



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

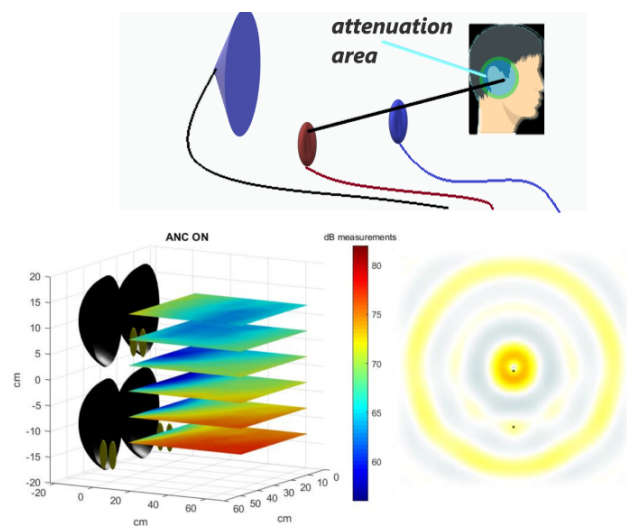
# Ενεργητικός έλεγχος χαμηλόσυχνου θορύβου με χρήση νοητού μικροφώνου

*Μελέτη και υλοποίηση*

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΕΡΣΠΑΜΕΡ ΑΛΜΠΕΡΤΟ**



**Επιβλέπων:** Ιωάννης Αντωνιάδης  
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2020





# Ενεργητικός έλεγχος χαμηλόσυχνου θορύβου με χρήση νοητού μικροφώνου

*Μελέτη και υλοποίηση*

---

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**ΕΡΣΠΑΜΕΡ ΑΛΜΠΕΡΤΟ**

**Επιβλέπων:** Ιωάννης Αντωνιάδης  
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26 Οκτωβρίου 2020.

*(Υπογραφή)*

*(Υπογραφή)*

*(Υπογραφή)*

.....  
Ιωάννης Αντωνιάδης  
Καθηγητής

.....  
Χρήστος Γιακόπουλος  
Ε.ΔΙ.Π

.....  
Δημήτριος Κουλοχέρης  
Καθηγητής





Copyright © - All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.  
Εροπάμερ Αλμπέρτο, 2020.

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.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

#### **ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτο-μερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, έσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοι-χείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Μεταπτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Μεταπτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

(Υπογραφή)

.....  
Εροπάμερ Αλμπέρτο

26 Οκτωβρίου 2020



## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται πρότυπο σύστημα ενεργητικής ακύρωσης θορύβου νοητού σημείου. Στα μέσα μεταφοράς, στους εργασιακούς χώρους και αλλού, υπάρχουν ποικίλες μορφές θορύβου παρασκηνίου προερχόμενες από διάφορες ηχητικές πηγές (με κυριότερες εξ αυτών τους κινητήρες). Αυτοί οι θόρυβοι πρέπει να ελαχιστοποιούνται σύμφωνα με τα παγκόσμια πρότυπα των οργανισμών υγείας που καθορίζουν τα μέγιστα επιτρεπτά όρια ηχητικής έντασης. Ο ενεργητικός τρόπος ακύρωσης θορύβου επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση συστοιχιών μικροφώνων-μεγάφωνων με στόχο αρχικά την αναγνώριση του θορύβου από το σύστημα και αφετέρου την εξάλειψη του με τη δημιουργία θορύβου ίδιας έντασης και αντίθετης φάσης από τα μεγάφωνα. Βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η επίτευξη της μείωσης σημειακά σε προκαθορισμένα σημεία του χώρου και πιο συγκεκριμένα γύρω από μια μικρή περιοχή όπου τοποθετούνται μικρόφωνα του συστήματος. Ωστόσο η ακυρωτική λειτουργία πρέπει να τελείται σε ζώνες γύρω από τα αυτιά του χρήστη όπου δεν μπορούν να βρίσκονται μικρόφωνα. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξ ερευνώνται και εφαρμόζονται μέθοδοι και τεχνικές ενεργητικής ακύρωσης θορύβου νοητού σημείου. Πιο συγκεκριμένα γίνεται θεωρητική τεκμηρίωση, προσομοιώσεις και υλοποίηση συστημάτων ενεργητικού ελέγχου θορύβου με εφαρμογή των τεχνικών εικονικού μικροφώνου "Virtual Microphone" και "Remote Microphone Technique" και τεχνικών εμπρόσθιας πρόβλεψης πεδίου τύπου "Extrapolation". Οι προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον της MATLAB μέσω του πακέτου προσομοίωσης k-Wave. Οι στόχοι του συστήματος τέθηκαν υπό τα πλαίσια του έργου TRANVIC "Συστήματα καταναμημένων ευφυών υλικών για ενεργητικό έλεγχο χαμηλόσυχνων ευρέως φάσματος θορύβων και κραδασμών σε μέσα μεταφοράς και ελαφρές κατασκευές". Τα αποτελέσματα της πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο δυναμικής και κατασκευών (ΕΔΚ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6 της εργασίας και δείχνουν υπερκάλυψη των στόχων που τέθηκαν.

### Λέξεις Κλειδιά

Ενεργητική ακύρωση θορύβου, μικρόφωνο, μεγάφωνο, ζώνες αποκοπής, τεχνική εικονικού μικροφώνου, τεχνική εμπρόσθιας πρόβλεψης, μέσα μεταφοράς.





## Abstract

---

In the current thesis an active noise control (ANC) system using virtual microphone techniques is studied. In many key areas of interest like transportation medium, work areas and other, it exists a big variety of background noises that need to be eliminated. In an ANC system the actual attenuation is succeeded by the means of the placement of a number of speakers and microphones. The goal of the ANC system is the local attenuation of the noise in the area of the ANC configuration by the generation of a waveform that has the same amplitude but opposite phase characteristics from the sound originated by the noise source. In its simplest configuration the system is able to succeed this attenuation in specified points in the 3D space and more specifically, in the points where the microphones of the system are located. The zone of attenuation around these points is usually small. The goal of the current study is the design, simulation and construction of an ANC system capable of attenuating the noise in bigger areas in the 3D space far away from the actual system's microphones, and more specifically where the head of the user in mind are located. Three virtual arrangements are studied, namely Virtual Microphone (VM) method, Remote Microphone Technique (RMT), and forward prediction method namely Extrapolation. Extended theoretical analysis of the simple LMS, FXLMS and the above virtual algorithms is presented, as well as the results of simulations for all the virtual algorithms conducted through MATLAB with the K-Wave software. Finally in chapter 6, the results of the experimental configuration that was built in the lab of Laboratory of Dynamics and Control at NTUA university of Athens in accordance with the goals of the European project "TRANVIC" are presented.

## Keywords

Active noise control (ANC), virtual microphone, speaker, 3D space, attenuation zone, Virtual Microphone (VM), Remote Microphone Technique (RMT), Forward Prediction Method, Extrapolation, LMS, FXLMS, MATLAB, K-Wave.



---

## Ευχαριστίες

---

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Χρήστο Γιακόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τον εν λόγω θέμα που τόσο πολύ άπτεται των ενδιαφερόντων μου καθώς σχετίζεται με τη φύση του ήχου. Τον ευχαριστώ επίσης για την πολύπλευρη βοήθεια, την παρότρυνση και το ενδιαφέρον του τόσο απέναντι σε εμένα όσο και στον συνεργάτη μου Δημήτρη Μυλωνά τον οποίο επίσης ευχαριστώ βαθύτατα τόσο για τις πολλαπλές φορές που με βοήθησε να “ξεγλυστρίσω” από άβυσσους σημεία στα πλαίσια της έρευνας μας ανοίγοντας νέες οπτικές, όσο και για την καλή του διάθεση που έκανε τον χρόνο να περνάει αβίαστα. Ευχαριστώ επίσης τη γυναίκα μου Wen για την συνεχή στήριξη και αγάπη της και τη θεία και το θείο για την συμπαράσταση τους. Τέλος ευχαριστώ τον καθηγητή κύριο Αντωνιάδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, και για την ευκαιρία να εργαστώ και να συνεργαστώ σε κάτι πραγματικά ενδιαφέρον με την ομάδα του Εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών του ΕΜΠ.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

*Ερσπάμερ Αλιμπέρτο*



# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Ευχαριστίες</b>	<b>4</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>12</b>
1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή . . . . .	12
1.2 Αντικείμενα αυτής της διπλωματικής . . . . .	13
1.3 Εφαρμογή-πειραματική διάταξη . . . . .	13
1.4 Οργάνωση του τόμου . . . . .	14
<b>2 Θεωρητικό υπόβαθρο</b>	<b>16</b>
2.1 Προσαρμοστικά Adaptive συστήματα ελέγχου . . . . .	16
2.2 Η συνάρτηση κόστους-μέσου τετραγωνικού σφάλματος . . . . .	17
2.3 Η μέθοδος steepest decent . . . . .	18
2.4 Ο αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων LMS . . . . .	19
<b>3 Οι χρήσεις του αλγορίθμου LMS</b>	<b>22</b>
3.1 Μοντελοποίηση μονοπατιού . . . . .	22
3.2 Ενεργητικός έλεγχος θορύβου . . . . .	23
3.3 Ο αλγόριθμος FXLMS . . . . .	24
<b>4 Αλγόριθμοι απόσβεσης θορύβου σε απομακρυσμένη θέση-Θεωρητική ανάλυση</b>	<b>28</b>
4.1 Η μέθοδος εικονικού μικροφώνου - Virtual microphone . . . . .	28
4.2 Remote Microphone Technique . . . . .	30
4.3 Μέθοδος εμπρόσθιας πρόβλεψης πεδίου - Extrapolation . . . . .	33
4.4 Άθροισμα error μικροφώνων . . . . .	35
<b>5 Προσομοιώσεις</b>	<b>38</b>
5.1 Το περιβάλλον προσομοίωσης K-Wave . . . . .	38
5.2 Παράμετροι προσομοιώσεων . . . . .	38
5.3 Επιλογή παραμέτρων προσομοιώσεων . . . . .	39
5.4 Προσομοιώσεις μεθόδου ενεργητικού ελέγχου θορύβου τύπου FXLMS . . . . .	40
5.5 Προσομοιώσεις εικονικών (virtual) μεθόδων ενεργητικού ελέγχου θορύβου . . . . .	44
5.5.1 Προσομοιώσεις μεθόδου ενεργητικού ελέγχου θορύβου τύπου VM . . . . .	45
5.5.2 Προσομοιώσεις μεθόδου ενεργητικού ελέγχου θορύβου τύπου RMT . . . . .	48
5.6 Επιπλέον παρατηρήσεις για τις τεχνικές εικονικού μικροφώνου . . . . .	52
5.6.1 Θέση του συστήματος και λάθος μοντελοποίηση των μονοπατιών . . . . .	52

---

5.6.2 Επίδραση της απόστασης μεταξύ των physical και virtual μικροφώνων στην απόδοση των αλγορίθμων. . . . .	54
5.7 Προσομοιώσεις μεθόδου ενεργητικού ελέγχου θορύβου εμπρόσθιας πρόβλεψης τύπου Extrapolation . . . . .	55
5.8 Προσομοιώσεις πραγματικού κόσμου . . . . .	59
<b>6 Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα</b>	<b>62</b>
6.1 Το υλικό του συστήματος (hardware) . . . . .	62
6.2 Η πλατφόρμα FPGA . . . . .	62
6.3 Επιλογή μεγαφώνων και μικροφώνων . . . . .	63
6.4 Επιδεικτική- μετρητική διάταξη . . . . .	64
6.5 Το περιβάλλον προγραμματισμού LABVIEW . . . . .	65
6.6 Τεχνικές πληροφορίες . . . . .	65
6.7 Πειραματικά αποτελέσματα 1-Πτώση overall dB . . . . .	65
6.7.1 Άθροισμα error μικροφώνων . . . . .	66
6.7.2 Extrapolation . . . . .	68
6.8 Πειραματικά αποτελέσματα 2- Φάσματα 80+160Hz . . . . .	74
<b>7 Επίλογος</b>	<b>80</b>
7.1 Συμπεράσματα . . . . .	80
7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις . . . . .	80
<b>Συντημήσεις - Αγγλικοί όροι - Ελληνικοί όροι</b>	<b>86</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Απλό FIR (transversal) φίλτρο . . . . .	16
2.2	Σχηματικό διάγραμμα adaptive φίλτρου . . . . .	17
2.3	Ανάλυση του LMS αλγόριθμου . . . . .	19
3.1	Σχηματικό διάγραμμα LMS. Πλήρης και απλοποιημένη απεικόνιση . . . . .	22
3.2	Μοντελοποίηση ηχητικού μονοπατιού . . . . .	23
3.3	Ενεργητικός έλεγχος θορύβου ANC . . . . .	24
3.4	Ο αλγόριθμος FXLMS . . . . .	25
4.1	Ο αλγόριθμος VM. Στάδια μοντελοποίησης (αριστερά) και ενεργητικού ελέγχου (δεξιά) . . . . .	28
4.2	Ενεργητικός έλεγχος με τον VM αλγόριθμο . . . . .	30
4.3	Η επίδραση του μονοπατιού H . . . . .	31
4.4	Ενεργητικός έλεγχος με τον αλγόριθμο RMT . . . . .	31
4.5	Στάδια μοντελοποίησης μονοπατιών της τεχνικής RMT . . . . .	32
4.6	Στάδια μοντελοποίησης μονοπατιών τεχνικής RMT- αναλυτικά . . . . .	33
4.7	Η τεχνική της εμπρόσθιας πρόβλεψης- extrapolation . . . . .	33
4.8	Στάδια μοντελοποίησης μονοπατιών τεχνικής extrapolation . . . . .	34
4.9	Εφαρμογή τοπικού ANC με ένα μικρόφωνο. . . . .	35
4.10	Εφαρμογή εκτεταμένου ANC με δύο μικρόφωνα. . . . .	36
5.1	Διατάξεις προσομοίωσης απλού FXLMS. Αριστερά: Διάταξη 1. Δεξιά: Διάταξη 2 . . . . .	40
5.2	Στιγμιότυπα ενεργητικού ελέγχου για τις δύο διατάξεις FXLMS . . . . .	40
5.3	Στάδιο μοντελοποίησης μονοπατιού . . . . .	41
5.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1. Simulation time=2 - πτώση 50 dB στην περιοχή του μικροφώνου . . . . .	42
5.5	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 2. Simulation time=8 - πτώση 50 dB στην περιοχή του μικροφώνου . . . . .	42
5.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 3. Simulation time=8 - Πτώση 54 dB στην περιοχή των μικροφώνων . . . . .	43
5.7	Διατάξεις προσομοίωσης 1 . . . . .	44
5.8	Διατάξεις προσομοίωσης 2 . . . . .	44
5.9	Στιγμιότυπα ενεργητικού ελέγχου για τη διάταξη 1. Αριστερά: VM ANC. Δεξιά: RMT ANC . . . . .	45
5.10	Στιγμιότυπα ενεργητικού ελέγχου για τη διάταξη 2. Αριστερά: VM ANC. Δεξιά: RMT ANC . . . . .	45
5.11	Στιγμιότυπα μοντελοποίησης μονοπατιών. Αλγόριθμος VM . . . . .	46
5.12	Αποτελέσματα μοντελοποίησης μονοπατιών. Αλγόριθμος VM . . . . .	46
5.13	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1 (VM). Simulation time=2 - Πτώση 4 dB "κοντά" στην περιοχή των αυτιών. Πτώση 3 dB στην περιοχή του νοητού μικροφώνου . . . . .	47

5.14	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1 (VM). Simulation time=8 - Πτώση 8 dB "κοντά" στην περιοχή των αυτιών. Πτώση 4 dB στην περιοχή του νοητού μικροφώνου . . . . .	47
5.15	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 2 (VM). Simulation time=8 - Πτώση 5 dB "κοντά" στην περιοχή των αυτιών. Πτώση 0.5 dB στην περιοχή του νοητού μικροφώνου . . . . .	48
5.16	Στιγμιότυπα μοντελοποίησης μονοπατιών για τη διάταξη RMT . . . . .	49
5.17	Αποτελέσματα μοντελοποίησης για τη διάταξη RMT . . . . .	49
5.18	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1 (RMT). Simulation time=4 - Πτώση 5 dB στην περιοχή των αυτιών (νοητό μικρόφωνο) . . . . .	50
5.19	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1 (RMT). Simulation time=8 - Πτώση 8 dB στην περιοχή των αυτιών (νοητό μικρόφωνο) . . . . .	50
5.20	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 2 (RMT). Simulation time=8 - Ενίσχυση 2 dB στην περιοχή των αυτιών (νοητό μικρόφωνο) . . . . .	51
5.21	Αιτιατότητα (casuality) μονοπατιού <b>S</b> . . . . .	52
5.22	Ελλιπής αιτιατότητα μονοπατιού <b>H</b> . . . . .	52
5.23	Αιτιατή διάταξη προσομοίωσης RMT . . . . .	53
5.24	Το προκύπτων μονοπάτι H . . . . .	53
5.25	Αιτιατότητα μοντελοποίησης ηχητικού μονοπατιού . . . . .	53
5.26	Αποτελέσματα προσομοίωσης simulation time=8 μείωση 12 dB στην virtual περιοχή . . . . .	54
5.27	Βελτίωση της απόδοσης με μείωση της απόστασης του virtual μικροφώνου . . . . .	54
5.28	Αποτελέσματα προσομοίωσης simulation time=8 μείωση 11 dB στην virtual περιοχή . . . . .	55
5.29	Διατάξεις προσομοίωσης extrapolation . . . . .	56
5.30	Στιγμιότυπα ενεργητικού ελέγχου για τις δύο διατάξεις . . . . .	56
5.31	Αποτελέσματα μοντελοποίησης μονοπατιού. Χρησιμοποιείται το physical mic 1 . . . . .	57
5.32	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1. Ζητούμενη απόσταση απόσβεσης x=10cm. Simulation time=8 μείωση 17 dB στην virtual περιοχή . . . . .	57
5.33	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1. Ζητούμενη απόσταση απόσβεσης x=20cm. Simulation time=8 μείωση 7 dB στην virtual περιοχή . . . . .	58
5.34	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 2. Ζητούμενη απόσταση απόσβεσης x=10cm. Simulation time=8 μείωση 13 dB στην virtual περιοχή . . . . .	58
5.35	Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1. Ζητούμενη απόσταση απόσβεσης x=20cm. Simulation time=8 μείωση 3 dB στην virtual περιοχή . . . . .	59
5.36	Προσομοίωση πραγματικών μεγεθών 1 . . . . .	60
5.37	Προσομοίωση πραγματικών μεγεθών 2 . . . . .	60
6.1	Η πλατφόρμα CRIO . . . . .	62
6.2	Μικρόφωνο τύπου Shure - MX183 . . . . .	63
6.3	Χαρακτηριστικά μικροφώνου τύπου Shure - MX183 . . . . .	63
6.4	Ηχείο FR 6.5 ιντσών . . . . .	63
6.5	Συχνοτική απόκριση ηχείου FR 6.5 ιντσών . . . . .	64
6.6	Η πειραματική διάταξη . . . . .	64



6.7	Το περιβάλλον προγραμματισμού Labview . . . . .	65
6.8	Πλάγια όψη συστήματος ANC. . . . .	66
6.9	Διάταξη 1 . . . . .	67
6.10	Επίπεδα διάταξης 1 . . . . .	67
6.11	Διάταξη 2 . . . . .	68
6.12	Επίπεδα διάταξης 2 . . . . .	68
6.13	Πλάγια όψη συστήματος ANC. . . . .	69
6.14	Διάταξη 3 . . . . .	69
6.15	Επίπεδα διάταξης 3 . . . . .	70
6.16	Διάταξη 4 . . . . .	70
6.17	Επίπεδα διάταξης 4 . . . . .	71
6.18	Διάταξη 5 . . . . .	71
6.19	Επίπεδα διάταξης 5 . . . . .	72
6.20	Διάταξη 6 . . . . .	72
6.21	Επίπεδα διάταξης 6 . . . . .	73
6.22	Μετρητική διάταξη . . . . .	74
6.23	Παράδειγμα data acquisition . . . . .	74
6.24	Διάταξη 4 και μετρητική διάταξη . . . . .	75
6.25	Διάταξη 5 και μετρητική διάταξη . . . . .	77

## Κατάλογος Πινάκων

---

6.1	Συγκεντρωτικός πίνακας 1-Φάσματα διάταξης 4 . . . . .	75
6.2	Συγκεντρωτικός πίνακας 1-Φάσματα διάταξης 5 . . . . .	77



---

## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή

---

Τα τελευταία χρόνια τα συστήματα ενεργητικού ελέγχου θορύβου χαίρουν ολοένα αυξανόμενης απήχησης λόγω της ικανότητάς τους για απόσβεση θορύβου χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων. Εν αντιθέσει, παθητικές τεχνικές απόσβεσης που είναι πιο αποτελεσματικές στην αποκοπή θορύβου υψηλών κυρίως συχνοτήτων, απαιτούν τη δημιουργία βαρέων κατασκευών (τοιχοι- εγκαταστάσεις ηχομόνωσης). Εργασιακά περιβάλλοντα όπως:

- Εργοστάσια και βιομηχανίες
- Χώροι μετακίνησης εμπορευμάτων

καθώς επίσης και ο σύγχρονος τρόπος ζωής στα μεγάλα αστικά κέντρα (θορυβώδεις μετακινήσεις), δημιουργούν ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για την εύκολη και γρήγορη απόσβεση θορύβου. Η εξέλιξη των μέσων μεταφοράς μεγάλης ιπποδύναμης, δημιουργεί αυξανόμενη ανάγκη για την απόσβεση θορύβου χωρίς την χρήση ηχομονωτικών και άλλων βαρέων υλικών που σε χαμηλές συχνότητες μικρότερες των 500 Hz κρίνονται αναποτελεσματικές [14].

Όπως όλα τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου ο ενεργητικός έλεγχος θορύβου (ANC) απαιτεί τη συνέργεια πολλών συσκευών και συστημάτων για να λάβει πληροφορίες και για να επηρεάσει το φυσικό-ηχητικό περιβάλλον. Βασικά στοιχεία των συστημάτων αυτών είναι οι ενεργοποιητές- actuators (μεγάφωνα) και οι αισθητήρες ήχου- sound sensors (μικρόφωνα). Ένας οποιοσδήποτε αλγόριθμος ANC χρησιμοποιεί την πληροφορία που λαμβάνει από μία συστοιχία μικροφώνων. Μέσω των μεγαφώνων παράγει ένα ακουστικό κύμα το οποίο αποσβένει μέσω της αρχής της υπέρθεσης το θορυβώδες σήμα στην περιοχή των μικροφώνων. Εκ κατασκευής και εκ πρώτης όψεως, ένα τέτοιο σύστημα έχει το βασικό μειονέκτημα ότι δύναται να λάβει πληροφορία και συνεπώς να αποσβέσει το θόρυβο μόνο κοντά στα μικρόφωνα.

Υπάρχουν πρακτικές εφαρμογές όπως ο ενεργητικός έλεγχος θορύβου σε φορητά ακουστικά, όπου το εν λόγω μειονέκτημα του συστήματος δεν δημιουργεί μεγάλο πρόβλημα [27]. Ωστόσο αν ζητούμενο είναι ο ενεργητικός έλεγχος μιας μεγάλης ευρύτερης περιοχής προκειμένου να δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα και η ευελιξία να κυκλοφορεί με μεγάλο βαθμό ελευθερίας στον χώρο χωρίς μάλιστα να φέρει κάποιον εξοπλισμό, τότε το σύστημα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να επηρεάζει και να ελέγχει μία περιοχή ευρύτερη των μικροφώνων [22].

#### 1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Το 1936 ο Lueg [29] κατοχύρωσε την πρώτη πατέντα σχετικά με τον ενεργητικό έλεγχο θορύβου. Η πατέντα εισήγαγε την ιδέα της απόσβεσης μιας ηχητικής διαταραχής σε ένα σημείο του χώρου μέσω μιας δεύτερης ηχητικής πηγής που παράγει την ίδια διαταραχή με ανεστραμμένη φάση. Η υπέρθεση των δύο ηχητικών διαταραχών θα συνεπαγόταν απόσβεση

του θορύβου στο επιθυμητό σημείο. Η ευμετάβολη φύση των χαρακτηριστικών του ήχου (πλάτος, φάση) καθώς και του περιβάλλοντος διάδοσης του, καθέστησε απαγορευτική την δημιουργία ενός τέτοιου συστήματος για την εποχή εκείνη. Οι Widrow και Streans, 1985 [28] αντιλήφθηκαν την ανάγκη υλοποίησης ενός προσαρμοστικού αλγορίθμου για την συνεχή αναγνώριση των χαρακτηριστικών του ήχου και την επαναληπτική αναπροσαρμογή του αποσβεστικού κύματος.

## 1.2 Αντικείμενα αυτής της διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη αλγορίθμων και τεχνικών για την δημιουργία ζώνης ησυχίας μακριά από τα μικρόφωνα του συστήματος και κοντά στα αυτιά του χρήστη. Επίσης στα πλαίσια της εργασίας αναπτύσσονται:

- Εικονικό περιβάλλον προσομοίωσης του συστήματος ενεργητικού ελέγχου στο περιβάλλον MATLAB.
- Επιδεικτική-πειραματική διάταξη με σκοπό την απόσβεση θορύβου συγκεκριμένων προδιαγραφών σε μέσα μεταφοράς.

## 1.3 Εφαρμογή-πειραματική διάταξη

Η ανάπτυξη της επιδεικτικής εφαρμογής προσβλέπει στην μελέτη αρχικά και στην επίτευξη τελικά των στόχων ελέγχου και περιορισμού της έντασης του θορύβου σε ένα αεροσκάφος και μία θαλαμηγό. Οι βασικοί στόχοι εν συντομία περιγράφονται παρακάτω:

- Μείωση τουλάχιστον 10 dB του πλάτους της κύριας συνιστώσας της ταχύτητας περιστροφής της έλικας του αεροσκάφους.
- Μείωση τουλάχιστον 10 dB των πλατών των παραγόμενων πολλαπλών αρμονικών από τις MEK και τις γεννήτριες της θαλαμηγού.
- Μείωση τουλάχιστον 10 dB του συνολικού επίπεδου θορύβου SPL στο αεροσκάφος και τη θαλαμηγό.
- Επίτευξη των παραπάνω στόχων σε περιοχή απομακρισμένη τουλάχιστον 10 cm από τα μικρόφωνα του συστήματος με χωρική έκταση τουλάχιστον 20 cm x 20 cm x 20 cm.

Τελικός στόχος είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος ενεργητικού ελέγχου του θορύβου για την επίτευξη της προσδοκώμενης μείωσης της στάθμης των ακουστικών διαταραχών σε ένα υποθετικό επιβατικό κάθισμα.

Η συμβατότητα και η απόδοση του ολοκληρωμένου ANC συστήματος μελετήθηκε και ελέγχθηκε από πειραματική διάταξη που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Δυναμικής και Κατασκευών (ΕΔΚ) του ΕΜΠ. Η εν λόγω διάταξη παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6 της εργασίας.

## 1.4 Οργάνωση του τόμου

Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε 6 κεφάλαια.

- Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στους προσαρμοστικούς αλγορίθμους που αποτελούν τον βασικό σκελετό ανάπτυξης όλων των αλγορίθμων της παρούσας εργασίας.
- Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι χρήσεις του αλγορίθμου ελάχιστου τετραγωνικού σφάλματος (LMS) για μαθηματική μοντελοποίηση φυσικών ηχητικών και ηλεκτρικών συστημάτων και για ενεργητικό έλεγχο θορύβου Active Noise Control (ANC).
- Στο κεφάλαιο 4 γίνεται θεωρητική ανάλυση και παρουσίαση των τεχνικών που δοκιμάστηκαν στο εργαστήριο και στοχεύουν στη μεγένθυση και απομάκρυνση της ζώνης ησυχίας από τα μικρόφωνα του συστήματος.
- Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που έγιναν στο περιβάλλον προσομοίωσης k-wave.
- Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των σημαντικότερων από τις μεθόδους στην πειραματική διάταξη του εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών (ΕΔΚ) του ΕΜΠ.
- Στο κεφάλαιο 7 προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις των τεχνικών που αναπτύχθηκαν.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν υπερκάλυψη των στόχων που τέθηκαν και τη δημιουργία μιας ζώνης ησυχίας ικανής να προσφέρει άνεση στα αυτιά ενός καθισμένου επιβάτη. Μάλιστα, οι κινήσεις του κεφαλιού του επιβάτη δεν δημιουργούν κάποια αίσθηση δυσφορίας καθώς η δημιουργούμενη ζώνη ησυχίας κατανέμεται ομοιόμορφα στο χώρο με τη μείωση της απόδοσης της να επέρχεται σταδιακά ανάλογα με την αύξηση της απόστασης από τα μικρόφωνα του συστήματος.



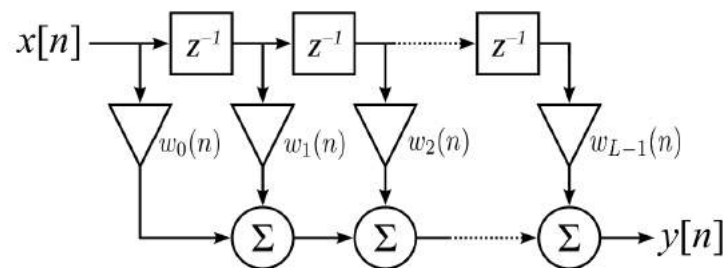
## Κεφάλαιο 2

### Θεωρητικό υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύντομη αναφορά στα προσαρμοστικά συστήματα ελέγχου και γίνεται εξαγωγή των χαρακτηριστικών μαθηματικών εξισώσεων που διέπουν τη λειτουργία τους. Σταδιακά, αναπτύσσεται και μοντελοποιείται μαθηματικά ο αλγόριθμος Least Mean Square, ο οποίος αποτελεί την βάση των αλγορίθμων της εργασίας.

#### 2.1 Προσαρμοστικά Adaptive συστήματα ελέγχου

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές [1] είναι ζητούμενο η μαθηματική μοντελοποίηση πραγματικών φυσικών συστημάτων. Πολλές μέθοδοι έχουν καθιερωθεί προς αυτή τη κατεύθυνση με κυρίαρχες την μοντελοποίηση στο πεδίο της συχνότητας μέσω συναρτήσεων μεταφοράς, και την μοντελοποίηση στο πεδίο του χρόνου με state space μοντελοποίηση. Τα μοντέλα αυτά εξάγονται είτε με άμεση εφαρμογή των φυσικών εξισώσεων του συστήματος, είτε συχνά επειδή αυτές δεν είναι γνωστές, με τη χρήση "προσαρμοστικών" φίλτρων [10]. Μέσα από μια προσαρμοστική-επαναληπτική διαδικασία δημιουργούνται φίλτρα που χαρακτηρίζονται στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας από πεπερασμένα διανύσματα συντελεστών, έστω  $\mathbf{W}$ . Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο προσαρμοστικό φίλτρο, τύπου FIR.



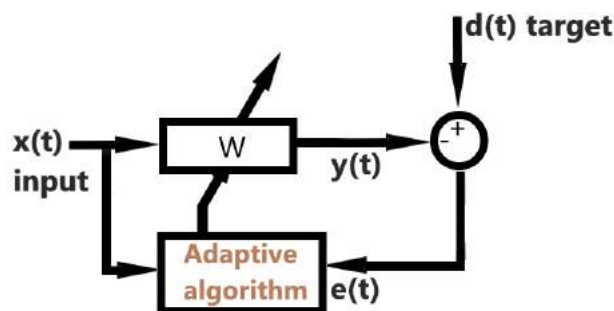
Σχήμα 2.1: Απλό FIR (transversal) φίλτρο

Όπως φαίνεται από το σχήμα, η γνώση των συντελεστών του φίλτρου είναι αρκετή για την εξαγωγή της εξόδου  $y(n)$  ενός γραμμικού συστήματος, δοθείσας μιας χρονικής διαταραχής  $x(n)$ . Η εξίσωση εξόδου ενός φίλτρου FIR δίνεται από τον γνωστό τύπο της συνέλιξης:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x(n-l) \quad (2.1.1)$$

Στο σχήμα 2.2 αναπαριστάται η γενική μορφή ενός προσαρμοστικού φίλτρου, και πιο

συγκεκριμένα το στάδιο μοντελοποίησης του, όπου  $d(n)$  είναι η επιθυμητή απόκριση,  $y(n)$ ,  $x(n)$  είναι η έξοδος και η είσοδος αντίστοιχα, ενώ  $e(n)$  είναι η διαφορά μεταξύ των σημάτων  $y(n)$  και  $d(n)$ . Σκοπός του προσαρμοστικού αλγορίθμου είναι η μοντελοποίηση του φίλτρου  $\mathbf{W}$  ώστε για οποιαδήποτε τιμή εισόδου  $x(n)$  να δημιουργεί στη έξοδο του την επιθυμητή απόκριση  $d(n)$ .



Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα adaptive φίλτρου

Έστω  $x(n)$  η είσοδος του συστήματος για κάθε χρονική στιγμή  $n$ . Ορίζονται το διάνυσμα  $\mathbf{x}(n)$ , όπου  $L$  το μήκος του διανύσματος [1]

$$\mathbf{x}(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-L+1)]^T \quad (2.1.2)$$

και το διάνυσμα  $\mathbf{w}(n)$  ως

$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \quad w_1(n-1) \quad \dots \quad w_{L-1}(n)]^T \quad (2.1.3)$$

τότε για κάθε χρονική στιγμή  $n$  το σήμα εξόδου  $y(n)$  μπορεί να εκφραστεί ως

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) \quad (2.1.4)$$

Τελικά το σήμα σφάλματος  $e(n)$  προκύπτει ως η διαφορά :

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) \quad (2.1.5)$$

Ζητούμενο είναι η εύρεση του κατάλληλου προσαρμοστικού αλγορίθμου που δεδομένων των χρονικών σημάτων  $x(n)$  και  $e(n)$  να μπορεί να "εκπαιδεύσει" κατάλληλα το φίλτρο  $\mathbf{W}$ .

## 2.2 Η συνάρτηση κόστους-μέσου τετραγωνικού σφάλματος

Για την ελαχιστοποίηση του σήματος σφάλματος  $e(n)$  το οποίο στην τελική του μορφή διατυπώνεται όπως στην εξίσωση (2.1.5) επιλέγεται είτε η νόρμα ή το τετράγωνο του σήματος για τη δημιουργία ενός "δείκτη" απόδοσης που κινείται στο εύρος  $[0, \text{inf}]$ . Συχνά επιλέγεται να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση κόστους-απόδοσης  $\xi(n)$  που ορίζεται ως η μέση τιμή του τετραγώνου του σφάλματος  $e(n)$ . Η συνάρτηση απόδοσης πρέπει να τείνει στο μηδέν. Από την (2.1.5) το τετράγωνο του σφάλματος και η μέση τιμή του τετραγωνικού σφάλματος είναι:

$$e^2(n) = d^2(n) - 2d(n)\mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) + (\mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n))^2 \quad (2.2.2)$$



$$E[e^2(n)] = E[d^2(n)] - E[2d(n)\mathbf{w}^T(\mathbf{n})\mathbf{x}(\mathbf{n})] + E[(\mathbf{w}^T(\mathbf{n})\mathbf{x}(\mathbf{n}))^2] \quad (2.2.3)$$

Ο δεύτερος και ο τρίτος όρος της εξίσωσης (2.2.3) μπορούν να μετεγραφούν. Πιο συγκεκριμένα από βασική ιδιότητα πινάκων:

$$E[2d(n)\mathbf{w}^T(\mathbf{n})\mathbf{x}(\mathbf{n})] = E[2d(n)\mathbf{x}^T(\mathbf{n})\mathbf{w}(\mathbf{n})] \quad (2.2.5.a)$$

$$E[(\mathbf{w}^T(\mathbf{n})\mathbf{x}(\mathbf{n}))^2] = E[(\mathbf{w}^T(\mathbf{n})\mathbf{x}(\mathbf{n})\mathbf{x}^T(\mathbf{n})\mathbf{w}(\mathbf{n}))] \quad (2.2.5.b)$$

Θεωρώντας το διάνυσμα  $\mathbf{w}(\mathbf{n})$  ντετερμινιστικό και ορίζοντας τα διανύσματα που αποτελούν δείκτες συσχέτισης:

$$\mathbf{p} = E[d(n)\mathbf{x}(\mathbf{n})] \quad (2.2.6)$$

και

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(\mathbf{n})\mathbf{x}^T(\mathbf{n})] \quad (2.2.7)$$

όπου  $\mathbf{p}$  είναι το διάνυσμα συσχέτισης του σήματος  $d(n)$  με κάθε όρο του διανύσματος  $\mathbf{x}(\mathbf{n})$  και  $\mathbf{R}$  ο πίνακας ιδιοσυσχέτισης του διανύσματος  $\mathbf{x}(\mathbf{n})$ , προκύπτει τελικά [28, 16]

$$\xi(n) = E[d(n)^2] - 2\mathbf{p}^T \mathbf{w}(n) + \mathbf{w}^T(n)\mathbf{R}\mathbf{w}(n) \quad (2.2.8)$$

Ζητούμενο του αλγορίθμου είναι η εύρεση του βέλτιστου διανύσματος  $\mathbf{w}(\mathbf{n})$  για το οποίο ελαχιστοποιείται η συνάρτηση κόστους  $\xi(n)$ . Παραγωγίζοντας τη  $\xi(n)$  με το διάνυσμα  $\mathbf{w}(\mathbf{n})$ , και αυστηρά με τη προϋπόθεση ότι το διάνυσμα  $\mathbf{x}(\mathbf{n})$  είναι μία στάσιμη στοχαστική διαδικασία ώστε να προκύπτει ότι ο πίνακας ιδιοσυσχέτισης  $\mathbf{R}$  είναι συμμετρικός ( $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T$ ), είναι:

$$\nabla \xi(n) = -2\mathbf{p} + 2\mathbf{R}\mathbf{w}(n) \quad (2.2.9)$$

Η βέλτιστη λύση ελαχιστοποίησης παράγεται από τον μηδενισμό της (2.2.9), αλλά η επίλυση της εξίσωσης ξεφεύγει από το σκοπό αυτού του κεφαλαίου.

## 2.3 Η μέθοδος steepest decent

Σκοπός του προσαρμοστικού αλγορίθμου είναι ο επαναληπτικός υπολογισμός του φίλτρου  $\mathbf{W}$ . Η μέθοδος steepest decent χρησιμοποιεί μία προσέγγιση υπολογισμού όπως αυτή φαίνεται στην εξίσωση (2.3.1). Η μέθοδος σε κάθε νέο χρονικό δείγμα των σημάτων  $\mathbf{x}(n)$  και  $d(n)$  απαιτεί τον εκ νέου υπολογισμό του διανύσματος  $\mathbf{w}(n)$ :

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - (\mu/2)\nabla \xi(n) \quad (2.3.1)$$

Η εν λόγω μέθοδος προσφέρει εξαιρετικά αποτελέσματα ως προς την εκτίμηση των συντελεστών του φίλτρου FIR.

## 2.4 Ο αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων LMS

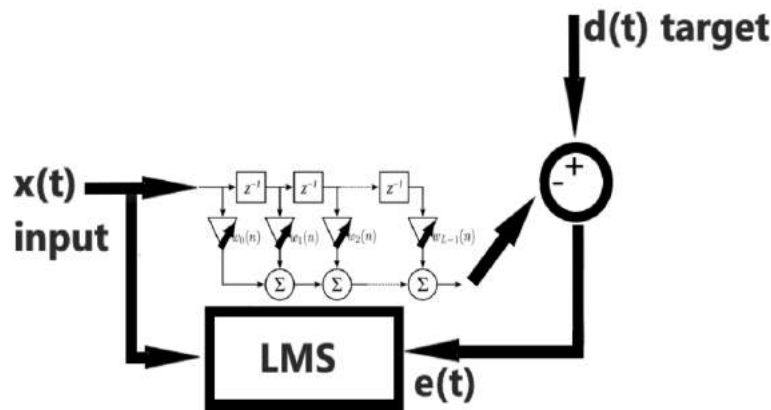
Ο επαναληπτικός υπολογισμός της (2.2.9) για τον υπολογισμό του εκάστοτε  $w(n)$  έχει πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Ο Widrow [1985] [28], χρησιμοποίησε το στιγμιαίο τετραγωνικό σφάλμα για να εκτιμήσει την συνάρτηση κόστους.

$$\hat{\xi}(n) = e^2(n) \quad (2.4.1)$$

Συνεπώς για την επίλυση της (2.3.1) τώρα χρησιμοποιείται το gradient του στιγμιαίου τετραγωνικού σφάλματος

$$\nabla \hat{\xi}(n) = 2[\nabla e(n)]e(n) \quad (2.4.2)$$

Σημειώνεται ότι σε αντίθεση με την (2.2.9) η εύρεση του gradient της  $\hat{\xi}(n)$  δεν προϋποθέτει ότι το διάνυσμα  $\mathbf{x}(n)$  είναι στάσιμη στοχαστική ανέλιξη.



Σχήμα 2.3: Ανάλυση του LMS αλγορίθμου

Από την (2.1.5) προκύπτει ότι

$$\nabla e(n) = -\mathbf{x}(n) \quad (2.4.3)$$

Από τις εξισώσεις (2.3.1) έως (2.4.3) προκύπτει ένας νέος προσαρμοστικός αλγόριθμος εκτίμησης του φίλτρου  $\mathbf{W}$ , και ονομάζεται αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων (Least Mean Square).

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}(n)e(n) \quad (2.4.4)$$

Ο αλγόριθμος LMS αποτελείται από δύο βασικές διαδικασίες:

- Φιλτράρισμα του σήματος αναφοράς  $x(n)$  μέσω του φίλτρου  $\mathbf{W}$  και σύγκριση του σήματος εξόδου  $y(n)$  με την επιθυμητή απόκριση  $d(n)$ .
- Επαναληπτική ρύθμιση των βαρών του προσαρμοστικού φίλτρου χρησιμοποιώντας το σφάλμα εκτίμησης.

Ο γραμμικός-προσαρμοστικός αλγόριθμος LMS χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη απλότητα καθώς δεν απαιτεί υπολογισμό των σχετικών συναρτήσεων συσχέτισης ή αντιστροφής μήτρας.

Η καταφανής απλότητα του αλγορίθμου, η άρση της αναγκαιότητας ότι το διάνυσμα  $\mathbf{x}(n)$  είναι στάσιμη στοχαστική ανέλιξη καθώς και η συνολικότερη αποτελεσματικότητα και ευστάθεια του, τον καθιστούν πρωταρχική επιλογή στα συστήματα ενεργητικού ελέγχου θορύβου. Πιο αναλυτικά ο αλγόριθμος LMS παρουσιάζεται στην ακόλουθη αλγοριθμική διαδικασία.

---

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 2.1: *Αλγόριθμος LMS.*

---

**Βήμα 1:** Προσδιορισμός παράμετρου βήματος  $\mu$  (step size).

**Βήμα 2:** Προσδιορισμός των συντελεστών του φίλτρου  $L$  (FIR (filter length)).

**Βήμα 3:** Αρχικοποίηση-μηδενισμός του διανύσματος  $\mathbf{W}$ .

**while** αριθμός επανάληψης **is smaller than** επιθυμητός αριθμός επαναλήψεων **do**

**Βήμα 4:** Φιλτράρισμα του σήματος αναφοράς  $x(n)$  μέσω του φίλτρου  $\mathbf{W}$ .

**Βήμα 6:** Υπολογισμός σήματος σφάλματος  $e(n)$ .

**Βήμα 7:** Προσαρμογή των βαρών  $\mathbf{W}$  του φίλτρου.

**end while**

---

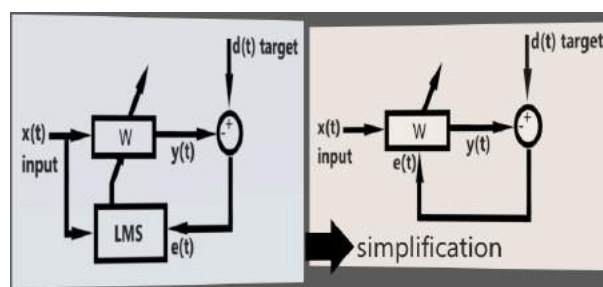


## Κεφάλαιο 3

# Οι χρήσεις του αλγορίθμου LMS

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τυπικές εφαρμογές του αλγορίθμου LMS. Αναλύονται οι κάτωθι εφαρμογές

- Μοντελοποίηση μονοπατιού. Χαρακτηρισμός φυσικού-ψηφιακού συστήματος.
- Ενεργητικός έλεγχος θορύβου.
- Συνδυασμός των παραπάνω για βελτιωμένο ενεργητικό έλεγχο.



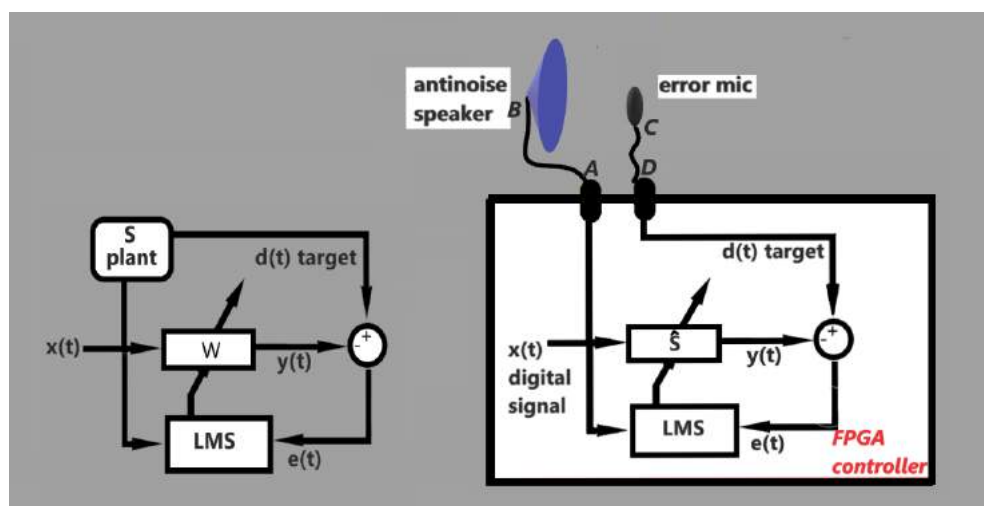
Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα LMS. Πλήρης και απλοποιημένη απεικόνιση

### 3.1 Μοντελοποίηση μονοπατιού

Σημαντικότερη χρήση του αλγορίθμου ελαχίστου τετραγωνικού σφάλματος όπως και κάθε προσαρμοστικού αλγόριθμου είναι η εκτίμηση του μονοπατιού (transfer path) ενός φυσικού, ενός ψηφιακού είτε ενός συνδυασμού και των δύο, συστήματος. Στην περίπτωση του ενεργητικού ελέγχου θορύβου, όπως θα φανεί στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση τέτοιων "μικτών" μονοπατιών για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος.

Στο σχήμα (3.2 - αριστερά) απεικονίζεται η κλασική στρατηγική μοντελοποίησης ενός συστήματος  $\mathbf{S}$ . Το προς μοντελοποίηση σύστημα τοποθετείται μεταξύ του σήματος αναφοράς  $x(t)$  και του σήματος στόχου  $d(t)$ . Το σήμα  $x(t)$  αποτελεί την είσοδο του συστήματος ενώ το σήμα  $y(t)$  είναι η παραγόμενη έξοδος που προκύπτει από τη συνέλιξη του σήματος αναφοράς με το σύστημα  $\mathbf{S}$ .

Στόχος του αλγορίθμου είναι η μαθηματική μοντελοποίηση και ψηφιακή αποθήκευση του συστήματος  $\mathbf{S}$ , σε ένα FIR ψηφιακό φίλτρο. Κατά τη διάρκεια της "εκπαίδευσης" παράγεται μία random και συνήθως ασυσχέτιστη στοχαστική ανέλιξη  $x(n)$  που τροφοδοτεί τόσο το φυσικό όσο και το ψηφιακό κομμάτι του συστήματος. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου ανανεώνονται οι συντελεστές του FIR φίλτρου  $\mathbf{S}$  με στόχο τον μηδενισμό του σήματος σφάλματος  $e(t)$ .



Σχήμα 3.2: Μοντελοποίηση ηχητικού μονοπατιού

Στο σχήμα (3.2 - δεξιά) απεικονίζεται ένας κλασικός βρόγχος μοντελοποίησης στην περίπτωση ενός συστήματος ANC. Το σύστημα απαρτίζεται από τον ελεγκτή (FPGA controller), ένα ηχείο, ένα μικρόφωνο καθώς και από τα μονοπάτια μετάδοσης (A-B-C-D), όπως αναλύονται παρακάτω:

- A->B ηλεκτρομαγνητικό μονοπάτι μετάδοσης
- B->C ακουστικό μονοπάτι μετάδοσης
- C->D ηλεκτρομαγνητικό μονοπάτι μετάδοσης

Ένα ψηφιακό σήμα  $x(n)$  που παράγεται μέσα στον ελεγκτή, μετατρέπεται σε αναλογικό μέσω του ενσωματωμένου μετατροπέα Digital to Analog converter του ελεγκτή και οδηγείται στη έξοδο A. Έπειτα ακολουθεί το μονοπάτι μετάδοσης A->B και αφού πρώτα ενισχυθεί αναλογικά καταλήγει στον transducer-ηχείο του σχήματος. Το σήμα μετατρέπεται σε ακουστικό, διαδίδεται στο μονοπάτι μετάδοσης B->C όπου ένα μικρόφωνο το λαμβάνει και το μετατρέπει εκ νέου σε ηλεκτρομαγνητικό σήμα. Ακολουθεί η αναλογική ενίσχυση του, η διαδρομή C->D και τέλος η μετατροπή του σε ψηφιακό πάλι σήμα μέσω του ενσωματωμένου μετατροπέα Analog to Digital converter του ελεγκτή.

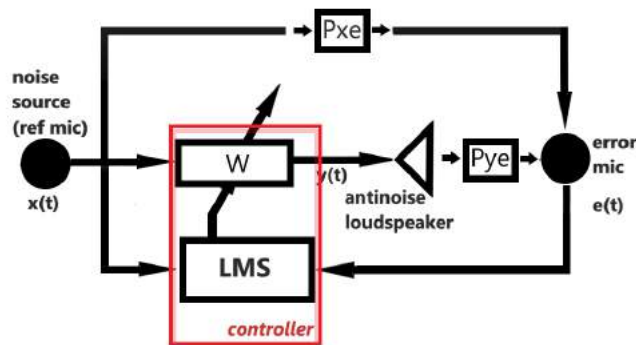
Η δημιουργία του σήματος αναφοράς  $x(t)$  μπορεί να γίνεται είτε από τον ελεγκτή όπως στο εικονιζόμενο παράδειγμα είτε να προέρχεται από το ίδιο το προς μοντελοποίηση σύστημα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική μοντελοποίηση του S, είναι το σήμα αναφοράς να προηγείται χρονικά του σήματος στόχου προκειμένου να εξασφαλίζεται η αιτιότητα του συστήματος. Η σημαντική επίδραση του γεγονότος αυτού θα φανεί στο κεφάλαιο 5 όπου γίνεται αναφορά στην επίδραση της θέσης του συστήματος για την σωστή μοντελοποίηση ενός μονοπατιού μεταξύ δύο μικροφώνων στο πλαίσιο εφαρμογής του αλγορίθμου RMT.

### 3.2 Ενεργητικός έλεγχος θορύβου

Ο αλγόριθμος LMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν για τον ενεργητικό έλεγχο θορύβου. Αποτελεί μια από τις πρώτες επιτυχημένες προσπάθειες απόσβεσης ηχητικών

διαταραχών από τους Widrow and Stearms το 1985. Λόγω της “συνεχώς προσαρμοζόμενης” ή αλλιώς adaptive φύσης του αλγορίθμου, μπορούν να αποσβεθούν χρονικά μεταβαλλόμενα ηχητικά πεδία, υπό την προϋπόθεση ότι τα χαρακτηριστικά του ηχητικού πεδίου (πλάτος, φάση, συχνότητα) μεταβάλλονται με “αργό” ρυθμό.

Ο αλγόριθμος LMS-ANC αντικαθιστά τον υπολογισμό του error σήματος, που στον αλγόριθμο LMS γίνεται υπολογιστικά με αφαίρεση των σημάτων  $d(n)$  και  $y(n)$ , με ένα μικρόφωνο που συνήθως ονομάζεται μικρόφωνο σφάλματος (error microphone).



Σχήμα 3.3: *Ενεργητικός έλεγχος θορύβου ANC*

Το error microphone τοποθετείται συνήθως κοντά σε μια συστοιχία μεγαφώνων που παράγουν έναν “ακυρωτικό” ήχο αντίθετης φάσης από το σήμα αναφοράς, το οποίο επίσης παράγεται από ένα μικρόφωνο αναφοράς (reference microphone) και τοποθετείται κοντά στην ηχητική διαταραχή. Συνεπώς, επιτυγχάνεται απόσβεση του θορύβου πάνω και σε μια μικρή ζώνη γύρω από το error microphone.

Στο σχήμα απεικονίζονται τα δύο μικρόφωνα καταγραφής, το antinoise ηχείο καθώς και τα ηχητικά μονοπάτια  $P_{xe}$  και  $P_{ye}$ . Το μονοπάτι  $P_{xe}$  συμβολίζει την ακουστική διαδρομή από το reference microphone στο error microphone, ενώ το  $P_{ye}$  συμβολίζει την ακουστική διαδρομή από το antinoise speaker στο error microphone. Ο αλγόριθμος υπολογίζει διαρκώς το βέλτιστο φίλτρο  $\mathbf{W}$  έτσι ώστε να μηδενιστεί το σήμα σφάλματος  $e(n)$  με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### 3.3 Ο αλγόριθμος FXLMS

Ο αλγόριθμος LMS-ANC παρουσιάζει προβλήματα αστάθειας και μη σύγκλισης ιδίως σε περιβάλλοντα με ασταθείς συνθήκες.

- Ασταθή και θορυβώδη ακουστικά μονοπάτια
- Ασταθή ηλεκτρομαγνητικά μονοπάτια (π.χ ακατάλληλες ηλεκτρικές γειώσεις)
- Μακρυά καλώδια
- Ηλεκτρικά συστήματα που είτε εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά, είτε είναι επιρρεπή σε μη γραμμικά φαινόμενα κ.α

Οι συνήθεις αυτές συνθήκες σε πραγματικά συστήματα δημιουργούν πολλά προβλήματα στην ευστάθεια του αλγορίθμου. Όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος LMS όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα εστιάζει στη μοντελοποίηση του φίλτρου  $\mathbf{W}$  προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το πλάτος του τελικού σήματος που λαμβάνεται από το μικρόφωνο. Αυτό ωστόσο δεν είναι αρκετό καθώς όπως θα φανεί τελικά το σύστημα δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα σωστά. Το σήμα  $e(n)$  που εισέρχεται στον αλγόριθμο LMS δεν εμπεριέχει πληροφορία για το αν ισχύει η απαραίτητη συνθήκη σύγκλισης  $e(n)=d(n)-y(n)$ . Αντιθέτως, στην πραγματικότητα, στην περίπτωση του αλγορίθμου LMS το σήμα  $e(n)$  εκφράζεται πιο σωστά ως: [28, 16]:

$$e(n) = d(n) - s(n) * y(n) \quad (3.3.1)$$

όπου  $s(n)$  είναι η κρουστική απόκριση του  $\mathbf{S}(\mathbf{z})$ , που περιλαμβάνει τα μονοπάτια μετάδοσης όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα (3.1). Το σήμα  $y(n)$  εξακολουθεί να είναι:

$$y(n) = \mathbf{w}^T(\mathbf{n})\mathbf{x}(n) \quad (3.3.2)$$

Επομένως το error σήμα που "φτάνει" στον LMS είναι:

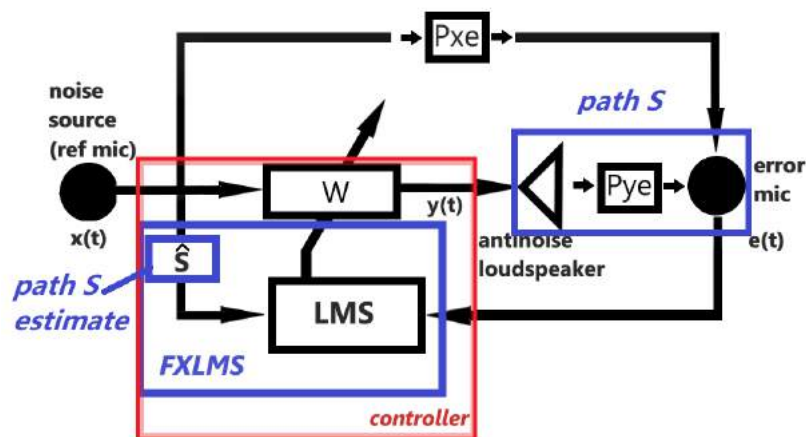
$$e(n) = d(n) - s(n) * [\mathbf{w}^T(\mathbf{n})\mathbf{x}(n)] \quad (3.3.3)$$

Η εξίσωση (3.3.3) σύμφωνα με τον τύπο της συνέλιξης (2.1.1) μπορεί να γραφτεί ως το διπλό άθροισμα

$$e(n) = d(n) - \sum_{k=0}^{L-1} s_k \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n-k)x(n-k-l) \quad (3.3.4)$$

Επίσης, με απλή ανακατανομή των όρων της (3.3.4)

$$e(n) = d(n) - \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} w_l(n-k)s_k x(n-k-l) \quad (3.3.5)$$



Σχήμα 3.4: Ο αλγόριθμος FXLMS



Έστω  $x'(n)$  το σήμα που προκύπτει από τη συνέλιξη του  $x(n)$  με το μονοπάτι  $\mathbf{S}$  κρουστικής απόκρισης  $s(n)$ :

$$x'(n) = s(n) * x(n) \quad (3.3.6)$$

$$x'(n) = \sum_{k=0}^{L-1} s_k x(n-k) \quad (3.3.7)$$

Αν το  $w_l(n)$  μεταβάλλεται αργά προκύπτει ότι το error σήμα που τελικά φτάνει στον αλγόριθμο LMS είναι περίπου ίσο με

$$e(n) = d(n) - \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x'(n-l) \quad (3.3.8)$$

Ο Widrow [1985] [1] εντοπίζοντας αυτή την ανωμαλία πρότεινε το σήμα αναφοράς  $x(n)$  που εισέρχεται στον LMS να αντικατασταθεί από το σήμα

$$x'(n) = \hat{s}(n) * x(n) \quad (3.3.9)$$

όπου  $\hat{s}(n)$  η κρουστική απόκριση της μοντελοποιημένης διαδρομής, προκειμένου να αντισταθμίσει την επίρεια της δευτερεύουσας διαδρομής και ο LMS να αποδίδει καλύτερα.

Ο αλγόριθμος FX-LMS έχει καθιερωθεί ως ο πλέον αποτελεσματικός αλγόριθμος ενεργητικού ελέγχου θορύβου και εφαρμόζεται πολλά χρόνια με επιτυχία σε πολλά συστήματα. Βασικό μειονέκτημα του είναι η αδυναμία του να αποκόψει ασυσχέτιστο θόρυβο καθώς και η μείωση της απόδοσης του με την αύξηση των αρμονικών συνιστωσών του προς απόσβεση θορύβου. Ωστόσο, για τις ανάγκες της εφαρμογής του εργαστηρίου αποδείχτηκε ικανοποιητικός καθώς ζητούμενο ήταν η αποκοπή μόνο δύο συχνοτήτων. Για την αποκοπή περισσότερο ασυσχέτιστου θορύβου και για την αντιμετώπιση μη γραμμικών ακουστικών φαινομένων αναπτύσσονται πλέον μη γραμμικές τεχνικές τύπου (Flann, Voltera) κ.α.





Στόχος του αλγορίθμου είναι η δημιουργία ζώνης ησυχίας στην περιοχή virtual-(v στην εικόνα) όπου δεν υπάρχει μικρόφωνο. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί αρχικά ένα off-line στάδιο μοντελοποίησης των μονοπατιών όπως περιγράφηκε στην ενότητα (3.1), πριν την τελική εφαρμογή του ενεργητικού ελέγχου θορύβου. Απαιτείται η μοντελοποίηση δύο μονοπατιών:

- Ηλεκτροακουστικό μονοπάτι μεταξύ ηχείου-φυσικού μικροφώνου [antinoise speaker-physical mic]:  $\hat{S}_p$
- Ηλεκτροακουστικό μονοπάτι μεταξύ ηχείου-“εικονικού” μικροφώνου [antinoise speaker-virtual mic]:  $\hat{S}_v$ ,

Το εικονικό μικρόφωνο ή αλλιώς virtual microphone είναι ένα πραγματικό μικρόφωνο που τοποθετείται στο σύστημα ANC μόνο κατά τη διάρκεια μοντελοποίησης του αντίστοιχου μονοπατιού. Με το πέρας της μοντελοποίησης απομακρύνεται από το σύστημα.

Η μοντελοποίηση, εφόσον τα χαρακτηριστικά του συστήματος παραμένουν αναλλοίωτα μπορεί να γίνει μόνο την πρώτη φορά ενεργοποίησης του συστήματος και τα προκύψαντα μονοπάτια μπορούν να αποθηκευτούν στη μόνιμη μνήμη του ελεγκτή. Επομένως κάθε φορά που το σύστημα ενεργοποιείται μπορεί να παραλείπεται το στάδιο μοντελοποίησης.

Στο στάδιο ενεργητικού ελέγχου θορύβου (ANC), ζητούμενο είναι η προσέγγιση του σήματος σφάλματος  $e_v$  έχοντας γνώση του  $e_p$ . Το σήμα  $e_v$ , δηλαδή το σήμα που “ακούει” ένα νοητό μικρόφωνο αν θεωρηθεί ότι βρίσκεται στη θέση του ακροατή κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος ANC, είναι:

$$e_v(n) = y_v(n) + d_v(n) \quad (4.1.1)$$

όπου

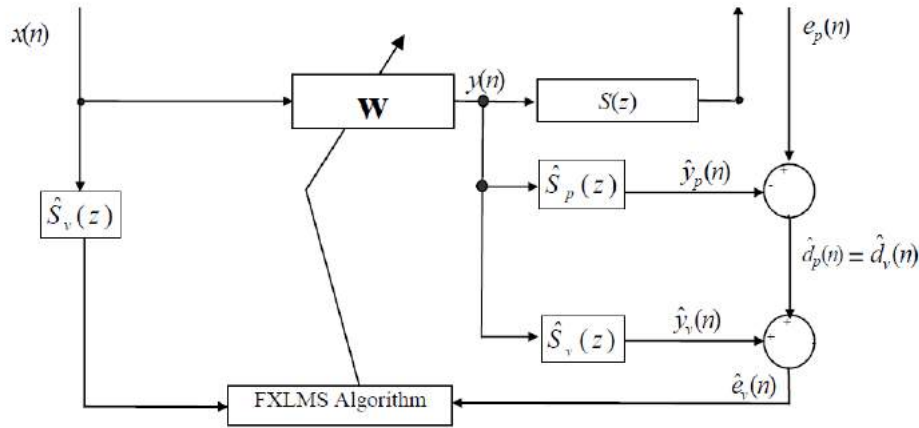
$y_v$ : το σήμα που φτάνει στο virtual μικρόφωνο από το ηχείο ελέγχου (antinoise speaker) και  $d_v$ : το σήμα που προέρχεται από την πηγή θορύβου.

Για τη κατασκευή του  $y_v$  χρησιμοποιείται το μοντέλο του μονοπατιού μεταξύ του antinoise ηχείου και του virtual μικροφώνου (που τοποθετείται μόνο κατά τη φάση μοντελοποίησης για τον υπολογισμό του μονοπατιού) ως εξής:

$$y_v(n) = \hat{s}_v(n) * y(n) \quad (4.1.2)$$

Ο αλγόριθμος θεωρεί ότι το ακουστικό πεδίο που προέρχεται από την πηγή θορύβου είναι το ίδιο και στα δύο μικρόφωνα, γεγονός που ισχύει υπό τις προϋποθέσεις ότι η απόσταση της πηγής θορύβου είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με την απόσταση των δύο μικροφώνων, και ότι το μήκος κύμματος του θορύβου είναι μεγάλο [πηγή]. Τότε το σήμα  $d_v$  μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το  $d_p$ . Ωστόσο το  $d_p$  δεν είναι άμεσα διαθέσιμο καθώς το σήμα του φυσικού μικροφώνου είναι:

$$e_p(n) = y_p(n) + d_p(n) \quad (4.1.3)$$



Σχήμα 4.2: Ενεργητικός έλεγχος με τον VM αλγόριθμο

Οπότε το  $d_v$  μπορεί να σχηματιστεί από τη διαφορά του σήματος του φυσικού μικροφώνου με το σήμα θορύβου που προσκρούει στο νοητό μικρόφωνο:

$$d_v(n) = e_p(n) - y_p(n) \quad (4.1.4)$$

Ο αλγόριθμος VM επιχειρεί να εκτιμήσει το σήμα που θα λάμβανε ένα νοητό μικρόφωνο αν ήταν τοποθετημένο στα αυτιά του χρήστη. Ο εν λόγω αλγόριθμος θεωρεί ότι το ακουστικό πεδίο που προέρχεται από την πηγή θορύβου είναι το ίδιο και στα δύο μικρόφωνα. Συνεπώς, πετυχαίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση ηχητικών κυμάτων μεγάλου μήκους κύματος και άρα χαμηλών συχνοτήτων όπου εμφανίζεται ομοιομορφία στην ηχητική πίεση. Επίσης άλλοι δύο παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του αλγόριθμου είναι η απόσταση της ηχητικής διαταραχής από το σύστημα καθώς και από τον αριθμό των δευτερευουσών ηχητικών διαταραχών που δημιουργούνται λόγω της γεωμετρίας του χώρου. Μεγαλύτερη απόσταση κύριας και δευτερευουσών ηχητικών διαταραχών εγγυάται την μεγαλύτερη ακρίβεια και ευσταθία του αλγόριθμου.

## 4.2 Remote Microphone Technique

Η τεχνική RMT προτάθηκε το 1996 από τον Porovich [4]. Αποτελεί μια επέκταση του VM αλγόριθμου, ενώ η κύρια διαφορά της είναι η μη θεώρηση του ότι τα ηχητικά σήματα  $d_p(n)$  και  $d_v(n)$  που φτάνουν στα δύο μικρόφωνα από την πηγή θορύβου ταυτίζονται. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική RMT θεωρεί σημαντική την επίδραση του ακουστικού μονοπατιού μεταξύ των δύο μικροφώνων. Το ακουστικό αυτό μονοπάτι για τα επόμενα συμβολίζεται ως  $\mathbf{H}$  ενώ η σχέση που συνδέει τα σήματα  $d_p(n)$  και  $d_v(n)$  γράφεται ως

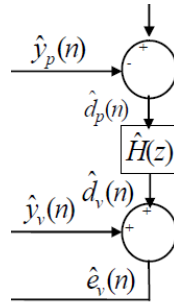
$$d_v(n) = h(n) * d_p(n) \quad (4.2.1)$$

όπου  $h(n)$  η κρουστική απόκριση του μονοπατιού  $\mathbf{H}$ . Η συγκεκριμένη τεχνική απαιτεί την μοντελοποίηση 3 (έναντι 2 του αλγόριθμου VM) μονοπατιών.

- Ηλεκτροακουστικό μονοπάτι μεταξύ [antinoise speaker-physical mic]:  $\hat{S}_p$

- Ηλεκτροακουστικό μονοπάτι μεταξύ [antinoise speaker-virtual mic]:  $\hat{S}_v$ ,
- Ηλεκτροακουστικό μονοπάτι μεταξύ [physical mic-virtual mic]:  $\hat{H}$

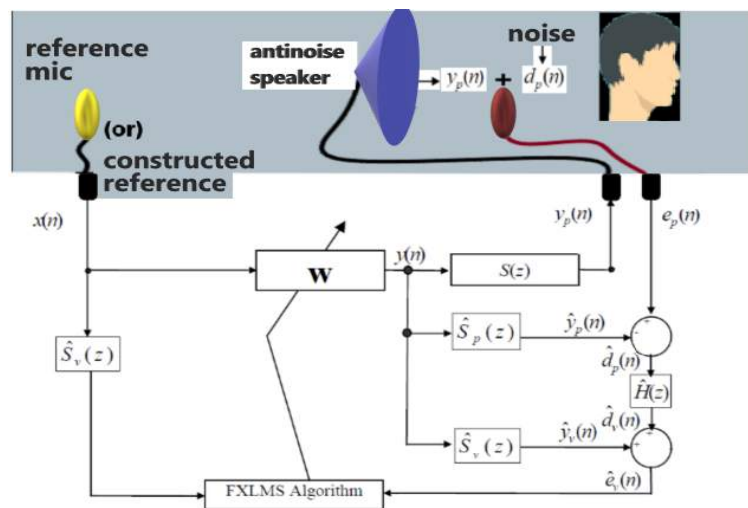
Τα μοντέλα των δύο πρώτων μονοπατιών παράγονται διαδοχικά όπως στην περίπτωση του αλγορίθμου VM. Πολύ προσοχή απαιτεί η διατύπωση του νέου μοντέλου  $\mathbf{H}$ .



Σχήμα 4.3: Η επίδραση του μονοπατιού  $H$

Ως μονοπάτι  $\mathbf{H}$  ορίζεται η ηλεκτρο-ακουστική συνάρτηση μεταφοράς που έχει ως είσοδο το σήμα  $e_p(n)$  και ως έξοδο το σήμα  $e_v(n)$ , όταν και μόνο όταν στον χώρο είναι ενεργή μόνο η αρχική πηγή θορύβου (noise source). Αναλυτικά τα σήματα  $e_p(n)$  και  $e_v(n)$  είναι:

- $e_p(n)$ : το σήμα που προκύπτει από το φυσικό-μόνιμα τοποθετημένο μικρόφωνο physical microphone.
- $e_v(n)$ : το σήμα που προκύπτει από το φυσικό-εικονικό (προσωρινά τοποθετημένο) μικρόφωνο virtual microphone.



Σχήμα 4.4: Ενεργητικός έλεγχος με τον αλγόριθμο RMT

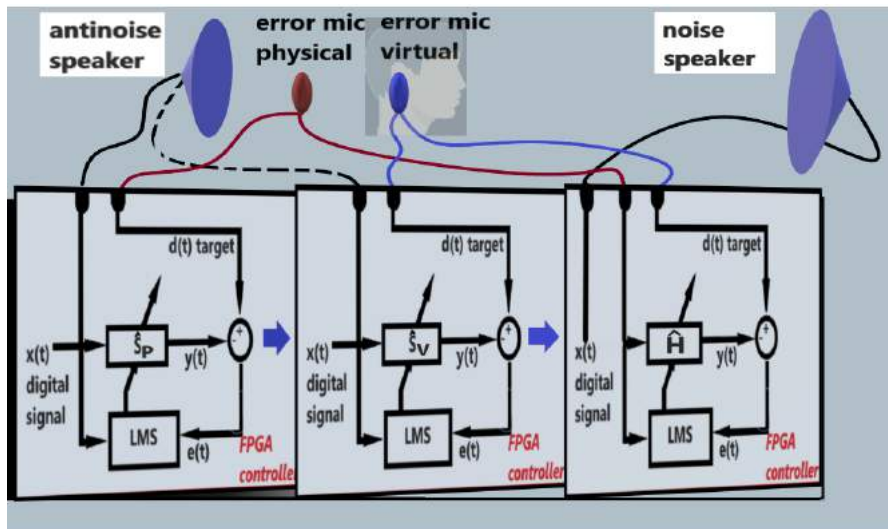
Όταν και μόνο όταν είναι ενεργή μόνο η αρχική πηγή θορύβου ισχύει ότι

$$d_p(n) = e_p(n) \quad (4.2.2)$$

$$d_v(n) = e_v(n) \quad (4.2.3)$$

καθώς τα σήματα  $y_p(n)$  και  $y_v(n)$  είναι μηδενικά ενώ έχει θεωρηθεί ότι για το συνολικό σύστημα ισχύουν οι εξισώσεις (4.1.1) και (4.1.3).

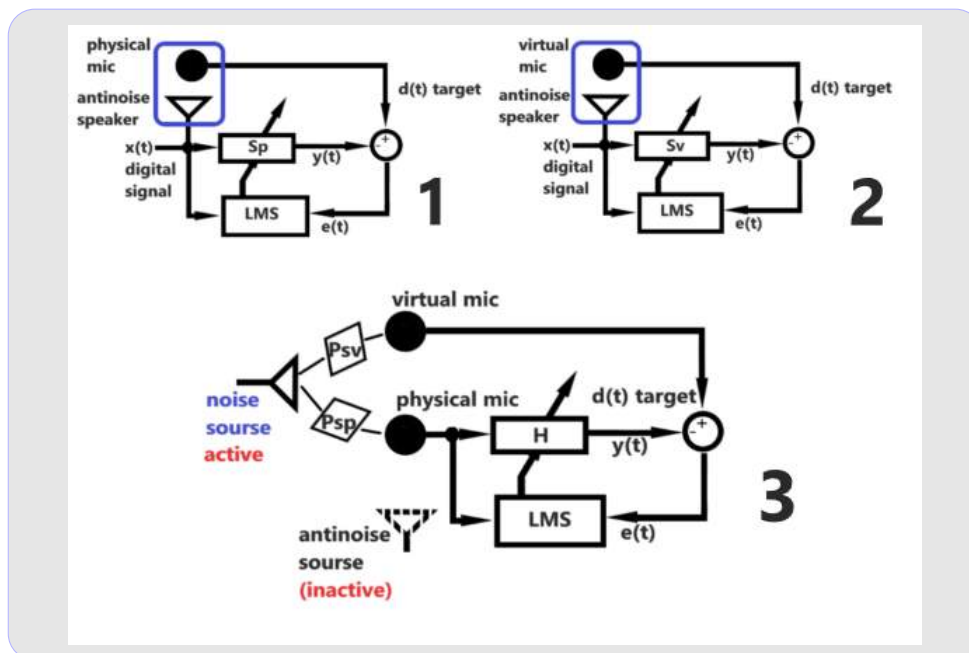
Στα σχήματα (4.5) και (4.6) παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία μοντελοποίησης όλων των μονοπατιών. Η σειρά μοντελοποίησης δεν έχει σημασία καθώς τα τρία μονοπάτια είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.



Σχήμα 4.5: Στάδια μοντελοποίησης μονοπατιών της τεχνικής RMT

Κατά τη διάρκεια μοντελοποίησης των  $S_p$  και  $S_v$  είναι ενεργοποιημένο μόνο το antinoise ηχείο ενώ γίνεται η θεώρηση ότι δεν υπάρχουν άλλες πηγές θορύβου στο χώρο. Αντίθετα, για τη μοντελοποίηση του  $H$  χρησιμοποιείται μόνο ο περιβάλλον θόρυβος ακριβώς για να μοντελοποιηθεί η διαφορά μεταξύ των φυσικών διαταραχών  $d_p$  και  $d_v$  [22].

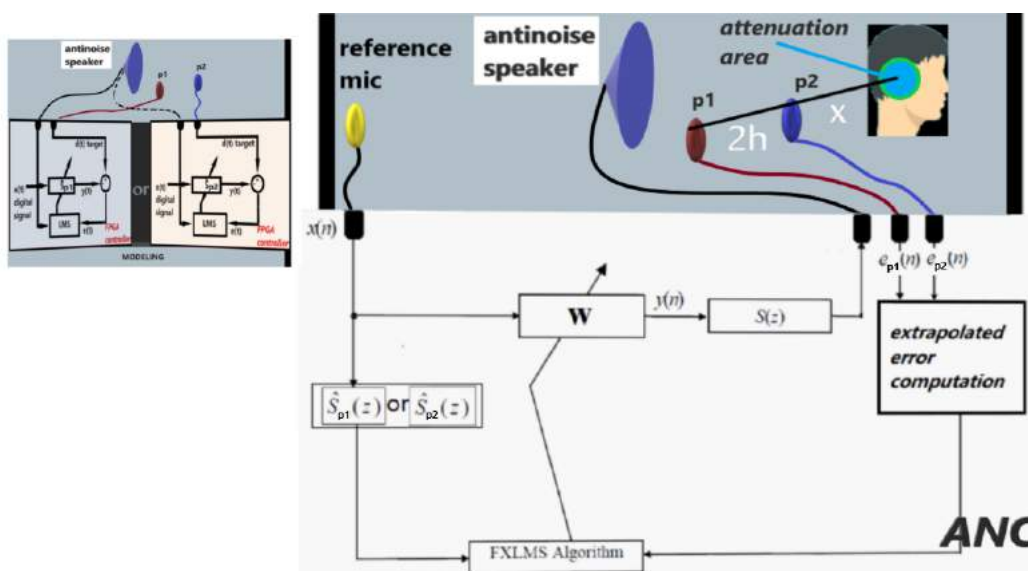
Ο αλγόριθμος RMT έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά συστήματα ενεργητικού ελέγχου θορύβου με αρκετά καλά και σε ορισμένες περιπτώσεις εξαιρετικά αποτελέσματα. Ωστόσο, παρουσιάζει μεγάλη εξάρτηση από το χώρο και τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος [22]. Όπως θα φανεί στο επόμενο κεφάλαιο η θέση του συστήματος στο χώρο επηρεάζει καθοριστικά την ποιότητα μοντελοποίησης του μονοπατιού  $H$  και συνεπώς την απόδοση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η φορά πρόσπτωσης του ηχητικού πεδίου στα δύο μικρόφωνα (physical και virtual microphones) κατά τη διάρκεια μοντελοποίησης του  $H$ , καθορίζει το βαθμό αιτιατότητας (casuality) του συστήματος που αποτελεί σημαντικό παράγοντα σύγκλισης του αλγορίθμου LMS [22]. Για το λόγο αυτό, συνήθως απαιτείται η μοντελοποίηση του μονοπατιού  $H$  σε ανηχοικό χώρο με τοιχώματα μηδενικής ανάκλασης για τον απόλυτο έλεγχο της φοράς πρόσπτωσης του ηχητικού πεδίου. Άλλο μειονέκτημα του αλγορίθμου RMT αποτελεί η εξάρτηση του από τη θέση της πηγής θορύβου: Αλλαγή της θέσης της πηγής συνεπάγεται διαφορετικό φυσικό μοντέλο  $H$  και συνεπώς είναι απαραίτητη η εκ νέου μοντελοποίηση του  $H$  για κάθε μετακίνηση της πηγής [26]. Προσπάθειες αντιμετώπισης του εν λόγω προβλήματος έχουν δοκιμασθεί με επιτυχία από τους Koba, Kondo και Kijimoto [2011].



Σχήμα 4.6: Στάδια μοντελοποίησης μονοπατιών τεχνικής RMT- αναλυτικά

### 4.3 Μέθοδος εμπρόσθιας πρόβλεψης πεδίου - Extrapolation

Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η απόσβεση πεδίων ήχου χαμηλής συχνότητας η μέθοδος εμπρόσθιας πρόβλεψης (extrapolation) μπορεί να προσφέρει πολύ καλά αποτελέσματα. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται δύο συστοιχίες φυσικών μικροφώνων εκ των οποίων η μία τοποθετείται πιο μπροστά από την άλλη.



Σχήμα 4.7: Η τεχνική της εμπρόσθιας πρόβλεψης- extrapolation

Η τεχνική extrapolation, όπως προτείνεται από τον Cazzolato [1999] [5], ταυριάζει με ένα πολυώνυμο τα σήματα από έναν αριθμό φυσικών μικροφώνων. Η πίεση στην εικονική τοποθεσία εκτιμάται με παρέκταση αυτού του πολυωνύμου στην εικονική τοποθεσία. Αυτός



ο αλγόριθμος εικονικής ανίχνευσης είναι κατάλληλος όταν η εικονική απόσταση και η απόσταση μεταξύ των φυσικών μικροφώνων είναι πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος της ηχητικής διαταραχής. Σε χαμηλές συχνότητες, ο χωρικός ρυθμός μεταβολής της ηχητικής πίεσης μεταξύ των μικροφώνων είναι μικρός και επομένως μπορεί να εφαρμοστεί η εν λόγω τεχνική.

Θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή ηχητικής πίεσης στο χώρο μπορεί να θεωρηθεί η εκτίμηση πρώτης τάξης [7]

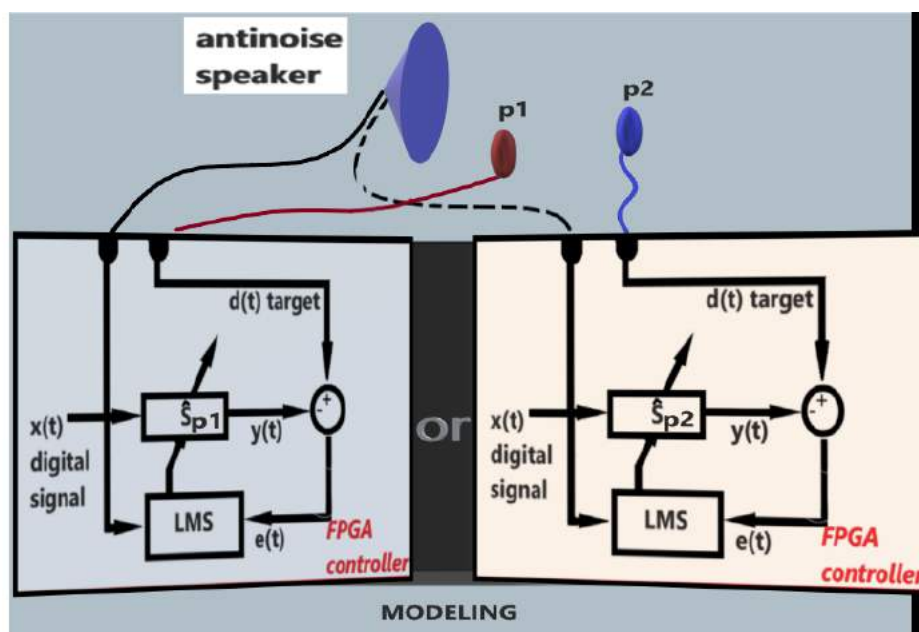
$$p(x) = \frac{dp}{dx}x + c \quad (4.3.1)$$

αν θεωρηθεί ως επίπεδο 0 το μικρόφωνο  $p_2$ :

$$p(0) = p_2 \quad (4.3.2)$$

προκύπτει ότι η εκτίμηση πρώτης τάξης της πίεσης σε ένα σημείο του χώρου δεδομένων δύο διαδοχικών πιέσεων  $p_1$  και  $p_2$  είναι

$$p(x) = \frac{p_2 - p_1}{2h}x + p_2 \quad (4.3.3)$$



Σχήμα 4.8: Στάδια μοντελοποίησης μονοπατιών τεχνικής extrapolation

Η τεχνική extrapolation παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της αποστάσεως της ζώνης ησυχίας από τα φυσικά μικρόφωνα μέσω ενός περιβάλλοντος διεπαφής με υπολογιστή. Μάλιστα η δυνατότητα αυτή παρέχεται σε πραγματικό χρόνο εν αντιθέσει με τις υπόλοιπες τεχνικές νοητού μικροφώνου που απαιτούν την εκ των νέου μοντελοποίηση μονοπατιών για τη μετακίνηση της ζώνης ησυχίας. Η απλότητα της μεθόδου, προσφέρει το πλεονέκτημα της συγχώνευσης με άλλες μεθόδους και αλγόριθμους για τη βελτίωση της συνολικής εμπειρίας του χρήστη. Πιο συγκεκριμένα ένα σύστημα ανίχνευσης της θέσης των αυτιών του χρήστη

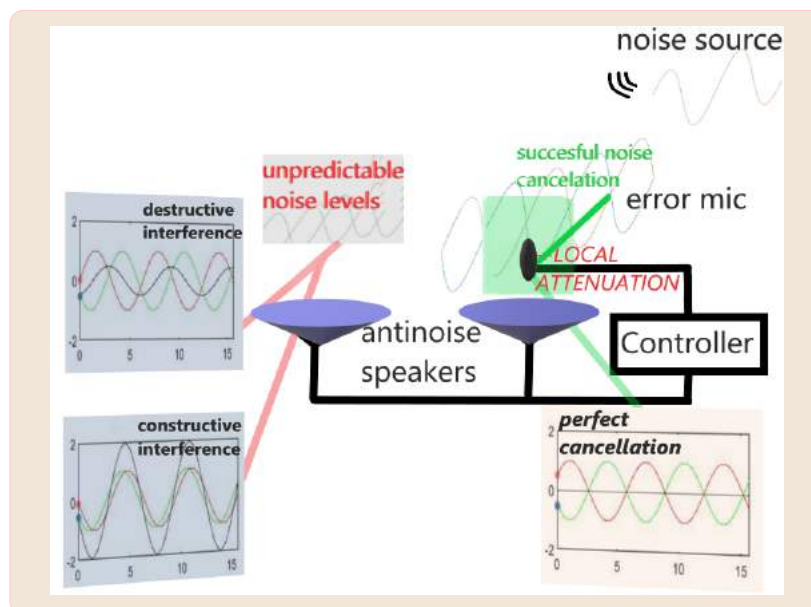
μπορεί να τροφοδοτεί τον αλγόριθμο extrapolation ώστε να εκτιμάται αυτομάτως η επιθυμητή ζώνη αποκοπής.

#### 4.4 Άθροισμα error μικροφώνων

Η χρήση ενός συστήματος SISO που λαμβάνει πληροφορία από πολλά μικρόφωνα αντί για ένα προσφέρει το πλεονέκτημα της εκτιμήσεως της ηχητικής πίεσης σε μία ευρύτερη περιοχή. Αυτό έχει ισχύ ιδίως στην περίπτωση θορύβου χαμηλών συχνοτήτων. Ο αλγόριθμος ελάχιστων τετραγώνων λαμβάνει ως είσοδο σε αυτή την περίπτωση το μέσο χωρικό ηχητικό σφάλμα. Επομένως δημιουργείται ένα σήμα το οποίο δεν δύναται να αποσβέσει πλήρως το ηχητικό πεδίο σε ένα σημείο του χώρου αλλά ωστόσο αποσβένει σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό την ηχητική πίεση σε μία ευρύτερη περιοχή.

Στο σχήμα (4.9) περιγράφεται μια περίπτωση εφαρμογής τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου με ένα μικρόφωνο και δύο ηχεία τα οποία παράγουν ακριβώς τον ίδιο ήχο. Αν θεωρηθεί πως έχει επιτευχθεί η σύγκλιση του αλγορίθμου FXLMS, τότε στην περιοχή του μικροφώνου θα έχει επέλθει μείωση της ηχητικής πίεσης. Ωστόσο, στην γειτονική περιοχή, το αριστερά ηχείο παράγει ένα ηχητικό κύμα κατάλληλο για να αποσβέσει το θόρυβο στο σημείο του μικροφώνου.

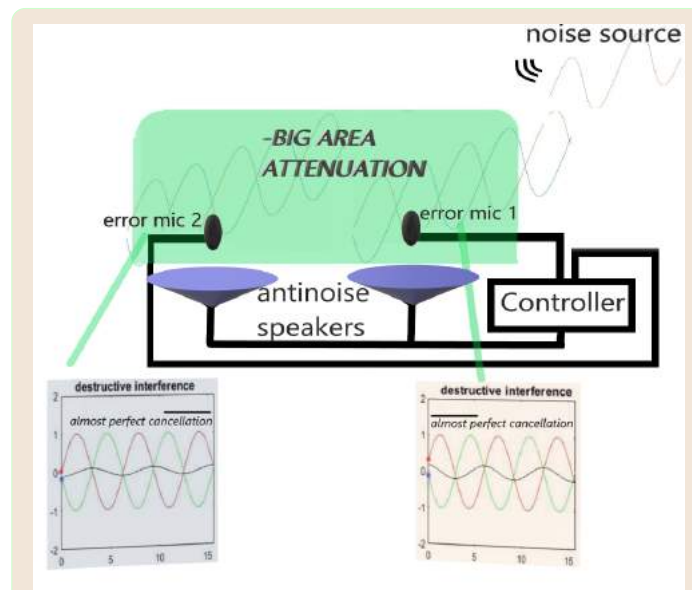
Αναλόγως με τις διαστάσεις του συστήματος καθώς και του μήκους κύματος της ηχητικής διαταραχής, είναι πιθανό στην περιοχή του αριστερά ηχείου να υπάρχει ενίσχυση (ενισχυτική συμβολή) ή μερική απόσβεση (καταστροφική συμβολή) του ηχητικού πεδίου της αριστερής περιοχής. Συνεπώς επιτυγχάνεται μόνο τοπικός έλεγχος.



Σχήμα 4.9: Εφαρμογή τοπικού ANC με ένα μικρόφωνο.

Η διάταξη που απεικονίζεται στο σχήμα (4.10) θεωρεί πως ο ελεγκτής λαμβάνει πληροφορία από δύο μικρόφωνα. Και σε αυτή την περίπτωση το σήμα οδήγησης είναι κοινό και για τα δύο ηχεία. Αν ο ελεγκτής θεωρήσει ως σήμα σφάλματος το σήμα που προκύπτει από το άθροισμα των δύο μικροφώνων, τότε παράγει ένα antinoise σήμα οδήγησης των ηχείων

που (στην περίπτωση χαμηλών συχνοτήτων) είναι καταλληλότερο για την δημιουργία μιας μεγαλύτερης ζώνης ησυχίας.



Σχήμα 4.10: Εφαρμογή εκτεταμένου ANC με δύο μικρόφωνα.



---

## Κεφάλαιο 5

# Προσομοιώσεις

---

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των αλγορίθμων ενεργητικού ελέγχου θορύβου που αναπτύχθηκαν θεωρητικά στα προηγούμενα κεφάλαια. Πρώτα παρουσιάζεται η διάταξη του απλού FXLMS αλγορίθμου η οποία παρουσιάζει εξαιρετικά αποτελέσματα πολύ κοντά στην περιοχή του μικροφώνου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο διατάξεις εικονικού μικροφώνου εκ των οποίων η δεύτερη λαμβάνει υπόψη την ακουστική διαδρομή μεταξύ του φυσικού και του εικονικού μικροφώνου. Τελευταία παρατίθενται τα αποτελέσματα της τεχνικής extrapolation. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η τελευταία τεχνική υπερτερεί σε σχέση με τις προηγούμενες τόσο ως προς το εύρος της δημιουργούμενης ζώνης ησυχίας όσο και ως προς την συνολική μείωση του θορύβου στην περιοχή, προσθέτοντας ωστόσο το αναπόφευκτο κόστος επιπλέον υλικού (μικρόφωνων).

Επιπλέον παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προς εξέταση συστήματος που απαρτίζεται από δύο ηχητικές πηγές. Προσπάθεια έγινε για την ενσωμάτωση όσο το δυνατόν περισσότερων χαρακτηριστικών του φυσικού συστήματος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της πραγματικής διάταξης παρουσιάζονται τελευταία.

### 5.1 Το περιβάλλον προσομοίωσης K-Wave

Προκειμένου να μελετηθούν σε βάθος οι αλγόριθμοι ενεργητικού ελέγχου θορύβου για την επίτευξη μιας επαρκούς για τις ανάγκες της εφαρμογής ζώνης ησυχίας, αναπτύχθηκαν προσομοιώσεις στο υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB. Το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται βασίζεται στη λύση τριών πρωτοβάθμιων μερικών διαφορικών εξισώσεων που είναι ισοδύναμες με τη γενικευμένη μορφή της εξίσωσης Westervelt. Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται με την μέθοδο k-space. Τα μοντέλα που αναπτύσσονται προσομοιώνουν τη διάδοση δισδιάστατων και τρισδιάστατων ακουστικών κυμάτων στο πεδίο του χρόνου.

### 5.2 Παράμετροι προσομοιώσεων

Η μέθοδος k-space προσφέρει πολλές δυνατότητες και μεγάλη ευελιξία όσον αφορά την επιλογή διαφόρων παραμέτρων του συστήματος. Είναι δυνατή τόσο η δισδιάστατη όσο και η τρισδιάστατη επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, η επιλογή διαφορετικών ηχητικών πηγών με ποικίλα σχήματα και χαρακτηριστικά, καθώς και η τοποθέτηση υλικών στοιχείων και κάθε είδους επιφανειών στο χώρο.

Η ανάπτυξη αλγορίθμου προσομοίωσης του συστήματος ενεργητικού ελέγχου θορύβου στο εν λόγω περιβάλλον, έγινε δυνατή χάρη στη δυνατότητα γνώσης της ηχητικής πίεσης

σε κάθε σημείο του χώρου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο χρήστης έχει γνώση του ακουστικού πεδίου σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου και μπορεί να την επηρεάσει μέσω χρονικά ελεγχόμενων ηχητικών πηγών-ηχείων που τοποθετεί όπου επιθυμεί. Για τους αλγόριθμους ANC που αναπτύχθηκαν υλοποιήθηκε ένα επαναληπτικό σχήμα όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 5.1: Αλγόριθμος προσομοίωσης ενεργητικού ελέγχου θορύβου στο περιβάλλον προσομοίωσης *k*-wave.

**Βήμα 1:** Προσδιορισμός περιβάλλοντος χώρου και πυκνότητας υλικού διάδοσης.  
**Βήμα 2:** Προσδιορισμός των διαστάσεων του χώρου και του χωρικού και χρονικού βήματος προσομοίωσης.  
**Βήμα 3:** Τοποθέτηση πηγών θορύβου, μικροφώνων αναφοράς (reference microphone), μικροφώνων σφάλματος (error microphone) και ηχείων ελέγχου (antionise speakers).  
**Βήμα 4:** Αρχικοποίηση παραμέτρων πηγής-ων θορύβου.  
**while** αριθμός επανάληψης **is smaller than** επιθυμητός αριθμός επαναλήψεων **do**  
    **Βήμα 5:** Καταγραφή ακουστικής πίεσης στα error και reference microphones.  
    **Βήμα 6:** Τροφοδότηση ANC αλγορίθμου και ανανέωση των βαρών **W**.  
    **Βήμα 7:** Υπολογισμός σήματος  $y(n)$ .  
    **Βήμα 8:** Τροφοδότηση antionise ηχείων με το υπολογισμένο σήμα.  
**end while**

### 5.3 Επιλογή παραμέτρων προσομοιώσεων

Για τις παραμέτρους των προσομοιώσεων θεωρήθηκαν

- Ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον αέρα: 349m/s.
- Διαστάσεις περιβάλλοντος χώρου 12m x 12m.
- Χωρικό βήμα προσομοίωσης 10cm. Συνεπώς, ως μικρότερο στοιχείο στο δισδιάστατο επίπεδο θεωρείται στοιχείο διαστάσεων 10cm x 10cm.
- Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί χρόνοι προσομοίωσης για κάθε προσομοίωση.
- Διαστάσεις μικροφώνου: 10cm x 10cm. Διαστάσεις ηχείου: 10cm x 10cm.
- Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της επιδεικτικής εφαρμογής, για τις προσομοιώσεις κατασκευάστηκε θόρυβος δύο αρμονικών συνιστωσών 80 και 160Hz με background λευκό θόρυβο. Το σύστημα εμφανίζει συνολικό επίπεδο θορύβου 80dB στην περιοχή του ANC συστήματος πριν την ενεργοποίηση του ANC.

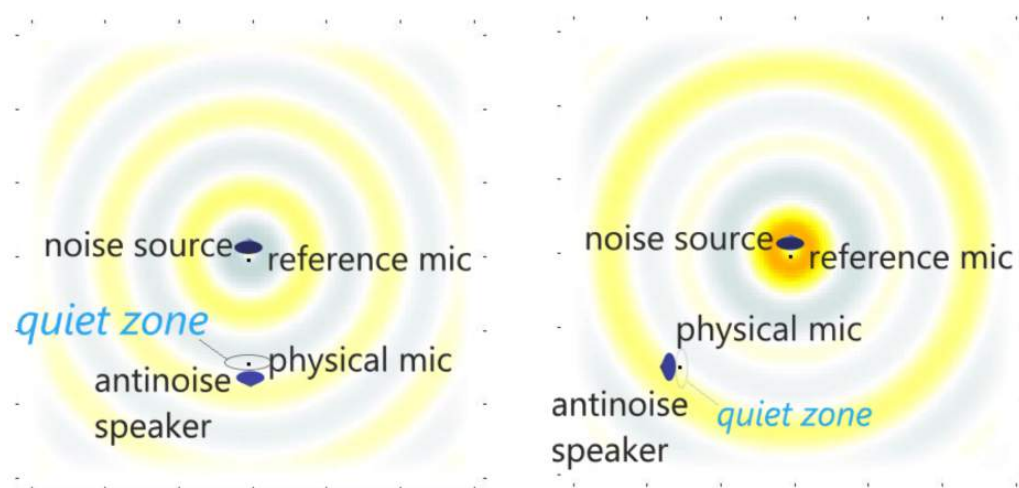
Για τις παραμέτρους των αλγορίθμων ANC θεωρήθηκαν:

- Μήκος φίλτρων filter length ( $L$ )=100 και step size ( $\mu$ )=0.000001

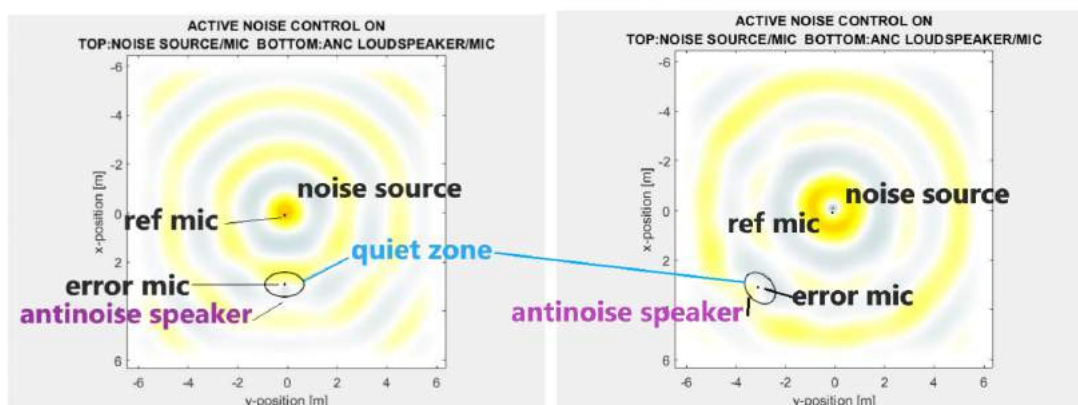
Επιλέχθηκε μεγάλο χωρικό βήμα για την γρήγορη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Οι προσομοιώσεις στις τρεις πρώτες υποενότητες που ακολουθούν δίνουν μια εκτίμηση του βέλτιστου αλγορίθμου. Στην τελευταία υποενότητα, δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μιας περισσότερο "πραγματικής" διάταξης.

## 5.4 Προσομοιώσεις μεθόδου ενεργητικού ελέγχου θορύβου τύπου FXLMS

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον αλγόριθμο FXLMS. Στο σχήμα (5.1) απεικονίζονται οι δύο διατάξεις που υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον προσομοίωσης k-wave για την μέτρηση της απόδοσης του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Οι δύο διατάξεις χρησιμοποιούν τον ίδιο αριθμό στοιχείων αλλά η θέση του συστήματος ANC, που απαρτίζεται από ένα antinoise speaker και ένα error microphone, είναι διαφορετική στις δύο διατάξεις.



Σχήμα 5.1: Διατάξεις προσομοίωσης απλού FXLMS. Αριστερά: Διάταξη 1. Δεξιά: Διάταξη 2

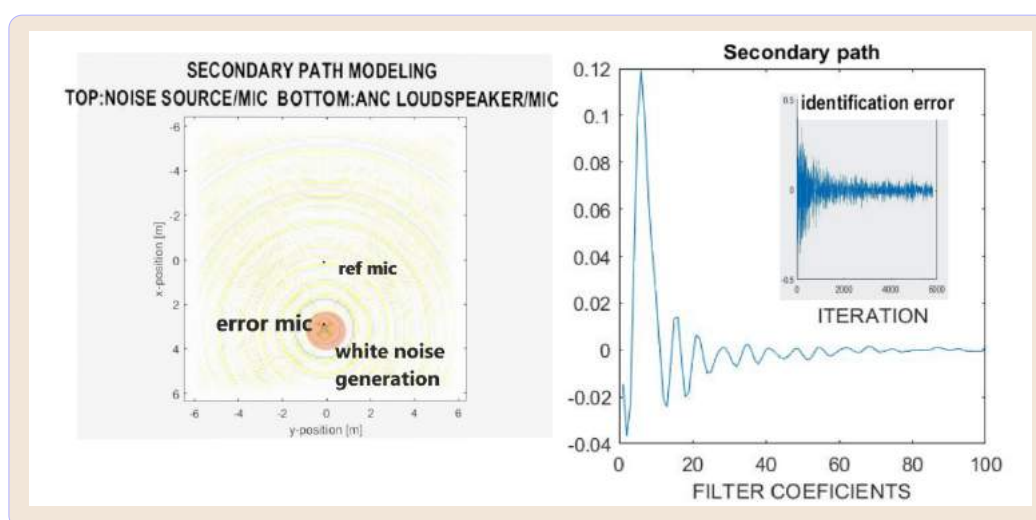


Σχήμα 5.2: Συμμότωση ενεργητικού ελέγχου για τις δύο διατάξεις FXLMS

Επιλέχθηκαν δύο κάθετες μεταξύ τους θέσεις τοποθέτησης του συστήματος προκειμένου να εκτιμηθεί το πόσο επηρεάζει η γωνία πρόσπτωσης του ηχητικού κύματος την απόδοση του αλγορίθμου. Στο σχήμα (5.2) παρατίθενται στιγμιότυπα κατά τον ενεργητικό έλεγχο θορύβου.

### Φάση μοντελοποίησης μονοπατιών (Modeling Paths Phase)-διάταξη 1

Πρίν τον ενεργητικό έλεγχο πρέπει να προηγηθεί μοντελοποίηση του δευτερεύοντος μονοπατιού όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα (3.1), για βελτίωση της απόδοσης του αλγορίθμου. Παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από τη φάση μοντελοποίησης, το προκύπτον μονοπάτι και το σφάλμα του LMS αλγορίθμου. Εφόσον το σφάλμα μηδενίζεται ο αλγόριθμος LMS δείχνει να καταφέρνει να δημιουργήσει μια "καλή" εκτίμηση του Secondary Path ( $\hat{S}$ ).



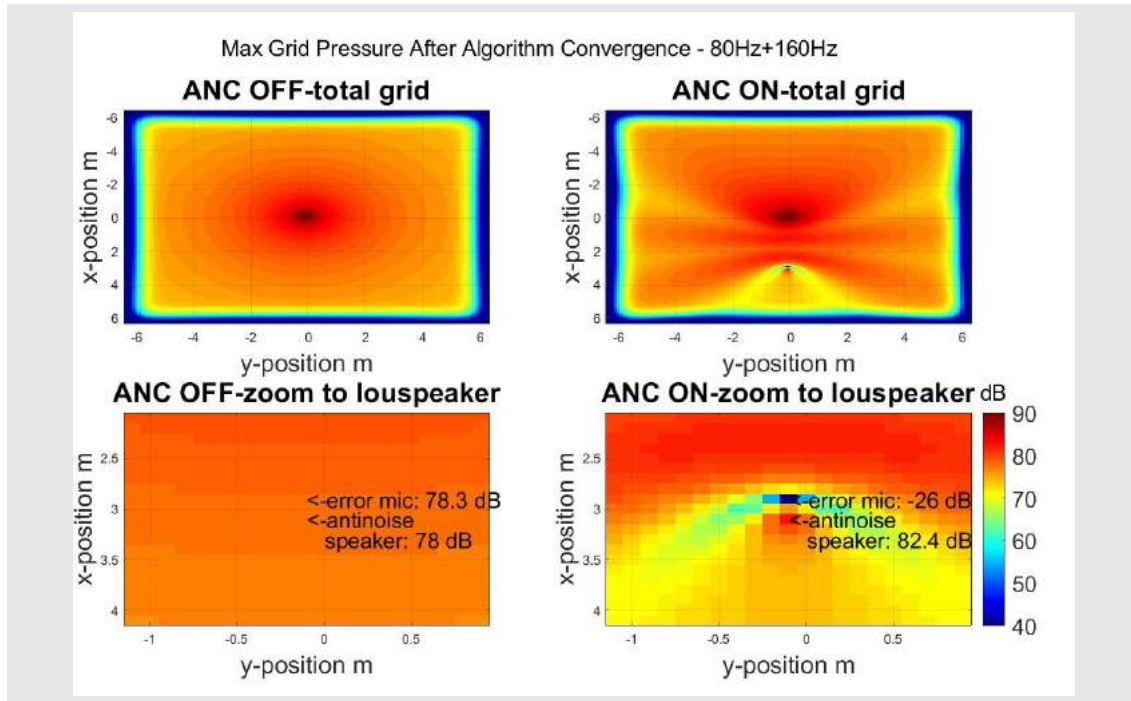
Σχήμα 5.3: Στάδιο μοντελοποίησης μονοπατιού

Στο σχήμα (5.3) απεικονίζονται τα αποτελέσματα μοντελοποίησης για τη διάταξη 1. Η διαδικασία γίνεται με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παράγραφο (3.1) με το αντι-noise ηχείο να αναπαράγει μια τυχαία τύπου λευκού θορύβου - white noise κυματομορφή. Σε αυτό το στάδιο είναι ενεργά μόνο το error microphone και το antinoise speaker. Δεν αντλείται πληροφορία από το μικρόφωνο αναφοράς και η πηγή θορύβου θεωρείται ανενεργή.

### Αποτελέσματα Προσομοιώσεων-διάταξη 1

Μετά τη μοντελοποίηση ακολουθεί η εφαρμογή του συστήματος ενεργητικού ελέγχου. Τα αποτελέσματα εφαρμογής ενεργητικού ελέγχου θορύβου για τη διάταξη 1 φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Αριστερά απεικονίζεται η ένταση του ηχητικού πεδίου πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου ενώ αριστερά φαίνεται η επίδραση του ANC συστήματος. Σε κάθε προσομοίωση παρουσιάζεται η ηχητική πίεση (σε μορφή dB) τόσο στο συνολικό επίπεδο προσομοίωσης, αλλά και μεγενθυμένη κοντά στο σύστημα ελέγχου όπου είναι επιθυμητή η μείωση της ηχητικής έντασης.

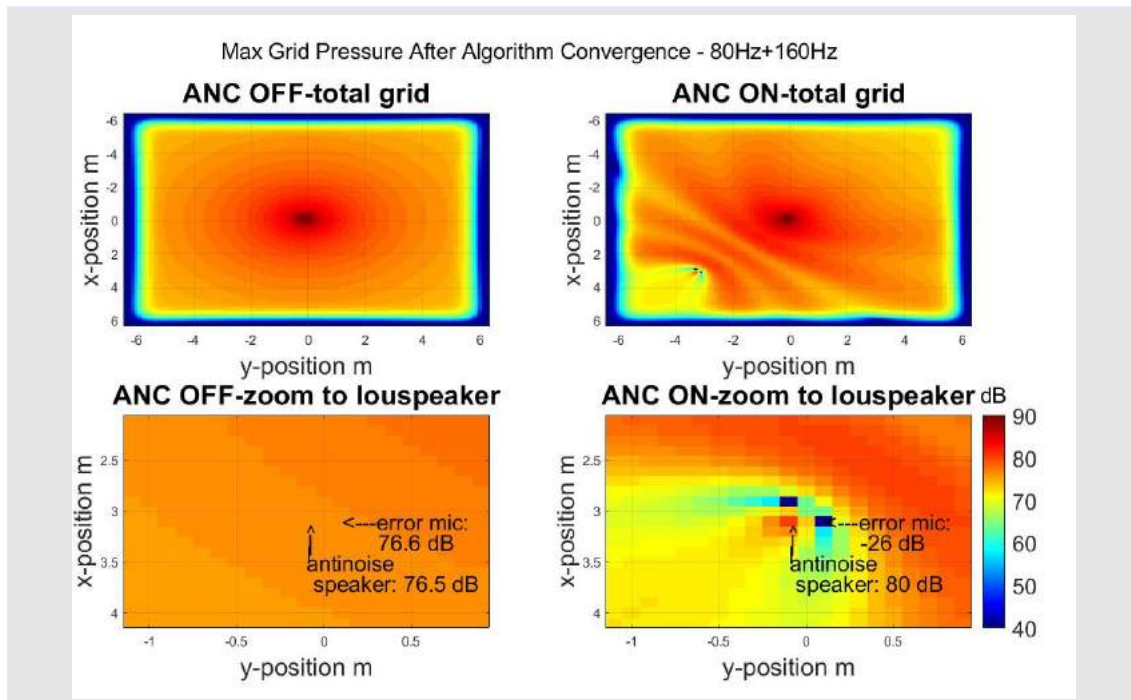




Σχήμα 5.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1. Simulation time=2 - πτώση 50 dB στην περιοχή του μικροφώνου

### Αποτελέσματα Προσομοιώσεων-διάταξη 2

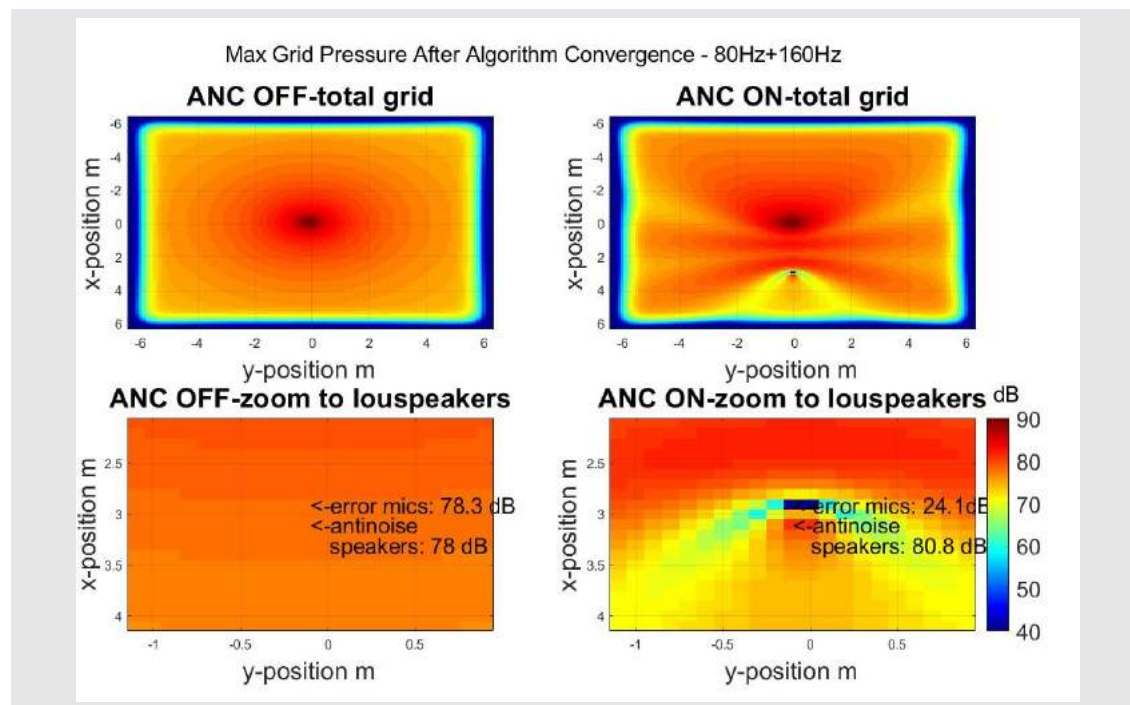
Τα αποτελέσματα εφαρμογής ενεργητικού ελέγχου θορύβου για τη διάταξη 2 φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 2. Simulation time=8 - πτώση 50 dB στην περιοχή του μικροφώνου

### Αποτελέσματα Προσομοιώσεων-διάταξη 3

Η διάταξη 3 είναι μια ελαφριά τροποποίηση της 1 όπου έχει γίνει τοποθέτηση δύο ηχείων και δύο error μικροφώνων αντί ενός.



Σχήμα 5.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 3. Simulation time=8 - Πτώση 54 dB στην περιοχή των μικροφώνων

Έγιναν προσομοιώσεις για δύο διαφορετικές χρονικές διάρκειες μεγαλύτερες των 2 δευτερολέπτων. Όπως φαίνεται από τα σχήματα (5.4-5.6) η απόδοση του αλγορίθμου δεν βελτιώνεται με την πάροδο χρόνου επιπλέον των δύο δευτερολέπτων. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα αλλά δεν παρατηρήθηκε περαιτέρω μείωση του θορύβου. Παρακάτω σημειώνεται ο τύπος μετατροπής pascal σε dB που χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή των ηχητικών πιέσεων του υπολογιστικού πακέτου προσομοίωσης k-wave από pascal σε dB.

$$dB = 20 * \log_{10}(pascal/0.00002) \quad (5.4.1)$$

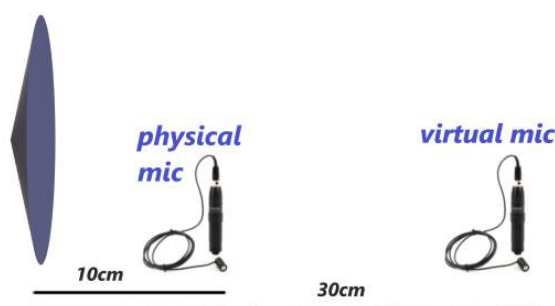
Σημειώνεται εδώ ότι πέραν των δύο βασικών αρμονικών 80+160Hz θεωρήθηκε ασυσχέτιτος background θόρυβος της τάξης των 30dB, εξού και ο μη πλήρης μηδενισμός της ηχητικής διαταραχής.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συμπεραίνεται ότι ο αλγόριθμος FXLMS πετυχαίνει εξαιρετικά αποτελέσματα στην απόσβεση της ηχητικής διαταραχής πάνω στο μικρόφωνο, ενώ δημιουργεί και μια ζώνη ησυχίας μικρής έκτασης το μέγεθος της οποίας είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του μικροφώνου οπότε κρίνεται ανεπαρκής. Συνεπώς κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη μεθόδων εικονικού μικροφώνου για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος.

## 5.5 Προσομοιώσεις εικονικών (virtual) μεθόδων ενεργητικού ελέγχου θορύβου

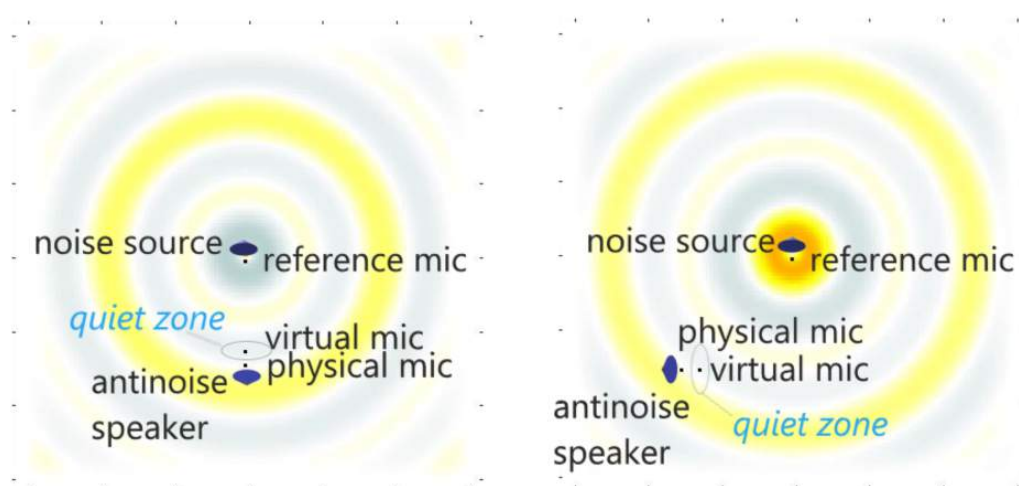
Για την αύξηση της ζώνης ησυχίας αλλά και για την αποκοπή του θορύβου μακριά από τα μικρόφωνα σφάλματος, αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι τύπου "virtual". Οι αλγόριθμοι αυτοί προσομοιώνουν ένα νοητό μικρόφωνο (virtual microphone) προκειμένου η ζώνη ησυχίας να δημιουργείται πιο μακριά από το φυσικό μικρόφωνο (physical microphone). Όμοια με προηγουμένως υλοποιήθηκαν δύο διατάξεις με το ANC σύστημα να τοποθετείται όπως προηγουμένως.

Στην παρούσα υποενότητα εξετάζονται οι αλγόριθμοι τύπου VM και RMT. Σκοπός σε όλα τα παρακάτω είναι η αποκοπή του θορύβου σε απόσταση 20cm από το φυσικό μικρόφωνο όπως φαίνεται στο σχήμα (5.7).



Σχήμα 5.7: Διατάξεις προσομοίωσης 1

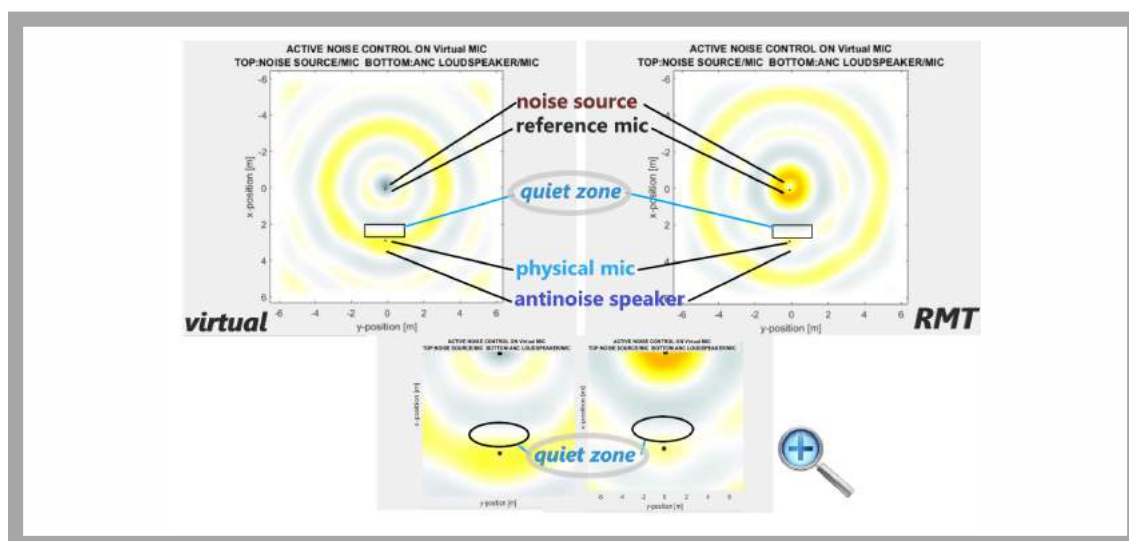
Το virtual μικρόφωνο τοποθετείται προσωρινά μόνο κατά τη διάρκεια μοντελοποίησης. Στην περίπτωση του αλγορίθμου VM, χρησιμοποιείται μόνο για την εκτίμηση του μονοπατιού  $S_0$ , ενώ στην περίπτωση που εφαρμόζεται αλγόριθμος τύπου RMT χρησιμοποιείται και για την μοντελοποίηση του ενδιάμεσου ηχητικού μονοπατιού  $H$ .



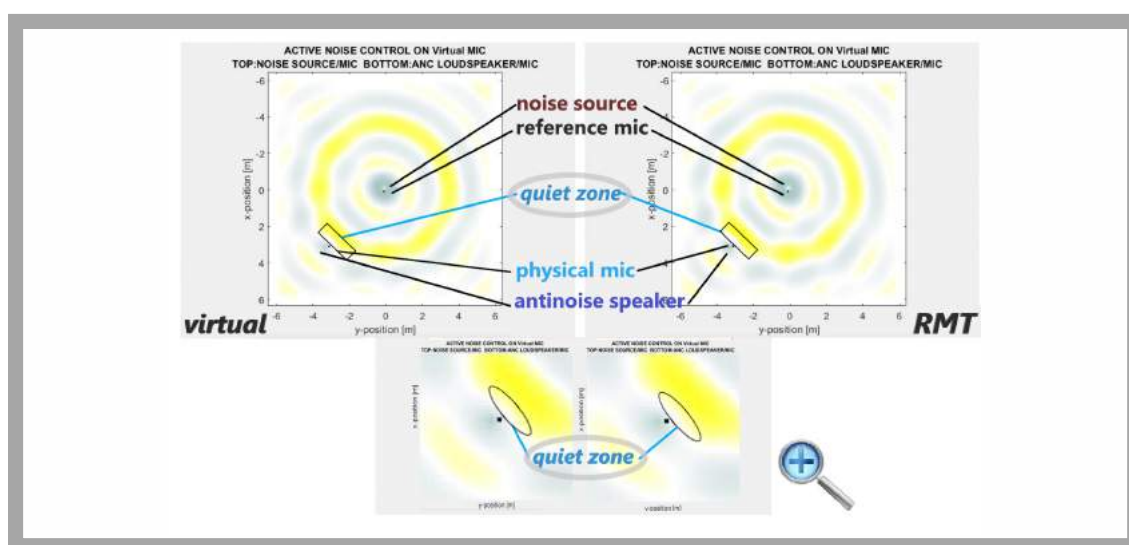
Σχήμα 5.8: Διατάξεις προσομοίωσης 2

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται δύο στιγμιότυπα κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αλγορίθμων VM και RMT για τις διατάξεις 1 και 2. Όπως φαίνεται η επιλεγμένη περιοχή

είναι πάντα λευκή, δηλαδή επιτυγχάνεται ο έλεγχος στις ζητούμενες περιοχές.



Σχήμα 5.9: Στιγμιότυπα ενεργητικού ελέγχου για τη διάταξη 1. Αριστερά: VM ANC. Δεξιά: RMT ANC

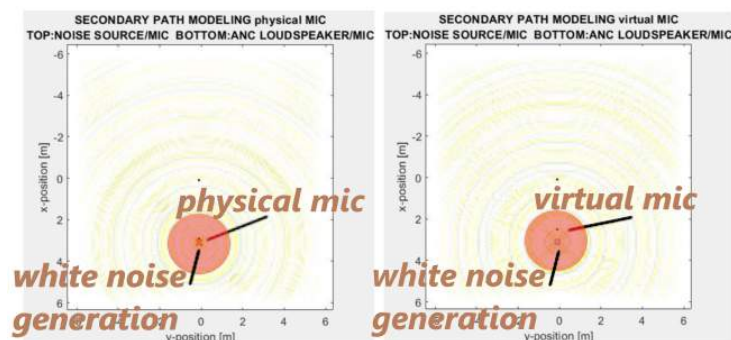


Σχήμα 5.10: Στιγμιότυπα ενεργητικού ελέγχου για τη διάταξη 2. Αριστερά: VM ANC. Δεξιά: RMT ANC

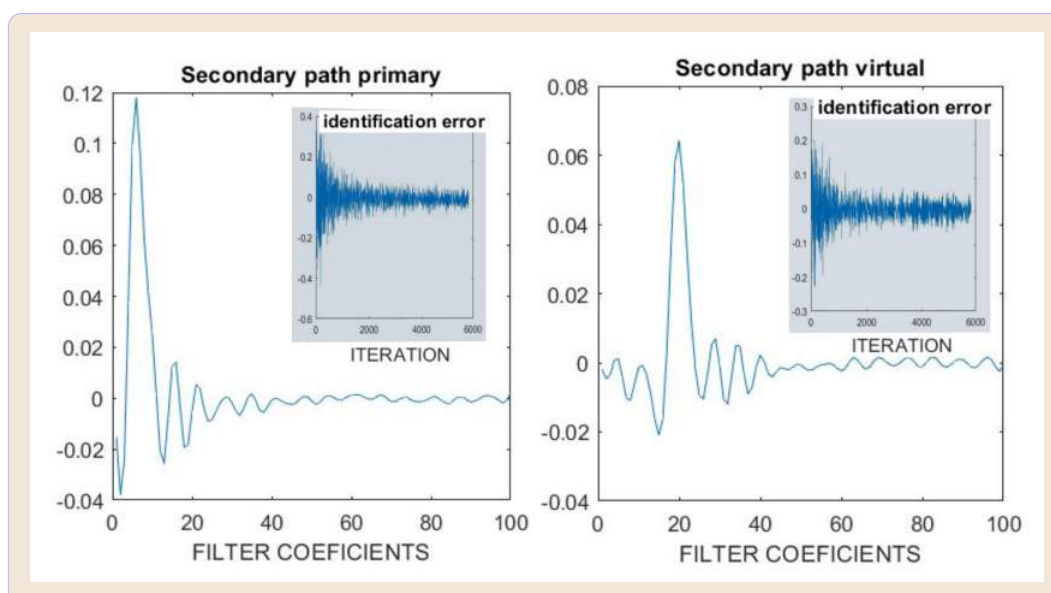
### 5.5.1 Προσομοιώσεις μεθόδου ενεργητικού ελέγχου θορύβου τύπου VM

Παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων k-wave για τον αλγόριθμο VM. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται όπως στην προηγούμενη υποενότητα. Πρώτα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των μονοπατιών  $S_p$  και  $S_b$  για τη διάταξη 1. Έπειτα απεικονίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο διατάξεις για διαφορετικούς χρόνους προσομοίωσης.

### Φάση μοντελοποίησης μονοπατιών (Modeling Paths Phase)-διάταξη 1



Σχήμα 5.11: Στιγμιότυπα μοντελοποίησης μονοπατιών. Αλγόριθμος VM

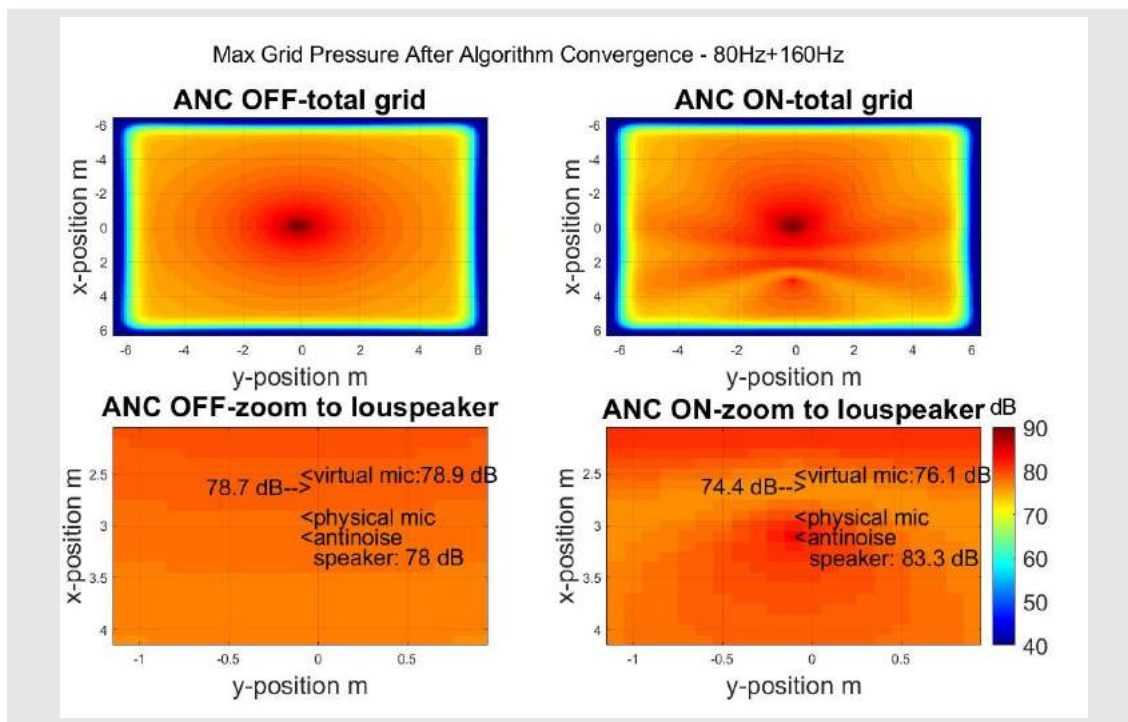


Σχήμα 5.12: Αποτελέσματα μοντελοποίησης μονοπατιών. Αλγόριθμος VM

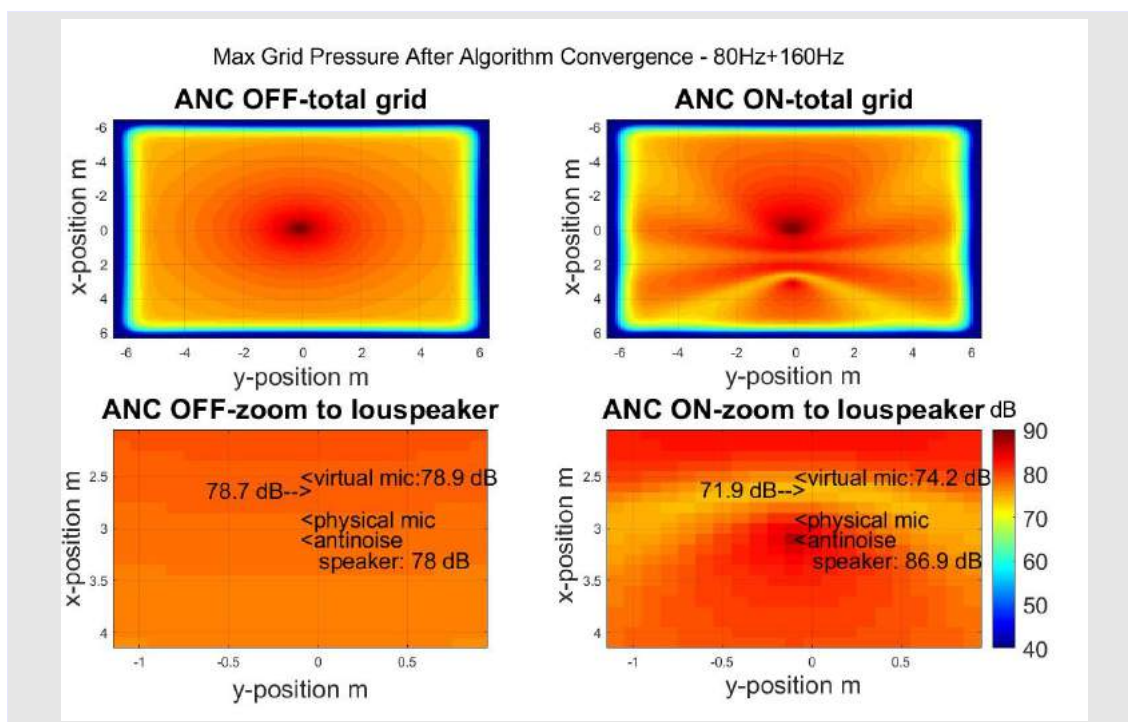
Εφόσον τα σφάλματα μηδενίζονται ο αλγόριθμος LMS δείχνει να καταφέρνει να δημιουργήσει μια “καλή” εκτίμηση των μονοπατιών.

### Αποτελέσματα Προσομοιώσεων-διάταξη 1

Αφότου μοντελοποιήθηκαν τα μονοπάτια μπορεί να ξεκινήσει ο ενεργητικός έλεγχος θορύβου. Είναι τοποθετημένο μόνο το physical microphone. Έχουν γίνει προσομοιώσεις για δύο διαφορετικές χρονικές διάρκειες 2 και 8 δευτερολέπτων. Όπως φαίνεται από τα σχήματα (5.13) και (5.14) η απόδοση του αλγορίθμου βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα αλλά δεν παρατηρήθηκε περαιτέρω μείωση του θορύβου.

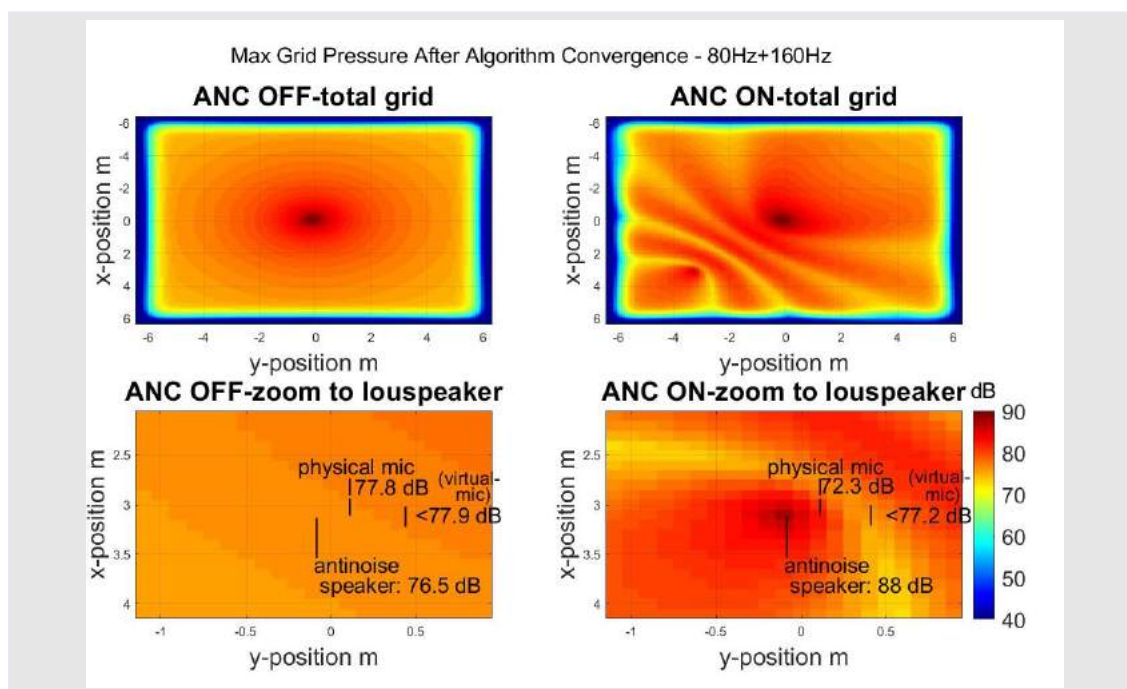


Σχήμα 5.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1 (VM). Simulation time=2 - Πτώση 4 dB "κοντά" στην περιοχή των αυτιών. Πτώση 3 dB στην περιοχή του νοητού μικροφώνου



Σχήμα 5.14: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1 (VM). Simulation time=8 - Πτώση 8 dB "κοντά" στην περιοχή των αυτιών. Πτώση 4 dB στην περιοχή του νοητού μικροφώνου

## Αποτελέσματα Προσομοιώσεων-διάταξη 2



Σχήμα 5.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 2 (VM). Simulation time=8 - Πτώση 5 dB "κοντά" στην περιοχή των αυτιών. Πτώση 0.5 dB στην περιοχή του νοητού μικροφώνου

Όπως φαίνεται από τις προσομοιώσεις το σύστημα πετυχαίνει μία μικρή μείωση θορύβου κοντά στην περιοχή τοποθέτησης του virtual μικροφώνου. Ωστόσο παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις ως προς την περιοχή αποκοπής, καθώς η μέγιστη αποκοπή δεν εντοπίζεται ακριβώς στο σημείο τοποθέτησης του εικονικού μικροφώνου. Αυτό οφείλεται στην προσέγγιση ότι το σήμα που λαμβάνει τόσο το virtual όσο και το physical μικρόφωνο λόγω της ηχητικής διαταραχής είναι το ίδιο.

$$d_v(n) \approx d_p(n) \quad (5.5.1)$$

### 5.5.2 Προσομοιώσεις μεθόδου ενεργητικού ελέγχου θορύβου τύπου RMT

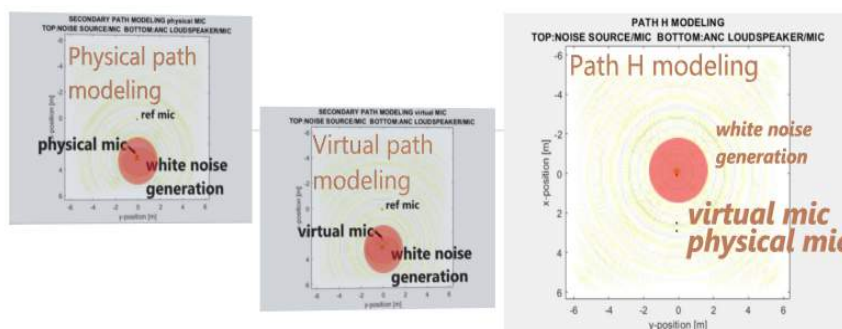
Σε προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η κύρια διαφοροποίηση της μεθόδου RMT από την μέθοδο VM. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος RMT δεν κάνει την παραδοχή (5.5.1), και συνεπώς απαιτεί την επιπλέον μοντελοποίηση της ηχητικής διαδρομής μεταξύ των δύο μικροφώνων, έστω  $\mathbf{H}$ .

#### Φάση μοντελοποίησης μονοπατιών (Modeling Paths Phase)-διάταξη 1

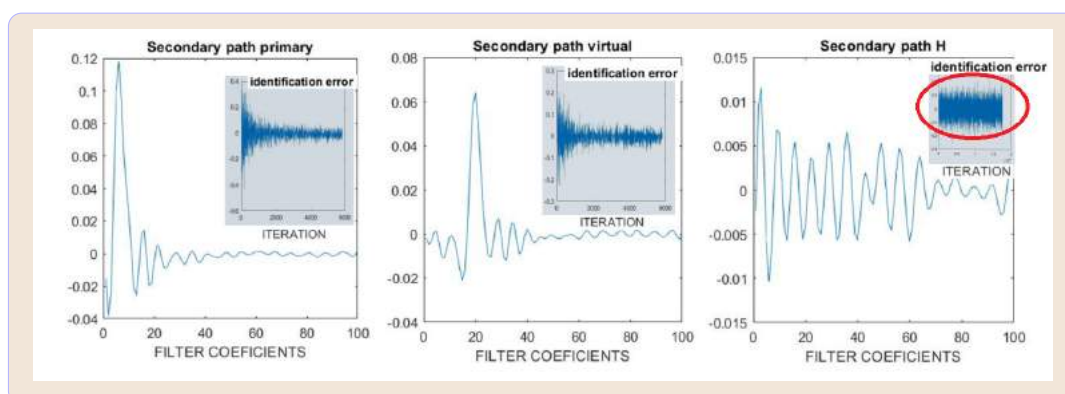
Η μοντελοποίηση των τριών path γίνεται σταδιακά. Σημειώνεται ότι αντίθετα με τα  $S_p$  και  $S_v$ , για την μοντελοποίηση της διαδρομής  $\mathbf{H}$  απενεργοποιούνται τα antinoise speakers, και παράγεται λευκός θόρυβος από ένα ηχείο κοντά στην πηγή θορύβου (πρόκειται για το ίδιο ηχείο στην περίπτωση του εργαστηρίου). Ταυτόχρονα καταγράφονται οι πιέσεις των

μικροφώνων physical και virtual (που είναι τοποθετημένο προσωρινά), εκπαιδεύοντας μέσω του αλγορίθμου LMS τους συντελεστές του  $\mathbf{H}$ . Η μοντελοποίηση των  $S_p$  και  $S_v$  γίνεται όπως ακριβώς στην μέθοδο virtual. Στην περίπτωση ενός αεροκάφους ή ενός πλοίου, η ηχητική διαταραχή μοντελοποίησης του  $\mathbf{H}$  μπορεί να τοποθετείται κοντά στον κινητήρα του σκάφους και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος ο θόρυβος του σκάφους.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα μοντελοποίησης των μονοπατιών (paths) της διάταξης 1.



Σχήμα 5.16: Σχημάτιστα μοντελοποίησης μονοπατιών για τη διάταξη RMT

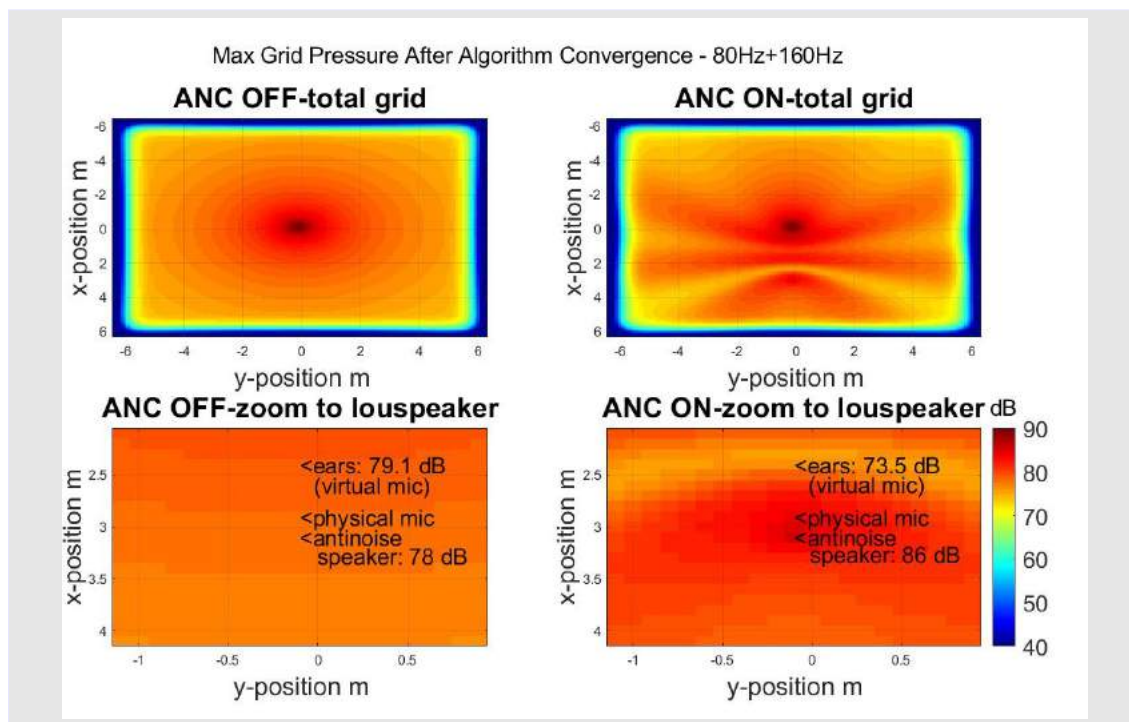


Σχήμα 5.17: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για τη διάταξη RMT

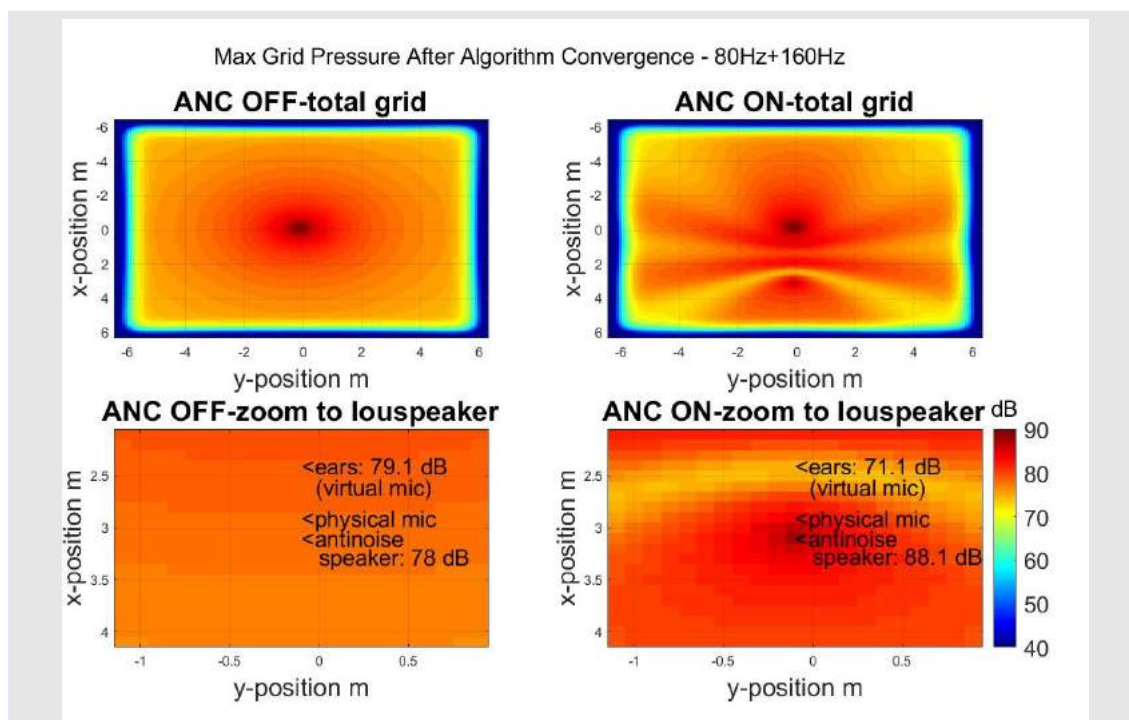
Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η μοντελοποίηση των Secondary paths  $S_p$  και  $S_v$  ήταν αποτελεσματική, ενώ δεν επιτεύχθηκε σύγκλιση του path  $\mathbf{H}$ . Σύμφωνα με το [22] και όπως θα φανεί στη συνέχεια, η αποτελεσματική μοντελοποίηση του  $\mathbf{H}$  εξαρτάται καθοριστικά από τη θέση του συστήματος στο χώρο. Αν κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης ο ακουστικός θόρυβος φτάσει πρώτα στην virtual θέση και έπειτα στην θέση του μόνιμα τοποθετημένου μικροφώνου, η συνάρτηση μεταφοράς του  $\mathbf{H}$  παρουσιάζει μειωμένη αιτιότητα (non causality system). Αυτό όπως θα φανεί συνεπάγεται μειωμένη αποδοτικότητα του αλγορίθμου, χωρίς ωστόσο ο μη μηδενισμός του σφάλματος μοντελοποίησης για το  $\mathbf{H}$  να οδηγεί σε μη σύγκλιση του αλγορίθμου ANC (όπως θα φανεί στα αποτελέσματα της διάταξης 1). Η επίδραση της σωστής μοντελοποίησης του  $\mathbf{H}$  στα τελικά αποτελέσματα θα σχολιαστεί αναλυτικά στην υποενότητα (5.6.1) του παρόντος κεφαλαίου.



**Αποτελέσματα Προσομοιώσεων-διάταξη 1**



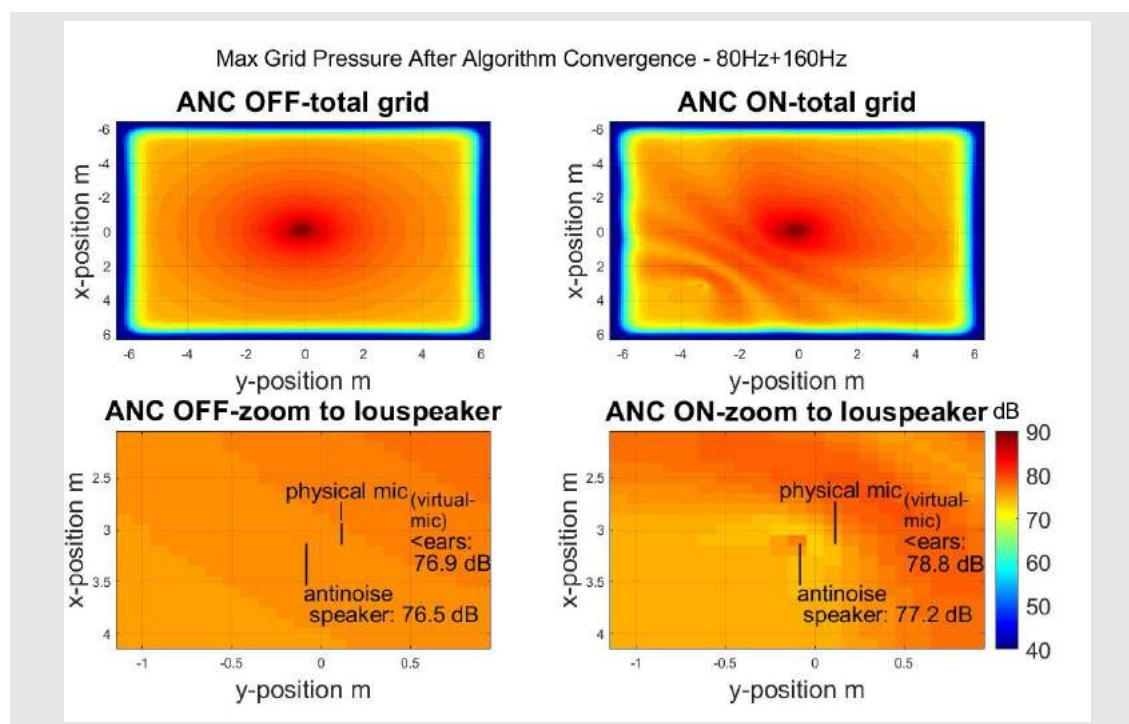
Σχήμα 5.18: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1 (RMT). Simulation time=4 - Πτώση 5 dB στην περιοχή των αυτιών (νοητό μικρόφωνο)



Σχήμα 5.19: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1 (RMT). Simulation time=8 - Πτώση 8 dB στην περιοχή των αυτιών (νοητό μικρόφωνο)

Στη διάταξη 1 παρατηρείται μικρή βελτίωση των αποτελεσμάτων συγκριτικά με τη προηγούμενη μέθοδο τόσο ως προς το συνολικό επίπεδο μείωσης όσο και στην ακρίβεια στόχευσης της περιοχής αποκοπής. Έγιναν προσομοιώσεις για δύο διαφορετικές χρονικές διάρκειες 4 και 8 δευτερολέπτων. Όπως φαίνεται από τα σχήματα (5.18-5.19) η απόδοση του αλγορίθμου βελτιώθηκε με την πάροδο του χρόνου. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα αλλά δεν παρατηρήθηκε περαιτέρω μείωση του θορύβου.

### Αποτελέσματα Προσομοιώσεων-διάταξη 2



Σχήμα 5.20: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 2 (RMT). Simulation time=8 - Ενίσχυση 2 dB στην περιοχή των αυτιών (νοητό μικρόφωνο)

Στη διάταξη 2 ο αλγόριθμος RMT αποτυγχάνει να συγκλίνει ενώ ενισχύει το επίπεδο του θορύβου στην περιοχή των αυτιών του χρήστη.

Όσον αφορά την ακρίβεια στόχευσης της περιοχής αποκοπής ο αλγόριθμος RMT φαίνεται να αποδίδει καλύτερα. Είναι πιθανό σε ορισμένες περιπτώσεις ο αλγόριθμος VM, επειδή δεν λαμβάνει υπόψη το ακουστικό μονοπάτι μεταξύ του φυσικού και του νοητού μικροφώνου να εμφανίζει μεγάλη απόκλιση ως προς την περιοχή αποκοπής. Ο αλγόριθμος RMT πετυχαίνει καλύτερη στόχευση αλλά η εξάρτησή του από την ακρίβεια μοντελοποίησης του  $\mathbf{H}$  πολλές φορές οδηγεί σε μειωμένη απόδοση όπως φάνηκε στο παράδειγμα της διάταξης 2 όπου υπάρχει ενίσχυση αντί για απόσβεση. Τελικά, η τοποθέτηση του συστήματος στο χώρο επηρεάζει πολύ την απόδοση λόγω της δυσκολίας μοντελοποίησης της ακουστικής διαδρομής μεταξύ των δύο μικροφώνων.

## 5.6 Επιπλέον παρατηρήσεις για τις τεχνικές εικονικού μικροφώνου

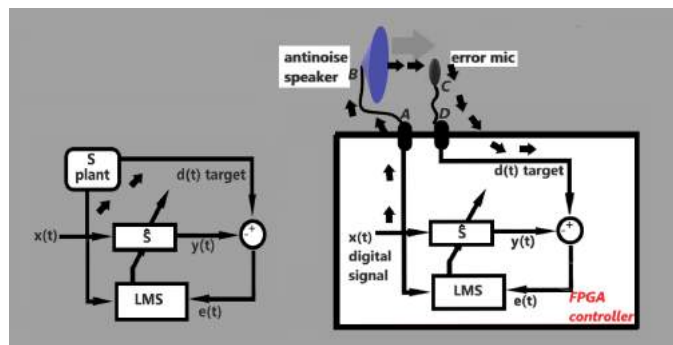
Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος είναι η επιθυμητή απόσταση απόσβεσης και η ακρίβεια μοντελοποίησης των μονοπατιών. Στις ακόλουθες υποενότητες αναλύονται αυτά τα δύο προβλήματα.

### 5.6.1 Θέση του συστήματος και λάθος μοντελοποίηση των μονοπατιών

Ανατρέχοντας στα βασικά διαγράμματα δομής του VM και του RMT αλγορίθμου είναι εμφανής η ανάγκη ακριβούς μοντελοποίησης των

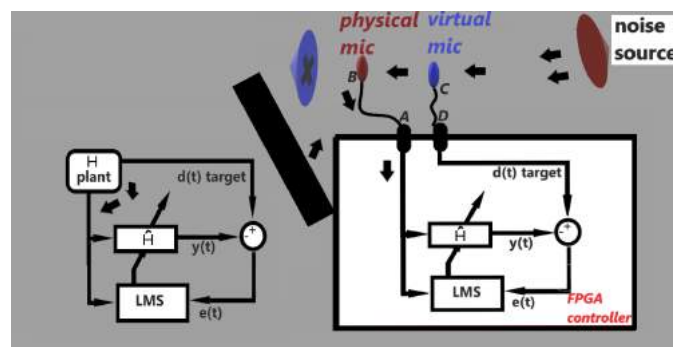
- Secondary paths  $S_p$  and  $S_v$
- Path H (μόνο για την περίπτωση του RMT αλγόριθμου)

Η επιτυχής μοντελοποίηση των  $S_p$  και  $S_v$  είναι σχεδόν πάντα εφικτή λόγω της εμπρόσθιας κατεύθυνσης του αλγορίθμου μοντελοποίησης και της διαδρομής του σήματος. Το σήμα αναφοράς πάντα προηγείται του σήματος "στόχου", καθώς κατά τη διάρκεια μοντελοποίησης το μικρόφωνο σφάλματος "ακούει" μόνο το σήμα του antinoise ηχείου.



Σχήμα 5.21: Αιτιατότητα (casuality) μονοπατιού  $S$

Αντιθέτως, κατά τη μοντελοποίηση του μονοπατιού μεταξύ των δύο μικροφώνων η αιτιότητα του συστήματος εξαρτάται από τη θέση του στο χώρο, από την ίδια τη θέση της πηγής θορύβου καθώς επίσης από την ανακλαστικότητα των περιβαλλόντων αντικειμένων και τη γενικότερη γεωμετρία του χώρου.



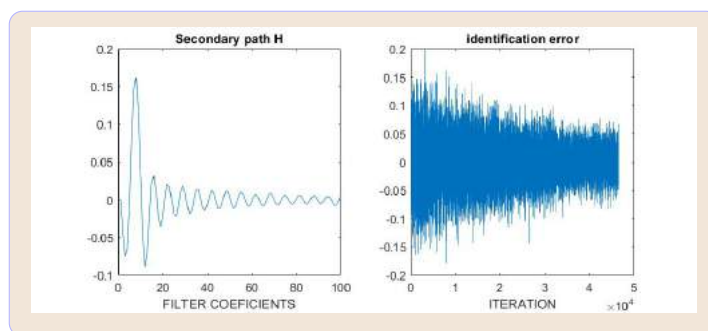
Σχήμα 5.22: Εθλιπής αιτιατότητα μονοπατιού  $H$

Στις προηγούμενες περιπτώσεις μοντελοποίησης, η θέση του virtual μικροφώνου ήταν και στις δύο διατάξεις πιο κοντά στην πηγή θορύβου από την θέση του physical μικροφώνου. Συνεπώς το σύστημα ήταν σε μεγάλο βαθμό μη αιτιατό. Για να φανεί η σημασία επιλογής κατάλληλης θέσης για τη διάταξη στην περίπτωση που εφαρμόζεται ο αλγόριθμος RMT παρατίθεται μια περίπτωση στην οποία το  $\mathbf{H}$  μοντελοποιείται ικανοποιητικά.

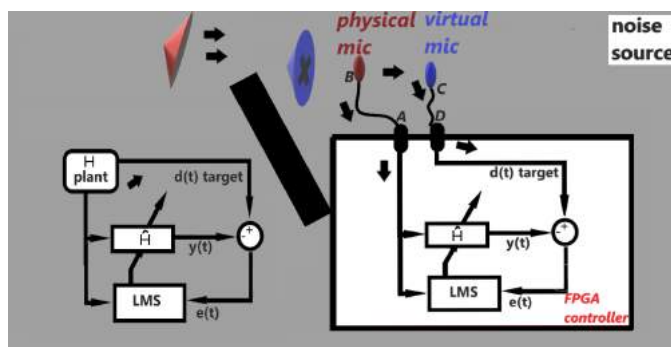


Σχήμα 5.23: Αιτιατή διάταξη προσομοίωσης RMT

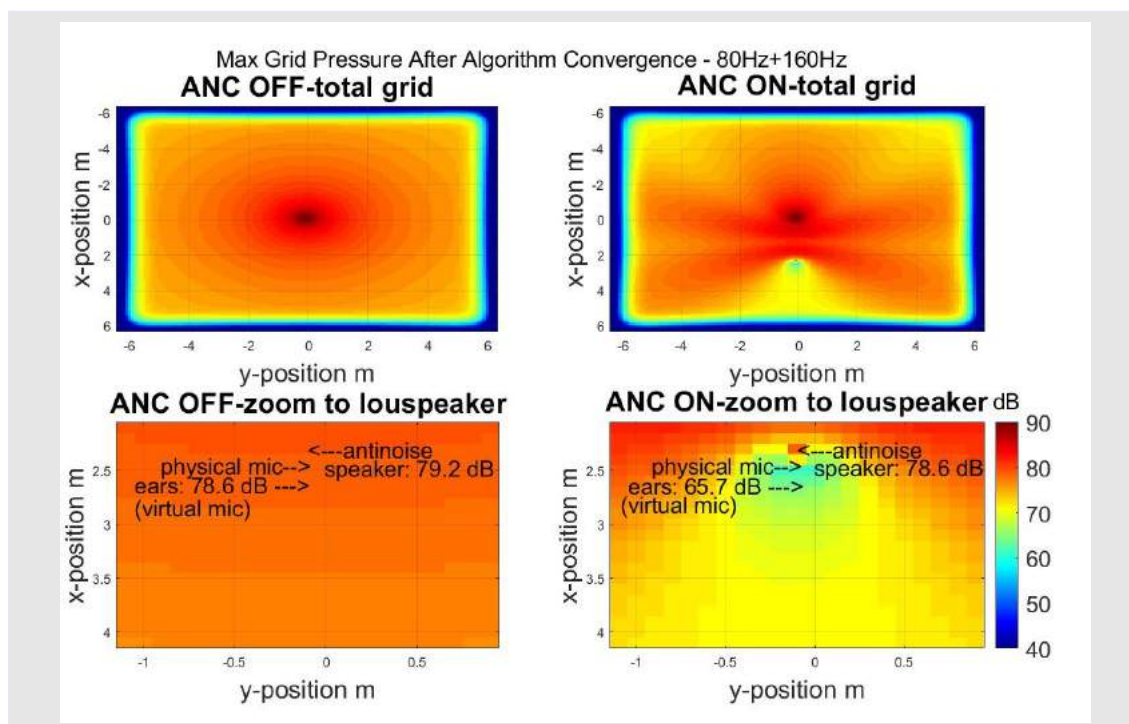
Στο παραπάνω σχήμα, το φυσικό μικρόφωνο προηγείται του εικονικού, γεγονός που καθιστά τόσο το σύστημα μοντελοποίησης του  $\mathbf{H}$  όσο και το τελικό σύστημα ANC αιτιατά. Πλέον ο αλγόριθμος μοντελοποίησης λειτουργεί σωστά καθώς το σήμα που φτάνει στο physical μικρόφωνο προηγείται του virtual.



Σχήμα 5.24: Το προκύπτον μονοπάτι  $H$



Σχήμα 5.25: Αιτιατότητα μοντελοποίησης ηχητικού μονοπατιού

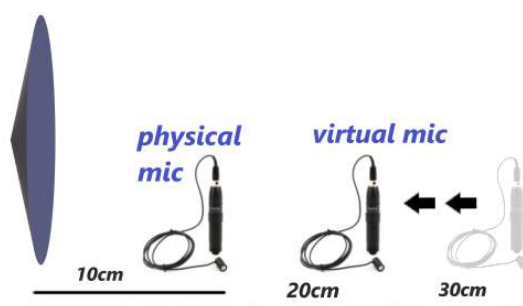


Σχήμα 5.26: Αποτελέσματα προσομοίωσης *simulation time=8* μείωση 12 dB στην *virtual* περιοχή

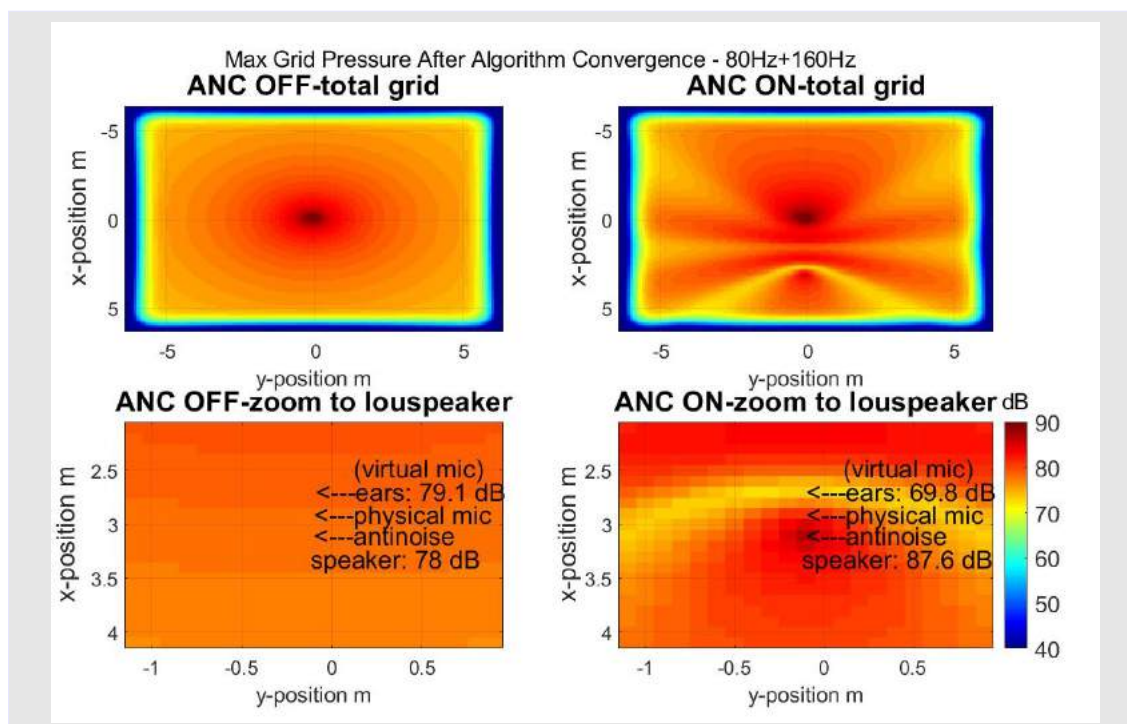
Συμπερασματικά λοιπόν η ἔξυπνη τοποθέτηση του συστήματος RMT στο χώρο απαιτεί βασική προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί με τους [22, 26] και αναδुकνύει το βασικό μειονέκτημα του εν λόγω αλγορίθμου συγκριτικά με τον πιο απλό VM αλγόριθμο. Η επίδραση του εν λόγω φαινομένου είναι πιο εμφανής σε κλειστούς χώρους όπου οι πολλαπλές ανακλάσεις της πηγής του θορύβου καθιστά σχεδόν αδύνατη την εύρεση της κατάλληλης θέσης τοποθέτησης του συστήματος.

### 5.6.2 Επίδραση της απόστασης μεταξύ των *physical* και *virtual* μικροφώνων στην απόδοση των αλγορίθμων.

Η απόδοση των αλγορίθμων φαίνεται να μειώνεται όσο η απόσταση των μικροφώνων αυξάνεται. Διατηρώντας σταθερή τη θέση του πρωτεύοντος μικροφώνου και μειώνοντας τη θέση του εικονικού μικροφώνου παρατηρήθηκε βελτίωση στα αποτελέσματα σε σχέση με τη διάταξη 1.



Σχήμα 5.27: Βελτίωση της απόδοσης με μείωση της απόστασης του *virtual* μικροφώνου



Σχήμα 5.28: Αποτελέσματα προσομοίωσης *simulation time=8* μείωση 11 dB στην virtual περιοχή

Αν η απόσταση του virtual μικροφώνου είναι πολύ μεγάλη τα ηχεία του συστήματος δεν μπορούν να ανταποκριθούν και η μείωση της ηχητικής πίεσης στην περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να είναι πολύ μικρή, μηδενική και σε μερικές περιπτώσεις ενισχυμένη λόγω αστάθειας του συστήματος.

Βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου RMT σύμφωνα με τους συγγραφείς [26] είναι τέλος η αδυναμία σύγκλισης του σε περιπτώσεις μετακίνησης της ηχητικής πηγής. Συνήθης μέθοδος αντιμετώπισης του εν λόγω προβλήματος είναι η τοποθέτηση του συστήματος σε ανηχοϊκό δωμάτιο και ο υπολογισμός ενός συνόλου ηχητικών μονοπατιών  $\mathbf{H}$  με βηματική μετακίνηση της θορυβώδους ηχητικής πηγής για τη βελτίωση της τελικής εκτίμησης του  $\mathbf{H}$ .

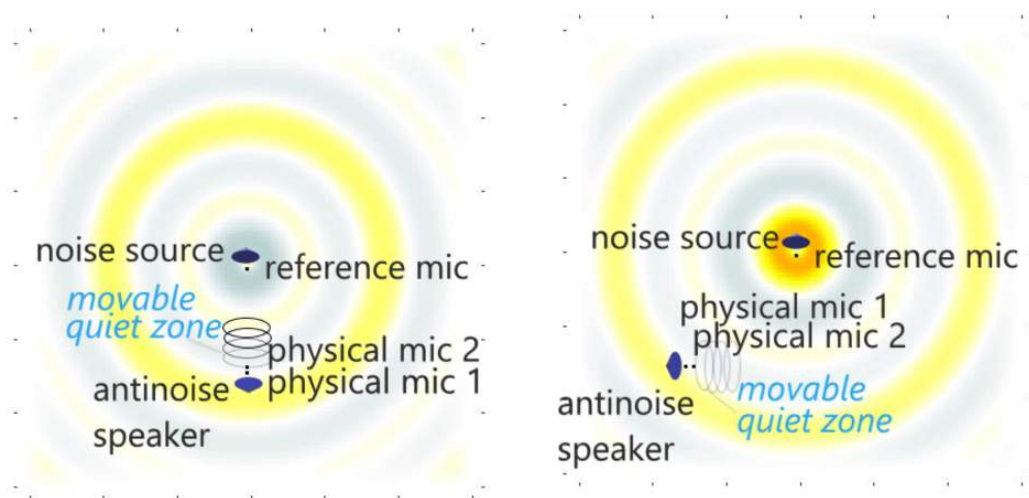
## 5.7 Προσομοιώσεις μεθόδου ενεργητικού ελέγχου θορύβου εμπρόσθιας πρόβλεψης τύπου Extrapolation

Για την αύξηση της ζώνης ησυχίας αλλά και για την αποκοπή του θορύβου μακριά από τα μικρόφωνα σφάλματος, οι προηγούμενοι αλγόριθμοι κρίνονται ανεπαρκείς. Βασικό πρόβλημα ακόμα και στο περιβάλλον προσομοίωσης του k-wave αποτελεί η ακριβής μοντελοποίηση των μονοπατιών. Ο αλγόριθμος τύπου εμπρόσθιας πρόβλεψης, όπως ο αλγόριθμος virtual, δεν απαιτεί τον προσδιορισμό του ηχητικού μονοπατιού μεταξύ μικροφώνων που εμφανίζει μεγάλες δυσκολίες, ενώ προσφέρει πολύ ικανοποιητικότερα αποτελέσματα από όλους τους προηγούμενους αλγόριθμους.

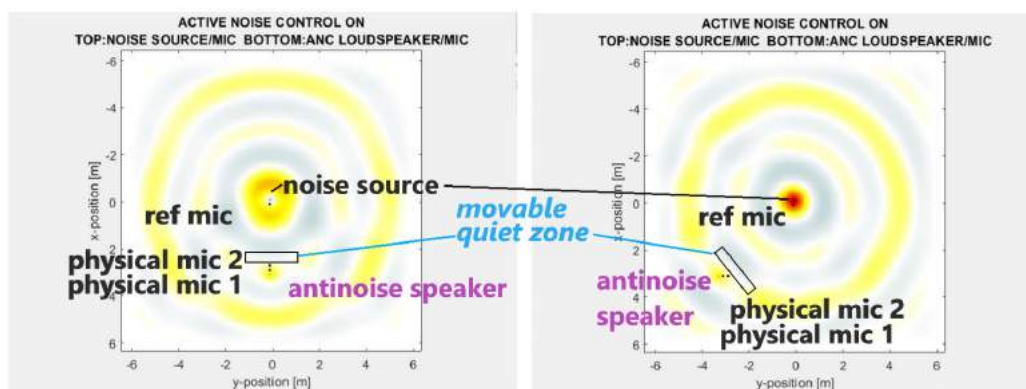
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο λογισμικό k-wave για την τεχνική extrapolation. Για την παραγωγή αποτελεσμάτων συγκρίσιμων με τα αποτε-

λέσματα των προηγούμενων αλγορίθμων, το δεύτερο physical μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε απόσταση 10 cm από το πρώτο μικρόφωνο (20 cm από το antinoise ηχείο), και ρυθμίστηκε να κάνει εμπρόσθια πρόβλεψη σε απόσταση 10 cm με τελικό στόχο την επίτευξη ζώνης η-συχίας στο ίδιο σημείο όπου είχε τοποθετηθεί το virtual μικρόφωνο στους προηγούμενους 2 αλγορίθμους (30 cm μπροστά από το antinoise speaker).

Όπως προηγουμένως, υλοποιήθηκαν δύο κάθετες διατάξεις για τον έλεγχο της απόδοσης του αλγορίθμου σε διαφορετικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, έγινε προσομοίωση για την περίπτωση εμπρόσθιας πρόβλεψης σε απόσταση 20 cm από το δεύτερο μικρόφωνο. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.



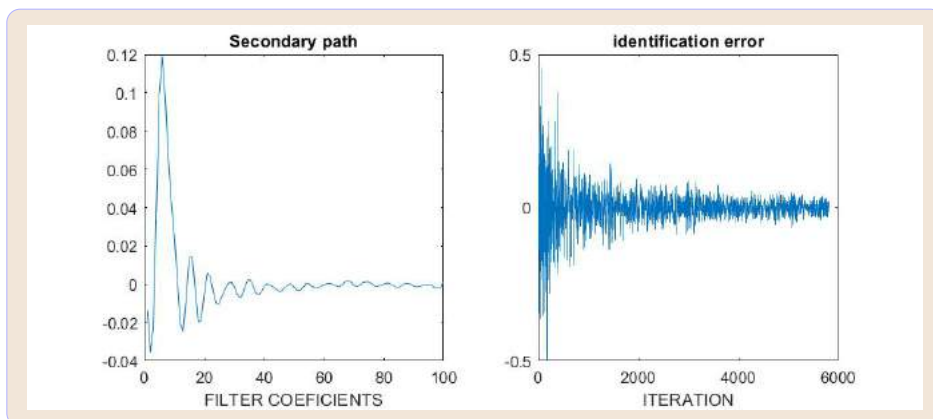
Σχήμα 5.29: Διατάξεις προσομοίωσης extrapolation



Σχήμα 5.30: Στιγμιότυπα ενεργητικού ελέγχου για τις δύο διατάξεις

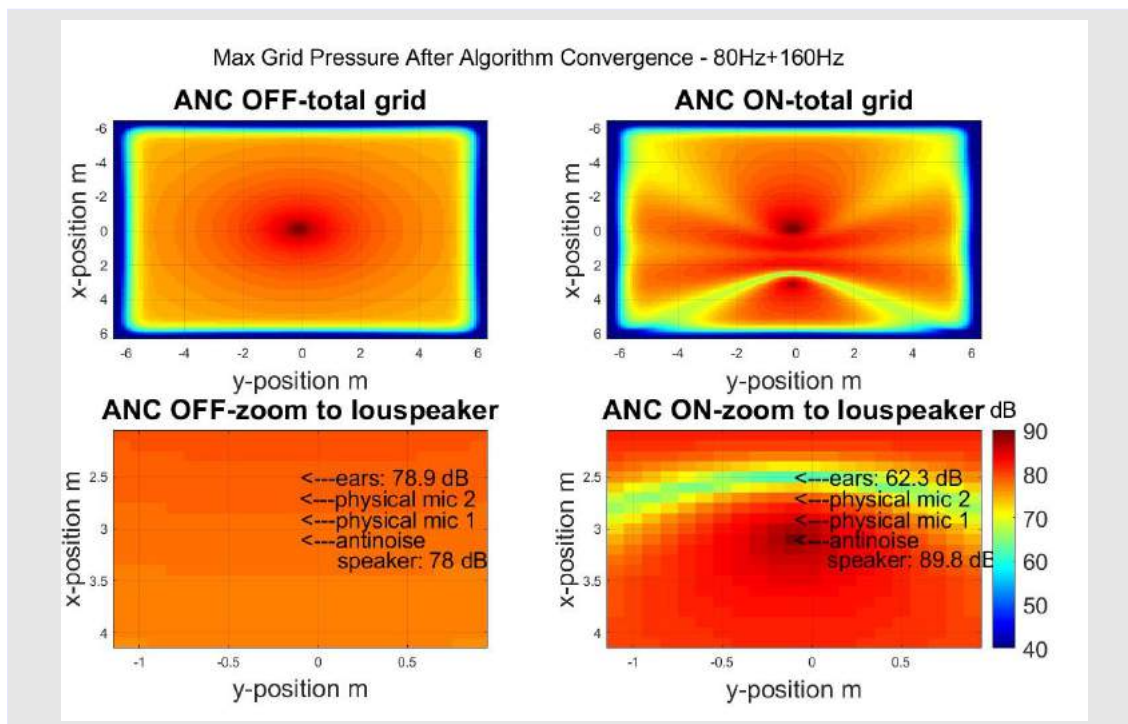
### Φάση μοντελοποίησης μονοπατιών (Modeling Paths Phase)-διάταξη 1

Στο στάδιο αυτό υπολογίστηκε το μονοπάτι antinoise ηχείου- μικροφώνου physical microphone 1, που είναι τοποθετημένο πιο κοντά στο ηχείο και αυτό χρησιμοποιήθηκε ως secondary path για τη βελτίωση σύγκλισης του αλγορίθμου.



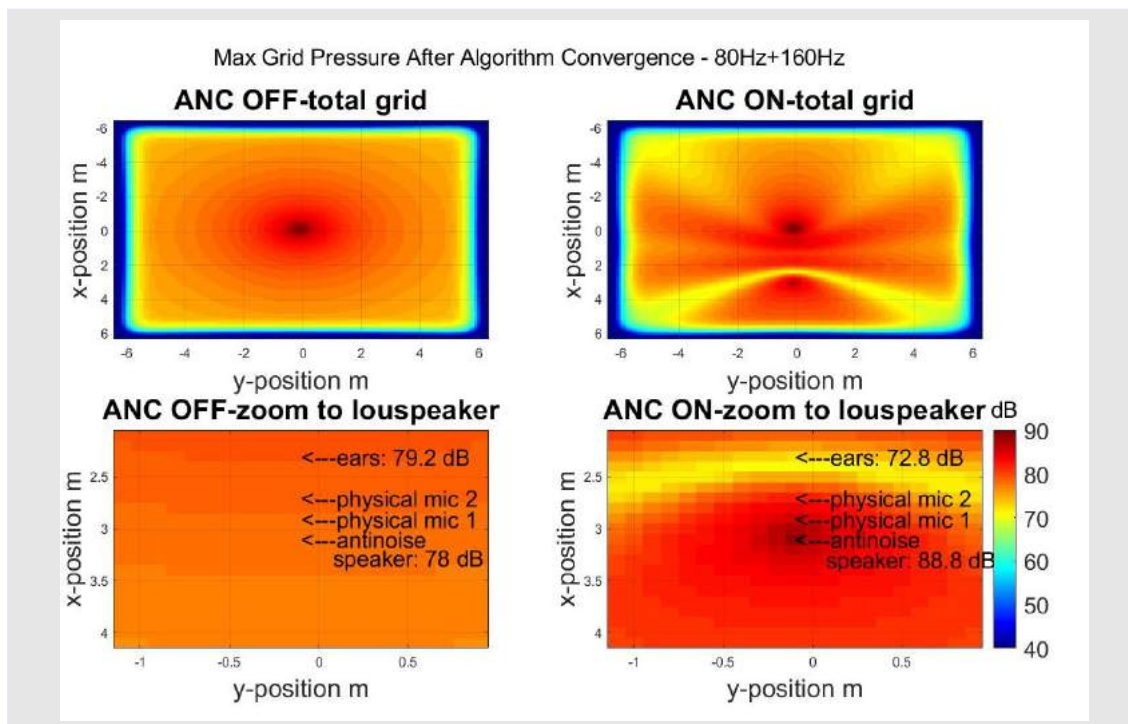
Σχήμα 5.31: Αποτέλεσμα μοντελοποίησης μονοπατιού. Χρησιμοποιείται το *physical mic 1*

### Αποτελέσματα Προσομοιώσεων-διάταξη 1



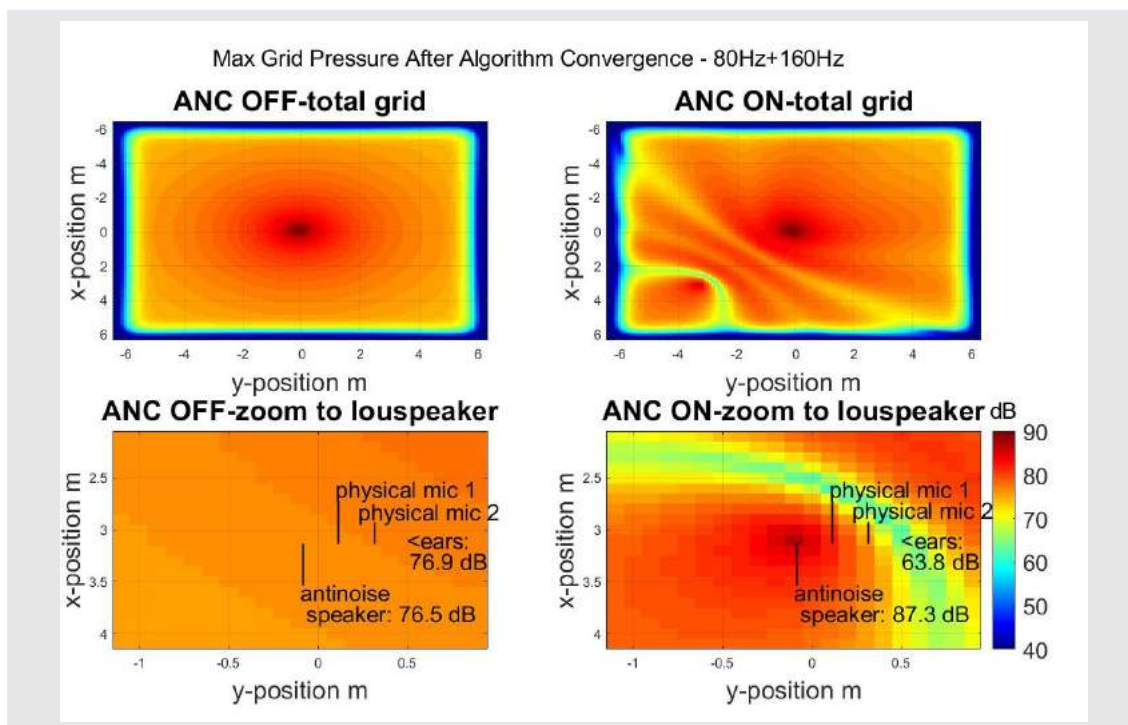
Σχήμα 5.32: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1. Ζητούμενη απόσταση απόσβεσης  $x=10\text{cm}$ . Simulation time=8 μείωση 17 dB στην virtual περιοχή



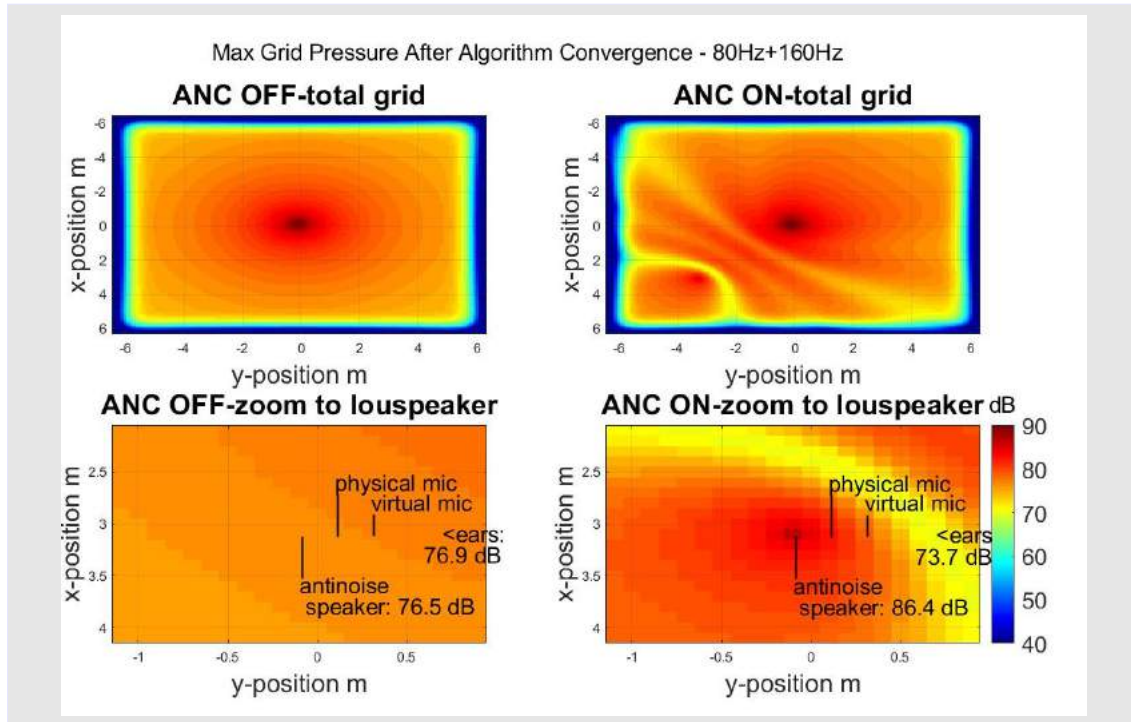


Σχήμα 5.33: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1. Ζητούμενη απόσταση απόσβεσης  $x=20\text{cm}$ . Simulation time=8 μείωση 7 dB στην virtual περιοχή

**Αποτελέσματα Προσομοιώσεων-διάταξη 2**



Σχήμα 5.34: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 2. Ζητούμενη απόσταση απόσβεσης  $x=10\text{cm}$ . Simulation time=8 μείωση 13 dB στην virtual περιοχή



Σχήμα 5.35: Αποτελέσματα προσομοίωσης διάταξης 1. Ζητούμενη απόσταση απόσβεσης  $x=20\text{cm}$ . Simulation time=8 μείωση 3 dB στην virtual περιοχή

Ο αλγόριθμος extrapolation παρουσιάζει πολύ καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τις προηγούμενες δύο τεχνικές. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του είναι η αυξημένη απόδοση, η δυνατότητα απόσβεσης του θορύβου σε μεγαλύτερη απόσταση, ο ακριβής έλεγχος της περιοχής αποκοπής από τον χρήστη και η μειωμένη χρήση υπολογιστικών πόρων. Βασικό μειονέκτημα του είναι η απαίτηση περισσότερων μικροφώνων.

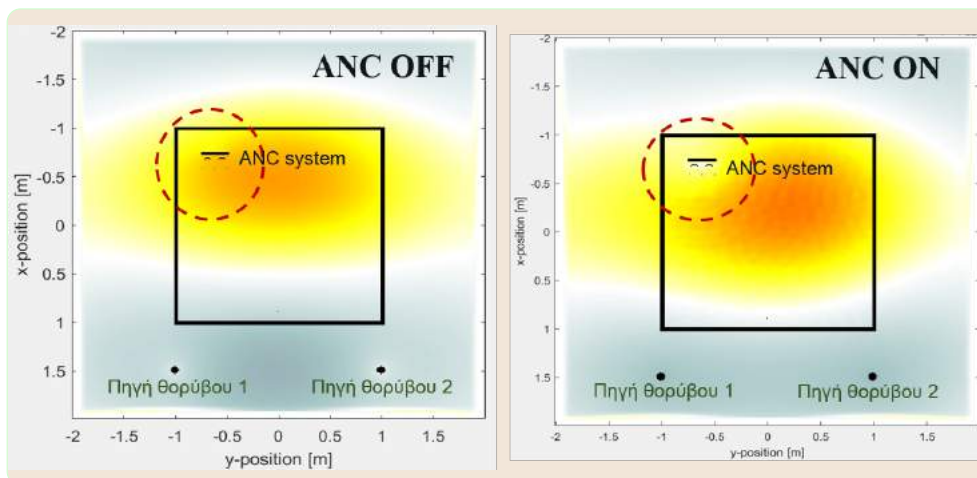
## 5.8 Προσομοιώσεις πραγματικού κόσμου

Στα σχήματα (5.36 και 5.37) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από ένα δωμάτιο (ΥΔ θαλαμηγού) που 'βιώνει' το θόρυβο που παράγεται από δύο εξωτερικές πηγές (π.χ. γεννήτριες θαλαμηγού) και η σημαντική εξασθένιση του θορύβου στην περιοχή που εφαρμόζεται το ANC σύστημα. Εφαρμόζονται οι τεχνικές "Extrapolation" και "άθροισμα error μικροφώνων".

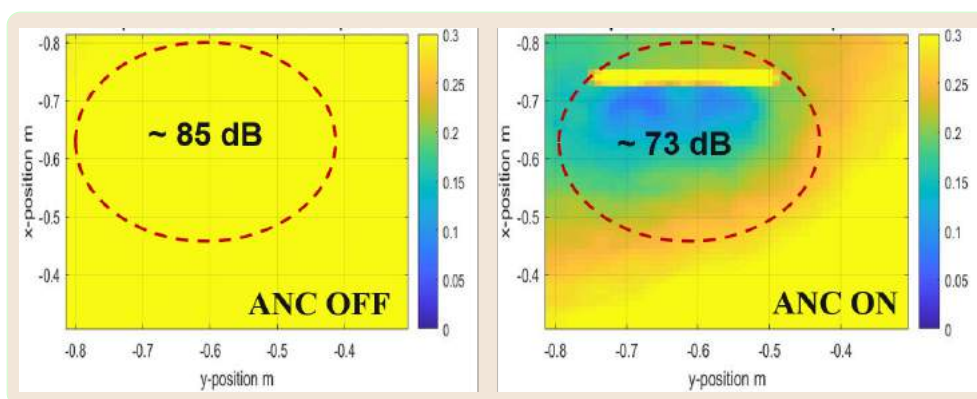
Για τις παραμέτρους "πραγματικού κόσμου" θεωρήθηκαν

- Ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον αέρα: 349m/s.
- Διαστάσεις περιβάλλοντος χώρου 1.5m x 1.5m.
- Χωρικό βήμα προσομοίωσης 1cm. Συνεπώς, ως μικρότερο στοιχείο στο δισδιάστατο επίπεδο θεωρείται στοιχείο διαστάσεων 1cm x 1cm.
- Χρόνος προσομοίωσης 1 sec.
- Διαστάσεις μικροφώνου: 2cm x 2cm. Διαστάσεις ηχείου: 10cm x 1cm.

- Διαστάσεις τοίχων: 30cm.



Σχήμα 5.36: Προσομοίωση πραγματικών μεγεθών 1



Σχήμα 5.37: Προσομοίωση πραγματικών μεγεθών 2



---

## Κεφάλαιο **6**

# Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα

---

**Η** απόδοση των διαφόρων συστημάτων ANC που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκαν υπό την επίδραση πηγαίου σήματος με δύο αρμονικές συνιστώσες 80 και 160 Hz στις οποίες προστέθηκε τυχαίος ευρυζωνικός θόρυβος έντασης έως 40 dB και εύρους ζώνης έως 1000 Hz.

### 6.1 Το υλικό του συστήματος (hardware)

Το εργαστήριο δυναμικών κατασκευών του ΕΜΠ όπου πραγματοποιήθηκε η διάταξη προσφέρει πληθώρα διαφόρων τύπων ελεγκτών, μικροφώνων και ηχείων για την ανάπτυξη ηχητικών εφαρμογών. Λόγως της MIMO αρχιτεκτονικής του συστήματος επιλέχθηκε ένας ελεγκτής τύπου FPGA για ταχύτητα πολυκάναλη παράλληλη επεξεργασία πολλών σημάτων. Επίσης επιλέχθηκαν κατάλληλα μικρόφωνα και μεγάφωνα σύμφωνα με τις απαιτήσεις τις εφαρμογής.

### 6.2 Η πλατφόρμα FPGA

Στην περίπτωση συστημάτων πολλών εισόδων πολλών εξόδων η πλατφόρμα FPGA προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα έναντι ενός απλού επεξεργαστή λόγω της δυνατότητας της για παράλληλη επεξεργασία σημάτων. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιούνται πολλά μεγάφωνα και μικρόφωνα, οδηγούμενα από αλγόριθμους πολλών εισόδων-πολλών εξόδων. Χρησιμοποιείται ο Crio 9030 σε συνδυασμό με ένα πολυκάναλο Digital to Analog Converter και ένα πολυκάναλο Analog to Digital Converter.



Σχήμα 6.1: Η πλατφόρμα CRIO

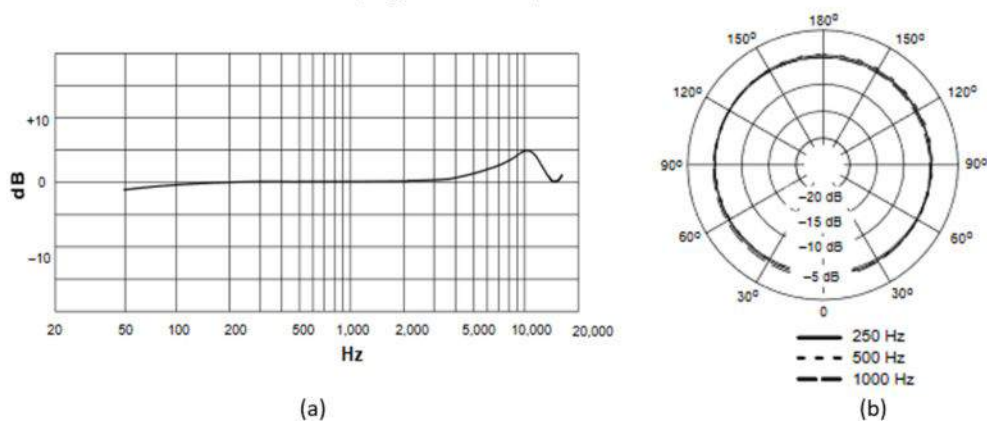
## 6.3 Επιλογή μεγαφώνων και μικροφώνων



Σχήμα 6.2: Μικρόφωνο τύπου Shure - MX183

### Specifications

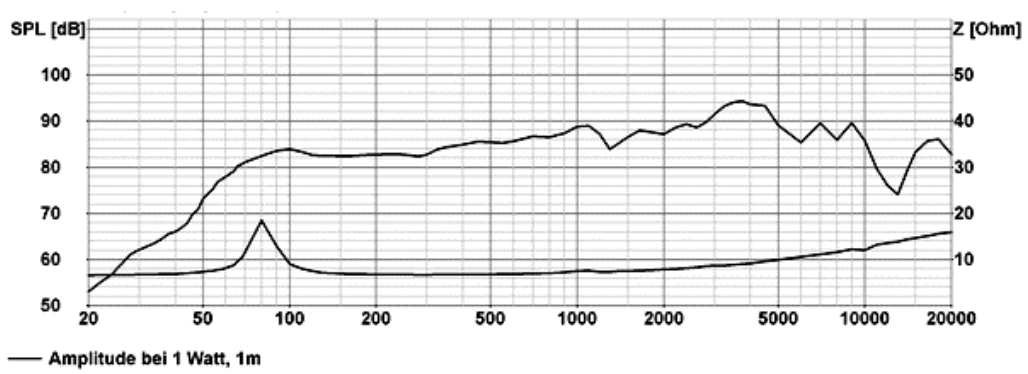
Type:	Condenser (electret bias)
Frequency Response:	50 to 17,000 Hz
Polar Pattern:	Omnidirectional
Output Impedance:	EIA rated at 150 ohms (180 ohms actual)
Open Circuit Sensitivity (at 1 kHz, ref. 1V/Pascal):	-27.5 dB (42.2 mV); All settings -12 dB at 0 gain
Max SPL (1kHz at 1%THD, 1 k ohm load):	116.7 dB; All settings +6 dB at 0 gain
Equivalent Output Noise (A-weighted):	20.5 dB
Signal to Noise Ratio (referenced at 94 dB SPL):	73.5 dB
Dynamic Range at 1 k ohm load:	96.2 dB; 100 dB at 0 gain
Power Requirements:	11 to 52 Vdc phantom, 2.0 mA
Common Mode Rejection:	45.0 dB minimum
Dimensions (length x diameter):	99 x 20 mm



Σχήμα 6.3: Χαρακτηριστικά μικροφώνου τύπου Shure - MX183



Σχήμα 6.4: Ηχείο FR 6.5 ισιών



Σχήμα 6.5: Συχνοτική απόκριση ηχείου FR 6.5 ιτσών

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα το υλικό μπορεί να υποστηρίξει εφαρμογές ενεργητικού ελέγχου άνω των 80 Hz που ήταν η ελάχιστη ζητούμενη συχνότητα αποκοπής.

## 6.4 Επιδεικτική- μετρητική διάταξη

Το σύστημα που αναπτύχθηκε αποτελείται από μια συστοιχία τεσσάρων ηχείων και από μικρόφωνα. Ανάλογα με την υπό εξέταση διάταξη ενεργοποιούνταν τα δύο εκ των τεσσάρων ή όλα τα ηχεία του συστήματος για να διαπιστωθεί αν είναι αναγκαία η χρήση δύο ή τεσσάρων ηχείων για τη δημιουργία της απαιτούμενης ζώνης ησυχίας. Χρησιμοποιήθηκαν από 3 έως 8 μικρόφωνα πάλι αναλόγως της υπο εξέτασης διάταξης και αλγορίθμου.



Σχήμα 6.6: Η πειραματική διάταξη

Για την μέτρηση του συνολικού ηχητικού επιπέδου χρησιμοποιήθηκε ένα ντεσιμπελόμετρο της εταιρείας NI. Για την εξαγωγή χαρακτηριστικών φάσματος σε προκαθορισμένα σημεία του χώρου χρησιμοποιήθηκε μια διάτρητη πλατφόρμα όπως φαίνεται στο σχήμα (6.6 - δεξιά) που μετατοπιζόταν ως προς τον άξονα y. Πάνω στην πλατφόρμα είχαν τοποθετηθεί μικρόφωνα σε σταθερές θέσεις.

## 6.5 Το περιβάλλον προγραμματισμού LABVIEW

Για τον προγραμματισμό του FPGA χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον του LABVIEW. Το λογισμικό Labview από την National Instruments είναι ένα ολοκληρωμένο πακέτο προγραμματισμού και Data Acquisition που προσφέρει τη δυνατότητα πλήρους αξιοποίησης των πόρων του FPGA, καθώς και ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον διεπαφής και παρακολούθησης με και από τον χρήστη. Μέσω της εν λόγω πλατφόρμας είναι εύκολος ο προγραμματισμός τόσο του FPGA όσο και του ενσωματωμένη επεξεργαστή που "τρέχει" μία embedded έκδοση του λειτουργικού Linux.



Σχήμα 6.7: Το περιβάλλον προγραμματισμού Labview

## 6.6 Τεχνικές πληροφορίες

Το πρωτογενές σήμα θορύβου δημιουργήθηκε με την εφαρμογή του λογισμικού LabVIEW της National Instruments και αναπαράχθηκε μέσω της κάρτας γραφικών του υπολογιστή από ένα πρωτεύον ηχείο (primary loudspeaker) τύπου Subwoofer Omnitronix BX 1250 και ισχύος 600 Watt. Η ένταση του πρωτεύοντος θορύβου ελέγχθηκε μέσω S/W και ενός ενισχυτή. Η τροφοδοσία του Subwoofer επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός τελικού ενισχυτή τύπου Behringer KM750. Ένα μικρόφωνο αναφοράς (reference microphone) τύπου BK 4189 είναι εγκατεστημένο πλησίον της κύριας πηγής θορύβου και τροφοδοτείται και ενισχύεται (με επιλεγμένο κέρδος ίσο με 10) από έναν ενισχυτή τύπου 480B21 της PCB piezotronics.

## 6.7 Πειραματικά αποτελέσματα 1-Πτώση overall dB

Ελέγχθηκαν διαφορετικά ANC συστήματα και διατάξεις και παρουσιάζονται ενδεικτικά 6 διαφορετικές ANC διατάξεις. Σε κάθε εφαρμογή όπου ελέγχθηκε διαφορετικός ANC αλγόριθμος και διάταξη μεγάλων-μικρόφωνων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 3 ως 6



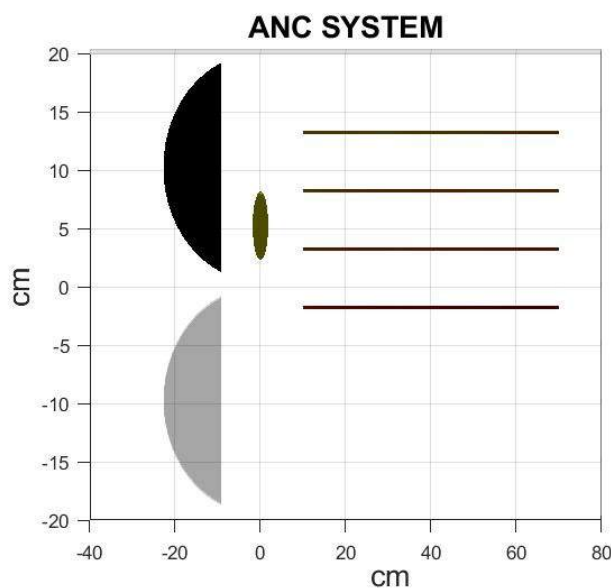
επίπεδα και καταγράφηκε το ακουστικό σήμα σε 30 διαφορετικά σημεία σε κάθε επίπεδο.

Για την ομοιόμορφη απεικόνιση των υπολογισμένων σταθμών έντασης SPL σε κάθε επίπεδο μέτρησης εφαρμόστηκε interpolation στο υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB. Κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Στις πειραματικές εφαρμογές, των οποίων τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στα σχήματα 1 έως και 6, η ηχητική διαταραχή περιλαμβάνει δυο αρμονικές συχνότητες 80 Hz και 160 Hz και τυχαίο θόρυβο έντασης έως 40dB.

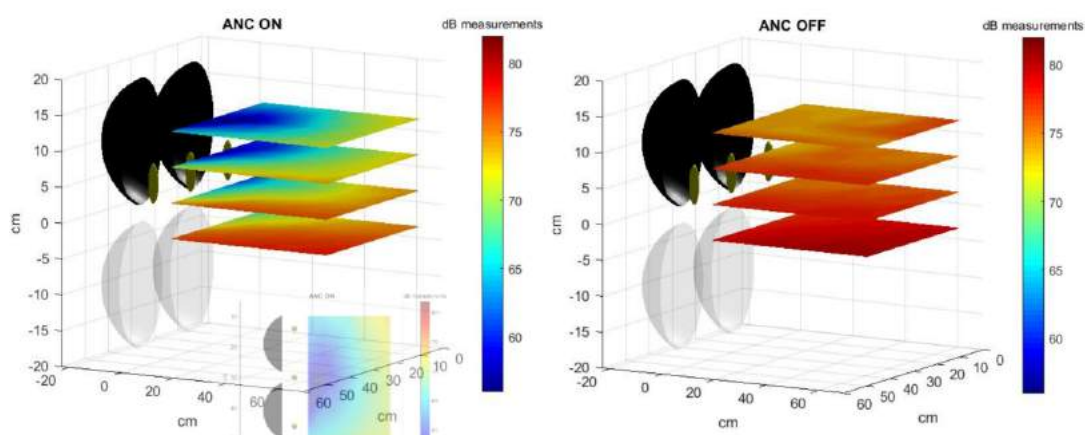
Αρχικά, και σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην πρώτη ενότητα, μετρήθηκε η στάθμη του θορύβου πριν την εφαρμογή του ANC. Όπως παρατηρείται στα σχήματα η συνολική στάθμη έντασης SPL του πρωτογενούς σήματος θορύβου κυμαίνεται μεταξύ 70 και 85 dB. Στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε το σύστημα ANC. Η μείωση του θορύβου είναι σημαντική στο χώρο που εξετάζεται και κυμαίνεται μεταξύ 60 και 70 dB.

### 6.7.1 Άθροισμα error μικροφώνων

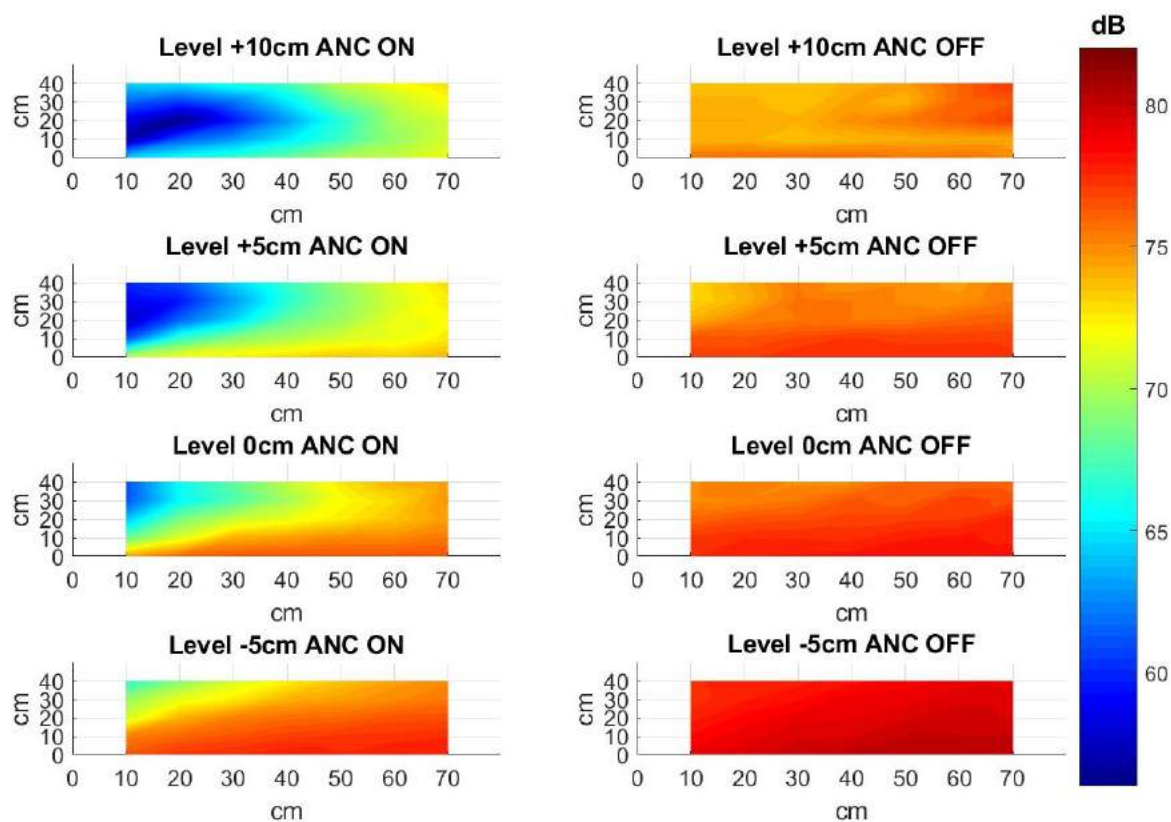
Αρχικά υλοποιήθηκε αλγόριθμος τύπου MIMO FXLMS με πολλαπλά μικρόφωνα για την καταγραφή της μέσης ηχητικής πίεσης στο χώρο και την αύξηση της ζώνης. Η τοποθέτηση των μικροφώνων στο χώρο έγινε εμπειρικά.



Σχήμα 6.8: Πλάγια όψη συστήματος ANC.

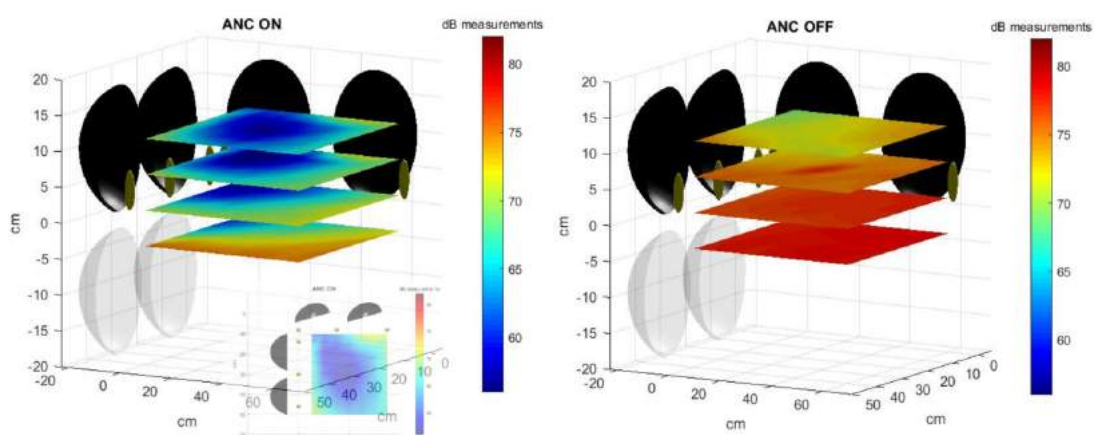


Σχήμα 6.9: Διάταξη 1

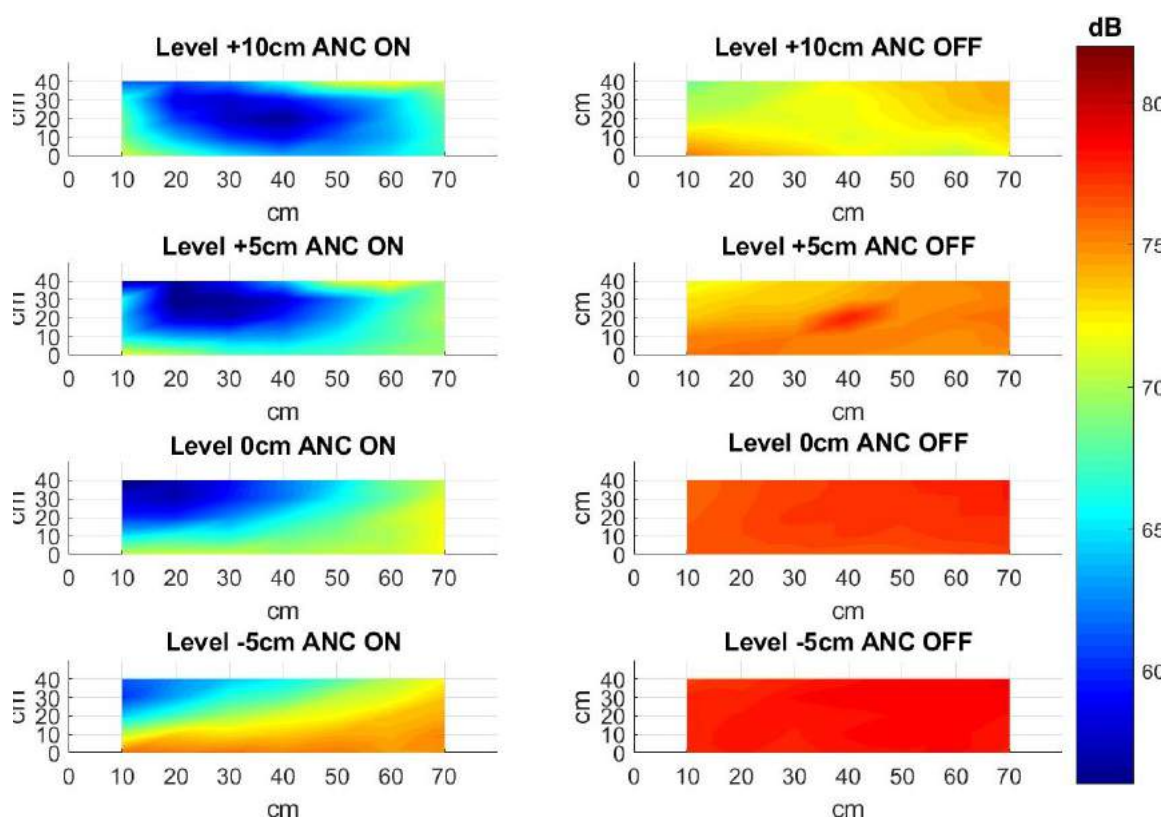


Σχήμα 6.10: Επίπεδα διάταξης 1

Τα αποτελέσματα της διάταξης 1 δεν δείχνουν υπερκάλυψη των στόχων που έχουν τεθεί ως προς το εύρος της ζώνης ησυχίας. Στην επόμενη διάταξη (διάταξη 2) χρησιμοποιήθηκαν δύο επιπλέον ηχεία και τα μικρόφωνα τοποθετήθηκαν εμπειρικά.



Σχήμα 6.11: Διάταξη 2



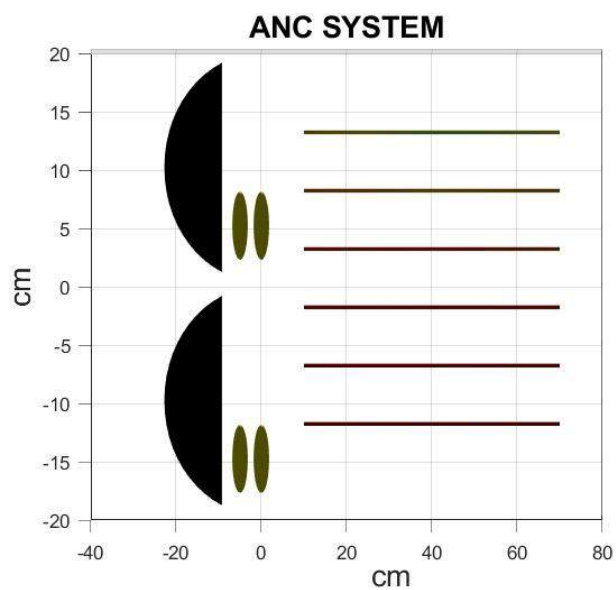
Σχήμα 6.12: Επίπεδα διάταξης 2

Η διάταξη 2 πλησιάζει στην επίτευξη των ζητούμενων στόχων. Ωστόσο ο βαθμός "εμπειρικότητας" που απαιτείται είναι ιδιαίτερα αυξημένος και καθιστά μη πρακτική και χρονοβόρα την τοποθέτηση του συστήματος σε οποιαδήποτε εγκατάσταση.

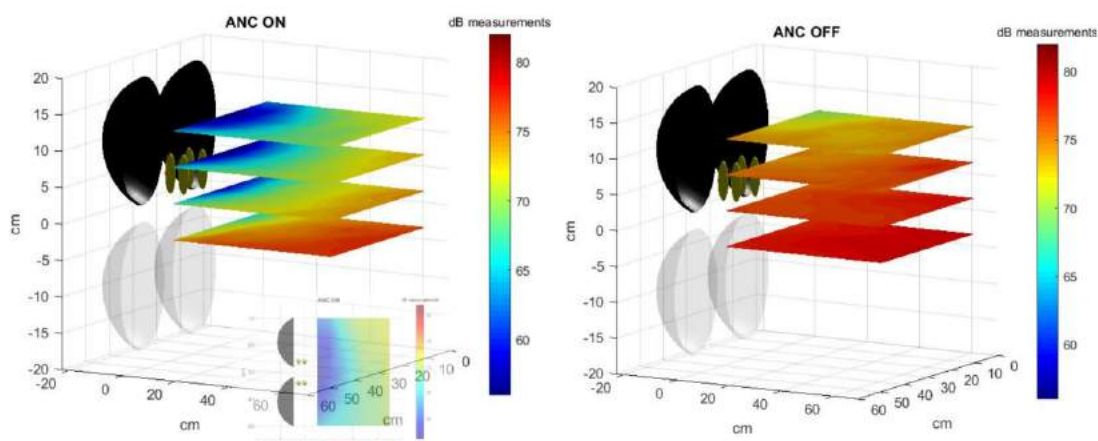
### 6.7.2 Extrapolation

Υλοποιήθηκε επίσης αλγόριθμος τύπου MIMO extrapolation με πολλαπλά μικρόφωνα για την καταγραφή της μέσης ηχητικής πίεσης στο χώρο και την αύξηση της ζώνης. Η τοποθέτηση των μικροφώνων στο χώρο έγινε με συστηματικό τρόπο λόγω της ευκολίας ρύθμισης

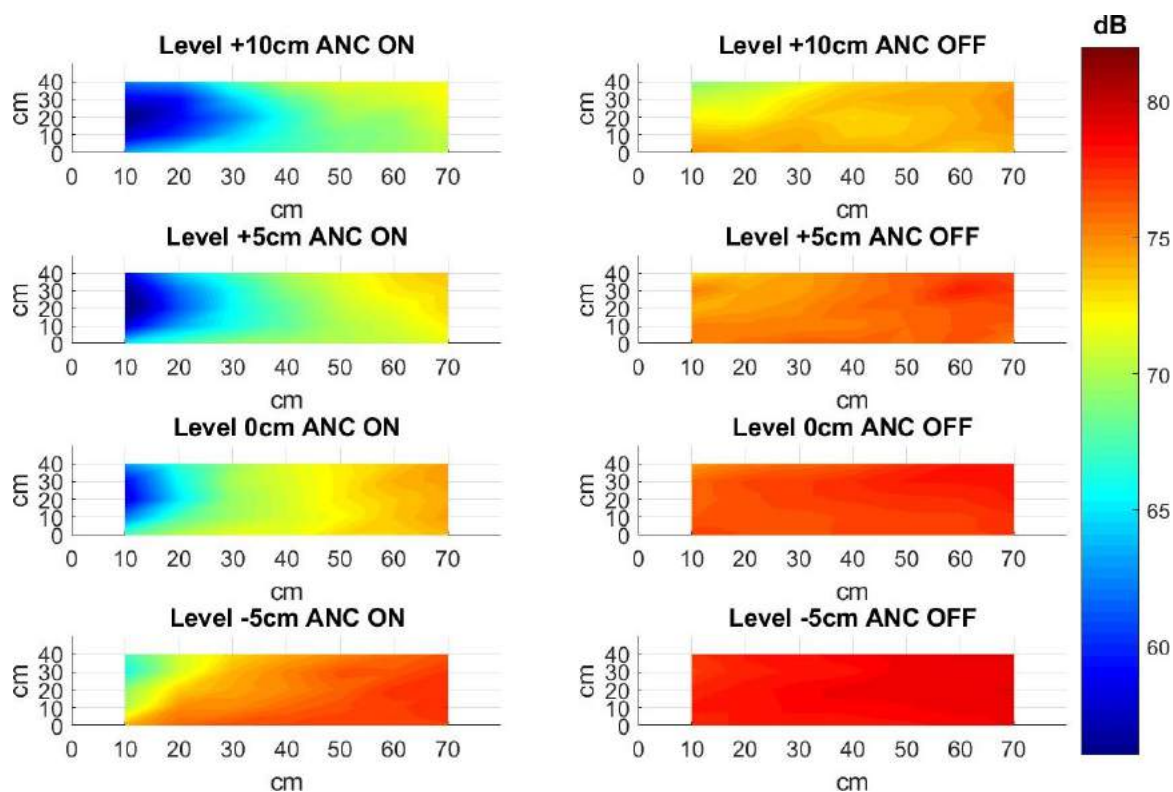
της απόστασης αποκοπής με προγραμματιστικό τρόπο.



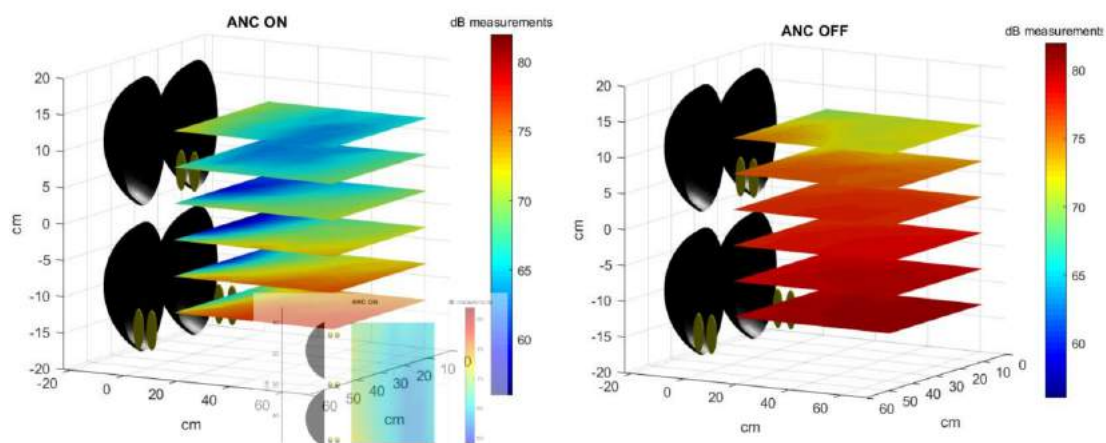
Σχήμα 6.13: Πλάγια όψη συστήματος ANC.



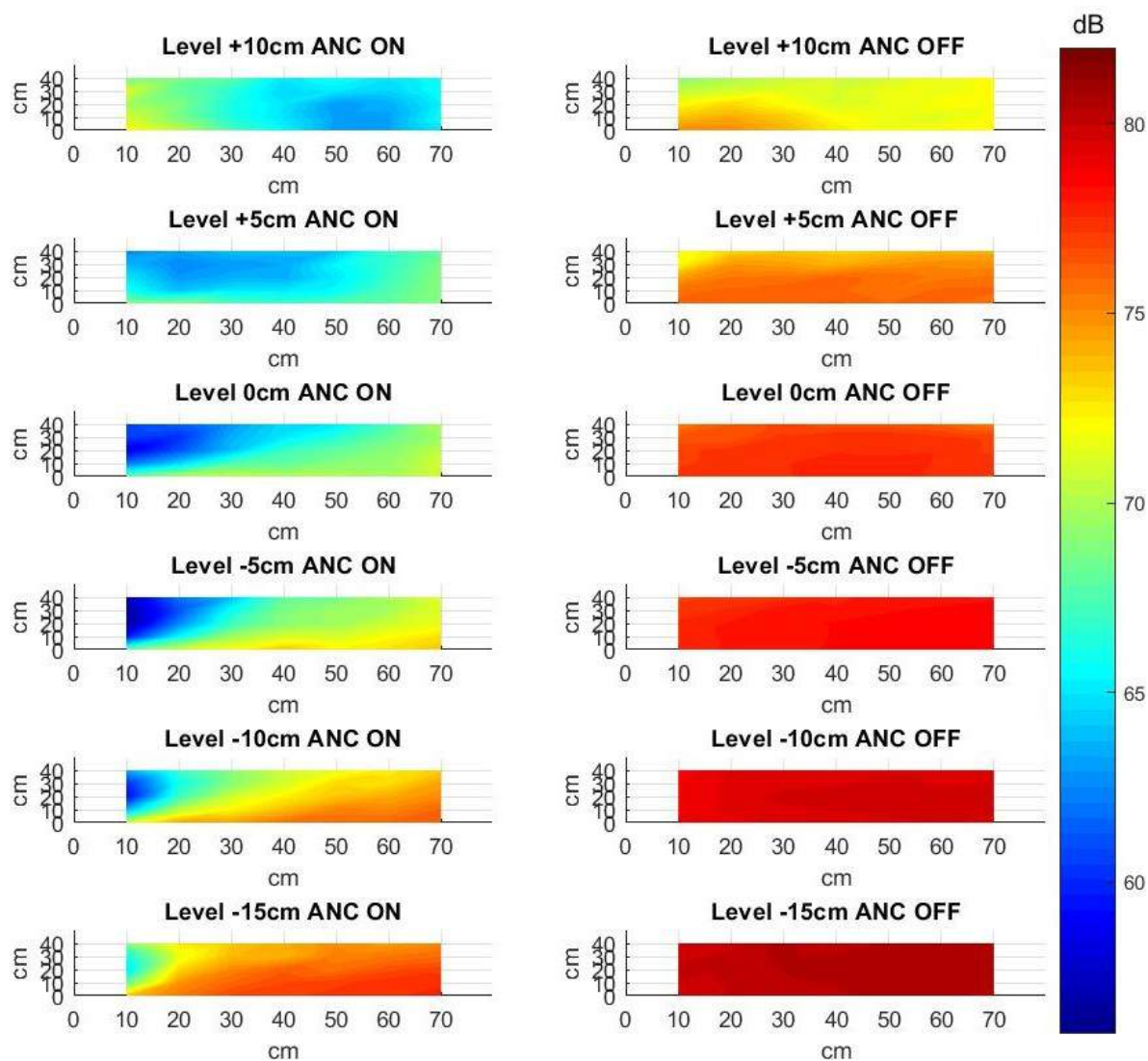
Σχήμα 6.14: Διάταξη 3



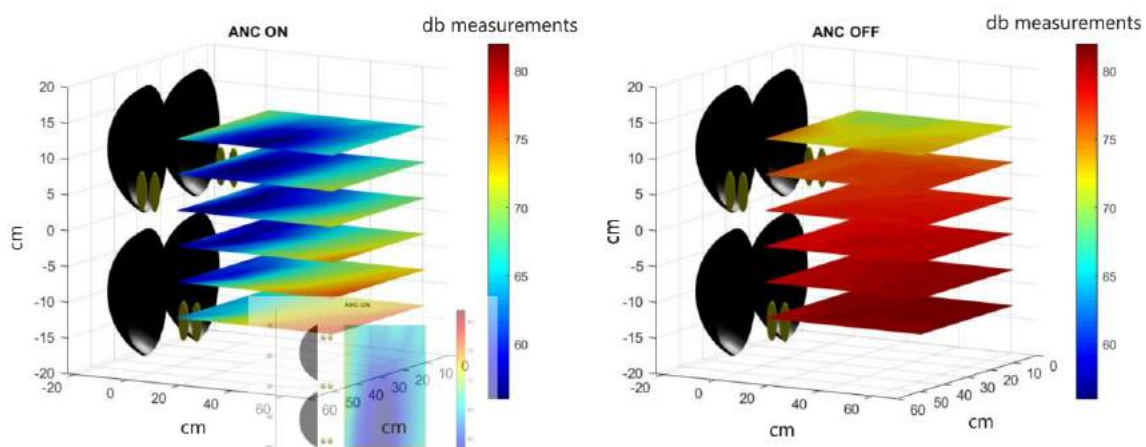
Σχήμα 6.15: Επίπεδα διάταξης 3



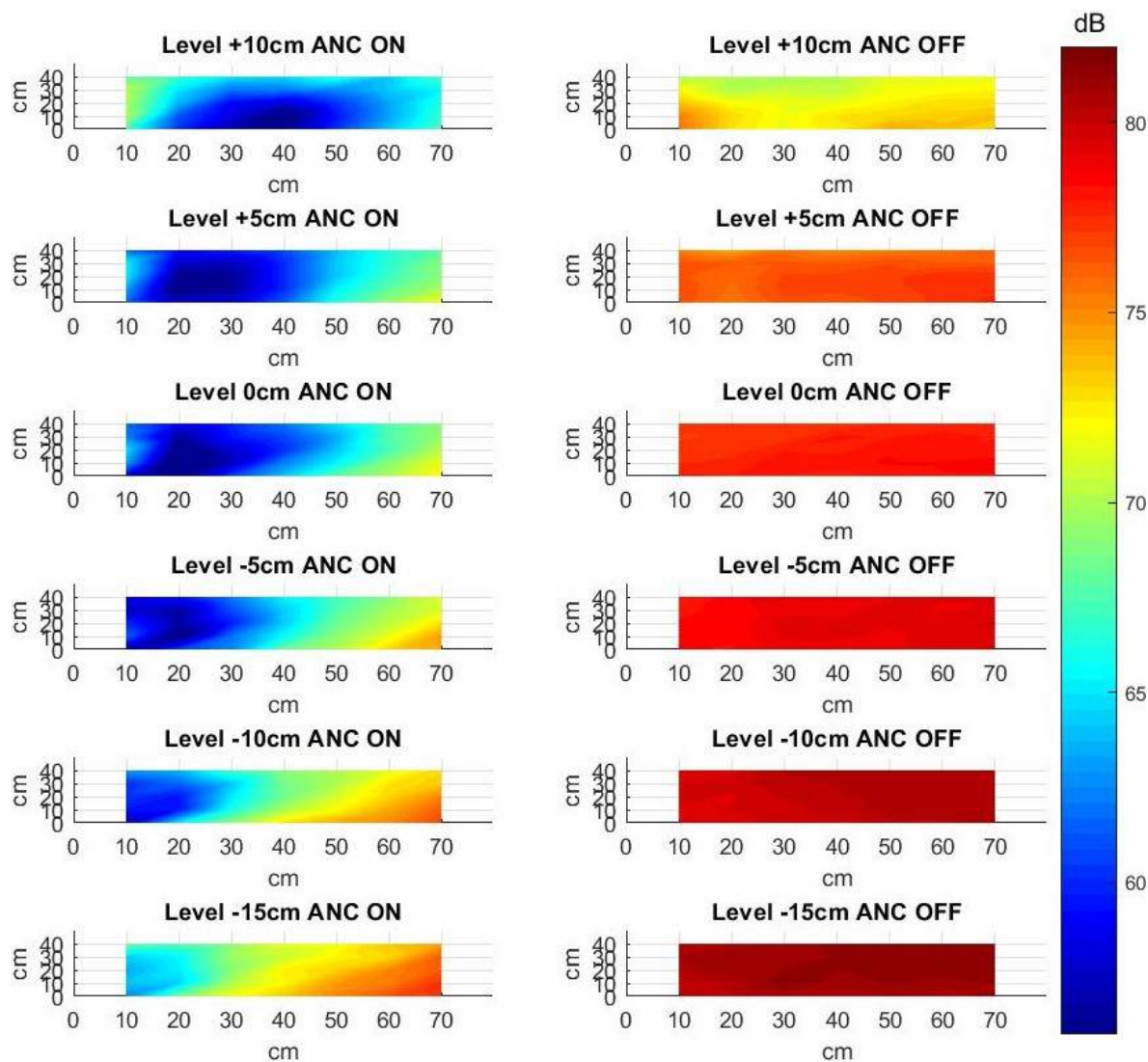
Σχήμα 6.16: Διάταξη 4



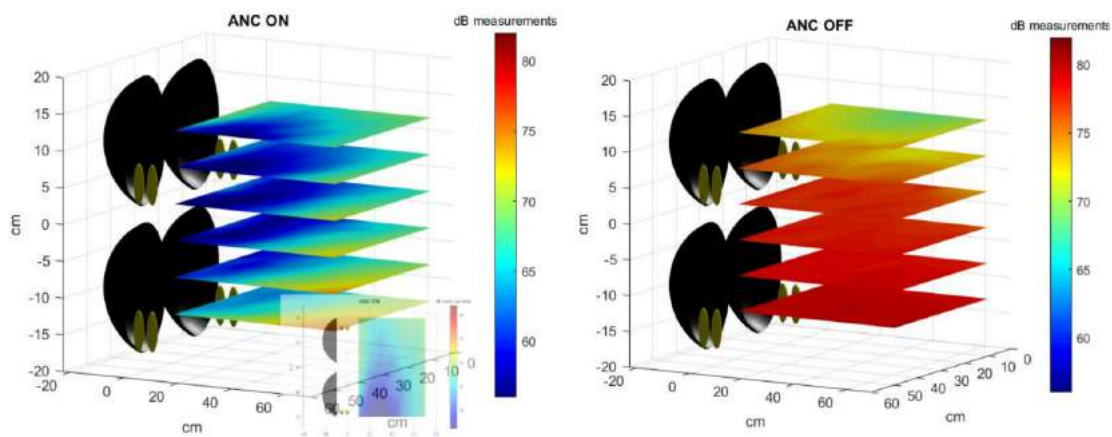
Σχήμα 6.17: Επίπεδα διάταξης 4



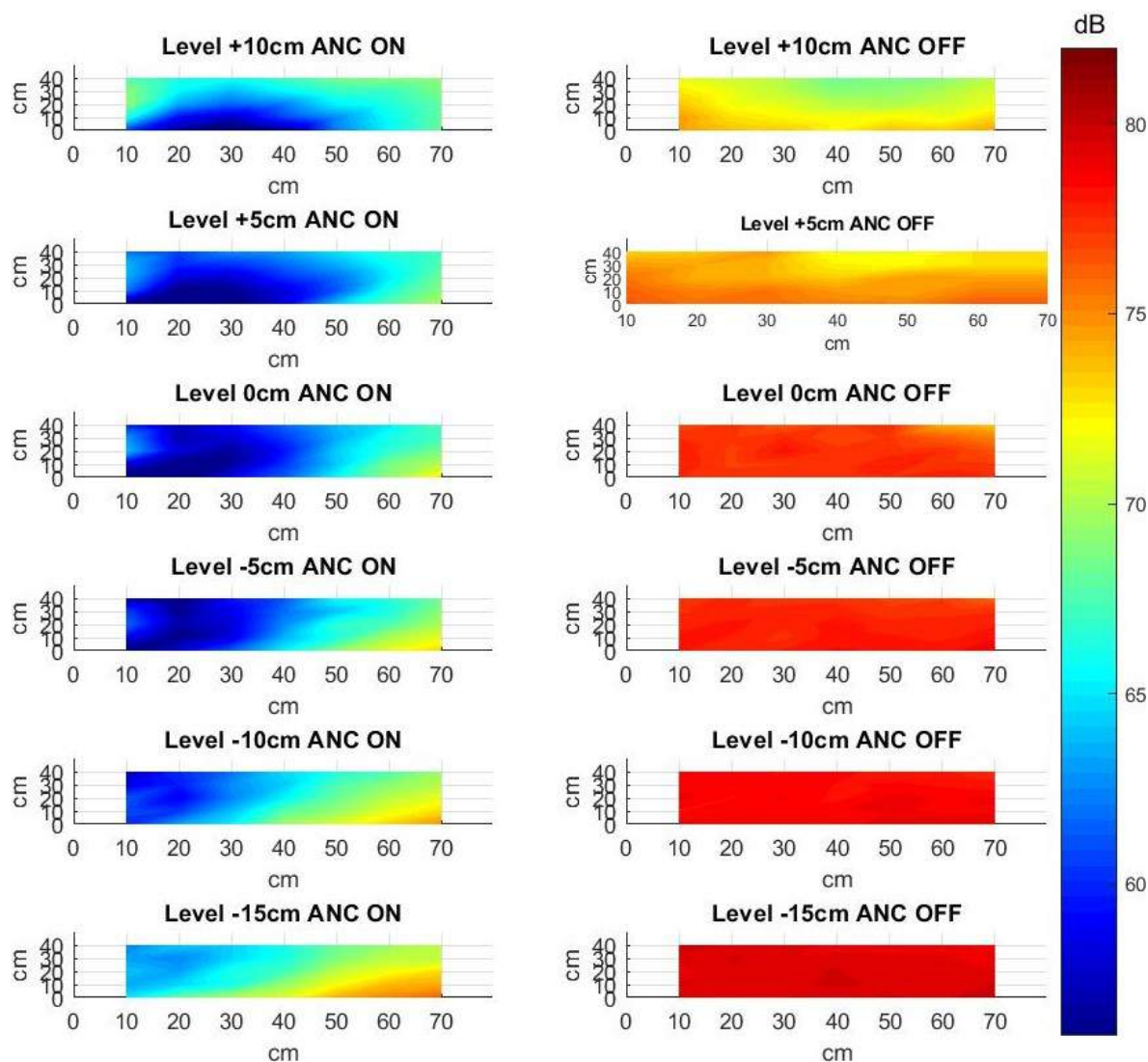
Σχήμα 6.18: Διάταξη 5



Σχήμα 6.19: Επίπεδα διάταξης 5



Σχήμα 6.20: Διάταξη 6



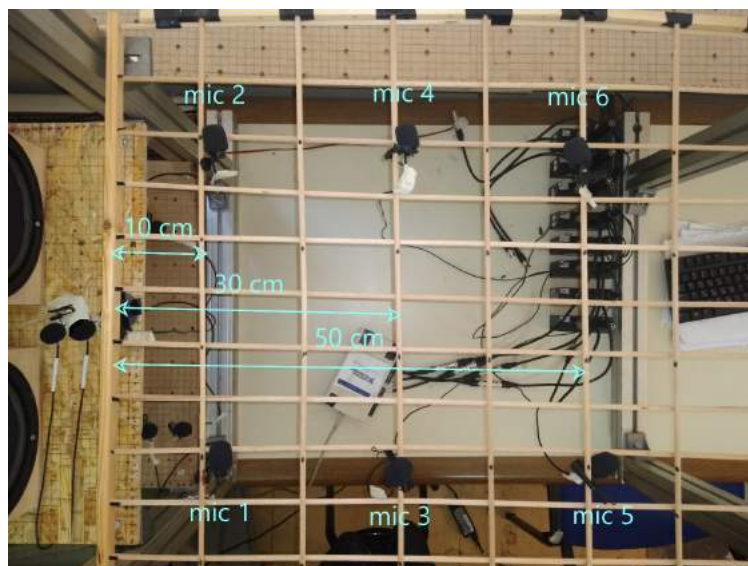
Σχήμα 6.21: Επίπεδα διάταξης 6

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, οι διατάξεις 4 και 5 εμφανίζουν την καλύτερη ζώνη ησυχίας και υπερκάλυψη του στόχου έκτασης της. Επιπρόσθετα, για τις δύο καλύτερες διατάξεις ακολούθησε ακριβής καταγραφή των επιμέρους αρμονικών για την καλύτερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

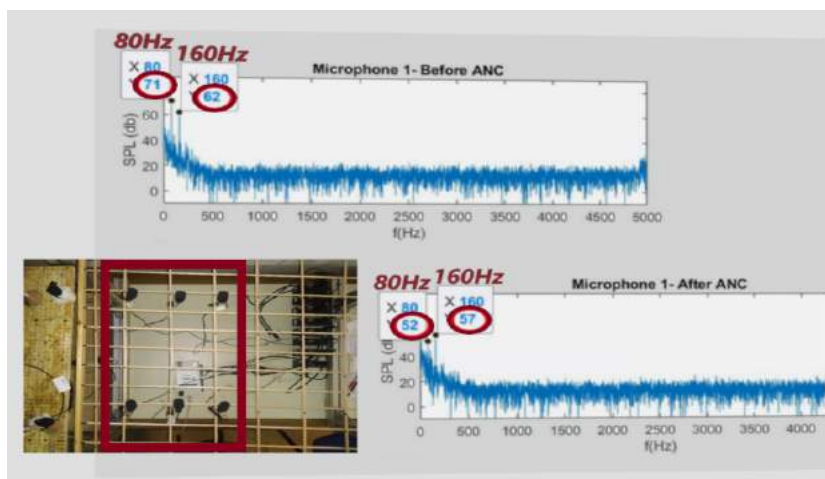


## 6.8 Πειραματικά αποτελέσματα 2- Φάσματα 80+160Hz

Εν συνεχεία καταγράφηκαν τα φάσματα των κυματομορφών στα 6 μικρόφωνα καταγραφής που έχουν τοποθετηθεί στις αποστάσεις 10, 30 και 50cm από το κάθετο επίπεδο της διάταξης όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Σημειώθηκαν τα dB των αρμονικών 80Hz και 160Hz πριν και μετά την εφαρμογή του ANC. Έγιναν 6 καταγραφές σε κάθε επίπεδο ενδιαφέροντος για συνολικά 6 επίπεδα.



Σχήμα 6.22: Μετρητική διάταξη



Σχήμα 6.23: Παράδειγμα data acquisition

Τα αποτελέσματα για τη διάταξη 4 extrapolation συγκεντώθηκαν στον συγκεντρωτικό πίνακα 1 όπου εμφανίζεται η πτώση των dB με τη διάταξη extrapolation να είναι ρυθμισμένη (προγραμματιστικά) να "κόβει" στα 10cm και στα 30cm.



Σχήμα 6.24: Διάταξη 4 και μετρητική διάταξη

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας 1-Φάσματα διάταξης 4

Level +10												
mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	74		62	74	58		74	58		74	58	
10 cm extrapolation	67	7	63	70	62	-4	72	2		59	-1	
30 cm extrapolation	64	10	63	70	62	-4	72	2		59	-1	
mic 1 (10 cm)				mic 3 (20 cm)				mic 5 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	71		61	72	59		71	59		71	59	
10 cm extrapolation	57	14	60	67	55	4	69	2		37	22	
30 cm extrapolation	52	19	61	66	53	6	69	2		37	22	
Level +5												
mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	74		62	74	60		74	58		74	58	
10 cm extrapolation	68	6	61	70	60	0	72	2		56	2	
30 cm extrapolation	63	11	62	70	60	0	72	2		56	2	
mic 1 (10 cm)				mic 3 (20 cm)				mic 5 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	71		62	72	61		72	62		72	62	
10 cm extrapolation	56	15	58	67	52	9	70	2		47	15	
30 cm extrapolation	49	22	60	66	47	14	69	3		48	14	
Level 0												
mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	74		63	74	61		74	59		74	59	
10 cm extrapolation	65	9	59	70	57	4	72	2		53	6	
30 cm extrapolation	61	13	60	70	57	4	72	2		51	8	
mic 1 (10 cm)				mic 3 (20 cm)				mic 5 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	71		62	72	63		72	63		72	63	
10 cm extrapolation	51	20	53	66	37	26	70	2		53	10	
30 cm extrapolation	52	19	57	65	36	27	69	3		53	10	

Level -5													
	mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	
Before ANC		74		64		74		63		74		61	
10 cm extrapolation		65	9	56	8	70	4	53	10	72	2	48	13
30 cm extrapolation		60	14	57	7	70	4	53	10	72	2	32	29

Level -10													
	mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	
Before ANC		72		65		72		67		72		65	
10 cm extrapolation		65	7	51	14	70	2	48	19	73	-1	44	21
30 cm extrapolation		59	13	53	12	69	3	49	18	72	0	43	22

Level -15													
	mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	
Before ANC		74		65		74		65		74		64	
10 cm extrapolation		66	8	51	14	71	3	53	12	73	1	51	13
30 cm extrapolation		60	14	46	19	70	4	44	21	72	2	52	12

Level -5													
	mic 1 (10 cm)				mic 3 (20 cm)				mic 5 (30 cm)				
	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	
Before ANC		71		64		71		65		72		64	
10 cm extrapolation		52	19	46	18	66	5	47	18	70	2	56	8
30 cm extrapolation		52	19	52	12	65	6	48	17	69	3	58	6

Level -10													
	mic 1 (10 cm)				mic 3 (20 cm)				mic 5 (30 cm)				
	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	
Before ANC		74		64		75		65		74		62	
10 cm extrapolation		53	21	39	25	66	9	53	12	70	4	58	4
30 cm extrapolation		54	20	48	16	65	10	52	13	69	5	60	2

Level -15													
	mic 1 (10 cm)				mic 3 (20 cm)				mic 5 (30 cm)				
	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	Amp	80 Hz	Diff	Amp	160 Hz	Diff	
Before ANC		72		65		72		66		72		66	
10 cm extrapolation		57	15	52	13	67	5	58	8	70	2	60	6
30 cm extrapolation		54	18	41	24	65	7	55	11	69	3	62	4

Αντίστοιχα καταγράφηκαν τα αποτελέσματα για τη διάταξη 5 extrapolation και συγκεντρώθηκαν στον συγκεντρωτικό πίνακα 2 όπου εμφανίζεται η πτώση των dB με τη διάταξη extrapolation να είναι ρυθμισμένη (προγραμματιστικά) να "κόβει" πάλι στα 10cm και στα 30cm.



Σχήμα 6.25: Διάταξη 5 και μετροική διάταξη

Πίνακας 6.2: Συγκενρωτικός πίνακας 1-Φάσματα διάταξης 5

Level +10												
mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	80 Hz		160 Hz		80 Hz		160 Hz		80 Hz		160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff
Before ANC	73		64		73		63		73		62	
10 cm extrapolation	66	7	60	4	69	4	59	4	70	3	58	4
30 cm extrapolation	63	10	60	4	67	6	59	4	69	4	58	4

Level +5												
mic 1 (10 cm)				mic 3 (20 cm)				mic 5 (30 cm)				
	80 Hz		160 Hz		80 Hz		160 Hz		80 Hz		160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff
Before ANC	70		62		71		60		71		61	
10 cm extrapolation	59	11	50	12	64	7	43	17	67	4	45	16
30 cm extrapolation	53	17	49	13	62	9	35	25	66	5	43	18

Level +5												
mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	80 Hz		160 Hz		80 Hz		160 Hz		80 Hz		160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff
Before ANC	73		65		73		64		73		63	
10 cm extrapolation	65	8	58	7	68	5	57	7	70	3	56	7
30 cm extrapolation	62	11	57	8	67	6	56	8	69	4	54	9

Level +5												
mic 1 (10 cm)				mic 3 (20 cm)				mic 5 (30 cm)				
	80 Hz		160 Hz		80 Hz		160 Hz		80 Hz		160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff	Amp	Diff
Before ANC	70		63		71		62		71		61	
10 cm extrapolation	57	13	40	23	64	7	48	14	67	4	51	10
30 cm extrapolation	47	23	33	30	62	9	48	14	65	6	52	9

Level 0												
mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	73		65		73		64		73		63	
10 cm extrapolation	65	8	54	11	68	5	53	11	71	2	49	14
30 cm extrapolation	61	12	52	13	67	6	50	14	71	2	45	18

Level -5												
mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	73		67		73		66		74		66	
10 cm extrapolation	64	9	56	11	68	5	57	9	70	4	59	7
30 cm extrapolation	59	14	46	21	66	7	48	18	69	5	49	17

Level -10												
mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	73		67		73		66		74		66	
10 cm extrapolation	64	9	56	11	68	5	57	9	70	4	59	7
30 cm extrapolation	58	15	55	12	66	7	57	9	69	5	58	8

Level -15												
mic 2 (10 cm)				mic 4 (20 cm)				mic 6 (30 cm)				
	80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz		80 Hz	160 Hz	
	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	Amp	Amp	Diff	
Before ANC	73		67		73		66		74		67	
10 cm extrapolation	64	9	59	8	68	5	60	6	70	4	61	6
30 cm extrapolation	60	13	59	8	67	6	60	6	69	5	61	6

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν υπερκάλυψη των στόχων που τέθηκαν και τη δημιουργία μιας ζώνης ησυχίας ικανής να προσφέρει άνεση στα αυτιά ενός καθισμένου επιβάτη. Η δημιουργούμενη ζώνη ησυχίας κατανέμεται ομοιόμορφα στο χώρο με τη μείωση της απόδοσης της να επέρχεται σταδιακά ανάλογα με την αύξηση της απόστασης από τα μικρόφωνα του συστήματος.



---

## Κεφάλαιο **7**

# Επίλογος

---

Με την πάροδο των χρόνων ο ενεργητικός έλεγχος θορύβου χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο τόσο στη βιομηχανία όσο και σε εμπορικές εφαρμογές λόγω των ασύγκριτων πλεονεκτημάτων που προσφέρει σε σχέση με τις παθητικές τεχνικές.

- Εύκολη και οικονομική τοποθέτηση του συστήματος.
- Δημιουργία ζωνών ησυχίας σε δυσπρόσιτες περιοχές.
- Ελαφριά κατασκευή που τοποθετείται παντού και "κρύβεται" εύκολα.

### 7.1 Συμπεράσματα

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας είναι ένα πλήρες σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου που πετυχαίνει ικανοποιητική πτώση dB και ζώνη ησυχίας στην περιοχή τοποθέτησης του κεφαλιού ενός καθισμένου επιβάτη. Μάλιστα είναι δυνατός ο έλεγχος της απόστασης αποκοπής σε πραγματικό χρόνο από τον χρήστη. Η κατασκευή θα δοκιμαστεί μελλοντικά σε αληθινές συνθήκες αεροπλάνου και θαλαμηγού και θα εκτιμηθεί για την αποτελεσματικότητά της.

### 7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί ως προς τις ακόλουθες κατευθύνσεις.

- Για τη βελτίωση των αλγορίθμων εικονικού μικροφώνου είναι πολύ σημαντική η συνεκτίμηση και η καταγραφή της ταχύτητας του ηχητικού κύμματος με κατάλληλα μικρόφωνα (velocity microphones). Με αυτά τα μικρόφωνα αναπτύσσονται τεχνικές που χρησιμοποιούν την συνολική ενέργεια του ηχητικού κύμματος και όχι απλά την ηχητική πίεση στα σημεία καταγραφής.
- Εύρεση βέλτιστου αλγορίθμου για περαιτέρω μείωση του επιπέδου της ηχητικής έντασης. Προς αυτή τη κατεύθυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι τύπου FsLMS, FxsLMS, Notch Filter κ.α.
- Τρισδιάστατη μοντελοποίηση της χωρικής συνάρτησης μεταφοράς για διαφορετικές θέσεις πηγών στο χώρο για την επιλογή της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης του συστήματος στο χώρο. Όπως φάνηκε στο κεφάλαιο 6, σε όλες τις διατάξεις παρατηρήθηκε μη ομοιόμορφη απόσβεση του πεδίου στα επίπεδα. Αυτό οφείλεται στην ευαισθησία του συστήματος σε ανακλαστικά αντικείμενα και επιφάνειες που το περικλείουν.

- Υλοποίηση μη γραμμικών αλγορίθμων για την απόσβεση background θορύβου. Η απόσβεση μη γραμμικού και ασυσχέτιστου θορύβου απαιτεί την εφαρμογή πιο αποτελεσματικών μεθόδων ικανών να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα στις μη γραμμικές μεταβολές που εμφανίζονται στα πραγματικά συστήματα. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η χρήση νευρωνικών δικτύων neural networks τύπου ANN, AEFLN, Volterra κ.α [30, 31, 32, 33].



---

## Βιβλιογραφία

---

- [1] S. Kuo and D. Morgan. [*Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*]. John Wiley and Sons, INC, 1996
- [2] D. Das, D. Moreau and B. Cazzolato. [*Nonlinear active noise control algorithm for virtual microphones controlling chaotic noise*]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012.
- [3] D. Moreau, B. Cazzolato, A. Zander and C. Petersen. [*A Review of Virtual Sensing Algorithms for Active Noise Control*]. Algorithms, 2008
- [4] S. Popovich [*Active acoustic control in remote regions*]. US Patent No 5,701,350, 1997
- [5] B. Cazzolato [*Sensing systems for active control of sound transmission into cavities*]. Doctor of Philosophy, University of Adelaide, 1999
- [6] J. Munn [*Virtual sensors for active noise control*]. Doctor of Philosophy, University of Adelaide, 2003
- [7] C. Kestell, B. Cazzolato and C. Hansen [*Active noise control in a free field with virtual sensors*]. Acoustical Society of America, 2001
- [8] B. Widrow, D. Shur and S. Shaffer [*On adaptive inverse control*]. in Proceeding of the 15th Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers, Nov. 1981
- [9] P. Song and H. Zhao [*Filtered-x generalized mixed norm (FXGMN) algorithm for active noise control*]. ELSEVIER, Feb. 2018
- [10] B. Widrow [*Adaptive Inverse Control*]. Search in this journal 2nd IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, 1986
- [11] I. Ardekani [*Stability Analysis of Adaptation Process in FxLMS-Based Active Noise Control*]. Doctor of Philosophy, University of Auckland, New Zealand, 2013
- [12] A. Streeter, L. Ray and R. Collier [*Hybrid Feedforward-Feedback Active Noise Control*]. Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30 - July 2, 2004
- [13] J. Lee, J. Holte and E. Ritenour [*A real-time data acquisition and control of gradient coil noise for fMRI identification of hearing disorder in children with history of ear infection*]. Quant Imaging Med Surg, Feb. 2013
- [14] A. Shalool, N. Zainal, K. Gan and C. Umat [*An Investigation of Passive and Active Noise Reduction using Commercial and Standard TDH-49 Headphones*]. International Conference on Advances in Electrical, Electronic and System Engineering, Nov 2016

- [15] Y. Kajikawa<sup>1</sup>, W. Gan and S. kuo [*Recent advances on active noise control: open issues and innovative applications*]. Cambridge JOURNALS, Feb. 2018
- [16] R. Falcao [*Adaptive Filtering Algorithms For Noise Cancellation*]. Master thesis, Automation Systems, FEUP, Jul. 2012
- [17] N. Miyazaki and Y. Kajikawa [*Head-mounted activenoisecontrolsystemwithvirtual sensing technique*]. ELSEVIER, Journal of Sound and Vibration, Dec. 2014
- [18] S. Edamoto ,C. Shi and Y. Kajikawa [*Virtual Sensing Technique for Feedforward Active Noise Control*]. 172nd Meeting of the Acoustical Society of America, Dec. 2016
- [19] S. Ahamed and P. Duraiswamy [*Virtual Sensing Active Noise Control System with 2D Microphone Array for Automotive Applications*]. Conference Paper, April 2019
- [20] K. Das, S. Das, A. Abu, N. Hamada, H. Toh, S. Das and W. Faris [*All-pass filtered x least mean square algorithm for narrowband active noise control*]. ELSEVIER, Applied Acoustics, 2018
- [21] S. Zhang, Y. Wang, H. Guo, C. Yang, X. Wang, N. Liu [*A normalized frequency-domain block filtered-x LMS algorithm for active vehicle interior noise control*]. ELSEVIER, Mechanical Systems and Signal Processing, Oct. 2018
- [22] Y. Kajikawa and C. Shi [*Comparison of Virtual Sensing Techniques for Broadband Feedforward Active Noise Control*]. International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), 2019
- [23] C. Lei, J. Xu, J. Wang, C. Zheng and X. Li [*Active Headrest with Robust Performance Against Head Movement*]. Journal Of Low Frequency Noise, Vibration And Active Control, Jan. 2015
- [24] L. Sujbert and A. Szarvas [*Noise-Canceling Office Chair with Multiple Reference Microphones*]. Applied sciences, Sep. 2018
- [25] W. Jung, S. Elliott and J. Cheer [*Combining the remote microphone technique with head-tracking for local active sound control*]. The Journal of the Acoustical Society of America, Jul. 2017
- [26] Y. Koba, D. Kondo and S. Kijimoto [*Active Noise Control Using a Virtual Sensing Algorithm with Incident Direction Information of Noise*]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2012
- [27] S. Kuo, S. Mitra and W. Gan, [*Active Noise Control System for Headphone Applications*]. IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 14, no. 2, March 2006
- [28] B. Widrow and S. Stearns [*Adaptive Signal Processing*]. Prentice-Hall signal processing series, 1985

- 
- [29] P. Lueg [*Process of silencing sound oscillations* ]. Patent US2043416A, United States, 1934
- [30] D. Das and G. Panda [*Active Mitigation of Nonlinear Noise Processes Using a Novel Filtered-s LMS Algorithm*]. IEEE Transactions On Speech And Audio Processing, Vol. 12, no. 3, May 2004
- [31] D. Das, S. Mohapatra, A. Routray and T. Basu [*Filtered-s LMS Algorithm for Multi-channel Active Control of Nonlinear Noise Processes*]. IEEE Transactions On Speech And Audio Processing, Vol. 14, no. 5, Sep 2006
- [32] G. Sicuranza and A. Carini [*A Generalized FLANN Filter for Nonlinear Active Noise Control*]. IEEE Transactions On Audio , Speech and Language Processing, Vol. 19, no. 8, Nov 2011
- [33] V. Patel, V. Gandhi, S. Heda and N. George [*Design of Adaptive Exponential Functional Link Network-Based Nonlinear Filters*]. IEEE Transactions On Circuits and Systems, Vol. 63, no. 9, Sep 2016



## Συντμήσεις - Αγγλικοί όροι - Ελληνικοί όροι

AF	Adaptive Filter	Προσαρμοστικό φίλτρο
DSP	Digital Signal Processing	Ψηφιακή επεξεργασία σήματος
FIR	Finite Impulse Response	Κρουστική απόκριση
LMS	Least-Mean-Squared	Ελαχίστου μέσου σφάλματος
MSE	Mean-Squared Error	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα
ANC	Active Noise Control	Ενεργητικός έλεγχος θορύβου
VM	Virtual Microphone method	Μέθοδος νοητού μικροφώνου
RMT	Remote Microphone Technique	Μέθοδος απομακρυσμένου(νοητού) μικροφώνου
SD	Steepest Descent	