



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Καθορισμός παραμέτρων πιστής αναπαραγωγής του ήχου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

.....

Αθανάσιος Ν. Σωτηρόπουλος

Επιβλέπων: Γ. Καμπουράκης  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

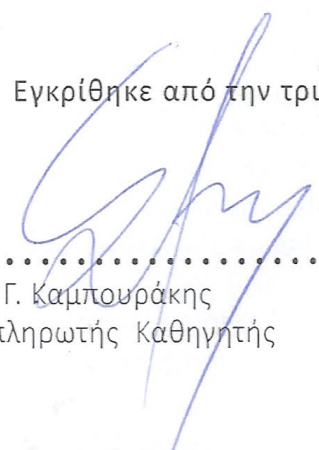
**Καθορισμός παραμέτρων πιστής αναπαραγωγής του ήχου**

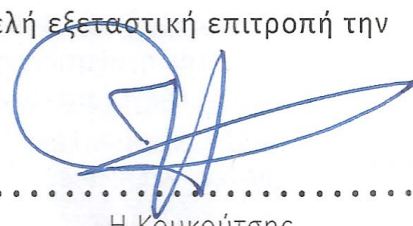
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ


.....  
Αθανάσιος Ν. Σωτηρόπουλος

Επιβλέπων: Γ. Καμπουράκης  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

  
.....  
Γ. Καμπουράκης  
Αναπληρωτής Καθηγητής

  
.....  
Η. Κουκούτσης  
Επίκουρος Καθηγητής

10/02/2017  
  
.....  
Β. Λούμος  
Ομότιμος Καθηγητής

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2017

.....

**Αθανάσιος Ν. Σωτηρόπουλος**

Copyright © Αθανάσιος Ν. Σωτηρόπουλος, 2017  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

---

## Περίληψη

---

Με τον όρο πιστότητα εκφράζεται παραδοσιακά η αρετή ενός ανθρώπου να είναι έμπιστος έναντι των άλλων. Στα αγγλικά, ο αντίστοιχος όρος είναι «Fidelity», από την Λατινική λέξη «fidēlis» που σημαίνει «έμπιστος». Στο χώρο της επιστήμης, η πιστότητα ορίζεται ως ο βαθμός στον οποίο μία μοντελοποίηση ή προσομοίωση αναπαράγει την κατάσταση και συμπεριφορά ενός πραγματικού φυσικού φαινομένου. Για αυτό το λόγο η πιστότητα μεταφράζεται συχνά και ως «βαθμός ομοιότητας». Σε ό,τι αφορά στο χώρο του ήχου και της ακουστικής, πιστότητα είναι η ιδιότητα μίας πηγής ήχου να αναπαραγάγει ήχο «πιστό» ως προς την αρχική του πηγή. Η πιστή αναπαραγωγή ενός ηχητικού σήματος αποτελεί το αντικείμενο της παρούσης ανάλυσης. Συγκεκριμένα, η εργασία αυτή επικεντρώνεται τόσο σε σύγχρονες όσο και σε ιστορικές τεχνολογίες και επιπλέον σε παραμέτρους, μετρήσεις και πρακτικές που διασφαλίζουν την πιστή αναπαραγωγή του ήχου.

Το πρόβλημα που παρατηρείται σήμερα είναι πως, παρά τη μεγάλη εξέλιξη στο χώρο της επιστήμης και της τεχνολογίας, ολοένα και περισσότεροι καταναλωτές προτιμούν τη χρήση τεχνολογιών που δεν διασφαλίζουν την πιστή αναπαραγωγή του ήχου. Μόνο μικρά ποσοστά του κοινού θεωρούν σημαντική παράμετρο την πιστότητα του ήχου κι ακόμη μικρότερα είναι τα ποσοστά εκείνων που την επιζητούν. Στατιστικές μελέτες, όπως αυτή της Αμερικανικής εταιρίας Atenga και του Καθηγητή μηχανικής ήχου, Trevor Cox του πανεπιστημίου του Salford στο Manchester, υποδεικνύουν ότι η πλειοψηφία του καταναλωτικού κοινού δεν επικεντρώνεται σε θέματα πιστότητας κατά την ακρόαση μουσικής και άλλων ήχων. Επί παραδείγματι, η δημοφιλέστερη ψηφιακή διαδικτυακή υπηρεσία διανομής μουσικής της Αμερικής, που ονομάζεται «Pandora» (Πανδώρα), αριθμεί πάνω από 250 εκατομμύρια χρήστες, παρότι παρέχει τη σχετικά χαμηλότερη σε πιστότητα ψηφιακή κωδικοποίηση ήχου από τους ανταγωνιστές της (κωδικοποίηση τύπου «AAC+» με 64kbps ρυθμό μετάδοσης bits). Η ψηφιακή κωδικοποίηση του ήχου περιγράφεται λεπτομερώς στο 6ο κεφάλαιο.

Ο χώρος της αναπαραγωγής του ήχου εμφανίζει μεγάλη υστέρηση σε σχέση με το χώρο της οπτικής και της αναπαραγωγής εικόνων. Στο χώρο της εικόνας, παρουσιάζεται αλματώδης εξέλιξη των τεχνολογιών υψηλής ευκρίνειας και πιστότητας και αντίστοιχα υψηλή αποδοχή από το ευρύ καταναλωτικό κοινό. Η αποδοχή αυτή δεν παρατηρείται ως προς τις τεχνολογίες του ήχου, παρότι η ακοή αποτελεί μία εξίσου σημαντική αίσθηση με την όραση. Τα αίτια αυτού του φαινομένου συνδέονται με τη εξέλιξη του ανθρώπινου είδους, καθώς και τη λειτουργία του εγκεφάλου, και αναλύονται στο 2ο κεφάλαιο. Βιομηχανίες, όπως εκείνη του κινηματογράφου, προσπαθούν να εξελίσουν παράλληλα τις τεχνολογίες των δύο αυτών χώρων (του ήχου και της εικόνας). Στο χώρο της Ιατρικής, επίσης διεξάγονται μελέτες για την πιστή αναπαραγωγή του ήχου, όπως αυτές που αφορούν στα κοχλιακά εμφυτεύματα σε ασθενείς που πάσχουν από σοβαρή ως βαρεία ακουστική απώλεια. Η σύγχρονη ψηφιακή τεχνολογία μικροεπεξεργαστών και αλγορίθμων επιτρέπει τη βελτίωση της πιστότητας σε πολλές τέτοιες ηχητικές εφαρμογές, παρότι στα πρώτα της βήματα είχε κατηγορηθεί για το αντίθετο. Το τεχνολογικό υπόβαθρο για τη διασφάλιση της πιστής αναπαραγωγής του ήχου υφίσταται. Εντούτοις, υπάρχει έλλειψη σχετικής ενημέρωσης κι εξοικείωσης του κοινού με τη σχετική τεχνολογία. Αντίθετα, παρατηρείται παραπληροφόρηση και διαφήμιση παραγόντων, οι οποίοι δεν επικεντρώνονται στην πιστότητα του ηχητικού εξοπλισμού και των ηχοσυστημάτων, αλλά σε άλλα εμπορικά χαρακτηριστικά, όπως η σχεδίαση (design).

---

Κάθε σύστημα, που εκτελεί λήψη, καταγραφή, επεξεργασία, διανομή και αναπαραγωγή ήχου, μπορεί να μελετηθεί ως μία αλυσίδα εν σειρά συνδεδεμένων υποσυστημάτων. Κάθε υποσύστημα έχει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που μπορούν να συμβάλλουν στη διασφάλιση της πιστότητας του ήχου. Βεβαίως, κάθε σύστημα και υποσύστημα έχει και αδυναμίες ή περιορισμούς, που δυνητικά δύνανται να αλλοιώσουν την πιστότητα. Στα πλαίσια της παρούσης ανάλυσης, θα επιχειρηθεί να καταδειχθούν οι ιδιαιτερότητες και οι αδυναμίες κάθε τέτοιου συστήματος και να προταθούν τεχνικές για τη βελτίωσή τους. Επίσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών αναπαραγωγής του ήχου, ως προς την πιστότητα, λαμβάνοντας υπόψη πειραματικά ευρήματα, δοκιμές (testing), καθώς και στατιστικές μελέτες.

.....

### **Λέξεις Κλειδιά**

Ήχος, αναπαραγωγή του ήχου, πιστότητα ήχου, ακουστική, ακρόαση μουσικής, δίσκοι βινυλίου, ψηφιακή κωδικοποίηση του ήχου, MPEG-1 Audio Layer 3 (MP3), ψυχοακουστική, ηχοληψία, ηχογράφηση, επεξεργασία ήχου, ηχητικός εξοπλισμός, ηχοσύστημα, ηχεία.

---

## Abstract

**Title: High fidelity reproduction of sound: determination of the required parameters**

---

The term “fidelity” refers to the virtue of faithfulness or loyalty. It is derived from the Latin word *fidēlis*, meaning “faithful” or “loyal”. In Science, it denotes how closely a model or simulation, reproduces its source, e.g. an object or condition. Thus, fidelity expresses the degree of similarity between a simulated and a real source. In the field of acoustics and sound, the term fidelity describes the potential of an audio source to reproduce a high-quality sound, very similar to that produced by an original sound source. The present analysis aims at exploring a broad spectrum of these very issues. Specifically, this work focuses on the past and contemporary technologies and the parameters, measurements and procedures that ensure the maximum possible high quality reproduction of sound.

The main problem noticed today, is, that *albeit* the development of hi-tech appliances, the consumers show a preference for low quality sound reproduction systems. It is noteworthy that just a small number of customers are interested in high quality sound sources. Statistical studies, like that of the American company Atenga and Professor’s Trevor Cox (audio engineer) at the University of Salford-Manchester, suggest that the majority of the consumers do not focus on fidelity when listening to music. Indicatively, “Pandora”, the most popular American Internet music distribution network, serves 250 million users, although it provides them with a much lower fidelity digital audio encoded format compared to its competitors (Advanced Audio Codec plus “AAC+”, at 64kbps bitrate). Digital audio encoding is extensively described in Chapter 6.

It is noteworthy that the field of reproduction of sound lags far behind the respective areas of optics and visual reproduction. Especially in the field of images transmission and reproduction, a tremendous progress has been made with respect to high resolution and fidelity technologies, which have attracted the vivid interest of the general public. Conversely, this is not the case with sound reproduction technologies, although hearing is a sense equally important to vision. In Chapter 2, an effort has been made to analyze the causes of this phenomenon, which is thought to be due to the human evolution process and brain functions.

Industries, like the film industry, are attempting to evolve both of these technologies (sound and vision), in parallel. In the medical field, the high-fidelity reproduction of sound has also attracted the interest of scientists, especially those working in the area of cochlear implants to patients suffering from serious hearing problems. The current digital microprocessors and algorithms technology has helped to develop such high fidelity devices, which at early stages, though, were considered as poor quality systems.

Nowadays, the state of the art technology in high-quality sound reproduction devices is a fact. However, there is lack of information and public familiarization with this type of technology. Conversely, there is lots of misinformation and advertisement of parameters, which are not related with the high-fidelity issues of the commercially available sound devices, but with other characteristics, like their design, for example.

Any reception, recording, data processing, distribution and sound reproduction system, can be viewed and studied as a unit comprised of, in-series connected, subsystems. Every subunit has its own specific characteristics, which play a key role in the assurance of high-fidelity audio reproduction. Needless to

---

say, that there are no ideal systems and subsystems and all have limitations, which negatively affect the quality of sound.

In the context of the present work, an attempt has been made to expose the distinctiveness and the weaknesses of such systems and propose the appropriate techniques for their improvement. To this end, the currently available sound reproduction technologies are described and compared, on the basis of their respective fidelity, taking into account experimental findings, tests and statistical studies.

.....

**KeyWords**

Sound, sound reproduction, audio fidelity, acoustics, listening to music, vinyl records, digital audio encoding, MPEG-1 Audio Layer 3(MP3), psychoacoustics, audio capture, audio recording, audio editing, audio equipment, sound system, loudspeakers.



---

# Περιεχόμενα

---

## Κεφάλαιο 1: Ιστορική αναδρομή σελ.15

## Κεφάλαιο 2: Η σημασία της πιστής αναπαραγωγής του ήχου για τον άνθρωπο σελ.31

- 2.1 Το ανθρώπινο αυτί και η μνήμη σελ.31
- 2.2 Η αντίληψη και η παραμόρφωση της πραγματικότητας σελ.32
- 2.3 Η λειτουργία της ανθρώπινης μνήμης και η μουσική σελ.35
- 2.4 Η κατηγοριοποίηση αντικειμένων στη μνήμη σελ.36
- 2.5 Συμπεράσματα σελ.40

## Κεφάλαιο 3: Ορισμοί και επεξήγηση βασικών εννοιών, μετρήσιμα μεγέθη σελ.45

- 3.1 Ο ήχος και οι μηχανικές ταλαντώσεις σελ.45
- 3.2 Το πλάτος και το φάσμα του ήχου σελ.47
  - 3.2.1 Η ένταση του ήχου σελ.47
  - 3.2.2 Το φάσμα του ήχου σελ.50
- 3.3 Η πιστότητα του ήχου, ορισμός, βασικές έννοιες και μέτρηση της πιστότητας του ήχου σελ.54
  - 3.3.1 Η πιστότητα σελ.54
  - 3.3.2 Αναλογικά σήματα ήχου σελ.55
  - 3.3.3 Περιοδικά αναλογικά σήματα ήχου σελ.56
  - 3.3.4 Μετασχηματισμός σήματος στο πεδίο της συχνότητας σελ.56
  - 3.3.5 Σήματα διακριτού χρόνου σελ.57
- 3.4 Πρότυπα και μετρήσεις ηχητικής πιστότητας σελ.58
- 3.5 Μετρήσιμα μεγέθη για την πιστή αναπαραγωγή του ήχου: Μηχανικές μετρήσεις σελ.62
- 3.6 Μετρήσεις αναλογικών ηλεκτρικών μεγεθών σελ.63
- 3.7 Απόκριση συχνότητας (Frequency Response) σελ.63
- 3.8 Ολική αρμονική παραμόρφωση (THD, Total Harmonic Distortion) σελ.65
- 3.9 Ισχύς εξόδου σελ.67
- 3.10 Παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (IMD) σελ.69
- 3.11 Θόρυβος σελ.69
- 3.12 «Crosstalk» σελ.70

- 
- 3.13 Λόγος απόρριψης κοινού σήματος (CMRR) σελ.71
  - 3.14 Δυναμική περιοχή σελ.71
  - 3.15 Λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) σελ.72
  - 3.16 Παραμόρφωση φάσης σελ.72
  - 3.17 Μεταβατική απόκριση σελ.72
  - 3.18 Συντελεστής απόσβεσης σελ.73
  - 3.19 Παραμόρφωση λόγω μεταβατικής ενδοδιαμόρφωσης, Transient Intermodulation Distortion (TIM) σελ.74

#### **Κεφάλαιο 4: Στάδια ηχητικής επεξεργασίας σελ.77**

- 4.1 Ηχητική επεξεργασία σελ.78
- 4.2 Συστήματα ηχητικής επεξεργασίας σελ.79
- 4.3 Αλυσίδα συστημάτων ηχητικής επεξεργασίας πραγματικού χρόνου σελ.80
- 4.4 Συστήματα ηχογράφησης και παραγωγής μουσικής σελ.86
- 4.5 Ηχοσυστήματα οικιακής και καταναλωτικής χρήσης σελ.89

#### **Κεφάλαιο 5: Αναλογικές πηγές ήχου σελ.93**

- 5.1 Το 1ο στάδιο κάθε αλυσίδας ηχητικής επεξεργασίας σελ.93
- 5.2 Πρώτες διατάξεις εγγραφής και αναπαραγωγής του ήχου σελ.93
  - 5.2.1 Ο φωνογράφος σελ.94
  - 5.2.2 Το γραμμόφωνο σελ.94
- 5.3 Οι δίσκοι βινυλίου ως πηγή ήχου σελ.95
  - 5.3.1 Το πικάπ σελ.96
  - 5.3.2 Κεφαλές ανάγνωσης δίσκων σελ.96
  - 5.3.3 Διαφορές μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών και κεραμικών κεφαλών σελ.97
  - 5.3.4 Κεφαλές κινητού μαγνήτη («Moving Magnet» ή MM) σελ.98
  - 5.3.5 Κεφαλές κινητού σιδήρου («Moving Iron» ή MI) σελ.98
  - 5.3.6 Κεφαλές κινητού πηνίου («Moving coil» ή MC) σελ.99
- 5.4 Βελτιώσεις του πικάπ ως προς την πιστότητα του ήχου σελ.100
  - 5.4.1 Στερεοφωνία σελ.100
  - 5.4.2 Τετραφωνία και πολυπλεξία καναλιών σελ.101
  - 5.4.3 Διακριτή τετραφωνία σελ.102
  - 5.4.4 Βελτιώσεις της απόκρισης συχνότητας σελ.102
  - 5.4.5 Ισοστάθμιση κατά RIAA σελ.103

---

5.4.6	Θόρυβος χαμηλών συχνοτήτων	σελ.105	
5.5	Μαγνητικά μέσα εγγραφής και αναπαραγωγής του ήχου	σελ.106	
5.5.1	Μαγνητικές ταινίες σε μπομπίνες	σελ.106	
5.5.2	Πως επηρεάζει το φυσικό πλάτος της ταινίας την απόδοσή της	σελ.107	
5.5.3	Η κασέτα 8-track	σελ.108	
5.5.4	Η συμπαγής κασέτα	σελ.109	
5.5.5	Μικροκασσέτες(Microcassettes)	σελ.110	
5.5.6	Οι ταχύτητες τυλίγματος των κασετών	σελ.111	
5.5.7	Το σήμα πόλωσης (bias) των μαγνητικών μέσων	σελ.113	
5.5.8	Ισοστάθμιση συχνοτήτων κατά την αναπαραγωγή μαγνητικών ταινιών	σελ.116	
5.5.9	Συστήματα μείωσης θορύβου	σελ.117	
5.5.10	Το σύστημα DBX	σελ.119	
5.5.11	Τα συστήματα Dolby	σελ.120	
5.6	Θέματα σφαλμάτων χρονικού χαρακτήρα	σελ.123	
5.6.1	Μέτρηση του πτερυγισμού (flutter)	σελ.123	
5.6.2	Αντιμετώπιση του flutter	σελ.126	
5.6.3	Ολίσθηση της ταχύτητας αναπαραγωγής:	σελ.127	
5.7	Μικρόφωνα	σελ.128	
5.7.1	Κατηγορίες μικροφώνων	σελ.128	
5.7.2	Το μικρόφωνο άνθρακα	σελ.129	
5.7.3	Το πυκνωτικό μικρόφωνο	σελ.130	
5.7.4	Μικρόφωνο λυχνίας:	σελ.132	
5.7.5	Μικρόφωνο ηλεκτρίτη (Electret)	σελ.132	
5.7.6	Μικρόφωνα πέτου (Lavalier)	σελ.137	
5.7.7	Δυναμικά μικρόφωνα	σελ.137	
5.7.8	Μικρόφωνο τύπου Ribbon	σελ.139	
5.7.9	Πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο	σελ.141	
5.7.10	Μικρόφωνο οπτικών ινών	σελ.142	
5.7.11	Μικρόφωνο λέιζερ	σελ.142	
5.7.12	Μικρόφωνο υγρού ή νερού	σελ.143	
5.7.13	Μικροηλεκτρομηχανικό (MEMS) μικρόφωνο	σελ.144	
5.8	Τεχνικά χαρακτηριστικά μικροφώνων	σελ.145	
5.8.1	Κατευθυντικότητα μικροφώνων	σελ.145	
5.8.2	Ευαισθησία μικροφώνου	σελ.149	
5.8.3	Χαρακτηριστικά υπερφόρτωσης (overload)	σελ.149	
5.8.4	Γραμμικότητα και παραμόρφωση	σελ.150	
5.8.5	Απόκριση συχνότητας	σελ.150	

5.8.6	Τεχνικές μείωσης θορύβου μικροφώνων	σελ.151	
5.8.7	Καλώδια σύνδεσης μικροφώνων	σελ.153	
5.8.8	Προσαρμογή αντίστασης μικροφώνων	σελ.154	
5.9	Τεχνικές τοποθέτησης μικροφώνων	σελ.156	
5.9.1	Μακρινή Τοποθέτηση Μικροφώνου	σελ.156	
5.9.2	Κοντινή Τοποθέτηση Μικροφώνου	σελ.157	
5.9.3	Τοποθέτηση Έμφασης	σελ.157	
5.9.4	Τοποθέτηση Μικροφώνων Χώρου	σελ.158	
5.10	Τεχνικές στερεοφωνικής ηχογράφησης με μικρόφωνα	σελ.158	
5.10.1.	Συμπτωτικές Τεχνικές Ηχογράφησης	σελ.158	
5.10.2	Ημισυμπτωτικές Τεχνικές Ηχογράφησης	σελ.160	
5.10.3	Απομακρυσμένες Τεχνικές Ηχογράφησης	σελ.161	
5.11	Ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς σήματος	σελ.163	
5.11.1	Μικροφωνισμοί	σελ.165	
5.11.2	Ραδιοφωνικές και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (RFI, EMI)	σελ.165	
5.11.3	Ο βόμβος (hum)	σελ.165	
5.11.4	Απόκριση συχνοτήτων μαγνητών κιθάρας	σελ.166	

## **Κεφάλαιο 6: Ψηφιακές πηγές ήχου σελ.171**

6.1	Εισαγωγή	σελ.171	
6.2	Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό	σελ.172	
6.2.1	Δειγματοληψία	σελ.172	
6.2.2	Κβαντισμός	σελ.179	
6.2.3	Υπερδειγματοληψία	σελ.188	
6.2.4	Εισαγωγή στην Κωδικοποίηση	σελ.190	
6.3	Ψηφιακά αρχεία	σελ.193	
6.3.1	Ρυθμός μετάδοσης (bitrate)	σελ.194	
6.3.2	Τρόποι κωδικοποίησης VBR	σελ.196	
6.4	Μέθοδοι κωδικοποίησης	σελ.197	
6.4.1	Το μέγεθος ενός αρχείου	σελ.199	
6.5	Μέθοδοι συμπίεσης	σελ.199	
6.5.1	Codecs (Κωδικοποιητές / Αποκωδικοποιητές)	σελ.200	
6.5.2	Αντιληπτική (Perceptual) κωδικοποίηση	σελ.201	
6.5.3	Τα πρότυπα MPEG	σελ.203	
6.5.4.	Ψυχοακουστικά χαρακτηριστικά για τη συμπίεση ήχου	σελ.204	
6.5.5	Αρχή λειτουργίας των αλγορίθμων MPEG	σελ.207	
6.5.6	Τα MPEG Audio layers, I και II.	σελ.207	

- 
- 6.5.7 Διαφορές των MPEG-1, Layer I και Layer II σελ.217
  - 6.5.8 Το MPEG Audio layer III ή MP3 σελ.218
  - 6.5.9 Επιπλέον δεδομένα και ετικέτες (tags) του mp3 αρχείου σελ.222
  - 6.5.10 Οι διαφορές μεταξύ των προτύπων MPEG-1, Layer III (mp3) και MPEG-1, Layer II σελ.223
  - 6.5.11 AAC (Advanced Audio Codec) σελ.224
  - 6.5.12 Το πρότυπο Dolby AC-3 σελ.225
  - 6.6 Πρότυπα συμπίεσης ήχου χωρίς απώλειες (lossless) σελ.228
  - 6.7 Ο οπτικός συμπαγής δίσκος (optical CD) σελ.230
    - 6.7.1 CD-DA (Compact Disk – Digital Audio) σελ.230
    - 6.7.2 Αναπαραγωγή ενός CD σελ.232
    - 6.7.3 Μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (DAC) σελ.234
  - 6.8 Φασματική συγκριτική δοκιμή μεταξύ CD, Flac, AAC και mp3 σελ.235
  - 6.9 Στατιστικές συγκριτικές δοκιμές μεταξύ CD και mp3 σελ.242
    - 6.9.1 Αποτελέσματα των δοκιμών και στατιστική ανάλυση με συμπεράσματα σελ.243
  - 6.10 Στατιστικές δοκιμές μεταξύ κωδικοποιητών MP3 σελ.248
    - Παράρτημα 6Α: Κώδικας MP3 συμπίεσης σελ.250
    - Παράρτημα 6Β: Τεχνικές λεπτομέρειες αλγορίθμων συμπίεσης του ήχου με απώλειες σελ.252
    - Παράρτημα 6Γ: Τεχνικές λεπτομέρειες αλγορίθμων συμπίεσης του ήχου χωρίς απώλειες (lossless) σελ.256
    - Παράρτημα 6Δ: Συγκριτικές δοκιμές ακρόασης μεταξύ απωλεστικών αλγορίθμων συμπίεσης του ήχου: σελ.257

## **Κεφάλαιο 7ο: Τα συστήματα ήχου ως «αλυσίδες» σταδίων, παρατηρήσεις και συμπεράσματα σελ.265**

- 7.1 Εισαγωγή σελ.265
- 7.2 Οι αλυσίδες παραγωγής ήχου σελ.265
- 7.3 Τα στάδια της αλυσίδας παραγωγής του ήχου σελ.266
- 7.4 Το 1ο στάδιο: λήψη ήχου σελ.267
  - 7.4.1 Φωνές και ήχοι περιβάλλοντος σελ.267
  - 7.4.2 Μουσικά όργανα σελ.269
- 7.5 Το 2ο στάδιο: καταγραφή & ψηφιοποίηση του ήχου σελ.270
- 7.6 Το 3ο στάδιο: μίξη και επεξεργασία του ήχου σελ.271
  - 7.6.1 Η μίξη ήχου: σελ.271
  - 7.6.2 Ηχητικά Εφέ σελ.273

- 
- 7.7 Mastering ήχου σελ.274
    - 7.7.1 Η διαδικασία mastering σελ.274
    - 7.7.2 remastering παλαιού υλικού σελ.275
  - 7.8 Το 5ο στάδιο: παραγωγή μέσου ή αρχείου για κυκλοφορία σελ.276
    - 7.8.1 Παραγωγή οπτικών δίσκων σελ.276
    - 7.8.2 Παραγωγή δίσκων βινυλίου σελ.277
    - 7.8.3 Παραγωγή ψηφιακών αρχείων σελ.277
  - 7.9 Το 6ο στάδιο: διανομή-διάθεση του ηχητικού υλικού σελ.278
  - 7.10 Το 7ο στάδιο, αναπαραγωγή από τον καταναλωτή σελ.279
    - 7.10.1 Τύποι ηχοσυστημάτων σελ.280
    - 7.10.2 Η τροφοδοσία ενός ηχοσυστήματος σελ.281
    - 7.10.3 Οι πηγές ενός ηχοσυστήματος σελ.283
    - 7.10.4 Οι έξοδοι (outputs) των πηγών σελ.284
    - 7.10.5 Ταίριασμα πηγών και προενισχυτών σελ.287
    - 7.10.6 Σύγκριση μεταξύ των αναλογικών και ψηφιακών πηγών του ήχου σελ.290
    - 7.10.7 Μελέτη ηχητικής απόδοσης του κινητού τηλεφώνου iPhone 5 ως πηγή ήχου σελ.292
    - 7.10.8 Οι ενισχυτές του ήχου σελ.299
    - 7.10.9 Στάδια ενίσχυσης σελ.302
    - 7.10.10 Τα ηχεία σελ.304
    - 7.10.11 Τεχνικά χαρακτηριστικά των ηχείων σελ.312
    - 7.10.12 Ηχοσύστημα οικιακού κινηματογράφου σελ.315
  - 7.11 Το 8ο στάδιο: ακρόαση από τον καταναλωτή και ακουστική χώρου σελ.316
    - 7.11.1 Ηχητικά φαινόμενα στο χώρο ακρόασης σελ.317
    - 7.11.2 Οι ανακλάσεις του ήχου σελ.321
    - 7.11.3 Το εμπειρικό πρότυπο LEDE (Live End - Dead End)σελ.323
    - 7.11.4 Στάσιμα κύματα σελ.325
    - 7.11.5 Ο χώρος ακρόασης και η δομή του σελ.326
    - 7.11.6 Τοποθέτηση των ηχείων ενός στερεοφωνικού συστήματος στο χώρο σελ.328
    - 7.11.7 Τοποθέτηση ηχείων οικιακού πολυκαναλικού συστήματος κινηματογράφου στο χώρο σελ.332
  - 7.12 Το 9ο στάδιο: απόκριση του ανθρώπινου αυτιού και αντίληψη σελ.335
  - 7.13 Συμπεράσματα και συμβουλές σελ.335

---

## Κεφάλαιο 1: Ιστορική αναδρομή

---

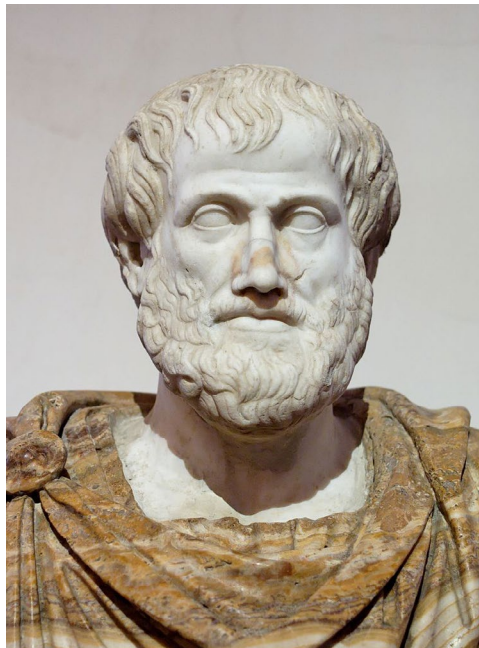
Ο ήχος και η μελέτη του έχει απασχολήσει την ανθρωπότητα από αρχαιοτάτων χρόνων. Σε σπηλιές όπως η «Niaux» της περιοχής «Ariège» στη Βορειοδυτική Γαλλία, έχουν ανακαλυφθεί τοιχογραφίες και αναπαραστάσεις ζώων ηλικίας δεκαπέντε έως εικοσιπέντε χιλιάδες χρόνων (εικόνα 1). Οι τοιχογραφίες αυτές παρουσιάζουν μία πύκνωση σε σημεία των σπηλιών που παρουσιάζουν ενίσχυση των ηχητικών κυμάτων. Σύμφωνα με τον αρχαιολόγο και ειδικό σε θέματα παλαιολιθικής τέχνης Paul Pettitt από το Πανεπιστήμιο του Sheffield στην Αγγλία, οι άνθρωποι ζωγράφιζαν στις σπηλιές κυρίως σε σημεία όπου παρουσιάζεται ηχητικός συντονισμός αγνοώντας άλλες μεγάλες και καταλληλότερες επιφάνειες. Αυτό το γεγονός, σύμφωνα και με τον Legor Reznikoff, ειδικό σε θέματα ακουστικής από το Πανεπιστήμιο του Παρισιού, δείχνει πως ο ήχος, οι ιδιότητές του και η ενίσχυσή του έπαιζαν ιδιαίτερο ρόλο στη ζωή των ανθρώπων. Μάλιστα, σύμφωνα με τον αρχαιολόγο Paul Pettitt, στις σπηλιές αυτές έχουν βρεθεί και πρώιμα πνευστά μουσικά όργανα από κόκκαλο καθώς και διάφορα άλλα μουσικά όργανα που παράγουν ήχους όταν περιστρέφονται ρυθμικά στον αέρα. Επομένως, φαίνεται πως ο άνθρωπος πειραματίζεται με τον ήχο και επηρεάζεται από τα ηχητικά φαινόμενα ήδη από τα πολύ πρώιμα στάδια της εξέλιξης του πολιτισμού.



Εικόνα 1

Στην Αφρική, οι αρχαίοι πολιτισμοί των οποίων οι παραδόσεις επιβιώνουν έως και σήμερα, είχαν μια ιδιαίτερη θέση για τον ήχο και τη μουσική στη ζωή τους. Η φυλή Πυγμαίων «BayAka», σύμφωνα με τον Αμερικανό Louis Sarno, πριν από την έναρξη του κυνηγιού, ετοιμάζει μία τελετή κατά την οποία οι κυνηγοί τραγουδούν και παίζουν κρουστά ταυτόχρονα και με ρυθμό. Οι κυνηγοί πρέπει να μπορούν να κρατούν το ρυθμό και να τραγουδούν ταυτόχρονα με τους συναδέλφους τους σε απόλυτη αρμονία. Η μουσική και ο ρυθμός βοηθούν τους κυνηγούς να ετοιμαστούν ώστε να συνεργαστούν συντονισμένα σαν μια μονάδα, να κυνηγήσουν αποτελεσματικά και να θρέψουν τις οικογένειές τους.

Η ιστορία της μελέτης του ήχου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ιστορία της επιστημονικής μελέτης των μηχανικών κυμάτων. Από πολύ νωρίς είχε γίνει η σύνδεση μεταξύ της συμπεριφοράς των μηχανικών κυμάτων, των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και του ήχου. Από τις πρώτες αναφορές θεώρησης του ήχου ως κύμα έγινε από τον Αριστοτέλη (εικόνα 2).



Εικόνα 2

Οι αναφορές του φιλόσοφου Αριστοτέλη σε θέματα ήχου και ακοής στο έργο του «Περὶ Ψυχῆς», αποτελούν μία πρώτη μελέτη με αρκετά ενδιαφέροντα στοιχεία. Ο Αριστοτέλης αναφέρει πως ο ήχος χρειάζεται ένα μέσο για να διαδοθεί όπως ο αέρας και τα υγρά. Μάλιστα αναφέρει πως ο ήχος ανακλάται όπως και το φώς κι ότι έχουν κοινές ιδιότητες, όπως σήμερα γνωρίζουμε σύμφωνα με τη σωματιδιοκυματική φύση του φωτός. Ο άνθρωπος και τα ζώα αντιλαμβάνονται τον ήχο μέσω της κίνησης του αέρα εντός των αυτιών τους σύμφωνα με τον Αριστοτέλη. Η μελέτη του εκτείνεται και στον «πραγματικό ήχο» κάθε αντικειμένου, αυτό που σήμερα ονομάζουμε συχνότητα συντονισμού ενός σώματος. Αναφέρει δε πως υπάρχει ηχητικό κύμα σε δυο μορφές, «οξύ και βαρύ». Στη φράση του «το οξύ κινεί την αίσθησιν πολλάκις εις ολίγον διάστημα χρόνου» ( σύμφωνα με τη μετάφραση του Παύλου Γρατσιαίου), μας δίνει μία πρώτη αναφορά στη συχνότητα ενός ηχητικού κύματος. Αναφέρει κυρίως αυτό που μετέπειτα τεκμηριώθηκε επιστημονικά, πως ένα κύμα υψηλής συχνότητας αποτελείται από περισσότερες περιόδους ταλαντώσεων σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα σε σχέση με ένα κύμα χαμηλότερης συχνότητας.

Περί το 1500 μ.Χ., ο πολυπράγμον Ιταλός επιστήμονας Leonardo Da Vinci που έζησε την περίοδο της Αναγέννησης, ανακάλυψε πως ο ήχος διαδίδεται ως κύματα. Αυτή είναι και μία πρώτη σαφή αναφορά στην κυματική φύση του ήχου. Περίπου έναν αιώνα αργότερα, ο Ιταλός φυσικός, μαθηματικός, αστρονόμος και φιλόσοφος Γαλιλαίος Γαλιλέι, ασχολήθηκε ιδιαίτερα με την κατανόηση του ήχου. Παρουσίασε πειράματα που αποδεικνύουν ότι η συχνότητα ενός ηχητικού κύματος καθορίζει το τονικό ύψος του ήχου. Στο πείραμά του, έτριβε μία σμίλη (καλέμι) επάνω σε μία ορειχάλκινη επιφάνεια.



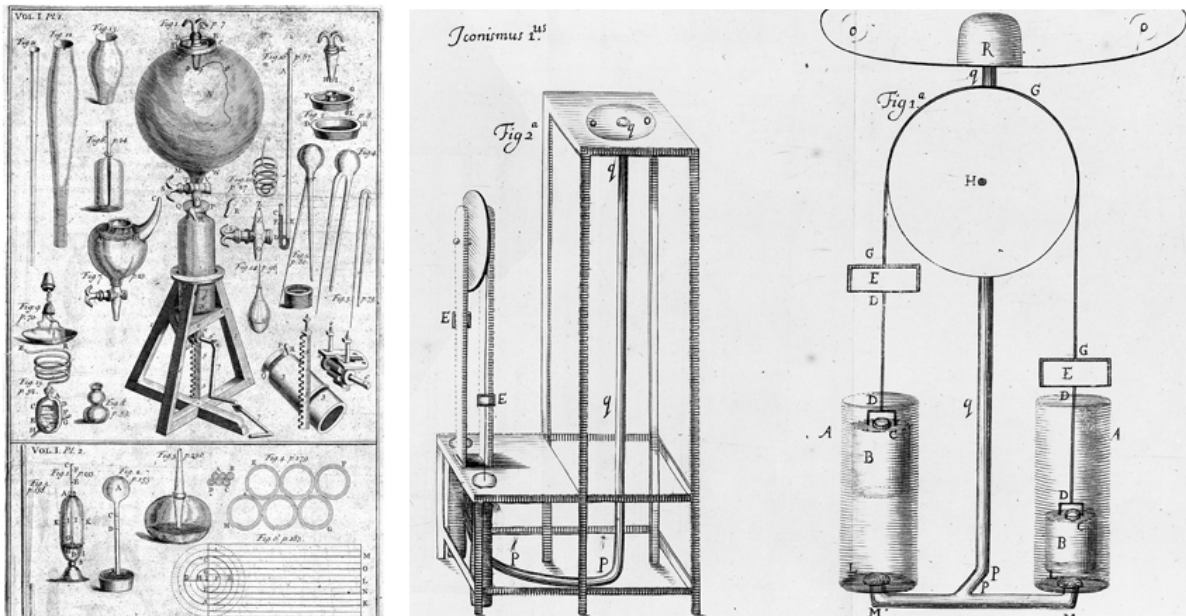
Αυτή η κίνηση παρήγαγε ένα συριγμό. Κατόπιν, ο Γαλιλαίος συνέδεσε την απόσταση μεταξύ των αυλακώσεων που προκαλούσε το καλέμι στην ορειχάλκινη επιφάνεια με το τονικό ύψος του συριγμού που ακουγόταν.

Περί το 1640 μ.Χ., ο Γάλλος θεολόγος, φιλόσοφος και μαθηματικός, πάτερ Marin Mersenne (εικόνα 3), ήταν ο πρώτος που μέτρησε την ταχύτητα του ήχου. Για τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου, ο Mersenne χρησιμοποίησε το φαινόμενο της ηχούς. Μετρώντας τις χρονικές αποστάσεις μεταξύ ενός αρχικού ήχου και το χρόνο επιστροφής της ηχούς στην πηγή αυτού του ήχου, μπόρεσε να κάνει μία εκτίμηση της ταχύτητας του ήχου με σφάλμα μικρότερο από δέκα τοις εκατό σε σχέση με σύγχρονες μετρήσεις. Αυτό το γεγονός είναι εντυπωσιακό αν αναλογισθεί κανείς την τεχνολογία που υπήρχε διαθέσιμη τότε και την μετέπειτα εξέλιξή της. Για αυτό το λόγο, ο πάτερ Marin Mersenne θεωρείται και ο «πατέρας της ακουστικής».



Εικόνα 3

Το 1660 μ.Χ., ο Ιρλανδός φυσικός Ρόμπερτ Μπόιλ (Robert Boyle), διεξήγαγε πειράματα σχετικά με τη διάδοση του ήχου. Κατά το πείραμά του, τοποθέτησε ένα ρολόι μέσα σε ένα γυάλινο δοχείο. Όταν το δοχείο ήταν πλήρες με αέρα, οι κτύποι του ρολογιού μπορούσαν να ακουστούν εκτός του δοχείου. Όταν ο Boyle άντλησε το μεγαλύτερο μέρος του αέρα μέσα από το δοχείο, το ρολόι δεν ακουγόταν πλέον. Κατά αυτό τον τρόπο απέδειξε ότι απαιτείται ένα μέσο όπως ο αέρας ή το νερό για να επιτευχθεί η παραγωγή και διάδοση ενός ηχητικού κύματος (εικόνα 4).



Εικόνα 4

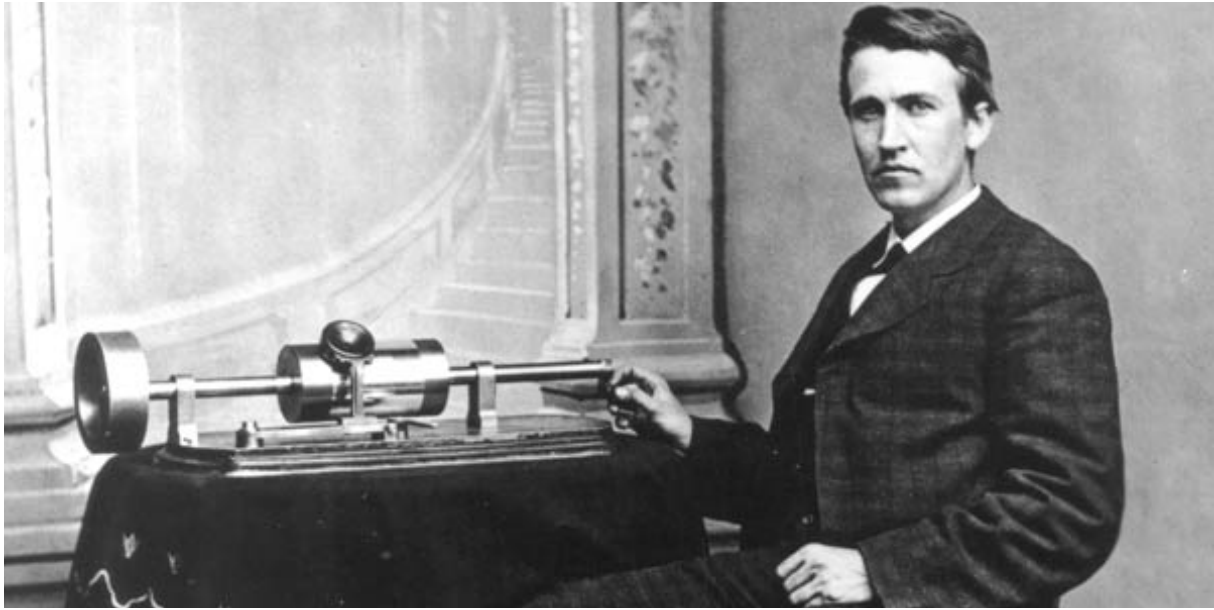
Η μαθηματική μελέτη της διάδοσης του ήχου ξεκίνησε με την έκδοση του βιβλίου με τίτλο «Principia» του Άγγλου φυσικού, μαθηματικού, αστρονόμου, φιλόσοφου, αλχημιστή και θεολόγου, Σερ Ισαάκ Νεύτων (Sir Isaac Newton) το 1686 μ.Χ. . Ο Νεύτων διατύπωσε μία θεώρηση του ήχου ως παλμούς πίεσης που διαδίδονται μεταξύ γειτονικών κινούμενων σωματιδίων. Επίσης, τυποποίησε μία σύνδεση μεταξύ της ταχύτητας του ήχου σε ένα μέσο και της πυκνότητας ή δυνατότητας συμπίεσης του μέσου αυτού.

Η θεωρία του Νεύτωνα, αποτέλεσε εργαλείο για τη μετέπειτα επιστημονική και μαθηματική μελέτη του ήχου από επιστήμονες όπως οι Joseph Louis Lagrange, Johann Bernoulli και Leonard Euler το 18<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. Στα μέσα του 18<sup>ου</sup> αιώνα, ο Ελβετός μαθηματικός και φυσικός Daniel Bernoulli εξήγησε πως μία χορδή μπορεί να ταλαντώνεται με περισσότερες από μία συχνότητες, αυτές που ονομάζουμε «αρμονικές συχνότητες».

Η πλήρης μαθηματική θεώρηση του ήχου άρχισε να ολοκληρώνεται το 19<sup>ο</sup> αιώνα από το Γερμανό φυσικό Γκέοργκ Ωμ (Georg Simon Ohm). Ο Ωμ ασχολήθηκε και με την Ακουστική καθώς εφάρμοσε την αρμονική ανάλυση (μέθοδο απεικόνισης των περιοδικών λειτουργιών μέσω τριγωνομετρικών σειρών) του Γάλλου φυσικού και μαθηματικού Ζοζέφ Φουριέ (Joseph Fourier) στη θεωρία του ήχου.

Από το 1877 έχουμε μία αλματώδη εξέλιξη στη μελέτη του ήχου, πολλές εφευρέσεις στο χώρο της ακουστικής και διάφορες ηχητικές εφαρμογές. Θα παρουσιάσουμε μερικές χρονιές –σταθμούς της σύγχρονης εποχής στην εξέλιξη των ηχητικών εφαρμογών.

Στις 6 Δεκεμβρίου του 1877, ο Αμερικανός εφευρέτης και επιχειρηματίας Τόμας Έντισον (Thomas Edison, εικόνα 5) είναι ο πρώτος που επιτυγχάνει να καταγράψει ήχο με μηχανικό τρόπο. Χρησιμοποίησε ένα κυλινδρικό φωνογράφο με μέσο εγγραφής κι αναπαραγωγής ένα φύλλο αλουμινοχάρτου. Ηχογράφησε το παραδοσιακό παιδικό τραγούδι “Mary had a little lamb”. Στα μέσα του 1880, ο Αλεξάντερ Γκράχαμ Μπελ (Alexander Graham Bell), δημιούργησε μία παρόμοια συσκευή ηχογράφησης με μέσο εγγραφής ένα χαρτόνι επικαλυμμένο με κερί. Το ονόμασε «γραφόφωνο» κι είχε καλύτερη ποιότητα ήχου από το φωνογράφο του Edison. Ο Edison ανέπτυξε τότε κι εκείνος ένα φωνογράφο με επικάλυψη κεριού. Έως το τέλος της δεκαετίας, ο Edison άρχισε να κυκλοφορεί εμπορικές ηχογραφήσεις. Ο Λούις Γκλας (Lewis Glass) της Αμερικανικής εταιρίας φωνογράφων, δημιούργησε μία πρωτότυπη μηχανή αναπαραγωγής μουσικής, το μετέπειτα γνωστό μας «jukebox».



Εικόνα 5

Το 1887, ο Εμίλ Μπερλινερ (Emile Berliner), κατοχύρωσε την πατέντα για το «γραμμόφωνο» που χρησιμοποιούσε επίπεδους κυκλικούς δίσκους από γομαλάκα για την εγγραφή ήχου σε αυλακώσεις. Η παραγωγή τέτοιων δίσκων ήταν ευκολότερη από τους κυλινδρικούς δίσκους του φωνογράφου κι ο ήχος ήταν πιστότερος. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας αναπαραγωγής εικόνας και ήχου, από τα τέλη της δεκαετίας του 1880 έως το 1926 έχουμε μία προσπάθεια πολλών εφευρετών με σκοπό να συνδυαστούν κινούμενες εικόνες, φωτογραφίες και φιλμ του βωβού κινηματογράφου με την ταυτόχρονη αναπαραγωγή ήχου. Με την εξέλιξη των μηχανών μηχανικής ηχογράφησης, η έρευνα σχετικά με την ηχογράφηση κι αναπαραγωγή ήχου συνεχίζεται και δοκιμάζονται οι πρώτες μαγνητικές ηχογραφήσεις από τους Edison, Bell, Oberlin Smith και Valdemar Poulsen. Ο τελευταίος ανέπτυξε μάλιστα ένα μαγνητικό καταγραφέα αστάλινου σύρματος (wire recorder).

Ο Edison πειραματίστηκε και με την ασύρματη μετάδοση ήχου όπως έκαναν επίσης οι Amos Dolbear και Guglielmo Marconi. Ο Marconi μάλιστα ανέπτυξε ιδέες που οδήγησαν στη δημιουργία του ραδιοφώνου βασισμένος στα πειράματα και ευρήματα του Heinrich Rudolf Hertz πάνω στα «κύματα hertz», δηλαδή τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συχνοτήτων 3kHz-300MHz. Τα πρώτα συστήματα ραδιοφωνικής μετάδοσης μετέδιδαν μηνύματα μόνο και μέσω ενός αδιαμόρφωτου «φέροντος» ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Στα 1900-1906 είχαμε τις πρώτες παρουσιάσεις συσκευών ραδιοφωνίας για μετάδοση φωνής και μουσικής με τεχνικές διαμόρφωσης πλάτους AM (amplitude modulation). Η διαμόρφωση πλάτους είναι μία αναλογική διαμόρφωση σήματος. Στην διαμόρφωση AM μεταβάλλεται το πλάτος του υψίσυχνου φέροντος κύματος ανάλογα με το πλάτος του σήματος πληροφορίας (σε αυτή την περίπτωση, του ηχητικού σήματος). Το διαμορφωμένο σήμα AM που προκύπτει έχει σταθερή συχνότητα αλλά μεταβαλλόμενο πλάτος.

Από το 1925, τα ηλεκτρονικά αρχίζουν να αποκτούν ρόλο στην, καταγραφή, μετάδοση κι αναπαραγωγή ήχου. Η Western Electric παρουσίασε συστήματα ηλεκτρικής καταγραφής κι αναπαραγωγής ήχου που αναπτύχθηκαν από τα εργαστήρια Bell Labs της AT&T το 1925. Οι πρώτοι δίσκοι «μακράς αναπαραγωγής» (LP : Long-playing records) παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 1925 από τη Brunswick και μετέπειτα το 1930 από την RCA. Την ίδια εποχή, ο Γερμανός επιστήμονας Fritz Pfleumer εφάρμοσε οξείδια σιδήρου επάνω σε χάρτινη ταινία για τη μαγνητική καταγραφή ήχου. Παράλληλα, έχουμε εφαρμογή της αναπαραγωγής κι ενίσχυσης ηχογραφημένης μουσικής στον κινηματογράφο. Η ταινία «Δον Χουάν» (Don Juan) του 1926 ήταν η πρώτη εμπορική ταινία με προ ηχογραφημένη κι ενισχυμένη αναπαραγωγή μουσικής, το λεγόμενο "sound-track". Αργότερα εισήλθαν και οι πρώτες ηχογραφημένες ειδήσεις στον κινηματογράφο που αναπαράγονταν πριν την προβολή της ταινίας.

Το 1928, ο George Neumann ίδρυσε εταιρία παραγωγής μικροφώνων. Τότε ξεκίνησε η παραγωγή του πρώτου εμπορικά διαθέσιμου πυκνωτικού μικρόφωνα (condenser microphone) που ονομάστηκε «το μπουκάλι του Neumann» λόγω σχήματος καθώς και των 40 εκατοστών ύψους και 9 εκατοστών διαμέτρου του (εικόνα 6). Σήμερα τα πυκνωτικά μικρόφωνα έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος, έως και μερικών χιλιοστών χάρις στην τεχνολογία ημιαγωγών και διηλεκτρικών υλικών. Ένα παράδειγμα σημερινών πυκνωτικών μικροφώνων είναι τα μικρόφωνα τύπου ηλεκτρίτη (electret). Αποτελούνται από ένα διάφραγμα με μόνιμα φορτισμένο διηλεκτρικό υλικό και έχουν ενσωματωμένο έναν ενισχυτή σήματος ενός τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET – Field Effect Transistor) σε συνδεσμολογία κοινής πηγής (common source). Οι νέες electret κάψουλες μικροφώνου χρησιμοποιούνται τόσο σε μεγαλύτερα μικρόφωνα ηχογραφήσεων όσο και σε πολλές άλλες συσκευές, ακόμη και φορητές όπως τα κινητά τηλέφωνα ή τα ψηφιακά καταγραφικά ομιλίας λόγω μικρού μεγέθους και κόστους παραγωγής.



Εικόνα 6

Τη δεκαετία του 1930 έχουμε μία εξέλιξη στο χώρο των ασύρματων μεταδόσεων τόσο φωνής όσο και δεδομένων που οδήγησαν σταδιακά στην ανάπτυξη δικτύων. Ένα παράδειγμα συσκευών που λάμβαναν δεδομένα ασύρματα ή ενσύρματα ήταν αυτό των τηλέτυπων. Παρότι πλέον θεωρούμε δεδομένους τους εκτυπωτές ασύρματης δικτύωσης Wi-Fi, τα θεμέλια για αυτή την τεχνολογία έθεσε το τηλέτυπο. Το τηλέτυπο (teletypewriter, Teletype ή TTY για Teletype/Teletypewriter) είναι μια ηλεκτρομηχανική γραφομηχανή με την ικανότητα να μεταδίδει τυπωμένα μηνύματα από σημείο σε σημείο διαμέσου ενός ηλεκτρικού καναλιού επικοινωνίας όπως ένα σύννηθες ζεύγος καλωδίων ή ασύρματα με τη χρήση πομποδεκτών. Το τηλέτυπο τύπου Hellschreiber που έλαβε την ονομασία του από το δημιουργό του ήταν μία πρωτοποριακή συσκευή με δύο μόνο κινούμενα μέρη, εν αντιθέσει με τις προηγούμενες κατασκευές και χρησιμοποιήθηκε πολύ κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο για τη μετάδοση μηνυμάτων, συχνά κωδικοποιημένων.

Το 1933 είχαμε την εφεύρεση της ραδιοφωνικής μετάδοσης με διαμόρφωση συχνότητας από τον Αμερικανό μηχανικό Edwin Armstrong. Η διαμόρφωση συχνότητας FM ( Frequency Modulation) είναι μία αναλογική διαμόρφωση σήματος. «Στην διαμόρφωση συχνότητας η συχνότητα του υψίσυχνου σήματος (φέρων κύμα) μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος του σήματος πληροφορίας (ηχητικό σήμα). Το διαμορφωμένο σήμα που προκύπτει έχει σταθερό πλάτος άλλα μεταβαλλόμενη συχνότητα και μοιάζει να παρουσιάζει «πυκνώματα» και «αραιώματα». Ο τρόπος με τον οποίο το πλάτος του ακουστικού σήματος επηρεάζει το φέρον είναι ο εξής. Όπου το ακουστικό σήμα έχει μεγάλο πλάτος έχουμε αύξηση της συχνότητας του φέροντος και όπου το ακουστικό σήμα έχει μικρό πλάτος έχουμε μείωση της συχνότητας του φέροντος» (Πηγή:[https://el.wikipedia.org/wiki/Διαμόρφωση\\_συχνότητας](https://el.wikipedia.org/wiki/Διαμόρφωση_συχνότητας)).

Η FM ραδιοφωνία χρησιμοποιείται ευρέως έως και σήμερα με διάφορες προσθήκες και παραλλαγές στο εύρος συχνοτήτων 87.5–108.0 MHz για την Ευρώπη που ονομάζεται μπάντα «CCIR» (Comité consultatif international pour la radio).

Το 1933, ο Murray Spivak γίνεται ο πρώτος παραγωγός ήχου που επεξεργάζεται ήχο. Για τα ηχητικά εφέ της εμπορικής ταινίας «King Kong», επεξεργάστηκε τον ηχογραφημένο βρυχηθμό ενός λιονταριού και τον ανέμειξε με τον ίδιο ήχο μία οκτάβα χαμηλότερα. Την ίδια χρονιά, έχουμε την πρώτη στερεοφωνική μετάδοση ήχου μέσα από τρεις τηλεφωνικές γραμμές. Η πειραματική αυτή μετάδοση στερεοφωνικού ήχου έγινε από τα εργαστήρια τηλεφωνίας Bell και μεταδόθηκε σε πραγματικό χρόνο η συναυλία της ορχήστρας της Φιλαδέλφειας στην Ουάσιγκτον των Η.Π.Α. .

Το 1935 η γερμανική εταιρία BASF παρουσιάζει την πρώτη μαγνητική ταινία εγγραφής ήχου στο κοινό. Οι μαγνητικές ταινίες ηχογραφήσεων θα αποκτήσουν στη συνέχεια ένα μεγάλο ρόλο στην εγγραφή και παραγωγή ήχου τόσο σε επαγγελματικά στούντιο όσο και για καθημερινή χρήση.

Το 1940, η ταινία «Fantasia» της Walt Disney είναι η πρώτη εμπορική κινηματογραφική ταινία που περιλαμβάνει πολυκαναλικό ήχο. Εννιά συνολικά κανάλια ήχου περιλαμβάνονται στο ηχητικό κομμάτι της ταινίας. Ο πολυκαναλικός ήχος χρησιμοποιείται έκτοτε έντονα στον κινηματογράφο και μετέπειτα ακόμη και στο σπίτι (home cinema) με σκοπό να αισθανθεί ο θεατής κι ακροατής ότι βρίσκεται στο επίκεντρο της ταινίας. Η αίσθηση αυτή δημιουργείται στο θεατή καθώς περιβάλλεται από διάφορους ήχους που έχει προσεκτικά τοποθετήσει στο ηχητικό κομμάτι ο σκηνοθέτης. Ο ήχος πλέον δεν φτάνει στην ακροατή μόνο από μία κατεύθυνση αλλά από διάφορα σημεία, διεγείροντας έτσι το ανθρώπινο αυτί και νου και δίνοντας νέα διάσταση στην κινηματογραφική εμπειρία.

Από το 1945, με την εξέλιξη στο χώρο των ηχείων, ενισχυτών και μαγνητικών κασετών, έχουμε τη εκκίνηση της περιόδου υψηλής πιστότητας ή «hi-fi» (high fidelity). Οι καταναλωτές αποκτούν πρόσβαση σε στερεοφωνικά συστήματα αναπαραγωγής ήχου, ραδιόφωνα υλοποιημένα με τρανζίστορ αντί για λυχνίες κενού και διάφορα κασετόφωνα. Η αναζήτηση των χρηστών για ήχο υψηλής πιστότητας ξεκινά καθώς πλέον μπορεί κανείς με σχετικά μικρό κόστος να αναβαθμίσει το ηχητικό σύστημα που χρησιμοποιεί καθημερινά. Οι εταιρίες παραγωγής ηχητικών συστημάτων αντιλαμβάνονται αυτή την αναζήτηση των χρηστών και προσπαθούν διαρκώς να βελτιώνουν τις δυνατότητες και την απόδοση των μηχανημάτων που παράγουν. Μάλιστα, με την αλλαγή των υλοποιήσεων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων από τις λυχνίες κενού στα νέα τρανζίστορ, η παραγωγή συσκευών αυξάνεται ενώ το μέγεθος, το βάρος και το κόστος παραγωγής ανά συσκευή μειώνεται. Κατά αυτόν τον τρόπο διογκώνεται η αγορά ηχητικών συσκευών και γίνεται προσβάσιμη για πολλούς χρήστες.

Το 1948, ξεκινά η παραγωγή των δίσκων βινυλίου με διάμετρο 12 ιντσών (εικόνα 7). Η αναπαραγωγή τους γινόταν με την κίνηση μίας βελόνας διαμαντιού επάνω στις αυλακώσεις του δίσκου που στρεφόταν με σταθερή ταχύτητα 33 και 1/3 στροφές ανά λεπτό. Οι παλιοί δίσκοι των 78 στροφών ανά λεπτό από τη δεκαετία του 1930 είχαν διάρκεια αναπαραγωγής ήχου από τρία έως πέντε λεπτά της ώρας περίπου ανά πλευρά. Οι νέοι δίσκοι βινυλίου των 33 και 1/3 στροφών ανά λεπτό προσέφεραν 20 λεπτά αναπαραγωγής ήχου ανά πλευρά κι ήταν πιο ανθεκτικοί. Το 1949, οι μικρότεροι δίσκοι βινυλίου των 45 στροφών ανά λεπτό με διάμετρο επτά ιντσών γίνονται εμπορικά διαθέσιμη από την εταιρία RCA. Οι δίσκοι αυτοί παίρνουν την ονομασία «single» (μονοί) καθώς μπορούσε να ηχογραφηθεί συνήθως ένα μουσικό κομμάτι ανά πλευρά τους. Οι δίσκοι βινυλίου αποτελούν έως και σήμερα κομμάτι της

μουσικής βιομηχανίας παρότι έχει μειωθεί πλέον η παραγωγή τους. Πολλοί συλλέκτες ανά τον κόσμο έχουν ακόμη πάθος με τη συλλογή δίσκων βινυλίου και συχνά η βράβευση καλλιτεχνών γίνεται συμβολικά ακόμη με την απονομή ενός ασημένιου ή χρυσού ομοιώματος δίσκου βινυλίου. Οι ακροατές επενδύουν έως και δεκάδες χιλιάδες ευρώ σε συσκευές αναπαραγωγής δίσκων βινυλίου, τα λεγόμενα «riskur» καθώς η πιστότητα ήχου που μπορεί να αποδώσει ένα τέτοιο αναλογικό ηλεκτρομηχανικό σύστημα δεν πλησιάζεται εύκολα από τα σημερινά οικονομικότερα ψηφιακά μέσα δειγματοληψίας και ανασύνθεσης ηχητικών σημάτων.



Εικόνα 7

Το 1951, ο πολωνός εφευρέτης Stefan Kudelski κατασκευάζει στην Ελβετία το πρώτο φορητό εγγραφέα μαγνητικής κασέτας με ονομασία την πολωνική λέξη «Nagra» που μεταφράζεται ως «θα ηχογραφεί». Η εξέλιξη των φορητών συσκευών καταγραφής ήχου θα οδηγήσει στη δημιουργία συσκευών-εργαλείων για πολλούς επαγγελματικούς κλάδους. Για παράδειγμα, οι φορητοί καταγραφείς φωνής αποτελούν έως και σήμερα ένα χρήσιμο και σημαντικό εργαλείο για τους δημοσιογράφους και ρεπόρτερ ανά τον κόσμο. Επίσης, οι καταγραφείς ομιλίας πιλοτηρίου στο χώρο της αεροπλοΐας αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ασφαλείας και διερεύνησης ατυχημάτων έως και σήμερα.

Το 1952 η βιομηχανία κινηματογράφου αναπτύσσει ένα επτακάναλο πολυκαναλικό πρότυπο αναπαραγωγής ήχου με ονομασία «Cinergama». Το 1953 έχουμε και τις πρώτες ταινίες της CinemaScope με τετρακαναλικό σύστημα αναπαραγωγής ήχου ονομαζόμενο «LCRS».

Το 1965 γίνεται η παρουσίαση του προτύπου μείωσης θορύβου «Dolby» τύπου «A». Το πρότυπο αυτό σχεδιάστηκε με σκοπό να αυξηθεί ο σηματο-θορυβικός λόγος των επαγγελματικών ηχογραφήσεων σε μαγνητικές ταινίες. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970, το πρότυπο αυτό επεκτάθηκε και βρήκε εφαρμογή στον ήχο του κινηματογράφου.

Το 1969 λανσάρεται στην αμερικανική αγορά η πρώτη τετραφωνική μαγνητική ταινία «Quadraphonic open reel tape (Q4)» με 4 κανάλια στην ίδια κατεύθυνση της ταινίας.

Το 1976 έχουμε την πρώτη εφαρμογή του προτύπου «Dolby Stereo» στην ταινία «Ένα αστέρι γεννιέται». Το πρότυπο «Dolby Stereo» αποτελεί μία κωδικοποίηση ήχου τεσσάρων καναλιών σε δύο με εναλλαγή της μεταξύ τους φάσης. Κατά αυτό τον τρόπο, μπορούν να μεταδοθούν τέσσερα κανάλια ήχου μέσω του στερεοφωνικού ραδιοφώνου διαμόρφωσης συχνότητας («FM»).

Το 1978 δημιουργείται το πρωτότυπο «Walkman»(εικόνα 8). Ήταν ένα φορητό σύστημα αναπαραγωγής μαγνητικής κασέτας κατασκευασμένο από τον Ιάπωνα μηχανικό ήχου της Sony, Nobutoshi Kihara. Το 1979 η Sony εξέδωσε το πρώτο εμπορικό Walkman φέρνοντας μία μεγάλη αλλαγή στο χώρο των φορητών συσκευών αναπαραγωγής μουσικής.



Εικόνα 8

Το 1982 έχουμε ένα άλμα στην αναπαραγωγή κι εγγραφή ήχου καθώς παρουσιάζεται στην αγορά ο πρώτος ψηφιακός «συμπαγής δίσκος» ή compact disc ("CD") από τις εταιρίες Philips και Sony (εικόνα 9). Το CD είναι ένα οπτικό μέσο αποθήκευσης ψηφιακής πληροφορίας που έφερε επανάσταση στη μουσική βιομηχανία και παράγεται ακόμη και σήμερα. Ο ψηφιακός αυτός δίσκος έχει διάμετρο 120 χιλιοστά, διάρκεια αναπαραγωγής ήχου 74 έως 99 λεπτά της ώρα και χωρητικότητα δεδομένων 650 έως 860 megabytes σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Διεθνούς Οργανισμού Προτύπων (ISO). Η συχνότητα δειγματοληψίας της ψηφιακής πληροφορίας ήχου του CD ορίστηκε στα 44.1 kHz. Για τους καταναλωτές, η ανθεκτικότητα του νέου ψηφιακού δίσκου, η πιστότητα του ήχου καθώς και η ευκολία με την οποία μπορούσε κανείς να προσπελάσει τα μουσικά κομμάτια του δίσκου, ήταν τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά προτίμησης. Γρήγορα το Cd άρχισε να παίρνει μεγάλο μερίδιο από την αγορά των μαγνητικών κασετών ήχου γι αυτούς τους λόγους.



Εικόνα 9

Το 1983 κυκλοφορεί η πρώτη κινηματογραφική ταινία «Η επιστροφή των Τζεντάι» με ηχητικό κομμάτι σύμφωνα με τα πρότυπα «THX» που παρέχουν εκτεταμένο φασματικό εύρος συχνοτήτων για την αναπαραγωγή ήχου.

Το 1986 παρουσιάζεται το δεύτερης γενιάς «Dolby» σύστημα μείωσης θορύβου επαγγελματικών ηχογραφήσεων και επεξεργασίας ηχητικού σήματος με ονομασία «Dolby SR». Το σύστημα αυτό επιτρέπει την αύξηση του δυναμικού εύρους των ηχογραφήσεων και μία ηχογράφιση μπορεί πλέον να ακουστεί όσο πιο πιστή γίνεται στο φυσικό ήχο που εγγράφεται. Το 1987, οι ταινίες «Robocop» και «Innerspace» γίνονται οι πρώτες κινηματογραφικές ταινίες που είναι σύμφωνες με το σύστημα Dolby SR. Την ίδια χρονιά έχουμε την παρουσίαση των πρώτων εγγραφένων ψηφιακής ταινίας «Digital Audio Tape (DAT)». Οι ταινίες DAT εγγράφονταν με ψηφιακή πληροφορίας βάθους 16bit και με συχνότητα δειγματοληψίας 48 kHz ή 44.1 kHz.

Το 1992 τα εργαστήρια Dolby κυκλοφόρησαν το ψηφιακό πολυκαναλικό πρότυπο αναπαραγωγής ήχου Dolby Digital που περιλαμβάνει πέντε περιφερειακά κανάλια ήχου συν ένα κανάλι αναπαραγωγής χαμηλών συχνοτήτων. Το πρότυπο αυτό ενσωματώνει και έναν αλγόριθμο συμπίεσης δεδομένων με κωδική ονομασία «AC-3». Το πρότυπο Dolby digital υιοθετήθηκε και αργότερα για το ηχητικό κομμάτι των DVD (Digital Video Disc ή Digital Versatile Disc). Το DVD παρουσιάστηκε το 1995 και είναι ένα οπτικό μέσο αποθήκευσης ψηφιακού βίντεο και ήχου που έθεσε νέα πρότυπα στην αγορά των ταινιών. Έχει ίδιες διαστάσεις με το CD αλλά μεγαλύτερη χωρητικότητα ψηφιακής πληροφορίας που κυμαίνεται από τα 4,7 έως τα 17,08 Gigabytes για διπλής όψης- διπλής επίστρωσης δίσκους.

Το 1993 εκδόθηκαν δύο νέα πρότυπα ψηφιακού ήχου στο χώρο του κινηματογράφου, το Digital Theater Systems (DTS) που παρουσιάστηκε στο φιλμ «Jurassic Park» και το SDDS. Το DTS χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο μείωσης και συμπίεσης της ψηφιακής πληροφορίας ήχου με τίτλο «Συναφής Ακουστική» (Coherent Acoustics) για το σύστημα 5.1 καναλιών. Ο αλγόριθμος «Coherent Acoustics» είναι μια παραλλαγή του συστήματος προσαρμοστικού κώδικα διαμόρφωσης παλμών Δέλτα (Adaptive Delta Pulse Code Modulation ή ADPCM). Το σύστημα Sony Dynamic Digital Sound (SDDS) είναι το πρώτο που υποστήριξε επτά περιφερειακά κανάλια αναπαραγωγής ήχου και ένα χαμηλών συχνοτήτων (7.1). Για



τη μείωση θορύβου, το σύστημα SDDS χρησιμοποίησε την τεχνική ATRAC που είχε αρχικά αναπτυχθεί για τους μικρούς μεγέθους ψηφιακούς δίσκους της Sony με ονομασία "Minidisc".

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 έγινε μία μεγάλη αλλαγή στο χώρο της αναπαραγωγής ήχου και μουσικής. Ο γερμανικός οργανισμός έρευνας Fraunhofer Society δημοσίευσε το πρώτο λογισμικό κωδικοποίησης για ψηφιακά αρχεία ήχου τύπου MP3 με κατάληξη «.mp3» (εικόνα 10). Ο κωδικοποιητής αυτός ονομάστηκε «I3enc» και το πρώτο πρόγραμμα αναπαραγωγής αρχείων mp3 σε πραγματικό χρόνο ήταν το «WinPlay3». Η απωλεστική κωδικοποίηση και συμπίεση αρχείων ήχου σε μορφή MP3 είχε τυποποιηθεί λίγα χρόνια νωρίτερα με βάση πρότυπα ISO/IEC κατά την προσπάθεια Γερμανών μηχανικών να συμπίεσουν τα αρχεία ήχου προοριζόμενα για ψηφιακή ραδιοφωνική μετάδοση. Ο μέσος χρήστης ηλεκτρονικού υπολογιστή είχε έκτοτε τη δυνατότητα να αποθηκεύει ψηφιακά αρχεία μουσικής και ήχου μικρού μεγέθους στα αποθηκευτικά του μέσα και να τα μεταδίδει γρήγορα μέσω των χαμηλού εύρους συνδέσεων Internet της εποχής. Ο προσωπικός ηλεκτρονικός υπολογιστής γίνεται για πολλούς χρήστες η κύρια πηγή αναπαραγωγής ήχου και μουσικής. Η εξέλιξη αυτή οδήγησε σε ριζικές αλλαγές στον τρόπο που ακούμε μουσική στην καθημερινότητά μας.



Εικόνα 10

Η μετάδοση ραδιοφωνικών εκπομπών μέσω του Internet (streaming radio) συνέβαλε αρκετά στην υιοθέτηση του ηλεκτρονικού υπολογιστή ως μέσο αναπαραγωγής ήχου. Το 1993 ο Αμερικανός τεχνολόγος Carl Malamud, δημιούργησε την πρώτη ιντερνετική ραδιοφωνική εκπομπή με τίτλο «Internet Talk Radio». Την ίδια χρονιά μεταδόθηκε μέσω του διαδικτύου σε πραγματικό χρόνο και η πρώτη συναυλία, από το συγκρότημα «Severe Tire Damage». Η μετάδοση πολυμέσων σε πραγματικό χρόνο μέσω διαδικτύου είναι έκτοτε ένας στόχος για πολλές εταιρίες από το χώρο του θεάματος.

Το 1998 η νοτιοκορεατική εταιρία SaeHan Information Systems λάνσαρε το πρώτο φορητό ηχοσύστημα αναπαραγωγής ψηφιακών αρχείων mp3 με ονομασία «MPMan». Το μικρό μέγεθος και βάρος των νέων φορητών συσκευών αναπαραγωγής αρχείων mp3, σε σχέση με τα παλαιότερα μηχανήματα ανάγνωσης cd και μαγνητικής κασέτας, τις έκανε γρήγορα δημοφιλείς στο ευρύ κοινό. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας ήταν επίσης ένα ζήτημα που απασχολούσε τους κατασκευαστές και χρήστες φορητών συσκευών αναπαραγωγής ήχου. Τα νέα φορητά συστήματα αναπαραγωγής mp3 δεν είχαν συνήθως κινούμενα μέρη και ενεργοβόρους ενσωματωμένους ηλεκτρικούς κινητήρες όπως τα cd και cassette players της εποχής. Εξαίρεση σε αυτό αποτελούσαν μόνο ελάχιστα μοντέλα αναπαραγωγής mp3 που διέθεταν ενσωματωμένο μηχανικό σκληρό δίσκο για την αποθήκευση των ψηφιακών αρχείων. Τα περισσότερα mp3 players διέθεταν μνήμη στερεάς κατάστασης (solid state) σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος για την αποθήκευση αρχείων mp3. Κάποιες συσκευές mp3 διέθεταν ενσωματωμένη μνήμη RAM κι άλλες διέθεταν υποδοχή για αποσπώμενη μνήμη σε μορφή καρτών μνήμης flash και secure digital (SD). Κάποιες συσκευές είχαν μάλιστα ενσωματωμένο αρσενικό βύσμα «USB» (Universal Serial Bus - Ενιαίος Σειριακός Δίαυλος) τύπου «A» ώστε να μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν σε κάποια θύρα usb ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή και να λειτουργήσουν ως εξωτερικό αποθηκευτικό μέσο. Έτσι γινόταν εύκολα η μεταφορά αρχείων μουσικής από κάποιο φάκελο του Η/Υ στο mp3 player. Αυτή η πρακτική εφαρμογή του διαύλου usb ήταν ήδη γνωστή από τα φορητά μέσα αποθήκευσης ψηφιακής πληροφορίας usb μνημών (flash drives ή usb «sticks») που εφευρέθηκαν το 1999 από την M-systems

και την IBM. Οι μνήμες αυτές αποτελούν έως και σήμερα έναν πολύ διαδομένο τρόπο αποθήκευσης και μεταφοράς αρχείων μουσικής. Στο χώρο του αυτοκινήτου, οι συσκευές ανάγνωσης usb μνήμης για την αναπαραγωγή μουσικής αποτελούν πλέον μέρος του βασικού εξοπλισμού.

(Πηγή: <http://www.mtv.com/news/150202/mpman-threatens-conventional-record-business/>)

Από το 2000 ξεκίνησε η ανάπτυξη και μια μη-απωλεστικής κωδικοποίησης και συμπίεσης αρχείων μουσικής με ονομασία «FLAC (Free Lossless Audio Codec)». Το Flac είναι μέρος δωρεάν λογισμικού «ανοικτού κώδικα». Αποτελεί μία από τις προσπάθειες που γίνονται τα τελευταία χρόνια για την απεξάρτηση της μουσικής βιομηχανίας από τα πρότυπα απωλεστικής συμπίεσης αρχείων ήχου όπως το mp3 και το aac. Η προσπάθεια αυτή έχει ως σύμμαχο την εξέλιξη των μηχανημάτων δικτύωσης και των συσκευών επεξεργασίας, αποκωδικοποίησης κι αναπαραγωγής πολυμέσων. Η είσοδος στην εποχή των πολυμέσων υψηλής ευκρίνειας (HD – high definition), δίνει τη δυνατότητα στο μέσο χρήστη να απολαύσει μουσική (από)κωδικοποιημένη χωρίς ιδιαίτερες απώλειες ηχητικής πληροφορίας.

Το 2001 η αμερικανική εταιρία τεχνολογίας Apple εκδίδει το πρώτο δικό της φορητό σύστημα αναπαραγωγής ψηφιακών αρχείων μουσικής με τίτλο «iPod»(εικόνα 11). Παρότι το iPod δεν αποτελεί την πρώτη φορητή συσκευή αναπαραγωγής αρχείων μουσικής, έγινε πολύ δημοφιλές χάρις στο σχεδιασμό, τα πλήκτρα αφής και την εργονομία του. Η προώθηση της εταιρίας Apple συνέβαλε επίσης τα μέγιστα στην αποδοχή του προϊόντος από το αμερικανικό κοινό. Η σειρά φορητών συσκευών αναπαραγωγής ήχου «iPod» γίνεται μετά από λίγα έτη πολύ δημοφιλής παγκοσμίως και πολλές εταιρίες σχεδιάζουν κι εκδίδουν παρόμοιες συσκευές ή περιφερειακά προϊόντα για τα αυθεντικά Apple iPod μηχανήματα. Οι φορητές συσκευές αναπαραγωγής ψηφιακών αρχείων ήχου και βίντεο έχουν γίνει έκτοτε αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας πολλών χρηστών παγκοσμίως. Η έκδοση συσκευών αναπαραγωγής ψηφιακών αρχείων ήχου ακόμη και για χρήση κατά την άθληση ή το τρέξιμο είναι ένα σημάδι ότι πολλοί χρήστες θέλουν να έχουν την αγαπημένη τους μουσική μαζί τους σε οποιαδήποτε καθημερινή δραστηριότητα.



Εικόνα 11

Από τον Ιούνιο του 2005, με την έκδοση του προγράμματος «iTunes 4.9» της Apple, οι χρήστες του διαδικτύου είχαν πλέον επίσημα τη δυνατότητα να παράγουν και να μεταδώσουν μέσω Internet της δική τους ραδιοφωνική εκπομπή. Οι εκπομπές αυτές ονομάστηκαν «podcasts» καθώς απευθύνονταν κυρίως σε χρήστες συσκευών όπως τα φορητά «iPod» της Apple. Υπάρχουν φυσικά και αρκετοί άλλοι δωρεάν εξυπηρετητές που παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργήσει τη δική του διαδι-

κτυακή ραδιοφωνική εκπομπή. Μία συνηθισμένη συχνότητα δειγματοληψίας του ψηφιακού ήχου μορφής MP3 προς μετάδοση μέσω του ιντερνετικού ραδιοφώνου, είναι συνήθως τα 44,1kHz με ρυθμό δειγματοληψίας τα 128kbs (kilobits ανά δευτερόλεπτο).

Το 2005 ιδρύθηκε από τους Τσαντ Χάρλεϊ, Στιβ Τσεν και Τζαουέντ Καρίμ η μεγαλύτερη εταιρία δωρεάν φιλοξενίας και διανομής διαδικτυακών βίντεο με την ονομασία «Youtube» (εικόνα 12). Παραδόξως, ενώ η Youtube παρέχει υπηρεσίες φιλοξενίας, διανομής κι αναπαραγωγής μόνο αρχείων βίντεο, η μεγαλύτερη βάση δεδομένων της μουσικής βιομηχανίας βρίσκεται σήμερα φιλοξενούμενη στο διαδικτυακό της τόπο: [www.youtube.com](http://www.youtube.com).



Εικόνα 12

Εκατομμύρια χρήστες ακούνε μουσική μέσω των εξυπηρετητών της Youtube σε καθημερινή βάση. Οι χρήστες που «ανεβάζουν» (upload) ένα μουσικό κομμάτι στο youtube συνήθως ορίζουν μία στατική εικόνα ή σειρά από εικόνες ως οπτικό περιεχόμενο για να δημιουργήσουν ένα αρχείο ψευδο-βίντεο σε μορφή σύμφωνη με τα πρότυπα της υπηρεσίας και να το μοιραστούν με τους λοιπούς χρήστες. Η Youtube προσπαθεί τα τελευταία χρόνια να ενσωματώσει ζωντανές (live)μεταδόσεις βίντεο και ήχου πραγματικού χρόνου (real time) στις υπηρεσίες της με επιτυχία. Αυτή η υπηρεσία βεβαίως απαιτεί μεγάλο εύρος ζώνης της διαδικτυακής σύνδεσης μεταξύ ενός εξυπηρετητή(server) της και ενός πελάτη (client) που παράγει το προς μετάδοση ψηφιακό σήμα εικόνας και ήχου.

Το 2007 η Apple εξέδωσε ένα «έξυπνο» κινητό τηλέφωνο με δυνατότητα αναπαραγωγής πολυμέσων, δικό του λειτουργικό σύστημα και πολλές άλλες δυνατότητες. Το ονόμασε «Iphone» κι έγινε γρήγορα γνωστό στην αγορά για την οθόνη αφής του και τη δυνατότητα παραμετροποίησης των λειτουργιών του με φόρτωση νέων εφαρμογών και προγραμμάτων. Το 2008 ακολουθεί τα βήματα της Apple η εταιρία Google εκδίδοντας ένα λειτουργικό σύστημα για «έξυπνα» κινητά τηλέφωνα με τίτλο «Android». Το πρώτο κινητό τηλέφωνο με σύστημα android ήταν το «HTC Dream». Η αναπαραγωγή ήχου πέρασε σε μία νέα εποχή με την εξέλιξη των κινητών τηλεφώνων. Πλέον οι περισσότεροι χρήστες κινητού τηλεφώνου αποθηκεύουν μουσική σε μορφή συμπιεσμένων αρχείων (mp3, aac, ogg) στο κινητό τους. Η εξέλιξη αυτή συνεχίστηκε με την εισαγωγή των φορητών υπολογιστών-«ταμπλετών» (Tablet PC) στην αγορά που γνώρισε μεγάλη άνθιση από το 2010. Η Apple λάνσαρε στην αγορά το πρώτο της tablet PC το 2010 με τίτλο «Ipad». Πλέον τα tablets είναι ένα καθημερινό εργαλείο για πολλούς χρήστες και η αναπαραγωγή ήχου και εικόνας είναι μία από τις πολλές εφαρμογές για τις οποίες χρησιμοποιούμε σήμερα τα tablets.

Με την εξέλιξη της ηλεκτρονικής και τη δημιουργία ολοένα και πιο συμπαγών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, οι ασύρματες συνδέσεις μεταξύ συσκευών αναπαραγωγής και εγγραφής ήχου φαίνεται να είναι πλέον η τάση.

Το πρότυπο ασύρματος μετάδοσης δεδομένων «Bluetooth» για ασύρματα προσωπικά δίκτυα υπολογιστών (Wireless Personal Area Networks, WPAN) λαμβάνει κύριο ρόλο στην ασύρματη μετάδοση ψηφιακών αρχείων ήχου. Πρόκειται για μια ασύρματη τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία μικρών αποστάσεων, η οποία μπορεί να μεταδώσει σήματα μέσω μικροκυμάτων σε ψηφιακές συσκευές και παρουσιάστηκε το 1994 από την εταιρεία κινητών τηλεφώνων Ericsson. Επομένως το Bluetooth είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο παρέχει τυποποιημένη, ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα σε tablets, κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, προσωπικούς υπολογιστές, εκτυπωτές, καθώς και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές ή ψηφιακές κάμερες, μέσω μιας ασφαλούς, φθηνής και παγκοσμίως διαθέσιμης χωρίς ειδική άδεια ραδιοσυχνότητας μικρής εμβέλειας.

Το 2013 χαρακτηρίστηκε ως η «χρονιά του έξυπνου ρολογιού» από τον αναλυτή Avi Greengart της εταιρείας Current Analysis καθώς οι μεγαλύτερες εταιρίες στο χώρο της τεχνολογίας ξεκίνησαν να επενδύουν μεγάλα ποσά στην έρευνα και ανάπτυξη τέτοιων συσκευών. Στις 9 Σεπτεμβρίου του 2014 η Apple ανακοίνωσε ότι το 2015 θα λανσάρει στην αγορά το πρώτο της έξυπνο ρολόι με ονομασία «Applewatch». Δεδομένης της ευρύτατης αποδοχής που έχουν γνωρίσει τα προϊόντα της Apple τα τελευταία χρόνια, μπορούμε να πούμε πως τα έξυπνα ρολόγια αν έχουν πιθανόν εμπορική επιτυχία, θα αποτελέσουν και μελλοντικές ψηφιακές πηγές ήχου για αρκετούς χρήστες.

Με την διαρκή αύξηση των χρηστών του διαδικτύου και της ολοένα αυξανόμενες ταχύτητες πρόσβασης σε αυτό, η διαδικτυακή μεταφορά και μετάδοση αρχείων ήχου είναι σήμερα ο κανόνας. Το ηλεκτρονικό ραδιόφωνο (e-radio) αντικαθιστά σταθερά την παραδοσιακή AM/FM ραδιοφωνία. Οι χρήστες του διαδικτύου μπορούν να ακούσουν τους αγαπημένους τους σταθμούς από όλο τον πλανήτη μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή ή κάποιας δικτυακής συσκευής αναπαραγωγής ήχου. Πλέον οι περισσότερες συσκευές όπως μια τηλεόραση, ένα στερεοφωνικό σύστημα ή ένα σύστημα home cinema μπορούν να συνδεθούν στο τοπικό μας δίκτυο (Local Area Network – LAN) και από εκεί στο διαδίκτυο μέσω κάποιας δικτυακής συσκευής δρομολόγησης (router). Οι συσκευές αυτές συνήθως χαρακτηρίζονται στο εμπόριο ως «έξυπνες» καθώς διαθέτουν δικό τους λογισμικό που συχνά μπορεί να παραμετροποιηθεί και από το χρήστη. Επομένως, η ευρεία μετάδοση (broadcast) ήχου μέσω Internet είναι σήμερα προσβάσιμη από πολλές συσκευές και χρήστες. Το μεγάλο εύρος ζώνης των σημερινών δικτυακών συνδέσεων παρέχει και τη δυνατότητα μετάδοσης εικόνας και ήχου «υψηλής ευκρίνειας» (High definition – HD) και αυτό συμβάλει στην πιστότερη αναπαραγωγή ήχου και εικόνας.

## Βιβλιογραφία για το 1ο κεφάλαιο:

“Περί Ψυχής” – ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ (Μετάφραση: ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ Σ. ΙΩΑΝΝΗΣ, ISBN 13: 9789604631148, Εκδότης: ΖΗΤΡΟΣ, Αύγουστος 2003)

“Newton’s Principia for the Common Reader” - Subrahmanyam Chandrasekhar, Clarendon Press, 1995

“Sound Design: The Development of Sound Design for Hollywood Films and its Impact on Modern Cinema” - Bastian Müller, diplom.de, 4 Σεπ 2008

“The Dolby Era: Film Sound in Contemporary Hollywood” - Gianluca Sergi, Manchester University Press, 2004

“Radio 2.0: Uploading the First Broadcast Medium” - Matthew Lasar, ABC-CLIO, 14 Μαρ 2016

Πηγές από το διαδίκτυο:

[http://news.nationalgeographic.com/news/2008/07/080702-cave-paintings\\_2.html](http://news.nationalgeographic.com/news/2008/07/080702-cave-paintings_2.html)

[http://www.bradshawfoundation.com/niaux/niaux\\_cave\\_france.php](http://www.bradshawfoundation.com/niaux/niaux_cave_france.php)

<https://el.wikipedia.org/wiki/Αριστοτέλης>

<https://www.sciencenews.org/blog/context/reproducing-experiments-more-complicated-it-seems>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_radio](https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_radio)

<http://europe.newsweek.com/inside-world-louis-sarno-pygmy-chief-new-jersey-322714?rm=eu>

<https://www.mikrosapoplous.gr/aristotle/psychs/contents.html>

[https://el.wikipedia.org/wiki/Λεονάρντο\\_ντα\\_Βίντσι](https://el.wikipedia.org/wiki/Λεονάρντο_ντα_Βίντσι)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo\\_da\\_Vinci](https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci)

[http://www.stmary.ws/HighSchool/Physics/sound\\_1.htm](http://www.stmary.ws/HighSchool/Physics/sound_1.htm)

<https://musicalsoundwaves.wordpress.com/the-history-of-sound-waves/>

<http://science.howstuffworks.com/sound-info5.htm>

<https://prezi.com/dvmev7clqwwy/robert-boyles-famous-experiment/>

<https://youtu.be/hlOqX4uJtYY>

<http://www.17centurymaths.com/contents/newton/newton%20on%20sound.pdf>

<http://www.sound-physics.com/Biography/Newton/>

<http://www2.stetson.edu/~efriedma/periodictable/html/B.html>

[https://el.wikipedia.org/wiki/Διαμόρφωση\\_πλάτους](https://el.wikipedia.org/wiki/Διαμόρφωση_πλάτους)

<https://en.wikipedia.org/wiki/Radio>

[https://el.wikipedia.org/wiki/Διαμόρφωση\\_συχνότητας](https://el.wikipedia.org/wiki/Διαμόρφωση_συχνότητας)

<http://www.rfcafe.com/references/electrical/frequency-modulation.htm>

[https://en.wikipedia.org/wiki/FM\\_broadcasting](https://en.wikipedia.org/wiki/FM_broadcasting)

[https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_sound\\_recording](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_sound_recording)

<https://www.nonstopsystems.com/radio/hellschreiber-modes-other-mfrs.htm>

<http://www.aes.org/aeshc/docs/recording.technology.history/notes.html>

<https://memory.loc.gov/ammem/berlhtml/berlgramo.html>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Gramophone\\_record](https://en.wikipedia.org/wiki/Gramophone_record)

<http://www.quepublishing.com/articles/article.aspx?p=337317>

<http://apple-history.com/h8>

<https://xiph.org/flac/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_YouTube](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_YouTube)

<https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/amm/prod/audiocodec/audiocodecs/mp3.html>

<https://www.cnet.com/news/samsungs-new-challenge-sharing-the-smartwatch-market-with-apple/>

<https://el.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>

---

## Κεφάλαιο 2: Η σημασία της πιστής αναπαραγωγής του ήχου για τον άνθρωπο

---

### 2.1 Το ανθρώπινο αυτί και η μνήμη

Το μεγάλο ερώτημα που καλούμαστε να απαντήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι κατά πόσο η πιστή αναπαραγωγή ήχου είναι απαραίτητη για τον άνθρωπο. Πριν προχωρήσουμε επομένως με τη μελέτη προτύπων, διαδικασιών και συνθηκών που διασφαλίζουν την πιστή αναπαραγωγή του ήχου, καλούμαστε να ερευνήσουμε ποια είναι η πραγματική σημασία της πιστότητας του ήχου για τον ανθρώπινο νου. Δυστυχώς δεν υπάρχει σαφής απάντηση στο ερώτημα που μόλις θέσαμε. Όμως, υπάρχουν διάφορες σχολές και θεωρίες που στηρίζονται στον τρόπο λειτουργίας του εγκεφάλου μας και πιο συγκεκριμένα στη λειτουργία της ανθρώπινης μνήμης. Για τη μελέτη της λειτουργίας του εγκεφάλου σε αυτό το κεφάλαιο, θα λάβουμε ως βάση πολλές αναφορές από την ανάλυση του Αμερικανού ψυχολόγου και νευρο-επιστήμονα, Daniel Joseph Levitin όπως παρουσιάζονται στο βιβλίο του με τίτλο «This Is Your Brain on Music: The Science of a Human Obsession» (εκδόσεις Dutton/Penguin 2006; Plume/Penguin 2007).

Αν μπορούσαμε να συγκρίνουμε τον άνθρωπο με ένα σύστημα, όπως για παράδειγμα έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή με τα περιφερειακά του εξαρτήματα, θα λέγαμε ότι το ανθρώπινο αυτί είναι ο αισθητήρας που λαμβάνει το αναλογικό μηχανικό ηχητικό σήμα. Το αντίστοιχο περιφερειακό εξάρτημα θα ήταν ένα μικρόφωνο συνδεδεμένο στην κάρτα ήχου του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα περισσότερα πειράματα που σχετίζονται με την πιστότητα αναπαραγωγής του ήχου χρησιμοποιούν ακροατήριο κι επομένως το μέσο ανθρώπινο αυτί για να συγκρίνουν ηχητικά δείγματα. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι και το ανθρώπινο αυτί έχει τις δικές του ιδιομορφίες και ατέλειες. Για παράδειγμα, το αυτί μας συμπιέζει το πλάτος του ηχητικού σήματος ώστε να προστατευθούν τα ευαίσθητα εσωτερικά του μέρη από πολύ δυνατούς ήχους. Το δυναμικό εύρος των τριχοειδών κυττάρων του κοχλίου στο εσωτερικό μέρος του ανθρώπινου αυτιού είναι πρακτικά περί τα 50decibel όμως μέσω της συμπίεσης της έντασης του ήχου μπορούμε να αντιληφθούμε ήχους με δυναμικό εύρος έως και τα 120decibel υπό ιδανικές συνθήκες. Πέρα όμως από το αισθητήριο όργανο του αυτιού και τις δικές του ιδιαιτερότητες που αναλύονται στο 4ο κεφάλαιο, πρέπει να έχουμε κατά νου ότι τα σήματα που λαμβάνει δεν θα είχαν κανένα νόημα χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Σύμφωνα με το Daniel Joseph Levitin, «ο ανθρώπινος εγκέφαλος είναι εκείνος που λαμβάνει τα σήματα από το ακουστικό νεύρο και τα διαχειρίζεται ανάλογα. Οι νευρώνες μας είναι εκείνοι που αντιλαμβάνονται τη μουσική που ακούμε, την αναλύουν, την επεξεργάζονται, την αποθηκεύουν και προκαλούν τα ανάλογα συναισθήματα. Τι διαφορές θα είχαν τα μουσικά κομμάτια και οι κλίμακες νοτών μινόρε και ματζόρε για τον ακροατή αν δεν αλληλοεπιδρούσαν με τα κέντρα συναισθημάτων του εγκεφάλου του;» Η μνήμη έχει μάλιστα σημαντικό ρόλο σε όλη αυτή την εμπειρία. Η επεξεργασία, αποθήκευση και αναπαραγωγή του ήχου γίνεται δε παράλληλα και σε πραγματικό χρόνο στον εγκέφαλο του ακροατή. Η μελέτη της ηχητικής αντίληψης του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος ονομάζεται ψυχοακουστική. «Πρόκειται για το ανθρώπινο αυτί, τον ανθρώπινο εγκέφαλο και την κατανόηση του πώς το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται τον ήχο», όπως δηλώνει στην αμερικανική εφημερίδα New York times ο Δρ. Χρήστος Κυριακάκης της Audyssey Laboratories από το Los Angeles των Η.Π.Α..

Ο Δρ. Κυριακάκης αναπτύσσει ηχητικά συστήματα κι αλγορίθμους πιστής αναπαραγωγής ήχου που μπορούν ακόμη και να πείσουν έναν ακροατή ότι βρίσκεται εντός μίας αίθουσας συναυλιών με ζωντανό μουσικό πρόγραμμα -στα πλαίσια πειράματος με κλειστά μάτια-ακόμη κι αν εκείνη τη στιγμή βρίσκεται σε ένα μικρό ηχομονωμένο δωμάτιο και ακούει προ-ηχογραφημένο υλικό. Το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα είναι ένα σύστημα που χαρακτηρίζεται από μη-γραμμικότητες και στοιχεία αυτο-οργάνωσης. Αυτά τα στοιχεία αποτελούν βασικές αρχές της αντίληψης της χροιάς, της κίνησης και της τονικότητας. Σε ό,τι αφορά στη χροιά, τον τόνο και την αντίληψη τονικότητας, τα μοντέλα αυτο-οργάνωσης μοιάζουν πολύ με τα νευρωνικά δίκτυα.

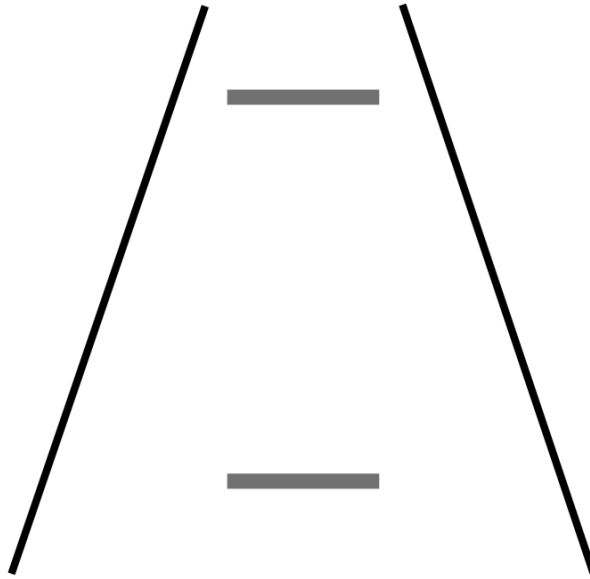
Στο βιβλίο του «This is your brain on music», ο Daniel J. Levitin , περιγράφει πως ο εγκέφαλός μας καλείται να μετατρέψει, να επεξεργαστεί και να αποθηκεύσει με κάποιο τρόπο μία αναπαράσταση του σήματος που λαμβάνει από το αισθητήριο όργανο του αυτιού μέσω του ακουστικού νεύρου. Η αποθήκευση αυτή έχει πολλά κοινά στοιχεία με την αποθήκευση ενός αρχείου ήχου στον εσωτερικό σκληρό δίσκο ενός υπολογιστή. Φυσικά αυτή η θεωρία μπορεί να επεκταθεί και σε πολλά άλλα ερεθίσματα όπως τα οπτικά ή της αφής αλλά σε αυτή την ανάλυση θα επικεντρωθούμε κυρίως στο κομμάτι του ήχου. Η ανθρώπινη μνήμη είναι επομένως το βασικό αποθηκευτικό μας μέσο και από τη μνήμη ανασύρουμε πληροφορίες για ένα κομμάτι μουσικής ή ένα ηχητικό ντοκουμέντο όταν το επιθυμούμε. Μάλιστα θα δούμε πως η μνήμη αλληλοεπιδρά σε πραγματικό χρόνο με τη μουσική και τον ήχο που λαμβάνεται από το αυτί.

Ένα εύλογο ερώτημα που τίθεται σε αυτό το σημείο είναι κατά πόσο το αποθηκευμένο «αρχείο» που διατηρούμε στη μνήμη μας είναι μία πιστή αναπαράσταση του μουσικού κομματιού ή ηχητικού στιγμιότυπου που έχουμε ακούσει. Όταν για παράδειγμα θυμόμαστε τα λόγια που μας είπε κάποιος σημαντικός άνθρωπος της ζωής μας, θυμόμαστε τόσο τη χροιά και τον τόνο της φωνής του όσο και την εικόνα του. Ίσως όμως ακούσαμε αυτά τα λόγια μέσα από μία γραμμή τηλεφώνου με περιορισμένο εύρος ζώνης μετάδοσης του ήχου και μάλιστα με κάποιο πρόσθετο θόρυβο ή διακοπές στο σήμα. Η μνήμη που διατηρούμε είναι όμως απαλλαγμένη από κάθε είδους πρόσθετο θόρυβο, από κάθε είδους σύντομες διακοπές και μάλιστα μπορεί να διατηρούμε κάποια μορφή εικόνας του συνομιλητή μας παρότι δεν τον αντικρίζαμε όταν είχαμε αυτή την επικοινωνία. Επομένως, αρχίζουμε να καταλαβαίνουμε ότι για την ανθρώπινη μνήμη, ίσως δεν είναι απαραίτητη η πιστότητα του ήχου σε όλες τις περιπτώσεις.

## 2.2 Η αντίληψη και η παραμόρφωση της πραγματικότητας

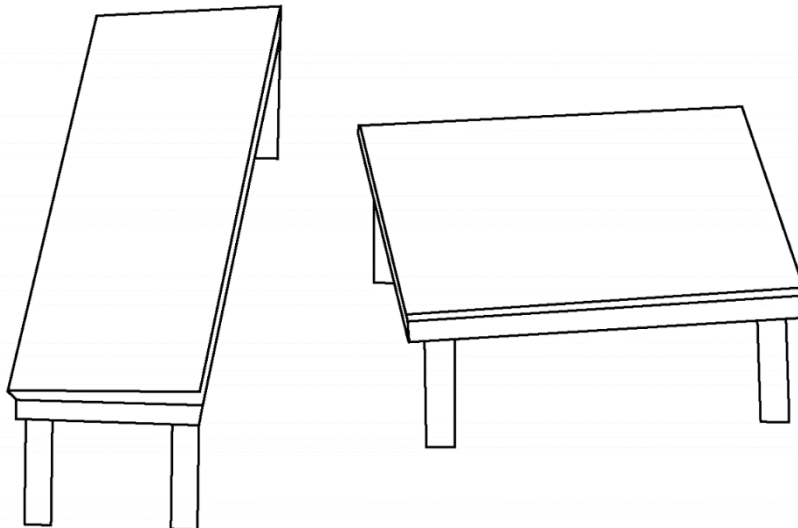
Έχει γίνει γνωστό τουλάχιστον από την εποχή του Αριστοτέλη ότι οι αισθήσεις μας μπορεί να στρεβλώσουν τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τον κόσμο. Ο Roger Shepard, ψυχολόγος αντίληψης στο Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ συνήθιζε να λέει ότι, «όταν λειτουργεί σωστά, το αντιληπτικό σύστημά μας είναι πρέπει να νοθεύει τον κόσμο που βλέπουμε και ακούμε». Όπως σημειώνει ο John Locke, «όλα όσα γνωρίζουμε για τον κόσμο είναι μέσω του ό, τι εμείς βλέπουμε, ακούμε και μέσα από τη μυρωδιά, την αφή ή τη γεύση. Φυσικά υποθέτουμε ότι ο κόσμος είναι όπως ακριβώς τον αντιλαμβανόμαστε. Αλλά απλά πειράματα μας έχουν αναγκάσει να αντιμετωπίσουμε την πραγματικότητα όπως είναι. Οι οπτικές ψευδαισθήσεις είναι ίσως η πιο συναρπαστική απόδειξη διαστρέβλωσης των αισθήσεων.» Πολλοί από εμάς έχουμε δει αυτά τα είδη των αυταπατών ως παιδιά, όπως όταν δύο γραμμές ίδιου μήκους εμφανίζονται σαν να έχουν διαφορετικά μήκη (η ψευδαίσθηση Ponzo, Εικόνα 2.1).





Εικόνα 2.1

Μία παραλλαγή της ψευδαίσθησης Ponzo είναι αυτή του Roger Shepard με δύο τραπέζια όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2. Είναι δύσκολο να πιστέψουμε ότι οι άνω επιφάνειες σε αυτά τα δύο τραπέζια είναι ίδιες σε μέγεθος και σχήμα. Αν κόψουμε ένα κομμάτι χαρτί και το εναποθέσουμε επάνω στις δυο επιφάνειες, καταλαβαίνουμε ότι είναι ίδιες.



Εικόνα 2.2

Παρότι γνωρίζουμε ότι η παραπάνω εικόνα είναι μια ψευδαίσθηση, δε μπορούμε απλά να απενεργοποιήσουμε το αντίστοιχο μηχανισμό του εγκεφάλου. Για αυτό το λόγο εξακολουθούμε να μπερδευόμαστε ως προς τις διαστάσεις αν κοιτάξουμε την Εικόνα 2.2 μετά από λίγο.

Πέρα από τη διαστρέβλωση της πραγματικότητας, η αντίληψή μας μπορεί και να συμπληρώσει στοιχεία της πληροφορίας που λείπουν. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα λόγω της εξέλιξης του ανθρώπου και είναι ένας προσαρμοστικός μηχανισμός. Πολλά από όσα βλέπουμε ή ακούμε έχουν ελλείψεις σε πληροφορία αλλά ο εγκέφαλός μας συμπληρώνει τα κενά. Είναι ένας εξελικτικός μηχανισμός που μας επιτρέπει να πάρουμε γρήγορα αποφάσεις και να λάβουμε μέτρα προστασίας ενάντια σε απειλητικές

καταστάσεις και θηρευτές.

«Το ακουστικό σύστημα παρουσιάζει στοιχεία αντιληπτικής ολοκλήρωσης». Ο γνωστικός ψυχολόγος Richard Warren το κατέδειξε αυτό ιδιαίτερα καλά μέσα από ένα πείραμα. Ηχογράφησε σε ταινία την πρόταση, «το νομοσχέδιο ψηφίστηκε και από τα δύο όργανα του νομοθετικού σώματος», αποκόπτοντας ένα κομμάτι της πρότασης από την ταινία καταγραφής. Αντικατέστησε το ελλείπον κομμάτι με μια έκρηξη του άσπρου θορύβου (στατικό θόρυβο) ίσης διάρκειας. Κάθε άτομο που άκουσε την καταγραφή μπορούσε να αναφέρει ότι άκουσε μια πρόταση και ένα στατικό θόρυβο. Αλλά το μεγαλύτερο ποσοστό των ανθρώπων δε μπορούσε να πει σε ποιο σημείο βρισκόταν ο θόρυβος! Το ακουστικό σύστημα είχε συμπληρώσει τις ελλείπουσες λεκτικές πληροφορίες, έτσι ώστε η πρόταση τους φάνηκε να είναι συνεχής. Ο στατικός θόρυβος και η πρόταση διαμόρφωσαν δύο χωριστά αντιληπτικά ρεύματα λόγω των διαφορών στη χροιά τους. Αυτό ανάγκασε τη μνήμη για να ομαδοποιήσει χωριστά. Ο Bregman καλεί αυτό το φαινόμενο «ροή εξαρτώμενη από τη χροιά». Σαφώς αυτό είναι μια αισθητήρια διαστρέβλωση καθώς το αντιληπτικό σύστημά μας, μας λέει κάτι για τον κόσμο που δεν είναι αληθινό.

Σύμφωνα με τους μεγάλους ψυχολόγους αντίληψης Hermann von Helmholtz, Richard Gregory, Rock Irvin, και Roger Shepard, «η αντίληψη είναι μια διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος και περιλαμβάνει μια ανάλυση πιθανοτήτων. Ο στόχος του εγκέφαλου είναι να καθοριστεί η πλέον πιθανή διάταξη των αντικειμένων στο φυσικό κόσμο, λαμβάνοντας υπόψη το ιδιαίτερο σχέδιο των πληροφοριών που φθάνει στον αισθητήριο δέκτη, δηλαδή τον αμφιβληστροειδή για την όραση και το τύμπανο του αυτιού για την ακοή. Το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου, οι πληροφορίες που λαμβάνουμε από τους αισθητήριους δέκτες μας είναι ελλιπείς ή διφορούμενες. Οι φωνές που ακούμε αναμιγνύονται με άλλες φωνές, με ήχους μηχανών, με τον άνεμο, με ήχους από βήματα και πολλούς άλλους θορύβους. Ο εγκέφαλός μας ομαδοποιεί τα ερεθίσματα που δέχεται από το αυτί βάσει της έντασης, της χροιάς, της χωρικής θέσης της πηγής τους και άλλους παράγοντες ώστε να τα διακρίνει, να τα διαχωρίσει και να τα αποθηκεύσει στη μνήμη. Δεν υπάρχει ακόμη υπολογιστικό σύστημα που να μπορεί να κάνει τόσο αποτελεσματικά αυτή τη διάκριση ήχων και θορύβων». Το φαινόμενο του συντονισμού της ακουστικής προσοχής ενός ακροατή σε μία συγκεκριμένη φωνή ενός ομιλητή που σχεδόν επικαλύπτεται από την οχλαγωγία και άλλες φωνές είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της διάκρισης που μπορεί να εκτελέσει ο εγκέφαλος (cocktail party effect). Ασθενείς με κοχλιακά εμφυτεύματα - μικροσκοπικές ηλεκτρονικές συσκευές που συνδέουν τον ήχο απευθείας στο ακουστικό νεύρο ενός κωφού ατόμου- αντιμετωπίζουν πρόβλημα με τη διάκριση ήχων και θορύβων. Παρά τις πρόσφατες εξελίξεις με χρήση μικροεπεξεργαστών και ψηφιακών συστημάτων, η ψυχοακουστική έχει δείξει στους μηχανικούς ότι έχουμε ακόμη πολύ δρόμο να διανύσουμε. Δεν υπάρχει ακόμη συσκευή που να μπορεί να φτάσει την ικανότητα του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος να κατανοήσει μια συζήτηση σε ένα γεμάτο εστιατόριο. «Οι ασθενείς με κοχλιακά εμφυτεύματα αντιμετωπίζουν τρομερή δυσκολία με το θόρυβο του περιβάλλοντος», όπως δήλωσε ο Δρ Oxenham.

Από την ανάλυσή μας παρατηρούμε επομένως πως ο εγκέφαλός μας διαθέτει ιδιαίτερες δυνατότητες επεξεργασίας και φιλτραρίσματος του ήχου. Μπορεί να αποθηκεύσει στη μνήμη μία ιδανική καταγραφή του λαμβανόμενου ήχου, παρότι αυτή δεν είναι πιστή στην πραγματικότητα. Το «ηχητικό αρχείο» που διατηρούμε στη μνήμη μας δεν είναι κατ'ανάγκη πιστό σε αυτό που αρχικά ακούσαμε. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που δεν έχουμε ιδιαίτερο πρόβλημα να κατανοήσουμε το λόγο ενός συνομιλητή μας ακόμη και όταν τον ακούμε μέσα από μία προβληματική γραμμή τηλεπικοινωνίας που προσθέτει έντονο θόρυβο όπως το παμπάλαιο παιχνίδι δύο χάρτινων ποτηριών που συνδέονται μέσω μίας κλωστής. Η ακρόαση μουσικής όμως είναι μία διαφορετική εμπειρία για τον εγκέφαλό μας που ενεργοποιεί έντονα τα κέντρα μνήμης και δεν απαιτεί συνήθως την κατανόηση ή τη λήψη αποφάσεων. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, η ακρόαση μουσικής μπορεί να αποτελέσει απόλαυση για τον εγκέφαλο μέσα από διαδικασίες σκανδαλισμού της μνήμης και των κέντρων συναισθημάτων του. Επομένως, θα πρέπει να μελετήσουμε εκτενέστερα πως λειτουργεί η μνήμη και πως η μουσική αποτελεί ερέθισμα για εκείνη.

## 2.3 Η λειτουργία της ανθρώπινης μνήμης και η μουσική

Σχεδόν όλες οι διαδικασίες σχετικές με τη μουσική, μπορεί να είναι φυσικές από τη άποψη της ακουστικής αλλά μπορεί να είναι και ψυχολογικές από την άποψη της ψυχοακουστικής και της αντίληψης. Η ακρόαση μουσικής είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και μη γραμμικής φύσης. Οι γραμμικές προσεγγίσεις γνωστές στην ακουστική και τη ψυχολογία μπορεί να είναι μια πρώτη προσέγγιση σε πολλά προβλήματα. Όμως κατά την εξέταση των συστημάτων του ανθρώπινου εγκεφάλου και της μνήμης, προκύπτουν πολλά προβλήματα. Τα απλά μοντέλα δεν μπορούν πλέον να εξηγήσουν τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την ακρόαση μουσικής.

Σύμφωνα με το Daniel Joseph Levitin, υπάρχουν δύο βασικές σχολές μελέτης της ανθρώπινης μνήμης. Η διαμάχη μεταξύ μελετητών της ανθρώπινης μνήμης τον τελευταίο αιώνα αφορά στο κατά πόσο η μνήμη είναι απόλυτη ή σχετική. Εκείνοι που υποστηρίζουν τη σχετική θεωρία πιστεύουν ότι το σύστημα της μνήμης μας αποθηκεύει πληροφορία για τις σχέσεις μεταξύ ιδεών και αντικειμένων αλλά όχι κατ' ανάγκη λεπτομέρειες για τα ίδια τα αντικείμενα. Αυτή η θεωρία ονομάζεται και «εποικοδομητική» καθώς υποστηρίζει πως, ελλείψει λεπτομερειών για τα αντικείμενα, οικοδομούμε μία απεικόνιση της πραγματικότητας στη μνήμη μας βασισμένοι σε σχέσεις μεταξύ ιδεών-αντικειμένων ενώ πολλές λεπτομέρειες συμπληρώνονται ή αναδημιουργούνται επί τόπου. Η σχολή της σχετικής θεωρίας πιστεύει πως η λειτουργία της μνήμης βασίζεται στην απόρριψη άσχετων λεπτομερειών για τη διατήρηση της ουσίας.

Στον αντίποδα, υπάρχει η θεωρία της διατήρησης αρχείου από τη μνήμη. Οι υποστηρικτές αυτής της θεωρίας πιστεύουν πως η μνήμη λειτουργεί κρατώντας ένα ακριβές αντίγραφο-αρχείο όπως θα γινόταν σε ένα κασετόφωνο ή μία ψηφιακή βιντεοκάμερα. Η απόλυτη θεώρηση πιστεύει πως η μνήμη διατηρεί όλες τις εμπειρίες μας με ακρίβεια και σχεδόν τέλεια πιστότητα.

Η μουσική παίζει σημαντικό ρόλο στις μελέτες της λειτουργίας της μνήμης καθώς, όπως έδειξε η ψυχολογία Gestalt πριν έναν αιώνα, οι μελωδίες διακρίνονται από σχέσεις μεταξύ τόνων. Αυτή είναι μία σχετική θεώρηση. Παράλληλα όμως, οι μελωδίες αποτελούνται από νότες με συγκεκριμένα τονικά ύψη και αυτό αποτελεί μία απόλυτη θεώρηση. Πολλά πειράματα και πολλές μελέτες υποστηρίζουν τη σχετική ή την απόλυτη θεώρηση της λειτουργίας της μνήμης. Τα πειράματα που στηρίζουν τη σχετική θεώρηση βασίζονται κυρίως στην ακρόαση ή ανάγνωση κειμένου από τα υποκείμενα του πειράματος και την αναπαραγωγή αυτού που άκουσαν ή διάβασαν. Οι μελέτες δείχνουν ότι υπάρχει σχετική αδυναμία να αναπαράγουν ό,τι άκουσαν ή διάβασαν τα υποκείμενα, λέξη προς λέξη, άρα δεν υπάρχει πιστότητα αλλά αποθήκευση του γενικού περιεχομένου ή της ουσίας του κειμένου.

Αντίθετα, οι υποστηρικτές της απόλυτης θεωρίας στηρίζονται σε πειράματα που αφορούν την αναγνώριση μικρών διαφορών ανάμεσα σε εικόνες που ίσως έχουμε δει πολύ σύντομα. Ο Roger Shepard έκανε ένα απλό σχετικό εργαστηριακό πείραμα. Έδειξε εκατοντάδες φωτογραφίες σε θεατές για μερικά δευτερόλεπτα την καθεμιά. Μετά από μία εβδομάδα, κάλεσε τους θεατές πίσω στο εργαστήριο και τους έδειξε ζεύγη φωτογραφιών που είχαν δει προηγουμένως δίπλα σε νέες φωτογραφίες που δεν είχαν δει. Οι νέες για αυτούς φωτογραφίες ήταν παραλλαγές των παλαιών φωτογραφιών με μικρές διαφορές όπως για παράδειγμα το διαφορετικό μέγεθος ενός δέντρο στο φόντο. Οι εξεταζόμενοι μπορούσαν να διακρίνουν ποιες φωτογραφίες είχαν δει την προηγούμενη εβδομάδα για λίγα δευτερόλεπτα με εντυπωσιακή ακρίβεια. Σε ό,τι αφορά στον ήχο, μπορούμε αποδεδειγμένα να αναγνωρίσουμε εκατοντάδες διαφορετικές φωνές ακόμη κι αν μας πουν την ίδια φράση και φυσικά να τις εντοπίσουμε μέσα στην οχλαγωγία ενός πλήθους. Αν είχαμε απλά μία γενίκευση της πραγματικότητας αποθηκευμένη, πως θα μπορούσαμε να διακρίνουμε τόσο αποτελεσματικά διαφορετικές φωνές ανάμεσα στο πλήθος; Αυτή είναι μια διαδικασία που απαιτεί σύγκριση με πολύ συγκεκριμένα κι ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Ένα γεγονός που δε μπορεί όμως να εξηγήσει η απόλυτη θεωρία είναι γιατί αναγνωρίζουμε ένα γνωστό μουσικό κομμάτι ή μία μελωδία ακόμη κι αν μας δοθεί μετατονισμένη ή σε διαφορετικό ρυθμικό μοτίβο. Ακόμη, η διαδικασία κατανόησης κι ερμηνείας του προφορικού λόγου πρέπει να στηρίζεται σε αφαίρεση των ιδιαίτερων

χαρακτηριστικών ενός ομιλητή όπως η προφορά και η χροιά της φωνής του, γεγονός που δε συνάδει με την απόλυτη θεώρηση αλλά με τη σχετική.

Επίσης, η απόλυτη θεωρία δεν καλύπτει το γεγονός ότι μπορούμε να κάνουμε γρήγορη αναπαραγωγή του κομματιού στο μυαλό μας χωρίς όμως να επηρεαστεί η τονικότητά του χρησιμοποιώντας τη φαντασία μας. Για παράδειγμα, αν μας ρωτήσουν να βρούμε γρήγορα ποια είναι η έβδομη κατά σειρά λέξη του Εθνικού μας Ύμνου (είναι η λέξη «σπαθιού»), πιθανότατα από μέσα μας θα προσπαθήσουμε να κάνουμε αναπαραγωγή του ύμνου με τη μελωδία του. Η αναπαραγωγή αυτή θα γίνει σε μεγάλη ταχύτητα ώστε να εντοπίσουμε τη λέξη που αναζητούμε αλλά η μελωδία θα διατηρηθεί αυτούσια ως τονικότητα. Αν διατηρούσαμε ακριβή ηχητικά αντίγραφα όπως κάνει ένα κασετόφωνο, η αύξηση της ταχύτητας αναπαραγωγής θα έπρεπε να αυξάνει και την τονικότητα του μουσικού κομματιού όπως συμβαίνει σε κάθε κασετόφωνο ή πικάπ δίσκων βινυλίου δεδομένου ότι δεν γίνονται αναπληρώσεις λέξεων. Μάλιστα, θα παρατηρήσουμε από το σύντομο αυτό πείραμα ότι δε μπορούμε συνήθως να απομονώσουμε μία λέξη ή μία φράση από τον ύμνο αλλά ξεκινούμε πάντα από την αρχή και πιθανότατα συνεχίζουμε μέχρι κάποιο σημείο ακόμη κι αν δεν απαιτείται. Αυτό μας δείχνει ότι υπάρχουν σημεία εισόδου και εξόδου σε κάθε αρχείο της μνήμης μας.

Επομένως, έχουμε αρκετή πληροφορία που στηρίζει τόσο τη σχετική όσο και την απόλυτη θεωρία λειτουργία της ανθρώπινης μνήμης. Ποια ισχύει επομένως; Η απάντηση που δίνει η επιστημονική κοινότητα είναι πως δεν ισχύει καμία από τις δυο απολύτως ή ότι ισχύουν και η δύο κατά κάποιο τρόπο. Η πιο πρόσφατη θεωρία μελέτης της μνήμης είναι υβριδική καθώς υποστηρίζει τόσο το απόλυτο όσο και το σχετικό μοντέλο λειτουργίας της μνήμης μας και ονομάζεται πολλαπλών ιχνών (multiple-trace), ένα μοντέλο πάνω στο οποίο έχουν εργαστεί οι Douglas Hintzman και Stephen Goldinger. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στην κατηγοριοποίηση αντικειμένων στη μνήμη.

## 2.4 Η κατηγοριοποίηση αντικειμένων στη μνήμη

Η κατηγοριοποίηση είναι μία πολύ βασική λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ο Αριστοτέλης έθεσε τις βάσεις για τη κατηγοριοποίηση υποστηρίζοντας ότι οι κατηγορίες προκύπτουν από λίστες καθοριστικών χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα, η κατηγορία «τρίγωνο» που έχουμε κατά νου περιλαμβάνει όλα τα τρίγωνα που έχουν δει μέχρι στιγμής και μπορούμε φυσικά να φανταστούμε και νέα τρίγωνα. Σύμφωνα με τον Αριστοτέλη, εντάσσουμε σε μία κατηγορία ένα αντικείμενο βάσει μίας ανάλυσης των χαρακτηριστικών του και μέσω της σύγκρισής τους με τον ορισμό της εκάστοτε κατηγορίας. Η κατηγοριοποίηση κατά αυτό τον τρόπο στηρίζεται στη λογική και αποτελεί ένα απόλυτο μοντέλο σύμφωνα με το οποίο ένα αντικείμενο μπορεί να βρίσκεται εντός ή εκτός μιας κατηγορίας. 2300 χρόνια μετά τον Αριστοτέλη, ο Ludwig Wittgenstein πρότεινε πως η ένταξη σε μία κατηγορία δεν γίνεται βάσει ορισμού αλλά βάσει ομοιότητας με τα μέλη αυτής της κατηγορίας. Έθεσε την απλή ερώτηση «τι εστί παιχνίδι». Η κατηγορία παιχνίδι δεν είχε σαφή όρια ώστε να μπορεί να ορισθεί με ακρίβεια. Το ίδιο ισχύει και για τα διάφορα είδη μουσικής. Δε μπορεί ένα μουσικό κομμάτι να ενταχθεί με σαφήνεια εντός μίας κατηγορίας μουσικής απλά και μόνο εξ ορισμού αλλά κυρίως επειδή ομοιάζει με άλλα κομμάτια αυτής της κατηγορίας. Η Eleanor Rosch μάλιστα προχώρησε τη θεωρία αυτή υποστηρίζοντας ότι κάθε κατηγορία έχει ένα χαρακτηριστικό ή πρότυπο στοιχείο που ονομάζεται «πρωτότυπο». Η κατηγορία συχνά σχηματίζεται τριγύρω από αυτό το πρωτότυπο αντικείμενο. Η κατανόηση του κόσμου γύρω μας ξεκινά πάντοτε με συγκεκριμένες διακριτές περιπτώσεις (π.χ. ένα άτομο, ένα δέντρο, ένα τραγούδι) και στη συνέχεια η κάθε περίπτωση εξελίσσεται σε μέλος μιας κατηγορίας μέσα από τις εμπειρίες και τα βιώματά μας. Το πρωτότυπο μιας κατηγορίας είναι κατά βάση το στοιχείο εκείνο που παρουσιάζει τα περισσότερα κοινά με τα μέλη της κατηγορίας, ο μέσος όρος. Η θεώρηση αυτή εξηγεί γιατί απολαμβάνουμε μουσικά κομμάτια που δεν έχουμε

ακούσει ποτέ ξανά και γιατί μπορεί να μας αρέσει ένα κομμάτι από την πρώτη κιόλας ακρόασή του.

Στο μοντέλο πολλαπλών ιχνών για τη λειτουργία της μνήμης, κάθε εμπειρία μας αποθηκεύεται με υψηλή πιστότητα στη μακροπρόθεσμη μνήμη. Παραμορφώσεις αυτού του ίχνους πληροφορίας προκύπτουν όταν κατά την ανάκληση από τη μνήμη το ίχνος δέχεται παρεμβολές από άλλα ίχνη με παρεμφερή χαρακτηριστικά ή αν το ίχνος έχει χάσει μέρος της πληροφορίας του από φυσικές νευρο-βιολογικές διαδικασίες. Το μοντέλο αυτό εξηγεί πως μπορούμε να κρατούμε πληροφορίες συγκεκριμένες αλλά και αφαιρετικές από ένα ερέθισμα όπως μια μελωδία που ακούμε. Όταν ακούμε μία μελωδία, αποθηκεύουμε στη μνήμη απόλυτες πληροφορίες όπως το τονικό ύψος, τη χροιά, το ρυθμό και τη ρυθμική ταχύτητα της μελωδίας ενώ παράλληλα κάνουμε υπολογισμούς επί της μελωδίας. Οι υπολογισμοί αυτοί αποθηκεύουν τα σχετικά διαστήματα μεταξύ νοτών και γενικά ρυθμικά μοτίβα που δεν εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη ταχύτητα αναπαραγωγής της μελωδίας. Οι υπολογισμοί αυτοί συνθέτουν το αφαιρετικό ίχνος του στοιχείου και μας δίνουν τη δυνατότητα να αναγνωρίσουμε τη μελωδία ακόμη κι αν είναι σε άλλο ρυθμό, σε άλλο τονικό ύψος και παράγεται από άλλο μουσικό όργανο με διαφορετική χροιά. Το σύστημα της μνήμης μας εξάγει από τη μουσική κάποιο τύπο ή υπολογιστική περιγραφή που μας επιτρέπει να αναγνωρίσουμε τα τραγούδια παρά τους διάφορους μετασχηματισμούς τους.

Ο εγκέφαλος κατασκευάζει τη δική του εκδοχή της πραγματικότητας, που βασίζεται εν μέρει σε ό,τι υπάρχει και εν μέρει στο πώς ερμηνεύει τους ήχους που ακούμε ως συνάρτηση του ρόλου που διαδραματίζουν στο μουσικό σύστημα που έχουμε μάθει και συνηθίσει. Ερμηνεύουμε την ομιλούμενη γλώσσα αναλόγως. Επί παραδείγματι, η λέξη «γάτα» έχουμε μάθει ότι είναι η συλλογή των ήχων αντιπροσωπεύει το αιλουροειδές κατοικίδιο ζώο. Ομοίως, έχουμε μάθει ότι ορισμένες αλληλουχίες ήχων πάνε μαζί, και περιμένουμε από αυτές να συνεχίσουν να συνδυάζονται. Προσδοκούμε συγκεκριμένους ήχους, ρυθμούς, ηχοχρώματα, και ούτω καθεξής να συνεργαστούν ή να εμφανιστούν μαζί με βάση μια στατιστική ανάλυση του εγκεφάλου μας που εξαρτάται από το πόσο συχνά έχουν εμφανιστεί μαζί στο παρελθόν. Πρέπει να απορρίψουμε την διαισθητικά ελκυστική ιδέα ότι ο εγκέφαλος αποθηκεύει μια ακριβή και αυστηρά ισομορφική εκπροσώπηση του κόσμου. Σε κάποιο βαθμό, η μνήμη αποθηκεύει αντιληπτικές στρεβλώσεις, ψευδαισθήσεις, και την σύνδεση σχέσεων μεταξύ των στοιχείων. Είναι μια υπολογιστική πραγματικότητα για εμάς και είναι πλούσια σε πολυπλοκότητα και ομορφιά. Ένα παράδειγμα είναι το απλό γεγονός ότι τα κύματα φωτός στον κόσμο ποικίλουν κατά μήκος μίας διάστασης, του μήκους κύματος. Όμως το σύστημα αντίληψής μας, αντιμετωπίζει το χρώμα ως δύο διαστάσεων όπως φαίνεται στον παρακάτω χρωματικό κύκλο (εικόνα 2.3):

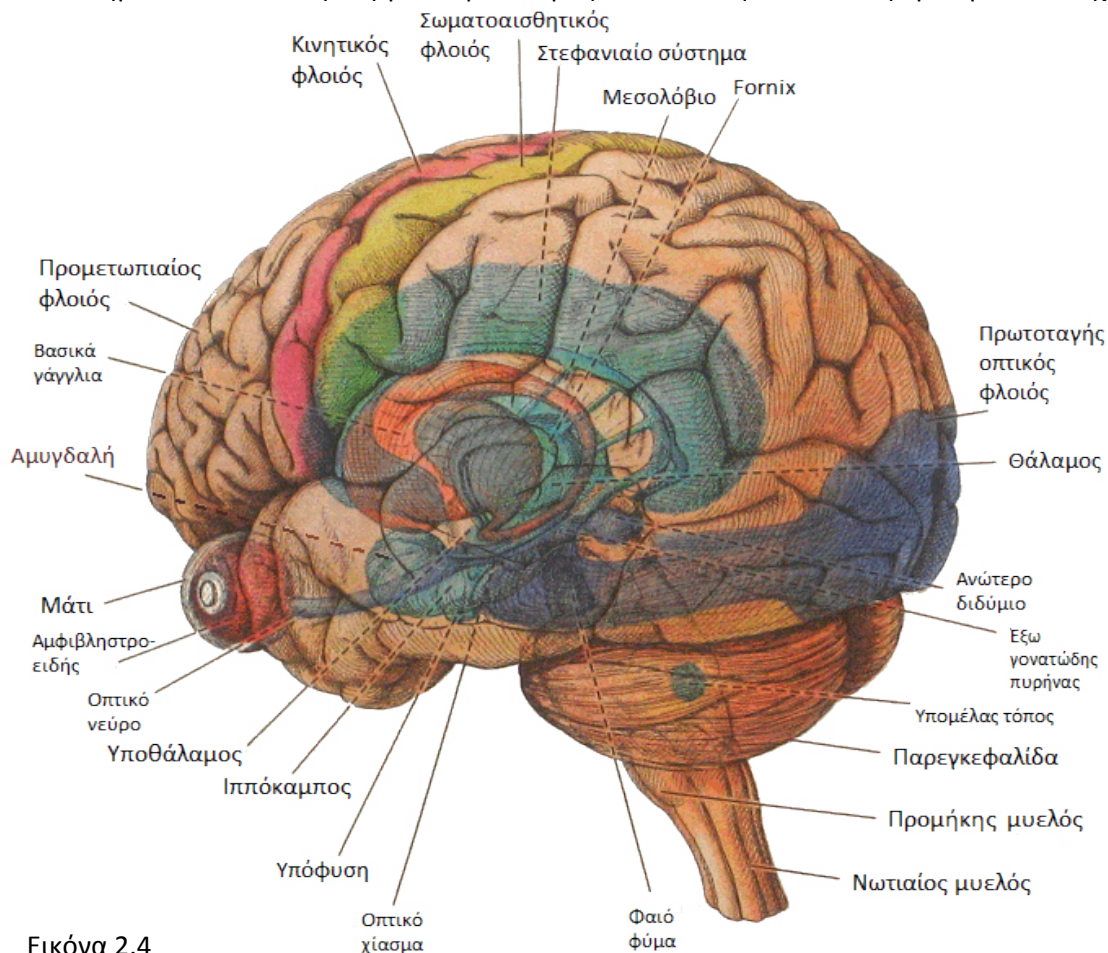


Εικόνα 2.3

Το μοντέλο πολλαπλών ιχνών εξηγεί και το γεγονός ότι αν ακούσουμε ένα μουσικό κομμάτι που έχουμε πολλά χρόνια να ακούσουμε, ξαφνικά ανασύρουμε παλιές, σχεδόν «ξεχασμένες» αναμνήσεις από την περίοδο εκείνη που το εν λόγω μουσικό κομμάτι είχε κυκλοφορήσει και ακουγόταν συχνά στο ραδιόφωνο. Το μοντέλο των πολλαπλών ιχνών στηρίζει πως κάθε πληροφορία που λαμβάνουμε από τα αισθητήρια όργανα μπορεί δυναμικά να αποτυπωθεί στη μνήμη μας, όχι σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Η μνήμη δεν λειτουργεί ως μία αποθήκη αλλά οι αναμνήσεις αποθηκεύονται σε μια ομάδα νευρώνων που όταν βρεθούν σε κατάλληλη κατάσταση θα επιτρέψουν να ανασυρθεί η αντίστοιχη

ανάμνηση και να αναπαραχθεί. Το να μη μπορούμε να θυμηθούμε κάτι δεν είναι μονάχα ζήτημα μη-αποτύπωσης της ανάμνησης στη μνήμη. Πιθανότατα δε μπορούμε να βρούμε την κατάλληλη αλληλουχία ερεθισμάτων και στοιχείων που θα μας οδηγήσουν στην ανάκτηση της ανάμνησης που αναζητούμε. Ένα κατάλληλο ερέθισμα μπορεί να ξεκλειδώσει μία ανάμνηση που είχαμε πολλά χρόνια να ανασύρουμε. Η δύναμη της μνήμης σχετίζεται με το πόσες φορές έχει βιώσει το αρχικό ερέθισμα. Η δύναμη της μνήμης είναι επίσης συνάρτηση του πόσο νοιαζόμαστε για την εμπειρία. Υπάρχουν νευρο-χημικές ετικέτες που συνδέονται με τις αναμνήσεις και σηματοδοτούν τη σημασία τους. Έχουμε μάλιστα την τάση να κωδικοποιούμε ως σημαντικά τα πράγματα εκείνα που φέρουν μαζί τους έντονο συναίσθημα, είτε θετικό είτε αρνητικό.

«Η μνήμη επηρεάζει τη μουσική εμπειρία ακρόασης τόσο βαθιά ώστε δε θα ήταν υπερβολή να πούμε ότι χωρίς μνήμη δεν θα υπήρχε μουσική.» σύμφωνα με το Daniel Levitin. Συμπεράσματα θεωρητικών μελετών και φιλόσοφοι έχουν σημειώσει ότι «η μουσική βασίζεται στην επανάληψη». Στη μουσική θυμόμαστε τους ήχους που μόλις ακούσαμε και τους σχετίζουμε με αυτούς που παίζονται τώρα. Αυτές οι ομάδες των ήχων ή φράσεις ίσως εμφανιστούν ξανά αργότερα στο κομμάτι σε μια παραλλαγή που ενεργοποιεί το σύστημα μνήμης κατά την ίδια στιγμή που ενεργοποιεί και τα συναισθηματικά κέντρα μας. Τα τελευταία δέκα χρόνια, νευροεπιστήμονες έχουν δείξει πόσο στενή είναι η σχέση του συστήματος της μνήμης μας με το συναισθηματικό μας σύστημα. Η αμυγδαλή, εφόσον θεωρείται η έδρα των συναισθημάτων στα θηλαστικά, βρίσκεται δίπλα στον ιππόκαμπο που θεωρείται η κρίσιμη δομή για την αποθήκευση στη μνήμη, αν όχι για την ανάκτηση της μνήμης (εικόνα 2.4). Τώρα γνωρίζουμε ότι η αμυγδαλή συμμετέχει στη μνήμη. Συγκεκριμένα, ενεργοποιείται από οποιαδήποτε εμπειρία ή μνήμη που έχει μια ισχυρή συναισθηματική συνιστώσα. Κάθε μελέτη νευροαπεικόνισης που έγινε στο εργαστήριο του Daniel J. Levitin έχει δείξει ότι η αμυγδαλή ενεργοποιείται στην ακρόαση μουσικής, αλλά όχι σε τυχαίες συλλογές ήχων ή τόνων. Όπως δηλώνει ο ίδιος, «Η επανεκτέλεση ενός μουσικού έργου, όταν γίνεται με δεξιοτεχνία από ένα συνθέτη, είναι συναισθηματικά ικανοποιητική για το μυαλό μας και κάνει την ακουστική εμπειρία πιο ευχάριστη».



Εικόνα 2.4

Στα μοντέλα μνήμης πολλαπλών ιχνών υποθέτουμε ότι ένα πλαίσιο κωδικοποιείται μαζί με τα ίχνη της μνήμης. Κατά τα λεγόμενα του Daniel Levitin «Η μουσική που έχετε ακούσει σε διάφορες χρονικές στιγμές στη ζωή σας είναι πεπλεγμένα κωδικοποιημένη με τα γεγονότα της εποχής εκείνης. Δηλαδή, η μουσική συνδέεται με τα γεγονότα της εποχής και τα γεγονότα εκείνα συνδέονται με τη μουσική. Αυτή η σύνδεση μουσικής/ήχων και γεγονότων μπορεί να ανασύρει αναμνήσεις μέσα από την ακρόαση μουσικής και να προκαλέσει μία πλειάδα συναισθημάτων». Τι συμβαίνει όμως όταν ένας άνθρωπος που καταβάλλεται από αρνητικά ή καταθλιπτικά συναισθήματα ακούει μουσική? Επηρεάζει αυτό το γεγονός την εμπειρία της ακρόασης? Σύμφωνα με τη συντάκτρια του διαδικτυακού περιοδικού «consequence of sound», Sasha Geffen, «η εμπειρία της ακρόασης μουσικής αλλάζει και μάλιστα βελτιώνεται όταν ένα άτομο αισθάνεται καλύτερα, είτε λόγω καλής διατροφής, άσκησης και παύσης καταχρήσεων είτε λόγω κατάλληλης αντικαταθλιπτικής φαρμακευτικής αγωγής. Η εμπειρία σίγουρα επηρεάζεται από την ποιότητα του ηχητικού εξοπλισμού που χρησιμοποιεί η ακροατής. Αυτό δε συμβαίνει όμως μονάχα λόγω των καλύτερων τεχνικών χαρακτηριστικών αλλά και λόγω της απόλαυσης που λαμβάνει ο ακροατής από την ενασχόλησή του με αυτό τον εξοπλισμό και τη συλλογή δίσκων του» (εικόνα 2.5).



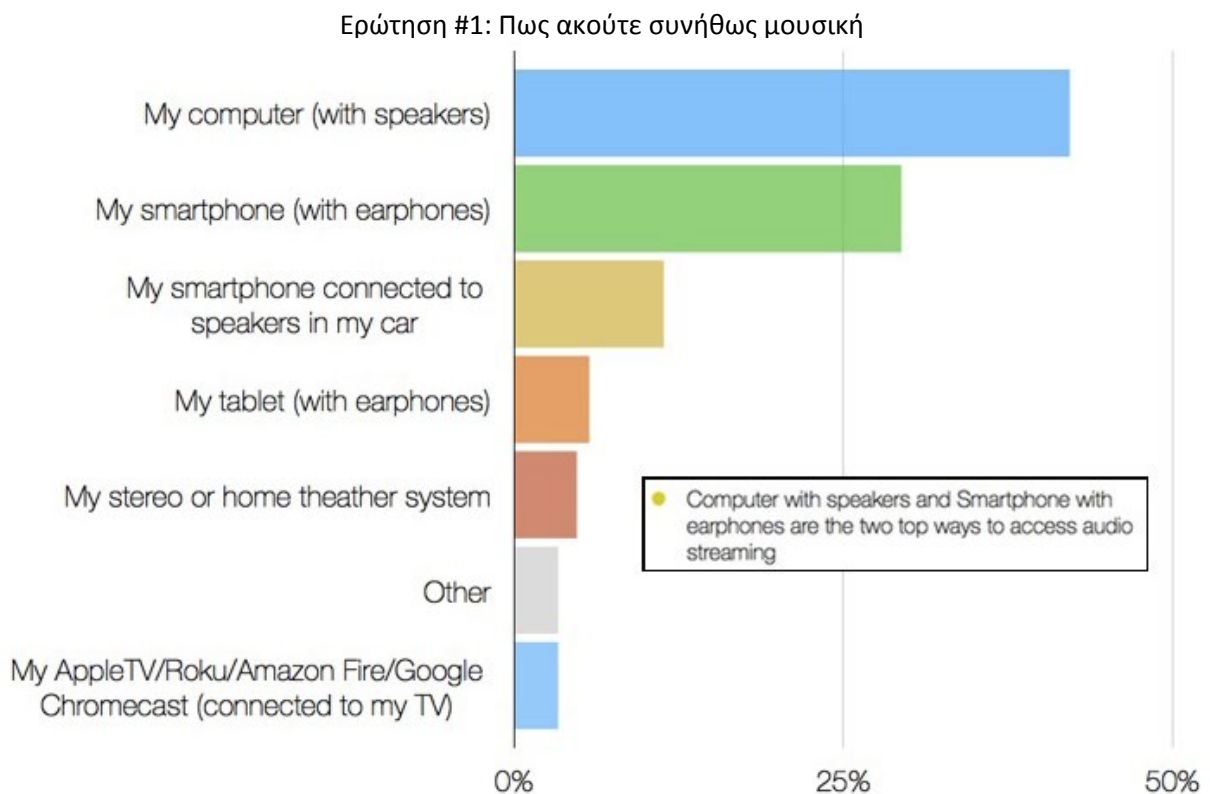
Εικόνα 2.5

## 2.5 Συμπεράσματα

Το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες έννοιες μη-γραμμικών στοιχείων, φαινομένων ψυχοακουστικής, αντίληψης και ψυχολογίας. Οι δυνατότητες ενός υγιούς τέτοιου συστήματος δεν έχουν μελετηθεί ακόμη διεξοδικά παρότι γίνονται μεγάλες προσπάθειες από την επιστημονική κοινότητα τις τελευταίες δεκαετίες. Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών όπως οι ψηφιακοί μικροεπεξεργαστές και η συρρίκνωσή των μεγεθών τους σίγουρα βοηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Σήμερα είμαστε τεχνολογικά στην καλύτερη θέση να αναπαράγουμε τον ήχο με υψηλή πιστότητα που μπορεί ακόμη και να μπερδέψει έναν ακροατή σε πείραμα με κλειστά μάτια. Όμως παρατηρούμε πολλούς καταναλωτές να αρκούνται σε αναπαραγωγή μουσικής χαμηλής πιστότητας μέσα από πολύ οικονομικά ίσως και μονοφωνικά ηχοσυστήματα και χαμηλής πιστότητας ψηφιακών μουσικών αρχείων.

Σύμφωνα με τον Paul Resnikoff, ιδρυτή και εκδότη του διαδικτυακού περιοδικού Digital Music News, το 2015 έγινε μία στατιστική έρευνα της συμβουλευτικής εταιρίας Atenga Marketing στις Η.Π.Α που περιέλαβε 857 Αμερικανούς πολίτες. Το θέμα της έρευνας ήταν η σημασία της πιστότητας ήχου για το αμερικανικό καταναλωτικό κοινό. Με αναλογία εμπιστοσύνης 95% (+/- 2,5%), μόλις το 25% των ερωτηθέντων ανέφερε ότι η ποιότητα του ήχου είναι η πιο σημαντική πτυχή της εμπειρίας ακρόασής τους (Εικόνα 2.7). Παρότι αυτό το ποσοστό μοιάζει μικρό και εγείρει ερωτήματα ως προς τη χρησιμότητα της πιστής αναπαραγωγής ήχου, δεν είναι αμελητέο. Μάλιστα, η έρευνα έδειξε ότι η διαθεσιμότητα της μουσικής που επιθυμεί να ακούσει ο καταναλωτής είναι ο σημαντικότερος παράγοντας. Οι περισσότεροι δε καταναλωτές ακούν μουσική μέσω του ηλεκτρονικού τους υπολογιστή και των ηχείων που αυτός διαθέτει (Εικόνα 2.6). Επομένως, η υψηλή πιστότητα του ήχου θα ήταν θεμιτή αν ο καταναλωτής μπορούσε να έχει εύκολη πρόσβαση σε αυτή μέσα από συσκευές που χρησιμοποιεί καθημερινά όπως ο υπολογιστής και το κινητό του.

### Question #1: How do you typically listen to music?

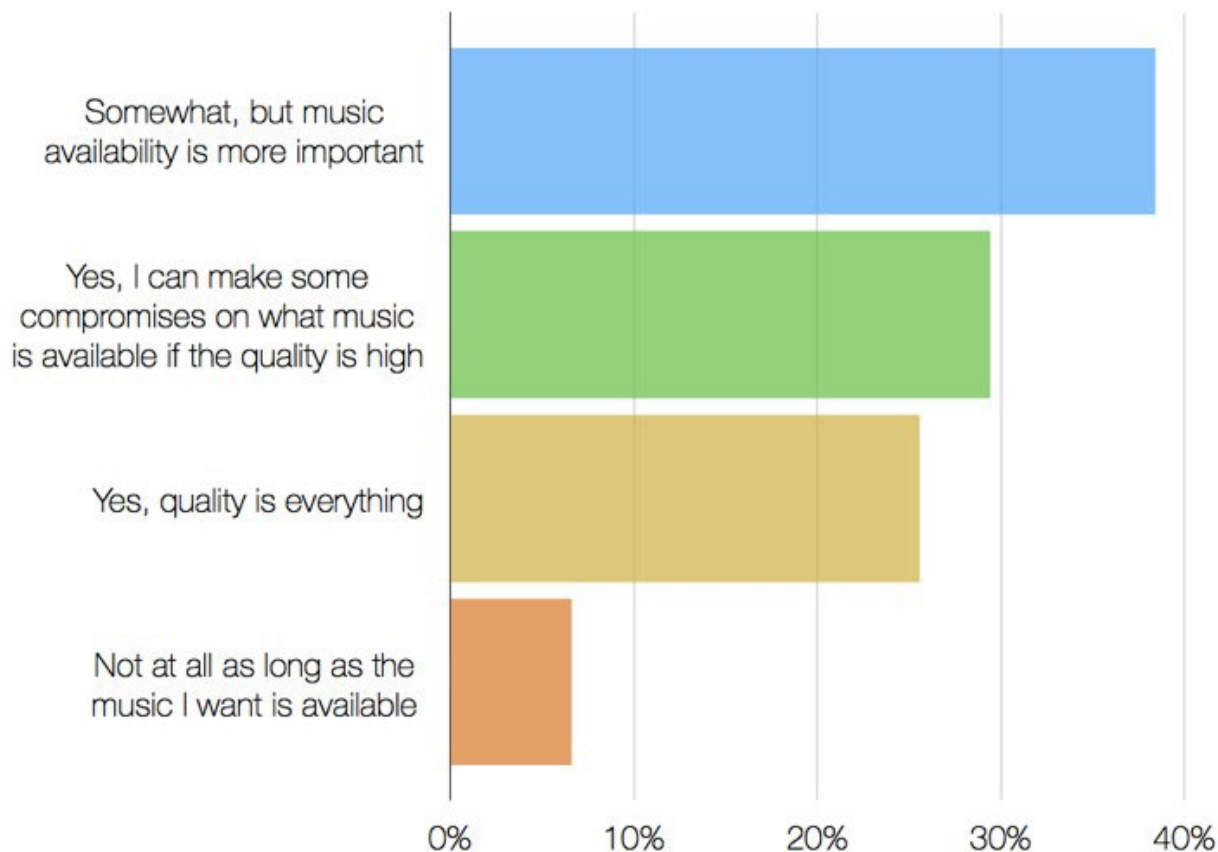


Εικόνα 2.6



### Question #3: How important is audio quality to you on your streaming service?

Ερώτηση #3: Πόσο σημαντική είναι η ποιότητα του ήχου για εσάς σε ότι αφορά στην υπηρεσία διαδικτυακής μετάδοσης μουσικής;



Εικόνα 2.7

Σύμφωνα με μελέτη του Καθηγητή μηχανικής ήχου, Trevor Cox του πανεπιστημίου του Salford στο Manchester, η πλειοψηφία του καταναλωτικού κοινού δεν επικεντρώνεται σε θέματα πιστότητας κατά την ακρόαση μουσικής και άλλων ήχων. Κατά τη διεξαγωγή πειράματος το 2012, ο Καθηγητής Cox ετοίμασε δύο ηχητικά δείγματα με ήχους από κελάϊδισμα πουλιών. Το ένα δείγμα είχε μόνο τον ήχο των πουλιών ενώ στο δεύτερο προστέθηκε θόρυβος από άνεμο και κίνηση αυτοκινήτων. Στο αρχικό πείραμα, οι ερωτήσεις αφορούσαν μόνο το κελάϊδισμα των πουλιών όπως για παράδειγμα κατά πόσο τους φάνηκε ευχάριστο το ηχητικό δείγμα. Κανείς δεν υπέβαλε παρατηρήσεις ή σχόλια για το θόρυβο στο δεύτερο ηχητικό δείγμα. Μετά από έξι μήνες, έγινε επανάληψη του ίδιου ακριβώς πειράματος όμως προστέθηκε μία ερώτηση για την πιστότητα και την ποιότητα της ηχογράφησης. Τότε υπήρξε υψηλότερη προτίμηση για το δείγμα με το λιγότερο θόρυβο. Αυτό το εύρημα δείχνει ότι κανείς δεν ενοχλήθηκε από το θόρυβο ή δεν τον παρατήρησε, πάρα μόνο όταν η προσοχή των ακροατών στράφηκε προς το θέμα της ποιότητας της ηχογράφησης.

Το φαινόμενο αυτό εξηγείται εν μέρη από το γεγονός ότι η πιστότητα αναπαραγωγής του ήχου είναι κάτι που δεν απαιτείται από το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα. Οι τεράστιες επεξεργαστικές δυνατότητες του εγκεφάλου επιτρέπουν στον ακροατή να κατανοήσει πλήρως μία συνομιλία και να επικεντρωθεί σε ένα μουσικό κομμάτι ακόμη και σε ένα πολύ θορυβώδες περιβάλλον. Ο εγκέφαλος φιλτράρει αποτελεσματικά τον ψηφιακό θόρυβο των αρχείων μουσικής χαμηλής πιστότητας ή τα

παράσιτα του ραδιοφώνου ή τον έντονο θόρυβο εντός των συρμών του Μετρό όταν ακούμε μουσική. Επίσης, στοιχεία που λείπουν, συμπληρώνονται από το νου με τις δυνατότητες που διαθέτει για ανάκληση από τη μνήμη ή πρόβλεψη και εξαγωγή συμπεράσματος.

Ένας δεύτερος παράγοντας για τον οποίο πολλοί καταναλωτές δεν δίνουν ιδιαίτερη σημασία στην πιστότητα του ήχου είναι το γεγονός ότι η μουσική συνδέεται άμεσα με τη συναισθηματική κατάσταση του ακροατή και τις αναμνήσεις του. Η ακρόαση μουσικής είναι μία εμπειρία που ενεργοποιεί τα συναισθηματικά μας κέντρα και τη μνήμη μας σε μεγάλο βαθμό. Αν επομένως η μουσική που ακούμε δεν μας προκαλεί συναισθηματική ευχαρίστηση, δεν θεωρούμε σημαντική την ακρόασή της μέσα από ένα ηχοσύστημα υψηλής πιστότητας. Αυτό συμβαίνει σε πολλές περιπτώσεις με λίστες μουσικών κομματιών που παίζονται πολύ συχνά από τους περισσότερους σταθμούς μετάδοσης στο ραδιόφωνο και τα λοιπά μέσα όπως το ιντερνετικό ραδιόφωνο. Αυτά τα μουσικά κομμάτια θεωρούνται από τον ακροατή έως και βαρετά λόγω της διαρκούς επανάληψης. Στον αντίποδα, αν ο ακροατής βρίσκεται σε κατάλληλη συναισθηματική κατάσταση, η ακρόαση ακόμη και υλικού που πάντοτε του άρεσε και έχει συνηθίσει, μπορεί να γίνει μία ένα καλή ακουστική εμπειρία. Η ανανέωση των στοιχείων της μνήμης μας κάθε φορά που ακούμε το ίδιο μουσικό κομμάτι και τα βιώματα με τα οποία το συνδυάζουμε, βοηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Ένα μουσικό κομμάτι που έχει συνδεθεί με ευχάριστες και ξένοιαστες εμπειρίες, εποχές και γεγονότα θα μας ανεβάζει το ηθικό σε γενικές γραμμές.

Η πιστότητα αναπαραγωγής του ήχου και η αναβάθμιση ενός ηχοσυστήματος δεν είναι επομένως απαραίτητη για τον ανθρώπινο νου και το ακουστικό σύστημα αλλά αποτελεί μία απόλαυση. Η ενασχόληση με μία μουσική συλλογή και η ακρόασή της μέσα από ένα σύστημα υψηλής πιστότητας αποτελεί για το νου μία θετική εμπειρία και δραστηριότητα. Ο ακροατής ανανεώνει το στοιχείο ανάμνησης που διαθέτει αποθηκευμένο στη μνήμη του για ένα μουσικό κομμάτι προσθέτοντας νέα θετικά στοιχεία και «ετικέτες». Η μνήμη δεν λειτουργεί κατά απόλυτο τρόπο όπως θα έκανε μία συσκευή ηχογράφησης. Δεν απαιτείται να ακούσουμε ένα κομμάτι σε υψηλή πιστότητα την πρώτη φορά ώστε να καταγραφεί πιστά στη μνήμη μας. Ακούγοντας όμως το κομμάτι συχνότερα σε υψηλή πιστότητα, το στοιχείο που αποθηκεύουμε στη μνήμη μας για το εν λόγω κομμάτι βελτιώνεται, παρατηρούμε περισσότερες λεπτομέρειες, παρακολουθούμε πιο συγκεντρωμένα την απόδοση κάθε μουσικού οργάνου, φωνής ή ήχου που εμπεριέχει και η συνολική ανάμνηση αυτή αποκτά θετικότερη συναισθηματική αξία. Η αξία που δίνει ο ακροατής στην υψηλή πιστότητα του ήχου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εμπειρία και την απόλαυση που θα του προσφέρει. Δεν είναι τυχαίο πως πολλοί μηχανικοί σχεδιάζουν τα ηχοσυστήματα πιστής αναπαραγωγής ήχου ώστε όχι μόνο να ακούγονται κατάλληλα αλλά και να δείχνουν καλαίσθητα. Η εμπειρία του ακροατή συμπληρώνεται από μία καλαίσθητη εικόνα του ηχητικού εξοπλισμού που διαθέτει. (Εικόνα 2.8)



Εικόνα 2.8

Είναι χρήσιμη επομένως η πιστότητα της αναπαραγωγής του ήχου για τον άνθρωπο; Πέρα από την απόλαυση και την ευχάριστη εμπειρία που μας παρέχει η ακρόαση μουσικής σε υψηλή πιστότητα, πρέπει να σκεπτούμε και μία ακόμη πολύ σημαντική εφαρμογή. Γενικά θέλουμε να διατηρούμε φυσικής μορφής ή ψηφιακά αντίγραφα υψηλής πιστότητας της μουσικής και των ηχητικών ντοκουμέντων τόσο για εμάς όσο και για τις επόμενες γενιές. Πολλά ηχητικά δείγματα είναι ιστορικά και σημαντικά για την πολιτιστική μας κληρονομιά και έχουν αποθηκευτεί σε χρονοκάψουλες (time capsules).

Ακόμη κι αν δεν απολαμβάνουμε καθημερινά και σε κάθε περίπτωση την ακρόαση μουσικής σε υψηλή πιστότητα, κρίνεται απαραίτητο να υπάρχει ένα αρχείο αποθηκευμένο στο οποίο να μπορούμε να ανατρέξουμε όποτε χρειαστεί. Αυτό συμβαίνει με τους περισσότερους χρήστες που θέλουν να διατηρήσουν τη μουσική τους συλλογή σε αρχεία υψηλής πιστότητας. Λόγω περιορισμών στους πόρους αποθηκευτικού χώρου, παρά την εξέλιξη των σκληρών δίσκων και μέσω αποθήκευσης, οι χρήστες πλέον χρησιμοποιούν μη-απωλεστικούς (lossless) αλγόριθμους ψηφιακής συμπίεσης ήχου όπως το FLAC (Free Lossless Audio Codec) που θα δούμε αναλυτικά στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Η διαδικασία αυτή όμως γίνεται και σε παγκόσμια κλίμακα από κρατικούς και μη οργανισμούς όπως το «NRPB (National Recording Preservation Board)» της Αμερικής και η μη-κερδοσκοπική οργάνωση «The Association for Recorded Sound Collections (ARSC)». Η πιστότητα της αναπαραγωγής του ήχου είναι απαραίτητη σε αυτές τις διαδικασίες καθώς απαιτείται να διατηρηθεί ένα όσο το δυνατόν πιστότερο αντίγραφο μουσικών έργων και ηχητικών δειγμάτων για μελλοντική χρήση και αναφορά. Η πιστή αναπαραγωγή του ήχου επομένως είναι απαραίτητη σε εφαρμογές όπως η διατήρηση της

μουσικής κληρονομιάς. Άλλες εφαρμογές είναι η ανάπτυξη ακουστικών βοηθημάτων για ασθενείς και αποδοτικών αλγορίθμων κωδικοποίησης αρχείων ήχου για τη μείωση του αποθηκευτικού χώρου που καταλαμβάνουν χωρίς αισθητές εκπτώσεις στην πιστότητα. Μπορεί να μην το αντιλαμβανόμαστε αυτό το γεγονός στην καθημερινότητά μας όμως θα είμασταν ένα αρκετά πτωχότερο είδος χωρίς τις μελέτες και εφαρμογές αυτές που διασφαλίζουν την πιστή αναπαραγωγή ήχου.

### **Βιβλιογραφία για το 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο:**

This is Your Brain on Music: Understanding a Human Obsession, by Daniel J. Levitin, 1 May 2008

Self-Organization as Basis of Musical Performance, Sound Production, and Perception, by Rolf Bader , Springer International Publishing Switzerland 2013

Πηγές από το διαδίκτυο:

<https://www.boundless.com/physics/textbooks/boundless-physics-textbook/sound-16/sound-intensity-and-level-129/human-perception-of-sound-459-10932/>

<http://consequenceofsound.net/aux-out/high-fidelities-augmenting-music-from-within/>

[http://www.nytimes.com/2011/09/06/science/06sound.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/2011/09/06/science/06sound.html?_r=0)

<http://thevinylfactory.com/features/the-15-most-photogenic-record-collections-of-2015-readers-special/>

[http://high-end-audio-products.blogspot.gr/2012\\_03\\_01\\_archive.html](http://high-end-audio-products.blogspot.gr/2012_03_01_archive.html)

<https://www.loc.gov/programs/national-recording-preservation-board/about-this-program/>

<http://www.arsc-audio.org/index.php>

<http://www.digitalmusicnews.com/2015/12/02/streaming-music-users-dont-care-about-audio-quality-study-finds/>

<https://acousticengineering.wordpress.com/2013/11/01/do-people-care-about-audio-quality/>

---

## Κεφάλαιο 3: Ορισμοί και επεξήγηση βασικών εννοιών, μετρήσιμα μεγέθη

---

### 3.1 Ο ήχος και οι μηχανικές ταλαντώσεις

Σύμφωνα με τον ορισμό του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) 263.1 (1.184):«Ως ήχος ορίζεται η μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μέσο που μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις (π.χ. Ελαστικότητα, εσωτερικής τριβής) κι έχει τέτοιο χαρακτήρα, ώστε μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο της ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα». Σύμφωνα με τον επίκουρο καθηγητή Διονύσιο Πολίτη του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, «ήχος είναι κάθε τι που ακούμε». Επομένως, για τον άνθρωπο, η ακοή ως βασική αίσθηση είναι ένα από τα παράθυρα μέσα από τα οποία αντιλαμβάνεται τον κόσμο. Εν αντιθέσει όμως με τον οφθαλμό που καλύπτεται από βλέφαρα, το ανθρώπινο αυτί παραμένει πάντοτε ενεργό.

«Ο ήχος παράγεται από τη μηχανική ταλάντωση ενός μέσου μετάδοσης, υγρού, στερεού ή αερίου. Το δε μέσο αυτό χαρακτηρίζεται από ελαστικότητα και αδράνεια. Η παραγωγή και διάδοση του ήχου γίνεται μέσω της ταλάντωσης των μορίων του μέσου κι όχι μέσω της μετακίνησης αυτών των μορίων του μέσου. Αυτό αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός κύματος. Όταν για παράδειγμα ο αέρας πάλλεται σαν αποτέλεσμα της μηχανικής ταλάντωσης ενός υλικού, δημιουργούνται μηχανικά κύματα. Αυτές οι μηχανικές κυμάνσεις συλλαμβάνονται από το αυτί μας ως ήχος. Το πλάτος και η συχνότητά τους διαμορφώνουν το ποιόν του ήχου που ακούγεται. Όμως, για να φτάσει ο ήχος από την πηγή στο δέκτη, πρέπει να μεσολαβήσει ένα φέρον μέσο. Αυτό το μέσο διάδοσης συνήθως είναι ο αέρας, αλλά μέσο διάδοσης του ήχου είναι και το νερό και τα στερεά σώματα. Επομένως, χωρίς μέσο διάδοσης δεν είναι δυνατή η μεταφορά του ήχου. Έτσι για παράδειγμα δεν είναι δυνατή η συνομιλία μεταξύ ανθρώπων στο διάστημα ή μέσα σε χώρο όπου υπάρχει κενό αέρος.

Ο ήχος μεταδίδεται στο χώρο ως σφαιρικό διάμηκες κύμα. Εάν θεωρήσουμε μηδενικές απώλειες στο ιδανικό μέσο μετάδοσης, η επιφάνεια της σφαιρικής κατανομής του ηχητικού κύματος μεγαλώνει με το τετράγωνο της ακτίνας. Η επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή του κύματος. Επομένως, ο ήχος είναι ενέργεια. Η ενέργεια αυτή μεταδίδεται υπό μορφή μηχανικής ταλάντωσης από την πηγή του ήχου στο δέκτη της. Ο συνηθέστερος δέκτης ήχου που μας ενδιαφέρει σε πολλές μελέτες είναι το ανθρώπινο αυτί.

Ο ήχος μπορεί να παράγεται από μια πηγή και να συλλαμβάνεται μετά από λίγο από το αυτί μας. Αναφέραμε ότι ο ήχος λαμβάνεται μετά από λίγο χρόνο από το αυτί μας καθώς χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα να μεσολαβήσει προκειμένου να φτάσει το ηχητικό κύμα από την πηγή στο δέκτη του, διαδιδόμενο σε ένα μέσο. Επίσης, το μέσο διάδοσης καθορίζει και τις ιδιότητες του ήχου. Αλλιώς π.χ. ακούγονται οι ήχοι στο νερό, αλλιώς φιλτράρονται και με άλλες ταχύτητες μεταδίδονται» (Πηγή: Φλώρος Ανδρέας, Επίκουρος Καθηγητής, μάθημα: «Ακουστική και Ψυχοακουστική», Διάλεξη 2: «Η φυσική του ήχου»).

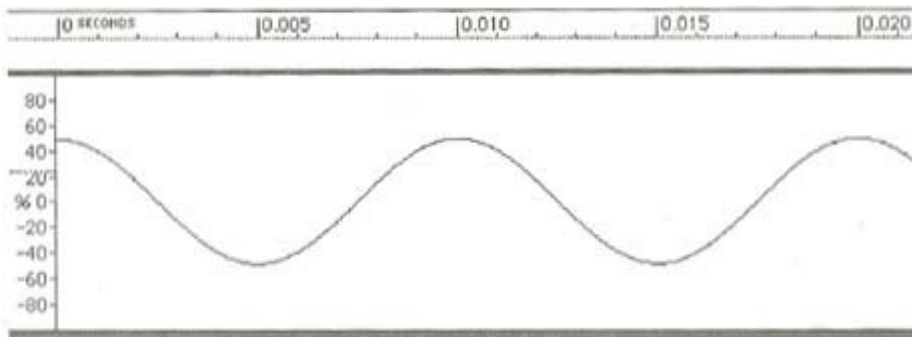
Σε ατμοσφαιρικό ξηρό αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C, η ταχύτητα του ήχου έχει μετρηθεί και είναι 343,2 m/s ή 1235 km/h. Ο πρώτος υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης του ήχου έγινε από τον M.Mersenne το 1633. Ο υπολογισμός αυτός έγινε με βάση το χρόνο μεταξύ της παραγωγής ενός ήχου και της άφιξης της ηχούς του λόγω της ύπαρξης ενός εμποδίου σε σταθερή απόσταση. Η μέτρηση του Mersenne ήταν αρκετά κοντά στη σημερινή ακριβή μέτρηση καθώς προέκυψε ταχύτητα

ήχου 316m/s. Η πρώτη όμως ακριβής μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στον αέρα έγινε από τον Άγγλο κληρικό και φιλόσοφο, William Derham το 18<sup>ο</sup> αιώνα.

«Γενικά, η ταχύτητα του ήχου δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από τις καταστατικές μεταβλητές του συστήματος όπως την πίεση και τη θερμοκρασία» (Μαθιουλάκης, Δ., Συμπιεστά ρευστά, ΕΜΠ, 2000). Επίσης, σε ένα μη ιδανικό αέριο, η ταχύτητα του ήχου μεταβάλλεται με τη συχνότητα του ηχητικού κύματος. Η ταχύτητα αυτή είναι δε ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της απόλυτης θερμοκρασίας του μέσου. Όμως, και το μέσο διάδοσης μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του ηχητικού κύματος. Για παράδειγμα, γνωρίζουμε πως η ταχύτητα μετάδοσης του ήχου στα υγρά και μη-πορώδη στερεά υλικά μέσα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα μετάδοσης στον αέρα. Στο νερό και σε θερμοκρασία 20 °C, η ταχύτητα του ήχου είναι 1,484 m/s , περίπου 4.3 φορές μεγαλύτερη από του αέρα. Στο σίδηρο, και σε θερμοκρασία 20 °C, η ταχύτητα του ήχου είναι 5,120 m/s, περίπου 15 φορές μεγαλύτερη από του αέρα. Στα μη-πορώδη στερεά υλικά, η ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων μεταβάλλεται με την πυκνότητα του μέσου, τη συμπιεστότητα και το συντελεστή ελαστικότητάς του.

«Ο απλούστερος τύπος κύμανσης είναι το ημιτονικό σήμα. Αυτό αντιστοιχεί σε ημιτονοειδές κύμα μίας μόνο συχνότητας κι αποτελεί περισσότερο ιδανική σύλληψη παρά μία πραγματική κατάσταση. Στην πραγματικότητα, όπως έχει αποδειχθεί από την Ανάλυση Fourier, μία πηγή ήχου όπως μια χορδή κιθάρας μπορεί να ταλαντώνεται ταυτόχρονα σε περισσότερες συχνότητες πέραν της θεμελιώδους. Οι συχνότητες ονομάζονται «αρμονικές συχνότητες», το δε πλήθος ή πλάτος τους εξαρτάται από την πηγή ήχου και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της.

Ας δούμε αρχικά ένα απλό ημιτονικό ηχητικό κύμα ή «τόνο» μίας συχνότητας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κύμανση που αντιστοιχεί σε τόνο συχνότητας 100 Hz, δηλαδή 100 περιοδικών κυμάνσεων το δευτερόλεπτο:



Σχήμα 3.1

Το ημιτονικό κύμα είναι ένα περιοδικό σήμα, επομένως ο πρώτος παλμός συνοδεύεται από πολλούς ίδιους παλμούς. Τα περιοδικά κύματα δημιουργούν ήχους που ονομάζονται «τόνοι», όπως είναι οι τόνοι που παράγει η χορδή μιας κιθάρας ή ένα διαπασών.

Στην πράξη, όπως αναφέραμε, αυτοί οι ήχοι που παράγονται δεν περιέχουν μόνο μια συχνότητα, αλλά και μερικές ακόμα παραπλήσιες συχνότητες και πολλαπλάσια αυτών, αλλά μπορούμε προς το παρόν να θεωρήσουμε με ικανοποιητική προσέγγιση πως έχουμε πράγματι παραγωγή απλών τόνων.

Ο ήχος όμως των κυμάτων που με δύναμη πέφτουν στην ακρογιαλιά θεωρείται ως θόρυβος, παρά ως τόνος ή τόνοι, γιατί αποτελείται από πληθώρα μη-περιοδικών κυμάνσεων. Τι είναι όμως ο θόρυβος ως προς το ηχητικό κύμα; Σύμφωνα με τον Ανδρέα Φλώρο, Επίκουρο Καθηγητή του Ιονίου Πανεπιστημίου, ο θόρυβος ορίζεται σαν κάθε ανεπιθύμητος ήχος. Είναι δε δυσάρεστος και προκαλεί ανεπιθύμητες παρενέργειες όπως ενόχληση, δυσκολίες στην επικοινωνία έως και απώλεια ακοής.

Χαρακτηριστικά όμως αναφέρει πως η διάκριση θορύβου και ήχου μπορεί να είναι και υποκειμενικό θέμα για τον άνθρωπο καθώς η μουσική κάποιου μπορεί να αποτελεί θόρυβο για το γείτονά του. Ο υπερβολικός και ενοχλητικός περιβαλλοντικός θόρυβος που προκαλείται από τον άνθρωπο, τα ζώα ή από μηχανές και διαταράσσει τη δραστηριότητα ή την ισορροπία του ανθρώπου και τη ζωή των ζώων, ονομάζεται «ηχορρύπανση». Εμείς φυσικά δε θα αναφερθούμε σε υποκειμενικές ή κοινωνικές θεωρήσεις διαφόρων ήχων και ειδών μουσικής ως θορύβων αλλά θα θεωρήσουμε το θόρυβο ως ανεπιθύμητη συνιστώσα ενός ηχητικού σήματος και θα δούμε τρόπους αντιμετώπισης διαφόρων τύπων θορύβου.» (Πηγή: <http://meteora.csd.auth.gr/dpolitis/ds/thewriapf.htm>)

## 3.2 Το πλάτος και το φάσμα του ήχου

### 3.2.1 Η ένταση του ήχου

Ο ήχος που διαδίδεται με κυματικές ιδιότητες εν τέλει λαμβάνεται από το αυτί μας και κατ' αυτό τον τρόπο αντιλαμβανόμαστε την ένταση ενός ήχου. Θα επιχειρήσουμε να ορίσουμε και κατόπιν να μετρήσουμε την ένταση αυτή του ήχου.

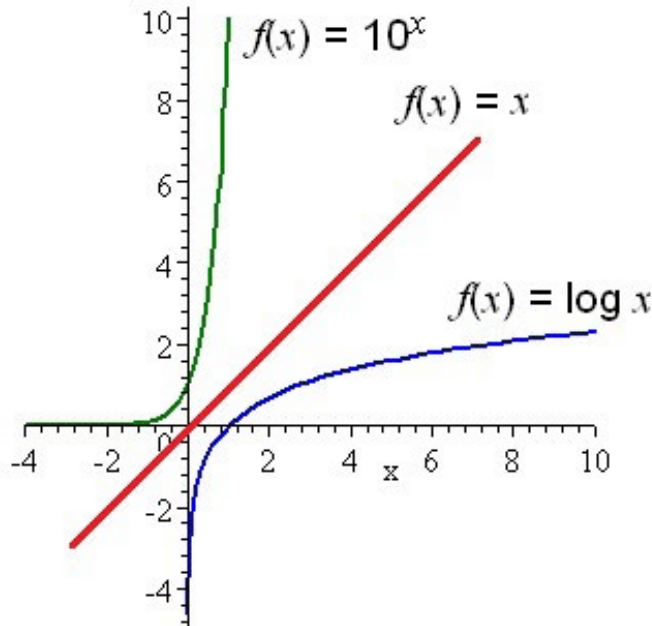
«Μία πηγή ήχου παράγει ηχητικά μηχανικά κύματα. Η ποσοτική περιγραφή του ηχητικού κύματος γίνεται μέσω της ακουστικής πίεσης, έστω « $p$ ». Ακουστική πίεση είναι η δημιουργούμενη από την μετακίνηση των μορίων του αέρα υπερπίεση ή υποπίεση σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση. Η ακουστική πίεση είναι βαθμωτό μέγεθος και σε κάποιο σημείο του χώρου είναι συνάρτηση του χρόνου. Ατμοσφαιρική πίεση ή «Βαρομετρική πίεση» ονομάζεται η πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα, με το βάρος της, στην επιφάνεια της Γης, όπως αυτό καθορίζεται και από την ατμοσφαιρική κυκλοφορία. Στην επιφάνεια της Γης, η ατμοσφαιρική πίεση ισούται, κατά μέσον όρο με το βάρος στήλης ύδατος ύψους 11 μέτρων (m) περίπου, ή με το βάρος στήλης υδραργύρου ύψους 760 χιλ. (mm). Μονάδα μέτρησης της πίεσης είναι το «Pascal» (N/τετραγωνικό μέτρο). Ως πλάτος της πίεσης ορίζεται η μέγιστη διαφορά της στιγμιαίας πίεσης από την ατμοσφαιρική πίεση και σχετίζεται άμεσα με το πόσο έντονα θα «ακουσθεί» ένας ήχος.

Η ακουστική πίεση είναι το μέγεθος που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αυτί. Την ακουστική πίεση καταγράφουν και οι ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς που ονομάζουμε «μικρόφωνα» ως δέκτες μηχανικών κυμάτων ήχου. Τα μικρόφωνα χρησιμοποιούμε για να μετατρέψουμε τον ήχο σε ηλεκτρικό σήμα και θα τα δούμε λίγο αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Ένα βασικό σημείο της ηχητικής κύμανσης, είναι η έντασή της, δηλαδή το πλάτος της. Όσο μεγαλύτερο το πλάτος της κύμανσης, τόσο ισχυρότερα ακούγεται ο ήχος όταν ληφθεί από το ανθρώπινο αυτί. Το πλάτος ενός ηχητικού κύματος ή σήματος είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που θα μας απασχολήσουν.

Ως ένταση ήχου ορίζεται η ισχύς του ηχητικού κύματος ανά μονάδα επιφάνειας ή αλλιώς η ενέργεια που μεταφέρει το ηχητικό κύμα ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου. Η ένταση μετράται στο σύστημα μονάδων S.I. σε  $W/m^2$  (Βατ ανά τετραγωνικό μέτρο). Η μονάδα Ντεσιμπέλ χρησιμοποιείται για να εκφραστεί η στάθμη της έντασης ενός ήχου. Η κλίμακα μέτρησης των Ντεσιμπέλ ((decibel, συντομογραφία «dB»), είναι λογαριθμική. Ένας λόγος για τον οποίο γίνεται χρήση μιας λογαριθμικής κλίμακας, είναι το γεγονός ότι το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται τεράστιο εύρος έντασης ηχητικών σημάτων. Επομένως, μόνο με τη χρήση λογαριθμικής κλίμακας μπορούμε να έχουμε συνοπτική εικόνα του μεγάλου εύρους σταθμών εντάσεως ήχου που αντιλαμβανόμαστε.» (Πηγή: [http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts\\_acoustics\\_lesson02.pdf](http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts_acoustics_lesson02.pdf))

Στο παρακάτω σχήμα 3.2 παρατηρούμε στο ίδιο γράφημα μία γραμμική συνάρτηση  $f(x) = x$ , μία εκθετική συνάρτηση  $f(x) = 10^x$  με βάση το 10 και μία λογαριθμική συνάρτηση  $f(x) = \log x$  με βάση το 10.



Σχήμα 3.2

Δε θα υπεισεέλθουμε σε πολλές λεπτομέρειες των λογαριθμικών κλιμάκων. Απλώς θα αναφέρουμε σε αυτό το σημείο ότι το Ντεσιμπέλ είναι μονάδα η οποία ακολουθεί λογαριθμική κλίμακα στην οποία εκφράζεται η διαφορά στάθμης μίας φυσικής ποσότητας. Συνήθως χρησιμοποιείται για να εκφράσει λόγο ισχύων ή εντάσεων. Η κύρια χρήση της μονάδας είναι στην ακουστική και στην ηλεκτρονική. Το όνομά της μονάδας δόθηκε προς τιμήν του Γκράχαμ Μπελ, πρωτοπόρου εφευρέτη της τηλεφωνίας, ενώ το πρόθεμα ντέσι δηλώνει πως είναι δεκαδική υποδιαίρεση της κύριας μονάδας Μπελ. Η μονάδα Μπελ δεν χρησιμοποιείται γιατί είναι δύσχρηστη στους υπολογισμούς και γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται αποκλειστικά το dB. Η στάθμη έντασης ήχου σε Ντεσιμπέλ ορίζεται ως το δεκαπλάσιο του δεκαδικού λογαρίθμου του λόγου της έντασης του ήχου προς την ένταση αναφοράς του κατωφλίου ακουστότητας. Η ένταση του κατωφλίου ακουστότητας έχει οριστεί ίση με  $I_0 = 10^{-12}$ , W/m<sup>2</sup> και αντιστοιχεί σε ηχητική πίεση 20 μPa ή τα 0dB της λογαριθμική κλίμακας. Η έκφραση σε Ντεσιμπέλ έντασης  $I_1$  ενός ήχου δίνεται από την σχέση:

$$I_{dB} = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_0}$$

Τύπος 3.1

Όπου  $I_0$  είναι η ένταση του κατωφλίου ακουστότητας που αναφέραμε προηγουμένως κι αντιστοιχεί σε ηχητικό σήμα οριακά μη-αντιληπτό από το αυτί μας. Επειδή όμως το αυτί μας είναι δέκτης ηχητικής πίεσης, στις μετρήσεις έντασης του ήχου πρέπει πάντοτε να υπεισεύχεται και η μέτρηση της απόστασης του ακροατή από τη φυσική πηγή του ηχητικού κύματος. Η ένταση του ήχου μειώνεται καθώς απομακρύνεται ο ακροατής από την πηγή που παράγει το ηχητικό κύμα. Αν αναφερόμαστε σε μεγέθη πεδίου όπως η ηχητική πίεση, η στάθμη της μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της απόστασης, έστω «r». Αν αναφερόμαστε σε μεγέθη ενέργειας όπως η ένταση του ήχου, η στάθμη της μειώνεται με την αύξηση του τετραγώνου της απόστασης, «r<sup>2</sup>». Επίσης, το μέσο διάδοσης ενός ηχητικού σήματος παρουσιάζει απόσβεση και έχει μία ακουστική σύνθετη αντίσταση. Ακουστική σύνθετη αντίσταση είναι η μέτρηση της αντίθεσης που εμφανίζει το μέσο στη ροή του ηχητικού κύματος όταν εφαρμόζεται σε αυτό μία ακουστική πίεση. Ο αέρας έχει ακουστική σύνθετη αντίσταση ίση με  $Z_0 = 400 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ . Η



στάθμη της έντασης ενός ήχου μειώνεται κατά προσέγγιση 6 deciBel κάθε φορά που διπλασιάζεται η απόσταση της πηγής και του δέκτη του ηχητικού κύματος. Επομένως, δεν έχει νόημα η μέτρηση της στάθμης της έντασης ήχου χωρίς να σημειωθεί σε ποια απόσταση από την πηγή λάβαμε τη μέτρηση. Για τη μέτρηση της στάθμης της έντασης του ήχου λαμβάνεται συνήθως η απόσταση πηγής-δέκτη του ενός μέτρου (1m) ως απόσταση αναφοράς. Η μέτρηση αυτή γίνεται με ειδικά όργανα μέτρησης που ονομάζονται «ντεσιμπελόμετρα». Τα ντεσιμπελόμετρα μετρούν τη στάθμη της ηχητικής πίεσης (Sound Pressure Level, «SPL»). Παρακάτω βλέπουμε τη διαφορά στη μέτρηση της στάθμης ηχητικής πίεσης «L<sub>p</sub>» και της στάθμης ηχητικής έντασης «L<sub>I</sub>» σε dB:

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{ in dB} = L_I = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ in dB}$$

Τύπος 3.2

Παρακάτω παραθέτουμε έναν πίνακα μερικές χαρακτηριστικές μετρήσεις στάθμης ηχητικής έντασης και πίεσης. Στις μετρήσεις αυτές σημειώνονται και οι σχετικές αποστάσεις πηγής και δέκτη. (Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sound\\_pressure](https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure)).

Πηγές ήχου (με σχετικές αποστάσεις όπου σημειωμένες απαιτείται)	Σ τ ά θ μ η η χ η τ ι κ ή ς πίεσης SPL (L <sub>p</sub> ) σε dB	Ηχητική πίεση p σε N/m <sup>2</sup> = Pascal	Ένταση ήχου σε W / m <sup>2</sup>
Αεροπλάνο Τζετ, 50 m απόσταση	140	200	100
Κατώφλι πόνου	130	63.2	10
Κατώφλι ενόχλησης	120	20	1
Αλυσοπρίονο, 1 m απόσταση	110	6.3	0.1
Ντίσκο, 1 m από τα ηχεία	100	2	0.01
Diesel φορτηγό, 10 m	90	0.63	0.001
Δρόμος συχνής κυκλοφορίας, 5 m απόσταση	80	0.2	0.000 1
Ηλεκτρική σκούπα, απόσταση 1 m	70	0.063	0.000 01
Συνομιλία σε απόσταση 1 m	60	0.02	0.000 001
Ήχοι σε ένα μέσο σπίτι	50	0.006 3	0.000 000 1
Εντός μία ήσυχης βιβλιοθήκης	40	0.002	0.000 000 01
Εντός ενός μέσου υπνοδωματίου το βράδυ	30	0.000 63	0.000 000 001
Εξωτερικός θόρυβος εντός ενός στούντιο εγγραφής προγράμματος τηλεόρασης.	20	0.000 2	0.000 000 000 1
Θρόισμα φύλλων σε μεγάλη απόσταση	10	0.000 063	0.000 000 000 01
<b>Κατώφλι ακουστότητας</b>	<b>0</b>	<b>0.000 02</b>	<b>0.000 000 000 001</b>

Πίνακας 3.1

Παρατηρούμε ότι το «κατώφλι του πόνου» είναι μετρημένο στα 130dB σε απόσταση 1m από την πηγή ήχου. Το κατώφλι πόνου του ανθρώπινου αυτιού λόγω έντασης ήχου κυμαίνεται ανάλογα την ευαισθησία του αυτιού από τα 120dB έως τα 140dB. Έκθεση σε ήχους πάνω από 120dB στο 1m είναι επικίνδυνη και μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα ακοής ή και κώφωση. Επίσης παρατεταμένη και συνεχής έκθεση σε ήχους άνω των 90dB δημιουργεί μακροπρόθεσμα προβλήματα στην ακοή σύμφωνα με σχετικές ιατρικές μελέτες. Με την πάροδο του χρόνου, το ανθρώπινο αυτί γίνεται ολοένα και λιγότερο ευαίσθητο με αποτέλεσμα να αντιλαμβάνεται κυρίως μεγαλύτερες μεταβολές στην αλλαγή της στάθμης της έντασης του ήχου. Στατιστικά, έχει μελετηθεί η ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού και στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε την αντίληψη που έχει το αυτί μας στις μεταβολές σε decibel της στάθμης της έντασης του ήχου:

**Αντίληψη των αυξήσεων στάθμης της έντασης του ήχου σε κλίμακα decibel**

Μη αντιληπτή μεταβολή	1dB
Οριακά αντιληπτή μεταβολή	3dB
Ξεκάθαρα αντιληπτή μεταβολή	5dB
Περίπου διπλάσια μεταβολή	10dB
Περίπου τετραπλάσια μεταβολή	20dB

Πίνακας 3.2

Παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα 3.2 ότι για να αντιληφθούμε ότι μία μεταβολή της στάθμης της έντασης του ήχου πρέπει η πηγή του ήχου να αυξήσει τη στάθμη της κατά 3 decibel. Αυτή η αύξηση κατά 3dB, μεταφράζεται σε μεγέθη ισχύος ως διπλασιασμός της ισχύος σε Watt. Ο διπλασιασμός αυτός προκύπτει μαθηματικά από τον εξής υπολογισμό λογαρίθμου του 2 με βάση τον τύπο 3.2 που είδαμε :  $10\log_{10}(2) = 3,0103 \text{ dB}$ . Επομένως, με αυτό τον υπολογισμό παρατηρούμε ότι για παράδειγμα ότι ο διπλασιασμός της ισχύος της πηγής του ήχου όπως για παράδειγμα, αύξηση της ισχύος του στερεοφωνικού μας συγκροτήματος από τα 50 Watt στα 100 Watt, δεν συνεπάγεται διπλασιασμό της στάθμης έντασης ήχου που αντιλαμβανόμαστε. Στην ευρεία αγορά καταναλωτικών προϊόντων τεχνολογίας hi-fi, τα συμπεράσματα αυτά του πίνακα 3.2 δεν είναι πολύ δημοφιλή για λόγους παραγωγής και πώλησης μηχανημάτων ενίσχυσης κυρίως για λόγους προώθησης και πωλήσεων.

Εντούτοις, στο χώρο του επαγγελματικού ήχου και των συστημάτων δημοσίων ανακοινώσεων «ΡΑ» από τα αγγλικά «Public announcement» ή «public address system», γίνεται χρήση μηχανημάτων ενίσχυσης του ήχου με ισχύ αρκετών χιλιάδων Watt (kW). Η χρήση αυτή γίνεται ακριβώς επειδή ο διπλασιασμός της αντιληπτής από το μέσο αυτί στάθμης του ήχου, απαιτεί 10dB αύξηση της έντασης ήχου που μεταφράζεται σε δεκαπλασιασμό της ισχύος σύμφωνα με τον παρακάτω υπολογισμό λογαρίθμου:  $10\log_{10}(10) = 10 \text{ dB}$ .

### 3.2.2 Το φάσμα του ήχου

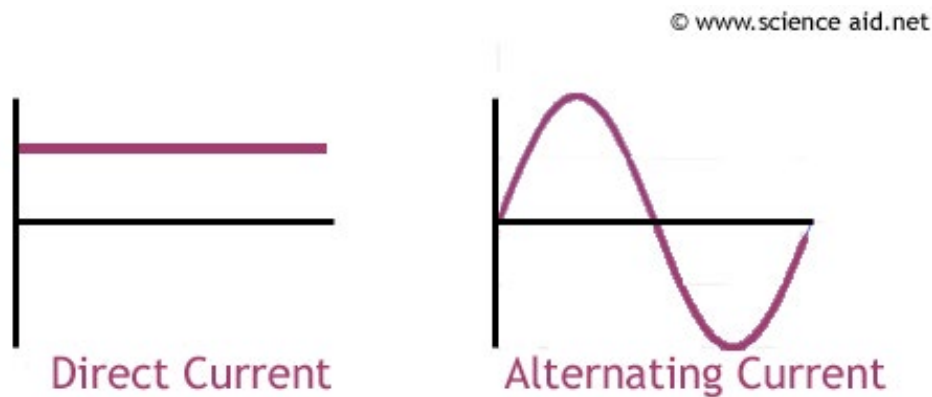
«Ο ήχος, όπως τον αντιλαμβανόμαστε καθημερινά, δεν έχει ως άμεσα αντιληπτό μέγεθος μόνο την έντασή του. Ένα επιπλέον στοιχείο που αντιλαμβανόμαστε ευθύς αμέσως είναι η συχνотική συμπεριφορά του σήματος που μας επιτρέπει να κατατάξουμε τις φωνές σε «μπάσες» ή «οξείες» και τους ήχους σε «στριγγλούς» ή «μουντούς». Το δεύτερο βασικό λοιπόν γνώρισμά του ηχητικού σήματος είναι η συχνότητά του.» (Πηγή: <http://meteora.csd.auth.gr/dpolitis/ds/thewriapf.htm>)

Ένας ήχος που ακούμε μπορεί να περιέχει ιδανικά μία συχνότητα, έναν τόνο ή μπορεί πρακτικά να περιέχει πολύ περισσότερες συχνότητες και πολλαπλάσια αυτών. Το αυτί μας όμως μπορεί να διακρίνει αρκετές συχνότητες και αντιλαμβανόμαστε τότε ένας ήχος είναι ένα απλός τόνος και τότε είναι σύνθεση διαφόρων συχνοτήτων ή θόρυβος. Ένας ηχητικό σήμα μπορεί να περιγραφεί όπως είδαμε και προηγουμένως στο πεδίο του χρόνου. Ένας απλός ημιτονοειδής τόνος μίας συχνότητας παριστάνεται στο πεδίο του χρόνου ως ένα ημίτονο που έχει μία συγκεκριμένη και σταθερή περίοδο «T» μετρούμενη σε δευτερόλεπτα (ή «s», από το αγγλικό «seconds»). Αυτή την εικόνα είδαμε προηγουμένως στο σχήμα 3.1.

Το αντίστροφο της περιόδου «T» καλείται συχνότητα «f» από το αγγλικό «frequency» και άρα ισχύει ο μαθηματικός απλός τύπος:  $f = 1/T$ . Η συχνότητα f μετριέται σε Χερτζ (Hertz). «Hertz» ονομάζεται στη Φυσική, η μονάδα μέτρησης συχνότητας οποιουδήποτε σύντομου περιοδικού φαινομένου. Η μονάδα, που συμβολίζεται διεθνώς με τα λατινικά γράμματα Hz, αφορά περίοδο ενός δευτερολέπτου και είναι ίση με «ένα κύκλο ανά δευτερόλεπτο». Με πιο απλά λόγια, συχνότητα ενός Hz σημαίνει ότι το φαινόμενο που μελετάμε συμβαίνει μια φορά το δευτερόλεπτο, ή διαφορετικά ότι μια πλήρης ταλάντωση ολοκληρώνεται σε χρόνο ενός δευτερολέπτου. Επομένως 1 Hz ισούται με  $1 \text{ s}^{-1}$ . Το χερτζ ανήκει στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων μέτρησης SI. Σε μονάδες χερτζ μετρούνται οι συχνότητες τόσο των μηχανικών περιόδων όπως οι ταλαντώσεις ή τα κύματα όσο και των εναλλασσόμενων ηλεκτρικών ρευμάτων, των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (φως, ραδιοκύματα) καθώς και των ηχητικών κυμάτων. Το όνομα της μονάδας αυτής προτάθηκε στην αρχή της δεκαετίας του 1920 από Γερμανούς φυσικούς προς τιμή του μεγάλου φυσικού του 19ου αιώνα, του Χάινριχ Χερτζ (1857-1894), ο οποίος έκανε σημαντικές επιστημονικές ανακαλύψεις στην ηλεκτρομαγνητική επιστήμη κι εργάστηκε πάνω στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η μονάδα Hz τέθηκε σε ισχύ από την Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Εταιρεία τον Οκτώβριο του 1933 προς αντικατάσταση της προηγούμενης ισότιμης μονάδας «κύκλος ανά δευτερόλεπτο» που συνεχίζει παρά ταύτα να χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Σημειώνεται ότι σε κάποιες σπάνιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται αντ' αυτών και η μονάδα φρενέλ (Fresnel), η οποία είναι πολλαπλάσια του χερτζ, και της οποίας μία μονάδα ισούται με  $10^{12}$  Hz.

Ας δούμε σε αυτό το σημείο τι είναι ως μέγεθος η συχνότητα του ηχητικού σήματος. « Η συχνότητα είναι ο αριθμός των παλμικών δονήσεων του ηχητικού σήματος ανά δευτερόλεπτο. Για παράδειγμα, μία συχνότητα  $f = 440\text{Hz}$  αντιστοιχεί σε έναν τόνο ημιτονικό με περίοδο  $1/440 = 0,002272$  δευτερόλεπτα. Στο χώρο της μουσικής, η συχνότητα των 440 Hz είναι πολύ σημαντική. Η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί στη νότα Λα ή τονικό ύψος «Α». Τα περισσότερα σύγχρονα μουσικά όργανα κουρδίζονται με βάση αυτή τη συχνότητα της νότας Λα.

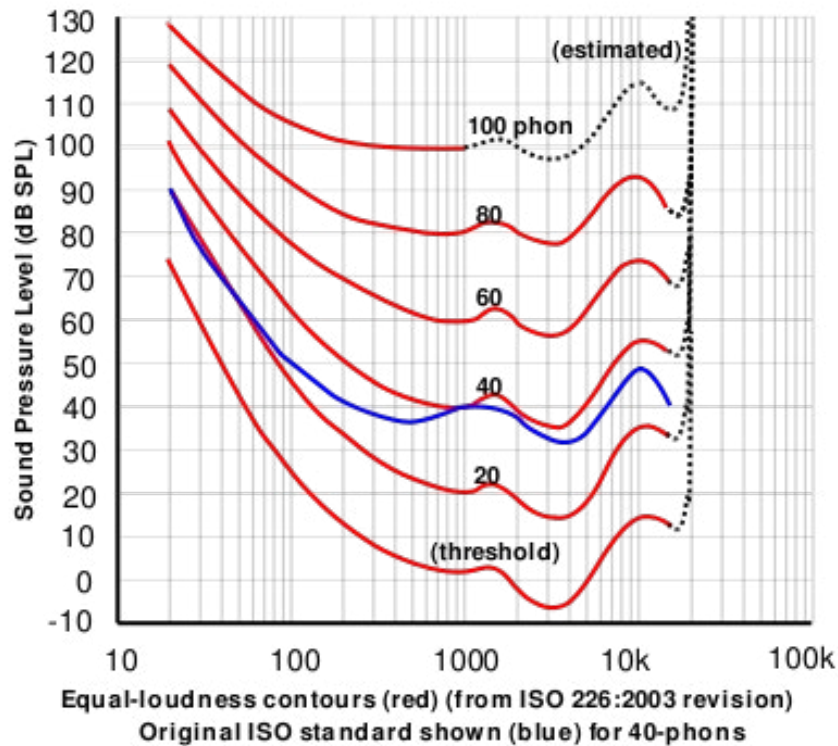
Η νότα Λα αντιστοιχεί επομένως σε ένα απλό ημιτονοειδές ηχητικό κύμα συχνότητας 440Hz ιδανικά. Υπάρχουν και ειδικά μηχανικά όργανα, τα διαπασών, που παράγουν αυτή τη νότα μόλις τα κτυπήσουμε ώστε να διεγερθούν και να αρχίσει η ταλάντωσή τους στα 440Hz. Μπορεί όμως να παράγουν και πολλαπλάσια αυτής της συχνότητας κατά την ταλάντωσή τους. Τα πολλαπλάσια αυτά ονομάζονται «αρμονικές» συχνότητες για να διακριθούν από τη «θεμελιώδη» συχνότητα των 440Hz που μας ενδιαφέρει. Υπάρχουν περιττές και άρτιες αρμονικές συχνότητες. Οι περιττές (στα Αγγλικά «Odd») αρμονικές συχνότητες είναι τα περιττά πολλαπλάσια μίας θεμελιώδους συχνότητας f όπως τα  $3f, 5f, 7f$  και ούτω καθεξής. Για παράδειγμα, περιττή αρμονική της νότας Λα θα ήταν η συχνότητα των 1320Hz. Οι άρτιες (στα Αγγλικά «even») αρμονικές συχνότητες είναι τα άρτια πολλαπλάσια μίας θεμελιώδους συχνότητας f όπως τα  $0f, 2f, 4f$  και ούτω καθεξής. Για παράδειγμα, περιττή αρμονική της νότας Λα θα ήταν η συχνότητα των 880Hz. Η συχνότητα  $0f = 0\text{Hz}$  είναι η σταθερή ή DC συνιστώσα ενός σήματος και δεν είναι ημιτονοειδής. Στο παρακάτω σχήμα 3.3 παρατηρούμε τα γραφήματα μίας σταθερής (DC, από το αγγλικό «Direct Current») συνάρτησης και μίας ημιτονοειδούς εναλλασσόμενης (AC, από το αγγλικό «Alternating current») συνάρτησης  $f(x) = \sin x$ .



Σχήμα 3.3

Η θεμελιώδης συχνότητα είναι και αυτή μία περιττή συχνότητα  $1f$ . Σε συμμετρικά συστήματα που δέχονται στην είσοδό τους ένα ημίτονο μίας θεμελιώδους συχνότητας, μόνο ένα είδος αρμονικών συχνοτήτων μπορεί να εμφανίζεται στην έξοδό τους. Αν έχουμε τόσο περιττές όσο και άρτιες αρμονικές συχνότητες της θεμελιώδους στην έξοδο ενός συστήματος, τότε ονομάζουμε «ασύμμετρο» το εν λόγω σύστημα. Τα συστήματα που δέχονται μία συχνότητας στην είσοδό τους και παράγουν στην έξοδό τους περισσότερες αρμονικές ονομάζονται πολλαπλασιαστές συχνότητας. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται συχνά για να μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά ενός ήχου και να τον μετατρέψουν για παράδειγμα από ημιτονοειδές σε τετραγωνικό σήμα.

Το ανθρώπινο αυτί μπορεί να αντιληφθεί ήχους που κυμαίνονται σε ένα εύρος από 20 Hz ως 20 KHz = 20000Hz, αν και σε ιδανικές συνθήκες στο εργαστήριο είναι δυνατή η ακοή ήχων από τα 12 Hz όταν αυτοί παράγονται σε καθαρή κυματική μορφή και εκπέμπονται σε πολύ μεγάλη ένταση. Αυτό το εύρος συχνοτήτων διαφέρει από άτομο σε άτομο, ειδικά στο άνω κατώφλι του, καθώς στατιστικά πολλοί άνθρωποι αντιλαμβάνονται ήχους συχνότητας έως 16KHz. Το φάσμα φτάνει μέχρι τα 20.000Hz στα περισσότερα παιδιά και σε μερικούς ενήλικες, αρχίζει όμως να συρρικνώνεται σταθερά από την ηλικία περίπου των 8 ετών, με την εντονότερη συρρίκνωση να παρατηρείται στις ψηλές συχνότητες. Ακόμα, υπάρχει διαφορά ανάμεσα στην ευαισθησία στον ήχο ανάμεσα στα φύλα, με τις γυναίκες να έχουν περισσότερη ευαισθησία στις ψηλές συχνότητες. Η ευαισθησία στον ήχο εξαρτάται επίσης από την συχνότητα, όπως δείχνουν οι καμπύλες ίσης ακουστότητας (Equal-loudness contours στα αγγλικά) των Fletcher και Munson. Οι καμπύλες ίσης ακουστότητας χαράσσονται με ειδική μέτρηση της στάθμης ηχητικής πίεσης σε dB (SPL) από έναν ακροατή ή καλύτερα από στατιστικά μεγάλα δείγματα ακροατών. Ο ακροατής ακούει καθαρούς σταθερούς τόνους μίας συχνότητας κάθε φορά. Οι συχνότητες των τόνων επιλέγονται ώστε να καλύπτεται όλο το ακουστικό φάσμα. Ο ακροατής ακούει τους τόνους και ρυθμίζει την ένταση των ακουστικών του ώστε να αντιλαμβάνεται όλους τους τόνους σε μία σταθερή ένταση μετρούμενη σε «rphon». Το «rphon» είναι η μονάδα μέτρησης της στάθμης της ακουστότητας ενός τόνου που αποτελείται από μία και μόνο συχνότητα. Το rphon προτάθηκε από τον Αμερικανό ψυχολόγο Stanley Smith Stevens με σκοπό να αντισταθμιστεί η επιρροή της μεταβολής της συχνότητας στην αντίληψη της στάθμης της ακουστότητας ή έντασης ενός τόνου και καθιερώθηκε από τα διεθνή πρότυπα DIN 45631 και ISO 532. Κατά αυτό τον τρόπο και μετά από αρκετές έρευνες και μετρήσεις δημιουργήθηκε το διεθνές πρότυπο ISO 226:2003 για τις καμπύλες ίσης ακουστότητας. Παρακάτω, στο σχήμα 3.4, βλέπουμε τις καμπύλες αυτού του διεθνούς προτύπου συγκρινόμενες με την παλαιότερη καμπύλη των 40 phons.» (Πηγή: [http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/8171/3/Nimertis\\_Kompogiannis\(ele\).pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/8171/3/Nimertis_Kompogiannis(ele).pdf))



Σχήμα 3.4

Η εξέταση των ορίων του ακουστού φάσματος και της σταδιακής αλλοίωσής τους γίνεται με το ακογόγραμμα, κατά το οποίο εκπέμπονται ήχοι διαφορετικών συχνοτήτων σε σταδιακά μειωμένη ένταση.

Επομένως το ανθρώπινο αυτί λειτουργεί ως ένα φυσικό φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων περίπου 20Hz-20000Hz. Μπορούμε όμως να αντιληφθούμε και ήχους ή «δονήσεις» όπως λέμε με συχνότητες κάτω των 20Hz με άλλα όργανα του σώματός μας όπως τη σπονδυλική στήλη. Οι ήχοι που έχουν συχνότητα χαμηλότερη από το κάτω όριο του συχνοτικού εύρους της ανθρώπινης ακοής ονομάζονται υπόηχοι (στα αγγλικά «Infrasounds»). Οι υπόηχοι ταξιδεύουν αρκετά μακριά εντός της ατμόσφαιρας της Γης και δεν απορροφώνται από αυτή. Οι ήχοι που έχουν συχνότητα υψηλότερη από το άνω όριο του συχνοτικού εύρους της ανθρώπινης ακοής ονομάζονται υπέρηχοι (στα αγγλικά «Ultrasounds»). Οι υπέρηχοι έχουν απασχολήσει έντονα τους επιστήμονες καθώς έχουν μεγάλη εφαρμογή στην ιατρική και την ακτοπλοΐα. Στην ιατρική, χρησιμοποιούμε υπέρηχους για την εξέταση ασθενών και εγκύων γυναικών καθώς και θεραπεία νεφρών, κάτι που δεν ήταν δυνατό στο παρελθόν. Άλλα όντα του ζωικού βασιλείου όπως οι νυχτερίδες ακούν κι αντιλαμβάνονται υπέρηχους έως και 200KHz και μάλιστα παράγουν υπέρηχους για να κατευθύνονται και να εντοπίζουν την απόστασή τους από εμπόδια τη νύχτα. Την ίδια κατά κανόνα τεχνική εύρεσης της ακριβούς απόστασης με την παραγωγή και λήψη κατάλληλων υπερήχων χρησιμοποιούν τα ηχοεντοπιστικά συστήματα sonar (sound navigation and ranging) της ακτοπλοΐας. Τα sonar είναι ηλεκτροακουστικές συσκευές που εκμεταλλεύονται τη διάδοση των κυμάτων ηχητικής ενέργειας μέσα στη θαλάσσια μάζα, όπως ακριβώς τα συστήματα ραντάρ και ηλεκτρονικού πολέμου εκμεταλλεύονται τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα και γενικότερα στον ελεύθερο χώρο. Η χρήση των συστημάτων sonar γίνεται για τον εντοπισμό, ανίχνευση, αναγνώριση, ταξινόμηση και παρακολούθηση υποβρυχίων σκαφών και διαφόρων αντικειμένων, την ακουστική χαρτογράφηση του βυθού, τη ναυτιλία πλοίων επιφανείας καθώς επίσης και τις υποθαλάσσιες επικοινωνίες και τηλεμετρία.

Πάντως οι πιο χρήσιμες συχνότητες για τον άνθρωπο βρίσκονται κάτω από τα 10 KHz. Σε αυτό το μέρος του ακουστικού φάσματος εντοπίζονται οι συχνότητες που έχουν να κάνουν με την ομιλία,

την μουσική ακόμα και με τους διάφορους θορύβους. Η ανθρώπινη φωνή συνήθως εκτείνεται σε ένα εύρος συχνοτήτων από 80 Hz έως 14 kHz περίπου. Ο κλάδος της τηλεφωνίας έλαβε από νωρίς υπόψιν του αυτό το χαρακτηριστικό ορίζοντας ως εύρος φωνής ή εύρος «στενής ζώνης» (narrow band στα Αγγλικά) το φάσμα συχνοτήτων από 300 Hz έως 3.4 kHz. Κατά αυτό τον τρόπο μπορεί να μεταδοθεί χωρίς ιδιαίτερες αλλοιώσεις στα χαρακτηριστικά της η ανθρώπινη ομιλία σε μεγάλες αποστάσεις μέσω του τηλεφωνικού δικτύου.

Ο παρακάτω πίνακας δίνει μια ιδέα για το συχνοτικό περιεχόμενο διαφόρων ηχητικών πηγών.

Πηγή ήχου	Εύρος συχνοτήτων (σε Hz)
Ανθρώπινη φωνή	70-2000
Πιάνο	30-3500
Βιολί	200-3000
Φλάουτο	260-3000
Εκκλησιαστικό όργανο	16-4000

### 3.3 Η πιστότητα του ήχου, ορισμός, βασικές έννοιες και μέτρηση της πιστότητας του ήχου

#### 3.3.1 Η πιστότητα

Στις ενότητες 3.1 και 3.2 είδαμε τον ήχο κυρίως ως μηχανικό κύμα και αναλύσαμε δύο βασικά χαρακτηριστικά του, το πλάτος και το φάσμα συχνοτήτων του. Στη συνέχεια θα δούμε τη μετατροπή ενός μηχανικού ηχητικού κύματος σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα ώστε να μπορέσουμε να αναλύσουμε σε βάθος αρκετές ακόμη παραμέτρους του. Σκοπός μας είναι να εντοπίσουμε ποιες παράμετροι του ηλεκτρικού σήματος παίζουν σημαντικό ρόλο στην πιστή αναπαραγωγή του ήχου. Επομένως, σε αυτό το σημείο πρέπει να ορίσουμε την πιστότητα του ήχου ως έννοια και να προσπαθήσουμε να βρούμε με ποιο τρόπο μπορούμε να έχουμε μία όσο το δυνατόν πιστότερη αναπαραγωγή ήχου.

Η πιστότητα είναι παραδοσιακά η αρετή ενός ανθρώπου να είναι έμπιστος απέναντι σε άλλους. Στα αγγλικά, η πιστότητα μεταφράζεται ως «Fidelity» από την Λατινική λέξη «fidēlis» που σημαίνει «έμπιστος». Σύμφωνα με την κυρία Ειρήνη Δ. Λειμόνη, Δρ. Βιολογίας, η πιστότητα είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο χαρακτηριστικό ποιότητας μίας αναλυτικής μεθόδου. Η πιστότητα εκφράζει το βαθμό της συμφωνίας μεταξύ των αποτελεσμάτων ανεξάρτητων εφαρμογών της μεθόδου υπό ρητά καθορισμένες συνθήκες. Ως μία παράμετρος ποιότητας της ανάλυσης, η πιστότητα μπορεί να περιγραφεί ως η ποσότητα που μετρά τη διασπορά (dispersion) των αποτελεσμάτων, όταν η αναλυτική μεθοδολογία επαναλαμβάνεται σε ένα δείγμα. Η διασπορά των αποτελεσμάτων μπορεί να προκληθεί από πολλές πηγές. Είναι κοινή πρακτική στην περιγραφή της πιστότητας να λαμβάνουμε υπόψη μόνο τις πηγές που προκαλούν τυχαίες διακυμάνσεις (random fluctuations) στη μεθοδολογία. Σύμφωνα με το «ελεύθερο λεξικό», πιστότητα είναι η ιδιότητα του πιστού, επομένως αυτού που αναπαράγει νοήματα, μέσα, αγαθά ή λόγο με μεγάλη ακρίβεια.

Στο χώρο της επιστήμης, πιστότητα είναι ο βαθμός στον οποίο μία μοντελοποίηση ή προσομοίωση αναπαράγει την κατάσταση και συμπεριφορά ενός πραγματικού φυσικού φαινομένου. Γι αυτό το λόγο η πιστότητα μεταφράζεται συχνά και ως βαθμός ομοιότητας. Σε ό,τι αφορά στο χώρο του ήχου και της ακουστικής, πιστότητα είναι η ιδιότητα μιας πηγής ήχου να αναπαραγάγει ήχο πιστό ως προς την αρχική πηγή του. Η πιστή αναπαραγωγή ενός αρχικού ηχητικού σήματος είναι το αντικείμενο που

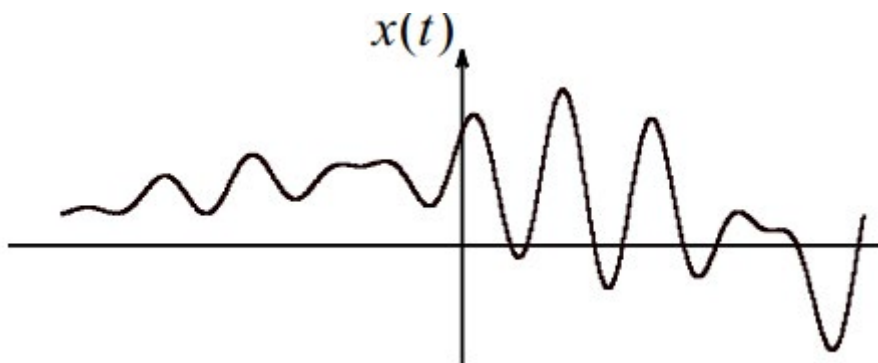
μας απασχολεί κυρίως σε αυτή την ανάλυση. Η πιστή αναπαραγωγή ενός ήχου εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Για παράδειγμα, ένας πλέον φθαρμένος δίσκος γραμμοφώνου θα αναπαράγει λιγότερο πιστά την αρχική ηχογράφηση σε σχέση με τον ίδιο δίσκο όταν ήταν καινούργιος. Το γραμμόφωνο βέβαια είναι ένα μηχανικό και αναλογικό σύστημα αναπαραγωγής ήχου. Εμείς θα αναλύσουμε κυρίως ηλεκτρικά αναλογικά ή ψηφιακά σήματα και συστήματα ήχου.

### 3.3.2 Αναλογικά σήματα ήχου

«Ως σήμα ορίζεται ένα φυσικό μέγεθος το οποίο μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο ή το χώρο ή με οποιαδήποτε άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή. Για παράδειγμα, το σήμα ομιλίας αντιστοιχεί στις μεταβολές της ακουστικής πίεσης σε σχέση με το χρόνο και προέρχεται από τις κινήσεις των φωνητικών χορδών. Από μαθηματική άποψη, ένα σήμα εκφράζεται ως συνάρτηση μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Ανάλογα με το πλήθος των ανεξαρτήτων μεταβλητών τα σήματα χαρακτηρίζονται ως μονοδιάστατα σήματα (1-D), δισδιάστατα (2-D) κι εν γένει πολυδιάστατα σήματα. Ένα σήμα ήχου είναι ένα μονοδιάστατο ηλεκτρικό σήμα που έχει δημιουργηθεί ως ακριβές αντίγραφο μιας αρχικής ηχητικής μηχανικής ταλάντωσης. Το ηχητικό ηλεκτρικό σήμα είναι αναλογικό κι έχει συγκεκριμένο πλάτος που ακολουθεί πιστά τις διακυμάνσεις της στάθμης της ηχητικής έντασης του αρχικού ήχου. Αναλογικό σήμα είναι ένα σήμα ρέουσας πληροφορίας που λαμβάνει συνεχείς τιμές σε ένα μέσο μετάδοσης συναρτήσει του χρόνου αντικατοπτρίζοντας τη διακύμανση μιας ποσότητας που μεταβάλλεται ομοίως στον χρόνο, όπως το πλάτος. Ο όρος «αναλογικό» συνήθως αναφέρεται σε ηλεκτρικά σήματα, όμως φορείς αναλογικών σημάτων είναι και μηχανικά, αέρια, υδραυλικά και άλλα συστήματα.

Το αναλογικό σήμα χρησιμοποιεί ιδιότητες του μέσου μετάδοσης για να μεταφέρει τις πληροφορίες της μεταβολής της ποσότητας που αντικατοπτρίζει. Ένας ήχος που ταξιδεύει σε ένα μέσο, πχ τον αέρα, αποτελεί ένα αναλογικό σήμα που μεταφέρει τη διακύμανση της πίεσης που προκαλεί στον αέρα η ταλάντωση μιας ηχητικής πηγής, για παράδειγμα ενός διαπασών. Ένα ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιεί ένα διαφορετικό μέσο όπως για παράδειγμα ένα ηλεκτρικό κύκλωμα για τη μετάδοση της πληροφορίας που εκπέμπει μια ηχητική πηγή, έπειτα από μετατροπή των κυμάτων πίεσης σε ηλεκτρικές διακυμάνσεις μέσω π.χ. ενός μικροφώνου. Σε επόμενη ενότητα αναλύεται η μετατροπή του ηχητικού κύματος σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα μέσω μικροφώνων και άλλων ηλεκτρομηχανικών μετατροπέων.

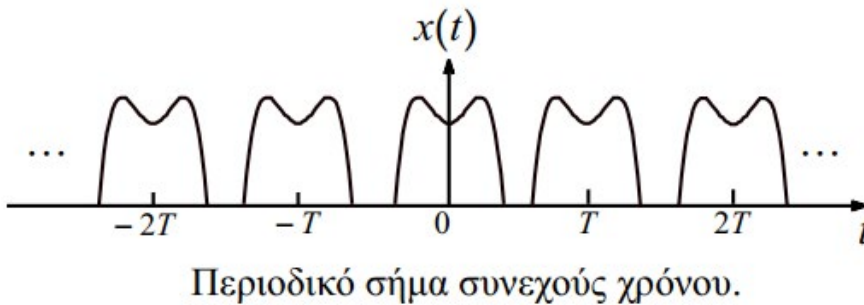
Ένα αναλογικό σήμα αντικατοπτρίζει με εν δυνάμει άπειρη ακρίβεια τη διακύμανση φυσικών φαινομένων, όπως του ήχου ή της πίεσης κλπ. Σε ένα ηλεκτρικό σήμα, η πληροφορία μπορεί να μεταφέρεται με διαφοροποίηση της ηλεκτρικής τάσης, της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος ή της συχνότητας που μεταβάλλονται ακολουθώντας τη μεταβολή του φυσικού φαινομένου που περιγράφουν. Το παραγόμενο αναλογικό ηλεκτρικό σήμα είναι ένα σήμα «συνεχούς χρόνου» όπως λέμε. Σήματα συνεχούς χρόνου ή αναλογικά σήματα είναι τα σήματα των οποίων η ανεξάρτητη μεταβλητή μεταβάλλεται σ' ένα συνεχές διάστημα. Στα μονοδιάστατα σήματα το πεδίο ορισμού του σήματος είναι διάστημα της ευθείας των πραγματικών αριθμών. Στο Σχήμα 3.5 έχει σχεδιαστεί ένα αναλογικό σήμα. Επειδή η ανεξάρτητη μεταβλητή  $t$  συνήθως είναι ο χρόνος τα σήματα αυτά ονομάζονται σήματα συνεχούς χρόνου ή σήματα συνεχούς μεταβλητής.



Σχήμα 3.5

### 3.3.3 Περιοδικά αναλογικά σήματα ήχου

Ένα αναλογικό ηχητικό σήμα είναι ένα περιοδικό σήμα. Ένα αναλογικό σήμα, έστω « $x(t)$ » λέγεται περιοδικό, όταν υπάρχει ένας θετικός σταθερός αριθμός, έστω « $T$ », για τον οποίο ισχύει η μαθηματική σχέση  $x(t) = x(t+T)$  για κάθε τιμή του χρόνου  $t$ . Στο Σχήμα 3.6 έχει σχεδιαστεί ένα περιοδικό σήμα. Ο σταθερός αριθμός « $T$ » λέγεται περίοδος.



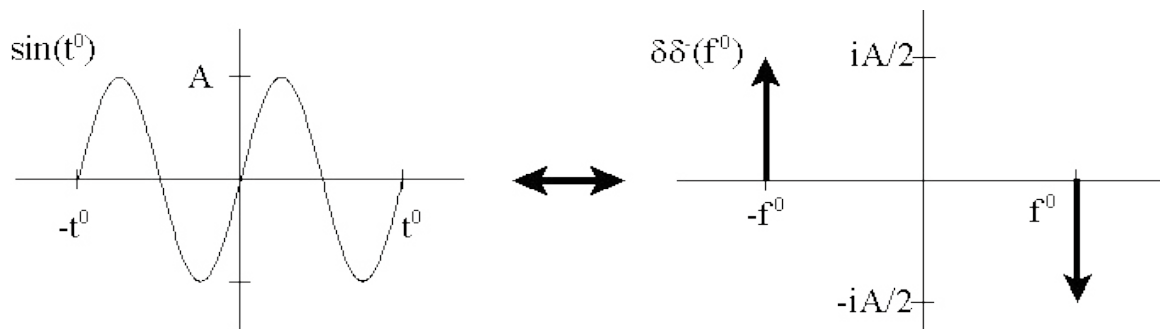
3.6

Σχήμα

Η ελαχίστη δυνατή περίοδος είναι γνωστή ως θεμελιώδης περίοδος, συμβολίζεται με  $T_0$  κι αντιστοιχίζεται στη θεμελιώδη συχνότητα  $f_0 = 1/T_0$ . Στην πράξη πολλές φορές αναφερόμαστε απλώς στην περίοδο και εννοούμε τη θεμελιώδη. Παράδειγμα περιοδικού σήματος είναι το ημιτονοειδές ηχητικό σήμα  $x(t) = \sin(\omega t + \theta)$ , με περίοδο  $T = 2\pi/\omega$ . Το « $\omega$ » είναι γνωστό ως κυκλική συχνότητα και ισχύει:  $\omega = 2\pi f$ , όπου  $f$  η συχνότητα του ημίτονου. Η γωνία « $\theta$ » είναι η λεγόμενη «αρχική φάση» του σήματος και εκφράζει μία αρχική χρονική καθυστέρηση του σήματος. Αν έχουμε αρχική φάση  $\theta = 0$ , τότε το σήμα μας θα ξεκινά από την αρχή των αξόνων.

### 3.3.4 Μετασχηματισμός σήματος στο πεδίο της συχνότητας

Στην απλούστερη περίπτωση, αν ένας ηχητικός τόνος μίας συχνότητας μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα, θα δούμε ότι το πλάτος « $A$ » του σήματος σχηματίζει ένα ημίτονο στο πεδίο του χρόνου. Το ίδιο σήμα βέβαια μπορεί να περιγραφεί αντίστοιχα και στο πεδίο της συχνότητας ώστε να λάβουμε το φάσμα του. Στο πεδίο της συχνότητας, ένας απλός τόνος θα αποτελείται ιδανικά από μία μόνο συχνότητα, τη θεμελιώδη συχνότητα  $f_0$  που αντιστοιχεί σε περίοδο  $T_0 = 1/f_0$ . Επομένως το φάσμα του θα αποτελείται από μία κρουστική συνάρτηση  $\delta$  στη θετική συχνότητα  $f_0$  και μία ακόμη κρουστική στην αρνητική συχνότητα  $-f_0$ . Τα αποτελέσματα αυτά μπορούμε να δούμε γραφικά στο σχήμα 3.7 :



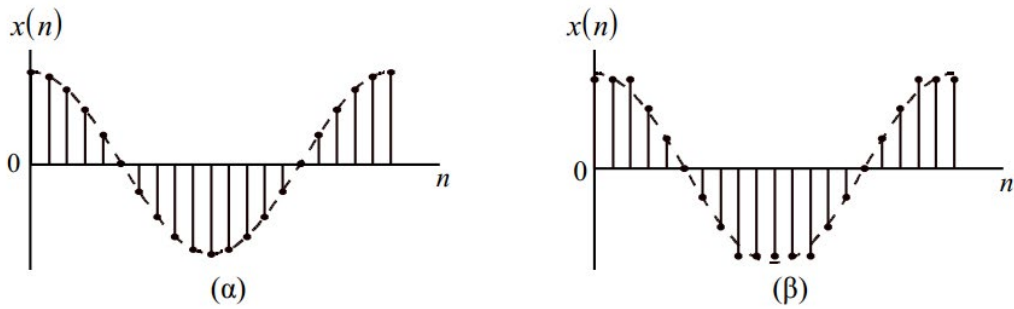
Σχήμα 3.7



Ο μετασχηματισμός που χρησιμοποιήσαμε για την περιγραφή του ημιτονοειδούς σήματος πλάτους  $A$  και περίοδο  $T$  στο πεδίο της συχνότητας ονομάζεται μετασχηματισμός Fourier. Ο μετασχηματισμός Fourier, το όνομά του οποίου προήλθε από τον Ζοζέφ Φουριέ, είναι ένας μαθηματικός μετασχηματισμός με πολλές εφαρμογές στη φυσική και την μηχανική. Πολύ συχνά μετατρέπει μια μαθηματική συνάρτηση του χρόνου,  $f(t)$ , σε μια νέα συνάρτηση, που μερικές φορές συμβολίζεται με « $F$ » κεφαλαίο, των οποίων η μονάδα μέτρησης είναι η συχνότητα. Η συχνότητα εκφράζεται συνήθως σε μονάδες κύκλου / δευτερόλεπτο ( Hertz ) ή ακτίνια ανά δευτερόλεπτο (rad/s). Η νέα συνάρτηση είναι τότε γνωστή ως μετασχηματισμός Fourier ή ως φάσμα συχνοτήτων της συνάρτησης  $f$ . Το κίνητρο για το μετασχηματισμό Fourier προέρχεται από τη μελέτη της σειράς Fourier. Στη μελέτη των σειρών Fourier, οι περίπλοκες αλλά περιοδικές συναρτήσεις έχουν γραφτεί ως το άθροισμα των απλών κυμάτων που στα μαθηματικά αντιπροσωπεύεται από ημίτονα και συνημίτονα. Ο μετασχηματισμός Fourier είναι μια επέκταση της σειράς Fourier που προκύπτει όταν η περίοδος της συνάρτησης που εκπροσωπεί επιμηκύνεται και αφήνεται να προσεγγίσει το άπειρο. Ο μετασχηματισμός Fourier είναι επίσης μια αντιστρέψιμη συνάρτηση. Έτσι, με δεδομένη την συνάρτηση  $F$ , μπορεί να προσδιοριστεί η αρχική συνάρτηση,  $f$ . Οι  $f$  και  $F$ , είναι επίσης γνωστές ως αναπαραστάσεις του ίδιου «γεγονότος» αντίστοιχα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Τις περισσότερες φορές η  $f$  είναι μια πραγματική συνάρτηση και η  $F$  είναι μια μιγαδική συνάρτηση, όπου ένας μιγαδικός αριθμός περιγράφει τόσο το πλάτος όσο και τη φάση της αντίστοιχης συνιστώσας συχνότητας. Σε γενικές γραμμές, η  $f$  είναι επίσης σύνθετη, όπως η αναλυτική αναπαράσταση μιας πραγματικής συνάρτησης. Ο όρος «μετασχηματισμός Fourier» αναφέρεται τόσο στην συνάρτηση μετασχηματισμού όσο και στην μιγαδική συνάρτηση που παράγει. Στην περίπτωση μιας περιοδικής συνάρτησης, για παράδειγμα ενός συνεχή, αλλά όχι απαραίτητα ημιτονοειδούς ήχου, ο μετασχηματισμός Fourier μπορεί να απλοποιηθεί με τον υπολογισμό ενός διακριτού συνόλου σύνθετου πλάτους, που ονομάζεται συντελεστής σειράς Fourier. Με το μετασχηματισμό ενός ηχητικού σήματος στο πεδίο της συχνότητας λαμβάνουμε το φάσμα συχνοτήτων του. Από τη μελέτη του φάσματος του σήματος μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την πιστότητά του στο αρχικό ηχητικό κύμα. Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο ότι το φάσμα ακουστικών συχνοτήτων εκτείνεται ιδανικά από τα 20Hz έως τα 20KHz, επομένως δε θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα συχνότητες πολύ μεγαλύτερες ή μικρότερες από τα όρια του ακουστικού φάσματος.» (Πηγή: [http://cgi.di.uoa.gr/~k14/sig\\_sys1.pdf](http://cgi.di.uoa.gr/~k14/sig_sys1.pdf))

### 3.3.5 Σήματα διακριτού χρόνου

Τα ηχητικά σήματα συνεχούς χρόνου μπορούν να μετατραπούν και σε σήματα διακριτού χρόνου. Σήματα διακριτού χρόνου είναι τα σήματα των οποίων το πεδίο ορισμού ή η εξαρτημένη μεταβλητή ανήκει σε κάποιο διακριτό σύνολο, όπως για παράδειγμα το σύνολο των ακεραίων αριθμών. Εξαρτημένη μεταβλητή των ηχητικών σημάτων είναι συνήθως ο χρόνος  $t$ . Όμως η εξαρτημένη μεταβλητή τους, δηλαδή το πλάτος τους είναι δυνατόν να λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή. Το σήμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.8α είναι ένα σήμα διακριτού χρόνου. Η μετατροπή ενός σήματος συνεχούς χρόνου σε διακριτού γίνεται με τη λήψη στιγμιότυπων του αρχικού σήματος και ονομάζεται δειγματοληψία. Τα σήματα διακριτού χρόνου με τη σειρά τους μας ενδιαφέρουν καθώς μπορούν να μετατραπούν σε ψηφιακά σήματα (digital στα αγγλικά). Ψηφιακά είναι τα σήματα στα οποία τόσο η ανεξάρτητη μεταβλητή, όσο και η εξαρτημένη μεταβλητή μπορούν να λαμβάνουν μόνο διακριτές τιμές. Στο Σχήμα 3.8β φαίνεται ένα ψηφιακό σήμα. Τα ψηφιακά σήματα απασχολούν ιδιαίτερα την επιστήμη τις τελευταίες δεκαετίες με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών κι επεξεργαστών. Για αυτό το λόγο θα μελετήσουμε εκτενώς και τις ιδιότητες των ψηφιακών σημάτων και συστημάτων ήχου καθώς και τη σχέση τους με τα αντίστοιχα αναλογικά.



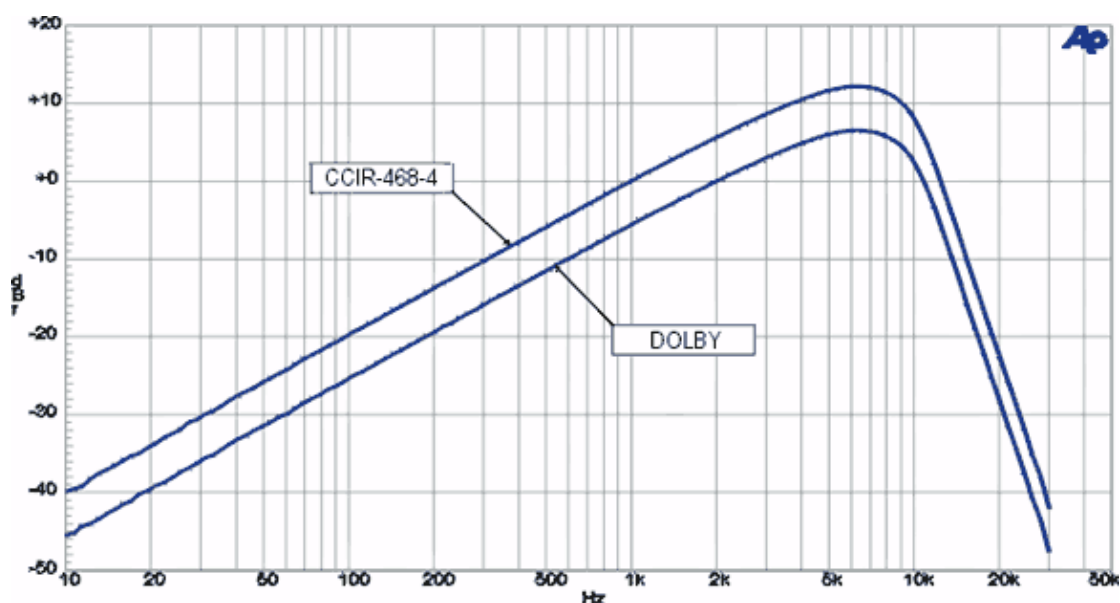
Γραφική αναπαράσταση (α) ενός σήματος διακριτού χρόνου και (β) ενός ψηφιακού σήματος.

Σχήμα 3.8

### 3.4 Πρότυπα και μετρήσεις ηχητικής πιστότητας

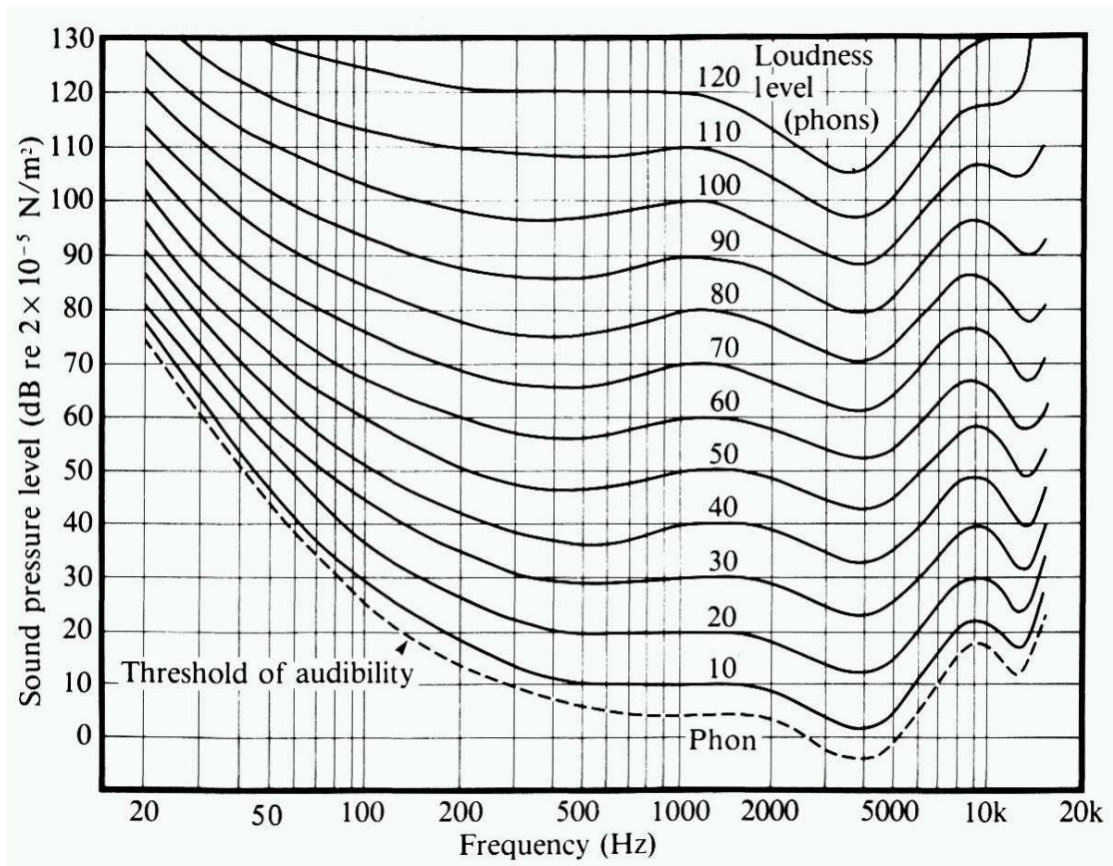
Οι μετρήσεις ήχου σε ένα σύστημα πραγματοποιούνται για διάφορους σκοπούς. Σχεδιαστές ηχητικού εξοπλισμού λαμβάνουν μετρήσεις, έτσι ώστε να μπορούν να καθορίσουν την γενικότερη απόδοση που έχει ένα κομμάτι του εξοπλισμού. Οι μηχανικοί συντήρησης κάνουν μετρήσεις ώστε να διασφαλίσουν πως ο εξοπλισμός εξακολουθεί να λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Επίσης, μετρήσεις γίνονται από ένα τεχνικό για να εξασφαλίσει ότι συσσωρευμένα ελαττώματα ενός «μονοπατιού» του ηχητικού σήματος (signal path στα αγγλικά) είναι εντός των ορίων που θεωρεί αποδεκτά. Ορισμένες πτυχές της μέτρησης και των προδιαγραφών αφορούν μόνον την προοριζόμενη χρήση του εξοπλισμού. Οι μετρήσεις ήχου ενός συστήματος ενσωματώνουν συχνά ψυχοακουστικού χαρακτήρα αρχές που σχετίζονται και με την ανθρώπινη ακοή. Πολλές μετρήσεις επομένως υπόκεινται σε υποκειμενικότητα.

Οι υποκειμενικά έγκυρες μέθοδοι ηχητικών μετρήσεων ήρθαν στο προσκήνιο στο Ηνωμένο Βασίλειο και την Ευρώπη κατά τη δεκαετία του 1970, με την εισαγωγή της συμπαγούς ταινίας μαγνητικής κασέτας (compact tape) και των τεχνικών DBX και Dolby για τη μείωση του θορύβου. Με τις τεχνικές αυτές έγινε φανερό η μη ικανοποιητική φύση πολλών βασικών μετρήσεων μηχανικής που χρησιμοποιούνταν έως τότε. Οι προδιαγραφές των μετρήσεων θορύβου όπως του σταθμισμένου φίλτρου CCIR-468 (σχήμα 3.9α) έγιναν ιδιαίτερα διαδεδομένες. Άλλα φαινόμενα αλλοίωσης του ήχου όπως τα «wow» (μακράς διάρκειας μεταβολές της ταχύτητας αναπαραγωγής) και «flutter» (πτερυγισμός ή σύντομης διάρκειας μεταβολές στην ταχύτητα αναπαραγωγής) άρχισαν να απασχολούν τους μηχανικούς. Επίσης έγιναν προσπάθειες να βρούμε πιο έγκυρες μεθόδους για τη μέτρηση της παραμόρφωσης (distortion) του ήχου.

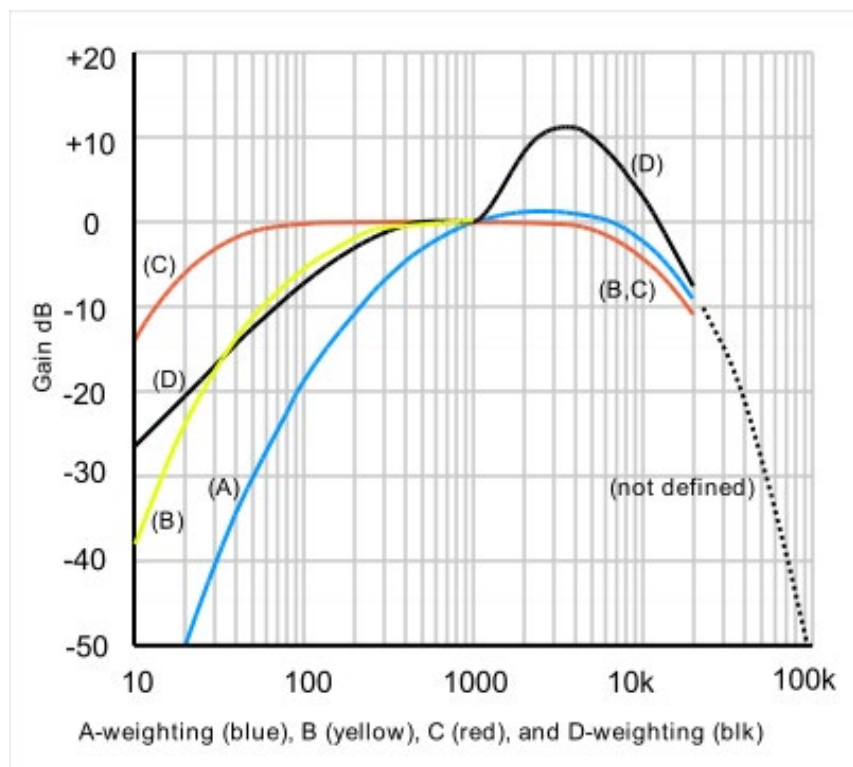


Σχήμα 3.9α σταθμισμένο φίλτρο CCIR-468

Στις μετρήσεις με βάση την ψυχοακουστική, όπως η μέτρηση του θορύβου, συχνά χρησιμοποιείται ένα φίλτρο στάθμισης (weighting filter). «Ένα φίλτρο στάθμισης χρησιμοποιείται για να δώσει έμφαση ή να περιορίσει πτυχές ενός φαινομένου σε σχέση με άλλες» (Πηγή: <https://apothesis.lib.teicrete.gr/bitstream/handle/11713/2402/AngelakisGiorgos2013.pdf?sequence=1>). Για παράδειγμα, είναι καλά τεκμηριωμένο ότι ανθρώπινη ακοή είναι περισσότερο ευαίσθητη σε ορισμένες περιοχές συχνοτήτων. Γι αυτό το λόγο, στις μετρήσεις ήχου χρησιμοποιούνται φίλτρα στάθμισης τύπου «Α» (σχήμα 3.9). Κατά αυτό τον τρόπο δίνουμε έμφαση σε περιοχές συχνοτήτων από 3kHz έως 6kHz, στις οποίες το ανθρώπινο αυτί παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία και μειώνουμε το πλάτος των υψηλότερων και χαμηλότερων συχνοτήτων. Ο σκοπός χρήσης αυτών των φίλτρων είναι η εξασφάλιση πως η μετρούμενη ένταση αντιστοιχεί στην υποκειμενική αντίληψη έντασης του ανθρώπινου αυτιού. Αυτό αποδεικνύεται και από τα ίσως-έντασης (equal loudness) διαγράμματα και καμπύλες των Fletcher και Munson (σχήμα 3.9β). Όμως οι καμπύλες αυτές ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του ήχου. Οι μετρούμενες καμπύλες για καθαρούς τόνους μιας συχνότητας για παράδειγμα, είναι διαφορετικές από εκείνες για τυχαίο θόρυβο. Το αυτί ανταποκρίνεται επίσης λιγότερο καλά σε μικρές ηχητικές ριπές, κάτω από 100 έως 200 ms, από ό, τι σε συνεχείς ήχους. Στα ψηφιακά συστήματα για παράδειγμα, ο θόρυβος συχνά περιέχει κλικ ή ριπές ήχου εκρηκτικού χαρακτήρα (bursts) που δεν αντιλαμβανόμαστε ιδιαίτερα. Για τους λόγους αυτούς, μια σειρά από υποκειμενικά έγκυρες τεχνικές μέτρησης έχουν επινοηθεί και ενσωματωθεί στα BS, IEC της EBU και τα κατά ITU πρότυπα. Αυτές οι μέθοδοι μέτρησης της ποιότητας του ήχου χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών εκπομπών στο μεγαλύτερο μέρος του κόσμου, καθώς και από ορισμένους επαγγελματίες του ήχου. Βέβαια και το παλαιότερο Α-τύπου πρότυπο φίλτρου στάθμισης (A-weighting) για συνεχείς τόνους, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως (σχήμα 3.9γ).

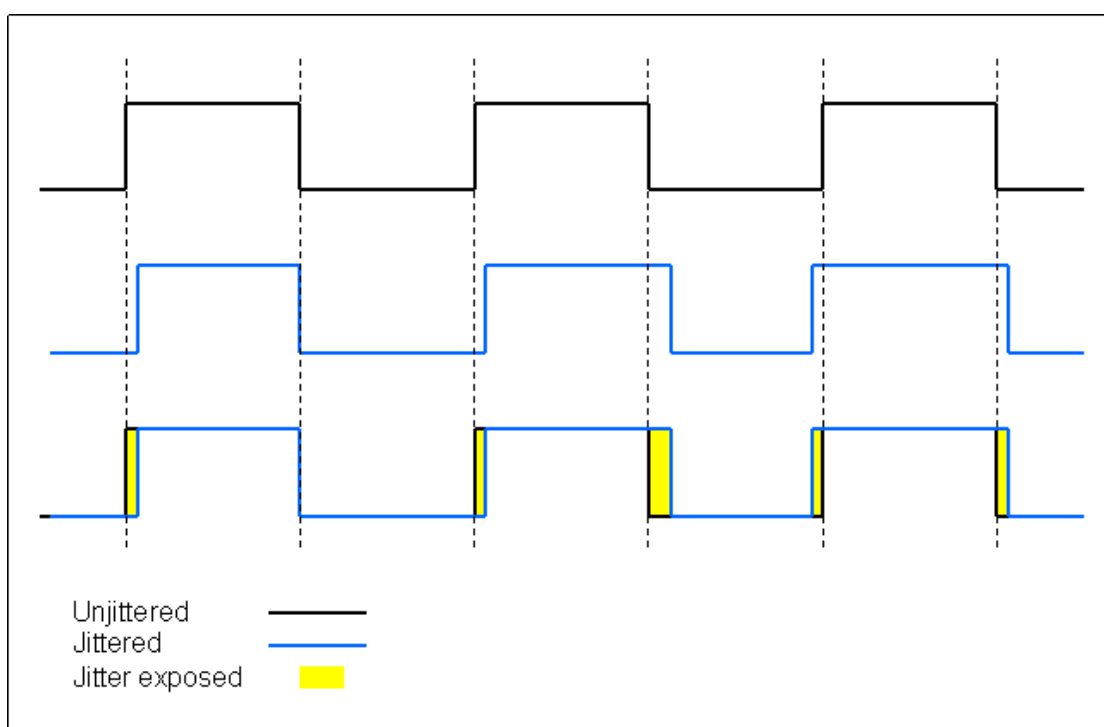


Σχήμα 3.9β Καμπύλες ίσης-έντασης (equal loudness) των Fletcher και Munson



Σχήμα 3.9γ Φίλτρα στάθμισης τύπου A, B, C και D

Οι μηχανικοί δε χρησιμοποιούν μόνο μια μέτρηση αλλά μια σειρά μετρήσεων για την ανάλυση διαφόρων τύπων υποβάθμισης του ήχου που μπορούν να μειώσουν την πιστότητά του. Για παράδειγμα, κατά τον έλεγχο μιας μηχανικής μαγνητικής αναλογικής ταινίας, είναι απαραίτητο να γίνει μία μηχανική μέτρηση για παραλλαγές στην ταχύτητα αναπαραγωγής της ταινίας σε μεγαλύτερες χρονικές περιόδους(φαινόμενο «wow»), καθώς και για την παραμόρφωση και το θόρυβο που εισάγει. Για τη δοκιμή ενός ψηφιακού συστήματος, η δοκιμή για τις αργά μεταβαλλόμενες διακυμάνσεις τύπου «wow» της ταχύτητας αναπαραγωγής συνήθως θεωρείται περιττή λόγω της σχετικής ακρίβειας των ρολογιών στα ψηφιακά κυκλώματα (clocks). Όμως μία δοκιμή για πολύ σύντομες μεταβολές στο χρονοδιάγραμμα του ρολογιού, που καλείται «φαινόμενο jitter», είναι συχνά επιθυμητή. Το «jitter» των ρολογιών των ψηφιακών συστημάτων μπορεί να προκαλέσει ακουστική υποβάθμιση. Στο σχήμα 3.10 παρατηρούμε ένα ιδανικό διάγραμμα χρονισμών ψηφιακού ρολογιού και από κάτω τη συμβολή του φαινομένου «jitter» στην ασύμμετρη μεταβολή του πλάτους και της καθυστέρησης των παλμών του ρολογιού.



Σχήμα 3.10

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε περισσότερο με αντικειμενικά κριτήρια και θα παρουσιάσουμε αναλυτικά αρκετά μετρήσιμα μεγέθη για μηχανικά, αναλογικά και ψηφιακά σήματα ή συστήματα.

### 3.5 Μετρήσιμα μεγέθη για την πιστή αναπαραγωγή του ήχου: Μηχανικές μετρήσεις

Οι μηχανικές μετρήσεις σχετίζονται με τη φυσική κίνηση σε ένα στοιχείο όπως την κίνηση ενός ηλεκτρικού κινητήρα που κινεί τη μαγνητική κασέτα ή το πλατό ενός πικάπ για δίσκους βινυλίου. Η σταθερότητα της κίνησης του μηχανισμού των αναλογικών μέσων ανάγνωσης είναι σημαντική παράμετρος καθώς επηρεάζει άμεσα το ηχητικό αποτέλεσμα. Το φαινόμενο «Wow» («Ουάου» στα Ελληνικά) ονομάστηκε έτσι από τον ήχο που παράγει καθώς είναι η αργή μεταβολή της ταχύτητας αναπαραγωγής. Η μεταβολή αυτή είναι συχνότητας λίγων Hz και προκαλείται από τη μακροπρόθεσμη μεταβολή της ταχύτητας και γήρανση του κινητήρα ενός μέσου αναπαραγωγής όπως το κασετόφωνο. Αντίθετα το φαινόμενο «φτερούγισμα» (flutter) είναι η πιο γρήγορη μεταβολή της ταχύτητας αναπαραγωγής με συχνότητα μερικές δεκάδες Hz που συνήθως προκαλείται από μηχανικές βλάβες του εξοπλισμού όπως η χαλάρωση των ιμάντων κίνησης. Η μέτρηση τέτοιων μηχανικών φαινομένων γίνεται σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) και όσο μικρότερο είναι το ποσοστό, τόσο σταθερότερη είναι η ταχύτητα αναπαραγωγής.

Ακόμη μία μέτρηση μηχανικού χαρακτήρα είναι η μέτρηση τριγμών. Οι τριγμοί είναι θόρυβοι χαμηλής συχνότητας (σε δεκάδες Hz) που παρουσιάζονται κυρίως στα πικάπ ενός αναλογικού συστήματος αναπαραγωγής ήχου. Ο τριγμός προκαλείται από ατελή κατασκευή του πλατό φόρτωσης δίσκων βινυλίου, ατέλειες στις περιελίξεις του κινητήρα που κινεί το πλατό, δονήσεις των ιμάντων κίνησης σε ορισμένα πικάπ καθώς και τις δονήσεις του δωματίου ή του περιβάλλοντος (π.χ. από την κυκλοφορία αυτοκινήτων). Η δόνηση που παρουσιάζεται ως θόρυβος μεταδίδεται από την περιστρεφόμενη βάση στο δίσκο και κατόπιν στην αδαμάντινη κεφαλή ανάγνωσης του πικάπ και έτσι γίνεται αισθητή κατά την ακρόαση. Η δόνηση αυτή μετράται σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) και όσο μικρότερο το ποσοστό, τόσο χαμηλότεροι είναι οι αντίστοιχοι τριγμοί. Κάποιοι κατασκευαστές πικάπ δαπανούν πολύ μεγάλα ποσά για την ανάπτυξη και κατασκευή όσο το δυνατόν σταθερότερων και χαμηλού μηχανικού θορύβου συστημάτων ανάγνωσης δίσκων βινυλίου όπως το παρακάτω δημιούργημα της εταιρίας «acoustic solid» (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1

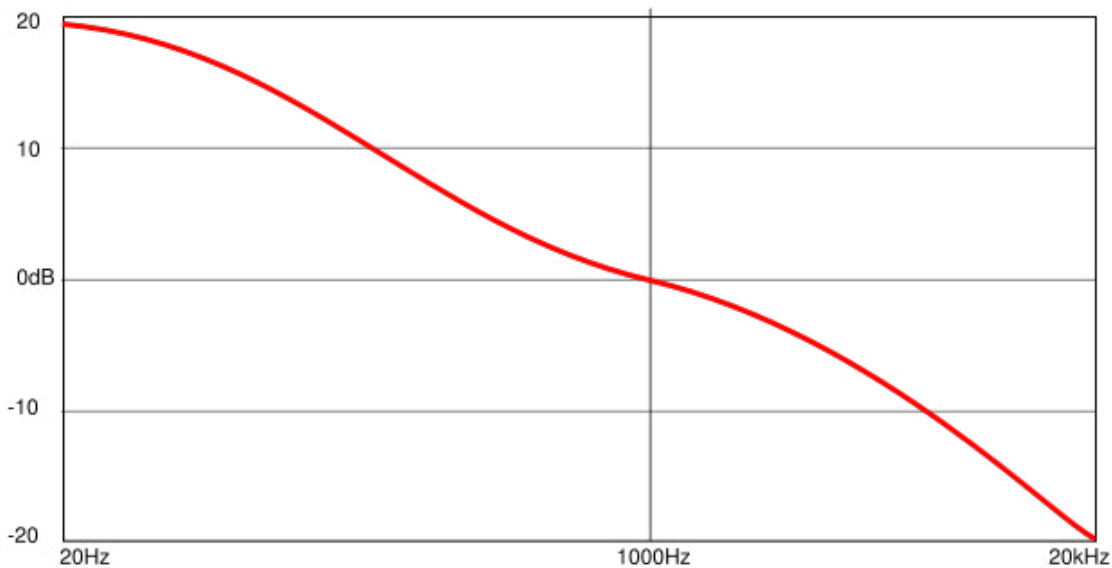
### 3.6 Μετρήσεις αναλογικών ηλεκτρικών μεγεθών

Σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε τα μεγέθη μέτρησης αναλογικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ηχητικών συστημάτων που απαντώνται συχνότερα. Οι μηχανικοί έχουν αναπτύξει αρκετές διαδικασίες και μεθόδους μετρήσεων ώστε να σχεδιάζουν, να κρίνουν και να συγκρίνουν ηχητικό εξοπλισμό. Κάθε συσκευή ενός ηχοσυστήματος διαθέτει εξαρτήματα και στοιχεία με αναλογική λειτουργία, ακόμη και οι πιο περίπλοκες ψηφιακές πηγές ήχου. Στη βάση αυτού του ισχυρισμού, παραθέτουμε τα μεγέθη που μετρούνται συνηθέστερα.

### 3.7 Απόκριση συχνότητας (Frequency Response)

Αυτή η μέτρηση μας πληροφορεί ποιο θα είναι το φάσμα συχνοτήτων ενός συστήματος εντός του οποίου το πλάτος του σήματος εξόδου θα παραμείνει αρκετά σταθερό. Το πλάτος του σήματος εξόδου μπορεί να μεταβληθεί εντός ορισμένων ορίων της κλίμακας ντεσιμπέλ (dB). Για παράδειγμα, συχνά χρησιμοποιείται η στάθμη -3dB για τη μέτρηση της απόκρισης συχνότητας. Η συχνότητα στην οποία το σήμα μειώνεται κατά τρία ντεσιμπέλ ονομάζεται συχνότητα «αποκοπής» ή «συχνότητα μισής ισχύος» καθώς η μείωση της έντασης κατά 3dB αντιστοιχεί σε μείωση της ισχύος του συστήματος κατά το ήμισυ.

Ένα συνηθισμένο ηχητικό σύστημα έχει απόκριση συχνότητας ίδια με ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης. Επομένως έχει δύο συχνότητες αποκοπής, μία χαμηλή και μία υψηλή συχνότητα. Μας ενδιαφέρει η χαμηλή συχνότητα αποκοπής να βρίσκεται κοντά στα 20Hz που είναι το κάτω όριο του ακουστικού φάσματος και η υψηλή συχνότητα αποκοπής να βρίσκεται κοντά στα 20KHz που είναι το άνω όριο του ακουστικού φάσματος. Ορισμένα εξαρτήματα ήχου, όπως οι ισοσταθμιστές συχνοτήτων (equalizers) έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορεί ο χρήστης και ακροατής να ρυθμίζει την ένταση του σήματος σε συγκεκριμένες συχνότητες σύμφωνα με τις προτιμήσεις του. Για παράδειγμα, μία ρύθμιση μπάσων συχνοτήτων (bass) ενός συστήματος, επιτρέπει την εξασθένιση ή τον τονισμό των χαμηλότερων συχνοτήτων που εμπεριέχονται στο ηχητικό σήμα. Οι συχνότητες αυτές θα βρίσκονται κάτω από ένα κατώφλι και δεν θα εξασθενούνται ή ενισχύονται όλες κατά το ίδιο ποσοστό. Σε κάθε περίπτωση, η ρύθμιση αυτή μεταβάλλει την απόκριση συχνότητας του ηχοσυστήματος. Διάφοροι προενισχυτές μπορεί επίσης να περιέχουν ενσωματωμένους μη μεταβλητούς ισοσταθμιστές και φίλτρα για την κατάλληλη προσαρμογή της απόκρισης συχνότητας. Για παράδειγμα, ένας προενισχυτής, για να αναπαράγει σωστά το ηχητικό υλικό από δίσκους βινυλίου, ενσωματώνει μία κατά «RIAA» (Recording Industry Association of America) διόρθωση της απόκρισης συχνότητας. Το πρότυπο RIAA ορίζει την καμπύλη απόκρισης συχνότητας που πρέπει να έχει ένα σύστημα ενίσχυσης ήχου για να αναπαράγει δίσκους βινυλίου. Η καμπύλη αυτή δίνεται στο σχήμα 3.11 .

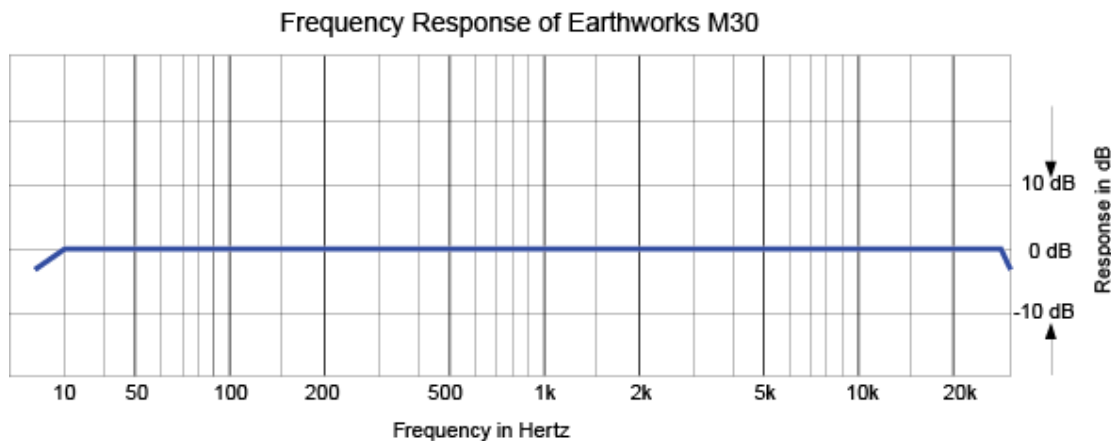


Σχήμα 3.11

Το «εύρος συχνοτήτων» είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται μερικές φορές για την απόκριση μεγαφώνων και άλλων ηλεκτρομηχανικών μετατροπών όπως τα μικρόφωνα για να υποδείξει τις συχνότητες που μπορούν να αναπαράγουν ή να ηχογραφήσουν, χωρίς όμως να προσδιορίζεται ένα εύρος ορίων μεταβολής του πλάτους σε ντεσιμπέλ. Για παράδειγμα, μπορεί ένα μεγάφωνο να μπορεί να αναπαράγει συχνότητες κοντά στα 5-10Hz αλλά με μία εξασθένιση της τάξης των 12dB που είναι αρκετά μεγαλύτερη από τα 3dB. Το «εύρος ισχύος» σχετίζεται επίσης με απόκριση συχνότητας καθώς δίνει το φάσμα των συχνοτήτων που μπορεί να αποδώσει ένα σύστημα όπως ένας ενισχυτής ήχου σε υψηλή ισχύ. Αντίθετα, οι μετρήσεις της απόκρισης συχνότητας λαμβάνονται συνήθως σε χαμηλά επίπεδα σήματος όπως για παράδειγμα στο 1W ισχύος εξόδου, όπου οι περιορισμοί ισχύος λόγω κορεσμού του τροφοδοτικού ή του μετασχηματιστή ενός ενισχυτή δεν αποτελούν πρόβλημα.

Ένα στοιχείο που έχει μια «επίπεδη» απόκριση συχνότητας δεν θα αλλάζει τη στάθμη έντασης του διερχόμενου από αυτό σήματος περισσότερο από 3dB σε όλη την καθορισμένη περιοχή συχνοτήτων. Η περιοχή συχνοτήτων συχνά ορίζεται μεταξύ 20 Hz και 20 kHz, η οποία αντανακλά σε μεγάλο βαθμό το ανθρώπινο ακουστικό φάσμα. Τα εξαρτήματα με «επίπεδη» απόκριση συχνότητας συχνά περιγράφονται ως «γραμμικά». Τα περισσότερα εξαρτήματα ήχου σχεδιάστηκαν για να έχουν γραμμική απόκριση σε όλο το εύρος λειτουργίας τους. Καλά σχεδιασμένοι ενισχυτές στερεάς κατάστασης (solid state) και συσκευές αναπαραγωγής οπτικών δίσκων (CD players) μπορεί να έχουν απόκριση συχνότητας που κυμαίνεται κατά μόλις 0,2 dB στην περιοχή φάσματος μεταξύ 20 Hz έως 20 kHz. Τα ηχεία και μικρόφωνα, ως μηχανικά συστήματα τείνουν να έχουν σημαντικά λιγότερο επίπεδη απόκριση συχνότητας από τα ηλεκτρονικά συστήματα. Εντούτοις, σημαντική έρευνα και προσπάθεια γίνεται τις τελευταίες δεκαετίες για την κατασκευή ηχείων και μικροφώνων με όσο το δυνατόν επίπεδη απόκριση για χρήση σε στούντιο ηχογραφήσεων και μουσικών/ηχητικών παραγωγών. Στο σχήμα 3.12 παρατηρούμε την απόκριση συχνοτήτων ενός μικροφώνου μετρήσεων (Earthworks M30) που είναι επίπεδη στην περιοχή 20 έως 20kHz που μας ενδιαφέρει:



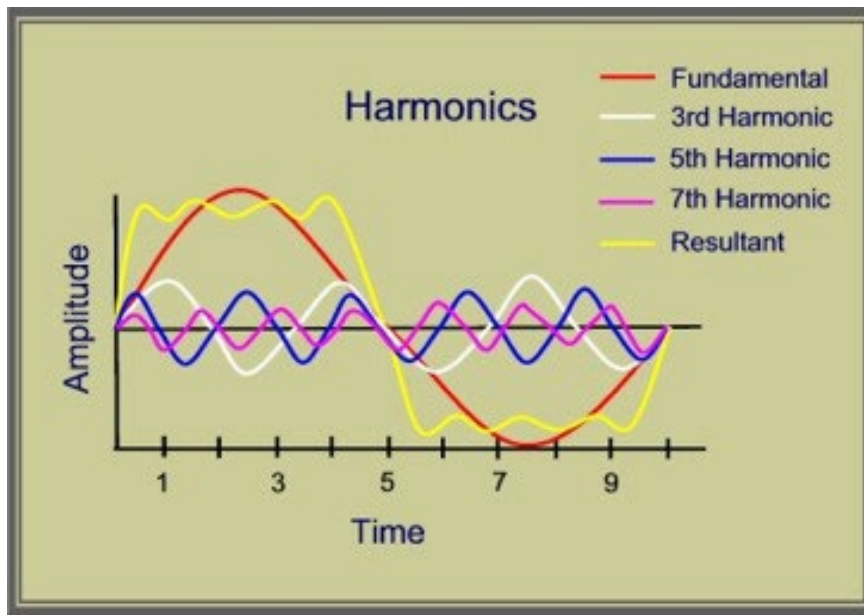


Σχήμα 3.12

### 3.8 Ολική αρμονική παραμόρφωση (THD, Total Harmonic Distortion)

Παραμόρφωση (ή στρέβλωση) είναι η μεταβολή του αρχικού σήματος ή άλλων χαρακτηριστικών του. Η παραμόρφωση είναι συνήθως ανεπιθύμητη και οι μηχανικοί προσπαθούν να εξαλείψουν την παραμόρφωση ή να την ελαχιστοποιήσουν. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ωστόσο, η παραμόρφωση μπορεί να είναι επιθυμητή. Η παραμόρφωση για παράδειγμα χρησιμοποιείται από διάφορους μουσικούς όταν ηχογραφούν ηλεκτρικές κιθάρες. Ας δούμε σε αυτό το σημείο τι είναι η αρμονική παραμόρφωση.

Ένα ηχητικό σήμα μπορεί να αποτελείται από ένα τόνο μίας θεμελιώδους συχνότητας  $f$  και να εφαρμοσθεί ως είσοδος σε ένα μη-γραμμικό, μη-ιδανικό σύστημα όπως για παράδειγμα ένας πραγματικός ενισχυτής ήχου. Το σήμα εξόδου, πέρα από άλλες μεταβολές όπως του πλάτους του, θα περιέχει και ήχους ή τόνους σε πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας  $f$  του σήματος εισόδου όπως για παράδειγμα τις  $2f$ ,  $3f$ ,  $5f$  κ.ο.κ. Κατά αυτό τον τρόπο, η καθαρή ημιτονική μορφή του αρχικού τόνου μοναδικής συχνότητας παραμορφώνεται στην έξοδο. Όσο περισσότερες αρμονικά συνδεδεμένες με τον αρχικό τόνο συχνότητες εμφανίζονται στο σήμα εξόδου, τόσο περισσότερο παραμορφώνεται η ημιτονοειδής μορφή του και πλησιάζει τη μορφή του τετραγωνικού παλμού. Η παραμόρφωση του σήματος λόγω εμφάνισης αρμονικών συχνοτήτων ονομάζεται αρμονική παραμόρφωση. Στο σχήμα 3.13 παρατηρούμε την αρμονική παραμόρφωση ενός θεμελιώδους ημιτονικού σήματος (fundamental) συχνότητας  $f$  λόγω εμφάνισης αρμονικών συχνοτήτων όπως η τρίτη ( $3^{\text{rd}}$ ) αρμονική  $3f$ , η Πέμπτη ( $5^{\text{th}}$ ) αρμονική  $5f$  και η έβδομη ( $7^{\text{th}}$ ) αρμονική  $7f$ . Το προκύπτον σήμα μοιάζει περισσότερο σε τετραγωνικό παλμό παρά στο αρχικό ημίτονο του τόνου συχνότητας  $f$  (σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13

Η συνολική αρμονική παραμόρφωση, ή THD, ενός σήματος είναι μια μέτρηση της αρμονικής παραμόρφωσης που παρουσιάζει το σήμα. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των ισχύων όλων των αρμονικών συχνοτήτων προς την ισχύ της θεμελιώδους συχνότητας. Στην περίπτωση που θέλουμε να μετρήσουμε την ολική αρμονική παραμόρφωση με τα πλάτη της θεμελιώδους συχνότητας και των αρμονικών της, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$THD_F = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1}$$

όπου  $V_n$ , με  $n > 1$  είναι η τάση ή το πλάτος της  $n$ -οστής αρμονικής συχνότητας και  $V_1$  για  $n = 1$  είναι το πλάτος ή η τάση της θεμελιώδους συχνότητας.

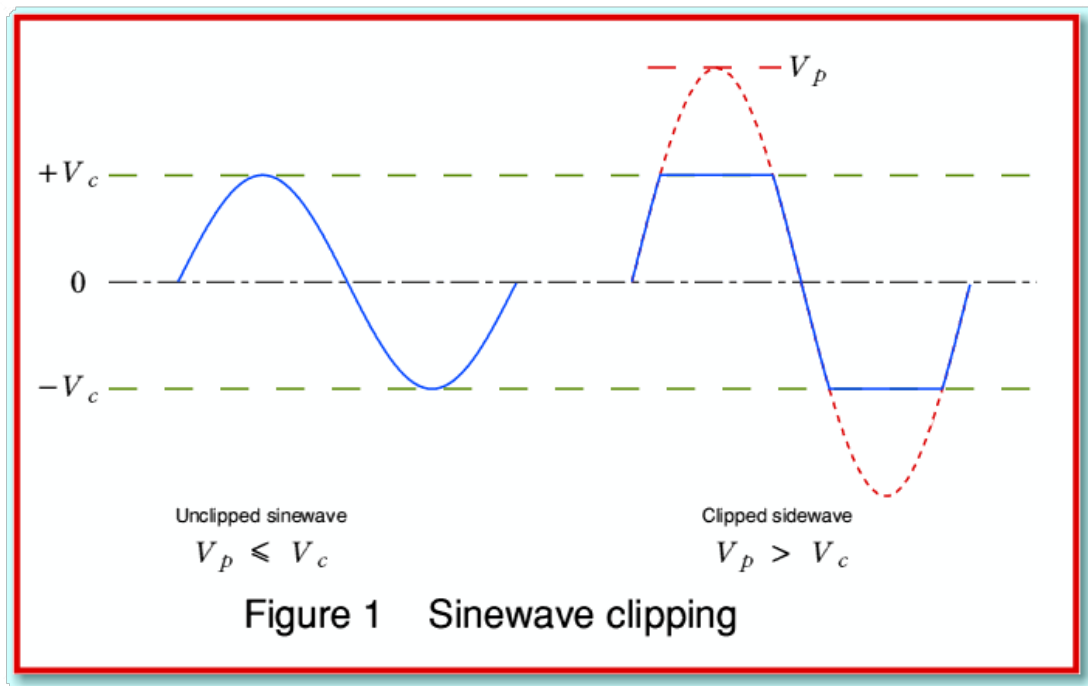
Η THD χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τη γραμμικότητα των συστημάτων ήχου και την ποιότητα της ισχύος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συντελεστής παραμόρφωσης είναι στενά συνδεδεμένος όρος με την THD και μερικές φορές χρησιμοποιείται ως συνώνυμο. Το αποτέλεσμα της μέτρησης της THD δίνεται συνήθως σε μορφή ποσοστού επί τοις εκατό (%) και αφορά την έξοδο μιας συσκευής. Σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό, ένα ποσοστό THD μικρότερο από 1% είναι αποδεκτό αλλά υπάρχουν και συσκευές με ποσοστά THD κοντά στο 10%. Τα μηχανικά συστήματα όπως τα ηχεία έχουν υψηλά ποσοστά ολικής αρμονικής παραμόρφωσης που αυξάνουν σε μεγαλύτερες εντάσεις. Η μέθοδος μέτρησης της αρμονικής παραμόρφωσης διάφορων κατασκευαστών συσκευών ήχου δεν ακολουθεί κατά ανάγκη κάποιο πρότυπο με αποτέλεσμα να υπάρχουν αρκετές διακυμάνσεις στις μετρήσεις THD και τα συμπεράσματά τους. Καθώς η μέτρηση γίνεται με τη συμβολή των πλατών διάφορων αρμονικών συχνοτήτων του σήματος εξόδου, ο κατασκευαστής πρέπει ιδανικά να παρέχει πληροφορίες για εύρος συχνοτήτων του σήματος προς εξέταση, το επίπεδο ισχύος ή κέρδους της συσκευής καθώς και τον αριθμό μετρήσεων που έλαβε. Συνήθως, οι χαμηλότερες σε ποσοστά THD μετρήσεις λαμβάνονται όταν η συσκευή έχει κέρδος μονάδα, επομένως δεν ενισχύει το πλάτος του σήματος εισόδου. Σε υψηλότερα κέρδη και μεγαλύτερη ισχύ, τα ποσοστά THD αυξάνονται συνήθως. Τα ανθρώπινα αυτιά είναι λιγότερο ευαίσθητα ως προς την αρμονική παραμόρφωση στις χαμηλές συχνότητες. Καθώς οι χαμηλές συχνότητες απαιτούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος ενός ενισχυτή ήχου, η παραμόρφωση μπορεί να μην είναι ιδιαίτερα ενοχλητική για τον ακροατή. Επίσης, έχει διαπιστωθεί πως η παραμόρφωση ενός ημιτόνου από αρμονικές συχνότητες άρτιας τάξης (για παρά-

δειγμα η 2<sup>η</sup>, 4<sup>η</sup> αρμονική κ.ο.κ.) ενοχλεί λιγότερο το ανθρώπινο αυτί από ότι η παραμόρφωση λόγω αρμονικών περιττής τάξης.

### 3.9 Ισχύς εξόδου

Ισχύς εξόδου για τους ενισχυτές ήχου ιδανικά αναφέρεται ως η μέγιστη Root Mean Square ( RMS ) ισχύς εξόδου του ενισχυτή ανά κανάλι. Η ισχύς αυτή μετράται με είσοδο ημιτόνου σε μια ορισμένη συχνότητα, συνήθως περί τα 1000Hz και σε ένα ορισμένο επίπεδο συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης THD. Η συχνότητα και το επίπεδο αυτό αρμονικής παραμόρφωσης αναφέρονται από τον κατασκευαστή στο βιβλίο οδηγιών του ενισχυτή. Η ισχύς αυτή αποδίδεται συνήθως σε ένα συγκεκριμένο ιδανικό ωμικό φορτίο. Παρά το γεγονός πως τα ηχεία που καλείται να οδηγήσει ο ενισχυτής ήχου αποτελούνται συνήθως από στοιχεία επαγωγικά όπως τα πηνία των μεγαφώνων, στοιχεία χωρητικά όπως οι πυκνωτές των συστημάτων διαχωρισμού συχνοτήτων (crossovers) και ωμικά στοιχεία, η μέτρηση της ισχύος εξόδου γίνεται ιδανικά επί ενός ωμικού φορτίου. Η τιμή της αντίστασης του φορτίου αυτού είναι συνήθως περί τα δύο, τέσσερα, οκτώ ή δεκαέξι Ohm. Θεωρητικά, ένας ενισχυτής μπορεί να αποδώσει υψηλότερη ισχύ σε χαμηλότερης αντίστασης φορτία λόγω του μεγαλύτερου πλάτους ρεύματος που ζητείται από το φορτίο. Στην πράξη όμως, μπορεί να αναφέρεται ρητά στο εγχειρίδιο χρήσης ενός ενισχυτή πως δεν πρέπει να συνδεθεί με φορτία κάτω των τεσσάρων ή οκτώ Ohm. Ο περιορισμός αυτός τίθεται για να μην υπερθερμανθούν και εν τέλει καταστραφούν τα στοιχεία του ενισχυτή όπως τα τρανζίστορ, οι λυχνίες εξόδου και το τροφοδοτικό του λόγω των υψηλότερων ρευμάτων που ζητά ένα χαμηλότερης αντίστασης φορτίο.

Η ισχύς εξόδου ενός ενισχυτή θεωρείται λαθεμένα ως το πιο σημαντικό μετρήσιμο μέγεθός του από πολλούς καταναλωτές. Αυτό γίνεται για διάφορους λόγους που αφορούν κυρίως πρακτικές προώθησης και πώλησης του ενισχυτή ως προϊόντος (marketing). Η τιμή της ισχύος εξόδου κάποιες φορές αναφέρεται μάλιστα στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο ενισχυτής επί ενός φορτίου. Η μέγιστη αυτή ισχύς, αν και πραγματική, μπορεί να παραχθεί από τον ενισχυτή για ορισμένο χρονικό διάστημα, σε συγκεκριμένες συχνότητες και με μεγάλες τιμές αρμονικής παραμόρφωσης. Η υψηλή παραμόρφωση εμφανίζεται κυρίως λόγω του φαινομένου του ψαλιδισμού του σήματος εξόδου. Με τον ψαλιδισμό των κορυφών του πλάτους του σήματος ημιτόνου, το παραγόμενο σήμα εξόδου πλησιάζει τη μορφή τετραφωνικού παλμού και περιέχει πολύ περισσότερες αρμονικές συχνότητες. Μάλιστα, ο ψαλιδισμός μπορεί να μην είναι ομοιόμορφος στις θετικές και αρνητικές τιμές του πλάτους και αυτό καλείται ασύμμετρη παραμόρφωση. Ο ψαλιδισμός εμφανίζεται συνήθως όταν το κύκλωμα του ενισχυτή προσπαθεί να δώσει τάσεις εξόδου που πλησιάζουν τη μέγιστη DC τάση των γραμμών τροφοδοσίας του τροφοδοτικού. Αν για παράδειγμα, ζητήσουμε από έναν ενισχυτή που τροφοδοτείται από συμμετρική πηγή τάσης +/-15Vdc να ενισχύσει ένα σήμα καθαρού ημιτόνου πλάτους 1Vpp (από κορυφή σε κορυφή) με ένα πολλαπλασιαστικό παράγοντα επί 40, τότε του ζητούμε να αποδώσει 40Vpp στην έξοδό του. Ακόμη και ιδανικά, ο ενισχυτής δε θα μπορούσε να αποδώσει τάση επιπέδου άνω των 30Vpp στην έξοδο του λόγω της τάσης τροφοδοσίας του. Επομένως, θα έχουμε ψαλιδισμό του πλάτους του ημιτόνου έως το επίπεδο των 30Vpp. Το σήμα εξόδου θα έχει συμπιεστεί σε σχέση με το σήμα που θα θέλαμε να λάβουμε, οδηγώντας σε παραγωγή αρμονικών συχνοτήτων που δεν υπήρχαν στο αρχικό ημίτονο και άρα σε υψηλά ποσοστά THD παραμόρφωσης. Στο σχήμα 3.14 παρατηρούμε ένα σήμα ημιτόνου ψαλιδισμένο (clipped) :



Σχήμα 3.14

Παρατηρούμε ότι για ημιτονικό σήμα εξόδου πλάτους  $V_p$ , μικρότερο από ένα κατώφλι τάσης  $V_c$ , το ημίτονο δεν ψαλιδίζεται. Το κατώφλι τάσης  $V_c$  είναι λίγο μικρότερο από την τάση DC τροφοδοσίας του κυκλώματος του ενισχυτή. Η τάση DC τροφοδοσίας του κυκλώματος ενίσχυσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν σταθερότερη χωρίς κυματώσεις ή συνιστώσες εναλλασσόμενης τάσης υψηλών ή χαμηλών συχνοτήτων καθώς μπορεί να εμφανιστούν φαινόμενα ενδο-διαμόρφωσης που θα περιγράψουμε στη συνέχεια. Το φιλτράρισμα της dc τάσης τροφοδοσίας από κυματώσεις συχνότητας διπλάσιας της AC τάσης τροφοδοσίας και άλλες AC συνιστώσες αναλαμβάνουν μεγάλοι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές «εξομάλυνσης» στο κύκλωμα του τροφοδοτικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα αυτών των πυκνωτών, τόσο σταθερότερη είναι η dc τάση που αποδίδεται στον ενισχυτή. Γι αυτό το λόγο υπάρχουν ενισχυτές με συστοιχίες πυκνωτών εξομάλυνσης χωρητικότητας δεκάδων χιλιάδων micro-Farads ( $\mu F$ ).

Σε οικονομικό εξοπλισμό ενίσχυσης ήχου συναντάμε και μία μέτρηση της PMPO ισχύος (peak musical power output). Αυτή η μέτρηση είναι σε μεγάλο βαθμό χωρίς νόημα και χρησιμοποιείται συχνά για λόγους προώθησης των προϊόντων. Κάποιες φορές μπορεί να αναφέρεται στην ισχύ που παράγεται στην έξοδο ενός ενισχυτή σε είσοδο μίας συνάρτησης Dirac. Η ισχύς της κρουστικής απόκρισης σημειώνεται στα κατασκευαστικά στοιχεία του ενισχυτή αλλά η τιμή της είναι πολύ υψηλότερη από αυτή που μπορεί να παραχθεί από τον ενισχυτή συνεχόμενα και για κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα χωρίς να υπερθερμανθεί λόγω απωλειών Joule.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 υπήρξε πολλή διαμάχη επί του θέματος της αναφοράς της ισχύος εξόδου των ενισχυτών ήχου και η κυβέρνηση των ΗΠΑ ζήτησε να αναφέρονται τα στοιχεία ενεργού ισχύος (RMS) για κάθε συσκευή εξοπλισμού υψηλής ηχητικής πιστότητας (hi-fi, high fidelity). Εντούτοις, πολλοί κατασκευαστές χρησιμοποιούν ακόμη άλλους τρόπους μέτρησης της ισχύος εξόδου των προϊόντων τους. Στην πράξη, ο καταναλωτής θα έπρεπε να ενδιαφέρεται περισσότερο για τη στάθμη ακουστικής πίεσης SPL (sound pressure level) που μπορεί να παράγει ένα ηχητικό σύστημα παρά για την ισχύ του καθώς αυτό θα καθορίσει «πόσο δυνατά» θα μπορεί να ακούσει την αγαπημένη του μουσική μέσω αυτού του συστήματος.

### 3.10 Παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (IMD)

Η παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (IMD, intermodulation distortion) είναι η παραμόρφωση που δεν σχετίζεται αρμονικά με το σήμα που ενισχύεται από έναν ενισχυτή ήχου. Η IMD είναι ένα μέτρο του επιπέδου της παρασιτικών σημάτων που προκύπτουν από ανεπιθύμητο συνδυασμό εισόδων διαφορετικής συχνότητας. Ιδανικά, σήματα εισόδου διαφορετικών συχνοτήτων μπορούν να συμβάλλουν και να δημιουργήσουν σήματα συχνότητας που δεν είναι πολλαπλάσια των θεμελιωδών συχνοτήτων των αρχικών σημάτων εισόδου. Αν για παράδειγμα, δυο σήματα ημιτόνου συχνοτήτων  $f_1$  και  $f_2$  συνδυαστούν, τότε μπορεί να παραχθούν σήματα ημιτονικά με συχνότητες  $f_1+f_2$  ή  $f_1-f_2$ . Αυτές οι παρασιτικές συνιστώσες δεν δημιουργούνται συνήθως στην πράξη από διακριτά σήματα εισόδου διαφορετικής συχνότητας. Οι παρασιτικές συχνότητες παράγονται συνήθως λόγω παρουσίας μη-γραμμικότητας στο σύστημα ενίσχυσης. Πολλά στοιχεία όπως τα τρανζίστορ ή λυχνίες ισχύος ενός ενισχυτή παρουσιάζουν μη-γραμμικότητες, ιδιαίτερα σε υψηλότερα επίπεδα εντάσεως, τάσεως και ισχύος. Η μη-γραμμικότητες στη συνάρτηση μεταφοράς ενός ενισχυτή μπορούν να μειωθούν ή και να εξαλειφθούν με τη χρήση αρνητικής ανάδρασης. Επαρκώς υψηλό επίπεδο αρνητικής ανατροφοδότησης του σήματος εξόδου, πίσω στην είσοδο (feedback), μπορεί να μειώσει το φαινόμενο αυτό σε έναν ενισχυτή. Πολλοί πιστεύουν πως είναι καλύτερο οι ενισχυτές να σχεδιάζονται με τρόπο που να ελαχιστοποιούνται τα επίπεδα ανατροφοδότησης, αν και αυτό είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Η παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (IMD) των μεγαφώνων ενός ηχείου είναι, σχεδόν πάντα μεγαλύτερη από ό, τι στις περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές. Η IMD αυξάνεται σε μεγαλύτερες εντάσεις καθώς παραμορφώνεται το σχήμα του κώνου του μεγαφώνου από την έντονη ταλάντωση. Η μείωση του εύρους ζώνης του μεγαφώνου μειώνει άμεσα την IMD. Αυτό επιτυγχάνεται με το διαχωρισμό της επιθυμητής περιοχής συχνοτήτων (συνήθως 20-20000HZ) σε διαφορετικές μικρότερες ζώνες συχνοτήτων. Για το διαχωρισμό σε περισσότερες από μία περιοχές συχνοτήτων, γίνεται χρήση φίλτρων διαχωρισμού (crossover). Συνήθως τα φίλτρα αυτά είναι παθητικά και ενσωματώνονται στο ηχείο. Τα φίλτρα αυτά έχουν μία είσοδο και δύο ή περισσότερες εξόδους. Η είσοδος λαμβάνεται από τον ενισχυτή ήχου. Οι εξοδοί των φίλτρων διαχωρισμού ονομάζονται «δρόμοι» και είναι έξοδοι βαθυπερατών, υψιπερατών ή ζωνοπερατών φίλτρων. Σε ένα συνηθισμένο ηχείο δυο δρόμων, το φίλτρο διαχωρισμού αποτελείται από ένα υψιπερατό φίλτρο και ένα βαθυπερατό που έχουν κοινή είσοδο. Το υψιπερατό φίλτρο οδηγεί το μεγάφωνο υψηλών συχνοτήτων ή «tweeter» στα Αγγλικά. Το βαθυπερατό φίλτρο οδηγεί το μεγάφωνο χαμηλών συχνοτήτων ή «woofers» στα Αγγλικά. Φίλτρα crossover με απότομη κλίση στη ζώνη αποκοπής είναι πιο αποτελεσματικά στη μείωση της παραμόρφωσης ενδοδιαμόρφωσης, αλλά παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά και μπορεί να είναι πολύ ακριβά για να υλοποιηθούν, ειδικά σε ηχητικά συστήματα μεγάλης ισχύος. Για αυτό το λόγο, σήμερα χρησιμοποιούνται ενεργά φίλτρα διαχωρισμού πριν τους τελικούς ενισχυτές και τα ηχεία σε εγκαταστάσεις επαγγελματικού ήχου και όχι παθητικά φίλτρα εντός των ηχείων. Αυτό συμβάλλει στη μείωση των απωλειών ενέργειας και θερμότητας στα ηχεία καθώς και μείωση του κόστους υλοποίησης αυτών των φίλτρων.

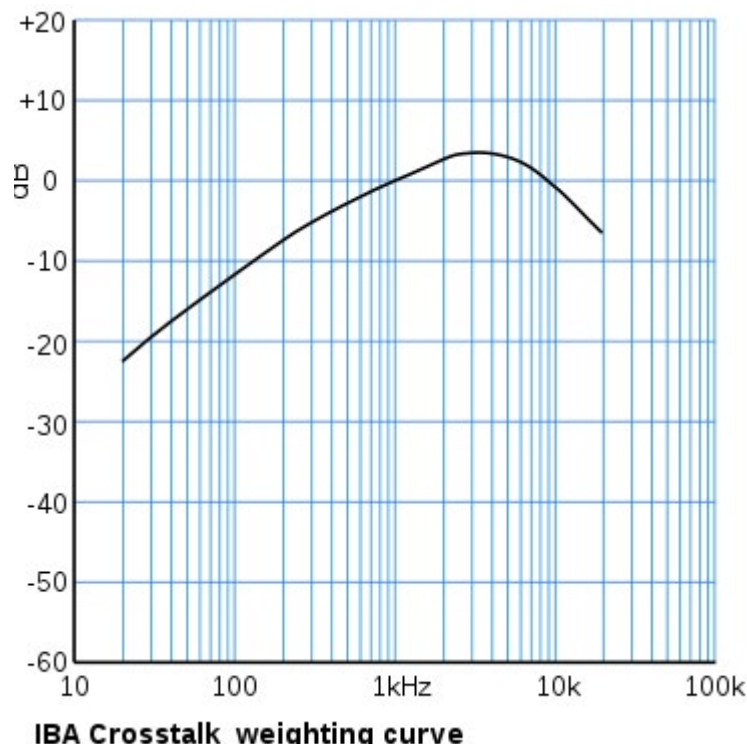
### 3.11 Θόρυβος

Ως θόρυβο σε ένα ηχητικό σύστημα ορίζουμε το επίπεδο του ανεπιθύμητου ήχου που παράγεται από το ίδιο το σύστημα ή από παρεμβολές από εξωτερικές πηγές που προστίθεται στο αρχικό προς ενίσχυση ηχητικό σήμα. Το θέμα του θορύβου θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στην ανάλυσή μας όμως εδώ θα αναφέρουμε απλά διάφορα είδη και παραδείγματα θορύβου. Θόρυβο μπορεί να παράγει το ίδιο το ηχητικό σύστημα ακόμη και χωρίς σήμα στην είσοδό του. Ένα απλό παράδειγμα είναι ο θόρυβος που παράγουν ανεμιστήρες ψύξης ενός ηχητικού συστήματος. Άλλο παράδειγμα θορύβου που εμφανίζεται στην έξοδο ενισχυτών ακόμη και με μηδενική είσοδο είναι ο χαμηλής συχνότητας βόμβος

ή «hum» στα αγγλικά. Ο θόρυβος αυτός δημιουργείται κυρίως λόγω παρεμβολής στο σύστημα της τάσης του δικτύου που είναι εναλλασσόμενη στα 50-60HZ. Οι χαμηλές αυτές συχνότητες εμφανίζονται ως ανεπιθύμητη έξοδος του συστήματος λόγω μεγάλου μήκους καλωδίων και ανεπαρκούς φιλτραρίσματος στις γραμμές τροφοδοσίας και εισόδου/εξόδου του συστήματος. Σε άλλες περιπτώσεις, έχουμε ένα σήμα στην είσοδο του συστήματος και ο θόρυβος εξαρτάται από το πλάτος του σήματος εισόδου και εξόδου. Φυσικά μας ενδιαφέρει περισσότερο ο λόγος του επιθυμητού ηχητικού σήματος προς το θόρυβο (SNR, signal to noise ratio). Αν για παράδειγμα, το επίπεδο στάθμης θορύβου δεν είναι αρκετές δεκάδες decibel χαμηλότερο από το επίπεδο στάθμης του επιθυμητού ηχητικού σήματος, ο θόρυβος γίνεται περισσότερο αντιληπτός και κατ' επέκταση ενοχλητικός για τον ακροατή.

### 3.12«Crosstalk»

«Crosstalk» ή αλληλο-παρεμβολή ονομάζεται το φαινόμενο εισαγωγής θορύβου σε ένα κανάλι σήματος από άλλο κανάλι. Προκαλείται συνήθως από ρεύματα που επάγονται μέσω της γείωσης ενός κυκλώματος και παρασιτική επαγωγή ή χωρητικότητα μεταξύ των εξαρτημάτων ή των γραμμών. Το crosstalk μειώνει, μερικές φορές αισθητά, ο καλός διαχωρισμός μεταξύ των καναλιών και η διακριτή υλοποίηση κάθε καναλιού ως ανεξάρτητο κύκλωμα. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται σε κάποια ακριβά στερεοφωνικά συστήματα όπου κάθε ένα από τα δυο κανάλια υλοποιείται επάνω σε δική του ανεξάρτητη πλακέτα ή και με δικό του ανεξάρτητο τροφοδοτικό. Άλλοτε χρησιμοποιούνται δυο εντελώς ανεξάρτητοι μονοφωνικοί ενισχυτές ή «monoblock» όπως αναφέρονται στα αγγλικά για την ενίσχυση ενός δικαναλικού σήματος. Το crosstalk μπορεί να μετρηθεί μεταξύ δύο καναλιών σε decibel ως ο λόγος του σήματος παρεμβολής προς την ονομαστική τιμή του επιθυμητού σήματος. Συνήθως υπάρχει η απαίτηση ο λόγος αυτός να βρίσκεται σε τιμές κάτω των μείον τριάντα decibel (-30dB). Εντούτοις, είναι δυσκολότερο να επιτευχθεί αυτό το νούμερο σε ραδιοφωνικές FM μεταδόσεις και εγγραφές δίσκων βινυλίου. Επίσης, έχει μελετηθεί πως η υποκειμενική ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού στο φαινόμενο crosstalk εξαρτάται από τη συχνότητα του σήματος. Η στατιστικές μετρήσεις αυτές καταγράφονται στο παρακάτω γράφημα (σχήμα 3.15)



Σχήμα 3.15

### 3.13 Λόγος απόρριψης κοινού σήματος (CMRR)

Αν ταυτόχρονα το ίδιο σήμα εφαρμόζεται και στις δυο εισόδους ενός ηχητικού συστήματος όπως ενός ενισχυτή, τότε αυτό καλείται κοινό σήμα. Αν το πρώτο στάδιο ενίσχυσης που συναντά το σήμα εισόδου είναι ένα διαφορικό στάδιο, τότε στην έξοδό του θα εμφανιστεί μόνο η διαφορά των δύο εισόδων του και το κοινό σήμα θα απορριφθεί. Ένα παράδειγμα ενισχυτή με διαφορικό στάδιο εισόδου είναι ο τελεστικός ενισχυτής (operational amplifier). Επειδή ο τελεστικός ενισχυτής έχει έξοδο μόνο όταν υπάρχει διαφορά μεταξύ των δυο εισόδων του, στο κοινό σήμα πρέπει η έξοδος να είναι μηδέν. Αυτό δεν γίνεται στην πράξη και η έξοδος στο κοινό σήμα έχει κάποια πολύ μικρή τιμή. Επειδή το κοινό σήμα δύο σημάτων εισόδου είναι συνήθως κάποιος θόρυβος ή εξωτερική παρεμβολή που εμφανίζεται και στις δυο εισόδους, η ενίσχυση της διαφοράς σημάτων βοηθά πολύ στη μείωση του θορύβου. Η απολαβή κοινού σήματος είναι κανονικά πολύ μικρότερη από την απολαβή διαφορικού σήματος. Ο λόγος της απολαβής διαφορικού σήματος προς την απολαβή κοινού σήματος λέγεται λόγος απόρριψης κοινού σήματος ( common mode rejection ratio – CMRR ). Ο λόγος αυτός μετρείται σε decibel (db) ως εξής:

**CMRR ( λόγος ) = απολαβή διαφορικού σήματος / απολαβή κοινού σήματος.**

**CMRR (dB ) = 20 log [(CMRR)].**

Συστήματα με διαφορικές εισόδους ονομάζονται ισορροπημένα (balanced) ενώ συστήματα με απλές εισόδους ονομάζονται μη-ισορροπημένα (unbalanced). Οι σύνδεσμοι και τα καλώδια που χρησιμοποιούνται σε επαγγελματικές ηχητικές εγκαταστάσεις και συστήματα όπως κονσόλες μείξης και επαγγελματικούς ενισχυτές είναι ισορροπημένα και ονομάζονται «XLR» ή «Cannon» προς τιμήν του εφευρέτη τους James H. Cannon.

### 3.14 Δυναμική περιοχή

Το δυναμικό εύρος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη ένταση του ήχου από μία δεδομένη πηγή σήματος. Η μέτρηση αυτή ποσοτικοποιεί επίσης τη μέγιστη δυναμική περιοχή που μπορεί να μεταδώσει ένα σύστημα ήχου. Αυτός ο λόγος συνήθως εκφράζεται σε decibel. Η δυναμική περιοχή του συστήματος μετράται συνήθως ως ο λόγος του σήματος εξόδου της συσκευής χωρίς κανένα σήμα εισόδου προς το μέγιστο σήμα εξόδου με ημιτονοειδή είσοδο, που μπορεί να παράγει η συσκευή διατηρώντας παράλληλα ένα χαμηλό επίπεδο παραμόρφωσης.

Όμως από τη δεκαετία του 1990, έχει προταθεί από διάφορες αρχές, συμπεριλαμβανομένης και της Κοινότητας Μηχανικών Ήχου (Audio Engineering Society) ότι οι μετρήσεις της δυναμικής περιοχής πρέπει να γίνονται με ένα ηχητικό σήμα παρόν στην είσοδο. Αυτό μειώνει τις αμφισβητήσιμες μετρήσεις που βασίζονται στη χρήση κενού ή βωβού σήματος ως είσοδο.

Το δυναμικό εύρος του ανθρώπινου αυτιού πλησιάζει τα 130dB. Οι περισσότεροι ποιοτικοί σύγχρονοι ενισχυτές ήχου έχουν ένα δυναμικό εύρος άνω των 110dB, κάτι που υποστηρίζουν κάποια ψηφιακά μέσα εγγραφής μουσικής. Το CD για παράδειγμα υποστηρίζει ιδανικά δυναμικό εύρος 100dB ενώ η μαγνητική κασέτα υποστήριζε δυναμικό εύρος 60dB περίπου ενώ οι δίσκοι βινυλίου υποστήριζαν δυναμικό εύρος από 50 έως 80dB περίπου. Το δυναμικό εύρος φυσικά μειώνεται στην πράξη λόγω περιορισμών των μέσων εγγραφής και του εξοπλισμού αναπαραγωγής ήχου.

### 3.15 Λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR)

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο ή «Signal to Noise Ratio» (SNR ή  $S / N$ ) είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται στον τομέα της επιστήμης και της μηχανικής για να συγκρίνει το επίπεδο του επιθυμητού σήματος προς το επίπεδο θορύβου του περιβάλλοντος. Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος σήματος προς την ισχύ θορύβου και συχνά εκφράζεται σε ντεσιμπέλ (dB). Ένας λόγος SNR μεγαλύτερο από ένα προς ένα (επομένως μεγαλύτερο από 0 dB) , μεταφράζεται σε μεγαλύτερη ισχύ επιθυμητού σήματος από την ισχύ του θορύβου. Ενώ ο λόγος SNR είναι διαδεδομένος για ηλεκτρικά σήματα, μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε μορφή σήματος. Η μέτρηση της μέγιστης ισχύος ενός σήματος προς την ισχύ του εμφανιζόμενου θορύβου που αλλοιώνει το σήμα, ονομάζεται λόγος κορυφής σήματος προς θόρυβο PSNR (Peak Signal to noise ratio).

### 3.16 Παραμόρφωση φάσης

Ένα ιδανικό σύστημα ήχου θα διατηρήσει τη συνοχή της φάσης ενός σήματος σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Στην επεξεργασία σήματος, παραμόρφωση φάσης ή παραμόρφωση φάσεως-συχνότητας είναι η παραμόρφωση που συμβαίνει όταν η απόκριση φάσης ενός φίλτρου δεν είναι γραμμική στην περιοχή συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Τότε η μετατόπιση φάσης που εισάγεται από ένα κύκλωμα ή συσκευή δεν είναι ευθέως ανάλογη προς τη συχνότητα, ή το σημείο τομής μηδενικής συχνότητας της χαρακτηριστικής φάσης-συχνότητας δεν είναι το μηδέν ή ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του  $2\pi$  σε ακτίνια.

Η παραμόρφωση φάσης μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολο να μειωθεί ή να εξαλειφθεί. Το ανθρώπινο αυτί δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στη σταδιακή παραμόρφωση φάσης, αν και είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στις σχέσεις φάσεων μεταξύ ήχων που ακούγονται ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, διαφορές φάσεις εντοπίζονται εύκολα σε συστήματα με περισσότερα από ένα ηχεία που παράγουν ηχητικά σήματα την ίδια στιγμή. Αν κάποιο ηχείο είναι συνδεδεμένο με ανάστροφη πολικότητα, θα υπάρχει μία διαφορά φάσης  $2\pi$  rad ή  $360^\circ$  μοίρες μεταξύ του ηχητικού σήματος που παράγει αυτό το ηχείο με τα σήματα από τα άλλα ηχεία. Το ανθρώπινο αυτί θα αντιληφθεί αυτή τη διαφορά φάσης αρκετά εύκολα. Αν όμως τα ηχεία δεν αναπαράγουν ταυτόχρονα το δεδομένο ηχητικό σήμα, ο ακροατής δε θα μπορέσει να εντοπίσει διαφορές στη φάση. Ο σύνθετος χαρακτήρας της ευαισθησίας μας στα λάθη φάσης σε συνδυασμό με την έλλειψη ενός βολικού ελέγχου που να παρέχει μια κατανοητή αξιολόγηση της υποβάθμισης της ποιότητας ήχου λόγω φασικής παραμόρφωσης, είναι και ο λόγος που η παραμόρφωση φάσης δεν αποτελεί μέρος των συμβατικών προδιαγραφών ήχου.

### 3.17 Μεταβατική απόκριση

Ένα σύστημα μπορεί να έχει χαμηλή αρμονική παραμόρφωση καθώς αναπαράγει ή ενισχύει ένα σήμα ημιτόνου με σταθερό πλάτος, αλλά να παρουσιάζει παραμορφώσεις όταν το πλάτος του ημιτό-



νου μεταβάλλεται γρήγορα. Μία ιδανική συσκευή μπορεί να ακολουθήσει ακαριαία αυτά τα μεταβατικά φαινόμενα όπως οι απότομες αλλαγές στην τιμή του πλάτους ενός σήματος. Στην πράξη όμως, οι περισσότερες συσκευές εμφανίζουν μία καθυστέρηση να αποκριθούν σε απότομες μεταβολές της εισόδου τους. Η μεταβατική απόκριση καθορίζει πως συμπεριφέρονται τα συστήματα και οι έξοδοί τους σε μεταβολές της εισόδου.

Στους ενισχυτές ήχου, η αδυναμία του συστήματος να ακολουθήσει πιστά τις μεταβολές της εισόδου, μπορεί να αποδοθεί σε αδυναμία του τροφοδοτικού του να παρέχει ακαριαία υψηλές τιμές ηλεκτρικού ρεύματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις η μεταβατική τους απόκριση επηρεάζεται από υπερβολικά ποσοστά αρνητικής ανάδρασης. Σχετικές μετρήσεις που μας δίνουν στοιχεία για τη μεταβατική απόκριση ενισχυτών είναι ο ρυθμός ανόδου ή «slew rate» (SR) στα Αγγλικά και ο χρόνος ανόδου ή «rise time». Ο ρυθμός ανόδου ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της τάσης εξόδου ανά μονάδα χρόνου και εκφράζεται σε βολτ ανά δευτερόλεπτο (V/s).

**SR = max { dVout/dt } ,** όπου Vout είναι το πλάτος της τάσης του σήματος εξόδου του συστήματος.

Οι περιορισμοί του ρυθμού ανόδου ενός ενισχυτή οδηγούν σε μη-γραμμικότητα της απόκρισής του και κατ' επέκταση σε παραμόρφωση της παραγόμενης κυματομορφής στην έξοδό του. Για μια ημιτονοειδή κυματομορφή, ο ρυθμός ανόδου ενός ενισχυτή πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη για να μην εμφανίζονται παραμορφώσεις: **SR >= 2πf \* Vpk**, όπου Vpk είναι η μέγιστη τιμή (κορυφή ή «peak») του πλάτους του σήματος εισόδου και f η συχνότητα του σήματος.

Ο χρόνος ανόδου σχετίζεται με τη βηματική απόκριση ενός αναλογικού συστήματος. Όταν η είσοδος είναι μια βηματική συνάρτηση, ο χρόνος ανόδου είναι ο χρόνος που χρειάζεται το αναλογικό ηλεκτρονικό σύστημα για να ανυψώσει το πλάτος της εξόδου του από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής. Πολλοί ενισχυτές πάσχουν από χαμηλούς χρόνους ανόδου λόγω παρασιτικών χωρητικότητων και αυτεπαγωγών που εμφανίζουν τα στοιχεία των κυκλωμάτων τους. Με την εξέλιξη των ψηφιακών κυκλωμάτων, παρουσιάζονται συνεχώς στοιχεία με ταχύτερες αποκρίσεις και μικρότερους χρόνους ανόδου.

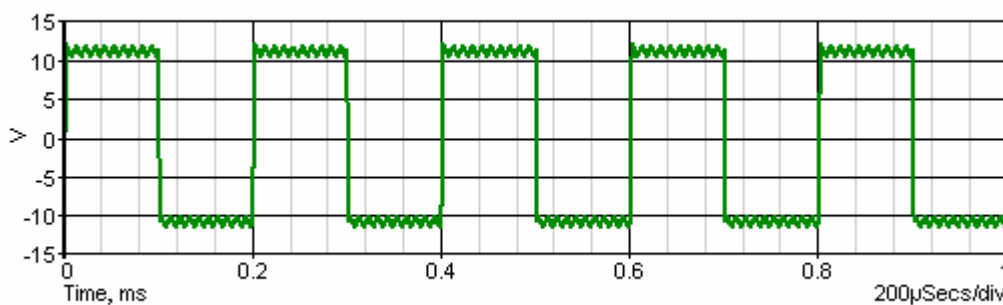
### 3.18 Συντελεστής απόσβεσης

Για ένα ηχητικό σύστημα, συντελεστής απόσβεσης (damping factor) είναι ο λόγος της αντίστασης των φορτίων που οδηγεί ένας ενισχυτής προς την αντίσταση εξόδου του ενισχυτή και των καλωδίων σύνδεσης του με τα ηχεία. Ως αντίσταση φορτίου, συχνά λαμβάνεται η DC αντίσταση του πηνίου φωνής των ηχείων. Ο συντελεστής απόσβεσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερος καθώς είναι ένα μέτρο του πόσο καλά ένας ενισχυτής ισχύος ελέγχει την ανεπιθύμητη κίνηση ενός μεγαφώνου. Ένας ενισχυτής θα πρέπει να είναι σε θέση να καταστείλει τους συντονισμούς που προκαλούνται από τη μηχανική κίνηση λόγω αδράνειας ενός κώνου μεγάφωνου. Το φαινόμενο αυτό συναντάται ιδιαίτερα σε μεγάφωνα με κώνο μεγάλης διαμέτρου και μεγάλης μάζας κώνου. Η συχνότητα όπου το μεγάφωνο συντονίζεται ως σύστημα είναι εκείνη που ενδιαφέρει περισσότερο τους μηχανικούς για τη μέτρηση αυτή. Για τα περισσότερα συστήματα, ένας υψηλός συντελεστής απόσβεσης επιτυγχάνεται ουσιαστικά με την εξασφάλιση ότι η σύνθετη αντίσταση εξόδου του ενισχυτή θα είναι κοντά στο μηδέν. Ο ενισχυτής, ως πηγή τάσης με πολύ χαμηλή αντίσταση εξόδου, εξασφαλίζει σταθερό πλάτος της τάσης εξόδου του για ένα μεγάλο εύρος τιμών της αντίστασης των φορτίων. Φυσικά, ρόλο στο συντελεστή απόσβεσης έχουν και τα φορτία, δηλαδή τα ηχεία που συνδέονται στον ενισχυτή και για αυτό το λόγο συναντούμε συχνά την έννοια «ταίριασμα» ηχείων κι ενισχυτή. Κάθε διαφορετικό ηχείο με διαφορετικά μεγάφωνα θα έχει διαφορετική συχνότητα συντονισμού και πιθανόν διαφορετικό σύστημα διαχωρισμού συχνοτήτων. Επομένως, ο συντελεστής απόσβεσης θα μεταβάλλεται.

Επίσης, πρέπει τα καλώδια των ηχείων να είναι επαρκώς μικρά σε μήκος και να έχουν αρκετά μεγάλη διατομή ώστε να παρουσιάζουν όσο το δυνατόν μικρότερη ωμική αντίσταση κι απώλειες ενέργειας Joule. Οι απώλειες στα συστήματα των ηχείων είναι τόσο μηχανικές όσο και ηλεκτρικές. Απώλειες Joule υπάρχουν τόσο επάνω στη DC αντίσταση του μεγαφώνου όσο και στα ηλεκτρονικά στοιχεία του διαχωριστή συχνοτήτων (crossover). Ένας συντελεστής απόσβεσης της τάξης του αριθμού 20 ή μεγαλύτερος θεωρείται υπέρ-επαρκής για επαγγελματικά συστήματα ενίσχυσης ήχου. Η αρνητική ανάδραση σε έναν ενισχυτή μειώνει αποτελεσματικά την αντίσταση εξόδου του και συνεπώς, αυξάνει το συντελεστή απόσβεσής του.

### 3.19 Παραμόρφωση λόγω μεταβατικής ενδοδιαμόρφωσης, Transient Intermodulation Distortion (TIM)

Η TIM είναι η παραμόρφωση που προκαλείται σε μία κυματομορφή με γρήγορες και απότομες αλλαγές της στάθμης του πλάτους της από ενισχυτές που χρησιμοποιούν μεγάλα ποσοστά αρνητικής ανάδρασης κι εμφανίζουν καθυστέρηση στην απόκρισή τους. Σύμφωνα με τους MATTI OTALA και EERO LEINONEN, όταν μία κυματομορφή με απότομες μεταβάσεις εφαρμοσθεί ως είσοδος σε ενισχυτή με αρνητική ανάδραση άνω των 40dB, σε κάθε εσωτερικό στάδιο ενίσχυσης θα εμφανιστούν φαινόμενα υπερακόνησης (overshoot) λόγω περιορισμών στην ταχύτητα απόκρισης του σταδίου. Εξ αιτίας όμως του περιορισμένου δυναμικού εύρους κάθε σταδίου ενίσχυσης, οι υπερακοντισμοί θα ψαλιδιστούν και τα αντίστοιχα στάδια ενίσχυσης θα λειτουργούν πλέον στην περιοχή αποκοπής και όχι στη γραμμική τους περιοχή. Αυτές οι συνθήκες θα οδηγήσουν σε αισθητή παραμόρφωση της αρχικής γρήγορα μεταβαλλόμενης κυματομορφής. Η παραμόρφωση αυτή δε μπορεί να εντοπιστεί όταν είσοδος του ενισχυτή είναι ένα σταθερού πλάτους ημίτονο οποιαδήποτε συχνότητας. Η κυματομορφή που χρησιμοποιείται συνήθως για τον εντοπισμό φαινομένων TIM αποτελείται από μία σειρά τετραγωνικών παλμών στην οποία υπερπροστίθεται ένα ημίτονο. Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 3.16) παρουσιάζεται μία τέτοια κυματομορφή αποτελούμενη από μία παλμοσειρά συχνότητας 10kHz στην οποία έχει προστεθεί μία ημιτονική κυμάτωση 100kHz.



Σχήμα 3.16

Για τη μείωση των φαινομένων TIM, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός ενισχυτή με χαμηλότερα ποσοστά αρνητικής ανάδρασης. Αυτό επιτυγχάνεται με χαμηλότερο κέρδος ανοικτού βρόχου που δεν ξεπερνά το κέρδος κλειστού βρόχου (με αρνητική ανάδραση) πάνω από 25dB. Επίσης, το εύρος συχνοτήτων κάθε σταδίου ενίσχυσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο των 20kHz όμως το αρχικό στάδιο εισόδου θα πρέπει να διαθέτει βαθυπερατό φίλτρο που να αποκόπτει σήματα συχνοτήτων υπερήχων και ραδιοφώνου RF (radio frequency) που δεν ανήκουν στο ακουστικό φάσμα. Λόγω της μείωσης της

αρνητικής ανάδρασης, πρέπει τα σχέδια και η υλοποίηση του ενισχυτή να είναι πλήρως συμμετρικά ώστε να διατηρηθεί η αρμονική παραμόρφωση THD σε χαμηλά επίπεδα και να λειτουργεί στη γραμμική περιοχή ο ενισχυτής.

Τα μεγέθη που είδαμε σε αυτό το κεφάλαιο θα συναντήσουμε στην περαιτέρω ανάλυσή μας. Στη συνέχεια θα δούμε τα διάφορα στάδια από τα οποία περνά ένα ηχητικό σήμα για την εγγραφή, επεξεργασία και αναπαραγωγή του. Τα στάδια αυτά θα οργανωθούν σε νοητές αλυσίδες και σε κάθε στάδιο θα δούμε τρόπους ανάλυσης και μέτρησης σημαντικών μεγεθών που σχετίζονται με την πιστότητα του ήχου. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να βοηθήσουν έναν μηχανικό να βελτιώσει την απόδοση του εκάστοτε σταδίου αυτής της αλυσίδας ως προς την πιστότητα.

### **Βιβλιογραφία για το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο:**

«Sound - Perception – Performance» - Rolf Bader, Springer Science & Business Media, 23 Μαΐ 2013

«Acoustics for Engineers: Troy Lectures» - Jens Blauert, Ning Xiang, Springer Science & Business Media, 17 Απρ 2008

«High-fidelity Audio, Psychoacoustics, and How Our Hearing Works» - Dr. Milind Kunchur, Department of Physics and Astronomy, University of South Carolina

«ESTIMATING TIMING AND CHANNEL DISTORTION ACROSS RELATED SIGNALS» - Colin Raffel, Daniel P. W. Ellis, LabROSA, Dept. of Electrical Engineering, Columbia University

«Audio, Distortion and Feedback» - Nelson Pass, 11/1/08

«Βασικές αρχές σημάτων και συστημάτων» - Γιώργος Καραγιάννης, Πέτρος Μαραγκός, Παπασωτηρίου, 2011

Πηγές από το διαδίκτυο:

[http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts\\_acoustics\\_lesson02.pdf](http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts_acoustics_lesson02.pdf) (Ακουστική και Ψυχοακουστική, Διάλεξη 2: “Η φυσική του ήχου”, Φλώρος Ανδρέας Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας Ιονίου Πανεπιστημίου)

<http://www.electricalfacts.com/Neca/Science/sound/history.shtml>

<http://www.sengpielaudio.com/TableOfSoundPressureLevels.htm>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Sound>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/soucon.html>

<http://www.podcomplex.com/guide/physics.html>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Speed\\_of\\_sound](https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound)  
<http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/hearing.html>  
<http://www.sengpielaudio.com/calculator-soundlevel.htm>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Audio\\_frequency](https://en.wikipedia.org/wiki/Audio_frequency)  
[http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1274790](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1274790)  
<http://www.sengpielaudio.com/Calculations03.htm>  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/anerv.html>  
<http://sloaneletters.com/tag/william-derham/>  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/>  
<http://www.nchearingloss.org/hertz.htm?fromnncshhh>  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Hertz>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth\\_\(signal\\_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth_(signal_processing))  
<http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/dB.htm>  
<http://newt.phys.unsw.edu.au/~jw/education.html#music>  
<http://www.rane.com/note145.html>  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Audio/audiocon.html#c1>  
<http://www.sengpielaudio.com/calculator-ak-ohm.htm>  
<http://colinraffel.com/publications/icassp2014estimating.pdf>  
<http://parallelhomeaudio.net/TypesAudioDistortion.html>  
[http://www.firstwatt.com/pdf/art\\_dist\\_fdbk.pdf](http://www.firstwatt.com/pdf/art_dist_fdbk.pdf)  
<http://leachlegacy.ece.gatech.edu/papers/lowtim/feb76feb77articles.pdf>  
[http://www.eetimes.com/author.asp?doc\\_id=1284811](http://www.eetimes.com/author.asp?doc_id=1284811)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Slew-induced\\_distortion](https://en.wikipedia.org/wiki/Slew-induced_distortion)  
<http://electronics.howstuffworks.com/high-fidelity-high-definition1.htm>  
<http://www.ruthfarrar.com/archives/106>  
<http://www.bl.uk/subjects/sound>  
<https://www.sweetwater.com/insync/ccir-468-weighting/>  
[https://www.noisebud.se/?page\\_id=2671](https://www.noisebud.se/?page_id=2671)  
<http://www.audioholics.com/audio-amplifier/damping-factor-effects-on-system-response>

---

## Κεφάλαιο 4: Στάδια ηχητικής επεξεργασίας

---

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο είδαμε επιγραμματικά αρκετά μετρήσιμα μεγέθη που μπορούν να καθορίσουν κατά πόσο αναπαράγεται πιστά ένα αρχικό ηχητικό σήμα αν τεθεί ως είσοδος σε ένα ηχητικό σύστημα. Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι καθαρά μηχανικό όπως στην περίπτωση του φωνογράφου, ηλεκτρικό, ηλεκτρονικό, αναλογικό, ψηφιακό ή συνδυασμός τέτοιων συστημάτων. Στην έξοδο αυτού του ηχητικού συστήματος θα λάβουμε ένα διαφορετικό σήμα. Το σήμα αυτό μπορεί να έχει ελάχιστες διαφορές από το σήμα που θεωρήσαμε ως αρχικό αλλά μπορεί να έχει και μεγάλες διαφορές. Οι διαφορές αυτές μπορεί να είναι ως προς το πλάτος σε πολύ απλές περιπτώσεις αλλά συνήθως μεταβάλλονται και πολλά επιπλέον χαρακτηριστικά του αρχικού μας σήματος.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα ορίσουμε τι είναι η ηχητική επεξεργασία, θα δούμε αναλυτικά ποια είναι τα στάδια επεξεργασίας ενός ηχητικού σήματος και θα σχηματίσουμε μερικές «αλυσίδες» σταδίων επεξεργασίας ηχητικών σημάτων. Οι αλυσίδες αυτές έχουν πρακτική εφαρμογή σήμερα και απασχολούν πολλούς μηχανικούς. Οι αλυσίδα των σταδίων θα μπορούσε σε κάποιες περιπτώσεις να θεωρηθεί και ως μια αλυσιδωτή σύνδεση διαφορετικών συστημάτων όμως σε άλλες περιπτώσεις η διασύνδεση των σταδίων απαιτεί κάποια προσαρμογή και δεν είναι απαραίτητο να γίνεται σε πραγματικό χρόνο.

Μία διάκριση των αλυσίδων ηχητικής επεξεργασίας μπορεί να γίνει αρχικά ως προς το χρόνο. Για παράδειγμα, τα επαγγελματικά ηχητικά συστήματα κάλυψης εκδηλώσεων και δημόσιων ομιλιών ή ανακοινώσεων είναι συστήματα πραγματικού χρόνου (real time). Αντίθετα, τα συστήματα ηχογράφησης και παραγωγής μουσικής δεν είναι συνήθως πραγματικού χρόνου καθώς μπορεί να μεσολαβήσουν έως και μήνες μεταξύ της αρχικής εκτέλεσης και ηχογράφησης ενός μουσικού κομματιού μέχρι και το τελικό αποτέλεσμα της μείξης και παραγωγής του κομματιού. Στη μουσική παραγωγή δίνεται έμφαση σε άλλους παράγοντες. Ένας παράγοντας είναι η πρόβλεψη της καλής απόδοσης του προϊόντος της μείξης που έγινε στο στούντιο, στα ηχοσυστήματα που χρησιμοποιούν συνήθως οι καταναλωτές που θα αγοράσουν και θα ακούσουν το δίσκο. Ένας δίσκος που έχει δημιουργηθεί για παράδειγμα με πολύ υψηλά κριτήρια για ακρόαση σε υψηλής απόδοσης ηχοσυστήματα, πιθανότατα δε θα αποδοθεί σωστά, σύμφωνα με το μηχανικό ήχο, από μία αναλογική FM ραδιοφωνική μετάδοση.

Τόσο στα συστήματα πραγματικού χρόνου όσο και στα υπόλοιπα συστήματα ηχητικής επεξεργασίας, δίνεται έμφαση στην αναπαραγωγή του ήχου όσο πιο πιστά γίνεται, σύμφωνα πάντοτε με τα κριτήρια του μηχανικού ήχου, του ηχολήπτη, του καλλιτέχνη και του μουσικού παραγωγού. Η πιστή αναπαραγωγή του ήχου κρίνεται φυσικά με βάση μετρήσιμα μεγέθη αλλά και την αποδοχή του αποτελέσματος από τους ακροατές. Για παράδειγμα, η πιστότητα ενός δίσκου μουσικής μπορεί να αξιολογηθεί τόσο με μετρήσεις και αντικειμενικά κριτήρια όσο και με στατιστική μελέτη επάνω σε τεστ ακρόασης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων και η ανάλυση μετρήσεων και στατιστικών μελετών συγκλίνει συνήθως σε ένα συμπέρασμα ως προς την πιστή αναπαραγωγή του ήχου.

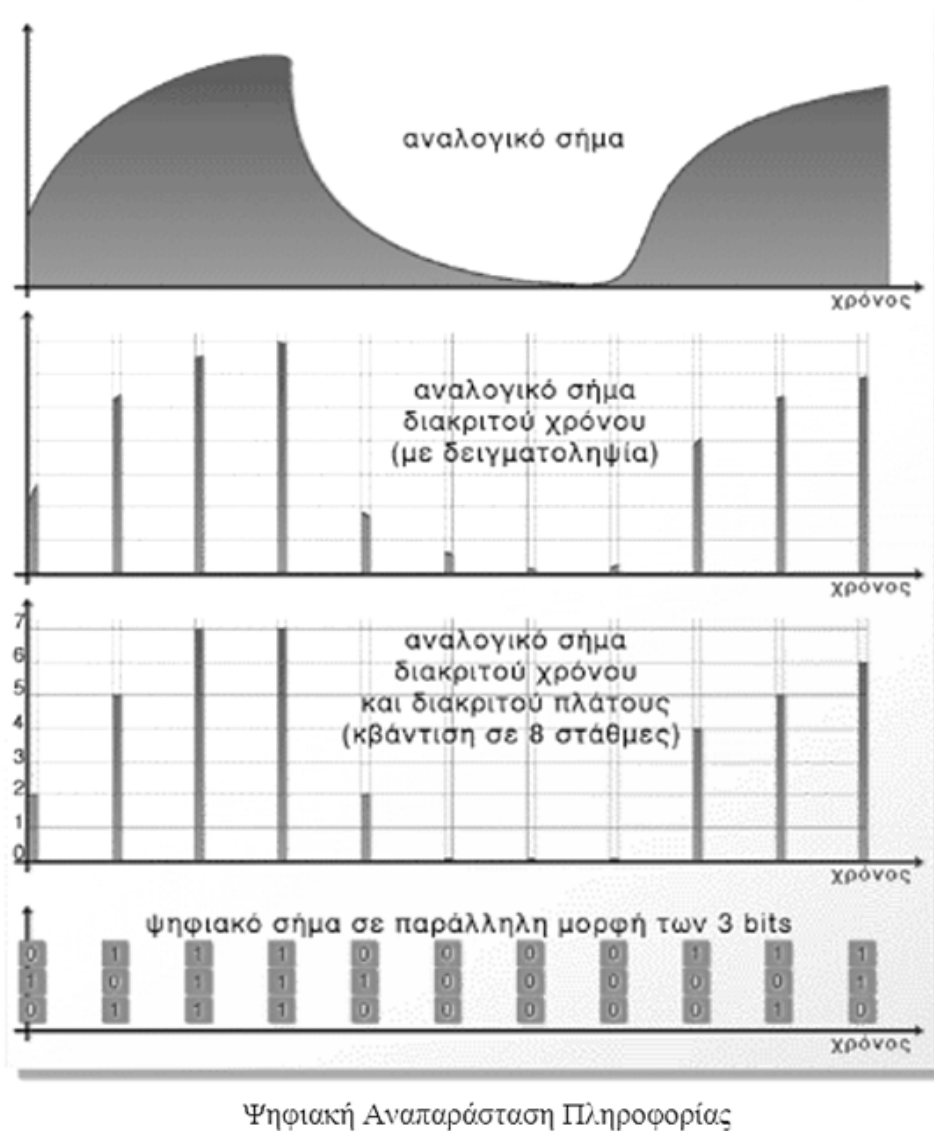
## 4.1 Ηχητική επεξεργασία

Η ηχητική επεξεργασία (audio signal processing στα αγγλικά) είναι η επιτηδευμένη μεταβολή ηχητικών σημάτων, συνήθως με χρήση κατάλληλου λογισμικού ή υλικού για την επίτευξη του αποτελέσματος (effect).

Η ηχητική επεξεργασία είναι στην πράξη μία επεξεργασία σήματος (signal processing). Τα σήματα αυτά που καλείται ένα ηχητικό σύστημα να επεξεργαστεί είναι απεικονίσεις ηχητικών κυμάτων ως ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό σήμα. Τα ηχητικά σήματα μπορούν να παρασταθούν ηλεκτρονικά ως αναλογικά ή ψηφιακά σήματα. Οι αναλογικοί επεξεργαστές ήχου επηρεάζουν απευθείας τα χαρακτηριστικά του αναλογικού ηχητικού σήματος ενώ οι ψηφιακοί επεξεργαστές ήχου επηρεάζουν με μαθηματικό τρόπο τα χαρακτηριστικά μίας ψηφιακής απεικόνισης του ηχητικού σήματος.

Για την κατάλληλη επεξεργασία ενός ηχητικού σήματος απαιτείται συχνά η μετατροπή του από μία μορφή σε άλλη. Για παράδειγμα, το ηχητικό κύμα συνήθως μετατρέπεται σε ηλεκτρικό αναλογικό σήμα συνεχούς χρόνου με τη βοήθεια ηλεκτρομηχανικών μετατροπέων (transducers) όπως μικροφώνων και άλλων ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων. Κατόπιν, το αναλογικό σήμα συνεχούς χρόνου μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα διακριτού χρόνου με τη διαδικασία της δειγματοληψίας (audio sampling). «Το σήμα διακριτού χρόνου συνεχούς πλάτους μετατρέπεται με τη σειρά του σε κβαντισμένο σήμα με πλάτος που ανήκει σε ένα σύνολο διακριτών σταθμών μέσω της διαδικασίας της κβαντοποίησης. Κάθε σχέδιο για την αναπαράσταση καθενός από αυτά τα διακριτά σύνολα τιμών σαν μια ιδιαίτερη διάταξη διακριτών γεγονότων ονομάζεται κώδικας (code). Η διαδικασία μετατροπής του κβαντισμένου σήματος σε ψηφιακό ονομάζεται κωδικοποίηση (coding). Ένα από τα διακριτά γεγονότα σε ένα κώδικα ονομάζεται στοιχείο του κώδικα (code element) ή σύμβολο (symbol). Μια ιδιαίτερη διάταξη συμβόλων που χρησιμοποιείται σε ένα κώδικα για την παράσταση μίας μόνο τιμής του διακριτού συνόλου ονομάζεται κωδική λέξη (codeword) ή χαρακτήρας (character). Σε ένα δυαδικό κώδικα (binary code) κάθε σύμβολο μπορεί να πάρει μια από δύο διακριτές λογικές τιμές μηδέν ή ένα. Εναλλακτικά, η ψηφιακή δυαδική πληροφορία μπορεί να παρασταθεί με δύο είδη σημάτων, όπως η παρουσία ή η απουσία ενός τετραγωνικού παλμού πλάτους 5Volt για το λογικό ένα και το λογικό μηδέν αντίστοιχα» (Πηγή:[http://www.medialab.ntua.gr/education/MultimediaTechnology/MultimediaTechnologyNotes/chap2a\\_1.htm](http://www.medialab.ntua.gr/education/MultimediaTechnology/MultimediaTechnologyNotes/chap2a_1.htm)).

Στο σχήμα 4.1 παρατηρούμε ενδεικτικά τις μετατροπές ενός αναλογικού σήματος συνεχούς χρόνου σε διακριτού χρόνου, σε κβαντισμένου πλάτους και εν τέλει σε ψηφιακό σήμα πληροφορίας με τις διαδικασίες που περιγράψαμε επιγραμματικά.



Σχήμα 4.1

Τις μετατροπές του ηχητικού σήματος από τη μία μορφή στην άλλη θα τις δούμε αναλυτικότερα σε επόμενες ενότητες. Κάθε μετατροπή του σήματος από μία μορφή σε μία άλλη ενέχει κάποιο σφάλμα, απώλεια πληροφορίας ή προσθέτει θόρυβο. Θα δούμε αναλυτικότερα τα προβλήματα αυτά που δημιουργούνται κατά τις μετατροπές και την επεξεργασία του σήματος καθώς και τρόπους αντιμετώπισής τους.

## 4.2 Συστήματα ηχητικής επεξεργασίας

Τα συστήματα που επεξεργάζονται ηχητικά σήματα μπορεί να είναι αυτοτελή ή να αποτελούνται από συνδυασμό διαφόρων υποσυστημάτων. Τα υποσυστήματα αυτά, όπως είδαμε, μπορεί να είναι μηχανικά, αναλογικά, διακριτού χρόνου ή ψηφιακά. Τα απλούστερα συστήματα είναι αναλογικά και είναι εκείνα που καλούνται να ενισχύσουν ένα ηλεκτρικό αναλογικό σήμα ως προς το πλάτος του. Οι

ενισχυτές ήχου που χρησιμοποιούν καθημερινά καταναλωτές και επιχειρήσεις είναι παραδείγματα τέτοιων αναλογικών συστημάτων επεξεργασίας του ηχητικού σήματος. Ιδανικά, ένας ενισχυτής πρέπει να μεταβάλει μόνο το πλάτος ενός σήματος ενισχύοντάς το επί μία επιθυμητή ποσότητα κέρδους (gain) χωρίς να προκαλεί άλλες μεταβολές ή παραμορφώσεις στο σήμα. Ακόμη όμως και τα πιο απλά συστήματα ενίσχυσης, θα δούμε πως έχουν διάφορα υποσυστήματα(subsystems) και στάδια(stages). Μάλιστα, πολλά μεγέθη του σήματος πέραν του πλάτους δύνανται να μεταβληθούν, αλλοιώνοντάς το. Επίσης, μπορεί να προστεθεί θόρυβος στο σήμα από κάθε στάδιο του συστήματος. Στόχος ενός μηχανικού είναι να εντοπίσει τις αλλοιώσεις που υφίσταται το σήμα κατά τη μετάβασή του από ένα στάδιο του συστήματος σε άλλο, να τις αναλύσει και να βρει τρόπους αντιμετώπισης ή αντιστάθμισής τους.

Τα συστήματα επεξεργασίας ήχου μπορούν να διακριθούν σε εκείνα που επεξεργάζονται το σήμα καθώς αυτό παράγεται από την πηγή και σε αυτά που επεξεργάζονται το σήμα σε μεταγενέστερο χρόνο. Τα συστήματα που δίνουν έξοδο ταυτόχρονα με τη στιγμή που δέχονται το σήμα στην είσοδό τους, ονομάζονται πραγματικού χρόνου (real time systems). Τα συστήματα αυτά μπορούν να χαρακτηρισθούν και ως αιτιατά συστήματα χωρίς μνήμη. Είναι αιτιατά καθώς η έξοδος δεν προτρέπει της εισόδου και χωρίς μνήμη καθώς συνήθως η έξοδος δεν εξαρτάται από προηγούμενες εισόδους. Σε μερικές περιπτώσεις βέβαια ο ηχολήπτης μπορεί να θέλει να προσθέσει τεχνητή καθυστέρηση (time delay) αλλά και αυτή η καθυστέρηση θα είναι της τάξης των milliseconds.

Υπάρχουν όμως και τα συστήματα που δεν επεξεργάζονται το σήμα σε πραγματικό χρόνο αλλά μπορεί η μετάβαση από το ένα στάδιο επεξεργασίας στο άλλο να διαρκέσει πολύ χρόνο, όπως για παράδειγμα ώρες, ημέρες ή μήνες. Τέτοια συστήματα είναι τα συστήματα των στούντιο επεξεργασίας και μείξης προ-ηχογραφημένων σημάτων και μετέπειτα τελικής επεξεργασίας και παραγωγής ή «mastering» στα αγγλικά.

### 4.3 Αλυσίδα συστημάτων ηχητικής επεξεργασίας πραγματικού χρόνου

Ας δούμε σε αυτό το σημείο χαρακτηριστικά των συστημάτων πραγματικού χρόνου και βασικά ζητήματα που καλούνται αυτά τα συστήματα να αντιμετωπίσουν στην πράξη. Τα συστήματα πραγματικού χρόνου έχουν στόχο συνήθως να ενισχύσουν το αρχικό ηχητικό σήμα που λαμβάνουν ως είσοδό τους χωρίς καθυστέρηση και να το αναπαράγουν με ευδιάκριτο τρόπο προς τους ακροατές.

Το αρχικό σήμα εισόδου μπορεί να είναι απλά η φωνή ενός ανθρώπου που θέλει να κάνει μία ανακοίνωση ή να μιλήσει στο κοινό. Σε άλλες περιπτώσεις το αρχικό ηχητικό σήμα που καλείται να αναπαράγει το σύστημα πραγματικού χρόνου είναι πιο σύνθετο καθώς μπορεί να αποτελείται από διάφορα άλλα σήματα όπως εκείνα των μουσικών οργάνων μίας ολόκληρης ορχήστρας. Στις πιο σύνθετες περιπτώσεις, το σύστημα πραγματικού χρόνου έχει αρκετό φόρτο εργασίας και η καθυστέρηση επεξεργασίας πρέπει να ελαχιστοποιείται.

Σε πλήρως αναλογικά συστήματα, η καθυστέρηση της επεξεργασίας και αναπαραγωγής ενός σήματος μπορεί να αντιμετωπιστεί σχετικά εύκολα. Η μείωση της καθυστέρησης στηρίζεται κυρίως σε μηχανισμούς αντιμετώπισης των περιορισμών των αναλογικών υποσυστημάτων του όπως οι διαφορές φάσης και οι μέγιστοι ρυθμοί μεταβολής των ενισχυτικών βαθμίδων του.

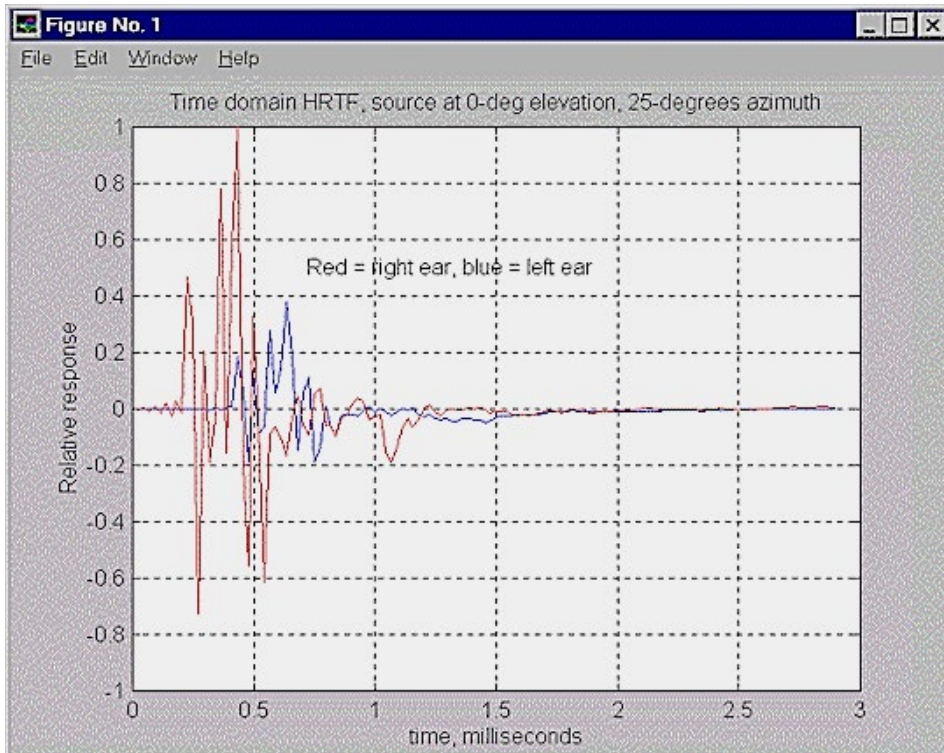
Σε ψηφιακά όμως συστήματα επεξεργασίας του ήχου, η καθυστέρηση είναι ένας παράγοντας που



απασχολεί ιδιαίτερα τους μηχανικούς. Η επιπλέον καθυστέρηση που εισάγεται από τους μικροεπεξεργαστές και τους ψηφιο-αναλογικούς μετατροπείς (D/A και A/D converters) του συστήματος είναι σημαντική σε σχέση με τις καθυστερήσεις που εισάγουν τα αναλογικά κυκλώματα. Τα φαινόμενα αυτά αντιμετωπίζονται με διάφορες τεχνικές όπως βελτίωση του λογισμικού, κατάλληλους αλγόριθμους που θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο αλλά και ταχύτερων επιδόσεων υλικό (hardware).

Ένα ακόμη ζήτημα είναι η κατεύθυνση του αναπαραγόμενου ήχου. Η κατεύθυνση αυτή πρέπει ιδανικά να ταυτίζεται με εκείνη της αρχικής πηγής του ήχου. Για παράδειγμα, ο ακροατής μπορεί να διακρίνει ως ενοχλητικό το γεγονός ότι ακούει την ενισχυμένη φωνή του ομιλητή πίσω από την πλάτη του ενώ τον αντικρίζει απευθείας μπροστά του. Σε μεγαλύτερες εκδηλώσεις για παράδειγμα, η ακρόαση των μουσικών οργάνων που έχουν στηθεί στα δεξιά της σκηνής συνήθως αναπαράγονται προς το κοινό κυρίως από το δεξί κανάλι και σύστημα ηχείων. Γιατί όμως είναι τόσο σημαντικοί οι παράγοντες καθυστέρησης και κατεύθυνσης του αναπαραγόμενου ήχου; Όλα σχετίζονται με τη δομή και τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου αυτιού.

Το ανθρώπινο αυτί είναι αρκετά ευαίσθητο σε καθυστέρηση ενός ηχητικού κύματος και αντιλαμβάνεται εύκολα την κατεύθυνσή του. Μάλιστα, η καθυστέρηση άφιξης ενός ηχητικού κύματος μεταξύ του δεξιού και αριστερού αυτιού μας κατά χρονικό διάστημα της τάξης των 0.5 milliseconds (0,5 χιλιοστά του δευτερολέπτου), γίνεται αντιληπτή και μπορεί να επηρεάσει την αίσθηση που έχουμε για την θέση της πηγής του ήχου. Το περύγιο του ανθρώπινου αυτιού παίζει σημαντικό ρόλο στην αίσθηση κατευθυντικότητας που έχουμε για τον ήχο. Ο εγκέφαλός μας χρησιμοποιεί τις ανακλάσεις που δημιουργούνται στα τοιχώματα του περυγίου και του κεφαλιού για να καθορίσει την κατεύθυνση του ηχητικού κύματος. Η μαθηματική περιγραφή της αντίληψης κατευθυντικότητας του ήχου από το ανθρώπινο αυτί έχει εκφραστεί με τη συνάρτηση μεταφοράς σχετιζόμενη με το κεφάλι (head-related transfer function (HRTF)). Η HRTF είναι η κρουστική απόκριση του συστήματος που αποτελείται από το ανθρώπινο κεφάλι, το περύγιο του αυτιού και τον ακουστικό πόρο. Στο σχήμα 4.2 παρατηρούμε την κρουστική απόκριση HRTF και για τα δύο ανθρώπινα αυτιά στον ίδιο ήχο τύπου Dirac που αναπαράγεται ως είσοδος κοντά στο δεξί αυτί:

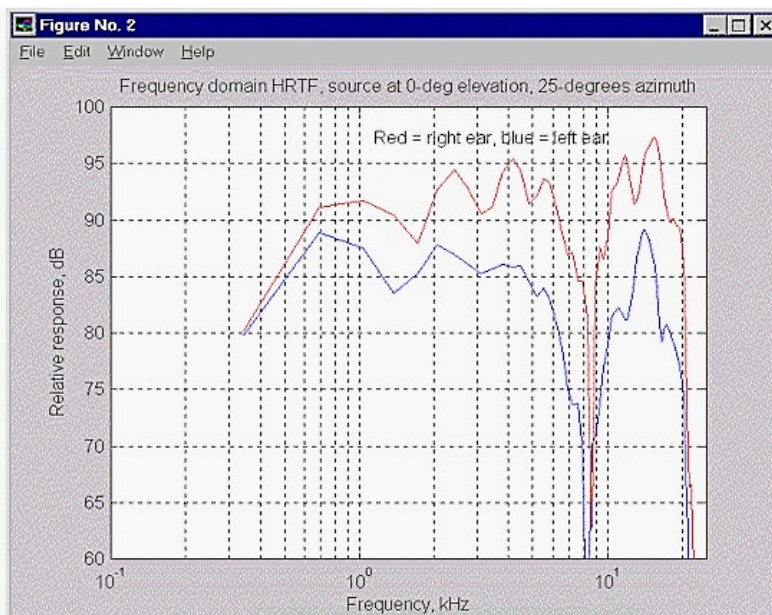


Σχήμα 4.2

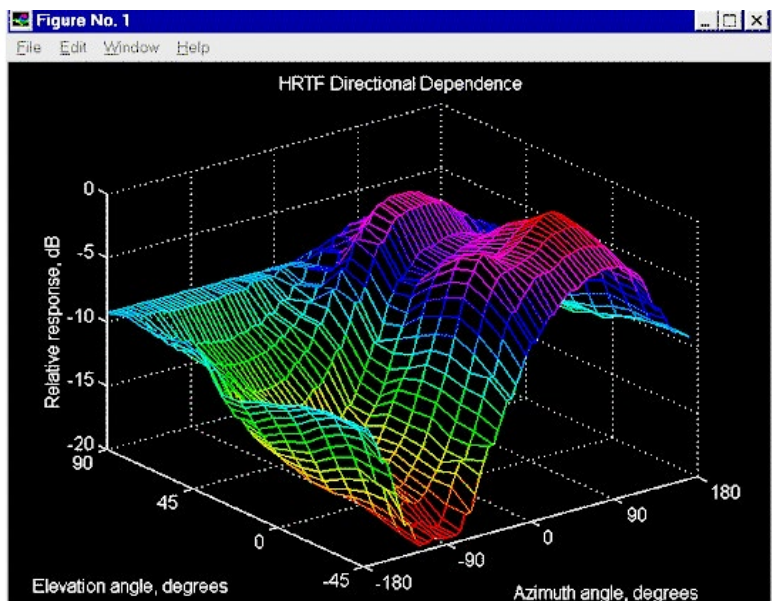
Από το σχήμα 4.2 βλέπουμε διαφορές στην απόκριση μεταξύ των δυο αυτιών στον ίδιο ήχο. Οι διαφορές αυτές επεξεργάζονται από τον εγκέφαλο και μεταφράζονται σε κατεύθυνση της πηγής του ήχου. Στο πεδίο της συχνότητας, η HRTF κάθε αυτιού έχει πολύ μεγαλύτερες ομοιότητες όπως μπορεί να φανεί και από το επόμενο γράφημα (Σχήμα 4.3).

Επομένως, οι χρονικές καθυστερήσεις είναι πολύ πιο εύκολα αντιληπτές καθώς ο εγκέφαλος δρα ως ένας διαφορικός ενισχυτής ή συγκριτής των σημάτων που λαμβάνει από τα δύο αυτιά. Φασματικές διαφορές μεταξύ των δύο σημάτων που λαμβάνει από τα αυτιά μας δεν έχουν τόσο μεγάλη επιρροή στην αντίληψη της κατευθυντικότητας του ήχου.

Η επιρροή της κρουστικής απόκρισης HRTF του αυτιού μας από τη γωνία ανύψωσης και αζιμούθιου της πηγής που παράγει τον ήχο δίνεται ως τρισδιάστατη γραφική παράσταση στο σχήμα 4.4. Για παράδειγμα, αζιμούθιο 90 μοιρών σημαίνει πως η πηγή του ήχου βρίσκεται απευθείας επάνω από το κεφάλι μας.



Σχήμα 4.3



Σχήμα 4.4

Επίσης, αν μπορούμε να δούμε τον ομιλητή καθώς μας απευθύνεται, μπορούμε να παρατηρήσουμε ξεκάθαρα τις καθυστερήσεις με τις οποίες φτάνει η φωνή του στο αυτί μας έχοντας περάσει από ηχητική επεξεργασία. Μία τέτοια καθυστέρηση του αρχικού ήχου που παράγει η πηγή (π.χ. ο ομιλητής) κατά χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 50 milliseconds γίνονται έντονα αντιληπτές από τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Μάλιστα, επανάληψη του ίδιου ήχου κατά διαστήματα μεγαλύτερα από 50 milliseconds προκαλεί το φαινόμενο της ηχούς, κοινώς αποκαλούμενης και «αντίλαλος».

Ας δούμε τώρα από τι αποτελείται μία τυπική αλυσίδα συστήματος επεξεργασίας ήχου πραγματικού χρόνου. Σε καθένα από τα επόμενα κεφάλαια θα επεκταθούμε στην ανάλυση κάθε σταδίου, των χαρακτηριστικών και μεγεθών που επηρεάζουν την πιστή αναπαραγωγή του ήχου. Ένα σύστημα πραγματικού χρόνου αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

#### -Ηλεκτρομηχανικούς ή ηλεκτρομαγνητικούς μετατροπείς:

Οι συσκευές αυτές είναι το 1ο στάδιο ή υποσύστημα που συναντά το ηχητικό αναλογικό κύμα ως είσοδος του συστήματος. Από τις πιο διαδεδομένες συσκευές μετατροπής της πίεσης του ηχητικού κύματος σε ηλεκτρικό αναλογικό σήμα είναι τα μικρόφωνα. Υπάρχουν πολλά είδη μικροφώνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, ανάλογα την εφαρμογή και τους ήχους που θέλουμε να καταγράψουμε.

Πέρα από τα μικρόφωνα, στους μετατροπείς συγκαταλέγονται και πιεζοηλεκτρικά στοιχεία που μετατρέπουν δονήσεις σε ηλεκτρικό σήμα αλλά και ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις όπως οι μαγνήτες εγχόρδων μουσικών οργάνων που μετατρέπουν ταλαντώσεις των μεταλλικών χορδών εντός του μαγνητικού τους πεδίου σε αναλογικό ηλεκτρικό ηχητικό σήμα.

Επομένως, μπορούμε σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε πως το αρχικό σήμα εισόδου μπορεί να μην είναι ακουστικό μηχανικό κύμα σε κάθε περίπτωση. Επίσης, το σήμα προς επεξεργασία μπορεί σκόπιμα να έχει υποστεί ήδη αλλαγές ή αλλοίωση. Αυτό συχνά συμβαίνει με ήχους ηλεκτρικής κιθάρας ή πλήκτρων και συνθεσάιζερ που ο καλλιτέχνης προτιμά να παραμορφώσει ή να αλλοιώσει κατάλληλα ώστε να παράγει τον ήχο που επιθυμεί.

Για την κάλυψη μεγάλων εκδηλώσεων και χώρων συνήθως χρησιμοποιούνται πολλά μικρόφωνα των οποίων τα σήματα οδηγούνται στο 2ο στάδιο του συστήματος πραγματικού χρόνου.



Σχήμα 4.5

#### -Κονσόλες μείξης ή προενισχυτές:

Στο δεύτερο στάδιο του συστήματος συνήθως συναντάμε τις κονσόλες μείξης των σημάτων που παράγονται από τα μικρόφωνα και τις συσκευές του 1ου σταδίου. Τα σήματα που παράγονται από τις συσκευές του 1ου σταδίου χρειάζονται κάποιες φορές προενίσχυση ή προσαρμογή αντίστασης πριν δοθούν στην κονσόλα μείξης για περεταίρω επεξεργασία. Μία απλή κονσόλα μείξης έχει στόχο να συνδυάσει κατάλληλα τα σήματα από τις συσκευές του 1ου σταδίου, να τα ενισχύσει ή να τα ελαττώ-

σει κατά πλάτος και να τα οδηγήσει στα κατάλληλα κανάλια εξόδου της.

Οι κονσόλες μπορεί να είναι αναλογικές με την έννοια ότι υλοποιούνται μόνο με αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα ή ψηφιακές (σχήμα 4.6). Οι ψηφιακές κονσόλες περιέχουν τόσο αναλογικά όσο και ψηφιακά κυκλώματα. Τα ψηφιακά κυκλώματα μπορεί να συμμετέχουν στη δρομολόγηση και τον έλεγχο των αναλογικών καναλιών της κονσόλας και να προσθέτουν ηχητικά εφέ (sound effects) όπως ηχώ (echo ή reverb) και καθυστέρηση (delay). Σε άλλες περιπτώσεις, μπορεί τα κανάλια της κονσόλας να είναι πλήρως ψηφιακά και να γίνεται ψηφιοαναλογική μετατροπή των σημάτων. Κάποιες παλαιότερες κονσόλες έχουν πολλές μονοκαναλικές ή μονοφωνικές όπως λέμε εισόδους και ένα μόνο κανάλι ως έξοδο. Άλλες σύγχρονες κονσόλες έχουν αρκετές μονοφωνικές αλλά και στερεοφωνικές εισόδους και αντίστοιχα μονοφωνικές και στερεοφωνικές εξόδους. Κονσόλες μείξης που προορίζονται για εφαρμογές πολυκαναλικού περιφερειακού ήχου έχουν ενσωματωμένους κωδικοποιητές περιβάλλοντος ήχου (surround) και κατάλληλο αριθμό εξόδων.

Η κονσόλα ήχου είναι «ο εγκέφαλος» του συστήματος και το κέντρο ελέγχου του. Από εκεί ρυθμίζονται οι περισσότερες παράμετροι που θα καθορίσουν πως θα μεταδοθεί προς το κοινό το ηχητικό σήμα. Οι επιλογές του ηχολήπτη και του μηχανικού που χειρίζεται την κονσόλα μπορούν να δημιουργήσουν ένα πετυχημένο και ευχάριστο αποτέλεσμα για τους ακροατές ή το ακριβώς αντίθετο. Για αυτό το λόγο, η θέση της κονσόλας στο χώρο μίας εκδήλωσης είναι ανάμεσα στο κοινό. Σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα χρησιμοποιούνται δύο κονσόλες μείξης ήχου: μία για το κοινό και μία για τη σκηνή ώστε να ακούν οι μουσικοί και ηθοποιοί τις φωνές και μουσικά όργανά τους. Το σύνολο σημάτων που δίνεται στη σκηνή είναι διαφορετικό από αυτό που προσφέρεται στο κοινό και ονομάζεται «monitor» ή επίβλεψη. Στόχος αυτών των σημάτων που διαχειρίζεται η κονσόλα της σκηνής είναι να ακούν οι ίδιοι οι μουσικοί και συντελεστές μιας εκδήλωσης πώς ακούγονται, λαμβάνοντας μία ανατροφοδότηση (feedback), και να συντονίζονται με τους υπόλοιπους συντελεστές.

Εμείς θα επικεντρωθούμε στο αντίστοιχο κεφάλαιο στα χαρακτηριστικά της κονσόλας και την πληθώρα υποκυκλωμάτων της. Τα χαρακτηριστικά αυτά, δεδομένης της ορθής χρήσης της κονσόλας, θα καθορίσουν πόσο πιστά μπορεί να αναπαραχθεί από την κονσόλα το αρχικό ηχητικό σήμα, πόσος θόρυβος προστίθεται στο αποτέλεσμα και πως μπορεί να βελτιωθεί η συνολική απόδοση της κονσόλας.



Σχήμα 4.6

-Τελικοί ενισχυτές ή ενισχυτές ισχύος:

Στο 3<sup>ο</sup> στάδιο του συστήματος συναντάμε συνήθως τους τελικούς ενισχυτές ήχου που λαμβάνουν ως είσοδο τα σήματα εξόδου της κονσόλας μείξης (σχήμα 4.7). Οι ενισχυτές αυτοί αναλαμβάνουν να μεταδώσουν στα ηχεία το αναλογικό ηλεκτρικό σήμα που λαμβάνουν από την κονσόλα, ενισχυμένο αρκετές φορές και σε κατάλληλο επίπεδο αντίστασης. Τα ηχεία που οδηγούν οι επαγγελματικοί ενισχυτές είναι συνήθως ονομαστικής αντίστασης 2, 4 ή 8 Ohm. Καθώς η αντίσταση αυτή μεταβάλλεται με τη συχνότητα του σήματος και σε μερικές περιπτώσεις πλησιάζει το βραχυκύκλωμα, οι ενισχυτές πρέπει να μπορούν να παράγουν ικανές ποσότητες ρεύματος για την οδήγηση των ηχείων.

Η ενίσχυση του σήματος φαντάζει απλή υπόθεση στη θεωρία καθώς ενισχύουμε ιδανικά το πλάτος της τάσης και του ρεύματος του σήματος εισόδου και το παραδίδουμε στα ηχεία. Εντούτοις, η ενίσχυση του σήματος σε πολύ υψηλή στάθμη ισχύος, όπως γίνεται στους επαγγελματικούς ενισχυτές (σχήμα 4.7), είναι ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία και δημιουργεί προβλήματα και παραμορφώσεις ή αλλοιώσεις του σήματος. Για παράδειγμα, μικρές στάθμες θορύβου στην είσοδο του ενισχυτή μεταφράζονται σε δυνατό θόρυβο στην έξοδό του. Γι αυτό το λόγο είναι σημαντική η προσεκτική σχεδίαση ενός ενισχυτή ήχου. Κάθε ενισχυτής περιέχει δε αρκετά στάδια ενίσχυσης και υποσυστήματα. Για παράδειγμα, κάθε ενισχυτής έχει τουλάχιστον ένα στάδιο ενίσχυσης τάσης και ένα στάδιο ενίσχυσης ρεύματος. Επίσης, σημαντικότερα είναι τα υποσυστήματά του όπως το τροφοδοτικό του και οι διατάξεις προστασίας του από υπερ-ρεύματα, υπερθέρμανση, υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα.



Σχήμα 4.7

-Διατάξεις ηχείων:

Στο 4<sup>ο</sup> και τελευταίο στάδιο ενός ηχητικού συστήματος συναντάμε τα ηχεία. Τα ηχεία είναι στην πράξη καμπίνες και κουτιά που περιέχουν μεγάφωνα ή οδηγούς όπως λέμε (drivers) και παθητικά φίλτρα διαχωρισμού συχνοτήτων (crossovers). Οι οδηγοί είναι διατάξεις που μετατρέπουν το εισερχόμενο ηλεκτρικό σήμα σε μηχανική ταλάντωση ενός κώνου ή μιας επιφάνειας εν γένει. Η ταλάντωση αυτή παράγει ηχητικά κύματα πίεσης κατάλληλου πλάτους τα οποία διεγείρουν το αυτί του ακροατή. Το σήμα όμως περνά από φίλτρα διαχωρισμού συχνοτήτων πριν φτάσει στους οδηγούς. Αυτό επιβάλλεται καθώς υπάρχουν αρκετοί οδηγοί κατάλληλοι για την αναπαραγωγή σημάτων συχνοτήτων κάτω από ένα κατώφλι και οδηγοί για την αναπαραγωγή σημάτων συχνοτήτων πάνω από ένα κατώφλι. Οι οδηγοί χαμηλών συχνοτήτων ονομάζονται στα αγγλικά «woofers» ενώ οι οδηγοί υψηλών συχνοτήτων ονομάζονται «tweeters». Υπάρχουν και οδηγοί κατάλληλοι για ενίσχυση μεσαίων συχνοτήτων εντός του ακουστικού φάσματος (mid-range). Σε μερικές εφαρμογές μικρότερης ισχύος συναντάμε και οδηγούς πλήρους φάσματος όπως λέγονται (full range). Όπως αναφέραμε και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, οι περιοχές συχνοτήτων στις οποίες διαχωρίζεται το σήμα εισόδου από τη διάταξη crossover, ονομάζονται «δρόμοι». Τα πιο συνηθισμένα ηχεία που συναντά κανείς σε ηχοσυστήματα είναι αυτά των δύο δρόμων (σχήμα 4.8).

Τέλος, είναι πολλές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός ηχείου και συνήθως τα ηχεία παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη παραμόρφωση του σήματος από ό,τι οι ηλεκτρονικές συσκευές επεξεργασίας και ενίσχυσης του ήχου. Για αυτό το σκοπό, η σχεδίαση των ηχείων είναι σημαντική υπόθεση και πλέον χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό σχεδίασης ηχείων που βασίζεται σε μοντελοποιήσεις και ακριβείς υπολογισμούς παραμέτρων.



Σχήμα 4.8

## 4.4 Συστήματα ηχογράφησης και παραγωγής μουσικής

Τα συστήματα παραγωγής μουσικής έχουν πολλά κοινά στοιχεία με τα συστήματα επεξεργασίας ήχου σε πραγματικό χρόνο. Τα βασικά τμήματα της «αλυσίδας» του συστήματος πραγματικού χρόνου εντοπίζονται και στα συστήματα μουσικών παραγωγών.

1<sup>ο</sup> στάδιο, οι πηγές:

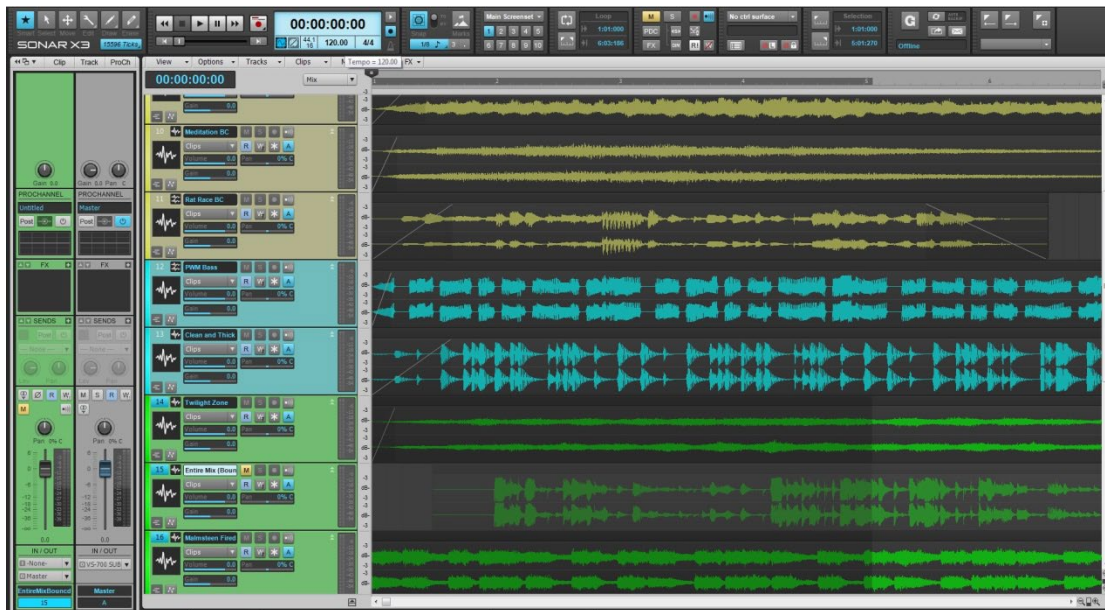
Το 1<sup>ο</sup> στάδιο είναι κοινό καθώς σε όλα τα συστήματα χρησιμοποιούνται μικρόφωνα και μετατροπείς για τη λήψη του αρχικού ηχητικού σήματος από την πηγή και τη μετέπειτα επεξεργασία του. Στην περίπτωση του συστήματος ηχογράφησης βέβαια μπορεί η αρχική πηγή να είναι κάποιο παλαιότερο μέσο που θέλουμε να ψηφιοποιήσουμε όπως ένας δίσκος βινυλίου ή μία μαγνητική κασέτα. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ως πηγή εισόδου η έξοδος ενός συστήματος πικάπ ή αναπαραγωγής κασέτας. Η διαδικασία μετατροπής παλαιών ηχογραφήσεων σε ψηφιακή μορφή και η βελτίωση της ποιότητας του ήχου τους ονομάζεται «re-mastering» στο χώρο της μουσικής παραγωγής. Κατά τη διαδικασία αυτή γίνεται μία επέμβαση, όπως θα δούμε, από το μηχανικό ήχου στα χαρακτηριστικά της αρχικής ηχογράφησης. Το αποτέλεσμα κάποιες φορές δε διαφέρει πολύ ηχητικά από το αρχικό (εκτός της ψηφιοποίησης φυσικά) ενώ σε άλλες περιπτώσεις βλέπουμε μία σημαντική βελτίωση.

2<sup>ο</sup> στάδιο, η κονσόλα και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής ως κέντρο ελέγχου:

Το 2<sup>ο</sup> στάδιο στην περίπτωση της σύγχρονης ηχογράφησης είναι η δειγματοληψία του ηλεκτρικού αναλογικού σήματος και η μετατροπή του σε ψηφιακό. Τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας δειγματοληψίας και το υλικό του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (A/D converter) παίζουν σημαντικό ρόλο στο πόσο πιστά θα καταγραφεί το αρχικό σήμα. Με τη δειγματοληψία και την κωδικοποίηση του αρχικού σήματος χάνεται ένα μέρος της πληροφορίας. Μάλιστα, όταν το σήμα μετατραπεί σε ψηφιακό συμπιέζεται ακόμη περισσότερο με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων ώστε να καταλαμβάνει μικρότερο χώρο σε ψηφιακά αποθηκευτικά μέσα. Η διαδικασία της συμπίεσης ευθύνεται για επιπλέον απώλεια πληροφορίας και προσθήκη θορύβου στο σήμα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι και αλγόριθμοι συμπίεσης ενός ψηφιακού αρχείου μερικούς από τους οποίους θα δούμε αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο καθώς βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή και αποδοχή σήμερα. Θα προτείνουμε και τρόπους αντιμετώπισης των περιορισμών που θέτουν αυτοί οι αλγόριθμοι ως προς την πιστότητα.

Το σήμα που έχει ηχογραφηθεί και μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή αποθηκεύεται συνήθως σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής μπορεί κατόπιν να μετατρέψει και πάλι το ψηφιακό σήμα σε αναλογικό με διάφορους αλγορίθμους αποκωδικοποίησης ώστε να το μεταδώσει μέσω της κάρτας ήχου του στο μηχανικό ήχου. Η κάρτα ήχου του υπολογιστή μπορεί να είναι μία απλή κάρτα ήχου με εισόδους και εξόδους ή μία ολόκληρη ψηφιακή κονσόλα όπως αυτή που χρησιμοποιείται σε συστήματα πραγματικού χρόνου. Το ρόλο όμως του κέντρου ελέγχου όλου του συστήματος μουσικής παραγωγής παίζει εδώ ο ηλεκτρονικός υπολογιστής και σπανιότερα η κονσόλα. Αρκετά παλαιότερα, όταν οι εφαρμογές των υπολογιστών ήταν λιγότερες, η κονσόλα είχε τον κύριο ρόλο και στα στούντιο ηχογραφήσεων. Μάλιστα η κονσόλα συνδυαζόταν συχνά με πολλά εξωτερικά μηχανήματα ομαδοποιημένα σε κουτιά-στήλες (racks) τα οποία αναλάμβαναν να τροποποιήσουν το ηχητικό σήμα με ηχητικά εφέ, να προσθέσουν ή να αφαιρέσουν θόρυβο, να επηρεάσουν και να ισοσταθμίσουν το φάσμα του σήματος και άλλες πολλές εφαρμογές.

Πλέον, ολόκληρη η κονσόλα που χρησιμοποιούταν καθώς και οι στήλες περιφερειακών μηχανημάτων μπορεί να αντικατασταθεί από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή με ικανή επεξεργαστική ισχύ και το κατάλληλο λογισμικό. Ο συνδυασμός υλικού (hardware) του υπολογιστή και λογισμικού ονομάζεται «ψηφιακό ηχητικό κέντρο εργασίας» ή digital audio Workstation (DAW) στην αγγλική ορολογία. Ο όρος «DAW» πλέον αναφέρεται περισσότερο στο λογισμικό (software, σχήμα 4.9) που χρησιμοποιεί ο μηχανικός ήχου για να επεξεργαστεί ψηφιακά αρχεία και σήματα ήχου παρά στο υλικό. Μάλιστα πολλοί μηχανικοί εκπαιδεύονται επάνω σε συγκεκριμένα προγράμματα όπως τη γνωστή σειρά λογισμικού «Cubase» της εταιρίας Steinberg παρά σε συγκεκριμένο υλικό και υπολογιστές. Η χρήση υπολογιστών της αμερικανικής εταιρίας Apple είναι μία κοινή πρακτική για πολλούς μηχανικούς ήχου και ηχολήπτες αλλά το λογισμικό μπορεί να εγκατασταθεί και σε οποιοδήποτε άλλο ισχυρό υπολογιστή και λειτουργικό σύστημα. Το λογισμικό DAW φυσικά επεμβαίνει στο ψηφιακό σήμα ήχου και όχι στο αναλογικό.

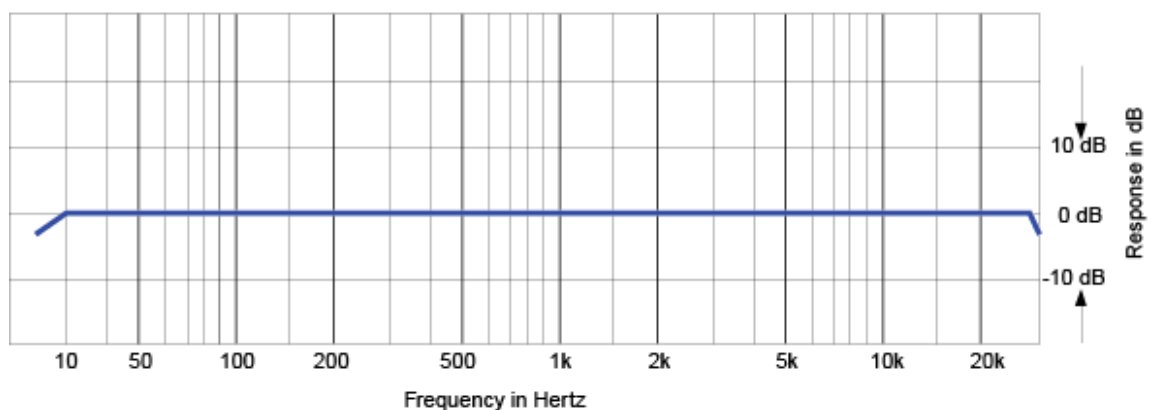


Σχήμα 4.9

### 3<sup>ο</sup> στάδιο, η αναπαραγωγή του επεξεργασμένου σήματος

Η μετατροπή του σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό και αντίστροφα μπορεί να γίνει αρκετές φορές κατά τη διάρκεια επεξεργασίας του καθώς ο ηχολήπτης πρέπει να ακούει κάθε φορά το αναλογικό σήμα. Η ακρόαση του σήματος από τον ηχολήπτη γίνεται αφού μετατραπεί από την κάρτα ήχου το σήμα σε αναλογικό και οδηγηθεί σε συνήθως σε κατάλληλα αυτό-ενισχυόμενα ηχεία ή ακουστικά. Καθώς ο παραγωγός ήχου θέλει να ακούσει όσο το δυνατόν πιστότερα το σήμα που έχει επεξεργαστεί μέχρι στιγμής, τα ηχεία και τα ακουστικά αυτά πρέπει να έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να μην «χρωματίζουν» καθόλου τον ήχο. Με την έννοια «χρωματισμός» αναφερόμαστε στις αλλαγές που μπορεί να επιβάλλει στο φάσμα του αναλογικού ηχητικού σήματος μία συσκευή αναπαραγωγής ήχου. Αν η συνάρτηση μεταφοράς της συσκευής στο χώρο της συχνότητας είναι ιδανικά μία σταθερή συνάρτηση σε περιοχή συχνοτήτων μεγαλύτερη του εύρους 20Hz-20kHz, τότε λέμε πως το σήμα δεν «χρωματίζεται». Στο σχήμα 4.10 για παράδειγμα βλέπουμε την σταθερή απόκριση (flat response) σε decibel του μικροφώνου μετρήσεων και αναφοράς M30 της εταιρίας Earthworks που χρησιμοποιείται σε μετρήσεις απόκρισης ηχείων και χώρων ακρόασης. Η απόκριση ενός ηχείου σπάνια είναι τόσο σταθερή στο ακουστικό φάσμα αλλά μπορεί να την προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια.

Frequency Response of Earthworks M30





Σχήμα 4.10

Επομένως, δεν θέλουμε να ενισχύεται περισσότερο μία περιοχή του ακουστικού φάσματος από μία άλλη. Επίσης, η γραμμική φασική απόκριση των ηχείων είναι σημαντική για να μην αλλοιώνονται χαρακτηριστικά της φάσης του ηχητικού σήματος. Τα ηχεία και ακουστικά που σχεδιάζονται κατά τρόπο που να προσεγγίζει το ιδανικό αυτό «αχρωμάτιστο» μοντέλο λέγονται *monitors κοντινού πεδίου* «near field monitors». Η λέξη *monitor* (επιμελητής) χρησιμοποιείται καθώς τα ηχεία αυτά χρησιμοποιούνται για να επιβλέπει και να αξιολογεί κάθε στιγμή ο μηχανικός ή παραγωγός ήχου τη δουλειά του. Ως «κοντινού πεδίου» χαρακτηρίζονται αυτά τα ηχεία επειδή σχεδιάζονται για να τοποθετούνται κοντά στον ακροατή. Κατά αυτό τον τρόπο, δε λαμβάνεται το σήμα από ανακλάσεις στο χώρο αλλά απευθείας από αυτά. Τα *monitor* ηχεία έχουν συνήθως τους δικούς του ενσωματωμένους ενισχυτές οι οποίοι σχεδιάζονται με τρόπο που να συμπληρώνουν και να βελτιώνουν την απόδοση των ηχείων. Σε άλλες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται εξωτερικοί ενισχυτές οι οποίοι πρέπει επίσης να μην χρωματίζουν τον ήχο και να αναπαράγουν το σήμα εισόδου τους όσο πιστότερα γίνεται.

## 4.5 Ηχοσυστήματα οικιακής και καταναλωτικής χρήσης

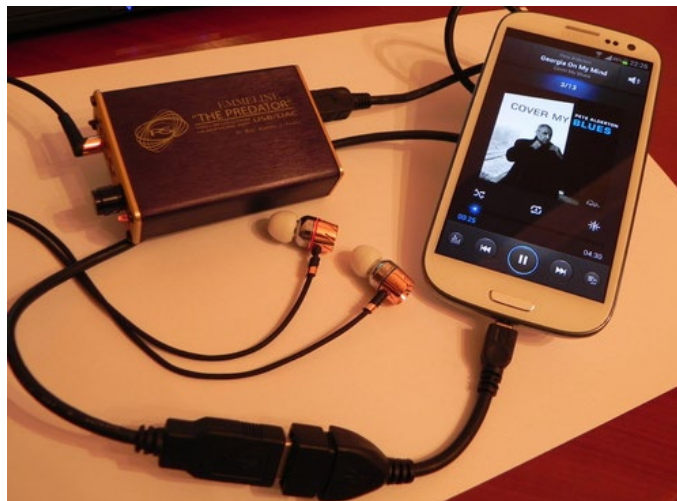
Τα ηχοσυστήματα που αναφέραμε έως τώρα χρησιμοποιούνται συνήθως για επαγγελματική ή ημι-επαγγελματική χρήση. Στόχος για παράδειγμα των συστημάτων μουσικής παραγωγής είναι εν τέλει να παραχθεί ένας δίσκος μουσικής που οι καταναλωτές θα μπορούν να ακούσουν ευχάριστα στο σπίτι ή το αυτοκίνητό τους μέσα από απλά ηχοσυστήματα. Ο δίσκος μουσικής μπορεί φυσικά να παραχθεί και σε ψηφιακή άυλη μορφή ώστε να μπορεί ο καταναλωτής να την κατεβάσει μέσω του διαδικτύου στον υπολογιστή, την ταμπλέτα, το κινητό του ή πλέον ακόμη και στο έξυπνο ρολόι του (σχήμα 4.11). Πως όμως θα μπορέσει να ακούσει αυτό το δίσκο όσο πιο πιστά γίνεται; Είναι για παράδειγμα κοινή πρακτική πλέον να ακούμε τη μουσική μας μέσω ακουστικών όπου και αν είμαστε ώστε να μην ενοχλούμε τους συνανθρώπους μας. Πως μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι ακούμε πιστά το μουσικό κομμάτι που μας ενδιαφέρει, χωρίς έντονη παραμόρφωση και «χρωματισμούς»; Αυτά τα ζητήματα θα μελετήσουμε στο αντίστοιχο κεφάλαιο για τα συστήματα καταναλωτικής χρήσης.



Σχήμα 4.11

### Το 1<sup>ο</sup> στάδιο του συστήματος: η πηγή ήχου

Στο 1<sup>ο</sup> στάδιο της αλυσίδας αυτής συναντάμε την πηγή του ήχου που μπορεί να είναι κάποια φορητή ή επιτραπέζια συσκευή αναπαραγωγής ψηφιακών αρχείων ή δίσκων cd, ένα κινητό, ένας φορητός υπολογιστής ή ένα ηχοσύστημα αυτοκίνητου. Η πηγή του ήχου έχει συνήθως αρκετά υποσυστήματα ενσωματωμένα κάποια από τα οποία επηρεάζουν την πιστή αναπαραγωγή του ήχου. Για παράδειγμα, κάθε συσκευή που αναφέραμε μόλις ως πηγή ήχου εμπεριέχει έναν μετατροπέα ψηφιακών αρχείων σε αναλογικό σήμα. Το ψηφιακό αυτό υποσύστημα αποκωδικοποίησης ονομάζεται στα αγγλικά DAC (Digital to Analog Converter, σχήμα 4.12). Η υλοποίηση και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί το DAC επηρεάζουν ιδιαίτερα τον τρόπο αναπαραγωγής και την πιστότητα του τελικού αποτελέσματος. Πλέον υπάρχουν αρκετές εξωτερικές συσκευές DAC υψηλής πιστότητας που συνδέονται ενσύρματα ή ασύρματα με ψηφιακό τρόπο με τα μέσα αποθήκευσης αρχείων. Κατόπιν αναλαμβάνουν να αποκωδικοποιήσουν τα ψηφιακά αρχεία με τρόπο που να ανακτά όσο μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας του αρχικού ηχητικού σήματος. Το σφάλμα και ο θόρυβος που προκύπτει από τη διαδικασία της αποσυμπίεσης και αποκωδικοποίησης των ψηφιακών αρχείων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με κατάλληλες τεχνικές και επιλογές.



Σχήμα 4.12

### Το 2<sup>ο</sup> στάδιο του συστήματος: το μέσο αναπαραγωγής του αναλογικού ήχου

Μετά τη μετατροπή του ψηφιακού αρχείου σε αναλογικό ηχητικό σήμα, έχουμε την ενίσχυση του σήματος. Είτε το αναλογικό αυτό σήμα προορίζεται για αναπαραγωγή μέσω ακουστικών είτε ηχείων κάθε τύπου, πρέπει πρώτα να ενισχυθεί κατάλληλα. Ο ενισχυτής κάθε καταναλωτικού συστήματος με ισχύ από μερικά milliwatt έως αρκετά εκατοντάδες watt, έχει σημαντικό ρόλο στην πιστή αναπαραγωγή του ήχου. Οι αρχές που ισχύουν στους επαγγελματικούς ενισχυτές που περιγράψαμε στις προηγούμενες ενότητες ισχύουν και εδώ. Ο ενισχυτής κάθε συστήματος πρέπει να λειτουργεί γραμμικά, με χαμηλά ποσοστά παραμόρφωσης και φασματικής αλλοίωσης του σήματος.

### Το 3<sup>ο</sup> στάδιο, ηχεία και ακουστικά

Στο 3<sup>ο</sup> στάδιο, όπως και στα επαγγελματικά συστήματα, συναντάμε τις συσκευές που καλούνται να μετατρέψουν το αναλογικό ηλεκτρικό ηχητικό σήμα σε μηχανικό. Ο τελικός δέκτης του σήματος σε κάθε περίπτωση είναι το ανθρώπινο αυτί. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε ακουστικά για την

ακρόαση του ήχου, σημαντικό ρόλο στην πιστή αναπαραγωγή έχει η σχεδίαση των ακουστικών και των οδηγών που περιέχει. Υπάρχουν πολλοί τύποι ακουστικών στο εμπόριο σε ένα μεγάλο εύρος κόστους. Για παράδειγμα, στο σχήμα 4.13 βλέπουμε το σετ ενίσχυσης ακουστικών Orpheus και ακουστικών HD800 της εταιρίας Sennheiser που παρουσιάστηκε στη διεθνή έκθεση Consumer Electronics Show (CES) του 2013 με συνολικό κόστος αγοράς 30000 δολάρια.

Θα μας απασχολήσουν περισσότερο τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ακουστικών και η απόκρισή τους. Συνήθως είναι διαθέσιμα μόνο τα τεχνικά χαρακτηριστικά από τον κατασκευαστή και βάσει αυτών μπορούμε να επιλέξουμε τι να προσέξουμε πριν αγοράσουμε ένα νέο σετ.

Για τα ηχεία του ηχοσυστήματός μας ισχύουν και εδώ οι ίδιες βασικές αρχές που ισχύουν και για τα επαγγελματικά συστήματα. Εντούτοις, στο χώρο του καταναλωτικού ήχου υψηλής πιστότητας (high fidelity ή Hi-Fi) οι απαιτήσεις ως προς την απόδοση και την ισχύ των ηχείων δεν είναι τόσο μεγάλες. Υπάρχουν πολλοί κατασκευαστές ηχείων που παρέχουν τεχνικά χαρακτηριστικά και φύλλα αλλά θα πρέπει να είμαστε επιφυλακτικοί απέναντι σε υποκειμενικές αξιολογήσεις που έχουν συνήθως χαρακτήρα προώθησης (marketing). Θα εξετάσουμε και σε αυτή την περίπτωση τα επίσημα τεχνικά στοιχεία του κατασκευαστή και θα δούμε ποια είναι τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν προκειμένου να αγοράσουμε ένα σύνολο ηχείων με όσο το δυνατόν πιστότερη απόδοση του ήχου.



Σχήμα 4.13

### **Βιβλιογραφία για το 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο:**

«Audio Engineering 101: A Beginner's Guide to Music Production» - Tim Dittmar, Taylor & Francis, 2012

«Head-Related Transfer Function and Virtual Auditory Display: Second Edition» - Bosun Xie, J. Ross Publishing, 23 Ιουλίου 2013

«Audio & Video Systems, 2<sup>nd</sup> edition» - Tata McGraw, Hill Education, 2010

Πηγές από το διαδίκτυο:

<http://www.silcom.com/~aludwig/EARS.htm>

[http://www.silcom.com/~aludwig/glossary.htm#Head\\_related\\_tf](http://www.silcom.com/~aludwig/glossary.htm#Head_related_tf)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>

<http://www.earthworksaudio.com/microphones/m-series/m30/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Transducer>

<http://lifehacker.com/the-basics-of-music-production-the-complete-guide-514079132>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Studio\\_monitor](http://en.wikipedia.org/wiki/Studio_monitor)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_audio\\_workstation](http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_audio_workstation)

<http://www.whathifi.com/how-to/hi-fi/hi-fi-speakers>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Smartwatch>

[http://www.slate.com/articles/arts/music\\_box/2010/12/dulcet\\_downloads.html](http://www.slate.com/articles/arts/music_box/2010/12/dulcet_downloads.html)

[http://en.wikipedia.org/wiki/High\\_fidelity](http://en.wikipedia.org/wiki/High_fidelity)

<http://en-us.sennheiser.com/dynamic-headphones-high-end-around-ear-hd-800>

<http://www.head-fi.org/products/sennheiser-orpheus-he-90>

---

## Κεφάλαιο 5: Αναλογικές πηγές ήχου

---

### 5.1 Το 1ο στάδιο κάθε αλυσίδας ηχητικής επεξεργασίας

Η αλυσίδα ενός ηχητικού συστήματος, πραγματικού χρόνου ή μη, αποτελείται από επιμέρους στάδια καθένα από τα οποία λαμβάνει μία είσοδο και παράγει μία απόκριση. Το πρώτο στάδιο αυτού του συστήματος λαμβάνει ως είσοδο το αρχικό ηχητικό σήμα ενώ το τελευταίο στάδιο του συστήματος προσφέρει ως έξοδο το ηχητικό σήμα στον ακροατή. Το σήμα που θα λάβει ο ακροατής από το τελικό στάδιο είναι ένα αναλογικό μηχανικό ηχητικό κύμα.

Το αρχικό σήμα που λαμβάνει το σύστημα ως είσοδο μπορεί να είναι ένα αναλογικό κύμα, ένα αναλογικό ηλεκτρικό σήμα ή ένα ψηφιακό σήμα. Στα συστήματα επεξεργασίας ήχου πραγματικού χρόνου για παράδειγμα, πηγή θεωρούμε κυρίως τα σήμα που λαμβάνουμε από τα μικρόφωνα του χώρου αλλά και τα ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά μουσικά όργανα μιας ορχήστρας. Εν αντιθέσει, σε συστήματα υψηλής πιστότητας (hi-fi) οικιακής χρήσης μπορούμε να θεωρήσουμε ως πηγή μία συσκευή αναπαραγωγής δίσκων βινυλίου, μαγνητικής κασέτας, CD ή ακόμη και ψηφιακών αρχείων mp3. Ως πηγή ήχου επομένως θα ορίσουμε το στάδιο εκείνο που παράγει ως έξοδό του την είσοδο του συστήματος που καλούμαστε να μελετήσουμε. Το σήμα που παράγει η πηγή θα αναλύσουμε σε αυτό το κεφάλαιο ενώ στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα δούμε πως μπορούμε να κάνουμε δειγματοληψία, ψηφιοποίηση και συμπίεση αυτού του σήματος για να το οδηγήσουμε στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας.

Σύμφωνα με τον μηχανικό ήχου Ethan Winer, χρειάζεται να ασχοληθούμε μόνο με τέσσερις κατηγορίες παραμέτρων για να καθορίσουμε την πιστότητα ήχου μίας συσκευής: το θόρυβο, την απόκριση συχνότητας, την παραμόρφωση και τα χρονικού χαρακτήρα λάθη. Κάθε κατηγορία φυσικά χωρίζεται σε περισσότερες υποκατηγορίες καθεμιά από τις οποίες διαθέτει μετρήσιμα μεγέθη. Πολλά από τα μεγέθη αυτά είδαμε ως έννοιες στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Σε κάθε περίπτωση θα μελετήσουμε τα μεγέθη αυτά που επηρεάζουν την πιστή αναπαραγωγή ήχου και θα δούμε σχετικές βελτιώσεις και εξελίξεις.

### 5.2 Πρώτες διατάξεις εγγραφής και αναπαραγωγής του ήχου

Σε αυτή την περίπτωση, η είσοδος του συστήματός μας είναι κάποιο ηχητικό κύμα που καλείται το σύστημα να καταγράψει και να στη συνέχεια να προωθήσει σε επόμενα στάδια για περεταίρω επεξεργασία. Η καταγραφή ενός ηχητικού κύματος μπορεί να γίνει με διάφορα μέσα καθένα από τα οποία έχει δικά του χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Τα περισσότερα μέσα μετατρέπουν το κύμα σε ηλεκτρικό αναλογικό σήμα τάσης ή ρεύματος αλλά υπάρχουν και μέσα που μπορούν να καταγράψουν το μηχανικό κύμα κατευθείαν χωρίς μετατροπή σε ηλεκτρική μορφή. Θα ξεκινήσουμε αναλύοντας την παλαιότερη και απλούστερη περίπτωση συσκευής που κατέγραφε ήχο χωρίς να το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα, αυτή του φωνογράφου.

### 5.2.1 Ο φωνογράφος

Ένα απλό παράδειγμα καταγραφής ήχου χωρίς μετατροπές σε ηλεκτρική μορφή είναι η χρήση του φωνογράφου. Ο φωνογράφος ή γραμμόφωνο (Phonograph) ήταν μια από τις πρώτες συσκευές για την εγγραφή και αναπαραγωγή ήχου. Κατασκευάστηκε από τον Αμερικανό Τόμας Άλβα Έντισον (Thomas A. Edison) το 1877. Ο φωνογράφος χρησιμοποιούσε μια βελόνα για να καταγράψει τον ήχο χαράσσοντας αυλακώσεις στην επιφάνεια ενός κυκλικού δίσκου που περιστρεφόταν χειροκίνητα με όσο το δυνατόν σταθερή ταχύτητα. Η συσκευή διέθετε αρχικά ένα ξύλινο κύλινδρο που περιστρεφόταν χειρονακτικά με μανιβέλα και ήταν καλυμμένος με ένα λεπτό φύλλο κασσιτέρου (Staniol). Μία μεταλλική βελόνα ήταν σταθερά συνδεδεμένη σε μια μεμβράνη και η μεμβράνη ήταν τοποθετημένη στη βάση μίας χοάνης. Η χοάνη λειτουργούσε ως ενισχυτής της ακουστικής πίεσης των ήχων που διαδίδονταν στο εσωτερικό της. Όταν ένας ομιλητής μιλούσε κοντά στο άνοιγμα της χοάνης, η μεμβράνη στο στένωμα της χοάνης πραγματοποιούσε ταλαντώσεις λόγω των ηχητικών κυμάτων. Σαν αποτέλεσμα, η βελόνα που ήταν συνδεδεμένη με τη μεμβράνη δημιουργούσε βαθουλώματα στο φύλλο κασσιτέρου, άλλοτε μεγαλύτερου και άλλοτε μικρότερου βάθους, ανάλογα με την ένταση του ήχου που λάμβανε. Ένας μηχανικός οδηγός μετακινούσε τη βελόνα αξονικά επάνω στον κύλινδρο, ώστε τελικά να προκύψει ένα σπειροειδές αυλάκι στον κύλινδρο και να μην συμπέσουν διαφορετικές ηχογραφήσεις. Για την αναπαραγωγή (playback) της ηχογράφησης, αρχικά περιστρεφόταν ο κύλινδρος και η βελόνα χαμήλωνε ώστε να περάσει από τα αυλάκια της χαραγμένης κυλινδρικής επιφάνειας. Η βελόνα ταλαντωνόταν λόγω του μεταβλητού βάθους των αυλακώσεων και οι ταλαντώσεις αυτές μεταδίδονταν στη μεμβράνη. Η μεμβράνη παλλόταν, οι παλμοί της ενισχύονταν από τη χοάνη και μετατρέπονταν σε ηχητικά κύματα που μπορούσε να ακούσει ο ακροατής.

Από τις πρώτες κιόλας εφαρμογές του φωνογράφου διαπιστώθηκε πως η ποιότητα της ηχογράφησης δεν ήταν ικανοποιητική και η χρήση του δεν ήταν τόσο πρακτική. Οι άνθρωποι της εποχής είχαν συνηθίσει να ακούν τη φυσική φωνή του συνομιλητή τους. Έτσι, συνέκριναν το αποτέλεσμα της ηχογράφησης του φωνογράφου με τους ήχους που άκουγαν φυσικά. Κατά αυτό τον τρόπο είχαμε μία από τις πρώτες απαιτήσεις για πιστή εγγραφή και αναπαραγωγή του ήχου.

Μία πρώτη προσπάθεια βελτίωσης της πιστότητας του ήχου του φωνογράφου έγινε το 1881 από το γνωστό ως εφευρέτη του τηλεφώνου, Αλεξάντερ Γκράχαμ Μπελ. Ο Μπελ προσπάθησε να βελτιώσει το φωνόγραφο του Έντισον. Για το σκοπό αυτό κάλυψε τον ξύλινο κύλινδρο με κερί, επάνω στο οποίο θα χαρασσόταν το αυλάκι της ηχογράφησης. Η προσπάθεια αυτή απέδωσε καλύτερα αποτελέσματα, κυρίως όμως δεν επέτρεπε την ηχογράφηση άσχετων θορύβων, όπως η κατασκευή του Έντισον. Είχαμε επομένως μία πρώτη προσπάθεια βελτίωσης του σηματοθορυβικού λόγου (signal to noise ratio) «SNR» των ηχογραφήσεων.

Το 1888, ο ίδιος ο Έντισον αντικατέστησε το φύλλο κασσιτέρου με στρώμα σκληρού κεριού και τοποθέτησε στη συσκευή ένα μηχανικό κινητήρα με βαρίδι για ευκολία χρήσης και σταθερότερη ταχύτητα αναπαραγωγής. Η σταθερότερη ταχύτητα αναπαραγωγής μείωνε τα χρονικού χαρακτήρα λάθη. Αργότερα χρησιμοποιήθηκε ένας μηχανικός κινητήρας με ελατήριο και μανιβέλα που κουνιζόταν. Στη συνέχεια, σε μερικά μοντέλα προστέθηκε ένας ηλεκτρικός κινητήρας, αν και οι ηλεκτρικοί κινητήρες ήταν εκείνη την εποχή και για αρκετές δεκαετίες ακόμα ογκώδεις και ακριβοί.

### 5.2.2 Το γραμμόφωνο

Μετεξέλιξη του φωνογράφου ήταν το γραμμόφωνο του Emile Berliner (σχήμα 5.1). Ο Berliner αντικατέστησε τον κύλινδρο όπου χαρασσόταν ένα «αυλάκι ήχου» του Έντισον, με μία επίπεδη πλάκα όπου μία ελικοειδής διαδρομή σχημάτιζε ένα συνολικό αυλάκι σε όλη την επιφάνεια της πλάκας και η βελόνα έκανε ταλαντώσεις, εγκάρσια στην κίνηση. Ενώ δηλαδή η κεφαλή της συσκευής του Έντισον εκτελούσε κινήσεις μόνο καθ' ύψος για να ανιχνεύσει τα βαθουλώματα της επιφάνειας, στη συσκευή του Μπερλίνερ έπαιζαν ρόλο τα τοιχώματα του αυλακιού και η βελόνα πραγματοποιούσε κινήσεις δεξιά-αριστερά. Η τεχνολογία του Μπερλίνερ οδήγησε στην κατασκευή στερεοφωνικών δίσκων βινυλίου μετέπειτα. Τέλος οι δίσκοι έγιναν διπλής όψης, κατασκευάζονταν από βινύλιο και πήραν τη γνωστή

μορφή δίσκου πικάπ που διατηρείται ακόμη και σήμερα. Ήδη από τη δεκαετία του 1920 είχαμε μία προσπάθεια μετατροπής του ακουστικού σήματος σε ηλεκτρικό για τη βελτίωση της ποιότητας των ηχογραφήσεων. Έως τότε η ηχογράφηση δίσκων γινόταν απλά με χρήση χοάνης και σε μεγάλες εντάσεις. Οι μηχανικοί της Western Electric πρώτοι έγραψαν δίσκους γραμμοφώνου με ηλεκτρικό τρόπο. Χρησιμοποίησαν μικρόφωνα για την καταγραφή του ήχου, το σήμα των οποίων ενίσχυσαν με ενισχυτές λυχνίας και κατόπιν οδηγούσαν σε μία ηλεκτρομαγνητική κεφαλή εγγραφής του δίσκου. Λόγω του αυξημένου κόστους αυτών των ηλεκτρικών συστημάτων, η αναπαραγωγή των δίσκων από τους καταναλωτές γινόταν ακόμη παραδοσιακά με τη χρήση χοάνης για την ενίσχυση του ήχου. Εντούτοις, η πιστότητα των ηλεκτρικών ηχογραφήσεων ήταν πολύ ανώτερη των μηχανικών. Η απόκριση συχνότητας ήταν πιο επίπεδη και το δυναμικό εύρος μεγαλύτερο αν και περιοριζόταν από το μέγιστο βάθος των αυλακώσεων του δίσκου. Συγκεκριμένα, το εύρος συχνοτήτων μίας ακουστικής ηχογράφησης ήταν 168Hz-2kHz. Με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων, το εύρος συχνοτήτων των ηχογραφήσεων αυξήθηκε κατά 2,5 οκτάβες, επομένως είχαμε μία απόκριση συχνότητας εύρους 100Hz-5kHz.



Σχήμα 5.1

Σήμερα γίνεται μία προσπάθεια από αρκετά ιδρύματα και φορείς να ψηφιοποιηθούν και να διασωθούν παλαιές και ιστορικές ηχογραφήσεις που είναι αποτυπωμένες σε δίσκους γραμμοφώνου και βινυλίου αλλά και σε μαγνητικά μέσα. Σε μερικές περιπτώσεις, γίνεται προσπάθεια σάρωσης της επιφάνειας του δίσκου και αποθήκευσης της πληροφορίας του ως ψηφιακή εικόνα υψηλής ανάλυσης. Με ειδικούς αλγορίθμους, από το αρχείο εικόνας μπορεί να παραχθεί το ηχητικό σήμα που ήταν αποτυπωμένο στο δίσκο. Η ψηφιοποίηση είναι μία διαδικασία που θα μας απασχολήσει στο επόμενο κεφάλαιο και έχει τις δικές της δυσκολίες ως προς την πιστότητα.

### 5.3 Οι δίσκοι βινυλίου ως πηγή ήχου

Με την ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων για την ανάγνωση δίσκων, το σήμα εξόδου του συστήματος αναπαραγωγής δίσκων έγινε ηλεκτρικό. Στην κατηγορία πηγών ήχου που παράγουν αναλογικό ηλεκτρικό σήμα χωρίς διαδικασία ψηφιοαναλογικής μετατροπής, συγκαταλέγονται τα πικάπ δίσκων βινυλίου, τα μέσα ανάγνωσης μαγνητικής κασέτας, το ραδιόφωνο και διατάξεις όπως μικρόφωνα και μετατροπείς (transducers) διαφόρων τύπων.

### 5.3.1 Το πικάπ

Με τη βελτίωση των ηλεκτρικών κινητήρων και την εισαγωγή του ηλεκτρονικού ενισχυτή, το γραμμόφωνο αντικαταστάθηκε σταδιακά από το ηλεκτρικό γραμμόφωνο που πήρε στην καθημερινή γλώσσα το όνομα «πικάπ» από την αγγλική έκφραση «rick up» (συλλέγω).

Το 1948 είχαμε την πρώτη εμφάνιση των δίσκων βινυλίου 12 ιντσών (30 εκατοστών του μέτρου) που περιστρέφονταν με ταχύτητα 33,5 στροφών ανά λεπτό (ΣΑΛ) κατά τη αναπαραγωγή τους. Το 1949 είχαμε και την εμφάνιση των γνωστών ως «single» μικρότερων δίσκων βινυλίου 7 ιντσών (18 cm), με ταχύτητα περιστροφής κατά την αναπαραγωγή τους στις 45 Σ.Α.Λ. Η αναπαραγωγή αυτών των δίσκων απαιτεί κεφαλές ανάγνωσης με μικρότερο βάρος και διαστάσεις από αυτές του γραμμοφώνου. Αυτό συμβαίνει καθώς τα αυλάκια του δίσκου βινυλίου είναι πολύ μικρότερα κατά πλάτος και χωρούν τυπικά 160 έως 180 αυλάκια ανά cm διαμέτρου του δίσκου. Έτσι, κάθε πλευρά ενός τυπικού δίσκου μακράς διάρκειας (long playing, LP) έχει συνολικό μήκος αυλακώσεων περί τα 460 μέτρα.

Το ηλεκτρικό γραμμόφωνο ή πικάπ, εν αντιθέσει με το γραμμόφωνο που είδαμε προηγουμένως, αναπαράγει στην έξοδό του το ηχητικό σήμα που είναι αποτυπωμένο επάνω στο δίσκο βινυλίου, αφού πρώτα το μετατρέψει σε ηλεκτρικό σήμα. Η μετατροπή γίνεται από ένα ειδικό ηλεκτρομαγνητικό, πιεζοηλεκτρικό ή φωτοηλεκτρικό σύστημα ενσωματωμένο στην κεφαλή ανάγνωσης της συσκευής αναπαραγωγής του δίσκου.

### 5.3.2 Κεφαλές ανάγνωσης δίσκων

Κατά καιρούς δημιουργήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι κεφαλής ανάγνωσης δίσκων. Οι κεφαλές έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ανάλυσή μας καθώς συχνά συνδέονται απευθείας στον προενισχυτή ή ενισχυτή ενός ηχοσυστήματος χωρίς διαμεσολάβηση άλλων συστημάτων πέραν των κατάλληλων ομοαξονικών θωρακισμένων καλωδίων και βυσμάτων.

Η κεφαλή αποτελείται από πέντε βασικά στοιχεία: τη γραφίδα (ή ακίδα), τη ράβδο στήριξης της γραφίδας, τους μαγνήτες, τα πηνία και το σώμα της κεφαλής όπου ενσωματώνονται όλα υποσυστήματά της. Η γραφίδα είναι το μέρος που, κατά τη χρήση του, έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του δίσκου και παρακολουθεί τις διακυμάνσεις στο αυλάκι εγγραφής (groove). Είναι συνήθως κατασκευασμένη από ένα μικρό διαμάντι γυαλισμένο ή άλλους πολύτιμους λίθους. Η ράβδος υποστηρίζει τη γραφίδα και μεταδίδει τις δονήσεις από αυτή στο σύστημα πηνίου-μαγνήτη. Η ράβδος είναι συνήθως κατασκευασμένη από βόριο ή αλουμίνιο, αν και ορισμένοι κατασκευαστές (όπως η Dynavector) χρησιμοποιούν πολύτιμους λίθους για την κατασκευή της ράβδου. Το ηλεκτρομαγνητικό σύστημα πηνίων-μαγνητών αντικαθίσταται με πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους σε κάποιες περιπτώσεις. Ας δούμε μερικούς τύπους τέτοιων κεφαλών και τεχνικά χαρακτηριστικά τους που συνέβαλαν στη βελτίωση της πιστότητας αναπαραγωγής.

Αρχικά, στα μέσα της δεκαετίας του 1920, οι πρώτες ηλεκτρομαγνητικές κεφαλές ανάγνωσης δίσκων γραμμοφώνου είχαν αρκετό βάρος δεκάδων γραμμαρίων, γρήγορα αναλώσιμη ακίδα ανάγνωσης από ατσάλι και μεγάλους μαγνήτες σε σχήμα πετάλου. Παρότι αυτές οι κεφαλές έχουν ελάχιστα κοινά με τις σημερινές, η βασική αρχή λειτουργίας είναι κοινή και όπως είδαμε έφεραν αρκετές βελτιώσεις στην πιστότητα ηχογράφησης και αναπαραγωγής ήχου σε σχέση με τη χρήση χοάνης. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1930, οι κεφαλές αυτές αντικαταστάθηκαν από ελαφρύτερες πιεζοηλεκτρικής τεχνολογίας κεφαλές ανάγνωσης. Οι γραφίδες κατασκευάζονταν ακόμη από ατσάλι και φθειρόνταν γρήγορα. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν στη συνέχεια ακίδες από εξωτικά ανθεκτικά μέταλλα όπως ζαφείρι και όσμιο.

Με την εμφάνιση των γνωστών δίσκων βινυλίου των 33,5 και 45 Σ.Α.Λ., αναπτύχθηκαν νέες μικρότερες κεφαλές ανάγνωσης των δίσκων. Οι νέες γραφίδες είχαν μέγιστο πλάτος περί τα 25μm και ονομάστηκαν «micro-groove». Η γραφίδα κατασκευαζόταν πλέον από ζαφείρι ή διαμάντι ώστε να είναι



ανθεκτικότερη. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς κεραμικού τύπου κεφαλές που ήταν οικονομικές και ανθεκτικές καθώς και κεφαλές με πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους. Φυσικά υπήρχαν και ακριβότερες ηλεκτρομαγνητικές κεφαλές που απέδιδαν καλύτερα και έγιναν ο κανόνας για τα επιτραπέζια συστήματα πικάπ στη συνέχεια. Τα φορητά συστήματα αναπαραγωγής δίσκων χρησιμοποιούσαν κυρίως κεραμικές κεφαλές λόγω χαμηλού κόστους και ανθεκτικότητας.

Σε συστήματα υψηλής πιστότητας, οι κρυστάλλινοι πιεζοηλεκτρικοί και κεραμικοί μηχανισμοί ανάγνωσης έχουν αντικατασταθεί από την ηλεκτρομαγνητική κεφαλή. Η κεφαλή αυτή λειτουργεί χρησιμοποιώντας είτε ένα κινούμενο μαγνήτη είτε ένα κινητό πηνίο. Σε σύγκριση με τα κρυστάλλινα και κεραμικά συστήματα, η ηλεκτρομαγνητική κεφαλή συνήθως δίνει βελτιωμένη πιστότητα αναπαραγωγής και μειωμένη φθορά του δίσκου καθώς ακολουθεί τον αύλακα του δίσκου ασκώντας λιγότερη πίεση και δύναμη. Οι ηλεκτρομαγνητικές κεφαλές έχουν επίσης χαμηλότερη τάση εξόδου από ένα κρύσταλλο ή κεραμικό σύστημα, της τάξης ελάχιστων millivolts, απαιτώντας έτσι μεγαλύτερη ενίσχυση.

### 5.3.3 Διαφορές μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών και κεραμικών κεφαλών

Στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί παρατηρούμε τις διαφορές μεταξύ μαγνητικών και κεραμικών κεφαλών παραγωγής. Παρατηρούμε ότι οι μαγνητικές κεφαλές ασκούν σε γενικές γραμμές μικρότερες δυνάμεις επί της επιφάνειας του δίσκου κι έχουν μικρότερη τάση και αντίσταση εξόδου. Η μικρότερη αντίσταση εξόδου συμβάλλει στη μεγαλύτερη απόσβεση του crosstalk μεταξύ του δεξιού και αριστερού καναλιού καθώς και τη μείωση του υψίσυχνου θορύβου που παρουσιάζουν έναντι των κεραμικών κεφαλών. Όμως η χαμηλότερη τάση εξόδου δυσκολεύει το έργο των προενισχυτών που καλούνται να διαχειριστούν το σήμα εξόδου του πικάπ. Το φαινόμενο crosstalk μεταξύ των καναλιών εμφανίζεται καθώς οι σύγχρονες μαγνητικές κεφαλές είναι φυσικά στερεοφωνικού τύπου αλλά υπάρχει συμβατότητά τους με παλαιότερους μονοφωνικού τύπου δίσκους βινυλίου. Έχουν δε κατασκευαστεί έως και τετραφωνικοί δίσκοι (4 καναλιών) όπως θα δούμε στην συνέχεια.

Τεχνολογία	Κατασκευαστής	Τύπος	Βάρος (γραμμάρια)	Δυναμική Μάζα [milligram]	Σχήμα γραφίδας	Καμπυλότητα γραφίδας [μm]	Δύναμη γραφίδας [pounds]	Τάση εξόδου σε αντίσταση	Crosstalk [db]
Μαγνητική	Shure	V15	11	-	ελλειπτικό	5 / 22.5	0.8 - 1.5	6mV at 50k0hms	> - 25
Μαγνητική	Ortofon	SPU-TE	17	1	ελλειπτικό	5 / 30	2	10mV at 50k0hms	> - 25
Μαγνητική	Audio Dynamics	ADC-4E	6	0.8	ελλειπτικό	5 / 30	0.8 - 1.5	8mV at 50k0hms	> - 22
Μαγνητική	Pickering	V15 AME1	5	-	ελλειπτικό	5 / 30	0.8 - 3	6mV at 50k0hms	> - 22
Μαγνητική	Shure	M44 -7	7	-	σφαιρικό	15 - 18	1.5 - 3	5mV at 50k0hms	> - 24
Κεραμική	Sonotone	9 TAHC	2.8	2.5	σφαιρικό	15 - 18	1 - 3	0.2V at 2M0hms	> - 20
Κεραμική	Connoisseur	SCU-1	7.5	1	σφαιρικό	15 - 18	1.5 - 3	0.3V at 2M0hms	> - 20
Κεραμική	Schumann	STC 481	4	2.4	σφαιρικό	15 - 18	2 - 4	0.15V at 2M0hms	> - 15

Πίνακας 5.1

Υπάρχουν διάφοροι τύποι σύγχρονων ηλεκτρομαγνητικών κεφαλών που βασίζονται σε κοινή αρχή λειτουργίας αλλά υλοποιούνται με διαφορετικό τρόπο από τους κατασκευαστές τους. Οι κυριότερες κατηγορίες τέτοιων κεφαλών είναι οι εξής:

### 5.3.4 Κεφαλές κινητού μαγνήτη («Moving Magnet» ή MM)

Στις κεφαλές κινητού μαγνήτη, η ράβδος της γραφίδας έχει στη μία άκρη το διαμάντι ανάγνωσης και στην άλλη άκρη της έχει ένα μικρό μόνιμο μαγνήτη. Στις στερεοφωνικού τύπου κεφαλές, ο μαγνήτης αυτός τοποθετείται μεταξύ δύο σετ πηνίων. Τέσσερα συνολικά πηνία, σταθερά τοποθετημένα, χρησιμοποιούνται ανά κεφαλή. Το ηλεκτρομαγνητικό αυτό σύστημα παράγει μία μικρή τάση εξόδου καθώς η γραφίδα κινείται μέσα στο αυλάκι του δίσκου βινυλίου. Ο μικρός μόνιμος μαγνήτης είναι το μόνο εξάρτημα που κινείται εντός του συστήματος, εξ ου και το όνομα «κινητού μαγνήτη», επάγοντας μικρά ρεύματα της τάξης του  $\mu\text{A}$  στα πηνία. Εν αντιθέσει με τις κεραμικές κεφαλές, η ράβδος της γραφίδας δε συνδέεται μηχανικά με το υπόλοιπο σύστημα και είναι σχετικά πιο ελεύθερη να κινηθεί. Για το λόγο αυτό, η κεφαλή ασκεί μικρότερη πίεση επί της επιφάνειας του δίσκου και παρακολουθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια τις διακυμάνσεις στην επιφάνεια των αυλακώσεων δίνοντας πιστότερο ηχητικό αποτέλεσμα.

Ένα τυπικό παράδειγμα κεφαλής κινητού μαγνήτη είναι το μοντέλο CN5625AL της εταιρίας audio-technica που παράγεται από το 2004 και κοστίζει περί τα 30\$ στην Αμερικανική αγορά. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται από πολλούς κατασκευαστές σήμερα και μπορεί να αντικαταστήσει αρκετές άλλες κεφαλές με ίδια σημεία στήριξης. Ας δούμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτής της κεφαλής :

- Frequency Response (απόκριση συχνότητας): 20-20,000 Hz
- Channel Separation (διαχωρισμός καναλιών): 20db (1kHz)
- Channel Balance (ισορροπία καναλιών): 1.5db
- Stylus force (δύναμη ασκούμενο από τη γραφίδα): 1.5-2.0grams
- Stylus form (μορφή γραφίδας): κωνική (0.7mil διάμετρος)
- Output voltage (τάση εξόδου): ca. 4mV στο 1kHz
- Rapidity (ταχύτητα) : 5cm/sec

Παρατηρούμε πως το εύρος της απόκρισης συχνότητας είναι το πλήρες ακουστικό φάσμα επομένως μπορεί να καλύψει κάθε ηχογράφιση. Παλαιότερες κεφαλές είχαν πολύ μικρότερο εύρος απόκρισης συχνότητας. Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο καναλιών είναι περί τα 20 decibel μετρημένος για έναν τόνο συχνότητας 1KHz. Αυτό σημαίνει πως η ισχύς του σήματος του ενός καναλιού που διαρρέει στο άλλο θα έχει ισχύ εξασθενημένη κατά 100 φορές καθώς υπολογίζεται ότι:  $20\text{dB} = 10 \cdot \log(100)$ . Επομένως θα έχουμε ελαχιστοποίηση των φαινομένων crosstalk. Επίσης, η μέγιστη διαφορά στην ενίσχυση των δύο καναλιών είναι στο 1,5 decibel. Η ποσότητα αυτή είναι σχετικά μικρή αν αναλογιστούμε πως 1dB είναι η ελάχιστη μεταβολή στην ένταση του ήχου που αντιλαμβάνεται το αυτί μας. Τέλος, η τάση εξόδου του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος είναι περίπου 4mV σε τόνο συχνότητας 1KHz. Ο τόνος στη συχνότητα του 1KHz χρησιμοποιείται συχνά για μετρήσεις τεχνικών χαρακτηριστικών ηχοσυστημάτων καθώς το ανθρώπινο αυτί είναι πιο ευαίσθητο σε αυτή τη συχνότητα.

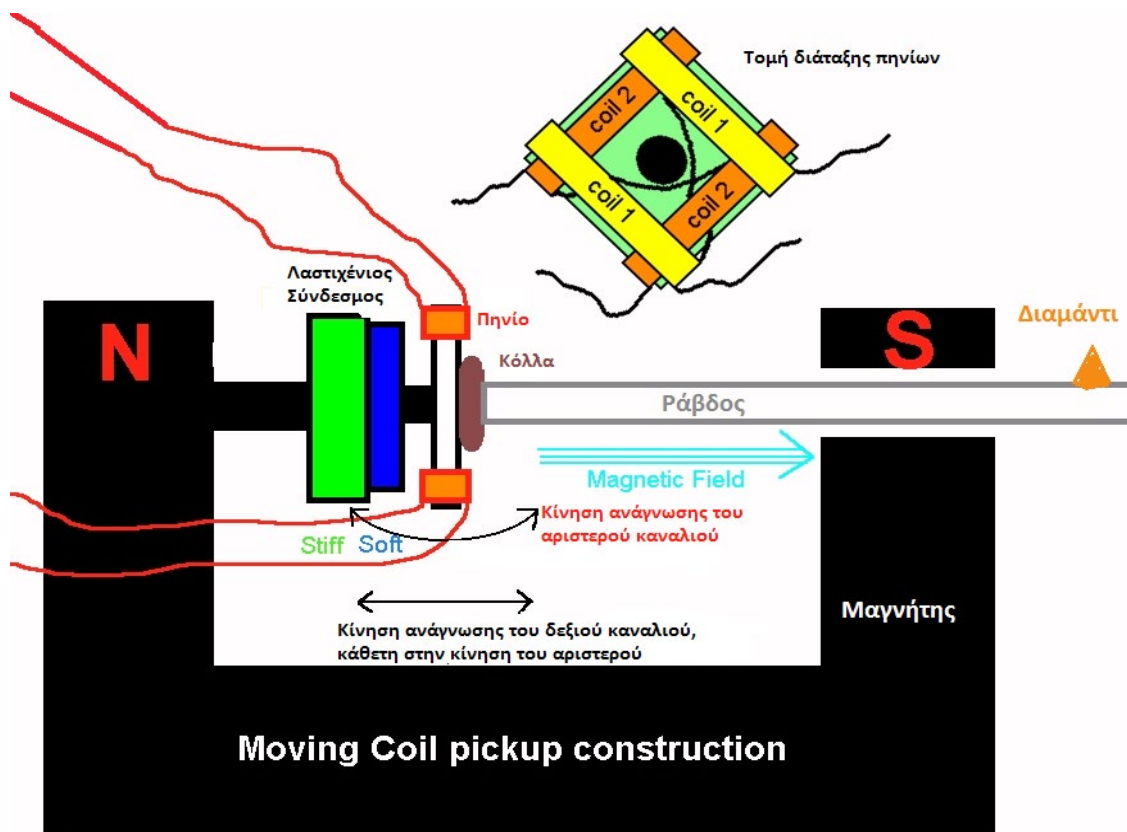
### 5.3.5 Κεφαλές κινητού σιδήρου («Moving Iron» ή MI)

Οι κεφαλές κινητού σιδήρου λειτουργούν όπως ακριβώς οι κινητού μαγνήτη με τη διαφορά ότι η ράβδος της γραφίδας διαθέτει ένα κομμάτι σιδήρου ή άλλου μετάλλου στην άκρη της αντί για μόνιμο μαγνήτη. Το κατάλληλο μαγνητικό πεδίο για τη λειτουργία του ηλεκτρομαγνητικού αυτό συστήματος παρέχει ένας μεγαλύτερου μεγέθους μόνιμος μαγνήτης τοποθετημένος σταθερά επάνω από τα πηνία της κεφαλής.

### 5.3.6 Κεφαλές κινητού πηνίου («Moving coil» ή MC)

Οι κεφαλές κινητού πηνίου στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας με τις κινητού μαγνήτη όμως σε αυτή την διάταξη, ο μαγνήτης παραμένει σταθερός και κινείται το πηνίο. Στην πράξη χρησιμοποιεί 4 πολύ μικρά πηνία που στηρίζονται επάνω στη ράβδο της γραφίδας και καθώς κινούνται εντός του μαγνητικού πεδίου δημιουργούν μικρά ρεύματα και τάσεις μερικών millivolt. Η τάση εξόδου των κεφαλών κινητού πηνίου είναι μικρότερη από των κεφαλών κινητού μαγνήτη λόγω του μικρότερου μεγέθους και αριθμού τυλιγμάτων των πηνίων τους. Γι αυτό το λόγο, ο θόρυβος γίνεται συγκρίσιμος με το θεμιτό σήμα εξόδου της κεφαλής και ο προενισχυτής έχει δυσκολότερο έργο. Εντούτοις, αν αυτές οι κεφαλές MC συνδυαστούν με έναν προενισχυτή πολύ χαμηλού θορύβου μπορούν να αποδώσουν πιστότερα την ανάγνωση του δίσκου βινυλίου χάρη στην ακριβέστερη κατασκευή τους. Οι MC κεφαλές έχουν εν γένει μικρότερη αυτεπαγωγή πηνίων, αντίσταση και παρουσιάζουν μικρότερη παρασιτική χωρητικότητα από τις MM κεφαλές. Αυτό το γεγονός βελτιώνει την απόκριση συχνοτήτων κυρίως στις υψηλότερες συχνότητες. Όμως σε περιπτώσεις που οι MC κεφαλές συνδυάζονται με μικρό μετασηματιστή ανύψωσης της τάσης εξόδου τους, η απόκριση συχνοτήτων μπορεί να περιοριστεί στα άκρα του φάσματος. Η αλήθεια είναι πως δεν είναι ξεκάθαρο ποια από τις 2 τεχνολογίες κατασκευής κεφαλών αποδίδει πιστότερο ηχητικό αποτέλεσμα καθώς εξαρτάται από την υλοποίηση κάθε κατασκευαστή και από τον εξοπλισμό προενίσχυσης με τον οποίο θα συνδυαστεί.

Στο παρακάτω σχήμα 5.2 βλέπουμε ένα σχεδιάγραμμα της κατασκευής μία κεφαλής κινητού πηνίου και τα βασικά της μέρη:



Σχήμα 5.2

## 5.4 Βελτιώσεις του πικάπ ως προς την πιστότητα του ήχου

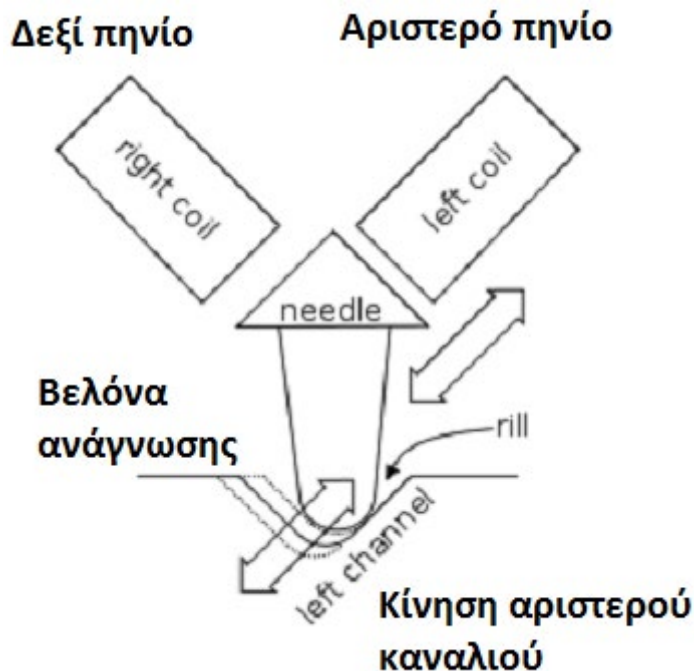
Διάφορες αλλαγές και βελτιώσεις έγιναν σε βάθος χρόνου στην τεχνολογία των πικάπ για τη βελτίωση της πιστής αναπαραγωγής ήχου.

### 5.4.1 Στερεοφωνία

Αρχικά οι δίσκοι ήταν μονοφωνικοί και μπορούσε να εγγραφεί επάνω τους μόνο ένα κανάλι με την τεχνική «λόφος και λαγκάδι» ή «hill dale» που ονομάστηκε έτσι από το ανάγλυφο των αυλακώσεων του δίσκου. Η κεφαλή εγγραφής και ανάγνωσης των δίσκων κινούταν μόνο κάθετα.

Ο μηχανικός Alan Blumlein της EMI εφευρέ μια στερεοφωνική μέθοδο εγγραφής δίσκων το 1931 με ονομασία «45/45». Η ονομασία αυτή δόθηκε καθώς καθένα από τα 2 κανάλια εγγράφεται ανεξάρτητα στα δύο αντικριστά τοιχώματα των αυλακώσεων του δίσκου σε επίπεδο κεκλιμένο κατά γωνία 45° μοιρών. Η στερεοφωνική βελόνα ανάγνωσης κινείται για αυτό το σκοπό και δεξιά-αριστερά. Δεν κινείται μόνο κάθετα στην επιφάνεια του δίσκου όπως συνέβαινε στις μονοφωνικές ηχογραφήσεις. Φυσικά υπάρχει συμβατότητα των νέων κεφαλών με τους μονοφωνικούς δίσκους. Οι στερεοφωνικές κεφαλές περιέχουν όπως είδαμε 4 πηνία ομαδοποιημένα κατά δύο ώστε να λαμβάνουν το σήμα κάθε καναλιού. Αν το ανάγλυφο των αυλακώσεων των 2 καναλιών αναλυθεί σε δύο διανύσματα, τότε η κάθετη κίνηση της κεφαλής παράγει ουσιαστικά τη διαφορά του δεξιού καναλιού από του αριστερού ενώ η οριζόντια κίνηση παράγει το άθροισμά τους.

Στο παρακάτω σχήμα 5.3 παρατηρούμε το σχήμα κεκλιμένων κατά 45° επιπέδων του στερεοφωνικού αυλακιού που δημιουργείται επί του δίσκου και των τρόπων κίνησης της κεφαλής.



Σχήμα 5.3

Η στερεοφωνική αναπαραγωγή και εγγραφή δίσκων βινυλίου βελτίωσε την ηχητική πιστότητα. Καταρχάς, προστέθηκε ένα ακόμη κανάλι που έδωσε πιστότερη αναπαράσταση του περιβάλλοντος στο οποίο ηχογραφήθηκε το ηχητικό σήμα. Όπως αναλύσαμε και στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, ο ακροατής έχει αίσθηση της κατευθυντικότητας του ήχου και η προσθήκη καναλιών περιβάλλοντος ήχου ενισχύει αυτή την αίσθηση που έχουμε από τη φύση μας. Επομένως έχουμε πιστότερο και φυσικότερο αποτέλεσμα. Για

αυτό το σκοπό είχαμε και ανάπτυξη τετραφωνικών συστημάτων αναπαραγωγής ήχου μεταγενέστερα.

Επίσης, η στερεοφωνική αναπαραγωγή δίσκων έχει χαμηλότερα ποσοστά παραμόρφωσης από τη μονοφωνική λόγω λιγότερων αναπηδήσεων και χαμηλών συχνοτήτων θορύβου που προκαλείται από την κάθετη κίνηση της βελόνας. Αυτό συμβαίνει επειδή το σήμα διαφοράς των δύο καναλιών που παράγεται από την κάθετη κίνηση είναι αρκετά μικρότερου πλάτους από καθενός καναλιού ξεχωριστά και από του αθροίσματός τους.

#### 5.4.2 Τετραφωνία και πολυπλεξία καναλιών

Από το 1971 είχαμε τη δημιουργία τετραφωνικών (quadraphonic) δίσκων στους οποίους μπορούσαν να εγγραφούν 4 διακριτά κανάλια ήχου. Το αυλάκι αυτών των δίσκων δεν ήταν διαφορετικού τύπου από εκείνο των στερεοφωνικών δίσκων. Ένας τετραφωνικός δίσκος μπορούσε να υποστηρίξει 4 κανάλια κωδικοποιημένα σε 2 κανάλια ώστε να μη μειωθεί η χωρητικότητά του σε χρόνο αναπαραγωγής και να υπάρχει συμβατότητα με τα απλούστερα στερεοφωνικά συστήματα. Η κωδικοποίηση των 4 καναλιών σε 2 γινόταν κατά τη εγγραφή του δίσκου με τεχνικές ηλεκτρονικής πολυπλεξίας και ολίσθησης φάσης κατά 90 μοίρες. Κατά την αναπαραγωγή του δίσκου, γινόταν κατάλληλη αποκωδικοποίηση των 2 καναλιών σε 4. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται συστήματα πίνακα ή «Matrix» ή «4:2:4» καθώς χρησιμοποιούταν ένας πίνακας για την αποκωδικοποίηση των 2 καναλιών σε 4. Αργότερα δημιουργήθηκαν και διακριτά (discrete) συστήματα για την αναπαραγωγή 4 διακριτών καναλιών. Τα δύο κυριότερα συστήματα τετραφωνίας σε δίσκους βινυλίου ήταν το «SQ (Stereo Quadraphonic)» της CBS και το «QS (Quadraphonic Sound ή Quadraphonic Synthesizer)» της Sansui. Το QS σύστημα παρουσίαζε αρχικά μόνο 3dB διαχωρισμό μεταξύ των καναλιών που ήταν μία αρκετά χαμηλή τιμή σε σχέση με τα περίπου 20dB διαχωρισμού των στερεοφωνικών συστημάτων. Στην συνέχεια αναπτύχθηκαν συστήματα όπως το Vario Matrix με δυνατότητα διαχωρισμού των καναλιών άνω των 12dB και έως 20dB. Εξ αρχής βέβαια έγινε αντιληπτό πως το τετραφωνικό σύστημα δίνει μία καλύτερη αίσθηση του χώρου και κατεύθυνσης του ήχου. Στο παρακάτω σχήμα 5.4 βλέπουμε τον πίνακα κωδικοποίησης 4 καναλιών του συστήματος QS. Ο φανταστικός «j» αριθμός συμβολίζει ολίσθηση φάσης κατά θετική γωνία 90 μοιρών.

QS Encoding Matrix	Left Front	Right Front	Left Back	Right Back
Left Total	0.92	0.38	j0.92	j0.38
Right Total	0.38	0.92	-j0.38	-j0.92

Σχήμα 5.4

Το ανταγωνιστικό σύστημα QS στηριζόταν στην ίδια τεχνολογία και βασική ιδέα του συστήματος SQ και είχε παρόμοιες επιδόσεις. Αρχικά προτάθηκε ένας πίνακας κωδικοποίησης για αυτό το σύστημα αλλά παρουσίαζε ασυμβατότητας με τα μονοφωνικά συστήματα αναπαραγωγής. Γι αυτό το λόγο προτάθηκε ένας εναλλακτικός πίνακας κωδικοποίησης που απεικονίζεται στο σχήμα 5.5

Modified SQ Encoding Matrix	Left Front	Right Front	Left Back	Right Back
Left Total	1.0	0.0	0.7	-j0.7
Right Total	0.0	1.0	-j0.7	0.7

Σχήμα 5.5

### 5.4.3 Διακριτή τετραφωνία

Από το 1971 έως το 1972 είχαμε την ανάπτυξη και πρώτη εμπορική διάθεση ενός συστήματος τετραφωνίας που μπορούσε να εγγράψει 4 διακριτά κανάλια επάνω στο δίσκο βινυλίου παρέχοντας μικρότερη παραμόρφωση, καλύτερο διαχωρισμό μεταξύ των καναλιών και μεγαλύτερο δυναμικό εύρος. Το σύστημα αυτό ονομάστηκε CD-4 (Compatible Discrete 4) από τις JVC και RCA εταιρίες. Ειδικές κεφαλές ανάγνωσης και συσκευές αποκωδικοποίησης του σήματος απαιτούνταν για την αναπαραγωγή των CD-4 δίσκων. Οι κεφαλές είχαν επεκταμένη απόκριση συχνοτήτων καθώς μπορούσαν να αναπαραγάγουν υπερήχους. Αυτό ήταν απαραίτητο καθώς τα 4 διακριτά κανάλια κωδικοποιούνταν στο δίσκο με διαδικασία διαμόρφωσης συχνότητας FM («frequency modulation») παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στο ραδιόφωνο. Τα 4 κανάλια είχαν κωδικές ονομασίες: LF (left front ή μπροστά αριστερά), LB (left back ή πίσω αριστερά), RB (right back ή πίσω δεξιά), RF (right front ή μπροστά δεξιά). Τα αυλάκια του δίσκου cd-4 ήταν πλατύτερα για να φιλοξενήσουν την επιπλέον πληροφορία και αυτό μείωνε τη συνολική χρονική διάρκεια μουσικής που μπορούσε να αποθηκεύσει. Οι συχνότητες 20Hz-15kHz περιείχαν τα αθροίσματα LF+LB και RF+RB του δίσκου. Ένα φέρον συχνότητας 30kHz εγγραφόταν σε κάθε τοίχωμα του αυλακιού και διέθετε την διαφορά των καναλιών LF – LB, RF – RB. Σε άλλους δίσκους υπήρχαν και φέροντα στις συχνότητες 18kHz-45kHz. Για την εγγραφή του δίσκου δεν υπήρχαν κεφαλές που να υποστηρίζουν τις συχνότητες άνω των 20kHz και γι' αυτό το λόγο τα φέροντα εγγράφονταν στο δίσκο καθώς αυτός περιστρεφόταν με τη μισή ταχύτητα. Οι συχνότητες των φερόντων επομένως μετατοπίζονταν στο ακουστικό φάσμα κατά την εγγραφή. Η τεχνική εγγραφής σε χαμηλότερες ταχύτητες χρησιμοποιείται και σήμερα ακόμη και για ψηφιακά μέσα εγγραφής όπως τα CD (Compact Disc, «Συμπαγής Δίσκος») καθώς μειώνει τα λάθη και το θόρυβο εγγραφής.

Για την αναπαραγωγή κι εγγραφή των δίσκων βινυλίου τύπου CD-4 χρησιμοποιούνταν και σε αυτή την περίπτωση ένας πίνακας με αλγεβρικές πράξεις αθροισμάτων και διαφορών χωρίς όμως απλές μετατόπισης φάσης όπως συνέβαινε στα matrix 4:2:4 συστήματα. Στο σχήμα 5.6 βλέπουμε τον πίνακα κωδικοποίησης κι αποκωδικοποίησης των cd-4 συστημάτων:

Quadraphonic channel		Sum channel		Difference channel
Left front	=	LF + LB	+	LF - LB
Left back	=	LF + LB	-	LF - LB
Right front	=	RF + RB	+	RF - RB
Right back	=	RF + RB	-	RF - RB

Σχήμα 5.6

### 5.4.4 Βελτιώσεις της απόκρισης συχνότητας

Παρότι είδαμε ότι το εύρος συχνοτήτων των εγγραφών σε δίσκο βινυλίου επεκτείνεται έως και τα 45kHz με τεχνικές διαμόρφωσης συχνότητας στην διακριτή τετραφωνία, δημιουργούνται άλλα ζητήματα λόγω θορύβων.

Στις υψηλές συχνότητες εμφανίζεται θόρυβος λόγω της τριβής που εμφανίζεται μεταξύ του περιστρεφόμενου δίσκου και της βελόνας ανάγνωσης. Επίσης, ατέλειες στην εκτύπωση του δίσκου και σωματίδια σκόνης που μαζεύονται στα αυλάκια δημιουργούν θορύβους υψηλής συχνότητας και κρουστικής μορφής που ακούγονται όπως οι λέξεις «ποπ», «τικ» ή «κλικ» και ονομάστηκαν ανάλογα.

Στις χαμηλές συχνότητες, κάτω των 30Hz, η κεφαλή ανάγνωσης του δίσκου λαμβάνει και θορύβους που παράγονται από τα μηχανικά κινούμενα μέρη του πικάπ όπως τα ρουλεμάν του μοτέρ κίνησης. Επίσης, σε υποηχητικές συχνότητες κάτω των 20Hz εντοπίζονται θόρυβοι που παράγονται από το σύστημα αντι-ολίσθησης του βραχίονα του πικάπ. Το σύστημα αυτό ασκεί μία μικρή δύναμη προς τα κάτω ώστε η βελόνα να διατηρεί τη θέση της εντός του αυλακιού του δίσκου. Όμως η κεφαλή συνδέεται μηχανικά με το σύστημα αυτό. Αυτό το γεγονός δημιουργεί φαινόμενα διαμόρφωσης συχνότητας καθώς οι υπό-ήχοι αναμειγνύονται με υψηλότερες συχνότητες του ηχητικού σήματος έως περίπου τα 100Hz. Επίσης, υποηχητικοί θόρυβοι πολύ χαμηλής συχνότητας είναι εμφανείς καθώς περιέχουν μεγάλα ποσοστά ενέργειας. Ένα παράδειγμα είναι ο θόρυβος από την περιστροφή ενός δίσκου 33,5 ΣΑΛ στα 0,55Hz.

Για τη μείωση των φαινομένων που οφείλονται σε θορύβους χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιούνται τεχνικές φιλτραρίσματος του σήματος της κεφαλής. Ένα φίλτρο αποκοπής των ήχων κάτω από 20Hz είναι μία λύση που χρησιμοποιείται από μερικούς κατασκευαστές ενισχυτών και προενισχυτών.

Στο παρελθόν έχουν παρουσιαστεί περισσότερες από 100 προτάσεις φιλτραρίσματος και ισοστάθμισης συχνοτήτων για τα πικάπ. Τη λύση στο θέμα αυτό έδωσε η RIAA(Recording Industry Association of America).

### 5.4.5 Ισοστάθμιση κατά RIAA

Λόγω της μεγαλύτερης ενέργειας που εμπεριέχουν τόνοι χαμηλότερων συχνοτήτων και της μεγαλύτερης περιόδου αυτών των σημάτων, οι κεφαλές εγγραφής δίσκων έπρεπε να σχηματίζουν πλατύτερα και βαθύτερα αυλάκια. Τα βαθύτερα αυλάκια δημιουργούσαν προβλήματα κατά την αναπαραγωγή του δίσκου καθώς η κεφαλή αναπηδούσε σε αυτά και υπερπηδούσε μήκη των αυλακώσεων, έφθειρε σημαντικά τους δίσκους και αύξανε τα ποσοστά παραμόρφωσης και χαμηλών συχνοτήτων θορύβου. Το μεγάλο πλάτος των αυλακώσεων όμως μείωνε αντίστοιχα το μήκος τους και άρα το χρονικό διάστημα μουσικής που μπορούσε να εγγραφεί στο δίσκο.

Σύμφωνα με μελέτη των Joseph P. Maxwell και Henry C. Harrison της Bell το 1926, παρατηρείται μείωση της έντασης ηχογράφησης και του πλάτους κάθετης κίνησης της κεφαλής εγγραφής σε υψηλότερες συχνότητες. Επομένως, εξ αρχής έγινε φανερό η ανάγκη για μείωση του πλάτους των συχνοτήτων κάτω των 250Hz με υπερατά φίλτρα κατά την εγγραφή του δίσκου. Κατά την αναπαραγωγή, γινόταν η αντίστροφη διαδικασία, επομένως οι χαμηλές συχνότητες ενισχύονταν δίνοντας τελικά μία σχετικά επίπεδη απόκριση συχνότητας που ακουγόταν πιο ρεαλιστική σύμφωνα με το ραδιοφωνικό παραγωγό G. H. Miller. Το αρνητικό είναι πως μαζί με τις χαμηλές συχνότητες του σήματος ενισχύονται και οι θόρυβοι που λαμβάνει η κεφαλή από την κίνηση των ρουλεμάν, ιμάντων και του ηλεκτρικού κινητήρα του συστήματος.

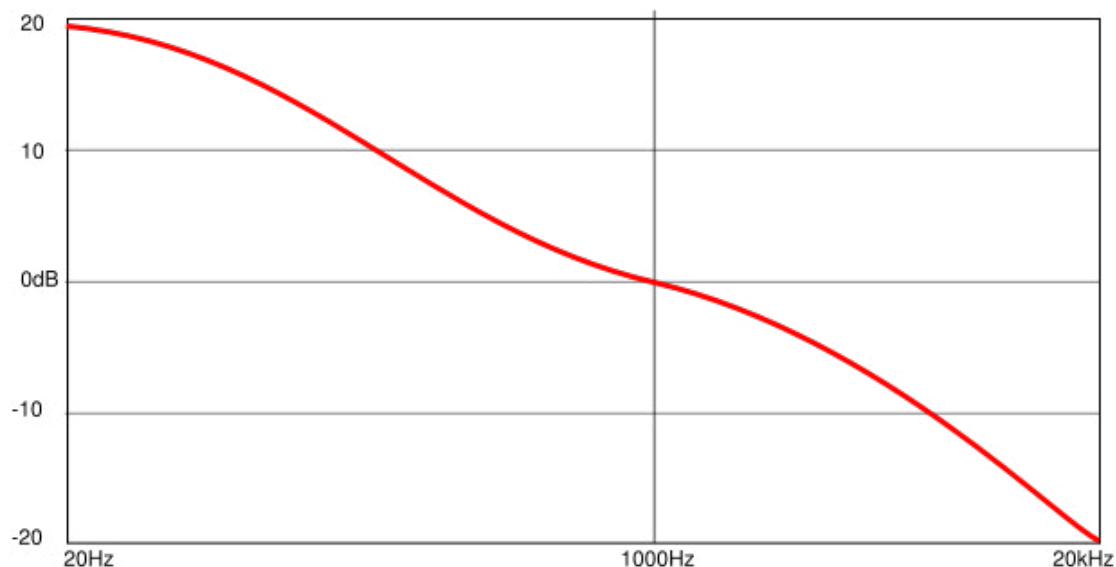
Όμως η αποκοπή ή μείωση πλάτους των χαμηλών συχνοτήτων δεν ήταν η μόνη τεχνική που αναπτύχθηκε. Ήδη από τη δεκαετία του 1930 έγινε φανερό που ενισχύοντας τις υψηλές συχνότητες άνω του 1kHz κατά την εγγραφή του δίσκου έδινε ευρύτερη απόκριση συχνότητας και πιστότερο αποτέλεσμα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται προ-έμφαση των υψηλών συχνοτήτων. Κατά την αναπαραγωγή του δίσκου και για να διατηρηθεί όσο πιο επίπεδη η απόκριση συχνότητας, γίνεται η αντίστροφη διαδικασία που ονομάζεται από-έμφαση. Ένα βαθυπερατό φίλτρο μειώνει κατά μερικά decibel της υψηλές συχνότητες κατά την ανάγνωση του δίσκου. Αυτή η τεχνική βοηθά στη μείωση του εγγενούς υψίσχου θορύβου (hiss) του συστήματος και των θορύβων λόγω σωματιδίων σκόνης που μαζεύονται στα αυλάκια του δίσκου.

Το 1951 υπήρξε μία πρώτη προσπάθεια δημιουργίας ενός προτύπου ισοστάθμισης συχνοτήτων για την αναπαραγωγή δίσκων από την Audio Engineering Society (AES). Αυτή η καμπύλη ισοστάθμισης

ορίζεται από τις συχνότητες μετάβασης των φίλτρων της. Τα φίλτρα είχαν έναν πόλο στα 2,5 kHz (με σταθερά χρόνου περίπου 63,7  $\mu$ s) και ένα μηδενικό στα 400 Hz (με σταθερά χρόνου περίπου 397,9  $\mu$ s).

Η καμπύλη ισοστάθμισης που προτάθηκε από τον Αμερικανικό σύνδεσμο της βιομηχανίας ηχογραφήσεων (Recording Industry Association of America ή RIAA) επρόκειτο να λειτουργήσει ως ένα de facto παγκόσμιο πρότυπο της βιομηχανίας για τις εγγραφές δίσκων από το 1954 και μετά.

Η καμπύλη RIAA δεν είναι ένα απλό φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Καθορίζει μία συνάρτηση μεταφοράς με τρία σημεία μετάβασης που έχουν σταθερές χρόνου: 75  $\mu$ s, 318  $\mu$ s και 3180  $\mu$ s, που αντιστοιχούν σε 2122 Hz, 500 Hz και 50 Hz (στρογγυλοποιημένες τιμές). Η υλοποίηση μίας κατά RIAA συνάρτησης μεταφοράς δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αλλά είναι πιο περίπλοκη από ένα απλό φίλτρο ή ενισχυτή σήματος όπως χρησιμοποιούταν στο παρελθόν. Σχεδόν όλοι οι hi-fi προενισχυτές, ενισχυτές και ραδιοενισχυτές είχαν ένα ενσωματωμένο σύστημα υλοποίησης της καμπύλης RIAA, αλλά συχνά παραλείπεται σε μοντέρνα σχέδια, λόγω της σταδιακής εμπορικής απαξίωσης των δίσκων βινυλίου. Σήμερα, υπάρχουν εξωτερικοί προενισχυτές πικάπ με την καμπύλη RIAA. Αυτοί οι προενισχυτές προσαρμόζουν το σήμα που λαμβάνουν από μια μαγνητική κεφαλή πικάπ σε σήμα επίπεδης απόκρισης συχνότητας και στάθμης -10 dB. Η στάθμη αυτή ονομάζεται επίπεδο γραμμής (line level). Οι προενισχυτές RIAA συνδέονται με τις επιμέρους συσκευές με ομοαξονικά καλώδια ήχου και βύσματα τύπου RCA. Στο σχήμα 5.7 παρατηρούμε την καμπύλη αναπαραγωγής δίσκων κατά RIAA. Η καμπύλη εγγραφής δίσκων είναι το συμπλήρωμα αυτής της καμπύλης.



Σχήμα 5.7 Καμπύλη αναπαραγωγής δίσκων κατά RIAA

Αργότερα αναπτύχθηκαν και άλλες καμπύλες ως επέκταση της RIAA καθώς τα σύγχρονα κυκλώματα στα συστήματα hi-fi επέτρεπαν την ενίσχυση υποήχων και υπερήχων. Αυτό ήταν κάτι που δεν είχε προβλεφθεί από τη RIAA και προσέθετε επιπλέον θόρυβο στα νέα συστήματα που είχαν μεγάλο εύρος απόκρισης συχνότητας. Τα λάθη κατά την εγγραφή του δίσκου και οι θόρυβοι ή τριγμοί του συστήματος περιστροφής του δίσκου ακούγονταν πλέον δυνατότερα και οι κώννοι των ηχείων πάλλονταν έντονα σε συχνότητες κάτω των 20Hz. Οι βελτιωμένες καμπύλες εμπνευσμένες από τη RIAA όπως η βελτιωμένη (enhanced) RIAA και η IEC RIAA απέκοπταν συχνότητες κάτω των 20Hz. Για την αποκοπή υψηλών συχνοτήτων, πολλοί κατασκευαστές hi-fi έθεταν δικά τους όρια βάσει της υλοποίησης του εξοπλισμού τους.

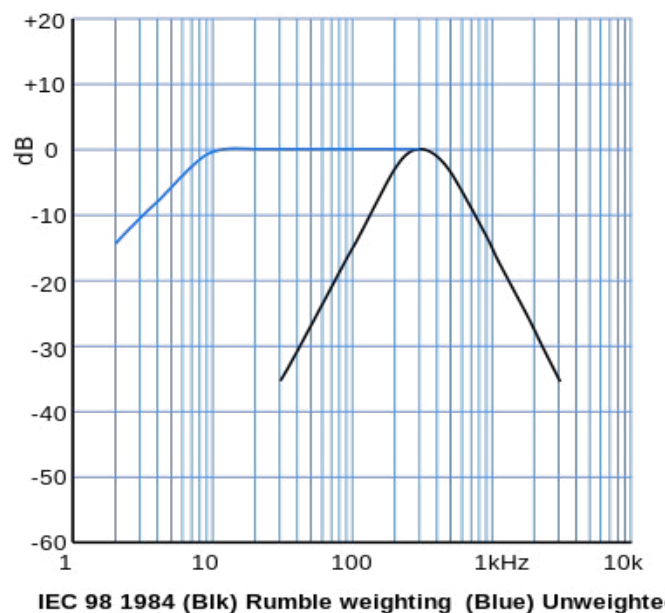


### 5.4.6 Θόρυβος χαμηλών συχνοτήτων

Στα πικάπ, ο θόρυβος που παράγεται από την κίνηση του πλατό του δίσκου και εμφανίζεται στην έξοδο της κεφαλής λέγεται «rumble», «βροντή» ή «βουητό». Ονομάζεται έτσι καθώς είναι ένας συνεχής, χαμηλής συχνότητας, ηχηρός θόρυβος που ακούγεται όπως ο ήχος που παράγεται από βαρέα οχήματα ή τη βροντή μιας αστραπής. Αυτός ο θόρυβος είναι περισσότερο αισθητός σε χαμηλής ποιότητας πικάπ που διαθέτουν ρουλεμάν με μπίλιες. Υψηλότερης ποιότητας πικάπ χρησιμοποιούν έδρανα ολίσθησης αντί για παραδοσιακά ρουλεμάν, ελαχιστοποιώντας τέτοιους θορύβους. Οι θόρυβοι αυτοί δημιουργούνται επίσης από τους μάντες κίνησης, τα καρούλια τεντώματος του μάντα, ατέλειες του πλατό ή ακόμη και ατέλειες και παραμορφώσεις στην κατασκευή και δομή του δίσκου βινυλίου.

Διάφοροι προενισχυτές πικάπ διαθέτουν ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων για τη μείωση του θορύβου «rumble» αλλά δεν είναι πάντοτε επαρκές. Σε συστήματα με μεγάλο εύρος απόκρισης συχνοτήτων, ο θόρυβος αυτός είναι ιδιαίτερα αισθητός. Τέτοιος θόρυβος επεκτείνεται και στις υποηχητικές συχνότητες δημιουργώντας ανεπιθύμητη κίνηση των μεγαφώνων ενός ηχείου. Αυτό δημιουργεί φαινόμενα ενδοδιαμόρφωσης με τις συχνότητες του επιθυμητού σήματος που βρίσκονται εντός του ακουστικού φάσματος. Η παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (IMD) είναι εντονότερη σε συστήματα όπως τα ηχεία. Επίσης, το αυτί μας είναι ευαίσθητο σε τέτοια φαινόμενα όπως έχουμε περιγράψει.

Η μέτρηση φαινομένων rumble γίνεται με διάφορες μεθόδους αλλά οι συνηθέστερες είναι βάσει των προτύπων DIN 45539 (του 1971) και IEC98. Οι δύο καμπύλες μέτρησης του χαμηλής συχνότητας θορύβου του προτύπου IEC98 φαίνονται στο παρακάτω γράφημα (σχήμα 5.7.β). Η μεγαλύτερη εύρους καμπύλη που δεν έχει στάθμιση συχνοτήτων χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό φαινομένων ενδοδιαμόρφωσης λόγω του rumble.



Σχήμα 5.7.β

Για την αντιμετώπιση του θορύβου rumble χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Μία λύση που δρα ως βαθυπερατό φίλτρο απόσβεσης θορύβου είναι η χρήση βαρύτερου πλατό κίνησης του δίσκου. Αυτή η λύση μειώνει τους θορύβους λόγω κίνησης του πλατό αλλά δε μειώνει το θόρυβο λόγω ατελειών στο δίσκο βινυλίου και το συντονισμό του βραχίονα στήριξης της κεφαλής ανάγνωσης. Ο βραχίονας συντονίζεται με την κίνηση και αναπήδηση της κεφαλής στο αυλάκι του δίσκου παράγοντας θόρυβο στην περιοχή συχνοτήτων 10–30 Hz. Μερικοί βραχίονες πικάπ χρησιμοποιούν πιστόνια από-

σβεσης με υγρό για τη εξάλειψη τέτοιων θορύβων.

Συνήθως ο θόρυβος χαμηλής συχνότητας εμφανίζεται ως διαφορικό σήμα μεταξύ των 2 καναλιών μίας στερεοφωνικής κεφαλής ανάγνωσης καθώς αντιστοιχεί σε κάθετη κίνησή της. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται συνήθως ένα υψιπερατό φίλτρο που μετατρέπει το στερεοφωνικό σήμα σε μονοφωνικό σε πολύ χαμηλές συχνότητες χωρίς να μειώνει αισθητά το διαχωρισμό των καναλιών και την απόκριση χαμηλών συχνοτήτων του συστήματος. Το ανθρώπινο αυτί είναι άλλωστε λιγότερο ευαίσθητο στην κατευθυντικότητα των ήχων χαμηλής συχνότητας. Ένα τέτοιο κύκλωμα φιλτραρίσματος προτάθηκε αρχικά από τον Jeff Macaulay το 1978. Έως τότε, τα περισσότερα υψιπερατά φίλτρα μείωσης θορύβου απλά μείωναν σημαντικά το πλάτος των χαμηλών συχνοτήτων, γεγονός που είναι επιζήμιο για την ποιότητα του ήχου και την επίπεδη απόκριση συχνότητας.

## 5.5 Μαγνητικά μέσα εγγραφής και αναπαραγωγής του ήχου

Σχεδόν παράλληλα με την ανάπτυξη των δίσκων βινυλίου και πικάπ άρχισε η εμφάνιση των μαγνητικών μέσων εγγραφής και αναπαραγωγής ήχου. Μαγνητικές ταινίες κάθε είδους χρησιμοποιούνταν αρχικά για επαγγελματικές ηχογραφήσεις και κατόπιν εισήλθαν στο χώρο του οικιακού hi-fi. Οι μαγνητικές ταινίες τυλίγονταν σε κυλινδρικές μπομπίνες με τη βοήθεια ηλεκτρικού κινητήρα και παράλληλα εγγράφονταν ή αναπαράγονταν από ειδικές ηλεκτρομαγνητικές κεφαλές. Το ηλεκτρικό αναλογικό σήμα χαμηλής ισχύος από και προς την κεφαλή, περνούσε από κυκλώματα προενίσχυσης, ενίσχυσης και φιλτραρίσματος. Θα δούμε σε αυτό το σημείο τα κυριότερα μαγνητικά μέσα που χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται στο χώρο των στούντιο ηχογραφήσεων και hi-fi καθώς και τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την πιστότητα του ήχου τους.

### 5.5.1 Μαγνητικές ταινίες σε μπομπίνες

Η μαγνητική ταινία είναι συνήθως κατασκευασμένη από πλαστικό αλλά στο παρελθόν υπήρξαν και χάρτινες ή μεταλλικές ταινίες. Η ταινία είναι συνήθως καλυμμένη με λεπτό μαγνητιζόμενο οξειδίο του σιδήρου. Χρησιμοποιείται για εγγραφή και αναπαραγωγή εικόνας και ήχου αλλά και για αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων όπως γίνονταν με τις DAT (Digital Audio Tape) ταινίες. Οι μαγνητικές ταινίες έφεραν την επανάσταση στις βιομηχανίες ραδιοφωνικής μετάδοσης. Την εποχή που διεξάγονταν ζωντανά όλες οι ραδιοφωνικές και οι τηλεοπτικές εκπομπές, πρώτος ο Bing Cosby χρησιμοποίησε εγγραφή του προγράμματός του σε ταινίες. Τα μαγνητόφωνα της εποχής επέτρεπαν την προεγγραφή μιας εκπομπής.

Οι μαγνητικές ταινίες είναι ευρέως διαδεδομένες με την μορφή καρουλίων, των «μπομπίνων», επειδή παρέχουν ικανοποιητικές δυνατότητες και αποτελούν ένα από τα οικονομικότερα μέσα αποθήκευσης. Το μειονέκτημα των μαγνητικών ταινιών είναι ότι για την ανάκτηση ενός συγκεκριμένου στοιχείου ή αρχείου θα πρέπει να προηγηθεί διαδοχική σειριακή αναζήτηση κατά μήκος της ταινίας που απαιτεί αρκετό χρόνο προσπέλασης.

Η μορφή ταινιών που τυλίγονταν από μπομπίνα σε μπομπίνα (reel to reel tape) χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα μαγνητόφωνα, συμπεριλαμβανομένων των πρωτοποριακών μηχανημάτων της γερμανο-βρετανικής Blattnerphone από τα τέλη του 1920 που χρησιμοποιούσαν ταινία χάλυβα. Τη δεκαετία του 1930 εμφανίστηκαν και οι γερμανικές μηχανές «Magnetophon» (Μαγνητόφωνα). Αρχικά, αυτή η μορφή συσκευών και κασετών δεν είχε όνομα, δεδομένου ότι διάφορες μορφές μαγνητικών κασετών και μαγνητοφώνων χρησιμοποιούνταν. Το όνομα «από μπομπίνα σε μπομπίνα (reel to reel tape)» προέκυψε μόνο από την ανάγκη να διακρίνουν αυτό τον τύπο ταινίας από τα διάφορα είδη ταινίας και τις κασέτες που υπήρχαν τότε. Ένα παράδειγμα είναι η κασέτα ατέρμονου βρόχου που αναπτύ-

χθηκε για διαφημίσεις σε ραδιοφωνικό σταθμό και ανακοινώσεις το 1954. Μετεξέλιξη της reel-to-reel ταινίας ήταν η συμπαγής κασέτα (Compact Cassette) που αναπτύχθηκε από τη Philips το 1962, αρχικά για συσκευές υπαγόρευσης και κατόπιν για χρήση σε οικιακά συστήματα hi-fi που εκμεταλλεύτηκε η μουσική βιομηχανία.

Τα πρώτα μηχανήματα reel to reel παρήγαγαν αρκετή παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εγγραφής. Η παραμόρφωση μειώθηκε σημαντικά από Γερμανούς μηχανικούς με την εφαρμογή μιας υψηλής συχνότητας ρεύματος πόλωσης στην κεφαλή εγγραφής μαζί με το επιθυμητό ηχητικό σήμα. Αργότερα, ο Αμερικανός μηχανικός ήχου Jack Mullin μαζί με τον ηθοποιό και τραγουδιστή Bing Crosby επένδυσαν σε μια τοπική εταιρεία ηλεκτρονικών ειδών, την «Amprex», για να μπορέσει να αναπτύξει ένα εμπορικό μοντέλο μαγνητοφώνου για μαζική παραγωγή. Το πρώτο Amprex σύστημα εφευρέθηκε από τον Ross Snyder. Τα μαγνητόφωνα και οι συσκευές πολυκάναλης εγγραφής ήχου που ανέπτυξε η Amprex, έγιναν γρήγορα το πρότυπο για επαγγελματικές και ραδιοφωνικές παραγωγές ήχου. Χρησιμοποιούνταν ευρέως έως τα τέλη της δεκαετίας του 1980 οπότε και έδωσαν σταδιακά τη σκυτάλη στα ψηφιακά μέσα.

Η επιτυχία του συστήματος βασίστηκε στο γεγονός ότι η ταινία μπορούσε να υποστηρίξει χρόνο εγγραφής αρκετά περισσότερο από τα 30 λεπτά των δίσκων βινυλίου της εποχής και μπορούσε να γίνει επεξεργασία ή μοντάζ της ταινίας εύκολα. Για να αποκοπεί ή να απομονωθεί ένα κομμάτι της εγγραφής, χρησιμοποιούταν η τεχνική της «σύνδεσης» (splice). Ονομάστηκε έτσι καθώς οι τεχνικοί ήχου έκοβαν το μέρος της ταινίας που ήθελαν με ξυράφι και το συνέδεαν επάνω σε άλλα κομμάτια της ταινίας με ειδικές κόλλες ή κολλητικές ταινίες. Η ύπαρξη βέβαια ενώσεων και κόλλας επάνω στην ταινία δημιουργούσε θορύβους μερικών millisecond κατά την ανάγνωσή της.

### 5.5.2 Πως επηρεάζει το φυσικό πλάτος της ταινίας την απόδοσή της

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των ταινιών reel to reel ήταν πως μπορούσε να βελτιωθεί η απόδοσή τους ως προς την πιστότητα της ηχογράφησης, την απόκριση συχνότητας, το σηματοθορυβικό λόγο και την παραμόρφωση σε υψηλές συχνότητες. Η απόδοση της ταινίας βελτιωνόταν με την αύξηση της ταχύτητας εγγραφής και του φυσικού πλάτους της ταινίας. Αυτό το γεγονός βέβαια μείωνε τη χρονική διάρκεια μουσικής που μπορούσε να εγγραφεί επάνω σε ένα δεδομένο μήκος ταινίας. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της ταινίας που διατίθεται για την εγγραφή ενός καναλιού, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαθέσιμη επιφάνεια μαγνητικού υλικού πάνω στην οποία μπορεί να εγγραφεί ένα σήμα. Έτσι, μπορούμε να εγγράψουμε σήματα μεγαλύτερης στάθμης επάνω στην αυξημένη επιφάνεια της ταινίας χωρίς να φτάσουμε σε κορεσμό του μαγνητικού υλικού. Ο κορεσμός οφείλεται στη μέγιστη μαγνήτιση που μπορεί να λάβει και να αποθηκεύσει η δεδομένη επιφάνεια σιδηρομαγνητικού υλικού της ταινίας. Επομένως, με την αύξηση του φυσικού πλάτους της ταινίας, αυξάνεται η δυναμική περιοχή και κατ' επέκταση μειώνεται η συνολική παραμόρφωση που εμφανίζει η ταινία για αυτό το κανάλι εγγραφής. Επίσης, η αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) εξαρτάται επίσης άμεσα από το πλάτος της ταινίας. Αυτό συμβαίνει λόγω της Γκαουσιανής (Gaussian) φύσης του θορύβου της ταινίας. Για παράδειγμα, διπλασιάζοντας το πλάτος της ταινίας, διπλασιάζεται το πλάτος σήματος που μπορούμε να εγγράψουμε σε αυτή. Ο τύπου Gauss θόρυβος όμως παραμένει σταθερός για σταθερή ταχύτητα εγγραφής. Επομένως, με αυτό τον τρόπο διπλασιάζουμε την σηματοθορυβική αναλογία SNR.

Το μεγάλο πλάτος της ταινίας έδωσε τη δυνατότητα να γίνονται ταυτόχρονα πολυκαναλικές εγγραφές ήχου επάνω σε μία ταινία από ειδικές κεφαλές. Κάθε κανάλι ήταν ανεξάρτητο και μπορούσε να εγγραφεί ή να αναπαραχθεί μόνο του. Η διευκόλυνση των πολυκαναλικών ηχογραφήσεων χάρη στην ταινία reel-to-reel έδωσε νέα εργαλεία σε παραγωγούς μουσικής και αναπτύχθηκαν εύκολα διάφορα ηχητικά εφέ όπως αυτό της καθυστέρησης (delay) και της ηχούς (echo). Αρχικά, οι ταινίες υποστήριζαν έως 4 κανάλια αλλά στη συνέχεια αναπτύχθηκαν συστήματα με έως και 36 κανάλια. Τα συστήματα αυτά ήταν πολύ ογκώδη, βαριά και ακριβά ενώ η ταινία που χρησιμοποιούσαν έφτανε σε πλάτος έως και τις 2 ίντσες (5,08 cm).

Πολλοί παραγωγοί μουσικής προτιμούν ακόμη και σήμερα τον αναλογικό ήχο της κασέτας καθώς προσθέτει στο σήμα αρμονική παραμόρφωση που είναι ευχάριστη στο άκουσμα. Επίσης, η απόκριση

συχνότητας των μαγνητοφώνων και ιδιαίτερα αυτών που χρησιμοποιούν φίλτρα κατά του θορύβου όπως Dolby και DBX, δίνει μία έμφαση στις μεσαίες συχνότητες, αποκόπτοντας πολύ υψηλές και χαμηλές συχνότητες. Αυτό το χαρακτηριστικό αρέσει ακουστικά σε αρκετούς παραγωγούς και αναφέρεται συχνά ως «ζεστός ήχος» της ταινίας. Στο σχήμα 5.8 απεικονίζεται μια συσκευή εγγραφής ταινιών από μπομπίνα σε μπομπίνα, η SONY TC-630. Ήταν μία από τις συσκευές που χρησιμοποιούνταν τυπικά για υψηλής πιστότητας και ποιοτικού ήχου (audiophile) παραγωγές.



Σχήμα 5.8

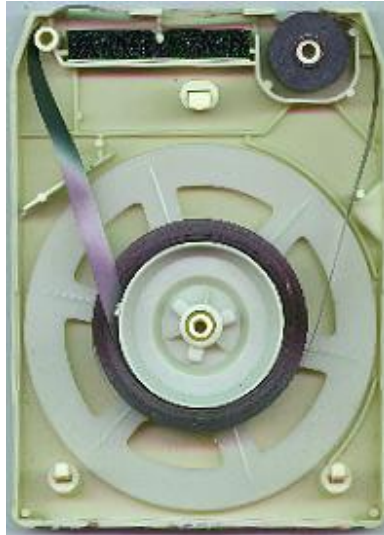
### 5.5.3 Η κασέτα 8-track

Η κασέτα «Stereo 8», που ήταν επίσης γνωστή ως κασέτα οκτώ κομματιών (eight-track cartridge) ήταν μία μαγνητική ταινία τυλιγμένη σε ειδικού τύπου μπομπίνα που περιέχεται σε μία πλαστική θήκη. Η κασέτα Stereo 8 δημιουργήθηκε το 1964 από τον Bill Lear της εταιρίας κατασκευής αεροπλάνων Lear Jet Corporation. Συνεργάστηκε με τις εταιρίες Ampex, Ford Motor Company, General Motors, Motorola και την RCA Victor Records (RCA). Χάρη στη συνεργασία όλων αυτών των εταιριών, η κασέτα 8-κομματιών γνώρισε μεγάλη αποδοχή κυρίως στην Αμερικανική αγορά έως τα τέλη της δεκαετίας του 1970.

Η κασέτα αυτή είχε 8 διακριτά κανάλια ή «tracks» καθώς στόχος ήταν να εγγραφούν σε αυτή τα 8 κομμάτια που συνήθως περιείχε ένας δίσκος βινυλίου 33,5 ΣΑΛ στις δυο πλευρές του. Η εγγραφή από βινύλιο σε κασέτα δεν ήταν βέβαια πάντοτε μία ένα-προς-ένα διαδικασία καθώς οι διάρκειες των μουσικών κομματιών δεν συνέπιπταν κατ' ανάγκη με τη διάρκεια των «tracks». Υπήρχε μία κεφαλή ανάγνωσης που κινούταν αρχικά κατ' εντολή και μεταγενέστερα αυτόματα εντοπίζοντας τα 8 κομμάτια της κασέτας. Στα αρνητικά της κασέτας αυτής συγκαταλέγεται το γεγονός ότι υπέφερε συχνά από φαινόμενα τριγμών και μεταβολών στην ταχύτητα αναπαραγωγής λόγω της κατασκευής της με ένα καρούλι. Επίσης, κολλούσε αν μάζευε σκόνη και κατάλοιπα, η ταινία δεν ευθυγραμμιζόταν πάντοτε με την κεφαλή ανάγνωσης και η αλλαγή των κομματιών δεν γινόταν πάντοτε στη σωστή χρονική στιγμή.

Η παράλληλη ανάπτυξη της μικρότερης σε μέγεθος και πρακτικότερης συμπαγούς κασέτας μείωσε αρκετά τις πωλήσεις της κασέτας 8-κομματιών. Εντούτοις, αρχικά η συμπαγής κασέτα υστερούσε σε πιστότητα ήχου σε σχέση με την 8-track λόγω του μικρότερου πλάτους της ταινίας και της μειωμένης ταχύτητας αναπαραγωγής της. Η συμπαγής κασέτα κινείται με τη μισή ταχύτητα σε σχέση με την 8-track.

Σχήμα 5.9 απεικονίζεται το εσωτερικό μίας κασέτας 8-track, η ταινία της και το καρούλι τυλίγματος:



Σχήμα 5.9

#### 5.5.4 Η συμπαγής κασέτα

Η συμπαγής κασέτα (Compact Cassette ή Musicassette) είναι ένα μαγνητικό μέσο αποθήκευσης και περικλείεται από μια πλαστική θήκη μικρών διαστάσεων: πλάτους 101,7mm επί ύψους 64,11mm και πάχους 12,29mm. Μέσα στην θήκη τοποθετείται μαγνητική ταινία που τυλίγεται σε 2 μικρά πλαστικά καρούλια. Στην ταινία εγγράφονται κυρίως ηχητικές πληροφορίες και μεταγενέστερα ψηφιακά αρχεία υπολογιστών. Η κασέτα είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί με τύλιγμα/ξετύλιγμα της μαγνητικής ταινίας σε μικρές ενσωματωμένες μπομπίνες και να τοποθετείται σε ειδική ηλεκτρονική συσκευή, με κεφαλή ανάγνωσης, που καλείται κασετόφωνο. Παρότι ο όρος κασέτα μπορεί να αναφέρεται σε διάφορες μορφές μαγνητικών μέσων αποθήκευσης που περικλείονται σε σκληρό περίβλημα, στα Ελληνικά με τον όρο αυτό συνήθως εννοούμε το μέσο που ακολουθεί τις προδιαγραφές (διαστάσεις περιβλήματος, πάχος ταινίας) του προτύπου Compact Cassette (συμπαγής κασέτα).

Η εγγραφή ηχητικών σημάτων σε μαγνητικές ταινίες για τις ηχογραφήσεις πρωτοτύπων μουσικών έργων ξεκινά από το 1945 και μετά. Στα μέσα της δεκαετίας του 1960 η Philips παρουσίασε πρώτη την μικρή γνωστή πλέον κασέτα «Compact Cassette» ως μέσο επαγγελματικής υπαγόρευσης, μαζί με το αντίστοιχο κασετόφωνο εγγραφής/αναπαραγωγής.

Για την οικιακή χρήση, η συμπαγής κασέτα που ήταν μικρότερη, ελαφρύτερη και οικονομικότερη κέρδισε γρήγορα τους καταναλωτές και αντικατέστησε τις μπομπίνες reel to reel. Εντούτοις, λόγω της χαμηλότερης ταχύτητας εγγραφής (4.76 cm/s & 9.53 cm/s +/- 0.3%) και του μικρότερου πλάτους της συμπαγούς ταινίας (περίπου 3.81 mm), η εγγραφή της παρουσίαζε περισσότερη παραμόρφωση και αλλοίωση του ήχου.

Κατά τη δεκαετία του 1980, η Compact Cassette κατέκλυσε την αγορά καθώς χρησιμοποιούταν σχεδόν σε κάθε σπίτι και αυτοκίνητο, ξεπερνώντας κατά πολύ τις προβλέψεις των κατασκευαστών της. Τα πλεονεκτήματά της ήταν το μικρό και συμπαγές μέγεθος, η εύκολη ηχογράφηση/αναπαραγωγή και η εύκολη αντιγραφή, από καταγεγραμμένο σε άλλα μέσα, ηχητικό σήμα. Σημαντική ώθηση στη δημοφιλή της παρουσία έδωσε το 1979 και η εμφάνιση ενός φορητού μέσου αναπαραγωγής κασετών σε ακουστικά από τη Sony με τίτλο «Walkman».

Η κασέτα ήταν ένα μεγάλο βήμα προς τα εμπρός ως προς την ευκολία εγγραφής ήχου. Ήταν πολύ πιο εύχρηστη από την ταινία reel to reel, αν και, λόγω των περιορισμών του μέγεθος και της ταχύτητάς της, η κασέτα είχε αρχικά υποδεέστερη ποιότητα ήχου. Σε αντίθεση με τις στερεοφωνικές κασέτες reel to reel μορφής ανοικτού κυλίνδρου, τα δύο στερεοφωνικά κομμάτια σε κάθε πλευρά της συμπαγούς κασέτας, βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο. Αυτό επέτρεψε σε μονοφωνικά κασετόφωνα να παίζουν στερεοφωνικές ηχογραφήσεις και στερεοφωνικά κασετόφωνα να παίζουν μονοφωνικές ηχογραφήσεις χωρίς ασυμβατότητες.

Η ταινία της συμπαγούς κασέτας έχει πλάτος 3,81 χιλιοστά (0,150 inches), με κάθε στερεοφωνικό κανάλι να είναι πλάτους 0,6 χιλιοστών. Υπάρχει συνήθως μια άγραφη περιοχή της ταινίας ανάμεσα στα μουσικά κομμάτια για να τα διαχωρίζει. Μερικά κασετόφωνα μπορούσαν να τρέξουν την κασέτα σε υψηλή ταχύτητα και να εντοπίσουν πού ξεκινούσε το επόμενο κομμάτι χάρη σε αυτές τις άγραφες ζώνες. Έτσι, ο χρήστης μπορούσε για πρώτη φορά να παραλείψει κάποια μουσικά κομμάτια κατά την ακρόαση, κάτι που σήμερα θεωρούμε δεδομένο. Το τύλιγμα της ταινίας γίνεται με ταχύτητα 4,76 εκατοστά / s (1 $\frac{7}{8}$  ιντσών / s) από αριστερά προς τα δεξιά.

Για λόγους σύγκρισης, αναφέρουμε πως το τυπικό πλάτος της ταινίας των μπομπίνων reel to reel ήταν 6,35 χιλιοστά (¼ ιντσες) με κάθε στερεοφωνικό κανάλι να καταλαμβάνει ονομαστικά πλάτος περίπου 1,0 χιλιοστού (1/25 ιντσας). Η ταχύτητα περιστροφής της μπομπίνας ήταν τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα της συμπαγούς κασέτας. Όπως έχουμε αναφέρει, μεγαλύτερο πλάτος και μεγαλύτερη ταχύτητα τυλίγματος της ταινίας συνεπάγεται πιστότερη ηχογράφιση σε γενικές γραμμές.

Κατά καιρούς, κυκλοφόρησαν διάφοροι τύποι κασετών με διαφορές τόσο ως προς τη χημική σύνθεσή τους όσο και ως προς τη διάρκειά τους. Ως προς τη σύνθεση της μαγνητικής ταινίας συναντάμε τους τύπους μετάλλου, διοξειδίου του χρωμίου(CrO<sub>2</sub>) και οξειδίου του σιδήρου(FeO).

Ας προς τη διάρκεια, οι κασέτες διακρίνονταν κυρίως με κωδικό που αναφέρεται στη μέγιστη συνολική διάρκεια εγγραφής/αναπαραγωγής. Ο κωδικός περιέχει έναν αριθμό που μεταφράζεται σε λεπτά της ώρας όπως προκύπτει από το άθροισμα των χρόνων και των 2 πλευρών της. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι κασέτες δεν εγγράφονταν στο σύνολο του μήκους τους με ήχο αλλά έμενε και ένα κενό διάστημα στο τέλος κάθε πλευράς καθώς τα μουσικά κομμάτια των ηχογραφήσεων είχαν μεταβλητή διάρκεια.

Κωδικός της συμπαγούς κασέτας:	Συνολική διάρκεια εγγραφής/αναπαραγωγής σε λεπτά της ώρας (άθροισμα και των 2 πλευρών):
C15	15
C20	20
C30	30
C60	60
C120	120
C180	180

Πίνακας 5.2

### 5.5.5 Μικροκασσέτες(Microcassettes)

Η μικροκασέτα είναι ένα μέσο αποθήκευσης ήχου που εισήγαγε η εταιρία Olympus το 1969 κυρίως για χρήση σε δημοσιογραφικά καταγραφικά. Χρησιμοποιεί την ίδια αρχή λειτουργίας και το ίδιο πλάτος μαγνητικής ταινίας όπως η συμπαγής κασέτα (Compact Cassette), αλλά σε πολύ μικρότερο πλαστικό περίβλημα. Με τη χρήση λεπτότερης ταινίας και την ταχύτητα εγγραφής της ταινίας μειω-

μηνή στο μισό ή στο ένα τέταρτο, οι microcassettes μπορούν να προσφέρουν συγκρίσιμους χρόνους εγγραφής με τη συμπαγή κασέτα. Το αρχικό πρότυπο για τις μικροκασέτες, το MC60, δίνει 30 λεπτά εγγραφής ανά πλευρά σε κανονική ταχύτητα εγγραφής 2,4 cm / s. Ο χρήστης μπορεί να διπλασιάσει τη διάρκεια της κασέτας επιβραδύνοντας την ταχύτητα στα 1,2 cm / s με κάποια έκπτωση όμως στην ποιότητα εγγραφής. Αργότερα παρουσιάστηκε η μικροκασέτα τύπου MC90, δίνοντας 45 λεπτά ανά πλευρά. Από το 1982, παράγονταν μικροκασέτες για στερεοφωνικές εγγραφές και εμφανίστηκαν μοντέλα μικροκασετών τύπου μετάλλου ή «IV»(τύπου 4). Οι μικροκασέτες τύπου 4 χρησιμοποιούσαν ταινίες επικαλυμμένες με καθαρά μεταλλικά σωματίδια αντί για οξείδιο ώστε να πετύχουν βελτίωση της ποιότητας της εγγραφής. Στο σχήμα 5.10 παρατηρούμε πόσο μικρότερο ήταν το μέγεθος της μικροκασέτας σε σύγκριση με της συμπαγούς κασέτας που απεικονίζεται πίσω της:



Σχήμα 5.10

### 5.5.6 Οι ταχύτητες τυλίγματος των κασετών

Η ταχύτητα με την οποία τυλίγεται μία κασέτα έχει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα της ηχογράφησης. Ο περιορισμός της ταχύτητας εγγραφής μοιάζει με τον περιορισμό που θέτει ο ρυθμός δειγματοληψίας στην ψηφιοποίηση αναλογικού σήματος ή το πλήθος των καρέ στην αναπαραγωγή βίντεο.

Η επιρροή της ηχητικής πιστότητας της ηχογράφησης από την ταχύτητα έγινε αντιληπτή εξ αρχής πειραματικά αλλά υπάρχει απλή φυσική εξήγηση. Η μεγαλύτερη ταχύτητα εγγραφής της ταινίας εξαπλώνει το δεδομένης χρονικής διάρκειας ηχογραφούμενο ηχητικό σήμα σε μεγαλύτερο μήκος της ταινίας. Η μαγνητική ταινία έχει μία σχετικά σταθερή πυκνότητα μαγνητικών διπόλων στην επιφάνειά της τα οποία διατάσσονται από την κεφαλή εγγραφής ώστε να αναπαριστούν υπό μορφή μαγνήτισης το ηχητικό σήμα. Υπό υψηλότερη ταχύτητα εγγραφής, περισσότερα μαγνητικά δίπολα χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του ηχητικού σήματος. Κατά αυτό τον τρόπο έχουμε υψηλότερη ανάλυση του σήματος και άρα πιστότερη αναπαράστασή του.

Αντίθετα, η μικρότερη ταχύτητα εγγραφής της κασέτας αυξάνει τη χρονική διάρκεια των ατελειών που εμφανίζει η ταινία με αποτέλεσμα να εμφανίζονται περισσότεροι θόρυβοι, ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες (hiss). Ο εγγενής θόρυβος τύπου Gauss της ταινίας μετατοπίζεται φασματικά σε χαμηλότερες συχνότητες λόγω της μικρότερης ταχύτητας μειώνοντας το σηματοθορυβικό λόγο SNR του ακουστικού φάσματος. Επίσης, η μη-γραμμικότητα του συστήματος μαγνητικής εγγραφής λόγω φαινομένων υστέρησης γίνεται εντονότερη σε χαμηλές ταχύτητες κι αυξάνεται η συνολική παραμόρφωση του σήματος.

Σε αυτό το σημείο ας δούμε τις τυπικές ταχύτητες διέλευσης μαγνητικών ταινιών από την κεφαλή

εγγραφής ή ανάγνωσης που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τον τύπο της κασέτας και χρήσης της (βλ. Πίνακα 5.3). Η μέτρηση της ταχύτητας δίνεται συνήθως σε μονάδες εκατοστών ανά δευτερόλεπτο ή ιντσών ανά δευτερόλεπτο (inches per second, IPS).

IPS	cm / s	Τυπική χρήση
120	304,8	Χρησιμοποιείται από κάποιες αναλογικές συσκευές εγγραφής και αναπαραγωγής ή αντιγραφής ταινιών.
60	152,4	Χρησιμοποιείται από μερικά αναλογικές συσκευές εγγραφής, καθώς και συσκευές επαγγελματικής αντιγραφής προηχογραφημένων ταινιών (loop bin duplicator)
45	114,3	Χρησιμοποιείται από την 3M για την πρώτη ψηφιακή συσκευή εγγραφής ήχου το 1978.
39,4	100	Χρησιμοποιείται από τα πρώτα AEG Magnetophon μοντέλα το 1935.
30	76,2	Το υψηλότερο πρότυπο ταχύτητας για επαγγελματική χρήση.
22.5	57.15	Χρησιμοποιήθηκε για ταινίες του ηχητικού κομματιού που περιείχονταν στο 70 χιλιοστών φιλμ κινηματογραφικών ταινιών. Η ταχύτητα επιβάλλεται από την ταχύτητα 112,5 ft / min του φιλμ που απαιτείται για να λάβουμε κινούμενη εικόνα με 24 καρέ / δευτερόλεπτο κατά την προβολή του φιλμ.
15	38.10	Η πιο κοινή ταχύτητα για reel to reel ταινίες σε studio, συμπεριλαμβανομένων και των πολυκάναλων καταγραφών.
7 1/2	19,05	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η χαμηλότερη ταχύτητα που χρησιμοποιείται σε ορισμένες επαγγελματικές συσκευές εγγραφής σε στούντιο, συμπεριλαμβανομένων των πολυκάναλων συσκευών εγγραφής.</li> <li>• Η υψηλότερη ταχύτητα για οικιακή χρήση.</li> <li>• Χρησιμοποιείται σε παλαιότερες οικιακές συσκευές μονής ταχύτητας.</li> <li>• Η πιο συνηθισμένη ταχύτητα για προηχογραφημένες ταινίες από μπομπίνα σε μπομπίνα.</li> </ul>
3 3/4	9.53	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χρησιμοποιείται σε μονής ταχύτητας οικιακές συσκευές.</li> <li>• Η δεύτερη πιο συνηθισμένη ταχύτητα για προηχογραφημένες ταινίες από μπομπίνα σε μπομπίνα</li> <li>• Η ταχύτητα που προδιαγράφεται για την κασέτα 8-track και Elcaset .</li> <li>• Χρησιμοποιείται από κάποια καταναλωτικά μηχανήματα πολυκάναλης εγγραφής που χρησιμοποιούν συμπαγείς κασέτες .</li> <li>• Χρησιμοποιήθηκε αργότερα ως «υψηλή ταχύτητα» σε ορισμένες διπλής ταχύτητας επαγγελματικές συσκευές εγγραφής συμπαγούς κασέτας όπως η Tascam 122</li> </ul>
1 7/8	4,76	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η τυπική ταχύτητα συμπαγών κασετών.</li> <li>• Η ελάχιστη ταχύτητα ταινιών από μπομπίνα σε μπομπίνα</li> <li>• Χρησιμοποιείται για reel-to-reel ταινίες εγγραφής μηνυμάτων.</li> </ul>
15/16	2,38	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η τυπική ταχύτητα για microcassettes</li> <li>• Επίσης χρησιμοποιείται για κάποιες ηχογραφήσεις όπως τα «ομιλούντα βιβλία» σε συμπαγή κασέτα για άτομα με προβλήματα όρασης, που εκδίδονται από τη Βιβλιοθήκη του Κογκρέσου.</li> </ul>
15/32	1.19	Η εναλλακτική ταχύτητα εγγραφής για microcassettes .

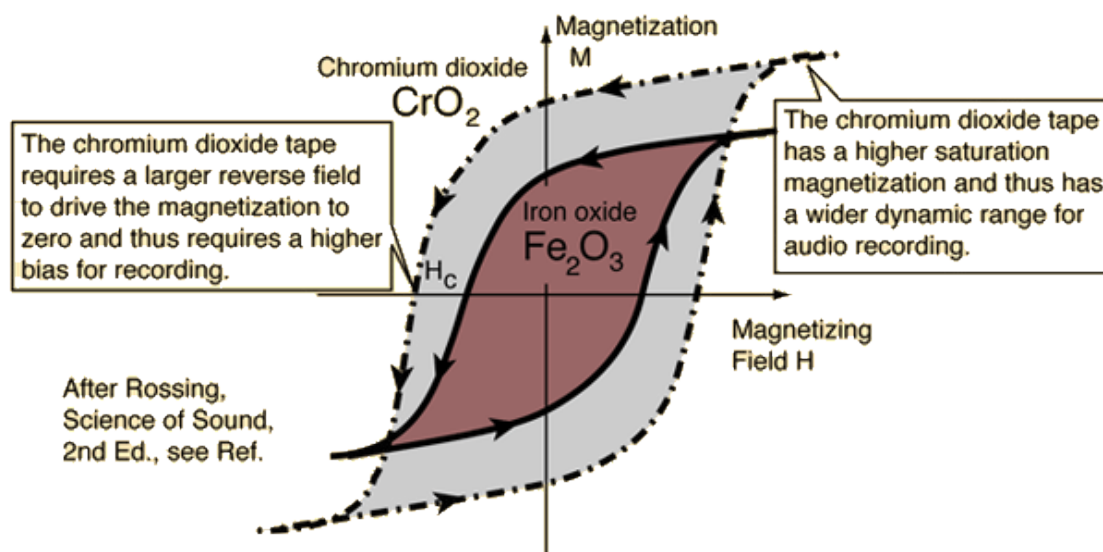


### 5.5.7 Το σήμα πόλωσης (bias) των μαγνητικών μέσων

Ένα σήμα μουσικής από μόνο του δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί ένα πιστό αντίγραφο μίας ηχογράφησης σε ταινία, διότι η μαγνήτιση της ταινίας εξαρτάται ιδιαίτερα από την προηγούμενη μαγνητική «ιστορία» της. Η μαγνήτιση της ταινίας εξαρτάται ακόμη και από το σήμα που μόλις έχει καταγραφεί επάνω της.

Κάθε ταινία από αυτές που αναλύσαμε έχει σιδηρομαγνητικές ιδιότητες και μάλιστα οι κεφαλές εγγραφής καλούνται κάθε φορά να αναδιατάξουν τα μαγνητικά δίπολα της ταινίας σε μια καθορισμένη διεύθυνση. Τα δίπολα στις άγραφες ταινίες έχουν τυχαία διεύθυνση και διάταξη. Η αναδιάταξη των μαγνητικών διπόλων δε μπορεί να γίνει πιστά με την επιβολή ενός σήματος ημιτόνου στις ακουστικές συχνότητες καθώς η μεταβολή της μαγνήτισης του υλικού παρουσιάζει μαγνητική υστέρηση. Λόγω της μαγνητικής υστέρησης, η ταινία αποθηκεύει ένα μέρος της μαγνήτισης λόγω του πεδίου που επιβάλλεται από την κεφαλή. Αυτός είναι άλλωστε και ο στόχος καθώς οι ταινίες προορίζονται για μαγνητική αποθήκευση πληροφορίας. Λόγω της υστέρησης όμως, το σήμα που θέλουμε να γράψουμε επάνω στην ταινία δε συναντά μηδενική μαγνήτιση. Επομένως πρέπει η κεφαλή να επιβάλλει εξωτερικά ένα σήμα που θα αντιτίθεται στην προηγούμενη μαγνήτιση της ταινίας και θα την μηδενίζει. Ένα τέτοιο εναλλασσόμενο σήμα πόλωσης (bias) υψηλής συχνότητας συνήθως εγγράφεται στην ταινία μέσα από την κεφαλή εγγραφής μαζί με το μουσικό σήμα, για την εξάλειψη των επιπτώσεων αυτού του μαγνητικού ιστορικού. Αυτό το σήμα πόλωσης έχει συχνότητα τυπικά από 40kHz έως 150 kHz. Ο ρόλος του είναι να επιτελεί 'ανάδευση' της μαγνήτισης της ταινίας, έτσι ώστε κάθε ηχητικό σήμα που καταγράφεται να συναντήσει τις ίδιες μαγνητικές αρχικές συνθήκες.

Κάθε μαγνητική ταινία παρουσιάζει ένα βρόχο υστέρησης. Στο σχήμα 5.11 παρατηρούμε την καμπύλη μαγνήτισης «M-H» διαφόρων ταινιών. Η μέγιστη τιμή της μαγνήτισης του βρόχου υστέρησης τους ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού. Οι μαγνητικές προσμίξεις των ταινιών που γίνονται με διοξείδιο του χρωμίου απαιτούν μεγαλύτερη πόλωση του σήματος καθώς σχηματίζουν μεγαλύτερο βρόχο υστέρησης. Για το λόγο αυτό, οι ταινίες  $\text{CrO}_2$  έχουν υψηλότερη μαγνήτιση κορεσμού. Υψηλότερη μαγνήτιση κορεσμού συνεπάγεται πως μπορεί να εγγραφεί σήμα μεγαλύτερου πλάτους στην ταινία χωρίς να παραμορφωθεί άρα οι ταινίες αυτές έχουν ευρύτερη δυναμική περιοχή. Τα σύγχρονα κασετόφωνα εγγραφής έχουν διαφορετικές ρυθμίσεις πόλωσης για εγγραφή σε ταινίες με οξείδιο του σιδήρου, με διοξείδιο του χρωμίου και μέταλλο.

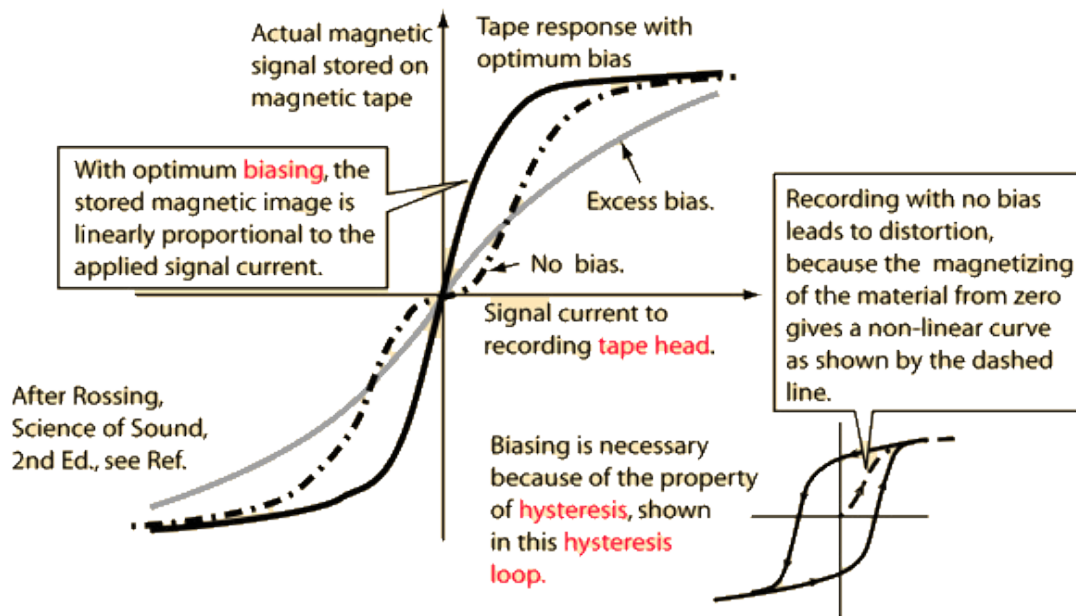


Σχήμα 5.11

Με τη βέλτιστη πόλωση, η μαγνήτιση της ταινίας γίνεται ανάλογη με το ρεύμα του ηχητικού σήματος που εφαρμόζεται στην κεφαλή εγγραφής. Για να πετύχουμε τη βέλτιστη πόλωση του σήματος προς εγγραφή πρέπει να ρυθμίσουμε κατάλληλα την ένταση του σήματος πόλωσης ανάλογα τον τύπο της ταινίας που χρησιμοποιούμε.

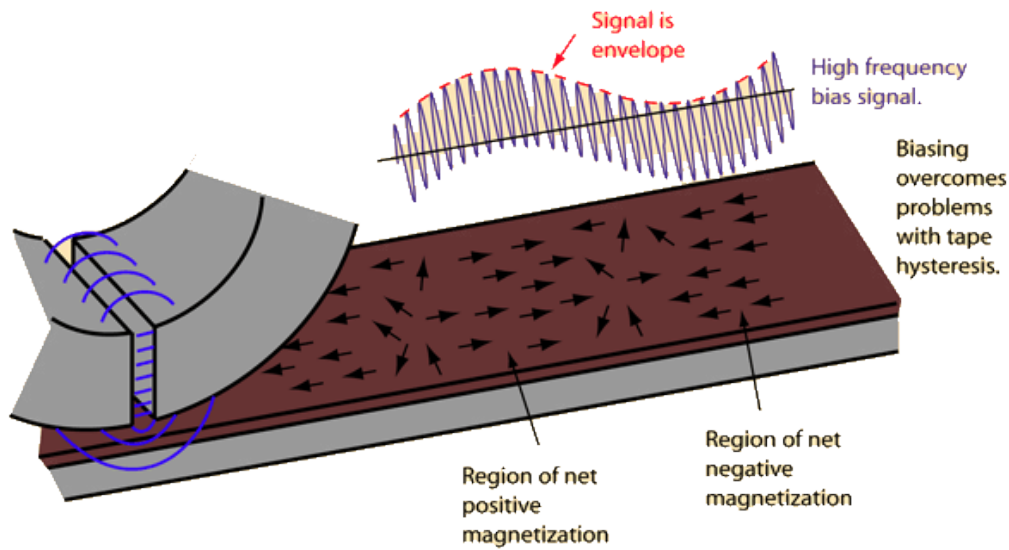
Αν το σήμα πόλωσης έχει πολύ μικρό πλάτος, τότε η σχέση μεταξύ του ηχητικού σήματος που παρέχουμε στην κεφαλή εγγραφής και του πραγματικού σήματος μαγνήτισης που αποθηκεύεται στην ταινία δεν θα είναι γραμμική εξ αιτίας των φαινομένων υστέρησης. Η μη γραμμική συμπεριφορά του συστήματος αυξάνει την παραμόρφωση, μειώνει τη διαθέσιμη δυναμική περιοχή και το εύρος της απόκρισης συχνότητας.

Αν όμως το σήμα πόλωσης έχει πολύ υψηλό πλάτος, τότε θα έχουμε και πάλι μία μη γραμμική απόκριση του συστήματος λόγω φαινομένων μαγνητικού κορεσμού της ταινίας. Ο κορεσμός συνεπάγεται ψαλιδισμό των κορυφών του σήματος προς εγγραφή και άρα αυξημένη παραμόρφωση. Στο σχήμα 5.12 παρατηρούμε τη σχέση μεταξύ του σήματος που αποθηκεύεται μαγνητικά στην ταινία και του ηχητικού σήματος που θέλουμε να εγγράψουμε στην ταινία. Η σχέση αυτή γίνεται προσεγγιστικά γραμμική για σήματα με απόλυτη τιμή πλάτους μικρότερη από του σήματος που οδηγεί την ταινία σε κορεσμό και για κατάλληλου πλάτους σήμα πόλωσης.



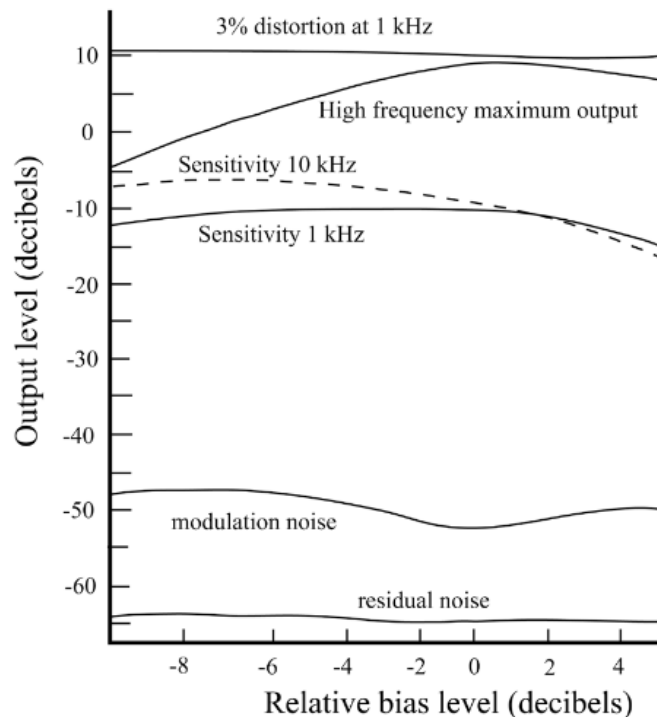
Σχήμα 5.12

Το ηχητικό σήμα προς εγγραφή στην ταινία αποτελεί την περιβάλλουσα του υψίσυχνου σήματος πόλωσης σταθερού πλάτους. Στο σχήμα 5.13 παρατηρούμε ένα σήμα απλού τόνου ως περιβάλλουσα ενός υψίσυχνου τριγωνικού σήματος πόλωσης. Στην ίδια εικόνα απεικονίζεται η διατομή της ταινίας εγγραφής και πως διατάσσονται τα μαγνητικά δίπολα καθώς η ταινία διέρχεται από την ηλεκτρομαγνητική κεφαλή εγγραφής.



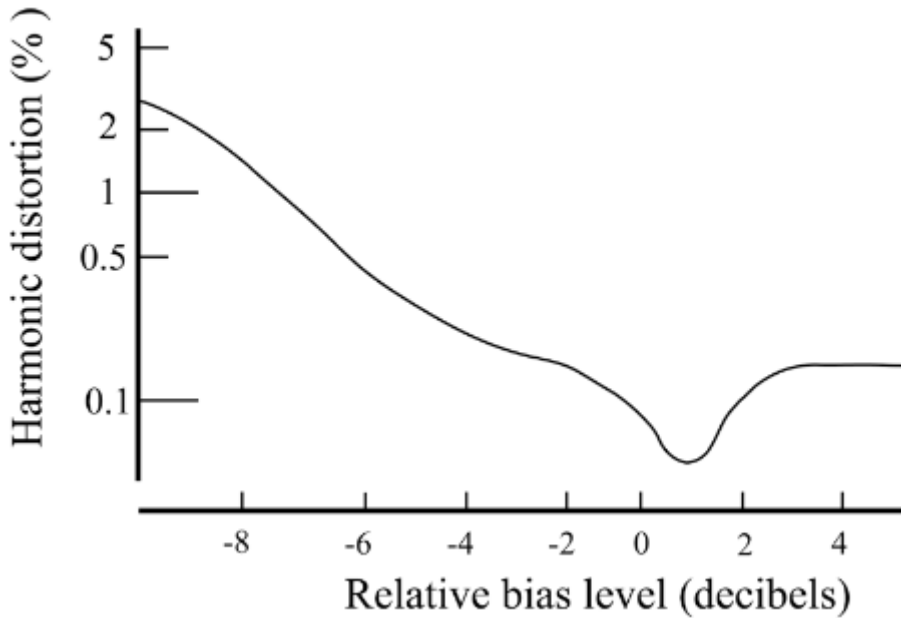
Σχήμα 5.13

Στο σχήμα 5.14 απεικονίζεται για ένα Ampex μπτομπινόφωνο, η σχέση που έχει η στάθμη του σήματος πόλωσης (bias) σε decibel με την παραμόρφωση, την ευαισθησία του συστήματος σε διάφορες συχνότητες, το θόρυβο και την απόκριση συχνότητας, ιδιαίτερα για τις υψηλές συχνότητες του ακουστικού φάσματος. Παρατηρούμε πως η προσεκτική επιλογή του επιπέδου του σήματος πόλωσης από το μηχανικό που σχεδιάζει και ρυθμίζει μία συσκευή εμπεριέχει καλούς συμβιβασμούς. Για παράδειγμα, παρατηρούμε ότι στα 0dB σήματος πόλωσης έχουμε μικρότερη στάθμη θορύβου λόγω προϊόντων διαμόρφωσης των συχνοτήτων του ηχητικού σήματος και του σήματος πόλωσης. Εντούτοις, στη στάθμη αυτή έχουμε πτώση της ευαισθησίας του συστήματος κι άρα της απόκρισης σε συχνότητες περί τα 10kHz.



Σχήμα 5.14

Στο σχήμα 5.15 έχουμε για την ίδια συσκευή, τη σχέση μεταξύ της στάθμης σε dB του σήματος πόλωσης με την συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) του σήματος που λαμβάνουμε στην έξοδο. Αυτή η καμπύλη συγκρίνεται από το μηχανικό με τις καμπύλες 5.14 ώστε να γίνει ένας επιπλέον καλός συμβιβασμός ή μία επιλογή ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται η εν λόγω συσκευή.



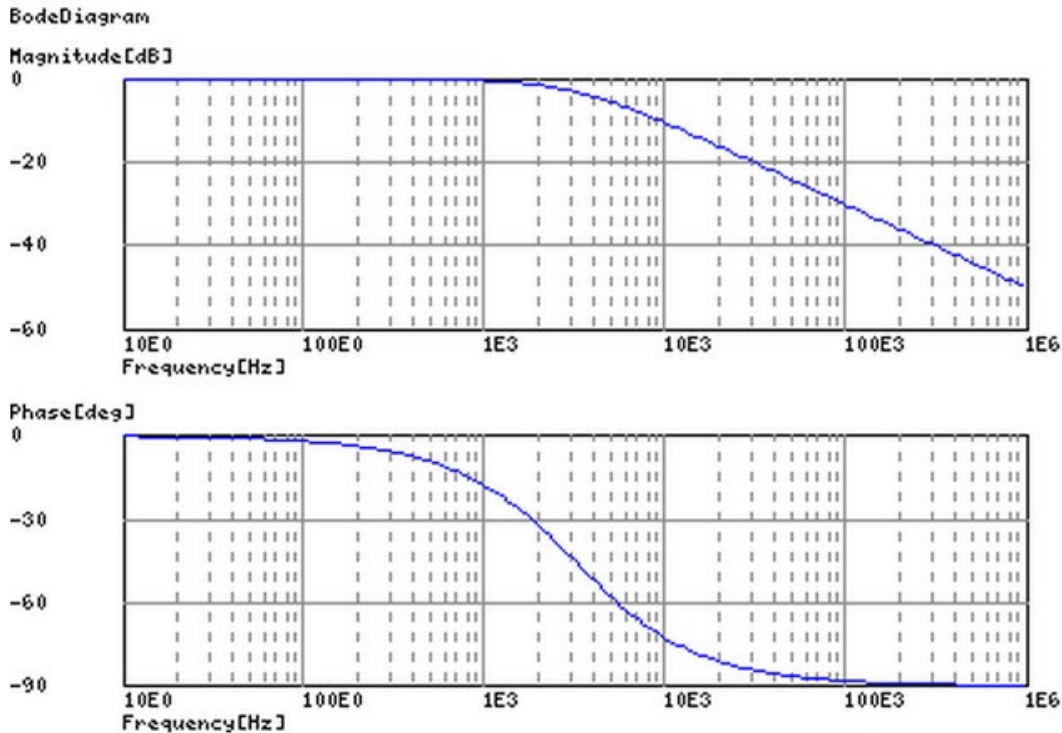
Σχήμα 5.15

Ενδεικτικά αναφέρουμε σε αυτό το σημείο ότι ένα από τα κορυφαία συστήματα αναπαραγωγής ταινιών, το Amprex ATR-100, είχε σχεδιαστεί κατά τρόπο που παρουσίαζε 3% αρμονική παραμόρφωση που θεωρείται μη-αποδεκτή για σύγχρονα ψηφιακά συστήματα. Όμως είχε επίπεδη απόκριση συχνότητας (+/- 2 dB) στο εύρος 35Hz-28kHz και σηματοθορυβικό λόγο (SNR) 72dB σε ταχύτητα τυλίγματος ταινίας 30 ίντσες ανά δευτερόλεπτο (30 ips). Παρότι η αρμονική παραμόρφωση της τάξης του 3% φαίνεται μεγάλο νούμερο, δεν είναι τόσο εύκολα αντιληπτή αν δε συνοδεύεται από υψηλή παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (IMD) και η ακρόασή της μπορεί να είναι έως και ευχάριστη για το αυτί. Περισσότερη αρμονική παραμόρφωση της τάξης του 10% THD για παράδειγμα παρουσιάζουν πολλά καλά σετ ηχείων του εμπορίου, ιδιαίτερα σε υψηλές στάθμες.

### 5.5.8 Ισοστάθμιση συχνοτήτων κατά την αναπαραγωγή μαγνητικών ταινιών

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, αν το σήμα πόλωσης έχει κατάλληλο πλάτος, η εγγραφή της ταινίας γίνεται με γραμμικό τρόπο. Δεδομένου ότι η αναπαραγωγή της ταινίας γίνεται ιδανικά υπό σταθερή ταχύτητα, η επιφάνεια της ταινίας που διέρχεται από την κεφαλή ανάγνωσης ανά δευτερόλεπτο είναι μία σταθερή ποσότητα. Καθώς η μαγνητισμένη ταινία διέρχεται από την κεφαλή ανάγνωσης, επάγει μαγνητική ροή στο πηνίο της κεφαλής και εμφανίζεται μία τάση V στους ακροδέκτες του. Η τάση V δίνεται από το νόμο του Faraday:  $V = -N \cdot \Delta\Phi/\Delta t$ , όπου N είναι ο αριθμός ελιγμάτων του πηνίου, και  $\Delta\Phi/\Delta t$  είναι ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής που επάγει η ταινία στο πηνίο. Ισχύει όμως πως η ποσότητα  $\Delta\Phi/\Delta t$  είναι ανάλογη της συχνότητας f της πηγής που σε αυτή την περίπτωση είναι το ηχητικό σήμα που είναι αποτυπωμένο στην ταινία ως σήμα μαγνήτισης. Επομένως, για ένα ηχητικό σήμα σταθερού πλάτους, αύξηση της συχνότητας f συνεπάγεται και αύξηση της τάσης εξόδου του πηνίου της κεφαλής. Η τάση του σήματος εξόδου αυξάνεται επί δύο για κάθε αύξηση στη συχνότητα f κατά μία οκτάβα (διπλασιασμός της συχνότητας). Για αυτό το σκοπό, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα κύκλωμα εξισορρόπησης ώστε να έχουμε επίπεδη απόκριση συχνοτήτων. Η αύξηση

κατά ένα παράγοντα επί 2 στην τάση συνεπάγεται αύξηση κατά 6 ντεσιμπέλ της ισχύος. Επομένως, το κύκλωμα ισοστάθμισης, πρέπει να αυξάνει την εξασθένισή του κατά 6 dB ανά οκτάβα. Αυτή είναι η απόκριση ενός βαθυπερατού φίλτρου με καμπύλη bode κλίσης 6db/octave και γραμμική φασική απόκριση. Η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου εξαρτάται από την ταχύτητα ανάγνωσης της ταινίας. Για παράδειγμα, η συχνότητα αποκοπής είναι 3150 Hz για μία ταινία reel-to-reel που κινείται με ταχύτητα 15 in/s. Η απόκριση αυτού του φίλτρου απεικονίζεται στο σχήμα 5.14

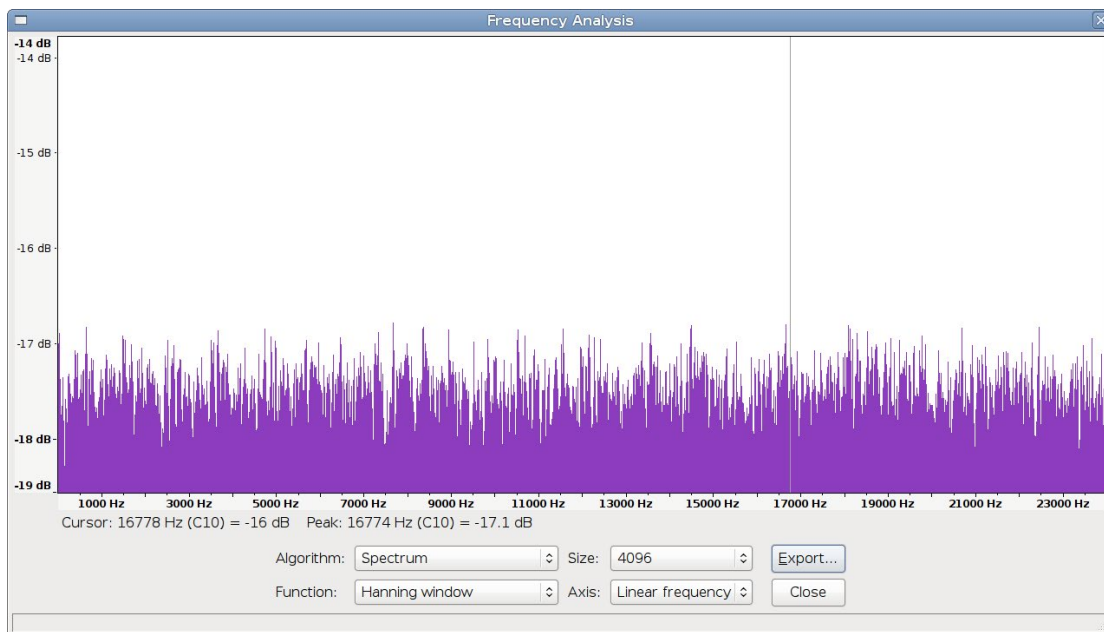


Σχήμα 5.14

Ένα ακόμη φίλτρο χρησιμοποιείται συχνά κατά την αναπαραγωγή μιας ταινίας για να απομακρύνει το υψίσυχο σήμα πόλωσης που βρίσκεται σε περιοχή συχνοτήτων 40kHz έως 150kHz, πολύ πάνω από το ακουστικό φάσμα. Το φίλτρο αυτό είναι βαθυπερατό και ονομάζεται «παγίδα πόλωσης» ή bias trap. Φυσικά, το σήμα πόλωσης εξασθενεί σημαντικά και από το βαθυπερατό φίλτρο ισοστάθμισης κλίσης 6dB/octave που είδαμε.

### 5.5.9 Συστήματα μείωσης θορύβου

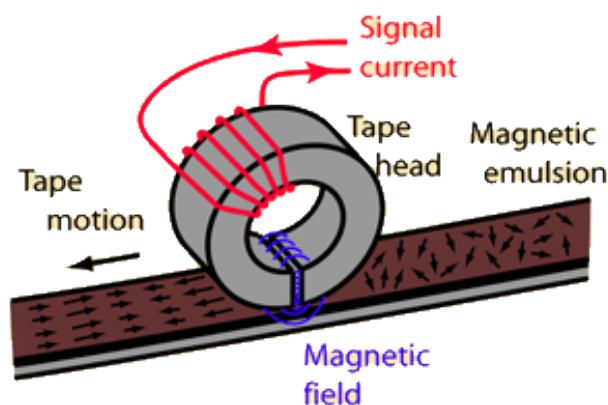
Μόλις το σήμα καταγράφεται από την κεφαλή στην ταινία, η τυχαία διακύμανση της μαγνήτισης των κόκκων οξειδίου δίνει ένα τυχαίο θόρυβο σήματος σε εύρος μερικών kilohertz και ονομάζεται «σφύριγμα ταινίας» ή «tape hiss» στα Αγγλικά. Μοιάζει αρκετά με το λευκό θόρυβο τύπου Gauss το φάσμα του οποίου παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα (σχήμα 5.15):



Σχήμα 5.15

Στη μη-μαγνητισμένη ταινία, οι κόκκοι του οξειδίου της ταινίας είναι σχεδόν εντελώς τυχαία διατεταγμένοι, αλλά εξακολουθούν να έχουν αρκετή μαγνήτιση που μπορεί να ακουστεί σαν τον ήχο που παράγει το καυτό λάδι κατά το τηγάνισμα ή σαν κάποιος να τσαλακώνει χαρτί. Ο τυχαίος αυτός θόρυβος ακούγεται αν αναπαραχθεί μία κενή ταινία υπό υψηλό κέρδος και ένταση.

Το τυχαίο σήμα θορύβου που παράγεται από την υπολειπόμενη μαγνήτιση των κόκκων οξειδίου περιορίζει την πιστότητα της μαγνητικής εγγραφής της ταινίας. Λόγω του μικρού μεγέθους τους και τη στενή απόσταση μεταξύ των κόκκων, ο θόρυβος είναι υψηλής συχνότητας και περιγραφικά ονομάζεται «σφύριγμα ταινίας». Ευτυχώς, τα συστήματα μείωσης του θορύβου, όπως τα Dolby και DBX μπορούν να διακρίνουν αυτό το θόρυβο της ταινίας και να εξασφαλίσουν υψηλή πιστότητα εγγραφής για τις μαγνητοταινίες. Στο σχήμα 5.16 απεικονίζεται η τυχαία διάταξη των κόκκων του οξειδίου πριν την εγγραφή της ταινίας. Μία τυχαιότητα στη διάταξη των κόκκων παραμένει και μετά την εγγραφή της ταινίας προσθέτοντας θόρυβο.



Σχήμα 5.16

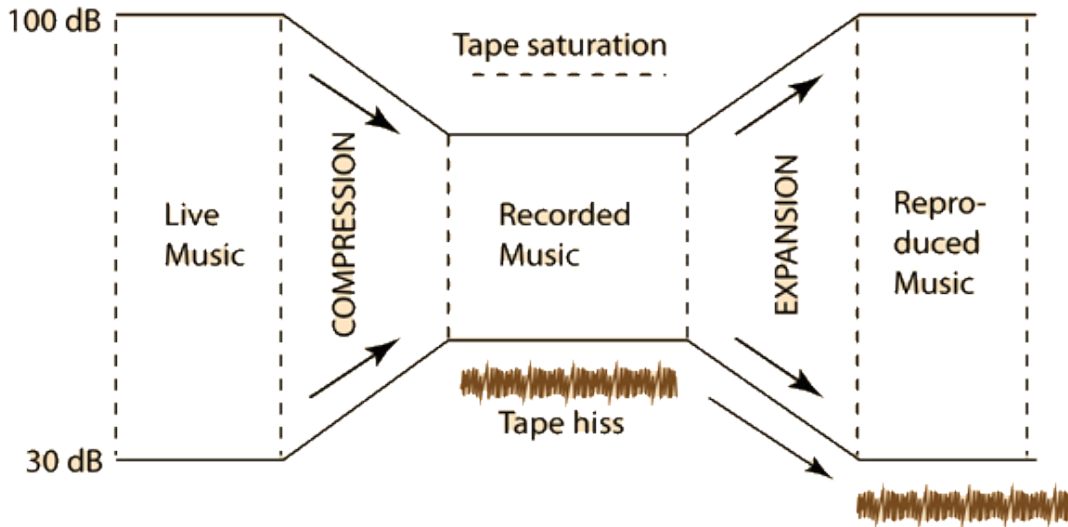
Η πιστότητα μιας εγγραφής ταινίας περιορίζεται από τον υψηλής συχνότητας τυχαίο θόρυβο που προκύπτει από το γεγονός ότι οι τυχαίες μαγνητίσεις των σωματιδίων οξειδίου της ταινίας δεν αλληλοεξουδετερώνονται, ακόμη και εν απουσία ενός εγγεγραμμένου σήματος. Συστήματα περιορισμού του θορύβου, όπως τα Dolby και το dbx έχουν βοηθήσει να ξεπεραστεί αυτό το φαινόμενο με της εξής τεχνική. Κατά την εγγραφή, δίνεται επιπλέον ενίσχυση ή όπως λέμε «προ-έμφαση» των σημάτων υψηλής συχνότητας και των μουσικών σημάτων χαμηλής έντασης. Κατά την αναπαραγωγή, γίνεται μία μείωση της ενίσχυσης ή από-έμφαση αυτών των σημάτων μαζί με τον υψηλής συχνότητας θόρυβο. Επομένως, σαν αποτέλεσμα έχουμε μία επίπεδη και ισορροπημένη απόκριση συχνότητας και αυξημένο σηματοθορυβικό λόγο SNR κατά αρκετά decibel.

Τα συστήματα περιορισμού του θορύβου στηρίζονται στην βασική ιδέα της ισοστάθμισης συχνοτήτων ή και την συμπίεση της δυναμικής περιοχής. Όλες οι εκδόσεις τέτοιων συστημάτων εξαρτώνται από κάποια κωδικοποίηση του σήματος πριν από την εγγραφή και την αποκωδικοποίησή του κατά την αναπαραγωγή. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι της μείωσης του θορύβου, το καθένα με μια σειρά παραλλαγών. Για το λόγο αυτό, μερικές φορές η κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση δεν γινόταν σωστά ή με χρήση του ίδιου συστήματος και για τις δυο διαδικασίες.

### 5.5.10 Το σύστημα DBX

Στο dbx σύστημα, η δυναμική περιοχή του σήματος συμπιέζεται όταν καταγράφεται στην ταινία, και στη συνέχεια επεκτείνεται κατά την ίδια αναλογία στην αναπαραγωγή. Αυτή η τεχνική μειώνει το θόρυβο κατά 20 έως 30 dB και επίσης αποτρέπει την παραμόρφωση λόγω μαγνητικού κορεσμού της ταινίας. Για παράδειγμα, η ζωντανή μουσική που καταγράφεται μπορεί να έχει ένα δυναμικό εύρος περί τα 70 dB, αλλά μόνο τα 40 dB της δυναμικής περιοχής καταγράφονται εν τέλει στην ταινία. Αν έχουν προσεκτικά επιλεγεί τα ηλεκτρονικά συστήματα εγγραφής ώστε να συμπιέσουν το σήμα σε δυναμική περιοχή κάτω των 40 dB πριν την εγγραφή και να το επεκτείνουν πίσω στα 70 dB κατά την αναπαραγωγή, μπορεί όχι μόνο να διατηρηθεί το μεγαλύτερο ποσοστό του δυναμικού εύρους της αρχικής μουσικής, αλλά και να υπάρξει μείωση του θορύβου της ταινίας. Με την τεχνική dbx, χαμηλής έντασης ηχητικά σήματα γίνονται μεγαλύτερου πλάτους από το πλάτος του θορύβου της ταινίας κατά την εγγραφή. Οι εντάσεις αυτών των ήχων γίνονται μικρότερες και πάλι κατά την αναπαραγωγή μειώνοντας παράλληλα και το θόρυβο που εκτείνεται στην ίδια περιοχή συχνοτήτων. Επίσης, η συμπίεση κατά dbx του σήματος κατά την εγγραφή επιτρέπει την αποφυγή παραμόρφωσης λόγω του μαγνητικού κορεσμού της ταινίας.

Το σύστημα DBX έχει όμως δύο βασικές παρενέργειες. Μερικές φορές μπορεί να παραχθεί θόρυβος που ακούγεται σαν τη λειτουργία κάποιας αντλίας και ονομάζεται «θόρυβος άντλησης». Ο θόρυβος άντλησης παρουσιαζόταν κυρίως σε ηχητικό υλικό που περιέχει χαμηλές συχνότητες ή γρήγορες μεταβατικές όπως κοντραμπάσο, τύμπανα ή οποιοδήποτε όργανο κρουστό. Το δεύτερο πρόβλημα της τεχνικής dbx ήταν πως η αποκωδικοποίηση δεν είναι ακριβής εάν υπάρχει απώλεια σήματος υψηλής συχνότητας κατά τη διάρκεια της εγγραφής, γεγονός που συνέβαινε αρκετά συχνά σε κασέτες. Η τεχνική DBX II διόρθωσε εν μέρει το πρόβλημα αποκωδικοποίησης λαμβάνοντας σήματα κωδικοποίησης κυρίως από συχνότητες στο μέσο του ακουστικού φάσματος. Όμως το ηχητικό υλικό που έχει κατά κύριο λόγο υψηλές ή χαμηλές συχνότητες μπορεί να παραμορφωθεί γιατί διαβάζεται ως μηδενικό σήμα κατά την κωδικοποίηση και ενισχύεται χωρίς λόγο. Αυτά τα φαινόμενα επηρεάζουν κατά κανόνα την επίπεδη απόκριση συχνότητας. Τέλος, αν μία ταινία έχει εγγραφεί με κωδικοποίηση κατά dbx, δε μπορεί να αναπαραχθεί ικανοποιητικά χωρίς dbx αποκωδικοποίηση. Στο σχήμα 5.17 παρατηρούμε την τεχνική συμπίεσης κι αποσυμπίεσης δυναμικής περιοχής του συστήματος μείωσης θορύβου DBX.



Σχήμα 5.17

### 5.5.11 Τα συστήματα Dolby

Το Dolby σύστημα μείωσης του θορύβου, ή Dolby NR (noise reduction), είναι μια σειρά από συστήματα που αναπτύχθηκαν από την εταιρεία Dolby Laboratories για χρήση σε αναλογική μαγνητική εγγραφή ταινίας. Το πρώτο σύστημα ήταν το Dolby A, ένα επαγγελματικής χρήσης ευρυζωνικό σύστημα μείωσης θορύβου για χρήση σε στούντιο ηχογράφησης που παρουσιάστηκε το 1966. Αλλά το πιο γνωστό είναι το Dolby B που παρουσιάστηκε το 1968 για την καταναλωτική αγορά και βοήθησε να επιτευχθεί υψηλής πιστότητας εγγραφή σε κασέτες. Η Dolby B τεχνική είναι κοινά χρησιμοποιούμενη σε κασετόφωνα αναπαραγωγής και εγγραφής μέχρι και σήμερα. Από τα συστήματα μείωσης του θορύβου, τα Dolby A και Dolby SR είχαν αναπτυχθεί για επαγγελματική χρήση. Τα Dolby B, C, και S έχουν σχεδιαστεί για την καταναλωτική αγορά. Εκτός από το Dolby HX, όλα τα Dolby συστήματα ενσωματώνουν τεχνικές από/συμπίεσης ή «compranding» (compressing/expanding) στα Αγγλικά ώστε να συμπιεστεί το δυναμικό εύρος του ηχητικού σήματος κατά την εγγραφή και να γίνει επέκταση του δυναμικού εύρους κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής. Όμως, εν αντιθέσει με το Dbx, τα Dolby συστήματα συνήθως εφαρμόζουν αυτή την τεχνική «compranding» σε ορισμένες ζώνες συχνοτήτων ακόμη και στο Dolby A που καλύπτει όλο το φάσμα.

Ο τύπος Dolby A καλύπτει όλο το φάσμα του ήχου χωρίζοντάς το σε τέσσερις συνολικά ζώνες με τέσσερα φίλτρα κλίσης 12 dB ανά οκτάβα. Αυτή είναι η παλαιότερη τεχνική Dolby για χρήση σε επαγγελματικό επίπεδο. Τα τέσσερα φίλτρα των ζωνών με τις συχνότητες αποκοπής (σημεία 3 dB) διαμορφώνονται ως εξής: 1) Βαθυπερατό (low-pass) στα 80 Hz, 2) ζωνοπερατό από 80 Hz έως 3 kHz, 3) ένα υψιπερατό (high-pass) από τα 3 kHz και 4) ένα ακόμη υψιπερατό (high-pass) στα 9 kHz. Η συνεισφορά από τις δύο ζώνες διέλευσης των υψιπερατών φίλτρων επιτρέπει μεγαλύτερη μείωση του θορύβου στις υψηλότερες συχνότητες. Το κύκλωμα comprander έχει κατώφλι λειτουργίας στη στάθμη των -40 dB, με αναλογία 2: 1 (ίδια αναλογία συμπίεσης με το Dbx) για συμπίεση / επέκταση του σήματος κατά 10 dB. Το Dolby A, δεν δημιουργεί το «θόρυβο άντλησης» του συστήματος dbx, αλλά δεν δίνει πολύ μεγάλη μείωση θορύβου σε παύσεις της μουσικής παρά μόνο 10dB και φτάνει σε μείωση έως τα 15 dB σε συχνότητες περί τα 15 kHz.

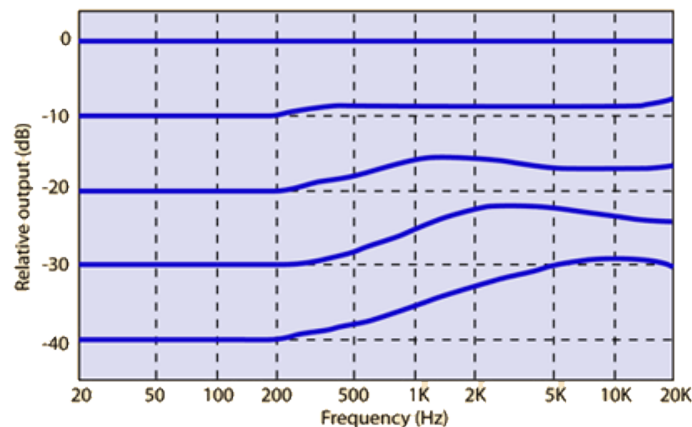
Όπως και στο σύστημα «B» που θα δούμε, η σωστή αντιστοίχιση των διεργασιών συμπίεσης και επέκτασης της δυναμικής περιοχής είναι σημαντική. Η βαθμονόμηση της επέκτασης (αποκωδικοποίησης του Dolby) για τη μαγνητική ταινία χρησιμοποιεί το επίπεδο μαγνητικής ροής των 185 nWb / m, το οποίο είναι το επίπεδο που χρησιμοποιείται και στις ταινίες βαθμονόμησης της βιομηχανίας, όπως αυτές τις Ampex. Αυτό το επίπεδο έχει οριστεί στα 0 VU για την αναπαραγωγή σε μαγνητόφωνο .



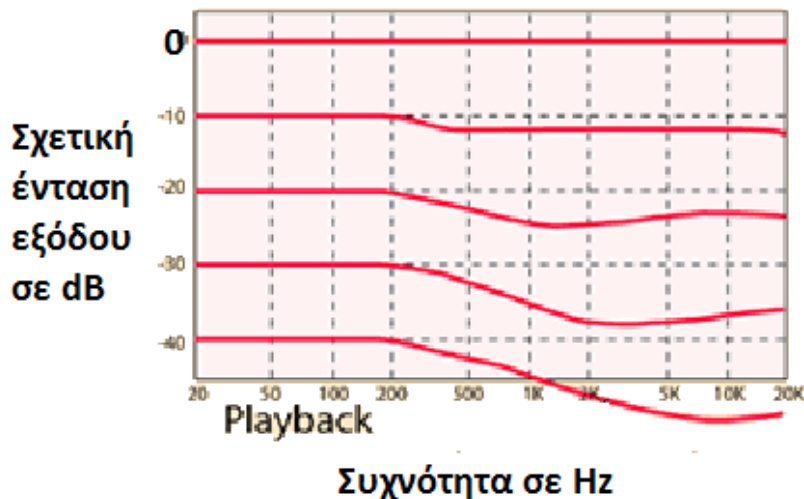
Κατά την εγγραφή, το πλάτος ενός χαρακτηριστικού τόνου της Dolby που παράγεται στο εσωτερικό της μονάδας μείωσης θορύβου έχει οριστεί ως το επίπεδο 0 VU για το κασετόφωνο.

Το σύστημα Dolby B αναπτύχθηκε μετά το Dolby A και παρουσιάστηκε το 1968, ως ένα ενιαίο σύστημα που παρέχει περίπου 9 dB μείωση θορύβου, κυρίως για κασέτες. Ήταν πολύ πιο απλό από το Dolby A και ως εκ τούτου, πολύ οικονομικότερο να υλοποιηθεί σε καταναλωτικά προϊόντα. Ηχογραφήσεις κωδικοποιημένες με σύστημα Dolby B ακούγονται αποδεκτές όταν αναπαράγονται σε εξοπλισμό που δεν διαθέτει αποκωδικοποιητή Dolby B, όπως σε πιο φθηνά κασετόφωνα. Ωστόσο, το Dolby B παρέχει λιγότερο αποτελεσματική μείωση του θορύβου από το Dolby A, γενικά περί 3 dB. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970, το Dolby B κατέστη πρότυπο για εμπορικά ηχογραφημένες κασέτες μουσικής, παρά το γεγονός ότι σε οικονομικό εξοπλισμό έλειπε το Dolby B κύκλωμα αποκωδικοποίησης.

Ο τύπος Dolby B εφαρμόζει την τεχνική μείωσης θορύβου μόνο στην περιοχή συχνοτήτων των εκάστοτε καταγεγραμμένων σημάτων. Επειδή οι περισσότεροι θόρυβοι είναι σήματα υψίσυχνα στη φύση, το σύστημα τύπου B επηρεάζει κυρίως την απόκριση υψηλών συχνοτήτων. Στο σύστημα Dolby-B, τα σήματα υψηλής συχνότητας και χαμηλού επιπέδου έντασης, ενισχύονται κατά την εγγραφή κατά 10dB, όπως φαίνεται από τις παρακάτω καμπύλες κωδικοποίησης του σχήματος 5.17. Κατά την αναπαραγωγή, τα σήματα υψηλών συχνοτήτων μειώνονται κατά πλάτος μαζί με τον υψίσυχνο θόρυβο που εντοπίζεται συνήθως σε συχνότητες άνω του 1kHz. Η τεχνική αυτή δίνει μια μείωση υψίσυχνων θορύβων («hiss») κατά 10 dB ενώ αρκετά χαμηλότερη είναι η επίδοσή του σε χαμηλότερες συχνότητες. Στο σχήμα 5.18 παρατηρούμε τις καμπύλες κωδικοποίησης του Dolby B κατά την εγγραφή ενώ στο σχήμα 5.19 παρατηρούμε τις συμπληρωματικές καμπύλες αποκωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται κατά την αναπαραγωγή της κασέτας.



Σχήμα 5.18



Σχήμα 5.19

Ο τύπος Dolby C έχει δύο ζώνες εφαρμογής. Σε σχέση με τη χρήση του τύπου B, το Dolby C παρέχει διπλάσια συνολική μείωση θορύβου. Το Dolby C δημιουργήθηκε το 1980. Παρέχει περίπου 15 έως 20 dB μείωση θορύβου. Είναι κατασκευασμένο συνδυάζοντας τα αποτελέσματα δύο συστημάτων Dolby B μαζί με μία επέκταση της δυναμικής περιοχής των χαμηλότερων συχνοτήτων. Οι προκύπτουσες ηχογραφήσεις ακούγονται δυστυχώς ως πολύ μειωμένης πιστότητας όταν αναπαράγονται σε εξοπλισμό που δεν έχει αποκωδικοποίηση τύπου Dolby C για μείωση του θορύβου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να μετριαστεί με τη χρήση Dolby B κατά την αναπαραγωγή αυτών των κασετών. Το Dolby C εμφανίστηκε για πρώτη φορά στα υψηλότερου κόστους κασετόφωνα τη δεκαετία του 1980. Το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο κασετόφωνο με Dolby C ήταν το NAD 6150C που βγήκε στην αγορά το 1981. Χρησιμοποιήθηκε επίσης σε επαγγελματικό εξοπλισμό βίντεο για τα κομμάτια ήχου των βιντεοκασετών Betacam SP και Umatic.

Ο τύπος Dolby SR είναι αρκετά περίπλοκος. Το σύστημα Dolby SR (Spectral Recording), που παρουσιάστηκε το 1986, ήταν το δεύτερο επαγγελματικό σύστημα μείωσης θορύβου της εταιρείας μετά το τύπου A. Υλοποιεί μια πολύ πιο επιθετική προσέγγιση μείωσης θορύβου από το Dolby A. Το SR προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την ένταση που έχει το εγγεγραμμένο σήμα συνεχώς χρησιμοποιώντας μια πολύπλοκη σειρά φίλτρων που μεταβάλλουν την απόκρισή τους ανάλογα με το σήμα εισόδου. Ως αποτέλεσμα, το Dolby SR είναι πολύ πιο ακριβό να υλοποιηθεί από τα Dolby B ή C, αλλά είναι ικανό να παρέχει μέχρι και 25 dB μείωση θορύβου στο εύρος των υψηλών συχνοτήτων. Για το λόγο αυτό, εντοπίζεται μόνο σε επαγγελματικό εξοπλισμό καταγραφής ήχου.

Το Dolby HX και το HX-Pro (για επαγγελματική χρήση) εφευρέθηκε το 1980 και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1981 (EP 0046410) από τον Jørgen Selmer Jensen της Bang & Olufsen. Όπως είδαμε, οι ταινίες εγγράφονται παρουσία ενός σήματος πόλωσης (bias) υψηλής συχνότητας. Το επίπεδο του σήματος πόλωσης είναι πολύ σημαντικό και επηρεάζει την παραμόρφωση του σήματος καθώς και το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Εάν το σήμα ήχου περιέχει ισχυρό κατά πλάτος περιεχόμενο υψηλής συχνότητας, ιδίως από κρουστά όργανα όπως πιατίνια, αυτό το σήμα συμβάλλει προσθετικά με το σήμα πόλωσης προκαλώντας μαγνητικό κορεσμό στην ταινία και παραμόρφωση. Το σύστημα Dolby HX Pro μειώνει αυτόματα το σήμα πόλωσης παρουσία ισχυρών σημάτων υψηλής συχνότητας, καθιστώντας δυνατή την εγγραφή σήματος σε ένα υψηλότερο επίπεδο έντασης. Αυτή η τεχνική, όπως είναι φανερό αυξάνει το σηματοθορυβικό λόγο SNR του συνολικού εγγεγραμμένου σήματος. Το όνομα «HX» προέρχεται από τις λέξεις «Headroom eXpansion» που σημαίνει επέκταση του δυναμικού εύρους του σήματος χωρίς παραμόρφωση.

Στον πίνακα 5.3 παρατηρούμε τι συμβαίνει σε συνήθεις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται Dolby κωδικοποίηση κατά την εγγραφή ή αναπαραγωγή μιας κασέτας.

Ηχογράφηση	Αναπαραγωγή	Αποτέλεσμα
Χωρίς Dolby	Χωρίς Dolby	Σωστά ισοσταθμισμένη απόκριση συχνοτήτων αλλά εμφανίζεται υψίσυχνος θόρυβος
Με Dolby	Χωρίς Dolby	Δίνεται έμφαση στις υψηλές συχνότητες κατά την αναπαραγωγή και δεν έχουμε επίπεδη απόκριση συχνότητας
Χωρίς Dolby	Με Dolby	Απώλεια έντασης στις υψηλότερες συχνότητες και ενίσχυση χαμηλών συχνοτήτων που οδηγούν σε μη-επίπεδη απόκριση
Με Dolby	Με Dolby	Ιδανική επίπεδη απόκριση συχνοτήτων και χαμηλός θόρυβος

Πίνακας 5.3

## 5.6 Θέματα σφαλμάτων χρονικού χαρακτήρα

Η ταχύτητα αναπαραγωγής του δίσκου με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων, γραναζιών και μάντων ήταν σημαντική παράμετρος. Εάν η ταχύτητα ήταν μεγαλύτερη από την ταχύτητα στην οποία ηχογραφήθηκε για παράδειγμα ένα αρχικό σήμα ομιλίας, τότε η συχνότητα της φωνής και η ταχύτητα ομιλίας ανέβαινε ενώ το αντίθετο συνέβαινε αν η ταχύτητα αναπαραγωγής ήταν μικρότερη από αυτή της ηχογράφησης.

Επίσης, οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα αναπαραγωγής έπρεπε να μειώνονται στο ελάχιστο καθώς αυτό το φαινόμενο αλλοιώνει περεταίρω την ποιότητα της ηχογράφησης. Αυτές οι διακυμάνσεις σήμερα αναφέρονται ως «περυγισμοί» ή ταραχές («flutter» στα αγγλικά) και υπάρχουν τρόποι μέτρησης και αντιμετώπισής τους. Οι αργές ταραχές της ταχύτητας αναπαραγωγής με συχνότητα κάτω των 4Hz αναφέρονται στα αγγλικά με τον όρο «Wow» λόγω του ηχητικού φαινομένου ή εφέ που παράγουν κι ακούγεται σαν το γνωστό επιφώνημα θαυμασμού. Εντούτοις, η μέθοδος μέτρησης και αντιμετώπισης των ταραχών κάθε συχνότητας είναι κοινή. Κάθε συσκευή αναλογικής ηχογράφησης με περιστροφικά κινούμενα μέρη πάσχει από φαινόμενα ταραχής ή flutter της ταχύτητας περιστροφής.

Η πιστή αναπαραγωγή της συχνότητας και χροιάς ενός ήχου στα πικάπ βινυλίου και τις συσκευές εγγραφής/αναπαραγωγής μαγνητικών κασετών επηρεάζεται από φαινόμενα διαταραχής της ταχύτητας αναπαραγωγής. Οι ταραχές οφείλονται στα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων και των μάντων κίνησης αυτών των συσκευών. Ακόμη και τα ψηφιακά κυκλώματα βέβαια πάσχουν από υψίσυχνες ταραχές λεγόμενες «jitter» λόγω της αστάθειας των παλμών του ρολογιού τους. Θα μελετήσουμε αυτά τα φαινόμενα των ψηφιακών κυκλωμάτων στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Για να δώσουμε ένα παράδειγμα που φανερώνει πως το flutter επηρεάζει την πιστή αναπαραγωγή ήχου ας δούμε τι συμβαίνει αν η ταχύτητα αναπαραγωγής ενός δίσκου μεταβληθεί ελάχιστα. Έστω ότι στο δίσκο είναι εγγραμμένο μόνο ένα σήμα ημιτονοειδούς τόνου. Αν μεταβληθεί ελάχιστα η συχνότητα περιστροφής του δίσκου, τότε θα μεταβληθεί η συχνότητα του τόνου. Αν η μεταβολή της συχνότητας του τόνου είναι μόλις 6%, τότε ο τόνος θα μεταβληθεί κατά ένα ολόκληρο ημιτόνιο όπως ορίζεται στη δυτική μουσική. Οι περισσότεροι άνθρωποι μπορούν να αντιληφθούν μεταβολές της συχνότητας κατά 3% και άνω ενώ κάποιιοι που έχουν διακριτική ικανότητα των νοτών άνω του μέσου όρου μπορούν να αντιληφθούν και μεταβολές της συχνότητας κατά 1%. Επίσης, μία διαταραχή συχνότητας 200Hz έστω και σε πολύ χαμηλή ένταση -50dB επί ενός τόνου στα 0dB, θα προκαλέσει παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (intermodulation distortion) IMD της τάξης του 0,3% που είναι μία σχετικά υψηλή τιμή για ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο ότι το αυτί μας είναι εξαιρετικά ευαίσθητο σε IMD παραμορφώσεις καθώς τότε παράγονται συχνότητες που δεν είναι πολλαπλάσια των αρχικών συχνοτήτων των τόνων ή νοτών αλλά άθροισμα και διαφορά αυτών. Οι τόνοι αυτών των νέων συχνοτήτων που παράγονται, ακούγονται ως διαφωνίες, παραφωνίες ή νότες σε διάφωνα διαστήματα από τους αρχικούς τόνους της μουσικής που ακούμε.

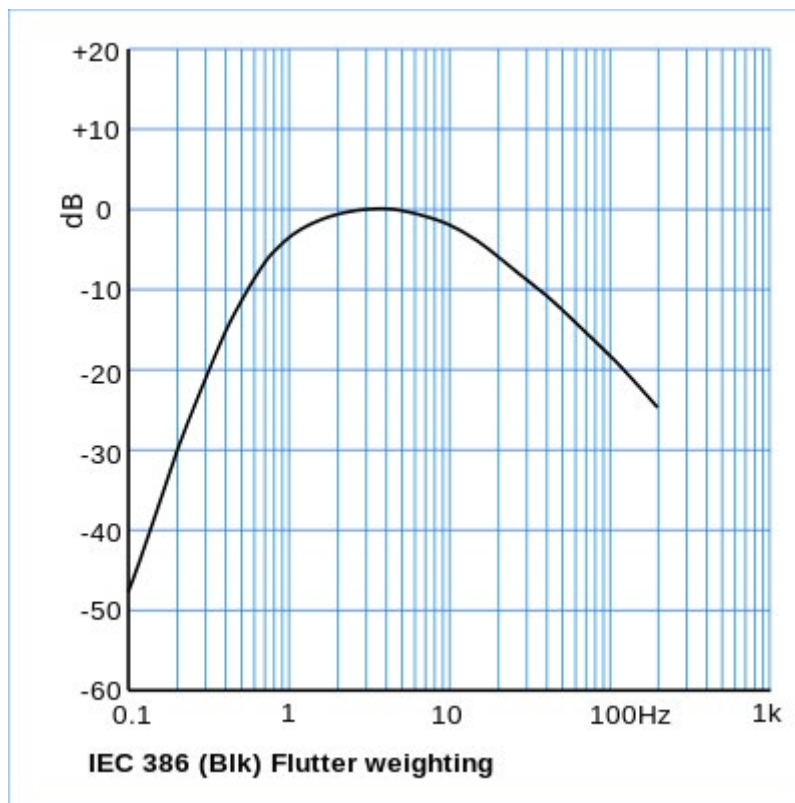
### 5.6.1 Μέτρηση του περυγισμού (flutter)

Ο περυγισμός μπορεί να οριστεί ως χρονική αστάθεια που δημιουργεί παραπροϊόντα διαμόρφωσης συχνότητας που διαφθείρει το ηχητικό σήμα μας. Η διαμόρφωση συχνότητας λόγω περυγισμού παράγει νέους ήχους πλευρικής ζώνης που δεν υπήρχαν στην αρχική μουσική. Οι συχνότητες των πλευρικών ζωνών είναι συνδυασμοί των συχνοτήτων μουσικής και των συχνοτήτων περυγισμού. Για παράδειγμα, ένας τόνος 1 kHz τροφοδοτείται σε ένα μαγνητόφωνο που έχει περυγισμό συχνότητας 20 Hz λόγω της κίνησης του μοτέρ του με 1200 Σ.Α.Λ.. Τότε θα προκύψουν νέες πλευρικές συχνότητες στον τόνο του 1 kHz:  $1\text{kHz} \pm 20\text{ Hz}$  ή 980 Hz και 1020 Hz. Στα κασετόφωνα, ο περυγισμός είναι συνήθως μικρότερος από 0,1% και το σύστημά μας μπορεί να μελετηθεί ως πολύ στενής ζώνης διαμόρφωσης συχνότητας, γεγονός που οδηγεί σε απλουστεύσεις σε ορισμένες από τις εξισώσεις που το περιγράφουν. Στην περίπτωση μας, αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται να μελετήσουμε της πρώτης μόνο τάξης πλευρικές ζώνες συχνοτήτων που περιγράφονται παραπάνω, όταν το ποσοστό περυγισμού

είναι χαμηλό.

Θέλουμε μια μέθοδο που να διαχωρίζει τις ενοχλητικές πλευρικές συνιστώσες αγνοώντας τον κεντρικής συχνότητας δοκιμαστικό τόνο. Το εργαλείο για αυτή τη δουλειά είναι ένας διευκρινιστής συχνότητας FM (frequency modulation, διαμόρφωσης συχνότητας). Η συσκευή αυτή εντοπίζει και κλειδώνει σε ένα δοκιμαστικό τόνο σταθερής συχνότητας. Η διευκρινιστής εξαλείφει τη φέρουσα συχνότητα του τόνου δοκιμής και ανακατά μόνο τις πλευρικές ζώνες που περιέχουν της ανεπιθύμητες συχνότητες. Κατά τη διαδικασία της αποδιαμόρφωσης, όλες οι πλευρικές ζώνες που ήταν εντοπισμένες γύρω από το φέρον, θα μετατοπιστούν σε χαμηλές συχνότητες του φάσματος, γύρω από το μηδέν (σε Hertz). Η διαδικασία αναδίπλωσης συνδυάζει τις άνω και κάτω πλευρικές ζώνες που δημιουργούνται από μια συγκεκριμένη συχνότητα διαμόρφωσης.

Όπως είδαμε, τα όργανα μέτρησης του flutter χρησιμοποιούν ένα διευκρινιστή/εντοπιστή συχνότητας για να μεταφράσουν τις μεταβολές τονικού ύψους ενός προηχογραφημένου καθαρού τόνου σε μία κυματομορφή πτερυγισμού. Η κυματομορφή αυτή διέρχεται κατόπιν από ένα φίλτρο στάθμισης συχνοτήτων και τέλος ανορθώνεται πλήρως από μία γέφυρα διόδων ώστε να δημιουργήσει ένα αργά μεταβαλλόμενο σήμα που οδηγεί την ένδειξη μέτρησης ενός οργάνου. Η μέγιστη ένδειξη του οργάνου αυτού είναι ο συνολικός πτερυγισμός που μετρείται. Η πλήρης ανόρθωση του σήματος γίνεται με μία ειδική γέφυρα διόδων υψηλής ταχύτητας ώστε να εντοπίζονται και οι συντομότερες μεταβολές ταχύτητας. Το φίλτρο στάθμισης της παραπάνω διαδικασίας σύμφωνα με το πρότυπο IEC 386 έχει την απόκριση συχνοτήτων που δίνεται στο σχήμα 5.20.



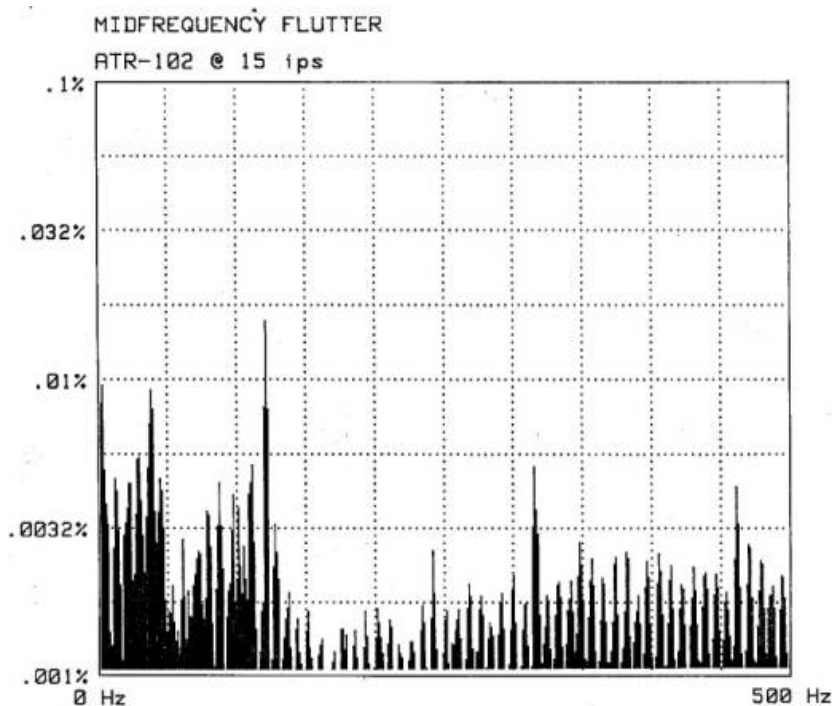
Σχήμα 5.20

Η μέτρηση του πτερυγισμού γίνεται συνήθως με έναν καθαρό τόνο στα 3,15 kHz (ή μερικές φορές στα 3 kHz). Η συχνότητα αυτή επιλέγεται επειδή είναι αρκετά υψηλή ώστε να δώσει καλή ανάλυση, αλλά είναι αρκετά χαμηλή ώστε να μην επηρεάζεται από σύντομες διακοπές σήματος (drop-outs) και απώλειες υψηλής συχνότητας. Ιδανικά, ο πτερυγισμός θα πρέπει να μετρείται χρησιμοποιώντας ένα προ-ηχογραφημένο τόνο απαλλαγμένο από κάθε είδους πτερυγισμό. Ο τόνος αυτός μπορεί να παραχθεί από μία καλή γεννήτρια συχνοτήτων. Όμως στην ταινία στην οποία θα ηχογραφηθεί αυτός

ο τόνος θα περιέχεται και πτερυγισμός από το κασετόφωνο που χρησιμοποιήθηκε για την ηχογράφιση. Επομένως, το κασετόφωνο αυτό και η κασέτα πρέπει να είναι άριστης ποιότητας. Κατά αυτό τον τρόπο μπορούμε να λάβουμε ικανοποιητικές μετρήσεις του πτερυγισμού από κασετόφωνα χαμηλότερης ποιότητας. Αν όμως θέλουμε να μετρήσουμε τον πτερυγισμό ενός ίδιου κασετοφώνου επιπέδου αναφοράς, δύσκολα θα βγάλουμε μετρήσιμο αποτέλεσμα με την απλή τεχνική αναπαραγωγής της κασέτας που περιέχει τον καθαρό τόνο. Μία παραλλαγή της τεχνικής είναι να σταματάμε σε τακτά διαστήματα την αναπαραγωγή της κασέτας και να συνεχίζουμε από το ίδιο σημείο. Αυτή η τεχνική βοηθά στην αποσυσχέτιση του πτερυγισμού της συσκευής αναπαραγωγής που θέλουμε να μετρήσουμε από τον πτερυγισμό που αποτυπώθηκε στην ταινία κατά την εγγραφή της.

Στην απλή μέτρηση του πτερυγισμού, όλες οι συχνότητες που προκύπτουν από την αποδιαμόρφωση το σήματος μέτρησης αθροίζονται και εν τέλει προκύπτει η μέγιστη τιμή που απεικονίζεται μέσω του οργάνου ένδειξης. Για να εκτελέσουμε μία ακριβέστερη μελέτη των συνιστωσών του φάσματος του flutter και να εντοπίσουμε τις αιτίες του, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ζωνοδιαβατά μεταβλητά φίλτρα. Τα φίλτρα αυτά μπορούν να διαχωρίσουν το φάσμα του πτερυγισμού σε περιοχές συχνοτήτων. Στην περιοχή συχνοτήτων 0.5 - 250 Hz εντοπίζονται τα φαινόμενα flutter χαμηλής συχνότητας που ονομάζονται «Wow» και δημιουργούνται λόγω μηχανικής κίνησης και περιστροφής των εξαρτημάτων της συσκευής αναπαραγωγής. Στην περιοχή 250Hz - 5kHz εντοπίζονται τα φαινόμενα flutter λόγω ταλαντώσεων που δημιουργούνται από την ίδια την ταινία. Στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων περί τα 1kHz έως 10kHz, εντοπίζονται συνιστώσες flutter που ονομάζονται πτυριγισμοί «ξυσίματος» (scrape flutter). Η ονομασία αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι το flutter αυτό δημιουργείται λόγω δόνησης της ταινίας καθώς περνά πάνω από μια κεφαλή ή άλλο μη-περιστρεφόμενο στοιχείο στη διαδρομή της. Η ταινία έχει μία ταχεία αλληλεπίδραση με αυτά τα σταθερά στοιχεία και γίνεται απότομο τέντωμα της ταινίας ή κόλλημα της ομαλούς ολίσθησής της. Τα φαινόμενα scrape flutter μετρώνται καλύτερα με χρήση ενός τόνου υψηλής συχνότητας, στα 10kHz.

Για ταυτόχρονη και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση των πτερυγισμών που εμφανίζονται σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων χρησιμοποιούνται μετατροπείς Fourier και γίνεται δειγματοληψία του σήματος flutter με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανάλυση σε δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Στο σχήμα 5.21 παρατηρούμε το φάσμα πτερυγισμών της συσκευής ATR-102 στο εύρος συχνοτήτων 0-500Hz.



Σχήμα 5.21

### 5.6.2 Αντιμετώπιση του flutter

Για την αντιμετώπιση του flutter υπάρχουν διάφορες λύσεις. Αρχικά πρέπει να αναλυθούν οι μετρήσεις του flutter όπως το γράφημα στο σχήμα 5.21 προκειμένου να εντοπιστούν τα αίτια του πτερυγισμού. Για παράδειγμα, στο σχήμα 5.21, η υψηλότερη συνιστώσα πτερυγισμού παρατηρείται στη συχνότητα των 120Hz. Δεδομένου ότι η συσκευή τροφοδοτείται στην Αμερική από παροχή του δικτύου 110Vac στα 60Hz, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η συχνότητα των 120Hz αντιστοιχεί στη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας που προκύπτει από πλήρη ανόρθωση της AC τάσης των 60Hz του δικτύου. Η τάση αυτή φυσικά παρέχεται στο κύκλωμα της συσκευής από κατάλληλο μετασχηματιστή υποβιβασμού. Η συχνότητα των 120Hz θα έπρεπε ιδανικά να φιλτράρεται από τους πυκνωτές εξομάλυνσης τάσης της τροφοδοσίας και στο κύκλωμα να εισέρχεται μόνο μία σταθερού πλάτους DC τάση μηδενικής συχνότητας. Ατέλειες στη σχεδίαση και κατασκευή του τροφοδοτικού αλλά και γήρανση των εξαρτημάτων του επιτρέπουν τη διέλευση της συχνότητας των 120Hz προς τα μοτέρ του κασετοφώνου και τα λοιπά υποσυστήματά του. Καθώς αυτή η συχνότητα βρίσκεται εντός του ακουστικού φάσματος, δημιουργεί φαινόμενα διαμόρφωσης συχνότητας με το ηχητικό υλικό που περιέχει χαμηλές συχνότητες παραμορφώνοντας το σήμα που ακούμε. Μία λύση λοιπόν θα ήταν να αντικατασταθούν οι παλιοί ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές εξομάλυνσης τάσης του κασετοφώνου που έχουν χάσει μέρος της χωρητικότητάς τους με νέους και ενδεχομένως ελαφρά μεγαλύτερης συχνότητας αν το επιτρέπει ο κατασκευαστής. Οι νέοι πυκνωτές παρέχουν καλύτερο φιλτράρισμα της συχνότητας των 120Hz του τροφοδοτικού. Αυτή η λύση εφαρμόζεται και σε πικάπ ανάγνωσης δίσκων βινυλίου, το μοτέρ των οποίων κινείται με dc τάση καθώς και πολλές άλλες συσκευές ήχου και εικόνας. Στην Ελλάδα θα πρέπει να αναζητούμε συχνότητες flutter λόγω ανορθωμένης τάσης τροφοδοσίας περί τα  $2 \times 50 = 100\text{Hz}$  καθώς η συχνότητα AC τάσης του δικτύου είναι ιδανικά στα 50Hz.

Αν εμφανίζονται πολύ χαμηλές συχνότητες flutter, εξετάζουμε συνήθως τα μηχανικά κινούμενα μέρη του κασετοφώνου ή του πικάπ. Γενικά κάθε συσκευή με αργά περιστρεφόμενα μηχανικά μέρη και ηλεκτρικούς κινητήρες παρουσιάζει κάποιο ποσοστό πτερυγισμού χαμηλής συχνότητας. Για παράδειγμα, η περιστροφή ενός κινητήρα με 44 Σ.Α.Λ. αντιστοιχεί σε συχνότητα 0.73 Hz. Η συχνότητα αυτή είναι εκτός του ακουστικού φάσματος όμως μπορεί να δημιουργήσει αργά μεταβαλλόμενες αστάθειες τύπου «Wow» στην ταχύτητα ανάγνωσης ενός δίσκου βινυλίου. Για την απόσβεση τέτοιων συχνοτήτων πτερυγισμού απαιτείται καλός σχεδιασμός και συντήρηση του πλατό κίνησης του δίσκου, συντήρηση των ιμάντων και γραναζιών κίνησης καθώς και των ελατηρίων ή ελαστικών συνδέσμων στήριξης του πλατό και του βραχίονα της κεφαλής ανάγνωσης.

Άλλη συνήθης αιτία εμφάνισης μεταβολών και σφαλμάτων στην ταχύτητα αναπαραγωγής ενός μέσου είναι η φθορά των ελαστικών ιμάντων που μεταφέρουν την κίνηση από τους κινητήρες του συστήματος στα διάφορα κινούμενα μέρη του μηχανισμού. Με τη χρήση και την πάροδο του χρόνου ή τη θερμοκρασία, οι ιμάντες παρουσιάζουν σημεία σκλήρυνσης ή χαλάρωσης και επηρεάζουν τόσο τη σταθερότητα της ταχύτητας αναπαραγωγής όσο το τονικό ύψος του ηχητικού σήματος. Σε φθαρμένα κασετόφωνα, πολλές φορές η ομιλία για παράδειγμα ακούγεται σε αργή ταχύτητα και πολύ μπάσα. Η τεχνική παραμόρφωσης της φωνής κατά αυτό τον τρόπο χρησιμοποιείται κάποιες φορές ηθελημένα σε μια ηχογράφιση για να παραμορφωθεί η χροιά της φωνής ενός προστατευόμενου μάρτυρα για παράδειγμα και να μην αναγνωρίζεται. Αλλαγή των ιμάντων του μηχανισμού ανάγνωσης με νέους μπορεί να γίνει από εξειδικευμένο τεχνικό. Κατόπιν θα ακολουθήσει προσεκτική ρύθμιση του μηχανισμού ώστε η ταχύτητα αναπαραγωγής/εγγραφής να έχει και κατάλληλη τιμή πέρα από σταθερότητα. Η σωστή ρύθμιση του μηχανισμού κίνησης μιας συσκευής είναι απαραίτητη για τη εξάλειψη φαινομένων flutter και μεταβολής του τονικού ύψους. Η ρύθμιση γίνεται βάσει τεχνικών προδιαγραφών του κατασκευαστή και συνήθως υπάρχουν τόσο μηχανικές όσο και ηλεκτρονικές ρυθμίσεις. Για παράδειγμα, υπάρχουν συγκεκριμένα σημεία του μηχανισμού που απαιτούν λίπανση και άλλα σημεία που απαιτούν ακριβώς το αντίθετο: καθαρισμό από λίπη και εναποθέσεις. Επίσης, στα κυκλώματα εντοπίζονται συνήθως μεταβλητές αντιστάσεις-trimmers που καθορίζουν την ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων και άλλες παραμέτρους.

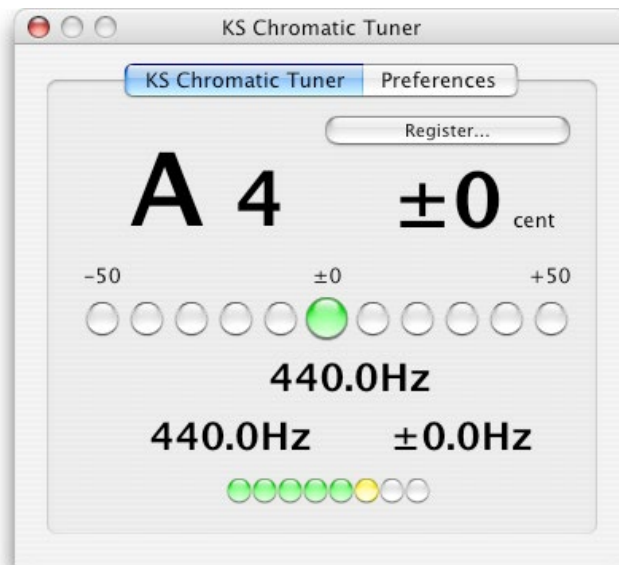
Για τη μείωση του υψίσυχνου «scrape flutter», οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν συνήθως κυλίνδρους

απόσβεσης μεγάλου βάρους και άλλους μηχανισμούς απόσβεσης των υψίσυχνων ταλαντώσεων λόγω της κίνησης της ταινίας.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές ψηφιοποίησης των ταινιών και δίσκων βινυλίου που μπορούν να εξαλείψουν φαινόμενα flutter με ψηφιακή επεξεργασία dsp (digital signal processing). Θα δούμε τέτοιες τεχνικές στο επόμενο κεφάλαιο.

### 5.6.3 Ολίσθηση της ταχύτητας αναπαραγωγής:

Η απόλυτη τιμή της ταχύτητας αναπαραγωγής είναι σημαντική καθώς μία σταθερή μετατόπιση της ταχύτητας κατά 6% μεταβάλλει το τονικό ύψος της μουσικής κατά ένα ολόκληρο ημιτόνιο της δυτικής μουσικής. Για παράδειγμα, αν ένας ηχογραφημένος τόνος συχνότητας 440Hz που αντιστοιχεί στη νότα Λα, αναπαραχθεί με ταχύτητα αυξημένη κατά 6%, θα ακούσουμε τη νότα Λα δίεση (Λα<sup>#</sup>) ή Σι ύφεση (Σι<sup>b</sup>). Μία τεχνική εντοπισμού απόκλισης της ταχύτητας αναπαραγωγής από την ιδανική, είναι να εγγράψουμε με μία ποιοτική συσκευή αναφοράς έναν καθαρό τόνο σε μία ταινία ή ένα δίσκο δοκιμής και κατόπιν να αναπαράγουμε το μέσο αυτό στο σύστημα προς εξέταση. Με τη χρήση ενός διευκρινιστή συχνότητας που χρησιμοποιούν και οι μουσικοί για να κουρδίσουν κατάλληλα τα μουσικά όργανα, μπορούμε να δούμε αν ο τόνος που ακούμε έχει μεταβληθεί ως προς συχνότητα. Στην παρακάτω εικόνα (σχήμα 5.22), βλέπουμε ένα πρόγραμμα (software) διευκρινιστή συχνότητας μεγάλης ακριβείας καθώς μπορεί να μετρήσει αποκλίσεις της τάξης του 0.1Hz από τον καθαρό τόνο (της νότας Λα στο παράδειγμά μας).



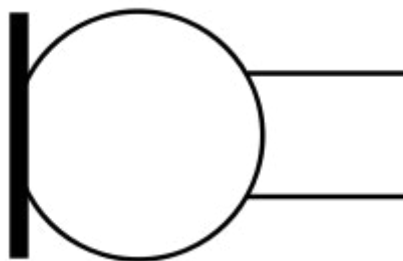
Σχήμα 5.22

## 5.7 Μικρόφωνα

Η συνηθέστερη πηγή ήχου για πολλά συστήματα και ιδιαίτερα τα συστήματα ζωντανής μουσικής και επεξεργασίας ήχου σε πραγματικό χρόνο είναι το μικρόφωνο. Το μικρόφωνο είναι μία συσκευή που μετατρέπει τα ηχητικά κύματα που λαμβάνει ως είσοδο σε ηλεκτρικές ταλαντώσεις στην έξοδό της. Η χρησιμότητα του μικροφώνου είναι μεγάλη καθώς διαμορφώνει το αναλογικό ηλεκτρικό σήμα ανάλογα με την ένταση των ηχητικών κυμάτων που δέχεται. Το σήμα εξόδου του μικροφώνου είναι συνήθως ένα σήμα εναλλασσόμενης τάσης πλάτους μερικών millivolts και χρειάζεται κατάλληλη ενίσχυση και ισοστάθμιση συχνοτήτων πριν ακολουθήσει περαιτέρω επεξεργασία του.

Τα μικρόφωνα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως στην τηλεφωνία, σε συστήματα δημόσιας αναγγελίας (PA) για αίθουσες συναυλιών και δημόσιες εκδηλώσεις, σε ηχογραφήσεις, στη βιομηχανία του κινηματογράφου, στο χώρο του ραδιοφώνου, στους υπολογιστές για την καταγραφή και ψηφιοποίηση φωνής, σε ηλεκτρονικά συστήματα αναγνώριση φωνής καθώς και για ιατρικούς σκοπούς όπως σε ακουστικά βαρηκοΐας, εξετάσεις υπερήχων και ηχητική ανάλυση του βήχα του ασθενούς. Επίσης, στο χώρο της αεροπλοΐας, ένα σημαντικό σύστημα ασφαλείας είναι ο καταγραφέας συνομιλιών εντός του πιλοτηρίου CVR (cockpit voice recorder) που χρησιμοποιεί μικρόφωνα. Οι εφαρμογές των μικροφώνων είναι πάμπολλες και υπάρχουν διάφοροι τύποι μικροφώνων που λαμβάνουν και ήχους πέραν του ακουστικού φάσματος των 20Hz-20kHz.

Τα περισσότερα μικρόφωνα χρησιμοποιούν σήμερα ηλεκτρομαγνητική επαγωγή (δυναμικά μικρόφωνα), μεταβολή της χωρητικότητας (πυκνωτικά μικρόφωνα) ή πιεζοηλεκτρισμό (πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνα) για να παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα από τις διακυμάνσεις της πίεσης του αέρα ή δονήσεις. Στο σχήμα 5.23 παρατηρούμε το ηλεκτρονικό σύμβολο ενός μικροφώνου όπως παρουσιάζεται σε σχηματικά διαγράμματα κυκλωμάτων.



Σχήμα 5.23

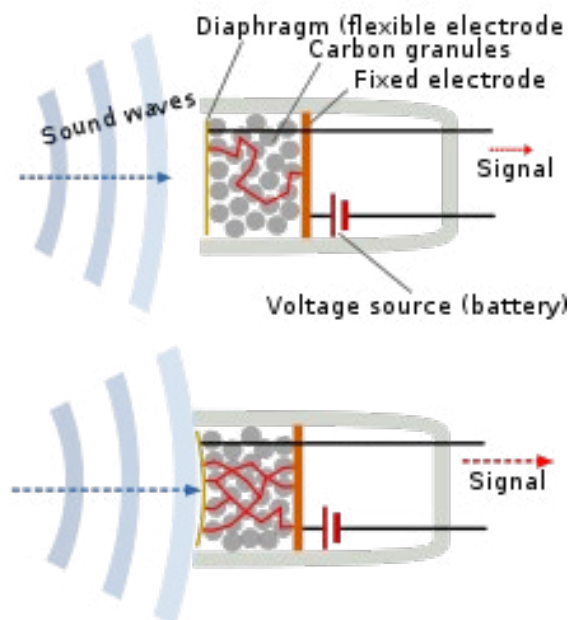
### 5.7.1 Κατηγορίες μικροφώνων

Τα περισσότερα μικρόφωνα διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του αισθητήρα τους, τη χρήση τους και το μοτίβο κατευθυντικότητάς τους για τη λήψη ήχου (pick up directional pattern). Το ευαίσθητο αισθητήριο ενός μικροφώνου ονομάζεται «στοιχείο» (element) ή «κάψουλα» (capsule). Ο ήχος συνήθως μετατρέπεται πρώτα σε μηχανική κίνηση μέσω ενός διαφράγματος, του οποίου η κίνηση στη συνέχεια μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Ένα πλήρες μικρόφωνο περιλαμβάνει επίσης ένα περίβλημα, ορισμένα μέσα για την μεταφορά του σήματος εξόδου του και συχνά ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα για την προσαρμογή της εξόδου της κάψουλας προς τον εξοπλισμό που λαμβάνει το σήμα της. Ένα ασύρματο μικρόφωνο περιέχει και έναν ραδιοπομπό για τη μετάδοση του σήματός του προς κάποιον εξωτερικό δέκτη.



### 5.7.2 Το μικρόφωνο άνθρακα

Το πρώτο μικρόφωνο ήταν το μικρόφωνο άνθρακα και χρησιμοποιήθηκε στην τηλεφωνία. Παρουσιάστηκε από τους David Edward Hughes στην Αγγλία and Emile Berliner και Thomas Edison στην Αμερική περί το 1877. Το μικρόφωνο άνθρακα αποτελείται από δύο μεταλλικές πλάκες που διαχωρίζονται από κόκκους άνθρακα. Η μία μεταλλική πλάκα είναι πολύ λεπτή, κατευθύνεται προς τον ομιλητή και ενεργεί ως ένα διάφραγμα. Τα ηχητικά κύματα κτυπούν το διάφραγμα με αποτέλεσμα να δονείται, ασκώντας μια μεταβαλλόμενη πίεση επί των κόκκων άνθρακα. Η μεταβαλλόμενη πίεση με τη σειρά της αλλάζει την ηλεκτρική αντίσταση που παρουσιάζεται μεταξύ των πλακών. Υψηλότερη πίεση στο διάφραγμα μειώνει την αντίσταση καθώς οι κόκκοι άνθρακα ωθούνται πιο κοντά ο ένας στον άλλο. Ένα σταθερού πλάτους συνεχές ρεύμα διέρχεται μεταξύ των πλακών μέσω των κόκκων. Η μεταβολή της αντίστασης του συστήματος οδηγεί σε μία διαμόρφωση του ρεύματος, δημιουργώντας ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Το μεταβαλλόμενο ρεύμα αναπαράγει σχετικά πιστά την μεταβαλλόμενη πίεση του ηχητικού κύματος. Κατά αυτό τον τρόπο έχουμε μετατροπή του μηχανικού σε ηλεκτρικό σήμα. Τα μικρόφωνα αυτά συναντώνται ακόμη και σήμερα σε ορισμένες εφαρμογές όπου απαιτείται λειτουργία ακόμη και με χαμηλή τάση αλλά και αντοχή σε υπερτάσεις και κεραυνούς. Το πλεονέκτημα των μικροφώνων άνθρακα έναντι άλλων σύγχρονων μικροφώνων είναι πως μπορούν να παράγουν ικανοποιητικού πλάτους σήμα εξόδου ακόμη και με πολύ μικρή τάση τροφοδοσίας DC όπως κλάσματα του ενός Volt. Επίσης, αντέχουν τις μεταβατικές υπερτάσεις από κεραυνούς ή ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς και γι αυτό χρησιμοποιούνται από το στρατό. Μία άλλη χρήση των μικροφώνων άνθρακα ήταν ως επαναλήπτες σε τηλεφωνικές γραμμές μεγάλου μήκους καθώς μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και ως ενισχυτές του σήματος. Για την ενίσχυση σήματος, ένα μικρόφωνο άνθρακα συνδεόταν μηχανικά με τον ηλεκτρομαγνητικό τηλεφωνικό δέκτη. Το ασθενές σήμα του δέκτη μεταδιόταν στο μικρόφωνο άνθρακα μηχανικά και το μικρόφωνο παρήγαγε ένα μεγαλύτερου πλάτους ηλεκτρικό σήμα στην έξοδό του δρώντας έτσι ως ενισχυτής και επαναλήπτης του αρχικού ηλεκτρικού τηλεφωνικού σήματος. Στο σχήμα 5.24 παρατηρούμε την αρχή λειτουργίας του μικροφώνου άνθρακα:



Σχήμα 5.24

### 5.7.3 Το πυκνωτικό μικρόφωνο

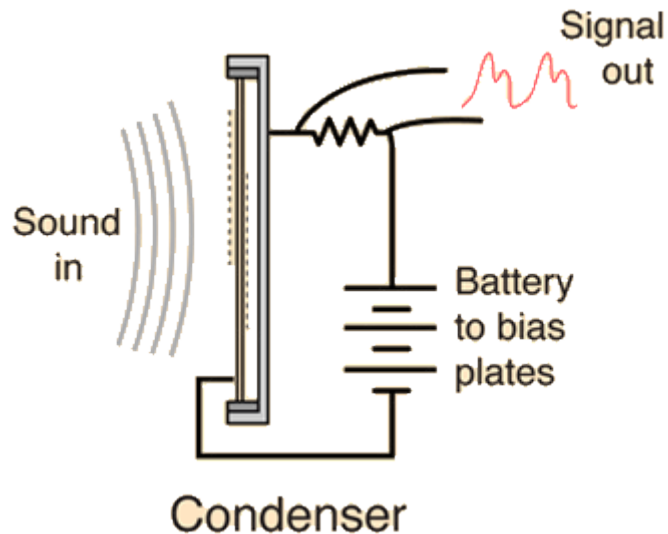
Το μικρόφωνο συμπυκνωτή, εφευρέθηκε στα Bell Labs το 1916 από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Wente. Λέγεται επίσης και μικρόφωνο πυκνωτή ή ηλεκτροστατικό μικρόφωνο ή πυκνωτικό μικρόφωνο. Οι πυκνωτές ιστορικά ονομάζονταν συμπυκνωτές. Στο πυκνωτικό μικρόφωνο, η ηχητική πίεση αλλάζει την απόσταση ανάμεσα σε ένα λεπτό μεταλλικό διάφραγμα και της σταθερής μεταλλικής πλάκας του συστήματος. Το διάφραγμα δρα σαν τη μια από τις δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες ενός πυκνωτή και οι δονήσεις παράγουν αλλαγές στην απόσταση μεταξύ των πλακών. Υπάρχουν δύο τύποι πυκνωτικών μικροφώνων, ανάλογα με τη μέθοδο λήψης του ηχητικού σήματος από το αισθητήριο: 1) μικρόφωνα πολωμένα με DC τάση και 2) μικρόφωνα ραδιοσυχνοτήτων (RF) ή υψηλής συχνότητας (HF).

Στα πυκνωτικά μικρόφωνα που είναι πολωμένα με σταθερή τάση DC, το σύστημα δρα ως ένας πυκνωτής του οποίου οι πλάκες είναι φορτισμένες με σταθερό φορτίο Q. Η χωρητικότητα των πλακών είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την απόσταση μεταξύ τους για ένα πυκνωτή παράλληλων πλακών.

Η τάση που διατηρείται μεταξύ των πλακών του πυκνωτή αλλάζει με τις δονήσεις στον αέρα, σύμφωνα με την εξίσωση χωρητικότητας :  $C = Q/V = \epsilon * A/d$ , όπου C είναι η μεταβαλλόμενη χωρητικότητα του πυκνωτικού μικροφώνου σε Farad και έχει τιμή 5 - 100 pF, Q είναι το σχετικά σταθερό φορτίο του σε Coulomb, V είναι η συνολική τάση του συστήματος σε Volts,  $\epsilon$  η διηλεκτρική σταθερά του υλικού μεταξύ των πλακών, A η επιφάνεια των πλακών και d η απόστασή τους.

Η τάση V αποτελείται από δύο συνιστώσες, τη DC σταθερή τάση  $V_{dc}$  που παρέχεται από εξωτερική πηγή μέσω αντίστασης και μία εναλλασσόμενη τάση  $V_{ac}$  που παράγεται από την κίνηση μεταξύ των πλακών του πυκνωτή. Η αντίσταση πόλωσης που τοποθετείται εν σειρά μεταξύ πηγής τάσης και πυκνωτή έχει συνήθως τιμή 100 MΩ έως δεκάδες GΩ. Άρα έχουμε μία πραγματικά μεγάλη αντίσταση και πολύ μικρά ρεύματα. Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος αυτού δίνεται από τον τύπο  $T=R*C$ . Αυτό το R-C κύκλωμα σχηματίζει ένα φίλτρο που είναι υψιπερατό (high-pass) για το ηχητικό σήμα, και βαθυπερατό (low-pass) για την DC τάση πόλωσης.

Το χρονικό πλαίσιο αλλαγής της χωρητικότητας του πυκνωτικού μικροφώνου έχει τιμή περίπου 50ms για ηχητικό σήμα συχνότητας 20Hz. Σε αυτό το σύντομο διάστημα, το φορτίο Q είναι πρακτικά σταθερό και η τάση V στα άκρα του πυκνωτή ακολουθεί ακαριαία την αλλαγή στην χωρητικότητα C. Η τάση στα άκρα του πυκνωτή μεταβάλλεται κατά τιμή επάνω και κάτω από την DC τάση πόλωσης. Η διαφορά τάσης μεταξύ της DC τάσης πόλωσης και της AC τάσης που παράγεται από τη μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή μετράται επάνω στον εν σειρά αντιστάτη πόλωσης. Η μικρής τιμής τάση στα άκρα του αντιστάτη ενισχύεται για να χρησιμοποιηθεί στην εγγραφή ηχητικού σήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα ηλεκτρονικά που ενσωματώνονται στο ίδιο το μικρόφωνο δεν παρέχουν κανένα κέρδος τάσης καθώς η διαφορική τάση που δημιουργείται μεταξύ των πλακών του πυκνωτή είναι αρκετά σημαντική, έως και αρκετά volts για υψηλά επίπεδα ήχου. Δεδομένης της πολύ υψηλής αντίστασης του κυκλώματος, χρειάζεται μόνο υψηλό κέρδος ρεύματος συνήθως. Το κέρδος τάσης παραμένει πρακτικά σταθερό. Στο σχήμα 5.25 παρατηρούμε την αρχή λειτουργίας του πυκνωτικού μικροφώνου πολωμένου με DC τάση από εξωτερική μπαταρία.



Σχήμα 5.25

Τα πυκνωτικά μικρόφωνα τύπου ραδιοφωνικών συχνοτήτων RF, έχουν ίδια δομή πυκνωτή με τα DC μικρόφωνα αλλά διαφέρουν ως προς την αρχή λειτουργίας. Τα RF μικρόφωνα, τροφοδοτούνται με μία σχετικά χαμηλούς πλάτους εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας RF, που παράγεται από έναν εξωτερικό ταλαντωτή χαμηλού θορύβου. Το σήμα από τον ταλαντωτή παρέχεται στο μικρόφωνο και γίνεται διαμόρφωσή του κατά πλάτος (AM, amplitude modulation) από τις αλλαγές της χωρητικότητας που δημιουργούν τα ηχητικά κύματα που φτάνουν στο διάφραγμα κάψουλας. Εναλλακτικά, η κάψουλα μπορεί να είναι μέρος ενός κυκλώματος συντονισμού που διαμορφώνει τη συχνότητα του σήματος ταλαντωτή (FM, frequency modulation). Οι τεχνικές αυτές της διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται ευρέως στη ραδιοφωνία γι αυτό και ονομάζουμε «RF»(radio-frequency) αυτά τα πυκνωτικά μικρόφωνα που λειτουργούν κατ' αυτό τον τρόπο. Η αποδιαμόρφωση του σήματος που παράγεται από το RF μικρόφωνο, δίνει ένα σήμα ακουστικής συχνότητας χαμηλού θορύβου με πολύ χαμηλή αντίσταση πηγής. Η απουσία μίας υψηλής τάσης πόλωσης επιτρέπει τη χρήση ενός διαφράγματος με χαλαρότερη μεμβράνη, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθεί ευρύτερη απόκριση συχνότητας. Η διαδικασία πόλωσης RF οδηγεί σε μια χαμηλότερη ηλεκτρική αντίσταση της κάψουλας. Αυτό είναι ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό καθώς τα μικρόφωνα RF μπορούν να λειτουργούν και σε υγρές καιρικές συνθήκες που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν προβλήματα στα DC μικρόφωνα με κακή μόνωση. Η σειρά «MKH» των μικρόφωνων της εταιρίας Sennheiser χρησιμοποιεί για παράδειγμα την τεχνική πόλωσης RF.

Τα πυκνωτικά μικρόφωνα καλύπτουν όλο το φάσμα χρήσεων από τηλεφωνικούς πομπούς έως φθηνά μικρόφωνα ομιλίας και μικρόφωνα ηχογράφησης υψηλής πιστότητας. Σε γενικές γραμμές παράγουν ένα σήμα υψηλής πιστότητας ήχου και για αυτό το λόγο είναι τώρα η δημοφιλής επιλογή σε εργαστήρια και στούντιο ηχογράφησης. Η εγγενής καταλληλότητα αυτής της τεχνολογίας οφείλεται στην πολύ μικρή μάζα διαφράγματος που πρέπει να μετακινηθεί από την πίεση του ηχητικού κύματος. Εν αντιθέσει, σε άλλους τύπους μικρόφωνου το ηχητικό κύμα πρέπει να ασκεί περισσότερη πίεση στο διάφραγμα της κάψουλας. Τα πυκνωτικά μικρόφωνα όμως απαιτούν πάντοτε μια πηγή ενέργειας που παρέχεται εξωτερικά, είτε μέσω των εισόδων του εξοπλισμού όπως η τροφοδοσία ονόματι «phantom power» των 48Vdc, ή από μια μικρή μπαταρία. Η εξωτερική τάση είναι απαραίτητη για ανάπτυξη τάσης μεταξύ των πλακών του πυκνωτή. Είναι επίσης απαραίτητη για να τροφοδοτήσει τα ενσωματωμένα ηλεκτρονικά στοιχεία μικρόφωνου που αναλαμβάνουν προσαρμογή αντίστασης στην περίπτωση των «electret» και DC-πολωμένων μικρόφωνων ή την αποδιαμόρφωση σήματος στην περίπτωση των RF / HF μικροφώνων. Τα πυκνωτικά μικρόφωνα είναι επίσης διαθέσιμα με δύο διαφράγματα που είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα για παροχή μιας σειράς προτύπων κατευθυντικότητας. Θα δούμε σε λίγο αυτά τα πρότυπα.

Στα θετικά των πυκνωτικών μικροφώνων συγκαταλέγεται το ευρύ και σχετικά επίπεδο φάσμα συχνοτήτων της απόκρισής τους και η υψηλή ευαισθησία τους. Όμως η χρήση εξωτερικής πηγής κάνει λίγο δυσκολότερη την υλοποίηση του κυκλώματος ενίσχυσής τους και δημιουργεί θόρυβο αν η DC τάση δεν είναι καλά σταθεροποιημένη. Επίσης, θόρυβοι κρουστικού τύπου μεγάλης έντασης ακούγονται από τα πυκνωτικά μικρόφωνα όταν ο ηχολήπτης ανοίξει ή κλείσει την τροφοδοσία τους χωρίς να έχει πρώτα κατεβάσει την ένταση (mute) στα αντίστοιχα κανάλια του προενισχυτή ή της κονσόλας μείξης.

Στις επόμενες ενότητες θα δούμε διάφορους άλλους τύπους πυκνωτικών μικροφώνων που χρησιμοποιούνται ευρέως όπως το μικρόφωνο ηλεκτρίτη (electret microphone).

#### 5.7.4 Μικρόφωνο λυχνίας:

Ένα μικρόφωνο λυχνίας είναι ένα μικρόφωνο πυκνωτικό που χρησιμοποιεί έναν ενισχυτή λυχνίας, αντί για ένα κύκλωμα με τρανζίστορ, για την προσαρμογή της αντίστασής του και του επιπέδου του σήματος εξόδου. Τα μικρόφωνα λυχνίας χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα από καλλιτέχνες λόγω του ιδιαίτερου ήχου που παράγουν με το ελαφρώς μειωμένο φάσμα απόκρισης συχνοτήτων, το θόρυβο βολής της λυχνίας και τις αρμονικές συχνότητες που εμφανίζουν έχοντας υψηλότερα ποσοστά THD παραμόρφωσης. Το 1948, το μοντέλο μικροφώνου U47 της Neumann εμφανίστηκε στην αγορά και διανεμόταν από την Telefunken. Ενσωμάτωνε την κάψουλα τύπου M7 με διάφραγμα πάχους μόλις 0,012 χιλιοστών και τον προενισχυτή λυχνίας VF-14 που χρησιμοποιούσε μία προπολεμική πέντοδο λυχνία συνδεδεμένη ώστε να λειτουργεί ως τρίοδος. Το εύρος συχνοτήτων του ήταν από 35-15000Hz. Είχε συνολική αρμονική παραμόρφωση 0,8% στο 1kHz και σε ένταση ήχου έως 110dB. Η αντίσταση εξόδου ήταν 50 ή 200Ω και η λυχνία τροφοδοτούταν με τάση ανόδου 105Volts dc και 40mA ρεύματος. Στο σχήμα 5.26 βλέπουμε το μοντέλο μικροφώνου U47.



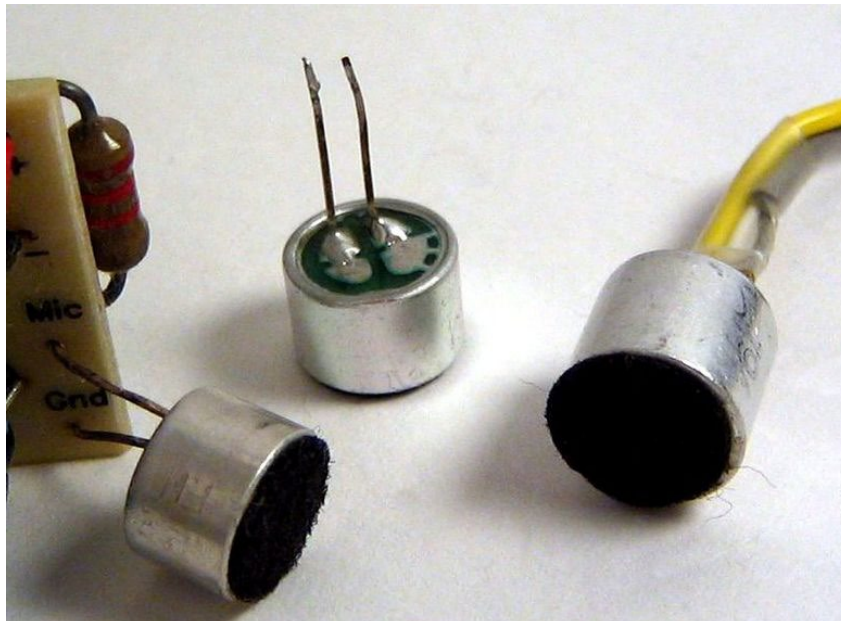
Σχήμα 5.26

#### 5.7.5 Μικρόφωνο ηλεκτρίτη (Electret)

Ένα μικρόφωνο τύπου electret ή ηλεκτρίτη είναι ένα είδος ηλεκτροστατικού πυκνωτή που εξαλείφει την ανάγκη για παροχή ρεύματος πόλωσης χρησιμοποιώντας ένα μόνιμα μαγνητικά φορτισμένο υλι-

κό. Ο ηλεκτρίτης (electret) είναι ένα σταθερό διηλεκτρικό υλικό με μια μόνιμα ενσωματωμένη κατανομή στατικό ηλεκτρικού φορτίου η οποία, λόγω της υψηλής αντοχής και χημική σταθερότητα του υλικού, δεν θα αποσυντεθεί για εκατοντάδες χρόνια. Οι ηλεκτρίτες συνήθως παράγονται από την τήξη ενός κατάλληλου διηλεκτρικού υλικού όπως ένα πλαστικό ή κερί και στη συνέχεια αφήνοντάς το να στερεοποιηθεί ξανά παρουσία ενός ισχυρού ηλεκτροστατικού πεδίου. Τα μόρια του διηλεκτρικού διατάσσονται προς την κατεύθυνση του ηλεκτροστατικού πεδίου, παράγοντας μια μόνιμη ηλεκτροστατική πόλωση. Στα σύγχρονα μικρόφωνα electret χρησιμοποιείται PTFE (Polytetrafluoroethylene) πλαστικό, είτε σε μορφή φιλμ ή διαλυτής ουσίας για την κατασκευή τους.

Τα υλικά τύπου ηλεκτρίτη είναι γνωστά από τη δεκαετία του 1920 και προτάθηκαν ως στοιχεία για κατασκευή πυκνωτικού μικρόφωνου αρκετές φορές, κάτι που θεωρήθηκε ανέφικτο μέχρι να εφευρεθεί ο ηλεκτρίτης τύπου φύλλου (film) στα Bell Laboratories το 1962 από τον Gerhard Sessler και James West, χρησιμοποιώντας ένα λεπτό επιμεταλλωμένο φύλλο Teflon. Έκτοτε το μικρόφωνο electret έγινε το πιο κοινά χρησιμοποιούμενο σε πολλές εφαρμογές, από υψηλής ποιότητας μικρόφωνα ηχογράφησης έως μικρόφωνα πέτου (Lavalier) και ενσωματωμένα μικρόφωνα σε μικρές συσκευές ή τηλέφωνα. Περισσότερες από 100,000,000 μονάδες electret μικροφώνων παράγονται πλέον ετησίως. Στο σχήμα 5.27 παρατηρούμε διάφορες μικρές electret κάψουλες μικροφώνου που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές:



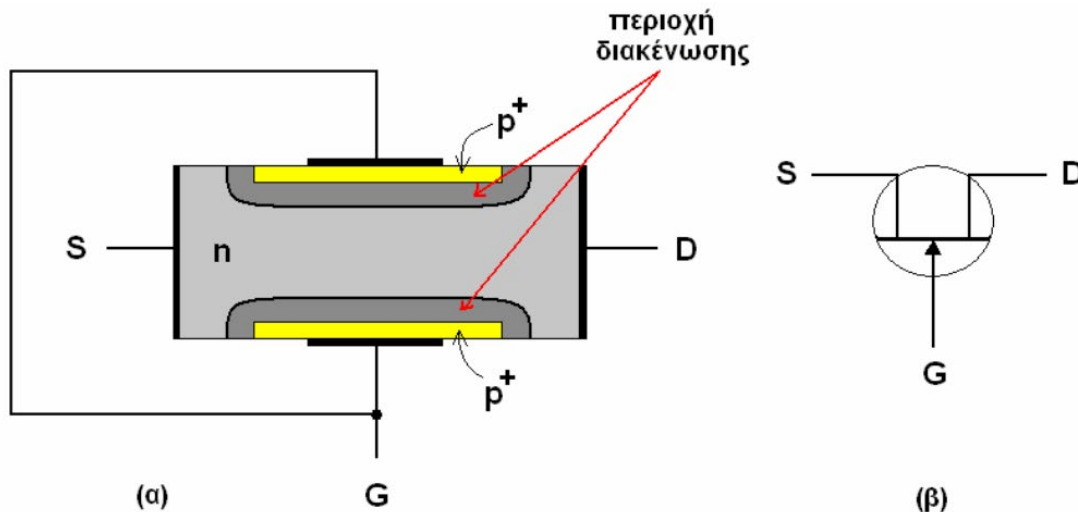
Σχήμα 5.27

Το electret τύπου διαφράγματος (Foil) μικρόφωνο επινοήθηκε στα Bell Labs το 1962, και από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 η συσκευή αντιπροσώπευε περισσότερο από το ένα τρίτο της παραγωγής όλων των εμπορικών μικρόφωνων υψηλής πιστότητας. Foil-μικρόφωνα ηλεκτρίτη επίσης χρησιμοποιούνται σε βοηθήματα ακοής, στα μικρόφωνα πέτου, σε συσκευές για τη μετάδοση ή καταγραφή ήχου με υπολογιστή. Το 1977, ένα νέο χειριστήριο που περιέχει electret μικρόφωνο έγινε μέρος του προτύπου μεγάλων «4A» και τέθηκε στη διάθεση των πελατών σε όλες τις τηλεφωνικές εταιρείες που χρησιμοποιούσαν το Bell σύστημα.

Τα μικρόφωνα Foil τύπου δεν απαιτούν ξεχωριστή μπαταρία τροφοδοσίας και είναι μηχανικά απλούστερα από ό,τι τα συμβατικά πυκνωτικά μικρόφωνα. Έχουν επίσης υψηλότερη χωρητικότητα, υψηλή ευαισθησία, καλή απόκριση συχνοτήτων, χαμηλή παραμόρφωση, και προστασία από εξωτερικά ηλεκτρικά, μαγνητικά πεδία και δονήσεις. Οι ιδιότητές τους δίνουν επίσης στους σχεδιαστές μια μεγάλη ευελιξία και αυτά τα μικρόφωνα παρουσιάζουν εξαιρετική κατευθυντικότητα. Το φύλλο ηλεκτρίτη παρέχει ένα βασικό στοιχείο για την κατασκευή μικροφώνων υψηλής ποιότητας, αντοχής, χαμηλού κόστους, μικρού μεγέθους και ανθεκτικά σε παρεμβολές. Έχουν επίσης ευρεία δυναμική περιοχή και

απόκριση συχνοτήτων.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι μικροφώνου electret, που διαφέρουν ανάλογα με τον υλικό ηλεκτρίτη που χρησιμοποιείται. Σε πολλά μικρόφωνα χαμηλού κόστους χρησιμοποιείται το ίδιο το φιλμ του διηλεκτρικού ως διάφραγμα χωρίς όμως να δίνει καλή απόδοση. Στα τύπου «Back electret» μικρόφωνα, μία διηλεκτρική μεμβράνη εφαρμόζεται στην πίσω πλάκα της κάψουλας του μικροφώνου και το διάφραγμα κατασκευάζεται από ένα αφόρτιστο υλικό, το οποίο μπορεί να είναι μηχανικά πιο κατάλληλο. Στα νεότερα «front electret» τύπου μικρόφωνα, η οπίσθια πλάκα απομακρύνεται από το σχεδιασμό, και ο συμπυκνωτής σχηματίζεται από το διάφραγμα και την εσωτερική επιφάνεια της κάψουλας. Η μεμβράνη ηλεκτρίτη προσκολλάται στο εσωτερικό μπροστινό κάλυμμα και το επιμεταλλωμένο διάφραγμα συνδέεται με την είσοδο ενός τρανζίστορ επίδρασης πεδίου FET. Κάθε αφόρτιστο αγώγιμο φιλμ μπορεί να χρησιμοποιείται ως διάφραγμα και σε αυτά τα μικρόφωνα. Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου είναι ηλεκτρονικά στοιχεία στα οποία οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ενός είδους (οι φορείς πλειονότητας ενός αγώγιμου διαύλου που σχηματίζεται) σε αντίθεση με τα διπολικά τρανζίστορ όπου συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό ρεύμα τόσο οι φορείς πλειονότητας όσο και οι φορείς μειονότητας. Οι φορείς αυτοί είναι ελεύθεροι να κινούνται σε μια περιοχή (κανάλι, διάυλος) που οριοθετείται από τις περιοχές φορτίων χώρου (διακένωσης) δύο ανάστροφα πολωμένων  $p_n$  επαφών. Το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου του σχήματος 5.28 αποτελείται από έναν κρύσταλλο πυριτίου τύπου  $n$  στις δύο πλευρές του οποίου έχουν σχηματιστεί  $p$ -περιοχές μεγάλης συγκέντρωσης προσμίξεων ( $p^+$ ). Ένα τέτοιο FET ονομάζεται  $n$ -τύπου JFET. Οι δύο αυτές περιοχές βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους και καταλήγουν σε έναν ακροδέκτη που ονομάζεται πύλη. Τα δύο άκρα του κρυστάλλου υπάρχουν δύο ακροδέκτες. Τα δύο άκρα του κρυστάλλου είναι εν γένει ισοδύναμα μεταξύ τους (σε αντίθεση με το διπολικό τρανζίστορ όπου ο εκπομπός διαφέρει από το συλλέκτη στα επίπεδα προσμίξεων). Στους ακροδέκτες του FET αποδίδεται ονομασία ανάλογα με τη συνδεσμολογία. Έτσι, το άκρο στο οποίο κατευθύνονται οι φορείς πλειονότητας ονομάζεται απαγωγός (Drain) και καταδεικνύεται με το γράμμα  $D$  ενώ το άλλο άκρο ονομάζεται πηγή (Source) και καταδεικνύεται με το γράμμα  $S$ .



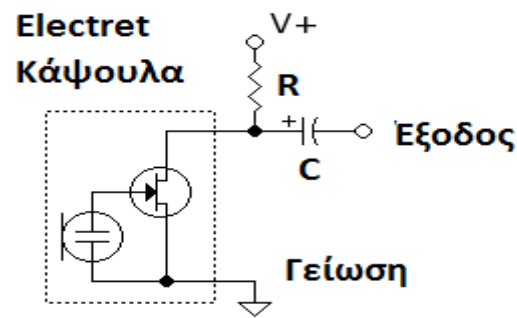
**JFET n-διαύλου:**

**(α) δομή,**

**(β) σύμβολο**

Σχήμα 5.28

Στο σχήμα 5.29 βλέπουμε ένα κύκλωμα electret μικροφώνου με FET. Ένα τυπικό κύκλωμα προενισχυτή μικροφώνου electret χρησιμοποιεί ένα FET τρανζίστορ σε διάταξη κοινής πηγής. Η δύο ακροδεκτών κάψουλα electret περιέχει ένα ενσωματωμένο FET που πρέπει να τροφοδοτείται εξωτερικά από την τάση τροφοδοσίας  $V_+$ , τιμές περί το 1,5Volt συνήθως. Η αντίσταση καθορίζει την αντίσταση εξόδου και το κέρδος του κυκλώματος. Το ακουστικό σήμα εμφανίζεται στην έξοδο μετά από τον αποκλεισμό της DC συνιστώσας της τάσης από τον πυκνωτή  $C$ .



Σχήμα 5.29

Ας δούμε σε αυτό το σημείο ένα παράδειγμα electret μικροφώνου με ενσωματωμένο FET και τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού.

Μοντέλο: CMA-4544PF-W της CUI inc.

Περιγραφή: πυκνωτικό μικρόφωνο electret

Κατευθυντικότητα: πανκατευθυντικό

Ευαισθησία (S):  $-44 \pm 2$  dB  $f = 1$  KHz,  $0$ dB  $1$ PA =  $1$ V / Pa

Μείωση της ευαισθησίας ( $\Delta S$ -Vs):  $-3$  dB  $f = 1$  KHz,  $1$ PA Vs =  $3,0 \sim 2,0$  V dc

Τάση λειτουργίας:  $3$  V DC (ονομαστική),  $10$  V DC μέγιστη (max.)

Αντίσταση εξόδου ( $Z_{out}$ ):  $2.2$  K  $\Omega$   $f = 1$  KHz,  $1$ PA

Συχνότητα λειτουργίας (st):  $20 \sim 20.000$  Hz

Κατανάλωση ρεύματος (IDSS):  $0.5$  mA max με Vs =  $3,0$  V dc τάση τροφοδοσίας,  $R_L = 2.2$ K  $\Omega$  αντίσταση φορτίου

Λόγος σήματος προς θόρυβο (S / N):  $60$  dBA ,  $f = 1$  KHz,  $1$ PA, A-σταθμισμένη

Θερμοκρασία λειτουργίας:  $-20 \sim + 70$  ° C

Θερμοκρασία αποθήκευσης :  $-20 \sim + 70$  ° C

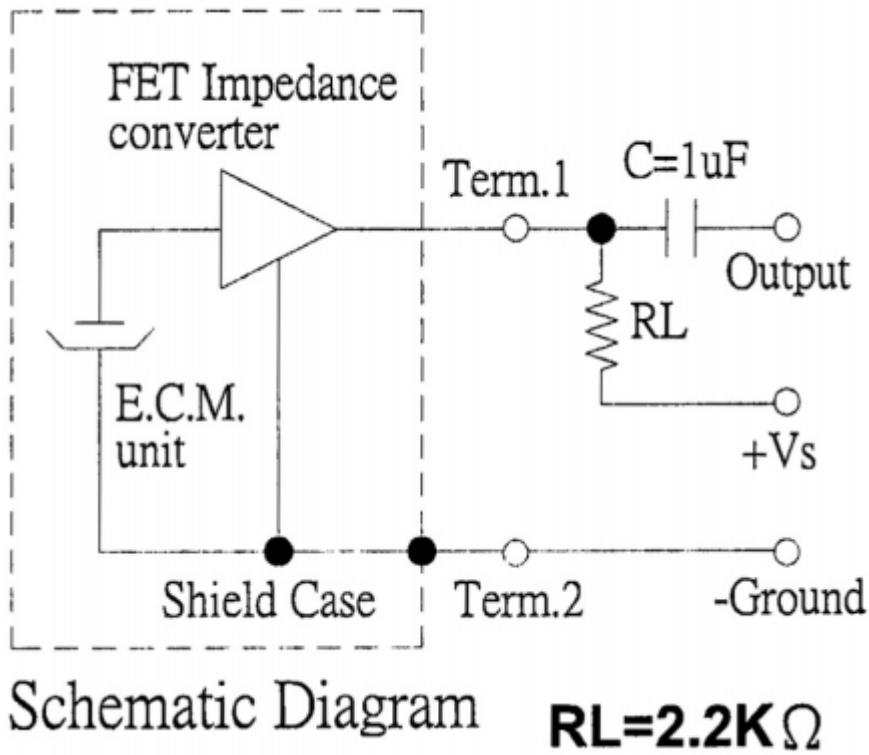
Διαστάσεις:  $\varnothing 9.7$  x  $4,5$  mm

Βάρος :  $0,80$  g max.

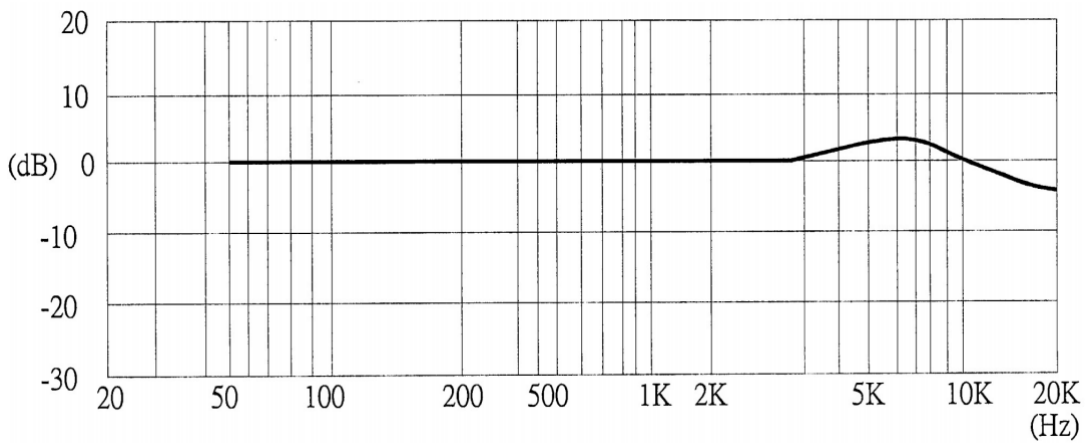
Υλικό: Al (αλουμίνιο)

Τερματικά τύπου pin (συγκόλλησης με το χέρι μόνο)

Προδιαγραφές RoHS: Ναι



Σχήμα 5.30 Κύκλωμα μέτρησης



Σχήμα 5.31 Καμπύλη απόκρισης συχνότητας

Παρατηρούμε ότι το εν λόγω μικρόφωνο έχει μία ικανοποιητική απόκριση συχνότητων, πρακτικά επίπεδη στις συχνότητες ομιλίας 50-3000Hz που μας ενδιαφέρουν συνήθως. Μία μέγιστη ενίσχυση κατά 3dB περίπου εμφανίζεται σε συχνότητες περί τα 7,5Khz και μέγιστη απόσβεση κατά -3dB παρουσιάζεται στα 20kHz.



### 5.7.6 Μικρόφωνα πέτου (Lavalier)

Τα μικρόφωνα πέτου είναι μικρά σε μέγεθος, ελαφριά (π.χ. το 647A της ElectroVoice ήταν μόλις 57 γραμμάρια) και παρουσιάστηκαν αρχικά το 1932. Τα περισσότερα πλέον χρησιμοποιούν electret και δυναμικά μικρόφωνα όμως έχουν κατασκευαστεί και μικρόφωνα άνθρακα πέτου. Χρησιμοποιούνται ευρέως στην τηλεόραση και σε ομιλίες λόγω του μικρού τους μεγέθους και της ελευθερίας κινήσεων που παρέχουν. Συνήθως χρησιμοποιούν ένα ειδικό περίβλημα που παρέχει ήπια ενίσχυση των υψηλών συχνοτήτων καθώς υπάρχει μικρή απώλεια σε αυτή την περιοχή λόγω της τοποθέτησης του μικροφώνου σε απόσταση από το στόμα του ομιλητή. Μια ενίσχυση κατά περίπου 6 dB στις συχνότητες 6-8 kHz θεωρείται ευεργετική για την αντιστάθμιση της απώλειας της καθαρότητας της φωνής όταν το μικρόφωνο τοποθετείται στο στήθος. Επίσης, μία ενίσχυση μερικών ντεσιμπέλ σε συχνότητες 10-15 kHz προτιμάται όταν το μικρόφωνο τοποθετείται στα μαλλιά πάνω από το μέτωπο. Αυτή η μέθοδος για την ενίσχυση στις υψηλές συχνότητες δεν επιδεινώνει το θόρυβο, όπως θα έκανε η ηλεκτρονική ισοστάθμιση και ενίσχυση. Στο σχήμα 5.31 βλέπουμε μία τηλεφωνήτρια που φοράει στο λαιμό της ένα από τα πρώτα μικρόφωνα πέτου της δεκαετία του 1930:



Σχήμα 5.31

### 5.7.7 Δυναμικά μικρόφωνα

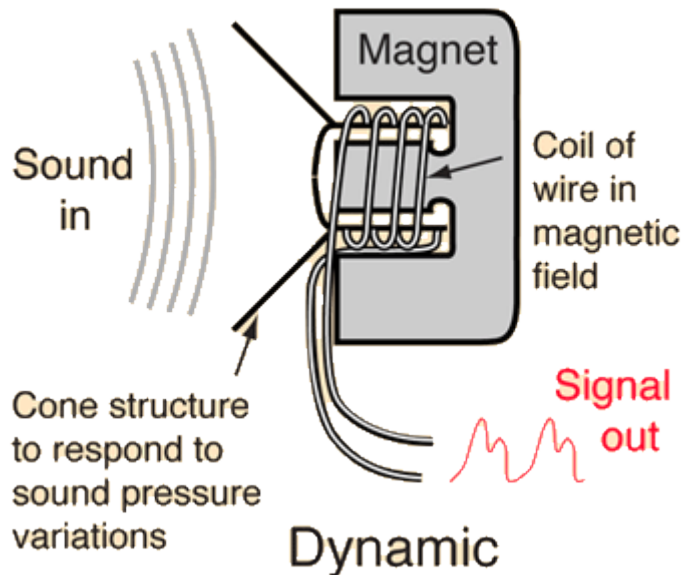
Τα δυναμικά μικρόφωνα λειτουργούν με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Είναι σχετικά φθηνά και ανθεκτικά στην υγρασία. Αυτό, σε συνδυασμό με το δυναμικά υψηλό κέρδος τους χωρίς προβλήματα θετικής ανάδρασης, τα καθιστά ιδανικά για χρήση σε ζωντανή μουσική και θέατρο ή οποιαδήποτε εφαρμογή επεξεργασίας ήχου γίνεται σε πραγματικό χρόνο.

Το πρόβλημα της θετικής ανάδρασης ή ανατροφοδότησης εμφανίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις χρήσης μικροφώνου όπου ο ομιλητής θέλει να ακούει ταυτόχρονα τη φωνή του. Αν η φωνή του λαμβάνεται από ένα μικρόφωνο και μεταδίδεται ενισχυμένη πίσω σε αυτόν από ηχεία, υπάρχει ένα μονοπάτι θετικής ανατροφοδότησης του ηχητικού σήματος. Αν η ενίσχυση του σήματος έχει μεγάλο κέρδος και ένταση, τότε υπάρχει πιθανότητα το ηχοσύστημα να πέσει σε αστάθεια και να εκτελεί αμείωτες ταλαντώσεις. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται συντονισμός και στην ορολογία των μηχανικών ήχου καλείται «feedback» αφού προκαλείται από θετική ανατροφοδότηση.

Τα δυναμικά μικρόφωνα φημίζονται για την ανθεκτικότητά τους απέναντι σε φαινόμενα feedback σε μεγάλες εντάσεις όπου η χρήση πυκνωτικού μικροφώνου θα ήταν προβληματική. Στο μαγνητο-δυναμικό, κοινώς «δυναμικό» μικρόφωνο, τα ηχητικά κύματα προκαλούν την κίνηση ενός λεπτού μεταλλι-

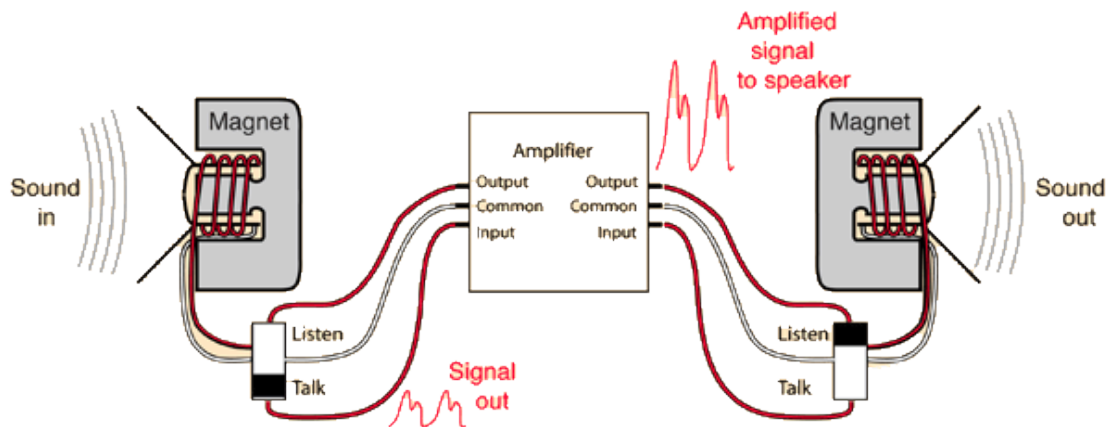
κού διαφράγματος που είναι μηχανικά συνδεδεμένο με ένα πηνίο. Ένας μόνιμος μαγνήτης παράγει το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο που περιβάλλει το πηνίο. Η κίνηση του πηνίου εντός αυτού του πεδίου προκαλεί τη ροή ρεύματος. Μια ενιαία δυναμική μεμβράνη δεν ανταποκρίνεται γραμμικά σε όλες τις συχνότητες ήχου. Ορισμένα μικρόφωνα για το λόγο αυτό χρησιμοποιούν πολλαπλές μεμβράνες για τα διάφορα τμήματα του φάσματος του ήχου και στη συνέχεια, συνδυάζουν τα προκύπτοντα σήματα. Συνδυάζοντας τα πολλαπλά σήματα σωστά είναι δύσκολο και τα μικρόφωνα που κάνουν σωστό συνδυασμό είναι σπάνια και συνήθως ακριβά. Υπάρχουν από την άλλη πλευρά πολλά δυναμικά μικρόφωνα που στοχεύουν προς την κατεύθυνση απομονωμένων τμημάτων του ακουστικού φάσματος. Το μοντέλο D 112 της AKG, για παράδειγμα, έχει σχεδιαστεί για απόκριση χαμηλών συχνοτήτων και όχι πρίμων. Ένας μηχανικός ήχου χρησιμοποιεί συνήθως διάφορα είδη δυναμικών μικροφώνων ταυτόχρονα για να λάβει το καλύτερο ηχητικό αποτέλεσμα.

Οι αρχές είναι οι ίδιες με εκείνες των μεγαφώνων. Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι το ρεύμα που παράγεται από την κίνηση του διαφράγματος και η ποσότητα του ρεύματος προσδιορίζεται από την ταχύτητα της εν λόγω κίνησης. Για αυτό το λόγο, το είδος του δυναμικού μικροφώνου είναι ευαίσθητο στην ταχύτητα του ηχητικού κύματος. Στο σχήμα 5.32 βλέπουμε την αρχή λειτουργία του δυναμικού μικροφώνου:



Σχήμα 5.32

Η γεωμετρία ενός δυναμικού μικροφώνου είναι σαν εκείνη ενός μικροσκοπικού μεγάφωνου, και αυτό δεν είναι απλά μια σύμπτωση. Ένα μικρό μεγάφωνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα δυναμικό μικρόφωνο και το γεγονός αυτό αξιοποιείται στην κατασκευή μικρών συστημάτων ενδοεπικοινωνίας. Ανάλογα με τη θέση του διακόπτη Ομιλίας/Ακοής (Talk/Listen), η συσκευή σε κάθε άκρο του συστήματος ενδοεπικοινωνίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα μικρόφωνο ή ως ένα ηχείο. Φυσικά, αυτό δεν είναι μια διαδικασία υψηλής πιστότητας. Τα εμπορικά δυναμικά μικρόφωνα έχουν κυρίως βελτιστοποιηθεί για χρήση σε ηχοληψία και όχι για αναπαραγωγή ήχου όπως τα μεγάφωνα. Στο σχήμα 5.33 παρατηρούμε την αρχή λειτουργίας ενός συστήματος ενδοεπικοινωνίας με δυναμικά μικρόφωνα/μεγάφωνα:



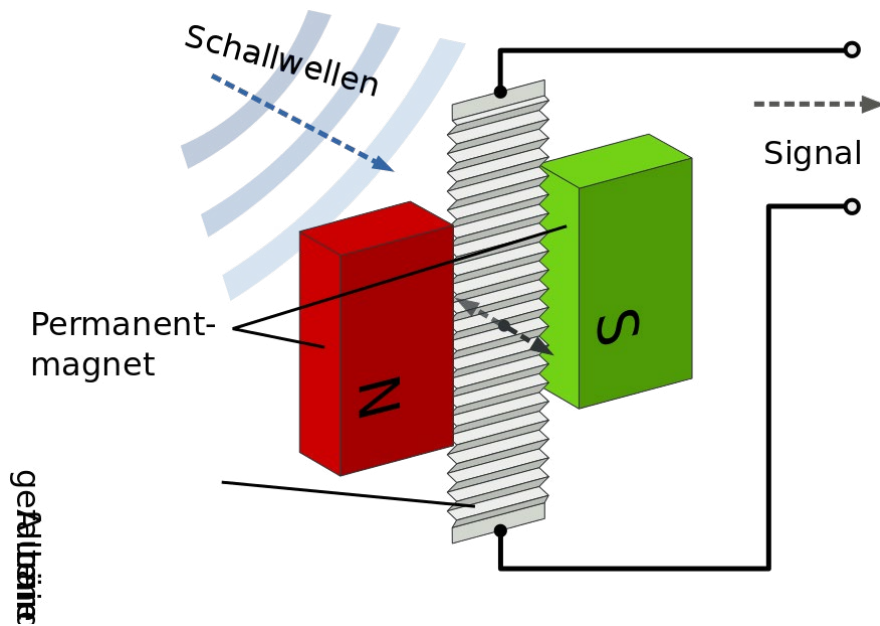
In a simple intercom, the same device can be used as a dynamic microphone and a dynamic loudspeaker.

Σχήμα 5.33

### 5.7.8 Μικρόφωνο τύπου Ribbon

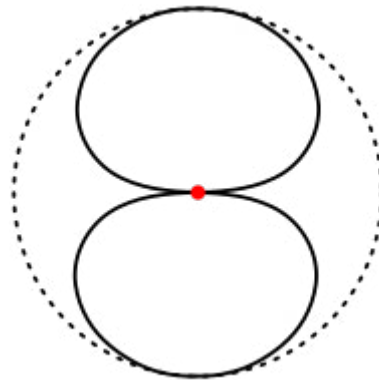
Στις αρχές του 1920, οι Δρ. Walter H. Schottky και Erwin Gerlach συν-εφηύραν το πρώτο ribbon(ταινίας ή κορδέλας) μικρόφωνο. Με τη χρήση του κυκλώματος προς την αντίθετη κατεύθυνση, εφηύραν επίσης το πρώτο μεγάφωνο ταινίας. Μεγάφωνα ταινίας χρησιμοποιούνται και σήμερα κυρίως για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων όπως τα ribbon tweeters. Λίγα χρόνια αργότερα, ο Δρ Harry F. Olson της RCA άρχισε να αναπτύσσει ribbon μικρόφωνα που χρησιμοποιούν πηνία και μόνιμους μαγνήτες. Το μοντέλο RCA Photophone τύπου PB-31 κατασκευάστηκε και διατέθηκε εμπορικά το 1931. Επηρέασε σε μεγάλο βαθμό την καταγραφή ήχου και τη βιομηχανία ραδιοφωνικών μεταδόσεων. Πυκνωτικά μικρόφωνα της εποχής δεν μπορούσαν να συγκριθούν με το ribbon PB-31 ως προς την απόκριση συχνότητας.

Ένα μικρόφωνο ταινίας, επίσης γνωστό και ως μικρόφωνο κορδέλας ή ταχύτητας, είναι ένα είδος μικροφώνου που χρησιμοποιεί μια λεπτή ηλεκτρικά αγώγιμη κορδέλα αλουμίνιου, duraluminium ή nanofilm που τοποθετείται μεταξύ των πόλων ενός μαγνήτη. Η κίνηση του αέρα που ωθείται από το ηχητικό κύμα, κινεί τη μεταλλική κορδέλα στο μαγνητικό πεδίο. Η κίνηση αυτή δημιουργεί λόγω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μία τάση μεταξύ των άκρων της ταινίας η οποία είναι ανάλογη προς την ταχύτητά της. Για το λόγο αυτό, το μικρόφωνο ταινίας χαρακτηρίζεται ως μικρόφωνο «ταχύτητας». Στο σχήμα 5.34 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των μικροφώνων ταινίας:



Σχήμα 5.34

Τα μικρόφωνα κορδέλας είναι συνήθως διπλής κατεύθυνσης, που σημαίνει ότι λαμβάνουν τους ήχους εξίσου καλά από κάθε πλευρά τους. Το σχήμα κατευθυντικότητας της λήψης ενός μικροφώνου κορδέλας μοιάζει με το σχήμα του αριθμού «8» και γι αυτό ονομάζεται φιγούρα του οκτώ (figure of 8). Στο Σχήμα 5.35 βλέπουμε το αυτό το μοτίβο του μικροφώνου κορδέλας:



Σχήμα 5.35

Το πλεονέκτημα του μικροφώνου κορδέλας όταν παρουσιάστηκε ήταν ότι η ελαφριά ταινία είχε μια πολύ υψηλότερη φυσική συχνότητα συντονισμού από ό, τι τα υπάρχοντα διαφράγματα μικροφώνων της εποχής. Η συχνότητα συντονισμού της ταινίας ήταν πάνω από το ακουστικό φάσμα. Για αυτό το λόγο, το μικρόφωνο ταινίας είχε επίπεδη απόκριση σε υψηλές συχνότητες. Η τάση εξόδου των παλαιότερων μικροφώνων κορδέλας ήταν τυπικά αρκετά χαμηλή σε σύγκριση με ενός δυναμικού μικροφώνου. Τότε, ένας μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης χρησιμοποιούταν για να αυξήσει την τάση εξόδου και την αντίσταση εξόδου του μικροφώνου. Τα σύγχρονα μικρόφωνα κορδέλας δεν υποφέρουν από αυτό το πρόβλημα. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στην εξέλιξη των μαγνητών και σε πιο αποδοτικούς μετασχηματιστές. Τα σημερινά μικρόφωνα ταινίας έχουν επίπεδο τάσης εξόδου που μπορεί να υπερβαίνει το τυπικό επίπεδο της τάσης εξόδου δυναμικών μικροφώνων.

### 5.7.9 Πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο

Ένα μικρόφωνο με κρύσταλλο ή πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο χρησιμοποιεί για τη λειτουργία του το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού (piezoelectricity) και δεν διαθέτει πηνία και μαγνήτες όπως τα δυναμικά μικρόφωνα. Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών, κυρίως κρυσταλλικών υλικών αλλά και μερικών κεραμικών υλικών, να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική τάση/πίεση ή ταλάντωση. Το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με τη μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Επίσης, ο όρος περιλαμβάνει και το αντίστροφο φαινόμενο, κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται, όταν βρεθεί υπό ηλεκτρική τάση. Ο πιεζοηλεκτρισμός ανακαλύφθηκε από τον Πιερ Κιουρί το 1880. Οφείλεται σε κρυσταλλικές ασυμμετρίες. Παραδείγματα υλικών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ), το αλάτι Rochelle ή Seignette (τρυγικό καλιονάτριο,  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), το ADP (δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), το ένυδρο θειικό λίθιο, ( $\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , το συνθετικό πολυμερές PVDF (polyvinylidene difluoride) και άλλα.

Ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό μπορεί να μετατρέψει δονήσεις σε ηλεκτρικό σήμα τάσης. Ένα παράδειγμα αυτού είναι το τρυγικό καλιονάτριο, το οποίο είναι ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο που λειτουργεί ως ένα αισθητήριο, τόσο ως μικρόφωνο αλλά και ως συστατικό ηχείων, συνήθως για υψηλές συχνότητες. Τα κρυσταλλικά μικρόφωνα δίνονταν αρχικά μαζί με εξοπλισμό που χρησιμοποιούσε λυχνίες, όπως οι πρώτες οικιακές συσκευές εγγραφής ταινίας. Η υψηλή αντίσταση εξόδου τους ταίριαζε με την υψηλή αντίσταση εισόδου (συνήθως περί τα 10 MΩ) του σταδίου εισόδου των λυχνιών κενού. Ήταν δύσκολο να ταίριαζον την αντίσταση αυτή με συσκευές τρανζίστορ που παρουσιάζουν χαμηλότερη αντίσταση εισόδου. Γι αυτό το λόγο, αντικαταστάθηκαν γρήγορα από δυναμικά μικρόφωνα για ένα διάστημα και αργότερα από πυκνωτικά μικρόφωνα. Η υψηλή αντίσταση του μικροφώνου κρυστάλλου το έκανε πολύ ευαίσθητο σε θορύβους. Οι θόρυβοι λαμβάνονταν ως παρεμβολή τόσο από το ίδιο το μικρόφωνο όσο και από το καλώδιο σύνδεσης με τον εξοπλισμό καταγραφής ήχου.

Τους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς χρησιμοποιούν συχνά οι εταιρίες ως μικρόφωνα επαφής για την ενίσχυση του ήχου από ακουστικά μουσικά όργανα, τύμπανα και κρουστά. Επίσης χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων όπως συναγερμοί και τηλεχειρισμοί καθώς και για την καταγραφή ήχου σε δύσκολα περιβάλλοντα, όπως υποβρυχίως κάτω από υψηλή πίεση. Κρύσταλλοι χρησιμοποιούνται κατά κανόνα και στις ακουστικές κιθάρες και συνήθως τοποθετούνται κάτω από τη γέφυρα μιας κιθάρας που έρχεται σε μηχανική επαφή με τις χορδές. Έτσι, ο κρύσταλλος λαμβάνει απευθείας τις δονήσεις που παράγονται από την κίνηση των χορδών.

Στο σχήμα 5.36 απεικονίζεται ένα τυπικό πιεζοηλεκτρικό στοιχείο που χρησιμοποιείται σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές σήμερα ως μικρόφωνο ή ως μεγάφωνο υψηλών συχνοτήτων:



Σχήμα 5.36

### 5.7.10 Μικρόφωνο οπτικών ινών

Ένα μικρόφωνο οπτικών ινών μετατρέπει ακουστικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα ανιχνεύοντας τις αλλαγές της έντασης του φωτός, αντί για ανίχνευση αλλαγών στη χωρητικότητα ή στα μαγνητικά πεδία όπως γίνεται στα περισσότερα συμβατικά μικρόφωνα.

Κατά τη λειτουργία του, το φως από μία πηγή λέιζερ οδεύει μέσω μιας οπτικής ίνας και φωτίζει την επιφάνεια ενός ανακλαστικού διαφράγματος. Οι ηχητικές δονήσεις που κινούν της επιφάνεια του διαφράγματος ρυθμίζουν την ένταση του φωτός που ανακλάται από το διάφραγμα σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Το διαμορφωμένο φως μεταδίδεται τότε μέσω μιας δεύτερης οπτικής ίνας σε ένα ανιχνευτή φωτός. Ο ανιχνευτής μετασχηματίζει την ένταση του διαμορφωμένου φωτός σε αναλογικό σήμα ή ψηφιακή πληροφορία ήχου. Τα μικρόφωνα οπτικών ινών διαθέτουν υψηλό δυναμικό εύρος και εύρος απόκρισης συχνοτήτων. Η απόδοσή τους είναι παρόμοια με τα καλύτερα συμβατικά μικρόφωνα υψηλής πιστότητας.

Τα μικρόφωνα οπτικών ινών δεν επηρεάζονται από ηλεκτρικά, μαγνητικά, ηλεκτροστατικά ή ραδιοενεργά πεδία. Έχουν επομένως προστασία από EMI / RFI (electromagnetic/ radiofrequency interference). Ο σχεδιασμός του μικροφώνου οπτικών ινών είναι επομένως ιδανικός για χρήση σε περιοχές όπου τα συμβατικά μικρόφωνα είναι αναποτελεσματικά ή επικίνδυνα, όπως το εσωτερικό των βιομηχανικών στροβίλων ή στη μαγνητική τομογραφία (MRI).

Τα μικρόφωνα οπτικών ινών είναι ανθεκτικά στις περιβαλλοντικές αλλαγές, στη θερμότητα και την υγρασία. Ένα μικρόφωνο οπτικό μπορεί να παραχθεί για οποιοδήποτε χρήση κατευθυντικότητας ή σύνθετης αντίστασης εξόδου. Η απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής του μικροφώνου και του ανιχνευτή φωτός του μπορεί να είναι μέχρι και αρκετά χιλιόμετρα χωρίς την ανάγκη για οποιοδήποτε ενίσχυση λόγω των πολύ χαμηλών απωλειών της ίνας, περί το 1 dB ανά χιλιόμετρο για φως μήκους κύματος 1300nm. Αυτό καθιστά τα μικρόφωνα οπτικών ινών κατάλληλα για μετάδοση ήχου σε μεγάλες αποστάσεις, βιομηχανική χρήση, παρακολούθηση παραμέτρων συστημάτων και υψηλής πιστότητας ηχογραφήσεις. Χρησιμοποιούνται επίσης σε πολύ συγκεκριμένους τομείς εφαρμογών, όπως για την παρακολούθηση υπόηχων και σε συστήματα ακύρωσης θορύβου (noise cancelling). Οι οπτικές ίνες γενικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολυανακαλικά ψηφιακά συστήματα ήχου όπως αυτά του οικιακού κινηματογράφου. Στο σχήμα 5.37 βλέπουμε το μικρόφωνο οπτικών ινών Optoacoustics 1140:



Σχήμα 5.38

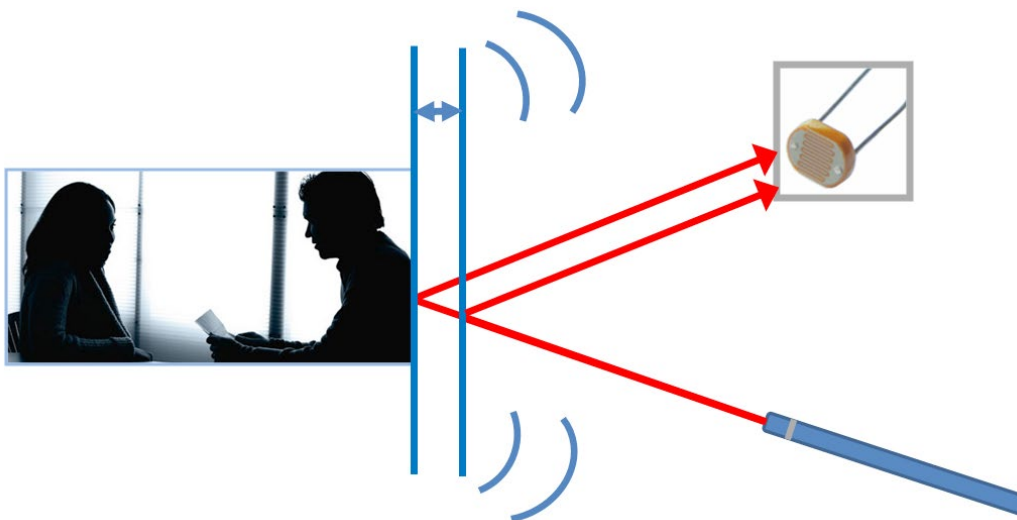
### 5.7.11 Μικρόφωνο λέιζερ

Τα μικρόφωνα λέιζερ συχνά απεικονίζονται σε ταινίες του κινηματογράφου ως μικροσυσκευές (gadgets) των κατάσκοπων, επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λήψη ήχου από μεγάλη απόσταση. Μία δέσμη λέιζερ στοχεύει στην επιφάνεια ενός παραθύρου ή άλλη επίπεδη επιφάνεια που

επηρεάζεται από ηχητικά κύματα. Οι δονήσεις αυτής της επιφάνειας αλλάζουν τη γωνία κατά την οποία η δέσμη λέιζερ ανακλάται και η κίνηση της κηλίδας λέιζερ από τη δέσμη επιστροφής ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε ένα σήμα ήχου.

Σε μια πιο περίπλοκη και δαπανηρή υλοποίηση, το επιστρεφόμενο φως χωρίζεται και τροφοδοτείται σε ένα συμβολόμετρο που ανιχνεύει την κίνηση της επιφάνειας από τις αλλαγές στο μήκος της οπτικής διαδρομής της ανακλώμενης δέσμης. Η εφαρμογή αυτή όμως απαιτεί ένα εξαιρετικά σταθερό λέιζερ και οπτικό εξοπλισμό μεγάλης ακριβείας.

Ένας νέος τύπος μικροφώνου λέιζερ είναι εκείνος που χρησιμοποιεί μια δέσμη λέιζερ και καπνό ή ατμό για την ανίχνευση ηχητικών δονήσεων στον αέρα. Στις 25 Αυγούστου του 2009, το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ΗΠΑ 7.580.533 εκδίδεται και αναφέρεται σε ένα μικρόφωνο που βασίζεται σε ένα ζεύγος λέιζερ-φωτοκύτταρου και απαιτεί για τη χρήση του ένα κινούμενο ρεύμα καπνού ή ατμού στη διαδρομή της δέσμης λέιζερ. Τα ηχητικά κύματα πίεσεως προκαλούν διαταραχές στον καπνό που με τη σειρά τους μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στην ποσότητα του φωτός λέιζερ που φθάνει στον ανιχνευτή φωτός. Ένα πρωτότυπο της συσκευής αυτής επιδείχθηκε κατά την 127η συνάντηση της AES (Audio Engineering Society) στη Νέα Υόρκη στις 9-12 Οκτωβρίου 2009. Στο σχήμα 5.39 απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας του μικροφώνου laser:

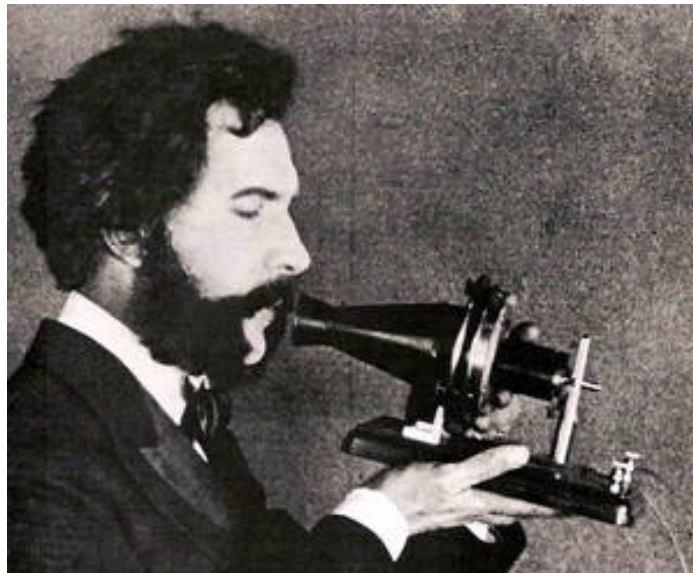


Σχήμα 5.39

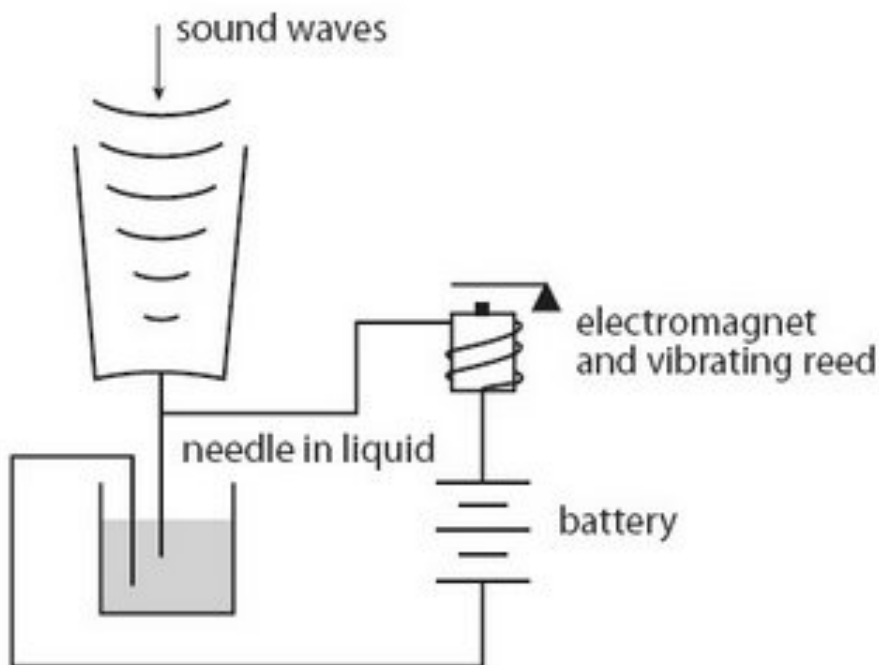
### 5.7.12 Μικρόφωνο υγρού ή νερού

Τα πρώτα μικρόφωνα δεν παρήγαγαν κατανοητό σήμα ομιλίας, έως ότου ο Αλεξάντερ Γκράχαμ Μπελ έκανε βελτιώσεις συμπεριλαμβανομένου ενός μεταβλητής αντίστασης μικρόφωνου με εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση πόλωσης που ονομάστηκε «υγρός πομπός» (σχήμα 5.40α). Ο υγρός πομπός του Bell αποτελούταν από ένα μεταλλικό κύπελλο και ένα δοχείο γεμάτο με νερό που εμπεριείχε μία μικρή ποσότητα θειικού οξέος. Στη βάση του κυπέλλου υπήρχε ένα διάφραγμα και μία προσαρτημένη σε αυτό βελόνα (σχήμα 5.40β). Η βελόνα ήταν συνδεδεμένη με την εξωτερική πηγή τάσης πόλωσης και βυθισμένη κατά ένα μέρος στο υγρό. Το ηχητικό κύμα προκαλούσε το διάφραγμα του κυπέλλου να κινηθεί, αναγκάζοντας τη βελόνα να κινηθεί προς τα επάνω και προς τα κάτω μέσα στο νερό. Η ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ ενός ηλεκτροδίου που ήταν επίσης βυθισμένο στο νερό και της βελόνας στη βάση του κυπέλλου ήταν τότε αντιστρόφως ανάλογη προς το ύψος του νερού γύρω από τη βυθισμένη βελόνα. Τη μεταβολή της αντίστασης παρακολουθούσε ένας ηλεκτρομαγνήτης μέσω της εξωτερικής

πηγής τάσης και τη μετέτρεπε σε εναλλασσόμενο ηχητικό ηλεκτρικό σήμα. Η Elisha Gray κατέθεσε πρόταση για μια παραλλαγή του μικροφώνου υγρού χρησιμοποιώντας μια ράβδο από ορείχαλκο αντί της βελόνας. Άλλες ήσσονος σημασίας τροποποιήσεις και βελτιώσεις έγιναν στο υγρό μικρόφωνο από τους Majoranna, Chambers, Vanni, Sykes, και Elisha Gray. Επίσης, μία έκδοση με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας έγινε από τον Reginald Fessenden το 1903. Αυτά ήταν τα πρώτα μικρόφωνα, αλλά δεν ήταν πρακτικά για εμπορική εφαρμογή. Η περίφημη πρώτη τηλεφωνική συνομιλία μεταξύ του Bell και του Watson πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα μικρόφωνο υγρού.



Σχήμα 5.40α



Σχήμα 5.40β

### 5.7.13 Μικροηλεκτρομηχανικό (MEMS) μικρόφωνο

Το MEMS (Microelectromechanical systems) μικρόφωνο ονομάζεται επίσης μικρόφωνο τσιπ (chip) ή



μικρόφωνο πυριτίου. Ένα ευαίσθητο στην πίεση διάφραγμα χαράσσεται απευθείας σε ένα πλακίδιο πυριτίου με τεχνικές επεξεργασίας MEMS και έχει συνήθως ενσωματωμένο προενισχυτή. Τα περισσότερα μικρόφωνα MEMS είναι παραλλαγές του σχεδιασμού του πυκνωτικού μικρόφωνου. Τα ψηφιακά MEMS μικρόφωνα έχουν ενσωματωμένο μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα (ADC). Η χάραξη κυκλωμάτων στο ίδιο τσιπ CMOS κάνει το ψηφιακό μικρόφωνο να ενσωματώνεται πιο εύκολα σε σύγχρονα ψηφιακά προϊόντα όπως έξυπνα κινητά και έξυπνα ρολόγια (σχήμα 5.41). Μεγάλοι κατασκευαστές που παράγουν μικρόφωνα MEMS πυριτίου είναι οι: Wolfson (μοντέλα WM7xxx), Analog Devices, Akustica ( μοντέλα AKU200x), η Infineon (SMM310 μοντέλο), Knowles Electronics, MEMSTech (MSMx), NXP και άλλοι. Τελευταία έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για την έρευνα και παραγωγή πιεζοηλεκτρικών MEMS μικροφώνων που είναι ουσιαστικά διαφορετικής αρχιτεκτονικής από αυτή που χρησιμοποιείται στα υπάρχοντα σχέδια πυκνωτικών μικροφώνων MEMS.



Σχήμα 5.41

## 5.8 Τεχνικά χαρακτηριστικά μικροφώνων

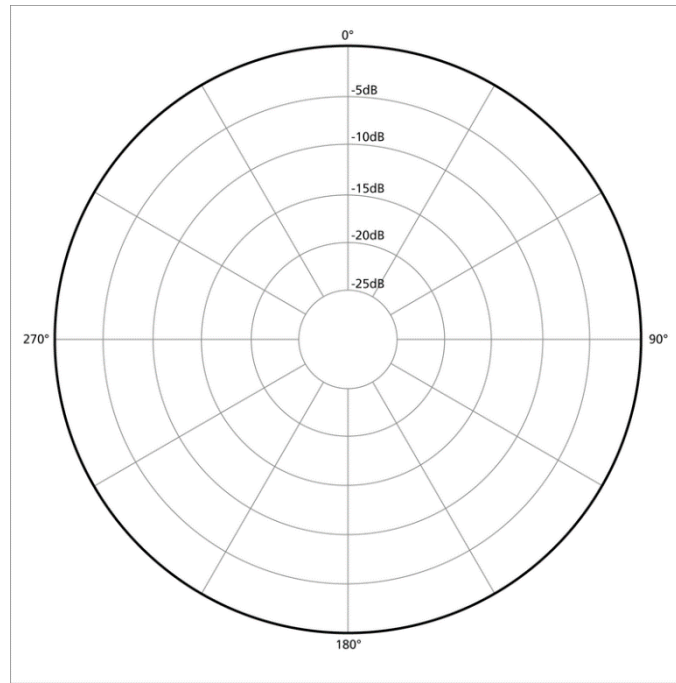
Τα μικρόφωνα διαφέρουν μεταξύ τους στο φάσμα των συχνοτήτων που καλύπτουν ικανοποιητικά, στην ακουστική ένταση μέχρι την οποία δεν παραμορφώνουν το σήμα, στην αναλογία σήματος / θορύβου (SNR) και φυσικά την κατευθυντικότητά τους. Δεν υπάρχει γενικά ένα εγγενές πλεονέκτημα στην πιστότητα ενός τύπου σύγχρονου μικροφώνου έναντι ενός άλλου. Άλλα χαρακτηριστικά καθορίζουν εν τέλει αν ένα μικρόφωνο υπερτερεί ενός άλλου για μία συγκεκριμένη χρήση. Για παράδειγμα, το πυκνωτικό μικρόφωνο χρειάζεται μπαταρίες ή ρεύμα από την κονσόλα μίξης για να λειτουργήσει, το οποίο είναι μερικές φορές μια ταλαιπωρία. Το δυναμικό μικρόφωνο απαιτεί θωράκιση από μαγνητικά πεδία το οποίο το καθιστά λίγο βαρύτερο μερικές φορές. Όμως πολύ καλά μικρόφωνα είναι διαθέσιμα και στις δύο μορφές τεχνολογίας. Ο πιο σημαντικός παράγοντας στην επιλογή ενός μικροφώνου είναι το πώς ακούγεται στην απαιτούμενη εφαρμογή. Τα ακόλουθα ζητήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη.

### 5.8.1 Κατευθυντικότητα μικροφώνων

Αν ταξινομήσουμε τα μικρόφωνα ανάλογα με την κατευθυντικότητά τους, θα καταλήξουμε στις πέντε παρακάτω κατηγορίες :

A) Παντοκατευθυντικά (omnidirectional)

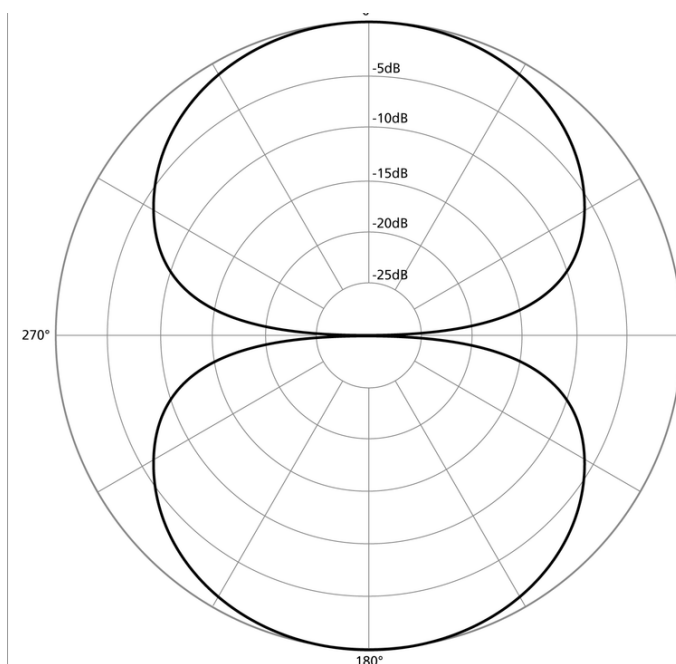
Τα παντοκατευθυντικά μικρόφωνα είναι εξίσου ευαίσθητα σε όλα τα ηχητικά ερεθίσματα, ανεξάρτητα από πια κατεύθυνση έρχονται και τη γωνία που έχει η πηγή τους σε σχέση με το διάφραγμα τους. Αυτό φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα του πολικού διαγράμματός τους (σχήμα 5.42).



Σχήμα 5.42

B) Δι-κατευθυντικά (bi-directional) ή «Φιγούρας του οκτώ».

Τα δι-κατευθυντικά είναι εξίσου ευαίσθητα σε πιέσεις που ασκούνται από το εμπρός και το πίσω μέρος του διαφράγματος, αλλά χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλά επίπεδα ευαισθησίας σε πιέσεις που ασκούνται από τα πλαϊνά μέρη του μικροφώνου. Αυτό δίνει ένα μοτίβο κατευθυντικότητας που μοιάζει με τη φιγούρα του συμβόλου «8». Στο πολικό διάγραμμα του σχήματος 5.43 απεικονίζεται η κατευθυντικότητά τους:

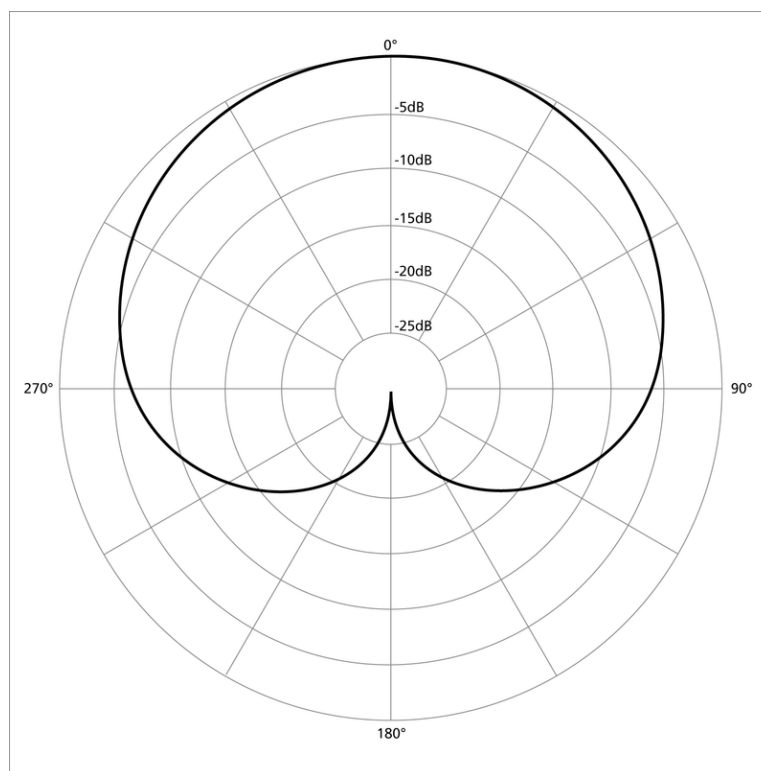


Σχήμα 5.43

### Γ) Μονοκατευθυντικά (Unidirectional)

Τα μονοκατευθυντικά μικρόφωνα είναι ιδιαίτερος ευαίσθητα σε ήχους που προέρχονται ακριβώς μπροστά από το διάφραγμα (στις μηδέν μοίρες). Αντίθετα, μπορεί να είναι ελάχιστα ή καθόλου ευαίσθητα σε πηγές που βρίσκονται στο πίσω μέρος του διαφράγματος (στις 180 μοίρες). Οι πλευρικοί ήχοι με κλίση μικρότερη των 90ο ή μεγαλύτερη των 270ο μπορούν να συλληφθούν ικανοποιητικά, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τους υπόλοιπους πλευρικούς ήχους.

Ένα από τα πιο συνηθισμένα μονοκατευθυντικά μικρόφωνα είναι το καρδιοειδές καθώς το σχήμα κατευθυντικότητάς του μοιάζει με καρδιά (σχήμα 5.44). Τα καρδιοειδή μικρόφωνα χρησιμοποιούνται συνήθως για φωνητικά ή ομιλία, δεδομένου ότι είναι καλά στην απόρριψη ήχου από άλλες κατευθύνσεις. Σε τρεις διαστάσεις, το καρδιοειδές σχήμα διαμορφώνεται όπως το σχήμα ενός μήλου. Η καρδιοειδής απόκριση μειώνει την παρεμβολή ήχων από το πλάι και από την πίσω πλευρά, βοηθώντας να αποφευχθεί η θετική ανατροφοδότηση (feedback) από τα ηχεία. Η τοποθέτησή τους πολύ κοντά στην πηγή του ήχου (σε αποστάσεις μερικών εκατοστών) οδηγεί σε ενίσχυση μπάσων. Αυτό είναι γνωστό ως το φαινόμενο προσέγγισης. Το μοντέλο μικροφώνου SM58 της SHURE έχει γίνει το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο για ζωντανά φωνητικά για περισσότερα από 40 χρόνια. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει τη σημασία και τη δημοτικότητα του καρδιοειδούς μικροφώνου. Στο σχήμα 5.44 απεικονίζεται η κατευθυντικότητά τους σε πολικό διάγραμμα:



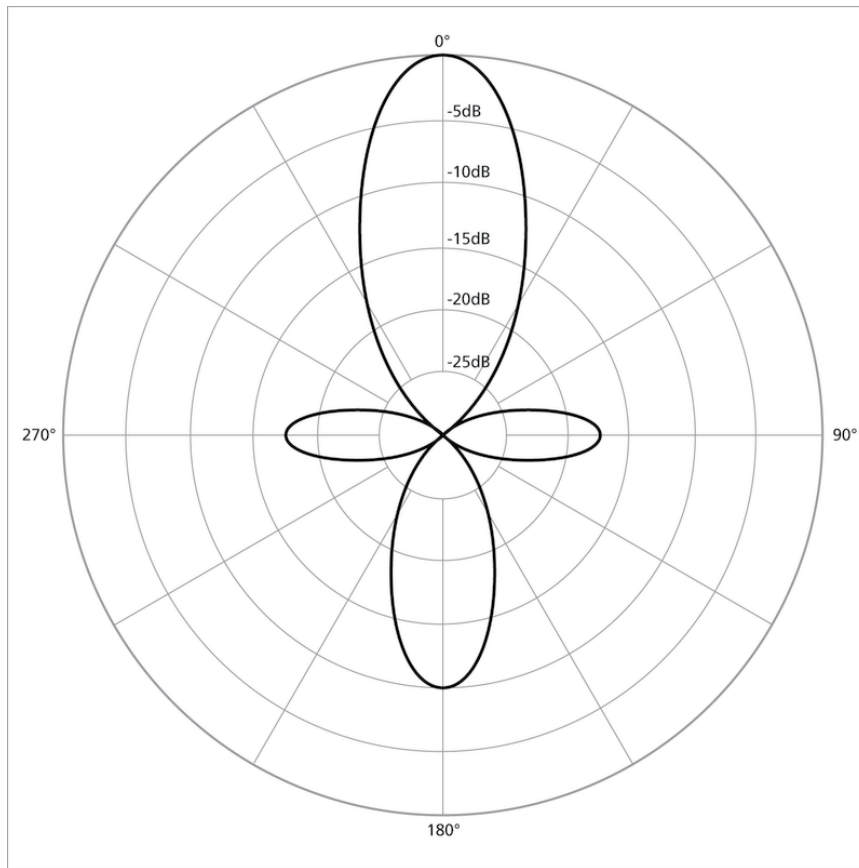
Σχήμα 5.44

### Δ) Ιδιαίτερος-κατευθυντικά

Τα ιδιαίτερος κατευθυντικά μικρόφωνα χαρακτηρίζονται έτσι από την ιδιαίτερα υψηλή ευαισθησία που δείχνουν στα ηχητικά σήματα που βρίσκονται στις 0 μοίρες (ακριβώς μπροστά τους), την ελάχιστη ευαισθησία σε σήματα που βρίσκονται στις 180 μοίρες και την ιδιαίτερα χαμηλή ευαισθησία που έχουν στους πλευρικούς ήχους. Αυτά τα μικρόφωνα δεν χρησιμοποιούνται συχνά στη μουσική αλλά βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή στην τηλεόραση, τον κινηματογράφο και το θέατρο. Εκεί δηλαδή, όπου θέλουμε το μικρόφωνο να είναι μακριά από την πηγή (π.χ. τον ηθοποιό), να μην επηρεάζεται

πολύ από τους ήχους του περιβάλλοντος, αλλά και να μην διακρίνεται στις κάμερες ή από τον θεατή στο θέατρο.

Παραδείγματα τέτοιων μικροφώνων είναι τα τύπου «καραμπίνας» (shotgun) που ονομάζονται έτσι λόγω του σχήματός τους και τα παραβολικού τύπου μικρόφωνα. Στο σχήμα 5.45 παρατηρούμε το πολικό μοτίβο κατευθυντικότητας ενός μικροφώνου τύπου shotgun.



Σχήμα 5.45

Ε) Μικρόφωνα με περισσότερα από ένα πολικό διάγραμμα.

Τα μικρόφωνα με παραπάνω από ένα πολικό διάγραμμα είναι πυκνωτικά μικρόφωνα κυρίως. Έχουν εφαρμογή σε στούντιο ηχογραφήσεων.

Στον πίνακα 5.4 παρατηρούμε μία σύγκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών των παντοκατευθυντικών και τον ιδιαίτερως κατευθυντικών μικροφώνων:

Πολικό διάγραμμα	Παντοκατευθυντικό	Κατευθυντικό
Λόγος κέρδους προς συντονισμό (feedback)	Χαμηλός	Υψηλός
Δημιουργία συντονισμού	Αργά	Γρήγορα
«Χρωματισμός» φάσματος ήχου σε θέση εκτός άξονα (off-axis colouration)	Επίπεδη απόκριση με ήπιες αποκλίσεις	Έντονες αποκλίσεις από την επίπεδη απόκριση
Εμφάνιση φαινομένου προσέγγισης κι ενίσχυσης μπάσων	Όχι	Ναι

Ευαισθησία σε άνεμο και θορύβους	Χαμηλή	Υψηλή
Παραμόρφωση THD	Χαμηλή	Υψηλή
Διαχωρισμός καναλιών	Ικανοποιητικός σε κοντινό πεδίο αλλά όχι σε μακρινό πεδίο	Ικανοποιητικός σε κοντινό πεδίο και σε μακρινό πεδίο

Πίνακας 5.4

### 5.8.2 Ευαισθησία μικροφώνου

Η ευαισθησία είναι ένα μέτρο της τιμής της τάσης εξόδου που παράγεται από το μικρόφωνο για ένα δεδομένο ήχο. Είναι μία ζωτικής σημασίας προδιαγραφή εάν θέλουμε να καταγράψουν πολύ μικρού πλάτους ήχοι, όπως η κίνηση μιας χελώνας, αλλά θα πρέπει να εξετάζεται σε κάθε κατάσταση. Αν τοποθετήσουμε ένα όχι και τόσο ευαίσθητο μικρόφωνο σε μια ήσυχη πηγή ήχου όπως μια ακουστική κιθάρα, θα πρέπει να αυξήσουμε το κέρδος της κονσόλας μείξης, προσθέτοντας θόρυβο στο αποτέλεσμα. Από την άλλη πλευρά, πολύ ευαίσθητα μικρόφωνα για φωνητικά θα μπορούσαν να επιβαρύνουν την είσοδο του μείκτη ή του κασετόφωνου, οδηγώντας σε κορεσμό και υψηλή παραμόρφωση.

Υπάρχουν δύο κοινοί τρόποι μέτρησης της ευαισθησίας. Το κατά προτίμηση διεθνές πρότυπο μέτρησης γίνεται σε millivolt ανά Pascal (mV/Pa) σε τόνο συχνότητας 1 kHz. Μια υψηλότερη τιμή υποδεικνύει μεγαλύτερη ευαισθησία μικροφώνου. Η παλαιότερη αμερικανική μέθοδος αναφέρεται σε ένα πρότυπο 1 V / Pa και μετριέται σε ντεσιμπέλ. Το αποτέλεσμα έχει μια αρνητική τιμή. Και σε αυτή τη μέθοδο μέτρησης, μια υψηλότερη τιμή υποδεικνύει μεγαλύτερη ευαισθησία, έτσι ώστε μικρόφωνο με -60 dB ευαισθησία να είναι πιο ευαίσθητο από ένα με -70 dB ευαισθησία.

### 5.8.3 Χαρακτηριστικά υπερφόρτωσης (overload)

Κάθε μικρόφωνο θα παράγει στρεβλώσεις και παραμόρφωση του σήματος, όταν υπερφορτωθεί από τους δυνατούς σε ένταση ήχους. Αυτό προκαλείται από διάφορους παράγοντες. Στα δυναμικά μικρόφωνα, το πηνίο μπορεί να τραβηχτεί έξω από το μαγνητικό πεδίο λόγω της έντονης κίνησης του διαφράγματος. Στα πυκνωτικά μικρόφωνα, ο εσωτερικός ενισχυτής FET μπορεί να ψαλιδίσει την έξοδο του παραμορφώνοντας το σήμα. Η παρατεταμένη υπεροδήγηση από εξαιρετικά δυνατούς ήχους μπορεί να στρεβλώσει μόνιμα το διάφραγμα και να οδηγήσει σε υποβάθμιση της απόδοσης ακόμη και σε κανονικά επίπεδα ήχου. Οι δυνατοί ήχοι συναντώνται πιο συχνά από ό, τι μπορείτε να σκεφτείτε, ειδικά αν έχετε τοποθετήσει το μικρόφωνο πολύ κοντά στα μουσικά όργανα. Θα βάζατε ποτέ για παράδειγμα το αυτί σας στο χωνί της τρομπέτας; Ένα μικρόφωνο κοντά σε πνευστό μπορεί να παραμορφώνει λόγω της έντασης του ήχου. Μπορούμε συνήθως να κάνουμε μια επιλογή συμβιβασμού μεταξύ της υψηλής ευαισθησίας και της υπερφόρτωσης του μικροφώνου. Για αυτό το λόγο, μερικές φορές υπάρχει ένας διακόπτης με ένδειξη «PAD» επάνω στο μικρόφωνο που μειώνει την ένταση κατά μερικά decibel (π.χ. 10dB) για χρήση σε διαφορετικές καταστάσεις. Ο διακόπτης (σχήμα 5.46) συνδέεται συνήθως με μία ή περισσότερες αντιστάσεις που αναλαμβάνουν μείωση του σήματος εξόδου του μικροφώνου.



Σχήμα 5.46

Η μέγιστη ηχητική πίεση (SPL, sound pressure level) που μπορεί να δεχτεί το μικρόφωνο μετριέται για συγκεκριμένες τιμές της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD), συνήθως 0.5%. Το ποσοστό της παραμόρφωσης αυτής δεν είναι γενικά αντιληπτό, έτσι μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει με ασφάλεια το μικρόφωνο έως αυτή την μέγιστη πίεση SPL χωρίς να βλάψει την εγγραφή. Για παράδειγμα: «142 dB SPL κορυφή (στα 0,5% THD)» σημαίνει πως το μικρόφωνο θα αρχίσει να υπερφορτώνεται από ήχους δυνατώτερους από εκείνους με SPL: 142dB. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή αυτή, τόσο το καλύτερο, αν και τα μικρόφωνα με πολύ υψηλό μέγιστο SPL εμφανίζουν επίσης μεγαλύτερο θόρυβο.

Το επίπεδο αποκοπής είναι επίσης ένας σημαντικός δείκτης της μέγιστης χρηστικότητας του μικροφώνου. Αυτό το επίπεδο είναι το σημείο στο οποίο το μικρόφωνο ψαλιδίζει το σήμα εξόδου του και παραμορφώνει έντονα. Το ποσοστό THD κάτω του 1% που συνήθως αναφέρεται στο πλαίσιο του μέγιστου SPL είναι πραγματικά ένα πολύ ήπιο επίπεδο της παραμόρφωσης και δεν είναι εύκολα αντιληπτό. Στο επίπεδο αποκοπής τα φαινόμενα παραμόρφωσης THD και IMD είναι πολύ πιο έντονα. Για ορισμένα μικρόφωνα, το επίπεδο αποκοπής μπορεί να είναι πολύ υψηλότερα από το μέγιστο επίπεδο SPL.

Η δυναμική περιοχή ενός μικροφώνου είναι η διαφορά του επιπέδου πίεσης SPL μεταξύ του δαπέδου του θορύβου (noise floor) και του μέγιστου SPL του μικροφώνου με χαμηλή THD παραμόρφωση 0.5%. Αν όμως αναφέρεται για παράδειγμα, «120 dB δυναμική περιοχή» στα τεχνικά στοιχεία του μικροφώνου από τον κατασκευαστή, έχουμε σημαντικά λιγότερες πληροφορίες από ό, τι αν μας ανέφερε τα επίπεδα θορύβου και τη μέγιστη τιμή πίεσης SPL ξεχωριστά.

#### 5.8.4 Γραμμικότητα και παραμόρφωση

Αυτό είναι το χαρακτηριστικό που καθορίζει περισσότερο το κόστος κατασκευής των μικροφώνων. Τα χαρακτηριστικά παραμορφώσεως ενός μικροφώνου προσδιορίζονται ως επί το πλείστον από την προσοχή με την οποία το διάφραγμα κατασκευάζεται και συναρμολογείται. Με τις μεθόδους μαζικής παραγωγής μικροφώνων, μπορεί να προκύψει ένα μικρόφωνο με επαρκείς επιδόσεις αλλά η απόδοση σχετικά με την παραμόρφωση θα είναι και θέμα τύχης ή καλύτερα, στατιστικής. Πολλοί κατασκευαστές έχουν πολλούς αριθμούς μοντέλων για την ίδια κατά βάση κάψουλα μικροφώνου. Κατασκευάζουν μια παρτίδα, στη συνέχεια ελέγχουν τις κάψουλες ως προς τις τιμές παραμόρφωσης και τις διαχωρίζουν σε κατηγορίες. Κάποια εργοστάσια όπως της Neumann καταστρέφουν τις κάψουλες μικροφώνου που δεν πληρούν τις προδιαγραφές τους.

Η γραμμικότητα του μικροφώνου εξαρτάται επίσης από την ποιότητα κατασκευής του. Κανένα μικρόφωνο δεν έχει εντελώς γραμμική απόκριση και μάλιστα σε όλες τις εντάσεις και συχνότητες. Τα ποσοστά μη-γραμμικότητας εξαρτώνται για παράδειγμα από ενεργά στοιχεία όπως τα FET τρανζίστορ των electret πυκνωτικών μικροφώνων και αυξάνονται με την ένταση SPL του ήχου που καλείται να διαχειριστεί το μικρόφωνο.

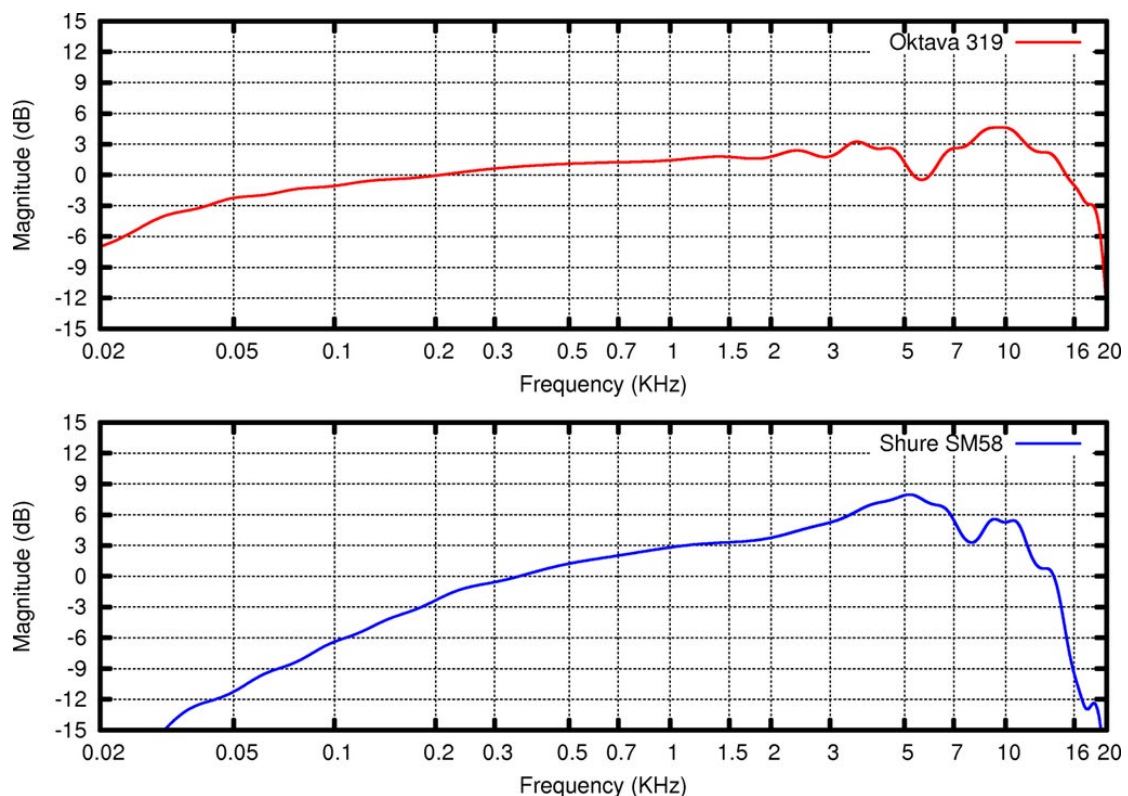
#### 5.8.5 Απόκριση συχνότητας

Μια επίπεδη απόκριση συχνότητας ήταν ο κύριος στόχος των επιχειρήσεων που κατασκευάζουν μικρόφωνα για τις τέσσερις τελευταίες δεκαετίες. Στη δεκαετία του 1950, τα μικρόφωνα είχαν τόσο περιορισμένο φάσμα απόκρισης συχνοτήτων που οι κατασκευαστές κονσόλας άρχισαν να προσθέτουν ισοσταθμιστές για κάθε είσοδο μικροφώνου ώστε να αντισταθμίσουν αυτό το φαινόμενο.

Η προσπάθεια αυτή έχει πλέον ολοκληρωθεί καθώς η απόκριση συχνοτήτων στα επαγγελματικά μικρόφωνα είναι αξιοπρεπώς επίπεδη, τουλάχιστον για τους ήχους που προέρχονται από μπροστά (στις 0 μοίρες). Οι κυριότερες εξαιρέσεις είναι τα μικρόφωνα με σκόπιμη έμφαση σε ορισμένες συχνότητες οι οποίες είναι χρήσιμες για ορισμένες εφαρμογές. Αυτό είναι ένα άλλο μέρος της αίγλης του μικρο-

φώνου και ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται παλαιού τύπου μικρόφωνα («vintage») όπως λυχνιών για ορισμένες ηχογραφήσεις. Προβλήματα στην απόκριση συχνότητας ως επί το πλείστον συναντώνται με τους ήχους που προέρχονται πίσω από το μικρόφωνο (στις  $180^\circ$ ) ή από το πλάι του ( $\pm 90^\circ$ ).

Τα μικρόφωνα ακουστικών μετρήσεων και αναφοράς είναι εκείνα που παρουσιάζουν την πιο επίπεδη απόκριση συχνότητων σε ένα μεγάλο εύρος. Φυσικά, η απόκριση συχνότητων ενός μικροφώνου μετράται υπό συνθήκες έντασης που δεν οδηγούν σε παραμόρφωση και σε κατάλληλη απόσταση και θέση από την πηγή ήχου. Σε μακρινό πεδίο από την πηγή αλλάζει η απόκριση του μικροφώνου καθώς λαμβάνεται ο ήχος από διαφορετικές κατευθύνσεις και με μειωμένη ένταση SPL. Στο σχήμα 5.47 για παράδειγμα, παρατηρούμε την απόκριση συχνότητας δύο γνωστών μικροφώνων στο κοντινό πεδίο, του Oktava 319 και του Shure SM58.



Σχήμα 5.47

### 5.8.6 Τεχνικές μείωσης θορύβου μικροφώνων

Τα μικρόφωνα παράγουν γενικά μια πολύ μικρή ποσότητα ρεύματος και τάσης. Τα χαμηλά επίπεδα ισχύος του μικροφώνου οφείλονται στα μικροσκοπικά πηνία, διαφράγματα και αισθητήρια που χρησιμοποιούνται. Η χρήση μικροσκοπικών μερών είναι απαραίτητη καθώς τα κινούμενα μέρη τους πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθήσουν με ακρίβεια ακόμη και τις μικρότερες διακυμάνσεις των ηχητικών κυμάτων. Για να καταστεί κατάλληλο το ασθενές σήμα εξόδου ενός μικροφώνου για καταγραφή ή άλλες ηλεκτρονικές διαδικασίες επεξεργασίας, πρέπει να ενισχύεται κατά ένα συντελεστή κέρδους πάνω από χίλια. Κάθε ηλεκτρικός θόρυβος που παράγεται από το μικρόφωνο επίσης θα ενισχυθεί αναπόφευκτα. Έτσι, ακόμη και μικρές ποσότητες θορύβου θα γίνουν εμφανείς μετά την ενίσχυση. Τα δυναμικά μικρόφωνα είναι ουσιαστικά αθόρυβα στη λειτουργία αλλά λαμβάνουν εξωτερικούς θορύβους ως παρεμβολές. Λόγω του χαμηλού τους θορύβου και της χαμηλής ευαισθησίας τους, είναι καταλληλότερα για χρήση σε ζωντανό πρόγραμμα και μουσική. Από την άλλη πλευρά, το ηλεκτρονικό

κύκλωμα FET που είναι ενσωματωμένο σε τύπου electret μικρόφωνα είναι μια δυνητική πηγή ηλεκτρονικού θορύβου και πρέπει να είναι σχεδιασμένο και κατασκευασμένο πολύ προσεκτικά.

Ο θόρυβος περιλαμβάνει επίσης και ανεπιθύμητες παρεμβολές των μηχανικών κραδασμών μέσα από το σώμα του μικροφώνου. Πολύ ευαίσθητα μικρόφωνα απαιτούν ελαστικές βάσεις στήριξης για απόσβεση κραδασμών. Μικρόφωνα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν με στήριξη στο χέρι του ομιλητή, πρέπει να έχουν τέτοιες βάσεις απόσβεσης κραδασμών μέσα στο κέλυφός τους. Άλλοι θόρυβοι παρεμβολής είναι αυτοί του ανέμου ή της αναπνοής του ομιλητή. Τα κύματα αέρα ή ανέμου λαμβάνονται από το μικρόφωνο αλλοιώνοντας ή επικαλύπτοντας το επιθυμητό σήμα. Για αυτό το λόγο έχουν κατασκευαστεί κατάλληλα καλύμματα μικροφώνων και «φίλτρα» αέρα. Στο στούντιο χρησιμοποιούνται συνήθως φίλτρα «Pop» για την εξάλειψη θορύβου από τον αέρα που παράγει η φωνή του ομιλητή ή τραγουδιστή ειδικά από την προφορά του γράμματος «Π» που ακούγεται ως θόρυβος ακούσματος «ποπ». Τα καλύμματα αυτά τοποθετούνται μεταξύ ομιλητή και μικροφώνου και είναι φτιαγμένα συνήθως από νάιλον ηχοπερατό ύφασμα.

Στο σχήμα 5.48 βλέπουμε ένα «pop» κάλυμμα:



Σχήμα 5.48

Τα «Blimps», επίσης γνωστά ως Ζέπελιν (Zeppelins) είναι μεγάλα, κούφια καλύμματα μικροφώνου που χρησιμοποιούνται για λήψη ήχου σε εξωτερικές τοποθεσίες και θορυβώδες περιβάλλον, όπως η καταγραφή ήχων της φύσης, καταγραφή ειδήσεων καθώς και για τα γυρίσματα ταινιών και βίντεο. Μπορούν να μειώσουν το θόρυβο του ανέμου κατά έως και 25 dB, ειδικότερα του θορύβου χαμηλής συχνότητας. Στο σχήμα 5.49 παρατηρούμε δυο καλύμματα τύπου Ζέπελιν για χρήση σε μικρόφωνα που φέρουν οι τηλεοπτικές κάμερες:

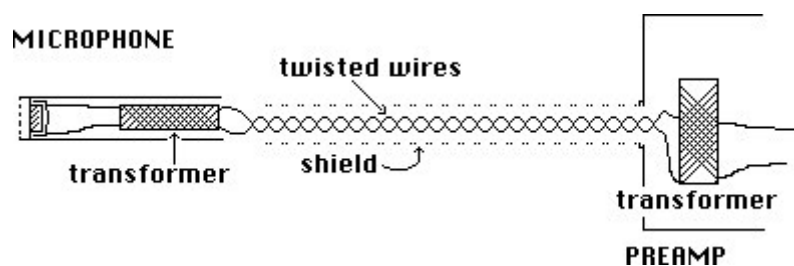




Σχήμα 5.49

### 5.8.7 Καλώδια σύνδεσης μικροφώνων

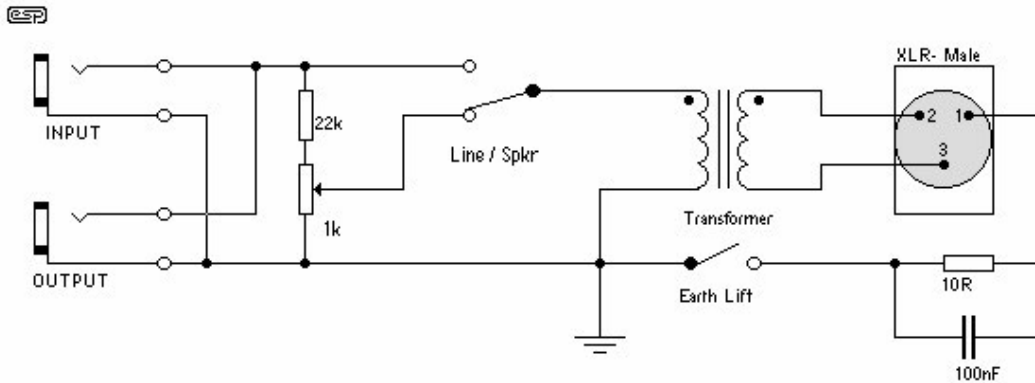
Η πιο κοινή πηγή του θορύβου που σχετίζεται με τα μικρόφωνα είναι το καλώδιο που συνδέει το μικρόφωνο στην κονσόλα ή το κασετόφωνο. Το πρώτο στάδιο μιας προενίσχυσης μικροφώνου είναι παρόμοιο με αυτό που συναντάμε σε ένα ραδιοφωνικό δέκτη. Έτσι, το καλώδιο πρέπει να σχεδιάζεται κατάλληλα ώστε να μη λειτουργεί ως μια RF κεραία. Η βασική τεχνική κατασκευής είναι να περιβάλλουμε τα καλώδια που μεταφέρουν το ρεύμα προς και από το μικρόφωνο με ένα εύκαμπτο μεταλλικό πλέγμα γείωσης που δρα ως Farad κλωβός. Ο κλωβός Farad είναι μία διάταξη που περιβάλλει ένα ηλεκτρονικό σύστημα και δρα ως ασπίδα για τις περισσότερες εξωτερικές προς αυτό ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Μια δεύτερη παλαιού τύπου τεχνική, η οποία είναι πιο αποτελεσματική για το βουητό χαμηλής συχνότητας, είναι η εξισορρόπηση της γραμμής μεταφοράς με μετασχηματιστές όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 5.50

Οι μετασχηματιστές αυτοί έχουν αντικατασταθεί πλέον στις περισσότερες εφαρμογές από ηλεκτρονικά στοιχεία. Συχνά οι ηχολήπτες χρησιμοποιούν συσκευές προσαρμογής αντίστασης που ονομάζονται

κουτιά απευθείας εισόδου ή D.I. (Direct Injection boxes). Οι προσαρμογείς αυτοί απομονώνουν κάποιες φορές και γαλβανικά τις γειώσεις δύο μηχανημάτων ήχου ώστε να μη δημιουργούνται θόρυβοι από διαφορές τάσης των γειώσεων και βρόχους γείωσης. Τα σήματα που λαμβάνουν στην είσοδό τους αυτοί οι μετατροπείς ονομάζονται ασύμμετρα ή «unbalanced» και τα σήμα στην έξοδό τους λέγονται συμμετρικά (balanced). Ένα κύκλωμα DI βλέπουμε στο σχήμα 5.51:



Σχήμα 5.51

Ασύμμετρες (unbalanced) γραμμές:

Οι ασύμμετρες γραμμές σήματος χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι το καλώδιο και τα βύσματά τους χρησιμοποιούν μόνο δύο αγωγούς, έναν κεντρικό αγωγό που περιβάλλεται από ένα προστατευτικό γειωμένο κάλυμμα. Σε περιβάλλοντα που έχουν πολλές παρεμβολές, όταν ένα unbalanced σήμα στέλνεται σε μεγάλες αποστάσεις, θα γίνεται όλο και πιο επιρρεπές σε ανεπιθύμητες παρεμβολές. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να μετριαστεί με τη χρήση ισορροπημένων (balanced) γραμμών.

Συμμετρικές (balanced) γραμμές:

Οι ισορροπημένες γραμμές χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι υπάρχουν δύο αγωγοί στο κέντρο τους για το σήμα που συνήθως περιβάλλονται από ένα προστατευτικό κάλυμμα. Αυτοί οι δυο κεντρικοί αγωγοί έχουν ίση αντίσταση ως προς τη γείωση. Η εξωτερική θωράκιση συνδέεται με τη γείωση, όπως στις ασύμμετρες γραμμές, αλλά δεν απαιτείται να δρα ως ένας από τους αγωγούς σήματος. Ο μοναδικός σκοπός της ασπίδας γείωσης είναι να παρέχει άμυνα έναντι των ανεπιθύμητων παρεμβολών. Ένα πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης είναι ότι η ασπίδα χρειάζεται να συνδεθεί με τη γείωση έστω και μόνο στο ένα άκρο του καλωδίου προκειμένου να λειτουργήσει. Έτσι, η ασπίδα γείωσης μπορεί να αποσυνδεθεί στο ένα άκρο της γραμμής μεταφοράς. Αυτό μπορεί να εξαλείψει το πρόβλημα βρόχων γείωσης που συζητήθηκε. Το βύσμα με το οποίο συνδέονται οι περισσότερες συμμετρικές γραμμές ονομάζεται «XLR».

Επίσης, τα τύλιγμα των δύο καλωδίων του μικροφώνου μεταξύ τους είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται εδώ και πολλές δεκαετίες για τη μείωση των παρεμβολών. Γενικά, το καλώδιο του μικροφώνου πρέπει να τοποθετείται μακριά από καλώδια τροφοδοσίας καθώς η συχνότητα των 50-60Hz του δικτύου επάγεται ως θόρυβος στην είσοδο του εξοπλισμού ηχογράφησης. Αν για κάποιο λόγο το καλώδιο του μικροφώνου πρέπει να τοποθετηθεί κοντά σε καλώδια παροχής ρεύματος, τότε πρέπει αυτά τα 2 καλώδια να τέμνονται κάθετα στην τοποθέτησή τους και όχι παράλληλα ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο επαγόμενος θόρυβος.

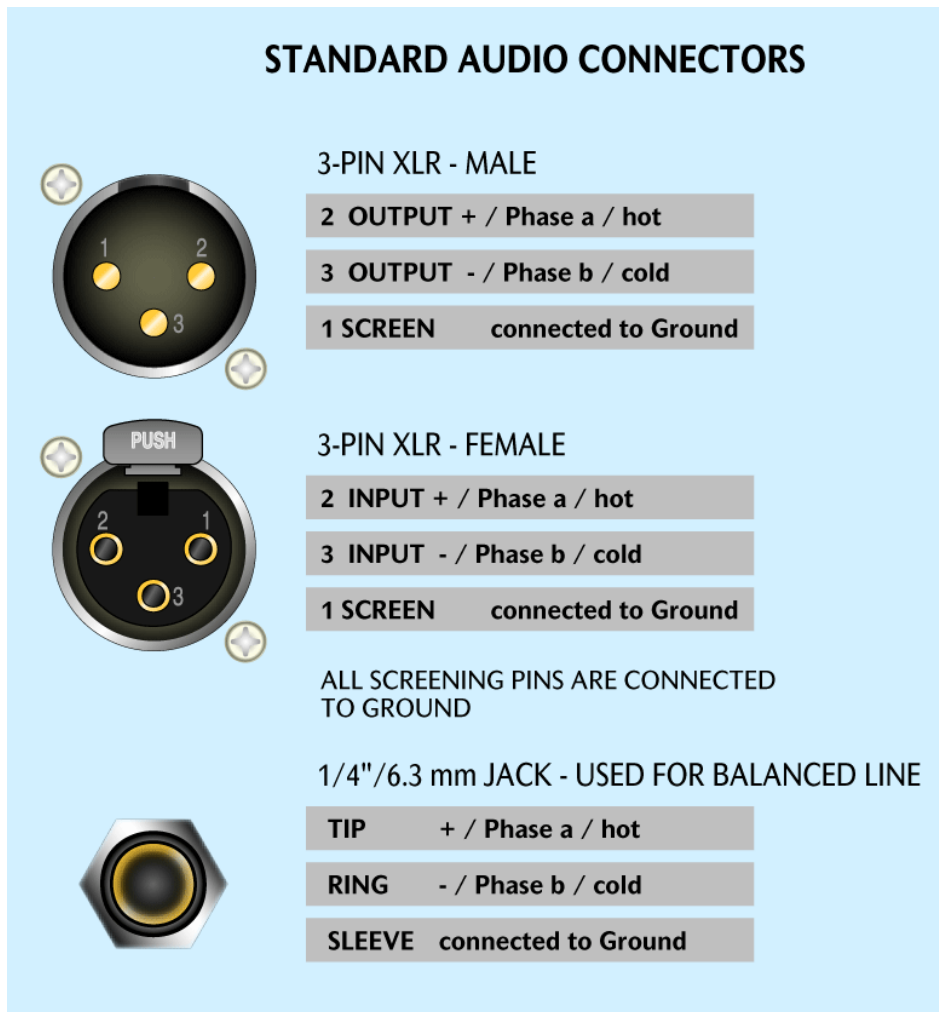
**5.8.8 Προσαρμογή αντίστασης μικροφώνων**

Όλα τα μικρόφωνα έχουν ένα ηλεκτρικό χαρακτηριστικό που ονομάζεται αντίσταση, μετρούμενη σε ohms (Ω), η οποία εξαρτάται από το σχεδιασμό τους. Τυπικά, η ονομαστική αντίστασή τους αναφέρεται από τον κατασκευαστή στα τεχνικά φύλλα τους. Ως χαμηλή αντίσταση θεωρείται η αντίσταση

τιμής κάτω από 600 Ω. Μεσαία αντίσταση ενός μικροφώνου θεωρείται η τιμή μεταξύ 600 Ω και 10 kΩ. Τα μικρόφωνα υψηλής αντίστασης έχουν αντίσταση πάνω από 10 kΩ. Λόγω του ενσωματωμένου ενισχυτή τους, τα πυκνωτικά μικρόφωνα έχουν συνήθως μια χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου μεταξύ 50 και 200 Ω.

Η έξοδος ενός δεδομένου μικρόφωνου αποδίδει την ίδια ισχύ είτε είναι χαμηλή είτε υψηλή η σύνθετη αντίστασή του. Εάν ένα μικρόφωνο παράγεται σε δυο εκδόσεις, μία με υψηλή (hi-Z) και μια με χαμηλή αντίσταση εξόδου (Lo-Z), εκείνο με την υψηλή αντίσταση έχει υψηλότερη τάση εξόδου για μία δεδομένη είσοδο ηχητικής πίεσης. Επομένως είναι κατάλληλο για χρήση με ενισχυτές λυχνίας για παράδειγμα, που έχουν υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου και απαιτούν μια σχετικά υψηλή τάση εισόδου σήματος που θα ξεπεράσει τον εγγενή θόρυβο βολής τους. Τα περισσότερα επαγγελματικά μικρόφωνα είναι χαμηλής αντίστασης, με τιμή περίπου 200 Ω ή χαμηλότερα. Ο επαγγελματικός εξοπλισμός ήχου με λυχνίες ενσωματώνει έναν μετασχηματιστή που προσαρμόζει την αντίσταση του κυκλώματος μικροφώνου στην υψηλή αντίσταση και την τάση που απαιτείται για την οδήγηση των λυχνιών. Η προσαρμογή αντίστασης δημιουργεί και ένα κέρδος τάσης. Εξωτερικοί μετασχηματιστές προσαρμογής όπως τα DI boxes που είδαμε είναι επίσης διαθέσιμοι εμπορικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συνδεθεί ένα μικρόφωνο χαμηλής αντίστασης σε είσοδο εξοπλισμού ηχογράφησης με υψηλή σύνθετη αντίσταση.

Τα μικρόφωνα χαμηλής σύνθετης αντίστασης προτιμώνται έναντι εκείνων με υψηλή σύνθετη αντίσταση για δύο λόγους: ο ένας είναι ότι η χρήση ενός μικροφώνου υψηλής εμπέδησης με ένα μακρύ καλώδιο οδηγεί σε απώλεια σημάτων υψηλής συχνότητας που οφείλεται στην παρασιτική χωρητικότητα των καλωδίων. Η παρασιτική χωρητικότητα C σχηματίζει ένα βαθυπερατό φίλτρο R-C με την σύνθετη αντίσταση εξόδου R του μικροφώνου. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι τα μακριά σε μήκος καλώδια υψηλής αντίστασης τείνουν να λαμβάνουν περισσότερο θόρυβο και πιθανώς παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων (RFI). Το αποτέλεσμα έλλειψης προσαρμογής αντίστασης είναι επομένως η συνολική μείωση του σήματος, μείωση του σηματοθορυβικού λόγου SNR και η μεταβολή στην απόκριση συχνότητας. Οι σύγχρονες κονσόλες διαθέτουν τόσο εισόδους χαμηλής σύνθετης αντίστασης (Lo-Z) με βύσματα τύπου XLR συνήθως όσο και εισόδους με υψηλή σύνθετη αντίσταση που διαθέτουν συνήθως βύσματα τύπου «TRS» ή «καρφί» διαμέτρου 6.35 mm (σχήμα 5.51β) :



Σχήμα 5.51β

## 5.9 Τεχνικές τοποθέτησης μικροφώνων

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές βασικές τοποθετήσεις μικροφώνων, έχοντας ως κριτήριο την απόσταση του μικροφώνου από την ηχητική πηγή:

### 5.9.1 Μακρινή Τοποθέτηση Μικροφώνου

Στην τεχνική της μακρινής τοποθέτησης του μικροφώνου, θα τοποθετήσουμε το/τα μικρόφωνο/α σε απόσταση μεγαλύτερη του ενός μέτρου από την πηγή. Συνήθως τοποθετούμε το μικρόφωνο σε απόσταση σχεδόν ίση με το μέγεθος της πηγής ως εμπειρικό κανόνα. Έτσι, πέρα από τον απευθείας ήχο θα λάβουμε και τις ανακλάσεις από τον χώρο. Με αυτόν τον τρόπο, ένα ακουστικό μουσικό όργανο για παράδειγμα ακούγεται πιο «φυσικό». Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για την ηχογράφηση μεγάλων μουσικών συνόλων όπως χορωδίες και ορχήστρες. Ιδιαίτερη προσοχή θα χρειαστεί να δώσουμε στον χώρο στον οποίο γίνεται η ηχογράφηση!

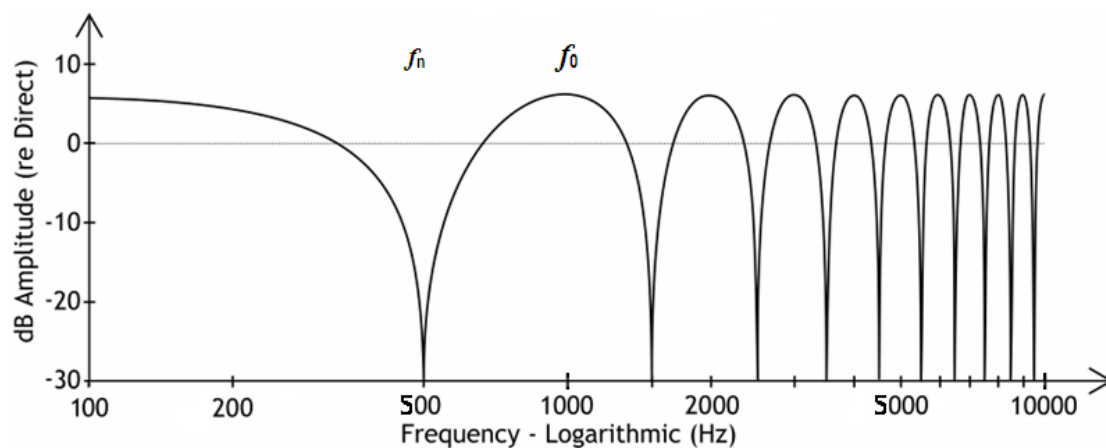
### 5.9.2 Κοντινή Τοποθέτηση Μικροφώνου

Στην τεχνική της κοντινής τοποθέτησης του μικροφώνου, θα τοποθετήσουμε το μικρόφωνο σε απόσταση 3–90 εκατοστά (cm) από την πηγή. Το ηχητικό αποτέλεσμα θα είναι ένας ήχος με αρκετή ένταση, υψηλό σηματοθορυβικό λόγο (SNR) και αρκετές χαμηλές συχνότητες. Πρέπει να προσέξουμε το φαινόμενο προσέγγισης κάποιων μικροφώνων ώστε οι χαμηλές συχνότητες να μην είναι υπερβολικά ενισχυμένες κατά πλάτος. Σε μεγάλο βαθμό, το αποτέλεσμα δεν θα περιέχει ήχους από το περιβάλλον, δηλαδή τις ανακλάσεις του χώρου. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη αν ο χώρος ηχογράφησης δεν έχει καλή ακουστική ή κατάλληλη διαμόρφωση ή αν ο παραγωγός θέλει να προσθέσει κατόπιν στην επεξεργασία βάθος και ηχώ προσομοιώνοντας ένα χώρο. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι πλέον που αναλαμβάνουν αυτή την επεξεργασία βασισμένοι σε μοντέλα χώρων.

Προσοχή χρειάζεται όταν ηχογραφούμε πολλά όργανα μαζί καθώς το ένα μικρόφωνο μπορεί να λάβει και ήχο από άλλη πηγή ως παρεμβολή. Για να το αποφύγουμε αυτό: α) Φέρνουμε το μικρόφωνο ακόμα πιο κοντά στην πηγή αν υπάρχει η δυνατότητα, β) Χρησιμοποιούμε καρδιοειδές μικρόφωνο ή γ) Απομακρύνουμε τις πηγές μεταξύ τους.

#### Κανόνα τρία προς ένα (3:1):

Υπάρχει ένας «Κανόνας 3:1» που εφαρμόζεται ως εξής: για να μην λαμβάνει ένα μικρόφωνο ήχο από μια πηγή πέρα από την επιθυμητή και ακυρώνονται μερικές συχνότητες σαν να είχαμε ένα φίλτρο «χτένι» (comb filter, σχήμα 5.51γ), τοποθετούμε τα μικρόφωνα μεταξύ τους τρεις φορές πιο μακριά από την απόσταση τους με την πηγή. Δηλαδή αν ηχογραφούμε δυο τρομπέτες με τα μικρόφωνα τους να είναι σε απόσταση 20cm, τότε τα μικρόφωνα μεταξύ τους θα πρέπει να έχουν απόσταση  $3 \times 20 = 60\text{cm}$ . Η διαφορά της στάθμης-οφειλόμενης στην ίδια ηχητική πηγή- πρέπει να είναι τουλάχιστον 9dB μεταξύ των δύο μικροφώνων. Έτσι πετυχαίνουμε μείωση των «βυθίσεων» του comb filter περίπου στο 1dB.



Σχήμα 5.51γ

### 5.9.3 Τοποθέτηση Έμφασης

Η τεχνική της τοποθέτησης έμφασης, χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να ηχογραφήσουμε ένα σύνολο όπως μια ορχήστρα, αλλά θέλουμε να τονιστεί ένα μουσικό όργανο περισσότερο. Τότε χρησιμοποιούμε και τις δυο τεχνικές που αναφέραμε προηγουμένως συνδυαστικά. Πρώτα τοποθετούμε το/τα μικρόφωνο/α σε μακρινή απόσταση και ύστερα μετακινούμε σε κοντινή απόσταση το μικρόφωνο που θα ηχογραφήσει το όργανο που θέλουμε να τονιστεί. Προσοχή χρειάζεται καθώς το κοντινό μικρόφωνο θα χρειαστεί να τοποθετηθεί λίγο πιο μακριά από ότι αν ηχογραφούσαμε με την τεχνική της κοντινής τοποθέτησης. Αυτό συμβαίνει διότι επιδιώκουμε να λαμβάνει και κάποιο σήμα από τον

περιβάλλοντα χώρο. Αν δεν το εφαρμόζαμε κατά αυτό τον τρόπο, θα είχαμε πρόβλημα στη μίξη αφού το σήμα του οργάνου θα παρουσίαζε αρκετά διαφοροποιημένη χροιά και φάσμα στο κανάλι του κοινοτικού και στο κανάλι του μακρινού μικρόφωνου.

#### 5.9.4 Τοποθέτηση Μικροφώνων Χώρου

Στην τεχνική της τοποθέτησης μικροφώνων χώρου, πέρα από το/τα μικρόφωνο/α που τοποθετούμε για να καταγράψουμε ένα όργανο ή ένα σύνολο, τοποθετούμε και ένα μικρόφωνο με τρόπο που να λαμβάνει περισσότερο τις ανακλάσεις και πολύ λιγότερο τον απευθείας ήχο. Επομένως, το μικρόφωνο αυτό τοποθετείται μακριά από την πηγή. Έτσι, ηχογραφούμε ένα κανάλι με τον ήχο του περιβάλλοντα «χώρου» και προσδίδεται μία φυσική ακουστική στον ήχο κατά τη μίξη. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για να καταγράψει το κοινό σε μια συναυλία για παράδειγμα ή το φυσικό ήχο ενός θεάτρου.

### 5.10 Τεχνικές στερεοφωνικής ηχογράφησης με μικρόφωνα

Τις τεχνικές αυτές χρησιμοποιούμε όταν θέλουμε να αποδώσουμε στην ηχογράφηση τις συνθήκες με τις οποίες ακούν τα αυτιά του ανθρώπου ως προς την κατευθυντικότητα του ήχου, δηλαδή να ξεχωρίζουν εμφανώς το «αριστερό» και το «δεξί» μέρος ενός μουσικού συνόλου, χορωδίας ή ακόμη και ενός μουσικού οργάνου. Οι τεχνικές που είδαμε προηγουμένως είναι όλες υλοποιημένες συνήθως με μονοφωνικά μικρόφωνα και μονοφωνικά κανάλια εγγραφής. Αν όμως θέλουμε για παράδειγμα να καταγράψουμε ξεχωριστά και να διακρίνουμε τις πριμέ νότες του πιάνο που βρίσκονται στα δεξιά του κλαβιέ από της μπάσες στα αριστερά του, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε στερεοφωνική ηχογράφηση. Αυτή η στερεοφωνική διακριτή αναπαράσταση του «αριστερά» και του «δεξιά» καναλιού γίνεται εφικτή με πολλούς τρόπους. Ανάλογα με την απόσταση των μικροφώνων αλλά και την διαφορά φάσης που εισάγουν στο σήμα που μας δίνουν, οι τεχνικές στερεοφωνικής ηχογράφησης χωρίζονται στις 1) Συμπτωτικές (Coincident) 2) Ημισυμπτωτικές (Near – coincident) και 3) Απομακρυσμένες (Spaced)

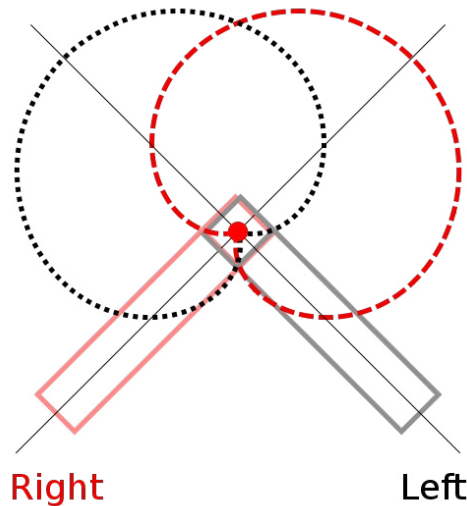
#### 5.10.1. Συμπτωτικές Τεχνικές Ηχογράφησης

Στις συμπτωτικές τεχνικές χρησιμοποιούμε δύο όμοια κατευθυντικά μικρόφωνα που τοποθετούνται υπό γωνία σε σχέση με την ηχητική πηγή και συμμετρικά ως προς τον άξονα που δημιουργείται από τα μικρόφωνα και την πηγή. Τα διαφράγματα των μικροφώνων βρίσκονται στην ίδια θέση ή όσο πιο κοντά είναι πρακτικά δυνατόν καθώς αυτές οι τεχνικές βασίζονται αποκλειστικά στην διαφορά στη στάθμη έντασης του ηχητικού σήματος. Η καλύτερη λύση είναι να βρίσκονται το ένα πάνω από το άλλο ώστε να συμπίπτουν στο οριζόντιο άξονα καθώς σε αυτόν μας ενδιαφέρει να δημιουργήσουμε τα ηχητικά είδωλα. Τα δύο μικρόφωνα τροφοδοτούν από ένα κανάλι. Επειδή τα σήματα είναι απολύτως συμφασικά έχουμε δημιουργία του πιο σταθερού και συμπαγούς ειδώλου σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές, καθώς και πλήρη συμβατότητα με τη μονοφωνική παραγωγή. Από την άλλη, όμως μεριά εμφανίζουν στην πλειονότητα τους τη λιγότερο εντυπωσιακή εικόνα από άποψη πλάτους της ορχήστρας, ενώ λόγω της κλίσης τους τα μικρόφωνα δεν κοιτάνε την ηχητική πηγή και είναι καλό να προτιμώνται μοντέλα που εμφανίζουν καλή συμπεριφορά εκτός άξονα (off axis).

#### X-Y τεχνική: Στερεοφωνία έντασης ή συμπίπτον ζεύγος

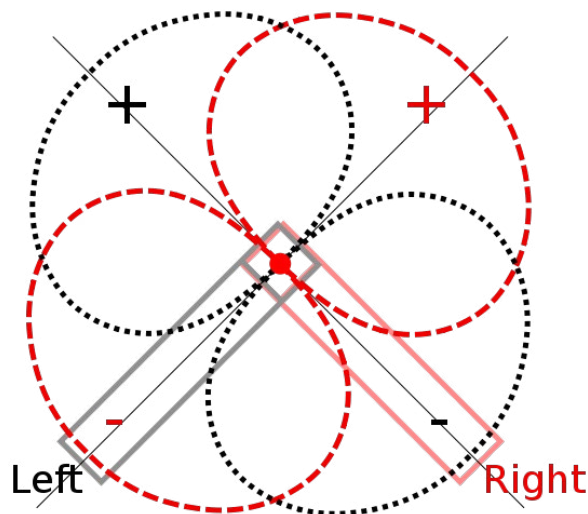
Ένα παράδειγμα συμπτωτικής τεχνικής ηχογράφησης είναι η τεχνική X-Y. Εδώ υπάρχουν δύο κατευθυ-

ντικά μικρόφωνα στον ίδιο χώρο και τοποθετούνται τυπικά σε γωνία  $90^\circ$  ή περισσότερο το ένα προς το άλλο. Το στερεοφωνικό αποτέλεσμα επιτυγχάνεται μέσω των διαφορών σε επίπεδο πίεσης SPL του ήχου μεταξύ των δύο μικρόφωνων. Το συμπύκνωτο ζεύγος δημιουργείται με δύο πανομοιότυπα μικρόφωνα, συνήθως καρδιοειδή. Τα μικρόφωνα είναι τοποθετημένα υπό γωνία ( $60^\circ - 135^\circ$ ,  $90^\circ - 135^\circ$ ,  $60^\circ - 130^\circ$ ) και συμμετρικά ως προς τον κεντρικό άξονα που κοιτάζει την ηχητική πηγή. Συνήθως τα μικρόφωνα σημαδεύουν τα άκρα της πηγής. Με αυτή τη ρύθμιση, τα ηχητικά κύματα θα φτάσουν και τα δύο στις κάψουλες ταυτόχρονα, αλλά με διαφορετική ένταση. Η τεχνική αυτή μπορεί επιλεγεί για το βέλτιστο εντοπισμό του ήχου στο δωμάτιο (σχήμα 5.52).



Σχήμα 5.52

Όταν τα μικρόφωνα είναι δι-κατευθυντικά και στραμμένα κατά  $\pm 45^\circ$  σε σχέση με την πηγή του ήχου, η X-Y στερεοφωνική τεχνική ονομάζεται «ζεύγος Blumlein» (σχήμα 5.53). Η ηχητική εικόνα που παράγεται από την παρούσα διάταξη θεωρείται από πολλούς ο τρόπος να δημιουργήσουν μια πιο ρεαλιστική, σχεδόν ολογραφική εικόνα ήχου.

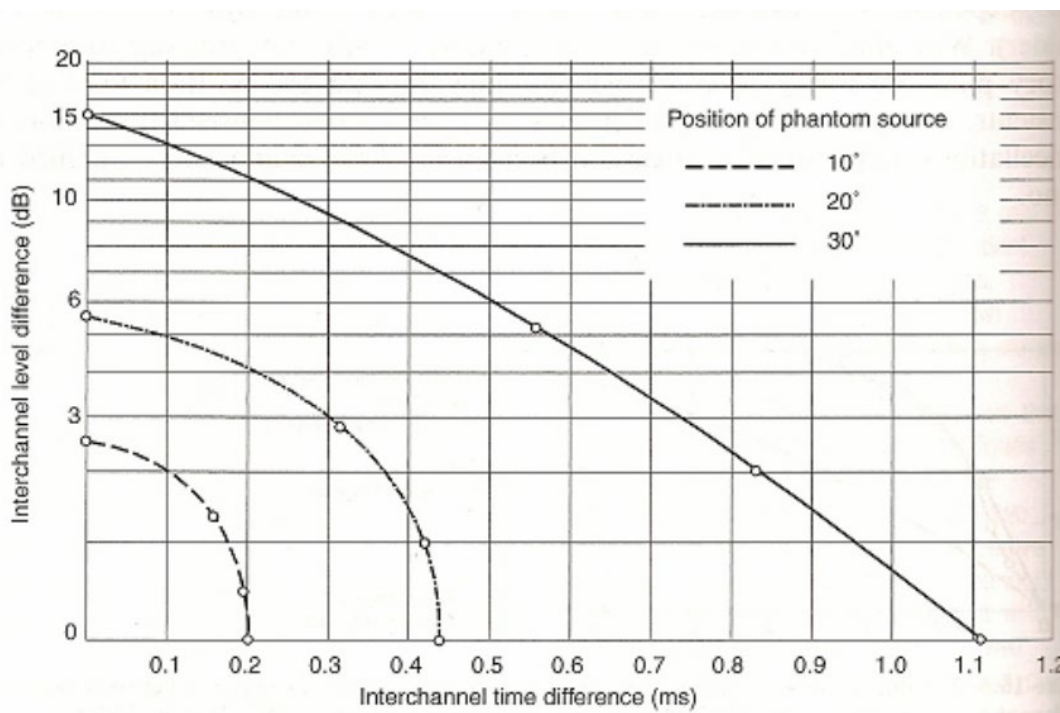


Σχήμα 5.53

Μια περαιτέρω βελτίωση της Blumlein τεχνικής αναπτύχθηκε από την EMI το 1958, και την αποκάλεσαν «Stereosonic». Πρόσθεσαν επίτηδες κάποιο crosstalk των καναλιών με μηδενική διαφορά φάσης σε συχνότητες άνω των 700Hz. Έτσι πέτυχαν την καλύτερη ευθυγράμμιση των πηγών μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων με την πηγή που έχει απόκριση χαμηλών συχνοτήτων.

### 5.10.2 Ημισυμπτωτικές Τεχνικές Ηχογράφησης

Στις ημισυμπτωτικές τεχνικές τα διαφράγματα των δύο μικροφώνων είναι απομακρυσμένα μεταξύ τους κατά απόσταση περίπου ίση με την απόσταση των δύο ανθρώπινων αυτιών. Σε αυτές τις τεχνικές, συνεισφέρουν στη δημιουργία της στερεοφωνικής εικόνας οι διαφορές χρόνου και φάσης κυρίως, μαζί βέβαια με κάποιες διαφορές έντασης. Με αυτό τον τρόπο είναι πιο εύκολος ο εντοπισμός των κινουμένων ήχων αλλά αυξάνεται και το εύρος του ηχητικού πεδίου της εγγραφής. Κατά συνέπεια η λήψη αποκτά μεγαλύτερη φυσικότητα, αλλά και μικρότερη συμβατότητα με τα μονοφωνικά συστήματα αναπαραγωγής. Στην πραγματικότητα οι ημισυμπτωτικές τεχνικές είναι αμέτρητες καθώς μπορούν να γίνουν διάφοροι συνδυασμοί γωνιών και αποστάσεων των δύο μικροφώνων. Οι συνδυασμοί αυτοί μπορούν να καθοριστούν από τις καμπύλες του Michael Williams (σχήμα 5.54). Οι καμπύλες αυτές δείχνουν πως υπάρχει άμεσος συσχετισμός μεταξύ της διαφοράς στο χρόνο άφιξης του ηχητικού σήματος και της διαφοράς στην ένταση με την οποία λαμβάνει τον ήχο κάθε αυτί. Ο συσχετισμός αυτός δίνει την αίσθηση της γωνίας υπό την οποία ακούμε την πηγή.



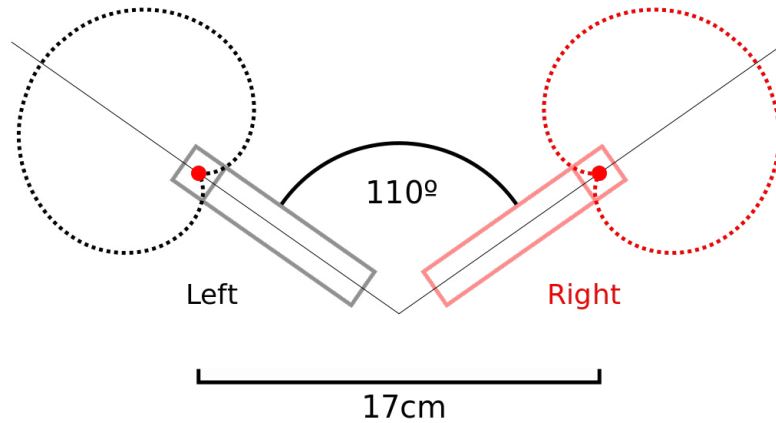
Σχήμα 5.54

#### Τεχνική O.R.T.F.

Η τεχνική ηχογράφησης O.R.T.F. (σχήμα 5.55) χρησιμοποιεί μία διάταξη από δύο καρδιοειδή μικρόφωνα και πήρε το όνομα της από τον οργανισμό που πρώτος την εφάρμοσε, το γαλλικό ραδιόφωνο ("Office de Radio-diffusion – Télévision Française"). Είναι η πιο διαδεδομένη ημισυμπτωτική τεχνική



και σε αυτήν τα δύο μικρόφωνα απέχουν 17 εκατοστά και η μεταξύ τους γωνία είναι 110°. Επειδή όμως η απόσταση και η γωνία είναι αλληλοεξαρτώμενες (λόγω των καμπυλών “Williams”) η απόσταση μπορεί να κυμανθεί από 5 έως 30 εκ. ενώ η γωνία από 0° έως 180°. Παρέχει εξαιρετική ακρίβεια στον εντοπισμό των πηγών και ικανοποιητική αίσθηση του χώρου.



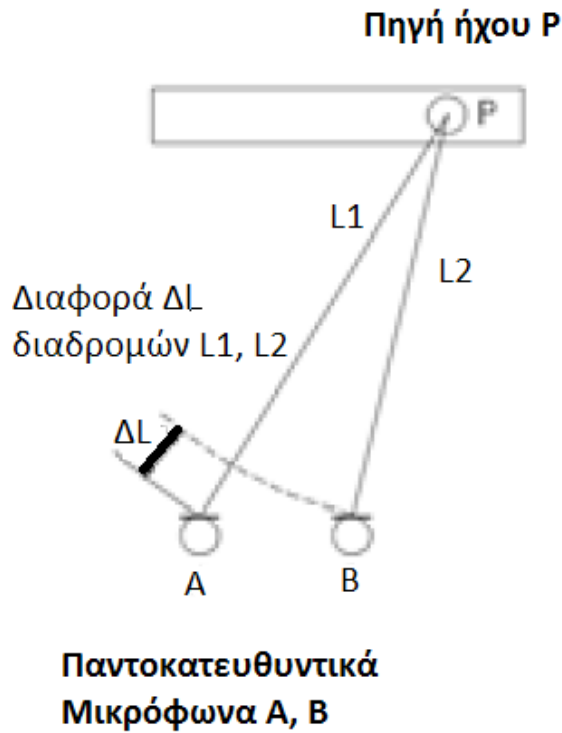
Σχήμα 5.55

### 5.10.3 Απομακρυσμένες Τεχνικές Ηχογράφησης

Στις απομακρυσμένες τεχνικές χρησιμοποιούνται κυρίως παντοκατευθυντικά μικρόφωνα καθώς αυτές βασίζονται αποκλειστικά στις διαφορές στο χρόνο άφιξης του ηχητικού σήματος.

A-B τεχνική: στερεοφωνία βάσει της ώρας άφιξης του σήματος:

Η απομακρυσμένη τεχνική αυτή χρησιμοποιεί δύο ίδια παντοκατευθυντικά μικρόφωνα σε μια ορισμένη απόσταση  $d$  μεταξύ τους (π.χ. 50cm), που βρίσκονται τοποθετημένα σε διαφορετική απόσταση μπροστά από την πηγή ήχου και στραμμένα προς την ίδια κατεύθυνση (σχήμα 5.56). Λόγω της διαφορά μήκους της διαδρομής που διανύει ο ήχος από την πηγή προς κάθε μικρόφωνο, τα ηχητικά κύματα θα φτάσουν στα μικρόφωνα με χρονική διαφορά. Έτσι, θα έχουμε χρονικές καθυστερήσεις μεταξύ των δύο σημάτων των μικρόφωνων. Όταν οι καταγραφές των δυο μικροφώνων καταγραφούν και αναπαραχθούν, τα αυτιά του ακροατή θα αντιληφθούν τη χρονική διαφορά ως κατευθυντικότητα και χωρική εικόνα. Αυτή η τεχνική επιλέγεται για μια πιο φυσική εικόνα του πραγματικού χώρου στον οποίο γίνεται η ηχογράφηση. Σε μια απόσταση περίπου 60 cm (24 in), ο χρόνος καθυστέρησης ή χρονική διαφορά άφιξης για να φθάσει ένα σήμα στο πρώτο μικρόφωνο και στη συνέχεια στο άλλο είναι περίπου 1,5 ms (από 1 έως 2 ms συνήθως). Αν αυξήσουμε την απόσταση μεταξύ των μικρόφωνων, μπορούμε να μειώσουμε αποτελεσματικά τη γωνία λήψης.



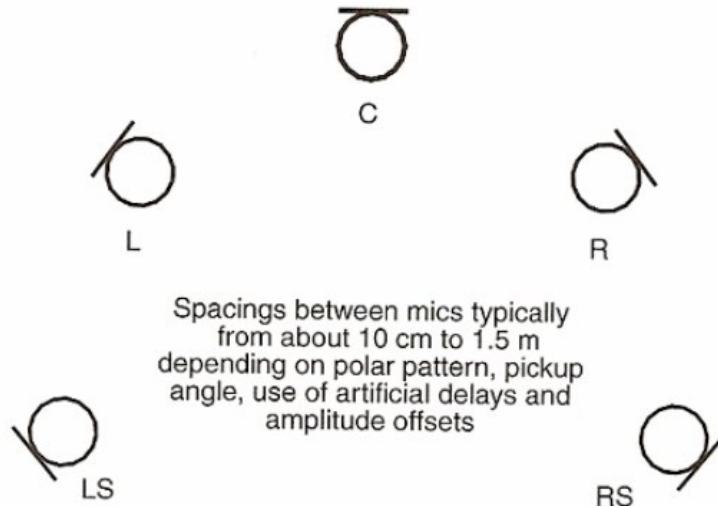
Σχήμα 5.56

Απομακρυσμένες Τεχνικές Ηχογράφησης 5.1

Στις απομακρυσμένες τεχνικές για συστήματα περιφερειακού ήχου surround 5.1, η ηχογράφηση γίνεται εν γένει με 5 μικρόφωνα σε διάταξη αντίστοιχη αυτής του συστήματος αναπαραγωγής.

Το έκτο κανάλι «.1» παράγεται από μία χαμηλοπερατή έξοδο ενός εκ των μικροφώνων καθώς η κατευθυντικότητα του καναλιού χαμηλών συχνοτήτων κάτω των 150Hz δεν είναι εύκολα αισθητή από το ανθρώπινο αυτί.

Στη γενική διάταξη μικροφώνων ηχογράφησης surround, οι αποστάσεις μεταξύ των μικροφώνων κυμαίνονται από 10 εκ. έως 1.5 μ. αναλόγως του πολικού τους διαγράμματος, των γωνιών και της αναμενόμενης εκ των υστέρων επεξεργασίας των σημάτων (σχήμα 5.57).



Σχήμα 5.57

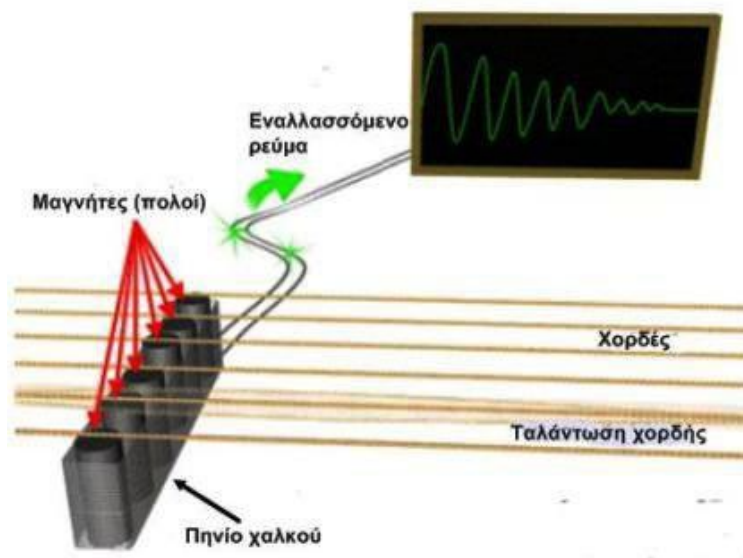
## 5.11 Ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς σήματος

Πέρα από τους διάφορους τύπους μικροφώνων που είδαμε στις προηγούμενες ενότητες, υπάρχουν και διάφοροι μετατροπείς σήματος που δεν στηρίζονται στην αρχή λειτουργίας των μικροφώνων. Για παράδειγμα, πολλά έγχορδα μουσικά όργανα δε διαθέτουν «σώμα» ή «σκάφος» με κοιλότητες που να δρα ως ακουστικός ενισχυτής. Σε αυτή την περίπτωση δε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μικρόφωνα για λήψη του ακουστικού σήματός τους καθώς η στάθμη του σήματος και φυσικά ο σηματοθυρβικός λόγος θα ήταν πολύ χαμηλά. Το γεγονός ότι οι χορδές που χρησιμοποιούν αυτά τα έγχορδα είναι συνήθως μεταλλικές, έδωσε την ιδέα να κατασκευαστούν ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς που θα λαμβάνουν ως σήμα εισόδου την ταλάντωση της μεταλλικής χορδής. Ένας από τους πρωτοπόρους ήταν ένας μηχανικός της εταιρίας εγχόρδων Gibson ονόματι Lloyd Loar. Το 1924 ανέπτυξε ένα ηλεκτρικό μαγνήτη για βιόλα και άλλα έγχορδα. Οι μετατροπείς αυτοί ονομάστηκαν «μαγνήτες» καθώς διέθεταν μόνιμο μαγνήτη που δημιουργούσε το κατάλληλο μαγνητικό πεδίο μέσα στο οποίο κινείται η μεταλλική χορδή. Ένα ή περισσότερα πηνία που διαθέτει ο μετατροπέας παράγουν μικρές τιμές (μερικές δεκάδες mV) εναλλασσόμενης τάσης εξ επαγωγής. Ο μαγνήτης τοποθετείται συνήθως ακριβώς κάτω από τις μεταλλικές χορδές μίας κιθάρας ή άλλου εγχόρδου (όπως το ηλεκτρικό μπάσο) και λαμβάνει την ταλάντωσή τους. Τα μουσικά όργανα που διέθεταν τέτοιους ηλεκτρομαγνητικούς μετατροπείς ονομάστηκαν ιστορικά «ηλεκτρικά» όργανα με δημοφιλέστερο την ηλεκτρική κιθάρα που καθιερώθηκε από τη δεκαετία του 1950 στο χώρο της μουσικής. Η πρώτη εμπορικής παραγωγής ηλεκτρική κιθάρα ήταν στην πραγματικότητα μια παραδοσιακή κιθάρα στυλ Χαβάης που έχει σχήμα σαν «τηγάνι». Η κιθάρα αυτή αναπτύχθηκε και βγήκε στο εμπόριο από τον George Beauchamp και Adolph Rickenbacher το 1932. Στο σχήμα 5.58 βλέπουμε αυτή την πρώτη ηλεκτρική κιθάρα.



Σχήμα 5.58

Στο παρακάτω σχήμα 5.59, παρατηρούμε έναν μαγνήτη κιθάρας που διαθέτει ένα πηνίο και παρουσιάζεται σχηματικά η λειτουργία του:



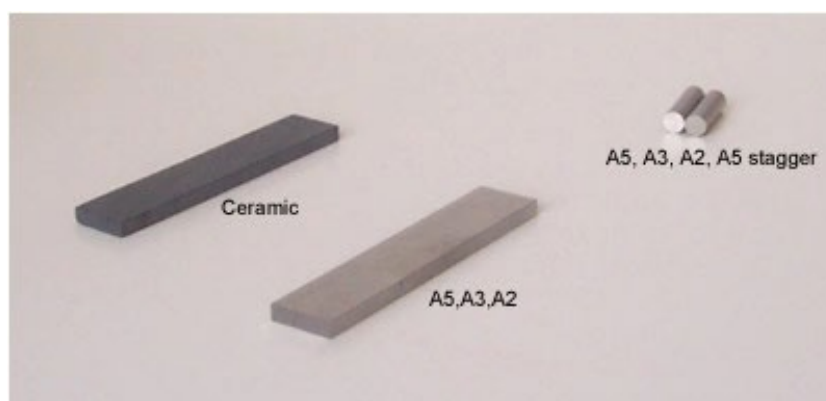
Σχήμα 5.59

Οι πρώτοι μαγνήτες χρησιμοποιούσαν παραδοσιακά ένα πηνίο για τη λήψη της ταλάντωσης των χορδών και ονομάζονταν «μονού πηνίου» ή «single-coils». Το πηνίο χαλκού είχε χιλιάδες ελίγματα (2000 έως 10000) που σχηματίζονταν από το τυλίγμα μονωμένου με βερνίκι καλωδίου γύρω από πλαστικές μπομπίνες ή μεταλλικές ράβδους. Τα λεπτά καλώδια για το σχηματισμό του πηνίου ήταν τύπου 43 ή 42 AWG (American Wire Gauge) που αντιστοιχεί σε διάμετρο καλωδίου 0.0564 ή 0.0633mm. Η ωμική αντίσταση του πηνίου είναι συνήθως της τάξης μερικών kΩ, τυπικά περί τα 5-6kΩ. Στο σχήμα 5.60 βλέπουμε μία μηχανή τυλίγματος μαγνητών:



Σχήμα 5.60

Οι μόνιμοι μαγνήτες του συστήματος αποτελούνται είτε από μια ενιαία κεντρική μπάρα μαγνήτη ή επιμέρους μαγνήτες κάτω από κάθε χορδή. Ο μαγνήτης μπορεί να είναι κατασκευασμένος από χάλυβα ή μαγνητισμένο μαγνητικό κράμα όπως τα: Alnico τύπου A2 έως A5 (Αλουμίνιο, Νικέλιο, Κοβάλτιο), Σαμάριο κοβάλτιο ή νεοδύμιο. Ωστόσο, σε πολλά σχέδια χρησιμοποιείται ένας κεραμικός μόνιμος μαγνήτης. Παρακάτω βλέπουμε διάφορους τύπους μονίμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται (σχήμα 5.61):



Σχήμα 5.61

Το σήμα του μαγνήτη είναι γενικά ασθενές, της τάξης μερικών mV και γι αυτό ενισχύεται από κατάλληλους ενισχυτές μουσικών οργάνων ή προενισχυτές. Σήμερα, υπάρχουν προενισχυτές με smd (surface mounted) ηλεκτρονικά στοιχεία που ενσωματώνονται στην κιθάρα ή στο κέλυφος του ίδιου του μαγνήτη.

### 5.11.1 Μικροφωνισμοί

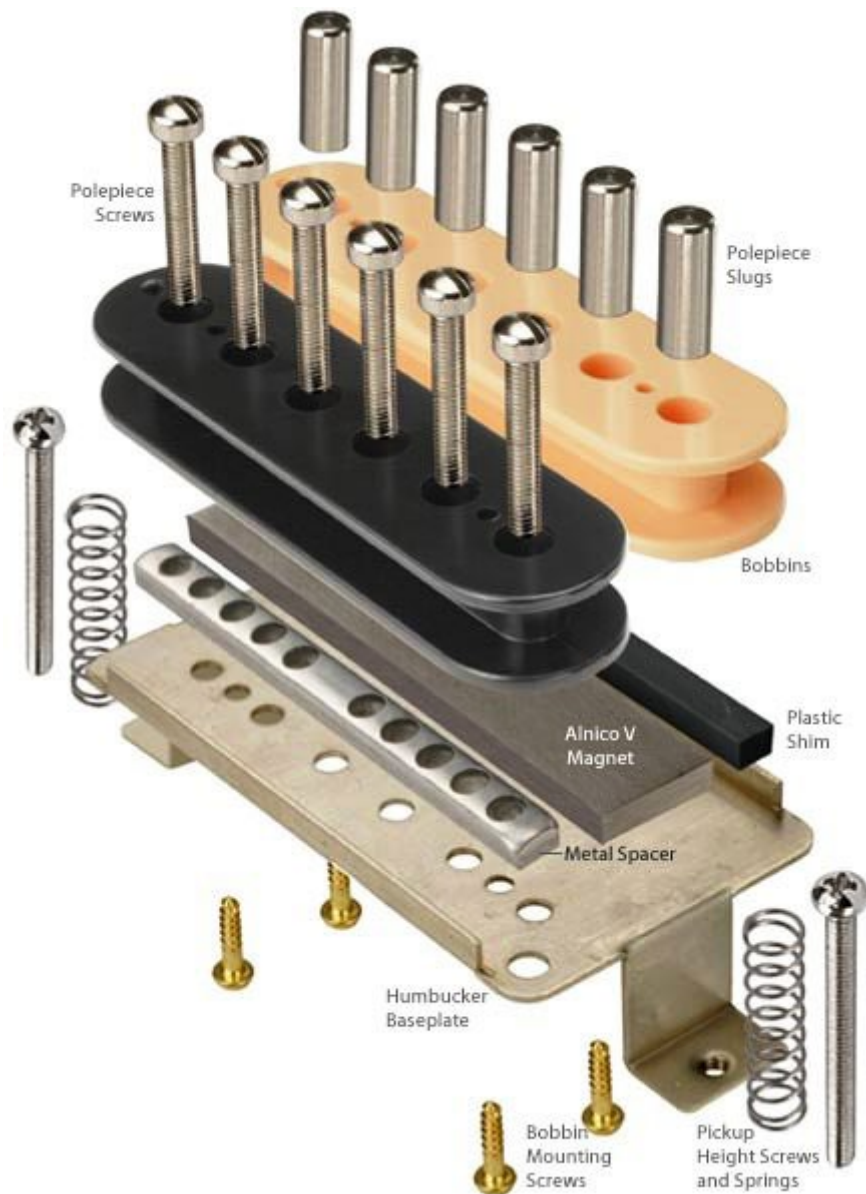
Ένα πρόβλημα που παρουσιάστηκε εξ αρχής ήταν πως το πηνίο του μαγνήτη συντονιζόταν μηχανικά σε μεγάλες εντάσεις και μεγάλα κέρδη ενίσχυσης δημιουργώντας μικροφωνισμούς και feedback. Η λύση ήταν να εμποτίζεται ολόκληρος ο μαγνήτης, με το εξωτερικό του μεταλλικό καπάκι σε τηγμένο κερί. Το κερί αντικαθιστούσε τα μόρια αέρα εντός του πηνίου και των κοιλοτήτων του μαγνήτη κρατώντας σταθερή τη δομή του και αποσβένοντας μηχανικές ταλαντώσεις.

### 5.11.2 Ραδιοφωνικές και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (RFI, EMI)

Ένα άλλο ζήτημα ήταν ο θόρυβος που επαγόταν από τα καλώδια τροφοδοσίας των μηχανημάτων στο πηνίο του μαγνήτη και άλλοι εξωτερικοί θόρυβοι λόγω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Διάφορες προσπάθειες έγιναν για τη μείωση των παρεμβολών από ηλεκτρομαγνητικά πεδία του περιβάλλοντος. Αρχικά, τα πλαστικά κελύφη των μαγνητών αντικαταστάθηκαν από μεταλλικά γειωμένα κελύφη που δρουν ως κλωβός Farad θωρακίζοντας το σύστημα από εξωτερικές ραδιοφωνικές και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (RFI, EMI). Τα καλώδια σύνδεσης του μαγνήτη με τον εξοπλισμό ενίσχυσης έγιναν ομοαξονικά με μπλεντάζ-ασπίδα γείωσης για να μειωθεί περαιτέρω κάθε υψηλής συχνότητας παρεμβολή.

### 5.11.3 Ο βόμβος (hum)

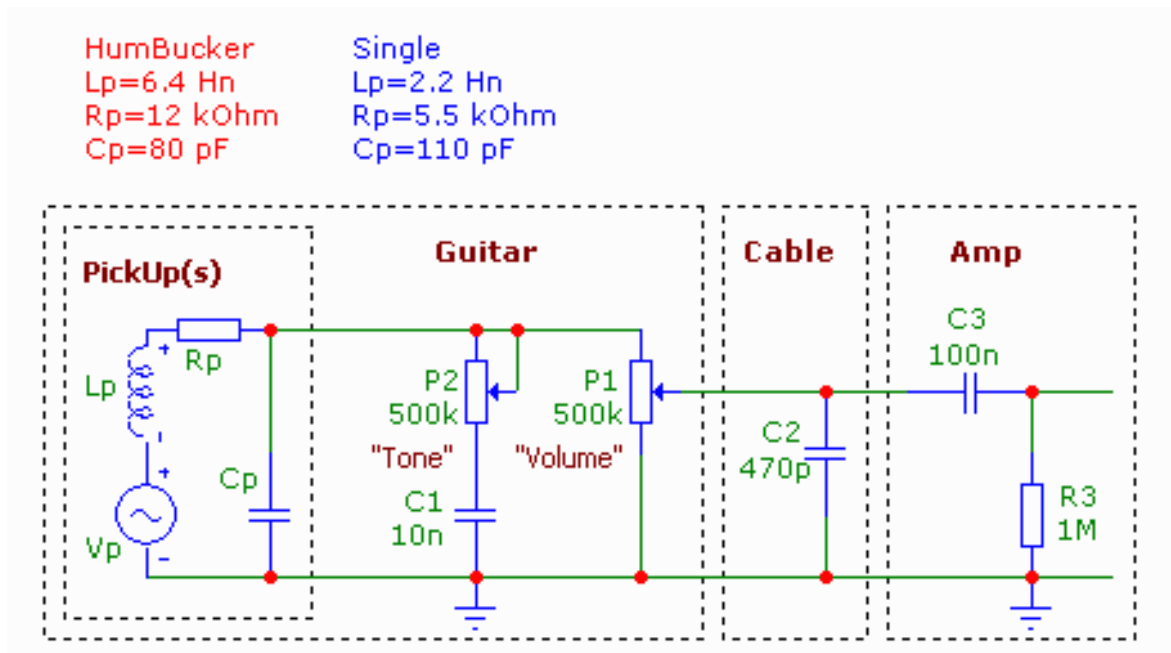
Όμως σε κάθε περίπτωση εμφανιζόταν ένας βόμβος χαμηλής συχνότητας περί τα 50-60Hz. Αυτός ο βόμβος επάγεται από το δίκτυο παροχής ρεύματος και είναι συνήθως ισχυρότερος των λοιπών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Η λύση σε αυτό το θέμα προτάθηκε από τον μηχανικό της Gibson, ονόματι Seth Lover τη δεκαετία του 1950. Η ιδέα του ήταν να χρησιμοποιήσει 2 πηνία που θα αλληλο-ακυρώνουν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που ήταν υπεύθυνα για τον ανεπιθύμητο χαμηλών συχνοτήτων θόρυβο ή «hum» στα αγγλικά. Οι μαγνήτες αυτοί ονομάστηκαν «humbuckers» καθώς ακύρωναν το βόμβο ή «hum». Οι humbuckers αποτελούνται από ένα ζεύγος κλασικών μαγνητών μονού πηνίου τοποθετημένους πλάι-πλάι, με την πολικότητα του δεύτερου μαγνήτη αντεστραμμένη. Τα πηνία των δύο μαγνητών συνδέονται εν σειρά. Τα δύο πηνία συνδέονται εκτός φάσης, αλλά αναστρέφοντας το μαγνητικό πεδίο στον ένα μαγνήτη βάζει το σήμα πίσω σε φάση. Η τεχνική αυτή σύνδεσης ονομάζεται RWRP (reverse wound, reverse polarity) ή «ανεστραμμένου τυλίγματος, ανεστραμμένης μαγνητικής πόλωσης». Ως εκ τούτου, τα 2 πηνία λειτουργούν σαν ένας διαφορικός ενισχυτής. Επομένως, οποιοσδήποτε βόμβος ή θόρυβος λαμβάνεται από κοινού και από τα 2 πηνία, τίθεται εκτός φάσης και μειώνεται κατά πλάτος. Αντίθετα, το διαφορικό σήμα από την ταλάντωση των χορδών που εμφανίζεται σε κάθε πηνίο δε μειώνεται. Μάλιστα, για τα κύματα των χορδών, κάθε πηνίο συμβάλλει προσθετικά και έχουμε διπλασιασμό του συνολικού πλάτους του επιθυμητού σήματος. Επομένως, έχουμε μία μεγάλη βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Στα αρνητικά αυτής της κατασκευής συγκαταλέγονται το διπλάσιο μέγεθος και βάρος της αλλά και η απόσβεση που παρουσιάζει σε υψηλές συχνότητες του ακουστικού φάσματος. Στο σχήμα 5.62 βλέπουμε τη δομή ενός «humbucker» διπλού μαγνήτη:



Σχήμα 5.62

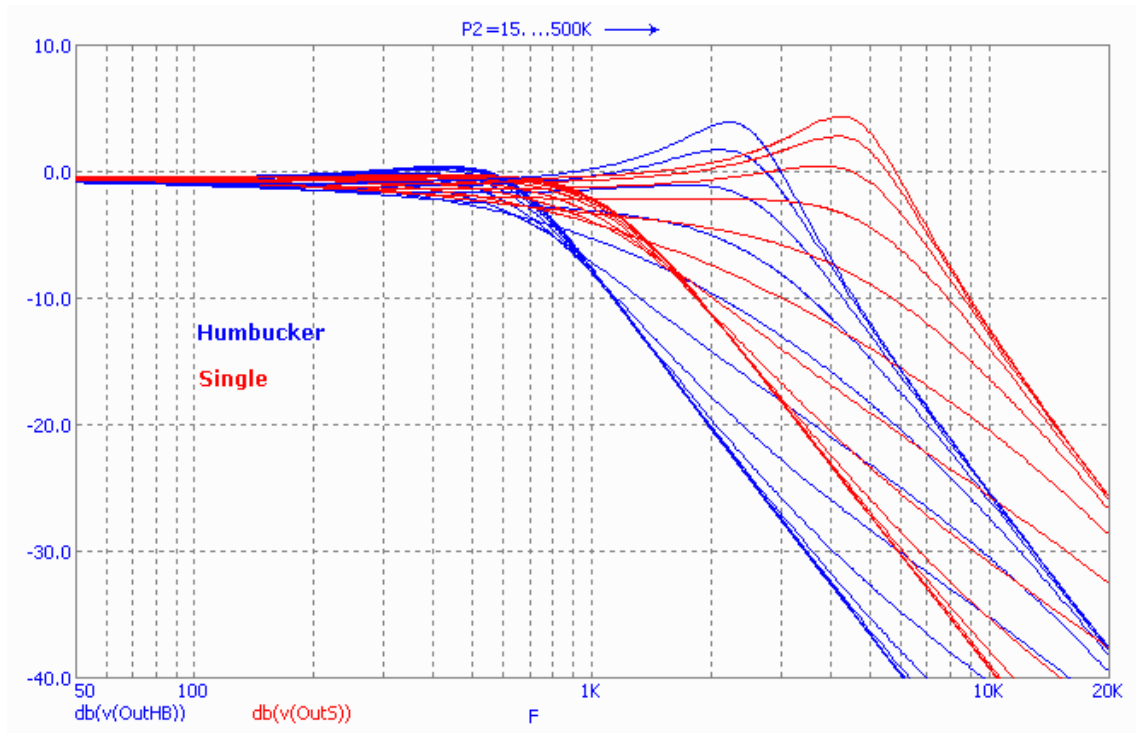
#### 5.11.4 Απόκριση συχνοτήτων μαγνητών κιθάρας

Οι μονοί και διπλοί μαγνήτες που είδαμε στις προηγούμενες ενότητες παράγονται με διάφορες παραλλαγές για διάφορες χρήσεις. Σχεδόν πάντοτε όμως συνδέονται σε κάποιο κύκλωμα ελέγχου της έντασης και των υψηλών συχνοτήτων τους αλλά και κάποιον ενισχυτή. Το σύστημα μαγνήτη-ελέγχου-ενισχυτή παρουσιάζει χαρακτηριστικά φίλτρου. Η χρήση βαθυπερατού φίλτρου για τη μείωση του επιπέδου των υψηλών συχνοτήτων ήταν μία τεχνική που χρησιμοποιήθηκε εξ αρχής από τις εταιρίες παραγωγής κιθαρών. Το μεταβλητό αυτό βαθυπερατό φίλτρο αποτελείται από μία μεταβλητή αντίσταση μέγιστης τιμής συνήθως 50-500KΩ και έναν πυκνωτή χωρητικότητας 10- 100nF. Στο σχήμα 5.63 βλέπουμε το σχηματικό ηλεκτρονικό διάγραμμα του συνολικού συστήματος μαγνήτη-φίλτρου-καλωδίου - 1<sup>ου</sup> σταδίου του ενισχυτή:



Σχήμα 5.63

Στο σχήμα 5.64 παρατηρούμε τη μεταβολή της απόκρισης ενός μαγνήτη μονού κι ενός διπλού πηνίου, καθώς μεταβάλλουμε την αντίσταση του ποτενσιόμετρου  $P_2$  του βαθυπερατού φίλτρου της κιθάρας από την τιμή 15KΩ έως τιμή 500KΩ. Θεωρούμε σταθερές τις λοιπές παραμέτρους του συστήματος του σχήματος 5.63.



Σχήμα 5.64

### **Βιβλιογραφία για το 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο:**

- «Ανάπτυξη και διαχείριση συλλογής» - Μονιάρου Β. , Αθήνα: ΤΕΙ Αθηνών, 2004
- «The Audio Expert»- Ethan Winer, published by Focal Press (ISBN: 9780240821009)
- «Edison, His Life and Inventions» - Frank Lewis Dyer
- «Εισαγωγή στη Μικροηλεκτρονική» - C. C. Katsidis
- «Εισαγωγή στα χαρακτηριστικά των μικροφώνων», Μηνάς Εμμανουήλ ΤΕΙ Κεφαλονιάς 2007 –2008
- «Fits & Starts Productions» - Mike Sokol, Hector La Torre , USA
- «The Recording and Reproduction of Sound» - Read, Oliver. Published by Indianapolis. Sams, 1949
- «Designing Audio Circuits» - Robert Sontheimer, Elektor International Media, 1998

### **Πηγές από το διαδίκτυο:**

- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/audio/bias.html#c2>
- <http://el.wikipedia.org/wiki/Φωνογράφος>
- <http://metadataregistry.org/conceptprop/show/id/2805.html>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Single\\_%28music%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Single_%28music%29)
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Pickup>
- <http://www.cs.huji.ac.il/~springer/DigitalNeedle/index.html>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Gramophone\\_record](http://en.wikipedia.org/wiki/Gramophone_record)
- <https://www.nonstopsystems.com/radio/hellschreiber-modes-other-mfrs.htm>
- <http://www.edsstuff.org/docs/PickupTechnology.pdf>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_cartridge](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_cartridge)
- <http://www.originlive.com/dynavector/cartridges-mc-mm/dynavector-mc-mm-cartridge.html>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/LP\\_record](http://en.wikipedia.org/wiki/LP_record)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Vertical\\_cut\\_recording](http://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_cut_recording)
- <http://www.33audio.com/enter/data/Linn.pdf>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnet>
- <http://www.dspguide.com/ch22/1.htm>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting>
- [http://el.wikipedia.org/wiki/Μαγνητική\\_ταινία](http://el.wikipedia.org/wiki/Μαγνητική_ταινία)



<http://www.vintagecassette.com>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Compact\\_Cassette](http://en.wikipedia.org/wiki/Compact_Cassette)  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/audio/tapecon.html>  
[http://artsites.ucsc.edu/EMS/music/equipment/analog\\_recorders/analog\\_recorders.html](http://artsites.ucsc.edu/EMS/music/equipment/analog_recorders/analog_recorders.html)  
[http://artsites.ucsc.edu/EMS/music/tech\\_background/TE-20/teces\\_20.html](http://artsites.ucsc.edu/EMS/music/tech_background/TE-20/teces_20.html)  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Microcassette>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Loop\\_bin\\_duplicator](http://en.wikipedia.org/wiki/Loop_bin_duplicator)  
<http://www.d.umn.edu/~mharvey/th1551reeltoreelcassetteda.html>  
<http://www.tpub.com/journalist/165.htm>  
<http://www.angelfire.com/electronic2/vintagetx/Recording.html>  
<http://home.comcast.net/~mrltapes/equaliz.html>  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/audio/audiocon.html#c1>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Reel-to-reel\\_audio\\_tape\\_recording](http://en.wikipedia.org/wiki/Reel-to-reel_audio_tape_recording)  
<http://globalrecordings.net/en/232>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wow\\_\(recording\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Wow_(recording))  
<http://hypertextbook.com/facts/2000/TienHueyHeh.shtml>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wow\\_and\\_flutter\\_measurement](http://en.wikipedia.org/wiki/Wow_and_flutter_measurement)  
<http://www.katsurashareware.com/chromatic/chromaticau.html>  
<http://www.manquen.net/audio/index.php?page=20>  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Microphone>  
[http://artsites.ucsc.edu/EMS/Music/tech\\_background/TE-20/teces\\_20.html](http://artsites.ucsc.edu/EMS/Music/tech_background/TE-20/teces_20.html)  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/audio/mic.html>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_microphone](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_microphone)  
<http://www.google.com/patents/US222390>  
<http://www.coutant.org/u47/u47u48.pdf>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Valve\\_microphone](http://en.wikipedia.org/wiki/Valve_microphone)  
<http://www.coutant.org/u47/>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electret\\_microphone](http://en.wikipedia.org/wiki/Electret_microphone)  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluoroethylene>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Lavalier\\_microphone](http://en.wikipedia.org/wiki/Lavalier_microphone)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Field\\_effect\\_transistor](http://en.wikipedia.org/wiki/Field_effect_transistor)

[http://www.mit.edu/~sysun/MAS531\\_laser.html](http://www.mit.edu/~sysun/MAS531_laser.html)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_microphone](http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_microphone)

<http://el.wikipedia.org/wiki/Πιεζοηλεκτρισμός>

<http://www.thenakedscientists.com/HTML/content/interviews/interview/1076/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical\\_systems](http://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical_systems)

<http://www.dpamicrophones.com/en/Mic-University/Tech-Guide/Directional-vs-Omnidirectional-Microphones.aspx>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Balanced\\_audio](http://en.wikipedia.org/wiki/Balanced_audio)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Balanced\\_line](http://en.wikipedia.org/wiki/Balanced_line)

<http://whirlwindusa.com/support/tech-articles/unbalanced-vs-balanced-lines/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/DI\\_unit](http://en.wikipedia.org/wiki/DI_unit)

<http://www.sugardas.lt/~igoramps/article57.htm>

[http://www.stewmac.com/How-To/Online\\_Resources/Pickups\\_and\\_Electronics/Single-coil\\_Pickup\\_Kits.html](http://www.stewmac.com/How-To/Online_Resources/Pickups_and_Electronics/Single-coil_Pickup_Kits.html)

<http://www.soundmattersblog.com/history-development-magnetic-pickups/>

[http://www.soundlevel.gr/inner.php?sub2=68&sub1=68&menu\\_id=11](http://www.soundlevel.gr/inner.php?sub2=68&sub1=68&menu_id=11)

<http://www.bl.uk/subjects/sound>

[http://www.badenhausen.com/VSR\\_History.htm](http://www.badenhausen.com/VSR_History.htm)

---

## Κεφάλαιο 6: Ψηφιακές πηγές ήχου

---

### 6.1 Εισαγωγή

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο είδαμε αναλυτικά διάφορες αναλογικές πηγές ήχου και τα χαρακτηριστικά τους εκείνα που επηρεάζουν την πιστή αναπαραγωγή ήχου. Στα αναλογικά αυτά συστήματα, η εγγραφή του ήχου γινόταν αναλογικά όπως και η αναπαραγωγή του. Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα δούμε αναλυτικά τα ψηφιακά συστήματα ήχου και τις ψηφιακές πηγές ήχου. Με την έννοια «ψηφιακές πηγές ήχου» ορίζουμε τις συσκευές εκείνες που δέχονται ως είσοδο ψηφιακά σήματα και παράγουν στην έξοδό τους αναλογικό ηχητικό ηλεκτρικό σήμα.

Πλέον οι σημαντικότερες και δημοφιλέστερες ψηφιακές πηγές ήχου είναι οι συσκευές αναπαραγωγής ψηφιακών αποθηκευτικών μέσων όπως: οι ψηφιακές κασέτες ήχου (Digital Audio Tapes, DAT), οι συμπαγείς δίσκοι ήχου (Compact Disc, CD), οι δίσκοι ταινιών DVD (digital video disc) και BD (Blue Ray disc). Ψηφιακές πηγές ήχου είναι και οι διάφορες συσκευές που αναπαράγουν ψηφιακά αρχεία ήχου όπως Mp3 και AAC καθώς και οι δικτυακές συσκευές μετάδοσης ψηφιακών αρχείων. Στην πράξη όλες αυτές οι συσκευές αναπαράγουν κάποια μορφή ψηφιακού ηχητικού αρχείου αφού το αποκωδικοποιήσουν και το μετατρέψουν σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα. Η μουσική και ο ήχος που έχει εγγραφεί στα ψηφιακά αυτά αρχεία και μέσα αποθήκευσης έχει περάσει από κατάλληλες διαδικασίες μετατροπής. Για να κατανοήσουμε πως οι ψηφιακές πηγές ήχου λειτουργούν και ποιες παράμετροί τους επηρεάζουν την πιστή αναπαραγωγή ήχου, θα πρέπει πρώτα να δούμε τις διαδικασίες αυτές μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.

Καθώς το ηχητικό σήμα που παράγεται για παράδειγμα από μουσικά όργανα ή την ανθρώπινη φωνή είναι αναλογικό, καταλαβαίνουμε πως δε μπορούμε να έχουμε μόνο ψηφιακή επεξεργασία ενός ηχητικού σήματος αλλά είναι απαραίτητη η μετατροπή του από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα και το αντίστροφο σε διάφορα στάδια. Η μετατροπή αυτή είναι μία διαδικασία που εμπεριέχει τη δειγματοληψία του αναλογικού σήματος, τη κβαντοποίησή του, την κωδικοποίηση και τη συμπίεση. Η διαδικασία της ψηφιοαναλογικής μετατροπής διαφέρει ανάλογα με την ψηφιακή αναπαράσταση του σήματος που θέλουμε να δημιουργήσουμε.

Σε συστήματα επεξεργασίας ήχου σε πραγματικό χρόνο, η μετατροπή από αναλογικό σήμα σε ψηφιακό και η αντίστροφη διαδικασία πρέπει να γίνονται με όσο μικρότερη καθυστέρηση είναι δυνατόν. Αυτή η απαίτηση είναι σημαντική για τα συστήματα πραγματικού χρόνου όπως για παράδειγμα μία ψηφιακή κονσόλα ήχου που χρησιμοποιείται για ηχητική κάλυψη μίας συναυλίας ή θεατρικής παράστασης. Η απαίτηση ελάχιστης καθυστέρησης μεταφράζεται σε ταχύτατη ψηφιοαναλογική μετατροπή καθώς και σε ταχύτατη επεξεργασία από τα κυκλώματα DSP (digital signal processing). Πλέον συναντάμε επεξεργαστές DSP σε πολλά συστήματα ήχου, τόσο επαγγελματικής χρήσης όσο και απλά οικονομικά συστήματα οικιακής χρήσης.

Σε συστήματα που δεν είναι κατ' ανάγκη πραγματικού χρόνου, μετά τη δειγματοληψία του αναλογικού ηχητικού σήματος, την κβαντοποίηση και την κωδικοποίησή του, είναι απαραίτητη και η αποθήκευσή του ως ψηφιακό αρχείο. Το ψηφιακό αρχείο μπορεί αργότερα να τροποποιηθεί και να διαμορφωθεί κατάλληλα μέσα από κυκλώματα και λογισμικό DSP. Θα δούμε αναλυτικά τις δημοφιλέστερες μορφές ψηφιακών αρχείων ήχου που χρησιμοποιούνται σήμερα.

## 6.2 Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Το πέρασμα από τον αναλογικό στον ψηφιακό κόσμο είναι η διαδικασία της ψηφιοποίησης (digitization). Κατά την ψηφιοποίηση ένα σήμα αναλογικής μορφής μετατρέπεται σε ψηφιακό (συνήθως δυαδικό), δηλ. από συνεχή συνάρτηση του χρόνου μετατρέπεται σε μια σειρά διακριτών αριθμητικών τιμών. Στους Η/Υ η αναπαράσταση της κάθε πληροφορίας γίνεται σε δυαδική μορφή. Η δυαδική κωδικοποίηση χρησιμοποιεί δύο τιμές 1 και 0 οι οποίες αντιστοιχούν στις καταστάσεις θετικό και μη θετικό. Έτσι κάθε πληροφορία αποθηκεύεται σαν μια ακολουθία από 0 και 1. Για να μπορέσουμε να αποθηκεύσουμε και να επεξεργαστούμε συνεχή σήματα στον Η/Υ πρέπει επομένως να τα μετατρέψουμε σε ακολουθίες αριθμών μέσω της ψηφιοποίησης

Η ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Δειγματοληψία (sampling),
- Κβαντισμό (quantization) και
- Κωδικοποίηση (coding) (που περιλαμβάνει και τη συμπίεση)

### 6.2.1 Δειγματοληψία

Δειγματοληψία (στα αγγλικά : «sampling») είναι η μετατροπή ενός συνεχούς σήματος σε διακριτό. «Η δειγματοληψία ενός συνεχούς αναλογικού σήματος προκύπτει από την καταγραφή των τιμών του σε μια σειρά από διακριτά και ισαπέχοντα σημεία στο χρόνο (στην περίπτωση του ήχου), στο χώρο (για την περίπτωση της εικόνας) ή στο χωρόχρονο (για την περίπτωση του βίντεο)» (Πηγή:<http://users.iit.demokritos.gr/~ntsap/courses/bes04/lectures/mm02.pdf>) .

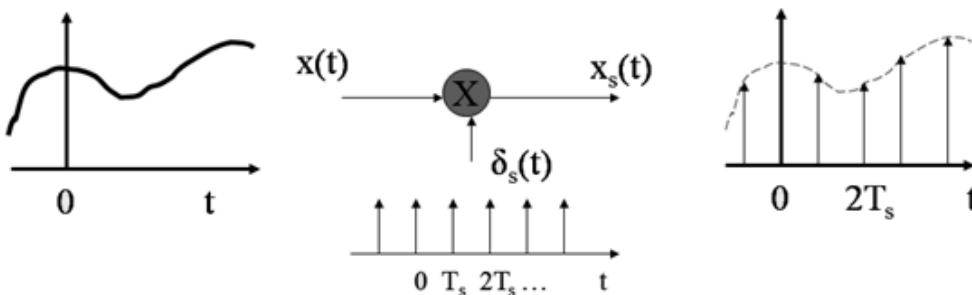
Η δειγματοληψία που μελετάμε σε αυτή την περίπτωση του ήχου αναφέρεται σε σήματα τα οποία μεταβάλλονται χρονικά. Ιδανική δειγματοληψία είναι η διαδικασία πολλαπλασιασμού ενός σήματος  $x(t)$  με μια περιοδική ακολουθία συναρτήσεων  $\delta_s(t)$ ,

$$\delta_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s)$$

Το σήμα  $x_s(t)$  που προκύπτει από την ιδανική δειγματοληψία είναι:

$$x_s(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) \delta(t - nT_s)$$

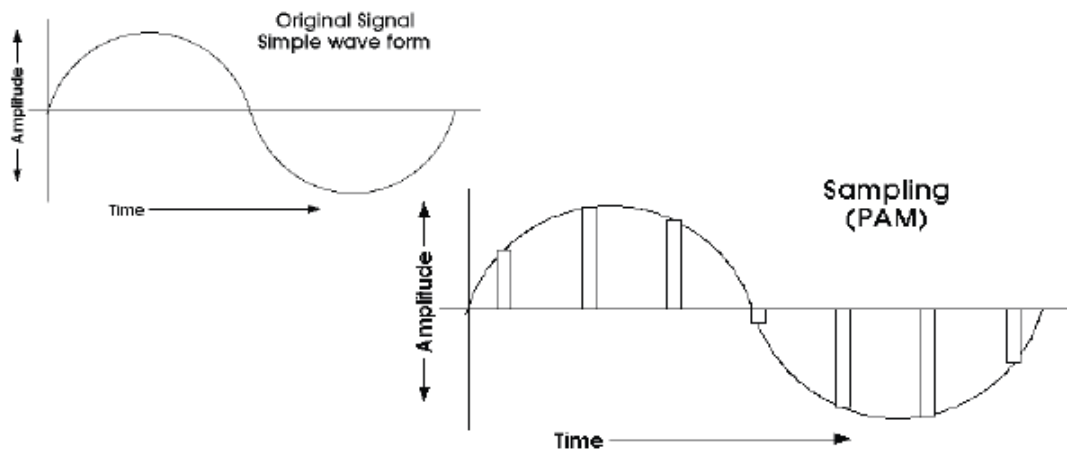
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η διαδικασία ιδανικής δειγματοληψίας:



Σχήμα 6.1

Ένα συνηθισμένο παράδειγμα δειγματοληψίας είναι η μετατροπή ενός ηχητικού σήματος (συνεχές σήμα) σε μια σειρά από δείγματα που ονομάζεται σήμα διακριτού χρόνου. Το δείγμα συνήθως αναφέρεται σε μια τιμή του συνεχούς σήματος σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Ο δειγματολήπτης είναι ένα σύστημα το οποίο εξάγει δείγματα (σε ίσα χρονικά διαστήματα) από ένα συνεχές σήμα. Ένας θεωρητικός ιδανικός δειγματολήπτης δημιουργεί δείγματα τα οποία αντιστοιχούν στην στιγμιαία τιμή του συνεχούς σήματος στα επιθυμητά χρονικά σημεία.

Με τη δειγματοληψία το σήμα μετασχηματίζεται σε μια σειρά δειγμάτων (samples). Η μορφή αυτή του σήματος είναι γνωστή και ως PAM (Pulse Amplitude Modulation). Σημειώνεται ότι το πλάτος των δειγμάτων, δηλαδή η αριθμητική τους τιμή δεν υπόκειται σε κανένα περιορισμό.



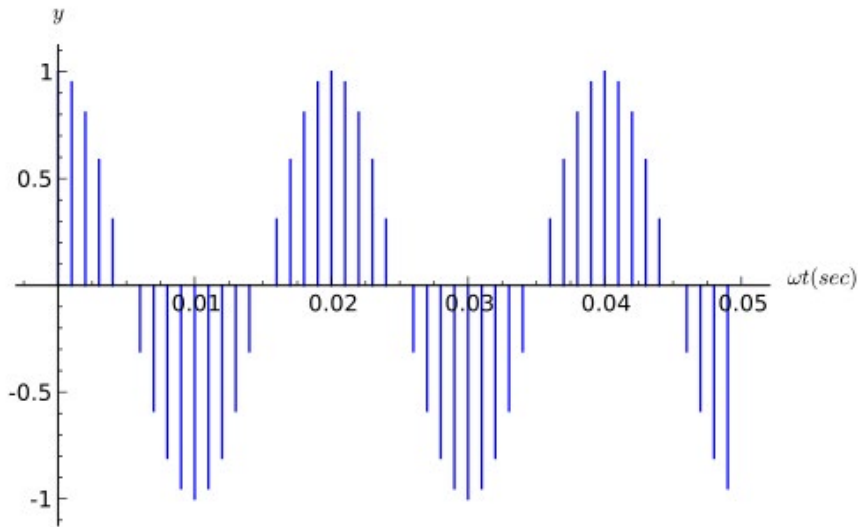
Σχήμα 6.2

Έστω  $x_c(t)$  ένα συνεχές ( $c$  είναι το αρχικό της αγγλικής λέξης continuous - συνεχές), μονοδιάστατο σήμα στο οποίο θα γίνει δειγματοληψία. Η δειγματοληψία θα γίνει παίρνοντας δείγματα του σήματος (την τιμή της συνάρτησης) ανά σταθερές χρονικές στιγμές, δηλαδή κάθε  $T$  δευτερόλεπτα.  $T$  ονομάζεται η περίοδος δειγματοληψίας του σήματος. Το σήμα  $x[n]$  στο οποίο έγινε η δειγματοληψία δίνεται από το τύπο:

$$x[n] = x_c(nT), \text{ με } n = 0, +/-1, +/-2, +/-3 \text{ κλπ}$$

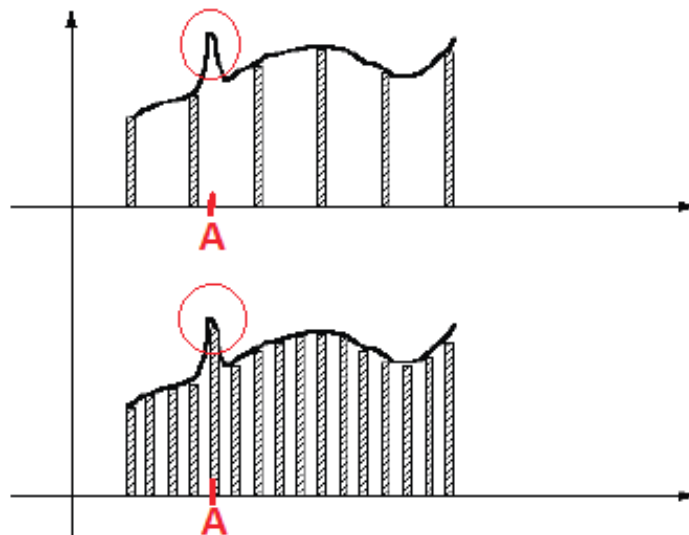
Η συχνότητα δειγματοληψίας ή ρυθμός δειγματοληψίας μετριέται στην μονάδα μέτρησης Χερτζ (Hz) και μας δείχνει πόσα δείγματα έχουν ληφθεί από τον δειγματολήπτη σε διάρκεια ενός δευτερολέπτου.

Εάν η συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s$  (όπου ο συμβολισμός  $f_s$  προκύπτει από τα αρχικά sampling frequency - συχνότητα δειγματοληψίας) είναι 1000 Hz, σημαίνει ότι ο δειγματολήπτης δημιουργεί 1000 δείγματα σε κάθε δευτερόλεπτο σήματος. Η χρονική απόσταση των δειγμάτων υπολογίζεται από τον τύπο  $f_s = 1/T_s$  όπου το  $T_s$  είναι η περίοδος δειγματοληψίας. Επομένως για συχνότητα δειγματοληψίας 1000 Hz έχουμε  $T = 1/f_s = 0,001\text{sec}$  περίοδο δειγματοληψίας. Παρακάτω βλέπουμε ένα παράδειγμα δειγματοληψίας ενός απλού ημιτόνου. Η δειγματοληψία έγινε σε κάθε 0,001 δευτερόλεπτα. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι  $f_s=1000$  Hz.



Σχήμα 6.3

Μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η πιστότητα καταγραφής του αναλογικού σήματος, εν ολίγοις, πόσο καλή μπορεί να είναι η προσέγγιση του αρχικού αναλογικού σήματος από το σήμα διακριτού χρόνου λεγόμενου και «δειγματοληπτούμενο». Στην περίπτωση που έχουμε χαμηλής συχνότητας δειγματοληψία, οι πολύ υψηλής συχνότητας ήχοι και αρμονικές δεν καταγράφονται. Έτσι, η πληροφορία που μεταφέρουν «χάνεται» αφού η περίοδός τους είναι μικρότερη από την περίοδο λήψης δειγμάτων. Το πρόβλημα διορθώνεται αν αυξήσουμε συνολικά τη συχνότητα δειγματοληψίας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πως η κορυφή που παρουσιάζει το αρχικό μας σήμα συνεχούς χρόνου στο σημείο A θα χαθεί αν το δειγματοληπούμε με χαμηλή συχνότητα. Έτσι δεν θα είναι δυνατή η πιστή ανακατασκευή του. Αντίθετα, με μεγαλύτερη συχνότητα δειγματοληψίας, θα έχουμε σαφώς μεγαλύτερη λεπτομέρεια καταγραφής και η εν λόγω κορυφή του σημείου A δεν θα χαθεί.



Σχήμα 6.4

Η τιμή της συχνότητας δειγματοληψίας πρέπει επομένως να ικανοποιεί δύο αντικρουόμενες απαιτήσεις: την ποιότητα ψηφιοποίησης (που απαιτεί υψηλή συχνότητα sampling) με όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος ψηφιακού αρχείου (που απαιτεί χαμηλή συχνότητα sampling).

Τελικά όμως πόσα δείγματα πρέπει να παίρνουμε κατά τη διακριτοποίηση ενός σήματος; Η απάντηση στο συγκεκριμένο ερώτημα δίνεται από ένα από τα θεμελιώδη θεωρήματα της επεξεργασίας σήματος, το θεώρημα του **Nyquist-Shannon**, το οποίο αποδεικνύει ότι:

Έστω ένα συνεχές στο χρόνο σήμα  $x(t)$  περιορισμένου εύρους, που περιέχει συχνότητες όχι μεγαλύτερες από  $f_{\max}$ , δηλαδή  $X(j\Omega) = 0$  για  $\Omega > |\Omega_N|$  όπου  $\Omega$  είναι η έκφραση της συχνότητας σε ακτίνια/sec. Το σήμα αυτό μπορεί να ανακατασκευαστεί ακριβώς από τα δείγματα του διακριτού σήματος  $x[n] = x[nT_s]$ , αν τα δείγματα αυτά έχουν ληφθεί με συχνότητα  $f_s = 1/T_s$  που είναι μεγαλύτερη από  $2 \cdot f_{\max}$ .

Η συχνότητα  $f_N = 2f_{\max}$  ονομάζεται συχνότητα Nyquist. Η συχνότητα  $f_{\max}$  είναι στην ουσία η συχνότητα εκείνη πάνω από την οποία η ενέργεια του σήματος είναι πρακτικά μηδέν. Η  $f_{\max}$  αναφέρεται συνήθως και ως «συχνότητα αποκοπής» (cutoff frequency στα Αγγλικά).

Αν μελετήσουμε τη ιδανική δειγματοληψία με ακολουθία των συναρτήσεων dirac (Δέλτα), Η περίοδος δειγματοληψίας είναι  $T_s$  και η συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s = 1/T_s$ . Η ακολουθία συναρτήσεων dirac αναπτύσσεται σε σειρά Fourier ως εξής:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\omega_s t} \quad \text{οπου} \quad \omega_s = 2\pi f_s = 2\pi/T_s$$

**Ετσι**

$$x_s(t) = x(t) \cdot \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\omega_s t} = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t) e^{jn\omega_s t}$$

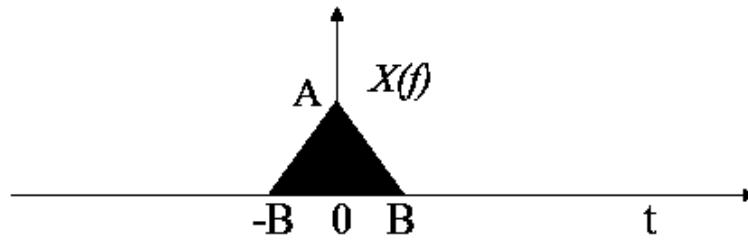
Παίρνουμε τον μετασχηματισμό στο πεδίο της συχνότητας κατά Fourier :

$$\begin{aligned} X_s(f) &= \frac{1}{T_s} X(f) * F \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\omega_s t} \right\} \\ &= \frac{1}{T_s} X(f) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} F \{ e^{jn\omega_s t} \} \\ X_s(f) &= \frac{1}{T_s} X(f) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_s), \quad \text{οπου} \quad f_s = \omega_s / 2\pi \end{aligned}$$

Οπότε προκύπτει:

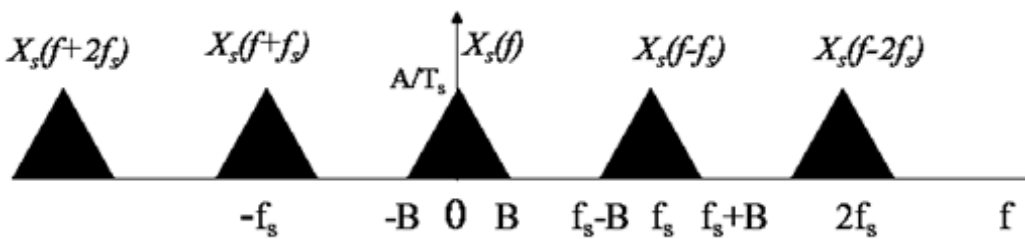
$$X_s(f) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_s)$$

Αν ο μ/ς Fourier του  $x(t)$  έχει την μορφή του σχήματος:



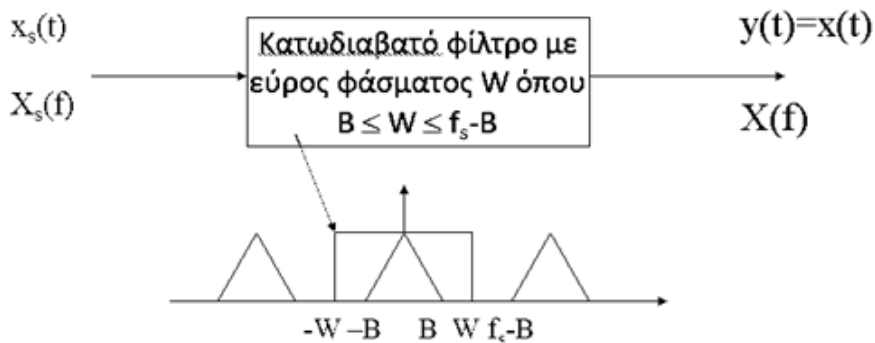
Σχήμα 6.5

Τότε ο μ/ς Fourier του  $x_s(t)$  θα έχει την παρακάτω μορφή. Υποθέσαμε ότι η συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s$  είναι τουλάχιστον κατά δυο φορές μεγαλύτερη από το εύρος συχνοτήτων του σήματος,  $B$ , άρα θα έχουμε  $f_s > 2B$ :



Σχήμα 6.6

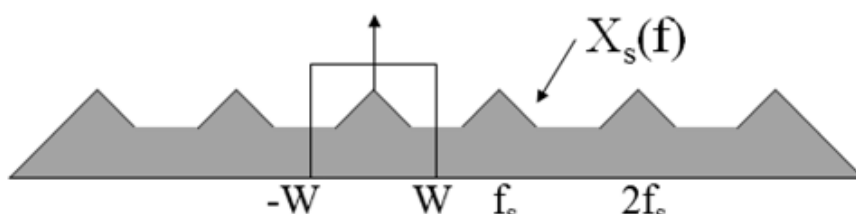
Το σήμα από την δειγματοληψία περνάμε κατόπιν από ένα κατωδιαβατό φίλτρο (low-pass filter) το οποίο επιτρέπει την διέλευση μόνο του φάσματος γύρω από τη συχνότητα  $f=0$  ώστε να ανακτήσουμε το αρχικό μας σήμα:



Σχήμα 6.7

Αν  $f_s \geq 2B$  το  $x(t)$  σήμα ανακτάται ακριβώς από τα δείγματα του.

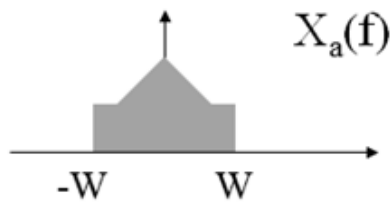
Αν όμως το σήμα υποστεί δειγματοληψία με συχνότητα  $f_s < 2B$  τότε θα έχουμε υπερκάλυψη των περιοδικά επαναλαμβανόμενων φασμάτων  $X(f-nf_s)$  στο φάσμα του  $X_s(f)$ , όπως φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 6.8



Το σήμα στην έξοδο του κατωδιαβατού φίλτρου κατά την ανακατασκευή, θα διαφέρει από το αρχικό σήμα:

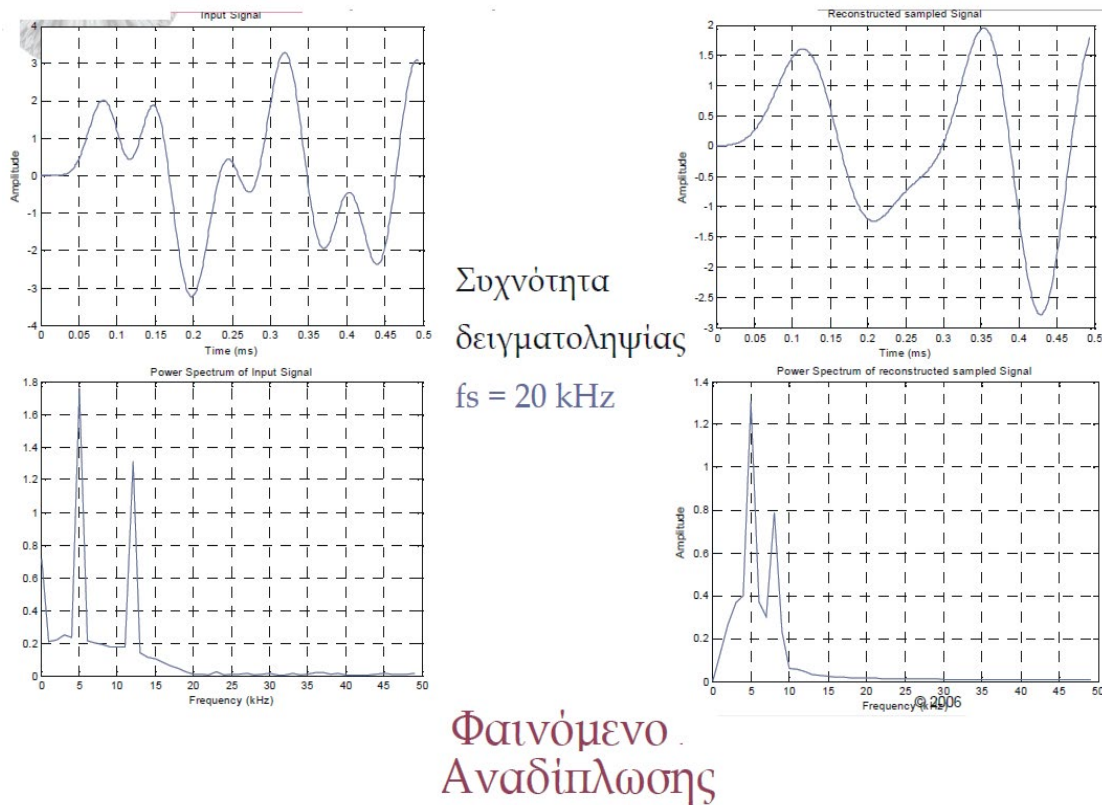


Σχήμα 6.9

Το θεώρημα δειγματοληψίας καθορίζει μια ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας  $f_N$  κάτω από την οποία η ακριβής ανακατασκευή του αναλογικού σήματος δεν είναι δυνατή. Άρα απαιτούνται τουλάχιστον  $2 \cdot f_{\max}$  δείγματα ανά δευτερόλεπτο (η  $f_{\max}$  μετριέται σε Hz). Υπάρχουν πάρα πολλές εφαρμογές του θεωρήματος του Nyquist. Για παράδειγμα, οι μουσικοί οπτικοί δίσκοι (Audio CD-ROM) χρησιμοποιούν συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 44.1KHz (44100 δείγματα ανά δευτερόλεπτο) για την αποθήκευση του ηχητικού σήματος. Επομένως λαμβάνεται δείγμα του αναλογικού σήματος κάθε 23μsec. Η συγκεκριμένη συχνότητα είναι ελαφρά μεγαλύτερη από 2 φορές τη συχνότητα των 20 KHz που κατά γενική παραδοχή αποτελεί το άνω όριο για τις συχνότητες που γίνονται αντιληπτές από το ανθρώπινο αυτί. Με ένα τέτοιο ρυθμό δειγματοληψίας διασφαλίζεται ότι όλες οι συχνότητες που είναι μικρότερες ή ίσες με 20 kHz θα αποδοθούν σωστά στο διακριτό σήμα.

Δειγματοληψία με συχνότητα χαμηλότερη από τη συχνότητα Nyquist παραμορφώνει το σήμα καθώς χάνονται οι υψηλότερες συχνότητες που τυχόν δεν καλύπτει η επιλεγμένη συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s$ . Επίσης, δημιουργεί συχνότητες οι οποίες δεν υπήρχαν στο αρχικό σήμα και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αναδίπλωση ή «aliasing». Επομένως, όταν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μικρότερη της συχνότητας Nyquist ( $f_s < f_N$ ) τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της αναδίπλωσης (aliasing ή foldover) για τις συχνότητες που περιέχονται στο σήμα και είναι μεγαλύτερες από το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας. Πιο συγκεκριμένα, αν  $f_0$  είναι η συχνότητα ενός σήματος το οποίο θέλουμε να δειγματοληψτούμε και για την οποία ισχύει ότι:  $f_s/2 < f_0 < f_s$ , τότε το συγκεκριμένο σήμα θα εμφανιστεί μετά τη δειγματοληψία με συχνότητα:  $f_1 = f_s - f_0$ . Για παράδειγμα, αν ψηφιοποιήσουμε ένα σήμα συχνότητας  $f_0 = 30$  KHz με συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s = 50$  kHz τότε θα έχουμε αναδίπλωση και το σήμα εξόδου θα έχει συχνότητα  $f_1 = 50 - 30 = 20$ kHz.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η δειγματοληψία αυτού του σήματος. Το αρχικό σήμα απεικονίζεται άνω αριστερά και έχει φάσμα (κάτω αριστερά) με συχνότητες έως 30kHz αλλά και ανώτερες αρμονικές αμελητέου πλάτους σε μεγαλύτερες συχνότητες. Αν λάβουμε δειγματοληψία του με  $f_s = 20$ kHz, το τελικό σήμα που θα ανακατασκευάσουμε φαίνεται στα δεξιά και δεν θα έχει καμιά σχέση τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στην συχνότητας με το αρχικό μας σήμα.



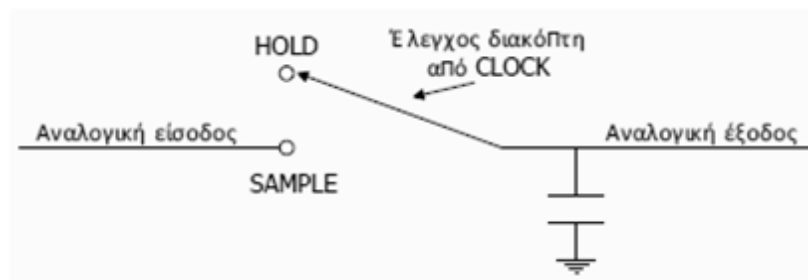
Σχήμα 6.10

«Τι γίνεται όμως στην περίπτωση που δεν γνωρίζουμε τη μέγιστη συχνότητα του σήματος που θέλουμε να δειγματοληψτούμε; Η λύση είναι να χρησιμοποιούμε βαθυπερατά φίλτρα τα οποία έχουν την ονομασία «αντιαναδιπλωτικά φίλτρα» (antialiasing filters) για να αποκόψουμε τις υψηλές συχνότητες που δεν μας ενδιαφέρουν.» (Πηγή: <http://users.iit.demokritos.gr/~ntsap/courses/bes04/lectures/m02.pdf>). Για παράδειγμα: στην ISDN τηλεφωνία αποκόπτονται όλες οι ηχητικές συχνότητες της ανθρώπινης φωνής πάνω από τα 3.4 kHz με χρήση ενός αντιαναδιπλωτικού φίλτρου με συχνότητα αποκοπής  $f_c = 3.4$  kHz. Έτσι μπορούμε να διακριτοποιήσουμε το σήμα φωνής επαρκώς με 8000 δείγματα / δευτερόλεπτο και να εξοικονομήσουμε μέγεθος ψηφιακών πακέτων και εύρος ζώνης στην ψηφιακή γραμμή μετάδοσης.

Τα Anti-aliasing φίλτρα υψηλής τάξης έχουν μικρή απαιτούμενη τιμή συχνότητας δειγματοληψίας, μικρές απαιτήσεις μνήμης και ταχύτητας επεξεργασίας, αλλά παρουσιάζουν παραμορφώσεις φάσεις και μεταβατικών φαινομένων των ηχητικών σημάτων. Αντίθετα, για τα φίλτρα χαμηλής τάξης απαιτείται χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής αλλά λαμβάνουμε χαμηλότερη πιστότητα στις υψηλές συχνότητες.

Πέρα από την ιδανική δειγματοληψία με κρουστικές συναρτήσεις δέλτα, υπάρχουν και άλλοι τρόποι δειγματοληψίας. Για παράδειγμα, μπορεί να γίνει δειγματοληψία με δείγματα πεπερασμένης διάρκειας όπου αντί για ακολουθία συναρτήσεων dirac, χρησιμοποιούνται τετραγωνικοί παλμοί πεπερασμένης διάρκειας. Άλλη τεχνική είναι η δειγματοληψία με δείγματα με επίπεδη κορυφή όπου και πάλι χρησιμοποιούνται παλμοί πεπερασμένης διάρκειας με ύψος όσο η τιμή του σήματος κατά την αρχή του παλμού. Η τεχνική αυτή ονομάζεται στα αγγλικά «sample and hold». Όλες οι τεχνικές συγκλίνουν στην ιδανική δειγματοληψία όταν η διάρκεια των παλμών που χρησιμοποιούν μικραίνει και πλησιάζει τη μορφή dirac.

Ένα σύστημα υλοποίησης sample and hold δειγματοληψίας δίνεται στο κάτωθι σχήμα.



Σχήμα 6.11

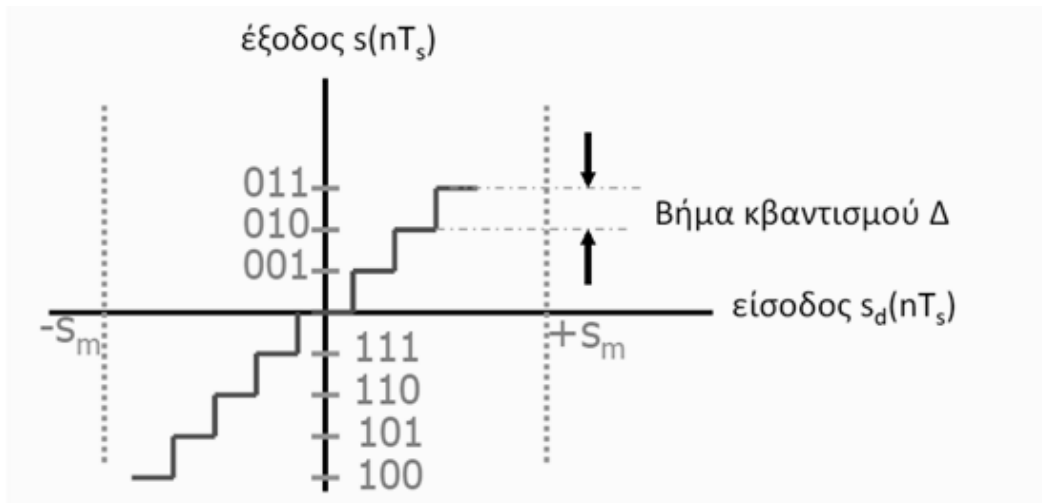
Οι βασικές απαιτήσεις για τη σωστή λειτουργία του συστήματος είναι: 1) το Ρολόι (CLOCK) να μην παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές στη συχνότητά του που ονομάζονται «jitter». Θέλουμε τιμές jitter <1ns και 2) η αποφόρτιση του πυκνωτή να γίνεται σε χρόνο μεγαλύτερο της  $T_s$  περίοδο δειγματοληψίας, όπου  $T_s = 1/f_s$ .

Τέλος, μια συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s$  πολύ υψηλότερη από τη συχνότητα Nyquist,  $f_N$ , αποτελεί σπατάλη αποθηκευτικού χώρου καθώς δημιουργεί πρόσθετα δείγματα χωρίς αυτά να είναι πάντοτε απαραίτητα. Στην πράξη επιλέγεται πάντα συχνότητα δειγματοληψίας λίγο υψηλότερη από τη συχνότητα Nyquist. Σε μερικές περιπτώσεις βέβαια χρησιμοποιείται συχνότητα μεγαλύτερη ώστε να γίνει υπερδειγματοληψία, έννοια που θα αναλύσουμε αμέσως μετά το κβαντισμό.

### 6.2.2 Κβαντισμός

Ένα συνεχές σήμα, όπως η φωνή, έχει συνεχές πεδίο τιμών πλάτους και συνεπώς τα δείγματά του έχουν συνεχές πεδίο τιμών πλάτους. Η δειγματοληψία δημιουργεί διακριτοποίηση του σήματος στο χρόνο (ή το χώρο για την περίπτωση εικόνων ή χωρόχρονο για περίπτωση video). Με άλλα λόγια, μέσα στο πεπερασμένο πεδίο τιμών του σήματος βρίσκουμε έναν άπειρο αριθμό σταθμών πλάτους. Δεν είναι απαραίτητο στην πραγματικότητα να μεταδίδουμε τα ακριβή πλάτη των δειγμάτων. Οποιαδήποτε ανθρώπινη αίσθηση σαν τελικός δέκτης, μπορεί μόνο να ανιχνεύσει πεπερασμένες διαφορές έντασης. Αυτό σημαίνει ότι το αρχικό συνεχές σήμα μπορεί να προσεγγιστεί από ένα σήμα το οποίο κατασκευάζεται από διακριτά πλάτη, επιλεγμένα από ένα διαθέσιμο σύνολο με βάση την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Η ύπαρξη ενός πεπερασμένου αριθμού διακριτών σταθμών πλάτους είναι μία βασική συνθήκη της PCM. Προφανώς, εάν καθορίσουμε διακριτές στάθμες πλάτους με αρκετά μικρό βήμα μεταξύ τους, μπορούμε να κάνουμε το προς προσέγγιση σήμα να μην ξεχωρίζει πρακτικά από το αρχικό συνεχές σήμα.

Η μετατροπή ενός αναλογικού δείγματος του σήματος σε μια ψηφιακή μορφή καλείται διαδικασία κβαντοποίησης και είναι εν γένει μη-γραμμική. Γραφικά, η διαδικασία κβαντοποίησης σημαίνει ότι μία ευθεία γραμμή που παριστάνει τη σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου ενός γραμμικού συνεχούς συστήματος αντικαθίσταται από μία κλιμακωτή χαρακτηριστική:



Σχήμα 6.12

Η διαφορά μεταξύ των δύο γειτονικών διακριτών τιμών ονομάζεται κβάντο ή μέγεθος βήματος. Τα σήματα που εφαρμόζονται σε έναν κβαντιστή ταξινομούνται σε στάθμες πλάτους (τα βήματα) και όλα τα σήματα εισόδου μέσα στο συν ή πλην μισό ενός κβάντου της μεσαίας τιμής μιας στάθμης αντικαθίστανται στην έξοδο από την υπόψη μεσαία τιμή.

Κατά τη διαδικασία του κβαντισμού επομένως, σε κάθε δείγμα πρέπει να εκχωρηθεί μία τιμή από αυτές που διαθέτει και επιτρέπει η χρησιμοποιούμενη κλίμακα. Για να γίνει αυτό, υποδιαιρείται το εύρος τιμών του συνεχούς σήματος σε συγκεκριμένα επίπεδα και σε κάθε τέτοιο επίπεδο εκχωρείται ένας ψηφιακός κωδικός από τους διαθέσιμους της κλίμακας. Κάθε δείγμα παίρνει εκείνη την ψηφιακή τιμή πλησιέστερα στην οποία βρίσκεται η αρχική του τιμή, δηλαδή στρογγυλοποιείται στον κοντινότερο διαθέσιμο κωδικό.

Έστω ότι έχουμε ένα σήμα για το οποίο γνωρίζουμε ότι η μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να πάρει είναι  $V_{max}$  και η ελάχιστη  $V_{min}$ . Αν έχουμε διαθέσιμα  $n$  bits για την κωδικοποίηση κάθε δείγματος, θα πρέπει να κωδικοποιούμε σε στάθμες τις τιμές πλάτους του σήματος. Είναι επομένως απαραίτητος ο διαχωρισμός του εύρους του πλάτους του σήματος σε διαστήματα ή βήματα κβαντισμού. Κάθε διάστημα θα έχει εύρος:  $q = (V_{max} - V_{min}) / 2^n$ .

«Το πλήθος των διαθέσιμων τιμών (σταθμών) οι οποίες μπορούν να ανατεθούν στη τιμή ενός δείγματος εξαρτάται από το πλήθος ψηφίων του κωδικού (codeword)  $n$  που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των τιμών αυτών. Το μέγεθος αυτό ( $n$ ) χαρακτηρίζεται ως «μέγεθος δείγματος» (sampling size).» (Πηγή: [http://openclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/INFORMATIC115/3-Ψηφιοποίηση\\_της\\_Πληροφορίας.pdf](http://openclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/INFORMATIC115/3-Ψηφιοποίηση_της_Πληροφορίας.pdf)).

Επομένως το πλήθος σταθμών κωδικοποίησης θα είναι ίσο με  $2^n$ . Αφού κάθε δείγμα παριστάνεται και αποθηκεύεται με χρήση ενός τέτοιου κωδικού, το μέγεθος δείγματος δείχνει ταυτόχρονα και το ποσό της μνήμης που απαιτείται για την ψηφιακή αποθήκευση του κάθε δείγματος. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιήσουμε μήκος λέξης 16 bit τότε κάθε δείγμα του ψηφιοποιημένου σήματος θα καταλαμβάνει  $16/8 = 2$  bytes μνήμης.

Για παράδειγμα, με 1 bit μήκος λέξης θα έχουμε 2 επίπεδα κβάντωσης, με 2 bit => 4 επίπεδα, με 4 bit => 16 επίπεδα κ.ο.κ. Άρα με  $n$  bit θα έχουμε  $2^n$  επίπεδα κβάντωσης. Οι πιο χαρακτηριστικές τιμές μήκους λέξης που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι: των 8 bit με 256 στάθμες κβάντωσης και των 16 bit με 65536 στάθμες.

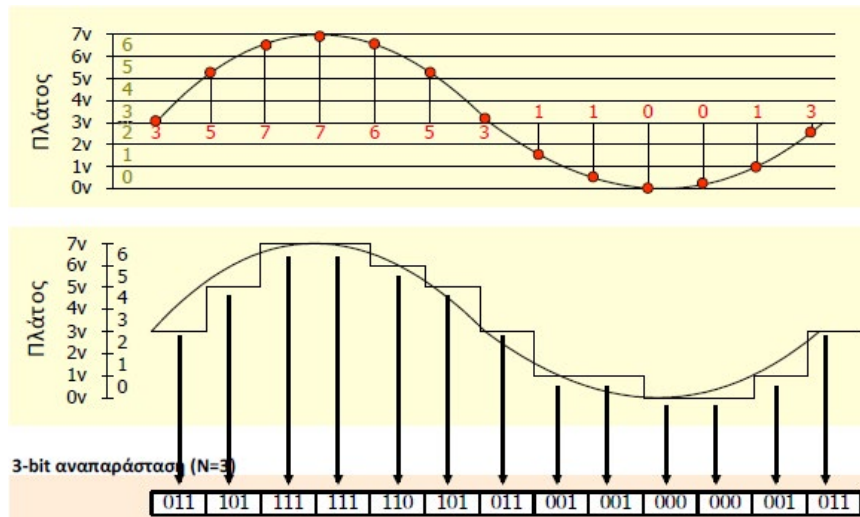
Το «Σφάλμα κβαντισμού» (quantization error) είναι η διαφορά της πραγματικής τιμής του δείγματος από την τιμή που τελικά κωδικοποιείται. Η διαφορά αυτή εισάγει παραμόρφωση στο κβαντισμένο σήμα. Η παραμόρφωση αυτή είναι τόσο πιο μικρή όσο περισσότερες στάθμες

κβαντισμού υπάρχουν.

Αν κωδικοποιήσουμε το μέσο των διαστημάτων κβαντισμού τότε το μέγιστο σφάλμα κβαντισμού είναι:

$$e = q/2 = (V_{\max} - V_{\min}) / 2^{n+1}$$

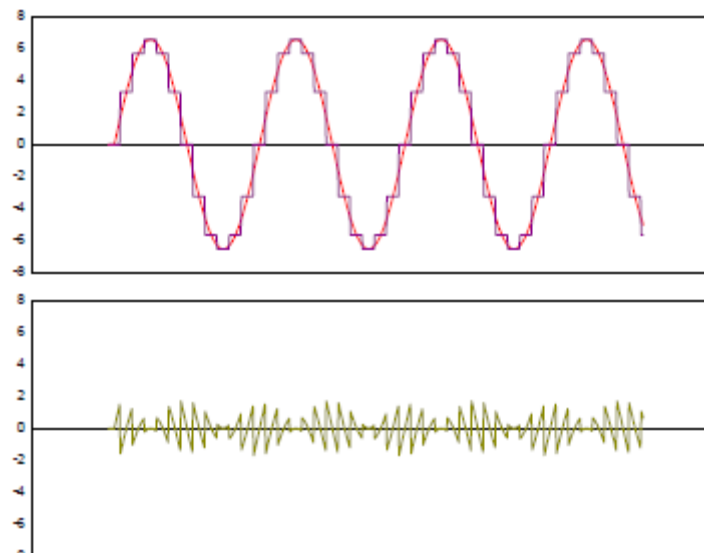
Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε μία γραφική αναπαράσταση ενός ημιτόνου με διαδικασία κβαντισμού των 3-bit:



Σχήμα 6.13

Ο κβαντισμός είναι μια μορφή προσθετικού θορύβου  $e(t)$  στο αναπαριστώμενο σήμα :

$$s(t) = s_c(t) + e(t)$$



Σχήμα 6.14

Ο σηματοθορυβικός λόγος εκφράζεται συνήθως σε db (decibel):

$$SNR = 20 \log_{10} (\text{Πλάτος Σήματος} / \text{Πλάτος Θορύβου})$$

Για ημιτονοειδή σήματα, η θεωρητική δυναμική περιοχή του κβαντισμένου ηχητικού σήματος με N-bits είναι:

$$\text{SNR} = 6 \cdot N + 1.76(\text{dB})$$

Τάξη- N (bits)	SNR (dB)
8	49.8
12	73.8
16	97.8
18	109.8
24	145.76

Πίνακας 6.1

Τα ακουστικά σήματα καλύπτουν μια δυναμική περιοχή της τάξης των 100dB. Τα αναλογικά συστήματα έχουν δυναμική περιοχή της τάξης των 80-90dB. Θεωρητικά, για N=16bit έχουμε ικανοποιητική τιμή SNR = 97,8dB. Στην πράξη όμως, δεν είναι όλοι η ήχοι καθαροί τόνοι ημιτόνου. Για μη-ημιτονικά σήματα ισχύει:

$$\text{SNR} = 6.02 \cdot N - 24.77(\text{dB})$$

Άρα, η απόδοση των 16 bit μετατροπέων είναι οριακά αποδεκτή. Η λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε μετατροπείς των 24 bit που δίνουν 119,71dB SNR σε αυτή την περίπτωση μη-ημιτονικών σημάτων.

Υπάρχουν δύο τρόποι σχεδίασης του κβαντιστή. Πρώτον, η έξοδος ενός κβαντιστή μπορεί να εκφραστεί στη μορφή  $H_i \delta$ , όπου  $\pm H_i = 0, 1, 2, \dots$  και  $\delta$  είναι το μέγεθος του κβάντου. Ένας κβαντιστής που έχει αυτή τη σχέση εισόδου-εξόδου καλείται τύπου μέσου πατήματος επειδή η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο μέσο ενός οριζόντιου τμήματος του σκαλοπατιού στο κλιμακωτό γράφημα

Ένας δεύτερος τρόπος σχεδίασης του κβαντιστή είναι να ορίσουμε την έξοδό του στη μορφή  $H_i \delta / 2$ , όπου  $\pm H_i = 1, 3, 5, \dots$ . Αυτός ο κβαντιστής ονομάζεται τύπου μέσης ανύψωσης επειδή στην περίπτωση αυτή η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο μέσο ενός κατακόρυφου τμήματος της κλιμακωτής σχέσης εισόδου-εξόδου.

Η διαδικασία κβαντοποίησης χρησιμοποιεί ομοιόμορφη απόσταση μεταξύ των επιπέδων κβαντισμού. Σε κάποιες εφαρμογές, ωστόσο, είναι προτιμητέο να χρησιμοποιηθεί μεταβλητή απόσταση μεταξύ των επιπέδων κβαντισμού. Για παράδειγμα η περιοχή των τάσεων που καλύπτονται από σήματα φωνής, από τα μέγιστα δυνατής φωνής μέχρι τα ασθενή διαστήματα της χαμηλής ομιλίας είναι της τάξης 1000 προς 1. Χρησιμοποιώντας έναν μη ομοιόμορφο κβαντιστή με το χαρακτηριστικό ότι το μέγεθος του βήματος αυξάνει, καθώς η απόσταση από την αρχή των αξόνων της χαρακτηριστικής πλάτους εισόδου-εξόδου αυξάνει, το τελευταίο μεγάλο βήμα του κβαντιστή μπορεί να συμπεριλάβει όλες τις πιθανές περιπλανήσεις του σήματος φωνής στις μεγάλες στάθμες πλάτους, οι οποίες συμβαίνουν σχετικά σπάνια. Με άλλα λόγια, τα ασθενή διαστήματα, που χρειάζονται περισσότερη προστασία, προτιμώνται σε βάρος των ισχυρών διαστημάτων. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μία ποσοστιαία ομοιόμορφη

ακρίβεια στο μεγαλύτερο τμήμα του πεδίου τιμών του σήματος εισόδου, με αποτέλεσμα να απαιτούνται λιγότερα βήματα από ότι στην περίπτωση που θα χρησιμοποιούνταν ομοιόμορφος κβαντιστής.

Η χρήση ενός μη ομοιόμορφου κβαντιστή είναι ισοδύναμη με τη διέλευση του σήματος βασικής ζώνης μέσω ενός συμπιεστή και στη συνέχεια την εφαρμογή του συμπιεσμένου σήματος σε ομοιόμορφο κβαντιστή. Μία ιδιαίτερη μορφή του νόμου συμπίεσης, που χρησιμοποιείται στην πράξη είναι ο ονομαζόμενος νόμος- $\mu$ , που ορίζεται από

$|u_2| = \log(1 + \mu|u_1|) / \log(1 + \mu)$ , όπου  $u_1$  και  $u_2$  είναι οι κανονικοποιημένες τάσεις εισόδου και εξόδου και  $\mu$  είναι μία θετική σταθερά. Η περίπτωση ομοιόμορφης κβαντοποίησης αντιστοιχεί σε  $\mu=0$ . Για δοσμένη τιμή του  $\mu$ , το αντίστροφο της κλίσης της καμπύλης συμπίεσης που ορίζει τα βήματα κβαντισμού είναι

$$d|u_1|/d|u_2| = (1 + \mu|u_1|) \log(1 + \mu) / \mu$$

Βλέπουμε συνεπώς, ότι ο νόμος- $\mu$  δεν είναι ούτε αυστηρά γραμμικός, ούτε αυστηρά λογαριθμικός, αλλά είναι κατά προσέγγιση γραμμικός για χαμηλές στάθμες εισόδου που αντιστοιχούν σε  $\mu|u_1| \gg 1$ .

Ένας άλλος νόμος συμπίεσης, που χρησιμοποιείται στην πράξη είναι ο λεγόμενος νόμος-A που ορίζεται από τη σχέση:  $|u_2| = A|u_1| / (1 + \log A)$  για  $0 = |u_1| = 1/A$

$$\text{Και } |u_2| = 1 + \log(A|u_1|) / (1 + \log A) \text{ για } 1/A = |u_1| = 1.$$

Οι πρακτικές τιμές του A (όπως του  $\mu$  στον νόμο- $\mu$ ) τείνουν να είναι στην περιοχή του 100. Η περίπτωση ομοιόμορφης κβαντοποίησης αντιστοιχεί σε  $A=1$ . Η αντίστροφη κλίση αυτής της καμπύλης συμπίεσης είναι:

$$d|u_1|/d|u_2| = 1 + \log A / A \text{ για } 0 = |u_1| = 1/A$$

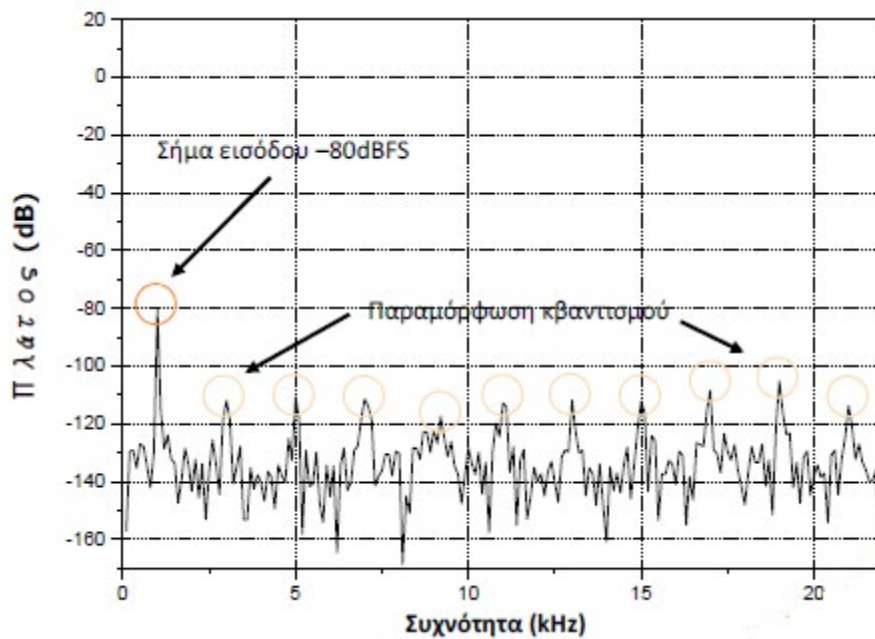
$$\text{και } d|u_1|/d|u_2| = (1 + \log A)|u_1| \text{ για } 1/A = |u_1| = 1$$

Έτσι τα βήματα κβαντισμού πάνω στο κεντρικό γραμμικό τμήμα, που επιδρούν κυρίως στα μικρά σήματα, ελαττώνονται κατά έναν παράγοντα  $A/(1 + \log A)$ . Αυτός είναι τυπικά περίπου 25 dB στην πράξη σε σύγκριση με τον ομοιόμορφο κβαντισμό.

Για να επαναφέρουμε τα δείγματα του σήματος στην αντίστοιχη σωστή στάθμη πρέπει, φυσικά, να χρησιμοποιήσουμε μια διάταξη στο δέκτη με χαρακτηριστική συμπληρωματική εκείνης του συμπιεστή. Μια τέτοια διάταξη ονομάζεται αποσυμπιεστής. Στην ιδανική περίπτωση, οι νόμοι συμπίεσης και αποσυμπίεσης είναι ακριβώς αντίστροφοι έτσι ώστε εκτός από την επίδραση της κβαντοποίησης η έξοδος του αποσυμπιεστή να είναι ίση με την είσοδο του συμπιεστή. Ο συνδυασμός ενός συμπιεστή και ενός αποσυμπιεστή ονομάζεται συμπιεστής-αποσυμπιεστής. (Πηγή: [http://www.medialab.ntua.gr/education/MultimediaTechnology/MultimediaTechnologyNotes/chap2a\\_1.htm](http://www.medialab.ntua.gr/education/MultimediaTechnology/MultimediaTechnologyNotes/chap2a_1.htm))

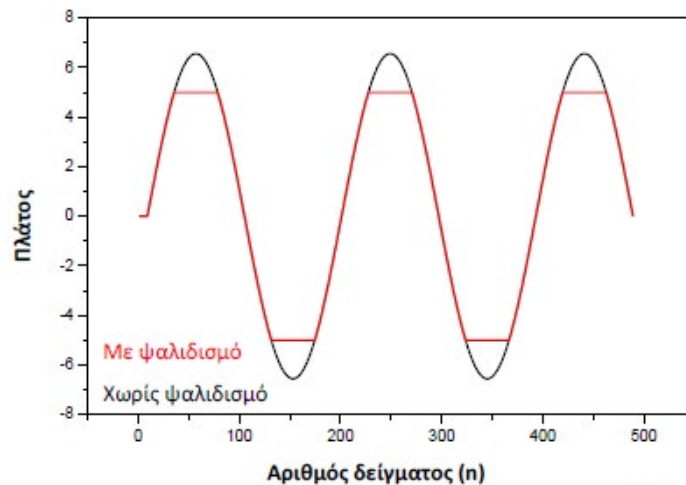
Παραμορφώσεις λόγω κβαντισμού:

Προβλήματα κβαντισμού εμφανίζονται για μικρές τιμές σήματος εισόδου όπως ήσυχα περάσματα μουσικής ή στο τέλος της διάρκειας μιας μουσικής νότας. Όσο μικραίνει το πλάτος του σήματος, ο θόρυβος κβαντισμού παύει να έχει χαρακτηριστικά «λευκού θορύβου» και γίνεται συσχετισμένος με το σήμα εισόδου. Έτσι εμφανίζεται ακουστική τραχύτητα στην χροιά των αναπαραγόμενων ήχων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πως για πολύ μικρές τιμές πλάτους σήματος της τάξης των -80dB, το πρόβλημα των παραμορφώσεων γίνεται πολύ έντονο. Εδώ έχουμε χρησιμοποιήσει ένα ημίτονο συχνότητας 1kHz.



Σχήμα 6.15

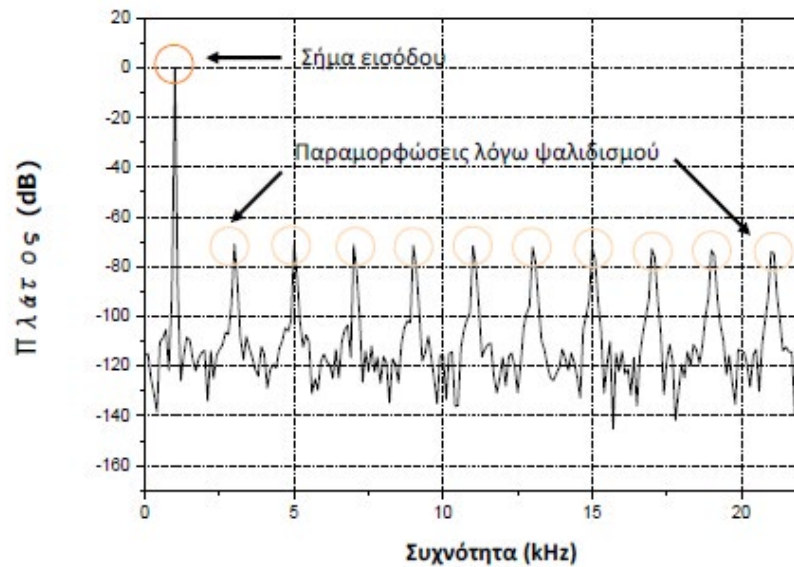
Ο κβαντιστής μπορεί όμως να προκαλέσει και σφάλματα στο πεδίου του χρόνου ενώ η έξοδός του μπορεί και να μηδενιστεί παρά την παρουσία σήματος στην είσοδό του. Εκτός από τα σήματα μικρού πλάτους, και τα σήματα μεγάλου πλάτους παρουσιάζουν προβλήματα. Όταν η τιμή του σήματος εισόδου ξεπερνά την μέγιστη τιμή στάθμη) κβαντισμού, το ψηφιακό σήμα «ψαλιδίζεται»:



Σχήμα 6.16

Ο ψαλιδισμός όπως παρουσιάζεται στο πεδίο της συχνότητας:

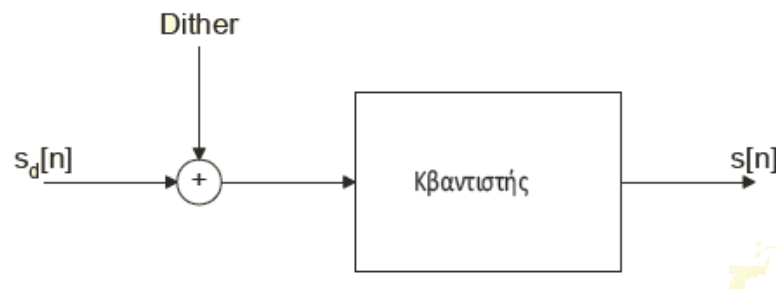




Σχήμα 6.17

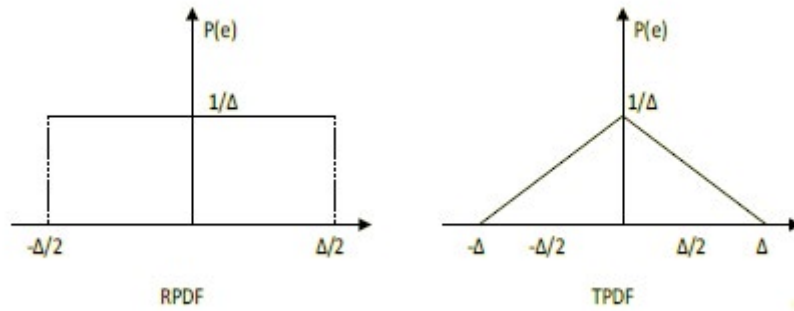
Προσθήκη θορύβου Dither:

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων είναι επομένως αναγκαία η χρήση μίας τεχνικής με ονομασία «dither» που είναι μία τεχνική εσκεμμένης προσθήκης θορύβου. Ο Dither είναι θόρυβος μικρού πλάτους με συγκεκριμένα στατιστικά χαρακτηριστικά που φαρμόζεται προσθετικά πριν τον κβαντισμό κι αλλάζει τη μορφή του σφάλματος κβαντισμού, καθιστώντας το ανεξάρτητο από το σήμα εισόδου. Δίνει στο θόρυβο κβαντισμού χαρακτηριστικά λευκού θορύβου, ακόμα και για μικρές τιμές πλάτους του σήματος εισόδου. Έχουμε επομένως μία υποκειμενική αύξηση της δυναμικής περιοχής του κβαντιστή παρά την αντικειμενική συνολική αύξηση του επιπέδου του θορύβου κβαντισμού.



Σχήμα 6.18

Κριτήριο για την επιλογή του θορύβου τύπου Dither είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητάς του (PDF). Υπάρχει η ομοιόμορφη (rectangular) κατανομή (RPDF) και η τριγωνική (triangular) κατανομή (TPDF).



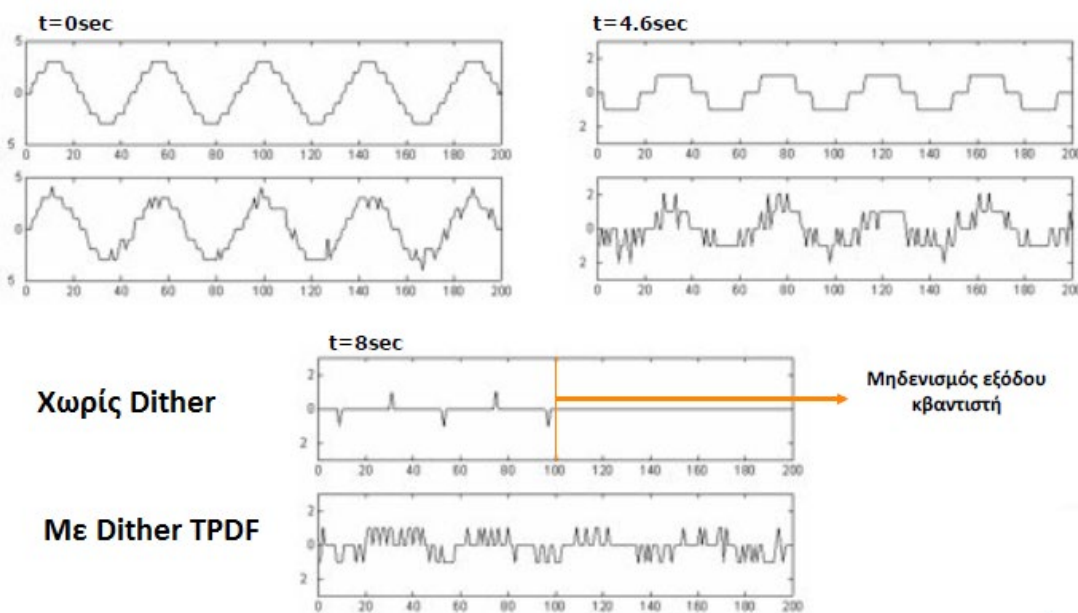
Σχήμα 6.19

Βέλτιστη λύση είναι συνήθως η χρήση θορύβου TPDF dither με πλάτος από κορυφή σε κορυφή, ίσο με δύο φορές το βήμα κβαντισμού. Αυτό επιφέρει μία συνολική αύξηση του θορύβου κβαντισμού κατά 6dB αλλά προσφέρει αρκετά θετικά στοιχεία στο τελικό αποτέλεσμα καθώς αποσυσχετίζει το θόρυβο από το πλάτος του ηχητικού σήματος. Στο παρακάτω παράδειγμα βλέπουμε τη βελτίωση που επιφέρει η τεχνική dither στο κβαντισμό:

Έστω σήμα συχνότητας 500Hz μεταβλητού πλάτους

- Εύρος διακύμανσης +20dB έως -20dB σε 20 δευτερόλεπτα ( κλίση 2dB/sec)
- 0dB το επίπεδο του θορύβου κβαντισμού χωρίς dither
- Στα 10sec, το πλάτος του σήματος είναι ίσο με το θόρυβο κβαντισμού
- Από τα 8bit μόνο τα 3 χρησιμοποιούνται λόγω μικρού πλάτους.

Χωρίς dither, μετά από 10sec, η έξοδος του κβαντιστή γίνεται ίση με μηδέν και χάνεται όλη η πληροφορία που θα έπρεπε να ληφθεί. Αντίθετα, με την τεχνική θορύβου TPDF dither, δεν έχουμε μηδενισμό της εξόδου παρότι υπάρχει μια αύξηση του θορύβου κβαντισμού κατά 4.2dB. (Πηγή: [http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts\\_dap\\_lesson02\\_03.pdf](http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts_dap_lesson02_03.pdf))

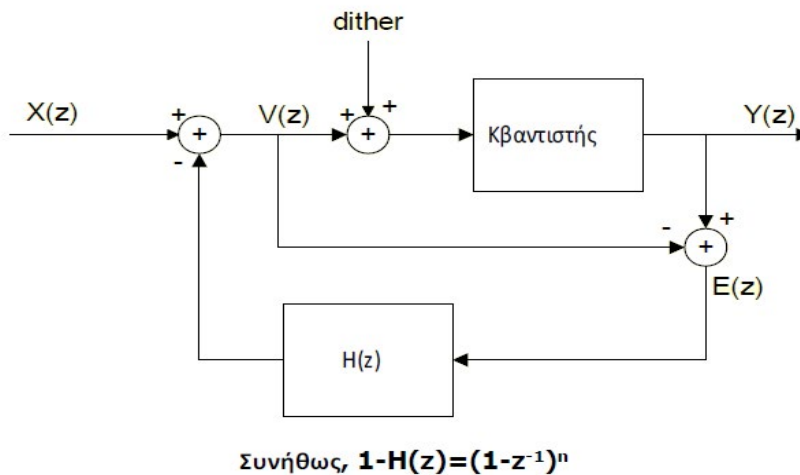


Σχήμα 6.20

Δε μας ενοχλεί όμως τόσο η αύξηση του θορύβου κβαντισμού καθώς υπάρχουν τεχνικές μορφοποίησής του ώστε να μην γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτός από το ανθρώπινο αυτί.

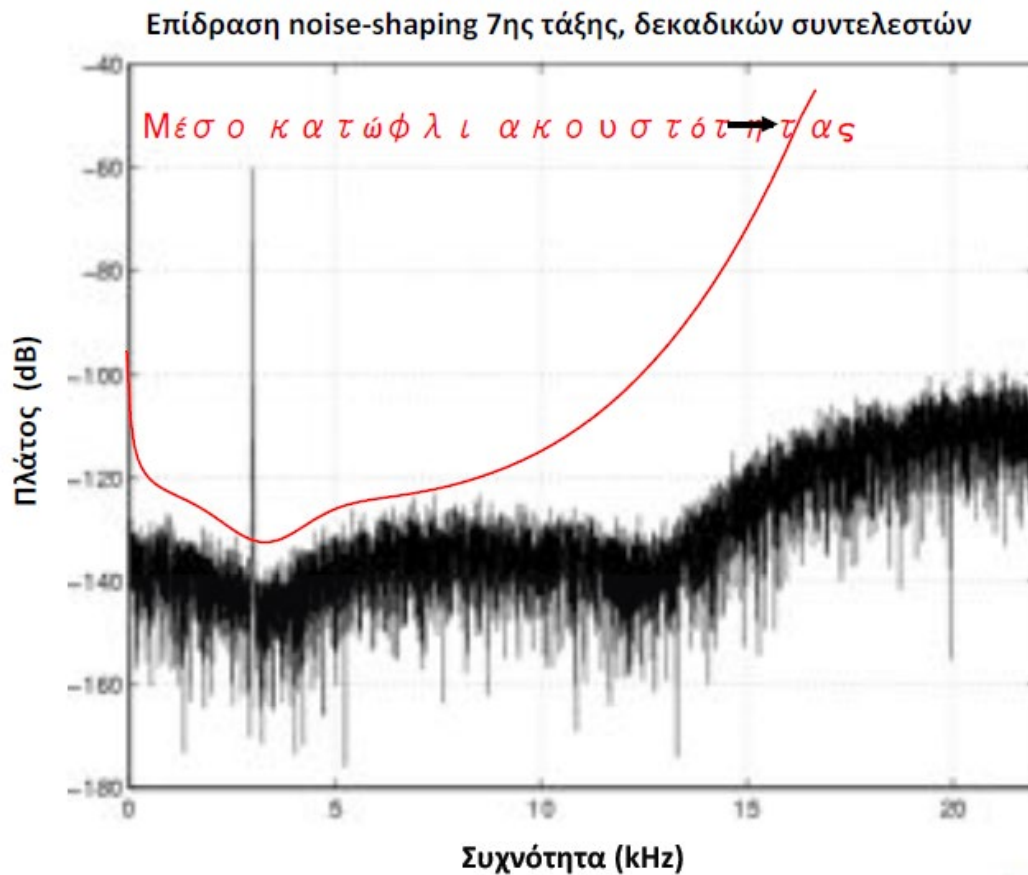
#### Μορφοποίηση θορύβου κβαντισμού (noise-shaping):

Η «ακουστότητα» του θορύβου κβαντισμού αυξάνει με τη συχνότητα. Η ευαισθησία του ανθρώπινου ακουστικού οργάνου είναι όμως μεταβλητή με τη συχνότητα. Κάτω από τα 4kHz, ο θόρυβος κβαντισμού είναι ιδιαίτερα ακουστός και μπορεί να ενοχλήσει τον ακροατή. Στόχος επομένως είναι η μορφοποίηση του θορύβου κβαντισμού (noise-shaping) ώστε να μη γίνεται αντιληπτός. Η μορφοποίηση του θορύβου γίνεται σύμφωνα με το ελάχιστο κατώφλι ακοής. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση ψηφιακών φίλτρων ως κλάδους ανατροφοδότησης του κβαντιστή. Οι συντελεστές ενός τέτοιου φίλτρου είναι συνήθως ακέραιοι για μικρό υπολογιστικό φορτίο σε ένα DSP χαμηλής επεξεργαστικής ισχύος. Αντίθετα, χρησιμοποιούμε φίλτρα με δεκαδικούς συντελεστές αν το DSP κύκλωμα αντέχει μεγάλο υπολογιστικό φορτίο, για να επιτύχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ας δούμε μία τοπολογία μορφοποίησης θορύβου:



Σχήμα 6.21

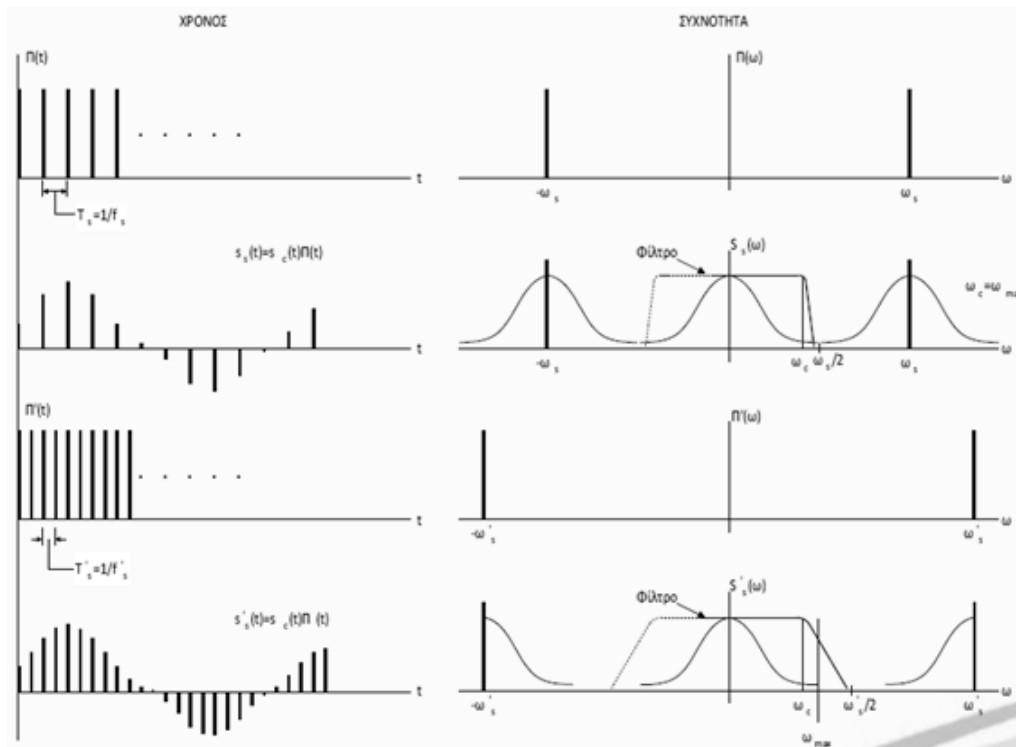
Το αποτέλεσμα της τεχνικής μορφοποίησης θορύβου ώστε να διατηρηθεί κάτω από το κατώφλι ακουστότητας, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.22

### 6.2.3 Υπερδειγματοληψία

Η υπερδειγματοληψία (oversampling) είναι η αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας κατά  $R$  φορές και συμβολίζεται ως «επί  $R$ » ή « $\times R$ » υπερδειγματοληψία. Χρήση της γίνεται τόσο στην Α/Ψ (αναλογικό σε ψηφιακό) όσο και στην Ψ/Α μετατροπή. Επιτυγχάνεται έτσι ελάττωση παραμορφώσεων από το anti-aliasing φίλτρο εισόδου/εξόδου, μείωση του επιπέδου θορύβου κβαντισμού και δυνατότητα ελάττωσης της τάξης του κβαντιστή χωρίς μείωση του SNR σηματοθορυβικού λόγου. Ένα παράδειγμα είναι ο 1-bit κβαντισμός με  $\times 64$  υπερδειγματοληψία. Με το oversampling γίνεται ευκολότερη η κατασκευή και ρύθμιση μετατροπέων Α/Ψ και Ψ/Α. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι μικρότερες απαιτήσεις του anti-aliasing φίλτρου με υπερδειγματοληψία:

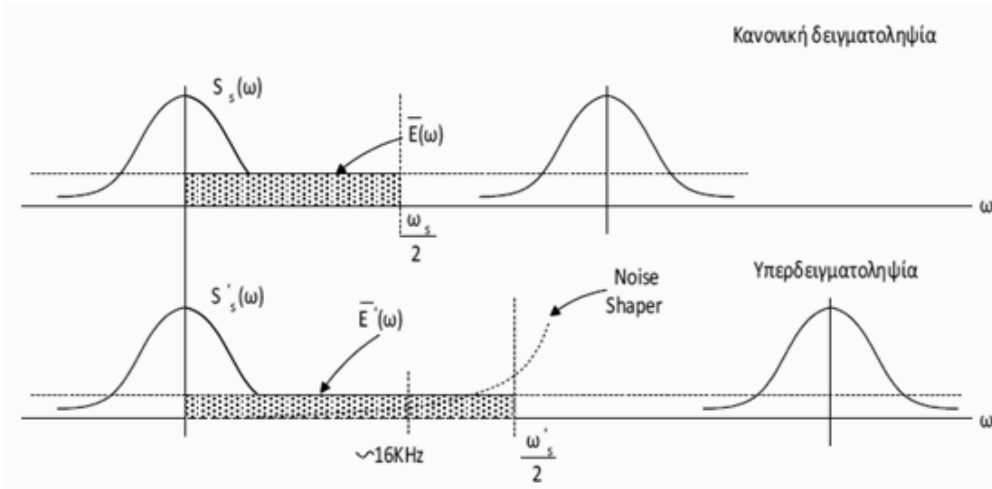


Σχήμα 6.23

Κατά την  $xR$  υπερδειγματοληψία έχουμε νέα συχνότητα δειγματοληψίας,  $f_s' = R * f_s$  και μπορούμε να δειγματοληφτούμε μέγιστη συχνότητα σήματος  $f'_{max} = R * f_{max}$ . Επομένως θα έχουμε χρήση ομαλότερων φίλτρων λόγω αύξησης του  $f'_{max}$  και μικρότερες παραμορφώσεις σε μεταβατικά σημεία και τη φάση του αρχικού σήματος. Επίσης, ο θόρυβος κβαντισμού «απλώνεται» σε μεγαλύτερη φασματική περιοχή. Έχουμε επομένως μείωση του επιπέδου θορύβου κβαντισμού. Για  $x4$  υπερδειγματοληψία, έχουμε π.χ. πτώση θορύβου κατά  $6\text{dB}$ . Επίσης, διπλασιασμός του πολλαπλασιαστικού παράγοντα  $R$ , μειώνει το θόρυβο κατά περίπου  $-3\text{dB}$ . Μεγαλύτερη μείωση θορύβου επιτυγχάνεται με χρήση τεχνικών μορφοποίησης θορύβου ή «noise-shaping». (Πηγή: [http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts\\_dap\\_lesson02\\_03.pdf](http://users.ionio.gr/~floros/lessons/avarts_dap_lesson02_03.pdf))

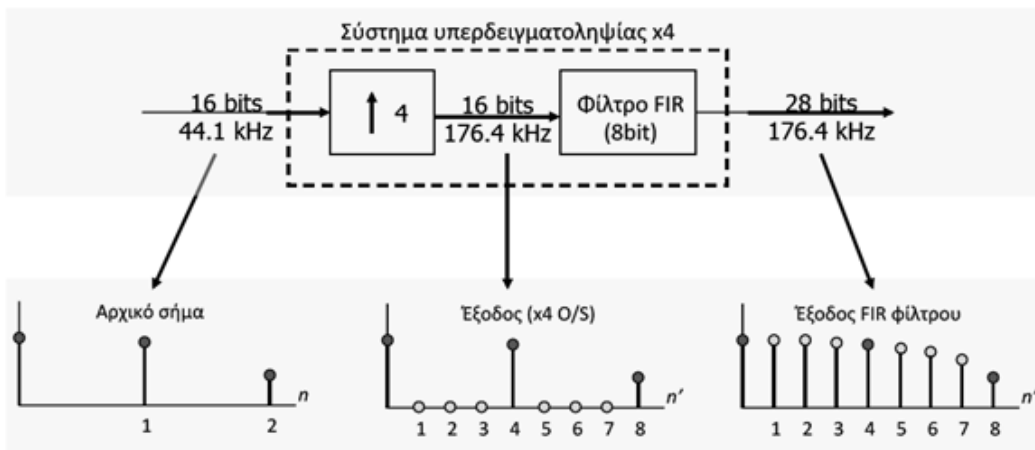
Η μείωση του επιπέδου θορύβου κβαντισμού αυξάνει το SNR, άρα και την τάξη του κβαντιστή (ευκρίνεια κβαντισμού). Έστω  $N$ -bit κβαντιστής με  $N'$ -bit ισοδύναμη τάξη για  $xR$  υπερδειγματοληψία. Θεωρώντας σταθερή ποιότητα αναπαραγωγής, αποδεικνύεται ότι  $N' < N$ . Γενικά ισχύει ότι:  $N - N' = \Delta N = 0.5 \log_2 R$ . Επομένως, διπλασιασμός του παράγοντα  $R$  ισοδυναμεί με κέρδος «μισού» bit. Με χρήση noise-shaping τεχνικής, το κέρδος αυτό είναι ακόμα μεγαλύτερο. Για παράδειγμα, με παράγοντα  $R=128$  και φίλτρο noise-shaping 2ης τάξης, ο 1-bit κβαντιστής είναι ισοδύναμος με 16bit κβαντιστή.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μείωση του επιπέδου θορύβου κβαντισμού λόγω υπερδειγματοληψίας:



Σχήμα 6.24

Παράδειγμα υλοποίησης υπερδειγματοληψίας «x4»:



Σχήμα 6.25

### 6.2.4 Εισαγωγή στην Κωδικοποίηση

Συνδυάζοντας τις διαδικασίες δειγματοληψίας και κβαντοποίησης, ένα συνεχές σήμα βασικής ζώνης περιορίζεται σε ένα διακριτό σύνολο τιμών, αλλά όχι σε μορφή κατάλληλη για αποδοτική αποθήκευση ή μετάδοση μέσω μιας γραμμής κι ενός ραδιοδιαύλου. Για να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα δειγματοληψίας και κβαντοποίησης απαιτείται η χρησιμοποίηση μιας διαδικασίας κωδικοποίησης (encoding process) για τη μετατροπή του διακριτού συνόλου των τιμών των δειγμάτων σε πιο κατάλληλη μορφή. Στην ορολογία της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, ο όρος «κωδικοποίηση» περιλαμβάνει και την έννοια της συμπίεσης.

Κωδικοποίηση ονομάζουμε την αναπαράσταση των κβαντισμένων τιμών πλάτους των δειγμάτων του σήματος σε δυαδική ακολουθία (ακολουθία δυαδικών ψηφίων). Δημιουργείται έτσι το τελικό ψηφιακό σήμα σαν μια σειρά bits. Ο κώδικας κάθε τιμής στάθμης ονομάζεται κωδική λέξη (codeword). Το

σύνολο των διαφορετικών κωδικών λέξεων που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση ονομάζεται κώδικας. Όταν το σύνολο των κωδικών λέξεων έχει το ίδιο μέγεθος (αριθμό bits) τότε ο κώδικας ονομάζεται κώδικας σταθερού μήκους.

Σε ένα δυαδικό κώδικα (binary code) κάθε σύμβολο μπορεί να πάρει μια από δυο διακριτές τιμές ή είδη, όπως η παρουσία ή απουσία ενός παλμού. Τα δυο σύμβολα ενός δυαδικού κώδικα συνήθως συμβολίζονται με 0 και 1. Σ' ένα τριαδικό κώδικα (ternary code), κάθε σύμβολο μπορεί να είναι μία από τρεις διακριτές τιμές ή είδη, και ούτω καθ' εξής για τους άλλους κώδικες. Ωστόσο, το μέγιστο πλεονέκτημα, σε σχέση με την επίδραση θορύβου σε ένα μέσο μετάδοσης, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας δυαδικό κώδικα, επειδή ένα δυαδικό σύμβολο αντέχει μια υψηλή στάθμη θορύβου και είναι εύκολο να αναγεννηθεί.

Υποθέτουμε ότι σε ένα δυαδικό κώδικα κάθε κωδική λέξη αποτελείται από  $n$  bit. Το bit είναι ένα ακρωνύμιο για το δυαδικό ψηφίο (binary digit). Τότε, χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο κώδικα μπορούμε να παραστήσουμε ένα σύνολο 2 διακριτών αριθμών. Για παράδειγμα, ένα δείγμα κβαντισμένο σε μια από 128 στάθμες μπορεί να παρασταθεί με μια κωδική λέξη 7-bit. Υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι για τη δημιουργία μιας αντιστοίχισης ένα προς ένα μεταξύ κβαντισμένων σταθμών και κωδικών λέξεων. Ένας βολικός τρόπος είναι να εκφράσουμε τον αριθμό τάξης της κβαντισμένης στάθμης σαν ένα δυαδικό αριθμό. Στο δυαδικό σύστημα αριθμών, κάθε ψηφίο έχει τιμή θέσης που είναι δύναμη του δύο.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους τα δυαδικά σύμβολα 1 και 0 μπορούν να παρασταθούν από ηλεκτρικά σήματα:

1. Το σύμβολο 1 παριστάνεται με τη μετάδοση ενός παλμού σταθερού πλάτους κατά τη διάρκεια του συμβόλου και το σύμβολο 0 παριστάνεται από τη διακοπή του παλμού. Αυτός ο τύπος σήματος αναφέρεται σαν σήμα on-off (on-off signal ή key).
2. Τα σύμβολα 1 και 0 παριστάνονται από παλμούς ίσου θετικού και αρνητικού πλάτους. Αυτός ο τύπος σήματος αναφέρεται σαν πολικό σήμα (polar signal) ή σήμα μη επιστροφής στο μηδέν (Non Return-toZero, NRZ signal).
3. Ένας ορθογώνιος παλμός (εύρους μισού συμβόλου) χρησιμοποιείται για το 1 και η απουσία παλμού για το 0. Αυτός ο τύπος σήματος ονομάζεται σήμα επιστροφής στο μηδέν (Return-to Zero, RZ signal).
4. Θετικοί και αρνητικοί παλμοί ίσου πλάτους χρησιμοποιούνται σε εναλλαγή για το σύμβολο 1 και απουσία παλμού για το σύμβολο 0. Αυτός ο τύπος σήματος ονομάζεται διπολικό σήμα (bipolar signal). Μια χρήσιμη ιδιότητα αυτής της μεθόδου είναι ότι το φάσμα ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος δεν έχει συνιστώσα dc και έχει σχετικά αμελητέες συνιστώσες χαμηλής συχνότητας, στην περίπτωση όπου τα σύμβολα 1 και 0 εμφανίζονται με ίση πιθανότητα.
5. Το σύμβολο 1 παριστάνεται μ' ένα θετικό παλμό ο οποίος ακολουθείται από έναν αρνητικό παλμό, με τους δύο παλμούς να έχουν ίσο πλάτος και εύρος μισού συμβόλου. Για το σύμβολο 0 οι πολικότητες αντιστρέφονται. Αυτός ο τύπος σήματος ονομάζεται χωρισμού φάσης (split phase), ή κώδικας Manchester (Manchester code). Απαλείφει την συνιστώσα dc και έχει σχετικά αμελητέες συνιστώσες χαμηλής συχνότητας, ανεξάρτητα από τη στατιστική του σήματος, που είναι σημαντικό σε μερικές εφαρμογές.
6. Μερικές φορές είναι επιθυμητό να κωδικοποιήσουμε την πληροφορία σε μια δυαδική κυματομορφή PCM (pulse code modulation) συναρτήσε των μεταβολών του σήματος. Για παράδειγμα, μια μεταβολή σε μια δυαδική κυματομορφή PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ορίζει το σύμβολο 0, ενώ η απουσία μεταβολής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ορίζει το σύμβολο 1. Αυτή η μέθοδος αναπαράστασης ονομάζεται διαφορική κωδικοποίηση (differential encoding). Είναι φανερό, ότι ένα διαφορικά κωδικοποιημένο σήμα μπορεί να αντιστραφεί χωρίς να επηρεάζεται το περιεχόμενό του. Η αρχική δυαδική πληροφορία επανακτάται με δειγματοληψία της λαμβανόμενης κυματομορφής και

σύγκριση της πολικότητας των γειτονικών δειγμάτων για να γίνει αντιληπτό κατά πόσο ή όχι έχει εμφανιστεί μια μεταβολή.

Η PCM κωδικοποίηση αποθηκεύει ένα προς ένα τα δείγματα σε ψηφιακή μορφή. Είναι μια γραμμική κωδικοποίηση και το πλήθος των σταθμών κβάντωσης κατανέμεται εξίσου σε όλο το εύρος του πεδίου τιμών του σήματος. Η PCM κωδικοποίηση είναι μία μέθοδος στην οποία η τιμή που προκύπτει από τον κβαντισμό του σήματος είναι ομοιόμορφα δομημένη με διαστήματα. Στην PCM λαμβάνεται τακτικά ένα δείγμα το οποίο αντιπροσωπεύει το στιγμιαίο πλάτος της κυματομορφής εισόδου.

Η PCM είναι μία μη συμπίεσμένη μορφή κωδικοποίησης ήχου αν και μερικές άλλες μορφές PCM όπως το *mu-law* και το *A-law* χρησιμοποιούν τιμές οι οποίες είναι λογαριθμικά δομημένες, με διαστήματα, επιτυγχάνοντας ένα καλό βαθμό συμπίεσης. Σε οποιαδήποτε από τις δύο περιπτώσεις ο λόγος που προτιμάται η λογαριθμική κωδικοποίηση σε σχέση με την γραμμική είναι ότι η αυτή επιτυγχάνει να εξομοιώνει καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται τον ήχο. Είμαστε πιο ευαίσθητοι σε μικρές αλλαγές σε χαμηλή ένταση σε σχέση με τις ίδιες αλλαγές σε υψηλή ένταση, συνεπώς ο ήχος μικρής έντασης αντιπροσωπεύεται με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι ο ήχος υψηλής.

7. **Mu-law και A-law PCM.** Με την PCM κωδικοποίηση, κάθε δείγμα αντιπροσωπεύεται από μία κωδική λέξη. Η *uniform PCM* χρησιμοποιεί μία ομοιόμορφη ποσότητα βήματος των διαστημάτων. Πραγματοποιώντας τον μετασχηματισμό, η κλίμακα βήματος του διαστήματος μπορεί να αλλαχθεί σε λογαριθμική, επιτρέποντας έτσι σε ένα μεγαλύτερο εύρος να καλυφθεί με τον ίδιο αριθμό των bits. Υπάρχουν δύο κυρίως χρησιμοποιούμενοι μετασχηματισμοί: ο *mu-law* και ο *A-law*. Αυτοί οι μετασχηματισμοί επιτρέπουν 8 bits/sample να αντιπροσωπεύουν το ίδιο εύρος που θα επιτυγχάνονταν με 14 bits/sample της *uniform PCM*. Αυτό μεταφράζεται σε σχέση συμπίεσης 1:1,75 (αρχική ποσότητα πληροφοριών: συμπίεσμένη ποσότητα πληροφοριών). Εξαιτίας αυτής της λογαριθμικής φύσης της μετατροπής, δείγματα μικρού πλάτους είναι κωδικοποιημένα με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με δείγματα μεγάλου πλάτους.

8. **ADPCM.** Η PCM μέθοδος κωδικοποίησης κωδικοποιεί κάθε ηχητικό σήμα ανεξάρτητα από τα συνεχόμενα δείγματα. Παρόλα αυτά, συνήθως συνεχόμενα δείγματα είναι ίδια μεταξύ τους και το πλάτος του δείγματος μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας την τιμή των συνεχόμενων δειγμάτων. Για παράδειγμα, μία απλή μέθοδος πρόβλεψης είναι να υποθέσουμε ότι το επόμενο δείγμα θα είναι ίδιο με το τρέχον δείγμα. Η ADPCM (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation*) μέθοδος κωδικοποίησης υπολογίζει την διαφορά μεταξύ κάθε δείγματος και του υποθετικού επόμενου και κωδικοποιεί τη διαφορά (ο όρος διαφορά εννοεί διαφορικό). Λίγα bits, για την ακρίβεια τέσσερα χρειάζονται για να κωδικοποιηθεί η διαφορά από ένα ολόκληρο εύρος δείγματος. Αυτή η συμπίεση δίνει ταχύτητα εξόδου 32kbit/sec. Οι κωδικοποιητές μπορούν να προσαρμόσουν τα χαρακτηριστικά του σήματος αλλάζοντας τις παραμέτρους της υποθετικής ποσότητας. Με αυτόν τον τρόπο η ADPCM κωδικοποίηση επιτυγχάνει σχέση συμπίεσης 1:2 σε σύγκριση με την *mu-law* ή την *A-law PCM*. Διαφορετικές μορφές της ADPCM κωδικοποίησης περιλαμβάνουν τον τρόπο με τον οποίο η υποθετική τιμή υπολογίζεται και πώς η υποθετική ποσότητα προσαρμόζει τα χαρακτηριστικά του σήματος.

9. **DPCM (Differential Pulse Code Modulation –διαφορική παλμοκωδική κωδικοποίηση).** Στην DPCM κάθε δείγμα κωδικοποιείται σε σχέση με τα γειτονικά δείγματα. Έτσι αποθηκεύεται πλήρως το πρώτο δείγμα ενώ για τα υπόλοιπα δείγματα αποθηκεύονται μόνο οι διαφορές τους από τα προηγούμενα.

10. Το MPEG πρότυπο υποστηρίζει συμπίεση ήχου πολύ υψηλής ποιότητας. Το MPEG I ορίζει ρυθμούς δειγματοληψίας των 48kHz, 44.1kHz και των 32kHz. Το MPEG II προσθέτει τρεις ακόμα συχνότητες, αυτή των 16kHz, 22,05 kHz και των 24 kHz. Το MPEG I επιτρέπει μέχρι δύο κανάλια ήχου ταυτόχρονα ενώ το MPEG II επιτρέπει μέχρι και πέντε κανάλια συν ένα κανάλι χαμηλών συχνοτήτων.

Το MPEG πρότυπο ορίζει τρία επίπεδα συμπίεσης τα οποία είναι τα Audio Layer I, II και III. Το επίπεδο I είναι και το πιο απλό, ένας κωδικοποιητής υποσυχνοτήτων με ένα μοντέλο που στηρίζεται στο πως αντιλαμβάνεται τον ήχο ο άνθρωπος. Το επίπεδο II προσθέτει πιο προχωρημένες τεχνικές



διαχείρισης bits και μεγαλύτερη ακρίβεια. Το επίπεδο III προσθέτει ένα υβριδικό φίλτρο και έναν μη ομοιόμορφο κβαντισμό του σήματος. Τα επίπεδα I, II και III δίνουν αυξημένες αναλογίες ποιότητας προς συμπίεση με επίσης αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και πολύπλοκους μηχανισμούς. Θα δούμε αναλυτικά τα δημοφιλή MPEG πρότυπα κωδικοποίησης και συμπίεσης ήχου στις επόμενες ενότητες. (Πηγή: <http://www.medialab.ntua.gr/education/MultimediaTechnology/MultimediaTechnologyNotes/>)

## 6.3 Ψηφιακά αρχεία

Κάθε ψηφιακό αρχείο έχει κάποια χαρακτηριστικά όπως το μέγεθός του σε bytes και γνωρίζουμε ότι αποτελείται από δυαδικά ψηφία, μηδέν και ένα. Τα ψηφία αυτά αναπαριστούν ένα ηχητικό σήμα στην περίπτωση που μελετάμε. Επομένως, ο αριθμός των ψηφίων ή «bits» που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν το ηχητικό σήμα επηρεάζει τη ακρίβεια και την πιστότητα της αναπαραστάσης αυτής. Αν χαθούν μερικά από αυτά τα ψηφία, θα έχουμε απώλειες πληροφορίας. Αν κρατήσουμε τις απώλειες πληροφορίας χαμηλά, θα μπορούσαμε να αναπαραστήσουμε το ηχητικό σήμα επαρκώς ώστε να το αναδημιουργήσουμε με διαδικασία αποκωδικοποίησης και αποσυμπίεσης. Αν χάσουμε μεγάλα ποσοστά πληροφορίας, δε θα μπορούμε να ανακτήσουμε ικανοποιητικά το αρχικό ηχητικό αναλογικό σήμα και αυτό θα επηρεάσει αρνητικά την πιστή αναπαραγωγή του αρχικού ήχου.

Ας δούμε σε αυτό το σημείο τους 10 πιο διαδεδομένους τύπους ψηφιακών αρχείων ήχου (audio file formats) και τα βασικά χαρακτηριστικά τους:

**.WAV (WAVE Audio File)** - Ψηφιακός τύπος αρχείου για την αποθήκευση κυματοειδών δεδομένων. Επιτρέπει την αποθήκευση ήχου με διάφορα sampling και bit rates. Συνήθως χρησιμοποιούνται για να αποθηκεύουν αρχεία ποιότητας CD. Είναι παρόμοια με τα .AIF αλλά είναι πιο περίπλοκα και χρησιμοποιούνται περισσότερο από συστήματα Windows.

**.MID (MIDI File)** - Αρχείο MIDI (Musical Instrument Digital Interface) που χρησιμοποιείται κυρίως για σύνθεση μουσικής σε Η/Υ και σε ηλεκτρονικά μουσικά όργανα. Περιέχει μουσικά δεδομένα όπως νότες και ρυθμούς. Τα δεδομένα καταγράφουν ποιες νότες περιέχει ένα κομμάτι, σε ποια μέτρα παίζονται αυτές οι νότες, με ποια δυναμική και με πόση χρονική διάρκεια. Επίσης περιέχει δεδομένα ελέγχου όπως η θέση που έχουν τα πετάλια ενός ηλεκτρικού πιάνο (λεγόμενο και «clavinova»). Δεν περιέχει ηχητικά δεδομένα. Ο ήχος παράγεται από τις ενσωματωμένες γεννήτριες ήχου του Η/Υ βάσει των δεδομένων ελέγχου που περιέχει το MIDI αρχείο. Χρησιμοποιεί και την επέκταση .MIDI

**.MP3 (MPEG Audio Layer 3)** - Συμπιεσμένο αρχείο που αναπτύχθηκε από την Movie Picture Experts Group. Μπορεί να προσφέρει ποιότητα παρόμοια με του CD (stereo 16-bit) σε ένα αρχείο περίπου στο 1/10 του μεγέθους ενός .WAV ή ενός .AIF. Η ποιότητα του εξαρτάται από το bit rate που χρησιμοποιήθηκε κατά την συμπίεση του. Τυπικές τιμές είναι 128kbps, 160kbps και 192kbps. Μεγαλύτερες τιμές bitrate έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα σε μέγεθος αρχεία.



Σχήμα 6.26

.AAC (Advanced Audio Coding File) - Συμπιεσμένο αρχείο ήχου που σε αντίθεση με το MP3, προσφέρει δυνατότητες βελτίωσης της ποιότητας όπως αποδοτικότερη κωδικοποίηση, απλούστερα φίλτρα και καλύτερο χειρισμό των συχνοτήτων άνω των 16KHz. Σχεδόν πανομοιότυπη ποιότητα με το αρχικό

.AIF (Audio Interchange File Format) - Τύπος αρχείου όμοιος με το .WAV. Αναπτύχθηκε από την Apple αλλά βασίστηκε σε ιδέα της Electronic Arts. Ένα τυπικό αρχείο .AIF ψηφιακού δίσκου έχει sampling rate 44.1KHz, είναι 16-bit και έχει δυο κανάλια (για stereo)

.IFF (Interchange File Format) - Τύπος αρχείου που αναπτύχθηκε από την Electronic Arts και μπορεί να περιέχει κείμενο, εικόνα ή ήχο. Χρησιμοποιείται σαν βάση από πολλούς άλλους τύπους και υποστηρίζεται από πολλά προγράμματα.

.M3U (MP3 URL) – Αντιπροσωπεύει απλά μία λίστα αναπαραγωγής (playlist) που αποθηκεύει τις τοποθεσίες των αρχείων MPEG βίντεο και ήχου σε απλή μορφή κειμένου (text). Αρχικά το χρησιμοποιούσε μόνο το winamp αλλά τώρα χρησιμοποιείται από πολλά προγράμματα.

.MPA (MPEG Audio File) - Αρχείο ήχου συμπιεσμένο με MPEG Layer I, II ή III

.RA (Real Audio File) - Τύπος αρχείου που κατασκευάστηκε από την Real Player. Μπορεί να περιέχει ήχο ή την θέση streaming ήχου από το διαδίκτυο. Χρησιμοποιεί αλγόριθμο συμπίεσης του Real Player και συχνά χρησιμοποιείται για αναπαραγωγή ήχων μέσω του περιηγητή (web browser). Χρησιμοποιεί και την επέκταση .RAM.

.WMA (Windows Media Audio File) - Αρχείο ήχου συμπιεσμένο με το Windows Media. Αρχικά κατασκευάστηκε από την Microsoft, έχει ομοιότητες με το MP3 και μπορεί να μετατραπεί σε άλλες πιο standardized μορφές. Συχνά χρησιμοποιείται για την αναπαραγωγή μουσικής από το διαδίκτυο.

### 6.3.1 Ρυθμός μετάδοσης (bitrate)

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό και την πιστότητα του ήχου είναι το «bitrate» ή ρυθμός μετάδοσης. Ο ρυθμός μετάδοσης ή bitrate είναι ένα μέγεθος άρρηκτα συνδεδεμένο με τα ψηφιακά αρχεία ήχου.

Ο ρυθμός μετάδοσης είναι ο αριθμός των ψηφίων (bits) που χρησιμοποιούνται σε μία μονάδα χρόνου για την ψηφιακή αναπαράσταση του δειγματοληπτούμενου και κβαντισμένου ηχητικού σήματός μας. Όταν μιλάμε για μορφές αρχείων μουσικής και ήχου, το bitrate υπολογίζεται σε kilobits ανά δευτερόλεπτο (kbps). Για παράδειγμα, ένα αρχείο MP3 των 320kbps (CBR) μεταφέρει σταθερά 320 kilobits πληροφορίας ανά δευτερόλεπτο. Ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να είναι σταθερός (constant bitrate CBR) ή μεταβαλλόμενος (Variable bitrate ή VBR).

Ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης ή CBR είναι χρήσιμος σε περιπτώσεις διαδικτυακής μετάδοσης ή «streaming» περιεχομένου πολυμέσων σε κανάλια και δίκτυα με περιορισμένη χωρητικότητα και εύρος ζώνης, δεδομένου ότι είναι ο μέγιστος ρυθμός bit που έχει σημασία, όχι η μέση τιμή του. Επομένως ο σταθερός ρυθμός CBR θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθεί η μέγιστη χρησιμοποίηση του δικτύου χωρίς να υπάρχουν διακοπές του σήματος ή πτώσεις του ρυθμού μετάδοσης που θα αλλοίωναν το αποτέλεσμα. Εντούτοις, ο σταθερός ρυθμός δεν είναι τόσο κατάλληλος για αποθήκευση δεδομένων καθώς χρησιμοποιεί ίδιο αριθμό από bits ανά δευτερόλεπτο για την αναπαράσταση της σιωπής και για την αναπαράσταση πολύπλοκων μουσικών περασμάτων. Θα προτιμούσαμε να χρησιμοποιούνται περισσότερα bits για την αναπαράσταση πολύπλοκων ηχητικών δειγμάτων ώστε να έχουμε καλύτερη πιστότητα στο αρχικό σήμα. Μία λύση για αυτό το φαινόμενο είναι να αυξηθεί συνολικά ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης. Αυτό όμως οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη κατανάλωση αποθηκευτικού χώρου και σπατάλη bits για σημεία μουσικών παύσεων. Πιο αποδοτική επομένως φαίνεται πως θα ήταν η χρήση μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης.

Η διαδικασία κωδικοποίησης μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης (VBR) λειτουργεί ως εξής: Αρχικά, στη σιωπή δεν δίνονται σχεδόν καθόλου bits ανά δευτερόλεπτο. Μεταβάλλοντας κατάλληλα το bitrate ανάλογα με την πολυπλοκότητα των μουσικών περασμάτων ενός κομματιού, το τελικό αρχείο έχει αρκετά μικρότερο μέγεθος από ένα αρχείο κωδικοποιημένο με σταθερό bitrate της ίδιας μέγιστης τιμής. Πολυπλοκότερα σήματα στην αναπαράστασή τους αναπαρίστανται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και bitrate από τα απλούστερα σήματα, δίνοντας καλύτερο λόγο ποιότητας προς όγκο δεδομένων. Η λεπτομέρεια με την οποία αναπαρίστανται κάποια δείγματα είναι καλύτερη από ό,τι στην κωδικοποίηση με σταθερό ρυθμό μετάδοσης.

Στα μειονεκτήματα είναι ότι τα VBR αρχεία μπορεί να χρειαστούν περισσότερο χρόνο για την κωδικοποίηση, καθώς η διαδικασία είναι πιο περίπλοκη. Επίσης, υπάρχει υλικό (hardware) που μπορεί να μην είναι συμβατό με αρχεία VBR. Η κωδικοποίηση με VBR μπορεί επίσης να δημιουργήσει προβλήματα κατά τη διάρκεια της ροής δεδομένων μέσα από ένα δίκτυο όταν η στιγμιαία τιμή του bitrate υπερβαίνει το μέγιστο ρυθμό δεδομένων στη γραμμή επικοινωνίας. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να αποφευχθούν με τον περιορισμό της στιγμιαίας τιμής του bitrate κατά την κωδικοποίηση ή με τη διεύρυνση του μεγέθους του αρχικού αποταμιευτή (buffer) που λαμβάνει το σήμα και το μεταδίδει με χρονική καθυστέρηση.

Οι πρώτοι αλγόριθμοι VBR περιστασιακά εισήγαγαν θόρυβο κατά την κωδικοποίηση απλών τόνων ή μουσικής και ομιλίας με απλά περάσματα όπως για παράδειγμα απαγγελία βιβλίων («audiobooks») και ακουστικής μουσικής. Οι θόρυβοι αυτοί ακούγονταν σαν τιτιβίσματα πουλιών κατά την αποκωδικοποίηση και αναπαραγωγή του αρχείου. Πλέον οι VBR αλγόριθμοι κωδικοποίησης έχουν βελτιωθεί και αυτά τα προβλήματα έχουν επιλυθεί στις σημερινές γενιές του προτύπου VBR.

Από τα ψηφιακά μέσα αποθήκευσης ήχου (CD, DAT, DCC και MD) το CD έχει καθιερωθεί ως de facto πρότυπο. Σε ένα CD ή ένα DAT σήματα με εύρος ζώνης 10 - 20000 Hz και 44,1 KHz συχνότητα δειγματοληψίας αποθηκεύονται με ανάλυση 16 bit/sample. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα bit rate (στέρεο):  $2 \times 44,1 \times 1 = 1411,2 \text{ Kb/s}$ . Οι επικεφαλίδες και οι μηχανισμοί διόρθωσης σφαλμάτων που απαιτούνται έχουν ως αποτέλεσμα συνολική απαίτηση 49 bit απεικόνιση για κάθε δείγμα 16 bit. Οπότε το συνολικό bit rate είναι:  $1,41 \times 49/16 = 4,32 \text{ Mb/s}$ .

Στον ακόλουθο πίνακα συγκρίνονται τα bitrates για διάφορα μέσα:

Ψηφιακό μέσο/ πρότυπο:	Audio Bitrate	Bitrate Επικεφαλίδας	Σ υ ν ο λ ι κ ό Bitrate
Compact Disc (CD)	1 , 4 1 Mb/s	2,91 Mb/s	4,32 Mb/s
Digital Audio tape (DAT)	1 , 4 1 Mb/s	1,67 Mb/s	3,08 Mb/s
MiniDisc (MD)	292 kb/s	718 kb/s	1,01 Mb/s

Πίνακας 6.2

Χωρίς συμπίεση, ο ψηφιακός ήχος με 44,1 KHz συχνότητα δειγματοληψίας και 16 bit ανάλυση δείγματος (για κάθε κανάλι) απαιτεί συνολικά 1,41 Mbps. Σύγχρονοι αλγόριθμοι όπως ο Perceptual Audio Coder (PAC) που αναπτύχθηκε από τα AT&T Bell Labs είναι ικανοί να κωδικοποιήσουν στερεοφωνικού ήχου με συνολικό bit rate 128 Kbps, χωρίς αισθητή μείωση της ποιότητάς του.

### 6.3.2 Τρόποι κωδικοποίησης VBR

Σημειώστε ότι η επιλογή μιας μεθόδου μεταβλητού bitrate (VBR) επηρεάζει μόνο τη διαδικασία κωδικοποίησης. Η αποκωδικοποίηση ενός αρχείου με VBR γίνεται με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις περιπτώσεις, ανεξάρτητα από το πώς ο κωδικοποιητής επιλέγει να κωδικοποιήσει κομμάτια του αρχείου.

#### Multi-pass κωδικοποίηση και single-pass κωδικοποίηση:

Ένα αρχείο VBR δημιουργείται χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη κωδικοποίηση ενός περάσματος (single-pass) ή πολλαπλών περασμάτων (multi-pass). Η Single-pass κωδικοποίηση αναλύει και κωδικοποιεί τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και χρησιμοποιείται επίσης σε σταθερού bitrate κωδικοποίηση. Single-pass κωδικοποίηση χρησιμοποιείται όταν η ταχύτητα κωδικοποίησης είναι το πιο σημαντικό στοιχείο όπως π.χ. σε πραγματικού χρόνου κωδικοποίηση. Για παράδειγμα, σε μία ψηφιακή κονσόλα μείξης, το DSP τσιπ είναι προτιμότερο να χρησιμοποιεί VBR κωδικοποίηση ενός περάσματος για ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης μετάδοσης. Η πολλαπλών περασμάτων ή «Multi-pass» κωδικοποίηση χρησιμοποιείται όταν η ποιότητα κωδικοποίησης είναι το πιο σημαντικό στοιχείο. Η Multi-pass δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο.

Η Multi-pass κωδικοποίηση χρησιμοποιείται μόνο για την κωδικοποίηση κατά VBR, επειδή η CBR κωδικοποίηση δεν προσφέρει καμία ευελιξία για να αλλάξει το bitrate. Η πιο κοινή multi-pass κωδικοποίησης είναι ή δύο περασμάτων ή «two-pass» κωδικοποίηση. Στο πρώτο πέρασμα από τα δύο της κωδικοποίησης, τα δεδομένα εισόδου αναλύονται και το αποτέλεσμα αποθηκεύεται σε ένα αρχείο καταγραφής. Στο δεύτερο πέρασμα, τα δεδομένα που συλλέγονται από το πρώτο πέρασμα χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί η καλύτερη ποιότητα κωδικοποίησης.

#### Κωδικοποίηση σταθερής ποιότητας:

Ένας από τους τρόπους κωδικοποίησης κατά VBR είναι ο σταθερής κβάντισης ή σταθερής ποιότητας κωδικοποίησης. Είναι συνήθως μία κωδικοποίηση ενός περάσματος. Ο χρήστης καθορίζει μία δεδομένη υποκειμενική τιμή ποιότητας κωδικοποίησης και το πρόγραμμα-κωδικοποιητής (encoder) διαθέτει τα bits ανά δευτερόλεπτο όπως απαιτείται για να επιτευχθεί το συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας. Αυτό εξασφαλίζει ότι το αρχείο εξόδου θα έχει σταθερή ποιότητα σε ολόκληρο το μήκος του. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου κωδικοποίησης είναι ότι ο μέσος ρυθμός bitrate και ως εκ τούτου το μέγεθος του αρχείου, δεν θα είναι γνωστό εκ των προτέρων. Για να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος μέσος ρυθμός bitrate του αρχείου, απαιτείται τεχνική δοκιμής και λάθους.

#### Κωδικοποίηση εύρους bitrate:

Αυτή η μέθοδος κωδικοποίησης VBR επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει ένα εύρος ρυθμών bitrate. Καθορίζεται επομένως μία ελάχιστη ή/και μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του bitrate. Ορισμένοι κωδικοποιητές επεκτείνουν αυτή τη μέθοδο προσθέτοντας απαίτηση για ένα μέσο ρυθμό bitrate. Το ελάχιστο και το μέγιστο επιτρεπόμενο bitrate θέτει τα όρια στα οποία μπορεί να κινηθεί το bitrate του αρχείου. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι το μέσο bitrate και επομένως το μέγεθος του αρχείου, δεν θα είναι γνωστά εκ των προτέρων. Το εύρος bitrate χρησιμοποιείται επίσης και σε ορισμένες σταθερής ποιότητας μεθόδους κωδικοποίησης, αλλά συνήθως χωρίς την άδεια να επιλεγεί ένα συγκεκριμένο bitrate. Οι τεχνικές ενός και δύο περασμάτων που είδαμε χρησιμοποιούν συνήθως την κωδικοποίηση εύρους bitrate (bitrate range).

#### Μέσος όρος bitrate:

Ο μέσος όρος bitrate (average bitrate, ABR) είναι μια τεχνική VBR κωδικοποίησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξασφαλιστεί ότι το αρχείο εξόδου επιτυγχάνει ένα προβλέψιμο μακροπρόθεσμο μέσο ρυθμό μετάδοσης. Αυτό συνήθως υλοποιείται με τη χρήση multi-pass κωδικοποίησης. Ένα ή περισσότερα αρχικά περάσματα χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με το αρχείο.

Ένα τελικό πέρασμα χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα για να επιτευχθεί ομοιόμορφη ποιότητα με τον καθορισμένο μέσο ρυθμό bitrate. Εναλλακτικά, εφαρμόζεται τεχνική ABR σε μικρότερα κομμάτια του αρχείου κάθε φορά ώστε κάθε κομμάτι του να έχει σταθερό μέσο ρυθμό και να χρησιμοποιείται μόνο ένα πέρασμα. Για ABR με ένα πέρασμα μπορεί επίσης να μεταβάλλεται κατάλληλα η ποιότητα της κωδικοποίησης ώστε να διατηρείται σταθερός ο μέσος ρυθμός μετάδοσης. Αυτό φυσικά δεν είναι το επιθυμητό πρότυπο για αρχεία ήχου υψηλής πιστότητας.

Ορισμένοι κωδικοποιητές επιτρέπουν επίσης στο χρήστη να καθορίσει μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή bitrate ή μέγιστη τιμή ποιότητας. Αυτό ονομάζεται Περιορισμένο Μεταβλητό Bitrate (Constrained Variable Bitrate, CVBR) και εφαρμόζεται συνήθως σε ABR αλγόριθμους.

Το μειονέκτημα της κωδικοποίησης ABR με ένα πέρασμα (με ή χωρίς CVBR) είναι πως το μέγεθος του αρχείου εξόδου είναι γνωστό εκ των προτέρων, αλλά η προκύπτουσα ποιότητα είναι άγνωστη. Βέβαια η ποιότητα είναι καλύτερη συνήθως από την ποιότητα της CBR κωδικοποίησης.

## 6.4 Μέθοδοι κωδικοποίησης

Κατά τη σύγκριση αρχείων που προέρχονται από το ίδιο μουσικό κομμάτι, αλλά ψηφιοποιούνται με ίδια διαδικασία σε διαφορετικά bitrates, το αρχείο με το υψηλότερο σταθερό bitrate έχει τη μεγαλύτερη πιστότητα. Υπάρχουν όμως διάφορες μορφές αρχείων και τρόποι για την ψηφιακή αναπαράσταση του ηχητικού σήματος.

Γενικά υπάρχουν τρεις τρόποι να αποθηκεύσει κανείς ένα αρχείο ήχου σε ψηφιακή μορφή: 1) χωρίς συμπίεση (compression) και χωρίς απώλειες, 2) με συμπίεση χωρίς απώλειες ή 3) με συμπίεση και απώλειες. Ας ορίσουμε σε αυτό το σημείο τις έννοιες των απωλειών και της συμπίεσης και ας δούμε τις κυριότερες μορφές ψηφιακής κωδικοποίησης και αποθήκευσης αρχείων ήχου:

### 1) Ασυμπίεστες χωρίς απώλειες :

Οι ασυμπίεστες χωρίς απώλειες μορφές διατηρούν (εμπεριέχουν) όλα τα αρχικά ηχογραφημένα δεδομένα. Δεδομένου ότι η σιωπή έχει τον ίδιο αριθμό από bits ανά δευτερόλεπτο, όπως και ο ήχος, τα ασυμπίεστα αρχεία χωρίς απώλειες είναι τεράστια σε μέγεθος. Απαιτούν επομένως τον περισσότερο αποθηκευτικό χώρο αλλά παρέχουν την μικρότερη δυνατή απώλεια πληροφορίας. Η κύρια τεχνική αποθήκευσης πληροφορίας ήχου σε ασυμπίεστη χωρίς απώλειες μορφή λέγεται παλμικός κωδικός διαμόρφωσης (PCM, pulse code modulation). Παραδείγματα κατάληξης αρχείων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση σε ασυμπίεστη μορφή χωρίς απώλειες είναι οι: «WAV» (PCM) (για χρήση σε Windows λειτουργικό σύστημα) και «.AIFF» (PCM) (για χρήση σε Mac OS λειτουργικό σύστημα της εταιρίας Apple.)

### 2) Συμπιεσμένες μορφές χωρίς απώλειες:

Οι συμπιεσμένες μορφές χωρίς απώλειες (lossless) ενσωματώνουν όλα τα αρχικά ηχογραφημένα δεδομένα σε λιγότερο χώρο από ότι οι ασυμπίεστες χωρίς απώλειες μέσω της διαδικασίας συμπίεσης των δεδομένων. Αυτό το είδος αλγορίθμων έχει το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι η διαδικασία συμπίεσης δεν αλλοιώνει καθόλου την πληροφορία. Δηλαδή, μετά την αποσυμπίεση, η πληροφορία επανέρχεται ακριβώς στην μορφή που είχε πριν. Συνήθως, αυτοί οι αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει κανένα περιθώριο απωλειών. Υπάρχουν διάφορες μορφές συμπίεσης δεδομένων που χρησιμοποιούνται και έχουν στόχο την ψηφιακή αναπαράσταση του ηχητικού σήματος με όσο το δυνατόν λιγότερα σύμβολα χωρίς όμως να χάνεται σημαντική πληροφορία. Δεδομένου ότι αμφότερες οι χωρίς απώλειες ηχητικές μορφές, ασυμπίεστες και συμπιεσμένες, διατηρούν όλα τα

δεδομένα από την αρχική καταγραφή, μπορούν να μετατραπούν από μια μορφή στην άλλη χωρίς σημαντική απώλεια στην πιστότητα. Παραδείγματα κατάληξης αρχείων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση σε συμπίεσμένη μορφή χωρίς απώλειες είναι οι: Free Lossless Audio Codec (FLAC), Apple Lossless Audio Codec (ALAC), Monkey's Audio (APE).

### 3)Απωλεστικές:

Οι απωλεστικές μορφές είναι πάντα συμπίεσμένες. Οι απωλεστικές μορφές έχουν μικρότερα μεγέθη αρχείων από τις ασυμπίεστες αλλά και τις συμπίεσμένες χωρίς απώλειες μορφές, επειδή αφαιρούν κάποια από τα αρχικά δεδομένα. Συνήθως τα αφαιρούμενα δεδομένα είναι σε συχνότητες τόσο υψηλές που οι άνθρωποι δεν μπορούν να ακούσουν, ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να υπάρχουν εμφανείς ακουστικές διαφορές μεταξύ των απωλεστικών και μη-απωλεστικών μορφών ήχου. Είναι φανερό ότι σε τέτοιες περιπτώσεις το σημασιολογικό περιεχόμενο ουσιαστικά δεν μεταβάλλεται αλλά υπεισέρχεται η έννοια της μείωσης της ποιότητας. Το ψηφιακό σήμα ως ακολουθία bits σαφώς και μεταβάλλεται.

Επειδή οι απωλεστικές μορφές αφαιρούν δεδομένα κατά τη διάρκεια της συμπίεσης (και έτσι χάνουν ποιότητα), απωλεστικές μορφές δεν μπορούν να μετατραπούν και να κωδικοποιηθούν σε μη-απωλεστικές ή άλλες απωλεστικές μορφές χωρίς να χάσουν περισσότερη πιστότητα. Στην καλύτερη περίπτωση θα διατηρήσουν τα χαρακτηριστικά τους αλλά δε θα μπορέσουμε να προσθέσουμε την πληροφορία που έχει ήδη χαθεί κατά την πρώτη απωλεστικού τύπου κωδικοποίηση.

Παραδείγματα κατάληξης αρχείων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση σε συμπίεσμένη μορφή με απώλειες είναι οι: MPEG Layer 3 Audio (MP3), Advanced Audio Encoding (AAC), Windows Media Audio (WMA), Dolby Digital Audio Codec 3 (AC3), DTS Coherent Acoustics Codec (DTS). Οι μορφή MP3 είναι η πιο διαδεδομένη. Θα αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο μία κωδικοποίηση ενός ηχητικού αρχείου κατά mp3 χάνει πληροφορία και οδηγείται σε υψηλή συμπίεση του μεγέθους του. Διάφορες παράμετροι όπως ο ρυθμός μετάδοσης και η συχνότητα δειγματοληψίας κατά τη διαδικασία συμπίεσης και αποσυμπίεσης ενός αρχείου mp3 επηρεάζουν άμεσα την πιστότητά του στο αρχικό ασυμπίεστο αρχείο ή ηχητικό αναλογικό σήμα.

Η ποιότητα της καταγραφής σε αρχείο mp3 είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το ρυθμό bit, δηλαδή τον αριθμό των bit της κωδικοποιημένης πληροφορίας τα οποία αναπαριστούν το κάθε δευτερόλεπτο ήχου. Τυπικά, οι ρυθμοί αυτοί είναι μεταξύ των 128 και 320 kbit/δευτ. Αντίθετα ο ασυμπίεστος ήχος όπως αποθηκεύεται σε έναν ψηφιακό δίσκο (CD) έχει ρυθμό bit 1411.2 kb/ δευτ (16bit ανα δείγμα X 44100 δείγματα το δευτερόλεπτο X 2 κανάλια). Η ποιότητα επίσης εξαρτάται και από την ποιότητα του προγράμματος κωδικοποίησης και την δυσκολία της μετατροπής του σήματος που κωδικοποιείται και συμπιέζεται. Ένα πρότυπο mp3 έχει ελάχιστους περιορισμούς ως προς τους αλγόριθμους κωδικοποίησης. Αυτό το γεγονός, πέρα από την τεράστια χρηστικότητά του μπορεί και να σημαίνει ότι διαφορετικοί κωδικοποιητές μπορεί να αποφέρουν διαφορετικές ποιότητες, ακόμα και έχοντας παρόμοιους ρυθμούς bit. Ο βαθμός στον οποίο ένα αρχείο MP3 ακούγεται χωρίς να ξεχωρίζει από τον αρχικό ήχο εντός του ανθρώπινου ακουστικού φάσματος, μπορεί να εκτιμηθεί περίπου στα 128Kbps χρησιμοποιώντας καλούς κωδικοποιητές σε ένα τυπικό κομμάτι μουσικής. Ένα πολυπλοκότερο μουσικό κομμάτι με γρήγορες μεταβάσεις και μουσικά περάσματα είναι προτιμότερο να έχει όριο τα 192Kbps ενώ η μέγιστη ποιότητα του mp3 και με την μεγαλύτερη πιστότητα καταγραφής επιτυγχάνεται συνήθως στο άνω όριο του bitrate που είναι 320 Kbps. Όπως και με όλες τις μορφές απωλεστικής συμπίεσης, κάποια δείγματα μουσικής δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιηθούν ικανοποιητικά ώστε να μην γίνονται αντιληπτές οι διαφορές τους από το ασυμπίεστο χωρίς απώλειες αρχείο από όλους τους χρήστες. Ο μέσος όρος όμως των ακροατών σε μία εξέταση ακρόασης ή «listening test» δε θα διακρίνει ιδιαίτερες διαφορές.

### 6.4.1 Το μέγεθος ενός αρχείου

Η συμπίεση οδηγεί σε δραματική μείωση του χώρου που απαιτείται για την αποθήκευση ενός μουσικού αρχείου. Παρακάτω ακολουθεί ένα παράδειγμα για το πώς το μέγεθος του αρχείου ενός τραγουδιού ποικίλλει ανάλογα με το αν η μορφή του τραγουδιού είναι ασυμπίεστη χωρίς απώλειες, συμπίεσμένη χωρίς απώλειες ή απωλεστική. Ας πάρουμε για παράδειγμα ένα κλασικό ποπ τραγούδι, Sk8er Boi της Avril Lavigne που κυκλοφόρησε το 2002 και έλαβε υποψηφιότητα για βραβείο Γκράμι καλύτερης γυναικείας φωνητικής ροκ ερμηνείας. Το τραγούδι διαρκεί 3 λεπτά και 24 δευτερόλεπτα συνολικά. Ασυμπίεστο χωρίς απώλειες σε αρχείο κατάληξης «.WAV» και κωδικοποίηση PCM καταλαμβάνει χώρο 34,3 MB (MegaBytes). Συμπιεσμένο χωρίς απώλειες κατά FLAC καταλαμβάνει χώρο 25,75 MB. Είναι επομένως κατά 25% συμπιεσμένο. Συμπιεσμένη με απωλεστικό αλγόριθμο κωδικοποίησης MP3 και σταθερό ρυθμό μετάδοσης 320kbps (CBR) καταλαμβάνει μόλις 7,78 MB. Είναι επομένως κατά 78% συμπιεσμένο σε σχέση με το «.Wav» κατάληξης αρχείο.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συχνότητες δειγματοληψίας και το μήκος της λέξης κατά την κβαντοποίηση για διάφορα πρότυπα συμπίεσης ήχου. Εκτός από την κατάλληλη επιλογή αυτών των παραμέτρων ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, περαιτέρω συμπίεση μπορεί να επιτευχθεί με αφαίρεση των σιωπηλών τμημάτων και με καλύτερες μεθόδους κωδικοποίησης όπως: μη γραμμική PCM όπως λογαριθμική ή μ-law, διαφορική PCM και προσαρμοστική διαφορική PCM.

Συχνότητα Δειγματοληψίας (kHz)	Κβαντοποίηση (bits)	Τεχνική Κωδικοποίησης	Ποιότητα
44.1	16	PCM	Hi-fi
37.8	8	ADPCM	Hi-fi
37.8	8	ADPCM	FM μετάδοση (μουσική)
18.9		ADPCM	AM μετάδοση (ομιλία)
8	8	PCM	Τηλεφωνική

*Ηχητική ποιότητα και μέθοδος ψηφιοποίησης*

Πίνακας 6.3

## 6.5 Μέθοδοι συμπίεσης

Σε αυτήν την ενότητα θα ασχοληθούμε με τις μεθόδους συμπίεσης που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ήχου. Τα σημερινά αποθηκευτικά μέσα και δίκτυα πασχίζουν να ικανοποιήσουν τις τεράστιες ανάγκες που επιβάλλουν οι εφαρμογές πολυμέσων που κάνουν ευρεία χρήση εικόνων, ήχου και βίντεο. Ένας συμπαγής οπτικός δίσκος (CD), ο οποίος έχει χωρητικότητα 650MB, χωρά μόνο 75 λεπτά της ώρας ασυμπίεστου στερεοφωνικού ήχου.

Στόχος της συμπίεσης είναι ο περιορισμός του μεγέθους που καταλαμβάνει ένα ποσό πληροφορίας εις βάρος βέβαια της διαθεσιμότητας του, της υπολογιστικής ισχύος και πολύ συχνά και της ακρίβειας του περιεχομένου του.

Τα δύο πρώτα πράγματα που θυσιάζονται κατά την συμπίεση της πληροφορίας είναι η διαθεσιμότητα της και ένα ποσό υπολογιστικής ισχύος. Αυτό σημαίνει, ότι οι διαδικασίες συμπίεσης και αποσυμπίεσης έχουν υπολογιστικό κόστος, που μπορεί να είναι τόσο μεγάλο που να απαιτεί ειδικό υλικό για να γίνει σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη πλευρά, η συμπιεσμένη μορφή της πληροφορίας δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμη. Πρέπει να προηγηθεί το στάδιο της αποσυμπίεσης για να αποκτήσει ξανά το σημασιολογικό της περιεχόμενο. Συνήθως μας απασχολεί η ταχύτητα αποσυμπίεσης και όχι τόσο αυτή της συμπίεσης. Στις περισσότερες εφαρμογές η συμπίεση γίνεται μια φορά στο στάδιο της κατασκευής και με χρήση ειδικού υλικού, ενώ η αποσυμπίεση γίνεται από τους χρήστες που έχουν στην διάθεση τους υπολογιστές γενικής χρήσης. Όπως αναφέραμε, υπάρχουν δύο τύποι αλγορίθμων συμπίεσης : με ή χωρίς απώλειες.

### 6.5.1 Codecs (Κωδικοποιητές / Αποκωδικοποιητές)

Κάθε εταιρεία χρησιμοποιεί δικούς της τρόπους συμπίεσης και αποσυμπίεσης. Τα προγράμματα κωδικοποίησης παίρνουν ένα αρχικό αρχείο κατάληξης «.wav, .au, .snd, .aiff» και μειώνουν το μέγεθος του «πετώντας» κάποια πληροφορία που εκείνα θεωρούν άχρηστη ή μη ζωτικής σημασίας για το τελικό αποτέλεσμα. Το συμπιεσμένο αρχείο που παράγουν είναι πολύ μικρότερο σε μέγεθος και χαμηλότερης ποιότητας ήχου σε σχέση με το αρχικό. Επίσης το αρχείο ήχου δίνεται σε μια μορφή (format) ανάλογα με τον προμηθευτή του αντίστοιχου προγράμματος. Τα προγράμματα κωδικοποίησης επιτρέπουν τον έλεγχο της ποιότητας του ήχου που θα παράγουμε. Φυσικά όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του ήχου και όσο μεγαλύτερη η συχνότητα δειγματοληψίας τόσο μεγαλύτερο θα είναι το μέγεθος του τελικού αρχείου.

Τεχνικές για τη μείωση ψηφιακών δεδομένων ήχου χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στα πρώτα ψηφιακά συστήματα τηλεφωνίας στη δεκαετία του 1960. Αρχικά τα συστήματα αυτά προσέφεραν μικρή μείωση στον όγκο των δεδομένων, στην καλύτερη περίπτωση 2:1. Πρόσφατα, αποδοτικότεροι αλγόριθμοι επιτρέπουν μεγαλύτερη μείωση δεδομένων παράγοντας εξόδους σημάτων που διαφέρουν από τα αρχικά σήματα αν τα εξετάσει κανείς bit προς bit αλλά αισθητικά ακούγονται το ίδιο με τα αρχικά σήματα τουλάχιστον για τη μεγάλη πλειοψηφία των ακροατών. Αυτή η προσέγγιση υιοθετήθηκε και για τον ήχο στο δίκτυο. Οι αλγόριθμοι δεν είναι διαφανείς, αλλά με μεγάλη επιτυχία διατηρούν ικανοποιητική ποιότητα ήχου ενώ ταυτόχρονα μειώνουν σε μεγάλο βαθμό το λόγο των δεδομένων.

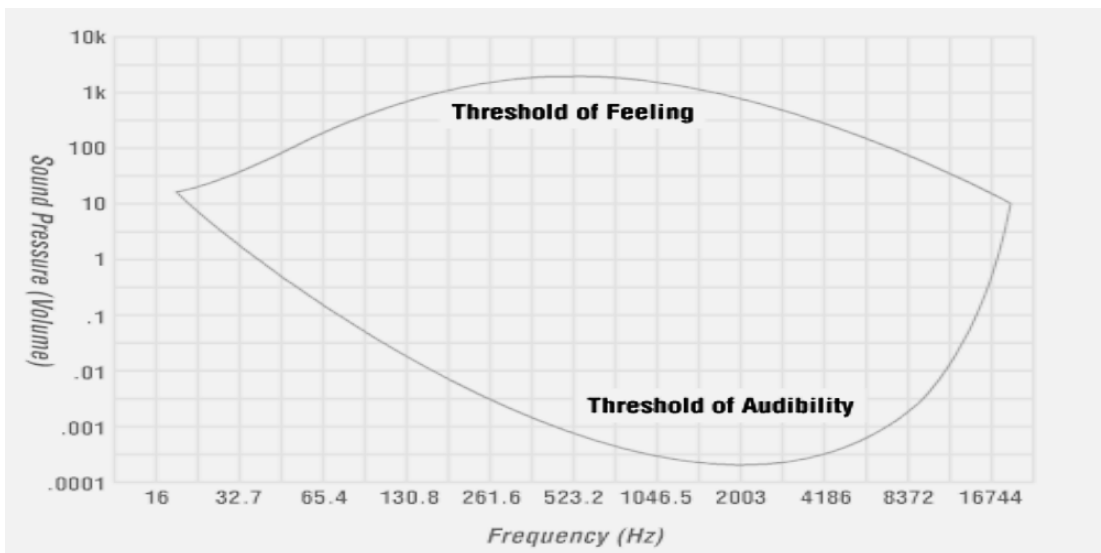
Αν αναρωτιέστε γιατί κλασσικές μέθοδοι συμπίεσης αρχείων δεν χρησιμοποιούνται για τον ήχο η απάντηση είναι, ότι αυτές οι μέθοδοι συμπίεσης αναλύουν τα δεδομένα από μια οπτική καθαρά στατιστική και τα αποσυμπιεσμένα δεδομένα δεν διαφέρουν καθόλου από τα αρχικά. Πρέπει να μην χάνονται καθόλου δεδομένα και να υπάρχει απόλυτη πιστότητα ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και εξόδου. Οι σημερινοί αλγόριθμοι ψηφιακού ήχου που πετούν κομμάτι των δεδομένων (lossy) και ειδικότερα οι perceptual αλγόριθμοι σχεδιάστηκαν αποκλειστικά για αρχεία ήχου και μειώνουν τα δεδομένα βασιζόμενοι μόνο στο πως θα ακούγεται από το ανθρώπινο αυτί τελικά το σήμα. Εκμεταλλεύονται την αδυναμία του ανθρώπινου αυτιού να αντιληφθεί κάποια απώλεια από το αρχικό σήμα και έτσι μειώνουν σημαντικά το μέγεθος των ψηφιακών σημάτων ήχου.

Η διαδικασία εκτελείται σε δύο στάδια. Αρχικά αναλογικό σήμα ήχου μετατρέπεται σε δεδομένα με λέξη 16-bit χρησιμοποιώντας μία από τις συνηθισμένες συχνότητες δειγματοληψίας των 32, 44.1 ή 48kHz. Τα στερεοφωνικά σήματα συνήθως συνενώνονται δημιουργώντας ένα όγκο δεδομένων από 500 ως 750 KB/δευτερόλεπτο. Τότε σε δεύτερο στάδιο αλγόριθμοι συμπίεσης δεδομένων εφαρμόζονται και ο λόγος των δεδομένων μειώνεται κατά ένα παράγοντα της τάξης του 50:1 ή και περισσότερο.



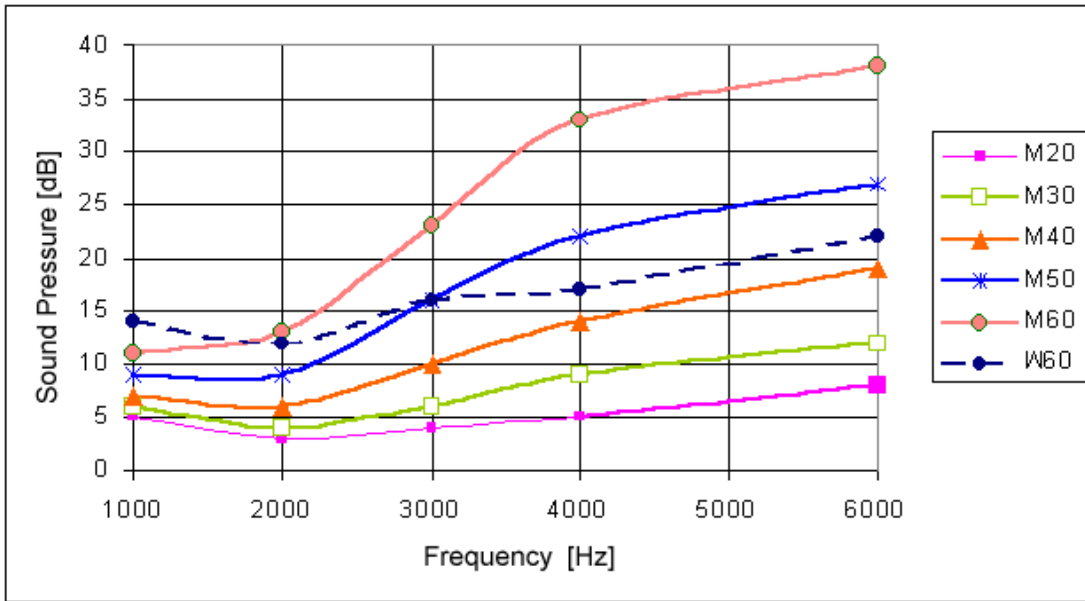
### 6.5.2 Αντιληπτική (Perceptual) κωδικοποίηση

Όπως έχουμε αναλύσει σε προηγούμενα κεφάλαια, ο ήχος είναι ένα κύμα το οποίο κάνει το τύμπανο του αυτιού να πάλλεται, γεγονός που δημιουργεί νευρικές ώσεις στον εγκέφαλο, ώσεις που αναγνωρίζονται ως ήχος. Ακόμη και αν οι διάφορες συχνότητες καθαρών τόνων που ακούμε έχουν ίδια ένταση, δεν δημιουργούν την ίδια εντύπωση στο αυτί μας. Το γεγονός αυτό δεν είναι τυχαίο και συνδέεται με την ψυχοακουστική. Η ψυχοακουστική είναι ο επιστημονικός τομέας που ασχολείται με την έρευνα πάνω στο πεδίο αυτό. Η ψυχοακουστική μελετά την αντίληψη που έχουμε για τους ήχους που λαμβάνουμε διαρκώς από το ολοένα και πιο θορυβώδες περιβάλλον. Με την εξέλιξη των ειδών, ο άνθρωπος ανέπτυξε τη δυνατότητα να φιλτράρει κάποιους ήχους του περιβάλλοντός του και να επικεντρώνεται σε άλλους. Η δυνατότητα φιλτραρίσματος των ήχων του περιβάλλοντος δημιουργείται τόσο με φυσιο-ακουστικούς μηχανισμούς λόγω της κατασκευής του ανθρώπινου αυτιού όσο και με ψυχοακουστικούς μηχανισμούς. Σε προηγούμενο κεφάλαιο είχαμε δει αναλυτικά τη συνάρτηση μεταφοράς του ανθρώπινου αυτιού και κεφαλιού που αφορά τη φυσιοακουστική. Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε πως κάποιοι αλγόριθμοι κωδικοποίησης ηχητικών αρχείων εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι ο εγκέφαλος απορρίπτει κάποιους ήχους και αντιλαμβάνεται ή δίνει έμφαση σε άλλους. Για παράδειγμα, οι MPEG αλγόριθμοι κωδικοποίησης αποτελούν παραδείγματα της εφαρμοσμένης ψυχοακουστικής. Δύο ανακαλύψεις ήταν ιδιαίτερα σημαντικές προς αυτή την κατεύθυνση. Το 1894, ο Alfred Marshall Meyer ανέφερε πως ένας ήχος μπορεί να γίνει μη αισθητός στο ανθρώπινο αυτί αν ταυτόχρονα εκπέμπεται ένας τόνος μικρότερης συχνότητας. Το 1959, ο Richard Ehmer περιέγραψε ένα πλήρες σύνολο από ακουστικές καμπύλες σχετικά με το παραπάνω φαινόμενο. Βρέθηκε πως ο άνθρωπος δεν μπορεί να διαχωρίσει ήχους με μικρή διαφορά στη συχνότητά τους και πως όλο το ακουστικό εύρος μπορεί να χωριστεί σε 24 τέτοιες ζώνες. Σε κάθε μία τέτοια ζώνη μπορεί να επιλεγεί μία συχνότητα που κυριαρχεί και καλύπτει όλες τις υπόλοιπες της αντίστοιχης ζώνης. Αν αυτή παρουσιαστεί ως αντιπρόσωπος όλων των υπολοίπων της αντίστοιχης ζώνης, τότε ο ακροατής δεν θα καταλάβει τη διαφορά.



Σχήμα 6.27

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τα κάτω όρια των εντάσεων (σε dB) ήχων που γίνονται αντιληπτοί σε συνάρτηση με τη συχνότητά τους καθώς και τα άνω όρια που λέγονται και όρια «πόνου» ή «αίσθησης». Στην πράξη κάθε άνθρωπος αντιλαμβάνεται διαφορετικά τα όρια αυτά. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται μία στατιστική μελέτη των ορίων βάσει τους γένους (M για Males = άνδρες, W για Women = γυναίκες) και της ηλικίας τους σε έτη (από 20 έως 60 ετών).



Σχήμα 6.28

Οι αλγόριθμοι αντίληψης (perceptual) στηρίζονται στην ψυχοακουστική που εξετάζει την ανθρώπινη αίσθηση της ακοής. Ένα βασικό αξίωμα της ψυχοακουστικής είναι η φασματική επικάλυψη (spectral masking), κατά την οποία η παρουσία ενός ηχητικού σήματος επικαλύπτει την αίσθηση κάποιου άλλου. Τα σήματα που επικαλύπτονται είναι κυρίως μικρής ισχύος σε γειτονικές συχνότητες. Χρησιμοποιώντας την επεξεργασία ψηφιακού σήματος στο επίπεδο της συχνότητας, οι perceptual κωδικοποιητές εξαφανίζουν «άχρηστα» κομμάτια από το ηχητικό σήμα που επικαλύπτονται από άλλα, πιο δυνατά, έτσι μειώνονται οι απαιτήσεις για μεγάλο εύρος ζώνης. Ο κωδικοποιητής μπορεί να μειώσει ακόμη περισσότερο το μέγεθος του σήματος μειώνοντας επιλεκτικά ακόμη και τα μη επικαλυπτόμενα σήματα. Φυσικά όσο περισσότερο μειώνουμε την ανάλυση του ψηφιακού ηχητικού σήματος τόσο αυξάνονται ο θόρυβος και οι παραμορφώσεις. Αλλά όσο οι αλγόριθμοι κρατούν αυτές τις δυσμορφίες κάτω από το κατώφλι επικάλυψων παραμένουν ανεπαίσθητες.

Ο ρυθμός δεδομένων ενός ψηφιακού σήματος ήχου είναι το αποτέλεσμα της συχνότητας δειγματοληψίας πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό των bits που χρησιμοποιούνται για την παρουσίαση του σήματος επί τον αριθμό των καναλιών του ήχου. Για παράδειγμα ο ήχος του κλασσικού CD χρησιμοποιεί μια συχνότητα δειγματοληψίας 44.1kHz με 16-bit παρουσίαση και δύο κανάλια (stereo) το οποίο παράγει ένα ρυθμό δεδομένων 1.4Mbit/δευτερόλεπτο. Για να μειωθεί αυτό το γινόμενο τουλάχιστον ένας από τους παράγοντες θα πρέπει να μειωθεί.

Μειώνοντας τη συχνότητα δειγματοληψίας θα χάσουμε τις υψηλές συχνότητες του ήχου, έτσι σε αυτό τον τομέα δεν υπάρχουν πολλά που μπορούμε να κάνουμε χωρίς να επηρεαστεί η πιστότητα του σήματος. Τα δύο κανάλια μπορούν να γίνουν ένα χωρίς όμως αυτό να είναι πάντοτε επιθυμητό. Τέλος ο παράγοντας του αριθμού των bits παρουσίασης ο οποίος επηρεάζει τη δυναμική περιοχή (θόρυβος, παραμορφώσεις) μπορεί να αλλαχθεί. Έξυπνοι κωδικοποιητές που χρησιμοποιούν perceptual αλγόριθμους έχουν το μεγάλο μέρος του κέρδους τους σε bits από αυτή την περιοχή. Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι κωδικοποίησης και συμπίεσης ηχητικών σημάτων στο δίκτυο –χωρίς να είναι οι μοναδικοί– είναι σήμερα οι εξής : MPEG Audio layer 3 και Dolby AC-3. Το Mpeg πρότυπο χρησιμοποιείται κυρίως για διαδικτυακή χρήση και αναπαραγωγή μουσικής σε υπολογιστές και «έξυπνες» συσκευές (smartphones, tablets, media players). Το AC-3 πρότυπο χρησιμοποιείται κυρίως στον κινηματογράφο και ιδιαίτερα τις συσκευές οικιακού κινηματογράφου και τους αντίστοιχους οπτικούς δίσκους DVD και Blu-Ray.

Ας δούμε όμως συνοπτικά τα χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση, παρουσίαση και την ανταλλαγή δεδομένων ήχου και μουσικής.

### 6.5.3 Τα πρότυπα MPEG

Η ομάδα Moving Pictures Experts Group (MPEG) του ISO/IEC αναπτύσσει πρότυπα για video και ήχο από το 1988. Το πρότυπο που προέκυψε από την πρώτη φάση είναι το MPEG-1 ενώ η έρευνα συνεχίζεται στο MPEG-2. Για κάποιο χρονικό διάστημα υπήρχε σε εξέλιξη το MPEG-3 αλλά εγκαταλείφθηκε και ένα τμήμα του ενσωματώθηκε στο MPEG-2.

Κάθε ένα από αυτά στοχεύει σε εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας και εύρους ζώνης και εκτός από τεχνικές συμπίεσης κινούμενης εικόνας περιέχει και ένα κομμάτι που αναφέρεται στην συμπίεση του ήχου. Οι τεχνικές συμπίεσης ήχου δεν περιορίζονται στη φωνή αλλά είναι σχεδιασμένες για τη γενικότερη περίπτωση της μουσικής.

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε σε συντομία τα βασικά χαρακτηριστικά του ηχητικού κομματιού του MPEG-1. Με δυο λόγια θα μπορούσαμε να περιγράψουμε το MPEG-1 ως εξής: Το ηχητικό κομμάτι του MPEG-1 δεν αποτελεί έναν αλγόριθμο συμπίεσης, αλλά μια οικογένεια τριών διαφορετικών τεχνικών κωδικοποίησης και συμπίεσης ήχου. Αυτές οι οικογένειες ονομάζονται MPEG-Audio Layer-1, Layer-2, Layer-3.

Και οι τρεις αυτές τεχνικές στηρίζονται στην ίδια αρχή: η συμπίεση γίνεται συνδυάζοντας ένα είδος κωδικοποίησης μετασχηματισμού και sub-band division. Οι διαφορές αυτών των τριών στρωμάτων εντοπίζονται στο τελικό στάδιο της κβαντοποίησης.

Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται είναι:

- Χωρισμός του φάσματος σε 32 τμήματα (sub-bands)
- Εφαρμόζεται στο σήμα ένας ταχύς μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform)
- Ένα ψυχοακουστικό μοντέλο εφαρμόζεται στο μετασχηματισμένο σήμα για να υπολογιστεί το ελάχιστο επίπεδο θορύβου που γίνεται αντιληπτό από το μέσο ακροατή

Το MPEG-1 προβλέπει δύο ηχητικά κανάλια. Αυτά μπορούν να απλά (μονοφωνικά), διπλά (δύο μονοφωνικά κανάλια), απλά στερεοφωνικά (ένα κανάλι μεταφέρει το αριστερό ηχητικό σήμα και το άλλο το δεξί) ή από κοινού στερεοφωνικά (joint stereo, το ένα κανάλι μεταφέρει το άθροισμα και το άλλο τη διαφορά των σημάτων). Το πρότυπο χρησιμοποιεί 16bits για την κωδικοποίηση των δειγμάτων ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 44.1kHz, 48kHz ή 32kHz.

Οι επιδόσεις κάθε στρώματος είναι:

- MPEG-Audio Layer-1: επιτρέπει την κατασκευή πολύ απλών κωδικοποιητών και αποκωδικοποιητών θυσιάζοντας βέβαια ένα μέρος της ποιότητας. Ως αποτέλεσμα, η ηχητική ποιότητα είναι μέτρια ενώ το bandwidth που απαιτείται είναι αυξημένο: 192 ή 256Kbps ανά κανάλι.
- MPEG-Audio Layer-2: ο αλγόριθμος αυτή της κατηγορίας έχει βελτιστοποιηθεί για ένα εύρος ζώνης 96 ή 128Kbps ανά μονοφωνικό κανάλι. Η ποιότητα είναι εφάμιλλη του CD.
- MPEG-Audio Layer-3: έχει την καλύτερη επίδοση από τα τρία στρώματα. Η ποιότητα του είναι υποδεέστερη αλλά πολύ κοντά σε αυτή του CD. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι απαιτεί μόνο 64Kbps. Σε σύγκριση με MPEG-Audio Layer-2 στα 64Kbps λειτουργεί πολύ καλύτερα.

Να σημειωθεί ότι αυτά τα στρώματα έχουν προς τα πίσω συμβατότητα, δηλαδή μια συσκευή MPEG-Audio Layer-3 αποκωδικοποιεί και δεδομένα κωδικοποιημένα κατά MPEG-Audio Layer-1 ή 2.

### 6.5.4. Ψυχοακουστικά χαρακτηριστικά για τη συμπίεση ήχου

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι κωδικοποίησης με βάση την αντίληψη οι κυριότεροι από τους οποίους βασίζονται στο πρότυπο MPEG (Moving Picture Expert Groups). Είναι αλγόριθμοι συμπίεσης με απώλειες και βασίζονται στη λογική της μη μετάδοσης του τμήματος εκείνου ενός ηχητικού (ή οπτικού) σήματος το οποίο δεν μπορεί να γίνει αντιληπτό από τα ανθρώπινα αισθητήρια όργανα

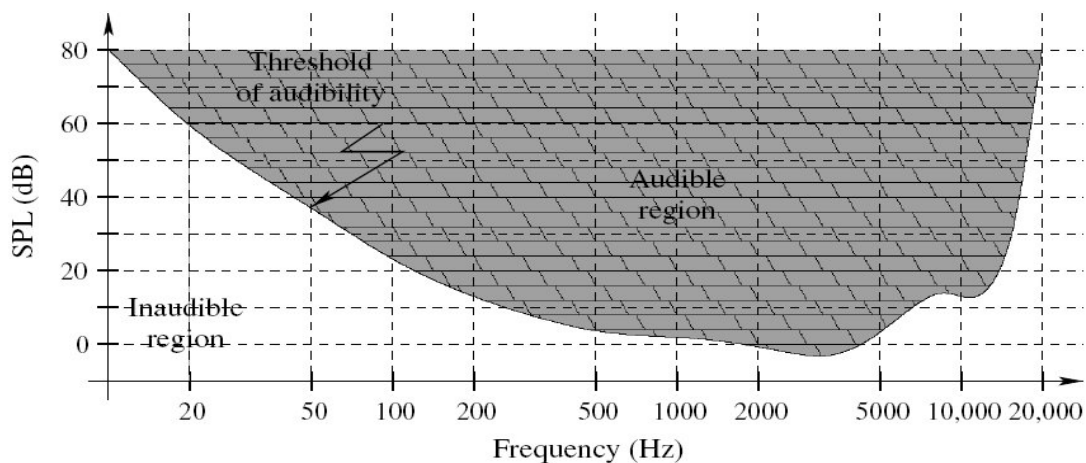
Για την συμπίεση ήχου λαμβάνονται τα εξής βασικά χαρακτηριστικά του ακουστικού συστήματος του ανθρώπου:

- 1)Ακουστική ικανότητα σε σχέση με τη συχνότητα (threshold of hearing)
- 2)Διακριτική ικανότητα αυτιού σε σχέση με τη συχνότητα (critical bands)
- 3)Φασματική κάλυψη (spectral masking) και
- 4)Χρονική κάλυψη (temporal masking)

Ας δούμε αναλυτικά αυτά τα χαρακτηριστικά:

#### 1)Ακουστική ικανότητα σε σχέση με τη συχνότητα (threshold of hearing):

Το διάγραμμα του κάτωθι σχήματος δίνει την ακουστική ικανότητα των ανθρώπων σε σχέση με τη συχνότητα. Μεγαλύτερη ευαισθησία (ακουστική ικανότητα) παρουσιάζεται στις συχνότητες 2-4kHz. Συχνότητες με ισχύ μικρότερη από τη από τη ελάχιστη ακουστή μπορούν να απαλειφθούν κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης χωρίς να υπάρξει αντιληπτή διαφορά στην ποιότητα. Για παράδειγμα μια συχνότητα 15kHz με ισχύ μικρότερη από 40 db δεν είναι ακουστή.



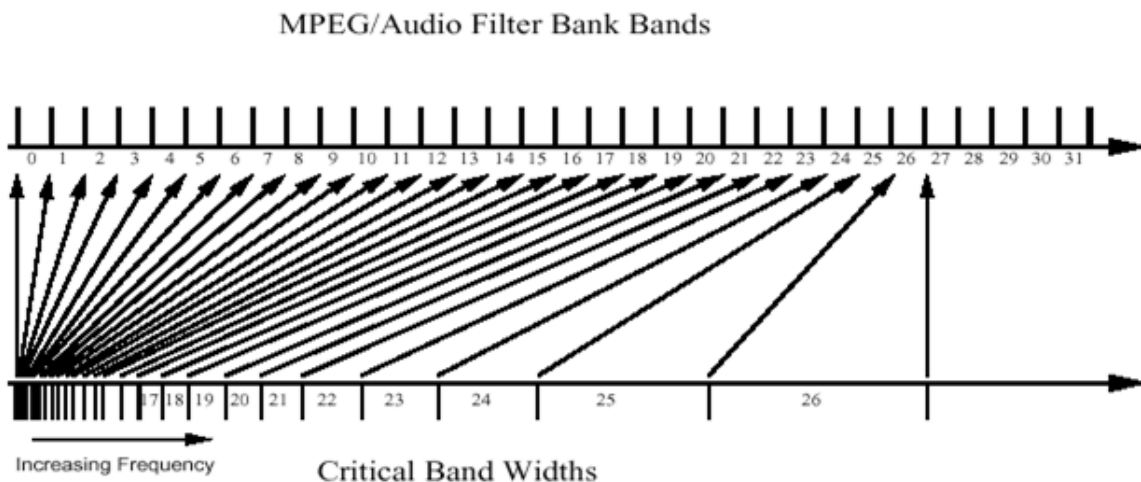
Σχήμα 6.29

#### 2) Διακριτική ικανότητα αυτιού σε σχέση με τη συχνότητα (Critical Bands):

Το ανθρώπινο αυτί έχει περιορισμένη διακριτική ικανότητα. Μέσα σε μια περιορισμένη κριτική περιοχή εύρους ζώνης συγγέει (δεν μπορεί να διαχωρίσει) τις συχνότητες που ακούει. Η διακριτική ικανότητα του αυτιού μπορεί να προσομοιωθεί με το άθροισμα μιας σειράς ζωνοπερατών φίλτρων με εύρος ζώνης περίπου 100 Hz για συχνότητες μικρότερες των 500 Hz. Το εύρος ζώνης για συχνότητες  $f > 500$  Hz, καθορίζεται σύμφωνα με τη σχέση  $bw = 25 + 75 \cdot \{1 + 1.4 \cdot (f/1000)^2\}^{0.69}$ .

Κάθε περιοχή που αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης ενός ζωνοπερατού φίλτρου ονομάζεται κρίσιμη περιοχή συχνοτήτων (critical band). Η διακριτική ικανότητα του αυτιού, σε σχέση με τις συχνότητες,

εντός της κρίσιμης περιοχής συχνοτήτων είναι σχετικά περιορισμένη ενώ αντίθετα το αυτί μπορεί πολύ εύκολα να διακρίνει συχνότητες που ευρίσκονται σε διαφορετικά critical bands. Για παράδειγμα, μπορεί να διακρίνει τις συχνότητες 370 Hz και 430 Hz ανεξάρτητα την ισχύ που έχει καθεμία από αυτές (εφόσον φυσικά η ένταση τους ξεπερνά την ελάχιστη ακουστή τιμή) γιατί υπάγονται σε διαφορετικά critical bands (band # 4, band # 5) ενώ δεν μπορεί να διακρίνει τις συχνότητες 650 Hz και 740 Hz γιατί υπάγονται στο ίδιο critical band (band # 7). Το φαινόμενο της φασματικής κάλυψης επομένως είναι ισχυρότερο εντός ενός critical band. Η διακριτική ικανότητα του αυτιού σε σχέση με τις συχνότητες οδήγησε στη χρήση φίλτρων ανάλυσης σε ζώνες (subband filters) στο πλαίσιο της κωδικοποίησης με βάση την αντίληψη. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις 32 ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για την MPEG layer I και II κωδικοποίηση και την αντιστοιχία τους με τις critical bands:



Σχήμα 6.30

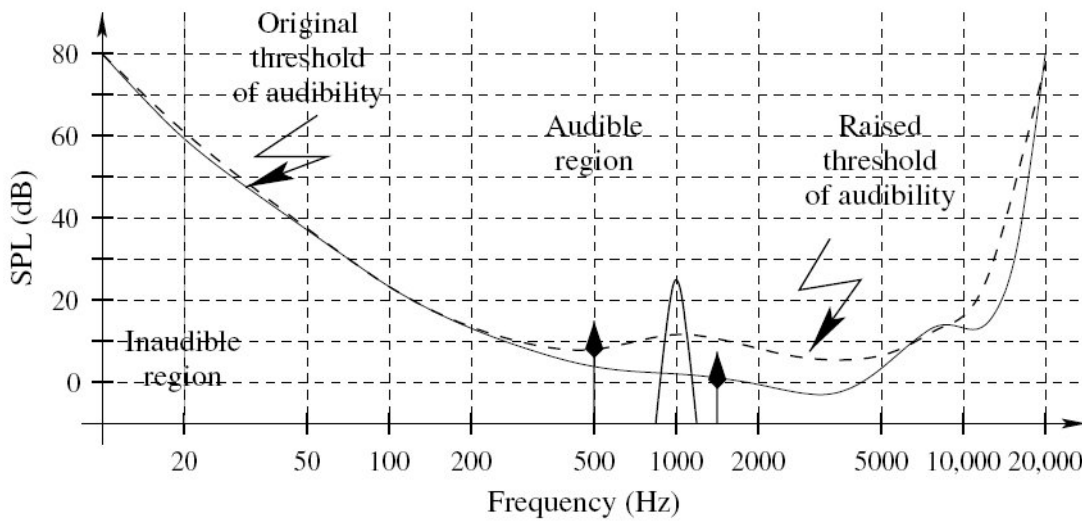
### 3)Φασματική κάλυψη (spectral masking):

Τα σχήματα συμπίεσης με απώλειες απαιτούν τη χρήση κβαντοποίησης. Όπως είδαμε, η κβαντοποίηση μπορεί να μοντελοποιηθεί ως διαδικασία προσθήκης θορύβου κατά την οποία η έξοδος του κβαντιστή είναι η είσοδος συν το θόρυβο κβαντισμού. Για να αποκρύψουμε το θόρυβο κβαντισμού, μπορούμε να κάνουμε χρήση του γεγονότος ότι τα σήματα κάτω από ένα συγκεκριμένο πλάτος και σε μια συγκεκριμένη συχνότητα δεν είναι αντιληπτά. Αν επιλέξουμε το μέγεθος του βήματος κβαντισμού έτσι ώστε ο θόρυβος κβαντισμού να βρίσκεται κάτω από το όριο ακουστότητας, ο θόρυβος δεν θα γίνει αντιληπτός.

Επιπλέον, το όριο ακουστότητας δεν είναι απόλυτα σταθερό και συνήθως αυξάνεται όταν πολλαπλοί ήχοι προσκρούουν στο ανθρώπινο αυτί. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε φασματική επικάλυψη (spectral masking). Ένας τόνος σε μια ορισμένη συχνότητα μπορεί να αυξήσει το όριο ακουστότητας μιας κρίσιμης ζώνης γύρω από αυτή τη συχνότητα. Αυτές οι κρίσιμες ζώνες έχουν μια σταθερή τιμή  $Q$ , η οποία είναι ο λόγος της συχνότητας προς το εύρος της ζώνης. Έτσι, σε χαμηλές συχνότητες η κρίσιμη ζώνη μπορεί να έχει ένα χαμηλό εύρος ζώνης περί τα 100 Hz, ενώ σε υψηλότερες συχνότητες το εύρος ζώνης μπορεί να είναι μεγάλο, περί 4 kHz. Αυτή η αύξηση του ορίου έχει σημαντικές επιπτώσεις για τη συμπίεση.

Ας δούμε ένα παράδειγμα που φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Στο παράδειγμα, ένας τόνος στο 1 kHz έχει αυξήσει το όριο ακουστότητας έτσι ώστε οι παρακείμενοι σε αυτό τόνοι μεγαλύτερης συχνότητας δεν είναι πλέον έντονα αντιληπτοί. Ταυτόχρονα, ενώ ο τόνος στα 500 Hz είναι έντονα αντιληπτός, λόγω της αύξησης στο κατώφλι ο τόνος αυτός μπορεί να κβαντιστεί με χαμηλότερη ανάλυση χωρίς πρόβλημα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση του ορίου ακουστότητας θα μας επιτρέψει να εισαγάγουμε περισσότερο θόρυβο κβαντισμού σε αυτή τη συχνότητα χωρίς να γίνει αντιληπτός. Ο βαθμός στον οποίο το όριο ακουστότητας αυξάνεται εξαρτάται από μια ποικιλία παραγόντων,

συμπεριλαμβανομένου του κατά πόσον το σήμα είναι ημιτονοειδές ή ατονικό.

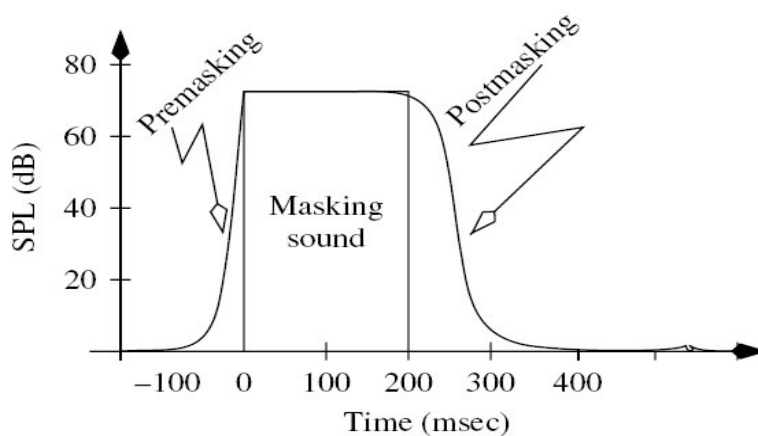


Σχήμα 6.31

4)Χρονική κάλυψη (temporal masking):

Μαζί με φασματική συγκάλυψη, οι ψυχοακουστικοί κωδικοποιητές επίσης να κάνουν χρήση του φαινομένου της χρονικής κάλυψης. Το διαχρονικό αποτέλεσμα συγκάλυψης είναι η συγκάλυψη που συμβαίνει όταν ένας ήχος αυξάνει το όριο ακουσιτότητα για ένα σύντομο χρονικό διάστημα πριν και μετά από τον ήχο.

Στο επόμενο σχήμα δείχνουμε το όριο ακουσιτότητας κοντά σε έναν ήχο συγκάλυψης. Ήχοι που εμφανίζονται σε ένα διάστημα γύρω από τον ήχο συγκάλυψης (τόσο πριν όσο και μετά τον τόνο κάλυψης) μπορούν να καλυφθούν.



Σχήμα 6.32

Αν ο καλυμμένος ήχος παραχθεί πριν από τον τόνο μάσκας, αυτό ονομάζεται «προ-επικάλυψη (preamasking)» ή «προς τα πίσω επικάλυψη». Αν ο καλυμμένος ήχος παραχθεί μετά τον τόνο συγκάλυψης αυτό το φαινόμενο ονομάζεται «postmasking» ή «προς τα εμπρός επικάλυψη». Η προς τα εμπρός μάσκα επικάλυψης παραμένει σε ισχύ για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ό, τι η προς τα πίσω επικάλυψη.

### 6.5.5 Αρχή λειτουργίας των αλγορίθμων MPEG

Οι ιδιότητες του αυτιού που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιούνται από όλους τους αλγόριθμους που λειτουργούν με βάση ένα ψυχοακουστικό μοντέλο. Υπάρχουν δύο μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην MPEG κωδικοποίηση ήχου. Αν και διαφέρουν σε ορισμένες λεπτομέρειες, η γενική προσέγγιση που χρησιμοποιείται και στις δύο περιπτώσεις είναι η ίδια.

Το πρώτο βήμα στο ψυχοακουστικό μοντέλο είναι να ληφθεί ένα φασματικό προφίλ του σήματος που κωδικοποιείται. Το ηχητικό σήμα εισόδου μετασχηματίζεται στο πεδίο των συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας μια τράπεζα φίλτρων ή ένα μετασχηματισμό στο πεδίο της συχνότητας. Η στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL) υπολογίζεται για κάθε φασματική ζώνη. Εάν ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια προσέγγιση υποζώνης (sub-band), τότε η SPL για τη ζώνη αυτή υπολογίζεται από τη στάθμη SPL για κάθε  $X_k$  συντελεστή.

Επειδή τα τονικά και ατονικά συστατικά του ήχου έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στο επίπεδο επικάλυψης (masking), το επόμενο βήμα είναι να προσδιοριστεί η παρουσία και η θέση αυτών των συστατικών. Η παρουσία όλων των τονικών συστατικών καθορίζεται πρώτα αναζητώντας για τοπικά μέγιστα. Ένα τοπικό μέγιστο δηλώνεται στη θέση  $k$  αν:

$|X_k|^2 > |X_{k-1}|^2$  και  $|X_k|^2 \geq |X_{k+1}|^2$ . Ένα τοπικό μέγιστο προσδιορίζεται ως ένα τονικό συστατικό εάν ισχύει ότι:

$$20 \log_{10} \frac{|X_k|}{|X_{k+j}|} \geq 7$$

, όπου οι τιμές  $J$  εξαρτώνται από τη συχνότητα.

Οι προσδιοριζόμενοι τόνοι επικάλυψης αφαιρούνται από κάθε κρίσιμη ζώνη και η ισχύς των λοιπών φασματικών γραμμών στη ζώνη αθροίζονται για να ληφθεί το ατονικό επίπεδο κάλυψης. Μόλις προσδιοριστούν όλες τα στοιχεία επικάλυψης, εκείνα με στάθμη SPL κάτω από το όριο ακουστότητας, αφαιρούνται. Επιπλέον, από τις συνιστώσες επικάλυψης που είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη σε συχνότητα, οι κατώτερου πλάτους αφαιρούνται. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων συνιστωσών λαμβάνονται χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση εξάπλωσης βασισμένη στα μοντέλα φασματικής συγκάλυψης (spectral masking).

Τέλος, η συγκάλυψη λόγω του επιπέδου ακουστότητας και η φασματική επικάλυψη συνδυάζονται για να δώσουν τις τελικές τιμές των κατωφλίων επικάλυψης. Τα όρια αυτά στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της MPEG κωδικοποίησης.

Στις ακόλουθες ενότητες περιγράψουμε τους διάφορους τύπου αλγορίθμων κωδικοποίησης ήχου που χρησιμοποιείται στα πρότυπα MPEG. Παρά το γεγονός ότι αυτοί οι αλγόριθμοι παρέχουν ήχο που είναι αντιληπτικά αθόρυβος, είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι ακόμα και αν δεν μπορούμε να το αντιληφθούμε, υπάρχει θόρυβος κβαντισμού που στρεβλώνει το αρχικό σήμα. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα σημαντικό αν το αναδομημένο σήμα ήχου περνά από οποιασδήποτε μετέπειτα επεξεργασία. Η μετέπειτα επεξεργασία μπορεί να αλλάξει κάποια από τα συστατικά του ήχου, καθιστώντας τον προηγουμένως αφανή θόρυβο κβαντισμού, εμφανή. Ως εκ τούτου, εάν υπάρχει οποιοδήποτε είδος επεξεργασίας που πρέπει να γίνει, συμπεριλαμβανομένης της μείξης ή ισοστάθμισης συχνοτήτων, ο ήχος θα πρέπει να συμπίεστεί κατά MPEG μόνο αφού η επεξεργασία έχει πραγματοποιηθεί. Επίσης, αυτό το πρόβλημα του κρυφού θορύβου δεν επιτρέπει χρήση πολλαπλών σταδίων κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης ή διαδοχική κωδικοποίησης.

### 6.5.6 Τα MPEG Audio layers, I και II.

Αυτά είναι τα βήματα κωδικοποίησης στο MPEG-1, layer I & II:

1-Λαμβάνονται αρχικά 36 δείγματα/ζώνη επί 32 ζώνες συχνοτήτων = 1152 δείγματα συνολικά (sam-

ples). Με δειγματοληψία 48000 samples /sec αυτό αντιστοιχεί σε διάρκεια 24 ms.

2-Κατόπιν γίνεται ανάλυση κάθε ομάδας 1152 δειγμάτων σε 32 ζώνες συχνοτήτων. Για δειγματοληψία στα 48 kHz, κάθε ζώνη έχει εύρος 750 Hz.

3-Γίνεται υπολογισμός του μέγιστου συντελεστή «scalefactor» σε κάθε ζώνη συχνοτήτων (που είναι μία ομάδα από 36 samples).

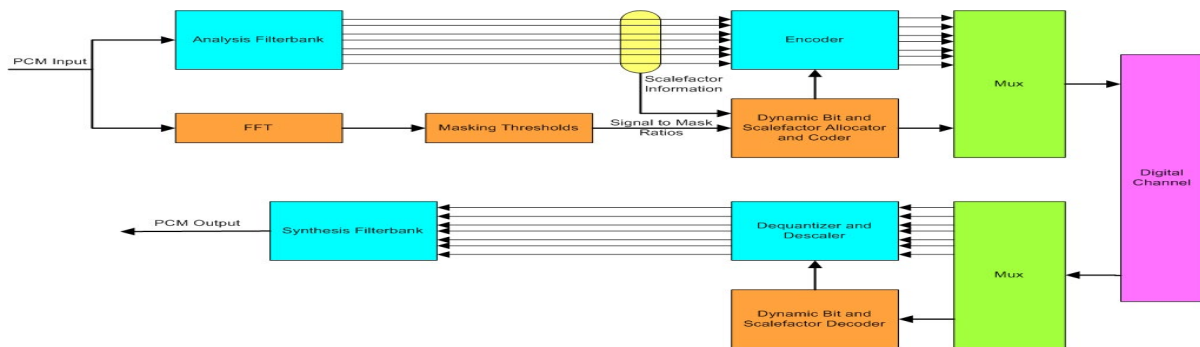
4-Πραγματοποιείται υπολογισμός της κάλυψης, φασματικής και χρονικής, για κάθε ζώνη συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας το σύνολο των  $36 \times 32 = 1152$  δειγμάτων και ταχύ μετασχηματισμού Φουριέ FFT (fast Fourier transform).

5-Αν η ισχύς σε κάποια ζώνη συχνοτήτων είναι μικρότερη από το κατώφλι κάλυψης τότε αυτή η ζώνη συχνοτήτων δεν κωδικοποιείται. Λαμβάνει επομένως 0 bits.

6-Σε διαφορετική περίπτωση, υπολογίζουμε τον αριθμό των bits που απαιτούνται για την κωδικοποίηση της έντασης του σήματος που υπερβαίνει το κατώφλι κάλυψης. Κάθε bit προσθέτει 6.02 db σηματοθορυβικού λόγου.

7-Τέλος, γίνεται μορφοποίηση του πλαισίου (frame) MPEG και μετάδοσή του. Ο λόγος που σχηματίζεται frame είναι πως το πρότυπο MPEG είχε αρχικά σχεδιαστεί για διαδικτυακή χρήση και μετάδοση.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μία συνοπτική παρουσίαση των σταδίων που χρησιμοποιούν οι κωδικοποιητές MPEG Layer I και II:



Σχήμα 6.33

Ας δούμε τώρα αναλυτικότερα τα στάδια κωδικοποίησης ενός σήματος κατά MPEG με παραδείγματα και κατάλληλες γραφικές παραστάσεις:

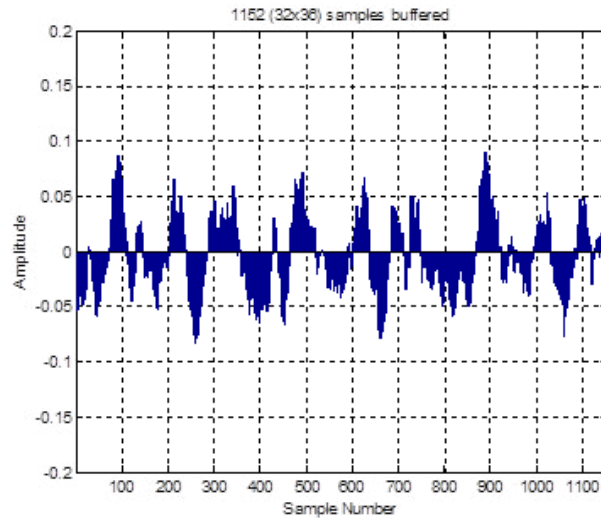
Επιμερισμός bits (bit allocation):

Αρχικά το σήμα εισόδου διαχωρίζεται σε ομάδες 1152 δειγμάτων. Κάθε ομάδα 1152 αναλύεται σε 32 ζώνες συχνοτήτων. Υπολογίζεται η ακουστική ικανότητα σε κάθε μια από τις 32 ζώνες συχνοτήτων. Κατόπιν υπολογίζεται η φασματική κάλυψη εξαιτίας ισχυρών συχνοτήτων με τη βοήθεια του μετασχηματισμού FFT. Επιλέγονται οι ζώνες συχνοτήτων που θα είναι ακουστές μετά από το συνδυασμό ακουστικής ικανότητας και φασματικής κάλυψης. Τέλος, υπολογίζεται ο αριθμός των bits με τον οποίο θα κωδικοποιηθούν τα δείγματα εντός κάθε ζώνης συχνοτήτων.

Δείγματα σήματος εισόδου:

Το διάγραμμα του σχήματος δίνει τις τιμές των πρώτων 1152 δειγμάτων ενός σήματος μουσικής:





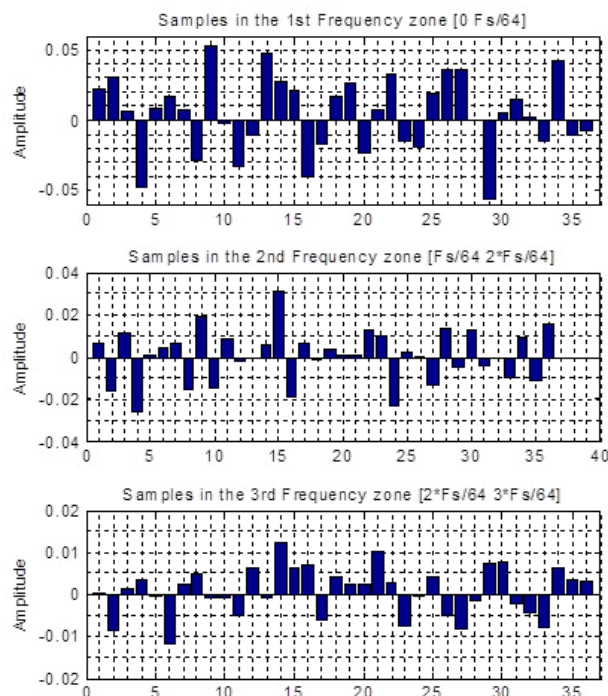
Σχήμα 6.34

Τα δείγματα αυτά θα πρέπει να κωδικοποιηθούν με κάποια bits το καθένα. Στο τμήμα του σήματος που αντιπροσωπεύεται από τα δείγματα του σχήματος υπάρχουν συχνότητες που δεν είναι ακουστές (ακουστική ικανότητα) και συχνότητες που είναι ισχυρές και καλύπτουν γειτονικές τους (φασματική κάλυψη).

Τα δύο αυτά φαινόμενα λειτουργούν αθροιστικά. Για παράδειγμα η ακουστική ικανότητα στη συχνότητα 8kHz απαιτεί ένταση τουλάχιστον 20 db για να είναι ακουστή. Αν εξαιτίας της παρουσίας μιας ισχυρής συχνότητας στα 6kHz έχουμε φασματική κάλυψη ύψους 15 db στη συχνότητα 8kHz τότε συνολικά η συχνότητα 8kHz θα είναι ακουστή αν έχει ένταση μεγαλύτερη από 35 db.

#### Διαχωρισμός δειγμάτων σε 32 ζώνες συχνοτήτων:

Το διάγραμμα του σχήματος δίνει τις τιμές δειγμάτων που αντιστοιχούν στις 3 πρώτες ζώνες συχνοτήτων:



Σχήμα 6.35

Κάθε ζώνη συχνοτήτων καλύπτει ένα διάστημα  $F_s/64$  ( $F_s$  = Sampling frequency). Το δείγμα με την ισχυρότερη ένταση σε κάθε ζώνη αποτελεί τον παράγοντα κλίμακας ή «scaling factor» της ζώνης αυτής. Στο παράδειγμα του σχήματος έχουμε:

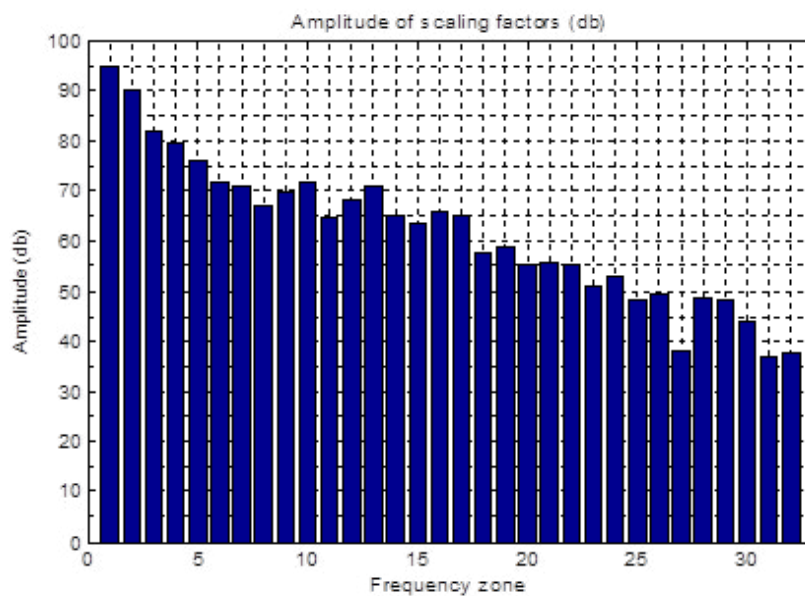
Ζώνη 1 => scaling factor το δείγμα 29

Ζώνη 2 => scaling factor το δείγμα 15

Ζώνη 3 => scaling factor το δείγμα 14

Ένταση των scaling factors (σε db):

Το διάγραμμα του σχήματος δίνει τις 'τιμές' των scaling factors σε db:

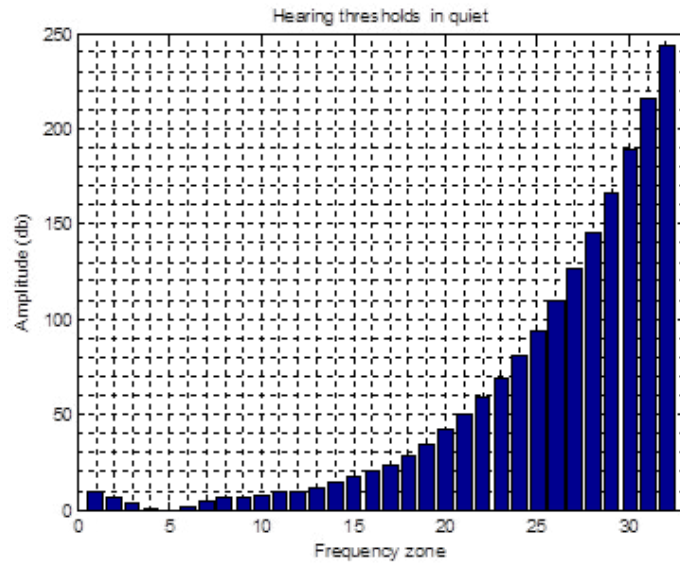


Σχήμα 6.36

Οι τιμές αυτές θα συγκριθούν με τα επίπεδα ακουστικής ικανότητας και φασματικής κάλυψης. Για όσες ζώνες τα scaling factors έχουν ένταση μεγαλύτερη από το άθροισμα των ανωτέρω επιπέδων τα δείγματα στις ζώνες αυτές θα μεταδοθούν ενώ στις υπόλοιπες θα αγνοηθούν.

Ακουστική ικανότητα ανά ζώνη συχνοτήτων:

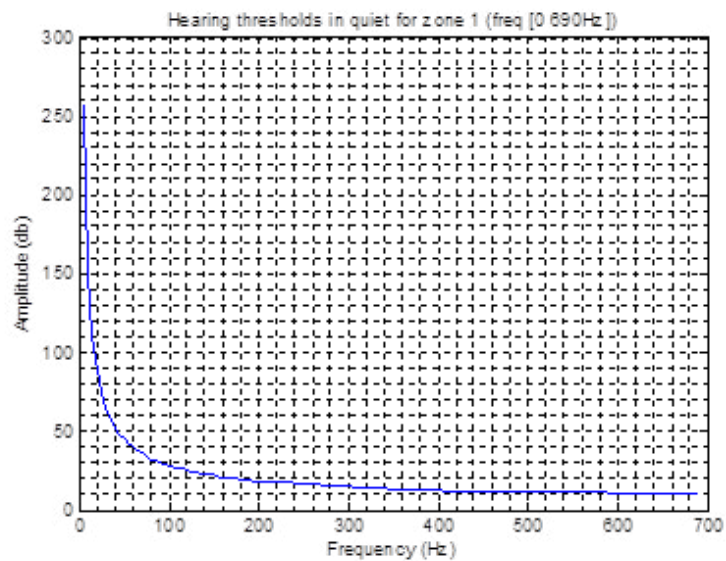
Το διάγραμμα του σχήματος δίνει την ακουστική ικανότητα ανά ζώνη συχνοτήτων:



Σχήμα 6.37

Τα επίπεδα ακουστικής ικανότητας λαμβάνονται ως οι ελάχιστες τιμές σε κάθε ζώνη.

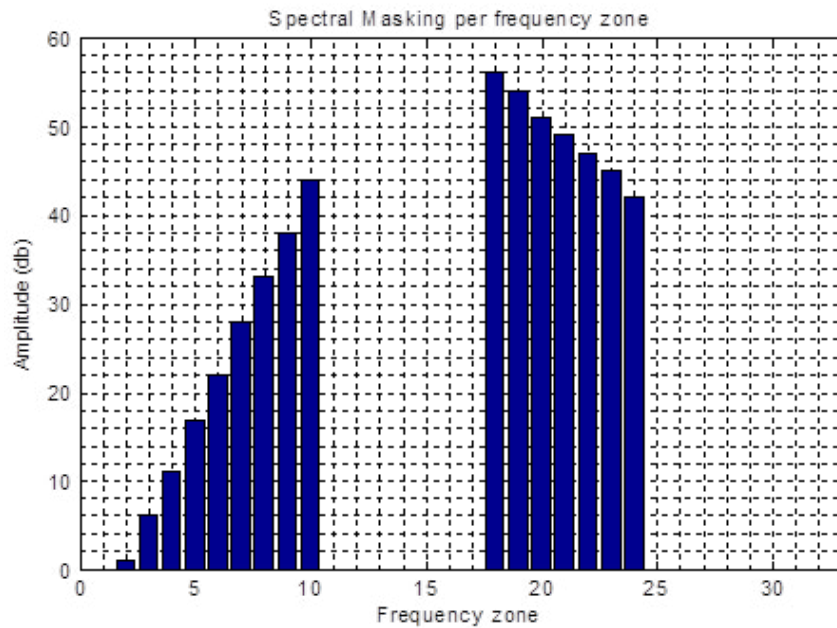
Για παράδειγμα η ακουστική ικανότητα στη ζώνη 1 (συχνότητες 0-690 Hz) είναι καλύτερη στη συχνότητα 690 Hz. Επομένως το επίπεδο ακουστότητας λαμβάνεται σε αυτή την τιμή:



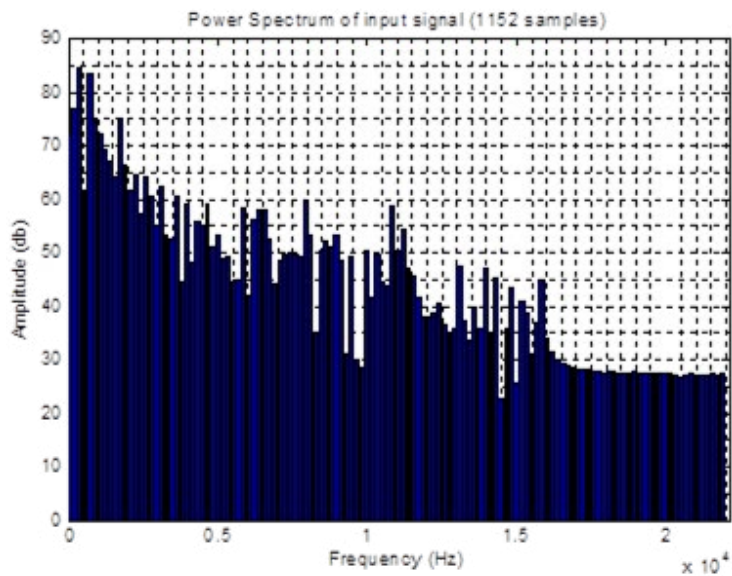
Σχήμα 6.38

#### Υπολογισμός Φασματικής Κάλυψης:

Το διάγραμμα του σχήματος δίνει την φασματική κάλυψη ανά ζώνη συχνοτήτων με βάση τα 1152 δείγματα. Ο υπολογισμός της φασματικής κάλυψης έγινε με τη βοήθεια του μετασχηματισμού FFT 1024 σημείων. Φασματική κάλυψη δίνουν μόνο οι συχνότητες με ένταση πάνω από 60 db.



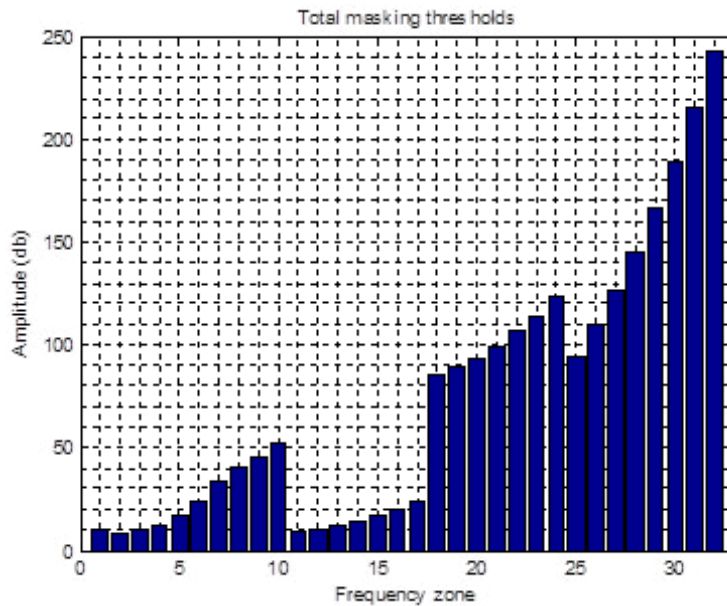
Σχήμα 6.39



Σχήμα 6.40

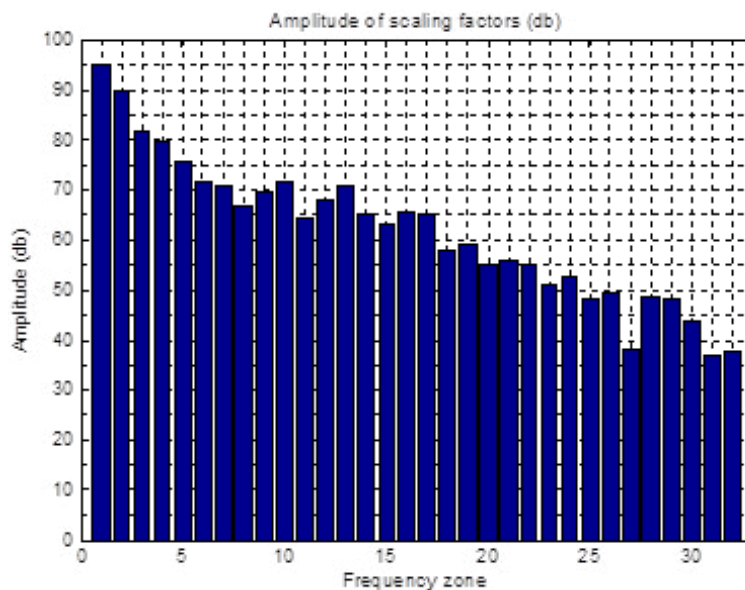
Συνολική κάλυψη:

Το διάγραμμα του σχήματος δίνει το συνολικό κατώφλι ακουστότητας (ακουστική ικανότητα και φασματική κάλυψη) ανά ζώνη συχνοτήτων με βάση τα 1152 δείγματα:



Σχήμα 6.41

Οι ζώνες συχνοτήτων των οποίων η ένταση των scaling factors υπερβαίνει το συνολικό κατώφλι ακουστότητας θα κωδικοποιηθούν ενώ τα δείγματα στις υπόλοιπες θα αγνοηθούν:

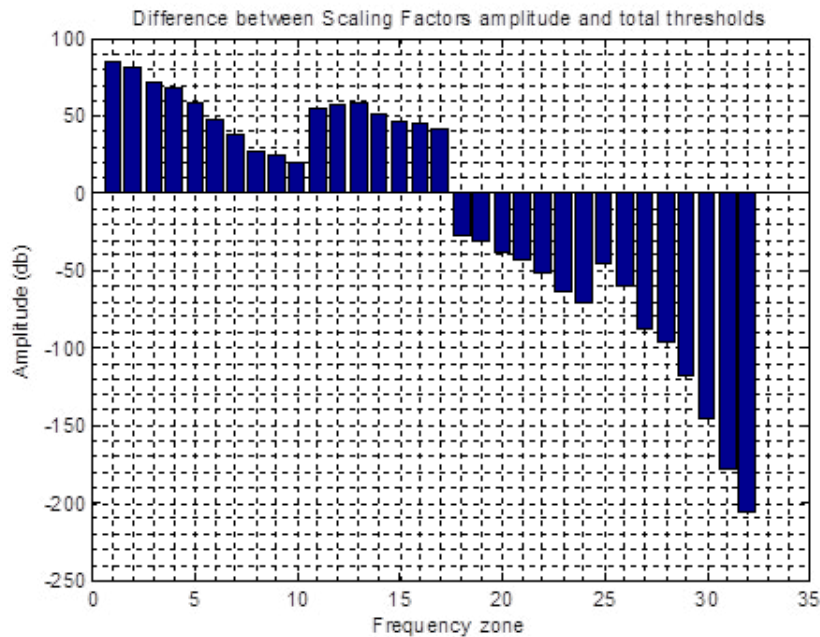


Σχήμα 6.42

Ζώνες που κωδικοποιούνται:

Οι ζώνες συχνοτήτων των οποίων η ένταση των scaling factors υπερβαίνει το συνολικό κατώφλι ακουστότητας θα κωδικοποιηθούν ενώ τα δείγματα στις υπόλοιπες θα αγνοηθούν.

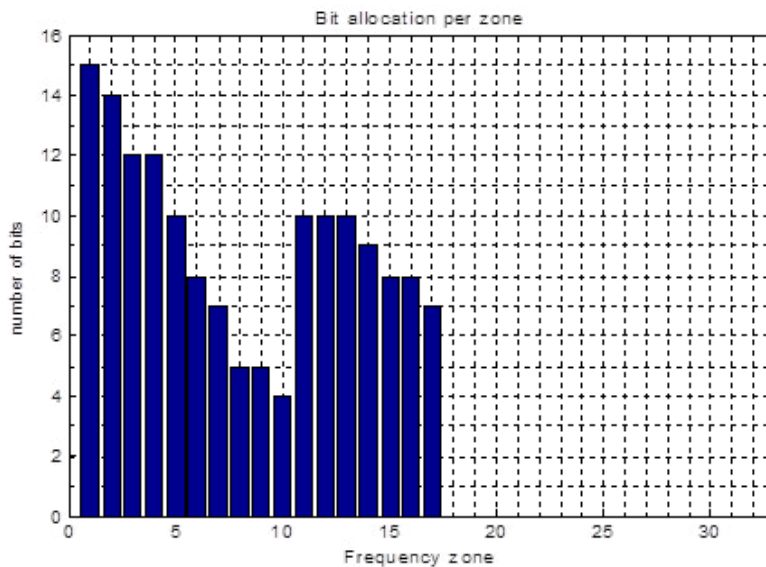
Από το κάτωθι σχήμα φαίνεται ότι θα κωδικοποιηθούν τα δείγματα στις ζώνες συχνοτήτων 1-17. Τα bits που θα διατεθούν για την κωδικοποίηση των δειγμάτων σε κάθε ζώνη υπολογίζονται διαιρώντας τις θετικές τιμές του διαγράμματος με το 6 και στρογγυλοποιώντας προς την μεγαλύτερη ακέραια τιμή.



Σχήμα 6.43

Επιμερισμός bit ανά ζώνη συχνοτήτων:

Στο σχήμα δίνεται ο αριθμός των bits με τα οποία θα κωδικοποιηθούν τα δείγματα σε κάθε ζώνη συχνοτήτων :



Σχήμα 6.44

Τα δείγματα σε 15 ζώνες δεν μεταδίδονται. Με περισσότερα bits κωδικοποιούνται τα δείγματα στη ζώνη 1 (15 bits) και με λιγότερα τα δείγματα στη ζώνη 10 (4 bits). Συνολικά για την κωδικοποίηση όλων των δειγμάτων χρειάζονται:  $36 \cdot (15+14+12+12+\dots+7) = 5544$  bits

Το MPEG-1 πλαίσιο μετάδοσης ήχου (Audio frame):

Για κάθε 1152 δείγματα σχηματίζεται ένα πλαίσιο από bits που περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

-Επικεφαλίδα (header)

-CRC (Cyclic Redundancy Code) 0-16 bits, προαιρετικό για έλεγχο σφαλμάτων

-Επιμερισμός bits (Bit Allocation): Δηλώνει τον αριθμό των bits που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση των δειγμάτων σε κάθε μία από τις 32 ζώνες. Κάθε δείγμα μπορεί να κωδικοποιηθεί σε 0-15 bits άρα χρειάζονται 4 bits για να μας δώσουν αυτή την πληροφορία

-Scale factors: Για τις ζώνες συχνοτήτων που δεν έχουν μηδενικό bit allocation η μέγιστη τιμή κάθε μιας από τις 32 ζωνες (στο σύνολο των 36 δειγμάτων) κωδικοποιείται με 6 bits.

-Δείγματα (Samples): κωδικοποίηση των 1152 (36 x 32) δειγμάτων με βάση των αριθμό των bits που υποδηλώνονται στο πεδίο bit allocation.

-Συμπληρωματικά δεδομένα (Ancillary data): προαιρετικά

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η μορφή ενός MPEG πλαισίου ήχου:

Header (32)	CRC (0,16)	Bit allocation (128-256)	Scale factors (0-384)	Samples	Ancillary data
----------------	---------------	--------------------------------	--------------------------	---------	-------------------

Σχήμα 6.45

Η επικεφαλίδα (Header) αποτελείται από 32 bits και τα εξής πεδία:

-Κώδικας συγχρονισμού 16 bits (SYNC = 1111111111111111)

-Πληροφορίες καναλιού 2 bits (SI = Stereo Information)

Monophonic => Code 00

Dual Monophonic => Code 01

Stereo => Code 10

Joint Stereo => Code 11

Η στερεοφωνική λειτουργία (stereo) αποτελείται από δύο κανάλια που κωδικοποιούνται χωριστά, αλλά προορισμένα να αναπαραχθούν μαζί. Η κοινή στερεοφωνική λειτουργία (joint stereo) αποτελείται από δύο κανάλια που κωδικοποιούνται μαζί. Τα αριστερά και δεξιά κανάλια συνδυάζονται για να σχηματίσουν μία ενδιάμεση και ένα σήμα πλευρά ως εξής:

$$M = \frac{L+R}{2}$$

$$S = \frac{L-R}{2}$$

Η λειτουργία διπλού (dual) μονοφωνικού καναλιού αποτελείται από δύο κανάλια που κωδικοποιούνται ξεχωριστά και δεν προορίζονται να αναπαραχθούν μαζί. Αυτές ακολουθούνται από δύο ψηφία επέκτασης λειτουργίας που χρησιμοποιούνται στο joint stereo.

-Το επόμενο ψηφίο είναι για τη δήλωση πνευματικών δικαιωμάτων: <1> αν το υλικό είναι προστατευμένο από πνευματικά δικαιώματα και <0> αν δεν είναι. Το επόμενο bit είναι ρυθμισμένο

στο <1> για αυθεντικό αρχείο και <0> αν είναι ένα αντίγραφο.

-Πληροφορίες *Bit Rate* 4 bit (BR = Bit Rate). Υπάρχουν 14 συγκεκριμένες επιλογές τιμών για το bitrate.

32 kbps => Code 0001

48 kbps => Code 0010

... kbps => Code .....

448 kbps => Code 1110

-Συχνότητα δειγματοληψίας 2 bits (SR = Sampling Rate)

32 kHz => Code 00

44.1 kHz => Code 01

48 kHz => Code 10

other => Code 11 (η συχνότητα ορίζεται στα επόμενα 8 bits)

Οι συχνότητες δειγματοληψίας για MPEG-1 και MPEG-2 είναι διαφορετικές. Είναι μία από τις λίγες διαφορές μεταξύ της κωδικοποίησης ήχου σύμφωνα με τα πρότυπα MPEG-1 και MPEG-2 και παρουσιάζονται στον κάτωθι Πίνακα:

Index	MPEG-1	MPEG-2
00	44.1 kHz	22.05 kHz
01	48 kHz	24 kHz
10	32 kHz	16 kHz
11	Reserved	

Πίνακας 6.4

-Τα δύο τελευταία ψηφία δείχνουν τον τύπο από-έμφασης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Για το υπόλοιπο frame, εάν οριστεί στην τιμή «1» το bit CRC, η επικεφαλίδα ακολουθείται από έναν κώδικα αντιμετώπισης λάθους CRC των 16-bit. Αυτό ακολουθείται από τις κατανομές δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται από κάθε υποζώνη (sub-band) και με τη σειρά του ακολουθείται από το σύνολο των scalefactors μεγέθους 6-bit. Τα δεδομένα των scalefactors ακολουθούνται από τα κβαντισμένα 384 δείγματα.

#### Υπολογισμός βαθμού συμπίεσης:

Στο παράδειγμα μας έχουμε  $36 \times 32 = 1152$  δείγματα. Σε ασυμπίεστη μορφή απαιτούνται 2304 bytes (16 bits / δείγμα) .Με βάση τον αλγόριθμο που περιγράψαμε έχουμε:

32 bits επικεφαλίδα

128 bits για καθορισμό του bit allocation

$17 \times 6 = 102$  bits για κωδικοποίηση των 17 scaling factors που αντιστοιχούν στις ζώνες συχνοτήτων οι οποίες είναι ακουστές



$154 \times 36 = 5544$  bits για κωδικοποίηση των δειγμάτων (17 μη μηδενικές ομάδες δειγμάτων με αριθμό bits όπως υπολογίστηκε νωρίτερα)

Άρα το σύνολο είναι: 5806 bits ή 726 bytes

Έχουμε επομένως πετύχει συμπίεση περίπου 3.17 : 1

(Πηγή: <https://eclass.uop.gr/modules/document/file.php/TST225/ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ/lesson4.pdf>)

### 6.5.7 Διαφορές των MPEG-1, Layer I και Layer II

Οι βασικές διαφορές του MPEG-1, Layer I σε σχέση με το MPEG-1, Layer II είναι οι εξής. Ο κωδικοποιητής Layer II παρέχει ένα υψηλότερο ποσοστό συμπίεσης με ορισμένες ελαφρές τροποποιήσεις στο σύστημα κωδικοποίησης του Layer I. Αυτές οι τροποποιήσεις περιλαμβάνουν το πώς τα δείγματα ομαδοποιούνται, την αναπαράσταση των scalefactors, και τη στρατηγική κβαντισμού.

Ενώ στο layer I ο κωδικοποιητής βάζει 12 δείγματα από κάθε υποζώνη σε ένα πλαίσιο, ο Layer II κωδικοποιητής ομαδοποιεί τρία σετ των 12 δειγμάτων από κάθε υποζώνη σε ένα πλαίσιο. Ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων ανά πλαίσιο αυξάνεται από 384 δείγματα 1152 δείγματα. Αυτό μειώνει την ποσότητα των bit επικεφαλίδων (overhead) ανά δείγμα.

Στο layer I, ένα ξεχωριστό scalefactor επιλέγεται για κάθε μπλοκ των 12 δειγμάτων. Στο layer II, ο κωδικοποιητής προσπαθεί να μοιράζει ένα συντελεστή κλίμακας σε δύο ή και τις τρεις ομάδες δειγμάτων από κάθε φίλτρο υποζώνης. Η μόνη περίπτωση που χρησιμοποιούνται ξεχωριστά scalefactors για κάθε ομάδα των 12 δειγμάτων είναι όταν προβλέπεται πως ο διαμοιρασμός scalefactors θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της παραμόρφωσης.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των συστημάτων κωδικοποίησης Layer I και II είναι στο βήμα κβαντισμού. Στο layer I, η έξοδος της κάθε υποζώνης είναι κβαντισμένη χρησιμοποιώντας μία από τις 14 δυνατότητες. Οι ίδιες 14 επιλογές χρησιμοποιούνται για όλες τις υποζώνες. Αντίθετα, στο layer-II, οι κβαντιστές που χρησιμοποιούνται για κάθε μια από τις υποζώνες μπορεί να επιλεγούν από ένα διαφορετικό σύνολο κβαντιστών, ανάλογα με το ρυθμό δειγματοληψίας και bitrate. Για ορισμένους ρυθμούς δειγματοληψίας και bitrates, πολλές από τις υψηλότερες υποζώνες έχουν ανατεθεί με 0 bits. Δηλαδή, οι πληροφορίες από αυτές τις υποζώνες απλά απορρίπτονται στο layer II.

Επίσης, για το layer I, αν οι κβαντιστές χρησιμοποιούν 3, 5 ή 9 επίπεδα κβαντισμού, πρέπει να χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα 2, 3 ή 4 δυαδικά bits που θα μπορούσαν να αναπαραστήσουν 4, 8 ή 16 επίπεδα αντίστοιχα. Έτσι χάνουμε ουσιαστικά επίπεδα και σπαταλάμε χώρο. Στο layer II, ο κωδικοποιητής ομαδοποιεί 3 δείγματα σε ένα κοκκίο (granule). Εάν κάθε δείγμα μπορεί να παρασταθεί π.χ. σε 3 επίπεδα, ένα κοκκίο μπορεί να έχει 27 επίπεδα. Ομοίως, εάν κάθε δείγμα μπορεί να πάρει 9 τιμές, ένας κόκκος μπορεί να πάρει 729 τιμές. Μπορούμε επομένως να παραστήσουμε 729 τιμές χρησιμοποιώντας 10 bits. Εάν κάθε δείγμα στο κοκκίο είχε κωδικοποιηθεί χωριστά, θα χρειαζόμασταν 12 bits. Χρησιμοποιώντας όλες αυτές τις εξοικονομήσεις, η αναλογία συμπίεσης στο Layer II κωδικοποίησης μπορεί να αυξηθεί από την αναλογία 4: 1, σε αναλογία 8: 1 ή 6: 1.

Η μόνη πραγματική διαφορά μεταξύ της δομής του πλαισίου του layer II και της δομής του πλαισίου του layer I κωδικοποιητή είναι το πεδίο των πληροφοριών επιλογής scalefactor.

### 6.5.8 Το MPEG Audio layer III ή MP3

Πριν μιλήσουμε για το Audio layer III είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε μερικά πράγματα γενικά για το MPEG. Το MPEG για τον ήχο χωρίζεται σε τρία επίπεδα ανάλογα με το bitrate που πρόκειται να έχουμε. Κάθε επίπεδο δεν είναι καλύτερο από το προηγούμενό του. Απλώς είναι πιο πολύπλοκο. Έτσι και τα τρία επίπεδα του MPEG-2 είναι ορισμένα ώστε να κάνουν την καλύτερη εκμετάλλευση του bitrate που έχουν στη διάθεσή τους. Όσο προχωράμε στα επίπεδα τόσο πιο περίπλοκος γίνεται ο κωδικοποιητής και τόσο καλύτερη εκμετάλλευση του bitrate γίνεται. Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει τα αποτελέσματα τεστ σύγκρισης των τριών επιπέδων με κλίμακα από το 1 έως το 5.

Επίπεδο	bitrate	Συμπύεση	Ελάχιστη καθυστέρηση	Ποιότητα 64 kbit
I	192 kbit	4:1	19ms	---
II	128kbit	6:1	35ms	2.1 ως 2.6 στα 5
III	64kbit	12:1	59ms	3.6 ως 3.8 στα 5

Πίνακας 6.5

Το επίπεδο III έχει κερδίσει τη θέση του στη βιομηχανία της μουσικής και ο κυριότερος χώρος εξάπλωσής του είναι το διαδίκτυο. Για δοσμένη ποιότητα ήχου, το MPEG layer III απαιτεί το μικρότερο bitrate ή αλλιώς για δοσμένο bitrate πετυχαίνει την υψηλότερη ποιότητα ήχου. Χρησιμοποιώντας το MPEG layer III μπορεί κανείς να συρρικνώσει τα αρχικά δεδομένα ήχου από ένα CD κατά ένα παράγοντα της τάξης του 12 χωρίς ιδιαίτερες απώλειες σε πιστότητα ήχου. Το αποτέλεσμα είναι να έχουμε μουσικά αρχεία 4-6 λεπτών που κανονικά θα καταλάμβαναν χώρο 40-70 MB, να πιάνουν τώρα χώρο μόλις 3-7MB. Κάποια παραδείγματα της απόδοσης του MPEG Audio layer III είναι τα εξής :

Ποιότητα ήχου	Εύρος	mode	Bitrate	Λόγος
«Ήχος τηλεφώνου»	2.5 kHz	mono	8 kbps	96:1
«Καλύτερος από shortwave»	4.5 kHz	mono	16 kbps	48:1
«Καλύτερος από AM radio»	7.5 kHz	mono	32 kbps	24:1
«Σχεδόν FM radio»	11 kHz	stereo	56-64kbps	26-24:1
«Ποιότητα σχεδόν-CD»	15 kHz	stereo	96 kbps	16:1
«Ποιότητα CD»	> 15 kHz	stereo	112-128 kbps	14-12:1

Πίνακας 6.6

Αρκετές από τις εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο χώρο του δικτύου χρησιμοποιούν κωδικοποιητές επιπέδου III χωρίς πάντοτε να υλοποιούν όλες τις δυνατότητες που προσφέρει κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνονται τα νούμερα και οι ποιότητες που αναφέρονται πιο πάνω.

Η Layer III κωδικοποίηση, είναι πολύ πιο περίπλοκη από ό, τι τα συστήματα κωδικοποίησης Layer I και II. Ένα από τα προβλήματα με τα συστήματα κωδικοποίησης Layer I και II ήταν ότι με την αναπαράσταση

του ηχητικού φάσματος σε 32 περιοχές, το εύρος ζώνης των υποζωνών σε χαμηλότερες συχνότητες είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τις πραγματικές κρίσιμες ζώνες.

Ένας απλός τρόπος για να αυξηθεί η φασματική ανάλυση θα ήταν να παρασταθεί το ηχητικό σήμα απευθείας σε έναν μεγαλύτερο αριθμό ζωνών. Ωστόσο, μία από τις απαιτήσεις σχετικά με τον αλγόριθμο Layer III είναι η συμβατότητα με τους Layer I και II κωδικοποιητές. Για να ικανοποιήσει αυτή την απαίτηση της προς τα πίσω συμβατότητας, η φασματική ανάλυση στον αλγόριθμο Layer III εκτελείται σε δύο στάδια.

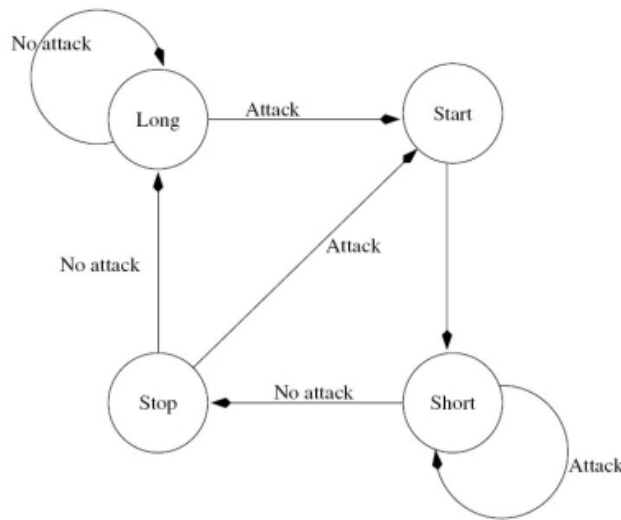
Πρώτον, γίνεται η 32-ζωνών ανάλυση που χρησιμοποιείται στο layer I και II. Η έξοδος της κάθε υποζώνης μετασχηματίζεται χρησιμοποιώντας έναν τροποποιημένο μετασχηματισμό διακριτού συνημίτονου (MDCT) με 50% αλληλοεπικάλυψη. Ο αλγόριθμος mp3 διευκρινίζει δύο μεγέθη για το MDCT, 6 ή 18. Αυτό σημαίνει ότι η έξοδος κάθε υποζώνης μπορεί να αναλυθεί σε 18 ή 6 συντελεστές συχνότητας.

Ένας τροποποιημένος διακριτός μετασχηματισμός συνημίτονου (MDCT) εκφράζει μια πεπερασμένη ακολουθία σημείων δεδομένων σε όρους ενός αθροίσματος συναρτήσεων συνημίτονου που ταλαντώνονται σε διαφορετικές συχνότητες. Οι DCTs είναι σημαντικοί για πολλές εφαρμογές στην επιστήμη και την τεχνολογία: από την απωλεστική συμπίεση του ήχου (π.χ. MP3), όπου είναι δυνατόν να απορρίπτονται στοιχεία υψηλής συχνότητας, έως φασματικές μεθόδους για την αριθμητική επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Ο λόγος ύπαρξης δύο μεγεθών για το MDCT είναι ότι όταν μετατρέπουμε μια ακολουθία στο πεδίο της συχνότητας, χάνουμε ανάλυση χρόνου όσο κερδίζουμε ανάλυση συχνότητας. Το πρόβλημα με αυτό είναι ότι οποιοσδήποτε θόρυβος κβαντισμού εισάγεται εντός των συντελεστών συχνότητας, θα εξαπλωθεί σε ολόκληρο το μέγεθος του μπλοκ του μετασχηματισμού. Η προς τα πίσω χρονική επικάλυψη συμβαίνει μόνο για σύντομο χρονικό διάστημα πριν από τον ήχο συγκάλυψης (περίπου 20 msec). Ως εκ τούτου, ο απλωμένος θόρυβος κβαντισμού θα ακουστεί λίγο πριν τον πραγματικό ήχο και δεν θα επικαλυφθεί. Αν έχουμε ως σήμα στην είσοδο έναν απότομο ήχο που είναι πολύ περιορισμένος χρονικά (όπως τον ήχο ενός τυμπάνου), θα θέλαμε να κρατήσουμε το μέγεθος του μπλοκ αρκετά μικρό ώστε να μπορεί να περιέχει αυτό τον απότομο ήχο. Με τη συμπίεση, όταν το σήμα θα επιβαρυνθεί με το θόρυβο κβαντισμού, η διάρκεια του θορύβου δεν θα ξεφεύγει από το διάστημα στο οποίο ο πραγματικός ήχος ακούγεται και, ως εκ τούτου, θα είναι καλυμμένος. Ο αλγόριθμος Layer III επομένως παρακολουθεί την είσοδο και αν χρειαστεί, αντικαθιστά τρεις σύντομους μετασχηματισμούς για ένα μεγάλο σε διάρκεια μετασχηματισμό.

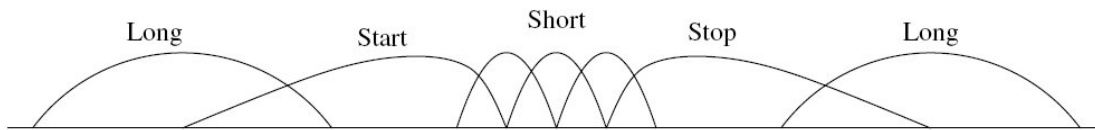
Αυτό που πραγματικά συμβαίνει είναι ότι η έξοδος της υποζώνης πολλαπλασιάζεται με μια συνάρτηση παραθύρου μήκους 36 κατά τη διάρκεια των εν στάσει περιόδων (δηλαδή ένα block μεγέθους 18 συν 50% επικάλυψη από γειτονικά block). Αυτό το παράθυρο ονομάζεται «μακρύ» παράθυρο. Όταν ανιχνεύεται ένας έντονος και σύντομος ήχος, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μία αλληλουχία τριών σύντομων παραθύρων μήκους 12 που ακολουθούν ένα παράθυρο μετάβασης μήκους 30. Αυτό το αρχικό παράθυρο μετάβασης ονομάζεται παράθυρο «εκκίνησης» (start window). Αν η είσοδος επιστρέφει σε μια πιο στατική λειτουργία, τα σύντομα παράθυρα ακολουθούνται από ένα άλλο παράθυρο μετάβασης που ονομάζεται παράθυρο λήξης (stop) μήκους 30. Στη συνέχεια, ακολουθεί η τυπική αλληλουχία μακράς διάρκειας παραθύρων.

Διάγραμμα καταστάσεων για τη διαδικασία αλλαγής παράθυρου:



Σχήμα 6.46

Ακολουθία των παραθύρων:



Σχήμα 6.47

Το πρότυπο επιτρέπει μια μικτή λειτουργία μπλοκ στην οποία, οι δύο χαμηλότερες υποζώνες χρησιμοποιούν μεγάλα παράθυρα, ενώ οι υπόλοιπες υποζώνες χρησιμοποιούν σύντομα παράθυρα. Παρατηρήστε ότι ενώ ο αριθμός των συχνοτήτων μπορεί να αλλάξει ανάλογα με το αν χρησιμοποιούμε μεγάλο ή μικρό παράθυρο, ο αριθμός των δειγμάτων σε ένα πλαίσιο παραμένει στα 1152. Έχουμε επομένως 36 δείγματα, ή 3 ομάδες των 12, από καθένα από τα 32 φίλτρα υποζώνης.

Η κωδικοποίηση και ο κβαντισμός της εξόδου του MDCT διεξάγονται με ένα επαναληπτικό τρόπο χρησιμοποιώντας δύο βρόγχους. Υπάρχει ένας εξωτερικός βρόχος που ονομάζεται ο «βρόχος ελέγχου παραμόρφωσης», σκοπός του οποίου είναι να εξασφαλισθεί ότι ο εισαγόμενος θόρυβος κβαντισμού βρίσκεται κάτω από το όριο ακουστότητας. Οι scalefactors χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της στάθμης του θορύβου κβαντισμού. Στο Layer-III οι scalefactors έχουν εκχωρηθεί σε ομάδες ή «ζώνες» των συντελεστών. Οι ζώνες συχνοτήτων είναι περίπου στο μέγεθος των κρίσιμων ζωνών. Υπάρχουν 21 ζώνες scalefactor για μεγάλα μπλοκ και 12 ζώνες scalefactor για σύντομα μπλοκ.

Ο εσωτερικός βρόχος ονομάζεται βρόχος ελέγχου του ρυθμού. Ο στόχος αυτού του βρόχου είναι να βεβαιωθεί ότι δεν γίνεται υπέρβαση ενός ρυθμού μετάδοσης bit. Αυτό γίνεται με την επιλογή μεταξύ διαφόρων κβαντιστών και κωδικών Huffman.

Ο αλγόριθμος Huffman παράγει ένα κώδικα βασισμένο στην πιθανότητα εμφάνισης του κάθε συμβόλου σε ένα κείμενο. Σχεδόν σε όλα τα κείμενα, μερικά σύμβολα εμφανίζονται περισσότερες φορές από ότι άλλα. Προκαθορισμένες πιθανότητες εμφάνισης κάθε συμβόλου χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός πλήρους δυαδικού δέντρου από τη βάση προς τα επάνω (bottom-up). Αυτός ο τρόπος εγγυάται ότι τα σύμβολα που εμφανίζονται λιγότερο θα έχουν μακρύτερες σειρές δυαδικών ψηφίων. Στο δέντρο τα σύμβολα είναι φύλλα (τερματικοί κόμβοι - terminal nodes), οι διακλαδώσεις

σημειώνονται με 0 ή 1 και η δυαδική αναπαράσταση της διαδρομής από τη ρίζα (root) μέχρι το σύμβολο είναι η συμπίεσμένη αναπαράστασή του ως σειρά δυαδικών ψηφίων.

Οι κβαντιστές που χρησιμοποιούνται στο mp3 είναι ανομοιόμορφοι. Εάν το αποτέλεσμα της χρήσης κωδικοποίησης μεταβλητού μήκους υπερβαίνει έναν επιθυμητό αριθμό bits, ο κβαντιστής κάνει αύξηση του μεγέθους του βήματος κβαντισμού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί το επιθυμητό bitrate.

Μόλις ο στόχος για το bitrate ικανοποιηθεί, ο έλεγχος περνά πίσω στον εξωτερικό βρόχο ελέγχου παραμόρφωσης. Το ψυχοακουστικό μοντέλο χρησιμοποιείται για να ελέγξει αν ο θόρυβος κβαντισμού σε οποιαδήποτε ζώνη υπερβαίνει την επιτρεπόμενη παραμόρφωση. Αν το κάνει, το scalefactor ρυθμίζεται ώστε να μειωθεί ο θόρυβος κβαντισμού. Όταν όλα τα scalefactors έχουν ρυθμιστεί, ο έλεγχος επιστρέφει στο βρόχο ελέγχου του ρυθμού bitrate. Οι επαναλήψεις λήγουν είτε όταν πληρούνται οι συνθήκες bitrate και παραμόρφωσης ή όταν οι scalefactors δε μπορούν να ρυθμιστούν περαιτέρω. Ο αντίστοιχος ψευδοκώδικας της διαδικασίας δίνεται παρακάτω:

«initialize all scalefactors to 0.

*compute initial q = quantization step size (bin\_search\_stepsize)*

*divide & conquer algorithm to find approximate value of q*

*outer\_loop:*

*do {*

*compute quantization with given scalefactors and not too many bits*

*(call inner\_loop)*

*calc\_noise():*

*compute distortion within each scalefactor band*

*compare distortion to allowed distortion (from psy-model)*

*over = number of scalefactor bands where distortion > allowed\_distortion*

*tot\_noise = average, over all bands of distortion(db) - allowed\_distortion(db)*

*over\_noise = as tot\_noise, but only bands with distortion > allowed\_distortion*

*if this quantization is the best one found so far (determined by quant\_compare())*

*save it.*

*if over=0 we are done, exit.*

*amplify scalefactors for bands with distortion*

*} while over<>0 or !(all scalefactors set to their max)*

*Restore BEST quantization».*

(Πηγή: [http://lame.sourceforge.net/outer\\_loop.php](http://lame.sourceforge.net/outer_loop.php))

Θα υπάρξουν πλαίσια στα οποία ο αριθμός των bit που χρησιμοποιούνται από τον κωδικοποιητή Huffman είναι μικρότερος από το ποσό που τους έχει εκχωρηθεί. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι η αρχή ενός μπλοκ δεδομένων δεν συμπίπτει κατ'ανάγκη με την επικεφαλίδα του πλαισίου και έτσι γίνεται αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου αποθηκευτικού χώρου. Όλη αυτή η πολυπλοκότητα επιτρέπει μια πολύ αποτελεσματική κωδικοποίηση των αρχείων ήχου. Το τυπικό αρχείο ήχου MP3 έχει μια αναλογία συμπίεσης περίπου 10 : 1.

Παρά το υψηλό αυτό επίπεδο συμπίεσης, οι περισσότεροι άνθρωποι δεν μπορούν να καταλάβουν τη διαφορά μεταξύ της αρχικής και της συμπιεσμένης μορφής ενός αρχείου. Όμως εκπαιδευμένοι επαγγελματίες μπορούν μερικές φορές να εντοπίσουν τη διαφορά μεταξύ των αρχικών και συμπιεσμένων εκδόσεων. Οι άνθρωποι που μπορούν να προσδιορίσουν πολύ λεπτές διαφορές μεταξύ των κωδικοποιημένων και αρχικών σημάτων έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των κωδικοποιητών ήχου. Με τον προσδιορισμό σημείων όπου η παραμόρφωση μπορεί να γίνεται αντιληπτή, έχουν βοηθήσει την προσπάθεια βελτίωσης της διαδικασίας κωδικοποίησης mp3.

### 6.5.9 Επιπλέον δεδομένα και ετικέτες (tags) του mp3 αρχείου

Μία ετικέτα ενός συμπιεσμένου αρχείου ήχου, είναι μια ενότητα έξτρα δεδομένων του αρχείου. Δεν περιέχει δεδομένα του ηχητικού σήματος αλλά πλεονάζουσα πληροφορία ή όπως λέμε «μετα-δεδομένα» (metadata). Τέτοια δεδομένα μπορεί να είναι ο τίτλος του κομματιού μουσικής, ο καλλιτέχνης, το άλμπουμ, ο αριθμός του τραγουδιού και άλλες πληροφορίες που σχετίζονται με το αρχείο ήχου. Μέχρι το 2006, οι πιο διαδεδομένοι τύποι μορφών ετικετών είναι οι ID3v1 και ID3v2, και πρόσφατα παρουσιάστηκε το APEv2. Η ετικέτα APEv2 μπορεί να συνυπάρχει μαζί με τις ετικέτες ID3 στο ίδιο αρχείο, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και αυτόνομα. Η δυνατότητα επεξεργασίας των ετικετών στα αρχεία MP3 είναι συχνά ενσωματωμένη στα προγράμματα αναπαραγωγής και επεξεργασίας MP3, αλλά υπάρχουν και προγράμματα ειδικά για την επεξεργασία των ετικετών, με περισσότερες δυνατότητες, όπως η μαζική αλλαγή ετικετών σε πολλά αρχεία, ή η αντιγραφή μέρος του ονόματος ενός αρχείου σε κάποια ετικέτα και αντίστροφα.

Επειδή η ψηφιακοί δίσκοι (CD) και άλλες πηγές ηχογραφούνται και παράγονται σε διαφορετικές εντάσεις ήχου, είναι χρήσιμο να αποθηκεύεται η πληροφορία της έντασης του ήχου ενός αρχείου στην ετικέτα ώστε κατά την διάρκεια της αναπαραγωγής, η ένταση του ήχου να μπορεί να ρυθμίζεται δυναμικά.

Έχουν προταθεί μερικά πρότυπα για την κωδικοποίηση της αύξησης του ήχου ενός MP3. Η ιδέα είναι να εξομαλυνθεί η μέση ένταση ενός αρχείου ήχου (όχι οι απότομες αλλαγές της), έτσι ώστε η ένταση να μην αλλάζει μεταξύ των συνεχόμενων κομματιών. Αυτό δεν πρέπει να συγχέεται με τη συμπίεση δυναμικής περιοχής του σήματος (DRC, dynamic range compression) η οποία είναι μία μορφή εξομάλυνσης ήχου που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια παραγωγής μουσικής.

Η πιο δημοφιλής και διαδεδομένη λύση για την αποθήκευση της αύξησης του ήχου κατά την αναπαραγωγή είναι απλά γνωστή ως «Replay Gain» (αύξηση ήχου στην αναπαραγωγή). Συνήθως, η μέση ένταση και η πληροφορία αύξησης ή μείωσης της για το κομμάτι του ήχου αποθηκεύεται στην ετικέτα που περιέχει τα μεταδεδομένα (metadata tag)

### 6.5.10 Οι διαφορές μεταξύ των προτύπων MPEG-1, Layer III (mp3) και MPEG-1, Layer II

Οι βασικές διαφορές του MPEG-1, Layer III (mp3) σε σχέση με το MPEG-1, Layer II είναι:

- Η χρήση του MDCT (Modified Discrete Cosine Transform) για υποδιαίρεση του φάσματος συχνοτήτων σε 576 ζώνες αντί για 32 με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση της φασματικής κάλυψης και τις διακριτικής ικανότητας.

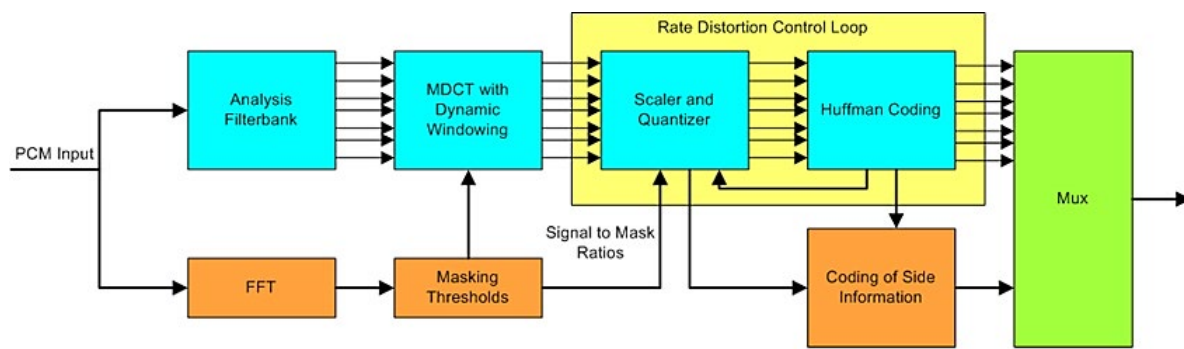
- Χρησιμοποιούνται 18 συντελεστές MDCT για κάθε μια από τις 32 ζώνες.

- Τελικά δημιουργούνται συνολικά  $32 \times 18 = 576$  ζώνες στο φάσμα συχνοτήτων.

- Δυναμικός επιμερισμός bits ανά ζώνη συχνοτήτων ώστε να μπορεί να επιτευχθεί το ζητούμενο από το χρήστη bit rate.

- Χρήση κωδικοποίησης Huffman επί της κωδικοποίησης των δειγμάτων (codewords) για να επιτευχθεί περαιτέρω συμπίεση.

Στο παρακάτω σχήμα αναπαρίστανται τα στάδια κωδικοποίησης του αλγορίθμου mp3:



Σχήμα 6.48

Υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί οι οποίοι στους οποίους υπόκειται το αρχείο MP3 και δεν μπορούν να ξεπεραστούν από κανέναν κωδικοποιητή. Νεότερα πρότυπα κωδικοποίησης όπως το Vorbis και το AAC δεν έχουν πια αυτούς τους περιορισμούς. Με τεχνικούς όρους, το MP3 περιορίζεται με τους παρακάτω τρόπους:

- Το Bitrate περιορίζεται κατά μέγιστο στα 320Kb/δευτ. Παρόλο που κάποιοι κωδικοποιητές μπορούν να δημιουργήσουν αρχεία με υψηλότερους ρυθμούς, υπάρχει πολύ μικρή ή καθόλου υποστήριξη για αυτά τα αρχεία.

- Η ανάλυση του χρόνου μπορεί να είναι πολύ χαμηλή για κάποια σήματα με υψηλές συχνότητες με μικρή χρονική διάρκεια. Αυτό το γεγονός προκαλεί προβλήματα και παραμόρφωση σε κάποιους κρουστικούς ήχους.

- Η ανάλυση του φάσματος των σημάτων σε περιοχές συχνοτήτων υπόκειται σε περιορισμούς και αυτό περιορίζει την αποτελεσματικότητα της κωδικοποίησης.

- Για συχνότητες πέραν των 15.5/15.8 KHz, επομένως για τη ζώνη 21, δεν υπάρχει κατάλληλος συντελεστής κλίμακας (scaling factor), αναγκάζοντας τον κωδικοποιητή να επιλέξει ανάμεσα σε λιγότερο ακριβή αναπαράσταση στη ζώνη 21 ή λιγότερο αποτελεσματική αποθήκευση για όλες τις ζώνες κάτω απ τη ζώνη 21.

-Το joint stereo προφίλ καναλιών επεξεργάζεται πλαίσιο προς πλαίσιο.

-Η καθυστέρηση της κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης δεν ορίζεται πρακτικά στο πρότυπο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει έλλειψη επίσημης πρόβλεψης για αναπαραγωγή κομματιών χωρίς κενά ανάμεσά τους. Παρόλα αυτά κάποιοι κωδικοποιητές όπως ο «L.A.M.E.» μπορούν να προσθέσουν επιπλέον «μεταδεδομένα» που επιτρέπουν στα προγράμματα αναπαραγωγής να προσφέρουν αναπαραγωγή κομματιών χωρίς κενά.

- Ο κυκλικός έλεγχος περιττότητας bit (CRC, cyclic redundancy check) προστατεύει μόνο τα δεδομένα της επικεφαλίδας (header) και όχι τα δεδομένα ήχου.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, ένας καλά ρυθμισμένος κωδικοποιητής μπορεί να αποδώσει ένα σωστά συμπιεσμένο αρχείο που εμφανίζει λίγες ακουστικές διαφορές από το ασυμπίεστο.

Στο τέλος του κεφαλαίου παραθέτουμε έναν αλγόριθμο συμπίεσης κατά το πρότυπο mp3 σε μορφή κώδικα.

### 6.5.11 AAC (Advanced Audio Codec)

Ο αλγόριθμος MPEG Layer III υπήρξε ιδιαίτερα επιτυχής. Ωστόσο, είχε κάποια ενσωματωμένα μειονεκτήματα, λόγω των περιορισμών βάσει των οποίων είχε σχεδιαστεί. Το κύριο εμπόδιο ήταν η προϋπόθεση ότι θα είναι συμβατό προς τα πίσω με τα layers I και II. Αυτή η απαίτηση για συμβατότητα με παλαιότερες εκδόσεις ανάγκασε τη σχεδίαση της κάπως περίεργης δομής ανάλυσης 2 βημάτων που περιλαμβάνει μία ανάλυση υποζώνης που ακολουθείται από μια ανάλυση MDCT.

Την περίοδο αμέσως μετά την απελευθέρωση των προδιαγραφών του MPEG, είδαμε επίσης σημαντικές εξελίξεις στην ικανότητα του υλικού και λογισμικού. Το πρότυπο Advanced Audio Coding (AAC) εγκρίθηκε το 1997 ως μια εναλλακτική λύση πολυκαναλικής συμπίεσης υψηλότερης ποιότητας.

Η προσέγγιση του AAC είναι μια σπονδυλωτή προσέγγιση και βασίζεται σε μια σειρά από αυτόνομα εργαλεία ή ενότητες. Μερικά από τα εργαλεία αυτά έχουν ληφθεί από το προηγούμενο πρότυπο ήχου MPEG, ενώ άλλα είναι νέα. Όπως και με τα προηγούμενα πρότυπα, το πρότυπο AAC ορίζει πρακτικά τον αποκωδικοποιητή. Τα εργαλεία του αποκωδικοποιητή που ορίζεται στο πρότυπο AAC που αναφέρονται στον κάτωθι πίνακα:

Tool Name	
Bitstream Formatter	Required
Huffman Decoding	Required
Inverse Quantization	Required
Rescaling	Required
M/S	Optional
Interblock Prediction	Optional
Intensity	Optional
Dependently Switched Coupling	Optional
TNS	Optional
Block switching / MDCT	Required
Gain Control	Optional
Independently Switched Coupling	Optional

Πίνακας 6.7



Το AAC είναι ένας αλγόριθμος κωδικοποίησης ήχου πραγματικό αριστούργημα αφού μπορεί να δώσει εξαιρετικά υψηλής ποιότητας ήχο σε bitrate 64Kbit/δευτερόλεπτο/κανάλι. Επιτρέπει την κωδικοποίηση έως και 48 καναλιών ήχου και έως και 16 καναλιών χαμηλής συχνότητας για εφέ, ενώ μπορεί να υποστηρίξει πολλές γλώσσες ταυτόχρονα, φωνή πάνω από προγράμματα ήχου και όλα αυτά ενσωματωμένα σε μια ροή δεδομένων (stream).

Όπως φαίνεται στον προηγούμενο πίνακα, μερικά από τα εργαλεία του AAC απαιτούνται για όλα τα προφίλ, ενώ άλλα απαιτούνται μόνο για ορισμένα προφίλ. Με τη χρήση ορισμένων ή όλων αυτών των εργαλείων, το πρότυπο περιγράφει τρία προφίλ/όψεις κωδικοποίησης: Την «κύρια», την «χαμηλής πολυπλοκότητας» και την «κλιμακούμενης συχνότητας δειγματοληψίας». Η «κύρια» όψη και απευθύνεται σε εφαρμογές που η υπολογιστική ισχύς και η μνήμη δεν είναι περιορισμένα. Η «χαμηλής πολυπλοκότητας» σε εφαρμογές που ισχύς και μνήμη είναι σε μεγάλη ζήτηση, ενώ η τελευταία είναι έτσι φτιαγμένη ώστε οι αποκωδικοποιητές να έχουν ελάχιστες απαιτήσεις σε μνήμη αλλά και ισχύ. Υποκειμενικά τεστ που έγιναν με καλά εκπαιδευμένους ακροατές έδειξαν ότι η συγκεκριμένη κωδικοποίηση δίνει καλύτερη ποιότητα ήχου από οποιαδήποτε άλλη κωδικοποίηση με το μισό μόνο bitrate. Η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται είναι περίπου 20% ενός επεξεργαστή Pentium I στα 133MHz για δύο κανάλια κωδικοποιημένα με συχνότητα δειγματοληψίας 48KHz με «χαμηλή πολυπλοκότητα»... Το AAC είναι κομμάτι του MPEG-4 και έχει κυριαρχήσει στο χώρο του δικτύου ιδιαίτερα λόγω της υιοθέτησής του από την εταιρία Apple στις συσκευές αναπαραγωγής ήχου Irod και το λογισμικό διανομής και διαχείρισης μουσικής iTunes. Το iTunes είναι πλέον πρακτικά ένα από τα μεγαλύτερα διαδικτυακά σύγχρονα ηλεκτρονικά «δισκοπωλεία» της παγκόσμιας μουσικής βιομηχανίας.

### 6.5.12 Το πρότυπο Dolby AC-3

Η Audio Code Number 3 - Dolby Digital (Surround) πρόκειται για κωδικοποίηση ήχου που αναπτύχθηκε από τα εργαστήρια της Dolby και χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως από την κινηματογραφική βιομηχανία στις ταινίες. Επίσης υιοθετείται στους ψηφιακούς δίσκους εικόνας (DVD και Blu-Ray) αλλά και από την τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV).

Σε αντίθεση με τους αλγόριθμους MPEG περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα, η μέθοδος Dolby AC-3 έγινε ένα de-facto πρότυπο. Αυτό αναπτύχθηκε ως πρότυπο για την τηλεοπτική μετάδοση υλικού υψηλής ευκρίνειας HDTV στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Ωστόσο, ακόμη και πριν το AC3 γίνει αποδεκτό για τον ήχο υψηλής ευκρίνειας της HDTV, είχε ήδη κάνει το ντεμπούτο του στη βιομηχανία του κινηματογράφου. Το πρότυπο χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε λίγα θέατρα κατά την παρουσίαση της ταινίας «Star Trek IV» το 1991 και παρουσιάστηκε επίσημα με την κυκλοφορία της ταινίας «ο Μπάτμαν Επιστρέφει» το 1992. Η πρόταση για το AC3 έγινε δεκτή από την Grand Alliance τον Οκτώβριο του 1993 και έγινε επίσημα αποδεκτό ως πρότυπο από την επιτροπή συστημάτων προηγμένης τηλεόρασης (ATSC) το 1995.

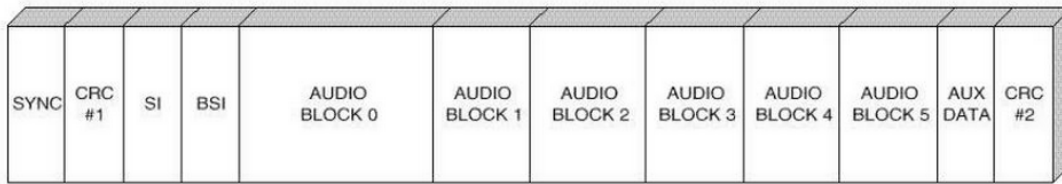
Σε αντίθεση με τα αναλογικά Dolby Surround συστήματα, το AC-3 5.1 σχήμα περιλαμβάνει 6 διακριτά κανάλια, αλλά κωδικοποιημένα μαζί για την αποτελεσματικότητα. Η κωδικοποίηση AC-3 μπορεί να συμπυκνώσει 6 ξεχωριστά κανάλια ήχου σε χώρο λιγότερο από αυτόν που απαιτεί ένα μόνο κανάλι σε ένα CD. Τα 6 κανάλια που περιλαμβάνει δημιουργούν πραγματική αίσθηση του χώρου για τον ήχο αφού είναι χωρισμένα σε δεξί, αριστερό, κεντρικό, δύο κανάλια ήχου surround και ένα κανάλι εξαιρετικά για τις χαμηλές συχνότητες (Low Frequency Effects Channel) που βοηθάει στη μεγιστοποίηση της ακρόασης ήχων όπως εκρήξεις, συγκρούσεις κ.τ.λ. Η χρήση subwoofer μας βοηθάει στην καλύτερη ακρόαση των ήχων του τελευταίου καναλιού. Το κανάλι υπογούφερ δεν είναι το ίδιο με το κανάλι LFE! Το κανάλι LFE έχει δημιουργηθεί από τον ηχολήπτη κατά τη μίξη ήχου της ταινίας ενώ το κανάλι του υπογούφερ παράγεται από τον AC-3 αποκωδικοποιητή κατά το χρόνο αναπαραγωγής.

Τα πέντε βασικά κανάλια είναι πλήρους εύρους ζώνης ακουστικών συχνοτήτων (3Hz έως 20.000 Hz)

ενώ το έκτο κανάλι περιορίζεται στις συχνότητες (3 Hz έως 120 Hz). Όλες οι γνωστές συχνότητες δειγματοληψίας υποστηρίζονται (32, 44.1, και 48 Hz) και ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης κωδικοποίησης είναι ότι επιτρέπει την επικάλυψη ήχων σε ένα κανάλι με θόρυβο, από ήχους άλλου καναλιού. Οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων που απαιτεί ποικίλουν από 32 kb/δευτερόλεπτο για ένα κανάλι ως 640kb/δευτερόλεπτο.

Σχετικά με τη δομή του πλαισίου του AC-3, ένα πλαίσιο αναπαριστά 1536 δείγματα PCM για όλα τα κανάλια. Ένα μπλοκ αντιπροσωπεύει 256 PCM δείγματα για κάθε κανάλι:

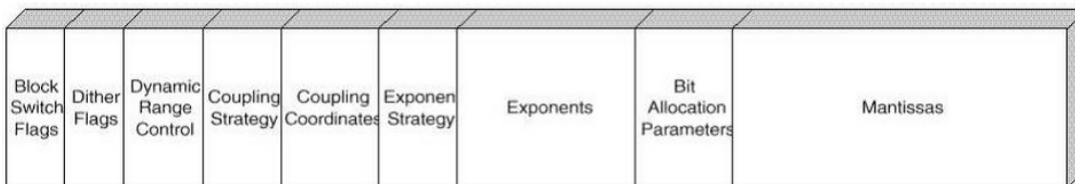
### 1 Frame represents 1536 PCM samples for all channels



Frame Structure

SI=Sync. Info BSI=Bitstream Info CRC for error correction Aux Data for private control

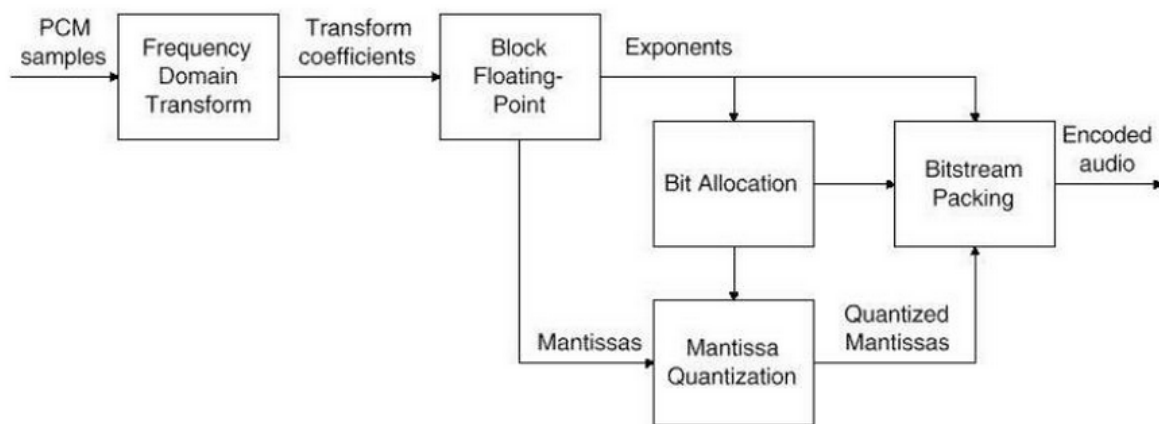
### 1 Block represents 256 PCM for each channel



Block Structure

Σχήμα 6.49

Ένα μπλοκ διάγραμμα του αλγόριθμου κωδικοποίησης Dolby-AC3 δίνεται στο εξής σχήμα:



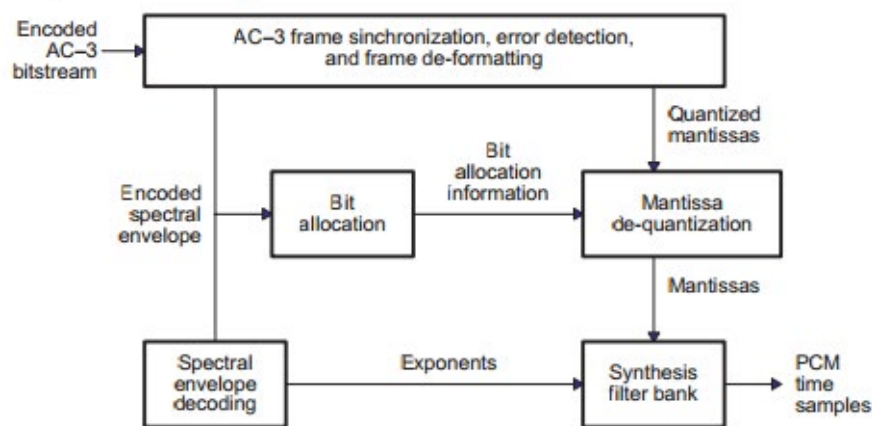
Σχήμα 6.50

Μεγάλο μέρος του συστήματος Dolby-AC3 είναι παρόμοιο με αυτό που έχουμε ήδη περιγράψει για τους αλγόριθμους MPEG. Όπως και στα σχήματα MPEG, ο αλγόριθμος Dolby-AC3 χρησιμοποιεί το

τροποποιημένο DCT (MDCT) μετασχηματισμό με 50% επικάλυψη για την φασματική ανάλυση της εισόδου. Όπως και στην περίπτωση του MPEG, υπάρχουν δύο διαφορετικά μεγέθη των παραθύρων που χρησιμοποιούνται.

Για τα σχετικά στατικά τμήματα του ήχου, ένα παράθυρο μεγέθους 512 χρησιμοποιείται για να λάβει ένα συντελεστή τιμής 256. Μια απότομη αύξηση στην ισχύ των συντελεστών υψηλής συχνότητας χρησιμοποιείται για να υποδεικνύει την παρουσία ενός παροδικού ήχου και το παράθυρο 512 αντικαθίσταται με δύο παράθυρα μεγέθους 256. Το σημείο όπου ο αλγόριθμος Dolby-AC3 διαφέρει σημαντικά από τον αλγόριθμο MPEG είναι ο τρόπος κατανομής των bits. Η κατανομή Bit γίνεται σε αναπαράσταση κινητής υποδιαστολής βάσης και εκθέτη που εκπροσωπούνται με διαφορετικό τρόπο. Τα Bits της βάσης κατανέμονται προσαρμοστικά.

Σχηματική αποκωδικοποίηση του AC-3:



Σχήμα 6.51

Τα διάφορα στάδια που περιγράφονται στο προηγούμενο σχήμα για την αποκωδικοποίηση της AC-3 ροής δεδομένων δίνεται ως ψευδοκώδικας παρακάτω:

```

Detect          AC-3          frame          sync
                Error Check (CRC)
                Unpack BSI (Bit Stream Information) data
                For audio block 0 to 5
                Unpack fixed data (coupling, bit allocation & other info)
                For channel 1 to No. of coded channels
                Unpack exponents
                For band 1 to No. of bands
                Compute bit allocation
                Unpack mantissas
                Scale mantissas
                Decouple mantissa
                Denormalize mantissas by exponents
                Compute partial inverse transform
                Downmix to appropriate output channels
                For channel 1 to No. of output channels
                Window/ overlap-add with delay buffer
                Store samples in PCM output buffer
Copy downmix buffer values to delay

```

## 6.6 Πρότυπα συμπίεσης ήχου χωρίς απώλειες (lossless)

Στα Lossy αρχεία (όπως είναι τα mp3) συμπιέζουμε το μέγεθος του αρχείου ήχου, αφαιρώντας από αυτό πληροφορίες που έτσι κι αλλιώς περνούν απαρατήρητες ή σχεδόν απαρατήρητες από το ανθρώπινο αφτί, με αποτέλεσμα το μέγεθος του αρχείου να είναι πολύ μικρότερο από το αρχικό.

Στα Lossless αρχεία (όπως είναι τα flac, wavpack, ape κ.α), δεν χάνεται καμιά πληροφορία κατά τη διαδικασία της συμπίεσης, δηλαδή έχουμε ακριβές αντίγραφο του πρωτότυπου, αλλά μεγαλύτερο σε μέγεθος αρχείο σε σύγκριση με τα lossy αρχεία. Δεν υπάρχει βέβαια αμφιβολία, ότι αν θελήσουμε να μετατρέψουμε ένα cd σε αρχεία flac θα έχουμε πιστό αντίγραφο της πρωτότυπης μουσικής του CD, αφού δεν θα έχει χαθεί ηχητική πληροφορία. Επιπλέον σήμερα, που έχουμε τεράστια δυνατότητα αποθήκευσης σε σκληρούς δίσκους της τάξης των Terrabytes, που αποκτάμε πλέον σε προσιτές τιμές, δεν μας προβληματίζει το μεγάλο μέγεθος των lossless αρχείων. Τυπικά, τα αρχεία lossless απαιτούν διπλάσιο χώρο από τα lossy αρχεία παρόμοιων προδιαγραφών κι επιτυγχάνουν βαθμό συμπίεσης περίπου 2 : 1 του αρχικού ασυμπίεστου αρχείου.

OFLAC (Free Lossless Audio Codec) είναι ίσως ο σημαντικότερος μη πατωλεστικός κωδικοποιητής (codec) στον οποίο έχει εύκολη πρόσβαση τόσο ο χρήστης όσο και οι κατασκευαστές. Είναι ανοικτού κώδικα (open source) και δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ενσωμάτωση μεταδεδομένων (metadata). Τα μεταδεδομένα είναι πληροφορίες που αφορούν στο περιεχόμενο του υπό κωδικοποίηση σήματος, ώστε να είναι στην συνέχεια εύκολη η αρχειοθέτηση, η αναζήτηση και η ανάκτησή του, γεγονός που τον κάνει ιδιαίτερα συμπαθή codec στους σχεδιαστές μεγάλων δικτυακών εξυπηρετητών ήχου (audio servers).

Ο FLAC χρησιμοποιεί μεταβλητό μήκος της ομάδας (block) των δεδομένων που επεξεργάζεται σε κάθε χρονική στιγμή από 16 έως 65535 δείγματα. Διαθέτει μία προχωρημένη τεχνική διαχείρισης των καναλιών που προσομοιάζει το Joint Stereo αλλά μπορεί να λειτουργήσει σε τέσσερις ρυθμούς: Mid/Side, Left/Side, Right/Side, Independent, ανάλογα με την μορφή και τις ανάγκες του σήματος. Διαθέτει επίσης και μία πολύ πιο ευέλικτη τεχνική πρόβλεψης σε σχέση με τον AAC coder η οποία περιλαμβάνει μηδενική πρόβλεψη/συμπίεση τύπου Verbatim όταν δεν υπάρχει σήμα και σταθερή πρόβλεψη (Constant) για σταθερές τιμές σήματος, όπως συνιστώσες dc ή τόνοι.

Ενσωματώνει σταθερή τεχνική κωδικοποίησης γραμμικής πρόβλεψης LPC, παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται από τον AAC και LPC με την χρήση ψηφιακού φίλτρου FIR (finite impulse response) 32ης τάξης. Στην τεχνική LPC (Linear Prediction Coding) η τιμή του σήματος μπορεί να προβλεφθεί με βάση τις τιμές  $p$  προηγούμενων δειγμάτων ως εξής:

$$\hat{x}(n) = - \sum_{i=1}^p a_i x(n-i)$$

Η διαφορά της τιμής που προβλέπεται με την πραγματική τιμή του σήματος  $e(n)$  είναι το σφάλμα το οποίο και κωδικοποιείται:

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n)$$

Όπως και στην περίπτωση του AAC, ο codec κωδικοποιεί το σφάλμα (error, residue) που απομένει όταν από τις πραγματικές τιμές του σήματος αφαιρέσουμε αυτές που προκύπτουν από την πρόβλεψη. Αφού ο τρόπος της πρόβλεψης είναι σταθερός και γνωστός από το player, το μόνο που χρειάζεται είναι να γνωρίζουμε τις διαφορές αυτές.



Σχήμα 6.52

Δομή του πλαισίου Flac:

Η βασική δομή μιας ροής δεδομένων FLAC είναι:

- Τα τέσσερα bytes της λέξης (string) «FLAC»
- Το μπλοκ μεταδεδομένων Streaminfo
- Μηδέν ή περισσότερα άλλα στοιχεία μεταδεδομένων
- Ένα ή περισσότερα πλαίσια ήχου

Τα πρώτα τέσσερα byte χρησιμοποιούνται να προσδιοριστεί το ρεύμα δεδομένων FLAC. Το κομμάτι με τα μεταδεδομένα που ακολουθεί περιέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με το ρεύμα, εκτός από τα ίδια τα δεδομένα ήχου. Μετά τα μεταδεδομένα, μεταδίδονται τα κωδικοποιημένα δεδομένα ήχου.

Τα δεδομένα ήχου και τα μεταδεδομένα δεν εναλλάσσονται. Όπως και οι περισσότεροι codecs ήχου, το FLAC χωρίζει τα μη κωδικοποιημένα δεδομένα ήχου σε μπλοκ, και κωδικοποιεί κάθε μπλοκ ξεχωριστά. Το κωδικοποιημένο μπλοκ είναι συσκευασμένο σε ένα πλαίσιο και επισυνάπτεται στο ρεύμα δεδομένων. Ο κωδικοποιητής αναφοράς χρησιμοποιεί ένα μόνο μέγεθος μπλοκ για το σύνολο του ρεύματος, αλλά η μορφή FLAC δεν απαιτεί κάτι τέτοιο.

Το μέγεθος μπλοκ είναι μία σημαντική παράμετρος για την κωδικοποίηση. Αν είναι πολύ μικρό, η επικεφαλίδα του πλαισίου θα μειώσει τη συμπίεση. Εάν είναι πάρα πολύ μεγάλο, το στάδιο μοντελοποίησης του συμπίεστη δεν θα είναι σε θέση να παράγει ένα αποτελεσματικό μοντέλο. Κατανόηση της μοντελοποίησης FLAC βοηθά ώστε βελτιώνετε η συμπίεση για ορισμένα είδη εισόδου μεταβάλλοντας κατάλληλα το μέγεθος του μπλοκ. Στην πιο γενική περίπτωση, με τη χρήση γραμμικής πρόβλεψης LPC για 44,1 kHz συχνότητα δειγματοληψίας ήχου, το βέλτιστο μέγεθος μπλοκ θα είναι μεταξύ 2-6 χιλιάδες δείγματα (samples). Στις προεπιλογές του FLAC, προτείνεται ένα μέγεθος μπλοκ των 4096 δειγμάτων σε αυτή την περίπτωση.

Στην περίπτωση του στερεοφωνικού ήχου εισόδου, μόλις τα δεδομένα χωριστούν σε μπλοκ, προαιρετικά διέρχονται διαμέσου ενός σταδίου αποσυσχέτισης μεταξύ των καναλιών. Τα αριστερά και δεξιά κανάλια μετατρέπονται σε κεντρικό και πλευρικό κανάλια μέσω του παρακάτω μετασχηματισμού: κεντρικό = (αριστερά + δεξιά) / 2, πλευρικό = αριστερά - δεξιά. Αυτή είναι μια διαδικασία χωρίς απώλειες, σε αντίθεση με την Joint stereo του mp3. Για κανονικό CD ήχου, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική επιπλέον συμπίεση. Το πλαίσιο FLAC έχει δύο επιλογές για αυτό: με κωδικό «-m» πάντα συμπιέζεται τόσο η αριστερά-δεξιά όσο και η κεντρική-πλευρική έκδοση του μπλοκ και λαμβάνεται το μικρότερο πλαίσιο. Με κωδικό «-M», ο κώδικας αποσυσχέτισης αλλάζει προσαρμοστικά μεταξύ αριστερά-δεξιά και κεντρικής-πλευρικής έκδοσης του μπλοκ.

Στο επόμενο στάδιο, ο κωδικοποιητής προσπαθεί να προσεγγίσει και να μοντελοποιήσει το σήμα κατά τρόπο ώστε, όταν η προσέγγιση αυτή αφαιρεθεί, το αποτέλεσμα (που ονομάζεται το υπολειπόμενο ή σφάλμα) να απαιτεί λιγότερα bits ανά δείγμα για να κωδικοποιηθεί. Το FLAC έχει

δύο μεθόδους σχηματισμού προσέγγισης του σήματος: 1) με σταθερή πολυωνυμική πρόβλεψη και 2) με γενική γραμμική προβλεπτική κωδικοποίηση (LPC). Η σταθερή πολυωνυμική πρόβλεψη είναι πολύ γρηγορότερη από την LPC αλλά λιγότερης ακριβείας. Όσο υψηλότερη είναι η μέγιστη τάξη της LPC, τόσο πιο αργή, αλλά πιο ακριβής, θα είναι η μοντελοποίηση του σήματος. Ωστόσο, υπάρχει φθίνουσα απόδοση με την αύξηση της τάξης του LPC πέρα από μια τιμή (από την 9<sup>η</sup> τάξη και άνω συνήθως).

Οι παράμετροι για τις σταθερές προγνωστικούς παράγοντες μπορούν να μεταδοθούν σε 3 bit, ενώ οι παράμετροι του μοντέλου LPC εξαρτώνται από τα bits ανά δείγμα και την τάξη του LPC. Αυτό σημαίνει ότι το μήκος της επικεφαλίδας του πλαισίου ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο και την τάξη που θα επιλέξετε και μπορεί να επηρεάσει το βέλτιστο μέγεθος μπλοκ.

Όταν δημιουργηθεί το μοντέλο, ο κωδικοποιητής αφαιρεί την προσέγγιση από το αρχικό σήμα για να πάρει το υπολειπόμενο σήμα σφάλματος. Το σήμα σφάλματος τότε μπορεί να κωδικοποιηθεί χωρίς απώλειες. Για να γίνει αυτό, το FLAC εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι το σήμα σφάλματος έχει γενικά μια Λαπλασιανή κατανομή. Υπάρχει ένα σύνολο ειδικών κωδικών Huffman που ονομάζονται κώδικες Rice που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κωδικοποιήσει αποτελεσματικά αυτό το είδος των σημάτων γρήγορα και χωρίς να χρειάζεται ένα λεξικό ή άλλη βάση δεδομένων. Η κωδικοποίηση Rice προϋποθέτει την εξεύρεση μίας μόνο παραμέτρου που ταιριάζει με τη κατανομή ενός σήματος. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτή την παράμετρο θα δημιουργήσει τους κωδικούς. Καθώς μεταβάλλεται η κατανομή, η βέλτιστη παράμετρος αλλάζει. Το FLAC υποστηρίζει μια μέθοδο που επιτρέπει την παράμετρο να αλλάξει δυναμικά όπως απαιτείται. Το υπόλειμμα μπορεί να χωριστεί σε διάφορα τμήματα, το καθένα με τη δική του παράμετρο Rice. Μπορεί π.χ. να χωριστεί σε  $2^n$  τμήματα. Η  $n$  παράμετρος ονομάζεται τάξη διαχωρισμού. Ο κωδικοποιητής μπορεί να αναζητήσει μεταξύ  $m$  και  $n$  τάξεων διαχωρισμού, λαμβάνοντας την καλύτερη. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ  $m$  και  $n$ , τόσο περισσότερο χρόνο θα διαρκέσει για τον κωδικοποιητή η αναζήτηση για την καλύτερη τάξη. Το μέγεθος του μπλοκ θα επηρεάσει επίσης τη βέλτιστη τάξη.

## 6.7 Ο οπτικός συμπαγής δίσκος (optical CD)

### 6.7.1 CD-DA (Compact Disk – Digital Audio)

Ο συμπαγής δίσκος ή σι-ντι (CD: Compact Disc), είναι ένας οπτικός δίσκος που χρησιμοποιείται για αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων ή για αποθήκευση ψηφιακού ήχου.



Σχήμα 6.53

Το μουσικό CD αποτελείται από μία ή περισσότερες στερεοφωνικές διαδρομές που αποθηκεύονται χρησιμοποιώντας τη 16-μπιτη κωδικοποίηση PCM σε ένα ρυθμό δειγματοληψίας 44,1 kHz ανά κανάλι. Με βάση την αρχική τους τυποποίηση οι συμπαγείς δίσκοι έχουν μια διάμετρο 12,0 εκατοστά, ενώ η δυνατότητα αποθήκευσης τους σε ασυμπίεστο ψηφιακό ήχο είναι 74 λεπτά (ενώ σήμερα έχει επεκταθεί στα 80 λεπτά). Η χωρητικότητα ενός συμπαγούς δίσκου φθάνει τα 800 Mbyte. Υπάρχουν επίσης και δισκάκια 8,0 εκατοστών, που αποθηκεύουν 18 - 24 λεπτά ψηφιακού ασυμπίεστου ήχου ή

155 - 210 MB στοιχείων και χρησιμοποιούνται συχνά σε CD single.

Διάμετρος	Χωρητικότητα ήχου	Χωρητικότητα στοιχείων CD-ROM	Σημειώσεις
120 χιλιοστά	74 – 99 λεπτά	650 – 870 Megabyte	Στάνταρ διαστάσεις
80 χιλιοστά	21 – 24 λεπτά	185 – 210 Megabyte	Δισκάκια 8 εκατοστών
85x54 χιλιοστά - 86x64 χιλιοστά	~ 6 λεπτά	10 - 65 Megabyte	«Business card»

Πίνακας 6.8

Οι προδιαγραφές του compact disc audio αναπτύχθηκαν από κοινού από τις εταιρίες Sony, Philips και Polygram και έχουν καταχωρηθεί στο «κόκκινο βιβλίο». Οι προδιαγραφές αυτές φαίνονται συνοπτικά παρακάτω:

<b>ΔΙΣΚΟΣ</b>	
Χρόνος αναπαραγωγής	74 min 33 sec (μέγιστος χρόνος)
Φορά περιστροφής	αντίθετη της φοράς των δεικτών του ρολογιού
Ταχύτητα περιστροφής	1.2-1.4 m/sec (σταθερή γραμμική ταχύτητα)
Απόσταση ανίχνευσης	1.6μm
Διάμετρος	120mm
Πάχος	1.2mm
Διάμετρος τρύπας κέντρου	15mm
Περιοχή εγγραφής	46mm-117mm
Περιοχή σήματος	50mm-116mm
Υλικό	κάθε αποδεκτό μέσο με δείκτη διάθλασης 1.55
Ελάχιστο μήκος κοιλότητας	0.833μm (1.2m/sec) - 0.972μm (1.4m/sec)
Μέγιστο μήκος κοιλότητας	3.05μm (1.2m.sec) -3.56μm (1.4m/sec)
Βάθος κοιλότητας	~ 0.11μm
Πλάτος κοιλότητας	~ 0.5μm
<b>ΟΠΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ</b>	
Βασικό μήκος κύματος	780nm (7800 E)
Εστιακό βάθος	2μm
<b>FORMAT ΣΗΜΑΤΟΣ</b>	
Αριθμός καναλιών	2 κανάλια (4 δυνατά κανάλια εγγραφής)
Κβαντοποίηση	16bit γραμμική
Συγχρονισμός κβαντοποίησης	ταυτόχρονη για όλα τα κανάλια
Συχνότητα δειγματοληψίας	44.1kHz

Ρυθμός μετάδοσης καναλιού	4.3218 Mb/sec
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	2.0338 Mb/sec
Λόγος δεδομένων ανά κανάλι	8:17
Κώδικας διόρθωσης λαθών	Cross Interleave Reed-Solomon Code (με 25% πλεονασμό)
Σύστημα διαμόρφωσης	8-σε-14 διαμόρφωση (EFM)

### 6.7.2 Αναπαραγωγή ενός CD

Μια συσκευή αναπαραγωγής CD audio (compact disk player) αποτελείται από δύο βασικά μέρη, τον επεξεργαστή δεδομένων ήχου και το σύστημα ελέγχου. Το πρώτο ασχολείται με τις διαδικασίες αναπαραγωγής και το δεύτερο με το περιβάλλον του χρήστη, την εστίαση των φακών, το μοτέρ του άξονα, την αυτόματη ανίχνευση.

Το κύκλωμα ελέγχου αποτελείται από έναν μηχανισμό φόρτωσης του συμπαγούς δίσκου (tray) που κινείται με διάφορα ηλεκτρικά μοτέρ και ιμάντες. Οι ιμάντες είναι δε αναλώσιμοι και πρέπει να αντικαθίστανται σε παλαιότερα cd players για να διατηρείται ομαλή η λειτουργία τους. Τα μοτέρ κινούν τόσο το tray φόρτωσης πάνω στο οποίο τοποθετείται ο οπτικός δίσκος όσο και την κεφαλή ανάγνωσης του δίσκου. Ο δίσκος περιστρέφεται επίσης από ένα ηλεκτρικό μοτέρ με ταχύτητα 200 έως 500 Σ.Α.Λ.

Καθώς ο δίσκος περιστρέφεται, ο μηχανισμός εντοπισμού κινεί την κεφαλή ανάγνωσης ακτινικά ή ημικυκλικά ώστε να διαβάσει τα δεδομένα που είναι εγγεγραμμένα στην ανακλαστική επιφάνεια του δίσκου. Ο μηχανισμός ακτινικής μετακίνησης της κεφαλής σχεδιάστηκε αρχικά από τη Sony και είναι ο δημοφιλέστερος. Ο μηχανισμός ημικυκλικής κίνησης της κεφαλής παρουσιάστηκε από την Philips και έχει εμπνευσθεί από τον τρόπο λειτουργίας του πικάπ βινυλίου. Παρακάτω βλέπουμε αυτούς τους δυο τύπους μηχανισμών:



Sony μηχανισμός,



Philips μηχανισμός

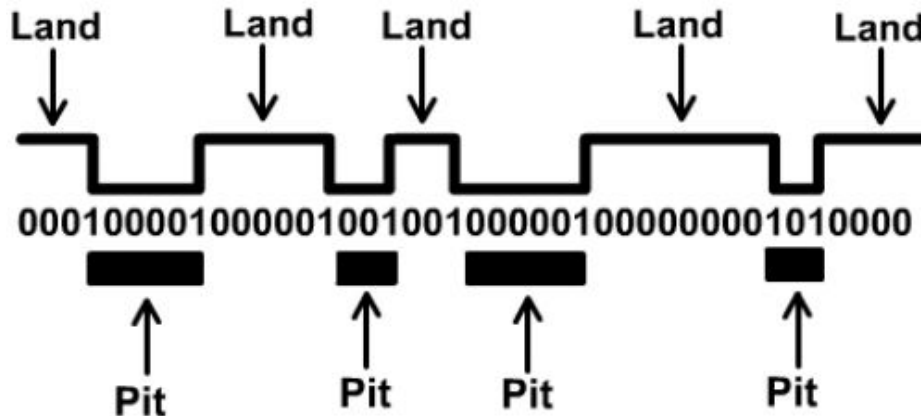
Σχήμα 6.54

Και στους δυο τύπους μηχανισμών, μία φωτοδίοδος τύπου λέιζερ εκπέμπει και εστιάζει μία κόκκινη δέσμη φωτός με μήκος κύματος 780nm προς το δίσκο. Η δέσμη ανακλάται από την επιφάνειά του και λαμβάνεται από μία φωτοευαίσθητη δίοδο που λειτουργεί ως αισθητήρας ανάγνωσης. Ο αισθητήρας ανιχνεύει τις αλλαγές στη δέσμη καθώς αυτή ανακλάται στην επιφάνεια του CD και μια ψηφιακή αλυσίδα επεξεργασίας ερμηνεύει αυτές τις αλλαγές ως δυαδικά δεδομένα. Όπως στους δίσκους βινυλίου, ο οπτικός συμπαγής δίσκος διαθέτει ένα αυλάκι εγγραφής ψηφιακών όμως δεδομένων



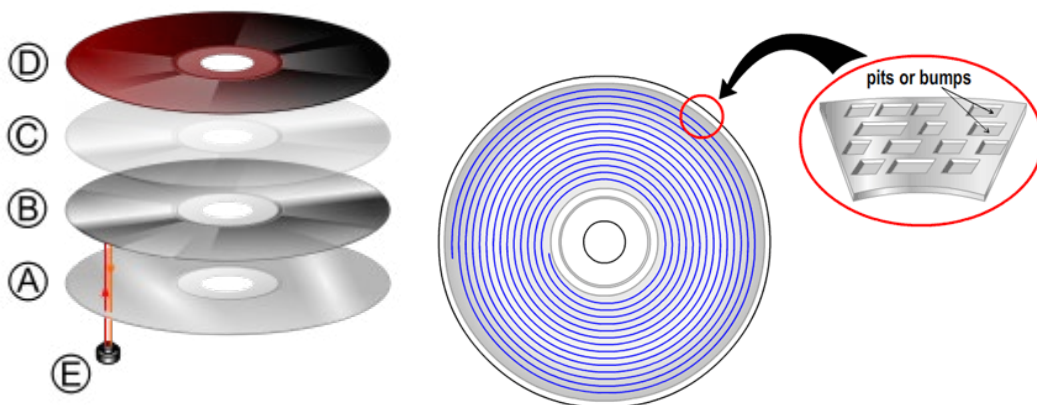
βάθος περίπου 125nm και πλάτους περίπου 600 nm.

Όπως και στους δίσκους βινυλίου, το αυλάκι του CD σχηματίζει μια ενιαία σπείρα για το κομμάτι των δεδομένων, που απλώνεται κυκλικά από το εσωτερικό του δίσκου προς τα έξω. Τα περισσότερα CD αποτελούνται από μια διαφανή πλαστική επιφάνεια, στην οποία εγγράφεται ένα εξαιρετικά μακρύ σπειροειδές κομμάτι δεδομένων. Τα δυαδικά δεδομένα αναπαρίστανται ως κοιλάδες και κορυφές.



Σχήμα 6.55

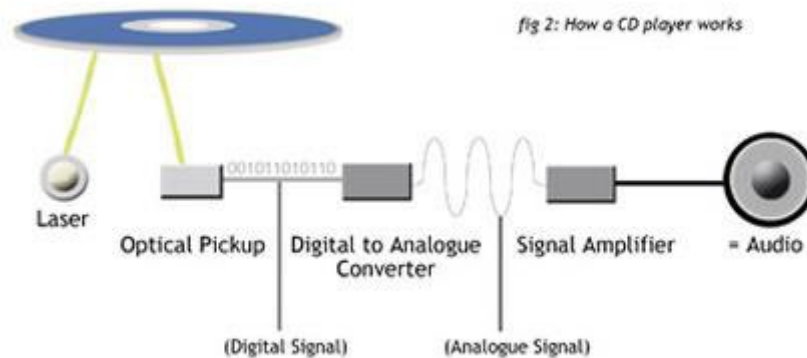
Ένα λεπτό στρώμα αλουμινίου τοποθετηθεί πάνω σε αυτό το πλαστικό, για να προστατεύσει τα δεδομένα και να ανακλά το φως. Στη συνέχεια, ένα λεπτό ακρυλικό στρώμα ψεκάζεται επάνω από το αλουμίνιο για να το προστατεύσει. Η χάρτινη ετικέτα του δίσκου είναι τυπωμένη επάνω στο ακρυλικό στρώμα. Το αυλάκι δεδομένων τα οποία αποτυπώνονται στα πολυανθρακικό στρώμα είναι  $\sim 0.5\mu\text{m}$  ευρύ. Το μικρό πλάτος του καναλιού δεδομένων κάνει τη σπειροειδή τροχιά εξαιρετικά μεγάλη. Αν την απλώσουμε σε μια ευθεία γραμμή, θα είναι 51 εκατοστά σε μήκος.



Σχήμα 6.56

Όταν το φως της δέσμης λέιζερ ανακλάται από την επιφάνεια αλουμινίου του δίσκου, λαμβάνεται από φωτοδιόδους και αυτές παράγουν ένα αναλογικό σήμα υψηλής συχνότητας RF στην έξοδό τους. Το RF σήμα αναπαριστά τις κοιλάδες και κορυφές του αυλακιού δεδομένων. Κατόπιν, το σήμα αυτό ψηφιοποιείται σε δυαδική πληροφορία με τη βοήθεια ενός κυκλώματος συγκριτή. Το ψηφιακό πλέον σήμα μπορεί να αποδιαμορφωθεί καθώς είναι διαμορφωμένο κατά EFM (8-σε-14). Τα δεδομένα που εγγράφονται στους οπτικούς δίσκους χωρίζονται πρώτα σε μπλοκ (ή bytes) των 8 bit και μετέπειτα μεταφράζονται σε κωδικές λέξεις των 14 bit βάσει ενός πίνακα. Τα bytes δεδομένων πάντα χωρίζονται από τουλάχιστον δύο και έως των δέκα δυαδικά μηδενικά ώστε να διευκολύνεται το έργο της κεφαλής ανάγνωσης και να μην εμφανίζονται παραμορφώσεις ή λάθη.

Με την αποδιαμόρφωση του ψηφιακού σήματος δημιουργούνται πλαίσια (frames) δεδομένων. Τα πλαίσια αυτά περιέχουν πληροφορίες για το ηχητικό κομμάτι, bits για τον κυκλικό έλεγχο περιττότητας (CRC) δεδομένων και εντοπισμό λαθών αλλά και δεδομένα προς το μικροεπεξεργαστή του κυκλώματος ελέγχου. Τα δεδομένα ήχου αποθηκεύονται προσωρινά σε μία στατική μνήμη SRAM και ελέγχονται για σφάλματα. Αν εντοπιστούν λάθη σε bits, διορθώνονται αν είναι εφικτό με έλεγχο περιττότητας. Αν δεν είναι εφικτή η διόρθωση, προτιμάται να μην αναπαραχθεί το εν λόγω κομμάτι ήχου στο χρήστη ως θόρυβος αλλά να αντικατασταθεί από παύση/ σιωπή. Τέλος, τα δεδομένα ήχου που έχουν διαβαστεί σωστά, οδηγούνται στον μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (DAC) και από εκεί στην αναλογική έξοδο ήχου του cd player.



Σχήμα 6.57

### 6.7.3 Μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (DAC)

Από την εμφάνιση των CD players το 1982 παρουσιάστηκαν στην αγορά τρεις γενιές. Χαρακτηριστικό της πρώτης γενιάς ήταν οι ψηφιακοί-σε-αναλογικοί μετατροπείς (DAC) πολλών bits με φίλτρα ανασύνθεσης. Της δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούσαν τους ίδιους DAC αλλά και με ψηφιακά φίλτρα υπερδειγματοληψίας. Τέλος, τα σημερινά CD players διαφοροποιούνται κυρίως στο ότι περιέχουν DAC λίγων bits.

Οι DAC μετατροπείς των CD players όταν πρωτοπαρουσιάστηκαν ήταν 14bit το οποίο θεωρούταν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις αναλογικές συσκευές. Ωστόσο, εξακολουθούσαν να είναι μέτριας ποιότητας συγκρινόμενοι με τους μετέπειτα 16bit, 18bit και τους σημερινούς 20bit μετατροπείς.

Ο αριθμός των bits σε ένα DAC μετατροπέα δεν αντικατοπτρίζει απόλυτα την απόδοση και ακρίβειά του. Καλύτερο κριτήριο είναι η ακρίβεια των bits καθ'αυτών. Θεωρητικά ένας 16bit μετατρέπει ακριβώς και τα 16 ψηφία της λέξης του δείγματος με γραμμικό τρόπο. Πρακτικά όμως, δεν είναι επαρκής για ακριβή μετατροπή. Το σφάλμα σε έναν μετατροπέα πολλών bits γενικά εξαρτάται από την ακρίβεια του πιο σημαντικού ψηφίου (MSB) της λέξης του δείγματος. Μια τέτοια ανακρίβεια θα μπορούσε να αποφέρει λάθος ίσο με το μισό του πλάτους του σήματος. Για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει να είναι πυκνά τα επίπεδα κβαντοποίησης.

Έχουν χρησιμοποιηθεί δύο μέθοδοι ανασύνθεσης εξόδου με τους DAC πολλών ψηφίων. Η πρώτη κάνει χρήση του φίλτρου «brickwall». Αυτά τα φίλτρα έχουν χαρακτηριστική απότομης αποκοπής και κρατούν το κέρδος του σήματος κοντά στη μονάδα. Αυτό θεωρήθηκε αναγκαίο καθώς αμέσως πάνω από την ηχητική ζώνη παρουσιάζονταν θόρυβος και aliasing. Το επακόλουθο πρόβλημα του φίλτρου αυτού ήταν η παρουσία μεγάλης μη-γραμμικότητας και καθυστέρησης ομάδων υψηλών συχνοτήτων.

Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται σε ένα ψηφιακό φίλτρο «υπερδειγματοληψίας» τοποθετημένο πριν τον DAC και σε ένα ομαλό αναλογικό φίλτρο. Λέγοντας ομαλό εννοούμε φίλτρο με αποκοπή κλίσης 12dB/οκτάβα και σημείο -3dB στα 30-40kHz. Στην περίπτωση αυτή έχουμε απόλυτη γραμμικότητα στη φάση.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζονταν στους μετατροπείς πολλών ψηφίων αναπτύχθηκαν δύο ανταγωνιστικές τεχνολογίες, μια από τη Matsushita (γνωστή και ως Panasonic) και μια από τη Philips. Και στις δύο τεχνολογίες γίνεται μετατροπή πολύ μικρότερου μήκους λέξεων με υψηλότερο ρυθμό αντί της μετατροπής ολόκληρης της λέξης παράλληλα κατά τη συχνότητα δειγματοληψίας.

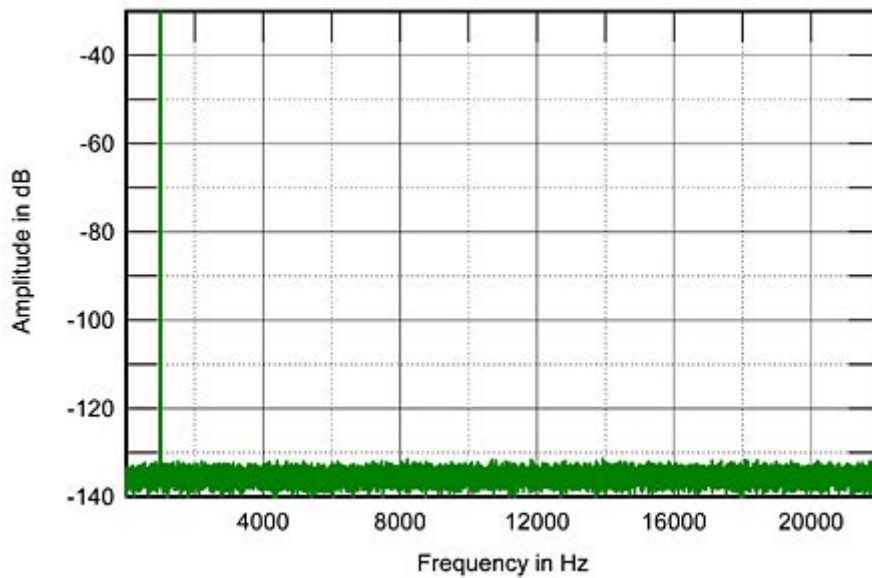
Η μέθοδος της Matsushita στηρίζεται σε διαμόρφωση πλάτους παλμού (pulse-width modulation, PWM). Σε αυτή τη σχεδίαση, το πλάτος του παλμού του σήματος αναπαριστά τη μοναδική λέξη, οπότε είναι σημαντικό τα βήματα της διαμόρφωσης PWM να έχουν το ακριβές πλάτος και το ελάχιστο χρονικό τρεμο-παίξιμο (jitter), έτσι ώστε να αυξάνει η ακρίβεια και η γραμμικότητα της εξόδου. Ο εμπορικός όρος για αυτή τη διαδικασία λέγεται MASH (Multi-stAge noise SHaping). Ένας MASH μετατροπέας κατασκευάζεται από τετραπλά υπερδειγματοληπτικά ψηφιακά φίλτρα παράλληλα με πρώτης και δεύτερης τάξης μορφοποιητές θορύβου. Η έξοδος από αυτούς οδηγείται σε έναν PWM μετατροπέα, του οποίου η έξοδος φιλτράρεται από ένα βαθυπερατό φίλτρο.

Η μέθοδος της Philips είναι γνωστή σαν διαμόρφωση πυκνότητας παλμού (pulse-density modulation PDM). Σε αυτήν την τεχνική ο λόγος πυκνότητας του παλμού σχετίζεται με την πρότυπη 16bit λέξη. Ο μετατροπέας PDM είναι τεχνολογία ενός bit. Τα δεδομένα του δείγματος από τον αποκωδικοποιητή οδηγούνται πρώτα σε ένα βαθυπερατό, τετραπλής υπερδειγματοληψίας και απλής παρεμβολής φίλτρο. Αυτός ο τύπος φίλτρου δίνει υψηλότερη ποιότητα γιατί είναι γραμμικής φάσης. Η μορφοποίηση πρώτης τάξης θορύβου γίνεται από το συσσωρευτή του πολλαπλασιαστή που περιέχεται στο φίλτρο. Το δεύτερο στάδιο φιλτραρίσματος αποτελείται από ένα 32ης-τάξης υπερδειγματοληπτικό γραμμικό παρεμβολέα και από ένα κύκλωμα διπλής υπερδειγματοληψίας δείγματος και κράτησης (sample and hold). Σε αυτό το στάδιο, με την προσθήκη ενός κατάλληλου dither ψηφιακού σήματος θορύβου στο δειγματοληπτούμενο σήμα, μειώνονται οι μη-γραμμικότητες που προκαλούνται από το θόρυβο κβαντοποίησης. Σε αυτό το σημείο η συνολική υπερδειγματοληψία είναι 256ης-τάξης και η λέξη έχει αυξηθεί στα 17 bits. Στη συνέχεια, τα δεδομένα οδηγούνται σε ένα μορφοποιητή θορύβου δεύτερης τάξης, σε συχνότητα 11.2896MHz. Αυτός μειώνει τα 17bit δεδομένα σε ροή δεδομένων του ενός bit χρησιμοποιώντας διαμόρφωση Σίγμα-Δέλτα (Sigma-Delta). Κατά τη διαδικασία αυτή, ο θόρυβος κβαντοποίησης αναδιανέμεται μακριά από την ηχητική συχνότητα. Η ροή των bit τότε μετατρέπεται σε αναλογική μορφή από ένα κύκλωμα διακοπτόμενων πυκνωτών.

## 6.8 Φασματική συγκριτική δοκιμή μεταξύ CD, Flac, AAC και mp3

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάσαμε αναλυτικά τα δημοφιλέστερα μέσα αναπαραγωγής του σήμερα όπως το συμπαγή οπτικό δίσκο CD και τα διάφορα κωδικοποιημένα αρχεία μουσικής. Στη συνέχεια θα δούμε μία συγκριτική δοκιμή που διεξήχθη από τον John Atkinson του [www.stereophile.com](http://www.stereophile.com) το 2008 μεταξύ του ασυμπίεστου περιεχομένου τύπου PCM ενός CD δοκιμής και των συμπιεσμένων μορφών αυτού κατά mp3, acc και flac. Η δοκιμή έχει ως βάση τη φασματική ανάλυση των διαφόρων μορφών.

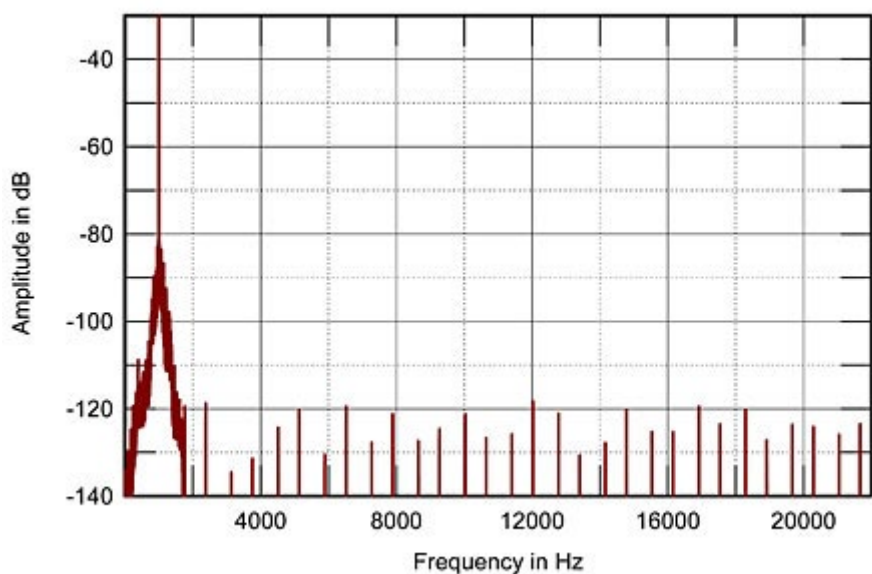
Αρχικά έγινε δοκιμή με ένα CD που περιείχε έναν απλό τόνο στο 1kHz. Το τόνος αυτής της συχνότητας χρησιμοποιείται από τους περισσότερους κατασκευαστές ηχητικού εξοπλισμού για δοκιμές. Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται το φάσμα του αρχικού CD που περιείχε τον τόνο των 1000Hz έντασης -10dBFS. Η κλίμακα του άξονα X των συχνοτήτων είναι γραμμική και η τεχνική κωδικοποίησης του CD ήταν η 16-bit γραμμική PCM. Η κλίμακα του Y άξονα είναι εκφρασμένη σε decibel με 10dB/div.



Σχήμα 6.58

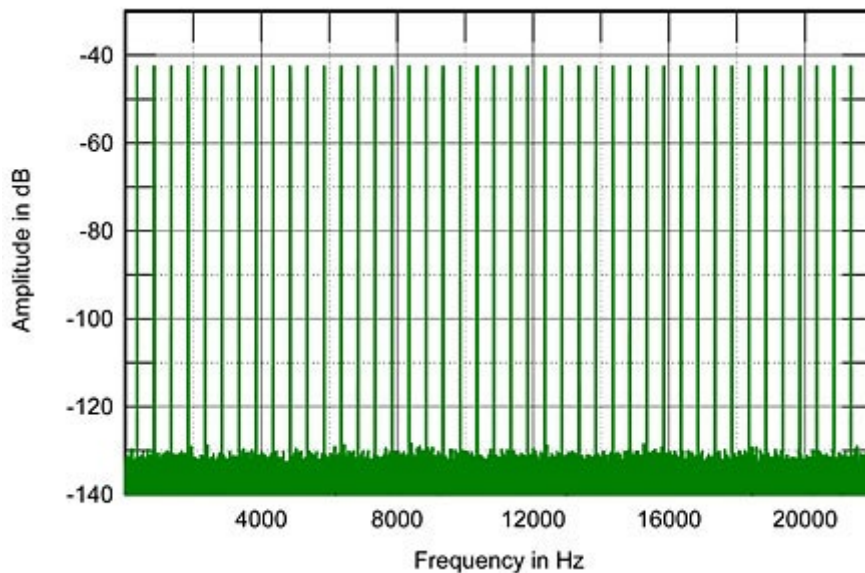
Παρατηρούμε τον τόνο του 1kHz. Δεν υπάρχουν άλλες αρμονικές συχνότητες του τόνου και παρατηρείται μόνο ο θόρυβος της PCM διαδικασίας κωδικοποίησης που βρίσκεται 132dB χαμηλότερα από το μέγιστο πλάτος του επιθυμητού σήματος. Ο σηματοθρομβικός λόγος SNR είναι επομένως περί τα 96dB. Το άνω όριο του φάσματος είναι περί τα 22kHz όπως αναμενόταν λόγω της συχνότητας δειγματοληψίας των 44,1kHz.

Στο επόμενο διάγραμμα παρατηρούμε τον ίδιο τόνο κωδικοποιημένο κατά mp3 με τον κωδικοποιητή του ιστιτούτου Fraunhofer σε σταθερό (CBR) bitrate 128kbps. Ο λευκός θόρυβος έχει πρακτικά εκλείψει καθώς ο κωδικοποιητής απορρίπτει οτιδήποτε δεν αποτελεί σήμα με ένταση πάνω από το εκάστοτε κατώφλι ακουστότητας. Κάτω από τη στάθμη των -80dB παρουσιάζεται όμως μία ασάφεια ως προς τη συχνότητα του τόνου σε σχέση με το ασυμπιεστο pcm σήμα.



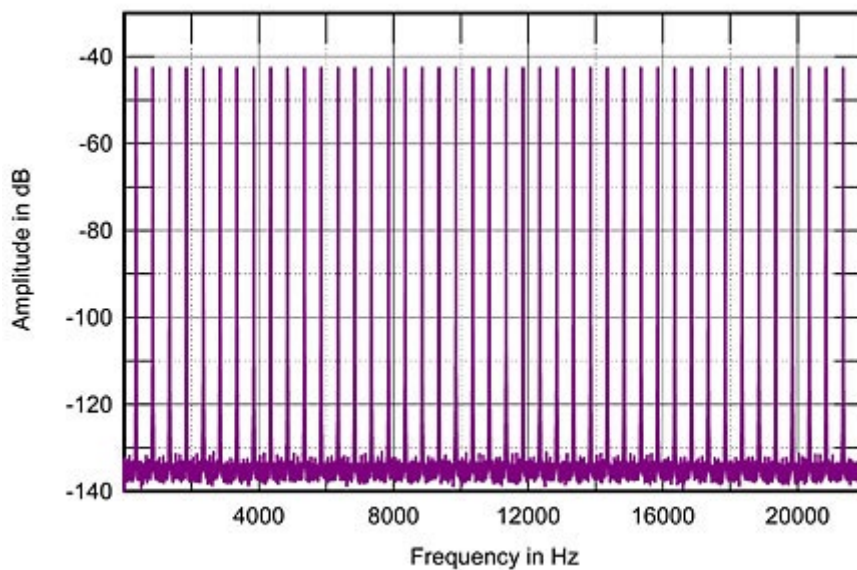
Σχήμα 6.59

Για την επόμενη δοκιμή, χρησιμοποιείται ένα CD που έχει εγγεγραμμένο ένα σήμα δοκιμής που προσομοιώνει ένα μουσικό κομμάτι. Αυτό γίνεται συνδυάζοντας 43 διακριτούς τόνους με 500Hz απόσταση συχνότητας μεταξύ τους. Ο χαμηλότερος συχνότητας τόνος είναι στα 350Hz ενώ ο υψηλότερος συχνότητας στα 21.35kHz. Αυτό το κομμάτι ακούγεται σαν ένα σμήνος από μέλισσες από τον ακροατή, αλλά είναι σημαντικό καθώς αποκαλύπτει εύκολα ελλείψεις των κωδικοποιητών (codexs), όπως νέες ανεπιθύμητες συχνότητες που εμφανίζονται στα φασματικά κενά ανάμεσα στους 43 τόνους. Το ασυμπιεστο σήμα του CD έχει το παρακάτω φάσμα:



Σχήμα 6.60

Στο επόμενο διάγραμμα δίνεται το φάσμα του ίδιου σήματος συμπεσμένου χωρίς απώλειες κατά FLAC στη ρύθμιση μέγιστης συμπίεσης και χαμηλότερης πιστότητας ή «level 8».

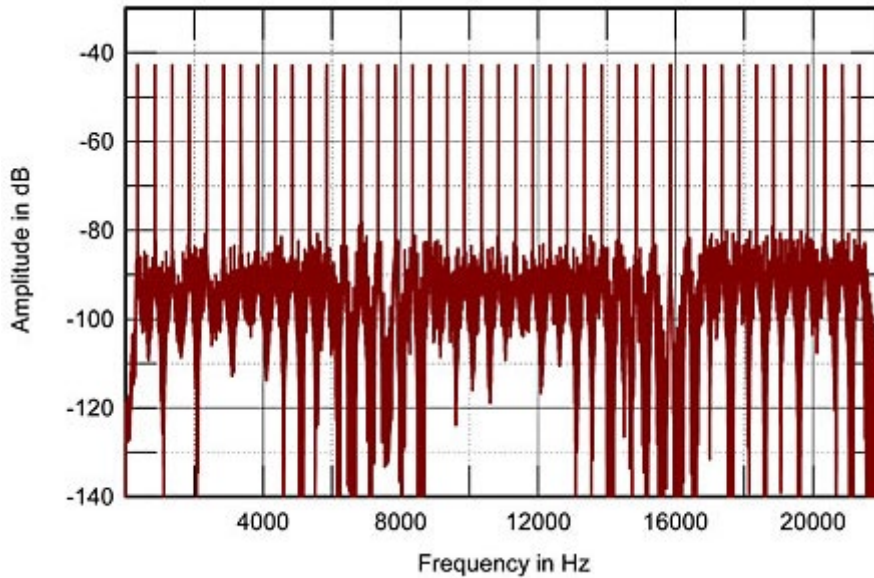


Σχήμα 6.61

Δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ του φάσματος PCM του CD και του συμπεσμένου κατά Flac αρχείου. Το επίπεδο θορύβου του Flac αρχείου είναι ελάχιστα χαμηλότερο μάλιστα. Επομένως, όπως είχαμε στηρίξει και στην αρχική μας ανάλυση, ένα Flac συμπεσμένο αρχείο αποτελεί

μα πιστή αναπαράσταση του αρχικού ασυμπιεστού ψηφιακού pcm σήματος. Η μετατροπή ενός flac αρχείου σε ασυμπιεστο, για την εγγραφή του σε cd (διαδικασία «cd burning») ή το αντίστροφο («cd ripping»), δεν θα δημιουργήσει περιττά φασματικά στοιχεία, ασάφειες στη συχνότητα και θόρυβο.

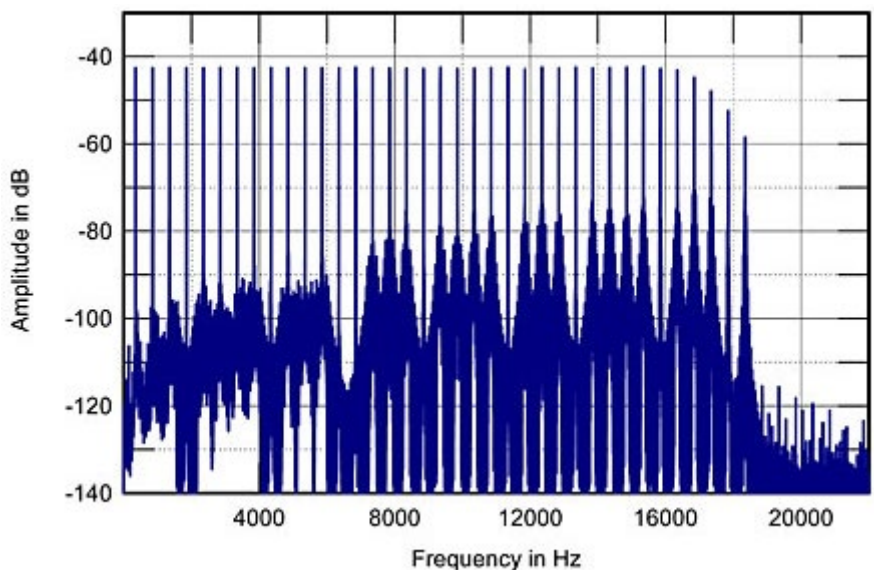
Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται το φάσμα του αρχικού pcm αρχείου όταν κωδικοποιηθεί κατά mp3 με σταθερό ρυθμός 128kbps με τον ίδιο αλγόριθμο Fraunhofer που χρησιμοποιήθηκε και για τον τόνο του 1kHz.



Σχήμα 6.62

Παρατηρούμε πως οι συχνότητες των τόνων έχουν όλες διατηρηθεί στο φάσμα του mp3 αρχείου. Όμως το επίπεδο του θορύβου έχει αυξηθεί από τα -132dB στα -85dB κατά μέσο όρο. Επίσης, γίνεται φανερή η εξάρτηση του επιπέδου θορύβου από τη συχνότητα των τόνων. Το γεγονός αυτό προκαλεί φαινόμενα ενδοδιαμόρφωσης και επομένως παρουσιάζεται παραμόρφωση IMD που γίνεται εύκολα αντιληπτή από το ανθρώπινο αυτί.

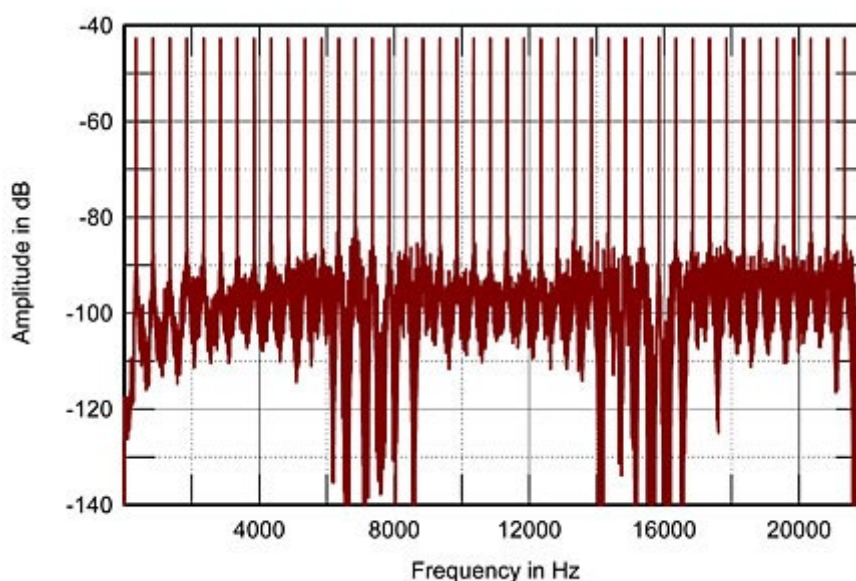
Για να συγκρίνουμε τη μέθοδο συμπίεσης κατά mp3 με την εξελεγμένη μέθοδο AAC, ας δούμε το ίδιο σήμα pcm συμπιεσμένο κατά AAC στα 128kbps:



Σχήμα 6.63

Αμέσως παρατηρούμε ότι οι συχνότητες άνω των 16kHz μειώνονται κατά πλάτος και άνω των 18kHz αποκόβονται. Αυτό το βαθυπερατό φιλτράρισμα της AAC κωδικοποίησης αποτελεί μια σημαντική απώλεια πληροφορίας ως προς το αρχικό σήμα, όμως μοντελοποιεί τη μειωμένη αντίληψη που έχει η πλειονότητα των ενηλίκων ακροατών στις υψηλές συχνότητες ηχητικών σημάτων. Κάτω από τα 4kHz παρατηρούμε μία μείωση του θορύβου κατά 10 έως 20dB σε σχέση με το mp3 ενώ σε συχνότητες άνω των 8kHz το επίπεδο θορύβου είναι υψηλότερο από του mp3. Γίνεται ξεκάθαρο πως η προσπάθεια του AAC κωδικοποιητή είναι να δωθεί μεγαλύτερη ανάλυση και πιστότητα στις συχνότητες όπου το ανθρώπινο αυτί είναι πιο ευαίσθητο. Η κωδικοποίηση aac αναπαριστά σε αυτές τις περιοχές συχνοτήτων το αρχικό σήμα με 2 έως 3 bit μεγαλύτερη ανάλυση από το mp3 αρχείο ίδιου ρυθμού bitrate.

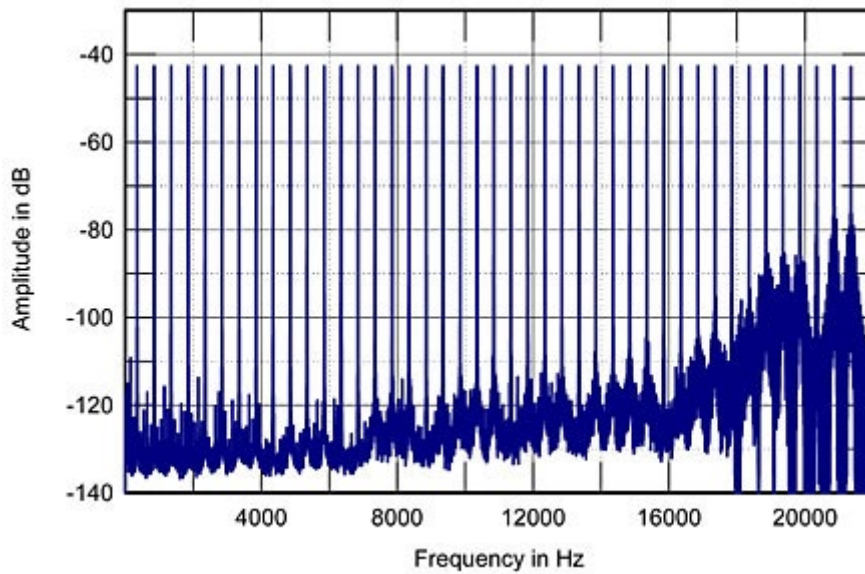
Ας δούμε όμως σε αυτό το σημείο πως μπορεί να βελτιώσει την απόδοση της κωδικοποίησης η αύξηση του ρυθμού bitrate. Στο επόμενο διάγραμμα κωδικοποιήθηκε το αρχικό σήμα τόνων με mp3 σε bitrate 320kbps που είναι το υψηλότερο υποστηριζόμενο από τους περισσότερους από/κωδικοποιητές mp3:



Σχήμα 6.64

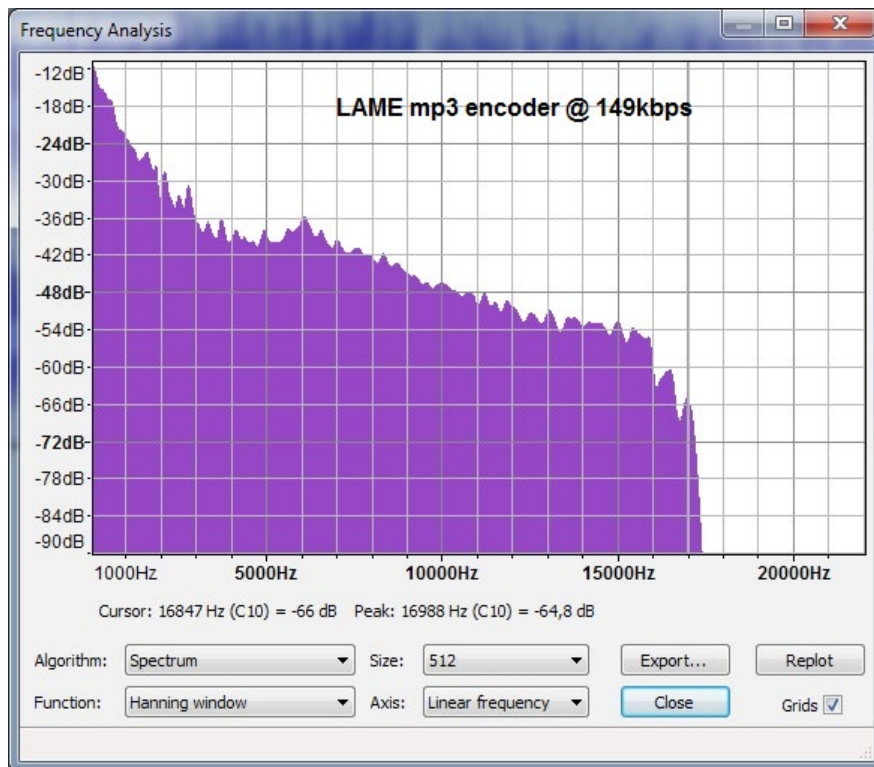
Παρατηρούμε πως και σε αυτή την περίπτωση, όλοι οι τόνοι αναπαράγονται σωστά. Όμως ο θόρυβος έχει μειωθεί κατά περίπου 6dB σε υψηλότερες συχνότητες και έως 15dB σε χαμηλότερες συχνότητες. Αλλά τα επίπεδα θορύβου δεν είναι τόσο χαμηλά όσο του AAC στα 128kbps σε συχνότητες κάτω του 1kHz.

Για την κωδικοποίηση κατά AAC στα 320kbps, το φάσμα δίνεται στο επόμενο διάγραμμα. Παρατηρούμε ότι το επίπεδο θορύβου είναι αρκετά ψηλά για συχνότητες πάνω από 18kHz. Όμως το επίπεδο θορύβου έχει πέσει κάτω από τα -110dB σε συχνότητες χαμηλότερες από 16kHz και κάτω από τα -120dB για τις χαμηλότερες συχνότητες. Αν και μπορεί να δει κανείς κάποια φασματική εξάπλωση στις βάσεις των κάθετων γραμμών που αναπαριστούν τους τόνους, είναι σχετικά ήπια.



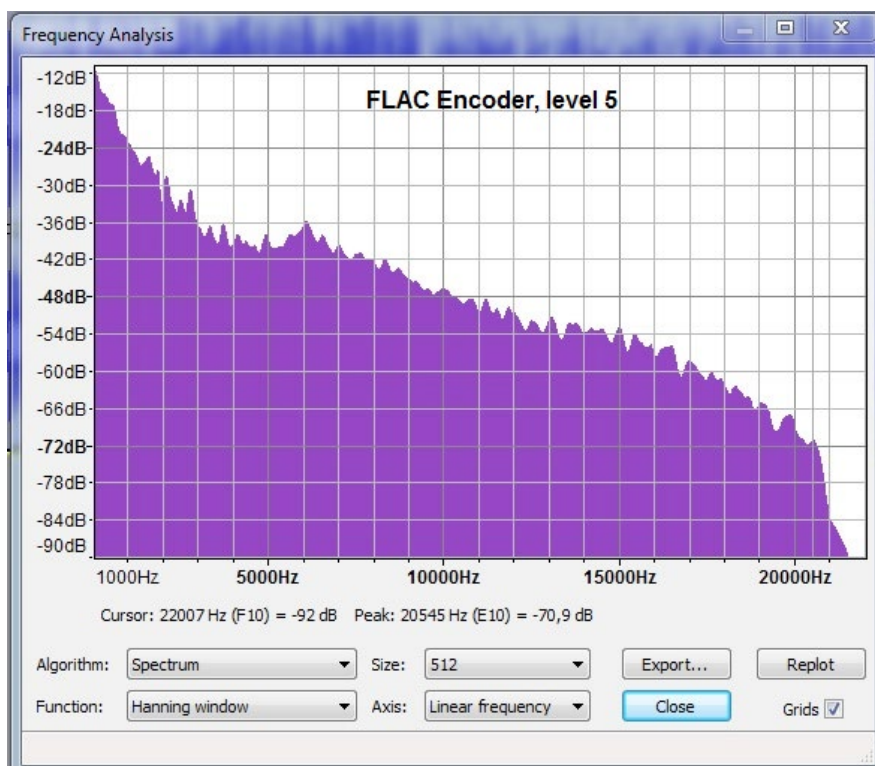
Σχήμα 6.65

Ας δούμε σε αυτό το σημείο και ένα ακόμη παράδειγμα σύγκρισης ενός FLAC αρχείου με ένα mp3 κωδικοποιημένο με τον τελευταίο LAME 3.99r encoder σε μεταβλητό Bitrate (VBR) μέσης τιμής 149kbps. Το κομμάτι που επιλέχθηκε ως πηγή είναι το «Waiting For A Girl Like You (2002 Remaster)» της μπάντας Foreigner από το αυθεντικό CD της Atlantic records που κυκλοφόρησε το 2002. Ας δούμε τη φασματική ανάλυση των δύο αρχείων:



Σχήμα 6.66





Σχήμα 6.67

Παρατηρούμε αμέσως την αποκοπή υψηλών συχνοτήτων που εφαρμόζει ο LAME mp3 κωδικοποιητής. Αποκόβει πλήρως τις συχνότητες πέραν των 17kHz περίπου. Ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι δεν εισαγάγει θόρυβο πέραν αυτής της συχνότητας όπως θα έκαναν άλλοι κωδικοποιητές δεδομένης της συχνότητας δειγματοληψίας στα 44.1kHz. Κατά τα άλλα, τα δύο φάσματα δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές. Αν θέλουμε φυσικά να διατηρήσουμε την πληροφορία που εμπεριέχουν οι υψηλές συχνότητες του κομματιού, η κωδικοποίηση κατά FLAC είναι απαραίτητη. Εντούτοις, το αρχείο FLAC είχε τελικό μέγεθος στο δίσκο 31,3 MB ενώ το mp3 αρχείο είχε 5,17 MB μέγεθος. Με το MP3 είχαμε επομένως μία μείωση του μεγέθους του κωδικοποιημένου αρχείου κατά 83.48%. Η διαφορά αυτή σημαντική αν έχουμε μειωμένο χώρο στο αποθηκευτικό μέσο που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε πως η κωδικοποίηση κατά Flac είναι η πιστότερη διαδικασία και πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που θέλουμε να διατηρήσουμε όσο μεγαλύτερο μέρος της αρχικής πληροφορίας γίνεται. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να ψηφιοποιήσουμε παλιά αναλογικά μέσα όπως ταινίες και δίσκους βινυλίου, η συμπίεση του ψηφιοποιημένου ήχου χωρίς απώλειες είναι η βέλτιστη λύση. Συμβάλλει στην ικανοποιητική διατήρηση του ηχητικού υλικού και παράλληλα στην αποδοτική χρήση των αποθηκευτικών μέσων. Αν δεν υπάρχει θέμα χώρου στα αποθηκευτικά μέσα, η διατήρηση του ασυμπίεστου PCM σήματος είναι η λύση με την υψηλότερη πιστότητα.

Η χρήση απωλεστικών αλγορίθμων συμπίεσης δεν ενδείκνυται για τέτοιες διαδικασίες ψηφιοποίησης και διατήρησης ιστορικών ηχητικών υλικών αλλά είναι ιδανική για τη γρήγορη διακίνηση αρχείων μέσω δικτύων και την αποθήκευση σε φορητά αποθηκευτικά μέσα μικρής χωρητικότητας όπως κάρτες μνήμης και usb flash disks. Οι βελτιωμένοι αλγόριθμοι κωδικοποίησης όπως ο AAC παρέχουν πιστότερη αναπαράσταση του ηχητικού υλικού για την πλειονότητα των ακροατών ακόμη και σε χαμηλότερους ρυθμούς bitrate. Έτσι διατηρείται χαμηλά και το μέγεθος των αρχείων

## 6.9 Στατιστικές συγκριτικές δοκιμές μεταξύ CD και mp3

Μία κατηγορία δοκιμών που χρησιμοποιούνται ευρέως από κατασκευαστές ηχητικού εξοπλισμού, μηχανικούς και ερευνητές ανά τον κόσμο είναι οι δοκιμές ακρόασης ή «listening tests». Οι δοκιμές αυτές γίνονται με διάφορους κανόνες και τα αποτελέσματά τους αναλύονται πάντοτε στατιστικά. Υπάρχουν διάφοροι τύποι δοκιμών ακρόασης και σε κάθε περίπτωση χρειάζεται ένα ακροατήριο και μία κατάλληλη πηγή ήχου. Το ακροατήριο αποτελείται συνήθως από ανθρώπους κάθε γένους και ηλικίας. Σε κάποιες δοκιμές, επιλέγεται ακροατήριο με εξειδίκευση στον τομέα της παραγωγής ήχου ή της μουσικής για να επιτευχθούν συγκεκριμένα αποτελέσματα όπως η βελτίωση αλγορίθμων κωδικοποίησης και συμπίεσης ήχου. Οι δοκιμές ακρόασης είναι ένας τρόπος να αξιολογηθεί αν και κατά πόσο οι διαφορές σε μετρήσιμα μεγέθη και τεχνικά χαρακτηριστικά γίνονται αντιληπτές από το μέσο ακροατή και χρήστη.

Οι τυφλές δοκιμές αναφέρονται σε πειράματα όπου οι ερευνητές μπορούν να δουν τα στοιχεία υπό δοκιμή, όμως τα άτομα που υποβάλλονται στα πειράματα δεν μπορούν να τα δουν. Σε ένα διπλά-τυφλό (double blind) πείραμα, ούτε τα άτομα, ούτε οι ερευνητές γνωρίζουν ποιος ανήκει στην ομάδα ελέγχου και ποιος στην πειραματική ομάδα. Τα άτομα επιλέγονται εντελώς τυχαία να ανήκουν στην μία ή στην άλλη ομάδα και μόνο μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται γνωστό ποιος ανήκει που. Η τεχνική αυτή εξασφαλίζει ένα όσο το δυνατόν αντικειμενικότερο αποτέλεσμα, απαλλαγμένο από προσωπικές προτιμήσεις, απόψεις ή προκαταλήψεις των ερευνητών και εξεταζόμενων που συμμετέχουν στο πείραμα.

Μια συνηθισμένη παραλλαγή της δοκιμής αυτής είναι η δοκιμή ABX. Σε έναν εξεταζόμενο παρουσιάζονται δύο γνωστά δείγματα: το δείγμα A που είναι το στοιχείο αναφοράς και το δείγμα B που είναι μια εναλλακτική λύση. Κατόπιν του δίνεται και ένα άγνωστο δείγμα X άρα παρουσιάζονται συνολικά τρία δείγματα. Το X επιλέγεται τυχαία μεταξύ των δειγμάτων A και B. Ο εξεταζόμενος προσδιορίζει εν τέλει αν το X είναι το A ή το B δείγμα. Στην περίπτωση των αρχείων ήχου, επιλέγεται συνήθως το A να είναι ένα ασυμπίεστο ή χωρίς απώλειες συμπίεσμένο αρχείο και το B να είναι το απωλεστικά συμπίεσμένο αρχείο. Αν ο ακροατής δε μπορεί με σιγουριά να διακρίνει ποιο από τα A ή B είναι το 3<sup>ο</sup> άγνωστο δείγμα «X», τότε λέμε πως για εκείνον ο αλγόριθμος συμπίεσης είναι πρακτικά «διαφανής» καθώς δεν γίνονται αντιληπτές αλλοιώσεις στον ήχο.

Σε άλλες δοκιμές, ζητείται να γίνει σύγκριση μεταξύ διαφόρων δειγμάτων από τον ακροατή ως προς συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Δεν δίνεται δείγμα αναφοράς αλλά γίνεται μία σχετική σύγκριση των διαφόρων δειγμάτων. Αν δεν γνωρίζουν οι ακροατές και οι εξεταστές ποιο δείγμα αναπαράγεται κάθε φορά, έχουμε και πάλι μία διπλά τυφλή δοκιμή.

Μία συγκριτική δοκιμή μεταξύ αρχείων mp3 διαφόρων bitrates και ασυμπίεστων CD μουσικής διεξήγαγε το Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας Μουσικής Μέσων και Τεχνολογίας (CIRMMT) του Schulich School of Music στο Πανεπιστήμιο McGill του Καναδά. Τα αποτελέσματα της δοκιμής και έρευνας παρουσιάστηκαν στην 127η Συνέλευση AES (Audio Engineering Society) στη Νέα Υόρκη στις 10 Οκτωβρίου του 2009. Ο τίτλος της δοκιμής ήταν «Υποκειμενική αξιολόγηση της συμπίεσης mp3 για διαφορετικά μουσικά είδη».

### Προηγούμενες έρευνες είχαν συμπεράνει τα εξής:

«Οι χωρίς εμπειρία ακροατές μπορούν να αντιληφθούν διαφορές μεταξύ ασυμπίεστου και συμπίεσμένου ήχου κατά mp3 μόνο αν το bitrate του mp3 είναι ίσο ή μικρότερο των 96kbps» (Salimpoor, 2006),






«Οι έμπειροι μηχανικοί ήχου προτιμούν την ποιότητα του CD έναντι ακόμη και των mp3 αρχείων με bitrate 320kbps» (Sutherland, 2007),

«Η ανοχή των ακροατών στο bitrate της συμπίεσης mp3 από τα 32 έως τα 192 kbps εξαρτάται από το

είδος μουσικής που έχει κωδικοποιηθεί» (Ruzanski, 2006).

Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, η έρευνα που διεξήχθη από το Πανεπιστήμιο McGill έθεσε ως στόχο να εντοπίσει κατά πόσο οι έμπειροι ακροατές όπως μηχανικοί ήχου και μουσικοί εντοπίζουν καλύτερα τις διαφορές λόγω συμπίεσης ήχου, αν μπορούν να πουν με σαφήνεια ποιες είναι αυτές οι διαφορές και κατά πόσο τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το είδος μουσικής.

Στη δοκιμή συμμετείχαν 4 μουσικοί και 9 μηχανικοί ήχου μέσης ηλικίας 28 ετών. Τους παρουσιάστηκαν 5 μουσικές φράσεις διαφόρων μουσικών ειδών και διάρκειας περί των 10 sec. Οι φράσεις αναφοράς ήταν ασυμπίεστα αρχεία «.wav» και οι συμπίεσμένες εκδοχές τους δημιουργήθηκαν με τον αλγόριθμο mp3 κωδικοποίησης LAME 3.98. Συνολικά παρουσιάστηκαν 6 εκδοχές στους εξεταζόμενους: .wav και .mp3 με bitrate στα 96, 128, 192, 256, 320kbits/s. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι 5 μουσικές φράσεις:

Είδος μουσικής	Τίτλος κομματιού	Συνθέτης	Ερμηνευτές	Παραγωγή
Pop	 Irish Green	Bart Moore	Slings & Arrows	Produced by Daniel Levitin
Metal rock	 Killing in The Name	Rage Against the Machine	Rage Against the Machine	Produced by Garth Richardson
Contemporary	 Diffraction	Yoshihisa Taïra	Quatuor Ixtla	Produced by Amandine Pras
Orchestra	 Symphonie #5	Gustav Malher	Wiener Philharmoniker directed by Pierre Boulez	Deutsche Grammophon
Opera	 Lascia ch'io pianga	George F. Handel	Not listed	Anechoic recording by Angelo Farina, downloaded from <a href="http://www.angelifarina.it">www.angelifarina.it</a>

Σχήμα 6.68

Η ακρόαση έγινε σε εργαστήριο ακροάσεων διαμορφωμένο κατά τα ITU πρότυπα με τον εξής εξοπλισμό:

Έλεγχος/πηγή: Grace m906

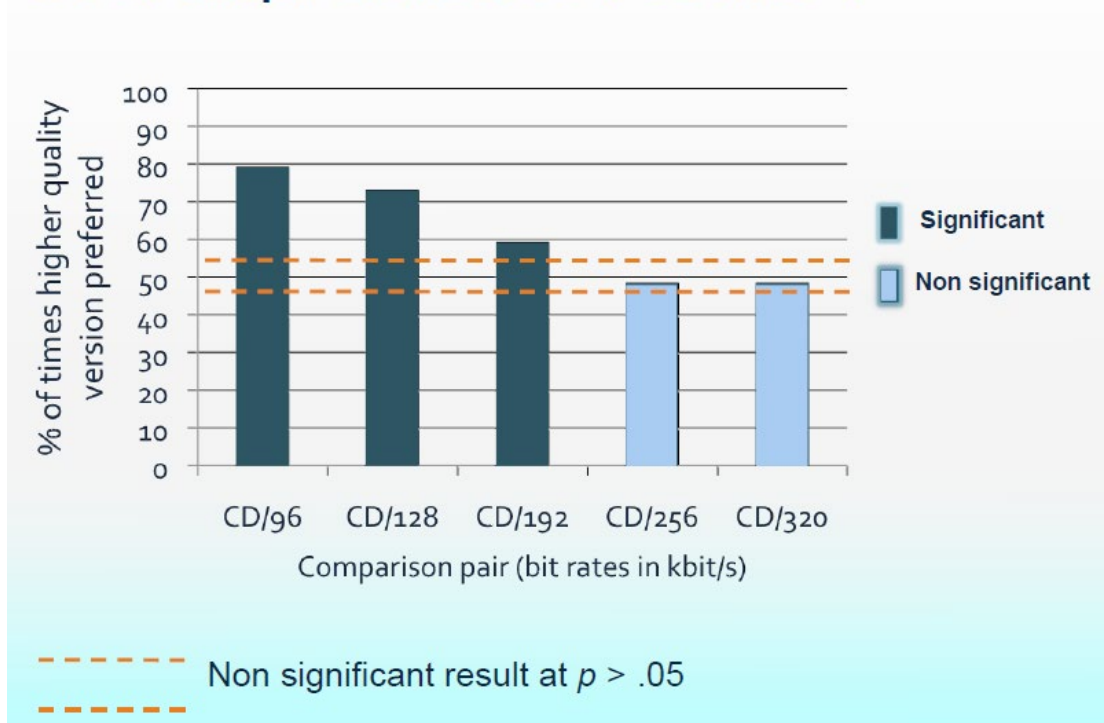
Στερεοφωνικός ενισχυτής: Classé CA-5200

Ηχεία: B&W 902D

### 6.9.1 Αποτελέσματα των δοκιμών και στατιστική ανάλυση με συμπεράσματα

Τα πρώτα αποτελέσματα αφορούν την προτίμηση της ποιότητας ήχου του ασυμπίεστου αρχείου έναντι των συμπίεσμένων μορφών του δίνονται στο παρακάτω γράφημα:

## Overall preference results 1

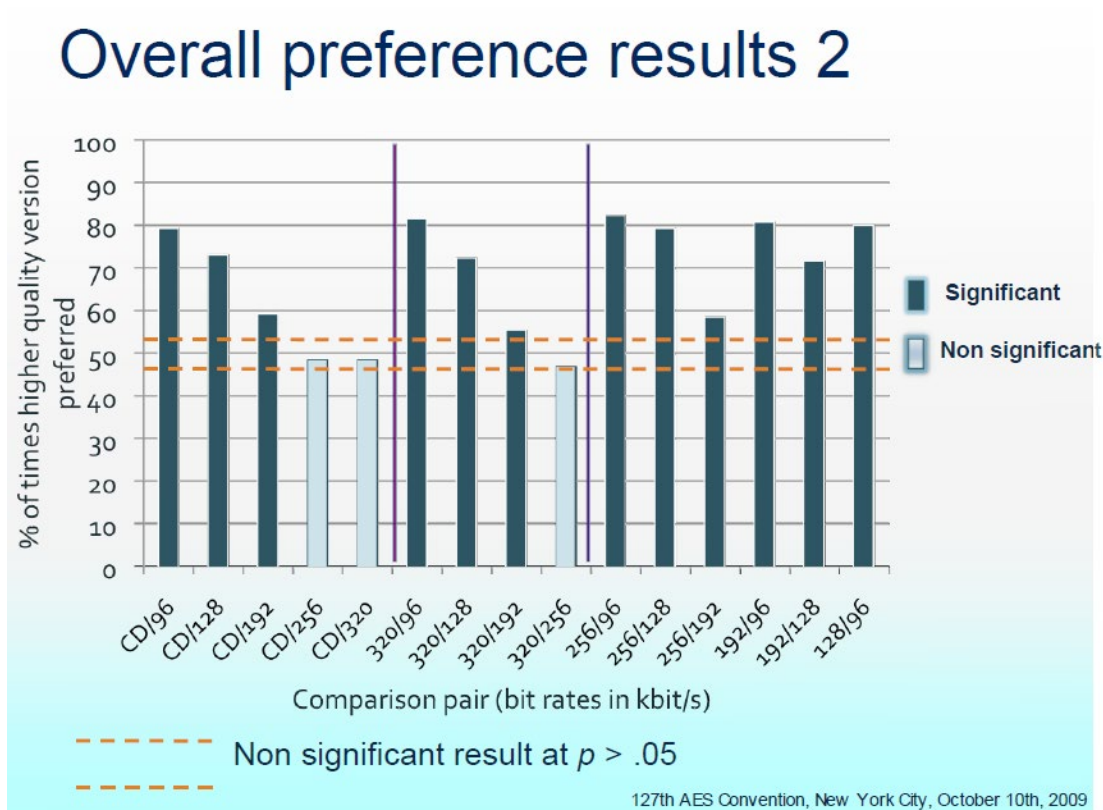


Σχήμα 6.69

Παρατηρούμε πως οι διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ του ασυμπίεστου αρχείου από το CD και των mp3 συμπιεσμένων εκδοχών του, με bitrate 256 και 320kbps, είναι πρακτικά ασήμαντες με p-value μεγαλύτερη από 0,05. Η p-value είναι η στατιστική σημαντικότητα ενός αποτελέσματος. Η τιμή της p-value αντιπροσωπεύει έναν δείκτη της αξιοπιστίας ενός αποτελέσματος. Αν στο ABX τεστ, το δείγμα X δεν μπορεί να προσδιοριστεί αξιόπιστα, με χαμηλή τιμή p-value, σε ένα προκαθορισμένο αριθμό των δοκιμών, τότε δεν μπορεί να αποδειχθεί ότι υπάρχει αισθητή διαφορά μεταξύ των δειγμάτων A και B.

Η πιθανότητα προτίμησης του αρχείου CD υψηλότερης ποιότητας έναντι των mp3 στα 256 και 320kbps είναι ασήμαντη σε αυτή την περίπτωση. Αντίθετα, οι διαφορές ποιότητας γίνονται εντονότερα αντιληπτές και οι ακροατές προτιμούν όλο και περισσότερο την ασυμπίεστη εκδοχή, όσο μειώνουμε το ρυθμό bit κάτω από τα 192kbps.

Στην 2<sup>η</sup> στατιστική ανάλυση έγινε σύγκριση της προτίμησης των ακροατών και μεταξύ των συμπιεσμένων μορφών mp3 σε διαφορετικά bitrates. Τα αποτελέσματα δίνονται στο παρακάτω γράφημα:

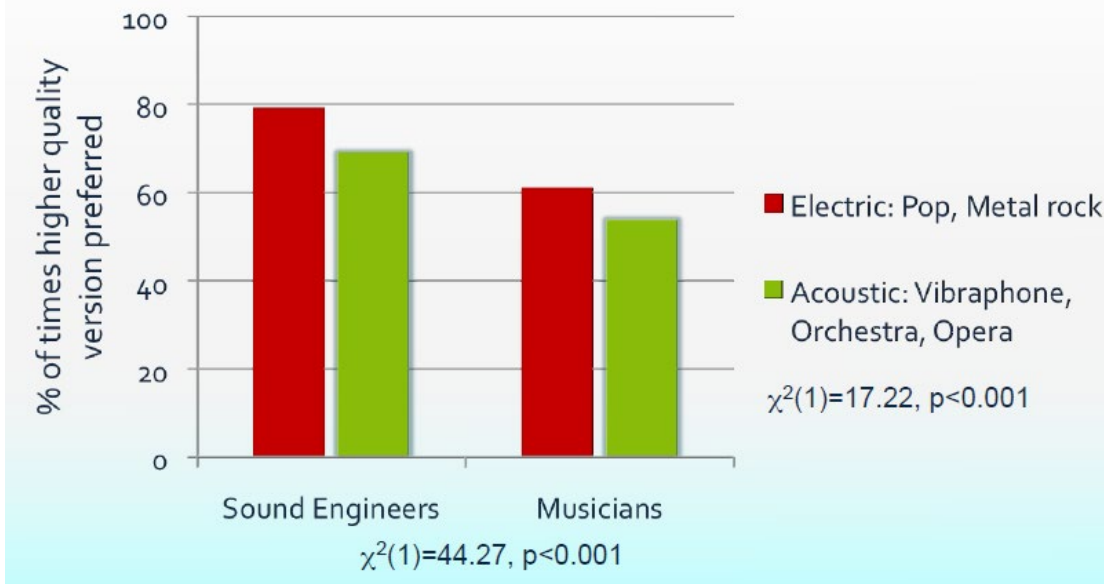


Σχήμα 6.70

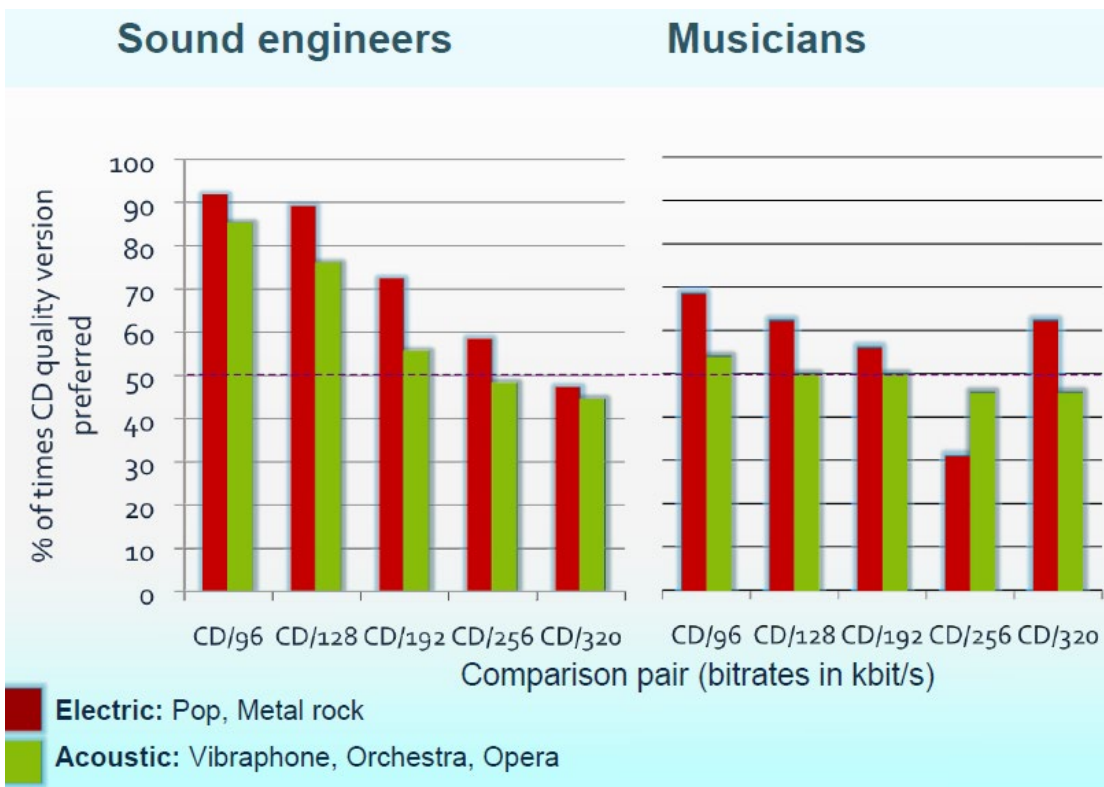
Η πιθανότητα προτίμησης της εκδοχής mp3 των 320kbps έναντι των 256kbps είναι ασήμαντη με  $p\text{-value} > 0,05$ . Αντίθετα, η προτίμηση αυτών των 2 μορφών έναντι εκείνων με χαμηλότερα bitrates είναι ξεκάθαρη.

Κατόπιν, μελετάται στατιστικά η επίδραση που έχει το μουσικό είδος και η πραγματογνωμοσύνη του ακροατή στις προτιμήσεις μορφών αρχείου. Τα αποτελέσματα δίνονται στα παρακάτω γραφήματα:

## Effect on musical genre and expertise

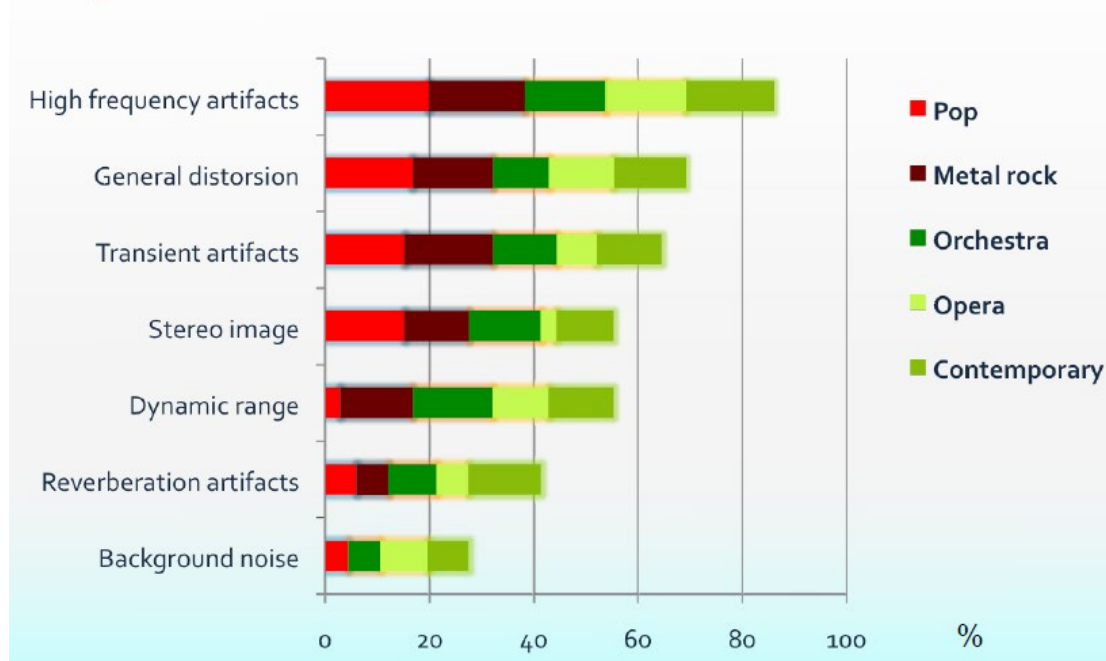


Σχήμα 6.71



Σχήμα 6.72

## Sound criteria



Σχήμα 6.73

### Συμπερασματικά, παρατηρούμε τα εξής:

-Δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μουσικών συνηθειών των ακροατών και τα αποτελέσματά τους για το τεστ ακρόασης. Δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα λόγω σχετικής εμπειρίας του ακροατή σε συγκεκριμένο μουσικό είδος.

-Οι εκπαιδευμένοι ακροατές μπορούν να ακούσουν τις διαφορές μεταξύ του ασυμπίεστου αρχείου ποιότητας CD και της mp3 συμπίεσης στο εύρος bitrate 96 - 192 kbps. Σε αυτή την περίπτωση προτιμούν την ποιότητα του CD.

- Οι ακροατές δεν μπορούν να διακρίνουν ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ της ποιότητας CD και της mp3 συμπίεσης σε εύρος bitrate 256-320 kbps. Οι μηχανικοί ήχου μπορούν να διακρίνουν καλύτερα κάποιες διαφορές, ίσως λόγω σχετικής εμπειρίας με τους διάφορους αλγορίθμους συμπίεσης.

-Η δυνατότητα διάκρισης διαφορών μεταξύ των συμπιεσμένων κι ασυμπίεστων μορφών εξαρτάται από την τεχνογνωσία των ακροατών και το μουσικό είδος του δείγματος. Σε γενικές γραμμές, φαίνεται να γίνεται περισσότερο εμφανής η χαμηλότερη ποιότητα του συμπιεσμένου αρχείου στη σύγχρονη ηλεκτρική μουσική, την pop και τη rock, παρά στην ακουστική μουσική.

- Οι ακροατές μπορούν να εντοπίσουν και να αναφέρουν σχετικές αλλοιώσεις του ήχου όπως διάφορους θορύβους κι ανεπιθύμητα προστιθέμενα στοιχεία, παραμόρφωση, μείωση δυναμικού εύρους, μεταβατικά φαινόμενα, μειωμένη στερεοφωνική εικόνα. Οι αλλοιώσεις αυτές είναι παρούσες σε όλα τα μουσικά είδη και δεν εξαρτώνται ιδιαίτερα από αυτά.

Παρατηρούμε επομένως πως ένας μηχανικός ήχου μπορεί να δει διαφορές μεταξύ ασυμπίεστων και συμπιεσμένων μουσικών αρχείων λόγω της εμπειρίας του αλλά το κοινό που θα καταναλώσει το προϊόν της παραγωγής ήχου δε θα μπορεί να διακρίνει έντονα αυτές τις διαφορές ακόμη κι αν έχει μουσική εμπειρία. Σε αυτή την παρατήρηση στηρίζονται πολλές εταιρίες διανομής ψηφιακού περιεχομένου μουσικής που εκμεταλλεύονται την υψηλού bitrate mp3 κωδικοποίηση.

Η ακρόαση ενός μουσικού album σε μορφή mp3 στα 320kbps από ένα μέσο ακροατή δε θα εμφανίσει

ιδιαίτερες ελλείψεις πιστότητας στον ήχο έναντι του αντίστοιχου CD. Έτσι, μια δισκογραφική εταιρία μπορεί να επωφεληθεί από την έλλειψη κόστους κοπής και φυσικής διανομής των CD, διαθέτοντας διαδικτυακά τα album καλλιτεχνών σε μορφή mp3 που απαιτούν χαμηλότερο εύρος ζώνης μετάδοσης και μικρότερο αποθηκευτικό χώρο.

## 6.10 Στατιστικές δοκιμές μεταξύ κωδικοποιητών MP3

Οι mp3 κωδικοποιητές συνεχώς εξελίσσονται και οι νεότεροι αλγόριθμοι συμπίεσης είναι αποδοτικότεροι και παρουσιάζουν πιστότερη αναπαραγωγή ήχου για σχεδόν ίδιο μέγεθος αρχείων και ίδιους ρυθμούς bitrate. Ο πρώτος mp3 encoder, ο L3enc (level three encoder) του 1994, είχε σαφώς χαμηλότερες επιδόσεις από τους σημερινούς, κάτι που μπορεί να φανεί και μέσα από μία διπλά τυφλή συγκριτική δοκιμή ακρόασης μεταξύ διαφόρων mp3 κωδικοποιητών:

Στη δημόσια δοκιμή που πραγματοποιήθηκε από τον Roberto Amorim τον Οκτώβριο του 2008, χρησιμοποιήθηκαν αρχεία μουσικής που κωδικοποιήθηκαν με τους παρακάτω encoders:

- [LAME](#) 3.98.2  
-V5.7
- [LAME](#) 3.97  
-V5 --vbr-new
- [iTunes](#) 8.0.1.11  
*112 kbps, VBR, highest quality, joint stereo, smart coding, filter below 10 Hz*
- [Fraunhofer IIS mp3surround CL encoder v1.5](#)  
*-br 0 -m 4 -q 1 -vbri -ofl*
- [Helix](#) 2005.08.09  
v5.1  
*-X2 -U2 -V60*
- [l3enc](#) (Low Anchor)  
0.99a  
*-br 128000 -mod 1*

Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό εκτέλεσης ενός ABC/HR τεστ. Σε μια δοκιμή ABC/HR, το C είναι το πρωτότυπο που είναι πάντα στη διάθεση του εξεταζόμενου ως αναφορά. Τα A και B είναι η αρχική και η κωδικοποιημένη έκδοση σε τυχαία σειρά. Ο ακροατής πρέπει πρώτα να διακρίνει το κωδικοποιημένο αρχείο από το πρωτότυπο (που είναι το κρυφό, το HR σημαίνει κρυμμένη αναφορά, Hidden Reference), πριν κάνει μια υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας. Διαφορετικές κωδικοποιημένες εκδόσεις μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους με τη χρήση αυτής της τεχνικής.

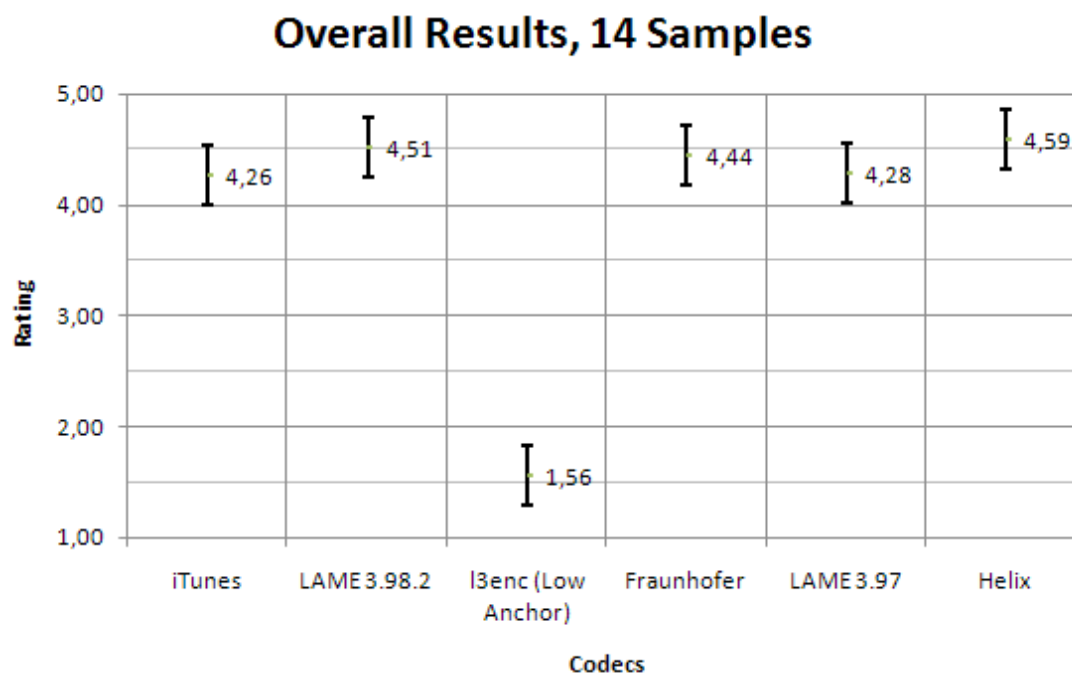
Αυτά είναι τα μουσικά κομμάτια είναι οι ρυθμοί bit που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή:



Δείγμα(διάρκεια σε sec)	iTunes	LAME 3.98.2	l3enc	Fraunhofer	LAME 3.97	Helix
finalfantasy (30)	118	107	128	119	97	114
Vangelis_Chariots_of_Fire (15)	117	149	128	121	126	110
linchpin (24)	139	143	128	139	138	126
Waiting (20)	145	140	128	140	149	151
Pet_Shop_Boys_In_The_Night (27)	133	138	128	144	146	149
atrain (19)	125	143	128	149	150	151
TomsDiner (20)	141	109	128	134	95	131
macabre (17)	120	136	128	128	147	138
White_Stripes_Hypnotize (15)	126	118	128	129	109	97
Layla (20)	148	152	128	147	158	152
sfbay (15)	151	145	128	134	149	117
fatboy_30sec (29)	192	214	128	212	194	228
Castanets_Original (7)	159	146	128	151	133	143
velvet (12)	158	156	128	163	159	173
Average: (19)	141	143	128	144	139	141
Encoding Speed:	25x	27x	1.63x	45x	18x	90x

Πίνακας 6.9

Κατόπιν έγινε αξιολόγηση από το κοινό στην κλίμακα του 5 για την ηχητική ποιότητα των δειγμάτων. Με ανάλυση τύπου ANOVA, σχεδιάστηκαν γραφήματα αξιολόγησης της ποιότητας ήχου κάθε κομματιού με 95% εμπιστοσύνη του αποτελέσματος. Κάθε κατακόρυφο τμήμα γραμμής αντιπροσωπεύει το διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Τα αποτελέσματα των αξιολογήσεων δίνονται στο παρακάτω γράφημα:



Σχήμα 6.74

Γίνεται αμέσως ολοφάνερη η βελτίωση που έχει γίνει στο σχεδιασμό των mp3 αλγορίθμων από το 1994 έως σήμερα από τη χαμηλότερη θέση του l3enc στη βαθμολογία. Επίσης, ο lame 3.98.2 παρουσιάζει μικρές βελτιώσεις στην ποιότητα σε σχέση με τον lame 3.97. Κατά τα άλλα, οι σύγχρονοι κωδικοποιητές έχουν όλοι εφάμιλλη απόδοση.

## Παράρτημα 6Α: Κώδικας MP3 συμπίεσης

Ένας από τους απλούστερους κωδικοποιητές ασυμπίεστων αρχείων «.wav» σε συμπιεσμένη μορφή «.mp3» είναι ο «Shine» που αναπτύχθηκε από τον Gabriel Bouvigne της LAME. Η προηγούμενη μορφή του «Shine» κωδικοποιητή ήταν η «8hz-MP3». Ο κώδικας έχει εγγραφεί σε γλώσσα προγραμματισμού «C». Μπορεί να υλοποιηθεί πολύ απλά με το εξής κυρίως (main) πρόγραμμα αρκεί να έχει γίνει εισαγωγή των αντίστοιχων βιβλιοθηκών και συναρτήσεων προηγουμένως. Οι αντίστοιχες βιβλιοθήκες του «Shine» κωδικοποιητή μπορούν να βρεθούν στο παρακάτω σύνδεσμο:

<https://github.com/kikko/Shine-MP3-Encoder-on-AS3-Alchemy/tree/master/lib/shine>

Πρόγραμμα βασικής συνάρτησης (main.c) για την κωδικοποίηση σε mp3 με τον Shine encoder:

```

/
/
Shine
is an
MP3
encod-
er

// Copyright (C) 1999-2000 Gabriel Bouvigne
//
// This library is free software; you can redistribute it and/or
// modify it under the terms of the GNU Library General Public
// License as published by the Free Software Foundation; either
// version 2 of the License, or (at your option) any later version.
//
// This library is distributed in the hope that it will be useful,
// but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
// MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU
// Library General Public License for more details.

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <time.h>

#include «types.h»
#include «error.h»
#include «wave.h»
#include «layer3.h»

#include «AS3.h»

config_t config;

static void print_header()
{
    fprintf(stderr,»Shine 0.1.4»);
}

static void set_defaults()
{
    config.byte_order = DetermineByteOrder();
    if(config.byte_order==order_unknown) ERROR("Can't determine byte or-
der");

    config.mpeg.type = 1;
    config.mpeg.layr = 2;
    config.mpeg.mode = (config.wave.channels==1) ? MODE_MONO :MODE_STEREO;
    config.mpeg.bitr = 128;
    config.mpeg.psync = 2;
    config.mpeg.emph = 0;
    config.mpeg.crc = 0;
    config.mpeg.ext = 0;
    config.mpeg.mode_ext = 0;
    config.mpeg.copyright = 0;
    config.mpeg.original = 1;
}

static int find_samplerate_index(long freq)
{
    static long mpeg1[3] = {44100, 48000, 32000};
    int i;

```

```

    for(i=0;i<3;i++)
        if(freq==mpeg1[i]) return i;

    ERROR(«Invalid samplerate»);
    return -1;
}

static int find_bitrate_index(int bitr)
{
    static long mpeg1[15] = {0,32,40,48,56,64,80,96,112,128,160,192,224,256,320};
    int i;

    for(i=0;i<15;i++)
        if(bitr==mpeg1[i]) return i;

    ERROR(«Invalid bitrate»);
    return -1;
}

static void check_config()
{
    static char *mode_names[4] = { "stereo", "j-stereo", "dual-ch", "mono" };
    static char *layer_names[3] = { "I", "II", "III" };
    static char *version_names[2] = { "MPEG-II (LSF)", "MPEG-I" };
    static char *psy_names[3] = { "", "MUSICAM", "Shine" };
    static char *demp_names[4] = { "none", "50/15us", "", "CIT" };

    config.mpeg.samplerate_index = find_samplerate_index(config.wave.samplerate);
    config.mpeg.bitrate_index = find_bitrate_index(config.mpeg.bitr);

    fprintf(stderr, "%s layer %s, %s Psychoacoustic Model: %s",
            version_names[config.mpeg.type],
            layer_names[config.mpeg.layer],
            mode_names[config.mpeg.mode],
            psy_names[config.mpeg.psy]);
    fprintf(stderr, "Bitrate=%d kbps ", config.mpeg.bitr);
    fprintf(stderr, "De-emphasis: %s %s %s\n",
            demp_names[config.mpeg.emph],
            ((config.mpeg.original)?»Original»:»»),
            ((config.mpeg.copyright)?»(C)»:»»));
}

// ALCHEMY UTILS

int readByteArray(void *cookie, char *dst, int size)
{
    return AS3_ByteArray_readBytes(dst, (AS3_Val)cookie, size);
}

int writeByteArray(void *cookie, const char *src, int size)
{
    return AS3_ByteArray_writeBytes((AS3_Val)cookie, (char *)src, size);
}

fpos_t seekByteArray(void *cookie, fpos_t offs, int whence)
{
    return AS3_ByteArray_seek((AS3_Val)cookie, offs, whence);
}

int closeByteArray(void * cookie)
{
    AS3_Val zero = AS3_Int(0);

    /* just reset the position */
    AS3_Set((AS3_Val)cookie, "position", zero);
    AS3_Release(zero);
    return 0;
}

static AS3_Val init(void * self, AS3_Val args)
{
    void * ref;
    void * src;
    void * dest;
}

```

```

AS3_ArrayValue(args, "AS3ValType, AS3ValType, AS3ValType", &ref,
&src, &dest);
flashErrorsRef = (AS3_Val)ref;
config.wave.file = fopen((void *)src, readByteArray, writeByteAr-
ray, seekByteArray, closeByteArray);
config.wave.output = fopen((void *)dest, readByteArray, write-
ByteArray, seekByteArray, closeByteArray);
if (config.wave.file == NULL || config.wave.output == NULL) {
ERROR("Unable to set bytes arrays");
}
wave_open();
set_defaults();
check_config();
start_compress();
return AS3_Int(1);
}

static AS3_Val update(void* self, AS3_Val args) {
int statut = update_compress();
if(statut==100) wave_close();
return AS3_Int(statut);
}

int main(int argc, char **argv)
{
print_header();

// set convert & update methods visible to flash
AS3_Val convertMethod = AS3_Function( NULL, init );
AS3_Val updateMethod = AS3_Function( NULL, update );

AS3_Val result = AS3_Object( "init:AS3ValType, update: AS3ValType",
convertMethod, updateMethod );

AS3_Release( convertMethod );
AS3_Release( updateMethod );

// notify that we initialized -- THIS DOES NOT RETURN!
AS3_LibInit( result );

return 0;
}

```

## Παράρτημα 6B: Τεχνικές λεπτομέρειες αλγορίθμων συμπίεσης του ήχου με απώλειες

Μορφή συμπίεσης ήχου	Αλγόριθμος	Ρυθμός Δειγματοληψίας	bitrate	Latency	cBR	VBR	Στερεοφωνία	Πολλαπλά κανάλια
AAC	MDCT , Hybrid υποζώνης (AAC-HE)	8-192 kHz	8-529 kbit / s (στερεοφωνικά)	20 έως 405 ms	Ναί	Ναί	Ναι: Διπλή, Mid / Side, Ένταση, Παραμετρικός	Ναι: Έως 48 κανάλια
AC3	MDCT	32, 44,1, 48 kHz	32 έως 640 kbit / s	40.6 ms	Ναί	Όχι	Ναί	Ναι: Έως 6 κανάλια
AMBE	;	8 kHz	2, 9.6 kbit / s	;	;	;	;	;
AMR	ACELP	8 kHz	4.75, 5.15, 5.90, 6.70, 7.40, 7.95, 10.20, 12.20 kbit / s	25 ms	Ναί	Ναί	Όχι	Όχι
AMR-WB (G.722.2)	ACELP	16 kHz	6.60, 8.85, 12.65, 14.25, 15.85, 18.25, 19.85, 23.05, 23.85 kbit / s	25 ms	Ναί	Ναί	Ναι μόνο σε MPEG-4 μέρος 12 του δοχείου	Όχι
AMR-WB +	ACELP	8, 11,025, 16, 22,05, 32, 44,1, 48 kHz	6-36 kbit / s (μονο) 7-48 kbit / s (στερεοφωνικά)	60-90 ms	Ναί	Ναί	Ναί	Όχι
apt-X	Υποζώνης	24-48 kHz (στερεοφωνικά)	192-384 kbit / s (στερεοφωνικά)	2 ms	Ναι (4: 1)	Όχι	Ναί	Ναι: Έως 8 κανάλια
ATRAC1	MDCT –Υβριδική υποζώνης	44,1 kHz	292 kbit / s	> 100 ms	Ναί	Όχι	Ναι: Διπλή μόνο	Όχι
ATRAC3	MDCT –Υβριδική υποζώνης	44,1 kHz	66, 105, 132, 146, 176, 264, 352 kbit / s	> 100 ms	Ναί	Όχι	Ναι: Διπλή (LP2), Mid / Side (LP4)	Όχι
ATRAC3plus	MDCT –Υβριδική υποζώνης	44,1 kHz	48 έως 352 kbit / s	> 100 ms	Ναί	;	Ναί	Ναι: Έως 6 κανάλια
BroadVoice (BV16, BV32)	Δύο Σταδίων Κωδικοποίηση ανάδρασης θορύβου (TSNFC)	8, 16 kHz	16, 32 kbit / s	5 ms	Ναί	Όχι	Όχι	Όχι
Codec2	Ομιλία	8 kHz	1.2, 1.4, 2.4, 2.55 kbit / s	20-40 ms	Ναί	Όχι	Όχι	Όχι
GSM-HR	VSELP	8 kHz	5.6 kbit / s	25 ms	Ναί	Όχι	Όχι	Όχι

Μορφή συμπίεσης ήχου	Αλγόριθμος	Ρυθμός Δειγματοληψίας	bitrate	Latency	CBR	VBR	Στερεοφωνία	Πολλαπλά κανάλια
GSM-FR	RPE-LTP	8 kHz	13 kbit / s	20-30 ms	Ναί	Όχι	Όχι	Όχι
GSM-EFR	ACELP	8 kHz	12,2 kbit / s	20-30 ms	Ναί	Όχι	Όχι	Όχι
HVXC	Ομιλία	8 kHz	2, 4 kbit / s	36 ms	Ναί	Ναί	Όχι	Όχι
iLBC	Αποκλεισμός Ανεξάρτητη LPC	8 kHz	13.33, 15.20 kbit / s	25, 40 ms	Ναί	Όχι	Όχι	Όχι
Isac	Η κωδικοποίηση μετασχηματισμού	16, 32 kHz	10-52 kbit / s	33, 63 ms	Ναί	Ναί	Όχι	Όχι
MP3 (MPEG-1, 2, 2.5 Audio Layer III)	MDCT , Υβριδικά υποζώνης	8, 11.025, 12, 16, 22,05, 24, 32, 44,1, 48 kHz	8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 144, 160, 192, 224, 256, 320 kbit / s	> 100 ms	Ναί	Ναί	Ναι: Διπλή, Mid / Side, Ένταση	Όχι
MPEG-1 Audio Layer II (MP2)	Υποζώνης	32, 44,1, 48 kHz	32, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 320, 384 kbit / s		Ναί	Ναι	Ναι: Διπλή, Ένταση	Όχι
MPEG-2 Audio Layer II (MP2)	Υποζώνης	16, 22,05, 24 kHz	8, 16, 24, 32, 40,48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 144, 160 kbit / s		Ναί	Ναι	Ναί	Ναι: έως 5 κανάλια ήχου πλήρους εύρους και ένας LFE καναλιών με MPEG Multichannel
Musepack	Υποζώνης	32, 37,8, 44,1, 48 kHz	3-1300 kbit / s	;	Όχι	Ναί	Ναί	Ναι: Έως 8 κανάλια
Έργο	LP , MDCT	8-48 kHz	6-510 kbit / s	5 έως 66,5 ms	Ναί	Ναί	Ναί	Ναι: Έως 255 κανάλια
RealAudio	MDCT	Ποικίλλει	Ποικίλλει	Ποικίλλει	Ναί	Ναί	Ναί	Ναι: Έως 6 κανάλια

Μορφή συμπίεσης ήχου	Αλγόριθμος	Ρυθμός Δειγματοληψίας	bitrate	Latency	CBR	VBR	Στερεοφωνία	Πολλαπλά κανάλια
SILK	LTP	8, 12, 16, 24 kHz	6-40 kbit / s	25 ms	Ναί	;	;	;
Siren 7	Προέρχεται από PT716plus, MLT	16 kHz	16, 24, 32 kbit / s	40 ms	Ναί	Όχι	Όχι	Όχι
Siren 14	MLT	32 kHz	24, 32, 48 kbit / s (μονο) 48, 64, 96 kbit / s (στερεοφωνικά)	40 ms	Ναί	Όχι	Ναί	Όχι
Siren 22	MLT	48 kHz	32, 48, 64 kbit / s (μονο) 64, 96, 128 kbit / s (στερεοφωνικά)	40 ms	Ναί	Όχι	Ναί	Όχι
Speex	CELP	8, 16, 32, (48) kHz	2,15 έως 24,6 kbit / s ( NB ) 4 - 44,2 kbit / s ( WB )	30 ms (NB) 34 ms (WB)	Ναί	Ναί	Ναι: Ένταση	Ναί
VMR-WB	ACELP	16 kHz	8.55, 4.0, 0.8, 13.3, 6.2, 2.7, 1.0 kbit / s	33,75 ms	Ναί	Ναί	;	;
Vorbis ( Ogg )	MDCT	1 Hz έως 200 kHz	μεταβλητός	> 100 ms	Ναι / ABR	Ναί	Ναι: Διπλή, χωρίς απώλειες, Φάση, σημείο ( Ένταση )	Ναι: Έως 255 κανάλια
WavPack με απώλειες	Πρόβλεψη, Κβαντοποίηση	1 Hz έως 16,777216 MHz	196 kbit / s και σε απώλειες λειτουργία (για CD ήχου)	;	Ναί	Ναί	Ναί	Ναι: Έως 256 κανάλια
Windows Media Audio Πρότυπο	MDCT	8, 11,025, 16, 22,05, 32, 44,1, 48 kHz	8 έως 768 kbit / s	> 100 ms	Ναί	Ναί	Ναί	Όχι
Windows Media Audio Pro	MDCT	8, 11,025, 16, 22,05, 32, 44.1, 48, 88.2, 96 kHz	4 έως 768 kbit / s	> 100 ms	Ναί	Ναί	Ναί	Ναι: Τουλάχιστον 8 κανάλια, επεκτάσιμη

## Παράρτημα 6Γ: Τεχνικές λεπτομέρειες αλγορίθμων συμπίεσης του ήχου χωρίς απώλειες (lossless)

Μορφή συμπίεσης:	Αλγόριθμος	Ρυθμός δειγματοληψίας	Bits ανά δείγμα	Καθυστέρηση	Στερεοφωνία	Πολυκαναλικό
<a href="#">ALAC</a>	<a href="#">Lossless</a>	1–384000 Hz	16, 20, 24, 32	-	Ναι	Ναι: ως 8 κανάλια
<a href="#">FLAC</a>	<a href="#">Lossless</a>	1–655350 Hz	8, 16, 20, 24, 32	4.3–92 ms (46.4 ms typical)	Ναι	Ναι: ως 8 κανάλια
<a href="#">Monkey's Audio</a>	<a href="#">Lossless</a>	8, 11.025, 12, 16, 22.05, 24, 32, 44.1, 48, 96 kHz	8, 16, 24	-	Ναι	Όχι
<a href="#">RealAudio Lossless</a>	<a href="#">Lossless</a>	Ποικίλει	Ποικίλει	Ποικίλει	Ναι	Ναι: ως 6 κανάλια
<a href="#">True Audio (TTA)</a>	<a href="#">Lossless</a>	0–4 GHz	1 to > 64	1045 ms (τυπικά)	Ναι	Ναι: ως 65535 κανάλια
<a href="#">WavPack Lossless</a>	<a href="#">Lossless</a> , γβριδικός	1 Hz to 16.777216 MHz	Ποικίλει στην χωρίς απώλειες μορφή. Υποστηρίζεις 32-bit float είσοδο; 2.2 κατ'ελάχιστο χωρίς απώλειες	?	Ναι	Ναι: ως 256 κανάλια
<a href="#">Windows Media Audio Lossless</a>	<a href="#">Lossless</a>	8, 11.025, 16, 22.05, 32, 44.1, 48, 88.2, 96 kHz	16, 24	>100 ms	Ναι	Ναι: ως 6 κανάλια



## Παράρτημα 6Δ: Συγκριτικές δοκιμές ακρόασης μεταξύ απωλεστικών αλγορίθμων συμπίεσης του ήχου:

Πηγή	Ημερομηνία	Τύποι αρχείων	Bitrate (kbit/s)	Κωδικοποιητές (Codecs)	Είδη μουσικής	Δειγμάτα	Ακροατές	Καλύτερο αποτέλεσμα
<a href="#">ff123</a>	2001	multiple	~128	<ul style="list-style-type: none"> <li>MP3: <b>Lame 3.89beta</b> --abr 134 -h --npsytune—athtype 2 --lowpass 16—ns-bass -8</li> <li>MP3: <b>Xing within Audio-Catalyst 2.1</b> 128 kbit/s, high frequency mode disabled, simple stereo disabled</li> <li>AAC: <b>Liquifier Pro 5.0.0 Beta 2, Build 24</b> streaming 128, equalization disabled, dynamics disabled, dual mono encoding disabled, audio bandwidth overridden by the program, set at 17995 Hz</li> <li>MPC: <b>mpenc.exe version 1.7.9c</b> -radio -ltq_gain 10 -tmn 12 -nmt 4.8</li> <li>WMA8: <b>Windows Media Player 7.1 (version 7.01.00.3055); wmadmoe.dll version 8.0.0.0371</b> 128 kbit/s</li> <li>Vorbis: <b>Oggdrop RC2 for Windows 32</b> 128 kbit/s</li> </ul>		1	16	<a href="#">Musepack</a> and <a href="#">AAC</a>
<a href="#">ff123</a>	October 2001-January 2002	multiple	~128	<ul style="list-style-type: none"> <li>MP3: <b>Lame 3.89beta</b> --abr 134 -h --npsytune—athtype 2 --ns-bass -8</li> <li>MP3: <b>Xing within Audio-Catalyst 2.1</b> 128 kbit/s, high frequency mode disabled, simple stereo disabled</li> <li>AAC: <b>Liquifier Pro 5.0.0 Beta 2, Build 24</b> streaming 128, equalization disabled, dynamics disabled, dual mono encoding disabled, audio bandwidth overridden by the program, set at 17995 Hz</li> <li>MPC: <b>*mpenc.exe version 1.7.9c</b> -radio -ltq_gain 10 -tmn 12 -nmt 4.8</li> <li>WMA8: <b>Windows Media Player 7.1 (version 7.01.00.3055); wmadmoe.dll version 8.0.0.0371</b> 128 kbit/s</li> <li>Vorbis: <b>**Oggdrop pre-RC3 for Windows 32; from CVS (10/26/01)</b> 128 kbit/s</li> </ul>	Various	3	25-28	<a href="#">Musepack</a> or <a href="#">Vorbis</a>

<a href="#">ff123</a>	July 2002	multiple	~64	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ogg Vorbis 1.0</b> -b 64—managed</li> <li>• <b>Ogg Vorbis 1.0</b> -q 0</li> <li>• <b>MMJB 7.2 mp3PRO</b> 64</li> <li>• <b>WMA8</b> at 64 kbit/s (using <b>WMP 7.1</b> to encode)</li> <li>• <b>QuickTime 6.0 MPEG-4 AAC</b> Low complexity at 64 kbit/s</li> </ul>	Various	12	24-41	<a href="#">mp3PRO</a>
<a href="#">Roberto Amorim</a>	June 2003	<a href="#">AAC</a>	128 <a href="#">CBR</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Psytel AACenc 2.15</b> -br 128</li> <li>• <b>Ahead/Nero 5.5.10.35</b> 128 kbit/s CBR, high quality</li> <li>• <b>Sorenson Squeeze 3.5 (FhG Pro)</b> 128 kbit/s</li> <li>• <b>Apple QuickTime 6.3 (Apple/Dolby)</b> 128 kbit/s high quality</li> <li>• <b>FAAC 1.17b</b> -a 64 (64 kbit/s/channel, ABR)</li> </ul>	Various	10	11-18	<a href="#">QuickTime</a>
<a href="#">Roberto Amorim</a>	July 2003	multiple	~128	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Apple QuickTime 6.3 MP4 encoder</b> 128 kbit/s high quality</li> <li>• <b>LAME MP3 Encoder 3.90.3</b> --alt-preset 128</li> <li>• <b>Musepack 1.14</b> --quality 4 --xlevel</li> <li>• <b>Ogg Vorbis post-1.0 CVS</b> -q 4.25</li> <li>• <b>Windows Media Audio v9 PRO</b> bitrate-managed 2-pass VBR 128 kbit/s</li> </ul>	Various	12	14-24	<a href="#">Musepack</a>
<a href="#">Roberto Amorim</a>	September 2003	multiple	~64	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ahead/Nero 6.0.0.15 HE AAC</b> VBR profile Streaming :: Medium, high quality</li> <li>• <b>Ogg Vorbis post-1.0 CVS</b> -q 0</li> <li>• <b>mp3PRO (from Adobe Audition 1.0)</b> VBR quality 40, Current Codec, allow M/S and IS, allow narrowing, no CRC</li> <li>• <b>Real Audio Gecko (from Real Producer 9.0.1)</b> 64 kbit/s</li> <li>• <b>Windows Media Audio v9</b> VBR quality 50</li> <li>• <b>QuickTime 6.3 AAC LC</b> 64 kbit/s, Best Quality</li> </ul>	Various	12	30-43	<a href="#">Nero HE AAC</a>

<a href="#">Roberto Amorim</a>	January 2004	<a href="#">MP3</a>	~128	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>LAME encoder 3.95</b> --preset 128</li> <li>• <b>FhG MP3 encoder from Adobe Audition 1.0</b> VBR quality 40, «Current - Best» codec.</li> <li>• <b>Apple iTunes 4.2 MP3</b> 112 kbit/s VBR, Highest quality, joint stereo, smart encoding</li> <li>• <b>GOGO-no-coda 3.12</b> -b 128 -a -q 0</li> <li>• <b>Audioactive Encoder 2.04</b> 128 kbit/s High Quality</li> <li>• <b>Xing MP3 Encoder 1.5</b> VBR quality normal</li> </ul>	Various	12	11-22	<a href="#">LAME</a>
<a href="#">Roberto Amorim</a>	February 2004	<a href="#">AAC</a>	~128	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ahead/Nero AACenc v 2.6.2.0</b> -internet profile, high quality, LC</li> <li>• <b>Apple iTunes 4.2 (Apple/QuickTime)</b> 128 kbit/s</li> <li>• <b>Compact! 1.2beta3 (zPlane/HHI)</b> VBR 5, high quality, LC</li> <li>• <b>FAAC 1.23.5</b> -q 115</li> <li>• <b>Real Producer 10 beta (CodingTechnologies)</b> 128 kbit/s</li> </ul>	Various	12	19-29	<a href="#">iTunes</a>
<a href="#">Roberto Amorim</a>	May 2004	multiple	~128	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>LAME encoder 3.96</b> -V5— a-athaa-sensitivity 1</li> <li>• <b>Apple iTunes 4.2</b> 128 kbit/s AAC</li> <li>• <b>Ogg Vorbis aoTuV tuning b2</b> -q 4.35</li> <li>• <b>Musepack 1.14b</b> --quality 4.15—xlevel</li> <li>• <b>Sony Atrac3</b> 132 kbit/s</li> <li>• <b>Microsoft WMA9 Std</b> Bitrate VBR 128 kbit/s</li> </ul>	Various	18	12-27	<a href="#">aoTuV</a> and <a href="#">Musepack</a>
<a href="#">Roberto Amorim</a>	June 2004	multiple	32 <a href="#">CBR</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>LAME encoder 3.96</b> -b 32</li> <li>• <b>Nero Ahead HE AAC+PS</b> 32 kbit/s CBR High Quality</li> <li>• <b>Ogg Vorbis post-1.0.1CVS</b> --managed -b 32 resampled with SSR</li> <li>• <b>Real Audio</b> 32 kbit/s stereo music codec in <b>Helix Producer 10</b></li> <li>• <b>QDesign Music Codec 2 Pro</b> 32 kbit/s at 32 kHz, Quality mode</li> <li>• <b>Microsoft WMA9 Std</b> 32 kbit/s at 32 kHz</li> <li>• <b>mp3PRO</b> 32 kbit/s at 32 kHz, in <b>Adobe Audition 1.5</b></li> </ul>	Various	18	47-77	<a href="#">Nero Digital</a>

Κεφάλαιο 6: Ψηφιακές πηγές ήχου

<a href="#">HydrogenAudio user «gurutuboolez»</a>	July 2004	multiple	~175	<ul style="list-style-type: none"> <li>MPC: <b>musepack</b> -standard</li> <li>MP3: <b>LAME 3.97 alpha</b> -V 3; -V 2</li> <li>Vorbis: <b>megamix</b> -q 6,00; -q 6,99; -q 5,50</li> </ul>	<a href="#">Classical</a>	18	1	<a href="#">Musepack</a>
<a href="#">HydrogenAudio user «gurutuboolez»</a>	August 2005	multiple	~180	<ul style="list-style-type: none"> <li>AAC: <b>faac 1.24.1</b>. Release date: end 2004 (?). Setting: -q175</li> <li>AAC: <b>Nero Digital aacenc32 v.3.2.0.15</b>. Release date: June 2005. Setting: -streaming (high/default encoder).</li> <li>MP3: <b>LAME 3.97 alpha 11</b>. Release date: July 2005. Setting: -V2—vbr-new</li> <li>MPC: <b>mppenc 1.15v</b>. Release date: march 2005. Setting: --quality 5</li> <li>Vorbis: <b>aoTuV beta 4 based on 1.1.1</b>. Release date: July 2005. Setting: -q6,00</li> </ul>	<a href="#">Classical</a>	18	1	<a href="#">aoTuV</a>
<a href="#">gURuBoOleZZ(French)</a>	August 2005	multiple	~96	<ul style="list-style-type: none"> <li>AAC-LC: <b>iTunes 4.9 / Quick-Time 7.02</b> CBR 96</li> <li>MP3: <b>LAME 3.97 alpha 11</b> --abr 99</li> <li>MPC: <b>mppenc 1.14</b> --xlevel—quality 3 (or—thumb)</li> <li>Ogg Vorbis: <b>aoTuV / LANCER beta 4 based on SVN 1.1.1</b> -q2,00</li> <li>WMA Standard: <b>WMA 9.1</b> CBR 96</li> </ul>	<a href="#">Classical</a> , various	1 5 0 classical, 3 5 various	1	<a href="#">ao-TuV</a> and <a href="#">AAC</a> tied (classical), <a href="#">aoTuV</a> (various)
<a href="#">Sebastian Mares</a>	December 2005	multiple	~ 1 4 0 (nominal 128)	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Nero AAC 3.1.0.2</b> VBR/Stereo - Streaming, 100-120 kbit/s [LC AAC]</li> <li><b>iTunes AAC 6.0.1.3</b> 128 kbit/s, VBR</li> <li><b>LAME 3.97 Beta 2</b> -V5—vbr-new</li> <li><b>Ogg Vorbis AoTuV 4.51 Beta</b> -q 4.25</li> <li><b>WMA Professional 9.1</b> Quality-Based VBR, Q50</li> <li><b>Shine 0.1.4 (Low Anchor)</b> -b 128</li> </ul>	Various	18	18-30	4-way tie (all except Shine)

<a href="http://Mp3-tech.org">Mp3-tech.org</a>	March 2006	AAC	48	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>3gpp 6.3.0</b> 48kbit/s CBR</li> <li>• <b>Coding Technologies - Winamp 5.2 beta 393</b> 48kbit/s CBR HE-AAC</li> <li>• <b>Coding Technologies - Winamp 5.2 beta 393</b> 48kbit/s CBR HEv2-AAC</li> <li>• <b>Nero Digital 4.9.9.95</b> 48kbit/s ABR HE-AAC</li> <li>• <b>Nero Digital 4.9.9.96</b> 48kbit/s ABR HEv2-AAC</li> <li>• <b>iTunes 6.0.2 (Low Anchor)</b> 48kbit/s CBR</li> <li>• <b>LAME 3.97b2 (High Anchor)</b> -V5</li> </ul>	Various	18	10-20	5-way tie (all except anchors)
<a href="#">Sebastian Mares</a>	November 2006	multiple	~48	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ogg Vorbis AoTuV 5 Beta -q -1</b></li> <li>• <b>WMA Professional 10</b> 1-pass CBR, 48 kbit/s</li> <li>• <b>Nero HE-AAC May 26, 2006</b> -q 0.2</li> <li>• <b>WMA Standard 9.2</b> Quality-Based VBR, Q10</li> <li>• <b>iTunes AAC 7.0.2.16</b> 48 kbit/s, CBR</li> </ul>	Various	20	22-34	<a href="#">Nero Digital</a>
<a href="#">Sebastian Mares</a>	July 2007	multiple	~64	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ogg Vorbis AoTuV 5 Beta -q 0</b></li> <li>• <b>WMA Professional 10</b> 1-pass CBR, 64 kbit/s</li> <li>• <b>Nero HE-AAC Jul 20 2007</b> -q 0.24</li> </ul>	Various	18	21-33	<a href="#">Nero Digital</a> and <a href="#">WMA Professional</a>
<a href="#">Sebastian Mares</a>	October 2008	MP3	~128	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>LAME 3.98.2</b> -V5.7</li> <li>• <b>LAME 3.97</b> -V5—vbr-new</li> <li>• <b>iTunes 8.0.1.11</b> 112 kbit/s, VBR, highest quality, joint stereo, smart encoding, filter below 10 Hz</li> <li>• <b>Fraunhofer IIS mp3surround CL encoder v1.5</b> -br 0 -m 4 -q 1 -vbri -ofl</li> <li>• <b>Helix v5.1 2005.08.09</b> -X2 -U2 -V60</li> <li>• <b>l3enc 0.99a (Low Anchor)</b> -br 128000 -mod 1</li> </ul>	Various	14	26-39	5-way tie (all except <a href="#">l3enc</a> )
<a href="#">HydrogenAudio user IgorC (March/April 2011)</a>	March 2011	multiple	~64	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ogg Vorbis AoTuV 6.02 Beta</b> -q 0.1</li> <li>• <b>Apple HE-AAC</b> constrained VBR, high quality, 64 kbit/s</li> <li>• <b>CELT</b> complexity 10, VBR 67.5 kbit/s</li> <li>• <b>Nero HE-AAC</b> -q 0.245</li> </ul>	Various	30	25-13	CELT / Opus

Κεφάλαιο 6: Ψηφιακές πηγές ήχου

HydrogenAudio user: IgorC (July/August 2011)	July/August 2011	LC-AAC	~96	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Nero 1.5.4.0</b> -q 0.345</li> <li>• <b>Apple QuickTime 7.6.9</b> true VBR, high quality, 96 kbit/s</li> <li>• <b>Apple QuickTime 7.6.9</b> constrained VBR, high quality, 96 kbit/s</li> <li>• <b>Fraunhofer IIS (via Winamp 5.62)</b> VBR 3</li> <li>• <b>Coding Technologies (via Winamp 5.61)</b> CBR 100 kbps</li> </ul>	Various	20	25	Apple QuickTime
HydrogenAudio user: «Kamedo2»	May 2013	MP3	~224	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>lame3100i</b> -V2+</li> <li>• <b>LAME 3.99.5</b> -V1</li> <li>• <b>LAME 3.98.4</b> -q 0 -b 224</li> <li>• <b>Helix v5.1</b> -X2 -U2 -V146</li> <li>• <b>BladeEnc (Low Anchor)</b> -quit -nocfg -224</li> </ul>	Various	25	1	4-way tie (all except BladeEnc low anchor)
HydrogenAudio user: Kamedo2 (July/September 2014)	July / September 2014	multiple	~96	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>AAC Apple QuickTime iTunes 11.2.2 (aac 2.4.1)</b> constrained VBR, high quality, 96 kbit/s</li> <li>• <b>Opus 1.1</b> VBR, 96 kbit/s</li> <li>• <b>Ogg Vorbis aoTuV Beta6.03</b> -q 2.2 (~96 kbps)</li> <li>• <b>MP3 LAME 3.99.5</b> VBR, -V 5 (~130 kbps, a well-known comparison but at higher bitrate)</li> <li>• <b>AAC FAAC v1.28 (Mid-low Anchor)</b> -b 96</li> <li>• <b>AAC FAAC v1.28 (Low Anchor)</b> -q 30 (~52 kbps)</li> </ul>	Various	40	33	<a href="#">Opus</a>

### Βιβλιογραφία για το 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο:

«Perceptual Coding of Digital Audio» - TED PAINTER, STUDENT MEMBER, IEEE AND ANDREAS SPANIAS, SENIOR MEMBER, IEEE.

«Novel Approach of Implementing Psychoacoustic model for MPEG-1 Audio» - Jagadeesh B , Dr B Siva Kumar

«Introduction to Data Compression» - Khalid Sayood , 2006

Διάλεξη με θέμα «Θεωρία Δειγματοληψίας, A/D και D/A μετατροπείς», μάθημα «HY530: Ψηφιακές Επικοινωνίες - Απόστολος Τραγανίτης, Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Κρήτης.

Διάλεξη 7: «Θεμελιώσεις Ψηφιακού Ήχου» - Φλώρος Ανδρέας(Επικ. Καθηγητής). μάθημα «Τεχνολογία ήχου», Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας Ιονίου Πανεπιστημίου, 9/10/13

Διάλεξη «Ψηφιακή Αναπαράσταση Σήματος: Δειγματοληψία, Κβαντισμός και Κωδικοποίηση» - Νικόλας Τσαπατσούλης, μάθημα: «ΒΕΣ04: Συμπύεση και μετάδοση πολυμέσων», Εθνικό κέντρο έρευνας φυσικών επιστημών Δημόκριτος, 2006.

Διάλεξη «Από τις τριγωνομετρικές συναρτήσεις στο Mp3» - Επαμεινώνδας Διαμαντόπουλος, 1ο ΓΕΛ Ξάνθης, 2013 – 2014

### Πηγές από το διαδίκτυο:

<https://www.whatinterviewprep.com/el/prepare-for-the-interview/audio-formats/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Variable\\_bitrate](http://en.wikipedia.org/wiki/Variable_bitrate)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Constant\\_bitrate](http://en.wikipedia.org/wiki/Constant_bitrate)

<http://www.djshop.gr/dt/piges-arxeia-kai-poiotita-ixou-17339.htm?lang=el&path=-1586859164>

[http://el.wikipedia.org/wiki/Δειγματοληψία\\_σήματος](http://el.wikipedia.org/wiki/Δειγματοληψία_σήματος)

<http://www.medialab.ntua.gr/education/MultimediaTechnology/MultimediaTechnologyNotes/extra/append1.htm>

<http://www.medialab.ntua.gr/education/MultimediaTechnology/MultimediaTechnologyNotes/>

<http://web.teipir.gr/WWWbeldia/greek/Diploma/kefalaio3/333.html>

<http://streamingcodecs.blogspot.gr/2014/09/decoding-ac-3-bitstream.html>

<http://www.slideserve.com/efuru/dolby-ac-3-audio-encoding-thx>

<http://www.planet-source-code.com/vb/scripts/ShowCode.asp?txtCodeId=372&lngWId=3>

<http://el.wikipedia.org/wiki/MP3>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Data\\_compression](http://en.wikipedia.org/wiki/Data_compression)

[http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1274857&page\\_number=3](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1274857&page_number=3)

[http://www.iema.gr/data/WB/Default\\_files/frame.htm](http://www.iema.gr/data/WB/Default_files/frame.htm)

<http://www.image.ntua.gr/meleti172KTP/node/36>

[http://www.medialab.ntua.gr/education/MultimediaTechnology/MultimediaTechnologyNotes/chap2a\\_3.htm](http://www.medialab.ntua.gr/education/MultimediaTechnology/MultimediaTechnologyNotes/chap2a_3.htm)

[http://el.wikipedia.org/wiki/Κωδικοποίηση\\_Huffman](http://el.wikipedia.org/wiki/Κωδικοποίηση_Huffman)

<http://www.image.ntua.gr/meleti172KTP/node/17>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Discrete\\_cosine\\_transform](http://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_cosine_transform)

[http://el.wikipedia.org/wiki/Συμπαγής\\_Δίσκος](http://el.wikipedia.org/wiki/Συμπαγής_Δίσκος)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Eight-to-fourteen\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Eight-to-fourteen_modulation)

[http://en.wikipedia.org/wiki/CD\\_player](http://en.wikipedia.org/wiki/CD_player)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Lookup\\_table](http://en.wikipedia.org/wiki/Lookup_table)

<http://www.themechwarrior.com/how-do-cds-works/>

<http://juggler8.blogspot.gr/2011/11/flac.html>

[https://xiph.org/flac/documentation\\_format\\_overview.html](https://xiph.org/flac/documentation_format_overview.html)

[http://lame.sourceforge.net/outer\\_loop.php](http://lame.sourceforge.net/outer_loop.php)

<https://code.google.com/p/flash-kikko/>

<http://gabriel.mp3-tech.org>

<https://github.com/kikko/Shine-MP3-Encoder-on-AS3-Alchemy/blob/master/lib/shine/main.c>

<http://z-issue.com/wp/flac-compression-level-comparison/>

<http://www.stereophile.com/content/mp3-vs-aac-vs-flac-vs-cd-page-2>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Codec\\_listening\\_test](http://en.wikipedia.org/wiki/Codec_listening_test)

<http://en.wikipedia.org/wiki/P-value>

[http://androulakis.bma.upatras.gr/mediawiki/index.php/Στοιχειώδεις\\_έννοιες\\_της\\_στατιστικής](http://androulakis.bma.upatras.gr/mediawiki/index.php/Στοιχειώδεις_έννοιες_της_στατιστικής)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Codec\\_listening\\_test#ABC.2FHR\\_test](http://en.wikipedia.org/wiki/Codec_listening_test#ABC.2FHR_test)

<http://listening-tests.hydrogenaud.io/sebastian/mp3-128-1/results.htm>

<https://www.hindawi.com/journals/jece/2008/346767/>

[https://www.researchgate.net/publication/4073568\\_A\\_MATLAB\\_Simulink\\_implementation\\_of\\_speech\\_masking\\_based\\_on\\_the\\_MPEG\\_psychoacoustic\\_model\\_1](https://www.researchgate.net/publication/4073568_A_MATLAB_Simulink_implementation_of_speech_masking_based_on_the_MPEG_psychoacoustic_model_1)



---

## Κεφάλαιο 7ο: Τα συστήματα ήχου ως «αλυσίδες» σταδίων, παρατηρήσεις και συμπεράσματα

---

### 7.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύσαμε σε βάθος τα διάφορα στοιχεία των συστημάτων αναπαραγωγής ήχου. Είδαμε αρχικά πως κατηγοριοποιούνται τα διάφορα συστήματα σε πραγματικού και μη χρόνου, σε αναλογικά και ψηφιακά.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε περισσότερο τα στάδια από τα οποία αποτελείται κάθε σύστημα ήχου καθώς και τα σημεία που πρέπει να προσέξουμε σε κάθε στάδιο ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή πιστότητα αναπαραγωγής του ήχου. Κάθε σύστημα έχει κοινά στοιχεία με άλλα, όμως έχει και ιδιαιτερότητες.

Ένας μηχανικός ήχου καλείται συχνά να σχεδιάσει ή να ελέγξει και να αξιολογήσει ένα σύστημα ήχου με στοιχεία που ποικίλουν ανάλογα την εφαρμογή όπως για παράδειγμα: κάλυψη εκδήλωσης, κάλυψη συναυλίας, σύστημα κινηματογράφου, σύστημα σε στούντιο ηχογράφησης και παραγωγής μουσικώς ή σύστημα οικιακής ακρόασης.

Πολλές φορές τα συστήματα αυτά διασυνδέονται νοητά καθώς το αρχικό ηχητικό σήμα π.χ. μίας συναυλίας ηχογραφείται, κατόπιν επεξεργάζεται σε ένα στούντιο παραγωγής μουσικής, διανέμεται σε φυσικό μέσο ή διαδικτυακά ως αρχείο μουσικής και εν τέλει αναπαράγεται σε ένα οικιακό σύστημα από τους περισσότερους καταναλωτές-ακροατές. Επομένως, θα πρέπει να δούμε και τη διασύνδεση αυτή ως μια νοητή αλυσίδα καθώς και ποια σημεία αυτής της αλυσίδας πρέπει να προσέξουμε ώστε να βελτιώσουμε την πιστή αναπαραγωγή του αρχικού σήματος ήχου.

### 7.2 Οι αλυσίδες παραγωγής ήχου

Μία από τις πιο δημοφιλείς και σημαντικές αλυσίδες συστημάτων ήχου είναι αυτή της παραγωγής και ακρόασης μουσικής. Ως μία από τις πιο δημοφιλείς μορφές τέχνης που συναντάμε καθημερινά στο σπίτι, στο αμάξι, στους χώρους εστίασης, αναψυχής και διασκέδασης, η μουσική απασχολεί περισσότερο από καθετί έναν μηχανικό ήχου. Στόχος του μηχανικού ή παραγωγού ήχου είναι να μπορέσει να παρέχει στους ακροατές όσο πιο πιστά γίνεται το μουσικό αποτέλεσμα που έχει διαμορφώσει μαζί του ο εκάστοτε καλλιτέχνης. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί μία σύνθετη αλυσίδα συστημάτων που ξεκινούν από το δωμάτιο ηχογράφησης και καταλήγουν στο αυτί του κάθε καταναλωτή. Κάποιες φορές, αυτή η διαδικασία γίνεται σε πραγματικό χρόνο όπως σε διαδικτυακές, ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές ζωντανές εκπομπές ή γενικά ζωντανές εμφανίσεις. Αυτό άλλωστε σημαίνει και οι έννοιες «ζωντανές». Στις συνήθεις περιπτώσεις, η διαδικασία παραγωγής της μουσικής γίνεται σταδιακά και χρειάζεται να παρέλθει κάποιος χρόνος από την ηχογράφησης της μουσικής έως την ακρόασή της από

τους καταναλωτές. Κατά αυτό τον τρόπο ηχογραφούνται και παράγονται ακόμη και σήμερα οι μουσικοί δίσκοι ή «άλμπουμ» καλλιτεχνών. Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται και στον κινηματογράφο με τη διαφορά όμως ότι συνήθως δίνεται έμφαση στον πολυκαναλικό ήχο παρά στον στερεοφωνικό όπως στη μουσική παραγωγή.

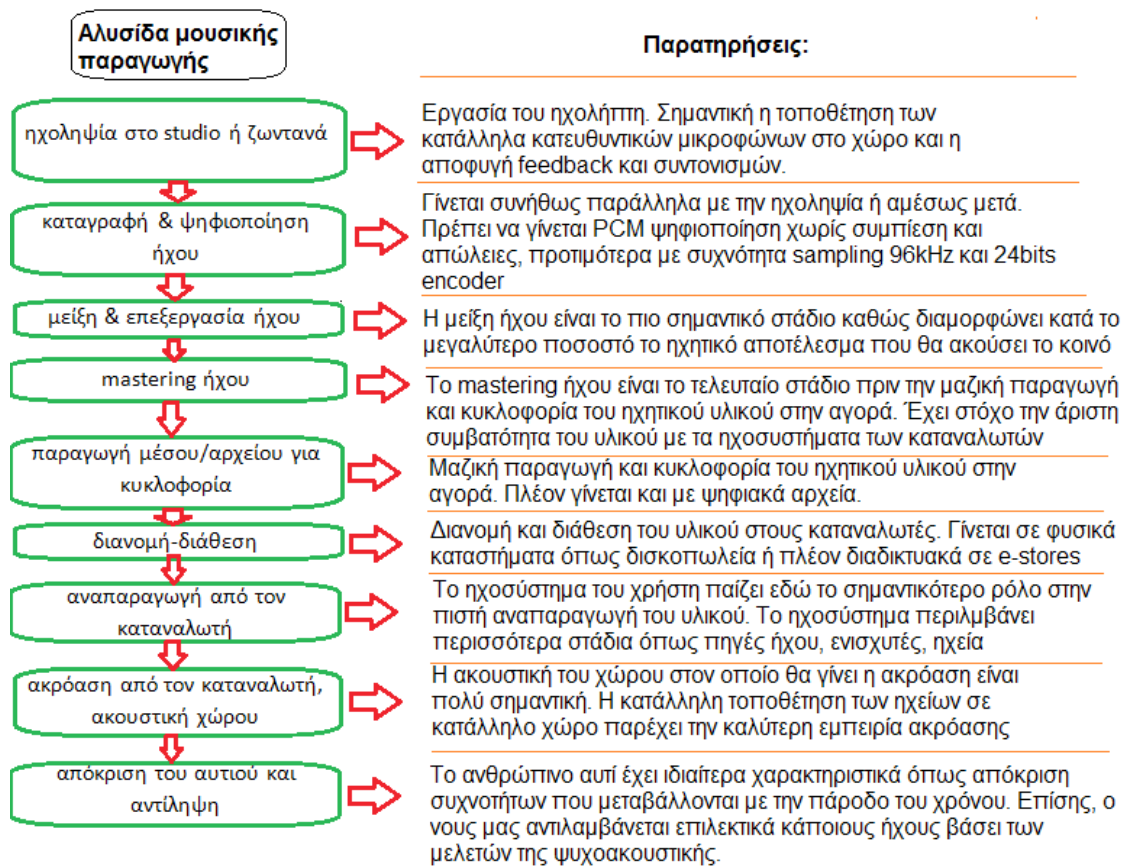
### 7.3 Τα στάδια της αλυσίδας παραγωγής του ήχου

Τα στάδια από τα οποία διέρχεται το ηχητικό σήμα αλλάζοντας μορφές είναι τα στάδια της «αλυσίδας» υποσυστημάτων που θα μας απασχολήσουν. Στο παρακάτω πίνακα (7.1) παραθέτουμε τα στάδια κάθε συστήματος που μελετάμε:

Εφαρμογή: Στάδιο αλυσίδας	Μουσική παραγωγή	Κινηματογραφική παραγωγή
<b>1ο</b>	ηχοληψία στο studio ή ζωντανά	ηχοληψία στο σεντ της ταινίας και στο studio
<b>2ο</b>	καταγραφή & ψηφιοποίηση ήχου	καταγραφή & ψηφιοποίηση ήχου
<b>3ο</b>	μίξη & επεξεργασία ήχου	μίξη & επεξεργασία ήχου
<b>4ο</b>	mastering ήχου	συγχρονισμός με εικόνα και mastering ήχου
<b>5ο</b>	παραγωγή μέσου/αρχείου για κυκλοφορία	παραγωγή μέσου/αρχείου για κυκλοφορία
<b>6ο</b>	διανομή-διάθεση	διανομή-διάθεση
<b>7ο</b>	αναπαραγωγή από τον καταναλωτή	αναπαραγωγή στο σινεμά ή σε dvd/blu-ray από το χρήστη
<b>8ο</b>	ακρόαση από τον καταναλωτή, ακουστική χώρου	ακρόαση στο σινεμά ή οικιακά, ακουστική αίθουσας
<b>9ο</b>	απόκριση του αυτιού και αντίληψη	απόκριση του αυτιού και αντίληψη

Πίνακας 7.1

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 7.1) απεικονίζονται τα στάδια της μουσικής παραγωγής καθώς και μερικά σημαντικά στοιχεία και παρατηρήσεις για κάθε στάδιο:



Σχήμα 7.1

## 7.4 Το 1ο στάδιο: λήψη ήχου

Ως πρώτο στάδιο κάθε αλυσίδας ορίζουμε τον εξοπλισμό εκείνον που χρειάζεται για να γίνει η λήψη ήχου. Είτε αναφερόμαστε σε ένα σύστημα μουσικής παραγωγής είτε σε ένα σύστημα κινηματογραφικής παραγωγής, η λήψη ήχου αποτελεί το αρχικό στάδιο από το οποίο θα περάσει το ηχητικό σήμα.

### 7.4.1 Φωνές και ήχοι περιβάλλοντος

Στην περίπτωση που θέλουμε να ηχογραφήσουμε ανθρώπινες φωνές και ήχους του περιβάλλοντος, θα πρέπει να εγκαταστήσουμε κατάλληλα μικρόφωνα στο χώρο. Αναλύσαμε στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο τα είδη μικροφώνων και τον τρόπο εγκατάστασής τους. Είναι σημαντικό να θυμηθούμε πως δεν υπάρχει μοναδικός τρόπος να ηχογραφήσει κανείς φωνές και ήχους αλλά όλα εξαρτώνται από το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα που θέλουν οι καλλιτέχνες και παραγωγοί να επιτύχουν. Αυτό που είναι σημαντικό είναι να τοποθετηθούν τα κατάλληλα φίλτρα εξάλειψης θορύβων σε κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, είδαμε τα τύπου Ζέπελιν καλύμματα μικροφώνων που χρησιμοποιούνται όταν ηχογραφούμε σε εξωτερικούς θορυβώδεις περιβάλλοντες. Για να προστατέψουμε το σήμα που θέλουμε να λάβουμε από εξωτερικούς θορύβους, χρησιμοποιούμε κατάλληλης ευαισθησίας μικρόφωνα κάθε φορά και anti-pop

υφασμάτινα πετάσματα.

Η ηχομόνωση του χώρου ηχογράφησης είναι επίσης σημαντική και για αυτό το σκοπό τα studio ηχογραφήσεων κατασκευάζονται με ιδιαίτερο τρόπο. Χρησιμοποιούνται κατάλληλα δάπεδα πολλαπλών επιπέδων που στηρίζονται επάνω σε ράγες και ελατήρια για απορρόφηση κραδασμών και συντονισμών, τοποθετούνται πλεξιγκλάς και διπλές τζαμαρίες μεγάλου πάχους για την απόσβεση ήχων από και ενός το εξωτερικό περιβάλλον, τοποθετούνται ειδικές αντικραδασμικές βάσεις σε ενισχυτές, μουσικά όργανα και μικρόφωνα. Οι τοίχοι καλύπτονται με υλικά απορρόφησης ανακλάσεων ήχου και στάσιμων κυμάτων. Για τους ήχους σε χαμηλές συχνότητες που δεν είναι ιδιαίτερα κατευθυντικοί, χρησιμοποιούνται διατάξεις και κατασκευές που ονομάζονται «μπασοπαγίδες».

Στην περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε ηχοληψία ήχων ζωντανά, ένα μεγάλο πρόβλημα που απαιτεί προσοχή είναι ο συντονισμός των μικροφώνων λόγω μονοπατιών θετικής ανάδρασης που δημιουργούνται από τα μεγάφωνα και ηχεία του χώρου. Τα δυναμικά μικρόφωνα χαμηλής ευαισθησίας βοηθούν στην αντιμετώπιση του φαινομένου όμως υπάρχουν και αρκετά ειδικά φίλτρα αποκοπής συχνοτήτων και αντιστροφείς φάσης που χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς ήχου για αυτό το σκοπό. Τα πυκνωτικά μικρόφωνα είναι πολύ πιο ευαίσθητα σε φαινόμενα συντονισμού και ανατροφοδότησης (feedback).

Για την εγγραφή ήχων μιας κινηματογραφικής ταινίας, γίνεται συνήθως ηχοληψία τόσο στα εξωτερικά γυρίσματα όσο και σε ειδικά στούντιο. Έμφαση δίνεται στον πολυκαναλικό ήχο και για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται διάφορα μικρόφωνα στο χώρο ώστε να γίνει κατάλληλη μίξη των σημάτων τους μετέπειτα.

Βασικά στοιχεία που πρέπει να λάβει υπόψιν του ένας ηχολήπτης όταν τοποθετεί μικρόφωνα στο χώρο για τη μέγιστη πιστότητα ηχοληψίας περιγράφονται στον πίνακα 7.2:

Απόκριση συχνότητας	Κάθε μικρόφωνο έχει μία συγκεκριμένη απόκριση συχνότητας που κρίνεται καλύτερη ανάλογα την εφαρμογή όπως π.χ. είναι τα μικρόφωνα χαμηλών συχνοτήτων για μεγάλους τύμπανα
Αντίσταση/προσαρμογή	Η αντίσταση εξόδου του μικροφώνου είναι σημαντική παράμετρος και πρέπει το εκάστοτε μικρόφωνο να συνδέεται στην κατάλληλης αντίστασης είσοδο της κονσόλας ή του προενισχυτή μικροφώνου
Κατευθυντικότητα	Τα μικρόφωνα έχουν διάφορα μοτίβα κατευθυντικότητας. Ανάλογα τη χρήση, επιλέγουμε το κατάλληλης κατευθυντικότητας μικρόφωνο. Όσο περισσότερο θέλουμε να απομονώσουμε μια πηγή από το γύρω περιβάλλον της, τόσο κατευθυντικότερο πρέπει να είναι το μικρόφωνο.
Τροφοδοσία	Μερικά μικρόφωνα απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία με τάση. Πρέπει να είμαστε προσεκτικοί με αυτή τη «Phantom» τροφοδοσία των 48V συνήθως καθώς μπορεί να κάψει ένα μικρόφωνο που δεν είναι σχεδιασμένο να δέχεται τροφοδοσία.

Φαινόμενο προσέγγισης	Διάφορα κατευθυντικά μικρόφωνα ενισχύουν τις χαμηλές συχνότητες καθώς πλησιάζουν στην πηγή. Άρα με σωστή τοποθέτηση δεν θα υπερκαλύπτουν οι χαμηλές συχνότητες το υπόλοιπο φάσμα και δε θα έχουμε παραμόρφωση λόγω υπερφόρτωσης του μικροφώνου ή του προενισχυτή του.
Υπερφόρτωση	Τα μικρόφωνα έχουν ένα εύρος εντάσεων ήχων που μπορούν να λάβουν αποτελεσματικά και χωρίς παραμόρφωση. Αν οι ήχοι είναι πολύ δυνατοί, ειδικά τα electret μικρόφωνα μπορούν να ψαλιδίσουν το σήμα έντονα.
Μηχανική απομόνωση	Η μηχανική απομόνωση των μικροφώνων από πηγές θορύβου και τριγμών είναι σημαντική για να λάβουμε ένα όσο το δυνατόν καθαρό σήμα, απαλλαγμένο από χαμηλής συχνότητας και υψηλής έντασης ανεπιθύμητα σήματα.
Σωστή μεταχείριση και συντήρηση	Η σκόνη, η υγρασία, η απότομες κινήσεις και οι ακραίες θερμοκρασίες φθείρουν τα μικρόφωνα όπως και κάθε άλλο κομμάτι του εξοπλισμού. Πρέπει να γίνεται σωστή συντήρηση, επισκευή ή αντικατάστασή τους για να έχουμε το καλύτερο ηχητικό αποτέλεσμα σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 7.2

### 7.4.2 Μουσικά όργανα

Σε ό,τι αφορά στα μουσικά όργανα, συναντάμε τόσο ακουστικά όργανα όσο και ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά ή ψηφιακά. Για τα ακουστικά όργανα, πλέον υπάρχουν αρκετά ειδικού τύπου μικρόφωνα για κάθε εφαρμογή. Για παράδειγμα, υπάρχουν ειδικά μικρόφωνα για πνευστά όργανα, για τύμπανα και για έγχορδα. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο είδαμε πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους που χρησιμοποιούνται σε πολλά έγχορδα. Συνήθως βέβαια χρησιμοποιούνται πυκνωτικά μικρόφωνα διαφόρων τύπων για την ηχογράφηση ακουστικών μουσικών οργάνων.

Για τα ηλεκτρικά όργανα όπως η ηλεκτρική κιθάρα, το ηλεκτρικό μπάσο και τα ηλεκτροφόρα όπως το ηλεκτρικό πιάνο (clavinova) ή το αρμόνιο, συνήθως το ηλεκτρικό ηχητικό σήμα λαμβάνεται απευθείας από τη σχετική έξοδο του μουσικού οργάνου. Τα σύγχρονα έγχορδα χρησιμοποιούν ειδικού τύπου ηλεκτρομαγνητικούς μετατροπείς που καλούνται συνήθως απλά «μαγνήτες».

Σε άλλες περιπτώσεις βέβαια, ο καλλιτέχνης προτιμά να συνδέσει πρώτα το μουσικό όργανο σε κατάλληλο εξοπλισμό και να γίνει λήψη του επεξεργασμένου ήχου. Για παράδειγμα, πολλοί συνδέουν την ηλεκτρική κιθάρα σε κατάλληλο ενισχυτή ή/και σε πετάλια-εφέ όπως παραμορφωτές και διαμορφωτές ήχου. Το συχνά έντονα παραμορφωμένο σήμα της κιθάρας οδηγείται σε έναν ενισχυτή και μια καμπίνα μεγαφώνων, λαμβάνεται από ένα δυναμικό μικρόφωνο όπως το sm57 της shure και οδηγείται κατόπιν στην κονσόλα ηχογράφησης ή κάρτα ήχου. Επομένως, το τελικό αποτέλεσμα που θα λάβει ο ακροατής δε μας ενδιαφέρει να είναι πιστό ως προς τον αρχικό απαραμόρφωτο ήχο των χορδών της κιθάρας αλλά ως προς τον έντονα παραμορφωμένο ήχο που έχει δημιουργήσει ο καλλιτέχνης μέσα από τα εφέ και τον εξοπλισμό του.

Πολλά ηλεκτροφόρα μουσικά όργανα διαθέτουν πλέον και ψηφιακές εξόδους ηχητικού σήματος τύπου USB (universal serial bus) ή MIDI (musical instrument digital interface) επομένως μπορούν να συνδεθούν απευθείας με την κάρτα ήχου ή την ψηφιακή κονσόλα ενός συστήματος ηχογράφησης.

## 7.5 Το 2ο στάδιο: καταγραφή & ψηφιοποίηση του ήχου

Αρκετές δεκαετίες παλαιότερα, το στάδιο αυτό της αλυσίδας ηχητικής επεξεργασίας γινόταν αναλογικά. Τα σήματα από τα μικρόφωνα και τα μουσικά όργανα εγγράφονταν απευθείας σε αναλογικές μαγνητικές ταινίες ήχου όπως οι reel-to-reel. Είδαμε αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των εγγραφών σε ταινία στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Καθοριστικό ρόλο στην πιστή εγγραφή των ταινιών έπαιζαν οι εξής παράγοντες:

Πλάτος της ταινίας: όσο μεγαλύτερο το φυσικό πλάτος μιας ταινίας, τόσο πιστότερη είναι η εγγραφή καθώς έχουμε υψηλότερο SNR, λιγότερη παραμόρφωση λόγω φαινομένων μαγνητικού κορεσμού και τη δυνατότητα να εγγράψουμε περισσότερα κανάλια ήχου.
Ταχύτητα εγγραφής: όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα εγγραφής της ταινίας, τόσο πιστότερη είναι η εγγραφή της. Υπό υψηλότερη ταχύτητα εγγραφής, περισσότερα μαγνητικά δίπολα της ταινίας χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του ηχητικού σήματος. Κατά αυτό τον τρόπο έχουμε υψηλότερη ανάλυση του σήματος και άρα πιστότερη αναπαράστασή του.
Σήμα πόλωσης: είναι το σήμα υψηλής συχνότητας που πρέπει να εφαρμοσθεί στην κεφαλή εγγραφής της ταινίας. Κατάλληλο σήμα πόλωσης ανάλογα με τον τύπο οξειδίου της ταινίας, συνεπάγεται μία καλής ποιότητας εγγραφή.
Σταθερότητα ταχύτητας τυλίγματος: όσο σταθερότερη είναι η ταχύτητα τυλίγματος της ταινίας, τόσο πιστότερη είναι η εγγραφή. Στόχος είναι τα μηχανικά μέρη του συστήματος εγγραφής να κινούνται σταθερά. Έτσι δεν θα έχουμε φαινόμενα μεταβολής ταχύτητας wow ή flutter, TIM παραμόρφωση και φαινόμενα μεταβολής ή διαμόρφωσης συχνότητας.
Ρύθμιση του συστήματος: η σωστή ρύθμιση του συστήματος εγγραφής σε τακτά χρονικά διαστήματα από τον κατάλληλο τεχνικό είναι απαραίτητη για την πιστή εγγραφή της ταινίας. Παράμετροι όπως οι ταχύτητες των μοτέρ κίνησης και το σήμα πόλωσης ρυθμίζονται κατάλληλα.
Η συντήρηση των ταινιών και του συστήματος είναι απαραίτητη ώστε να μην υπάρχει σημαντική αλλοίωση με την πάροδο του χρόνου. Μερικές ταινίες τοποθετούνται σε ειδικούς φούρνους ψήσιματος για μερικές ώρες και σε θερμοκρασίες 54 έως 60 °C, ώστε να εξατμιστεί η υγρασία που έχουν απορροφήσει.
Καταστολή θορύβου: τα συστήματα Dolby και DBX βοηθούν στην καταστολή θορύβου κατά την εγγραφή και αναπαραγωγή ταινιών χρησιμοποιώντας τεχνικές ισοστάθμισης κι έμφασης συχνοτήτων αλλά και (από)συμπίεση της δυναμικής περιοχής του σήματος.

Πίνακας 7.3

Πλέον όμως κάθε μουσική παραγωγή χρησιμοποιεί σε κάποιο βαθμό ψηφιακά συστήματα και αρχεία ήχου. Ο μηχανικός ήχου πλέον ψηφιοποιεί τα ηχητικά σήματα που λαμβάνονται από τα μικρόφωνα και τους μετατροπείς εκτός από περιπτώσεις ηλεκτρονικών μουσικών οργάνων που δίνουν ψηφιακό σήμα απευθείας στην έξοδό τους. Συνήθως επιλέγεται να γίνει ψηφιοποίηση του ήχου με παλμοκωδική διαμόρφωση PCM (Pulse Code Modulation). Η PCM είναι ένας στοιχειώδης τρόπος διαμόρφωσης που δεν χρησιμοποιεί φέρον. Το διαμορφωμένο σήμα PCM είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση του αναλογικού σήματος όπου το πλάτος του σήματος δειγματοληπτείται, κβαντίζεται και μεταδίδεται ως σειρά συμβόλων, συνήθως δυαδικών (bit). Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο είδαμε αναλυτικά τις διαδικασίες δειγματοληψίας, κβαντισμού και κωδικοποίησης. Κατά την αρχική ψηφιοποίηση του λαμβανόμενου ηχητικού σήματος, συνήθως δεν γίνεται συμπίεση καθώς δεν θέλουμε να έχουμε απώλειες πληροφορίας. Επίσης, γνωρίζουμε πως η συμπίεση ενός αρχείου προσπαθεί να αποκρύψει το θόρυβο της διαδικασίας σε στάθμες κάτω από το κατώφλι ακουστότητας με τεχνικές φασματικής και χρονικής επικάλυψης. Αν κατόπιν επεξεργαστούμε ένα τέτοιο αρχείο ακόμη και για μια απλή ισοστάθμιση συχνοτήτων ή μεταβολή της ταχύτητας αναπαραγωγής, ο θόρυβος της συμπίεσης μπορεί να γίνει εμφανής και άρα αντιληπτός από τον ακροατή. Σημαντικότερα στοιχεία κατά την ψηφιοποίηση ενός ηχητικού σήματος είναι:

Η συχνότητα δειγματοληψίας: όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα δειγματοληψίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση του σήματος που θέλουμε να αναπαραστήσουμε ψηφιακά. Για παράδειγμα, με συχνότητα δειγματοληψίας 96kHz, λαμβάνονται 96000 τιμές του αρχικού σήματος ανά δευτερόλεπτο. Για την αποφυγή φαινομένων φασματικής αναδίπλωσης, σύμφωνα με το θεώρημα Shannon, η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 φορές μεγαλύτερης της μέγιστης συχνότητας του σήματος.

Ο αριθμός σταθμών του κβαντιστή: ο κβαντιστής έχει στόχο να παραστήσει την πραγματική συνεχή τιμή πλάτους του κάθε δείγματος με μία διακριτή προκαθορισμένη τιμή πλάτους. Η διακριτή αυτή τιμή ή στάθμη απέχει από την αρχική τιμή κατά ένα σφάλμα. Ο αριθμός των κβαντισμένων σταθμών που χρησιμοποιούνται από τον κβαντιστή για την αναπαράσταση του συνεχούς πλάτους του σήματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα. Για παράδειγμα, κβαντοποίηση με ανάλυση 24 bit παρέχει  $2^{24} = 16.7$  εκατομμύρια στάθμες κβαντισμού για την διακριτή αναπαράσταση του πλάτους ενός σήματος και άρα το σφάλμα δημιουργεί πολύ χαμηλό θόρυβο κβαντισμού, έντασης -144 dB θεωρητικά. Για την περεταίρω μείωση της έντασης και αντιληπτικότητας του θορύβου κβαντισμού, χρησιμοποιείται προσθήκη θορύβου τύπου Dither όπως έχουμε δει.

Το **Jitter**: οι γρήγορες μεταβολές στην συχνότητα του ρολογιού που συντονίζει το ψηφιακό σύστημα μπορούν να προσθέσουν θόρυβο στο σήμα. Ένα όσο το δυνατόν πιο σταθερό και ακριβές ρολόι θα μειώσει το σχετικό θόρυβο.

Πίνακας 7.4

## 7.6 Το 3ο στάδιο: μίξη και επεξεργασία του ήχου

### 7.6.1 Η μίξη ήχου:

Ας δώσουμε αρχικά έναν ορισμό –ετοιμολογία για τη μίξη ήχου:

«Μίξη, η: 1) σύνθεση διαφορετικών στοιχείων = ανάμειξη: Η μίξη κειμένου και εικόνων κάνει πιο κατανοητές τις οδηγίες. 2) ταυτόχρονη εγγραφή ή αναπαραγωγή ηχητικών σημάτων από διάφορες πηγές = μιξάζ. μείκτης, ο: συσκευή μίξης ή οπτικών σημάτων.»

Πηγή: Ερμηνευτικό λεξικό νέας Ελληνικής, ΟΕΔΒ

Ο κατάλληλος γι' αυτή την εργασία είναι ο λεγόμενος mixing engineer ή μηχανικός μίξης, ελληνιστί. Θα τον δείτε συνήθως μέσα σε ένα στούντιο ηχογράφησης, πάνω από μια κονσόλα και έναν υπολογιστή. Παλαιότερα, θα τον βλέπαμε περιτριγυρισμένο από ένα συνονθύλευμα hardware επεξεργαστών, σε συνδυασμό με μια τεράστια αναλογική κονσόλα. Πλέον, η κλασική εργαλειοθήκη ενός μηχανικού μίξης περιλαμβάνει έναν πολύ δυνατό ηλεκτρονικό υπολογιστή, έτσι ώστε να μπορεί να ανταποκρίνεται στα αναρίθμητα plug-ins (ψηφιακούς επεξεργαστές ήχου), ένα ζευγάρι πολύ καλά ηχεία και μια απλή ψηφιακή κονσόλα. Έχοντας, λοιπόν, κάποιον εξωτερικό εξοπλισμό (hardware), σε συνδυασμό με τον υπολογιστή και κάποιο DAW (Digital Audio Workstation) της προτίμησής του –όπως είναι τα Logic Pro, Pro Tools, Reaper, Cubase και άλλα- είναι έτοιμος να επεξεργαστεί ξεχωριστά κάθε κανάλι του κομματιού που έχει αναλάβει να μετατρέψει σε ένα αρεστό και ευχάριστα ακουστό αποτέλεσμα.

Βασικό στοιχείο της λειτουργίας των DAWs είναι η δυνατότητα που προσφέρουν για ομαδοποίηση των δεδομένων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επιλεκτική επεξεργασία και δρομολόγησή τους. Το «εργαλείο» για αυτή τη δουλειά είναι το track ή αλλιώς κανάλι. Ένα track είναι ένας νοητός χώρος στον

οποίο ομαδοποιούνται οι πληροφορίες και ήχοι, έτσι ώστε να μπορούμε να τις επεξεργαστούμε με διαφορετικό τρόπο και να τις δρομολογήσουμε σε διαφορετική έξοδο ήχου από κάποιες άλλες. Μπορούμε να επέμβουμε στην ένταση, το ηχόχρωμα, το τονικό ύψος, τη θέση στη στερεοφωνική εικόνα, αλλά και σε άλλες ποιότητες του περιεχομένου του track, χωρίς να επηρεάσουμε το περιεχόμενο των άλλων tracks. Γι' αυτή τη διεργασία χρησιμοποιούμε τα ψηφιακά εφέ λογισμικού λεγόμενα και «plugins».

Ο μηχανικός, αφού έχει επεξεργαστεί κάθε κανάλι (track) και του έχει δώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα, δημιουργεί ένα στερεοφωνικό αρχείο (ή πολυφωνικό), που ονομάζεται mixdown όπως και premaster. Το αρχείο αυτό είναι συνήθως σε ασυμπιεστη μορφή .WAV ή .AIFF και προορίζεται για τον mastering engineer, ο οποίος θα προχωρήσει στο mastering που θα δούμε στην επόμενη ενότητα.

Κατά τη διαδικασία μίξης ήχου, ένας μηχανικός ήχου μπορεί να μεταβάλλει και να ρυθμίσει κατάλληλα τις ακόλουθες παραμέτρους του ηχητικού σήματος:

<b>1- την ένταση,</b>
<b>2-τη συχνότητα,</b>
<b>3-τη στερεοφωνική ή πολυκαναλική τοποθέτηση των ήχων,</b>
<b>4-τη χρονική τοποθέτηση των ήχων,</b>
<b>5- την ισοστάθμιση συχνοτήτων και</b>
<b>6- τη δυναμική περιοχή.</b>

ρτΠίνακας 7.5

Μπορεί επίσης και να προσθέσει διάφορα ηχητικά εφέ στο αρχικό σήμα. Οι διαδικασίες αυτές γίνονταν παλαιότερα από αναλογικά μηχανήματα όπως μεταβλητά φίλτρα αλλά πλέον γίνονται εξ ολοκλήρου ψηφιακά μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή και κατάλληλου λογισμικού εργασίας DAW (digital audio workstation). Ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί το σήμα καθώς το επεξεργάζεται μέσα από κατάλληλα ηχεία κοντινού πεδίου «near field monitor» ή ακουστικά επίπεδης απόκρισης συχνοτήτων σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο ενός studio.

Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να αναλογιστούμε τι ορίζουμε ως πιστότητα καθώς το αρχικό σήμα μεταβάλλεται σκόπιμα ώστε να γίνει μία βελτίωση του συνολικού ηχητικού αποτελέσματος. Επομένως, εδώ μας απασχολεί κυρίως να αποδοθεί πιστά το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει από τη μίξη ήχου και τη μετέπειτα διαδικασία τελειοποίησης (mastering).

**1)** Για την ανάλυση της πιστότητας του ηχητικού αποτελέσματος δε μας απασχολεί ιδιαίτερα η ένταση του σήματος αρκεί να διατηρείται εντός φυσιολογικών τιμών και να είναι αρκετά υψηλότερη από το επίπεδο διαφόρων θορύβων και ανεπιθύμητων συνιστωσών.

**2)** Η μεταβολή της συχνότητας ενός ηχητικού σήματος είναι κάτι που χρησιμοποιείται ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες με τις δυνατότητες που παρέχουν οι ψηφιακοί επεξεργαστές DSP. Συχνά ένα μουσικό όργανο μπορεί να ακούγεται λίγο ξεκούρδιστο λόγω της κατασκευής του ή ένας τραγουδιστής να μην τραγουδά τη νότα που θέλει με ακρίβεια. Αν π.χ. το μουσικό όργανο παράγει μία νότα Λα στα 443Hz ενώ θέλουμε να ακουστεί στα 440Hz ακριβώς, μπορούμε να επέμβουμε στο ηχογραφημένο αρχείο και να ρυθμίσουμε επακριβώς τη συχνότητα της νότας και τις αρμονικές της.

**3)** Η τοποθέτηση των ήχων στο χώρο είναι σημαντική υπόθεση, ιδιαίτερα για τον πολυκαναλικό ήχο του κινηματογράφου. Ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα να ορίσει ότι ένας ήχος θα αναπαράγεται κατά ένα ποσοστό από ένα κανάλι και κατά ένα άλλο ποσοστό από άλλα κανάλια. Μπορεί επίσης να ορίσει ότι ο ήχος θα αναπαράγεται ταυτόχρονα από διάφορα κανάλια αλλά με διαφορές φάσης και ισοστάθμισης συχνοτήτων. Κατά αυτό τον τρόπο δημιουργείται μία κατάλληλη στερεοφωνική εικόνα για τη μουσική ή μία αίσθηση περιβάλλοντος ήχου για τις κινηματογραφικές ταινίες. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία αυτής της αίσθησης λαμβάνουν υπόψιν τους την κατασκευή,



δομή και λειτουργία των ανθρώπινων αυτιών όπως έχουμε μελετήσει στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Οι πολυκαναλικές παραγωγές συμβάλλουν στη βελτίωση της πιστότητας και πειστικότητας του ήχου καθώς ο ακροατής που ακούει στο οικιακό του σύστημα το αποτέλεσμα, ιδανικά θα αισθάνεται πως βρίσκεται εντός του χώρου ηχογράφησης. Φυσικά, το αποτέλεσμα αυτό εξαρτάται και από την απόδοση οικιακού συστήματος του χρήστη ή τη συμβατότητά του με το ηχητικό υλικό.

**4)** Η χρονική τοποθέτηση των ήχων μέσα σε ένα μουσικό κομμάτι ή ηχητικό κομμάτι μιας ταινίας είναι μία απ τις βασικότερες διεργασίες της μίξης. Για να είναι πιστό το αποτέλεσμα πρέπει οι ήχοι μιας ταινίας να συντονιστούν με το βίντεο. Είναι αρκετά ενοχλητική εμπειρία για έναν θεατή να παρατηρεί τα χείλη του ηθοποιού να κινούνται ασυντόνιστα με την ομιλία που ακούγεται ταυτόχρονα. Επίσης, είναι ενοχλητικό στη μουσική να μη συμβαδίζουν οι χτύποι των κρουστών με το ρυθμό του κομματιού που στον οποίο κινούνται τα λοιπά μουσικά όργανα. Εδώ λαμβάνουμε υπόψιν και το ψυχοακουστικό φαινόμενο της χρονικής επικάλυψης ήχων που είδαμε στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Η σωστή ακολουθία ήχων και ο συντονισμός τους καλείται διαδικασία «sequencing» και το αντίστοιχο λογισμικό επεξεργασίας καλείται «sequencer».

**5)** Η ισοστάθμιση συχνοτήτων (equalization ή EQ εν συντομία) τόσο των επιμέρους ήχων όσο και του ηχητικού κομματιού συνολικά είναι επίσης πολύ σημαντική διαδικασία. Το ηχητικό αποτέλεσμα θα είναι αρκετά πειστικότερο αν οι διάφοροι ήχοι καταλαμβάνουν το κατάλληλο μέρος του ακουστικού φάσματος. Οι ήχοι θα ακουστούν κατά αυτό τον τρόπο πιο καθαρά χωρίς να γίνεται κατά λάθος φασματική επικάλυψή τους από άλλους ήχους. Εδώ λαμβάνεται υπόψιν το ψυχοακουστικό φαινόμενο της χρονικής επικάλυψης όπως ακριβώς γίνεται και στη συμπίεση ήχου που περιγράψαμε αναλυτικά στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

**6)** Η δυναμική περιοχή του ηχητικού σήματος είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους. Είναι η διαφορά ανάμεσα στον πιο δυνατό και τον πιο αδύναμο σε ένταση ήχο του κομματιού. Οι διακυμάνσεις στην ένταση με την οποία παίζουν οι μουσικοί ονομάζονται δυναμικές. Παρότι στη μουσική υπάρχουν όροι που περιγράφουν τις δυναμικές όπως piano (χαμηλή ένταση) και forte (υψηλή ένταση), η ερμηνεία αυτών των όρων είναι υποκειμενική υπόθεση και εξαρτάται από τον μουσικό. Στο χώρο της παραγωγής μουσικής και ήχου, μας ενδιαφέρει η ακριβής ένταση των ήχων μετρούμενη συνήθως στη λογαριθμική κλίμακα των decibel. Συχνά γίνεται συμπίεση (compression), επέκταση ή περιορισμός (limiting) της δυναμικής περιοχής του σήματος. Οι περιορισμοί του άνω ορίου της έντασης γίνονται κυρίως για να μην υπάρξει κορεσμός, ψαλιδισμός του σήματος και κατ' επέκταση παραμόρφωση. Επίσης, δυνατοί ήχοι τείνουν να επικαλύπτουν χαμηλότερης έντασης ήχους λόγω ψυχοακουστικών φαινομένων. Σε περιπτώσεις που ο θόρυβος είναι συγκρίσιμος με τους χαμηλότερης έντασης ήχους, γίνεται προσπάθεια να ενισχυθούν οι επιθυμητοί ήχοι μέσω της συμπίεσης της δυναμικής περιοχής.

## 7.6.2 Ηχητικά Εφέ

Τα διάφορα ηχητικά εφέ που εφαρμόζονται στο ηχητικό σήμα έχουν στόχο να μεταβάλλουν διάφορα χαρακτηριστικά του ή να προσθέσουν ήχους σε αυτό. Για παράδειγμα, μία μεγάλη κατηγορία εφέ είναι αυτά που διαμορφώνουν κατά πλάτος ή συχνότητα των ήχο και ονομάζονται «modulation effects». Συνήθης πρακτική των αλγορίθμων τέτοιων εφέ είναι να πολλαπλασιάζουν το αρχικό σήμα με νέους τόνους διαφόρων συχνοτήτων.

Άλλα εφέ γνωστά στο χώρο της μίξης ήχο είναι εκείνα που προσομοιώνουν την ακουστική απόκριση και αντήχηση μεγάλων χώρων όπως η ηχώ(echo), η επανάληψη του ήχου (reverb), η χρονική καθυστέρηση (delay) και άλλα. Παλαιότερα, τα εφέ ηχούς δημιουργούνταν με τη βοήθεια ελατηρίων και ελασμάτων που πάλλονταν από το αρχικό σήμα. Το τροποποιημένο ηχητικό σήμα στην έξοδο του εφέ εγγραφόταν και αυτό σε κασέτα. Επίσης, τα εφέ επανάληψης ενός ήχου με χρονική καθυστέρηση πραγματοποιούνταν με την εγγραφή και αναπαραγωγή μαγνητικών ταινιών. Σήμερα, όλα αυτά τα εφέ δημιουργούνται ψηφιακά και έχουν προκύψει αρκετοί αλγόριθμοι από τη μοντελοποίηση της ακουστικής θεάτρων, σταδίων, μεγάλων δωματίων και άλλων χώρων.

Η στοχευμένη προσθήκη ήχων σε ένα ηχητικό κομμάτι, όπως για παράδειγμα η προσθήκη παρασίτων που θυμίζουν αναπαραγωγή δίσκου βινυλίου ή γραμμοφώνου, είναι επίσης μία σημαντική τεχνική μίξης με ηχητικά εφέ. Στον κινηματογράφο χρησιμοποιούνται πάμπολλοι προηχογραφημένοι ήχοι με στόχο να εμπλουτίσουν το ηχητικό κομμάτι της ταινίας. Για παράδειγμα, σε μία ταινία δράσης, ήχοι εκρήξεων θα προστεθούν στη μίξη ενώ σε μία κωμωδία μπορούν να προστεθούν ήχοι γέλιου από ένα κοινό θεατών.

## 7.7 Mastering ήχου

Όπως αναφέραμε, οι δυο πρακτικές -η μίξη και το mastering- είναι μέρος της αλυσίδας παραγωγής της μουσικής και κινηματογραφικής βιομηχανίας. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους, τέτοιες ώστε να μην μπορούμε να κατατάξουμε και τις δυο στον ίδιο κλάδο. Έτσι κι αλλιώς, όπως θα καταλάβουμε σε λίγο, η κάθε μία χρησιμοποιείται για διαφορετικό σκοπό και ποτέ η μία δεν μπορεί να αντικαταστήσει την άλλη. Επίσης, η μίξη μπορεί να γίνει μόνο πριν το mastering.

Εδώ έχουμε να κάνουμε με μια διαφορετικού είδους εργασία σε σχέση με τη μίξη. Ο μηχανικός, έχοντας λάβει ένα στερεοφωνικό αρχείο (ή πολυφωνικό, στην περίπτωση που έχουμε να κάνουμε με stem mastering), το ακούει και το παρατηρεί για πιθανά λάθη στην ένταση και το ηχόχρωμα, καθώς και για μικρότερα όπως ο θόρυβος ή κάποια λάθη (glitches). Αφού έχει συνειδητοποιήσει τον τρόπο με τον οποίο θα κινηθεί, χρησιμοποιεί κάποιους δυναμικούς επεξεργαστές ή άλλους, όπως χωρικούς επεξεργαστές (spatial), προσομοιώσεις αναλογικού ήχου και διορθωτές στερεοφωνίας.

Η ακρόαση και η επεξεργασία του στερεοφωνικού κομματιού γίνεται σε χώρους με πολύ μικρή αντήχηση και ακουστική διόρθωση. Είναι πολύ σημαντικό ο χώρος που θα γίνει το mastering να είναι ειδικά διαμορφωμένος και να απαρτίζεται από επεξεργαστές ειδικούς για mastering, αλλιώς η κρίση του μηχανικού θα μεταβάλλεται ανάλογα με την ακουστική του χώρου και την ποιότητα των μηχανημάτων, γεννώντας ένα αρκετά αμφίβολο αποτέλεσμα. Σκοπός του τελικού master είναι να περάσει στο στάδιο της ακρόασης και στην μεταφορά του προς μαζική κυκλοφορία και διαδικτυακά μέσω εξυπηρετητών όπως τα iTunes, Beatport κλπ.

### 7.7.1 Η διαδικασία mastering

Mastering είναι το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας ενός μουσικού δίσκου. Είναι η νοητή «γέφυρα» μεταξύ μουσικού και εργοστάσιου αναπαραγωγής του δίσκου. Ως διαδικασία είναι αυτή που θα προσφέρει τις τελευταίες πινελιές και μικρο-ρυθμίσεις στο δίσκο ώστε όλα τα κομμάτια που το αποτελούν να ακούγονται ευχάριστα στο αυτί σε οποιοδήποτε μέσο αναπαραγωγής ήχου όπως σε ραδιοφωνική μετάδοση, στο αυτοκίνητο, στο κινητό τηλέφωνο, σε χώρους αναψυχής κλπ. Επίσης το mastering εξασφαλίζει πως δεν θα υπάρχουν διαφορές στη συνολική ένταση (loudness) που έχει το ένα κομμάτι από το άλλο προσφέροντας μια ακουστικά λογική συνέχεια.

Από την δεκαετία του 1950 μέχρι και την είσοδο της ψηφιακής επεξεργασίας στα μέσα του 1970 η διαδικασία του mastering πέρασε από διάφορα στάδια, σταμάτησε πλέον να είναι μια τυπική διαδικασία και σταδιακά διαχωρίστηκε από την διαδικασία την μίξης μιας και πριν κάποια χρόνια το τελικό mix ήταν στην ουσία και το master tape. Στην αρχή ήταν ηχογραφημένο σε ένα μόνο κανάλι (μονοφωνία) ενώ στην διάρκεια σε δυο κανάλια (στέρεο), που θα ταξίδευε σε κάποιο εργοστάσιο για αναπαραγωγή, πιθανότατα σε βινύλιο. Κάπου εκείνη την περίοδο ήταν που, από ανάγκη βέβαια για βελτιστοποίηση

ηση του ήχου και διόρθωση μετ' έπειτα τυχόν λαθών, δημιουργήθηκε η θέση του mastering engineer.

Το mastering ως εργασία μεταμορφώθηκε, λόγω της κυριότητας του αλλά και της σημασίας του, ως η τελευταία διαδικασία στην ολοκλήρωση ενός δίσκου, σε μια άκρως επιδέξια και υψηλής χρηματικής αμοιβής τέχνη. Ήταν πλέον η τέχνη της τελειοποίησης του ήχου. Ως αποτέλεσμα, την περίοδο της μεγάλης άνθισης της pop μουσικής, από το 1950 έως και το 1980, υπήρχε ζήτηση από τις μεγάλες δισκογραφικές εταιρίες για επιδέξιους mastering μηχανικούς.

Με την εισαγωγή του CD στο εμπόριο, ξεκίνησε ένας ατελείωτος πόλεμος, ή και ανάγκη θα μπορούσαμε να το πούμε, μεταξύ των mastering studios, όχι για βελτίωση στην ηχητική ποιότητα αλλά για αύξηση της συνολικής έντασης του μουσικού άλμπουμ. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε «loudness wars» και ήταν καταστροφικό για την τέχνη του mastering. Η λογική πίσω από την αύξηση της συνολικής έντασης είναι πολύ απλή και βασίστηκε στην ευρύτερη δυναμική περιοχή που προσέφερε το CD έναντι του μέσου βινυλίου και της συμπαγούς κασέτας.

Από την στιγμή που χρησιμοποιούμε συμπίεση και περιορισμό της δυναμικής περιοχής (compression και limiting) στην διαδικασία του mastering, συμπιέζουμε την κυματομορφή με αποτέλεσμα να επεμβαίνουμε στις δυναμικές περιοχές κάθε μουσικού κομματιού και να ελαχιστοποιούμε την διαφορά μεταξύ χαμηλών αλλά και δυνατών ήχων. Αυτό βέβαια από ένα σημείο και μετά εξαλείφει την όλη ιδέα πίσω από την μουσική ή γενικά τη σύνθεση του καλλιτέχνη. Παύει επομένως η κυματομορφή να αποτελείται από μια πληθώρα δυναμικών και μεταβάσεων που θα διαμορφώσουν όλη την αίσθηση του κομματιού ή του τραγουδιού. Αυτή το πρόβλημα της κακής χρήσης του mastering ονομάστηκε «Hot mastering» από το 1994. Αυτού του τύπου η μεταχείριση του ηχητικού υλικού είναι καταστρεπτική για την πιστότητα που μας ενδιαφέρει σε αυτή τη μελέτη.

Στις συνήθεις περιπτώσεις βέβαια, στόχος του mastering δεν είναι πλέον η αύξηση της έντασης των κομματιών αλλά η βελτίωση της ηχητικής πιστότητάς τους. Η διαδικασία του mastering περιέχει μια πληθώρα από μέρη επεξεργασίας μέχρι το τελικό αποτέλεσμα.

Καταρχήν πρέπει να γίνει μια σωστή ακρόαση του προ-master υλικού που ονομάζεται «mixdown», ώστε να αναγνωριστούν τα λάθη και τα σημεία που θα πρέπει να επεξεργαστούν ή να εξαλειφθούν ώστε να μας δώσουν ένα σωστό τελικό αποτέλεσμα. Για ένα σωστό mastering, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια αλυσίδα από επεξεργαστές σήματος. Ένα κλασικό «mastering chain», όπως αποκαλείται αυτή η αλυσίδα, αποτελείται από τους εξής βασικούς επεξεργαστές / βήματα: έναν ισοσταθμιστή (equalizer), ένα συμπιεστή δυναμικής περιοχής (compressor) και έναν απότομο περιοριστή πλάτους (brickwall limiter).

Από εκεί και πέρα ανάλογα με τα προβλήματα που θα παρουσιαστούν κατά την διάρκεια της ακρόασης, θα πρέπει να προσθαφαιρέσουμε επεξεργαστές. Λοιποί επεξεργαστές και εφέ που χρησιμοποιούνται στο mastering είναι: μια μονάδα ηχούς (reverb), μία μονάδα εξάπλωσης της στερεοφωνικής εικόνας του ήχου (stereo spreader) και συστήματα μείωσης θορύβου (noise reduction). Ακόμα και ο συμπιεστής (compressor) που θεωρείται από τα κλασικά βήματα στο mastering κάποιες φορές μπορεί να καταστρέψει το τελικό αποτέλεσμα, οπότε χρειάζεται μεγάλη προσοχή στην επιλογή του ανάλογου επεξεργαστή αλλά και για το αν πρέπει ή όχι να συμβάλει στην επεξεργασία του σήματος.

Ένα πολύ καλά εκπαιδευμένο αυτί μηχανικού ήχου μπορεί να κρίνει από την πρώτη ακρόαση την επεξεργασία που απαιτείται αλλά και την επιλογή του mastering chain, ώστε το αποτέλεσμα να μπορεί να ανταγωνιστεί τους δίσκους του εμπορίου.

### 7.7.2 remastering παλαιού υλικού

Συχνά γίνεται και re-mastering παλαιού ηχητικού υλικού καθώς η σύγχρονη τεχνολογία επιτρέπει την καλύτερη απόδοση του ηχητικού υλικού με σεβασμό στην αρχική δουλειά και σύνθεση του εκάστοτε

καλλιτέχνη και φυσικά τη σχετική άδειά του. Albums προηγούμενων δεκαετιών γίνονται re-mastered πλέον σε CD ή σε ψηφιακό αρχείο και παρότι περιέχουν το υλικό από παλιές αναλογικές ηχογραφήσεις, ακούγονται καλύτερα από ποτέ. Μία εύλογη ερώτηση είναι βέβαια κατά πόσο ένα re-mastered album είναι πιστό ηχητικά στην αρχική δουλειά του studio. Δυστυχώς δεν υπάρχει σαφής απάντηση που να καλύπτει κάθε δουλειά re-mastering και κανείς θα μπορούσε να ισχυριστεί ότι το αποτέλεσμα δεν είναι πιστό στο αρχικό υλικό. Εντούτοις, όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα στάδια, στόχος είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση του ηχητικού αποτελέσματος που επιθυμεί να πετύχει η ομάδα καλλιτεχνών, παραγωγών και μηχανικών ήχου που εργάζεται για ένα album.

## 7.8 Το 5ο στάδιο: παραγωγή μέσου ή αρχείου για κυκλοφορία

Στο 5<sup>ο</sup> στάδιο της αλυσίδας που μελετάμε, συναντούμε την τελική παραγωγή του προϊόντος της μουσικής ή κινηματογραφικής παραγωγής. Η διαδικασία αυτή διαφέρει ανάλογα με το μέσο που θα επιλέξει η εταιρία παραγωγής να εκδώσει και να κυκλοφορήσει. Για παράδειγμα, η κοπή δίσκων βινυλίου είναι μία εντελώς διαφορετική διαδικασία σε σχέση με την παραγωγή CDs ή compact κασετών. Είδαμε αναλυτικά τις διαδικασίες εγγραφής και παραγωγής κασετών στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

### 7.8.1 Παραγωγή οπτικών δίσκων

Για τους οπτικούς δίσκους όπως CD, DVD, Blu-Ray Disc, η διαδικασία παραγωγής εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα παραγωγής. Για μικρές ποσότητες οπτικών δίσκων, γίνεται συνήθως «κάψιμο» κενών εγγράψιμων δίσκων CD-R, dvd-R, bd-R σε ειδικούς εγγραφείς. Η τεχνική αυτή δεν διαφέρει ιδιαίτερα από την τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης στο οικιακό του υπολογιστή ή μηχανήμα εγγραφής cd/dvd και blu-ray δίσκων. Η βασική διαφορά είναι πως οι βιομηχανικοί εγγραφείς μπορούν να παράγουν ταυτόχρονα αρκετά αντίγραφα του ίδιου οπτικού δίσκου και να εκτυπώσουν ετικέτες επάνω του. Χρησιμοποιείται μία κατάλληλη κεφαλή laser ανάλογα τον τύπο του οπτικού δίσκου για την εγγραφή. Ως πρότυπο για την εγγραφή χρησιμοποιείται ένας δίσκος ή ένα σύνολο ψηφιακών αρχείων που έχει περάσει από τη διαδικασία mastering σε studio όπως περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Για μεγάλες ποσότητες παραγωγής οπτικών δίσκων, περί τους 550-900 δίσκους ανά ώρα, χρησιμοποιείται η τεχνική του βιομηχανικού mastering με καλούπια. Η τεχνική αυτή δεν είναι η διαδικασία εκείνη που επιτελείται στο studio και είδαμε προηγουμένως. Ονομάζεται όμως έτσι διότι βασίζεται στην αναπαραγωγή του πρότυπου ή «μάστερ» δίσκου. Για την παραγωγή αυτή, σχηματίζεται αρχικά μία μάσκα που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες αυλακώσεις του δίσκου που θα παραχθεί. Η μάσκα αυτή έχει ένα υπόστρωμα από γυαλί (glass master) και δημιουργείται με διάφορες τεχνικές όπως με φωτοευαίσθητα υλικά και υπεριώδεις ακτίνες ή εναπόθεση υλικού εν κενώ. Το πρότυπο ως μάσκα αναπαράγεται σε αντίγραφα από πολυμερές υλικό. Τα αντίγραφα δημιουργούνται από λιωμένο πολυμερές υλικό στους 130°C που περιχύνεται σε ειδικά καλούπια. Τα καλούπια έχουν φυσικά σχηματιστεί από το master δίσκο. Σε 3-5 sec μόνο έχουν σχηματιστεί όλα τα απαραίτητα αυλάκια των δεδομένων του δίσκου και το πολυμερές έχει στερεοποιηθεί. Κατόπιν, γίνεται επιμετάλλωση της άνω επιφάνειας του δίσκου με εναπόθεση κράματος αλουμινίου εν κενώ. Τέλος, η μεταλλική επιφάνεια βάφεται με ειδικό βερνίκι προστασία και κατόπιν γίνεται εκτύπωση και επικόλληση της σχετικής χάρτινης ετικέτας του δίσκου. Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την πιστότητα του τελικού αποτελέσματος της βιομηχανικής αυτής παραγωγής ελέγχονται διαρκώς και είναι οι εξής :

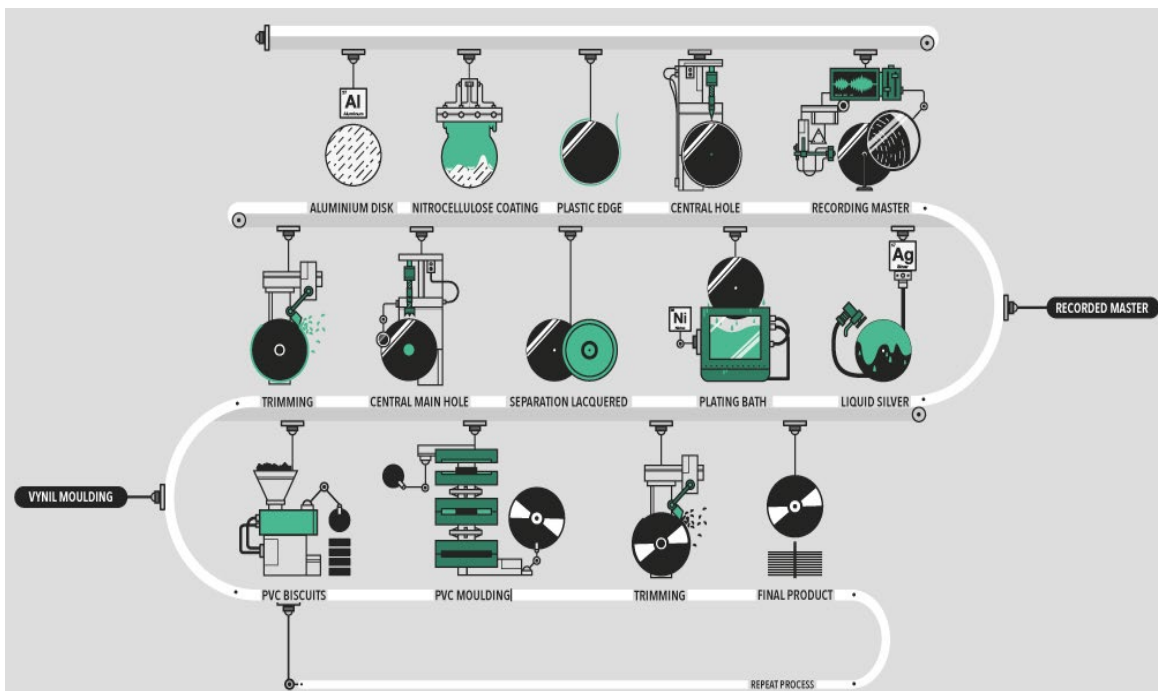
Ατέλειες στο master πρότυπο οπτικό δίσκο ή στο αρχείο που περιέχει τις σχετικές πληροφορίες
Έστω και οι παραμικρές εναποθέσεις σκόνης, λίπους, υγρασίας επάνω στο αρχικό γυάλινο master
Χαρακιές ή ατελές γυάλισμα του γυάλινου υποστρώματος του glass master
Ανεπαρκώς καθαρό & εν κενώ περιβάλλον παραγωγής κατά τα πρότυπα class 100 (ISO 5)
Γρήγορη εγγραφή με ταχύτητα άνω των 8X του master δίσκου

Πίνακας 7.6

### 7.8.2 Παραγωγή δίσκων βινυλίου

Η παραγωγή δίσκων βινυλίου μοιάζει πολύ με την παραγωγή των οπτικών δίσκων που αναλύσαμε. Κατά βάση, η ίδια τεχνική δημιουργίας ενός “master” προτύπου για δημιουργία καλουπιών και η συμπλήρωση καλουπιών με πολυμερή υλικά χρησιμοποιήθηκε αρχικά για δίσκους γραμμοφώνου και βινυλίου. Η ποιότητα κατασκευής του προτύπου και ο έλεγχος ποιότητας της διαδικασίας βιομηχανικής αναπαραγωγής αυτού είναι οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την πιστότητα του αποτελέσματος.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η πλήρης διαδικασία παραγωγής ενός δίσκου βινυλίου και τα επιμέρους στάδιά της:



Σχήμα 7.2

### 7.8.3 Παραγωγή ψηφιακών αρχείων

Η παραγωγή ενός ψηφιακού αρχείου που θα διανεμηθεί διαδικτυακά γίνεται στο studio και είναι ουσιαστικά το τελευταίο στάδιο του mastering. Το αρχείο βέβαια που παράγεται από το mastering είναι συνήθως ασυμπίεστο χωρίς καμιά απώλεια πληροφορίας. Επιλέγεται μάλιστα pcm κωδικοποίηση με υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας 96kHz και κβαντοποίηση στα 24bit. Το μέγεθος αυτών των αρχείων είναι πολύ μεγάλο για διαδικτυακή μετάδοση ακόμη και με τις σημερινές ταχύτητες σύνδεσης στο Internet. Απαιτούν επίσης μεγάλο χώρο στα αποθηκευτικά μέσα. Ευτυχώς, με την εμπορική επιτυχία

και τις σχετικά χαμηλές τιμές των σκληρών δίσκων μεγέθους μερικών Terrabytes σήμερα, η αποθήκευσή τους δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα.

Ο μηχανικός ήχου, ως έμπειρος ακροατής επιλέγει να συμπιέσει το master αρχείο για διαδικτυακή μετάδοση. Μία καλή λύση στην περίπτωση που θέλει να διατηρήσει όσο το δυνατόν περισσότερη πληροφορία και την υψηλή πιστότητα τους mastering είναι να επιλέξει συμπίεση χωρίς απώλειες. Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο είδαμε τον ανοικτού κώδικα αλγόριθμο μη-απωλεστικής συμπίεσης «FLAC». Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνει συμπίεση του μεγέθους του αρχικού αρχείου κατά 50% έως 60%. Στην περίπτωση που θέλει να επιτύχει ακόμη μικρότερο μέγεθος αλλά καλή συμβατότητα με τα περισσότερα μηχανήματα αποκωδικοποίησης της αγοράς, επιλέγει αποδοτικούς αλγορίθμους συμπίεσης όπως τον «LAME MP3» σε bitrates 256 ή 320kbps και ρυθμούς δειγματοληψίας 44100 Hz ή 48000 Hz. Όσο μεγαλύτεροι οι ρυθμοί bit και sampling, τόσο πιστότερο θα είναι το ηχητικό αποτέλεσμα στο master αρχείο. Σύμφωνα με test ακρόασης, ο μέσος χρήστης και ακροατής δεν διακρίνει εύκολα διαφορές ανάμεσα σε ασυμπίεστο αρχείο και συμπιεσμένο σε ρυθμούς 256/320kbps με 48000Hz sampling rate.

## 7.9 Το 6ο στάδιο: διανομή-διάθεση του ηχητικού υλικού

Παραδοσιακά, η διανομή δίσκων και κασετών γινόταν με εταιρίες μεταφορών (courier) και η διάθεση στο κοινό γινόταν κυρίως μέσω των δισκοπωλείων. Κατόπιν παρουσιάστηκαν διαδικτυακά καταστήματα αγορών οπτικών δίσκων και δίσκων βινυλίου όπως το Amazon.com με έδρα στο Σιάτλ της Αμερικής που ιδρύθηκε το 1994 από τον Τζεφ Μπέζος. Η εξάπλωση του διαδικτύου άλλαξε τον τρόπο διάθεσης της μουσικής και των ταινιών παρότι στην αρχή υπήρξαν αρκετά προβλήματα με τα πνευματικά δικαιώματα καλλιτεχνών και εταιριών λόγω φαινομένων πειρατείας. Ένας χρήστης μπορούσε να κατεβάσει νόμιμα ένα μουσικό αρχείο και κατόπιν να το μοιράσει σε άλλους χρήστες σε όλο τον πλανήτη. Οι εφαρμογές διαμοιρασμού αρχείων (sharing) με κυρίαρχη τη Napster έδωσαν ένα πλήγμα στα έσοδα των δισκογραφικών εταιριών. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου πειρατείας ήταν η υιοθέτηση προτύπων και λογισμικού διαχείρισης ψηφιακών δικαιωμάτων (DRM, digital rights management). Το λογισμικό αυτό απέτρεπε την αντιγραφή ενός αρχείου χωρίς σχετική άδεια. Εν συνεχεία βέβαια το πρότυπο των δικτύων διαμοιρασμού αρχείων υιοθετήθηκε και από τις δισκογραφικές εταιρίες οι οποίες και μείωσαν σημαντικά τις τιμές αγοράς των νομίμων αντιγράφων σε μια προσπάθεια να προσαρμοστούν στην νέα αγορά. Παρότι η δημιουργία ενός εξυπηρετητή αρχείων και σχετικού λογισμικού έχει ένα αρχικό κόστος εγκατάστασης, το κόστος αυτό αποσβήνεται γρήγορα λόγω μηδενικού σχεδόν κόστους παραγωγής αντιγράφων, διανομής και διάθεσης σε φυσικά καταστήματα.

Η σύγχρονη τάση είναι να παράγεται κυρίως ένα ψηφιακό αρχείο προς διανομή καθώς δεν απαιτεί παραγωγή και διανομή ενός φυσικού μέσου. Η παραγωγή και διανομή του φυσικού μέσου έχει αρκετό κόστος έναντι της διαδικτυακής διάθεσης αρχείων. Τα αρχεία που δημιουργούνται διανέμονται ψηφιακά μέσω του διαδικτύου χρησιμοποιώντας διάφορες πλατφόρμες. Η μεγαλύτερη πλατφόρμα σήμερα είναι το ηλεκτρονικό διαδικτυακό δισκοπωλείο της εταιρίας Apple, ονόματι iTunes. Χρησιμοποιεί μια κατάλληλη εφαρμογή που δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες ανά τον κόσμο να κατεβάσουν μουσική και ταινίες στον υπολογιστή, το tablet ή το κινητό τους σε μορφές συμπιεσμένων αρχείων.

Τα αρχεία που διανέμονται μέσω Internet μπορεί να είναι ασυμπίεστα, συμπιεσμένα χωρίς απώλειες ή συμπιεσμένα με απώλειες. Μεγαλύτερη απήχηση έχουν φυσικά τα συμπιεσμένα με απωλεστικούς αλγορίθμους αρχεία λόγω του μικρού μεγέθους τους. Το μικρό μέγεθος δεν απαιτεί μεγάλο εύρος ζώνης της γραμμής μετάδοσής του. Ένα συμπιεσμένο αρχείο κατεβαίνει γρήγορα στον Η/Υ του χρήστη αν διαθέτει μία απλή ADSL ενσύρματη ή 3G κινητής τηλεφωνίας σύνδεση με το διαδίκτυο. Για

μεγαλύτερης ταχύτητας συνδέσεις VDSL και 4G, το κατέβασμα συμπιεσμένων αρχείων γίνεται πολύ γρηγορότερα. Για παράδειγμα, ένα album σε συμπιεσμένη μορφή mp3 με μέγεθος περί τα 100Mbytes μπορεί ιδανικά να μεταφορτωθεί σε 2 λεπτά και 16 sec μέσω μιας σύνδεσης ADSL ταχύτητας 10Mbps από έναν ελάχιστα φορτωμένο εξυπηρετητή (server). Ο χρόνος αυτός φυσικά αυξάνεται όσο αυξάνεται ο φόρτος εργασίας του εξυπηρετητή και της σύνδεσής μας με αυτόν. Καθώς οι εξυπηρετητές κάθε εταιρίας διανομής δημιουργούν χιλιάδες συνδέσεις ανά δευτερόλεπτο, είναι απαραίτητο να διατηρείται όσο το δυνατόν μικρότερο το μέγεθος των αρχείων. Αυτό το γεγονός εξοικονομεί χώρο στους σκληρούς δίσκους και τα αποθηκευτικά μέσα που χρησιμοποιούν οι εξυπηρετητές άρα και κόστος.

Στον αντίποδα αυτών των θετικών στοιχείων βρίσκεται η υψηλή συμπίεση του μουσικού αρχείου. Όπως είδαμε αναλυτικά στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, για να διατηρηθεί χαμηλά το μέγεθος του συμπιεσμένου αρχείου, πρέπει να αυξηθούν οι απώλειες πληροφορίας, να μειωθεί ο ρυθμός bit, να συμπιεστεί το φασματικό εύρος του σήματος και να αυξηθεί κατ' επέκταση ο προστιθέμενος θόρυβος. Οι προσπάθειες που γίνονται για τη διαρκή βελτίωση των αλγορίθμων συμπίεσης έγιναν αισθητές μέσα από δοκιμές ακρόασης που παρουσιάσαμε. Αλγόριθμοι όπως ο AAC παρέχουν πιστότερο ηχητικό αποτέλεσμα σε σχέση με αλγόριθμους mp3 σε ίδια μεγέθη bitrate. Εντούτοις, το δημοφιλέστερο και ευρέως συμβατό πρότυπο συμπίεσης παραμένει το MPEG Layer 3.

Οι αλγόριθμοι συμπίεσης που χρησιμοποιεί το iTunes για τα μουσικά κομμάτια είναι κυρίως οι MPEG-4 AAC και High-Efficiency Advanced Audio Coding (HE-AAC) για τη μετάδοση ή όπως λέμε «streaming» ηχητικού υλικού σε πραγματικό χρόνο.

Διαδικτυακά φυσικά μεταδίδονται πλέον και πολλές σειρές και ταινίες ακόμη και κατά τη διάρκεια προβολής τους σε κανάλια τηλεόρασης και κινηματογραφικές αίθουσες αντίστοιχα. Το ηχητικό υλικό των αρχείων αυτών είναι συμπιεσμένο όπως και των Dvd και Blu-ray δίσκων.

## 7.10 Το 7ο στάδιο, αναπαραγωγή από τον καταναλωτή

Σε αυτό το σημείο μας ενδιαφέρει να αναλύσουμε πως το υλικό που διανέμεται χρησιμοποιείται ή καταναλώνεται από τους τελικούς χρήστες. Γνωρίζουμε πως έχει γίνει πλέον σημαντική προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα όσο το δυνατόν καλύτερο προϊόν σε φυσική ή ψηφιακή μορφή από τη μουσική βιομηχανία. Μάλιστα, η τελευταία τάση για υψηλής πιστότητας ήχο είναι το πρότυπο High Fidelity Pure Audio (HFPA) για δίσκους Blu-Ray που εκμεταλλεύεται την αυξημένη χωρητικότητά τους (25-128GB) και περιλαμβάνει ασυμπιεστό ήχο με συχνότητα δειγματοληψίας 96KHz και κβαντοποίηση στα 24 bits. Αυτό το ηχητικό υλικό αγοράζεται από τους καταναλωτές και αναπαράγεται. Πόσο πιστά αναπαράγεται όμως αυτό το προϊόν και πως μπορούμε να το ακούσουμε όσο πιο πιστά γίνεται; Οι απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα δίνονται μέσα από την ανάλυση του οικιακού ή φορητού συστήματος αναπαραγωγής μουσικής και ήχου του χρήστη. Τα συστήματα αυτά ποικίλουν σε επιδόσεις, μέγεθος, όγκο, βάρος και κόστος. Θα μας απασχολήσουν κυρίως οι επιδόσεις του συστήματος και μάλιστα όσες επηρεάζουν κυρίως την πιστή αναπαραγωγή του ήχου. Παράμετροι όπως το κόστος, βάρος ή απόδοση σε ισχύ και decibel, δεν είναι το κύριο ενδιαφέρον αυτής της ανάλυσης.

### 7.10.1 Τύποι ηχοσυστημάτων

Ας διακρίνουμε σε αυτό το σημείο τους διάφορους τύπους ηχοσυστημάτων που χρησιμοποιούν οι καταναλωτές κατά κύριο λόγο:

Τύπος ηχοσυστήματος ανάλογα με τη χρήση			
Φορητό ηχοσύστημα	Παρατηρήσεις	Οικιακό ηχοσύστημα	Παρατηρήσεις
Media player	Συνήθως mp3/mp4 player με ακουστικά	Micro HiFi ηχοσυστήματα	με μικρή κεντρική μονάδα και 2 ηχεία συνήθως
Cd player με ακουστικά	Φορητό, πλέον και με δυνατότητα mp3 αποκωδικοποίησης	Mini HiFi ηχοσυστήματα	με κεντρική μονάδα και 2 ηχεία συνήθως
Boombbox ραδιο-cd ή ραδιο-κασετόφωνο	περιλαμβάνει ηχεία, ενισχυτή, player σε ένα πακέτο	H/Y Desktop	με ενσωματωμένη ή εξωτερική κάρτα ήχου και 2, 2.1, 5.1 ή 7.1 αυτοενισχυόμενα ηχεία υπολογιστή
Φορητό ραδιόφωνο	Συνήθως FM/AM ή πλέον και e-radio με ηχείο ή ακουστικά	Midi HiFi ηχοσυστήματα	με διάφορες μονάδες πηγής, ενίσχυσης και περισσότερα ηχεία
Έξυπνη συσκευή	smartphone, tablet, smart-watch με ακουστικά ή Bluetooth ηχεία	Ηχοσυστήματα Hi-End με διακριτές μονάδες	Με διάφορες διακριτές μονάδες πηγών, ενισχυτών και ηχείων
H/Y	laptop ή netbook με ενσωματωμένα ηχεία 2 ή 2.1 καναλιών και ακουστικά	Συστήματα home cinema (οικιακού κινηματογράφου)	συνήθως 2.1, 5.1 ή 7.1 καναλιών με αποκωδικοποιητές, ενισχυτές και ηχεία.
Ηχοσύστημα αυτοκινήτου	Ενσωματωμένο ή after-market, απλό ή κέντρο πολυμέσων με ενισχυτές και ηχεία	Ηχο-μπάρες για οικιακό σινεμά	περιλαμβάνουν αποκωδικοποιητή, ενισχυτές και ηχεία σε ένα πακέτο
Ηχοσυστήματα PA για κάλυψη εκδηλώσεων	Συνήθως ένα σετ επαγγελματικά ηχεία, μια κονσόλα και ενισχυτές	Τηλεόραση	με ενσωματωμένα ηχεία και media player

Πίνακας 7.7

Κάθε τύπος ηχοσυστήματος που αναφέρθηκε στον παραπάνω πίνακα περιλαμβάνει μία μορφή πηγής ήχου, ένα ενσωματωμένο σύστημα αποκωδικοποίησης ή προενίσχυσης και διάφορα συστήματα ενίσχυσης και ηλεκτρομηχανικής μετατροπής του ήχου. Παρότι φαίνεται πως δεν μπορούμε να συγκρίνουμε ανάμεσα ηχοσυστήματα, ένα σύστημα μπορεί να αποδώσει πιστά τον ήχο στην κατάλληλη ένταση και εντός του κατάλληλου χώρου αν πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Συνήθεις εχθροί της πιστής αναπαραγωγής ήχου είναι η λανθασμένη χρήση και η ελλιπής σχεδίαση ενός ηχοσυστήματος.



Για παράδειγμα, ένα έξυπνο κινητό μπορεί να έχει πιστή αναπαραγωγή ήχου αν έχει εξοπλιστεί με μία καλοσχεδιασμένη εφαρμογή αναπαραγωγής και αποκωδικοποίησης πολυμέσων, αναπαράγει μουσικά αρχεία υψηλού bitrate περί τα 320kbps και συνδεθεί με καλής ποιότητας ακουστικά πλήρους φάσματος με σύστημα αποθρομβοποίησης.

Αν η ίδια συσκευή κινητού φορτωθεί με αρχεία mp3 κωδικοποιημένα με bitrate κάτω από τα 96kbps και ο χρήστης ακούσει τον ήχο από το ενσωματωμένο μεγαφωνάκι ή ένα σετ χαμηλότατης ποιότητας ακουστικών, τότε δεν θα είναι σε καμιά περίπτωση πιστή η αναπαραγωγή του ήχου. Οι λόγοι γι αυτό το γεγονός είναι οι εξής: όπως εξηγήσαμε στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, τα χαμηλού bitrate αρχεία mp3 παρουσιάζουν αρκετό θόρυβο κωδικοποίησης που γίνεται αντιληπτός ιδιαίτερα στις υψηλότερες συχνότητες, ενώ παράλληλα η απόκριση συχνοτήτων του ηχείου ενός κινητού ή ενός σετ απλών ακουστικών είναι ελλιπέστατη σε χαμηλές συχνότητες. Τα ποσοστά παραμόρφωσης THD επίσης θα είναι πολύ υψηλά μετά από κάποια ένταση για το μικρό ενσωματωμένο μεγάφωνο που είναι σχεδιασμένο κυρίως για αναπαραγωγή φωνής σε χαμηλές εντάσεις.

Στις επόμενες ενότητες θα δούμε αναλυτικά το ηχοσύστημα του χρήστη ως μέρος της αλυσίδας αναπαραγωγής ήχου. Το κάθε ηχοσύστημα βέβαια αποτελείται και αυτό από διάφορα στάδια κι επομένως είναι μια υπο-αλυσίδα με περισσότερα μέρη. Το πρώτο στάδιο του ηχοσυστήματος είναι η πηγή του όπως για παράδειγμα ένα CD player ή ένα πικάπ βινυλίου. Ενδιάμεσο στάδιο του ηχοσυστήματος αποτελεί ο ενισχυτής ακουστικών συχνοτήτων που διαδραματίζει ιδιαίτερο ρόλο. Το τελευταίο στάδιο του ηχοσυστήματος είναι τα ηχεία που αποδίδουν τον ήχο ως μηχανικά κύματα στο χώρο ακρόασης και εν τέλει στο αυτί του καταναλωτή. Ο χώρος ακρόασης και η απόκριση του ανθρώπινου αυτιού επίσης επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα όπως θα δούμε στη συνέχεια.

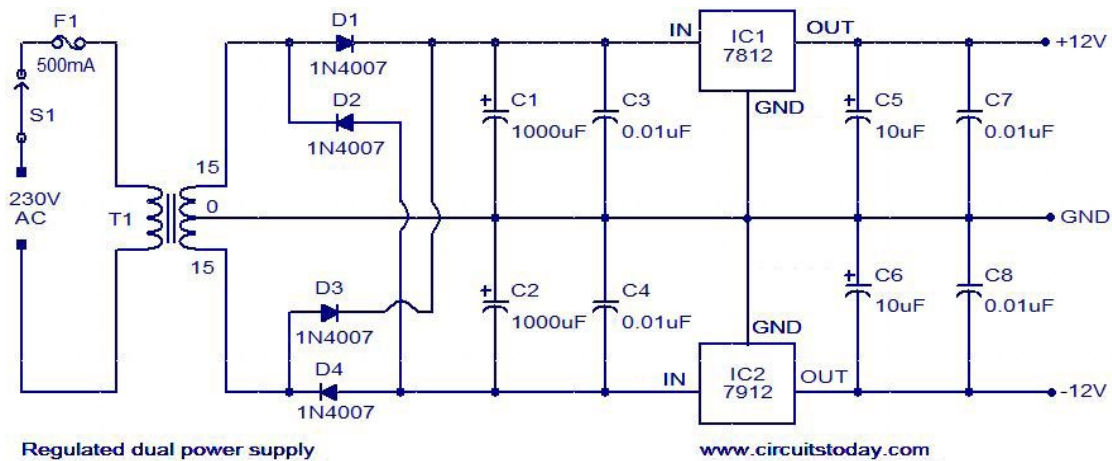
Ας ξεκινήσουμε όμως από τα βασικότερα υποσυστήματα, τα τροφοδοτικά των συσκευών. Είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του ηχοσυστήματος και περνούν συνήθως απαρατήρητα παρότι επηρεάζουν δυνητικά την πιστότητα της αναπαραγωγής ήχου.

### 7.10.2 Η τροφοδοσία ενός ηχοσυστήματος

Κάθε ηλεκτρονική συσκευή που χρησιμοποιεί το ηχοσύστημα ενός χρήστη περιέχει κάποια μορφή τροφοδοτικού είτε η κύρια πηγή τάσης είναι μία μπαταρία είτε η παροχή από το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η τροφοδοσία μπορεί να εισάγει θόρυβο και παρεμβολές στο χαμηλής τάσης αναλογικό ή ψηφιακό ηλεκτρικό σήμα που μεταδίδεται από μια πηγή σε έναν ενισχυτή. Επίσης, οι τελικοί ενισχυτές ισχύος συχνά υποφέρουν από το βόμβο που εμφανίζεται στις γραμμές τροφοδοσίας τους.

Τα παλαιότερα τροφοδοτικά με μετασχηματιστή AC, γέφυρα διόδων ανόρθωσης, πυκνωτές εξομάλυνσης της DC τάσης και σταθεροποίηση εμφάνιζαν συνήθως μικρές κυματώσεις της DC τάσης και AC θόρυβο χαμηλής συχνότητας περί τα 50-120Hz στην έξοδό τους. Το μικρής ισχύος αναλογικό σήμα εξόδου μιας πηγής μπορεί να επηρεαστεί από αυτά τα ελαττώματα του συστήματος τροφοδοσίας. Η κυμάτωση της DC τάσης μπορεί να ακουστεί ως αστάθεια στην ένταση του σήματος εξόδου ενώ ο AC θόρυβος που βρίσκεται εντός του ακουστικού φάσματος ακούγεται ως βόμβος στην έξοδο της πηγής. Καλή εξομάλυνση της ανορθωμένης τάσης με μεγάλης χωρητικότητας πυκνωτές εξομάλυνσης μπορεί να μειώσει αυτά τα φαινόμενα σημαντικά. Επίσης, η χρήση μαγνητικά θωρακισμένου μετασχηματιστή (π.χ. τοροειδή) είναι απαραίτητη για τη μείωση φαινομένων παρεμβολών. Η εσωτερική σχεδίαση και απομόνωση κάθε υποσυστήματος της πηγής ήχου είναι επίσης σημαντική. Πολλοί κατασκευαστές για παράδειγμα οδηγούν παράλληλα καλώδια τροφοδοσίας και σήματος με αποτέλεσμα να επάγεται θόρυβος από το ένα στο άλλο.

Στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα δίνεται το κύκλωμα ενός παραδοσιακού τροφοδοτικού συμμετρικής τάσης +/-12Vdc που ενσωματώνεται σε ηχοσύστημα.

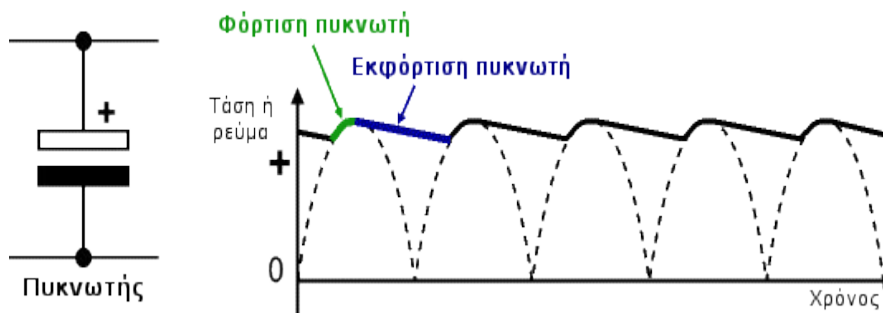


Σχήμα 7.3

Παρατηρούμε το μετασχηματιστή T1 με πρωτεύον τύλιγμα στα 230Vac και δύο δευτερεύοντα τυλίγματα των 15Vac με μεσαία λήψη (center tap) που συνδέεται στη γείωση του συστήματος. Η γέφυρα διόδων 1N4007 αναλαμβάνει την ανόρθωση των εναλλασσόμενων τάσεων των 15V σε δύο συμμετρικές dc τάσεις με τιμή  $V_{dc} = 0,637 \cdot V_{ACmax} = 9,55\text{Volts}$ .

Το πλάτος της  $V_{dc}$  δεν είναι όμως επαρκές για την τροφοδοσία του κυκλώματος που θέλουμε με +/- 12V. Ο λόγος γι αυτό το φαινόμενο είναι πως η τάση παρουσιάζει μεγάλη κυμάτωση (ripple). Η εξομάλυνση των κυματώσεων της DC τάσης που παράγει η ανόρθωση θα γίνει από τους πυκνωτές C1 και C2 πρωτίστως και δευτερευόντως θα γίνει μία καλύτερη εξομάλυνση των κυματώσεων υψηλής συχνότητας από τους C3 και C4 πυκνωτές. Με την εξομάλυνση, η κυμάτωση μειώνεται και η  $V_{dc}$  αυξάνεται κατά πλάτος αγγίζοντας ιδανικά τη μέγιστη τάση  $V_{max}$  πλάτους  $1,414 \cdot V_{ACmax} - 1,4V = 19,81V$ . Η πτώση τάσης των 1,4V οφείλεται στην πτώση τάσης πάνω σε κάθε δίοδο που είναι 0,7V και το γεγονός πως μόνο 2 δίοδοι άγουν κάθε φορά. Εντούτοις, η μέγιστη τάση των 19,81V δεν είναι σταθερή και είναι πολύ υψηλότερη από αυτή των 12V που θέλουμε να παρέχουμε στο φορτίο.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε με διακεκομμένη γραμμή την τάση εξόδου της γέφυρας ανόρθωσης χωρίς πυκνωτές εξομάλυνσης και με ενιαία γραμμή την τάση με χρήση πυκνωτών εξομάλυνσης.



Σχήμα 7.4

Η μέγιστη τιμή της κυμάτωσης  $V_{ripple}$  υπολογίζεται σε αυτή την περίπτωση από τον τύπο:

$$V_{(ripple)} = \frac{I_{(load)}}{f \times C}, \text{ Volts}$$

Όπου  $I$  είναι το ρεύμα DC που ζητά το φορτίο σε amperes,  $f$  είναι η συχνότητα του κυματισμού ή

δύο φορές η συχνότητα της τάσης Vac εισόδου σε Hertz (100Hz για το Ευρωπαϊκό σύστημα παροχής ηλεκτρισμού) και C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή εξομάλυνσης σε Farads. Όσο μεγαλύτερη η χωρητικότητα του πυκνωτή, τόσο χαμηλότερη η κυμάτωση της τάσης εξόδου του ανορθωτή. Ιδανικά θέλουμε να έχουμε όσο σταθερότερη τάση γίνεται και άρα μηδενική κυμάτωση. Δεδομένου ότι δε μπορούμε να αυξήσουμε επ' άπειρον τη χωρητικότητα των πυκνωτών, χρησιμοποιούμε άλλες μεθόδους σταθεροποίησης της τάσης. Μία λύση που χρησιμοποιείται συχνά είναι ο ψαλιδισμός ουσιαστικά της τάσης εξόδου του ανορθωτή. Έτσι η τιμή της τάσης εξόδου που παρουσιάζει μέγιστο πλάτος 19,81V και κάποια κυμάτωση μπορεί να μειωθεί και να σταθεροποιηθεί. Για τον ψαλιδισμό και τη σταθεροποίηση της τάσης χρησιμοποιούνται δύο διόδους zenen τύπου με κατάλληλης τιμής τάση κατάρρευσης ή συνηθέστερα ολοκληρωμένα κυκλώματα σταθεροποίησης. Στο παράδειγμά μας χρησιμοποιούμε ένα σετ ολοκληρωμένων κυκλωμάτων-σταθεροποιητών, το IC1 με κωδικό LM7812 για τη θετική τάση +12Vdc και το IC2 με κωδικό LM7912 για την αρνητική συμμετρική τάση -12Vdc. Οι πυκνωτές C5 έως C8 λειτουργούν ως βαθυπερατά φίλτρα αποκοπής υψίσυχνου θορύβου που μπορεί να παραχθεί από το κύκλωμα σταθεροποίησης.

Τα σύγχρονα τροφοδοτικά που είναι διακοπτικής λειτουργίας SMPS (switched mode power supplies) είναι αρκετά οικονομικότερα στην υλοποίηση αλλά δημιουργούν συνήθως υψίσυχνο θόρυβο λόγω της υψηλής διακοπτικής συχνότητάς τους. Παλμοί με μεταβλητό πλάτος και σε συγκεκριμένη διακοπτική συχνότητα παράγονται από κάποιο λογικό σύστημα ελέγχου των τρανζίστορ του μετατροπέα ισχύος. Η διακοπτική συχνότητα συχνά ακούγεται ακόμη και φυσικά από το ανθρώπινο αυτί αν βρίσκεται σε εύρος περί τα 10-15kHz. Ο συντονισμός μεταλλικών μερών του τροφοδοτικού όπως μετασηματιστών και ψηκτρών σε αυτή τη συχνότητα παράγουν αυτό το χαρακτηριστικό θόρυβο που μπορεί να γίνει και ενοχλητικός αν δεν υπάρχει επαρκής ηχομόνωση του τροφοδοτικού. Η συχνότητα αυτή εμφανίζεται όμως και ως θόρυβος στο ηχητικό σήμα εξόδου της πηγής λόγω crosstalk και ανεπαρκούς φιλτραρίσματος της DC τάσης εξόδου του τροφοδοτικού. Ακόμη και ενσωματωμένοι μετατροπέες ισχύος DC-DC διαφόρων φορητών συσκευών όπως laptops, tablets, κινητών και media players παράγουν υψίσυχνους θορύβους. Η καλή σχεδίαση του τροφοδοτικού και η απομόνωσή του από το λοιπό σύστημα που διαχειρίζεται τα ηχητικά σήματα είναι πολύ σημαντικές. Συσκευές της κατηγορίας hi-end υψηλής πιστότητας ήχου, συνήθως διαθέτουν ξεχωριστές μονάδες τροφοδοσίας εκτός του σασί των συσκευών που τροφοδοτούν ώστε να υπάρχει επαρκής απομόνωση μεταξύ τους. Για λόγους μείωσης κόστους και χρόνου παραγωγής βέβαια, τα τροφοδοτικά που συνοδεύουν ακόμη και μερικές υψηλού κόστους συσκευές επιλέγονται ώστε να πληρούν οριακά μερικές απαιτήσεις ασφαλείας χωρίς να ενδιαφέρει καθόλου η απόδοσή τους. Οι περισσότερες δε βλάβες που εμφανίζει ο σύγχρονος ηχητικός εξοπλισμός οφείλεται σε αστοχία της τροφοδοσίας.

### 7.10.3 Οι πηγές ενός ηχοσυστήματος

Αναφέραμε στα προηγούμενα κεφάλαια αρκετές από τις ψηφιακές και αναλογικές πηγές ήχου που συναντούμε συνήθως σε ηχοσυστήματα. Ακόμη και τα συστήματα που είναι σχεδιασμένα σε μορφή all-in-one (όλα σε ένα) περιλαμβάνουν συνήθως ξεχωριστό σύστημα πηγών ήχου. Συνήθως μάλιστα ενσωματώνουν διάφορες πηγές ήχου σε μία μονάδα και κάθε φορά επιλέγεται η αντίστοιχη πηγή από τον χρήστη.

Κλασικές αναλογικές πηγές ήχου είναι ο ραδιοφωνικός δέκτης, το κασετόφωνο και το πικάπ δίσκων βινυλίου. Οι αναλογικές πηγές ήχου μπορεί να είναι πολύ απλές ως ηλεκτρονικές συσκευές όπως για παράδειγμα ένα πικάπ βινυλίου που αποτελείται από μία κεφαλή ανάγνωσης και δύο καλώδια σύνδεσης με τον προενισχυτή πικάπ. Άλλες συσκευές όπως το κασετόφωνο αποτελούνται από διάφορα υποσυστήματα πέρα από μια κεφαλή ανάγνωσης της μαγνητικής ταινίας. Οι ψηφιακές πηγές ήχου όπως ένα cd, dvd ή mp3 player έχουν μεγάλη κυκλωματική πολυπλοκότητα καθώς αποτελούνται από ψηφιοαναλογικούς μετατροπέες, αποκωδικοποιητές κι επεξεργαστές σήματος, μνήμες προσωρινής αποθήκευσης, λογικό σύστημα ελέγχου και φυσικά ψηφιακό ρολόι χρονισμού. Στον παρακάτω πίνακα παρατηρούμε τους συνηθέστερους τύπους πηγών για οικιακό ηχοσύστημα καθώς και τους τρόπους σύνδεσης με τον ενισχυτή του συστήματος:

Πηγές αναλογικές	τρόπος σύνδεσης με τον ενισχυτή	Πηγές ψηφιακές	τρόπος σύνδεσης με τον ενισχυτή
Ραδιόφωνο am/fm	2 RCA ή DIN βύσματα	H/Y σε ρόλο home theater PC (HTPC) ή έξυπνη συσκευή tablet/κινητού	2, 6 ή 8 βύσματα RCA, βύσμα jack 3.5mm, ψηφιακή SPDIF ή HDMI, USB ή RJ45, ασύρματα με Bluetooth ή Miracast
πικάπ βινυλίου	2 RCA βύσματα αλλά χρειάζεται κατάλληλη προενίσχυση και ισοστάθμιση κατά RIAA συνήθως	cd player	2 RCA βύσματα, XLR βύσματα ή S/PDIF
κασετόφωνο	2 RCA ή XLR βύσματα	dvd player	2, 6 ή 8 βύσματα RCA, Scart αναλογική έξοδος A/V, ψηφιακή SPDIF ή HDMI
Μείκτης μικροφώνων και πηγών	2 RCA ή XLR βύσματα	blu ray player	2, 6 ή 8 βύσματα RCA, ψηφιακή SPDIF ή HDMI
		media player	2 βύσματα RCA, ψηφιακή SPDIF ή HDMI, USB ή RJ45, βύσμα jack 3.5mm
		Ψηφιακός δέκτης λήψης, επίγειος ή δορυφορικός	2 βύσματα RCA, ψηφιακή SPDIF ή HDMI, USB

Πίνακας 7.8

Κάθε πηγή, απλή ή πολύπλοκη χρειάζεται κάποιες περιφερειακές συσκευές για την υποστήριξη της λειτουργίας της και την καλύτερη δυνατή απόδοση. Ένας ραδιοφωνικός δέκτης AM ή FM απαιτεί για παράδειγμα κατάλληλη κεραία λήψης για να επιτύχει την καλύτερη ηχητική απόδοση. Ένα πικάπ απαιτεί έναν κατάλληλο προενισχυτή πικάπ με ισοστάθμιση συχνοτήτων κατά RIAA όπως έχουμε περιγράψει. Ένα κασετόφωνο συνήθως ενσωματώνει σύστημα αποθορυβοποίησης και αποκωδικοποίησης Dolby ή DBX. Τα περιφερειακά συστήματα αυτά είναι σημαντικά για κάθε πηγή ήχου.

#### 7.10.4 Οι έξοδοι (outputs) των πηγών

Η έξοδος που δίνει μία πηγή ήχου μπορεί να είναι αναλογική ή ψηφιακή. Για παράδειγμα, οι περισσότερες ψηφιακές πηγές ήχου όπως ένα blu-ray player διαθέτουν ένα μία στερεοφωνική έξοδο ήχου υπό μορφή 2 βυσμάτων τύπου RCA, ένα για το αριστερό και ένα για το δεξί κανάλι. Άλλα dvd ή blu-ray players διαθέτουν 6 διακριτές αναλογικές εξόδους για την αναπαραγωγή πολυκαναλικού ήχου DTS ή Dolby Digital. Εντούτοις, οι αναλογικές εξοδοι γίνονται ολοένα και σπανιότερες στα σύγχρονα dvd και blu-ray ή media players. Αντίθετα, οι ψηφιακές διασυνδέσεις τύπου HDMI και S/PDIF (Sony/Philips Digital Interface Format) μέσω οπτικών ινών πληθαίνουν συνεχώς. Βέβαια, το S/PDIF πρότυπο μπορεί να μεταδώσει ασυμπιεστο στερεοφωνικό σήμα ή συμπιεσμένο με απώλειες πολυκαναλικό περιεχόμενο. Αντίθετα το HDMI υποστηρίζει πολυκαναλικά πρότυπα χωρίς απώλειες όπως τα Dolby TrueHD και DTS-HD Master Audio.

Όταν το σήμα μεταδίδεται αναλογικά από την πηγή προς τον προενισχυτή ή ενισχυτή του ηχοσυστήματος, είναι σημαντική η εσωτερική δομή και υλοποίηση των κυκλωμάτων ήχου της πηγής. Δοκιμές ακρόασης και ανάλυση τεχνικών προδιαγραφών έχουν δείξει πως μπορούν να εντοπιστούν διαφορές μεταξύ πηγών που αναπαράγουν το ίδιο ακριβώς μέσο. Αυτό συνήθως οφείλεται στη διαφορετική υλοποίηση κάθε πηγής καθώς και τη σχεδίασή της. Απλούστερες συσκευές δεν σχεδιάζονται πάντοτε με στόχο να καλύπτουν πλήρως τις προδιαγραφές ενός προτύπου. Κάποια πρότυπα όπως τα MPEG διαθέτουν απαιτήσεις και προτάσεις. Οι απαιτήσεις πληρούνται από τις περισσότερες συσκευές αποκωδικοποίησης όμως οι προτάσεις για καλές επιδόσεις πληρούνται σπάνια. Για τη μείωση του κόστους παραγωγής και της πολυπλοκότητας ενός κυκλώματος, μερικές συσκευές σχεδιάζονται ενδεχομένως ώστε να καλύπτουν οριακά τις απαιτήσεις ενός προτύπου. Για παράδειγμα, ένα απλό και οικονομικό dvd player μπορεί να έχει τον ίδιο αποκωδικοποιητή με ένα περισσότερων δυνατοτήτων όμως η υλοποίηση του αναλογικού σταδίου εξόδου του να είναι πολύ διαφορετική. Τότε μπορεί κάποιος να ακούσει διαφορές μεταξύ διαφορετικών υλοποιήσεων που στηρίζονται όμως σε όμοιο ψηφιοαναλογικό μετατροπέα (DAC). Επίσης, η χαμηλότερη ποιότητα ψηφιακών κυκλωμάτων συγχρονισμού δημιουργεί φαινόμενα γρήγορων και μεταβατικών αλλαγών στη συχνότητα ενός ήχου που συνήθως καλούνται «jitter». Επομένως η έκφραση «το CD ακούγεται καλύτερα από το βινύλιο» ή το αντίστροφο δεν έχει ιδιαίτερο νόημα αν δεν αναφερόμαστε σε δοκιμή που έχει γίνει με ίδιας κατηγορίας και ποιότητας πηγές, σε ίδιο ενισχυτή, ηχεία και χώρο ακρόασης.

Κάθε πηγή ήχου εκτός των απλών πικάπ βινυλίου και φορητών συσκευών όπως κινητά & mp3 players, πρέπει κατά σύμβαση να παράγει αναλογικό σήμα στην έξοδό της που βρίσκεται εντός συγκεκριμένων προδιαγραφών. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν στο επίπεδο τάσης και έντασης του σήματος καθώς και στη σύνθετη αντίσταση εξόδου της πηγής.

Η αντίσταση εξόδου των αναλογικών πηγών σχεδόν κάθε ηχοσυστήματος έχει τιμή περί τα 100 έως 600 Ω. Η αντίσταση εισόδου του προενισχυτή στον οποίο συνδέεται αναλογικά η πηγή έχει συνήθως υψηλή τιμή περί τα 10-100KΩ. Η επιλογή αυτή την αντιστάσεων γίνεται για τη γεφύρωση (impedance bridging) των 2 συσκευών. Η γεφύρωση των αντιστάσεων απαιτεί πολύ χαμηλή αντίσταση εξόδου της πηγής και πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου του λήπτη (receiver) ώστε να μεγιστοποιείται η τάση στα άκρα της εισόδου του λήπτη. Δεν επιλέγεται όμως σχεδόν αντίσταση εισόδου ώστε να μην εισέρχεται εύκολα θόρυβος χαμηλής έντασης στο κύκλωμα του προενισχυτή. Δε χρειάζεται ταίριασμα αντιστάσεων (impedance matching) καθώς συνήθως γίνεται χρήση καλωδίων μήκους αρκετά μικρότερου από το μήκος κύματος του σήματος που οδηγείται μέσα από αυτά. Επομένως δεν έχουμε εμφάνιση φαινομένων γραμμής μεταφοράς για τα αναλογικά σήματα. Εντούτοις, ψηφιακά σήματα υψηλών συχνοτήτων έχουν άλλες απαιτήσεις διασύνδεσης.

Το επίπεδο της τάσης εξόδου των πηγών ενός τυπικού ηχοσυστήματος ονομάζεται επίπεδο γραμμής ή «line level» στα Αγγλικά. Το σήμα επίπεδου γραμμής είναι ένα σήμα εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς DC συνιστώσα (DC offset), πράγμα που σημαίνει ότι η τάση του μεταβάλλεται σε σχέση με την γείωση σήματος από την κορυφή πλάτους (για παράδειγμα 1,5 V) έως την ισοδύναμη αρνητική τάση (-1,5 V).

Το επίπεδο γραμμής περιγράφει την ονομαστική στάθμη μιας γραμμής σήματος ως ποσοστό, που εκφράζεται σε ντεσιμπέλ, έναντι μιας πρότυπης τάσης αναφοράς. Η ονομαστική στάθμη και η τάση αναφοράς έναντι της οποίας εκφράζεται εξαρτώνται από το επίπεδο της γραμμής που χρησιμοποιείται. Ενώ τα ονομαστικά επίπεδα ποικίλλουν, μόνο δύο τάσεις αναφοράς είναι κοινές: Volt ντεσιμπέλ (dBV) για καταναλωτικές εφαρμογές, και ντεσιμπέλ χωρίς φορτίο (DBU dB Unloaded) για επαγγελματικές εφαρμογές. Η τάση αναφοράς για τα μηδέν volt decibel (0 dBV) είναι 1 VRMS. Η τάση αναφοράς για την decibel χωρίς φορτίο (0 dBu) είναι η τάση AC που απαιτείται για να παραχθεί 1 mW ισχύος σε ένα φορτίο 600 Ω (περίπου 0,7746 VRMS). Η σύμβαση για τα 600Ω έχει μείνει από τα πρώτα πρότυπα τηλεφωνίας, τα οποία χρησιμοποιούν 600 Ω αντιστάσεις τερματισμού πηγών και φορτίων. Ο σύγχρονος εξοπλισμός ήχου δεν χρησιμοποιεί 600Ω ταιριασμένα φορτία, εξ ου και η χρήση της έκφρασης «dBm unloaded = dBu».

Η πιο κοινή ονομαστική στάθμη για καταναλωτικό εξοπλισμό ήχου είναι τα -10 dBV και η πιο κοινή ονομαστική στάθμη για επαγγελματικό εξοπλισμό είναι τα 4 dBu. Σε απόλυτους όρους, ένα σήμα

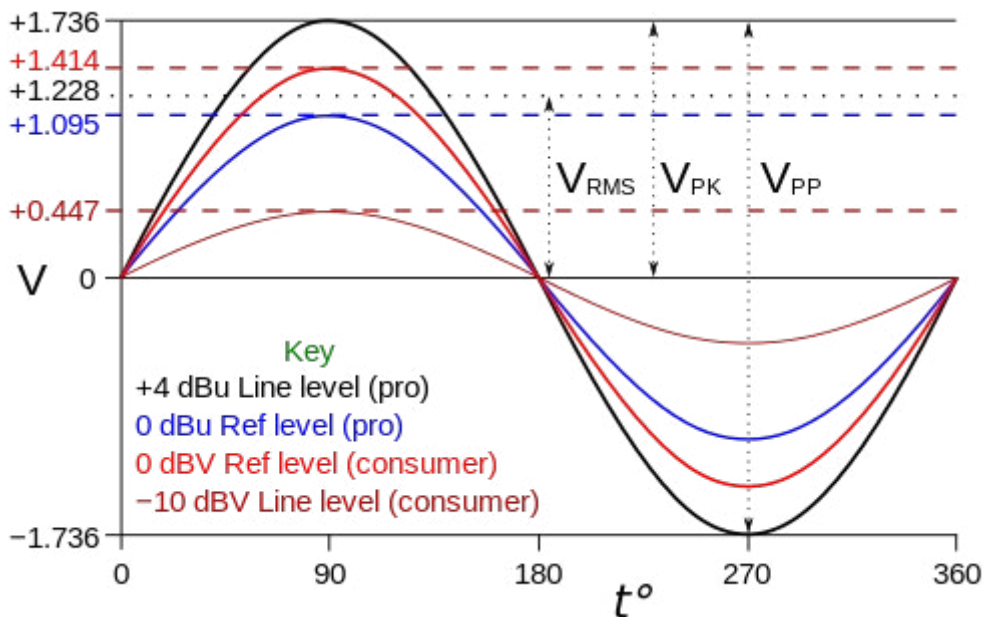
στα -10 dBV είναι ισοδύναμο με ένα ημιτονικό σήμα με πλάτος αιχμής (VPK) περίπου 0.447 Volts, ή οποιοδήποτε γενικό σήμα στα 0.316 VRMS. Ένα σήμα στα 4 dBu είναι ισοδύναμο με ένα ημιτονικό σήμα με ένα μέγιστο πλάτος περίπου 1.736 V, ή οποιοδήποτε γενικό σήμα ενεργού τάσης περίπου 1.228 VRMS.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα ονομαστικά επίπεδα και τα επίπεδα τάσεων για επαγγελματική και καταναλωτική εφαρμογή:

Χρήση:	Ονομαστικό Επίπεδο	Ονομαστική τάση, $V_{RMS}$	Τάση αιχμής, $V_{PK}$	Τάση από κορυφή σε κορυφή, $V_{PP}$
Επαγγελματικός εξοπλισμός	+4 dBu	1.228	1.736	3.472
Καταναλωτικός Εξοπλισμός	-10 dBV	0.316	0.447	0.894

Πίνακας 7.9

Στο παρακάτω γράφημα βλέπουμε την τάση συναρτήσει του χρόνου των κυμάτων ημιτόνου σε επίπεδα αναφοράς και γραμμής (line level), με VRMS, VPK, και VPP που σημειώνονται για το επίπεδο +4dBu.



Σχήμα 7.5

Όταν το σήμα μεταδίδεται ψηφιακά στη συσκευή προενίσχυσης ή ενίσχυσης ουσιαστικά παραλείπεται το στάδιο της μετατροπής ψηφιακού σε αναλογικό σήμα από την πηγή. Το σύστημα ψηφιοαναλογικής μετατροπής DAC (digital to analog converter) του ενισχυτή αναλαμβάνει αυτή την εργασία που είναι ουσιαστικά πολύ σημαντική. Θεωρητικά, δεν εντοπίζεται διαφορά στην πιστότητα του ηχητικού σήματος μεταξύ συσκευών που συνδέονται ψηφιακά με ίδιο τρόπο με τον ίδιο ενισχυτή διαχείρισης εικόνας και ήχου (Audio/Video, A/V). Επομένως είναι σημαντικό να επενδύσει κανείς σε πολύ καλής ποιότητας ενισχυτή AV με ψηφιακές εισόδους. Οι πηγές όπως τα dvd players είναι πλέον αρκετά οικονομικές και συχνά αναλώσιμες καθώς νέα μοντέλα με περισσότερες δυνατότητες όπως blu-ray players με διαδικτυακές δυνατότητες, εμφανίζονται διαρκώς.

### 7.10.5 Ταίριασμα πηγών και προενισχυτών

Οι περισσότερες συσκευές που διαθέτουν ψηφιακές εξόδους μπορούν να συνδεθούν στην κατάλληλη θήρα εισόδου ενός προενισχυτή ή ενισχυτή. Σε αυτή την περίπτωση, το βάρος της επεξεργασίας του σήματος και η πιστότητα του αναλογικού σήματος εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την υλοποίηση του κυκλώματος του προενισχυτή/αποκωδικοποιητή.

Για τις αναλογικές διασυνδέσεις πηγών και ενισχυτών, η εικόνα είναι εντελώς διαφορετική. Το σωστό «ταίριασμα» της πηγής με τον ενισχυτή είναι μία δύσκολη υπόθεση. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να δούμε μερικά χαρακτηριστικά που θα βελτιώσουν τη διασύνδεση αυτή:

Χρήση κατάλληλων και ποιοτικών καλωδίων διασύνδεσης	Οι διαφορές στην απόδοση των καλωδίων φαίνονται κυρίως όταν γίνεται ακατάλληλη χρήση τους ή κακή σχεδιάσή τους. Προτιμώνται καλώδια ομοαξονικού τύπου με καλή μόνωση και μπλεντάζ γείωσης που λειτουργεί ως κλωβός Farad για τη θωράκιση από εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι χωρητικότητα του καλωδίου ως προς τη γείωση πρέπει όμως να είναι αμελητέα καθώς διαφορετικά θα έχουμε βύθιση του σήματος στις υψηλές συχνότητες αφού το καλώδιο θα δρα ως βαθυπερατό φίλτρο. Η χωρητικότητα μεταξύ των διαφορετικών καλωδίων εντός του ίδιου πακέτου πρέπει να είναι επίσης πολύ μικρή για να μειωθούν τα φαινόμενα crosstalk μεταξύ των καναλιών.
Χρήση κατάλληλων βυσμάτων	Πολλά βύσματα υπάρχουν στο εμπόριο και στόχος είναι η σωστή χρήση κάθε βύσματος για την εφαρμογή που θέλουμε. Τα συνήθη βύσματα των πηγών είναι τα RCA. Υψηλής αγωγιμότητας κράματα μετάλλων χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους όπως π.χ. γίνεται για τα επιχρυσωμένα βύσματα. Προσεκτική πρέπει να είναι και η κόλληση των βυσμάτων στα καλώδια. Προτιμώνται συνδέσεις χωρίς ηλεκτροκόλληση ώστε να μην εμφανίζεται παρασιτική χωρητικότητα από το Καλά και μείωση της αγωγιμότητας. Μερικές φορές παράγονται «ψυχρές κολλήσεις» και σε βιομηχανικό περιβάλλον μειώνοντας σημαντικά την απόδοση των καλωδίων.

<p>Χρήση ενισχυτικού σταδίου απομόνωσης (Buffer)</p>	<p>Τα περισσότερα σήματα των πηγών είναι μικρά σε ισχύ και ευαίσθητα σε παρεμβολές και απώλειες λόγω κακής προσαρμογής αντίστασης. Πολλές πηγές δεν έχουν σχεδόν μηδενική αντίσταση εξόδου και οι προενισχυτές δεν διαθέτουν σχεδόν άπειρη αντίσταση εισόδου. Ένα στάδιο ενίσχυσης σε συνδεσμολογία μοναδιαίου κέρδους (unity gain) με μεγάλη αντίσταση εισόδου και μικρή αντίσταση εξόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την περίπτωση. Συνήθως επιλέγεται ένας τελεστικός ενισχυτής (Operational Amplifier) με μοναδιαίο κέρδος ή ένας ενισχυτής με FET ή BJT transistor σε συνδεσμολογία κοινής υποδοχής ή κοινού εκπομπού αντίστοιχα.</p>
<p>Σωστή συντήρηση</p>	<p>Η καλή συντήρηση των βυσμάτων και καλωδίων είναι βασική για την καλή διασύνδεση των πηγών και ενισχυτών. Τα καλώδια δεν πρέπει να τυλίγονται σφικτά για αποφυγή αποκοπής κλώνων τους αλλά και για μείωση της παρασιτικής χωρητικότητας και αυτεπαγωγής τους. Πολλοί τεχνικοί χρησιμοποιούν καθαριστικό επαφών σε μορφή σπρέι για τον καθαρισμό από λίπη, σκόνη, εναποθέσεις και σκουριά. Χάλκινα καλώδια και βύσματα οξειδώνονται με την πάροδο του χρόνου και πρέπει να αντικαθίστανται.</p>

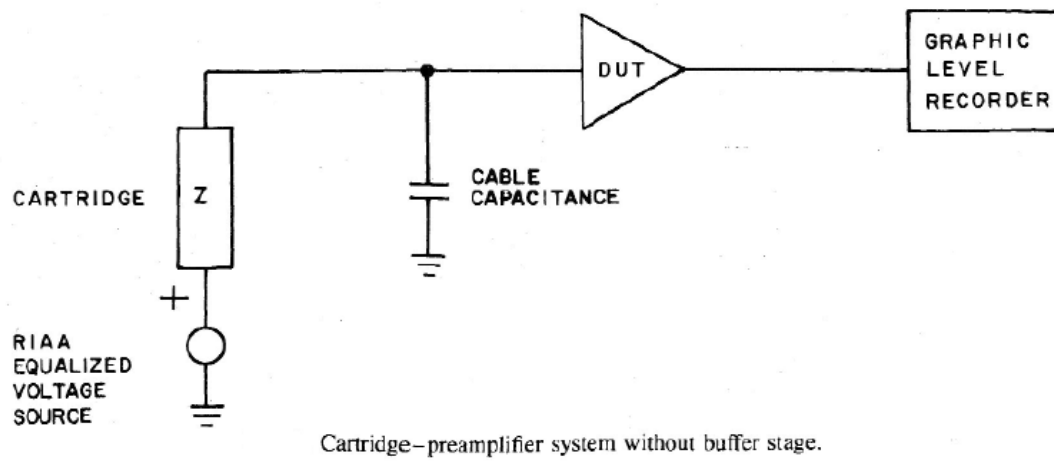
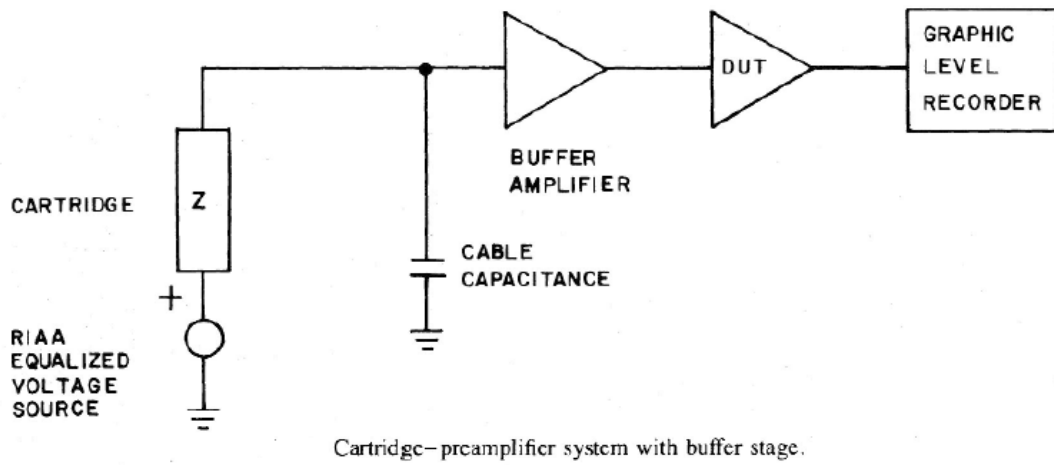
Πίνακας 7.10

Για τις πηγές ήχου ιδιαίτερα χαμηλής ισχύος όπως οι κεφαλές των πικάπ και οι κάψουλες των μικροφώνων, η χρήση σταδίου απομονωτή (buffer) και η κατάλληλα προενίσχυση είναι απαραίτητες. Ας δούμε για παράδειγμα τη βελτίωση στην απόδοση μιας κεφαλής πικάπ με χρήση buffer ενισχυτή ενός FET σε συνδεσμολογία κοινής υποδοχής.

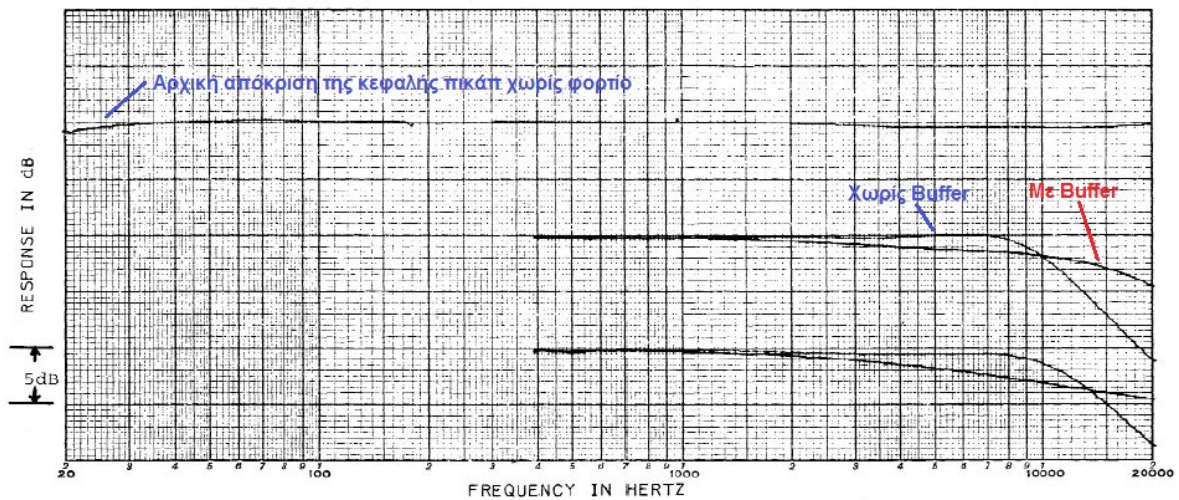
Αρχικά, η κεφαλή είναι ικανή για απόκριση συχνοτήτων 20-20000Hz με διακύμανση +/- 0.5dB μόνο. Στη συνέχεια συνδέεται με καλώδιο rca σε προενισχυτή με αντίσταση εισόδου 47KΩ. Το καλώδιο σύνδεσης της κεφαλής πικάπ με τον προενισχυτή της παρουσιάζει 200pF χωρητικότητα ως προς τη γείωση (σχήμα 7.6). Το γεγονός αυτό αλλοιώνει την απόκριση συχνοτήτων της κεφαλής στις υψηλές συχνότητες καθώς παρουσιάζεται βύθιση κατά 1,5dB στα 7kHz, 3dB στα 10kHz και 6,5dB στα 20kHz όπως φαίνεται στο σχήμα 7.7.

Η τοποθέτηση ενός απλούστατου ενισχυτή μοναδιαίου κέρδους υλοποιημένου με ένα fet σε συνδεσμολογία κοινής υποδοχής και αντίσταση εισόδου 47KΩ (σχήμα 7.7), μειώνει τα φαινόμενα φόρτωσης της εξόδου της κεφαλής και αυξάνει το εύρος απόκρισης συχνοτήτων (σχήμα 7.8).

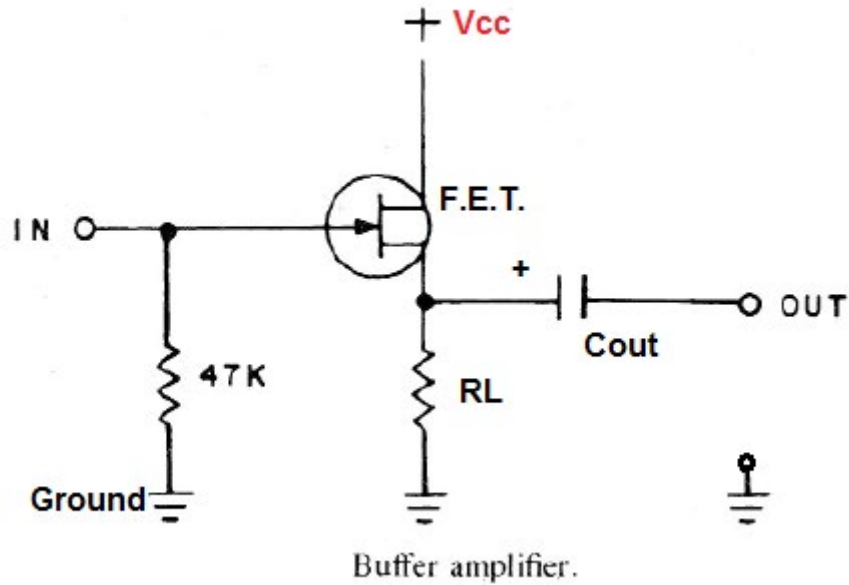




Σχήμα 7.6



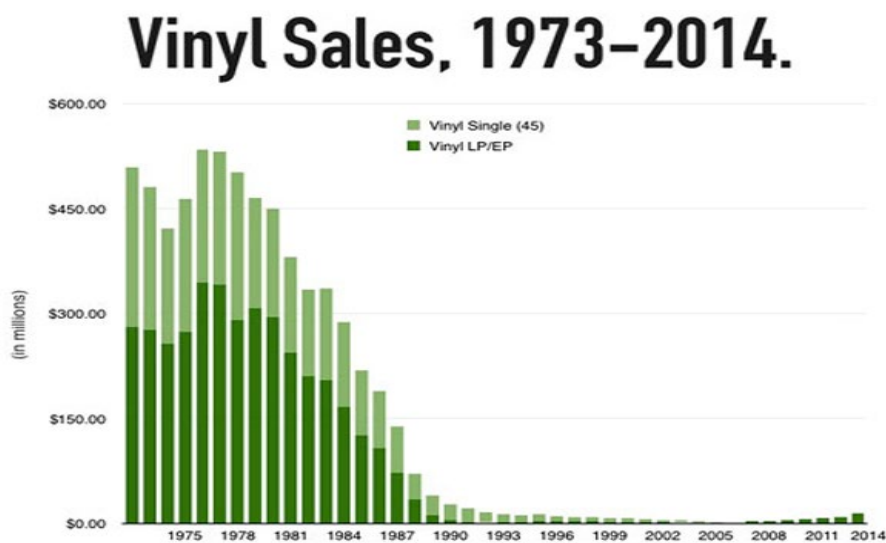
Σχήμα 7.7



Σχήμα 7.8

### 7.10.6 Σύγκριση μεταξύ των αναλογικών και ψηφιακών πηγών του ήχου

Σήμερα μπορεί κανείς να βρει ένα πολύ δημοφιλές album μουσικής σε όποια μορφή θέλει: σε κλασσικούς δίσκους βινυλίου, σε κασέτα, σε cd, ίσως σε super audio cd και dvd audio, σε High Fidelity Pure Audio (HFPA) blu-ray δίσκους, σε ψηφιακά αρχεία μορφής FLAC, AAC ή mp3. Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία ελάχιστη αύξηση στη ζήτηση δίσκων βινυλίου και κασετών χάριν σε ένα ρεύμα νέων και παλαιών χρηστών που αναζητούν «ρετρό» υλικό και θέλουν να μάθουν περισσότερα για τη μουσική των δεκαετιών που πέρασαν. Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε αυτή τη μικρή αύξηση στη ζήτηση δίσκων βινυλίου 33 και 45 στροφών, μετά το 2008:

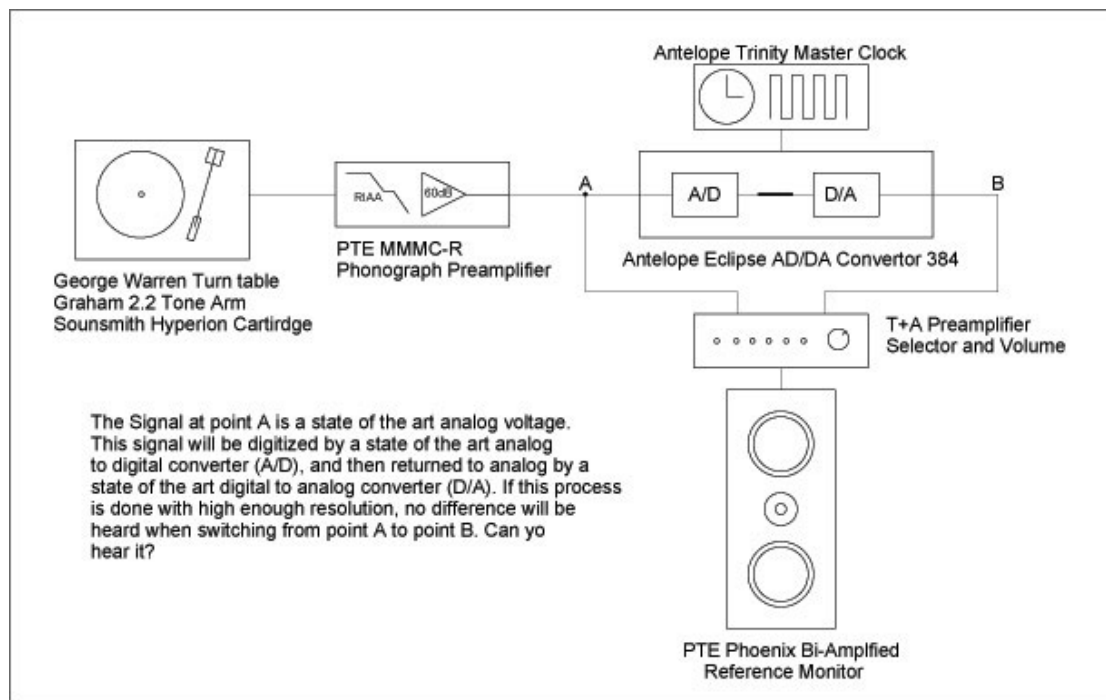


Σχήμα 7.9

Όπως αναφέραμε, δεν έχει ιδιαίτερο νόημα να συγκρίνουμε ως προς την πιστότητα ήχου πηγές που συνδέονται σε διαφορετικούς προ/ενισχυτές και ηχεία. Ένα καλό συγκριτικό τεστ πηγών προϋποθέτει

την ανεξαρτησία του αποτελέσματος από άλλες μεταβλητές και παράγοντες. Η κλασικότερη διαμάχη για τους λάτρεις της μουσικής και του ήχου είναι για την πιστότητα του αναλογικού έναντι του ψηφιακού σήματος. Έχουμε ήδη παραθέσει δοκιμές για τη σύγκριση συμπιεσμένου και ασυμπιεστού ψηφιακού σήματος. Ας δούμε σε αυτό το σημείο μία δοκιμή μεταξύ αναλογικού και ψηφιακού σήματος.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει για παράδειγμα η τυφλή δοκιμή τύπου ABX που έγινε στο Rocky Mountain Audio Fest το 2012 από τον Jim Rush και την PTE. Στη δοκιμασία αυτή, έγινε σύγκριση μεταξύ του πλήρως αναλογικού ηχητικού σήματος ενός κορυφαίου συστήματος ανάγνωσης δίσκου βινυλίου και της ψηφιοποιημένης έκδοσης του ίδιου σήματος. Για τη δοκιμασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η εξής διάταξη εξοπλισμού:



Σχήμα 7.10

Αρχικά, το σήμα της κεφαλής ανάγνωσης Soundsmith Hyperion του δίσκου βινυλίου οδηγείται στον προενισχυτή πικάπ κατά RIAA, MMMC-R της PTE. Ενισχύεται κατά 60dB από τον κορυφαίο αυτό προενισχυτή και φτάνει στο σημείο A της αλυσίδας. Από εκεί, οδηγείται στον προενισχυτή hi fi T+A 2030 και τέλος στα αυτοενισχυόμενα ηχεία τύπου monitor PTE Phoenix που διαθέτουν αναλογικό ενισχυτή τάξης AB.

Το σήμα από το σημείο A οδηγείται στον Antelope Eclipse mastering A/D και D/A μετατροπέα. Η δειγματοληψία του σήματος γίνεται με συχνότητα 92 kilosamples / sec και χρησιμοποιούνται 24 bits / sample (δείγμα) για την κβαντοποίησή του. Για την απαλοιφή φαινομένων jitter χρησιμοποιείται το ψηφιακό ρολόι Antelope Trinity master clock.

Οι ακροατές καλούνται στη δοκιμή αυτή να ακούσουν τα σήματα όπως λαμβάνονται από τα σημεία A και B της αλυσίδας μέσω του ίδιου ενισχυτή και ηχείων, στον ίδιο χώρο ακρόασης. Αρχικά οι ακροατές ακούνε και τα δυο δείγματα, A και B. Επίσης, αναφέρεται στους ακροατές ποιο δείγμα ακούνε. Κατόπιν όμως αναπαράγεται τυχαία ένα από τα δείγματα και καλούνται να αναγνωρίσουν ποιο δείγμα ακούν, το ψηφιοποιημένο ή το πλήρως αναλογικό. Οι ακροατές έχουν 5 προσπάθειες.

Κατά μέσο όρο, μόνο στο 59% των προσπαθειών κατάφεραν οι ακροατές να διακρίνουν ποιο σήμα άκουγαν όπως απεικονίζεται στον παρακάτω πίνακα. Το ποσοστό αυτό είναι οριακό και δείχνει πως δύσκολα μπορεί κανείς να διακρίνει ένα άριστα αναπαραγόμενο αναλογικό σήμα όπως ενός δίσκου βινυλίου από ένα ασυμπιεστο ψηφιοποιημένο ηχητικό σήμα υψηλής ανάλυσης. Ένας ακροατής δή-

λωσε πως ο υψηλών συχνοτήτων ήχος των κύμβων διέφερε ελαφρά στην ψηφιακή έκδοση του σήματος. Έχουμε δείξει στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο πως πράγματι, οι υψηλές συχνότητες είναι εκείνες που παραμορφώνονται ή αποκόβονται σε κάποιο βαθμό κατά την ψηφιοποίηση ενός ηχητικού σήματος. Όσο μάλιστα μειώνεται η συχνότητα δειγματοληψίας, ο ρυθμός bit και η ανάλυση σε bits/δείγμα, τόσο εμφανέστερες είναι οι διαφορές του αναλογικού σήματος από την ψηφιακή έκδοσή του. Παρατηρούμε επομένως γιατί είναι σημαντική η καλή σχεδίαση και υλοποίηση ενός DAC μετατροπέα στα σύγχρονα ηχητικά συστήματα.

Blind Test Results.xls																			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L							
1	Test #	# right	# right	# right	# right	# right	# right	# right		Total Correct	Total Trials	% correct							
2	1	2	3	2						7	15	47							
3	2	5	2	2	4	3	3			19	30	63							
4	3	4	2							6	10	60							
5	5	5	2	0	2	0	2	3		14	35	40							
6	6	3								3	5	60							
7	7	4	3	4	4	3				18	25	72							
8	8	4	2	2						8	15	53							
9	9	3	4	4						11	15	73							
10	10	4	4							8	10	80							
11																			
12	Blind Test of Audibility of the A/D-D/A process conducted by PTE at the Rocky Mountain Audio Fest 2012. Each participant had five trials to choose what they thought they were hearing: the analog source or the digitized copy. Only the test conductor knew which signal was playing. The test was begun by letting the participants hear and know what they were hearing.								Over all	94	160	59							
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			

Πίνακας 7.11

### 7.10.7 Μελέτη ηχητικής απόδοσης του κινητού τηλεφώνου iPhone 5 ως πηγή ήχου

Ακόμη μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ηχητική απόδοση του κινητού Iphone5 σύμφωνα με μετρήσεις του ηλεκτρολόγου μηχανικού Ken Rockwell. Για τη δοκιμή των επιδόσεων του εν λόγω κινητού ως πηγή ήχου χρησιμοποιήθηκε το CD αναφοράς και δοκιμών CBS CD-1 που περιλαμβάνει 21 κομμάτια για τον έλεγχο επιδόσεων συσκευών αναπαραγωγής οπτικών δίσκων CD κυρίως ως προς τη γραμμικότητα και την παραμόρφωση σύμφωνα με τα πρότυπα του Συνδέσμου Βιομηχανιών Ηλεκτρονικών (EIA).

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται αναλυτικά τα περιεχόμενα του CBS CD-1. Το CD αυτό ψηφιοποιήθηκε μέσω του προγράμματος iTunes 10 της Apple κατά Advanced Audio Coding (AAC) με ρυθμό 256kbps ώστε να αποθηκευθεί στο κινητό τηλέφωνο.

CBS CD-1 TEST DISC		FOR MEASURING CD PLAYER PERFORMANCE WITH E.I.A. STANDARD SIGNALS	
1 Reference, L & R, 0 dB, 1 kHz	10 19 997 Hz (Also used for Pitch Error)	16 Square Wave, L & R, 0 dB, 1 002.27 Hz	
2 Left Separation, 0 dB, 1K, 125, 4K, 10K, 16K Hz	11 Sweep Frequency Response, 0 dB, 5Hz – 22.05 kHz	17 Impulse & Polarity Test, 0 dB, L & R	
3 Right Separation, 0 dB, 1K, 125, 4K, 10K, 16K Hz	12 De-emphasis Error, L & R, 1K, 125, 4K, 10K, 16K Hz	18 Linearity, 997 Hz, L & R, 0 dB, –1, –3, –6, –10, –20, –30, –39.99, –49.97, –59.94, –70.31, –80.77, –90.31 dB	
4 Signal/Noise, L & R, Infinity Zero w/o em- phasis	13 Intermodulation Distortion (SMPTE, Twin Tone), L & R 60 Hz + 7 kHz, 11 kHz + 12 kHz	19 Linearity with Dither, 997 Hz, L & R * –70.31, –80.77, –90.31, –100 dB	
5 Dynamic Range, L & R, 1kHz, –60 dB w/o em- phasis	14 Wow & Flutter, L & R, 0 dB, 3150 Hz	20 Fade to Noise with Dither, L & R * –60 dB, 500 Hz	
6 Frequency Response, L & R, 0 dB, 4, 8, 17, 31 Hz	15 Access Time, L & R, 0 dB, 317 Hz	21 Monotonicity, L & R, * 1 102.5 Hz, 10 LSB	
7 61, 127, 251, 499 Hz		*Additional Test Tracks	
8 997, 1999, 4001, 7993 Hz			
9 10 007, 12 503, 16 001, 17 989 Hz			

*Contents of CBS CD-1 test disc. (Courtesy CBS)*

Πίνακας 7.12

Κατόπιν, η αναλογική έξοδος του iPhone 5 συνδέθηκε με τον αναλυτή ηχητικών σημάτων Rohde & Schwarz R&S UPL με ανάλυση παραμόρφωσης έως και 0.00003% THD και απόκριση συχνοτήτων 0-110 kHz. Για την αναπαραγωγή των αρχείων ήχου χρησιμοποιήθηκε η ενσωματωμένη iOS εφαρμογή αναπαραγωγής πολυμέσων του κινητού. Οι δέκτες GSM, GPS, Bluetooth και Wi-Fi απενεργοποιήθηκαν ώστε να μην επάγεται θόρυβος στην έξοδο του κινητού. Η ένταση του κινητού τέθηκε στη μέγιστη ρύθμιση. Έγιναν δοκιμές με μεγάλο φορτίο (200kΩ) που δεν υπερφορτώνει την έξοδο και προσομοιάζει είσοδο προενισχυτή hi-fi αλλά και με χαμηλά ωμικά φορτία ή ακουστικά παράλληλα συνδεδεμένα στην αναλογική έξοδο ήχου τύπου 3.5mm του κινητού.

Ας δούμε μερικές μετρήσεις που έγιναν:

#### Τάση εξόδου:

Φορτίο	0 DBFS @ 1 kHz
200 kΩ	1.0158 V
600 Ω	1.0075 V
37.5 Ω	916.3 mV

Πίνακας 7.13

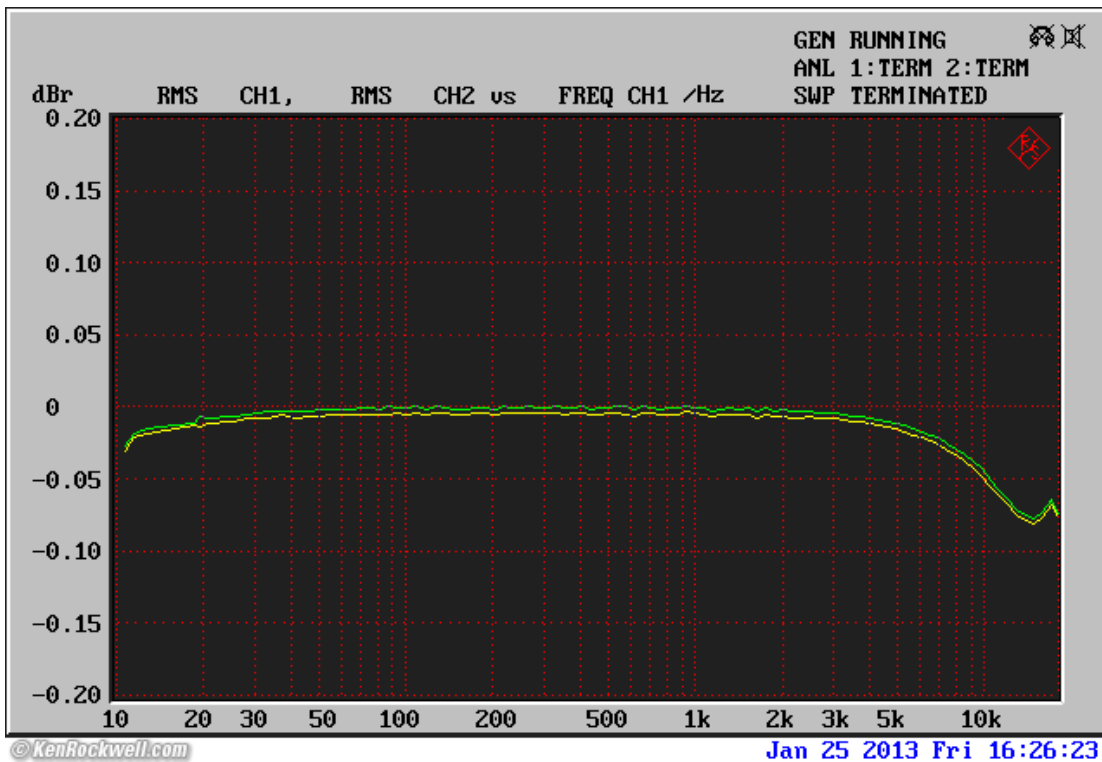
Η αντίσταση εξόδου του κινητού είναι πολύ χαμηλή, μόλις 4,5Ω. Αυτό το χαρακτηριστικό σπανίζει σε πολλές φορητές συσκευές ακόμη και μεγαλύτερης ισχύος.

**Επίπεδο θορύβου της εξόδου:**

-106.8 dBV, A-weighted, αναπαράγοντας σήμα παύσης (σιωπής)

-116 dBV, A-weighted, σε αναμονή

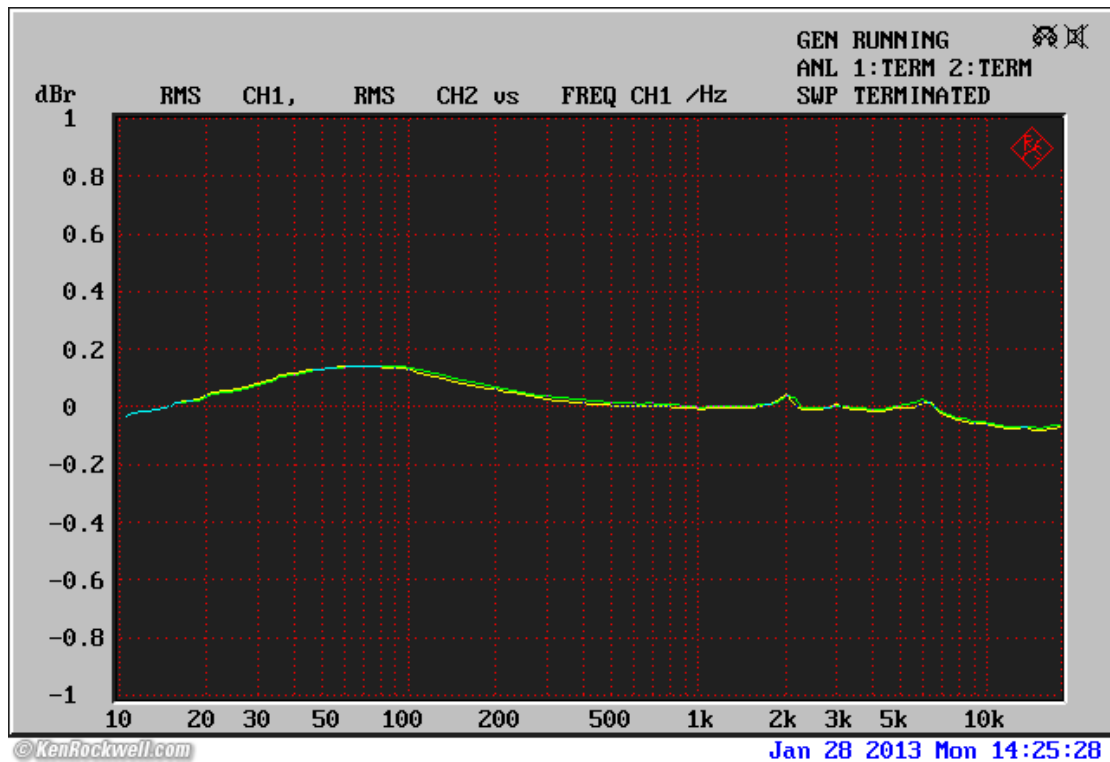
Παρακάτω δίνεται η απόκριση συχνοτήτων του κινητού σε φορτίο 200KΩ (π.χ. προενισχυτή hi-fi) με τάση εξόδου 1Vrms.



Σχήμα 7.11

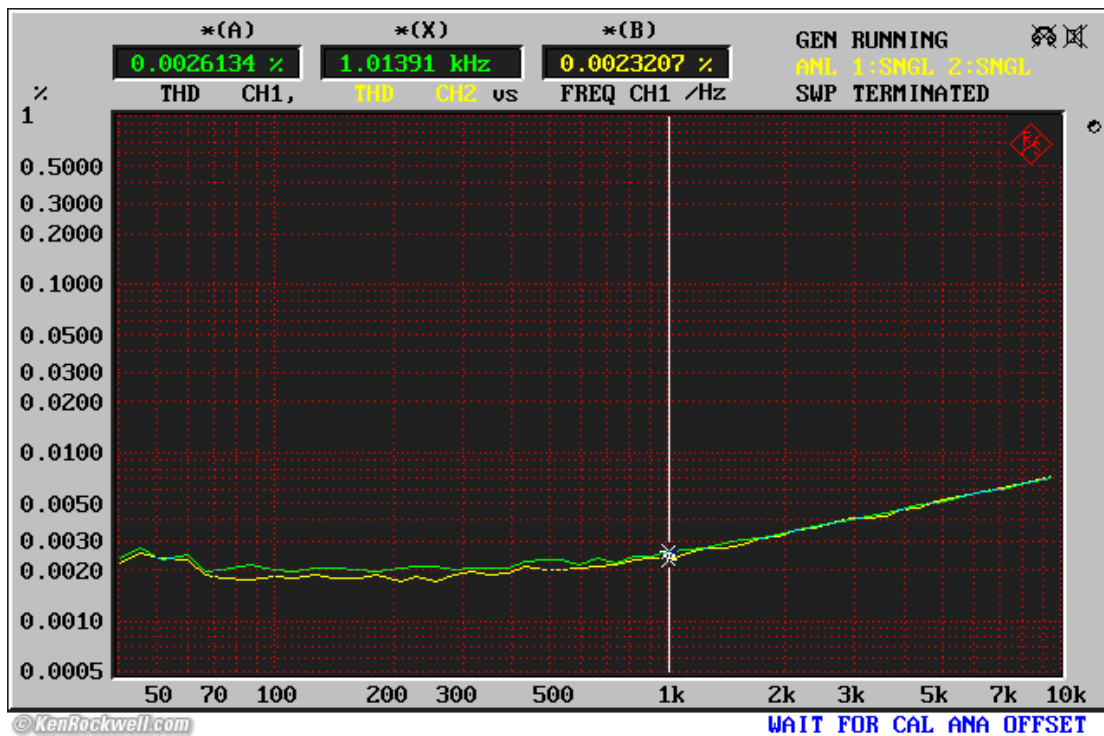
Παρατηρούμε μια ελαφρά πτώση κατά 0.01 dB στα 20 Hz και -0.08 dB στα 20 kHz. Η απόκριση είναι επομένως πρακτικά επίπεδη αν το κινητό συνδεθεί ως πηγή σε ένα οικιακό ηχοσύστημα με μεγάλη αντίσταση εισόδου.

Όταν όμως συνδέονται ακουστικά στη συσκευή, η απόκριση συχνοτήτων μεταβάλλεται όπως φαίνεται στο σχήμα 7.12. Τα ακουστικά Ultrasone Edition 8 που συνδέθηκαν έχουν ονομαστική αντίσταση 32Ω. Παρατηρούμε μια ελαφριά αύξηση κατά περίπου 0.16dB στην περιοχή των 70Hz και ελαφριά πτώση σε συχνότητες άνω των 10KHZ.



Σχήμα 7.12

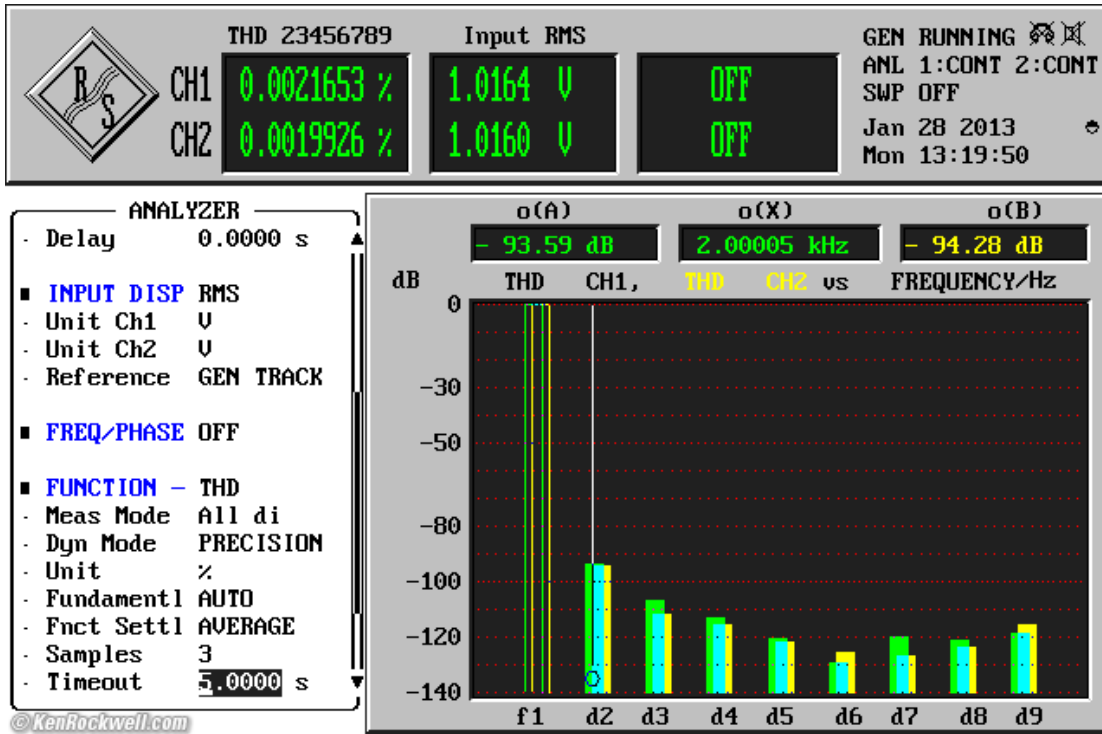
Για τις μετρήσεις συνολικής παραμόρφωσης, αρχικά χρησιμοποιήθηκε η αντίσταση φορτίου των 200KΩ και προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 7.13

Η αρμονική παραμόρφωση του κινητού παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, κάτω από 0,01% σε συχνότητες έως και 10KHz όπου είναι περισσότερο ευαίσθητο το ανθρώπινο αυτί.

Στη φασματική ανάλυση της παραμόρφωσης (σχήμα 7.14), παρατηρείται ότι εμφανίζεται κυρίως η 2<sup>η</sup> αρμονική σε στάθμη -93,59 dB από την θεμελιώδη συχνότητα και οι λοιπές αρμονικές υψηλότερης τάξης είναι τουλάχιστον κατά 15dB χαμηλότερης στάθμης από τη 2<sup>η</sup> αρμονική.

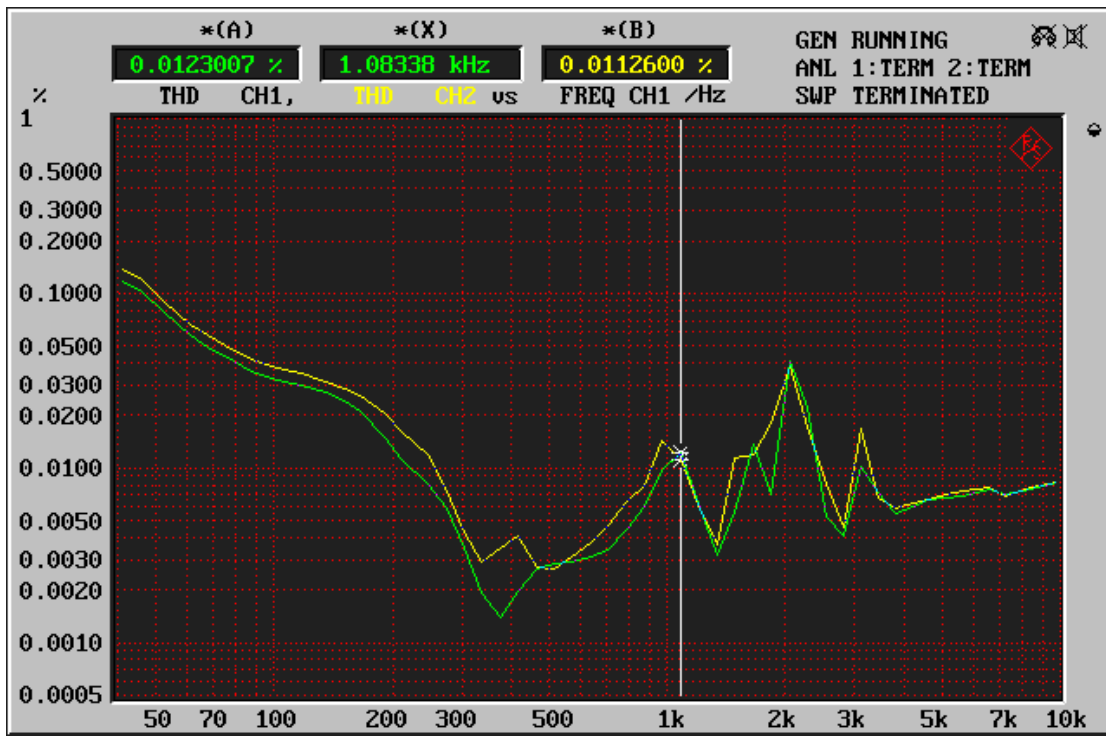


Σχήμα 7.14

Όμως, όταν το iPhone οδηγεί τα ακουστικά Ultrason Edition 8 (32Ω) με 1 V RMS, αποδίδοντας 113dB στάθμη ήχου στον ακροατή τους που μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο τύμπανό του, η παραμόρφωση είναι σαφώς μεγαλύτερη. Μετρούμε όμως μόνο την παραμόρφωση στην έξοδο του κινητού. Η παραμόρφωση από τους κώνους που διαθέτουν τα ακουστικά είναι πολύ μεγαλύτερη σε αυτές τις εντάσεις.

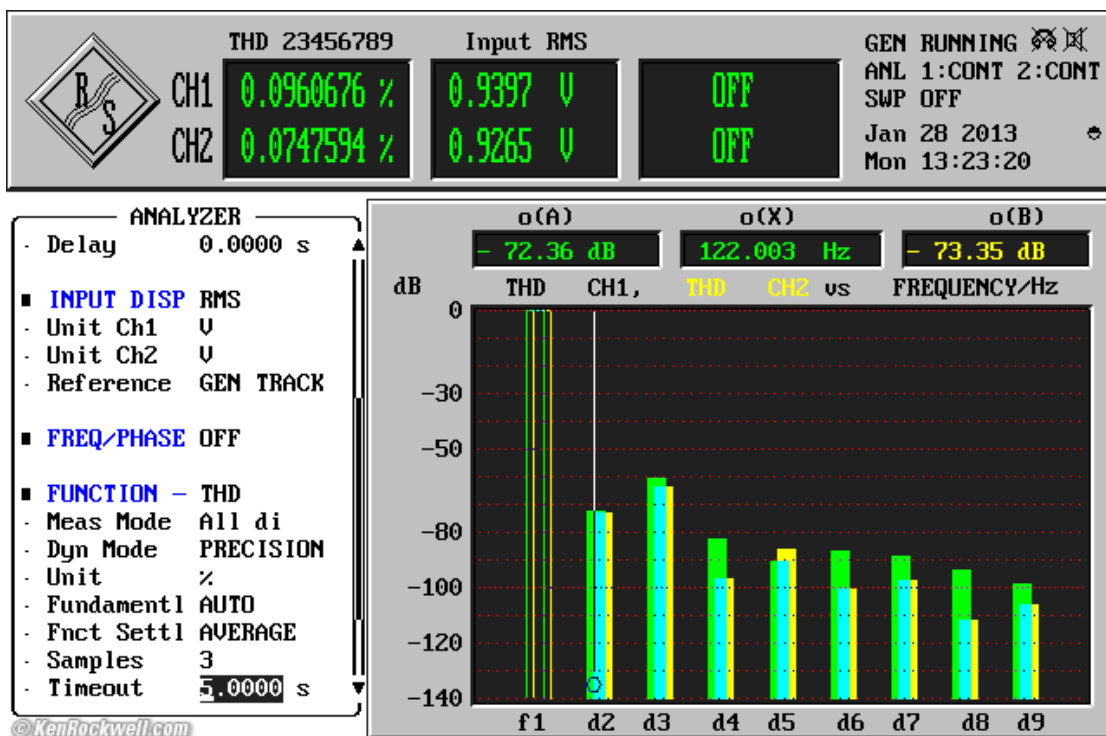
Στο φορτίο αυτό των ακουστικών (σχήμα 7.15), η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται σε χαμηλές συχνότητες λόγω όπως είναι φυσικό λόγω του αυξημένου ρεύματος που ζητούν οι κώνοι των ακουστικών σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων. Εντούτοις, η μέγιστη THD διατηρείται κάτω από το 0.2% ενώ υπάρχουν συσκευές του εμπορίου που αναφέρουν επίπεδα THD έως και 10% στα φύλλα προδιαγραφών τους.





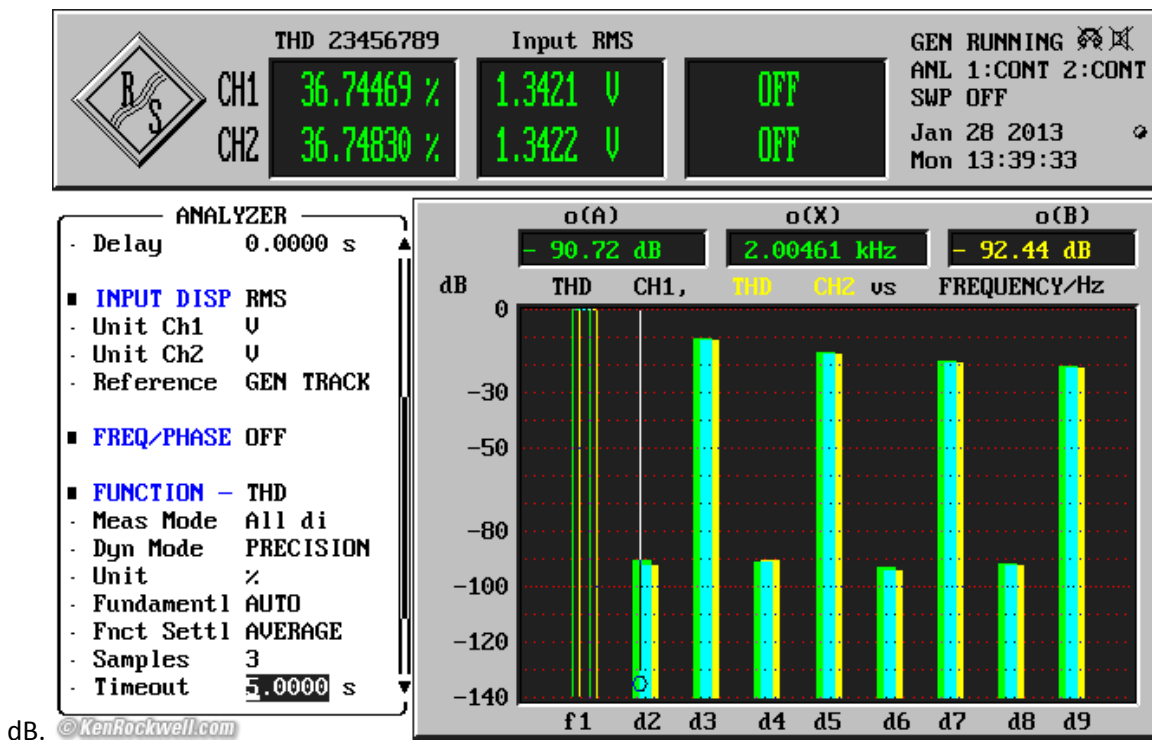
7.15

Στο σχήμα 7.16 παρατηρούμε τη φασματική ανάλυση της THD σε σήμα 61Hz στο φορτίο ακουστικών των 32Ω. Εμφανίζεται κυρίως η 3<sup>ης</sup> τάξης αρμονική σε στάθμη όμως περί τα -70 dB.



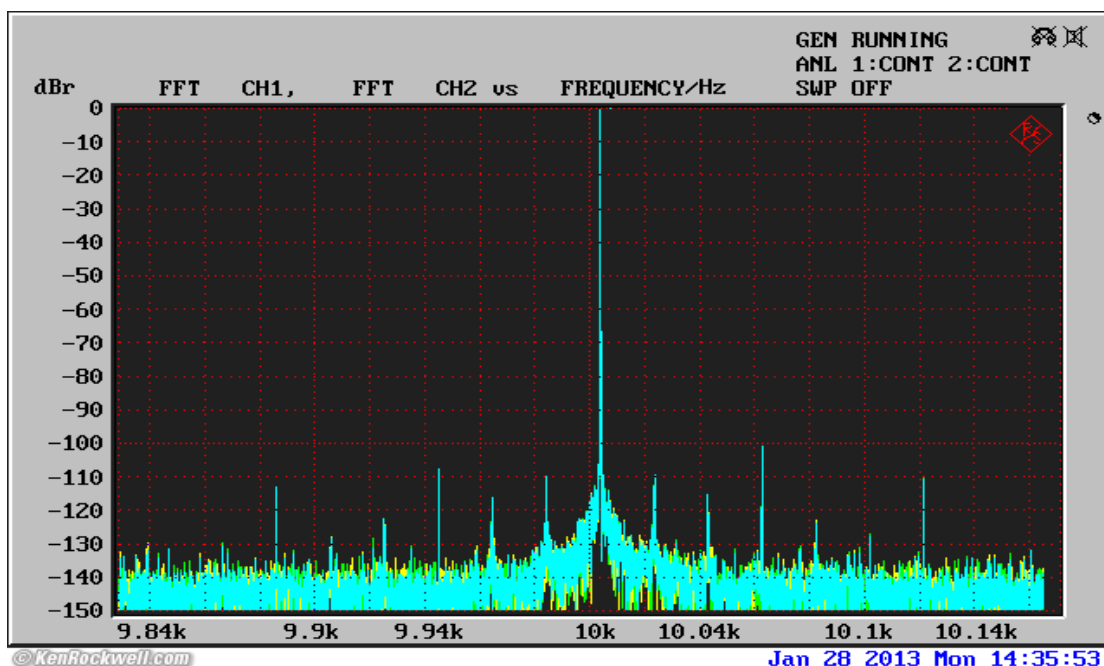
7.16

Για να δοκιμάσει τη μεταβατική απόκριση και τη δυνατότητα υπεροδήγησης της εξόδου του κινητού, ο Rockwell αναπαρήγαγε ένα σήμα τετραγωνικής κυματομορφής συχνότητας 1002,27 Hz. Στην έξοδο του κινητού πρέπει ιδανικά να μην εμφανίζονται αρμονικές άρτιας τάξης. Παρατηρούμε από το αποτέλεσμα (σχήμα 7.17) της μέτρησης ότι εμφανίζονται μεν άρτιες αρμονικές αλλά σε χαμηλό επίπεδο στάθμης -90.72



Σχήμα 7.17

Για τη μέτρηση της επιρροής φαινομένων jitter του ψηφιακού ρολογιού στην αναλογική έξοδο του κινητού, χρησιμοποιήθηκε το ακόλουθο τεστ. Ένας τόνος 10007 Hz αποθηκεύεται στο κινητό αρχικά. Ο τόνος αναπαράγεται από το κινητό και γίνεται ένας ταχύς μετασχηματισμός Fourier στενής ζώνης της εξόδου ώστε να εντοπιστούν αποκλείσεις από τη συχνότητα των 10007 Hz. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.18, εμφανίζονται συχνότητες περί την κεντρική συχνότητα αλλά είναι πρακτικά μη-αντιληπτές από το αυτί καθώς βρίσκονται σε επίπεδο τουλάχιστον 100dB χαμηλότερα από τη κεντρική συχνότητα κι άρα επικαλύπτονται αποτελεσματικά.



Σχήμα 7.18

Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι το iPhone μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ήχου από την έξοδο ακουστικών που διαθέτει. Μάλιστα, είναι προτιμότερο να συνδεθεί αναλογικά σε απλούς ενισχυτές χάριν στις επιδόσεις του εσωτερικού DAC που διαθέτει. Ένα εξωτερικό DAC μπορεί να παρουσιάσει μεγαλύτερα ποσοστά jitter και παραμόρφωσης λόγω των σφαλμάτων συγχρονισμού ρολογιών που δημιουργείται από τη μετάδοση μέσω USB θύρας ή Bluetooth και Wi-Fi συνδέσεων. Το σήμα εξόδου θα είναι βέβαια 6dB χαμηλότερο από το επίπεδο γραμμής (line level) που κατά σύμβαση απαιτείται για μία πηγή ήχου hi fi αλλά οι επιδόσεις του είναι αρκετά καλές ως προς την πιστότητα αναπαραγωγής. Έχουμε ήδη δείξει τα προτερήματα του AAC τύπου συμπίεσης και μάλιστα σε υψηλά bitrates όπως τα 256kbps στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Η χαμηλή αντίσταση εξόδου του αναλογικού κυκλώματος οδήγησης του κινητού το καθιστά ιδανικό ως πηγή ήχου. Λίγες φορητές ή οικιακές πηγές παρουσιάζουν τόσο χαμηλή αντίσταση εξόδου και δυνατότητες οδήγησης φορτίων.

Τα χαμηλά επίπεδα θορύβου οφείλονται μεταξύ άλλων και στο γεγονός ότι το μέσο αποθήκευσης των αρχείων είναι στερεάς κατάστασης (solid state) μνήμη flash και όχι κάποιος οπτικός ή μαγνητικός δίσκος που παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη καθυστέρηση ανάγνωσης. Επίσης, το γεγονός πως δεν χρησιμοποιεί ανεμιστήρες ψύξης, μοτέρ κίνησης ή εξωτερική τροφοδοσία μειώνει ακόμη περισσότερο το θόρυβο και τις παρεμβολές. Η μπαταρία ως πηγή μπορεί να δώσει ακαριαία απαιτούμενα ποσά ρεύματος που δε μπορεί να παρέχει χωρίς βύθιση τάσης ένα απλό τροφοδοτικό με μετασχηματιστή και μικρούς σε χωρητικότητα πυκνωτές. Άλλες υλοποιήσεις κινητών τηλεφώνων, tablets και mp3 players δεν πλησιάζουν φυσικά αυτές τις επιδόσεις. Πολύ οικονομικές συσκευές mp3 χαμηλών επιδόσεων δε μπορούν να συγκριθούν σε επιδόσεις με οικιακές συσκευές όπως ένα καλό cd player.

### 7.10.8 Οι ενισχυτές του ήχου

Ένας ενισχυτής ήχου έχει παραδοσιακά το ρόλο της ενίσχυσης του αναλογικού σήματος της πηγής ήχου ώστε να οδηγηθεί στα μεγάφωνα των ηχείων. Παρότι μερικές πηγές μπορούν να δώσουν τάσεις άνω των 2V<sub>rms</sub> στην έξοδό τους, δε μπορούν να παράγουν αρκετό ρεύμα ώστε να οδηγήσουν χαμηλής αντίστασης φορτία όπως είναι τα ηχεία. Οι σύνθετες αντιστάσεις των ηχείων έχουν συνήθως τιμές 2 έως 16Ω. Ο ενισχυτής επομένως πρέπει να διαθέτει υψηλή αντίσταση εισόδου και πολύ χαμηλή αντίσταση εξόδου ώστε να διασυνδέσει κατάλληλα πηγές ήχου και ηχεία. Σε αυτή την ανάλυση δε μας ενδιαφέρει η ικανότητα του ενισχυτή να παράγει αρκετή ισχύ και ρεύμα για την οδήγηση και των πιο δύσκολων φορτίων. Μας ενδιαφέρει η διαδικασία ενίσχυσης να γίνεται κυρίως χωρίς παραμόρφωση και χωρίς «χρωματισμό» του φάσματος συχνοτήτων του σήματος. Ένας ενισχυτής μπορεί να σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να παρουσιάζει χαμηλή αρμονική παραμόρφωση (THD) και παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (TIM ή IMD). Η καλή σχεδίαση βασίζεται συνήθως σε καλούς συμβιβασμούς μεταξύ χαρακτηριστικών καθώς για παράδειγμα: υψηλά ποσοστά αρνητικής ανάδρασης οδηγούν σε χαμηλότερη THD παραμόρφωση και αυξημένη TIM παραμόρφωση.

Οι σύγχρονοι ενισχυτές είναι πρακτικώς κέντρα ελέγχου ήχου και εικόνας καθώς διαθέτουν ψηφιακές κι αναλογικές εισόδους ήχου & εικόνας, αποκωδικοποιητές και άλλα πολλά υποσυστήματα. Από αυτά τα υποσυστήματα μας ενδιαφέρουν κυρίως οι ψηφιοαναλογικοί μετατροπείς ή DACs. Όσο πιο πιστά γίνεται η αποκωδικοποίηση και αποσυμπίεση ενός ψηφιακού αρχείου για την αναγέννηση του αναλογικού σήματος, τόσο καλύτερη θα είναι το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα. Οι ενισχυτές συνήθως ενσωματώνουν ένα κύκλωμα DAC υλοποιημένο από κάποια εξειδικευμένη εταιρία όπως η Cambridge Audio. Η σχεδίαση και υλοποίηση ενός DAC είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία και πρέπει να γίνεται με σεβασμό στα πρότυπα από/κωδικοποίησης όπως είναι τα MPEG πρότυπα.

Ένα σημαντικό στοιχείο που διακρίνει τις διάφορες υλοποιήσεις ενισχυτών και έχει άμεση σχέση με τα ποσοστά παραμόρφωσης που εμφανίζουν είναι η τάξη τους. Η τάξη ενός ενισχυτή είναι ο τρόπος λειτουργίας του τελικού του σταδίου. Τα τρανζίστορ ή οι λυχνίες ισχύος που απαρτίζουν το τελικό στάδιο ενός ενισχυτή διασυνδέονται και πολώνονται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα την τάξη του ενισχυτή

που θέλουμε να κατασκευάσουμε. Οι τάξεις διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο και χρόνο λειτουργίας των στοιχείων εξόδου όταν στην είσοδο του ενισχυτή επιβάλλεται ένα σταθερό σήμα ημιτόνου.

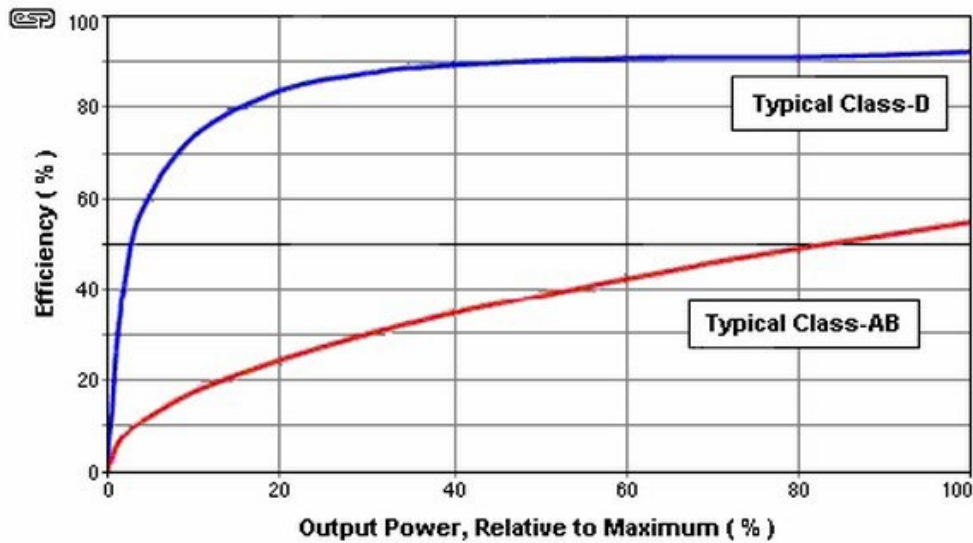
Στην τάξη λειτουργίας A, το ή τα στοιχεία ισχύος άγουν καθ' όλη τη διάρκεια του ημιτόνου (και τις 360° γωνίας) παράγοντας πολύ μικρά ποσοστά μη-γραμμικής παραμόρφωσης. Η τάξη αυτή θεωρείται από πολλούς η ιδανική για την πιστή αναπαραγωγή ήχου αλλά έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα: καταναλώνει μεγάλη ισχύ από το τροφοδοτικό για να παράγει έστω και μικρά ποσά ισχύος προς τα ηχεία. Η λοιπή ισχύς εκλύεται ως θερμότητα. Επομένως, οι τάξεις A ενισχυτές δεν είναι αποδοτική ως προς την ισχύ.

Υπάρχουν ενισχυτές με ζυγό αριθμό στοιχείων εξόδου που λειτουργούν σε τάξη B όπως λέμε. Στην τάξη B, η μία συσκευή εξόδου άγει κατά τη θετική ημιπερίοδο του ημιτόνου (για τις πρώτες 180°) ενός η 2<sup>η</sup> συσκευή άγει κατά την αρνητική ημιπερίοδο του ημιτόνου (από 180° έως 360°). Κατά αυτό τον τρόπο, ο φόρτος εργασίας μοιράζεται μεταξύ των στοιχείων εξόδου και αυξάνεται η απόδοση ισχύος. Όμως εμφανίζεται ένα άλλο πρόβλημα, εκείνο της παραμόρφωσης διασταύρωσης (crossover distortion). Αυτή προκαλείται από το γεγονός ότι κάθε συσκευή εξόδου χρειάζεται κάποιο ελάχιστο επίπεδο τάσης περί τα 0,6-0,7Volt και κάποιο χρόνο αντίδρασης για να άγει αποτελεσματικά. Όταν το ημίτονο πλησιάζει το σημείο εναλλαγής της πολικότητάς του, υπάρχει μία ασάφεια ως προς το πιο συσκευή εξόδου πρέπει να άγει και το πιθανότερο είναι να μην άγει καμία, αποκόβοντας την είσοδο από την έξοδο. Τότε δημιουργείται ένα σημείο διασταύρωσης στην κυματομορφή εξόδου που δεν υπήρχε στο ημίτονο εισόδου και άρα έχουμε παραμόρφωση (σχήμα 7.19).



Σχήμα 7.19

Για να αποφύγουν αυτή την κατάσταση, οι μηχανικοί σχεδιάζουν τους ενισχυτές αυτούς διαφορετικά. Κάθε συσκευή εξόδου λειτουργεί για λίγο περισσότερο χρόνο από τις 180° της τάξης B. Επομένως όλες οι συσκευές εξόδου άγουν όταν το ημίτονο αλλάζει πολικότητα προσομοιώνοντας την λειτουργία της τάξης A για λίγο χρονικό διάστημα. Στις λοιπές γωνίες, η τάξη αυτή λειτουργεί ως τάξη B. Γι αυτό το λόγο ονομάστηκε τάξη AB και συνδυάζει την υψηλή απόδοση της τάξης B και τη χαμηλότερη παραμόρφωση crossover της τάξης A. Υπάρχουν και διάφορες άλλες τάξεις λειτουργίας ενισχυτών που συναντώνται σπανιότερα εκτός από την τάξη D που έχει αρκετές εφαρμογές σήμερα. Στην τάξη D, οι συσκευές εξόδου λειτουργούν διακοπτικά όπως γίνεται στους μετατροπείς ισχύος. Παλμοί που διαμορφώνονται κατά πλάτος από ένα σύστημα ελέγχου οδηγούν τις πύλες των mosfet εξόδου παράγοντας μία κυματομορφή που μοιάζει με δειγματοληψία του ημιτόνου. Η κυματομορφή αυτή έχει αρκετή παραμόρφωση, ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται φίλτρα εξομάλυνσης και φιλτραρίσματος της εξόδου του ενισχυτή. Τα φίλτρα αυτά μπορεί να είναι 2<sup>ης</sup> ή μεγαλύτερης τάξης και αποτελούνται από πηνία και πυκνωτές. Όταν η έξοδος φιλτραριστεί επαρκώς, μένει το χαμηλότερης συχνότητας ημίτονο. Οι προσεκτικά σχεδιασμένοι ενισχυτές τάξης D παρουσιάζουν καλές επιδόσεις και πολύ υψηλή απόδοση ισχύος. Η θερμότητα που εκλύουν είναι πολύ χαμηλή όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα:



Σχήμα 7.20

Ως προς την πιστή αναπαραγωγή ήχου μας ενδιαφέρει κυρίως η σωστή σχεδίαση και υλοποίηση κάθε ενισχυτή ανάλογα με την εφαρμογή. Είναι για παράδειγμα ασύμφορο να κατασκευάσουμε έναν ενισχυτή ισχύος 500W σε τάξη A καθώς η θερμότητα που θα εκλύεται θα είναι ικανή να λιώσει τις κολλήσεις καλάνι του κυκλώματος. Αντίθετα, ένας τέτοιος ενισχυτής υλοποιημένος σε τάξη D θα έχει αρκετά μικρό μέγεθος και άριστη απόδοση ισχύος. Ας δούμε στον παρακάτω πίνακα τα θετικά κι αρνητικά κάθε τάξης:

Ενισχυτής Class	Τυπική Αποδοτικότητα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>A</b>	~ 15-35%	Δεν υπάρχει crossover distortion.	Η αναποτελεσματικότητα = θερμότητα.  Είναι επιρρεπής σε βουητό και υψηλότερα επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης.
<b>B</b>	~ 70%	Σχετικά υψηλή απόδοση.	Η πιθανότητα για σημαντικά ποσά παραμόρφωσης crossover μειώνει την πιστότητα
<b>A / B</b>	~ 50-70%	Πιο αποτελεσματική από ό,τι η Κλάση A Σχετικά φθηνή υλοποίηση. Η Crossover παραμόρφωση μπορεί να καταστεί αμελητέα	Η απόδοση είναι καλή, αλλά δεν είναι τέλεια.
<b>G &amp; H</b>	~ 50-70%	Βελτιωμένη απόδοση πάνω στα πρότυπα Class A / B αλλά με έξυπνη διαχείριση των γραμμών τροφοδοσίας.	Ακριβότεροι σε υλοποίηση από ό,τι οι κλάσης A / B, αλλά υψηλότερα επίπεδα ισχύος είναι δυνατόν να επιτευχθούν με μικρότερου μεγέθους και όγκου ενισχυτές.

D	> 90%	<p>Η καλύτερη δυνατή απόδοση σε ισχύ, μικρό βάρος και όγκος, μικρά ποσά θερμότητας, δε χρειάζεται μεγάλες ψήκτρες και τροφοδοτικά. Είναι οικονομικότερα στην υλοποίηση επομένως</p>	<p>Οι ρυθμιστές πλάτους του παλμού που λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές συχνότητες μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την αναπαραγωγή ήχου υψηλής συχνότητας. Μερικά σχέδια παράγουν ποικίλες ποιότητες ήχου ανάλογα με το φορτίο των ηχείων καθώς τα φίλτρα εξόδου είναι σχεδιασμένα συνήθως για μια τιμή ωμικής αντίστασης φορτίου.</p> <p>Η αντοχή τους στο χρόνο δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη λόγω της υψηλής συχνότητας διακοπτικής λειτουργίας που καταπονεί τα στοιχεία.</p>
---	-------	---	---

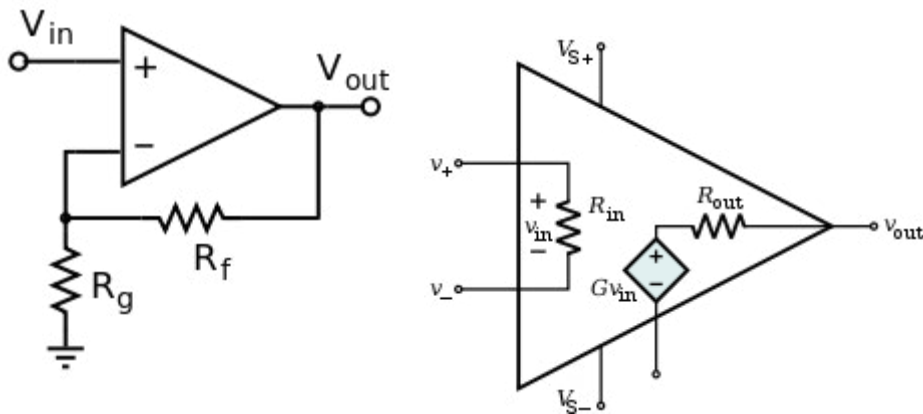
Πίνακας 7.14

### 7.10.9 Στάδια ενίσχυσης

Κάθε ενισχυτής απαρτίζεται από διάφορα στάδια ενίσχυσης αλυσιδωτά συνδεδεμένα μεταξύ τους συνήθως. Το τελικό στάδιο διαφέρει ανάλογα με την τάξη του ενισχυτή που αναφέραμε παραπάνω. Το τελικό στάδιο είναι συνήθως εκείνο που παρέχει το κέρδος ρεύματος αλλά όχι κέρδος τάσης. Όμως θέλουμε ενίσχυση τάσης Αν επί ενίσχυση ρεύματος  $A_i$  για να έχουμε τελικά κέρδος ισχύος  $A_p = A_i \cdot A_v$ .

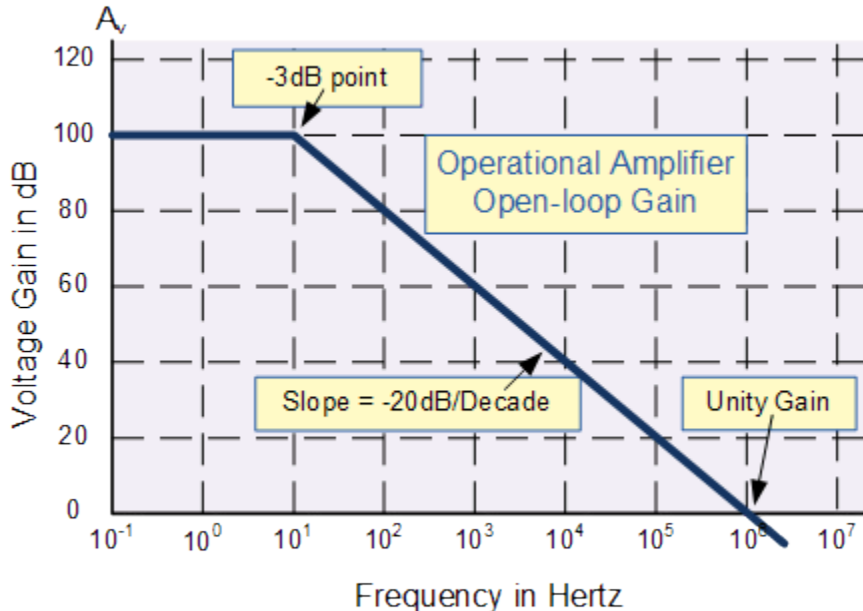
Το κέρδος τάσης  $A_v$  συνήθως παρέχεται από το στάδιο που οδηγεί τον τελικό ενισχυτή. Συχνά μάλιστα επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν περισσότερα στάδια κέρδους τάσης ώστε να αυξηθεί το συνολικό κέρδος τάσης χωρίς να μειώνεται το εύρος της απόκρισης συχνοτήτων του ενισχυτή και η δυναμική του περιοχής. Στα στάδια ενίσχυσης τάσης χρησιμοποιούνται πλέον κυρίως τελεστικοί ενισχυτές (operational amplifiers).

Οι τελεστικοί ενισχυτές παρουσιάζουν ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά όπως μεγάλη αντίσταση εισόδου (ειδικά αν χρησιμοποιούν Fetts στην είσοδό τους), χαμηλή αντίσταση εξόδου, αναστρέφουσα και μη- αναστρέφουσα είσοδο, απόρριψη κοινού σήματος των εισόδων και μεγάλο κέρδος τάσης ανοικτού βρόχου. Εντούτοις, το εύρος ζώνης (bandwidth) της απόκρισης συχνοτήτων τους είναι αντιστρόφως ανάλογο του κέρδους τους και χωρίς κατάλληλη αρνητική ανάδραση μπορεί να οδηγηθούν σε ταλαντώσεις. Αν χρησιμοποιηθεί κύκλωμα αρνητικής ανάδρασης λέμε, το κέρδος τους ονομάζεται κλειστού βρόχου (closed loop) καθώς η ανατροφοδότηση του σήματος εξόδου πίσω στην αναστρέφουσα είσοδο σχηματίζει έναν κλειστό βρόχο (σχήμα 7. ). Οι δύο είσοδοι του τελεστικού ενισχυτή δρουν ως ένα διαφορικό ζεύγος που σχηματίζεται από Fetts ή bjt transistors συνήθως. Στόχος του συστήματος αυτού είναι η απόρριψη σημάτων που είναι κοινά και στις 2 εισόδους όπως ο επαγόμενος σε αυτές εξωτερικός θόρυβος. Ενισχύεται επομένως η διαφορά μεταξύ των 2 εισόδων και άρα ο τελεστικός λειτουργεί ως ένας διαφορικός ενισχυτής.



Σημια 7.21

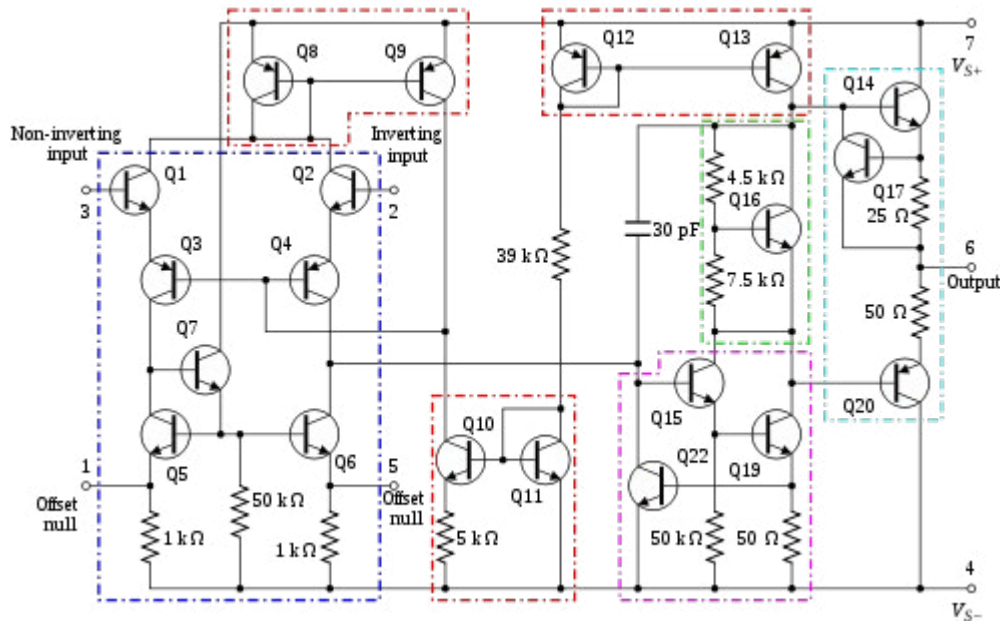
Για κάθε τελεστικό ενισχυτή υπάρχει ένα μέγεθος που καλείται «UGBW: Unity Gain Bandwidth» ή «εύρος ζώνης μοναδιαίου κέρδους». Το μέγεθος αυτό δίνει το μέγιστο εύρος ζώνης του ενισχυτή που επιτυγχάνεται αν συνδεθεί ως ενισχυτή με κέρδος μονάδα ή buffer όπως λέμε. Για μεγαλύτερο κέρδος, το εύρος ζώνης μειώνεται. Αν όμως θέλουμε να πετύχουμε μεγάλο κέρδος τάσης π.χ.  $A_v = 1000$  για μεγάλο εύρος ζώνης, μπορούμε να συνδέσουμε αλυσιδωτά εν σειρά τρεις τελεστικούς ενισχυτές με κέρδος τάσης  $A_{vi}=10$  για  $i=1,2,3$  και το συνολικό κέρδος θα είναι πράγματι  $A_v=A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3}= 10 \cdot 10 \cdot 10=1000$  αλλά το εύρος ζώνης θα είναι πολύ μεγαλύτερο από ότι θα διέθετε ένας μόνο τελεστικός ενισχυτής. Το εύρος ζώνης μας απασχολεί ιδιαίτερα για την πιστή αναπαραγωγή ήχου καθώς οι υψηλές συχνότητες πλήττονται από αυτό όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα:



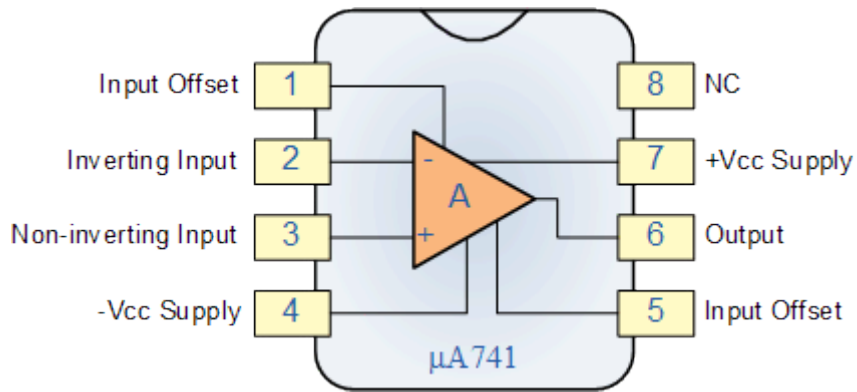
Σχίμα 7.22

Οι απόκριση χαμηλών συχνοτήτων εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο σύνδεσης των διαφόρων σταδίων ενίσχυσης εντός ενός ολοκληρωμένου ενισχυτή ήχου. Αν η σύνδεση γίνεται χωρητικά με πυκνωτές που αποκόβουν τις dc συνιστώσες, είναι επόμενο να αποκοπούν και χαμηλές συχνότητες του φάσματος. Δεδομένου μάλιστα ότι το αυτί μας είναι λιγότερο ευαίσθητο στις μπάσες συχνότητες (σύμφωνα με τις καμπύλες ισοδύναμης έντασης «equal loudness»), το σύστημα ενίσχυσης θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει μεγαλύτερο κέρδος ισχύος σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων και όχι χαμηλότερο. Αν η σχεδίαση του ενισχυτή απαιτεί χωρητική ζεύξη των σταδίων του, πρέπει να χρησιμοποιηθούν όσο

το δυνατόν μεγαλύτερης χωρητικότητας πυκνωτές ώστε να μην έχουμε φιλτράρισμα και αποκοπή των χαμηλών συχνοτήτων έως τα 20Hz που είναι το κάτω όριο του ακουστικού φάσματος.



Σχήμα 7.23 Εσωτερική δομή του τελεστικού ενισχυτή 741: Η δομή του μοιάζει πολύ με αυτή ενός ενισχυτή ήχου μεγαλύτερης ισχύος με διακριτά στοιχεία. Οι διακεκομμένες γραμμές περιγράφουν: τους καθρέπτες ρεύματος (κόκκινο), το διαφορικό ενισχυτή (μπλε), την τάξης Α βαθμίδα κέρδους (ματζέ-ντα), το μετατοπιστή του επίπεδου τάσης (πράσινο), το στάδιο εξόδου (κυανό). Παρακάτω φαίνεται τα πακέτο και οι τερματικές συνδέσεις ενός 741 τελεστικού:



Σχήμα 7.24

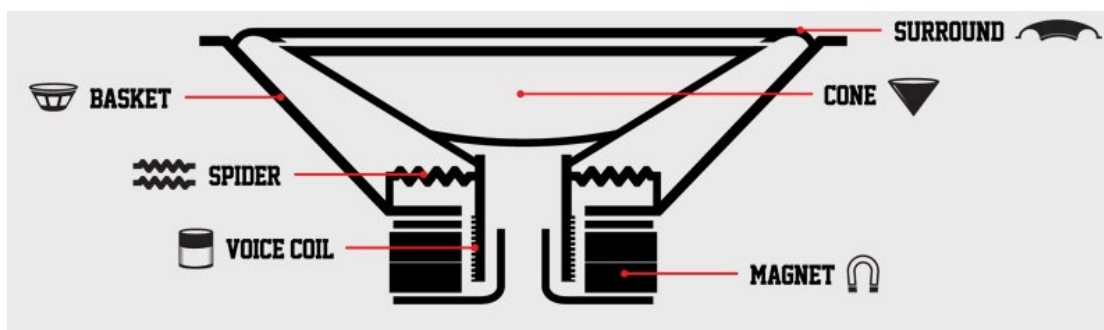
### 7.10.10 Τα ηχεία

Το ηχείο (speaker) αποτελεί μία διάταξη/συσκευή, η οποία έχει σκοπό τη μετατροπή της λαμβανόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (εισερχόμενο σήμα) σε ακουστική ενέργεια, δηλαδή σε στιγμιαίες μεταβολές πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα (διαμήκη κύματα), οι οποίες αντιστοιχούν σε όσο το δυνατόν περισσότερο φυσικό και αληθοφανή ήχο. Επομένως, το ηχείο δεν αποτελεί μία γνήσια ηλεκτρονική συσκευή, αλλά μία ηλεκτρομηχανική ή ηλεκτροακουστική διάταξη. Το ηχείο αποτελείται συνήθως από μία καμπίνα, ένα διαχωριστή συχνοτήτων ενδεχομένως και μεγάφωνο/α. Τα μεγάφωνα είναι διαφόρων ειδών και διαθέτουν σταθερά και κινητά μέρη.



## Μεγάφωνα

Το μεγάφωνο είναι μια ηλεκτροακουστική διάταξη που μετατρέπει ηλεκτρικά σήματα σε ήχο. Ο κώνος του μεγαφώνου πάλλεται σύμφωνα με τις μεταβολές του ηλεκτρικού σήματος που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του, μεταδίδοντας αυτή τη διαταραχή μέσω του αέρα, στα αυτιά μας, όπου τα κύματα γίνονται αντιληπτά ως ήχος. Παρακάτω θα δώσουμε μια σύντομη περιγραφή του τρόπου με τον οποίο τα ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα (ο πιο συνηθής τύπος μεγαφώνου) δουλεύουν ώστε να αναπαράγουν μουσική και ήχους όσο πιο πιστά προς τους φυσικούς ήχους και τους ήχους των μουσικών οργάνων γίνεται.



Σχήμα

7.25 Η δομή ενός μεγαφώνου τύπου κώνου

Τα περισσότερα ηχεία της αγοράς είναι ηλεκτροδυναμικά και βγαίνουν σε κάθε μορφή, μέγεθος και κόστος. Εδώ συναντάμε τους γνωστούς μας κώνους και θόλους, που αποτελούν τη «βιτρίνα» των ηχείων αυτών, αφού είναι το τμήμα των μεγαφώνων που φαίνεται εξωτερικά. Τα ηλεκτροδυναμικά ηχεία βασίζονται στις αρχές της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, σύμφωνα με τις οποίες όταν ένας αγωγός βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο και εφαρμοστεί στα άκρα του μια διαφορά δυναμικού, τότε θα δημιουργηθεί μια δύναμη πάνω στον αγωγό, ανάλογη της εφαρμοζόμενης διαφοράς δυναμικού.

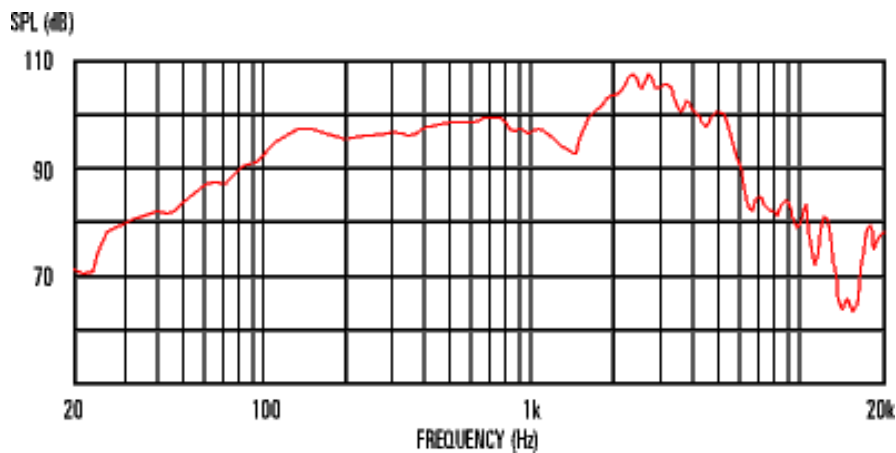
Στην καρδιά των ηλεκτροδυναμικών μεγαφώνων βρίσκεται ένας ισχυρός μόνιμος μαγνήτης κυλινδρικού σχήματος, στο κέντρο του οποίου υπάρχει μια κυλινδρική ράβδος (πόλος μαγνήτη). Ανάμεσά τους δημιουργείται ένα κυλινδρικό διάκενο λίγων χιλιοστών, μέσα στο οποίο αναπτύσσεται ένα ισχυρό, ομοιογενές και σταθερής έντασης μαγνητικό πεδίο. Στο διάκενο και γύρω από τον πόλο, προσαρμόζεται το πηνίο φωνής (voice coil) - αγωγός τυλιγμένος σε σπείρες - το οποίο κινείται ελεύθερα μέσα στο μαγνητικό πεδίο του διάκενου και υποβοηθείται από μία ειδική ελαστική ανάρτηση που φροντίζει ώστε το πηνίο να μην ακουμπά στον πόλο και να λειτουργεί σαν να αιωρείται. Όταν τον αγωγό του πηνίου διαρρέει εναλλασσόμενο ρεύμα που μεταφέρει το ηχητικό σήμα, τότε στο διάκενο θα αναπτυχθούν δυνάμεις που ωθούν το πηνίο σε παλινδρομική κίνηση μπρος - πίσω. Στο εξωτερικό μέρος του πηνίου προσαρμόζεται το διάφραγμα, το μέγεθος της επιφάνειας του οποίου καθορίζεται από τη χαμηλότερη συχνότητα που επιθυμούμε να αναπαράγουμε. Το διάφραγμα κινείται και έτσι ήχος παράγεται.

Όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος του κώνου, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι και το πηνίο φωνής και ο μαγνήτης, κάτι που οδηγεί σε μεγάφωνα μεγάλης μάζας και αδράνειας, δηλαδή σε συστήματα που απαιτούν μεγάλη ισχύ και αντιστέκονται τόσο στην έναρξη της κίνησής τους όσο και στη μεταβολή ή την παύση της. Παράλληλα οι κώνοι μεγάλης διαμέτρου τείνουν να παραμορφώνονται στα άκρα τους, γιατί η δύναμη του πηνίου ασκείται σε μία πολύ μικρή επιφάνεια του κέντρου τους. Έτσι απαιτούνται ελαφρά υλικά με μεγάλη ακαμψία (στοιχεία αλληλοαναιρούμενα), κάτι που μας οδηγεί στη χρήση σύνθετων ή εξωτικών υλικών, όπως το πολυπροπυλένιο, το kevlar, το εμποτισμένο με ειδικές ρητίνες χαρτί, το τιτάνιο και κάθε λογής κράματα και υφάσματα.

Όταν ο κώνος ενός μεγαφώνου κινείται προς τα εμπρός ασκώντας πίεση στα στρώματα του αέρα, τότε στο πίσω μέρος του δημιουργείται μια ίση αλλά αντίθετης φοράς πίεση (αραιώση, υποπίεση). Οι χαμηλές συχνότητες έχουν μικρή κατευθυντικότητα, περιθλώνται γύρω από το μεγάφωνο και τείνουν να επεκταθούν σε όλο το χώρο μπροστά και πίσω από αυτόν. Έτσι στο πίσω μέρος του θα έχουμε τη συμβολή δύο ίδιων αλλά αντίθετης φάσης ηχητικών κυμάτων, κάτι που συνεπάγεται την ακύρωσή τους.

Η ιδανική λύση για να αποφύγουμε την ακύρωση είναι να προσαρμόσουμε το μεγάφωνο στο κέντρο μιας επίπεδης επιφάνειας με μεγάλο εμβαδόν ή διάμετρο (άπειρο διάφραγμα - infinite baffle). Αυτό φυσικά είναι πρακτικά αδύνατον και έτσι καταφεύγουμε στη λύση της καμπίνας.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός μεγαφώνου τύπου g12t75 της Celestion και κατόπιν την απόκρισή του ως προς τη συχνότητα:

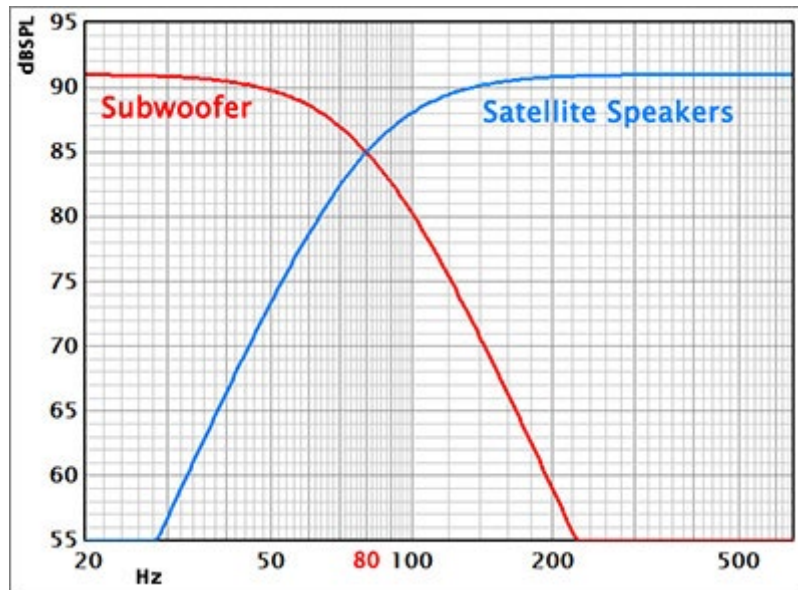


Σχήμα 7.26

Η αναπαραγωγή χαμηλών συχνοτήτων είναι παραδοσιακά το πιο δύσκολο κομμάτι ενός ηχείου, εξ' αιτίας του φόρτου που επιβάλλει πάνω στα μεγάφωνα. Για να ελαφρυνθούν τα κυρίως ηχεία από το φόρτο αναπαραγωγής χαμηλών συχνοτήτων, οι κατασκευαστές ηχείων επινόησαν το υπογούφερ (subwoofer ή sub), του οποίου ο ρόλος ακριβώς είναι να αναπαράγει τις κατώτατες ακουστές οκτάβες που εκτίνονται από τα 20Hz έως τα 80Hz σύμφωνα με τις προδιαγραφές της THX ή μέχρι και τα 120Hz αν τα κυρίως ηχεία είναι μικροί δορυφόροι. Έτσι τα κύρια ηχεία δε χρειάζεται πλέον να αναπαράγουν τις χαμηλές αυτές συχνότητες, με αποτέλεσμα να μπορούν να συμπεριφέρονται εξαιρετικά πιο γραμμικά, πιο αποδοτικά και ταυτόχρονα να είναι μικρότερα σε μέγεθος και φυσικά φτηνότερα. Καθώς η κατεύθυνση προέλευσης των χαμηλών συχνοτήτων δεν εντοπίζεται εύκολα από το ανθρώπινο αυτί, το υπογούφερ σε ένα πολυκάναλο σύστημα μπορεί να τοποθετηθεί μακριά από τα κυρίως ηχεία και παρ' όλα αυτά ο ακροατής να ακούει τα μπάσα χωρίς να αναρωτιέται αν προέρχονται από τις θέσεις που είναι τοποθετημένα τα μικρά ηχεία. Αν βέβαια το υπογούφερ δε διαθέτει καλό βαθυπερατό φίλ-

τρο και αναπαράγει υψηλότερες συχνότητες, η διαφορά της κατευθυντικότητας και η ασυμβατότητα της με τη θέση των ηχείων θα γίνει αντιληπτή από τον ακροατή και θα τον ενοχλήσει.

Επιπρόσθετα, καθώς όλες οι χαμηλές συχνότητες αναπαράγονται από ένα μόνο ηχείο, αυτό μπορεί να τοποθετηθεί στο βέλτιστο σημείο στο δωμάτιο ώστε να μειώνονται τα στάσιμα κύματα και να είναι πιο ομοιογενές το ηχητικό πεδίο. Έτσι διευκολύνεται η λεγόμενη διαχείριση μπάσου του συστήματος για ομαλό χαμηλό που δε παραμορφώνει τον ήχο από τα κύρια ηχεία αλλά συμπληρώνει το εύρος συχνοτήτων που έχουν π.χ. ανάγκη οι ταινίες δράσης και περιπέτειας.



Σχήμα 7.27

### Η καμπίνα του ηχείου

Η καμπίνα του ηχείου μπορεί να είναι κατασκευασμένη από διάφορα είδη ξυλείας ή πολυμερούς υλικού αλλά και από διάφορα άλλα υλικά. Η σχεδίαση μιας καμπίνας ηχείου δεν είναι απλή υπόθεση καθώς το ηχητικό αποτέλεσμα θα κριθεί από τις διαστάσεις, τον όγκο της και το σχήμα της. Η προσπάθεια των σχεδιαστών ηχείων είναι η όσο το δυνατό μεγαλύτερη καταπίεση/απόσβεση των μηχανικών συντονισμών της καμπίνας, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί και να απουσιάζει εντελώς. Κάποια ηχεία διαθέτουν για παράδειγμα μόνο ένα πλαίσιο στήριξης του μεγαφώνου και όχι καμπίνα. Η καμπίνα των ηχείων μπορεί να είναι κλειστή από κάθε πλευρά, ανοικτή από μια πλευρά ή να διαθέτει ειδικές οπές για την ανάκλαση χαμηλών συχνοτήτων (bass reflex ports). Κάθε δομή έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η καμπίνα ενός ηχείου βέβαια δεν είναι ένα απλό κουτί τυχαίων διαστάσεων, που αποσκοπεί στη στήριξη του μεγαφώνου και στην εξάλειψη των ακυρώσεων. Αντίθετα είναι μια προσεκτικά σχεδιασμένη διάταξη που επιχειρεί είτε να μιμηθεί το ελεύθερο μεγάφωνο (σχεδίαση άπειρου διαφράγματος), είτε να εκμεταλλευτεί τον όγκο του αέρα που βρίσκεται στο εσωτερικό, έτσι ώστε να συνεισφέρει θετικά στην απόδοση του μεγαφώνου (π.χ. σχεδιάσεις ακουστικής ανάρτησης, ανάκλασης χαμηλών και πολλές άλλες). Η ιδανική καμπίνα ενός ηχείου πρέπει να είναι άκαμπτη, ώστε να μην πάλλεται με τις εσωτερικές μεταβολές της πίεσης του αέρα. Επίσης πρέπει να έχει μεγάλη απόσβεση ώστε να εξασθενούν τα ηχητικά κύματα και να μην εκπέμπονται από την καμπίνα. Τέλος η συχνότητα συντονισμού πρέπει να είναι υψηλή και εκτός της ακουστικής μπάνας, για την αποφυγή χρωματισμών

Υπάρχουν πολλά είδη ηχείων, ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τεχνολογία και τις αρχές λειτουργίας πάνω στις οποίες στηρίζεται το καθένα. Μία βασική διάκριση των ηχείων είναι τα ηλεκτροστατικά, τα ηλεκτροδυναμικά, τα μαγνητοστατικά, τα υβριδικά, κτλ. Άλλη επίσης βασική διάκριση είναι τα μονόπολα συμβατικά ηχεία, τα δίπολα (διπολικά) ηχεία και τα αμφιπολικά ηχεία. Όλες οι κατηγορίες

παρουσιάζουν διάφορες υποδιαίρεσεις με κοινά μεταξύ τους χαρακτηριστικά, δυσκολεύοντας την αυστηρή κατάταξη των ηχείων.

Αναλόγως με τον τύπο της καμπίνας ενός ηχείου, έχουμε τις παρακάτω σχεδιάσεις/τοπολογίες:

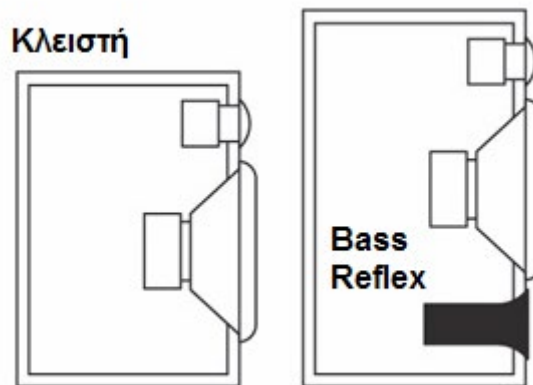
**Σχεδίαση κλειστής καμπίνας (ακουστικής ανάρτησης):** Η καμπίνα ακουστικής ανάρτησης είναι αεροστεγής γιατί ο εσώκλειστος αέρας χρησιμοποιείται ως ανάρτηση για τον έλεγχο του γούφερ. Όταν ο κώνος του γούφερ κινείται προς τα έξω, δημιουργείται υποπίεση η οποία ρουφάει το μεγάφωνο πίσω στη θέση ηρεμίας. Όταν ο κώνος κινείται προς τα μέσα, αυξάνεται η πίεση του αέρα και σπρώχνει το κώνο προς τη θέση ηρεμίας. Τα ηχεία με καμπίνα ακουστικής ανάρτησης, διακρίνονται για το σφιχτό και βαθύ μπάσο, το οποίο έχει προοδευτική μείωση κάτω από το όριο αποκοπής. Από την άλλη όμως τείνουν να είναι αναίσθητα γιατί η ακουστική ενέργεια που παράγεται από το πίσω μέρος του κώνου χάνεται.

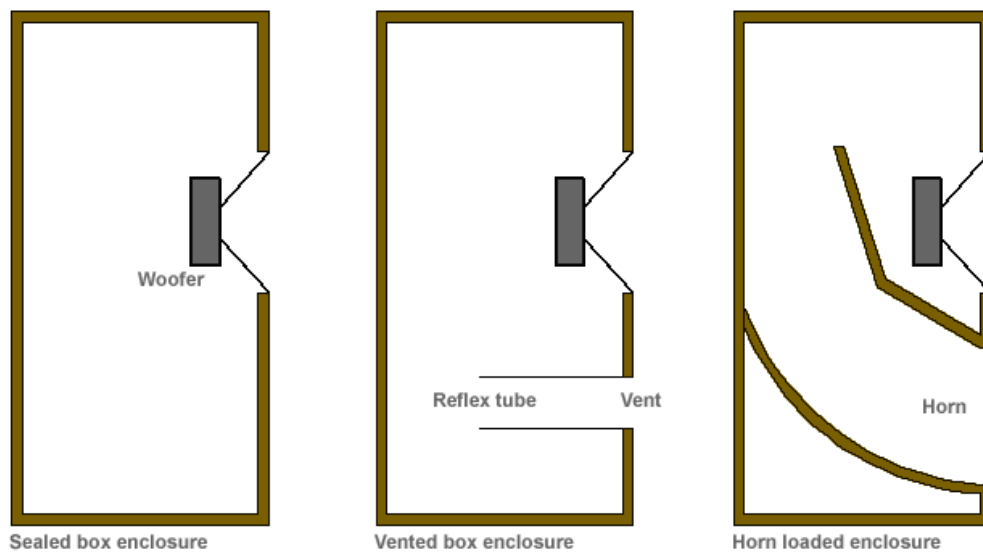
**Σχεδίαση ανοικτού κουτιού (bass reflex):** Οι καμπίνες οπής έχουν σχεδιαστεί ώστε να εκμεταλλεύονται την ακουστική ενέργεια που χάνεται στις καμπίνες ακουστικής ανάρτησης. Ανοίγοντας μια οπή (σωληνάς bass reflex) στην καμπίνα, οι χαμηλές συχνότητες εκπέμπονται σε φάση με τις χαμηλές που αναπαράγει το ίδιο το woofer. Μεταβάλλοντας τη διάμετρο και το μήκος του σωλήνα, μπορούμε να «κουρδίσουμε» τη συχνότητα συντονισμού του για βέλτιστο μπάσο. Οι καμπίνες οπής συνεπάγονται πιο αποδοτικές υλοποιήσεις, με αποτέλεσμα να σχεδιάζονται πιο ευαίσθητα και με περισσότερο μπάσο ηχεία στον ίδιο ή και μικρότερο όγκο καμπίνας απ’ ότι η αντίστοιχη σχεδίαση σε κλειστό κουτί. Από την άλλη η μείωση του μπάσου κάτω από τη συχνότητα αποκοπής του bass reflex είναι απότομη.

Ηχεία χοάνης: Τα ηχεία αυτού του είδους προορίζονται κυρίως για εξωτερική χρήση, (PA, post address), και καλούνται να καλύψουν ηχητικά μεγάλους χώρους. Τέτοιου είδους σχεδιάσεις είναι εξοπλισμένες με γούφερ πολύ μεγάλης διαμέτρου, της τάξης των 15 – 21 ιντσών.

Άλλες υλοποιήσεις: Πέραν των παραπάνω, υπάρχουν και ηχεία άλλων τύπων στην αγορά. Για παράδειγμα, μπορείτε να βρείτε επίπεδα ηχεία (panel), εξοπλισμένα με μια πολύ καλά τεντωμένη μεμβράνη που λειτουργεί σαν το ηχητικό διάφραγμα που παράγει ήχο, καθώς αυτή κινείται εμπρός – πίσω μέσα σε μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται με ράβδους φυσικών μαγνητών (μαγνητοστατικό ηχείο), ή ράβδους ηλεκτρομαγνητών (ηλεκτροστατικό ηχείο). Αυτή η μεμβράνη είναι κατασκευασμένη από πολυμερές υλικό ανθεκτικό στο τέντωμα, συνήθως Mylar, και επικαλυμμένο με κάποιο αγώγιμο υλικό.



Τα ηχεία πάνελ έχουν συνηθέστατα μεγάλο ύψος και σχετικά αρκετό πλάτος, ενώ έχουν ελάχιστο βάθος, ξεφεύγοντας από το σχήμα κουτιού που έχουν τα συμβατικά ηλεκτροδυναμικά, ενώ εκπέμπουν ήχο ως δίπολα (εμπρός και πίσω), και είναι κατασκευασμένα σχεδόν αποκλειστικά για οικιακή χρήση. Επίσης, μπορεί κάποιος να βρει στην αγορά και ηχεία με ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα, αλλά χωρίς καθόλου καμπίνα, ανοικτού τύπου. Κι αυτά τα ηχεία εκπέμπουν ήχο εμπρός και πίσω, ως δίπολα που είναι.





Σχήμα 7.28

Ανάλογα με την τοποθέτηση της καμπίνας στο χώρο, τα ηχεία διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

	<p><b>Ηχεία δαπέδου/Πύργου</b></p>
	<p><b>Ηχεία βιβλιοθήκης/βάσης</b></p>
	<p><b>Τοίχου</b></p>

Μπορούμε να επιλέξουμε οποιοδήποτε τύπο για Στερεοφωνική ή Home Cinema χρήση.

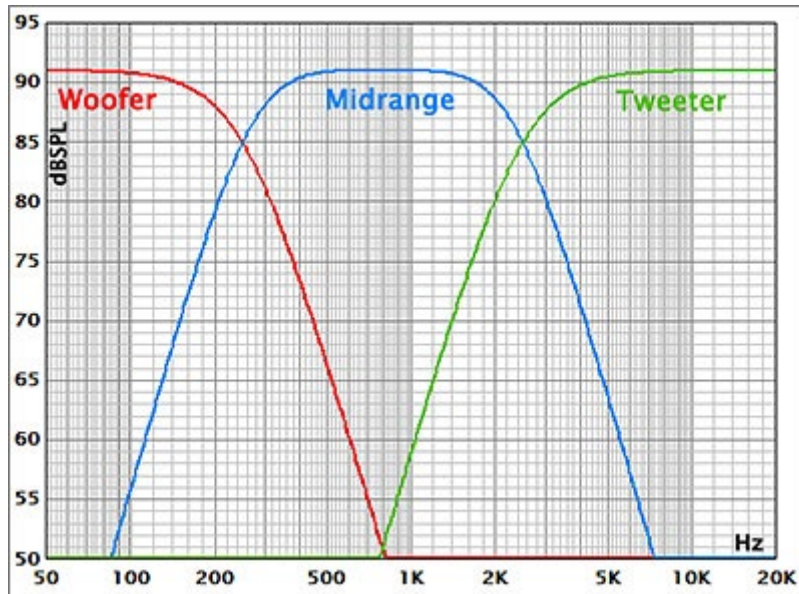
Το κύκλωμα crossover ενός ηχείου:

Είναι το κύκλωμα που διαχωρίζει τις περιοχές συχνοτήτων για κάθε ξεχωριστή μονάδα του ηχείου. Οι κατασκευαστές ηχείων έρχονται αντιμέτωποι με πολλές προκλήσεις στην προσπάθειά τους να αναπαράγουν ποιοτικό ήχο. Οι υψηλές συχνότητες επιβάλλουν την γρήγορη και με ακρίβεια κίνηση του διαφράγματος με αποτέλεσμα τα στοιχεία του μεγαφώνου να θερμαίνονται έντονα εξαιτίας των με-

γάλων επιταχύνσεων που αναπτύσσονται. Τα διαφράγματα που αναπαράγουν υψηλές συχνότητες πρέπει λοιπόν να έχουν χαμηλή μάζα.

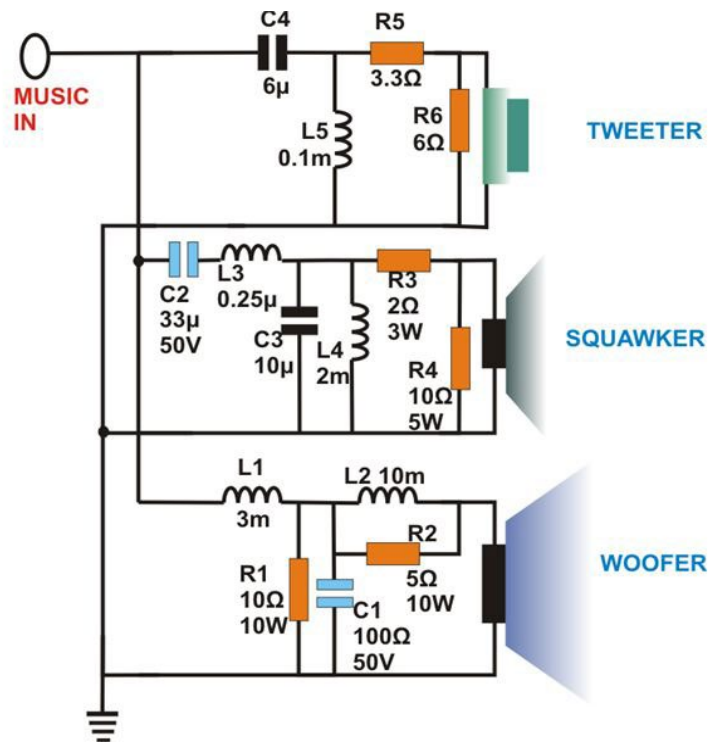
Οι χαμηλές συχνότητες που έχουν μεγάλο μήκος κύματος απαιτούν μεγάφωνα των οποίων η διάμετρος της παλλόμενης επιφάνειας πρέπει να είναι μεγάλη. Μεγάλα διαφράγματα συνεπάγονται και μεγάλες μάζες, κάτι που σημαίνει ότι αυξάνεται η αδράνεια του μεγαφώνου. Έτσι, εμφανίζει αυξημένη αδράνεια και μειωμένη ευαισθησία, ενώ απαιτείται και πολύ μεγαλύτερη ισχύς για να μετακινηθούν οι κώνοι τους.

Για να αντεπεξέλθουν στις αντικρουόμενες απαιτήσεις των υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων, οι κατασκευαστές ηχείων χωρίζουν το ακουστικό φάσμα σε υποζώνες και κατασκευάζουν ηχεία δύο ή και περισσότερων δρόμων, έτσι ώστε τα κατάλληλα μεγάφωνα να αναπαράγουν συγκεκριμένες συχνότητες. Δρόμους ονομάζουμε τις υποζώνες στις οποίες χωρίζεται το ακουστικό φάσμα. Ο διαχωρισμός του φάσματος σε περισσότερες ζώνες και μεγάφωνα μειώνει και την παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης (IMD) των μεγαφώνων όπως και την πιθανότητα υπερθέρμανσής τους. Τα δικτυώματα διαχωρισμού συχνοτήτων που επιτρέπουν τη λειτουργία ηχείων δύο, τριών ή και περισσότερων δρόμων ονομάζονται «crossover». Ονομάστηκαν έτσι λόγω των τομών που εμφανίζουν στα γραφήματα απόκρισης συχνότητας όπως θα δούμε παρακάτω (σχήμα 7.29). Στην ουσία τα crossovers είναι ειδικά σχεδιασμένα φίλτρα συχνοτήτων, με χρήση αντιστάσεων, πυκνωτών και πηνίων, που οδηγούν σε κάθε μεγάφωνο (woofers μπάσου, midrange μεσαίων συχνοτήτων, tweeter υψηλών συχνοτήτων) του ηχείου σήματα με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο. Το ταίριασμα της αναπαραγωγής από όλα τα μεγάφωνα μαζί πρέπει να δίνει ένα τονικά ισορροπημένο αποτέλεσμα όταν το κύκλωμα crossover είναι σωστά σχεδιασμένο.



Σχήμα 7.29

Η σχεδίαση ενός συστήματος διαχωρισμού συχνοτήτων γίνεται πλέον με ειδικό λογισμικό και χρησιμοποιεί συνήθως αντιστάσεις ισχύος, πυκνωτές και πηνία. Ανάλογα την εφαρμογή, μπορεί να σχεδιαστούν φίλτρα 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup> ή και 3<sup>ης</sup> τάξης ακόμη ώστε να γίνεται σχετικά απότομη αποκοπή συχνοτήτων που δεν επιθυμούμε να φτάσουν σε ένα από τα μεγάφωνα του ηχείου. Τα λοιπά μεγάφωνα θα καλύψουν αυτό το κενό στο φάσμα της απόκρισης του ηχείου. Στο επόμενο σχήμα παρατηρούμε ένα σχετικά πολύπλοκο κύκλωμα crossover 3 δρόμων:



Σχήμα 7.30

Στα αρνητικά των κυκλωμάτων crossover συγκαταλέγονται οι αλλαγές και παραμορφώσεις φάσης που εισάγουν, η κατανάλωση ισχύος επάνω στα στοιχεία τους καθώς και το αυξημένο κόστος κατασκευής τους για μεγάλα ποσά ισχύος. Στα επαγγελματικά συστήματα ήχου κάλυψη εκδηλώσεων και συναυλιών επιλέγεται πλέον η χρήση ενεργών crossover. Αυτά είναι πρακτικά προενισχυτές που δρουν ως μεταβλητά φίλτρα συχνοτήτων και τοποθετούνται ακριβώς πριν τους τελικούς ενισχυτές ισχύος του συστήματος. Κατά αυτό τον τρόπο, δεν καταναλώνεται άσκοπα ισχύς επάνω τους και αυξάνεται η απόδοση του ηχοσυστήματος. Μάλιστα, η δυνατότητα ρύθμισης και προγραμματισμού τους τα κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμα σε πληθώρα εφαρμογών και μπορούν να συνδυαστούν με διάφορα ηχεία και ενισχυτές ήχου.

Πολλά οικονομικά ηχοσυστήματα του εμπορίου δεν διαθέτουν σωστά σχεδιασμένα crossovers. Πολλά οικιακής χρήσης ηχεία έχουν απλώς έναν πυκνωτή ηλεκτρολυτικό χωρητικότητας περί τα 2.2μF εν σειρά συνδεδεμένο με το tweeter. Αν μάλιστα χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικής τεχνολογίας tweeters, τότε δε χρησιμοποιούν καθόλου φίλτρα crossover. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με την οικονομική κατασκευή της καμπίνας και τον μεγαφώνων καθιστά τα ηχεία αυτά ακατάλληλα για πιστή αναπαραγωγή ήχου ιδιαίτερα σε υψηλότερες εντάσεις. Η παραμόρφωση TIM και THD που εισάγουν αυτά τα ηχεία μπορεί να γίνει έως και ενοχλητική για το αυτί. Η απόκριση συχνοτήτων θα είναι επίσης πολύ μακριά από την επίπεδη απόκριση σοβαρών κατασκευών. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που πλέον οι περισσότεροι λάτρεις του ήχου υψηλής πιστότητας στρέφονται σε παλαιότερα και ακριβότερα ηχοσυστήματα απορρίπτοντας τα μαζικής παραγωγής micro, mini και midi ηχοσυστήματα. Οι επιδόσεις των ηλεκτρονικών στοιχείων (πηγών, ενισχυτών) αυτών των ηχοσυστημάτων είναι αξιοπρεπείς. Αν η σχεδίαση των ηχείων τους ήταν πιο μελετημένη και όχι μονάχα βασισμένη στο χαμηλό κόστος παραγωγής και διανομής/διάθεσης, οι επιδόσεις τους θα είναι σαφώς ανώτερες.

### 7.10.11 Τεχνικά χαρακτηριστικά των ηχείων

**Ευαισθησία (Sensitivity):** Η ευαισθησία είναι ένα μέτρο του πόσο δυνατά μπορεί να παίξει ένα ηχείο με σήμα εισόδου πλάτους 2.83Volts στο ένα μέτρο μπροστά από αυτό. Δεδομένου ότι η ένταση του ήχου (Sound Pressure Level - SPL) μετριέται σε dB, η μονάδα μέτρησης της ευαισθησίας καθορίζεται σε dB SPL/2.83V/m. Σημειώστε ότι 2.83Volt αντιστοιχούν σε 1Watt όταν εφαρμόζονται σε ηχείο 8ohm ( $P=V^2/R$ , ως εκ τούτου  $1W=2,832/8$ ). Δεδομένου ότι οι σύγχρονοι ενισχυτές είναι σταθερές πηγές τάσης στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής λειτουργίας τους, ο προσδιορισμός της ευαισθησίας σε μια συγκεκριμένη τάση και όχι στο παλαιότερα χρησιμοποιούμενο στάνταρντ του 1 W (το οποίο μεταφράζεται σε μια διαφορετική τάση για ηχεία με εμπέδηση διαφορετική των 8ohm), παρέχει ένα πολύ πιο συνεπή τρόπο εκτίμησης της πραγματικής ευαισθησίας των ηχείων.

Η ευαισθησία ενός ηχείου είναι ένα πολύ σημαντικό τεχνικό χαρακτηριστικό καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο πιο δυνατά παίζει το ηχείο και/ή τόσο μικρότερο ενισχυτή απαιτεί. Κατά κανόνα ηχεία υψηλής ευαισθησίας μειώνουν το κόστος του απαιτούμενου ενισχυτή και προσφέρουν χαμηλότερη παραμόρφωση και μεγαλύτερη δυναμική περιοχή. Αν τοποθετήσουμε 2 όμοια μεγάφωνα στο ίδιο ηχείο και σε απόσταση μεταξύ τους αρκετά μικρότερη από ένα μήκος κύματος (34 εκατοστά για συχνότητα τόνου 1kHz, στον αέρα), τότε η ευαισθησία του ηχείου θα αυξηθεί ιδανικά κατά 3dB. Η αύξηση αυτή αντιστοιχεί σε διπλασιασμό της επιφάνειας του κώνου ενός μεγαφώνου. Πολλοί κατασκευαστές καταφεύγουν σε αυτή την τεχνική για την ενίσχυση της ευαισθησίας των ηχείων τους διατηρώντας τον όγκο τους χαμηλά.

**Ονομαστική ισχύς εισόδου:** Η ονομαστική ισχύς εισόδου ενός ηχείου είναι η συνεχής ισχύς (Watt RMS) που μπορεί να απορροφηθεί από το ηχείο χωρίς αυτό να καταστραφεί. Φυσικά τα ηχεία μπορούν να χειριστούν χωρίς να καταστραφούν σήματα πολύ υψηλότερης τιμής ισχύος για μικρές χρονικές περιόδους (λίγα εκατοστά του δευτερολέπτου). Αν ένα ηχείο συνδυάζει υψηλή ονομαστική ισχύ εισόδου με υψηλή ευαισθησία, τότε αυτό μπορεί να αναπαράγει μουσική και γενικώς ήχο σε ρεαλιστικά επίπεδα χωρίς συμπίεση ή παραμόρφωση.

**Εμπέδηση (Impedance):** Η εμπέδηση ενός ηχείου είναι η μέτρηση που μας δείχνει πόσο εύκολα ένα ηχείο διάγει ένα ηλεκτρικό σήμα. Η εμπέδηση μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τη συχνότητα του σήματος. Οι τεχνικές προδιαγραφές των ηχείων συνήθως αναφέρουν το μέσο όρο της εμπέδησης στο πλήρες συχνοτικό εύρος. Επειδή η τιμή που αναφέρεται είναι ένας μέσος όρος, δύο ηχεία με την ίδια ονομαστική εμπέδηση μπορεί να έχουν τελείως διαφορετική εμπέδηση σε συγκεκριμένες συχνότητες. Για παράδειγμα σε ένα ηχείο με εμπέδηση 8 Ohm, η πραγματική εμπέδηση σε συγκεκριμένες συχνότητες μπορεί να κυμαίνεται από 3 Ohm έως και πάνω από 30 Ohm. Όσο πιο χαμηλή είναι η εμπέδηση ενός ηχείου τόσο πιο δύσκολη η οδήγηση του από έναν ενισχυτή.

**Διασπορά:** Πόσο ομοιόμορφα στο χώρο ένα ηχείο εκπέμπει τον ήχο του. Ένα ηχείο με στενή διασπορά ακτινοβολεί ήχο εμπρός, όπως η δέσμη από ένα φακό. Ένα ηχείο ευρείας διασποράς από την άλλη καλύπτει ομοιόμορφα όλη την περιοχή ακρόασης με ήχο. Τα ηχεία πρέπει να έχουν ευρεία οριζόντια διασπορά για δύο λόγους. Οι ανακλάσεις από τους πλάγιους τοίχους πρέπει να έχουν τονική ισορροπία όμοια με το άμεσο ηχητικό κύμα, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ανεπιθύμητοι χρωματισμοί. Δεύτερον, η ευρεία διασπορά επιτρέπει σε όλους τους ακροατές να απολαμβάνουν μουσική και ταινίες όπου και αν κάθονται σε ένα δωμάτιο.

**Συχνότητα Crossover:** Η συχνότητα crossover είναι η συχνότητα στην οποία το σήμα διαχωρίζεται στα διαφορετικά μεγάφωνα ενός ηχείου πολλών δρόμων. Σε ένα τυπικό σύστημα δύο δρόμων, η συχνότητα crossover μεταξύ του woofer και του tweeter είναι περίπου τα 2.500 Hz.

**Συχνότητα αποκοπής (Cutoff):** Η συχνότητα στην οποία η ένταση ενός σήματος πέφτει κατά 3 dB (ισοδυναμεί με μείωση ισχύος στο μισό) από τη μέγιστη τιμή του. Επίσης, αναφέρεται ως το σημείο -3 dB. Όσο πιο χαμηλή είναι η συχνότητα αποκοπής, τόσο περισσότερες χαμηλές συχνότητες ένα ηχείο μπορεί να αναπαράγει.



Αυτοενισχυόμενα ηχεία (powered speakers): Τα αυτοενισχυόμενα ηχεία όπως τα monitor ηχεία των στούντιο ηχογραφήσεων, κάποια επαγγελματικά ηχεία και αρκετά υπογούφερ για οικιακό κινηματογράφο έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των απλών παθητικών ηχείων αλλά και περιορισμούς. Ο βασικός περιορισμός είναι πως συνήθως δεν υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικού ενισχυτή για την οδήγησή τους. Εντούτοις, ο ενσωματωμένος ενισχυτής είναι συνήθως αρκετά ικανοποιητικός σε απόδοση και έχει σχεδιαστεί ώστε η απόκρισή του να ταιριάζει με αυτή των μεγαφώνων των ηχείων. Μάλιστα είναι υπολογισμένος ώστε η μέγιστη ισχύς του να μην ξεπερνά τη μέγιστη ισχύ που μπορούν να διαχειριστούν τα μεγάφωνα του συστήματος. Επομένως, το ενεργό ηχείο μπορεί να έχει μία όσο το δυνατόν επίπεδη απόκριση συχνοτήτων αν σχεδιαστεί σωστά.

Οι μετρήσεις των ηχείων και πώς μπορούν να μας φανούν χρήσιμες:

Οι μετρήσεις αποκαλύπτουν τον χαρακτήρα του ηχείου με βάση την επίπεδη ή μη απόκρισή του στο φάσμα των συχνοτήτων. Από τις πρώτες μέρες σχεδίασης και αξιολόγησης ηχείων έχουν υπάρξει πάμπολλες συζητήσεις και διχογνωμίες σχετικά με το τι μπορούν να μας αποκαλύψουν οι μετρήσεις των ηχείων, πώς συσχετίζονται με την ηχητική μας εμπειρία, σε ποιο βαθμό μπορεί ο σχεδιαστής να επαφίεται σε αυτές και πόσο έγκυρες και επαναλήψιμες είναι. Φυσικά αυτά είναι ερωτήματα με τα οποία ασχολούνται συγκεκριμένοι κλάδοι της ηλεκτροακουστικής, όπως για παράδειγμα η ψυχοακουστική, και θα ήταν αδύνατο να καλύψουμε πλήρως το θέμα εδώ. Παρόλα αυτά μπορούμε να δώσουμε αρκετά χρήσιμες γνώσεις για τον ακροατή και μουσικόφιλο που θέλει να γνωρίσει πιο βαθιά το επιστημονικό υπόβαθρο της ηλεκτροακουστικής σε αντίθεση με την αγυρτεία που περιτριγυρίζει συχνά τα ηχεία!

Η κύρια μέτρηση για την οποία ενδιαφέρεται ο σχεδιαστής ηχείων είναι η Απόκριση Συχνοτήτων όπως αυτή μετρείται σε κάποια απόσταση (1 ή 2 μέτρα) από το tweeter και κατά μήκος του άξονά του. Αυτή η μέτρηση δείχνει την απόκριση του ηχείου, δηλαδή την ηχητική στάθμη που αναπαράγει, για κάθε συχνότητα μέσα στο ακουστό εύρος συχνοτήτων. Παρά τις πολλές και αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με το ποια μορφή απόκρισης συχνοτήτων είναι προτιμητέα, είναι αναμφίβολο ότι η επίπεδη απόκριση συχνοτήτων, δηλαδή η σχεδίαση εκείνη που ούτε ενισχύει ούτε αποσβεννύει επιλεκτικά κάποιες συχνότητες, είναι η καλύτερη και πάντα επιθυμητή. Μια επίπεδη απόκριση σημαίνει ότι το ηχείο αναπαράγει ήχο με τη μεγαλύτερη δυνατή πιστότητα χωρίς να χρωματίζει τη μουσική εισάγοντας το δικό του ηχητικό χαρακτήρα (πχ. μπάσο ή πολύ πρίμο ηχείο).

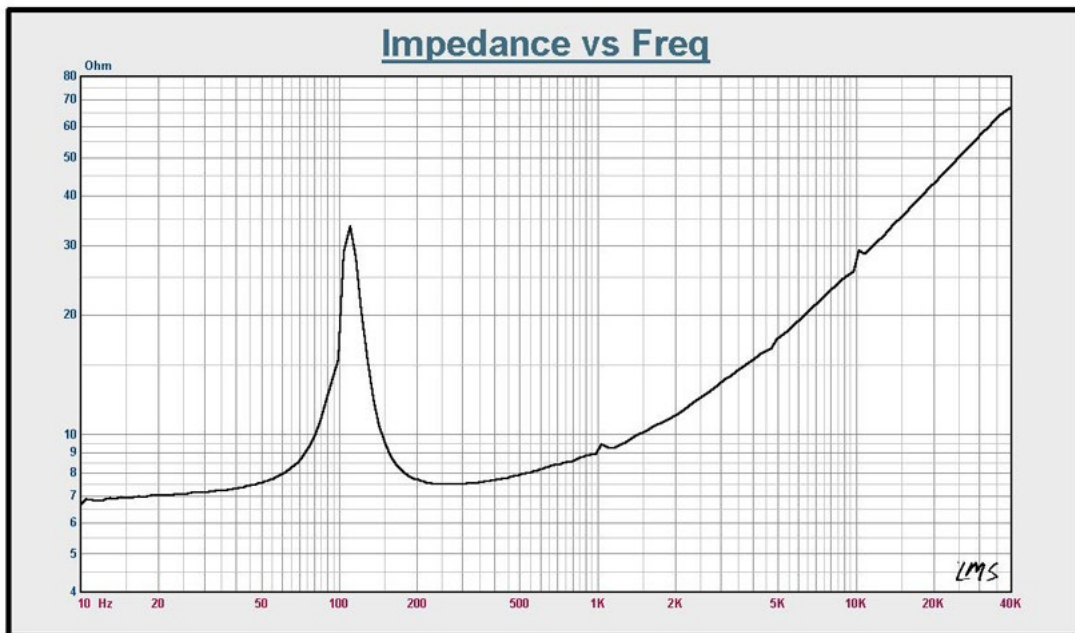
Στο σημείο αυτό πρέπει να προσέξουμε όμως γιατί υπάρχει μια παγίδα. Η γεωμετρία και η χωροθέτηση του δωματίου επιδρούν καθοριστικά στην απόκριση χαμηλών συχνοτήτων των ηχείων. Για να έχουμε ακριβή μέτρηση απόκρισης στα χαμηλά, με επαναληψιμότητα και συσχέτιση με την υποκειμενική παρατήρηση, θα πρέπει είτε να πραγματοποιήσουμε τη μέτρηση σε ένα πολύ μεγάλο δωμάτιο, ώστε οι ανακλάσεις από τους τοίχους να μην επηρεάζουν την αρχική μέτρηση, ή θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια τεχνική που ονομάζεται μέτρηση Κοντινού Πεδίου (Near-Field). Κάνοντας χρήση αυτής της τεχνικής, μετράμε από πολύ κοντά (το μικρόφωνο σχεδόν εφάπτεται του κώνου) την απόκριση των μεγαφώνων και των bass reflex αν υπάρχουν, ώστε να λαμβάνεται υπόψη μόνο το άμεσο κύμα και όχι οι ανακλάσεις. Αυτή η near-field μέτρηση χαμηλών συχνοτήτων συνθέτεται με τη μέτρηση μεσαίο-υψηλών συχνοτήτων που λαμβάνεται σε οποιοδήποτε δωμάτιο μεσαίων διαστάσεων, ώστε να πάρουμε μια μέτρηση η οποία συσχετίζεται πολύ καλά με αυτό που τελικά ακούμε από το υπό μέτρηση ηχείο.

Το ενδιαφέρον σημείο που προκύπτει από τη near-field μέτρηση είναι η συχνότητα στην οποία η απόκριση συχνοτήτων πέφτει κατά 3dB σε σχέση με το μέσο όρο στη μεσαία μπάντα. Αυτή η συχνότητα αναφέρεται ως η συχνότητα  $f_3$  και είναι ένα μέτρο της ικανότητας του ηχείου να αναπαράγει χαμηλές συχνότητες. Όσο πιο χαμηλή η  $f_3$ , τόσο πιο δυνατό μπάσο μπορεί να παίξει το ηχείο. Βέβαια όταν γίνεται ακρόαση του ηχείου μέσα σε ένα ρεαλιστικό δωμάτιο, το μπάσο του ενδέχεται να είναι αρκετά διαφορετικό εξαιτίας των στάσιμων κυμάτων. Παρόλα αυτά όμως, όσο πιο επίπεδη είναι η απόκριση των χαμηλών μέχρι τη συχνότητα  $f_3$ , τόσο πιο εύκολο θα είναι να ενσωματωθεί στο χώρο δίνοντας

ένα ομαλό, δυνατό μπάσο που φέρνει όλο το ρεαλισμό που απαιτείται για την ακρόαση της μουσικής και των ταινιών μας

Άλλη σημαντική μέτρηση είναι η απόκριση συχνότητας μετρημένη σε κάποια γωνία από τον άξονα του tweeter (off-axis). Αυτές οι μετρήσεις σε συγκεκριμένες γωνίες οριζόντια και κατακόρυφα (horizontal and vertical off-axis) δείχνουν την επίδραση που έχει η καμπύλη, τα μεγάφωνα αυτά καθαυτά και κυρίως το crossover (κύκλωμα διαχωρισμού συχνοτήτων) το οποίο εξαιτίας της διαφορά φάσης που εισάγει στο σήμα που οδηγείται σε κάθε μεγάφωνο μπορεί να δημιουργεί ακυρώσεις συχνοτήτων σε κάποιες γωνίες. Αναλύοντας λοιπόν τις off-axis μετρήσεις μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι το ηχείο εκπέμπει ισορροπημένο ήχο ακόμα και προς τα πλάγια, ώστε ο ήχος που θα φτάσει στον ακροατή εξ ανακλάσεως να έχει τον ίδιο τονικό χαρακτήρα με τον άμεσο ήχο (on-axis). Ένα τέτοιο ηχείο θα ακούγεται καλά όχι μόνο στην ιδανική θέση ακρόασης (sweet spot) αλλά σε μια πολύ ευρύτερη περιοχή.

Τέλος μεγάλης σημασίας είναι και η μέτρηση της εμπέδησης(impedance) σε συνάρτηση με τη συχνότητα (σχήμα 7.29 ). Αυτή απεικονίζει την τιμή της αντίστασής του σε όλο το εύρος του ακουστού φάσματος, από 20Hz έως 20kHz και δείχνει σε ποια συχνότητα – εύρος συχνοτήτων η εμπέδηση έχει την ελάχιστη τιμή της, καθώς και ποια είναι αυτή η τιμή. Συνήθως θέλουμε η ελάχιστη εμπέδηση να είναι παραπάνω από 3-4 Ohm, ούτως ώστε όλοι σχεδόν οι ενισχυτές να μπορούν να οδηγήσουν το ηχείο. Βέβαια σε ηχεία High-End, τιμές εμπέδησης τόσο χαμηλές όσο το 1 Ohm δεν είναι σπάνιες. Επίσης η συχνότητα στην οποία η εμπέδηση έχει την ελάχιστή της τιμή είναι σημαντική. Αν η συχνότητα αυτή είναι υψηλή, τότε το φορτίο στον ενισχυτή δεν είναι και τόσο μεγάλο, καθώς στις υψηλές συχνότητες η ηχητική πληροφορία δεν είναι και τόσο σημαντική. Αν από την άλλη η συχνότητα ελάχιστης εμπέδησης είναι στη χαμηλομεσαία μπάντα, τότε το ηχείο θα αποτελεί δύσκολο φορτίο καθώς υπάρχει αρκετή ηχητική πληροφορία σε αυτό το εύρος συχνοτήτων.



Σχήμα 7.31 (διάγραμμα εμπέδησης-συχνότητας για το μεγάφωνο του ενισχυτή μουσικών οργάνων MG10 της marshall)

### 7.10.12 Ηχοσύστημα οικιακού κινηματογράφου

Ο ρόλος κάθε ηχείου σε ένα σύστημα οικιακού κινηματογράφου είναι:

-Το εμπρός αριστερό και δεξί κανάλι (Front) αναλαμβάνει τον κύριο όγκο αναπαραγωγής μουσικής και ειδικών εφέ.

-Το κεντρικό κανάλι (Center) αναπαράγει κατά κύριο λόγο τους διαλόγους, καθώς επίσης και εστιάζει την εικόνα της μουσική σκηνής, ενώ αναπαράγει και ποσοστό των ειδικών εφέ.

-Τα περιφερειακά κανάλια (Surround) αναλαμβάνουν τα ηχητικά εφέ και τη διάχυτη ατμόσφαιρα (ambience) των soundtracks ταινιών ή των πολυκάναλων μουσικών ηχογραφήσεων.

-Τέλος το υπογούφερ (Subwoofer) αναπαράγει τις χαμηλές συχνότητες με ρεαλισμό.

Τα ηχεία έχουν την πιο δύσκολη αποστολή από όλα τα εξαρτήματα ενός οικιακού κινηματογράφου. Αναλογιστείτε ότι ένα μικρό «κουτί» πρέπει να αναπαράγει όλους τους ήχους, από την ανθρώπινη φωνή μέχρι ... μία έκρηξη και μάλιστα με ρεαλιστικό τρόπο για να μας πείσει ότι ο ήχος είναι «ζωντανός».

Ανάμεσα στα στοιχεία που πρέπει να χαρακτηρίζουν την απόδοση ενός ηχείου είναι τα παρακάτω:

-Επίπεδη και ευρεία απόκριση συχνότητας

-Χαμηλή παραμόρφωση

-Γρήγορη και ακριβή απόδοση μεταβατικών

-Κατάλληλη και ελεγχόμενη διασπορά

-Υψηλή ευαισθησία

-Χαμηλή εμπέδηση

Το πρώτο στοιχείο ενός ηχείου που καθορίζει την απόδοση του είναι η ποιότητα και ο τύπος της καμπίνας του. Ο τύπος των μεγαφώνων παίζει επίσης σημαντικότερο ρόλο στην ηχητική απόδοση του ηχείου.

Τελευταία παρατηρείται πως χρησιμοποιούνται ολοένα και μικρότερου μεγέθους ηχεία για τα περιφερειακά κανάλια που είναι εξοπλισμένα με ολοένα και μικρότερου μεγέθους μεγάφωνα για τη μείωση κόστους, όγκου και βάρους. Η ισχύς αυτών των μεγαφώνων και η ευαισθησία τους είναι δυστυχώς μικρή. Ακόμη μικρότερο είναι το εύρος της απόκρισης συχνότητων τους καθώς διαθέτουν 1 μόνο μεγάφωνο κώνου ανά ηχείο άρα 1 δρόμο. Ο μικρός όγκος της καμπίνας δεν επιτρέπει την αναπαραγωγή χαμηλό-μεσαίων συχνοτήτων ενώ η οικονομική κατασκευή του κώνου εξασθενεί σημαντικά τις συχνότητες άνω των 10-12kHz. Η παραμόρφωση που παρουσιάζουν δε οι μικροί κώνοι σε υψηλότερες στάθμες SPL είναι αρκετά υψηλή. Το υπογούφερ, όσο σωστά σχεδιασμένο κι αν είναι, καλείται να καλύψει το κενό που δημιουργείται στις μεσαίες συχνότητες με επέκταση της απόκρισής του σε υψηλότερες συχνότητες. Αυτό το γεγονός κάνει αντιληπτή στον ακροατή τη θέση του ενός υπογούφερ στο χώρο, γεγονός που ενοχλεί και μπερδεύει το αυτί.

Τα μεγάφωνα λαμβάνουν ηλεκτρικά σήματα από το κύκλωμα διαχωρισμού που διαχωρίζει τις συχνότητες σε επιμέρους φάσματα τα οποία οδηγούνται στα κατάλληλα μεγάφωνα για ηχητική αναπαραγωγή. Συνεπώς η ποιότητα του κυκλώματος διαχωρισμού αποτελεί επίσης καθοριστικό στοιχείο της ηχητικής απόδοσης ενός ηχείου.

Το υπογούφερ μπορεί να είναι παθητικό ηχείο ή να ενσωματώνει ενισχυτή ισχύος που το καθιστά ενεργό. Στα πλεονεκτήματα της χρήσης ενεργού υπογούφερ βρίσκεται καταρχάς η «ξεκούραστη» λει-

τουργία του κεντρικού ενισχυτή AV, χάρη στον ενσωματωμένο ενισχυτή του υπογούφερ. Υπάρχουν πολλοί λόγοι να ενσωματώσει κανείς ένα, δύο ή ιδανικά τέσσερα ενεργά υπογούφερ στο χώρο του. Ο πρώτος λόγος είναι για να προσθέσουμε μπάσο, εκτεινώντας την απόκριση των δύο κυρίων (main) ηχείων. Ένας άλλος λόγος είναι ότι χρησιμοποιώντας ένα ενεργό υπογούφερ, απαλλάσσουμε τα κύρια ηχεία από το φόρτο αναπαραγωγής των χαμηλών συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραμόρφωση και να βελτιώνεται η γραμμική απόκρισή τους. Επιπλέον, εάν χρησιμοποιούμε ένα ενεργό subwoofer, θα ελευθερωθεί ένα τμήμα των αποθεμάτων ενέργειας του ενισχυτή βελτιώνοντας έτσι τη διαχείριση της θερμότητάς του.

Η προσθήκη επιπλέον υπογούφερ στο ηχοσύστημα πρέπει όμως να γίνει προσεκτικά. Το υπογούφερ πρέπει να συνδυαστεί κατάλληλα με τα υπόλοιπα ηχεία. Πρέπει να επιλέξουμε τη σωστή συχνότητα αποκοπής που ελέγχει τις χαμηλές συχνότητες που αναπαράγονται από το υπογούφερ, ενώ το επίπεδο κάθε υπογούφερ πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε ο συνδυασμός τους να μη δίνει υπερβολικό μπάσο.

Τέλος θα πρέπει να τοποθετήσουμε το ή τα υπογούφερ σε σωστή θέση στο χώρο. Είναι αλήθεια ότι τα αυτιά μας δε μπορούν εύκολα να ανιχνεύσουν την πηγή αναπαραγωγής του μπάσου οπότε υπάρχει η ελευθερία τοποθέτησής του(ς) σε οποιαδήποτε σχεδόν θέση στο δωμάτιο. Ωστόσο, πρέπει να διασφαλίσουμε ότι οι θέσεις αυτές δε δημιουργούν στάσιμα κύματα.

Η χρήση τεσσάρων υπογούφερ είναι προτιμότερη καθώς έτσι λαμβάνουμε μια καλύτερη απόδοση χαμηλών και θα έχουμε πολύ μικρότερο πρόβλημα με τα στάσιμα κύματα, δεδομένου ότι το μπάσο θα προέρχεται από πολλές κατευθύνσεις μέσα στο δωμάτιο. Η πολύ πιο ομαλή απόδοση χαμηλών συχνοτήτων σε πολλές διαφορετικές θέσεις στο δωμάτιο δικαιολογεί επίσης το πρόσθετο κόστος απόκτησής τους.

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε αναλυτικότερα την κατάλληλη τοποθέτηση ηχείων στο χώρο ακρόασης βάσει της ακουστικής του (room acoustics). Σημαντικότερο ρόλο παίζει η ακουστική του χώρου μέσα στον οποίο παίζουν τα ηχεία. Η διαφορά στην απόδοση ανάλογα με το χώρο μπορεί να είναι μεγάλη.

## 7.11 Το 8ο στάδιο: ακρόαση από τον καταναλωτή και ακουστική χώρου

Πολλοί ακροατές επιλέγουν να ακούν την αγαπημένη τους μουσική μέσω ακουστικών λόγω της φορητότητάς τους και της διακριτικότητάς τους. Υπάρχουν πολλά είδη ακουστικών στο εμπόριο, από πλαστικές «ψείρες» όπως λέγονται τα μικρότερα σε μέγεθος έως μεγάλου μεγέθους high end ακουστικά ξύλινης επένδυσης. Η τεχνολογία κατασκευής τους είναι παρόμοια με αυτή των ηχείων. Διαθέτουν και αυτά μία καμπίνα πλαστική ή μεταλλική, κώνους και μεγάφωνα μικρών διαστάσεων, καλώδια σύνδεσης αλλά και φίλτρα, ρυθμιστικά έντασης ή ενσωματωμένους ενισχυτές σε κάποιες περιπτώσεις. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους είναι όμοια με αυτά των ηχείων αλλά με μικρότερη πάντοτε ισχύ. Η αντίσταση εισόδου τους είναι δε μεγαλύτερη από αυτή των ηχείων συνήθως. Παρότι πολλοί πιστεύουν ότι το περιβάλλον δεν επηρεάζει καθόλου την απόδοση των ακουστικών, είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι οι εταιρίες όπως η Bose παράγουν ακουστικά με ακύρωση εξωτερικού θορύβου (noise cancelation). Επομένως, το περιβάλλον επηρεάζει την ακρόαση μέσω ακουστικών λόγω του θορύβου που προκαλεί και φτάνει στα αυτιά μας μαζί με το επιθυμητό σήμα. Η επιλογή ποιοτικών ακουστικών με ευρύ φάσμα απόκρισης και χαμηλή παραμόρφωση είναι βασική για την πιστή αναπαραγωγή ήχου από συσκευές φορητές και μη με υποδοχή ακουστικών. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε φυσικά

το χώρο όπου θα τοποθετηθούν ηχεία για την ακρόαση μουσικής. Σε επόμενη ενότητα θα κάνουμε ειδική ανάλυση για το σύστημα ηχείων του οικιακού κινηματογράφου.

Η ακουστική χώρων ή αρχιτεκτονική ακουστική ασχολείται με τη μελέτη και συμπεριφορά του ήχου σε διάφορους κλειστούς χώρους και την αλληλεπίδραση με τα διάφορα αντικείμενα στο εσωτερικό των χώρων αυτών (αίθουσες συναυλιών, αμφιθέατρα, θέατρα, κινηματογράφοι, όπερα, studios, ναοί, γραφεία, άλλους εργασιακούς χώρους, ακόμη και απλές κατοικίες), με σκοπό τον έλεγχο του παραγόμενου ηχητικού αποτελέσματος και του επιπέδου θορύβου και αντηχήσεων.

Ειδικό θέμα της ακουστικής χώρων αποτελεί η ηχομόνωση και η ηχοπροστασία από το θόρυβο εγκαταστάσεων σε κλειστούς χώρους, με τους αντίστοιχους κανονισμούς, προδιαγραφές και μεθοδολογία υπολογισμών. Σημαντικό ρόλο στον τομέα αυτό, μεταξύ των άλλων παίζουν οι συντελεστές ηχο-απορρόφησης και οι ηχομονωτικές ιδιότητες των διαφόρων υλικών.

Η μελέτη της ακουστικής των χώρων γίνεται με διάφορα μοντέλα, πχ από τα εμπειρικά μοντέλα των Sabine και Eyring που παρέχουν προσεγγιστικές εκτιμήσεις ακρίβειας οκτάβας, μέχρι την κυματική θεωρία με τους κανονικούς ιδιορρυθμούς, τα υπολογιστικά μοντέλα των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Method), των συνοριακών στοιχείων BEM (Boundary Element Method) και των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου FDTD (Finite Difference Time Domain) έως και τη γεωμετρική θεωρία διάδοσης με ηχητικές ακτίνες (μέθοδοι ακτινών, ειδώλων, ακουστικών δεσμών).

### 7.11.1 Ηχητικά φαινόμενα στο χώρο ακρόασης

Η φτωχή ποιότητα ήχου που τυχόν έχει ένα σύστημα στο χώρο σας, πέρα από την ποιότητα των ίδιων των μηχανημάτων, μπορεί να εξαρτάται και από τα ηχητικά χαρακτηριστικά του χώρου σας και προβλήματα όπως διακροτήματα και ανακλάσεις του χώρου. Λέγοντας πως ακούμε έναν ήχο, στην πραγματικότητα τον ακούμε με έναν συγκεκριμένο κατά περίπτωση τρόπο, ο οποίος καθορίζεται από τα ακουστικά μας αισθητήρια. Κάθε ήχος προέρχεται από τουλάχιστον δύο πηγές, την αρχική πηγή του ήχου, καθώς επίσης και κάποια άλλα αντικείμενα, επάνω στα οποία ο ήχος ανακλάται πριν φθάσει στα αυτιά μας. Κάθε φορά που ένας ήχος ανακλάται, δίνει μια αλλοιωμένη αντίληψη κι αυτή η αντίληψη μπορεί να είναι εσφαλμένη ή σωστή, αναλόγως της περίπτωσης. Καθώς οι ανακλάσεις του ήχου είναι δεδομένο ότι θα υπάρχουν πάντοτε, ανακύπτει το ερώτημα, ποια ανάκλαση είναι «σωστή» και ποια «λάθος».

Τα ηχητικά κύματα μέσω του αέρα έχουν συγκεκριμένη ταχύτητα, της τάξης των 340m/sec υπό κανονικές κλιματολογικές συνθήκες και σε μηδενικό υψόμετρο, στην επιφάνεια της θάλασσας, ενώ η ταχύτητα του ήχου μέσω άλλων υλικών, όπως ο χάλυβας και το σπλισμένο σκυρόδεμα, είναι πολύ υψηλότερη. Όταν ακούτε έναν ήχο, αυτός προέρχεται κατά πρώτον από την πηγή του, και σε μεταγενέστερο χρόνο από κάποια άλλα αντικείμενα, επί των οποίων ανεκλάσθη. Αυτή η διαδικασία του αρχικού και των χρονικά μεταγενεστέρων διαδοχικών ήχων δίνει στον αρχικό ήχο κάποια πρόσθετη διάρκεια που ονομάζεται ηχώ (echo).

Αν αυτή η χρονική καθυστέρηση είναι αρκετά μεγάλη, αντιλαμβάνεσθε τον ήχο ως μια σειρά από έναν αρχικό και κάποιους μεταγενεστέρους, πρόσθετους και επαναλαμβανομένους ήχους, διακριτούς μεταξύ τους. Για παράδειγμα, αν φωνάζετε τη λέξη «Hello» μέσα σε μια χαράδρα, θα ακούστε δύο ή και περισσότερες επαναλήψεις της κραυγής σας, οι οποίες θα σβήνουν σταδιακά. Το φαινόμενο της ηχούς συμβαίνει όταν τα αντικείμενα που ανακλούν τον ήχο είναι αρκετά μακριά από τον ακροατή, και έτσι η καθυστέρηση των ανακλάσεων είναι αρκετά μεγάλη, ώστε οι επαναλήψεις να γίνονται αντιληπτές ως διακριτές μεταξύ τους.

Αν οι ανακλάσεις του ήχου έχουν να διανύσουν απόσταση μικρή, ο ήχος φυσικά θα ανακλασθεί και πάλι, αλλά οι χρονοκαθυστέρηση των ανακλάσεων θα είναι τόσο μικρή, ώστε αυτές θα είναι αντι-

ληπτές ως μια συνεχής «ουρά» του αρχικού ήχου. Αυτό το είδος της αντήχησης έχει επικρατήσει να ονομάζεται αντήχηση, (reverberation). Κάπου μεταξύ αυτών των δύο ακραίων περιπτώσεων, οι ανακλάσεις του ήχου φθάνουν σχετικά αργά ώστε να είναι διακριτές, αλλά και αρκετά εγκαίρως, ώστε να είναι τόσο γρήγορα επαναλαμβανόμενες, που ακούγονται με κάποιο τρέμουλο, ένα φαινόμενο γνωστό διεθνώς με τον όρο flutter echo. Το flutter echo γίνεται άμεσα αντιληπτό χτυπώντας παλαμάκια εντός του χώρου. Μπορούμε εύκολα να το καταπολεμήσουμε με απορροφητικές ή διαχυτικές ακουστικές διατάξεις όπως αυγοθήκες ή καλύμματα που μοιάζουν με τη δομή αυγοθήκης. Η επιλογή της εξάλειψης των απολύτως παράλληλων επιφανειών στο χώρο ακρόασης κατά το σχεδιασμό, εξασφαλίζει επίσης την απουσία του παραπάνω φαινομένου.

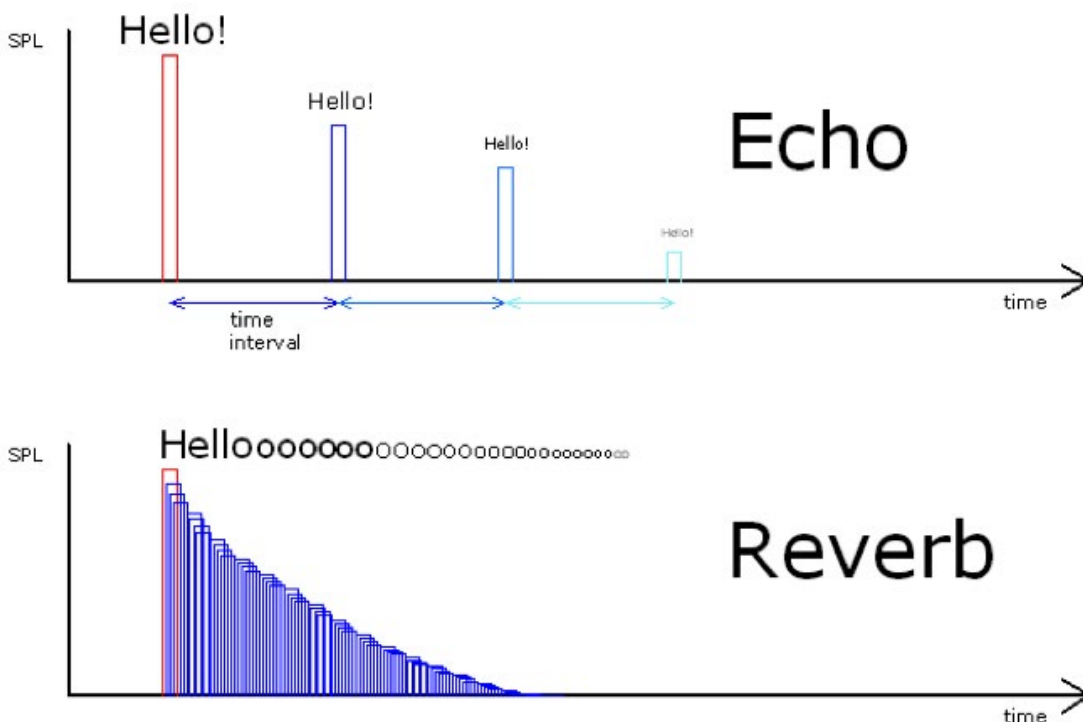
Όπως μπορείτε να διαπιστώσετε από τον τύπο που ακολουθεί, η σχέση μεταξύ της απευθείας και της ανακλώμενης ενέργειας είναι πολύ μικρή:

$$G = 13.8 * V / 4\pi * c * d^2 * T,$$

όπου V είναι ο όγκος του δωματίου σε m<sup>3</sup>, T ο χρόνος αντήχησης σε sec, d η απόσταση του ακροατή από την ορχήστρα σε m, π=3.14159... και c η ταχύτητα του ήχου.

Έτσι, ένας ακροατής που κάθετα 12m μακριά από τους μουσικούς στην Grosser Musikverein της Βιέννης (T=2.2sec και V=14.600 m<sup>3</sup>), δέχεται περίπου πέντε φορές μεγαλύτερη ανακλώμενη ενέργεια σε σχέση πάντα με την απευθείας (G=0.15). Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και σε άλλες, εξίσου περίφημες αίθουσες συναυλιών.

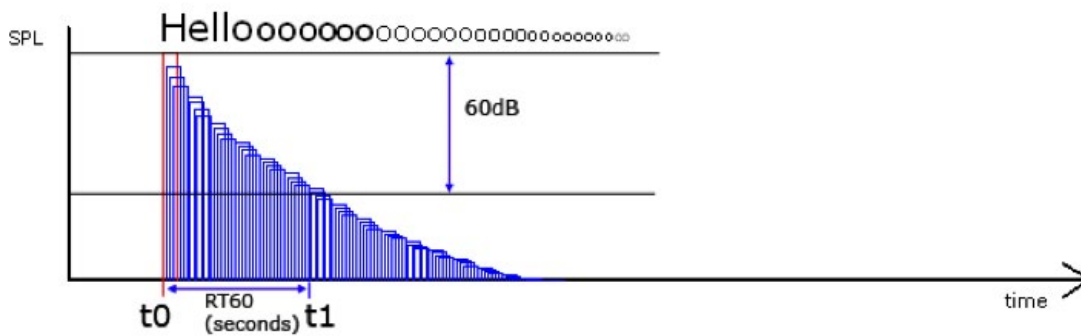
Η επόμενη εικόνα αναπαριστά γραφικά το φαινόμενο της ηχούς και της αντήχησης σε σχέση με το χρόνο.



Σχήμα 7.32

Η αντήχηση είναι θεμελιώδες χαρακτηριστικό όλων των αιθουσών ακρόασης μουσικής, από ένα απλό οικιακό δωμάτιο έως μια μεγάλη αίθουσα συναυλιών, ενώ ως φυσικό μέγεθος έχει τυποποιηθεί και συμβολίζεται ως T60, ένας όρος που λέει πόσος είναι ο χρόνος αντήχησης (σε δευτερόλεπτα ή χιλιοστά του δευτερολέπτου) από τη στιγμή που παύει να παίζει ο αρχικός ήχος έως τη στιγμή που η στάθμη της αντήχησης του θα πέσει 60dB κάτω από τη στάθμη του αρχικού ήχου. 60dB είναι περίπου

η δυναμική περιοχή που μπορεί να αντιληφθεί ένας υγιής ακροατής σε μια αίθουσα συναυλιών, πριν επέλθει κόπωση στα αυτιά του. Η εικόνα που ακολουθεί αναπαριστά την έννοια του χρόνου T60, όπου  $T60 = t1 - t0$  sec. Αξίζει να σημειωθεί πως, καθώς δεν είναι γνωστές οι ανακλαστικές συνθήκες του κατά περίπτωση μετρούμενου χώρου, ο χρόνος T60 πρέπει πάντοτε να συνοδεύεται από σχετική υποσημείωση για το τμήμα του ηχητικού φάσματος που ισχύει.



Σχήμα 7.33

Ο T(60) εξαρτάται από τις διαστάσεις του δωματίου, τα υλικά κατασκευής του, την επίπλωση και τέλος την συχνότητα του ήχου:

$$T(60) = 0.161 * V / A,$$

όπου A η ηχοαπορροφητικότητα (για συγκεκριμένη συχνότητα) του δωματίου σε Sabins και V ο όγκος δωματίου σε  $m^3$ . Το A υπολογίζεται σαν το άθροισμα των γινομένων των επιμέρους εκτεθειμένων επιφανειών των υλικών στο δωμάτιο (a) επί τον εκάστοτε συντελεστή ηχοαπορροφητικότητας (s) του υλικού.  $[A = (a1 \times s1) + (a2 \times s2) + \dots]$ . Ο συντελεστής ηχοαπορροφητικότητας χρησιμοποιείται για να εκφράζει την ιδιότητα ενός υλικού να απορροφά την ακουστική ενέργεια. Συμβολίζεται με s και υπολογίζεται ως εξής:

s = η ακουστική ενέργεια που απορροφά το υλικό προς την ακουστική ενέργεια που προσπίπτει στο υλικό.

Από τον τύπο αυτό συνάγεται ότι τα απόλυτα ηχοαπορροφητικά υλικά έχουν s ίσο με 1, ενώ τα απόλυτα ανακλαστικά υλικά έχουν συντελεστή απορρόφησης 0.

Αν δεν ορίσουμε συγκεκριμένη συχνότητα που θέλουμε να βρούμε τον T(60) σε κάποιο χώρο (συγκεκριμένη τοποθέτηση της πηγής), δεχόμαστε ότι η τιμή του T(60) αναφέρεται στην συχνότητα των 1000Hz. Αλλιώς, θα πρέπει να τον υπολογίσουμε σε πολλές συχνότητες και το σύνθετο φάσμα είναι από 125Hz - 4000Hz (ή και 8000Hz).

Για ακριβέστερες μετρήσεις απαιτούνται ειδικά όργανα, συνήθως όμως οι αποκλίσεις από το υπολογιστικό είναι μικρές - πλην ειδικών περιπτώσεων. Ωστόσο ένας καλός εμπειρικός κανόνας είναι ότι: Ο T(60) είναι πάντα μεγαλύτερος για τις χαμηλές συχνότητες και μικρότερος για τις υψηλές συχνότητες.

Ευνόητο είναι ότι ο T(60) σε πολύ μεγάλους χώρους είναι πολύ υψηλός, γι' αυτό και οι αίθουσες συναυλιών απαιτούν μελετημένη ηχητική παρέμβαση. Στους συνήθεις οικιακούς χώρους, βεβαίως, είναι μικρότερος και με τα έπιπλα που πάντα υπάρχουν, η ηχητική παρέμβαση πρέπει να είναι μικρή έως καθόλου.

Παρά τις διχογνωμίες που υπάρχουν μεταξύ των μηχανικών ήχου για το ποιός είναι ο καλύτερος T(60), είναι κοινώς αποδεκτό ότι διάφορα είδη μουσικής «ωφελούνται» διαφορετικά από μικρούς ή μεγάλους T(60).

Η αναπαραγωγή μεγάλων (η και μικρών) συμφωνικών έργων ευνοείται περισσότερο από μεγάλους χώρους ακροάσεων (ήχος πλούσιος σε ηχοχρώματα και ζεστασιά), ενώ η αναπαραγωγή γρήγορης Jazz, Rock, ανθρώπινης ομιλίας, ρεμπέτικων κλπ. ευνοούνται περισσότερο από μικρότερους χώρους (ήχος γρήγορος, στακάτος). «Ιδανικός» T(60) για έναν οικιακό Χώρο 150 κ.μ. θεωρείται ότι είναι περίπου 0,5sec., που όπως είπαμε αναφέρεται στα 1000Hz, με μικρότερο για τις υψηλές και μεγαλύτερο για τις χαμηλές. Το σημαντικότερο εδώ είναι να συνειδητοποιήσουμε το εξής: αν εφαρμόσουμε την εξίσωση  $G=13.8 \cdot V / 4\pi \cdot c \cdot d^2 \cdot T$ , ή απλούστερα  $G=0,0032 \cdot V / (d^2 \cdot T)$ , και για απόσταση θέσης ακρόασης  $a$  υποθέσουμε 3m, ο λόγος ανακλώμενης προς απευθείας ηχητικής ενέργειας είναι πάνω από 9 φορές! Επομένως, εκεί που νομίζουμε ότι ακούμε τα ηχεία μας, ουσιαστικά ακούμε το δωμάτιο και δεν μπορούμε να κάνουμε σχεδόν τίποτα γι' αυτό.

Όμως το αυτί μας δεν είναι μικρόφωνο. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αναλαμβάνει να κάνει όλη την επεξεργασία, εξομοιώνοντας τις συνθήκες κατά το δοκούν. Ζούμε συνεχώς μέσα σε ένα ηχητικά ανακλαστικό περιβάλλον, και έτσι ο εγκέφαλός μας είναι εξ αρχής εθισμένος, εκπαιδευμένος να αντιλαμβάνεται ως «σωστούς» ήχους που συνοδεύονται από λιγότερη ή περισσότερη αντήχηση, ακόμη και ηχώ (κατ' εξαίρεση). Οι ανηχοϊκοί θάλαμοι είναι κατασκευασμένοι μόνο για πειράματα και μετρήσεις ηχείων και μικροφώνων. Έτσι, μια πολύ ενδιαφέρουσα ερώτηση ανακύπτει εύλογα: Πόση αντήχηση χρειάζεται για να έχουμε «κανονικό», «σωστό» ήχο;

Όταν ένας ήχος ξεκινά χωρίς την παραμικρή ανάκλαση, και προοδευτικά αποκτά όλο και μακρύτερη αντήχηση, τότε ως ανηχοϊκός θα είναι εντελώς αποκρουστικός, μη αρεστός, στη συνέχεια θα γίνεται όλο και πιο αρεστός στον ακροατή, κάποια στιγμή θα φθάσει στο απόγειο της αποδοχής του, η οποία στη συνέχεια θα αρχίσει να φθίνει, οπότε ο ήχος θα γίνεται όλο και λιγότερο αρεστός, καθώς η αντήχηση θα είναι πλέον τόσο μακρά, που θα τον καθιστά ακαθόριστο, μη κατανοητό.

Όταν ακούτε μουσική στο δωμάτιο του σπιτιού σας, προφανώς ακούτε και κάποια αντήχηση, η οποία θα χαρακτηρίζει το δωμάτιό σας. Εκτός αυτής, θα ακούτε και την ηχογραφημένη στο δίσκο αντήχηση, είτε αυτή προήλθε από το χώρο της ηχογράφησης, είτε προστέθηκε σε μεταγενέστερο χρόνο, κατά την ηχητική επεξεργασία της ηχογράφησης. Η σύλληψη της αντήχησης του συγκεκριμένου κατά περίπτωση χώρου μιας ηχογράφησης γίνεται με χρήση μικροφώνων τοποθετημένων επί τούτου, σχετικά μακριά από όλα τα όργανα, ώστε να συλλαμβάνουν τον «αέρα» του χώρου.

Άλλες ηχογραφήσεις είναι εξ ολοκλήρου πραγματοποιημένες σε στούντιο, σε χώρο με αυστηρά ελεγχόμενη, ή και καθόλου αντήχηση, ώστε το υλικό να είναι δεκτικό μόνον της αντήχησης που θα εισαγάγει εκ των υστέρων ο παραγωγός, καθώς η αντήχηση είναι δρόμος χωρίς γυρισμό. Από τη στιγμή που θα ηχογραφηθεί, ή θα προστεθεί εκ των υστέρων ως εφέ, είναι αδύνατο να αφαιρεθεί.

Έτσι, αναλόγως του γούστου του καλλιτέχνη και του παραγωγού, σχεδόν όλες οι ηχογραφήσεις σε στούντιο περιέχουν εφέ αντήχησης, ειδικά στις φωνές, κάτι που κάνει την ηχογράφηση υποκειμενικά πιο ελκυστική.

Όμως, ακόμη και στην περίπτωση που μια ηχογράφηση εκδοθεί χωρίς να έχει την παραμικρή αντήχηση, φυσική ή τεχνητή, αποκτά την αντήχηση του δωματίου σας, κάθε φορά που την ακούτε, αφού το δωμάτιό σας έχει κάποιες διαστάσεις που καθορίζουν αποστάσεις που πρέπει να διανύει ο ήχος έως τα αυτιά σας, καθώς και διάφορα αντικείμενα, έπιπλα, κάδρα κλπ., τα οποία ανακλούν τον ήχο, καθένα με το δικό του τρόπο.

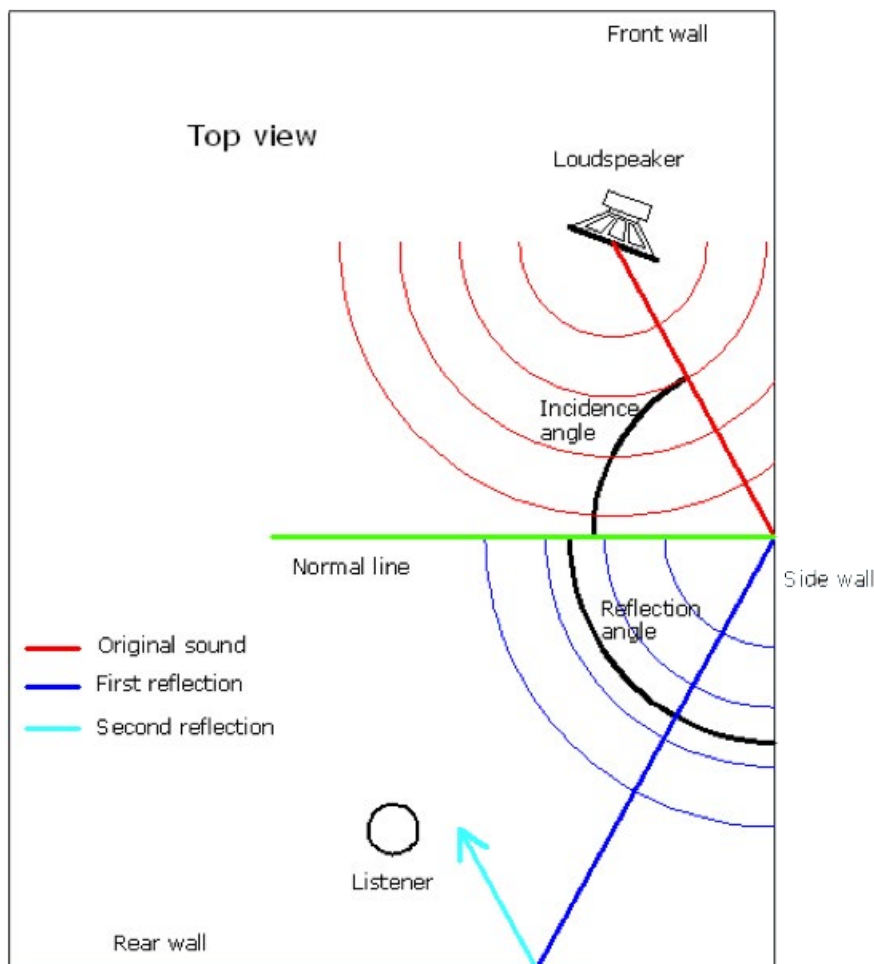
Έτσι, ενώ δεν μπορείτε να κάνετε τίποτα για την αντήχηση που περιέχει μια ηχογράφηση, αντιθέτως, μπορείτε να κάνετε πολλά για το δωμάτιο μέσα στο οποίο ακούτε μουσική, ώστε αυτό να αποκτήσει εκείνα τα απαραίτητα ακουστικά χαρακτηριστικά, ώστε να σας δίνει σαφές, ομαλό, συναφές άκουσμα, αφού στην πραγματικότητα δεν ακούτε μουσική από τα ηχεία σας, αλλά από τον αέρα του δωματίου, έτσι όπως αυτός διεγείρεται από τα ηχεία και στη συνέχεια ανακλάται μέσα στο δωμάτιο.



### 7.11.2 Οι ανακλάσεις του ήχου

Ο όρος «ανακλάσεις» είναι πολύ γενικός, καθώς καλείται να περιγράψει ένα φαινόμενο αρκετά περίπλοκο. Κατά πρώτον, αναλόγως των φυσικών του ιδιοτήτων, (μάζα, σχήμα, μέγεθος, ελαστικότητα, θερμοκρασία, αλλά και φύση των επιφανειών του), κάθε αντικείμενο ανακλά ήχους με τον δικό του τρόπο, αναλόγως της συχνότητας του ήχου που ανακλά κάθε στιγμή. Επίσης, αυτή ακριβώς η φύση των επιφανειών του, σε συνδυασμό με τη συχνότητα του ήχου, καθορίζουν το πόσο και πώς ανακλά ήχους το αντικείμενο. Έτσι, λοιπόν, ας ρίξουμε μια ματιά σε μερικά βασικά είδη ηχητικών ανακλάσεων.

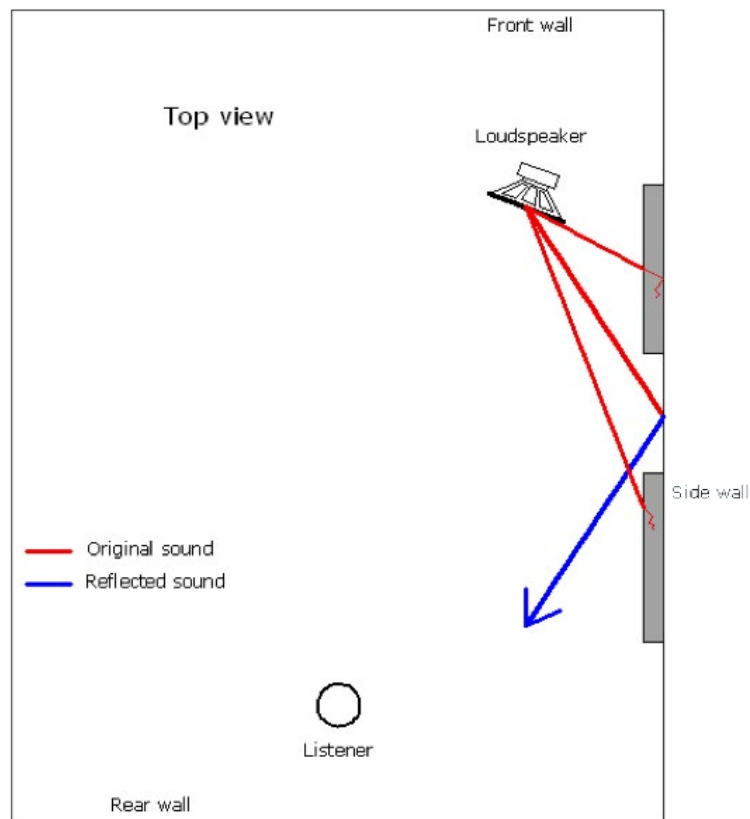
Όταν ένα ηχητικό κύμα προσκρούει σε μια επίπεδη και επαρκώς άκαμπτη επιφάνεια, ανακλάται σε γωνία ανάκλασης ίση με τη γωνία πρόσπτωσης, περίπου σαν να ήταν φωτεινή δέσμη. Αυτή είναι η απλούστερη και πλέον εύληπτη των περιπτώσεων ηχητικής ανάκλασης, και ονομάζεται κατοπτρική ανάκλαση, όπως αναπαρίσταται στην εικόνα παρακάτω:



Σχήμα 7.34

Η πράσινη ευθεία είναι κάθετη στο επίπεδο της επιφάνειας, ενώ περνά από το σημείο όπου γίνεται η ανάκλαση, και είναι γνωστή ως άξονας της ανάκλασης. Η γωνία ανάκλασης (reflection angle) είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης (incidence angle). Φυσικά, η εικόνα αυτή είναι απλουστευμένη για λόγους παραστατικότητας, αφού αναπαριστά το φαινόμενο σε μια διάσταση, ενώ στην πραγματικότητα η ανάκλαση πραγματοποιείται και ως προς τον άξονα του βάθους, μέσα στον Ευκλείδειο χώρο.

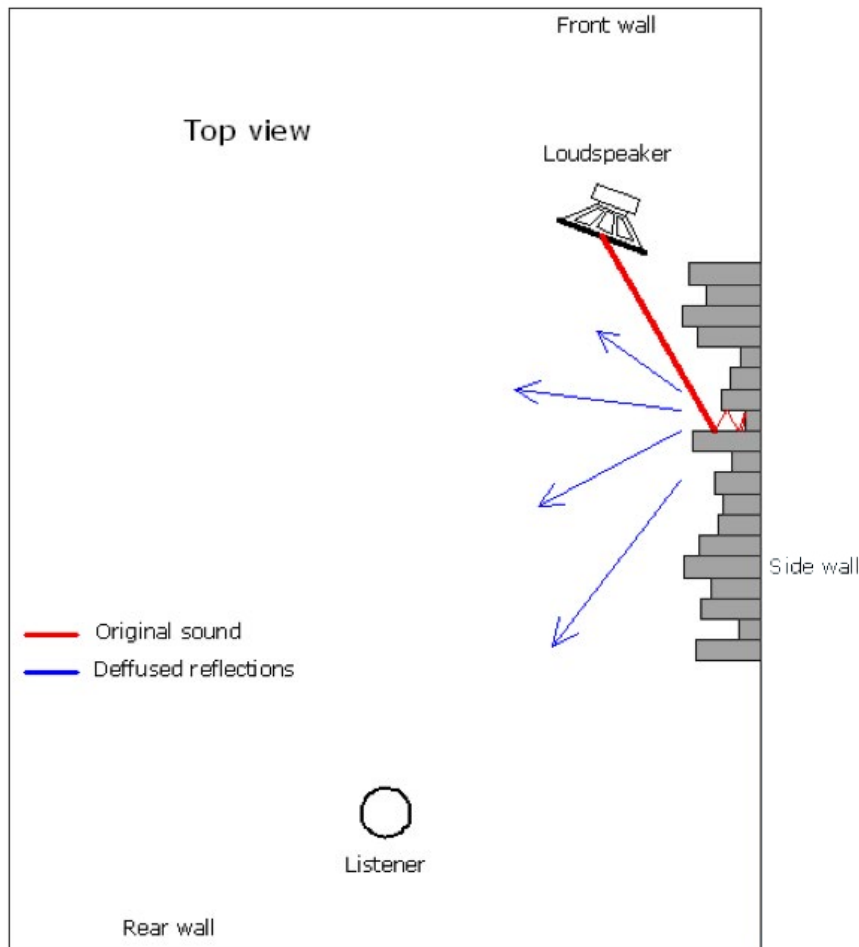
Αν η ανακλαστική επιφάνεια δεν είναι επίπεδη, οι ανακλάσεις του ήχου είναι ακανόνιστες, και πραγματοποιούνται προς όλες τις κατευθύνσεις, όπως αναπαριστά η επόμενη εικόνα.



Σχήμα 7.35

Παρά το γεγονός πως και αυτές είναι ανακλάσεις, εδώ μιλάμε για διάχυση του ήχου. Αξίζει να σημειωθεί, δε, πως κανένας διαχυτής δεν μπορεί να κάνει διάχυση του ήχου σε όλες τις συχνότητες. Εξ αιτίας του φαινομένου της διάθλασης, ένας τέτοιος διαχυτής μπορεί να διαχύσει μόνον τις συχνότητες, των οποίων το μήκος κύματος είναι ίσο ή μικρότερο από το μήκος των ακμών της διατομής κάθε ράβδου. Φυσικά, εκτός αυτού του είδους των «ραβδωτών», υπάρχουν και διαχυτές των οποίων η επιφάνεια είναι συνεχής και καμπυλωμένη με κανονικό ή ακανόνιστο (τυχαίο) τρόπο, ώστε αυτή να λειτουργεί ως ένα μεικτό τρόπο διάχυσης διάθλασης του ήχου, καθώς επίσης και διαχυτές «μονοδιάστατοι» που υλοποιούνται με διαδοχικές αυλακώσεις, των οποίων το πλάτος και κυρίως το βάθος διαφέρουν μεταξύ των.

Η επόμενη εικόνα αναπαριστά μια άλλη περίπτωση, στην οποία ο τοίχος πραγματοποιεί τμηματική ανάκλαση και απορρόφηση του ήχου, καθώς φέρει μια αλληλουχία απορροφητών, στο μεσοδιάστημα των οποίων παρεμβάλλεται γυμνή ανακλαστική επιφάνεια.



Σχήμα 7.36

Και εδώ, κάθε απορροφητής είναι ικανός να απορροφά μόνον ένα μέρος του ακουστικού φάσματος, αναλόγως της φύσης των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένος, αλλά και το βάθος του. Φυσικά, αν όλες οι πλευρές ενός δωματίου είναι πλήρως απορροφητικές σε όλες τις συχνότητες, τότε δεν μιλάμε για δωμάτιο, αλλά για ανηχοϊκό θάλαμο.

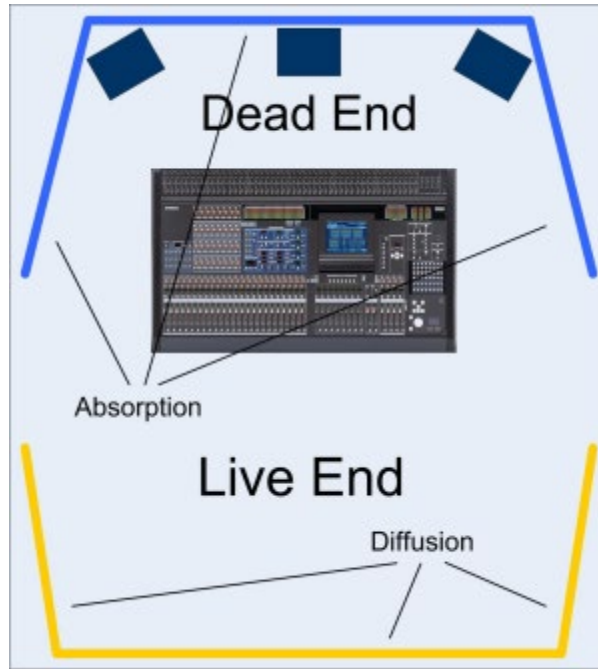
### 7.11.3 Το εμπειρικό πρότυπο LEDE (Live End - Dead End)

Ανεξάρτητα από τις περιορισμένες διαστάσεις του δωματίου (όχι θεωρητικά άπειρες), τα ηχητικά κύματα που ταξιδεύουν στο χώρο και διεγείρουν τον ακουστικό μας πόρο δημιουργούν ταυτόχρονα ένα σωρό προβλήματα που, αν θέλουμε να απολαύσουμε την στερεοφωνική εμπειρία, απαιτούν άμεσες λύσεις.

Σε γενικές γραμμές, κάθε σημείο του χώρου ακρόασης συμμετέχει στη διαδικασία χαλιναγώγησης των ηχητικών κυμάτων, είτε ανακλώντας τα είτε -σπανιότερα- απορροφώντας μέρος της ενέργειάς τους. Όσοι έχουν ενεργή σχέση με τα στούντιο ηχογραφήσεων, χρησιμοποιούν τον όρο L.E.D.E (Live End - Dead End) προκειμένου να ορίσουν ένα μοντέλο χώρου που συμπεριφέρεται ηχητικά ορθά. Αυτό σημαίνει πως η άκρη ενός δωματίου προς τη μεριά των ηχείων οφείλει να είναι ηχητικά ουδέτερη ώστε να απορροφά όσο το δυνατόν περισσότερο τα ηχητικά κύματα. Ενώ προς τη μεριά του ακροατή, η περιοχή του δωματίου πρέπει να είναι ηχητικά «ζωντανή», άρα να ευνοεί τις ανακλάσεις κυμάτων. Η σχεδιαστική Αρχή LEDE-RFZ στάθηκε ορόσημο στην ακουστική φροντίδα δωματίων ελέγχου των studios, αφού εξασφάλισε ποιοτικές συνθήκες μίξεων καθώς κι επαναληψιμότητα στην αναμενόμενη

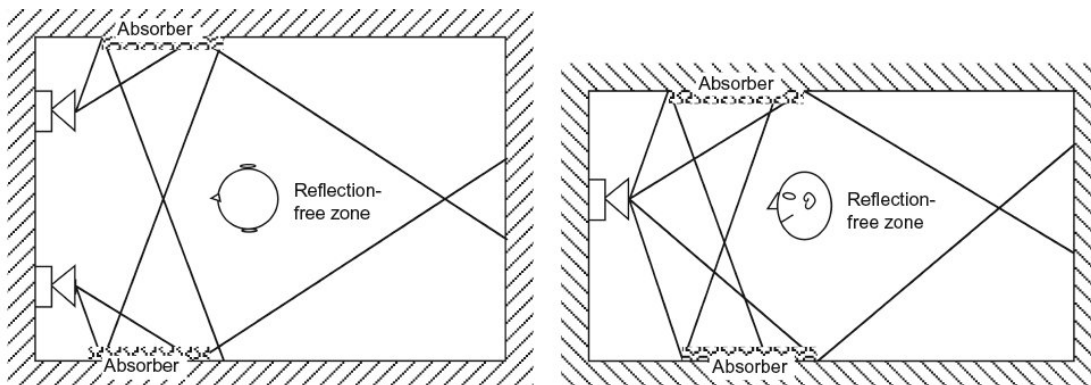
απόδοση κατά την αναπαραγωγή τους σε χώρους ακρόασης έξω από το δωμάτιο της μίξης.

Σύμφωνα με την σχεδιαστική φιλοσοφία L.E.D.E. που αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 από τους Don και Carolyn Davies, ο χώρος ακρόασης ενός δωματίου ελέγχου θα πρέπει να περιλαμβάνει 2 «ακουστικές ζώνες» με αντίθετα χαρακτηριστικά : τη ζώνη απορρόφησης (Dead End) και τη ζώνη διάχυσης (Live End).



Σχήμα 7.37

Σκοπός του δωματίου LEDE είναι η δημιουργία μιας καινούργιας ακουστικής Ζώνης Ελεύθερης Ανακλάσεων (RFZ – Reflection Free Zone), στα γεωμετρικά πλαίσια και όρια λειτουργίας του ακροατή, που θα είναι «ελεύθερη» από ανακλάσεις για το αρχικό χρονικό διάστημα των 15 – 20 ms. Αυτή επιτυγχάνεται με την κατάλληλη κλίση των ηχείων και χάρη στην τοποθέτηση απορροφητών (μείωση της ανακλώμενης ενέργειας) και κατοπτρικών ανακλαστήρων με γεωμετρία κεκλιμένων επιφανειών (ανακατεύθυνση ανακλώμενης ενέργειας προς το διαχυτικό οπίσθιο μισό του δωματίου) στις θέσεις των πρώιμων ανακλάσεων.



Σχήμα 7.38 , Ζώνη Ελεύθερη από Ανακλάσεις (RFZ – Reflection Free Zone)

Η θεωρία στηρίζει πως πρέπει να αποσβήνουμε τις ανακλάσεις πρώτης τάξης. Οι 1<sup>η</sup>ς τάξης ανακλάσεις είναι αυτές από τα ηχεία προς τους πλαϊνούς τοίχους, στα σημεία που φθάνει το ηχητικό κύμα μετά από μόλις 10 χιλιοστά του δευτερολέπτου (10ms). Οι ανακλάσεις που θα ακολουθήσουν, όταν

χρόνος των 20 ms παρέλθει, θα πρέπει να είναι διάχυτες και μειωμένες σε στάθμη κατά τουλάχιστον 20dB από τον απ' ευθείας ήχο. Το αποτέλεσμα ενός τέτοιου σχεδιασμού (όταν φυσικά η επίτευξη των τεχνικών στόχων γίνει εφικτή) είναι ένα άκουσμα χωρίς παραμορφώσεις που αναδεικνύει τον ηχητικό ρεαλισμό σ' ένα φυσικά ακουστικό περιβάλλον.

Για το σκοπό αυτό κυκλοφορούν στο εμπόριο (after market) προϊόντα σε μορφή πάνελ, πολυγώνου, κυλίνδρου κ.ο.κ. και ανάλογη επένδυση. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων ανάλογα με το βάθος του διαχύτη και δεδομένου ότι είναι στηριγμένος σε επιφάνεια σταθερή υψηλής μάζας:

Βάθος διαχύτη (inches)	Low frequency cut-off (Hz)
1»	3.2k Hz
2»	1.6k Hz
3»	1.2k Hz
4»	800 Hz
6»	600 Hz
8»	400 Hz
12»	300 Hz
16»	200 Hz
24»	150 Hz

Πίνακας 7.15

Σχεδόν ίδια αποτελέσματα όμως, μπορούμε να έχουμε απλώς απομακρύνοντας τα ηχεία μας όσο γίνεται από τους πλαϊνούς τοίχους κατά τουλάχιστον 1 με 1,5 μέτρο. Εννοείται ότι και ο ακροατής θα πρέπει επίσης να απέχει όσο γίνεται από τον πίσω τοίχο. Αυτό σημαίνει ότι το ιδανικό δωμάτιο ακρόασης έχει τουλάχιστον 6 μέτρα μήκος, ώστε να μεσολαβούν 2 με 3 μέτρα μεταξύ ηχείων και ακροατή.

Στην πράξη, όμως, τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά και δεν απαιτείται να διαμορφώνουμε χώρους ακρόασης πάντοτε βάσει των LEDE πρότυπων. Φανταστείτε δύο πηγές φωτός στο απόλυτο σκοτάδι. Ας πούμε, δύο φακούς led. Στην ουσία, δεν φωτίζουν τίποτε περισσότερο από το σημείο που πέφτει η δέσμη τους. Για να φωτίσουν, χρειάζονται κάτι που θα αντανάκλα τη δέσμη τους. Θυμηθείτε π.χ. ότι τη νύχτα η βρεγμένη ασφάλτος δεν φαίνεται με τα φώτα πορείας και χρειάζεται φώτα ομίχλης για να διακρίνουμε τα όριά της.

Το Φως, λοιπόν, απαιτεί την αντανάκλαση. Κατά τον ίδιο τρόπο, δύο ηχεία στο «νεκρό» άκρο ενός δωματίου (σύμφωνα με την αρχή LEDE) είναι δύο σημειακές πηγές ήχου. Δεν μπορούν να δημιουργήσουν, ούτε να υποστηρίξουν μια στερεοσκοπική ηχητική λειτουργία.

Αν όμως τοποθετηθούν στο ηχητικά «ζωντανό» άκρο του δωματίου, μετατρέπουν όλο το χώρο ακρόασης σε ηχητική σκηνή, με έντονες αντιθέσεις, βάθος, ύψος και πλάτος. Η στερεοφωνική λειτουργία επιτελείται με τη μέγιστη προσήλωση στην αρχή της. Επομένως και ο ήχος απαιτεί την αντανάκλαση και ένα δωμάτιο ακρόασης δε χρειάζεται να είναι διαμορφωμένο όπως ένα control room ενός στούντιο μουσικής παραγωγής.

#### 7.11.4 Στάσιμα κύματα

Τα στάσιμα κύματα, είναι οι επιστροφές των ηχητικών κυμάτων που ανακλώνται στις επιφάνειες του χώρου. Όταν ένα κύμα προσπίπτει σε ένα σύνορο (στην περίπτωση μας έναν τοίχο, το δάπεδο και το ταβάνι ενός δωματίου), αυτό ανακλάται εν μέρει προς τα πίσω. Αυτό το ποσοστό της ενέργειας του κύματος που ανακλάται προς τα πίσω προστίθεται στο αρχικό κύμα. Αναλόγως με το μήκος κύματος, δηλαδή τη συχνότητα, και την απόσταση που διένυσε το κύμα πριν χτυπήσει το σύνορο, δημιουργούνται από τη συμβολή των κυμάτων περιοχές μέσα στο χώρο όπου ελαχιστοποιούνται και μεγιστοποιούνται

ούνται ορισμένες συχνότητες, πολύ επιλεκτικά. Το φαινόμενο αυτό της δημιουργίας συγκεκριμένων περιοχών που ενισχύουν ή αποσβένουν κάποιες συχνότητες ονομάζεται δημιουργία στάσιμων κυμάτων.

Για έναν τυπικό οικιακό χώρο οι χαμηλές συχνότητες είναι αυτές που επηρεάζονται από τα στάσιμα κύματα του δωματίου. Γι αυτό το λόγο σε μερικά σημεία ακούγονται τα μπάσα πιο δυνατά ενώ σε άλλα απουσιάζουν σχεδόν τελείως, ιδίως σε συγκεκριμένες συχνότητες.

Όσο μεγαλύτερο και λιγότερο «κυβισμένο» είναι το δωμάτιο που ακούμε μουσική, τόσο καλύτερα. Τα στάσιμα κύματα, που ενδεχομένως να δημιουργηθούν από αλληπάλληλες ανακλάσεις μεταξύ παραλλήλων επιφανειών, θα είναι πολύ λιγότερο ενοχλητικά.

### 7.11.5 Ο χώρος ακρόασης και η δομή του

Ο μόνος αποτελεσματικός τρόπος να σχεδιάσετε κατάλληλα ένα χώρο ακρόασης είναι να εκλάβετε τις ηχητικές σας συσκευές – κυρίως τα ηχεία - και το χώρο σας ως ένα ενοποιημένο σύστημα. Ακόμη κι αν το σύστημά σας είναι πολύ υψηλής ηχητικής ποιότητας και έχετε τα καλύτερα ηχεία της αγοράς, τα οποία μπορούν να επιτύχουν ευθεία απόκριση σχεδόν σε όλες τις στάθμες, η πραγματική απόκριση συχνότητας που ακούτε καθορίζεται από τη σχέση των διαστάσεων του δωματίου μεταξύ των, καθώς και όποιων παρεμβάσεων τυχόν έχετε κάνει σ' αυτό, ώστε να ελέγξετε τις ανακλάσεις.

Με βάση το συνηθέστερο σενάριο, το δωμάτιό σας θα ομοιάζει προφανώς με ορθογωνικό εξάεδρο, με τέσσερις κτιστούς τοίχους με σπατουλαριστή επιφάνεια, και δάπεδο και οροφή από οπλισμένο σκυρόδεμα με επίχρισμα και αρκετά λεία πλακάκια στο δάπεδο, επιφάνειες οι οποίες εκλαμβάνονται ως πλήρως ανακλαστικές, κάτι που δεν απέχει και πολύ από την πραγματικότητα.

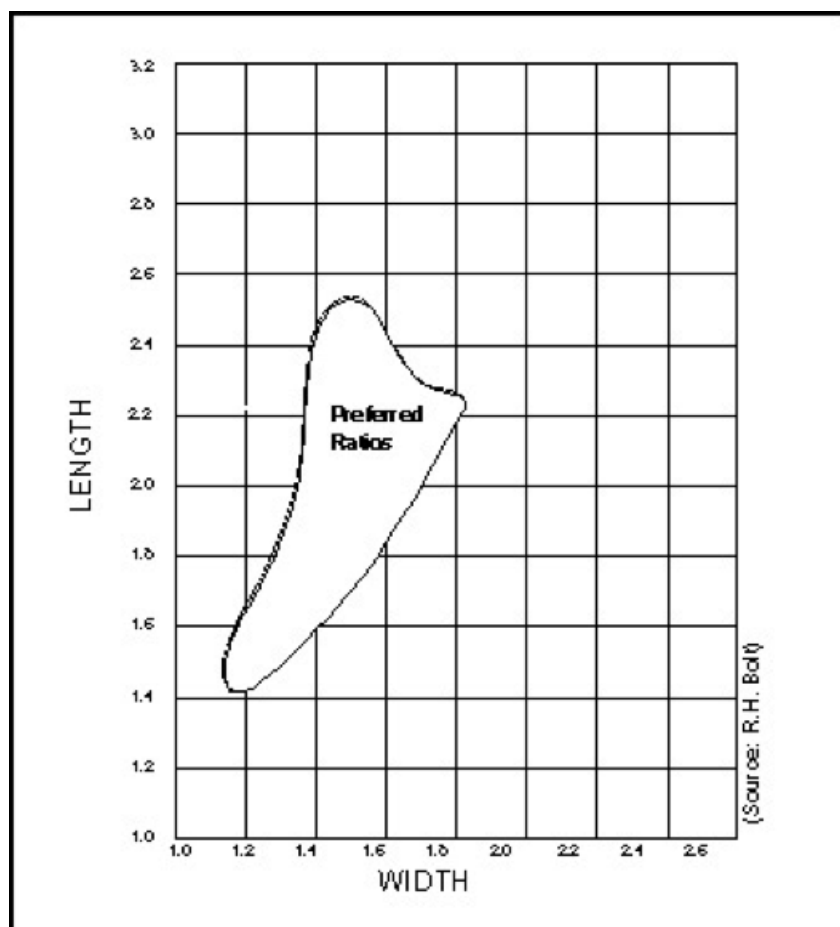
Σε όλες τις περιπτώσεις, ο αέρας που περιέχεται στο δωμάτιο θα έχει τρεις ιδιοσυχνότητες (συχνότητες συντονισμού), το μήκος κύματος καθεμιάς εκ των οποίων θα ισούται με την αντίστοιχη διάσταση του δωματίου, ενώ θα παρουσιάζονται και επιπρόσθετες αρμονικές ιδιοσυχνότητες, ακέραια πολλαπλάσια των βασικών τοιούτων. Αυτές οι βασικές ιδιοσυχνότητες είναι οι τρεις κύριοι ρυθμοί του δωματίου. Για να συγκεκριμενοποιήσουμε τα παραπάνω, ας πάρουμε για παράδειγμα ένα δωμάτιο διαστάσεων 8x5x3m. Οι συχνότητες στις οποίες θα δημιουργηθούν οι κύριοι συντονισμοί είναι 21.5, 34.4 και 57.3Hz και υπολογίζονται με τον εξής απλό τύπο:

$$Fres = 172 / L,$$

όπου L είναι η κάθε μία διάσταση του χώρου ακρόασης.

Γι' αυτόν το λόγο, είναι μακράν προτιμητέο, οι διαστάσεις του δωματίου να είναι άνισες μεταξύ τους. Αν κι αυτό το τελευταίο φαντάζει προφανές, δεν αρκεί. Κατόπιν εκτεταμένων πειραμάτων και μετρήσεων, έχει εξαχθεί το συμπέρασμα πως ο λόγος διαστάσεων του δωματίου πρέπει να εμπίπτει σε συγκεκριμένο εύρος τιμών, ώστε το δωμάτιο να έχει κατά το δυνατόν πολλούς και μικρής στάθμης συντονισμούς, αντί λίγους, έντονους και περισσότερο ενοχλητικούς, ώστε να επιτρέπει κατά το δυνατόν ομαλή απόκριση συχνότητας, χωρίς έντονες εξάρσεις και ακυρώσεις, χωρίς έντονους φασματικούς χρωματισμούς του ήχου.

Ας ρίξουμε μια ματιά στο γράφημα της επόμενης εικόνας. Το γράφημα αυτό δημοσιεύθηκε από τον καθηγητή του MIT Richard H. Bolt το έτος 1946, στην περιοδική επιθεώρηση της Acoustical Society of America και ορίζει μερικούς λόγους διαστάσεων δωματίων ακρόασης που προτιμώνται για την εξάλειψη αρνητικών ακουστικών φαινομένων του χώρου. Ο οριζόντιος άξονας μετρά το λόγο του πλάτους του δωματίου σε σχέση με το ύψος του, ενώ ο κατακόρυφος άξονας τον λόγο βάθους / ύψους του δωματίου.

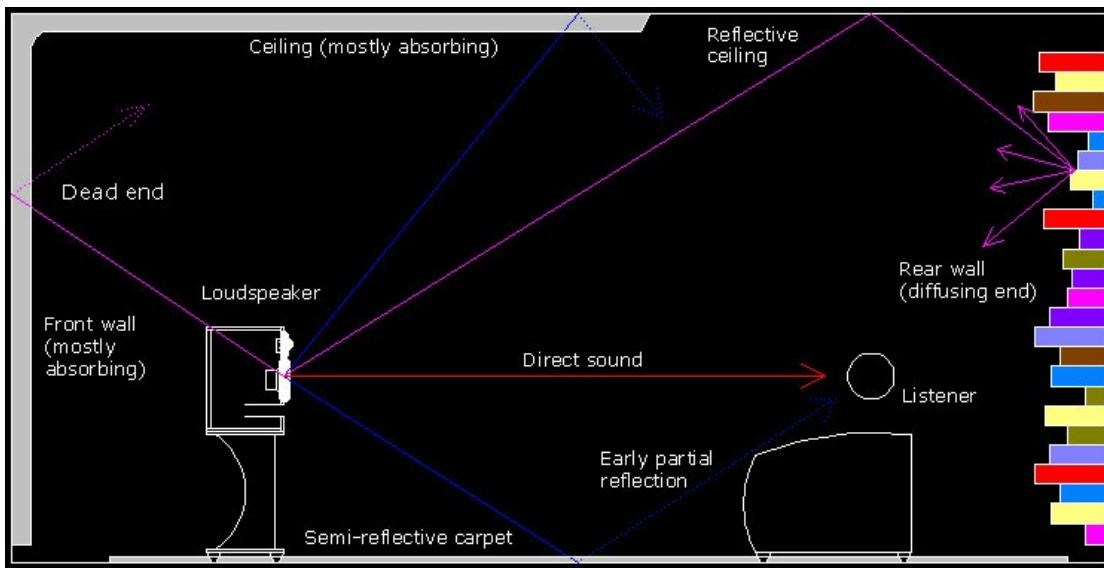


Σχήμα 7.39

Δοθέντος ότι το ύψος ενός οικιακού δωματίου είναι τυποποιημένο κάπου μεταξύ 2,8 και 3,2 μέτρων, οι υπόλοιπες δύο διαστάσεις του πρέπει να έχουν μήκος τέτοιο, ώστε ο λόγος τους να εντοπίζει κάποιο σημείο μέσα στην κλειστή καμπύλη του γραφήματος. Αν ένα δωμάτιο έχει προβληματικό λόγο διαστάσεων, δεν υπάρχει τρόπος διόρθωσης των ηχητικών του προβλημάτων, παρά μόνον με εξειδικευμένες επεμβάσεις, ανεξαρτήτως της ποιότητας ήχου και του κόστους των ηχητικών συσκευών. Έτσι, για παράδειγμα, αν το ύψος του δωματίου σας είναι 3,1m και το πλάτος του είναι 1,4 φορές το ύψος, τότε το βάθος του πρέπει να είναι 1,7 – 2,4 φορές το ύψος, κ.ο.κ.

Ας δούμε τώρα με απλοποιημένο τρόπο, τι συμβαίνει μέσα σε ένα δωμάτιο. Η επόμενη εικόνα αναπαριστά την πλάγια τομή ενός τυπικού δωματίου και τον τρόπο που ο ήχος φθάνει στον ακροατή ως απ' ευθείας, αλλά και ως ήχος εξ ανάκλασης. Τα μπλε βέλη αναπαριστούν τις λεγόμενες πρώιμες ανακλάσεις, προερχόμενες πρώτα από το δάπεδο και έπειτα από την οροφή, ενώ τα ματζέντα τις μεταγενέστερες ανακλάσεις, οι οποίες διανύουν μακρύτερη απόσταση. Όσο περισσότερες ανακλάσεις έχει το δωμάτιό σας, τόσο πιο «ζωντανό» είναι. Βεβαίως, αυτή η απλοποιημένη εικόνα δεν αναπαριστά τις τμηματικές ανακλάσεις και απορροφήσεις που πραγματοποιούν αντικείμενα που βρίσκονται μέσα στο δωμάτιο, όπως κάποια έπιπλα, κάποιο χαλί στρωμένο στο δάπεδο, καθώς και κάποια κάδρα στους τοίχους.

Το ηχητικό σύστημα είναι τοποθετημένο μέσα στο δωμάτιο κατά τρόπον, ώστε τα ηχεία να είναι απλωμένα κατά μήκος της μιας μικρής πλευράς, δηλαδή κατά πλάτος, ενώ η θέση του ακροατή είναι τοποθετημένη απέναντι από τα ηχεία, κοντά στην άλλη μικρή πλευρά, ώστε ο άξονας ακρόασης να συμπίπτει με το βάθος του δωματίου.



Σχήμα 7.40

Ας αναφέρουμε σε αυτό το σημείο τις ελάχιστες απαιτήσεις σε επίπεδο αρχιτεκτονικής του κατάλληλου χώρου ακρόασης σύμφωνα με την οδηγία ITU-R BS 775. Φυσικά σε επίπεδο οικιακής εγκατάστασης είναι δύσκολο να εφαρμοσθεί κατά 100%, αλλά μπορεί τουλάχιστον ένας κοινός χρήστης να καταλάβει ποιος διαθέσιμος χώρος είναι λιγότερο ακατάλληλος. Σύμφωνα με την οδηγία ITU-R BS 775, για ένα ιδανικό χώρο ακρόασης, οι παράμετροι διαμορφώνονται ως εξής:

- Χώρος: >40m<sup>2</sup> (>25m<sup>2</sup> σε οικιακή εφαρμογή)
- Όγκος δωματίου: >300m<sup>3</sup>
- Χρόνος αντήχησης: 0.2-0.4s (μεταξύ 200Hz και 2.5kHz)
- Πρώιμες ανακλάσεις: Περί τα -10dB σε σχέση με τον απευθείας ήχο
- Αντήχηση: Μη παρουσία πολλαπλής ηχούς (flutter echo) και χρωματισμών
- Θόρυβος φόντου (Background Noise): Περί τα 10dB

### 7.11.6 Τοποθέτηση των ηχείων ενός στερεοφωνικού συστήματος στο χώρο

Αν ο χώρος είναι σωστός “στα χαρτιά”, έχει δηλαδή σωστές αναλογίες και τον αποδεκτό χρόνο αντήχησης, είναι καιρός να ασχοληθείτε με τα ίδια τα ηχεία. Τα φαινόμενα από εδώ και πέρα σχετίζονται με αυτά και την θέση τους στο χώρο. Η γεωμετρία ενός δικαναλικού συστήματος είναι δεδομένη και δεν (πρέπει να) αλλάζει: Ηχεία και ακροατής δημιουργούν ένα ισόπλευρο τρίγωνο (με μέγιστο μήκος πλευρών τα 4m). Αλλά πού θα πρέπει να τοποθετηθούν τα ηχεία; Η θέση των ηχείων σε σχέση με τα όρια του χώρου έχει να κάνει με δύο σημαντικές παραμέτρους: Το πώς το ηχείο συζευγνύεται με τους ιδιο-ρυθμούς του χώρου αυτού και το πώς ο συγκεκριμένος χώρος φορτίζει το ηχείο.

Η σύζευξη ηχείου-χώρου σχετίζεται με το πώς το ηχείο διεγείρει τους ιδιο-ρυθμούς: Τα κλασικά ηλεκτροδυναμικά ηχεία είναι πηγές πίεσης και η τέλεια σύζευξή τους απαιτεί να τοποθετηθούν σε περιοχές όπου τα στάσιμα κύματα αποκτούν τις μέγιστες τιμές πίεσης τους, κάτι που συμβαίνει πάντα κοντά σε τοίχους. Αντιθέτως, τα planar (μαγνητοστατικά και ηλεκτροστατικά) ηχεία είναι πηγές ταχύτητας και για να συζευχθούν σωστά με τους ιδιορυθμούς θα πρέπει να τοποθετηθούν σε περιοχές μεγάλης ταχύτητας (που αντιστοιχούν σε περιοχές μικρής πίεσης στον χώρο, δηλαδή σε δεσμό του



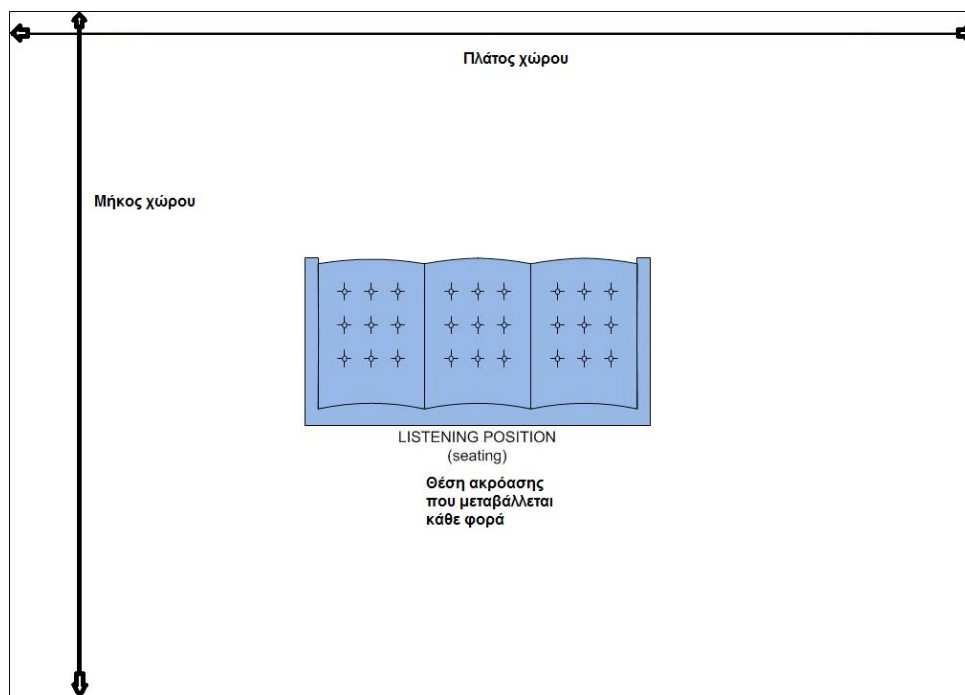
στάσιμου κύματος), οι οποίες βρίσκονται μακριά από τοίχους.

Τί θα συμβεί αν ένα ηχείο τοποθετηθεί σε μια θέση διαφορετική από την ιδανική; Η ανάλυση που έχει γίνει για τα στάσιμα κύματα δεν μας είναι τόσο χρήσιμη (επειδή αυτή προβλέπει πλήρη διέγερση) και το αποτέλεσμα θα είναι απρόβλεπτο, αλλά όχι κατ' ανάγκην κακό!). Αυτή η προσέγγιση μάλιστα, δηλαδή η πειραματική μετακίνηση των ηχείων σε διάφορα σημεία του χώρου είναι και η πιο απλή λύση στην περίπτωση που οι αναλογίες του τελευταίου προοιωνίζονται προβλήματα από την σύμπτωση ιδιο-ρυθμών, σε μια προσπάθεια να μην γίνεται η διέγερσή τους.

Όσον αφορά στον τρόπο με τον οποίο ο χώρος φορτίζει το ηχείο, αυτός έχει να κάνει με την αντίσταση ακτινοβολίας που "βλέπει" ένα μεγάφωνο από τα ηχητικά κύματα που ανακλώνται και επιστρέφουν πίσω σε αυτό. Εργασίες γύρω από το θέμα έχουν επιδείξει και θεωρητικά αυτό που γνωρίζουμε από την πράξη: Η θέση ενός ηχείου σε σχέση με τα τρία επίπεδα που καθορίζουν μια στερεά γωνία του χώρου επηρεάζει την απόκρισή του στις χαμηλές συχνότητες. Η απόσταση από τον πίσω και τον πλάγιο τοίχο καθώς επίσης και από το δάπεδο (αν το ηχείο είναι βάσης) μπορούν να βρεθούν εμπειρικά.

Η τοποθέτηση ενός ηχείου επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο ενεργοποιούνται τα στάσιμα κύματα σε έναν χώρο. Αν θέλουμε την μέγιστη διέγερση θα πρέπει να τοποθετήσουμε τα παντοκατευθυντικά (στις χαμηλές συχνότητες) ηχεία κοντά σε τοίχους και τα δίπολα σε περιοχές χαμηλής πίεσης, δηλαδή μακριά από τοίχους.

Υπάρχουν διάφοροι εμπειρικοί κανόνες τοποθέτησης των ηχείων ενός στερεοφωνικού συστήματος σε ένα χώρο ακρόασης εκ των οποίων θα παρουσιάσουμε τους οκτώ συνηθέστερους εδώ βάσει των διαστάσεων του δωματίου και τη θέση ακρόασης (σχήμα 7.41).



Σχήμα 7.41

### 1) Η Μέθοδος Αναλογίας 317

Διαιρέστε το μήκος του δωματίου με το 3. Τοποθετήστε το ηχείο στο  $1/3$  του μήκους του δωματίου. Η απόσταση μεταξύ των ηχείων είναι  $0,7$  επί τα  $2/3$  του μήκους του δωματίου.

Τα ηχεία θα πρέπει να είναι στραμμένα ελαφρώς προς τα μέσα αλλά και να μην είναι στραμμένα δεν υπάρχει θέμα. Η θέση ακρόασης θα πρέπει να είναι μακριά από τον τοίχο που βρίσκεται πίσω από

τον ακροατή.

Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για δωμάτια που είναι μεγαλύτερα και με καλύτερες αναλογίες διαστάσεων (π.χ. 1: 1,25: 1,6 ή 1: 1,6: 2,5).

### 2) Η μέθοδος Αναλογίας 331

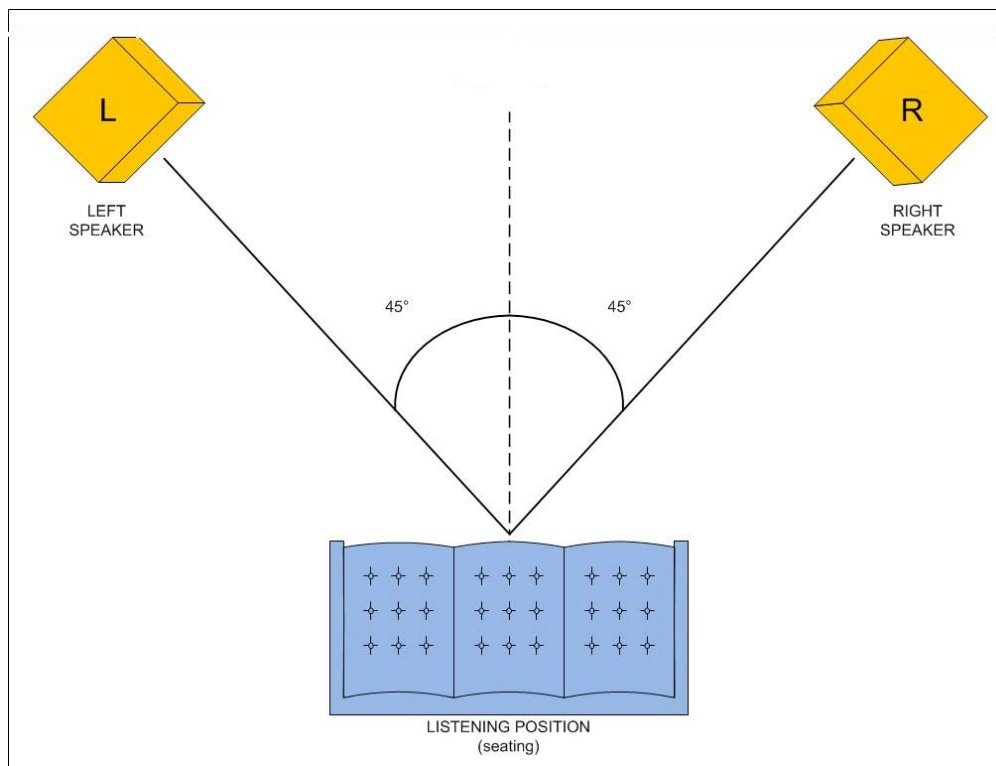
Η ουσία της είναι παρόμοια με τη μέθοδο 317, η μόνη διαφορά είναι ότι οι αποστάσεις μεταξύ των μεγαφώνων είναι στενότερες.

Διαιρέστε το μήκος και το πλάτος του δωματίου με το 3. Τα μεγάφωνα θα είναι τοποθετημένα στα σημεία διασταύρωσης του  $\frac{1}{3}$  του μήκους και του  $\frac{1}{3}$  του πλάτους του δωματίου.

Τα ηχεία θα πρέπει να είναι στραμμένα ελαφρώς προς τα μέσα αλλά και να μην είναι στραμμένα δεν υπάρχει θέμα. Η θέση ακρόασης θα πρέπει να είναι μακριά από τον τοίχο που βρίσκεται πίσω από τον ακροατή.

### 3) Η μέθοδος οπής βίδας (Screw Hole)

Τοποθετήστε τα ηχεία σε ένα σημείο μεταξύ του  $\frac{1}{3}$  και  $\frac{1}{2}$  του μήκους του δωματίου. Τα μεγάφωνα πρέπει να τοποθετούνται πολύ κοντά στα πλευρικά τοιχώματα (εκτός εάν το δωμάτιο είναι πολύ μεγάλο). Στρέψτε τα ηχεία προς τα μέσα κατά περισσότερο από 45 μοίρες (σχήμα 7.42). Η θέση ακρόασης είναι μεταξύ 0.5m και 1m πίσω από το σημείο τομής της των νοητών ευθειών από τα μεγάφωνα:



Σχήμα 7.42

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να μειώσει το πρόβλημα των έντονων υψηλών συχνοτήτων και της ανεπάρκειας χαμηλών συχνοτήτων. Μπορεί να δώσει άριστα αποτελέσματα σε ένα δύσκολο περιβάλλον ακρόασης.

### 4) Η Μέθοδος «Ισόπλευρο Τρίγωνο»:

Η πρώτη προϋπόθεση είναι ότι τα μεγάφωνα πρέπει να τοποθετούνται μακριά από τον τοίχο που

βρίσκεται πίσω τους (τουλάχιστον 1m μακριά) και μακριά από τα πλευρικά τοιχώματα (τουλάχιστον 0.5m). Η δεύτερη προϋπόθεση είναι ότι τα δύο ηχεία και η θέση ακρόασης αποτελούν τα σημεία ενός ισοσκελούς τριγώνου. Η τρίτη προϋπόθεση είναι ότι τα μεγάφωνα πρέπει να είναι στραμμένα προς τα μέσα κατά 45 μοίρες ή περισσότερο. Η τέταρτη προϋπόθεση είναι ότι το μέγεθος αυτού του ισόπλευρου τριγώνου έχει οριστεί σύμφωνα με το δωμάτιο και το σύστημα. Σε ένα μικρό δωμάτιο, ή με έναν ενισχυτή χαμηλής ισχύος, το τρίγωνο πρέπει να είναι μικρότερο. Σε ένα μεγάλο δωμάτιο, ή με ένα ενισχυτή υψηλής ισχύος, το τρίγωνο πρέπει να είναι μεγαλύτερο. Αυτό είναι κοινώς γνωστό ως εγγύς πεδίο ακρόασης (near field). Όφελος είναι η μείωση της επίδρασης των ανακλάσεων από τους τοίχους. Αυτή είναι επίσης η προτιμώμενη μέθοδος του σχεδιαστή των ηχείων της εταιρίας Venture.

#### **5) Η μέθοδος «Μακρά Τείχη»:**

Τα ηχεία τοποθετούνται κατά μήκος του μακρύτερου τοίχου του δωματίου που είναι το αντίθετο της συνηθισμένης περίπτωσης. Κατά τα άλλα, η μέθοδος ακολουθεί τη μέθοδο ισόπλευρου τριγώνου. Η θέση ακρόασης θα πρέπει να είναι μακριά από τον πίσω τοίχο κατά ελάχιστη απόσταση 1m.

Με τη μέθοδο αυτή, ήχοι της μεσαίας περιοχής συχνότητων θα ενισχυθούν. Εάν είναι ανεπιτυχείς οι μέθοδοι 1-4, τότε μπορείτε να πειραματιστείτε με αυτήν.

#### **6) Η μέθοδος Ρόμβος:**

Η χρήση αυτής της μεθόδου περιορίζεται μόνο σε τετράγωνα δωμάτια. Δείτε το τετράγωνο χώρο ως ένα ρόμβο. Τα ηχεία τοποθετούνται κατά μήκος των τοίχων που σχηματίζουν τις δύο πλευρές του ρόμβου. Οι κορυφές του ρόμβου - πίσω από τα μεγάφωνα και πίσω από τη θέση ακρόασης, θα πρέπει να καλύπτονται με διαχύτες. Τα ηχεία δεν πρέπει να τοποθετηθούν πολύ κοντά στους τοίχους.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ειδικά για να μειώσει στάσιμα κύματα στην περιοχή των χαμηλών συχνότητων. Εάν δεν θέλετε να χρησιμοποιήσετε αυτήν τη μέθοδο σε ένα τετράγωνο δωμάτιο, μπορείτε να μετακινήσετε τα έπιπλα στο δωμάτιο ώστε να μειωθούν τα στάσιμα κύματα.

#### **7) Η μέθοδος τοποθέτησης κοντά στον τοίχο:**

Αυτή είναι η παλαιότερη μέθοδος. Τοποθετήστε τα ηχεία κοντά στον τοίχο πίσω τους σε απόσταση 20, 30 ή 50 εκατοστά. Μπορείτε να προσαρμόσετε ανάλογα με τις προτιμήσεις σας. Συνήθως τα μεγάφωνα δεν χρειάζεται να είναι στραμμένα προς τα μέσα (προς τη θέση ακρόασης). Χρησιμοποιήστε αυτή τη μέθοδο όταν οι πρίμες είναι σε υψηλά επίπεδα ενώ τα μεσαία και μπάσα είναι χαμηλά σε ένταση.

#### **8) Η μέθοδος Βιβλιοθήκης:**

Οι 7 προηγούμενες μέθοδοι είναι για ηχεία-στήλες και για ηχεία σε βάση. Αυτή η 8η μέθοδος είναι για ηχεία που τοποθετούνται σε ράφι βιβλιοθήκης. Συνήθως, τα ηχεία αυτά θα πρέπει να τοποθετούνται πάνω από ένα ντουλάπι ή μέσα σε ένα ράφι.

Εάν το μεγάφωνο είναι πάνω από ένα ντουλάπι, χρησιμοποιήστε ένα μάρμαρο ή μια στιβαρή πλάκα ως βάση και ειδικά στηρίγματα απορρόφησης κραδασμών μεταξύ των ηχείων και της πλάκας. Τα στηρίγματα αυτά έχουν κωνικό σχήμα για την ελαχιστοποίηση της επιφάνειας επαφής το ηχείου με το δάπεδο. Επιπλέον, τοποθετήστε μια σακούλα μεταλλικές χάντρες ή ένα βαρύ κομμάτι μέταλλο πάνω από το ηχείο για να αποσβέσει περαιτέρω τη δόνηση.

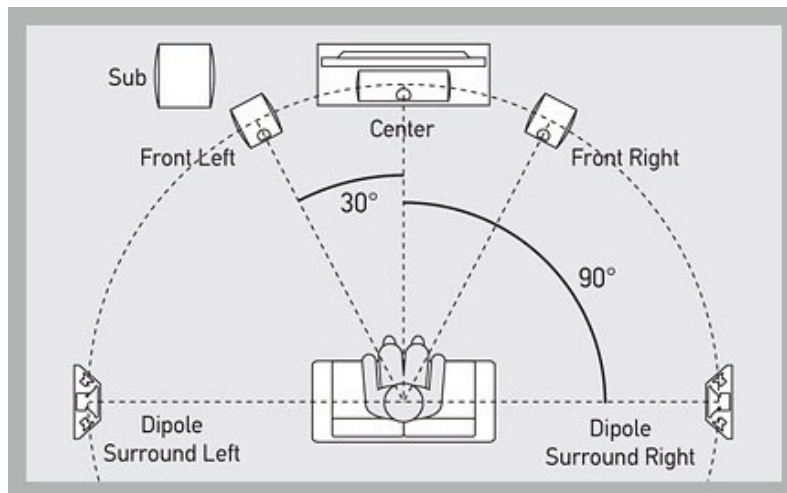
Αν το μεγάφωνο είναι τοποθετημένο σε ένα ράφι βιβλιοθήκης, τότε φροντίστε οι θέσεις πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά του να είναι γεμάτες με βιβλία. Βεβαιωθείτε ότι τα βιβλία είναι σφικτά συσκευασμένα, δεν πρέπει να υπάρχει είναι οποιαδήποτε χαλαρότητα στο χώρο. Τα ειδικά στηρίγματα απορρόφησης κραδασμών δεν είναι απαραίτητα.

(Πηγή: <http://hifi-unlimited.blogspot.gr/2012/05/eight-methods-of-loudspeaker.html>)

### 7.11.7 Τοποθέτηση ηχείων οικιακού πολυκαναλικού συστήματος κινηματογράφου στο χώρο

Σημαντική σε αυτή την περίπτωση είναι η εξασφάλιση ίδιας στάθμης για όλα τα ηχεία στο χώρο. Τα καλύτερα περιφερειακά ηχεία είναι τα δίπολα ηχεία. Ο ρόλος τους είναι να παρέχουν μια ευρεία διασπορά του ήχου προς όλες τις κατευθύνσεις, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ένα διάχυτο πεδίο για τα ηχητικά εφέ των ταινιών και την αντήχηση των πολυκάναλων μουσικών ηχογραφήσεων που κυκλώνουν τον ακροατή. Τα δίπολα είναι η πρόταση και της THX για τα περιφερειακά κανάλια, ώστε να προσομοιώνεται ο ήχος των πολλαπλών πλευρικών ηχείων των κινηματογραφικών αιθουσών.

Η καλύτερη τοποθέτηση για τα δίπολα είναι σε ύψος 70cm ή και περισσότερο, πάνω από τα αυτιά του καθιστού ακροατή, στους δύο πλάγιους τοίχους αριστερά και δεξιά από τη θέση ακρόασης. Θα πρέπει επίσης να είναι τοποθετημένα λίγο πιο πίσω από τον ακροατή, ώστε να σχηματίζουν γωνία από 90ο έως 110ο σε σχέση με την ευθεία που σχηματίζει ο ακροατής και το κεντρικό ηχείο.



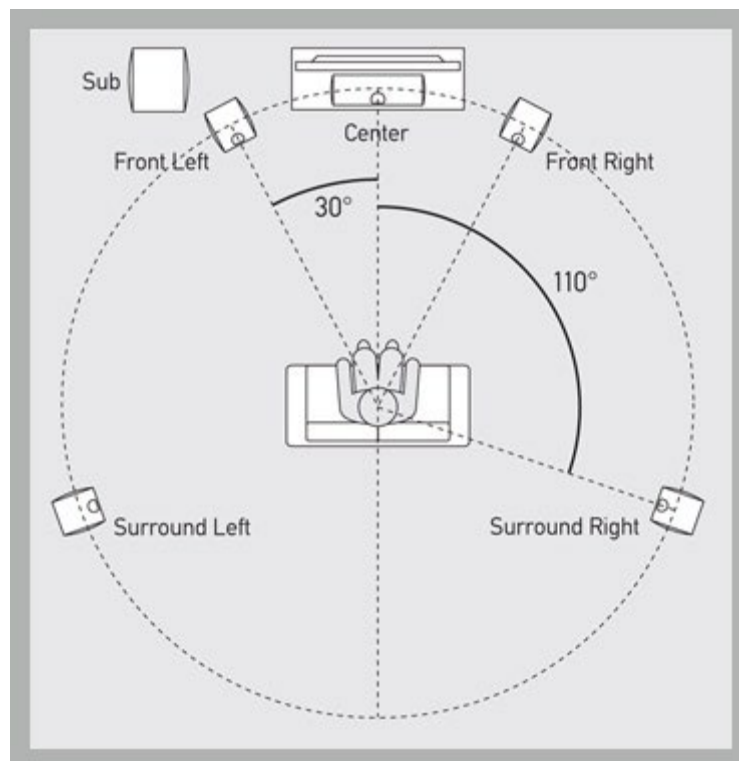
Σχήμα 7.43

#### Τοποθέτηση των Κύριων (**main ή Front**) ηχείων:

Όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση των ηχείων από τους τοίχους, τόσο πιο καθαρή είναι η απόκρισή τους

- Τοποθετείστε τα ηχεία λίγο πιο μπροστά από την TV και όχι σε ευθεία με αυτήν, ώστε η απόσταση τους από τη θέση ακρόασης να είναι ίδια με του κεντρικού ηχείου. Έτσι περιορίζονται και οι ανακλάσεις από την οθόνη
- Τα ηχεία πρέπει να σχηματίζουν με τη θέση ακρόασης ένα ισοσκελές τρίγωνο. Τα ηχεία τοποθετούνται μπροστά μας, όπως ισχύει στην περίπτωση μιας ζωντανής ορχήστρας
- Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ των ηχείων τόσο ευρύτερη είναι η στερεοφωνική εικόνα. **Προσοχή:** Απομακρύνουμε τα ηχεία μεταξύ τους, μέχρι να δημιουργηθεί ακουστική τρύπα ανάμεσά τους. Τα πλησιάζουμε ξανά τόσο, ώστε η μουσική να μην ακούγεται ξεχωριστά από το κάθε ηχείο, αλλά ανάμεσα τους
- Τα tweeter πρέπει να βρίσκονται στο ύψος των αυτιών μας στην θέση ακρόασης και να μην παρεμβαίνουν εμπόδια στην ευθεία διαδρομή από τα ηχεία μέχρι τα αυτιά μας

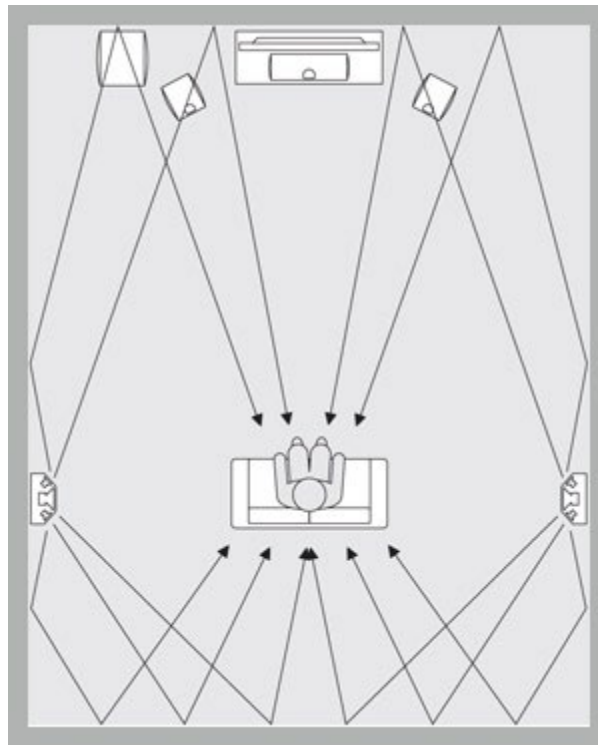
- Η κλίση των ηχείων προς τα μέσα δημιουργεί καλή εστίαση, αλλά περιορίζει τις διαστάσεις της μουσικής εικόνας. Αυτό επηρεάζει κάποιους τύπους ηχείων περισσότερο από κάποιους άλλους. Η δοκιμή είναι η καλύτερη μέθοδος
- Όλα τα ηχεία χρειάζονται στρώσιμο για κάποιο χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιήστε τα ηχεία σας τουλάχιστον 100 ώρες σε μέση προς χαμηλή στάθμη, για να μπορέσουν αποδώσουν σωστά.



Σχήμα 7.44

#### Τοποθέτηση των Περιφερειακών (**Surround**) ηχείων:

- Οι ανακλάσεις από τα ηχεία Surround είναι χρήσιμες, αντίθετα με τις ανακλάσεις από τα Κύρια ηχεία, που είναι καταστροφικές
- Τα tweeter δεν πρέπει να σημαδεύουν τα αυτιά σας
- Ο ήχος πρέπει να κατευθύνεται προς κάποιο τοίχο, και να έρχεται στα αυτιά μας μετά από ανάκλαση
- Το ύψος είναι καλό να είναι τουλάχιστον 50cm ψηλότερα από τα αυτιά του καθήμενου ακροατή



Σχήμα 7.45

Τοποθέτηση του Υπογούφερ:

Η επιτυχημένη τοποθέτηση και ρύθμιση του υπογούφερ είναι ζήτημα πολλαπλών δοκιμών.

- Ενα τοποθετημένο και καλορυθμισμένο υπογούφερ παράγει ήχο χωρίς να εντοπίζεται σαν ξεχωριστό ηχείο
- Τοποθετήστε το υπογούφερ κοντά στην θέση ακρόασης. Παίξτε ένα κομμάτι jazz με ακουστικό μπάσο και πολλές διαδοχικές νότες «walking bass». Περπατείστε στα γόνατα ή μπουσουλώντας (προσέξτε μην σας δουν οι γείτονες...) και βρείτε σε ποιο σημείο του δωματίου το μπάσο ακούγεται καθαρότερα. Τώρα αλλάξτε θέση, τοποθετείστε εκεί το υπογούφερ και καθίστε στην θέση σας ακρόασης
- Αποφύγετε την τοποθέτηση σε ίδια απόσταση από δύο τοίχους. Π.χ. αν το πλάτος του δωματίου είναι 8m, μην το τοποθετήσετε στη μέση της απόστασης (4m)
- Μην το τοποθετείτε σε γωνία και σε ίδια απόσταση από τους δύο τοίχους της γωνίας
- Τοποθετείστε το όσο πιο κοντά στην θέση ακρόασης, δίπλα στον καναπέ αν είναι δυνατόν. Έτσι θα έχετε περισσότερο απευθείας ήχο από το υπογούφερ παρά ανακλάσεις του δωματίου
- Η χρήση δύο υπογούφερ, αριστερά και δεξιά της θέσης ακρόασης αποτελεί την ιδανική αλλά πιο ακριβή λύση
- Η ιδανική τοποθέτηση ίσως δεν είναι πρακτική για τον χώρο σας. Σκεφθείτε την διακόσμηση του δωματίου και πώς δεν θα βρίσκονται τα ηχεία στον δρόμο σας
- Πειραματιστείτε με διαφορετικές θέσεις και με βάση τις ανωτέρω υποδείξεις. Θα ανταμειφθείτε με πολύ καλύτερο ήχο χωρίς μεγαλύτερο κόστος

## 7.12 Το 9ο στάδιο: απόκριση του ανθρώπινου αυτιού και αντίληψη

Το ανθρώπινο αυτί έχει κατά μέσο όρο μελετηθεί σε βάθος και έχει μία ιδιαίτερη απόκριση συχνοτήτων που δεν εκτείνεται κατ' ανάγκη από τα 20 έως τα 20000Hz. Αντίθετα, πολλοί ενήλικες ακούν ήχους έως τα 16kHz ενώ αντιλαμβάνομαστε υπόηχους και με άλλα όργανα του σώματός μας. Σε αυτό το φαινόμενο βασίζουν τη λειτουργία τους συσκευές με την ονομασία «bass-shakers» που τοποθετούνται στα καθίσματα σύγχρονων κινηματογράφων και δημιουργούν δονήσεις ανάλογα με το σήμα του καναλιού χαμηλών συχνοτήτων LFE.

Επίσης, το αυτί μας είναι πιο ευαίσθητο σε συχνότητες κοντά στο μέσο του ακουστικού φάσματος και σε παραμορφώσεις ενδοδιαμόρφωσης παρά σε αρμονικές παραμορφώσεις. Επομένως, ένα ηχητικό σήμα που εμφανίζει σε μετρήσεις υψηλά ποσοστά THD παραμόρφωσης μπορεί να ακούγεται αποδεκτό ή ακόμη και ευχάριστο από τους ακροατές. Αντίθετα, ακόμη και μικρά ποσοστά TIM παραμόρφωσης γίνονται αμέσως αντιληπτά και ενοχλητικά για τον ακροατή καθώς οι παραγόμενες ανεπιθύμητες συχνότητες δε συνδέονται αρμονικά με τις θεμελιώδεις συχνότητες του αρχικού ηχητικού σήματος.

Η ευαισθησία του αυτιού μεταβάλλεται με τη συχνότητα του ήχου που λαμβάνει. Σε διαφορετικές συχνότητες δίνεται διαφορετικός συντελεστής βάρους (weighting). Επίσης, το σύστημα του αυτιού μας έχει μια ιδιαίτερη συνάρτηση μεταφοράς που καλείται HRTF (head related transfer function) όπως είδαμε στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Το σύστημα των 2 αυτιών μας δίνει δε τη δυνατότητα να αντιληφθούμε διαφορές φάσης και χρόνου. Μπορούμε κατά αυτό τον τρόπο να τοποθετήσουμε κατάλληλα την πηγή του παραγόμενου ήχου στον τρισδιάστατο περιβάλλοντα χώρο. Το γεγονός αυτό προσέλκυσε εξ αρχής τους σχεδιαστές πολυκαναλικών ηχοσυστημάτων που σήμερα βρίσκουν τεράστια εφαρμογή στον περιφερειακό ήχο του κινηματογράφου.

Στους παράγοντες της ακοής έρχονται να προστεθούν τα ψυχοακουστικά φαινόμενα όπως η ηχητική επικάλυψη. Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύσαμε πως οι αλγόριθμοι συμπίεσης ηχητικών αρχείων εκμεταλλεύονται αυτά τα φαινόμενα. Η φασματική και χρονική επικάλυψη ήχων και θορύβων είναι μία σημαντική διαδικασία. Ο εγκέφαλος έχει μάλιστα τη δυνατότητα να απορρίψει κάποιο ηχητικό σήμα που δε θεωρεί σημαντικό. Για παράδειγμα, όταν κάτι μας αποσπά την προσοχή, μπορεί να μην αντιληφθούμε ότι κάποιος μας ομιλεί ακόμη και αν εκείνος μιλάει δυνατά και καθαρά. Επομένως, μερικές φορές μπορούμε να κρύψουμε θόρυβο υπό την παρουσία άλλων ήχων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο σχεδιασμός ενός εργασιακού περιβάλλοντος στο οποίο οι υπάλληλοι ήθελαν να συγκεντρώνονται όσο περισσότερο γίνεται στην εργασία τους. Η πρώτη σκέψη ήταν να γίνει ηχομόνωση από εξωτερικούς θορύβους για να υπάρχει πλήρης ησυχία αλλά αυτό δεν βοήθησε τόσο. Κατόπιν, τοποθετήθηκε ειδικό ηχοσύστημα το οποίο αναπαρήγαγε σε μία φυσιολογική ένταση αναμειγμένους ήχους και θορύβους αστικού και εργασιακού περιβάλλοντος χωρίς όμως να διακρίνονται καθαρά λέξεις ή έντονοι ήχοι. Αυτό το μείγμα ασαφούς αλλά γνώριμου θορύβου βοήθησε τους εργαζόμενους να συγκεντρωθούν στην εργασία τους περισσότερο από καθετί.

## 7.13 Συμπεράσματα και συμβουλές

Έχει αποδειχθεί πως δεν είναι ίδια η ακοή για κάθε άνθρωπο αλλά μεταβάλλεται με την ηλικία, το γένος και το θόρυβο του περιβάλλοντος στον οποίο υποβάλλουμε καθημερινά τα αυτιά μας. Επομένως, πρέπει να λαμβάνουμε υπόψιν μας αυτά τα γεγονότα κάθε φορά που διαβάζουμε μία κριτική για ηχητικό εξοπλισμό ή ηχητικό υλικό. Δεν υπάρχει το τέλειο αυτί και μάλιστα υπάρχει διαφορά στην ακουστική αντίληψη ενός εκπαιδευμένου ακροατή κι ενός ακροατή που δεν έχει ασχοληθεί ιδιαίτερα

με παραγωγή ήχου ή/και μουσική. Η υποκειμενικότητα της ακοής και τη αντίληψής μας δημιουργεί ενδιαφέρουσες διαφορές αλλά και αρκετή μυθολογία στο χώρο της αγοράς ηχητικού εξοπλισμού. Η επιστήμη του marketing ( της προώθησης) παίζει σημαντικό ρόλο σε πολλές κριτικές και δοκιμές ηχητικού εξοπλισμού ενώ λίγη βαρύτητα δίνεται σε αντικειμενικά μετρούμενα μεγέθη που σχετίζονται με την πιστή αναπαραγωγή ήχου. Κρίνοντας από την ανάλυσή μας στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, είναι βέβαια πως ακόμη και η αντίληψη και η ψυχολογία καθώς και άλλα ερεθίσματα του ακροατή επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ακουστική του εμπειρία. Το φαινόμενο placebo (εικονική επίδραση) έχει παρατηρηθεί σε πολλές περιπτώσεις όπου ο ακροατής πιστεύει πως ακούει διαφορές μεταξύ δύο ηχητικών συστημάτων ενώ δεν υφίστανται. Αυτό συμβαίνει λόγω άλλων παραγόντων, για παράδειγμα επειδή 2 συστήματα έχουν λίγο διαφορετική εμφάνιση ή επειδή ο καταναλωτής έχει πληρώσει μία λίγο μεγαλύτερη τιμή. Τα διαφορετικά ερεθίσματα που λαμβάνει παράλληλα με το ηχητικό σήμα από το σύστημα, δημιουργούν μία διαφορετική προσδοκία και αντίληψη για τον ακροατή.

Ένας καταναλωτής δε μπορεί φυσικά να κάνει δικές του μετρήσεις σε εργαστήριο πριν αγοράσει μία συσκευή αναπαραγωγής ήχου. Μπορεί εντούτοις να αναζητήσει στο διαδίκτυο τα τεχνικά στοιχεία και το εγχειρίδιο οδηγιών της εν λόγω συσκευής. Ο κατασκευαστής μπορεί να υπερβάλλει σε αυτά που αναφέρει επάνω στη συσκευασία και το φυλλάδιο προώθησης της συσκευής αλλά πρέπει να δώσει όσο πιο σαφή τεχνικά στοιχεία γίνεται («technical specifications») εντός του φυλλαδίου οδηγιών («manual» στα αγγλικά).

Τα μεγέθη στα οποία πρέπει να δώσει βάση ένας καταναλωτής είναι το εύρος της απόκρισης συχνότητων που αναφέρεται συχνά στις -3dB συχνότητες αποκοπής. Κατόπιν μπορεί να δει τις μετρήσεις της αρμονικής παραμόρφωσης (THD) και παραμόρφωσης ενδοδιαμόρφωσης (IM distortion) που δίνει ο κατασκευαστής (σχήμα 7.46). Συχνά, μια συσκευή ισχύος παρουσιάζει υψηλά ποσοστά παραμόρφωσης όταν αποδίδει τη μέγιστη ισχύ της παρότι κάτι τέτοιο δεν διαφημίζεται.

<b>AMPLIFIERS</b>	<b>KA-9100</b>
<b>POWER AMP SECTION</b>	
Min. RMS Power Output, watts per channel, at 8 ohms, 20Hz-20kHz	90 Watts
With Total Harmonic Distortion no more than	0.03%
IM Distortion (at rated power)	0.03%
Damping Factor	50
<b>PREAMP SECTION</b>	
Input Sens./Max. Input/Signal-To-Noise	
PHONO 1	5.0mV/250mV/89dB
PHONO 2	2.5mV/250mV/83dB
TUNER	150mV/ — /100dB
AUX	150mV/ — /100dB
TAPE	150mV/ — /100dB
Frequency Response: PHONO AUX/TAPE	RIAA curve ±0.2dB 7-50 kHz (+0, -1dB)
<b>GENERAL</b>	
Inputs and Outputs	2 PHONOS; TUNER; AUX; 2 Tape; 2 Spkrs; Phones; PRE OUT/ MAIN IN

Σχήμα 7.46



Το βασικότερο στοιχείο ενός ηχοσυστήματος, οικιακού ή επαγγελματικού είναι οι συσκευές που θα μετατρέψουν το ηλεκτρικό σήμα σε μηχανική ταλάντωση, τα ηχεία ή τα ακουστικά. Η αναβάθμιση των ηχείων ή των ακουστικών σε ένα ηχοσύστημα είναι ο πιο αποδοτικός τρόπος βελτίωσης της ακουστικής εμπειρίας. Όπως είδαμε από στατιστικές έρευνες, οι περισσότεροι καταναλωτές ακούν μουσική μέσω του ηλεκτρονικού τους υπολογιστή, φορητού ή επιτραπέζιου και του κινητού τους. Τα ενσωματωμένα ή περιφερειακά ηχεία των υπολογιστών και κινητών είναι ως επί το πλείστον σχεδιασμένα για χαμηλές στάθμες έντασης, μικρό μέγεθος και φορητότητα ή εύκολη τοποθέτηση. Η χρήση ακουστικών είναι για πολλούς η εναλλακτική λύση για καλύτερο ηχητικό αποτέλεσμα, με μειωμένους εξωτερικούς θορύβους. Σήμερα υπάρχουν πολλές επιλογές για καλά ηχεία και ακουστικά αλλά πολλοί καταναλωτές δελεάζονται περισσότερο από την τιμή, την εμφάνιση και τη σχεδίαση μερικών προϊόντων παρά από την απόδοσή τους. Οι περισσότεροι κατασκευαστές παραθέτουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών τους όπως το εύρος ζώνης, την ευαισθησία τους και τη μέγιστη ισχύ που μπορούν να διαχειριστούν. Βασικό στοιχείο αποτελεί τόσο για τα ηχεία όπως και τα ακουστικά η ονομαστική τους αντίσταση (impedance). Όσο χαμηλότερη αντίσταση διαθέτει ένα ηχείο ή ένα σετ ακουστικά, τόσο περισσότερο ρεύμα μπορεί να αντλήσει από τον ενισχυτή. Το πρόβλημα είναι πως δεν ανταποκρίνονται όλοι οι ενισχυτές καλά όταν καλούνται να αποδώσουν μεγάλα ρεύματα. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει λόγω θερμικών Joule απωλειών ή λόγω ανεπάρκειας του τροφοδοτικού τους και προκαλεί φαινόμενα παραμόρφωσης ή στιγμιαίας βύθισης της ισχύος. Αυτός είναι ένας λόγος για τον οποίο πολλοί κατασκευαστές ενισχυτών αναφέρουν ως ελάχιστη ονομαστική αντίσταση ηχείων τα 8Ω και τα 32Ω για τα ακουστικά. Συνήθως βέβαια ο καταναλωτής μπορεί να επιλέξει μεταξύ ηχείων ή ακουστικών ιδίων χαρακτηριστικών εκτός από τη διαφορετική σύνθετη ονομαστική αντίσταση. Αν βέβαια κρίνεται απαραίτητο, το επόμενο στάδιο αναβάθμισης του ηχοσυστήματος είναι η αλλαγή του ενισχυτή για έναν που διαθέτει μεγαλύτερα αποθέματα ισχύος και ικανότητες οδήγησης ηχείων.

Αν μας ενδιαφέρει η ένταση που θα παράγει το ηχοσύστημα, θα πρέπει να κοιτάξουμε τις μετρήσεις ευαισθησίας των μεγαφώνων του σε dB, σε απόσταση 1m από το ηχείο και ισχύ εισόδου 1W. Όσο μικρότερη η ευαισθησία των μεγαφώνων, τόσο χαμηλότερη στάθμη θα λάβουμε από το ηχοσύστημα για δεδομένη ισχύ του ενισχυτή, σε δεδομένο χώρο και απόσταση από τα ηχεία. Επομένως, τα watt ισχύος του ενισχυτή δεν είναι το νούμερο που πρέπει να μας ενδιαφέρει περισσότερο παρότι οι εταιρίες κάνουν κάθε προσπάθεια να προωθούν μόνο αυτό το νούμερο και ενδεχομένως να το «φουσκώνουν» λίγο. Η λύση για να διαπιστώσει ένας καταναλωτής κατά πόσο η ισχύς εξόδου είναι αυτή που διαφημίζεται είναι αρκετά απλή: Το τροφοδοτικό της συσκευής αναφέρει συχνά τη μέγιστη ισχύ που παρέχει στη συσκευή. Αν η μέγιστη ισχύς που καταναλώνει μία συσκευή από το δίκτυο παροχής ενέργειας είναι στα 100W δεν γίνεται να παράγει ισχύ εξόδου για παράδειγμα 300W ακόμη κι αν διαθέτει διακοπτικό ενισχυτή τάξης «D» (class-D). Το νούμερο αυτό είναι επομένως κάποιο διαφημιστικό τρικ και όχι πραγματικότητα, όπως είναι π.χ. τα Watt ισχύος κατά P.M.P.O. (Peak Music Power Output) που δεν έχουν γίνει αποδεκτά από κανένα πρότυπο παγκοσμίως. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να θυμόμαστε πως 10dB αύξηση στην ευαισθησία των μεγαφώνων, την αντιλαμβανόμαστε ως διπλασιασμό της έντασης του ήχου. Επομένως, η χρήση αποδοτικών και ευαίσθητων μεγαφώνων στα ηχεία μπορεί να μας δώσει μεγαλύτερη ένταση χωρίς ιδιαίτερα αύξηση της ισχύος του τελικού ενισχυτή ήχου. Αντίθετα, μεγάφωνα που δεν είναι ευαίσθητα (π.χ. 75dB@1W@1m) απαιτούν πολύ μεγαλύτερη ισχύ για να αποδώσουν το ίδιο επίπεδο ηχητικής πίεσης SPL (sound pressure level).

Για τα ακουστικά, ένας εξωτερικός μικρός ενισχυτής ακουστικών είναι συχνά μία λύση που βοηθά στην οδήγηση τους από τον υπολογιστή ή το κινητό. Συχνά, χρησιμοποιείται και ένας εξωτερικός ψηφιοαναλογικός μετατροπέας (DAC, digital to analog converter) ώστε να παρακαμφθεί η ενσωματωμένη κάρτα ήχου του υπολογιστή ή του κινητού.

Μετά τα ηχεία και τον ενισχυτή, οι ψηφιοαναλογικοί μετατροπείς ή «DACs» είναι επίσης πολύ σημαντικές συσκευές για τα σημερινά ηχοσυστήματα που διαθέτουν και ψηφιακές πηγές ήχου όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ένα DAC με υψηλή επεξεργαστική ισχύ που μπορεί να διαχειριστεί ψηφιακά αρχεία ήχου με μη-απωλεστική κωδικοποίηση όπως τα FLAC ή υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας και ρυθμού μετάδοσης μπορεί να βοηθήσει στη συνολική βελτίωση ενός υφιστάμενου ηχοσυστήματος. Όπως είδαμε, η διαφορά μεταξύ ενός αρχείου κωδικοποίησης κατά MP3 με ρυθμό μετάδοσης 320kbit ανά δευτερόλεπτο σε σχέση με το ίδιο αρχείο κωδικοποιημένο με αργότερο ρυθ-

μό 96kbit ανά δευτερόλεπτο είναι αισθητή από το μέσο ακροατή.

Τέλος, η σωστή μελέτη του χώρου ακρόασης και η σωστή τοποθέτηση των ηχείων εντός του χώρου είναι πολύ βασικές παράμετροι για την εξασφάλιση μιας καλής ακουστικής εμπειρίας και μέγιστης πιστότητας αναπαραγωγής. Η υψηλή στάθμη του ήχου δεν είναι το ζητούμενο εδώ αλλά πρέπει ο χώρος να μπορεί να υποστηρίξει φυσιολογικές εντάσεις χωρίς να δημιουργεί αρνητικά φαινόμενα ανακλάσεων και στάσιμων κυμάτων. Βοηθήματα όπως ηχο-απορροφητικά υλικά και κατασκευές μείωσης των στάσιμων κυμάτων αναφερόμενες και ως «μπασο-παγίδες» στο εμπόριο μπορούν να βελτιώσουν αισθητά την ακουστική ενός δεδομένου χώρου κατόπιν σχετικής μελέτης. Πολλοί μηχανικοί καλούνται με μελετήσουν και να βελτιώσουν την ακουστική χώρων και είναι μία επένδυση, ειδικά για επαγγελματικούς χώρους επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στο χώρο της μουσικής, της τέχνης και του θεάματος.

### **Βιβλιογραφία για το 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο:**

«NEW FACTORS IN PHONOGRAPH PREAMPLIFIER DESIGN» - TOMLINSON HOLMAN, Advent Corporation, Cambridge, MA. 02139

«ESTIMATING TIMING AND CHANNEL DISTORTION ACROSS RELATED SIGNALS» - Colin Raffel, Daniel P. W. Ellis, LabROSA, Dept. of Electrical Engineering, Columbia University

«Practical Recording Techniques: The Step- By- Step Approach to Professional Audio Recording» - Bruce Bartlett, Taylor & Francis, 20 Μαΐου 2013

«Complete Audio Mastering: Practical Techniques» - Gebre Waddell, McGraw Hill Professional, 22 Ιουλ 2013

«Audio Sampling: A Practical Guide» - Sam McGuire, Roy Pritts, Taylor & Francis, 2008

«Build Your Own Home Theater» - Robert Wolenik & John Adams, Elsevier, 25 Οκτωβρίου 2001

### **Πηγές στο διαδίκτυο**

<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-B110/93/737,2757/>

[www.eln.teilam.gr/sites/default/files/PCM.pdf](http://www.eln.teilam.gr/sites/default/files/PCM.pdf)

<http://fridge.gr/70163/stiles/beep/>

<http://fridge.gr/35589/stiles/beep/>

<http://www.soundonsound.com/sos/dec98/articles/20tips.568.htm>

<http://www.mediacollege.com/audio/microphones/how-to-use.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Sticky-shed\\_syndrome#Baking](http://en.wikipedia.org/wiki/Sticky-shed_syndrome#Baking)

<http://www.tomshardware.com/reviews/a-prima-donna-pc,544-4.html>

<http://fridge.gr/47788/stiles/beep/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Compact\\_Disc\\_manufacturing](http://en.wikipedia.org/wiki/Compact_Disc_manufacturing)

<http://en.wikipedia.org/?title=S/PDIF>

<http://www.audioholics.com/editorials/the-dumbing-down-of-audio>

<http://www.audioholics.com/editorials/why-we-measure-audio>

[http://www.ptecoustics.com/pte\\_demo1\\_011.htm](http://www.ptecoustics.com/pte_demo1_011.htm)

<http://www.trustmeimascientist.com/2013/08/05/modern-hi-fi-what-really-happened-to-the-high-end-stereo-market/>

<http://www.engadget.com/2013/07/04/high-fidelity-pure-audio/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Blu-ray\\_Disc](http://en.wikipedia.org/wiki/Blu-ray_Disc)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Impedance\\_bridging](http://en.wikipedia.org/wiki/Impedance_bridging)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Line\\_level](http://en.wikipedia.org/wiki/Line_level)

<http://www.kenrockwell.com/apple/iphone-5/audio-quality.htm>

<http://www.audioholics.com/audio-amplifier/amplifier-classes>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Operational\\_amplifier](http://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier)

[http://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp\\_1.html](http://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_1.html)

<http://www.wavelengthcalculator.com>

[en.wikipedia.org/wiki/Audio\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Audio_power)

[http://el.wikipedia.org/wiki/Ακουστική\\_χώρων](http://el.wikipedia.org/wiki/Ακουστική_χώρων)

<http://www.athensproaudio.gr/el/loudspeakers-gr.html>

<http://www.primacoustic.com/flexifuser-science.htm>

<http://www.avsite.gr/forum/threads/Ανατομία-Ακουστικής-Χώρων-remastered.79626/page-10>

[http://www.spandis.gr/docs/room\\_acoustics.html](http://www.spandis.gr/docs/room_acoustics.html)

<http://www.athensproaudio.gr/el/room-taming.html>

<http://www.crystalaudio.gr/FAQ/Room%20Acoustics.aspx>

<http://hifi-unlimited.blogspot.gr/2012/05/eight-methods-of-loudspeaker.html>

<http://audioart.audionet.com.tw/space/8.htm>

