



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ενεργητικός Έλεγχος Χαμηλόσυχνου Αρμονικού Θορύβου σε Μέσα Μεταφοράς

Μυλωνάς Δημήτριος

Επιβλέποντες: Δρ. Αντωνιάδης Ιωάννης, Καθηγητής

Δρ. Γιακόπουλος Χρήστος, ΕΔΙΠ

ΑΘΗΝΑ 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ενεργητικός Έλεγχος Χαμηλόσυχνου Αρμονικού Θορύβου σε Μέσα Μεταφοράς

Μυλωνάς Δημήτριος

Επιβλέποντες: Δρ. Αντωνιάδης Ιωάννης, Καθηγητής

Δρ. Γιακόπουλος Χρήστος, ΕΔΙΠ

ΑΘΗΝΑ 2019

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την / /2019.

.....
Αντωνιάδης Ιωάννης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Προβατίδης Χριστόφορος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Κουλοχέρης Δημήτριος

Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π

.....

Δημήτριος Ε. Μυλωνάς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Δημήτριος Ε. Μυλωνάς 2019.

Με επιφύλαξη παντός νόμιμου δικαιώματος. All rights reserved

Ευχαριστίες

Η συγγραφή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας δεν θα είχε καταστεί δυνατή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια ορισμένων ανθρώπων τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω. Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Αντωνιάδη Ιωάννη και τον μεταδιδακτορικό ερευνητή κ. Γιακόπουλο Χρήστο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν κατά την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την συνεχή υποστήριξη σε όποιο πρόβλημα ανέκυπτε κατά την υλοποίηση του συστήματος ANC. Επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους συναδέλφους μηχανικούς Αλμπέρτο Ερσπάμερ και Άγγελο Σκούρα για την συνεργασία μιας και το έργο που πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία είναι αποτέλεσμα ομαδικής δουλειάς. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κώστα Φούσκα για την υποστήριξη σε ποικίλα τεχνικά και γραφειοκρατικά θέματα που αντιμετώπισα.

Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η υλοποίηση ενός συστήματος ενεργητικού ελέγχου θορύβου, το οποίο θα μειώνει το επίπεδο θορύβων χαμηλής συχνότητας μέσα στην καμπίνα μέσων μεταφοράς (αυτοκίνητα, μικρά αεροσκάφη, θαλαμηγοί), οι οποίοι προέρχονται από τους κινητήρες των μέσων αυτών. Η μείωση των θορύβων αυτών συμβάλλει στη βελτίωση των συνθηκών που επικρατούν στην καμπίνα των επιβατών. Προκειμένου να επιτευχθεί το εν λόγω σύστημα ήταν αναγκαία η σε βάθος μελέτη των αλγορίθμων, του ελεγκτή καθώς και των αισθητήρων και επενεργητών που θα χρησιμοποιούνταν. Έτσι υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος FxLMS στο περιβάλλον του LabView 2017. Σαν υπολογιστική πλατφόρμα για να “τρέξει” ο FxLMS χρησιμοποιήθηκε ο CRIO-9030. Έπειτα έγινε η επιλογή κατάλληλων ηχείων και μικροφώνων, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική μείωση του χαμηλόσυχνου θορύβου.

Λέξεις Κλειδιά: Αλγόριθμος FxLMS, ενεργητικός έλεγχος θορύβου, δευτερογενές μονοπάτι, μείωση θορύβου, προσαρμοστικό φίλτρο, μείωση θορύβου, ενεργητική ακύρωση θορύβου

Abstract

The objective of this thesis is to study and implement an active noise control system (ANC) aimed at reducing a low-frequency sound from the cabin of vehicles such as automobiles and light aircrafts. The sound is produced by the engines of the vehicle and its reduction leads to the comfort enhancement inside the cabin. In order to achieve active noise control in these environments, aspects as the control method, the actuator and sensor type and the positioning must be considered. Filtered x LMS algorithm is used, implemented in LabVIEW 2017 environment. The algorithm “runs” in cRIO 9030 system of National Instruments. Significant decrease of the sound level and especially of the 100 Hz harmonic was noted.

Keywords: Filtered-x LMS algorithm, active noise control, secondary path, noise reduction, adaptive filter, LMS algorithm, active noise cancellation

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Περιεχόμενα.....	7
Εισαγωγή.....	10
1.1 Φυσικές αρχές των ακουστικών κυμάτων	11
1.2 Η αρχή της υπέρθεσης	12
1.3 Θεμελιώνοντας το πρόβλημα του Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου....	13
1.4 Περιγραφή του ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου.....	14
1.5 Πρωτεύον και δευτερεύον μονοπάτι (primary and secondary path)...	15
1.6 Δομή Συστημάτων ενεργητικού ελέγχου θορύβου	17
1.7 Ανασκόπηση αλγορίθμων για συστήματα Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου.....	17
2. Περιγραφή του αλγορίθμου FxLMS.....	18
2.1 Φίλτρο Wiener.....	18
2.2 Εξισώσεις Wiener για FIR εγκάρσιο φίλτρο (Finite Impulse Response transversal Filter)	19

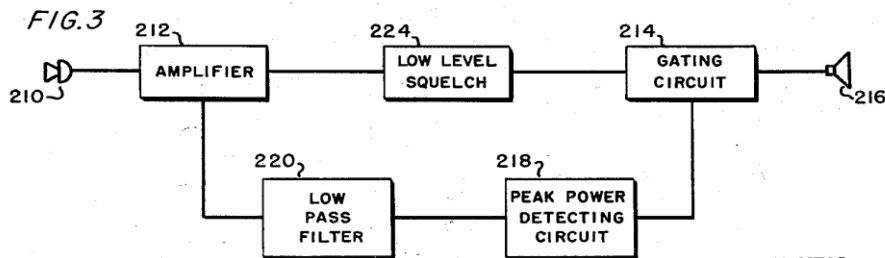
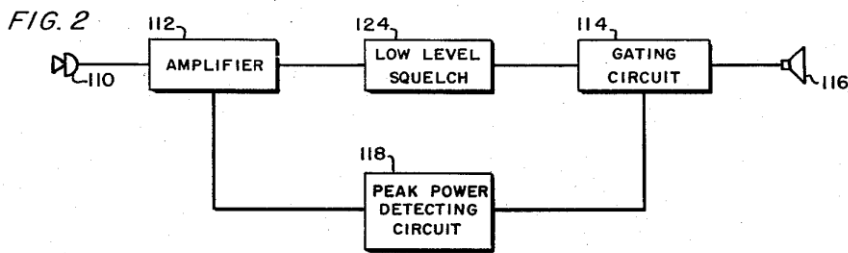
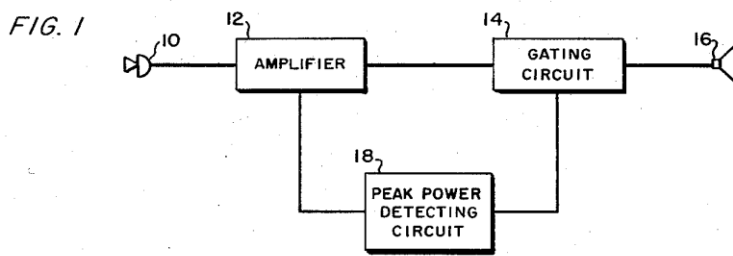
2.3 Ο αλγόριθμος Steepest-Descent	20
2.4 Ο αλγόριθμος LMS (Least- Mean Square)	21
2.5 Εξαγωγή των εξισώσεων του αλγορίθμου LMS.....	22
2.6 Ανάλυση σύγκλισης του αλγορίθμου LMS	23
2.7 Από τον LMS στον FxLMS	24
2.8 Μοντελοποίηση δευτερογενούς μονοπατιού.....	26
3. Περιγραφή του συστήματος ANC	28
3.1 Περιγραφή του hardware	28
3.2 Γενική περιγραφή του λογισμικού	31
3.3 Επιλογή παραμέτρων αλγορίθμων LMS και FxLMS.....	32
3.4 Διάταξη παραγωγής θορύβου.....	35
4. Αποτελέσματα Μετρήσεων	37
4.1 Σύστημα ελέγχου της απόδοσης του ANC συστήματος.....	37
4.3 Λογισμικό συστήματος ελέγχου απόδοσης ANC	39
4.3 Διαγράμματα.....	42
4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	71
4.5 Μελλοντικοί στόχοι.....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	74

Σύστημα μεγαφώνων.....	74
Ενισχυτές-Προενισχυτές μικροφώνων	76
Μικρόφωνα	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	81
Βιβλιογραφία	87

Εισαγωγή

Η παραδοσιακή προσέγγιση στον έλεγχο του ακουστικού θορύβου έχει να κάνει με παθητικές τεχνικές οι οποίες βασίζονται στη χρήση περιβλημάτων, φραγμών και σιγαστήρων. Ωστόσο οι τεχνικές αυτές παρουσιάζουν μειονεκτήματα όσο αφορά στο μέγεθος των διατάξεων που χρησιμοποιούν, στο κόστος καθώς και στην αποτελεσματικότητα, μιας και αποδεικνύονται αναποτελεσματικές, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για ακουστικό θόρυβο χαμηλής συχνότητας. Προκειμένου να ξεπεραστούν τα παραπάνω προβλήματα, έγινε μια στροφή σε τεχνικές **Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου (Active Noise Control-ANC)**. Σε αυτές, ένα ηλεκτρο-ακουστικό σύστημα είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία μια τοπικής ζώνης ησυχίας (local silence zone) γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος [1].

Η πρώτη πατέντα ενεργητικού ελέγχου θορύβου, πιστώθηκε στο Paul Leug το 1936. Για περίπου δυο δεκαετίες, η ιδέα του έμεινε στα χαρτιά, ώσπου ο Olson με τη χρήση αναλογικών κυκλωμάτων, δημιούργησε την πρώτη συσκευή ANC, την οποία ονόμασε 'electronic sound absorber'. Ως τα τέλη της δεκαετίας του 1950, κατασκευάστηκαν αρκετές αναλογικές συσκευές ANC, από τις οποίες ξεχώρισαν αυτές των Fogel (σχήμα 1.1) [4], Simshauser και Bose. Το μειονέκτημα των παραπάνω συσκευών ήταν η αδυναμία τους να προσαρμοστούν στη μεταβολή των χαρακτηριστικών του ακουστικού θορύβου που επρόκειτο να ακυρωθεί, καθώς και στη μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών. Το παραπάνω εμπόδιο ξεπεράστηκε με την ευρεία χρήση των ψηφιακών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων τα οποία επέτρεψαν τον **Προσαρμοστικό Έλεγχο του ακουστικού θορύβου (Adaptive Noise Control)**. Ο πρώτος αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για προσαρμοστικό έλεγχο θορύβου είναι ο **LMS (Least-Mean-Square)**. Ο αλγόριθμος LMS επινοήθηκε από τους **Widrow και Hoff το 1960** και σε αυτόν βασίζεται και η υλοποίηση του ANC που διαπραγματεύεται η παρούσα εργασία.



INVENTOR,
LAWRENCE J. FOGEL.

BY
Harry M. Saragovitz
ATTORNEY.

Σχήμα 1.1: Πατέντα ANC (Lawrence Fogel) [4].

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου γίνεται μια προσπάθεια θεμελίωσης του προβλήματος του προσαρμοστικού ελέγχου ακουστικού θορύβου, καθώς και μια σύντομη παράθεση των αλγορίθμων που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς και των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν.

1.1 Φυσικές αρχές των ακουστικών κυμάτων

Τα ηχητικά κύματα (sound waves), δημιουργούνται από τις εναλλαγές της ακουστικής πίεσης σε ένα σημείο του χώρου. Ως ακουστική πίεση ορίζεται η

απόκλιση από την ατμοσφαιρική πίεση, η οποία προκαλείται από ένα ηχητικό κύμα στο σημείο αυτό [1]. Η διανυσματική αυτή ποσότητα μπορεί να μετρηθεί άμεσα τοποθετώντας ένα μικρόφωνο στο σημείο ενδιαφέροντος, και η χρονική μεταβολή της μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\nabla^2 p(x, y, z, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x, y, z, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1) [1]$$

Όπου:

$p(x, y, z, t)$ η ακουστική πίεση στη θέση (x, y, z) τη χρονική στιγμή t ,

c : η ταχύτητα του ήχου ($c=343\text{m/s}$ σε στεγνό αέρα θερμοκρασίας 20°C).

1.2 Η αρχή της υπέρθεσης

Σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης, η ακουστική πίεση σε ένα σημείο (x, y, z) τη χρονική στιγμή n , η οποία προκαλείται από δυο ηχητικές πηγές **θα είναι το αλγεβρικό άθροισμα των ακουστικών πιέσεων που προκαλούνται από την κάθε πηγή ξεχωριστά στο σημείο αυτό**. Δηλαδή:

$$p(x, y, z, n) = p_1(x, y, z, n) + p_2(x, y, z, n) \quad (1.2)$$

Η αλληλεπίδραση των δύο παραπάνω ακουστικών κυμάτων μπορεί να δημιουργήσει μια ακουστική πίεση στο σημείο ενδιαφέροντος μεγαλύτερη, ίση ή μικρότερη από τις p_1, p_2 . Στην περίπτωση του ενεργητικού ελεγχου θορύβου μας ενδιαφέρει η συνολική ακουστική πίεση να είναι μικρότερη από τις επιμέρους ακουστικές πιέσεις. Μας ενδιαφέρει να προκαλέσουμε δηλαδή μια «εξουδετέρωση» των δυο κυμάτων.

1.3 Θεμελιώνοντας το πρόβλημα του Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου

Σε ένα σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου ενός καναλιού (single channel ANC), μια πηγή ελέγχου του θορύβου (anti-noise source) χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση πολλών πηγών θορύβου. Έτσι ορίζουμε ως p_d την ακουστική πίεση που οφείλεται στις πηγές του θορύβου και ως $p_{\bar{d}}$ εκείνη που οφείλεται στην πηγή anti-noise. Τότε για την περιοχή , γύρω από την οποία θέλουμε να δημιουργήσουμε μια ζώνη ησυχίας, με βάση την αρχή της υπέρθεσης ισχύει:

$$p(x, y, z, n) = p_d(x, y, z, n) + p_{\bar{d}}(x, y, z, n) \quad (1.3)$$

Έπειτα ορίζουμε τα παρακάτω μεγέθη:

1. $Z_s(x_s, y_s, z_s)$, είναι η θέση γύρω από την οποία θέλουμε να δημιουργήσουμε μια ζώνη ησυχίας.

2. $e(n)$, είναι η ακουστική πίεση στο Z_s :

$$e(n) \triangleq p(x_s, y_s, z_s) \quad (1.4)$$

3. $d(n)$, είναι η ακουστική πίεση στο Z_s που προκαλείται από τις πηγές του θορύβου.

$$d(n) \triangleq p_d(x_s, y_s, z_s, n) \quad (1.5)$$

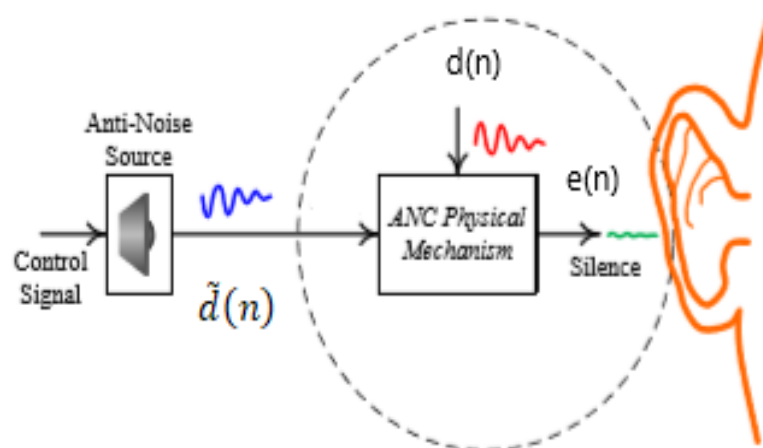
4. $\tilde{d}(n)$, είναι η ακουστική πίεση στο Z_s που προκαλείται από την πηγή anti-noise.

$$\tilde{d}(n) \triangleq p_{\bar{d}}(x_s, y_s, z_s, n) \quad (1.6)$$

Από την εξίσωση (1.3) προκύπτει:

$$e(n) = d(n) + \tilde{d}(n) \quad (1.7)$$

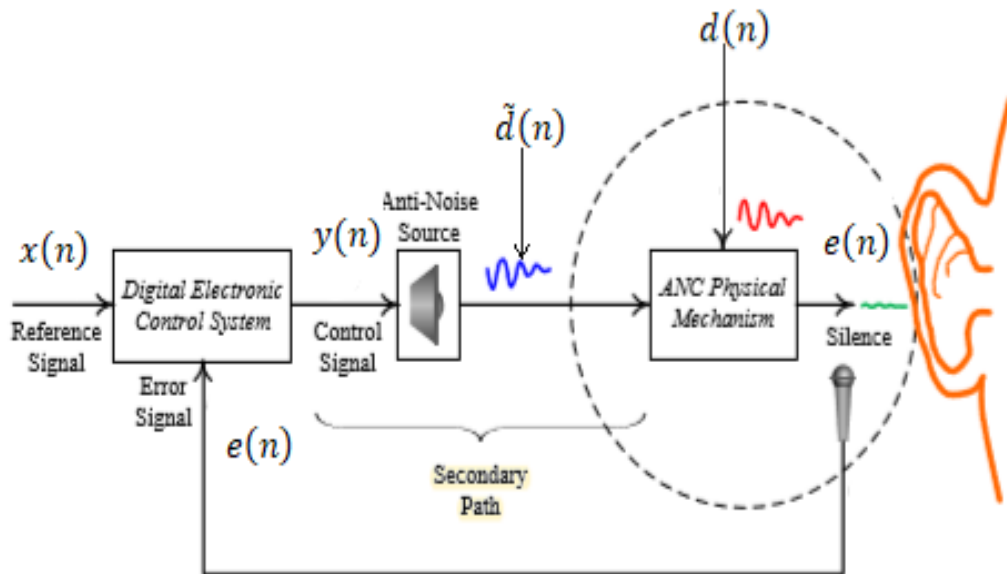
Είναι λοιπόν σαφές ότι στην ιδανική περίπτωση, προκειμένου να μηδενιστεί η ακουστική πίεση στο Z_s πρέπει $\tilde{d}(n) = -d(n)$. Ο μηχανισμός που περιγράφηκε παραπάνω απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.2: Φυσικές αρχές ενεργητικού ελέγχου θορύβου [1].

1.4 Περιγραφή του ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου

Προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση της ακουστικής πίεσης στην περιοχή γύρω από το Z_s , χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου το οποίο παράγει ένα σήμα ελέγχου για να οδηγηθεί η *anti-noise* ηχητική πηγή. Το σύστημα αυτό αναφέρεται συνήθως ως *ελεγκτής ANC*. Εκτός από την *anti-noise* ηχητική πηγή και τον ελεγκτή, ένα σύγχρονο σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου περιλαμβάνει και μια σειρά από μικρόφωνα τα οποία, ανάλογα με την εφαρμογή μετρούν την ακουστική πίεση σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος. Ένα τυπικό σύστημα ANC φαίνεται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Block διάγραμμα συστήματος ενεργητικού ελέγχου θορύβου [1].

Στο σχήμα αυτό βλέπουμε ότι σαν είσοδοι του συστήματος ελέγχου χρησιμοποιούνται ένα σήμα αναφοράς $x(n)$, το οποίο στην ιδανική περίπτωση ισούται με το ηχητικό σήμα $d(n)$ που θέλουμε να εξαλείψουμε, και ένα σήμα σφάλματος $e(n)$, το οποίο όπως έχουμε δει παραπάνω ισούται με το άθροισμα των ακουστικών πιέσεων στο Z_s . Σαν έξοδο το συστήματος ελέγχου παίρνουμε ένα σήμα ελέγχου $y(n)$, το οποίο οδηγεί την anti-noise ηχητική πηγή. Στην ιδανική περίπτωση θα θέλαμε το σήμα ελέγχου να οδηγεί την ηχητική πηγή, έτσι ώστε να παράγει ένα σήμα το οποίο θα «εξουδετερώνει» την ακουστική πίεση $d(n)$. Αυτό ωστόσο καθίσταται δύσκολο λόγω της ύπαρξης δύο ηλεκτροακουστικών διαδρομών (paths) που ακολουθούν τα σήματα που εμπλέκονται στο ANC σύστημα. Οι διαδρομές αυτές ονομάζονται πρωτεύον και δευτερεύον μονοπάτι (primary and secondary path).

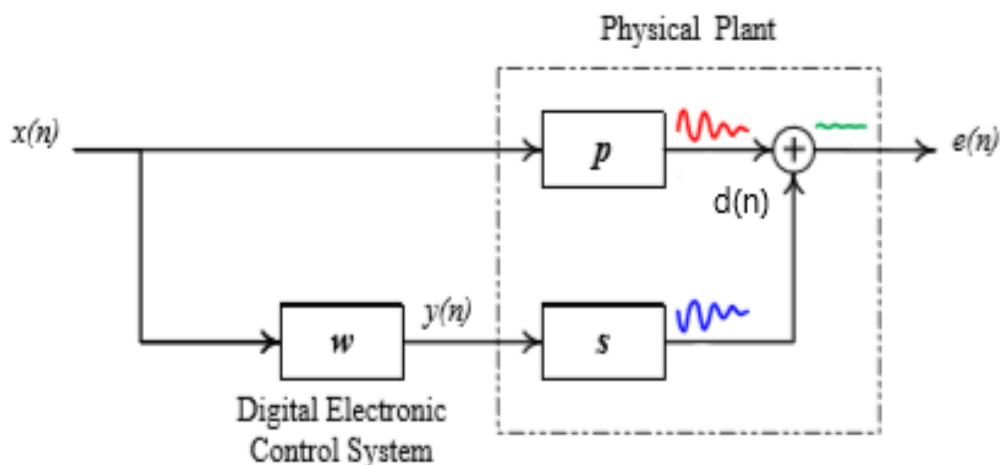
1.5 Πρωτεύον και δευτερεύον μονοπάτι (primary and secondary path)

Ως πρωτεύον μονοπάτι (primary path) ορίζεται η ηλεκτροακουστική διαδρομή που ακολουθεί η ηχητική διαταραχή από την πηγή της μέχρι το σημείο Z_s , όπου

θέλουμε να δημιουργήσουμε τη ζώνη ησυχίας. Το πρωτεύον μονοπάτι έχει σημασία διότι λόγω αυτού, το σήμα αναφοράς $x(n)$ μπορεί να διαφέρει από την ηχητική διαταραχή, η οποία τελικά φθάνει στο Z_s , με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία του συστήματος ελέγχου. Παρόλα αυτά η επίδραση του πρωτεύοντος μονοπατιού έχει παρατηρηθεί, ότι δεν είναι τόσο κρίσιμη για την απόδοση του συστήματος, όσο αυτή του δευτερεύοντος μονοπατιού.

Ως δευτερεύον μονοπάτι (secondary path) ορίζεται η ηλεκτροακουστική διαδρομή που ακολουθεί το σήμα ελέγχου $y(n)$ μέχρι να φθάσει ενισχυμένο στη αντι-noise πηγή, καθώς και η ηλεκτροακουστική διαδρομή που ακολουθεί το σήμα σφάλματος $e(n)$ από το μικρόφωνο σφάλματος μέχρι το σύστημα ελέγχου. Η σωστή μοντελοποίηση του δευτερεύοντος μονοπατιού είναι ιδιαίτερως σημαντική για την καλή απόδοση του συστήματος ενεργητικού ελέγχου θορύβου. Για το λόγο αυτό θα ασχοληθούμε εκτεταμένα με το συγκεκριμένο θέμα στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

Στο σχήμα 1.4 φαίνεται ένα σύστημα ANC με το πρωτεύον και το δευτερεύον μονοπάτι. Το πρωτεύον μονοπάτι συμβολίζεται με p , ενώ το δευτερεύον με s .



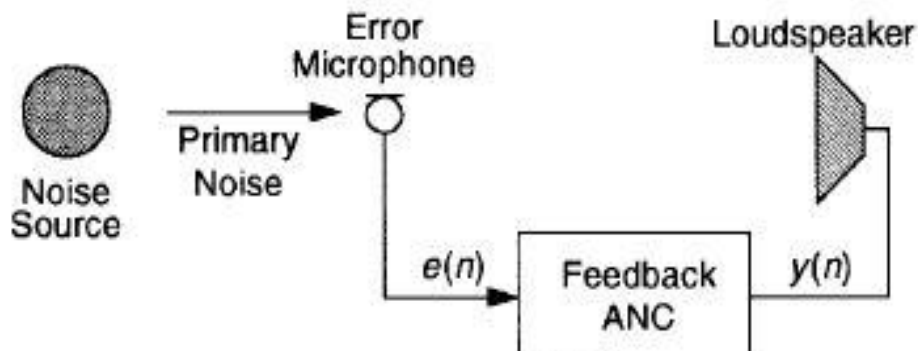
Σχήμα 1.4: Πρωτεύον και δευτερεύον μονοπάτι.

1.6 Δομή Συστημάτων ενεργητικού ελέγχου θορύβου

Τα συστήματα ενεργητικού ελέγχου θορύβου χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες: στα συστήματα ανοιχτού βρόχου (feedforward systems) και στα συστήματα κλειστού βρόχου (feedback systems).

Στα συστήματα ανοιχτού βρόχου, όπως αυτό που περιγράφηκε παραπάνω, το σήμα αναφοράς $x(n)$, παρέχεται στο σύστημα μέσω ενός μικροφώνου αναφοράς. Αντίθετα, στα συστήματα κλειστού βρόχου γίνεται πρόβλεψη του σήματος αναφοράς με δεδομένο το σήμα σφάλματος μέσω ενός ειδικού συστήματος (feedback predictor).

Επιπλέον υπάρχουν και τα υβριδικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό τεχνικών για να πετύχουν καλύτερη απόδοση.



Σχήμα 1.5: Απλοποιημένο block διάγραμμα ANC κλειστού βρόχου [11].

1.7 Ανασκόπηση αλγορίθμων για συστήματα Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται συνήθως για την υλοποίηση συστημάτων ενεργητικού ελέγχου θορύβου βασίζονται τις περισσότερες φορές στο αλγόριθμο LMS (Least Mean Square), ο οποίος αναπτύχθηκε από τους Widrow και Hoff. Η παραλλαγή του αλγορίθμου αυτού, η οποία λαμβάνει υπόψη και το «δευτερογενές μονοπάτι» ονομάζεται **FxLMS (Filtered x Least Mean Square)**. Ο FxLMS είναι ο

συχνότερα χρησιμοποιούμενος ANC αλγόριθμος αφού διακρίνεται τόσο για την απλότητά του όσο και για την ικανοποιητική ακρίβεια και την ταχύτητα σύγκλισής του. Άλλοι λιγότερο διαδεδομένοι αλγόριθμοι είναι οι *Filtered-x Normalized LMS*, *Leaky FxLMS*, *Filtered-x Recursive Least Square* και *Filtered-x Affine Projection*. Ωστόσο οι παραπάνω αλγόριθμοι, λόγω της υπολογιστική πολυπλοκότητάς τους και της αργής σύγκλισης δεν κατάφεραν να επικρατήσουν σε σχέση με τον FxLMS.

2. Περιγραφή του αλγορίθμου FxLMS

2.1 Φίλτρο Wiener

Οι Wiener και Hopf ασχολήθηκαν με τον σχεδιασμό ενός γραμμικού φίλτρου διακριτού χρόνου, που η έξοδος του είναι μια εκτίμηση της επιθυμητής εξόδου, τέτοια ώστε η μέση τιμή του τετραγωνικού σφάλματος να ελαχιστοποιείται. Αν εκφράσουμε την παραπάνω πρόταση με μαθηματικό τρόπο έχουμε:

$$e'(n) = d'(n) - y'(n) \quad (2.1)$$

Όπου $e'(n)$ είναι το σφάλμα της εκτίμησης που προκύπτει ως η διαφορά της εκτιμώμενης εξόδου $y'(n)$ από την επιθυμητή έξοδο $d'(n)$. Επίσης η συνάρτηση κόστους μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

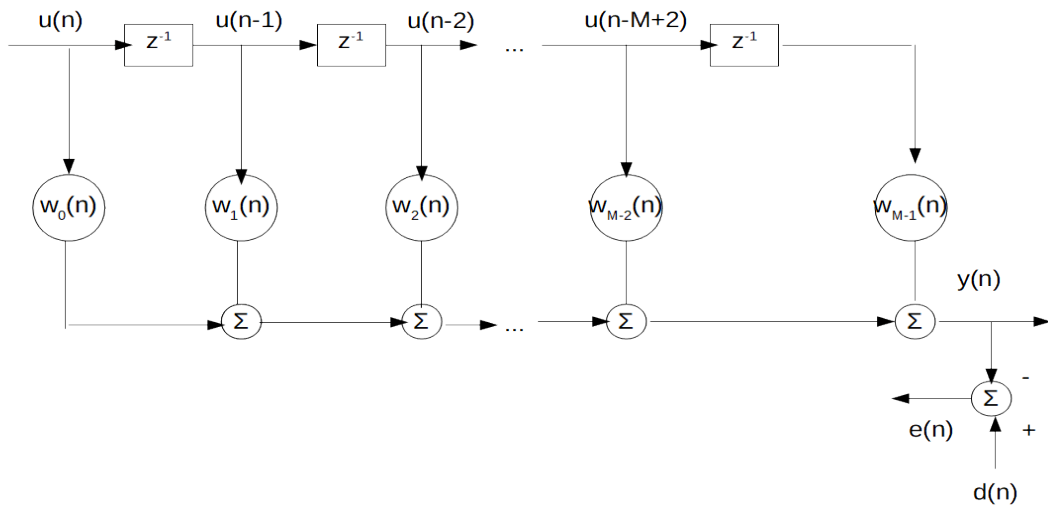
$$J = E[e'(n)^2] \quad (2.2)$$

Το ζητούμενο φίλτρο προκύπτει από την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους, δηλαδή από την επίλυση της εξίσωσης:

$$\nabla J = 0 \quad (2.3)$$

2.2 Εξισώσεις Wiener για FIR εγκάρσιο φίλτρο (Finite Impulse Response transversal Filter)

Έστω ότι έχουμε ένα εγκάρσιο φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (σχήμα 1.6).



Σχήμα 2.1: Εγκάρσιο φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης.

Επιλύοντας τη (2.3) για ένα τέτοιο φίλτρο προκύπτουν οι απλοποιημένες εξισώσεις Wiener-Hopf:

$$\sum_{i=0}^{M-1} w_{oi} r(i-k) = p(-k), \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2.4)$$

Και σε μορφή πινάκων:

$$\mathbf{w}_0 = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} \quad (2.5)$$

Όπου w_0 είναι το βελτιστοποιημένο διάνυσμα των συντελεστών του εγκάρσιου φίλτρου, R είναι ο πίνακας αυτοσυσχέτισης του διανύσματος των εισόδων αναφοράς $u(n)$ και p είναι το διάνυσμα συσχέτισης ανάμεσα στο $u(n)$ και την επιθυμητή απόκριση $d'(n)$.

2.3 Ο αλγόριθμος Steepest-Descent

Η απαίτηση για ένα προσαρμοστικό εγκάρσιο φίλτρο είναι να ικανοποιεί την εξίσωση 2.5. Παρόλα αυτά η απευθείας, αναλυτική επίλυση της παρουσιάζει πολλές υπολογιστικές δυσκολίες. Για το λόγο αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί πολλοί επαναληπτικοί αλγόριθμοι, με απλούστερο τον αλγόριθμο Steepest Descent.

Τα βήματα του αλγορίθμου αυτού μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Αρχικά επιλέγεται μια αρχική τιμή για το διάνυσμα w . Συνήθως, σαν $w(0)$ επιλέγεται το μηδενικό διάνυσμα.
2. Έπειτα υπολογίζεται το διάνυσμα των μερικών παραγώγων της συναρτησης κόστους, δηλαδή το $\frac{\partial J}{\partial w}$.
3. Στο βήμα αυτό αναθεωρείται το διάνυσμα w σε μια κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του διανύσματος των μερικών παραγώγων.
4. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται από το βήμα 2 μέχρι το διάνυσμα w να συγκλίνει στην τιμή που αντιστοιχεί στο ελάχιστο σημείο της συνάρτησης κόστους.

Η εξίσωση με βάση την οποία γίνεται η αναθεώρηση του διανύσματος w είναι:

$$w(n+1) = w(n) + \frac{1}{2} \mu [-\nabla(J(n))] \quad (2.6) [6]$$

Όπου μ είναι μια σταθερά η οποία καθορίζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου. Η αγγλική ορολογία για το μ είναι *step size*.

Αποδεικνύεται ότι:

$$\nabla J(n) = 2p + 2Rw(n) \quad (2.7) [6]$$

Από τις εξισώσεις (2.6) και (2.7) προκύπτει:

$$w(n + 1) = w(n) + \mu[p - Rw(n)] \quad (2.8)$$

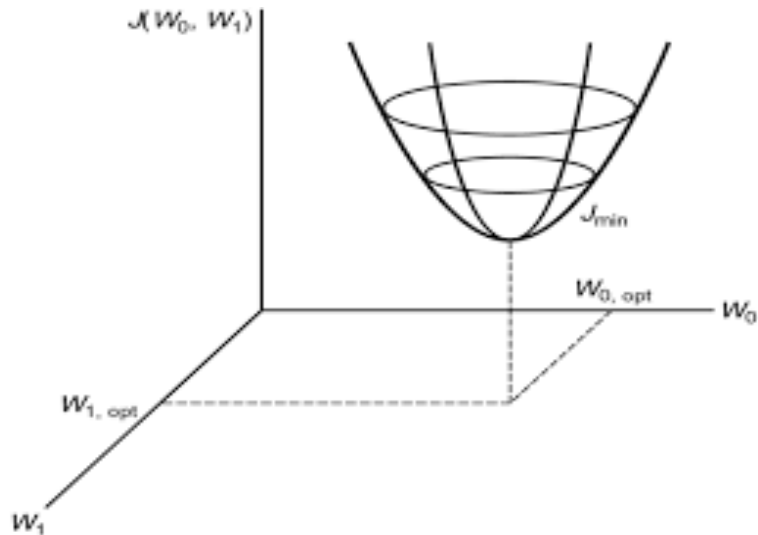
Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι για τον υπολογισμό του διανύσματος w , με βάση τη μέθοδο Steepest Descent, απαιτείται ο υπολογισμός των πινάκων αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης R και p , γεγονός που την καθιστά υπολογιστικά μη συμφέρουσα.

2.4 Ο αλγόριθμος LMS (Least- Mean Square)

Ο προσαρμοστικός αλγόριθμος LMS (Widrow και Hoff, 1960) διακρίνεται για την απλότητά του, διότι προσεγγίζει ικανοποιητικά τη λύση των εξισώσεων Wiener χωρίς να χρειάζεται ο υπολογισμός των συναρτήσεων συσχέτισης καθώς και η αναστροφή πινάκων που προκύπτουν στην εξίσωση 2.5.

Σε αντίθεση με τον αλγόριθμο Steepest Descent, ο LMS δεν συγκλίνει ντετερμινιστικά στην βέλτιστη λύση Wiener, αλλά με έναν στοχαστικό τρόπο. Συνεπώς η εκτίμηση για το διάνυσμα w που προκύπτει από τον αλγόριθμο LMS έχει πάντα μια μικρή απόκλιση από την βέλτιστη λύση. Το μειονέκτημα αυτό δεν μπορεί να μειώσει το πλεονέκτημα της απλότητας των υπολογισμών που ο LMS προσφέρει.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η συνάρτηση κόστους για ένα δισδιάστατο διάνυσμα w .



Σχήμα 2.2: Συνάρτηση κόστους για δισδιάστατο διάνυσμα w .

Επειδή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο LMS δεν συγκλίνει ντετερμινιστικά στο διάνυσμα w που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους J , υπάρχει πάντα μια διαφορά ανάμεσα στην τελική τιμή της συνάρτησης κόστους στην οποία συγκλίνει ο LMS $J(\infty)$ και την ελάχιστη τιμή της J_{min} . Η διαφορά αυτή είναι:

$$J_{ex}(\infty) = J(\infty) - J_{min} \quad (2.9)$$

Καθοριστικός παράγοντας για τον καθορισμό της διαφοράς αυτής είναι το βήμα (step size) το οποίο επιλέγεται από τον σχεδιαστή του προσαρμοστικού φίλτρου. Ένα μεγάλο βήμα θα οδηγήσει σε ταχύτερη σύγκλιση αλλά με μεγαλύτερη απόκλιση από την βέλτιστη τιμή, ενώ ένα μικρότερο βήμα θα οδηγήσει σε αργή σύγκλιση, η οποία όμως θα προσεγγίζει καλύτερα τη λύση των εξισώσεων Wiener.

2.5 Εξαγωγή των εξισώσεων του αλγορίθμου LMS

Στην ενότητα 2.3 αναφέρθηκε ότι η αναδρομική σχέση για τον υπολογισμό των συντελεστών w του εγκάρσιου φίλτρου, που προκύπτει από τον αλγόριθμο Steepest Descent είναι:

$$w(n + 1) = w(n) + \mu[p - R w(n)]$$

Θεωρούμε δυο στιγμιαίες εκτιμήτριες των πινάκων p και R :

$$\hat{R}(n) = u(n)u^T(n) \quad (2.10)$$

και

$$\hat{p}(n) = u(n)d^*(n) \quad (2.11)$$

Από τις σχέσεις (2.7), (2.10) και (2.11) παίρνουμε την παρακάτω σχέση:

$$\hat{\nabla}(J(n)) = -2u(n)d^*(n) + 2u(n)u^T(n)\hat{w}(n) \quad (2.12)$$

Αντικαθιστώντας την (2.12) στην (2.6) και έχοντας υπόψη:

$$y(n) = \hat{w}^T(n)u(n) \quad (2.13)$$

και

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.14)$$

παίρνουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$\hat{w}(n + 1) = \hat{w}(n) + \mu u(n)e^*(n) \quad (2.15)$$

2.6 Ανάλυση σύγκλισης του αλγορίθμου LMS

Προκειμένου ο αλγόριθμος LMS να παράγει τα επιθυμητά αποτελέσματα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω συνθήκες:

1. Η εκτίμηση για το διάνυσμα των συντελεστών του εγκάρσιου φίλτρου $\hat{w}(n)$ να πλησιάζει στη βέλτιστη λύση w_0 καθώς ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνεται.

2. Η τιμή της συνάρτησης κόστους $J(\infty)$ να είναι πεπερασμένη.

Για να ισχύουν τα παραπάνω κρίσιμο ρόλο παίζει η επιλογή της παραμέτρου μ , καθώς και η διάσταση του διανύσματος w .

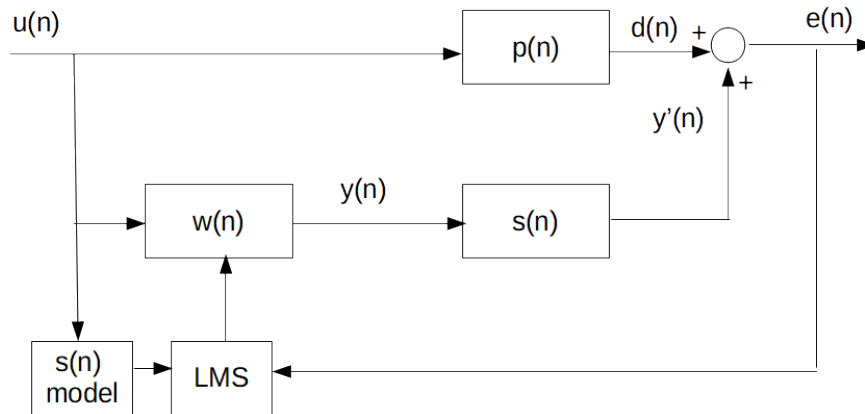
Αποδεικνύεται ότι η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιεί το μ για πραγματικά σήματα είναι:

$$\sum_{i=1}^M \frac{\mu \lambda_i}{2(1 - \mu \lambda_i)} < 1 \quad (2.16) \quad [6]$$

Όπου λ_i οι ιδιοτιμές του πίνακα αυτοσυσχέτισης του διανύσματος αναφοράς $u(n)$.

2.7 Από τον LMS στον FxLMS

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε ένα πραγματικό σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου υπάρχουν δυο ηλεκτροακουστικά μονοπάτια, το πρωτογενές και το δευτερογενές μονοπάτι, τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη στον αλγόριθμο LMS. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το σύστημά μας να μην έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Πιο κρίσιμη για τη λειτουργία του συστήματος είναι η μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού και η ένταξή του στον αλγόριθμο. Έτσι προέκυψε η παραλλαγή του αλγορίθμου LMS που ονομάζεται Filtered-x LMS. Σύμφωνα με την παραλλαγή αυτή, το διάνυσμα αναφοράς $u(n)$ χρησιμοποιείται σαν είσοδος σε ένα φίλτρο που μοντελοποιεί το δευτερογενές μονοπάτι. Έπειτα η έξοδος του φίλτρου αυτού χρησιμοποιείται σαν διάνυσμα αναφοράς του προσαρμοστικού αλγορίθμου για τον υπολογισμό των συντελεστών του διανύσματος $w(n)$. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα λειτουργίας του αλγορίθμου FxLMS.

Η ανάγκη «φιλτραρίσματος» του σήματος αναφοράς στον αλγόριθμο FxLMS, αποδεικνύεται εύκολα με βάση τις ιδιότητες των γραμμικών και χρονικά ανεξάρτητων συστημάτων (LTI). Έχουμε λοιπόν:

$$y'(n) = y(n) * s(n) \quad (2.17)$$

$$y(n) = u(n) * w(n) \quad (2.18)$$

Από τις (2.17) και (2.18) προκύπτει:

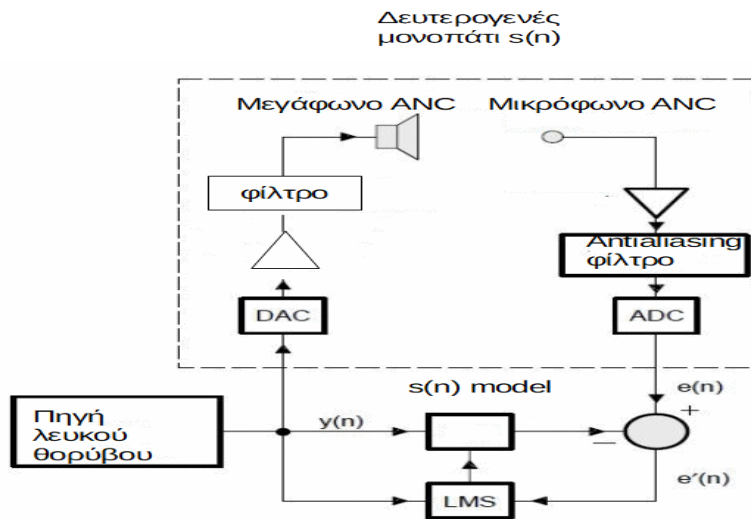
$$y'(n) = [u(n) * w(n)] * s(n) \Rightarrow$$

$$y'(n) = [u(n) * s(n)] * u(n) \quad (2.19)$$

Από τη (2.19) προκύπτει ότι το νέο σήμα αναφοράς, είναι το $u(n)$ φιλτραρισμένο από το σύστημα $s(n)$.

2.8 Μοντελοποίηση δευτερογενούς μονοπατιού.

Το δευτερογενές μονοπάτι είναι μεταβλητό ως προς το χρόνο, αφού επηρεάζεται από τη γήρανση των ηχείων, την μεταβολή της θερμοκρασίας, καθώς και τη ροή του αέρα. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να μοντελοποιηθεί, έχουν προταθεί κάποιες on-line τεχνικές. Παρόλα αυτά για λόγους απλότητας κάνουμε την παραδοχή ότι το δευτερογενές μονοπάτι δεν μεταβάλλεται ως προς το χρόνο. Έτσι η μοντελοποίησή του μπορεί να γίνει και off-line, δηλαδή να προηγηθεί του ενεργητικού ελέγχου θορύβου, χωρίς μεγάλο πρόβλημα στην ακρίβεια. Η κεντρική ιδέα της μοντελοποίησης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.4: Offline μοντελοποίηση δευτερογενούς μονοπατιού.

Στην off-line μοντελοποίηση παράγεται λευκός θόρυβος από μια πηγή, ο οποίος χρησιμοποιείται τόσο σαν σήμα αναφοράς για τον αλγόριθμο LMS, όσο και σαν πηγή για το μεγάφωνο ANC. Από το σχήμα φαίνεται, ότι η είσοδος του δευτερογενούς μονοπατιού είναι το $y(n)$ και η έξοδος το $e(n)$. Ακόμα ισχύει:

$$r(n) = s(n)_{model} * y(n) \quad (2.20)$$

$$e'(n) = e(n) - r(n) \quad (2.21)$$

Από τις (2.20) και (2.21) και δεδομένου ότι όταν ο αλγόριθμος συγκλίνει, $e'(n)=0$ προκύπτει ότι:

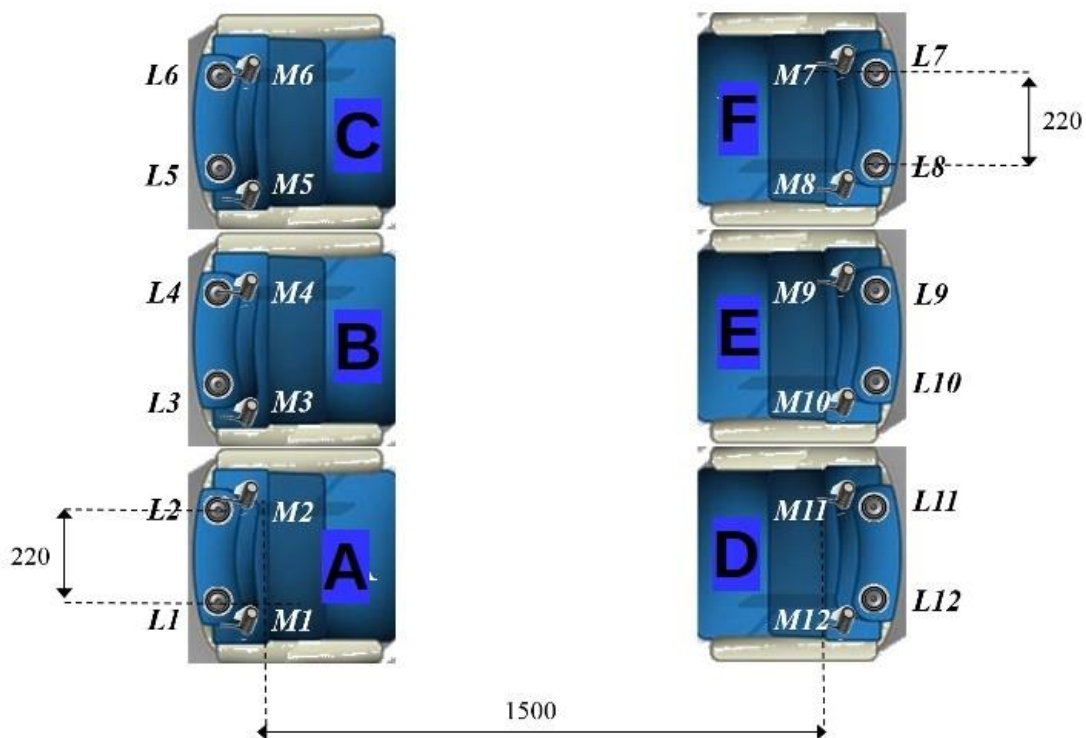
$$e(n) = s(n)_{model} * y(n) \quad (2.22)$$

Δηλαδή το $s(n)_{model}$ μοντελοποιεί ένα σύστημα που έχει σαν είσοδο το $y(n)$ και σαν έξοδο το $e(n)$, το οποίο είναι το δευτερογενές μονοπάτι.

3. Περιγραφή του συστήματος ANC

3.1 Περιγραφή του hardware

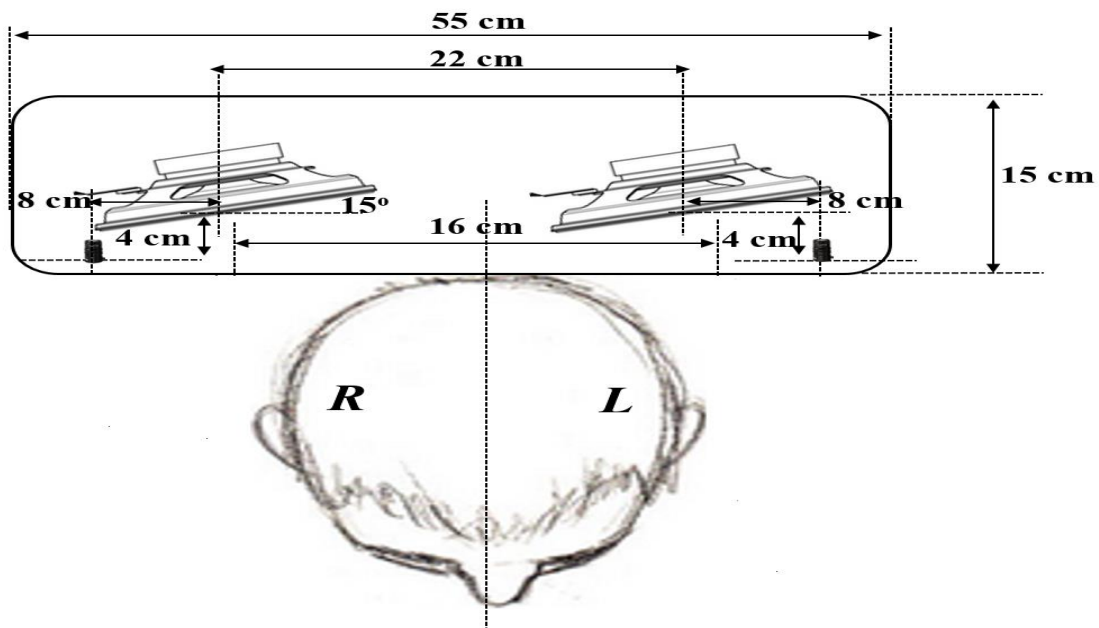
Το σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο Δυναμικής και Κατασκευών προορίζεται για εγκατάσταση σε καθίσματα μικρού εξαθέσιου αεροπλάνου. Ωστόσο με κατάλληλες τροποποιήσεις θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα μεταφορικά μέσα, όπως σε θαλαμηγό και ελικόπτερο. Η διάταξη των θέσεων μέσα στην καμπίνα φαίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Διάταξη θέσεων στο χώρο όπου υλοποιήθηκε το σύστημα του ANC.

Σε κάθε θέση τοποθετήθηκαν 2 μεγάφωνα που χρησιμοποιήθηκαν σαν πηγές του antinoise σηματος, καθώς και δυο μικρόφωνα (error microphones). Συνολικά για τις έξι θέσεις χρησιμοποιήθηκαν 12 μεγάφωνα και 12 μικρόφωνα. Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος, δοκιμάστηκαν διαφορετικοί τύποι μικροφώνων και μεγαφώνων προκειμένου να ικανοποιηθούν οι προδιαγραφές που σχετίζονται με το βάρος του συνολικού συστήματος, το μέγεθος του προσκέφαλου καθώς και την απόδοσή του συστήματος. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι το όριο που εφαρμόστηκε για τη μείωση του συνολικού επιπέδου θορύβου είναι τα 10 dB και για τη μείωση της αρμονικής στα 100 Hz, τα 15 dB.

Όσο αφορά στη διάταξη των μεγαφώνων και των μικροφώνων μέσα στο προσκέφαλο, αυτή επιλέχθηκε με βάση την απόδοση του συστήματος στο σημείο όπου θα βρίσκεται κατά προσέγγιση το αυτί του επιβάτη (10 cm μακριά από το μεγάφωνο). Έτσι παρατηρήθηκε ότι στο σημείο εκείνο, η μεγαλύτερη μείωση του θορύβου επιτυγχάνεται με τη χωροταξική διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Χωροταξική διάταξη συστήματος μεγαφώνων και μικροφώνων μέσα στο προσκέφαλο.

Επιπλέον όσο αφορά στην επιλογή του αριθμού των μεγαφώνων και των μικροφώνων, το σύστημα με τα δυο μεγάφωνα είχε ικανοποιητική απόδοση με ταυτόχρονη ικανοποίηση της προδιαγραφής βάρους και των περιορισμών στον αριθμό των εξόδων που τίθενται από τον ελεγκτή (16 εξοδοί).

Τέλος, τα δύο μικρόφωνα παρουσίασαν αυξημένη δυνατότητα στη δημιουργία μια μικρής σφαίρας μείωσης της στάθμης του θορύβου, σε σχέση με το ένα μικρόφωνο όπου η μείωση ήταν σημειακή, στο σημείο όπου ήταν τοποθετημένο το μικρόφωνο. Η ενίσχυση του σήματος των μεγαφώνων, καθώς και η προενίσχυση του σήματος των μικροφώνων έγινε με χειροποίητους ενισχυτές. Σαν πηγή του θορύβου χρησιμοποιήθηκε subwoofer. Τέλος χρησιμοποιήθηκε ένα μικρόφωνο αναφοράς. Το σύστημα που επιλέχθηκε για τη δειγματοληψία και για τον υπολογισμό του σήματος antinoise είναι ο cRio 9030 της National Instruments.

Τέλος η ανάπτυξη του πηγαίου κώδικα έγινε στην πλατφόρμα Labview 2017. Αναλυτικά στοιχεία για το hardware που χρησιμοποιήθηκε παρατίθενται στο **παράρτημα Α**.



*Εικόνα 3.1: Άποψη της διάταξης που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο
Δυναμικής και Κατασκευών*



Εικόνα 3.2: Διάταξη μικροφώνων και μεγαφώνων μέσα στο προσκέφαλο του καθίσματος

3.2 Γενική περιγραφή του λογισμικού

Η μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού για κάθε σύστημα μεγαφώνου-μικροφώνου έγινε offline, με τη χρήση του αλγορίθμου LMS. Σαν βάση του πηγαίου κώδικα χρησιμοποιήθηκε έτοιμος κώδικας του Labview 2017, ο οποίος στη συνέχεια επεκτάθηκε και εμπλουτίστηκε προκειμένου να ικανοποιεί τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου συστήματος. Ο κώδικας υλοποιείται σε δυο επίπεδα:

Το πρώτο έχει να κάνει με τον προγραμματισμό του FPGA, το οποίο βρίσκεται ενσωματωμένο στο σύστημα του cRio 9030. Στο επίπεδο αυτό γίνεται η δειγματοληψία, καθώς και ο υπολογισμός των συντελεστών του φίλτρου, το οποίο μοντελοποιεί το δευτερογενές μονοπάτι. Το δεύτερο επίπεδο αφορά στην απεικόνιση, σε πραγματικό χρόνο των αποτελεσμάτων τα οποία έχουν παραχθεί από το FPGA. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει σε ένα επεξεργαστή που βρίσκεται ενσωματωμένος στον cRio 9030, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με ένα λειτουργικό σύστημα Linux. Τέλος η πλατφόρμα του Labview 2017 σε συνδυασμό με τον cRio 9030, δίνει τη δυνατότητα επικοινωνίας των δυο αυτών επιπέδων με αποτέλεσμα

να έχουμε τα οφέλη της ταχύτητας που προσφέρει το FPGA σε συνδυασμό με την εύκολη απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προσφέρει ο επεξεργαστής.

Όσο αφορά τώρα στον κώδικα που αναπτύχθηκε για την παραγωγή του σήματος *antinoise*, και αυτός κινείται σε παρόμοια λογική με αυτή της μοντελοποίησης του δευτερογενούς μονοπατιού:

Η δειγματοληψία καθώς και ο υπολογισμός του *antinoise* σήματος $y(n)$ γίνονται στο FPGA, ενώ η απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο των σημάτων γίνεται στον επεξεργαστή του cRio 9030. Συνεπώς δημιουργήθηκαν δύο εφαρμογές, μία για τις διεργασίες που γίνονται σε επίπεδο FPGA και μια για τις διεργασίες που γίνονται στο επίπεδο του επεξεργαστή.

Οι κώδικες σε Labview 2017 που αναφέρονται παραπάνω περιλαμβάνονται στο **παράρτημα Β**.

3.3 Επιλογή παραμέτρων αλγορίθμων LMS και FxLMS

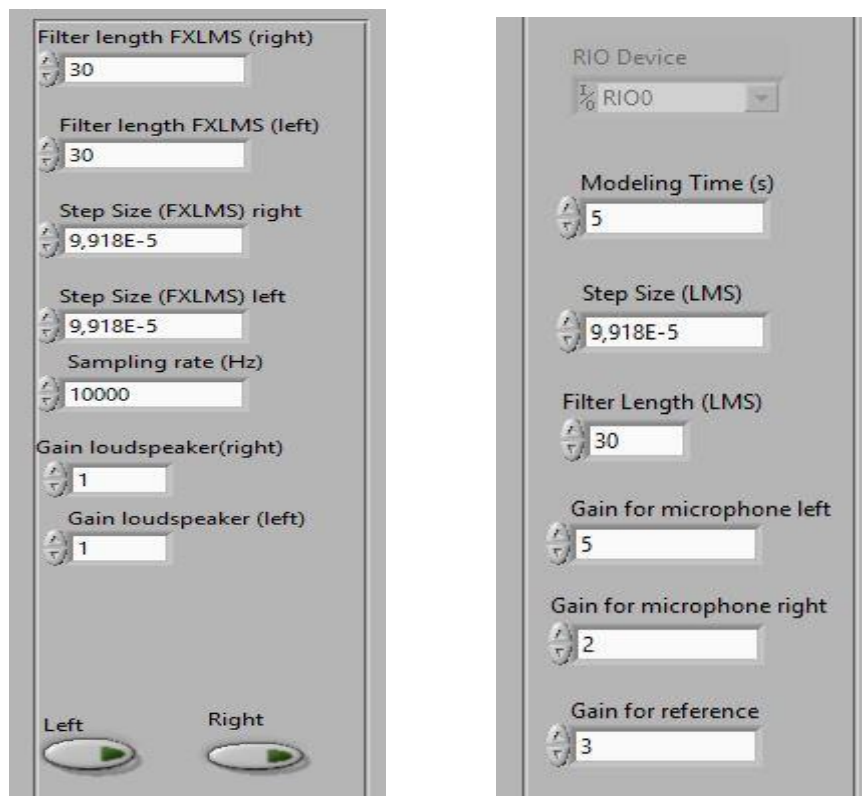
Όπως αναφέρθηκε και στα πρώτα κεφάλαια της συγκεκριμένης εργασίας, για τη σύγκλιση των αλγορίθμων LMS και FxLMS, ιδιαίτερα σημαντική είναι η επιλογή των παραμέτρων του μήκους του φίλτρου (*filter length*) και του βήματος (*step size*). Αυτές σε επίπεδο λογισμικού καθορίζονται από το χρήστη στην εφαρμογή που τρέχει *real time* στον επεξεργαστή (σχήμα 3.4) και ανακτώνται από το FPGA μέσω της δυνατότητας εσωτερικής επικοινωνίας που δίνει ο cRIO 9030.

Το μήκος του φίλτρου είναι ουσιαστικά το μήκος του διανύσματος που περιέχει τους συντελεστές του εγκάρσιου φίλτρου, οι οποίοι υπολογίζονται από τον αλγόριθμο. Συνεπώς, η παράμετρος αυτή αυξάνει τους υπολογισμούς που θα υλοποιηθούν από τον ελεγκτή (FPGA) με αποτέλεσμα να υπάρχει καθυστέρηση στον υπολογισμό του σήματος *antinoise*. Από την άλλη, όσο μεγαλύτερο είναι το διάνυσμα των συντελεστών, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται στον υπολογισμό του φίλτρου και κατά συνέπεια του σήματος. Έτσι έπρεπε να βρεθεί μια χρυσή τομή, ώστε οι υπολογισμοί να γίνονται με ταχύτητα τέτοια ώστε να

«προλαβαίνουμε» την έλευση του ηχητικού σήματος από την πηγή του θορύβου και παράλληλα να υπάρχει ικανοποιητική ακρίβεια. Μετά από δοκιμές καταλήξαμε στην τιμή 30 για το μήκος φίλτρου. Ενδεικτική της διαδικασίας που ακολουθήθηκε είναι η ανάγκη να μειωθεί το μήκος φίλτρου από 50 σε 30 από τη στιγμή που οι έξοδοι του αλγορίθμου αυξάνονταν καθώς αυξάναμε τα μεγάφωνα. Έτσι οι υπολογισμοί γίνονταν περισσότεροι με αποτέλεσμα η αργή ταχύτητα υλοποίησής του να ρίχνει το σύστημα σε αστάθεια.

Μια ακόμα ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος, με την οποία χρειάστηκε να ασχοληθούμε είναι το μέγεθος του βήματος (step size). Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2 η παράμετρος μ (step size) σχετίζεται με την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου στην λύση Wiener που αντιστοιχεί στο ελάχιστο σημείο της συνάρτησης κόστους. Το πρόβλημα είναι ότι αν το βήμα είναι αρκετά μεγάλο, οπότε θεωρητικά έχουμε γρήγορη σύγκλιση, στην πραγματικότητα ο αλγόριθμος δεν θα συγκλίνει ποτέ. Έτσι το μέγεθος πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να έχουμε γρήγορη σύγκλιση χωρίς το σύστημα να πέφτει σε αστάθεια. Η σχέση 2.16 μας δίνει ένα άνω όριο για το μ , το οποίο εξαρτάται από τις ιδιοτιμές του πίνακα αυτοσυσχέτισης του σήματος αναφοράς. Παρόλα αυτά δεν μπορούμε να γλιτώσουμε τις δοκιμές (tuning) για τον καθορισμό της τιμής του μ . Στο σύτημά μας, μετά από δοκιμές καταλήξαμε στην τιμή $\mu = 9.918 \cdot 10^{-5}$.

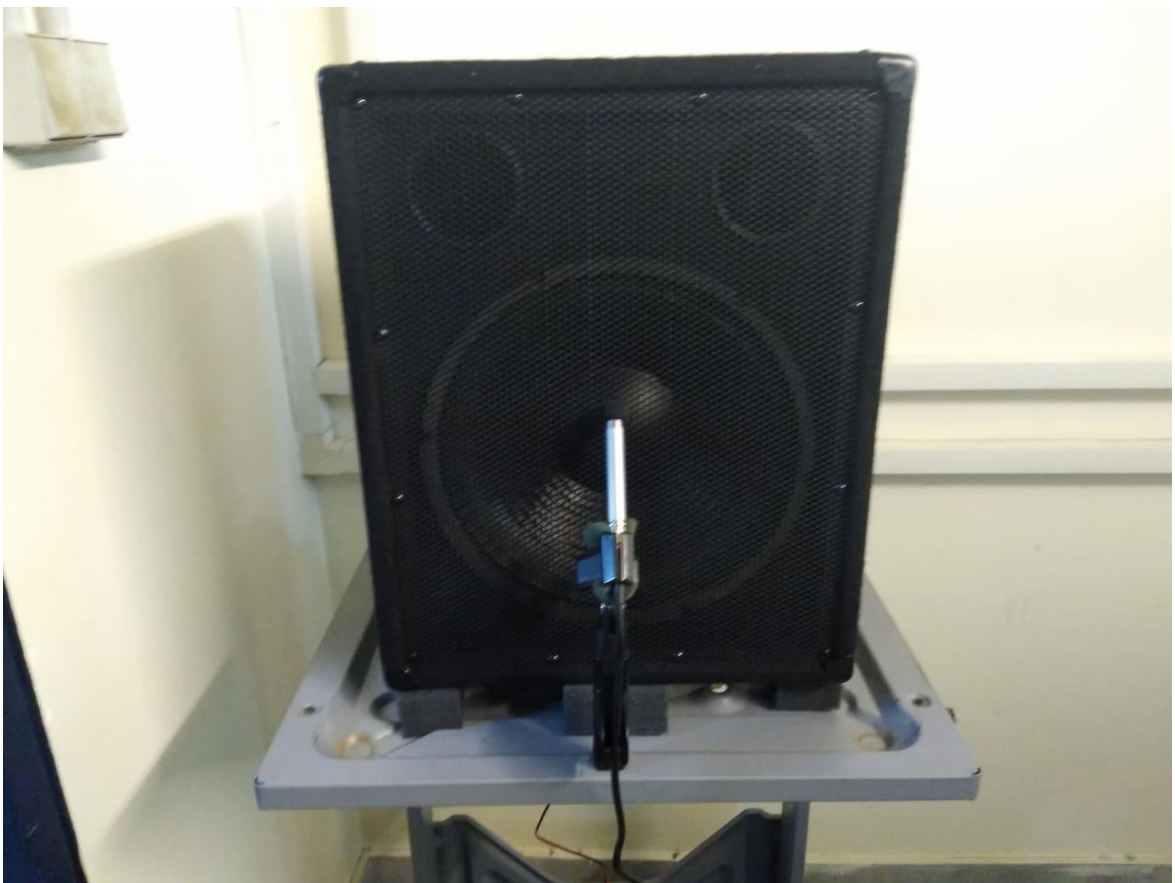
Τέλος άλλες παράμετροι που χρειάζετα να καθοριστούν από το χρήστη, και παίζουν ρόλο στη σύγκλιση του αλγορίθμου, είναι η συχνότητα δειγματοληψίας και η ενίσχυση του σήματος των μικροφώνων αναφοράς και σφάλματος.



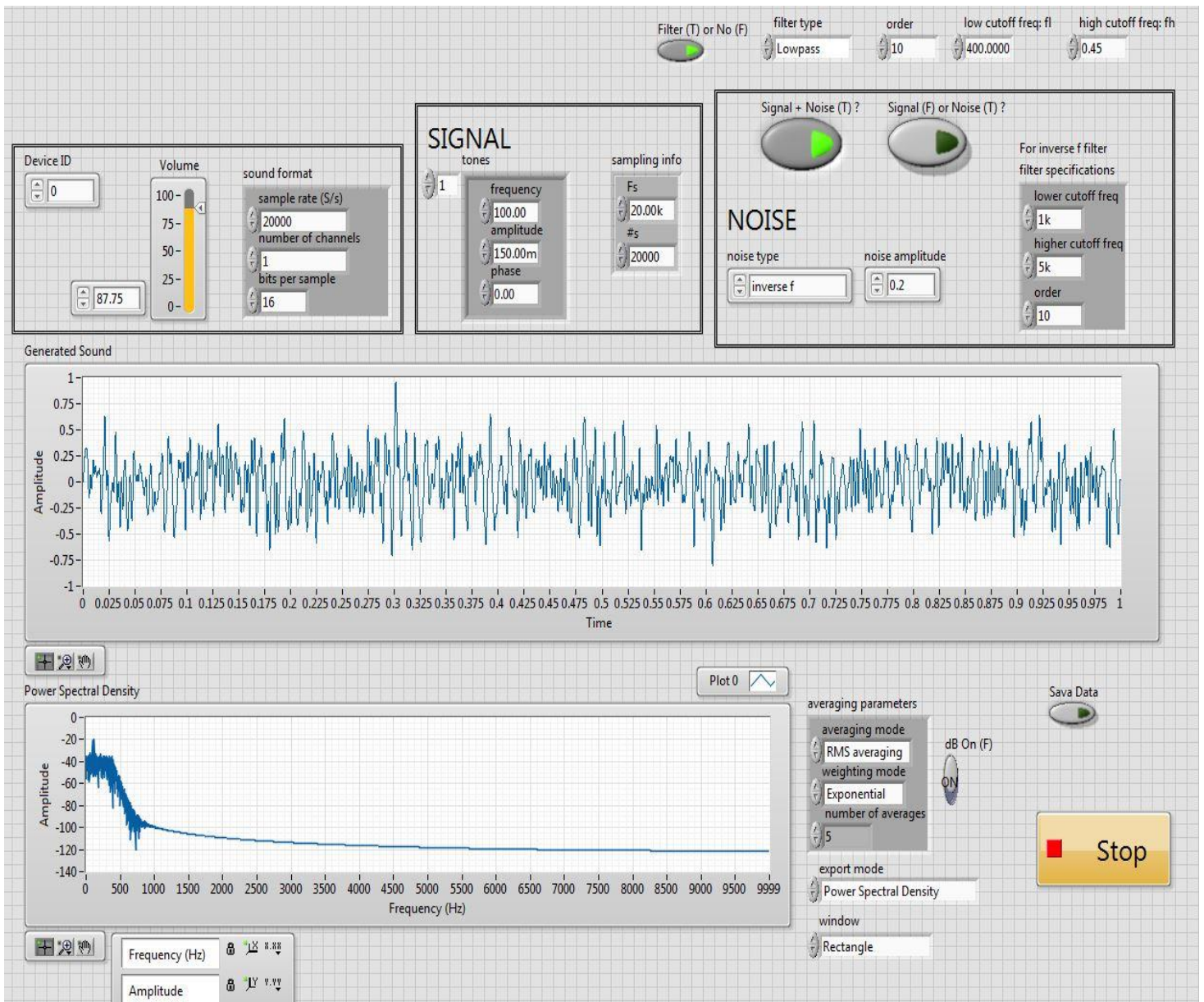
Εικόνα 3.3: Καθορισμός παραμέτρων

3.4 Διάταξη παραγωγής θορύβου

Για την παραγωγή του θορύβου στον οποίο κυριαρχεί η αρμονική στα 100 Hz, με αποτέλεσμα να προσομοιώνει το θόρυβο του κινητήρα του μεταφορικού μέσου χρησιμοποιήθηκε ένα subwoofer (εικόνα 3.5). Το σήμα ελέγχου δημιουργήθηκε μέσω μιας εφαρμογής σε περιβάλλον LabVIEW (εικόνα 3.6) μέσω της οποίας αρχικά καθορίζονται η συχνότητα και το πλάτος της αρμονικής. Έπειτα δημιουργούμε έναν επιπλέον θόρυβο προκειμένου να προσομοιωθούν καλύτερα οι συνθήκες της καμπίνας. Οι παράμετροι του θορύβου αυτού φαίνονται στην εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.4: Subwoofer και μικρόφωνο αναφοράς (reference microphone).



Εικόνα 3.5: Εφαρμογή για την παραγωγή του σήματος ελέγχου του subwoofer.

4. Αποτελέσματα Μετρήσεων

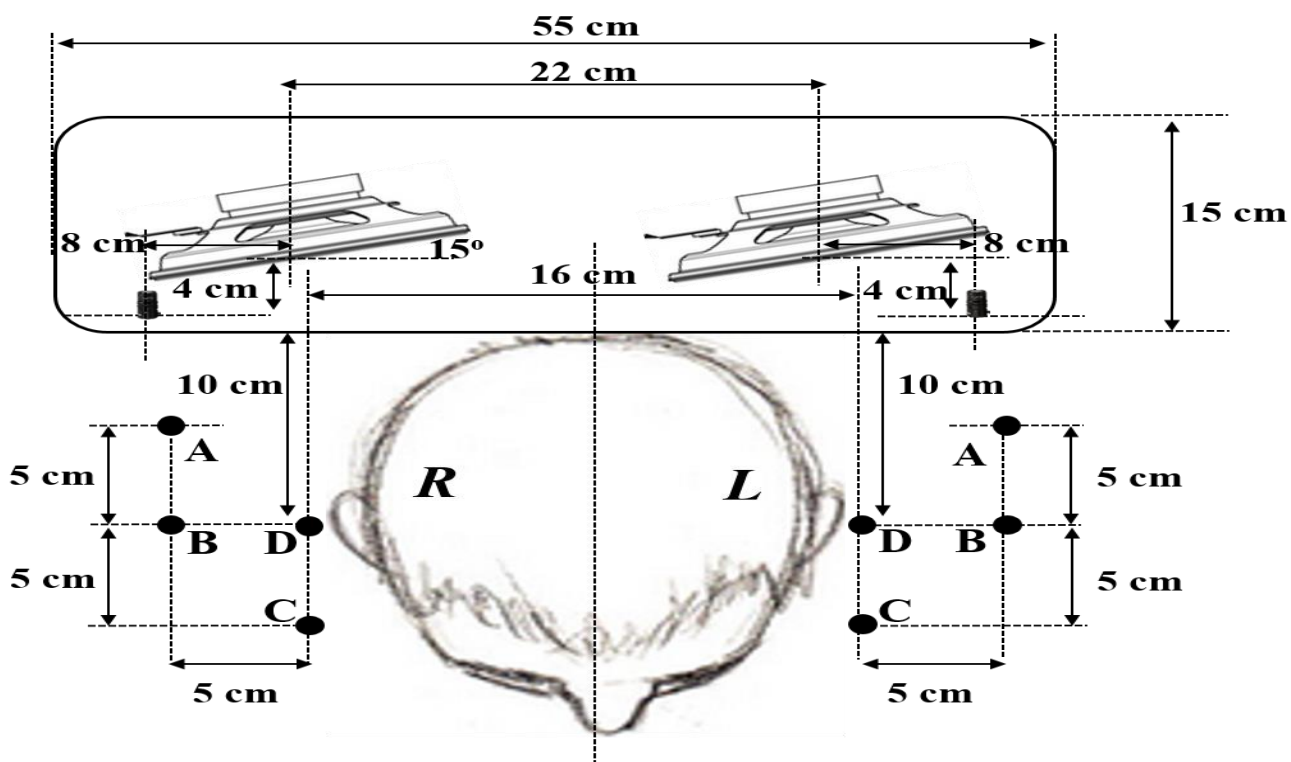
4.1 Σύστημα ελέγχου της απόδοσης του ANC συστήματος

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του συστήματος ANC, αποτελείται από τέσσερα μικρόφωνα τοποθετημένα σε κατάλληλη διάταξη (σχήμα 4.1). Ο τύπος των μικροφώνων είναι **MX183 Shure** (βλέπε παράρτημα Α). Για την προενίσχυση του σήματος των μικροφώνων χρησιμοποιήθηκε ο προενισχυτής **RK100PK της Shure**. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε μια κάρτα μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό της National Instruments. Έτσι γίνεται δειγματοληψία στο σήμα του μικροφώνου, το οποίο με τη σειρά του απεικονίζεται τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Η εφαρμογή μέσω της οποίας έγινε η δειγματοληψία, η αποθήκευση και η απεικόνιση των μετρήσεων αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Labview 2017.



Εικόνα 4.1: Σύστημα ελέγχου απόδοσης του ANC

Η διάταξη των μικροφώνων (σχήμα 4.2) εξυπηρετεί την ανάγκη να πάρουμε μετρήσεις σε σημεία τα οποία καλύπτουν μια περιοχή κοντά στο αυτί του επιβάτη. Έτσι το μικρόφωνο D βρίσκεται ακριβώς στο αυτί ενός μέσου επιβάτη, και τα υπόλοιπα καλύπτουν μια ακτίνα 5 εκατοστών γύρω από αυτό.



Εικόνα 4.2: Θέση μικροφώνων στη μετρητική διάταξη

Τέλος η μέτρηση της συνολικής στάθμης του θορύβου έγινε με κατάλληλο όργανο (ντεσιμπελόμετρο) πάνω στα σημεία ενδιαφέροντος.



Εικόνα 4.3: Ντεσιμπελόμετρο Larson-Davis



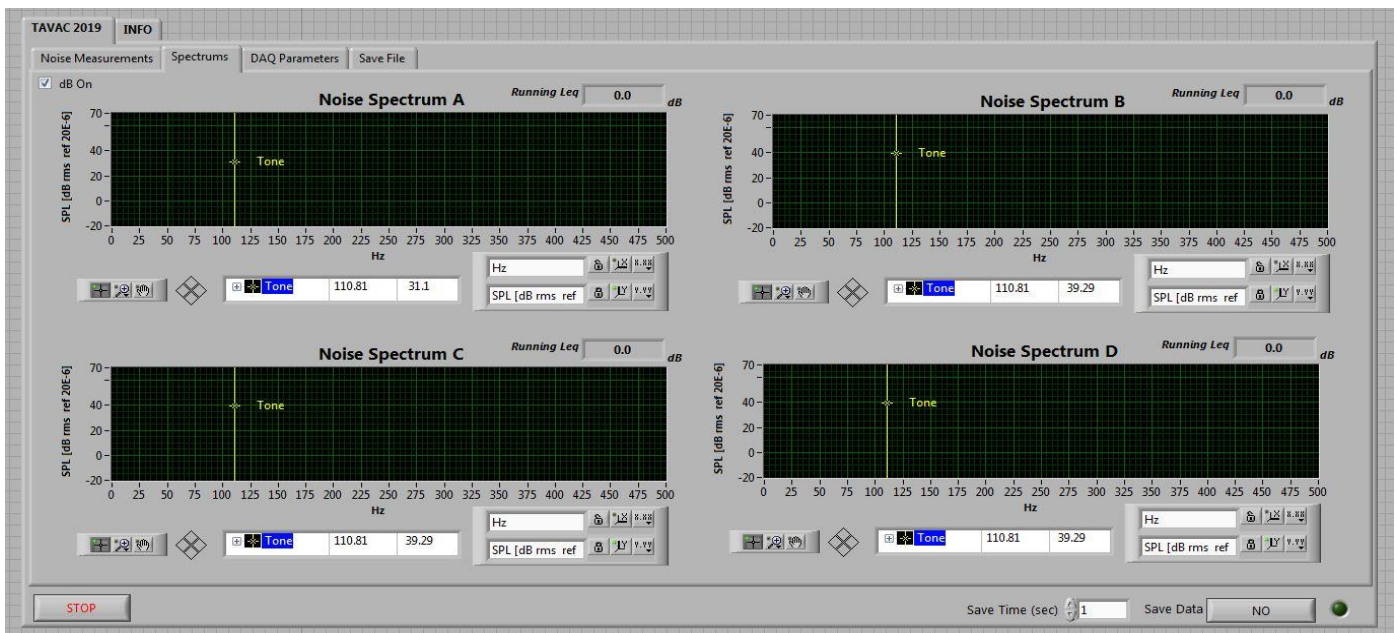
Εικόνα 4.3: Κάτοψη της μετρητικής διάταξης

4.3 Λογισμικό συστήματος ελέγχου απόδοσης ANC

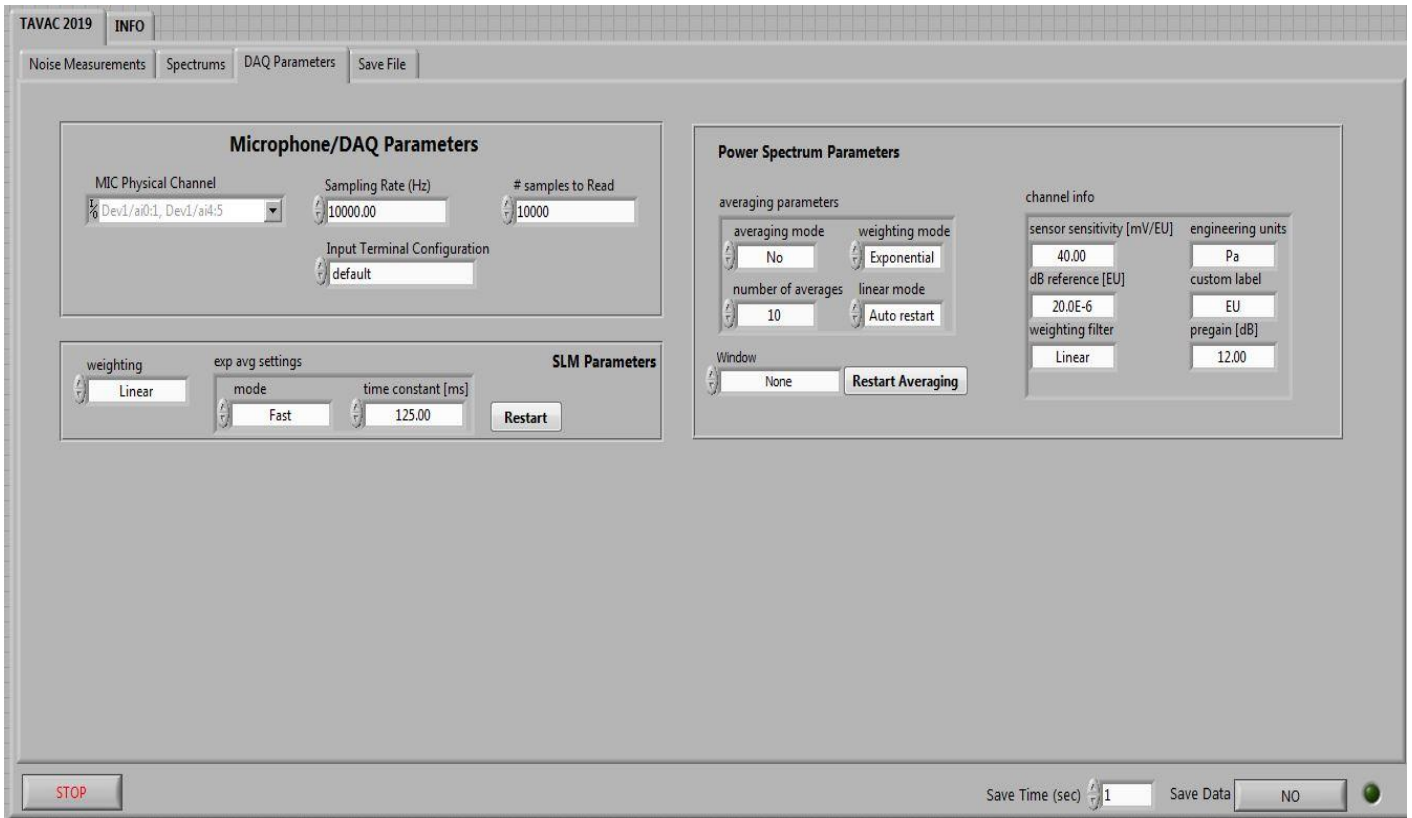
Προκειμένου να γίνει η δειγματοληψία, να απεικονιστούν και να αποθηκευτούν οι μετρήσεις που έγιναν με το σύστημα ελέγχου του ANC χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό που αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα του Labview. Παρακάτω φαίνονται κομμάτια του συγκεκριμένου λογισμικού. Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο καθορισμός των διαφόρων παραμέτρων (εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.4: Μέτρηση χρονικών σημάτων



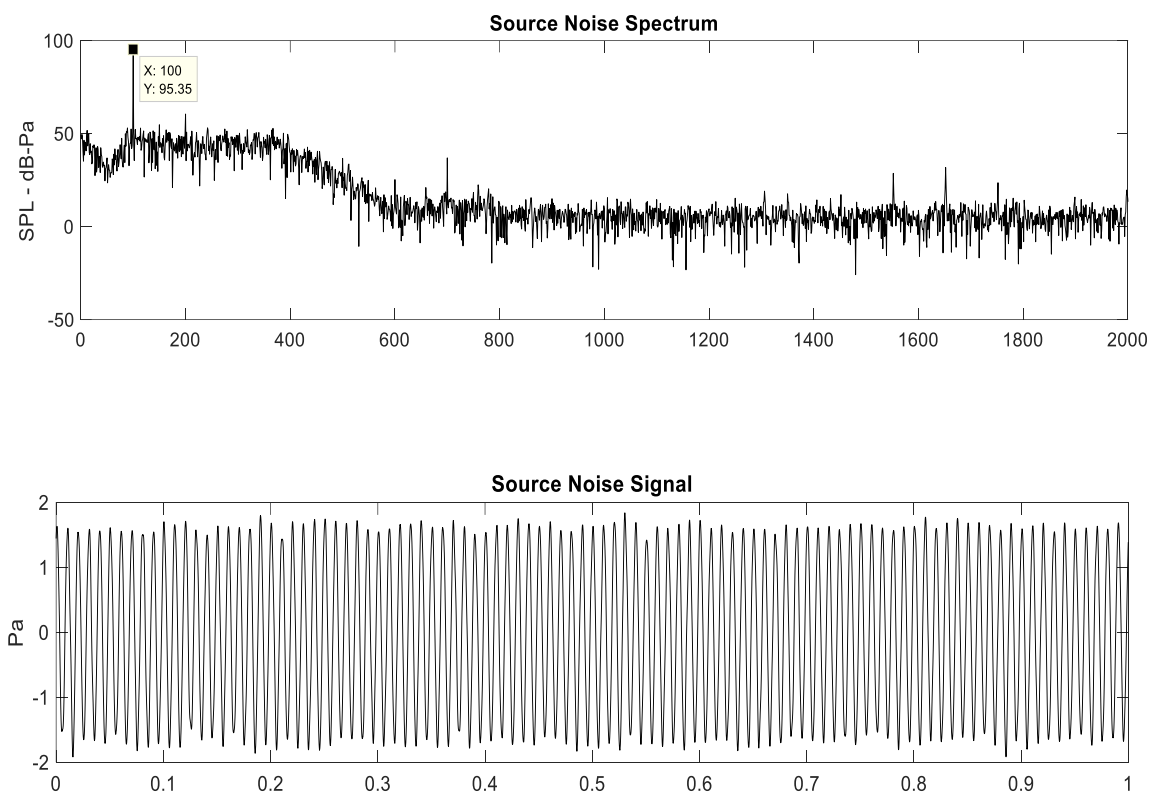
Εικόνα 4.5: Μέτρηση Φασμάτων



Εικόνα 4.6: Καθορισμός παραμέτρων μέτρησης

4.3 Διαγράμματα

Στον πίνακα 4.1 παρατίθενται οι μετρήσεις της **μέσης στάθμης του θορύβου** χωρίς τη λειτουργία και έπειτα με τη λειτουργία του συστήματος ANC. Στο φάσμα του θορύβου (σχήμα 4.1) κυριαρχεί η αρμονική στα 100 Hz. Επιπλέον η ενέργεια του σήματος θορύβου φαίνεται αυξημένη μέχρι τα 400 Hz, γεγονός που οφείλεται στον πρόσθετο θόρυβο που έχουμε προσθέσει, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4.



Σχήμα 4.1: Φάσμα και χρονικό σήμα του θορύβου, όπως αυτός καταγράφεται πάνω στην πηγή.

Seat A

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	76	77	77	76.2	80.2	80.3	79.9	80.5
with ANC	62	66.5	66.5	60.4	67.1	70.8	74.5	67
	14	10.5	10.5	15.8	13.1	9.5	5.4	13.5

Seat B

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	83	83	83.4	83	83.5	83.4	83.5	83.4
with ANC	72.2	74.6	77.8	71.4	78.8	64.1	71	64.8
	10.8	8.4	5.6	11.6	4.7	19.3	12.5	18.6

Seat C

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	83.7	83.5	83.3	83.3	82	82	82.1	82.2
with ANC	71.4	76.3	77.6	71.4	75.1	69.8	76.4	66.2
	12.3	7.2	5.7	11.9	6.9	12.2	5.7	16

Seat D

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	81.6	81.7	81.5	81.5	81.8	81.9	81.7	81.7
with ANC	68.6	73.6	77.5	71.4	68.3	75.1	76.2	71.6
	13	8.1	4	10.1	13.5	6.8	5.5	10.1

Seat E

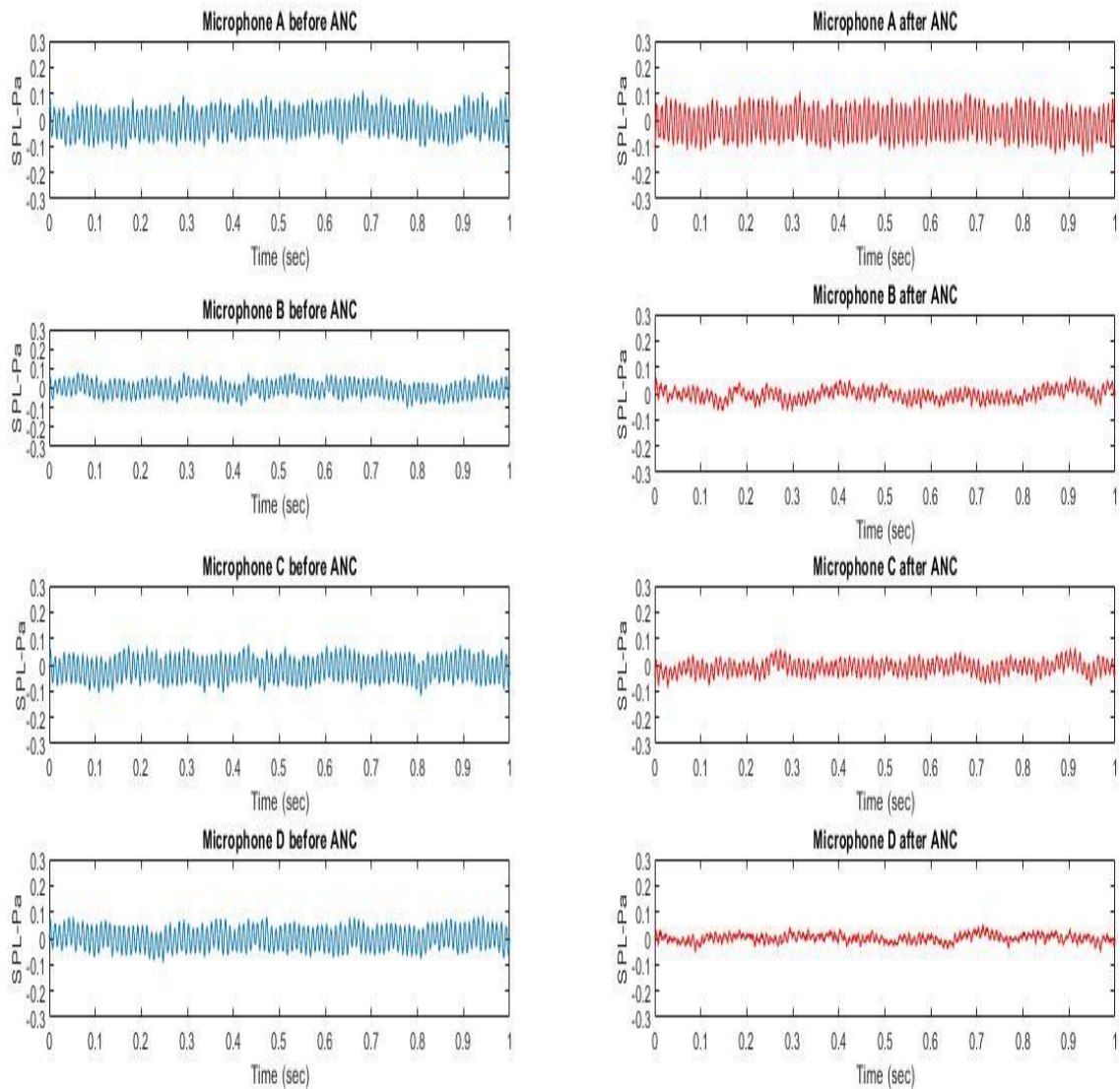
	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	84.8	84.6	84.4	84.3	83.6	83.5	83.7	83.7
with ANC	77.4	64.2	77.1	61.8	67.8	72.4	76.7	65.5
	7.4	20.4	7.3	22.5	15.8	11.1	7	18.2

Seat F

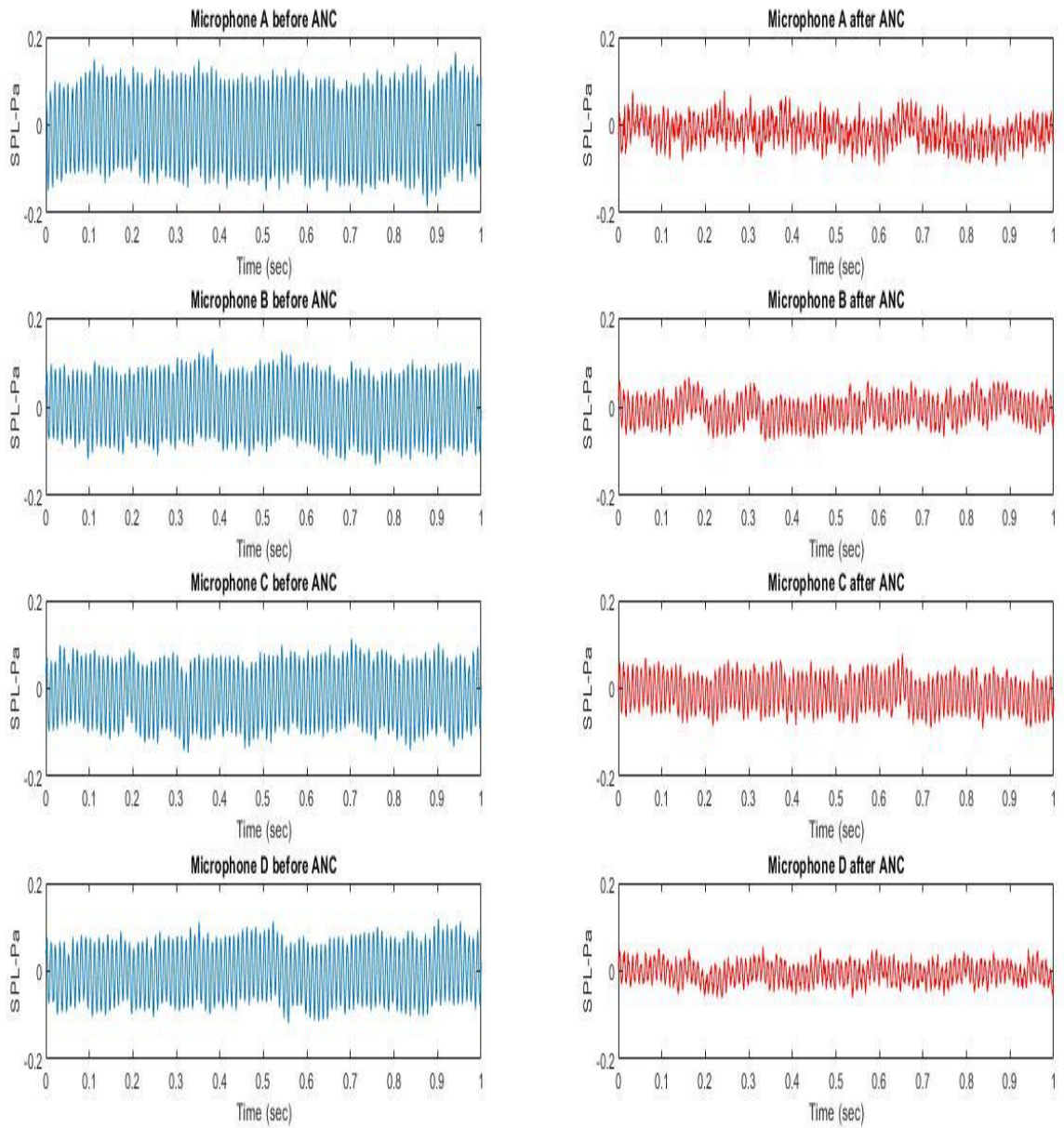
	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	85.7	85.9	85.8	85.9	85.7	85.6	85.4	85.7
with ANC	74.2	78.4	78.7	74.2	79	72.4	77.7	67.8
	11.5	7.5	7.1	11.7	6.7	13.2	7.7	17.9

Πίνακας 4.1: Μέση στάθμη θορύβου χωρίς και με τη λειτουργία του συστήματος ANC

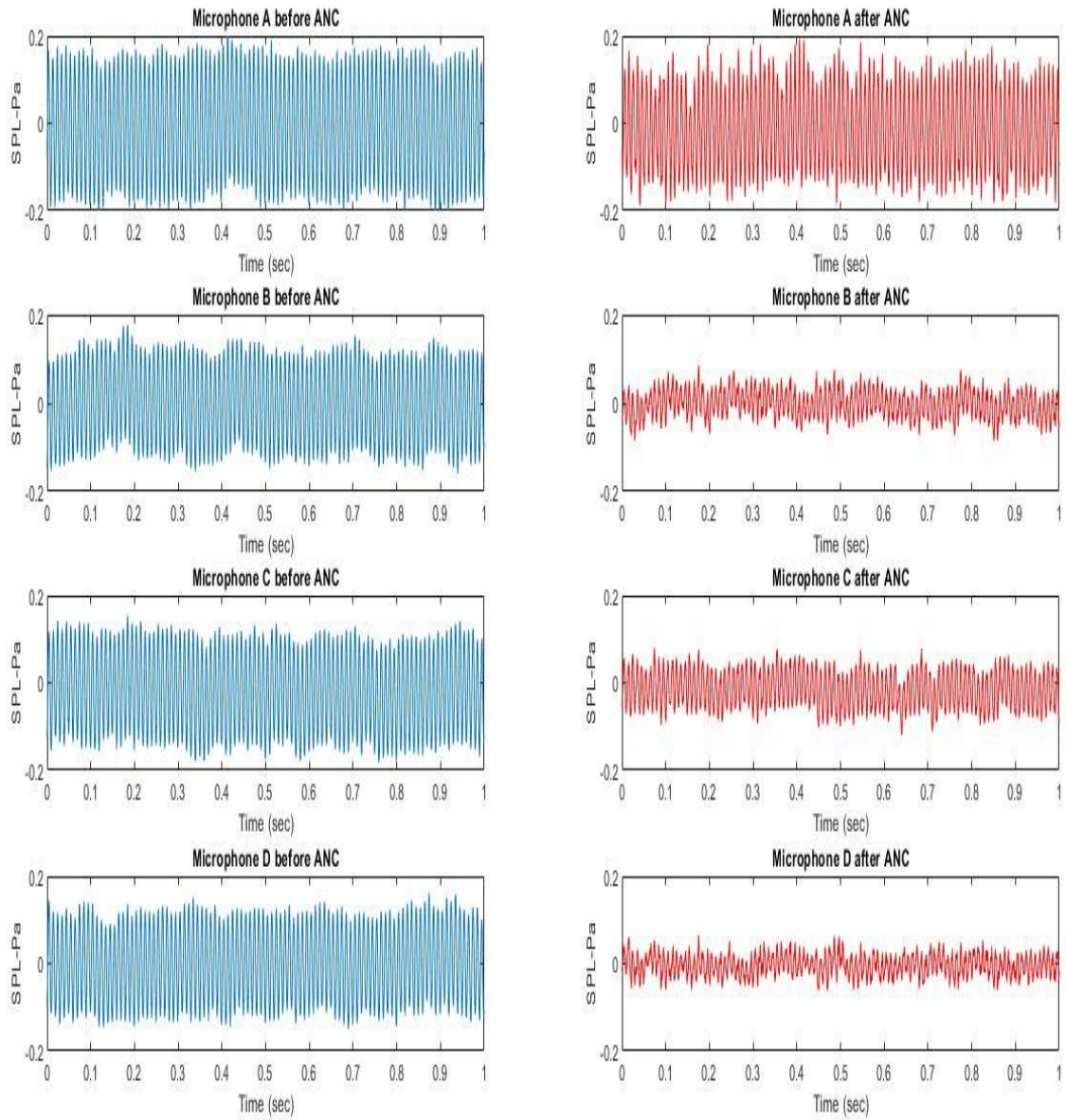
Παρακάτω παρατίθενται τα χρονικά σήματα και έπειτα τα φάσματα που μετρήθηκαν από τα τέσσερα μικρόφωνα της μετρητικής συσκευής πριν τη λειτουργία του συστήματος ANC και μετά την έναρξη της λειτουργίας τους. Τα διαγράμματα αναφέρονται σε κάθε θέση και στο δεξί και το αριστερό αυτί του επιβάτη.



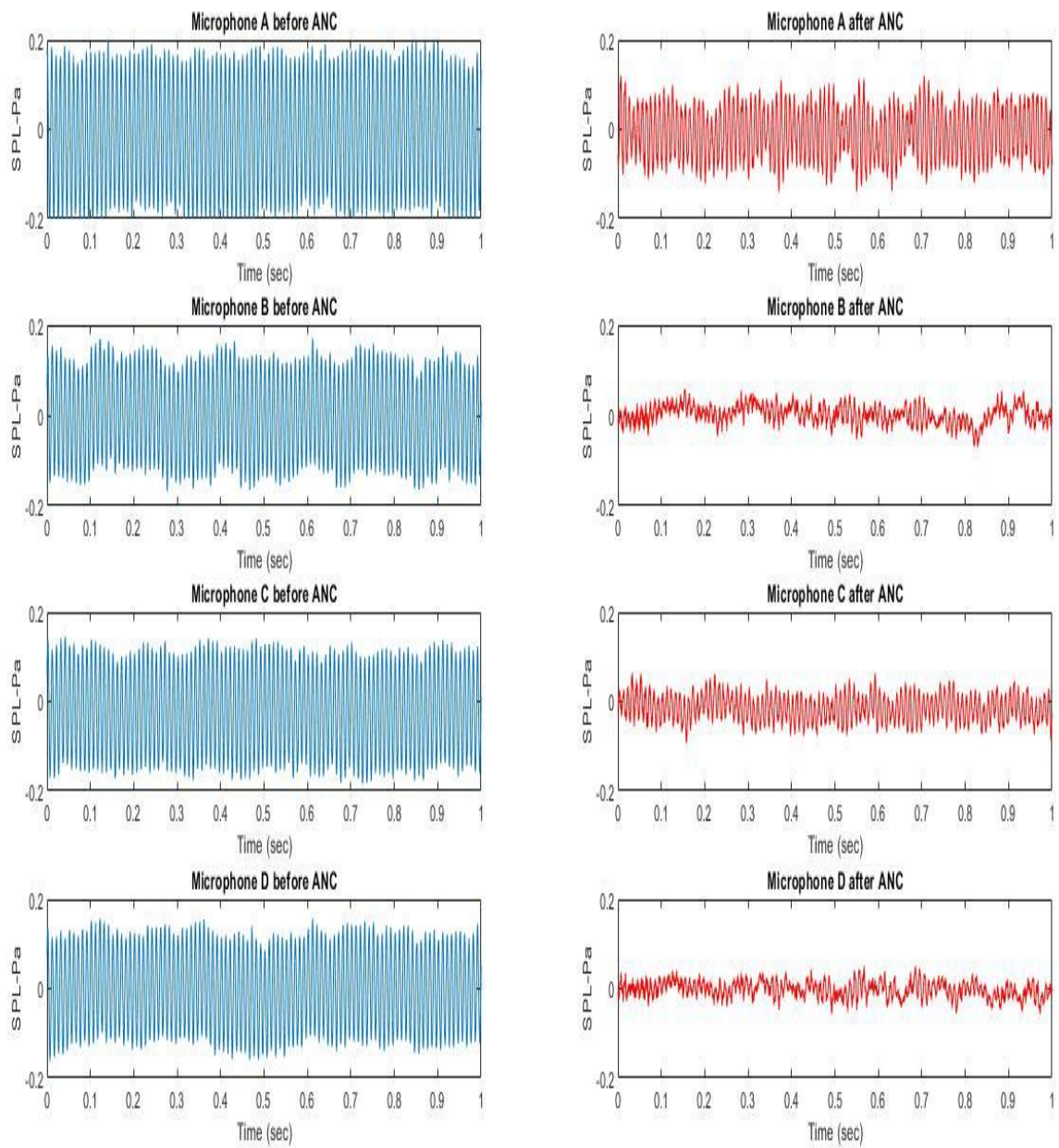
Σχήμα 4.2: Χρονικά σήματα: Θέση A- Δεξί αυτί



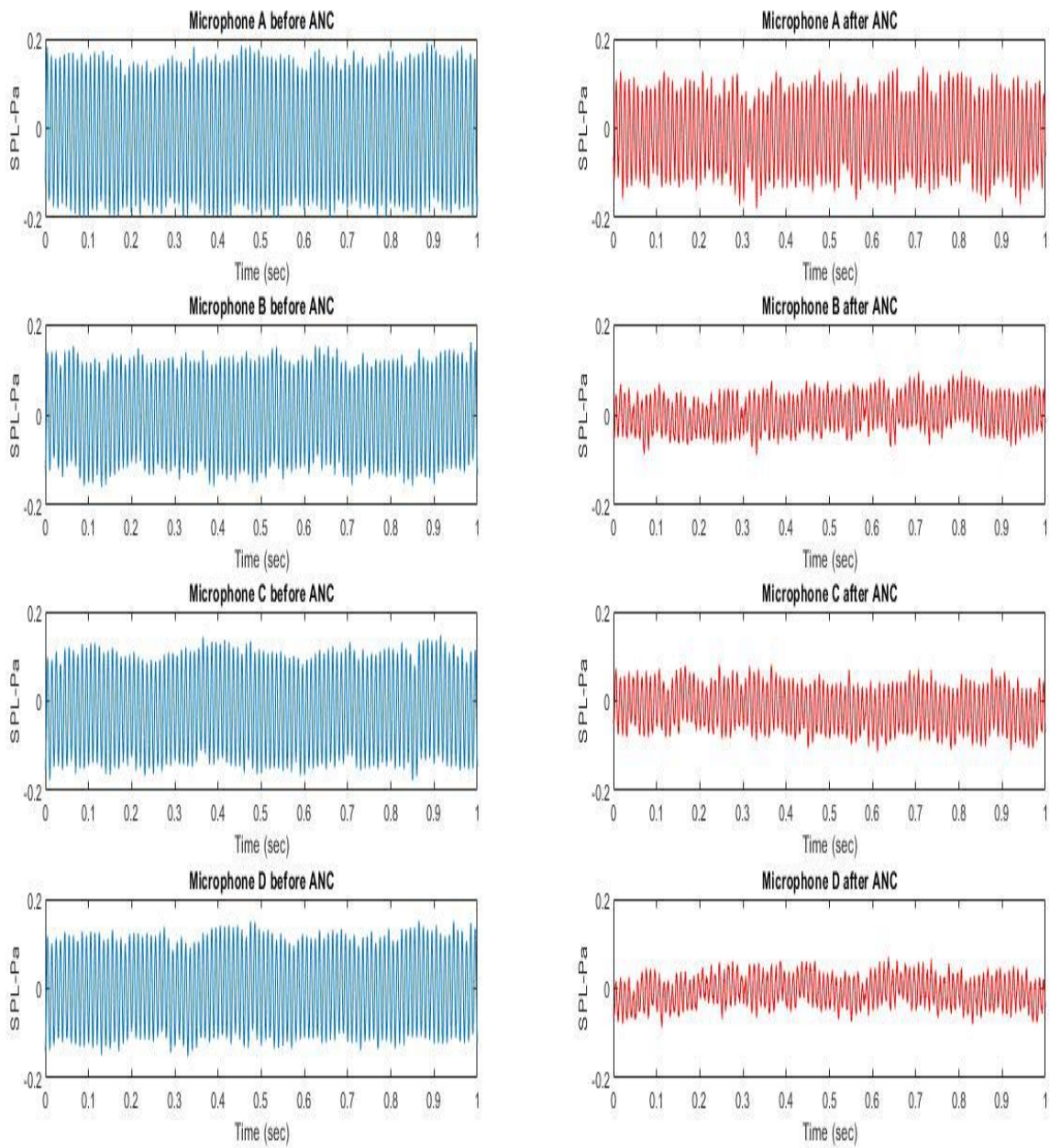
Σχήμα 4.3: Χρονικά σήματα: Θέση Α- Αριστερό αυτί



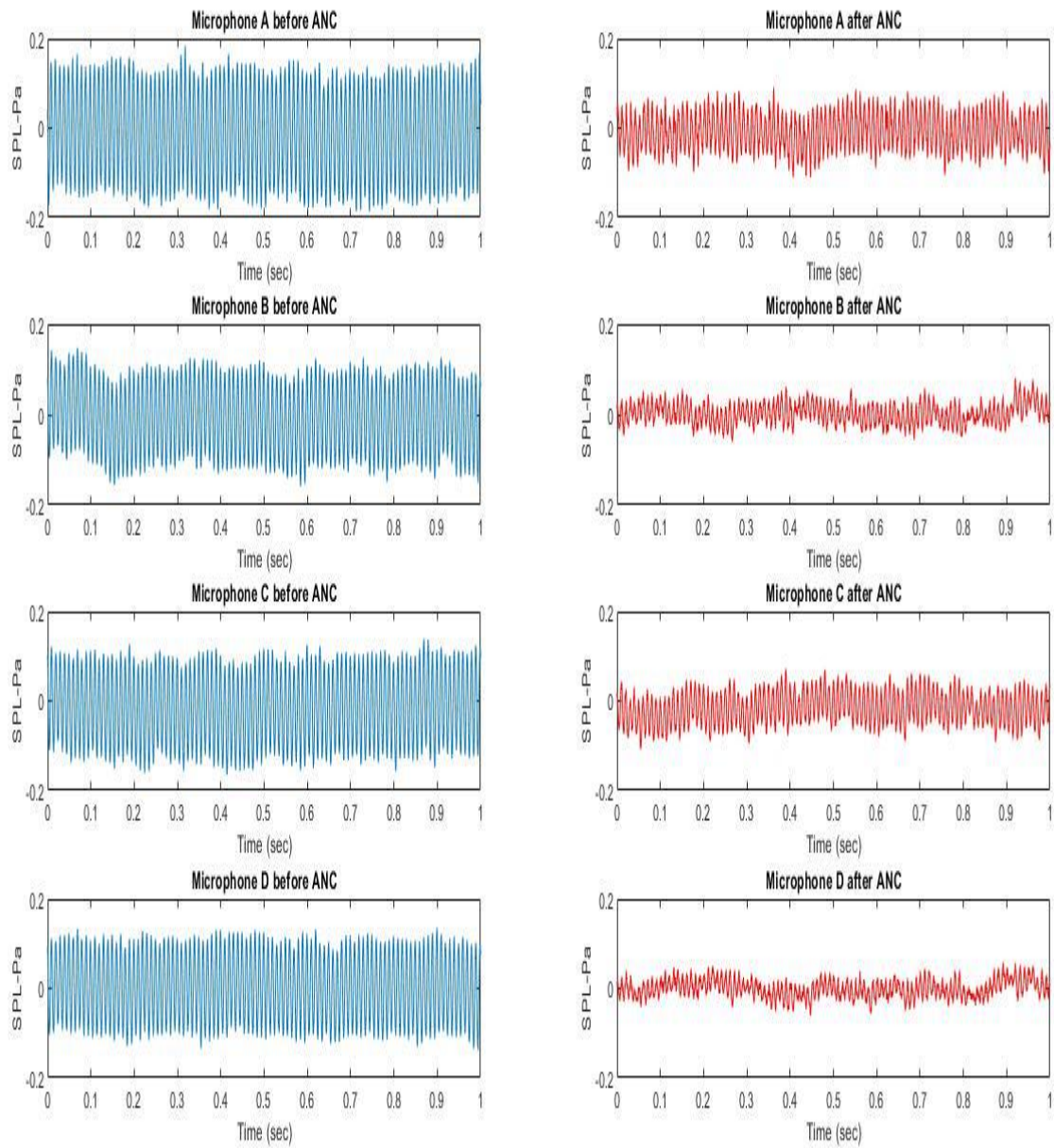
Σχήμα 4.4: Χρονικά σήματα: Θέση B- Δεξί αυτί



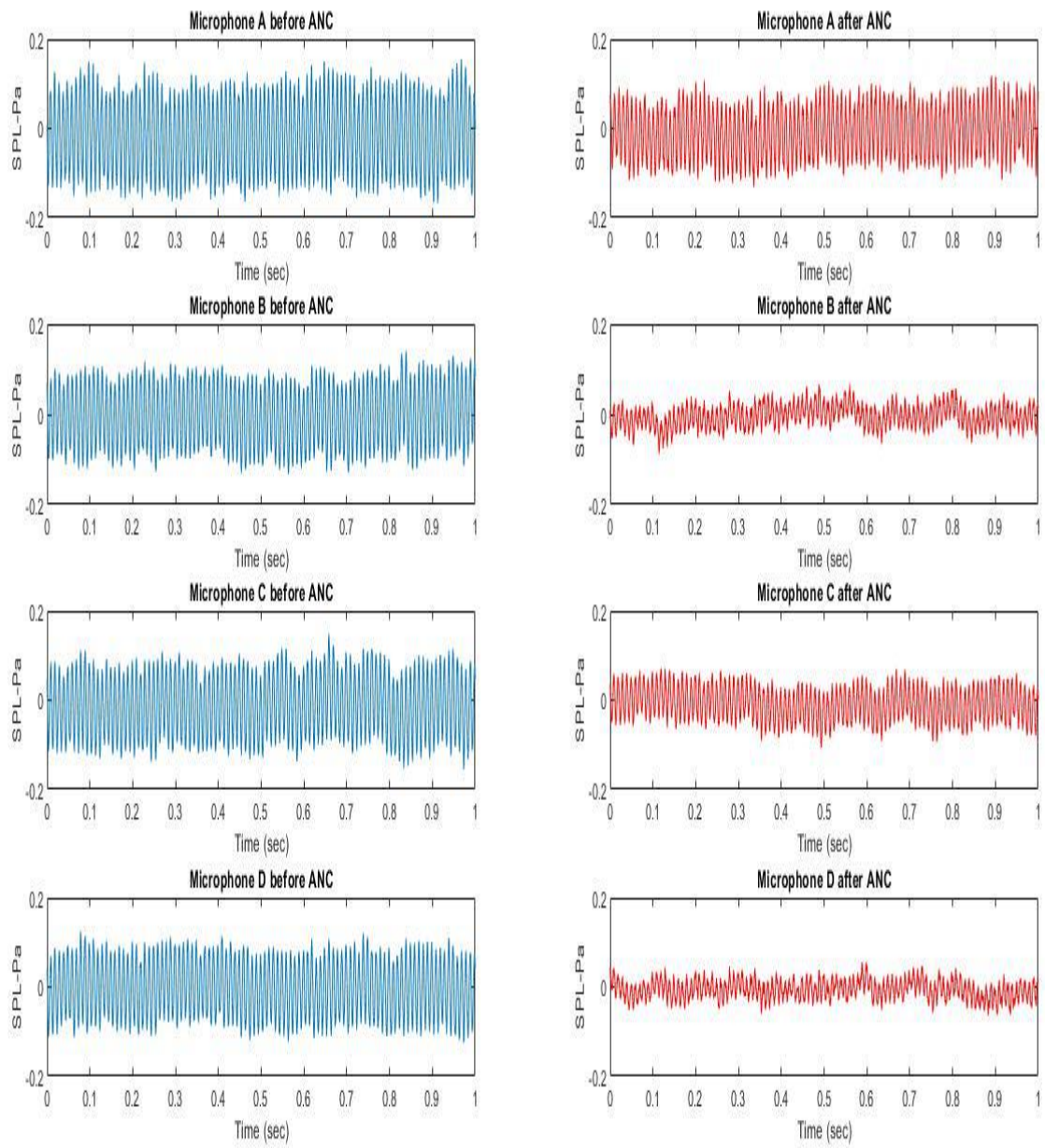
Σχήμα 4.5: Χρονικά σήματα: Θέση B- Αριστερό αυτί



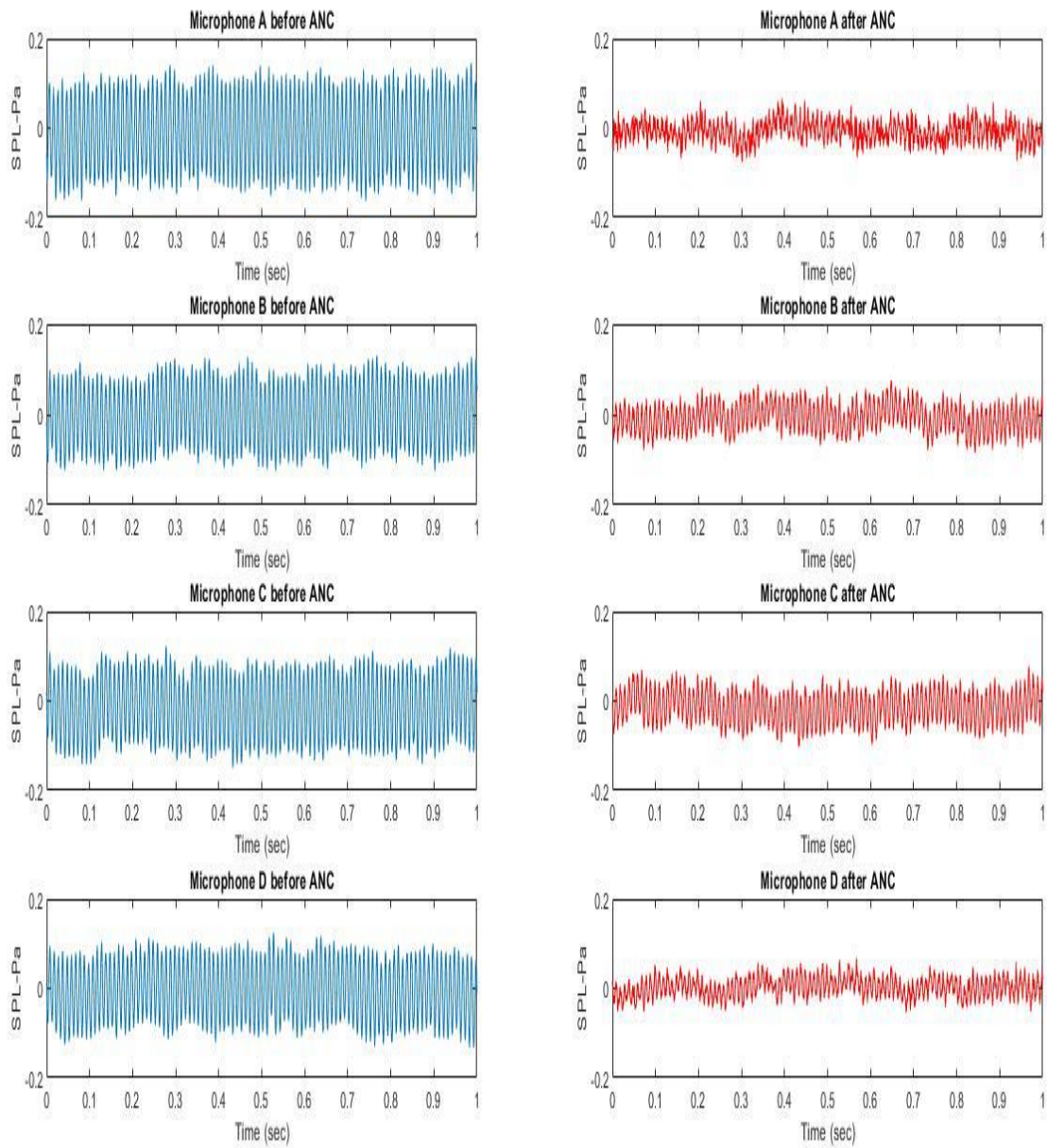
Σχήμα 4.6: Χρονικά σήματα: Θέση C- Δεξί αυτί



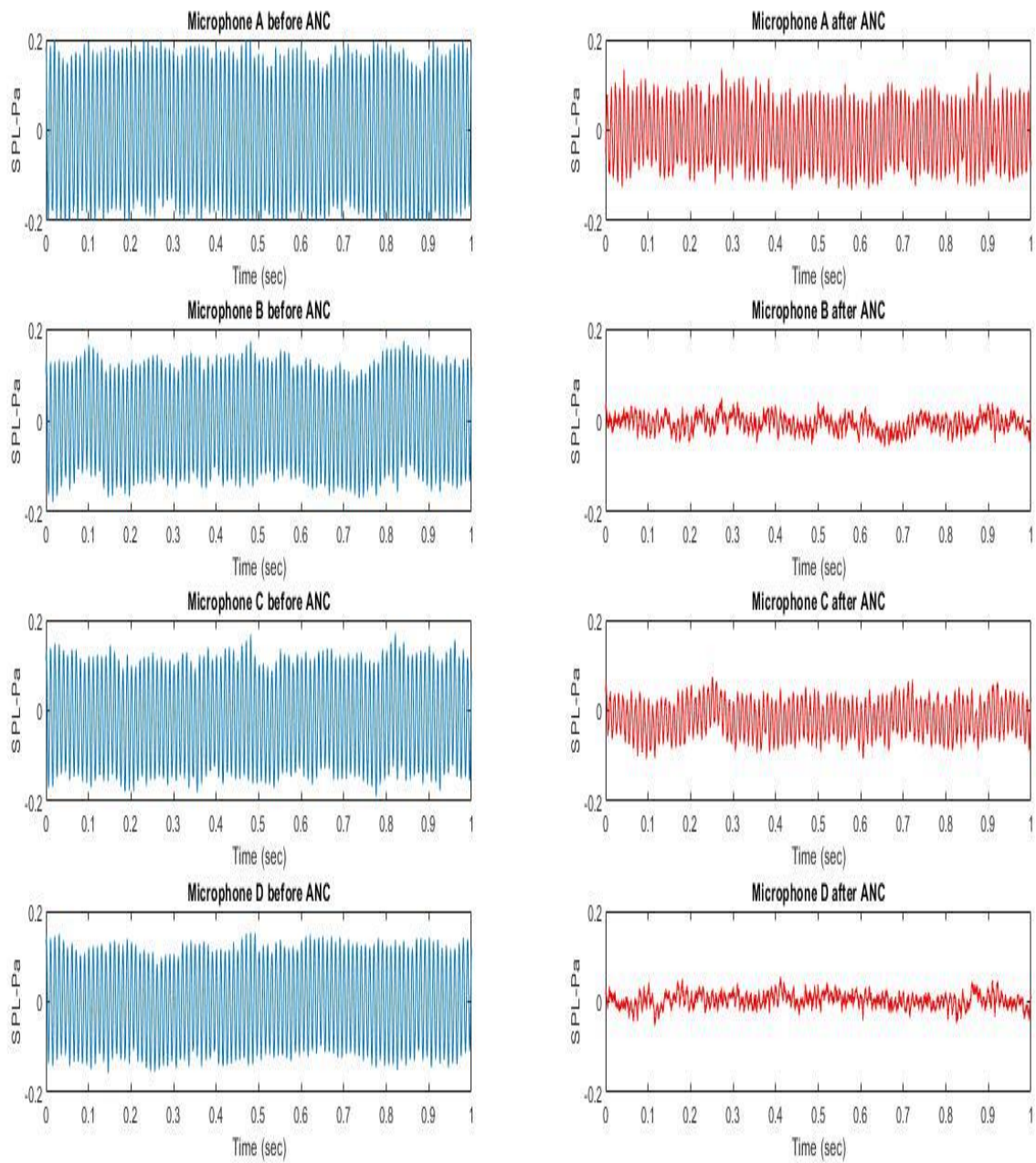
Σχήμα 4.7: Χρονικά σήματα: Θέση C- Αριστερό αυτί



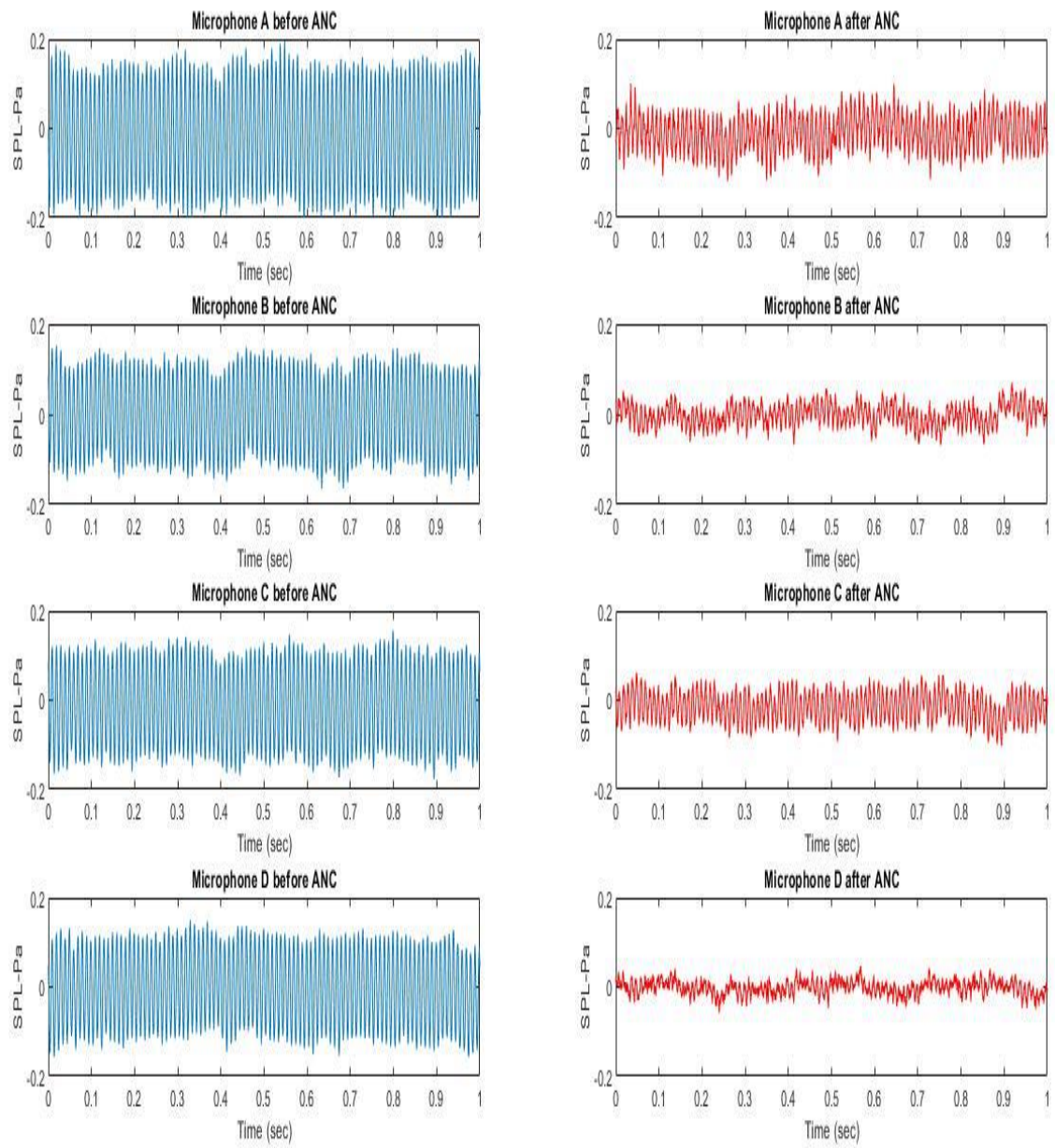
Σχήμα 4.8: Χρονικά σήματα: Θέση D- Δεξί αυτί



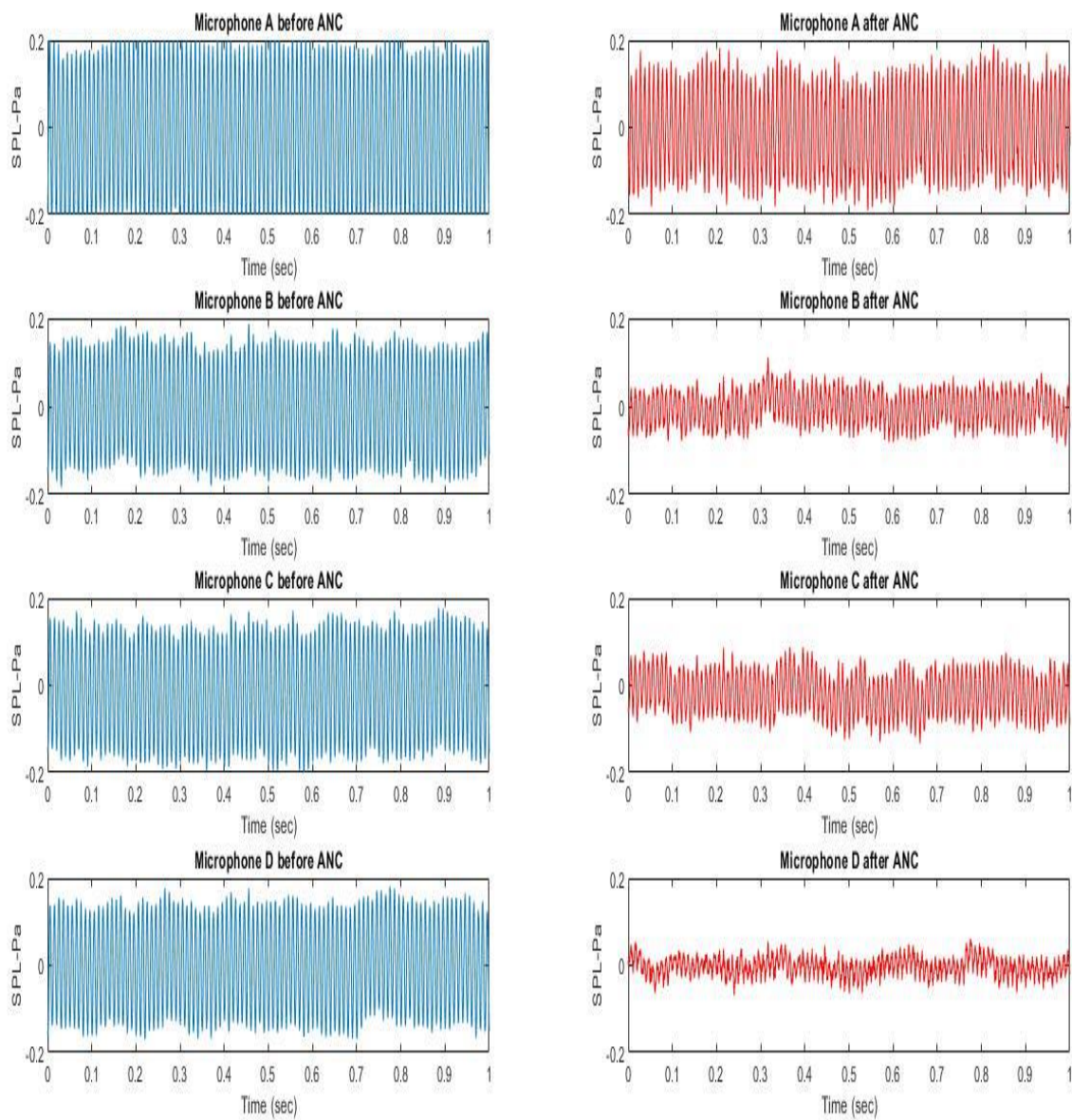
Σχήμα 4.9: Χρονικά σήματα: Θέση D- Αριστερό αυτί



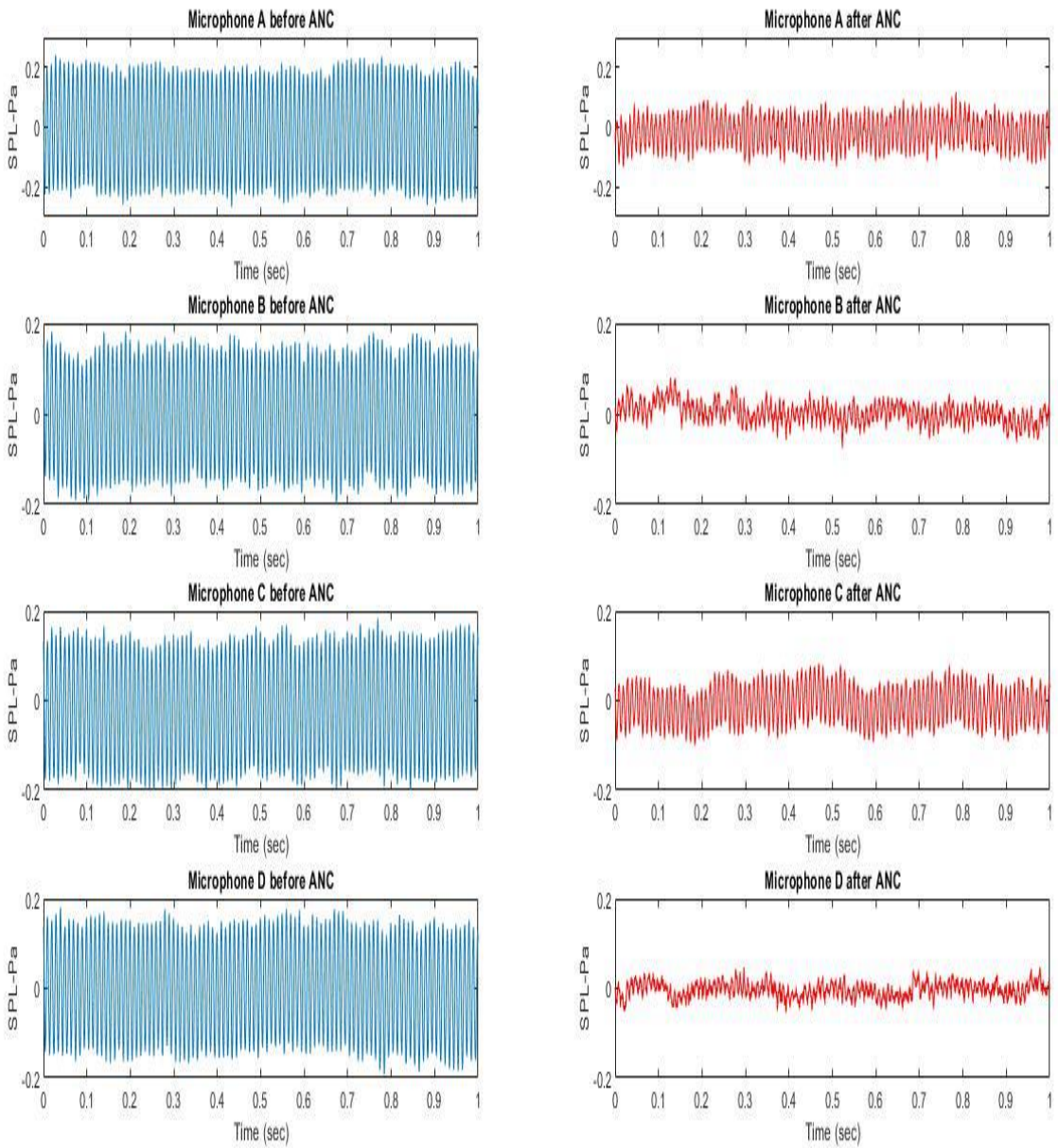
Σχήμα 4.10: Χρονικά σήματα: Θέση E- Δεξί αυτί



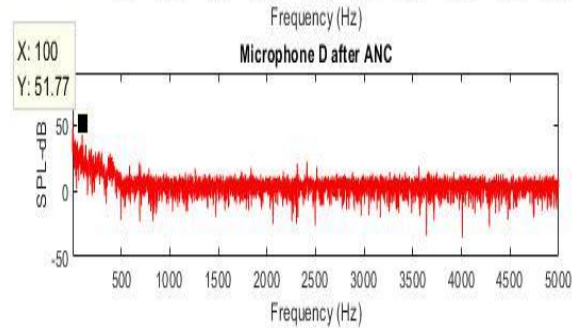
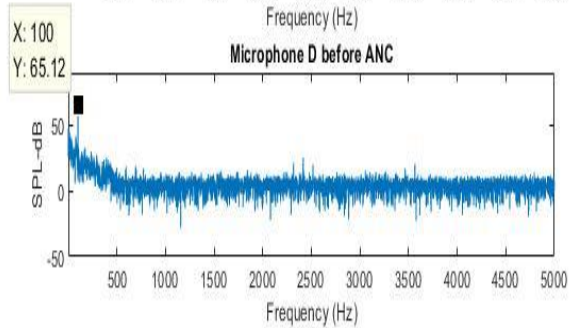
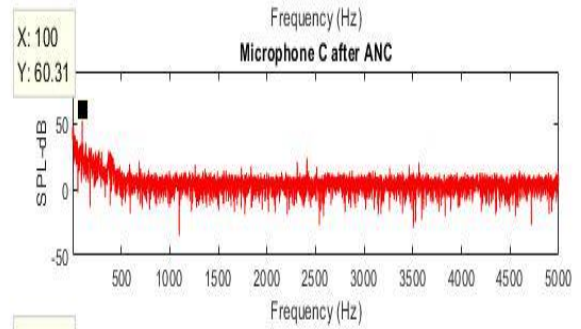
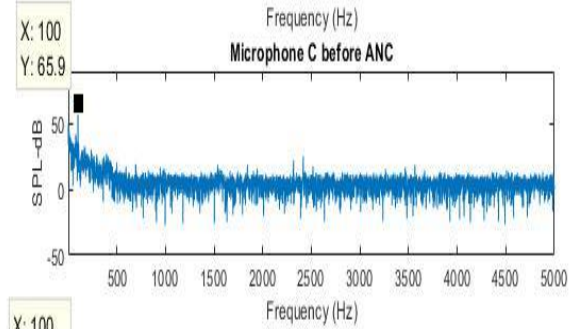
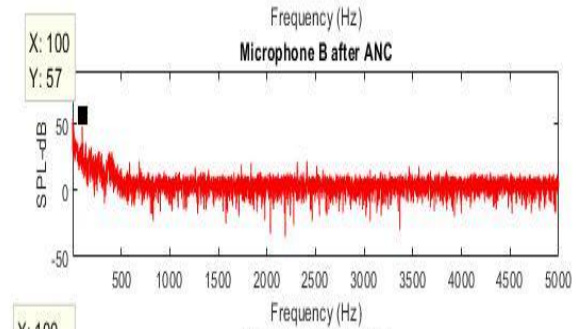
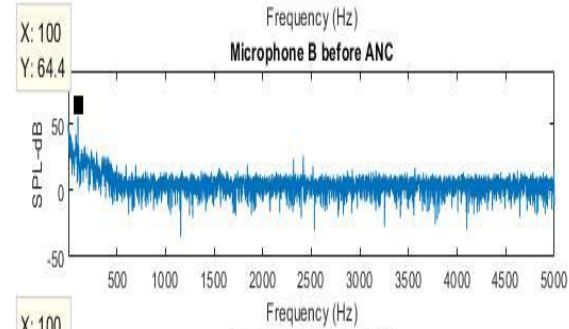
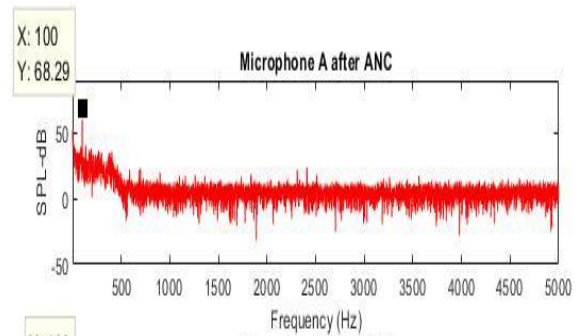
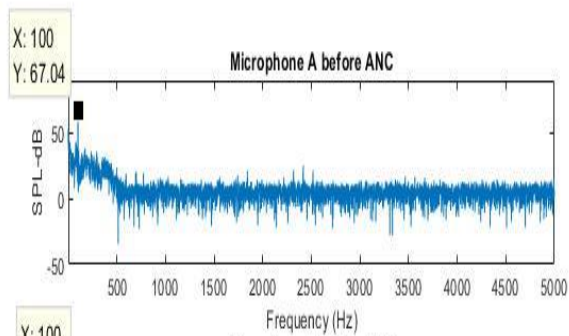
Σχήμα 4.11: Χρονικά σήματα: Θέση E- Αριστερό αυτί



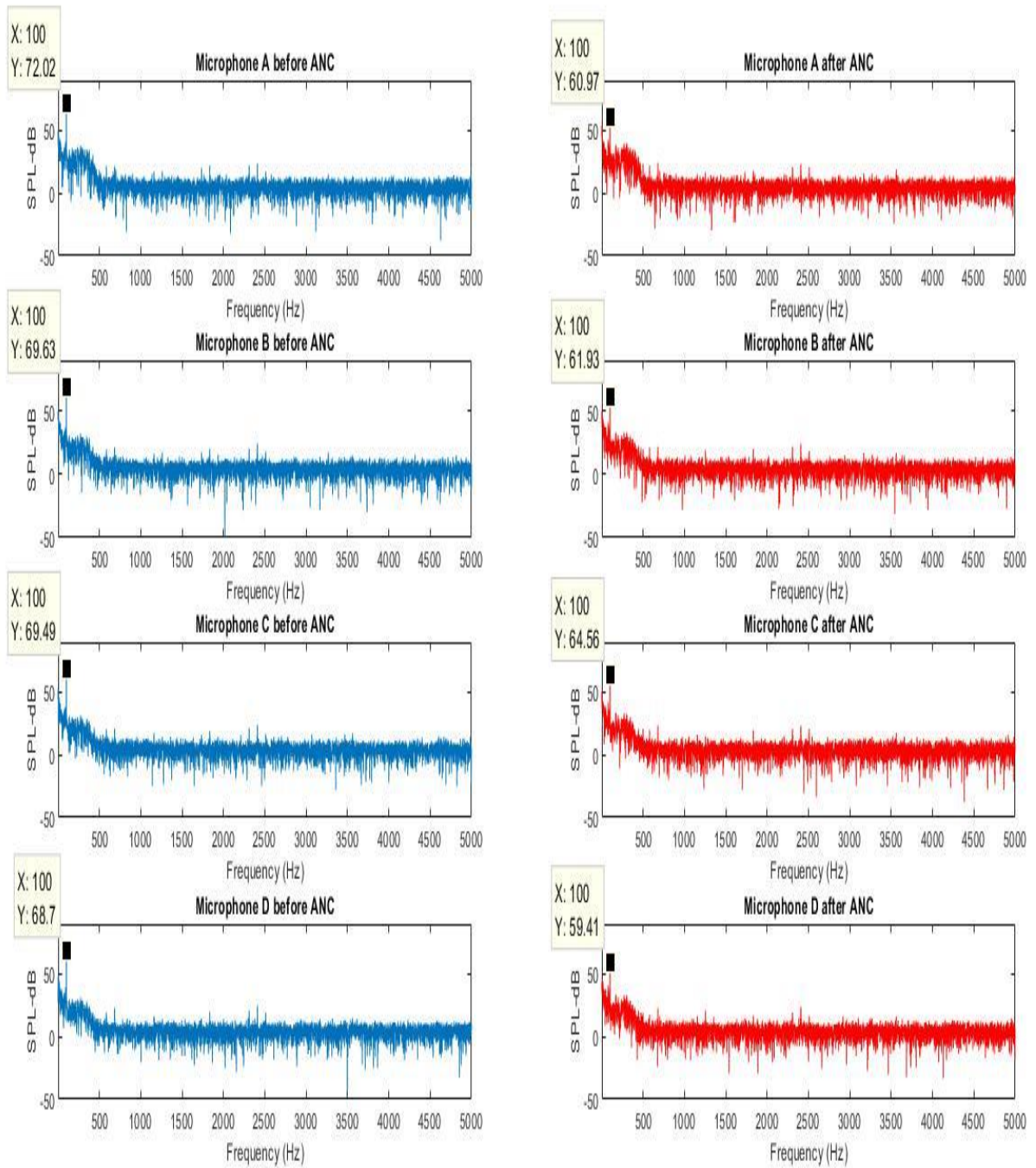
Σχήμα 4.12: Χρονικά σήματα: Θέση F- Δεξί αυτί



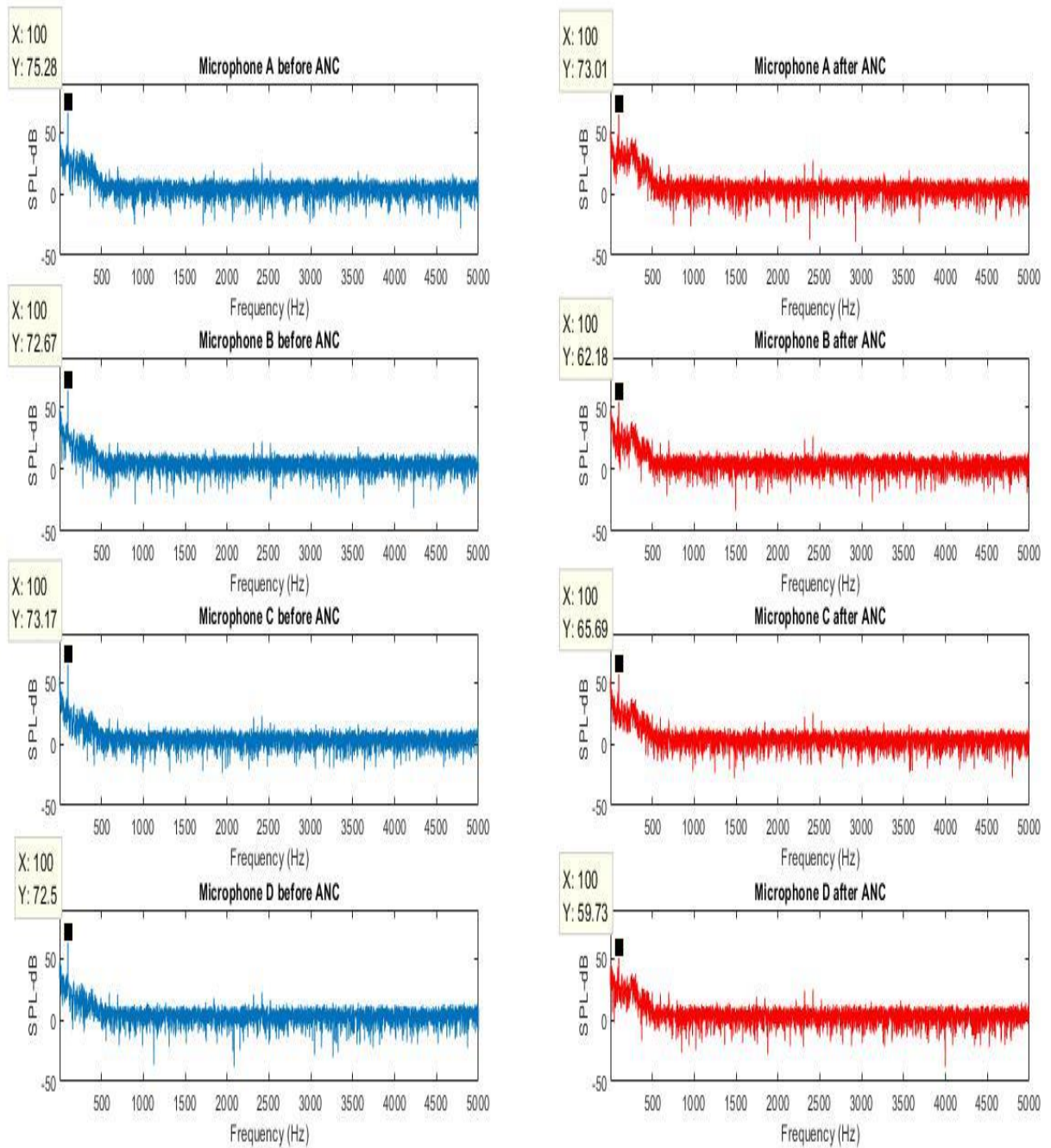
Σχήμα 4.13: Χρονικά σήματα: Θέση F- Αριστερό αυτί



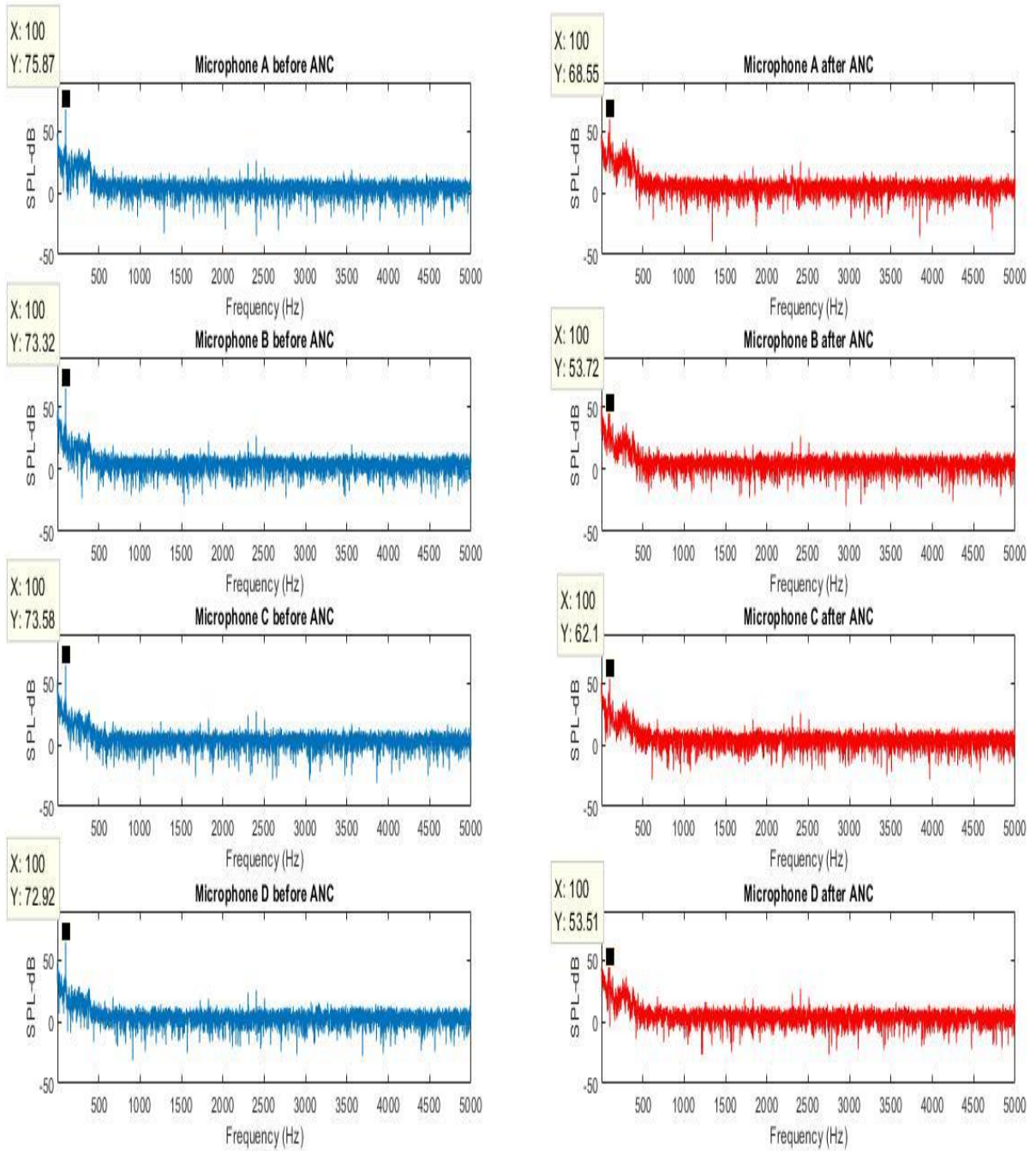
Σχήμα 4.14: Φάσματα: Θέση Α: Δεξί αυτί



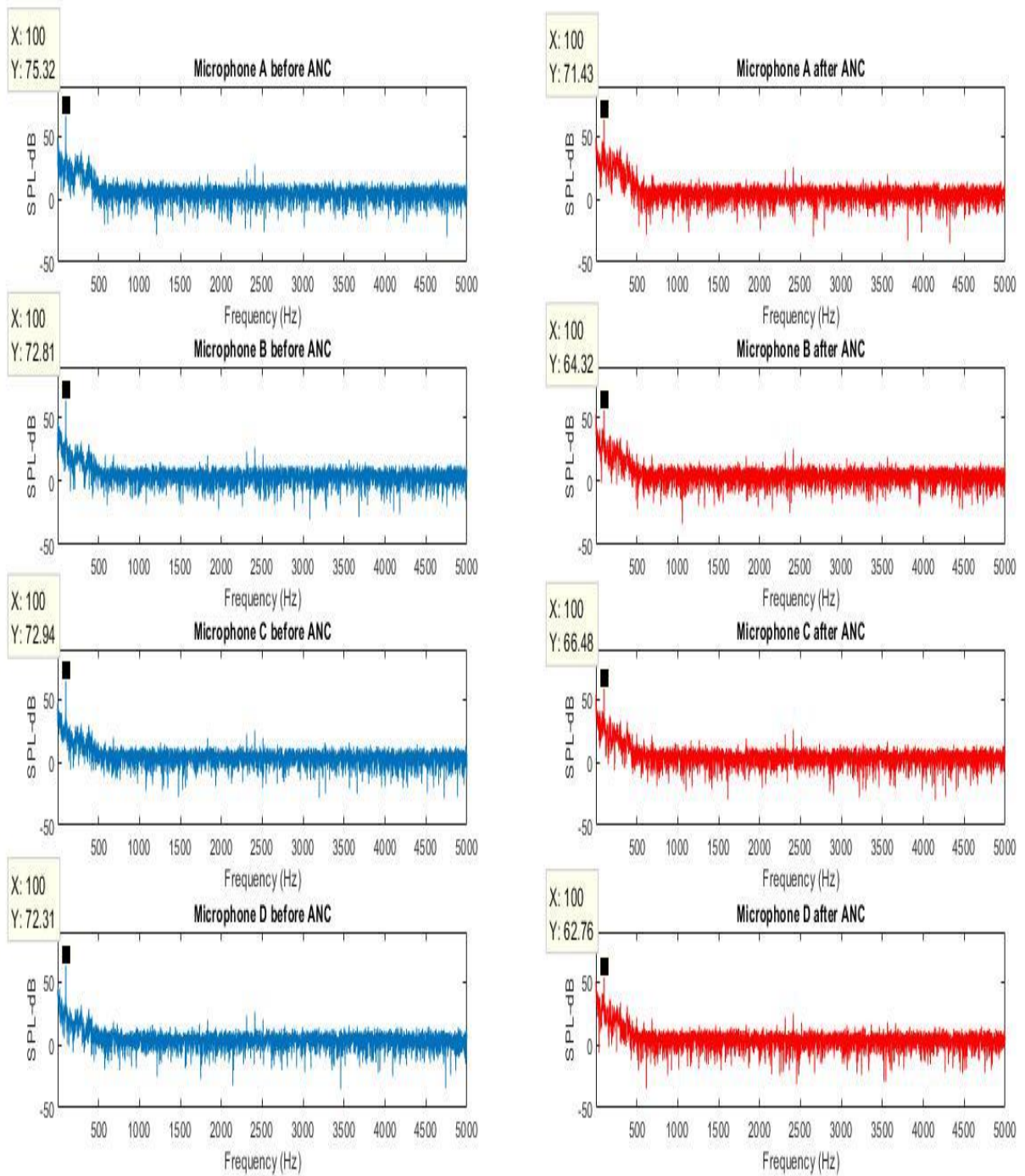
Σχήμα 4.15: Φάσματα: Θέση A: Αριστερό αυτί



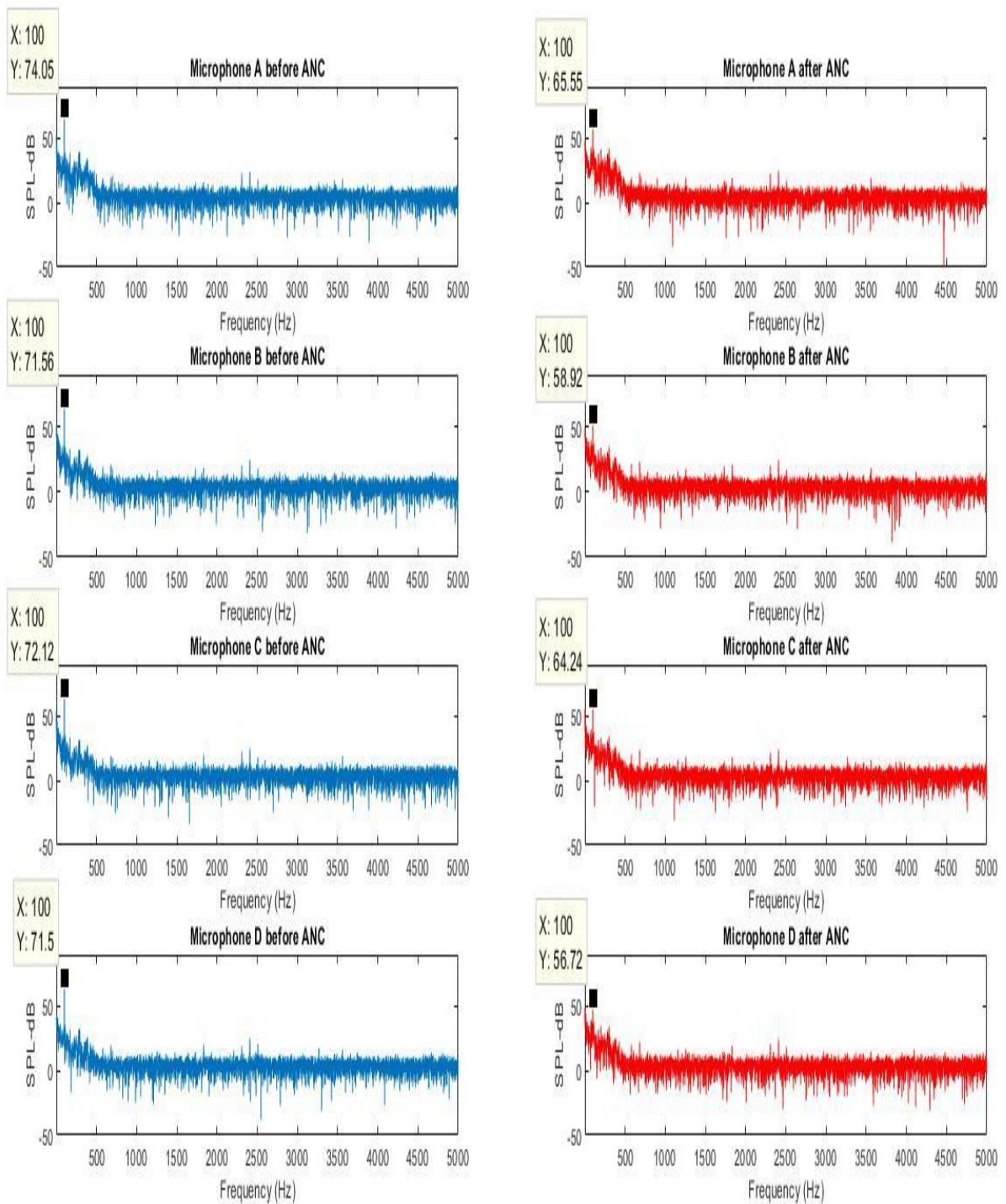
Σχήμα 4.16: Φάσματα: Θέση Β: Δεξί αυτί



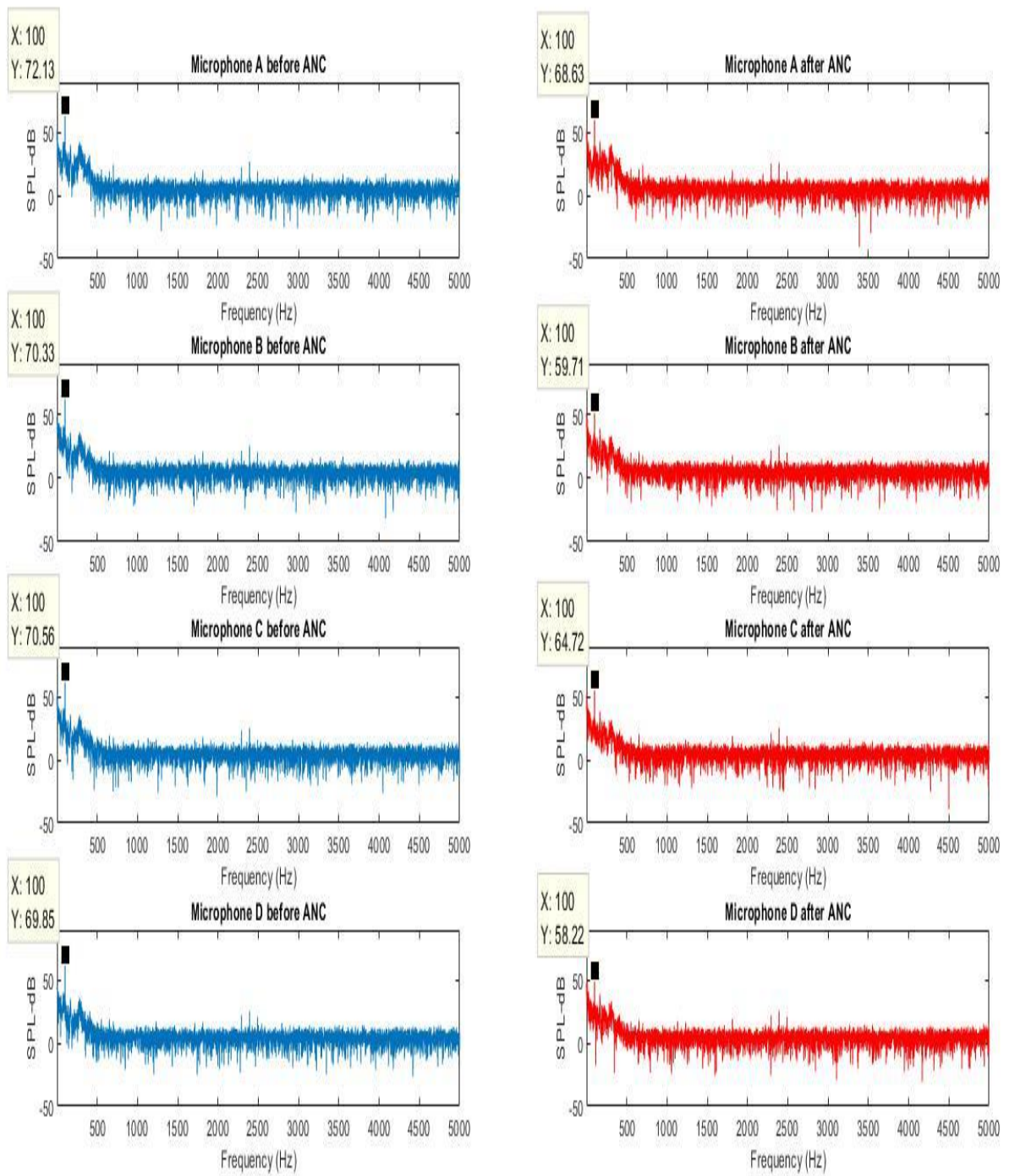
Σχήμα 4.17: Φάσματα: Θέση B: Αριστερό αυτί



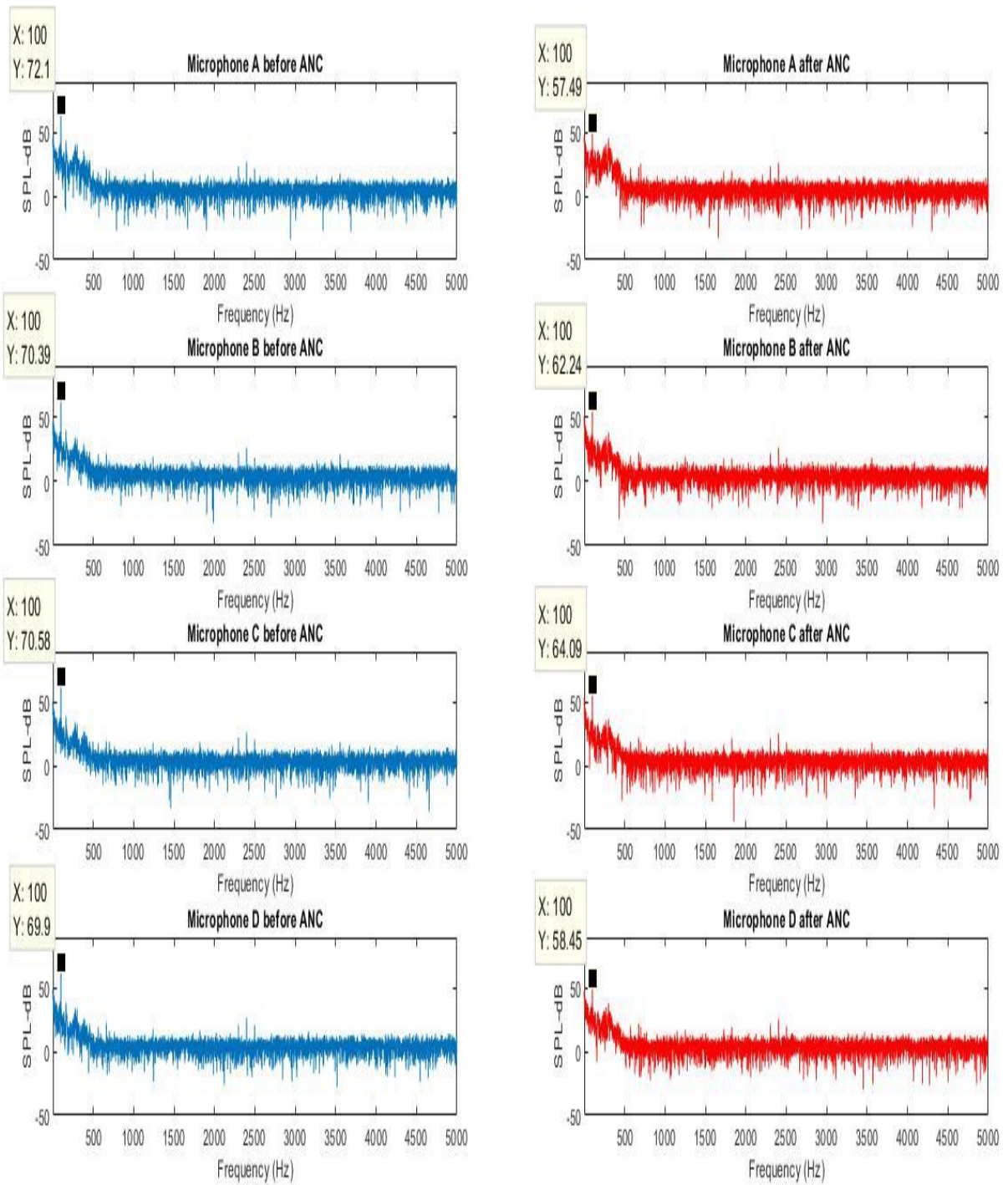
Σχήμα 4.18: Φάσματα: Θέση C: Δεξί αυτί



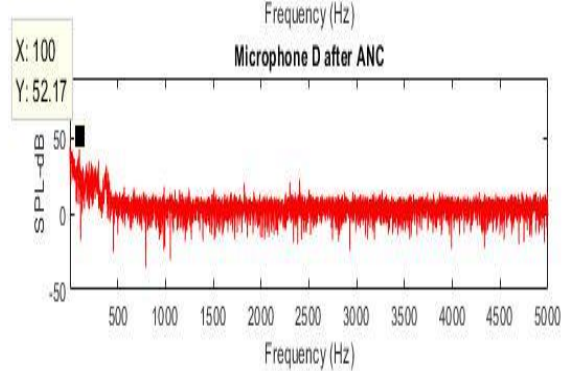
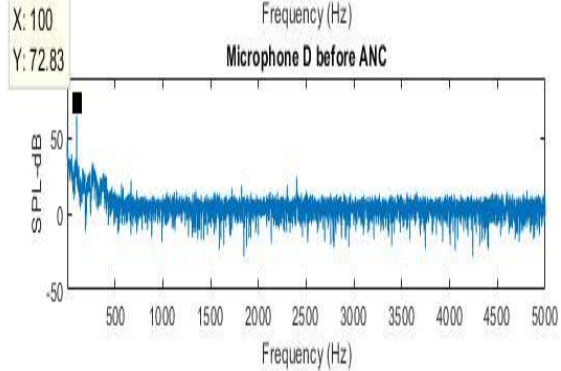
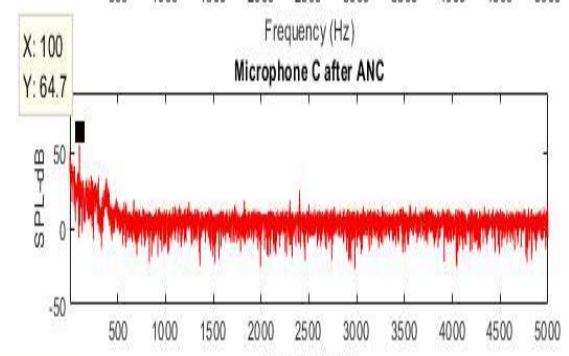
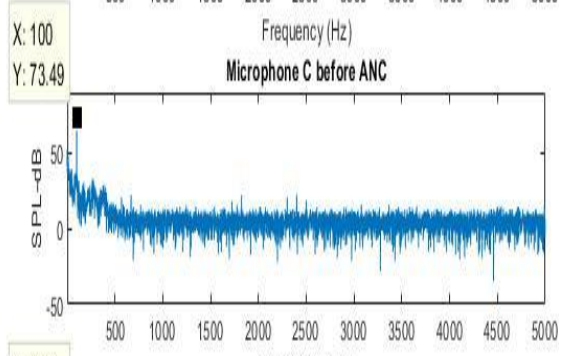
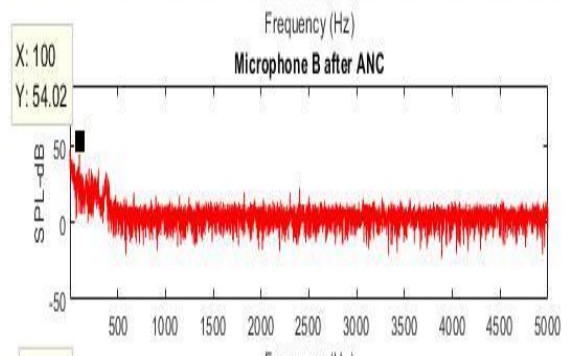
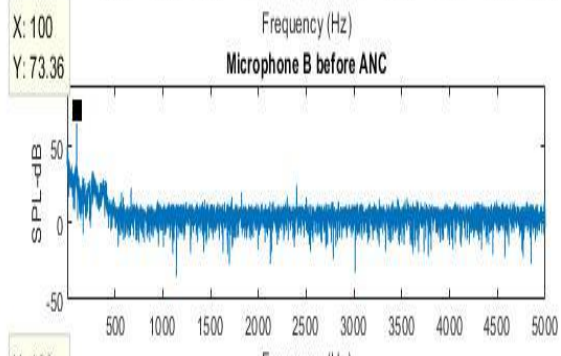
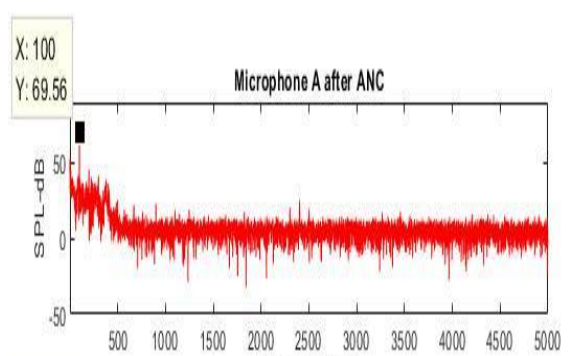
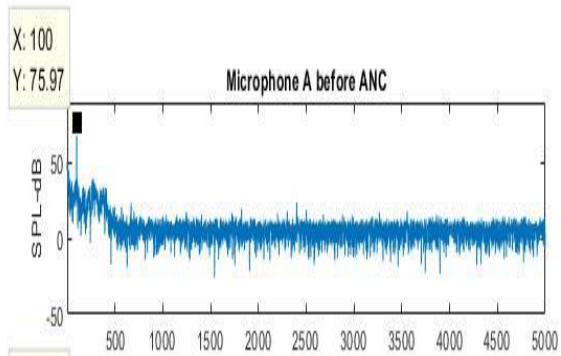
Σχήμα 4.19: Φάσματα: Θέση C: Αριστερό αυτί



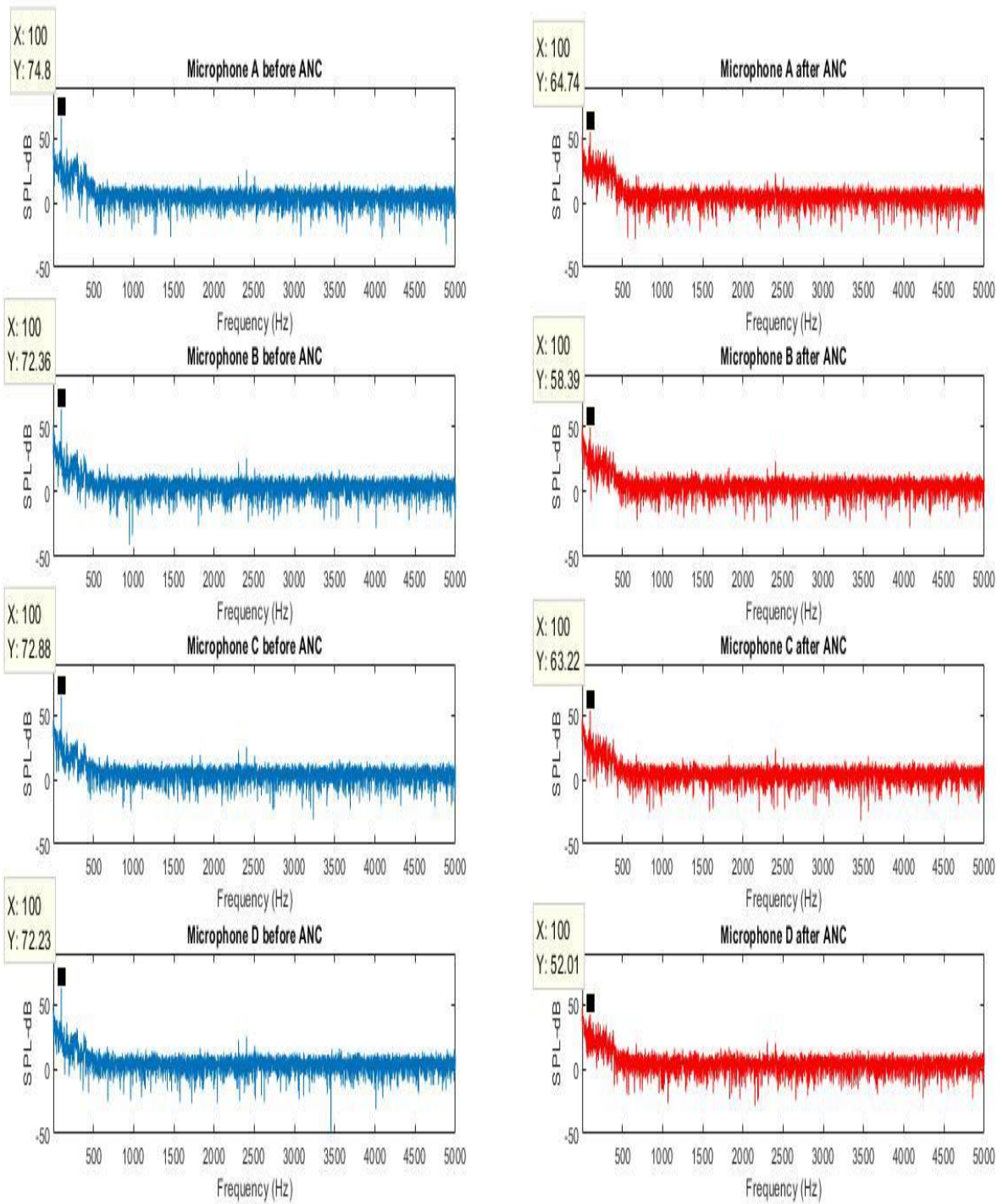
Σχήμα 4.20: Φάσματα: Θέση D: Δεξί αυτί



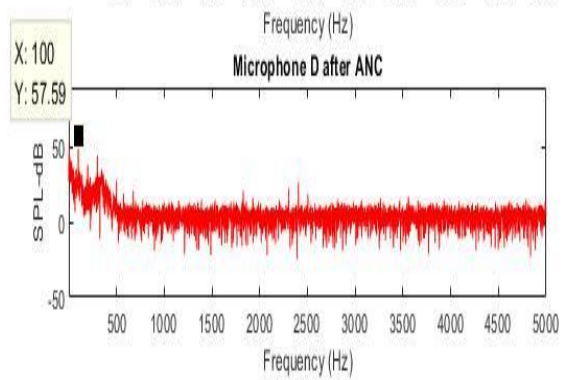
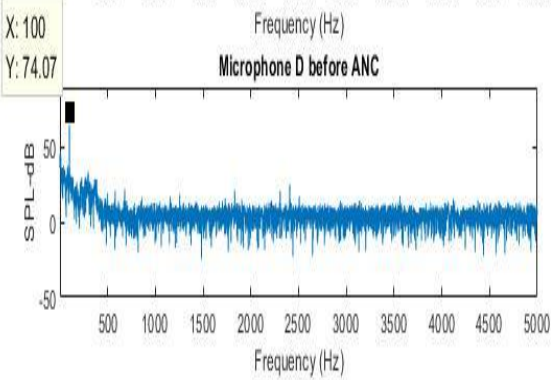
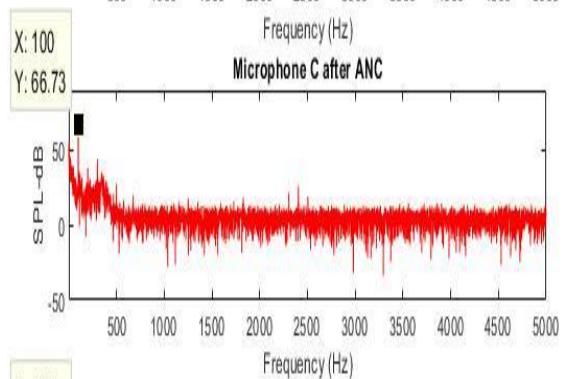
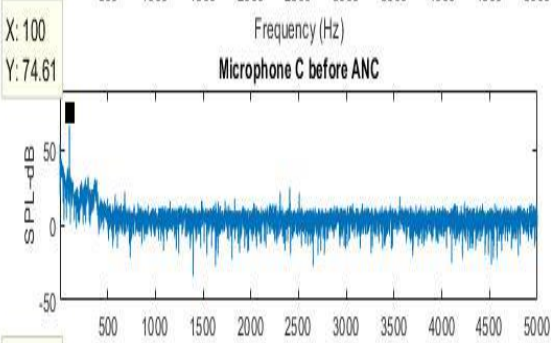
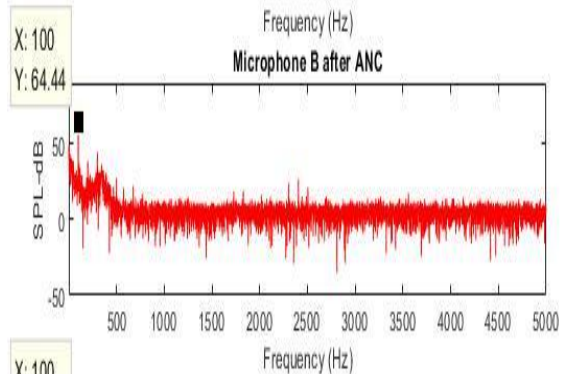
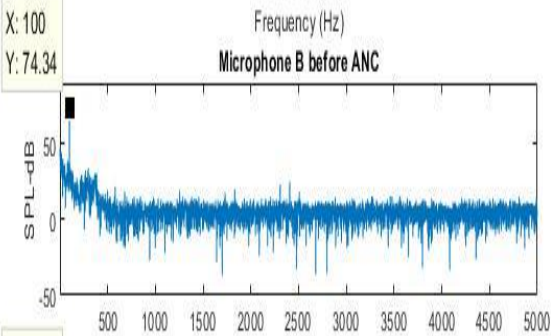
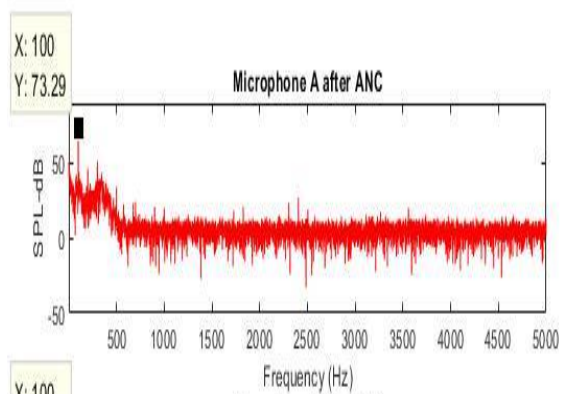
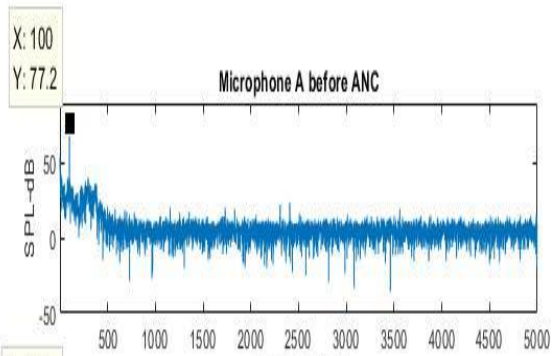
Σχήμα 4.21: Φάσματα: Θέση D: Αριστερό αυτί



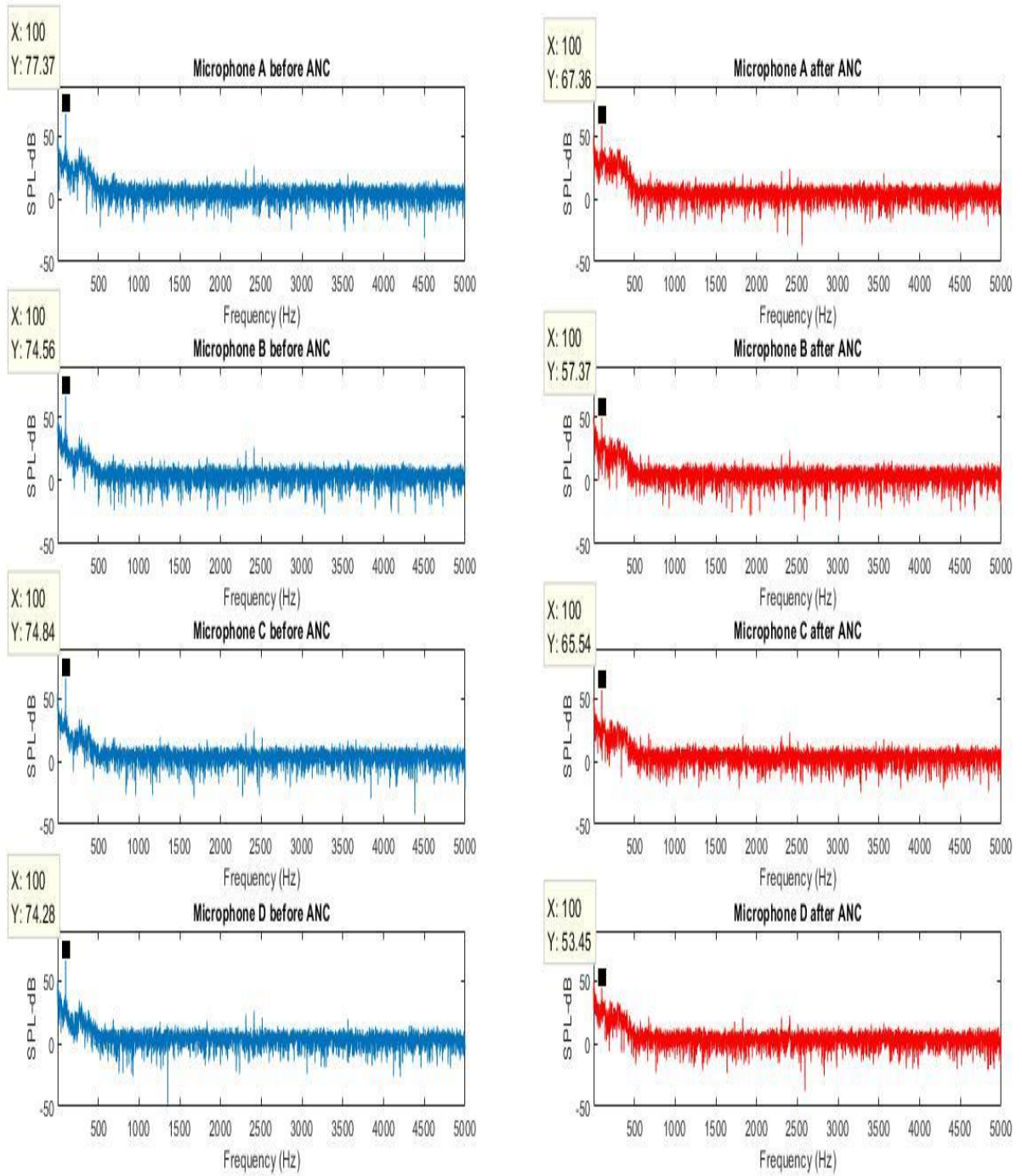
Σχήμα 4.22: Φάσματα: Θέση E: Δεξί αυτί



Σχήμα 4.23: Φάσματα: Θέση E: Αριστερό αυτί



Σχήμα 4.24: Φάσματα: Θέση F: Δεξί αυτί



Σχήμα 4.25: Φάσματα: Θέση F: Αριστερό αυτί

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται συγκεντρωμένες οι τιμές της αρμονικής στα 100 Hz πριν και μετά την εφαρμογή του συστήματος του ενεργητικού ελέγχου θορύβου:

Seat A

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	67	64.4	65.9	65.12	72	69.6	69.5	68.7
with ANC	68.3	57	60.3	51.8	61	62.9	64.6	59.4
	-1.3	7	5.6	13.32	11	6.7	4.9	9.3

Seat B

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	75.3	72.7	73.2	72.5	75.9	73.3	73.6	72.9
with ANC	73	62.2	65.7	59.7	68.6	53.7	62.1	53.5
	2.3	10.5	7.5	12.8	7.3	19.6	11.5	19.4

Seat C

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	73.3	72.8	72.9	72.3	74.1	71.6	72.1	71.5
with ANC	71.4	64.3	66.5	62.8	65.6	58.9	64.2	56.7
	1.9	8.5	6.4	9.5	8.5	12.7	7.9	14.8

Seat D

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	72.1	70.3	70.6	69.9	72.1	70.4	70.6	69.9
with ANC	68.6	59.7	64.7	58.2	57.5	62.2	64.1	58.5
	3.5	10.6	11.7	11.7	14.6	8.2	6.5	11.4

Seat E

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	76	73.4	73.5	72.8	74.8	72.4	72.9	72.2
with ANC	69.6	54	64.7	52.2	64.7	58.4	63.2	52
	6.4	19.4	8.8	20.6	10.1	14	9.7	20.2

Seat F

	Right ear				Left ear			
	A	B	C	D	A	B	C	D
without ANC	77.2	74.3	74.6	74.1	77.4	74.6	74.8	74.3
with ANC	73.3	64.4	66.7	57.6	67.4	57.4	65.6	53.5
	3.9	9.9	7.9	16.5	9.7	17.2	9.2	20.8

Πίνακας 4.2: Στάθμη αρμονικής στα 100 Hz πριν και μετά την εφαρμογή του ANC

4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου που είχε υλοποιηθεί στο εργαστήριο Δυναμικής και Κατασκευών και βασίζονταν στο αλγόριθμο LMS, χωρίς τη μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού, είχε επιτευχθεί ικανοποιητική μείωση της στάθμης του θορύβου στο σημείο όπου ήταν τοποθετημένο το μικρόφωνο καταγραφής σφάλματος (error microphone). Στο σύστημα το οποίο πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία, η μείωση της συνολικής στάθμης του θορύβου, καθώς και της αρμονικής στα 100 Hz, επιτυγχάνεται σε απόσταση 10 cm από το μεγάφωνο, όπου βρίσκεται κατά προσέγγιση το αυτί του επιβάτη. Το γεγονός αυτό αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη του συστήματος, η οποία οφείλεται αφενός στη γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε και αφετέρου στην μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού που υλοποιήθηκε στον αλγόριθμο αυτό.

Πιο αναλυτικά, το μικρόφωνο του συστήματος ελέγχου της απόδοσης του ANC, που βρίσκεται, κατά προσέγγιση στην περιοχή του αυτιού είναι το D. Στο μικρόφωνο αυτό παρατηρείται μείωση της συνολικής στάθμης του θορύβου μεγαλύτερη των 10 dB σε όλες τις θέσεις, αποτέλεσμα που ικανοποιεί τους στόχους που είχαν τεθεί πριν ο σχεδιασμό του συστήματος ενεργητικού ελέγχου θορύβου. Παρόλα αυτά η αρμονική στα 100 Hz δεν μειώνεται σε όλες τις θέσεις κατά τουλάχιστον 15 dB, σύμφωνα με το στόχο που είχε τεθεί. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στις θέσεις A και D οι οποίες βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή του θορύβου, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει μια εξήγηση για τη μειωμένη απόδοση του συστήματος στις θέσεις αυτές. Επιπλέον αν παρατηρήσουμε τα χρονικά σήματα των θέσεων A και D θα δούμε ότι τα πλάτη είναι μικρότερα σε σχέση με άλλες θέσεις γεγονός που οφείλεται σε φαινόμενα ανάκλασης και συμβολής των ηχητικών κυμάτων μέσα στην καμπίνα. Η ένταση των φαινομένων αυτών στις συγκεκριμένες θέσεις πιθανώς να δυσχεραίνουν τη λειτουργία του συστήματος, αφού ο ήχος που καλείται να παράξει απέχει από αυτόν που δέχεται ως αναφορά μέσω του μικροφώνου αναφοράς, το οποίο βρίσκεται πάνω στην πηγή του θορύβου. Μπορούμε να πούμε λοιπόν ότι η μείωση της στάθμης του θορύβου είναι πιο ικανοποιητική για το broadband σήμα, παρά για τη συγκεκριμένη αρμονική.

Εκτός από το μικρόφωνο D, μείωση παρατηρείται και στα μικρόφωνα A, B και C τα οποία είναι τοποθετημένα σε απόσταση 5 cm από το D (σχήμα 4.2), ωστόσο το μέγεθός της δεν είναι ικανοποιητικό, αν θεωρήσουμε σαν όριο τα 15dB για τη μείωση της αρμονικής στα 100 Hz και τα 10 dB για τη μείωση της συνολικής στάθμης του θορύβου. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι γύρω από το αυτί του επιβάτη δημιουργείται μια σφαίρα μέσα στην οποία παρατηρείται μείωση τόσο της αρμονικής, όσο και της συνολικής στάθμης του θορύβου, ωστόσο η μείωση αυτή δεν είναι ομοιόμορφη και ακόμα σε κάποια σημεία είναι εκτός των προδιαγραφών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Παρόλα αυτά συμβάλλει σημαντικά στην βελτίωση της αίσθησης που έχει ο επιβάτης.

Παρατηρώντας τα χρονικά σήματα, μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε την μείωση της ακουστικής πίεσης κυρίως στα μικρόφωνα B, C, D και ιδιαίτερα στο μικρόφωνο D το οποίο είναι και αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο μιας και βρίσκεται στη θέση του αυτιού του επιβάτη. Έτσι το πλάτος του ηχητικού κύματος μειώνεται από μια τιμή κοντά στα 0.2 Pa σε λιγότερο από 0.1 Pa. Η παρατήρηση αυτή δεν ισχύει για τις θέσεις A και D για λόγους που εξηγήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Μείωση της ακουστικής πίεσης φαίνεται να μην υπάρχει καθόλου στο μικρόφωνο A γεγονός που οφείλεται στη διάταξη του συστήματος μεγαφώνων-μικροφώνων που έχει επιλεγεί, ώστε να έχουμε μεγαλύτερη μείωση σε απόσταση 10 cm από το μεγάφωνο. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη περιορισμένη απόδοση του ANC συστήματος σε σημεία που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση από τα μεγάφωνα. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο μιας και ο FxLMS αλγόριθμος δεν μπορεί να δημιουργήσει μια σφαίρα ομοιόμορφης μείωσης της ακουστικής πίεσης.

Ένα ακόμα στοιχείο που πρέπει να σχολιαστεί είναι η αστάθεια που παρατηρήθηκε κάποιες φορές στο σύστημα των ηχείων καθώς και ένα μικρό «σφύριγμα» κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το φαινόμενο αυτό πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι επιδιώκουμε την μείωση της στάθμης του θορύβου αρκετά μακριά από το μεγάφωνο με αποτέλεσμα αυτό να μην έχει την ισχύ που απαιτείται. Πιθανές λύσεις στο πρόβλημα θα μπορούσαν να είναι η χρησιμοποίηση ισχυρότερων μεγαφώνων, καθώς και η μοντελοποίηση του ηχητικού μονοπατιού ανάμεσα στο μικρόφωνο σφάλματος και το αυτί του επιβάτη.

Συμπερασματικά, το λογισμικό που αναπτύχθηκε βασιζόμενο στο αλγόριθμο FxLMS καθώς και η διάταξη μεγαφώνων-μικροφώνων (σχήμα 3.2) που χρησιμοποιήθηκε κατάφεραν να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος ANC μιας και παρατηρείται ικανοποιητική μείωση της στάθμης του συνολικού θορύβου σε απόσταση 10 cm από το ηχείο και μάλιστα σε μια σφαίρα ακτίνας 5cm γύρω από αυτό. Βέβαια η σφαίρα αυτή δεν είναι ομοιόμορφη όσο αφορά στην μείωση της ακουστικής πίεσης και σε κάποια σημεία η μείωση αυτή δεν είναι ικανοποιητική, όσο αφορά κυρίως στην αρμονική των 100 Hz.

4.5 Μελλοντικοί στόχοι

Η εξέλιξη του υπάρχοντος συστήματος ενεργητικού ελέγχου θορύβου μπορεί να περιλαμβάνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης των ηχητικών μονοπατιών ανάμεσα στα μεγάφωνα antinoise και το σημείο όπου θέλουμε να εφαρμόσουμε τον έλεγχο του θορύβου. Η τεχνική αυτή αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως virtual microphones και θα επιτρέψει τον περιορισμό της εξάρτησης της απόδοσης του συστήματος από τη διάταξη των μεγαφώνων και των μικρόφωνων.

Επιπλέον μια πρόκληση είναι η δημιουργία μιας ομοιόμορφης σφαίρας γύρω από το αυτί του επιβάτη, ακτίνας μεγαλύτερης των 5 cm, στην οποία θα επιτυγχάνεται μείωση της στάθμης του θορύβου μεγαλύτερη των 10 dB. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί τόσο με την ένταξη στον FxLMS αλγόριθμο της μοντελοποίησης των ηχητικών μονοπατιών που αναφέρθηκαν παραπάνω (virtual microphones), όσο και με τον πειραματισμό πάνω σε διαφορετικές διατάξεις μεγαφώνων και μικροφώνων.

Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρησιμοποίηση αλγορίθμων που βασίζονται σε τεχνικές μηχανικής μάθησης (π.χ. νευρωνικά δίκτυα). Οι αλγόριθμοι αυτοί ενδεχομένως να μπορούν να εξελίξουν το σύστημα ώστε να επιτυγχάνεται μείωση όχι μόνο της στάθμης μιας συχνότητας αλλά και θορύβων που χαρακτηρίζονται από ένα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων (broadband noise).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για το σύστημα αναλύεται παρακάτω:

Σύστημα μεγαφώνων

FR 6.5” - 8 Ohm Speaker

Το μεγάφωνο FR 6.5” φαίνεται στο σχήμα 1. Έχει 17 εκατοστά διάμετρο και χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική απόκριση στις υψηλές συχνότητες. Είναι επίσης προσεκτικά σχεδιασμένο, ώστε να δημιουργεί χαμηλή παραμόρφωση στις χαμηλές συχνότητες, με μειωμένα βέβαια επίπεδα στην μέγιστη τιμή εξόδου. Η ευαισθησία του μεγαφώνου είναι περίπου 84 dB SPL στα 110 Hz με αναφορά μέτρησης ροζ θόρυβο (pink noise) 1 watt (σχήμα 2). Η δασπορά είναι προς όλες τις κατευθύνσεις για όλες τις συχνότητες κάτω από τα 200 Hz (σχήμα 3).

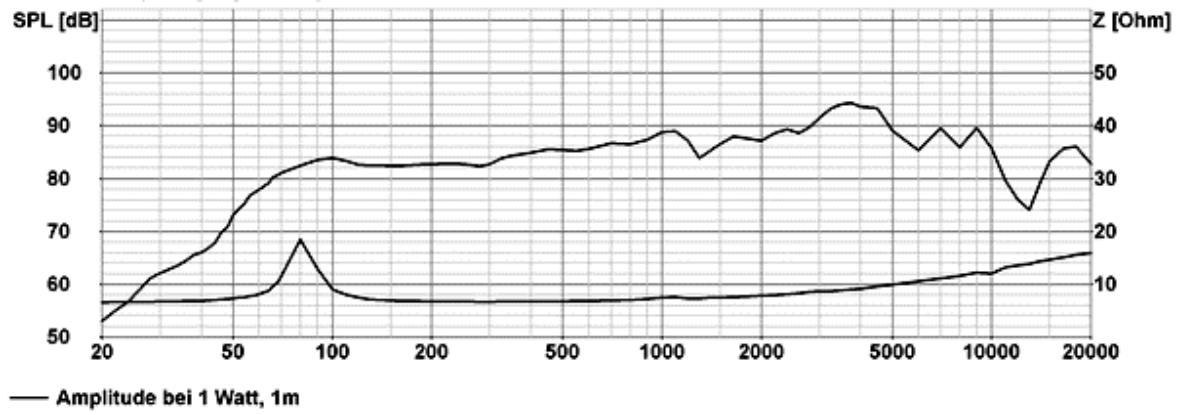


Σχήμα 1: Μεγάφωνο FR 6.5”

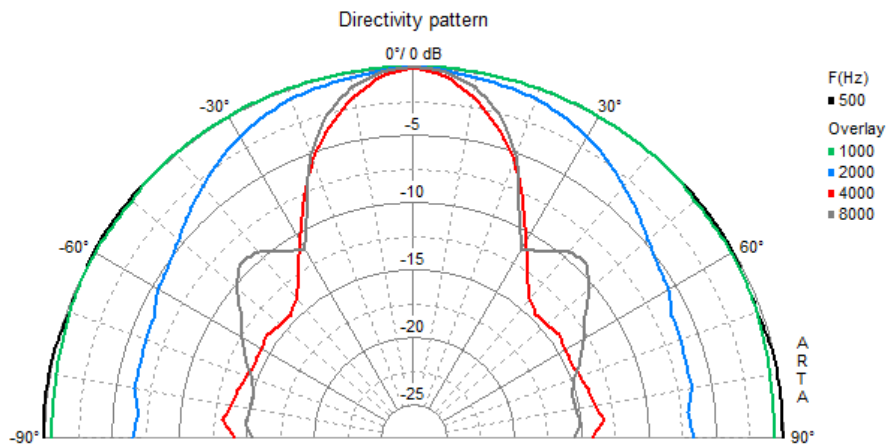
Οι προδιαγραφές των συγκεκριμένων μεγαφώνων είναι:

- Μέση ισχύς: 40 W
- Μέγιστη ισχύς: 60 W
- Σύνθετη αντίσταση: 8 Ohm
- Απόκριση συχνότητας: 70-20000 Hz
- Μέσο SPL: 87dB (1 W/1 m)

- Opening angle: 41°/4000Hz



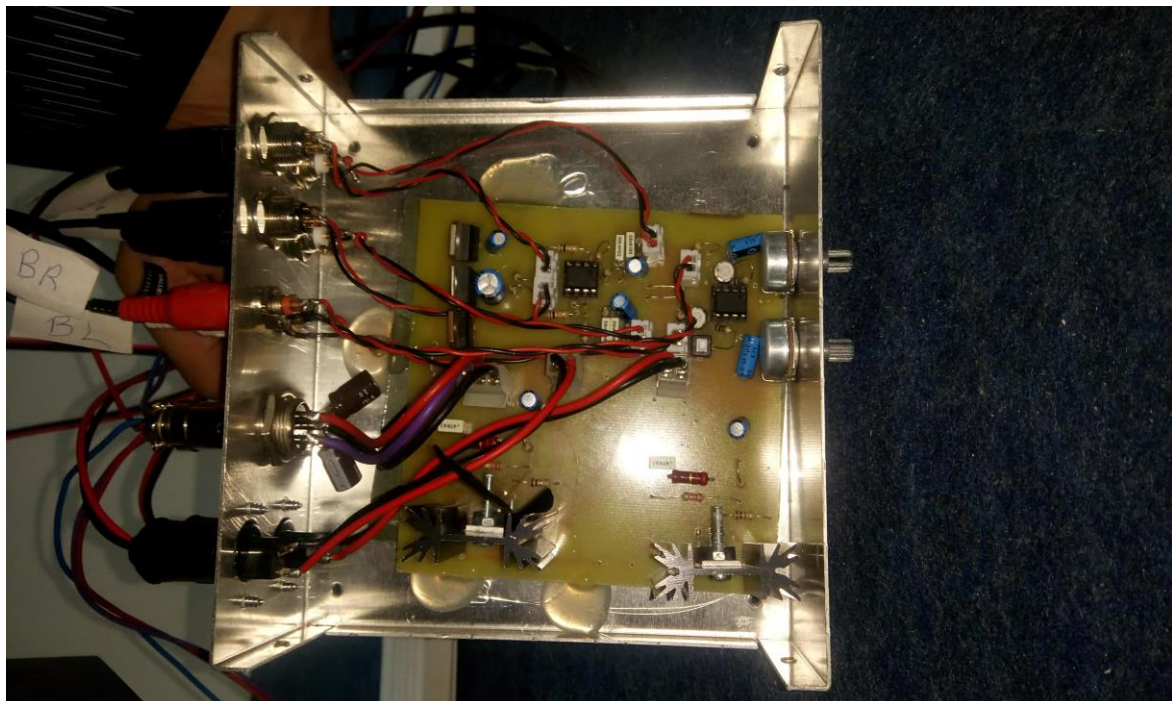
Σχήμα 2: Απόκριση συχνότητας



Σχήμα 3: Directivity pattern

Ενισχυτές-Προενισχυτές μικροφώνων

Οι ενισχυτές του σήματος των μεγαφώνων καθώς και οι προενισχυτές του σήματος των μικροφώνων βρίσκονται ενσωματωμένοι σε μια πλακέτα ανά δυο μικρόφωνα και δύο μεγάφωνα (σχήμα 4). Κατασκευάστηκε δηλαδή μια πλακέτα ανά μια θέση. Στη έξοδο κάθε ενισχυτή προστέθηκε ακόμα ένα βαθυπερατό φίλτρο με ρυθμιζόμενη συχνότητα αποκοπής από 30Hz ως 150Hz. Το φίλτρο βοηθά στον δραστικό περιορισμό του θορύβου από την έξοδο του μεγαφώνου και συμβάλλει στη συνολική ευστάθεια του συστήματος.



.Σχήμα 4: Χειροποίητος ενισχυτής μεγαφώνων και προενισχυτής σήματος μικροφώνων.

Μικρόφωνα

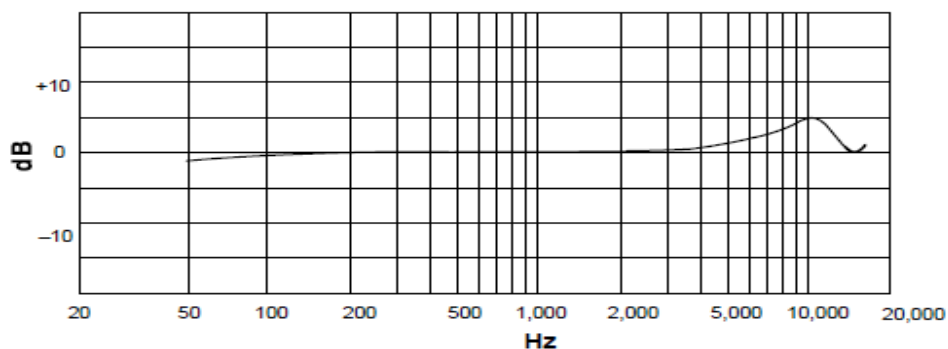
MX183 Shure microphone



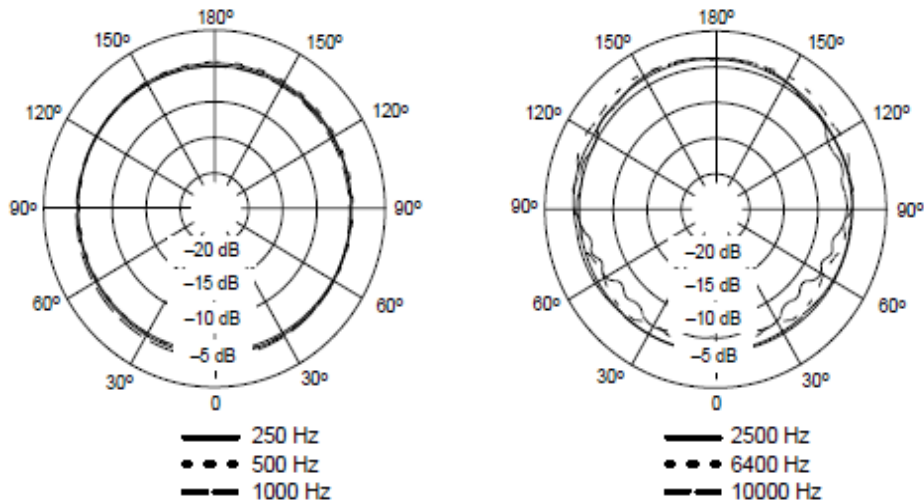
Σχήμα 5: Μικρόφωνο Shure MX 183

Οι προδιαγραφές του συγκεκριμένου μικροφώνου είναι:

- Απόκριση συχνότητας: 50 με 17000 Hz (σχήμα 6)
- Polar pattern: (σχήμα 7)
- Σύνθετη αντίσταση εξόδου: 150 Ω
- Ευαισθησία ανοιχτού κυκλώματος (στο 1kHz, αναφορά 1V/Pascal): -27.5 dB (42.2 mV)
- Αναλογία σήματος-θορύβου (με αναφορά στα 94 dB SPL): 73.5 dB
- Dynamic Range at 1kΩ load: 96.2 dB
- Απαιτήσεις τροφοδοσίας: 11 to 52 Vdc phantom, 2.0 mA
- Max SPL (1kHz at 1%THD, 1 kΩ load): 116.7 dB



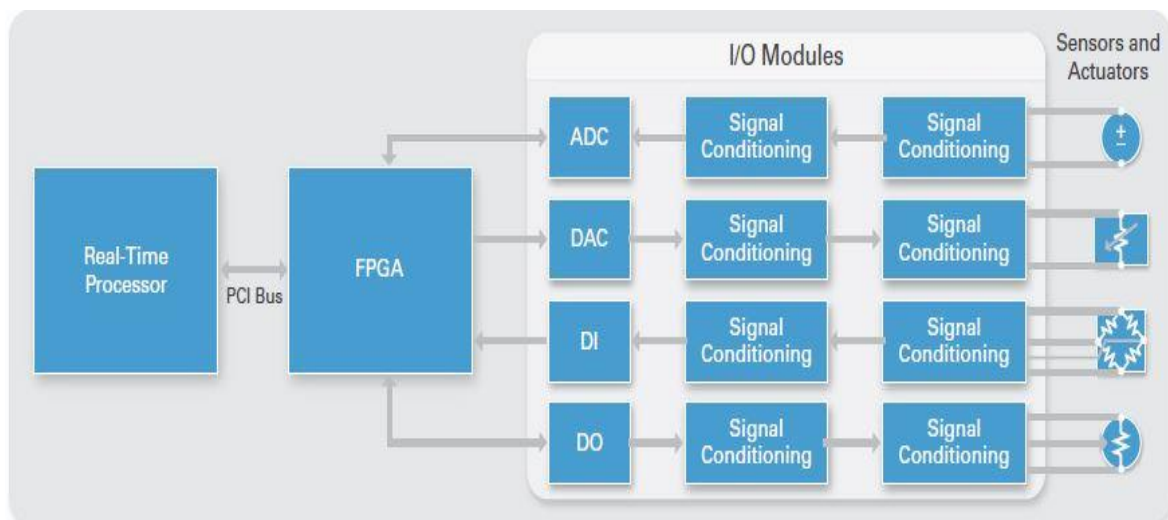
Σχήμα 6: Απόκριση συχνότητας



Σχήμα 7: Polar pattern

Σύστημα cRIO-9030

Η αρχιτεκτονική του cRIO περιλαμβάνει τρία κομμάτια: έναν μικροεπεξεργαστή στον οποίο «τρέχει» ένα λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου (real time operating system- RTOS), ένα FPGA το οποίο μπορεί να αναδιατάξει το κύκλωμά του ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής και τα στοιχεία όπου συνδέονται οι είσοδοι και οι έξοδοι (input-output modules).



Σχήμα 8: Μπλόκ διάγραμμα αρχιτεκτονικής cRIO

Ελεγκτής πραγματικού χρόνου (Real-Time controller)

Ο ελεγκτής πραγματικού χρόνου αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή, στον οποίο τρέχουν οι real time εφαρμογές του LabVIEW. Έτσι είναι κατάλληλος για την απεικόνιση των δεδομένων καθώς και για άλλες λειτουργίες όπως η επικοινωνία με περιφερειακές συσκευές. Το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιείται στον cRIO 9030 έχει σαν βάση το Linux.



Σχήμα 9: NI cRIO-9024 real time controller

FPGA

Το FPGA είναι το κέντρο της αρχιτεκτονικής του συστήματος του cRIO. Επειδή είναι συνδεδεμένο άμεσα, χωρίς κάποιο διάυλο με τις εισόδους και τις εξόδους μπορεί να επεξεργάζεται δεδομένα με πολύ μεγάλες ταχύτητες. Επιπλέον έχει τη δυνατότητα αναδιάταξης των κυκλωμάτων του, εφόσον προγραμματιστεί κατάλληλα μέσω του LabVIEW.



Σχήμα 10: Το FPGA στο σύστημα του cRIO

Συσκευές εισόδου- εξόδου (I/O modules)

Οι συσκευές εισόδου-εξόδου είναι τα σημεία όπου συνδέονται οι αισθητήρες και οι επενεργητές που απαιτούνται για κάθε εφαρμογή. Για το σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου χρησιμοποιήθηκαν modules με βύσματα τύπου BNC.



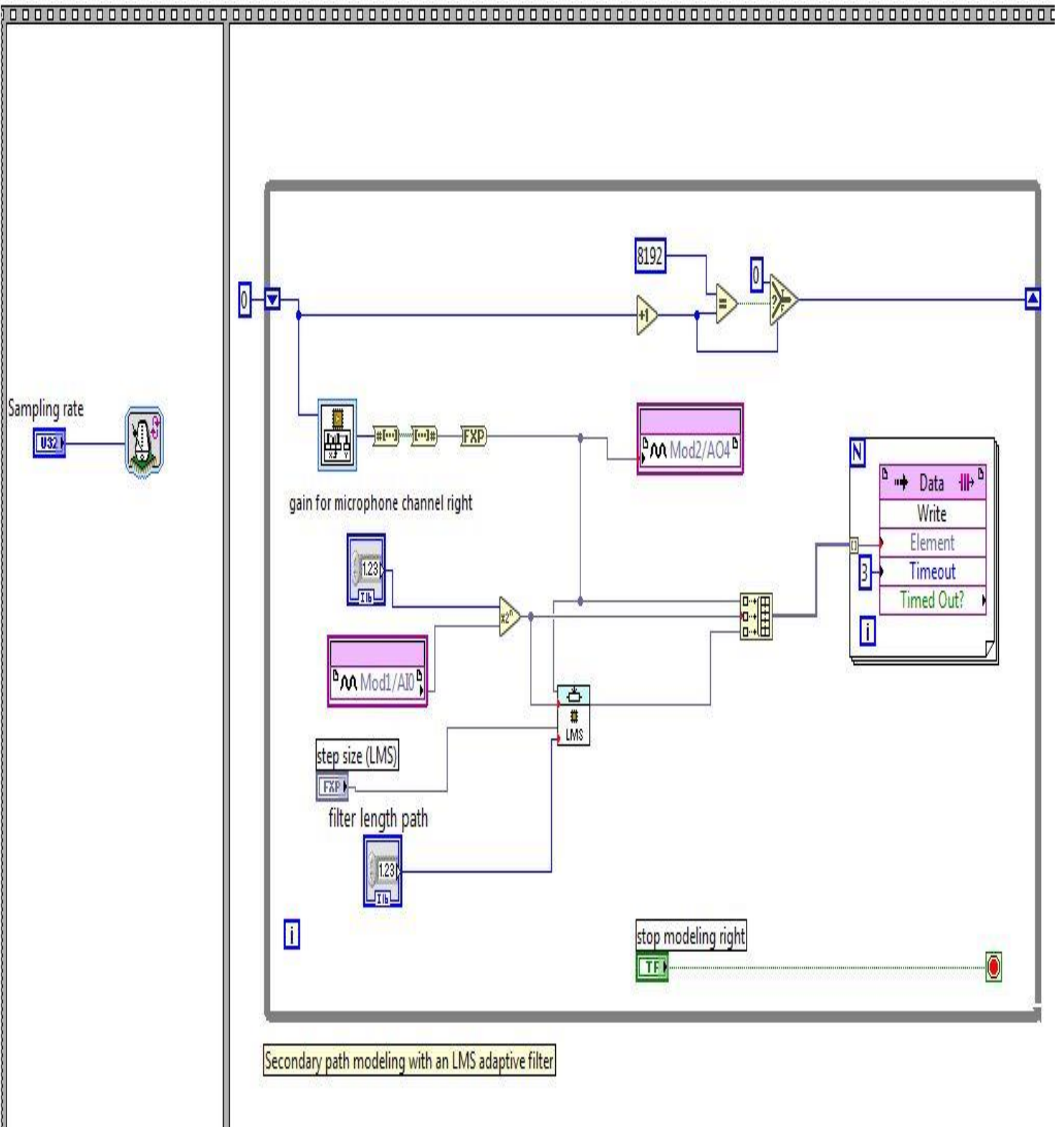
Σχήμα 11: Διάφορες συσκευές εισόδου-εξόδου για το σύστημα του cRIO

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

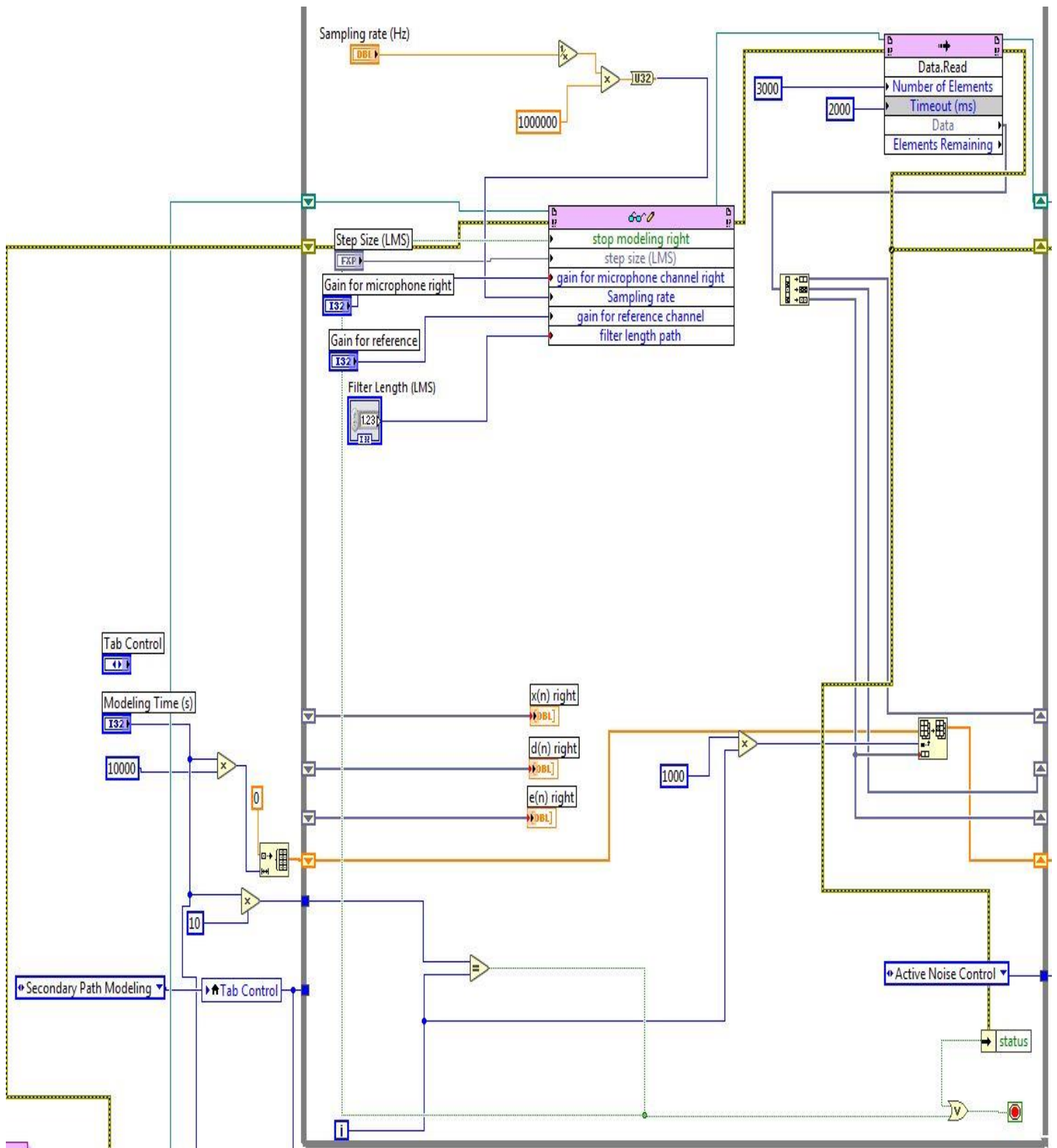
Παρακάτω παρατίθενται μερικά ενδεικτικά κομμάτια του κώδικα που αναπτύχθηκε στο LabVIEW και αφορά τόσο στη μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού, όσο και στον υπολογισμό των συντελεστών του φίλτρου που η έξοδος του αποτελεί το antinoise σήμα.

Μοντελοποίηση δευτερογενούς μονοπατιού (secondary path)

Η μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού, όπως έχει ήδη αναφερθεί γίνεται offline και προηγείται της λειτουργίας του συστήματος ANC. Οι συντελεστές των φίλτρων που μοντελοποιούν τα δευτερογενή μονοπάτια τροφοδοτούνται στο πρόγραμμα που υλοποιεί τον υπολογισμό του antinoise σήματος μέσω μιας TCP επικοινωνίας ανάμεσα στο real-time επεξεργαστή και τον host υπολογιστή. Πιο αναλυτικά, αρχικά οι συντελεστές των δευτερογενών μονοπατιών αποθηκεύονται στον σκληρό δίσκο του host υπολογιστή μέσω μιας TCP επικοινωνίας. Έπειτα το πρόγραμμα το οποίο υπολογίζει το σήμα ελέγχου των μεγαφώνων και το οποίο τρέχει στον real time επεξεργαστή του cRIO, ανακτά τους προαναφερθέντες συντελεστές μέσω μιας δεύτερης TCP επικοινωνίας ανάμεσα σε αυτόν και τον host υπολογιστή. Οι κώδικες στο LabVIEW φαίνονται παρακάτω:



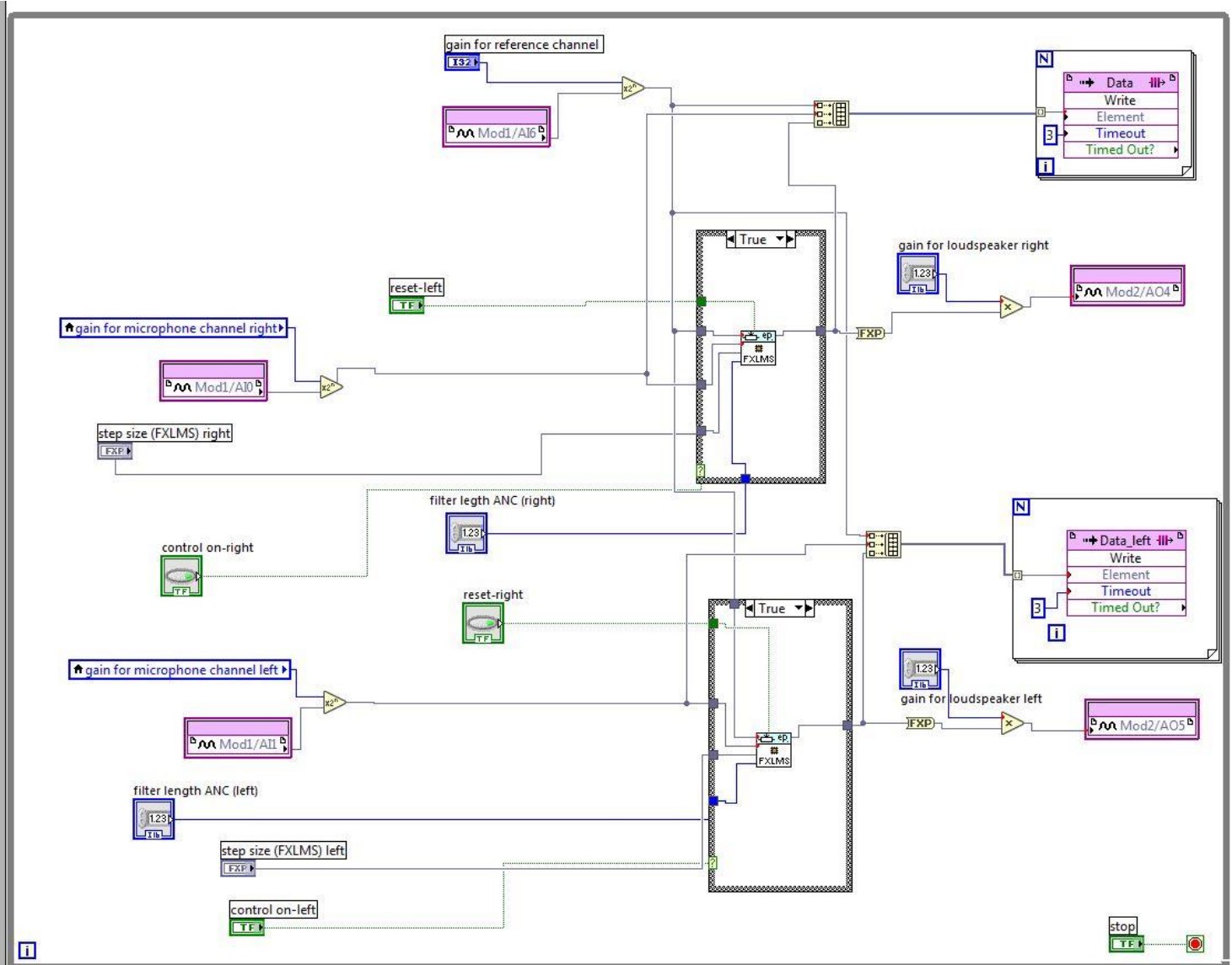
Σχήμα 12: Το πρόγραμμα του FPGA για τη διαδικασία του modelling.



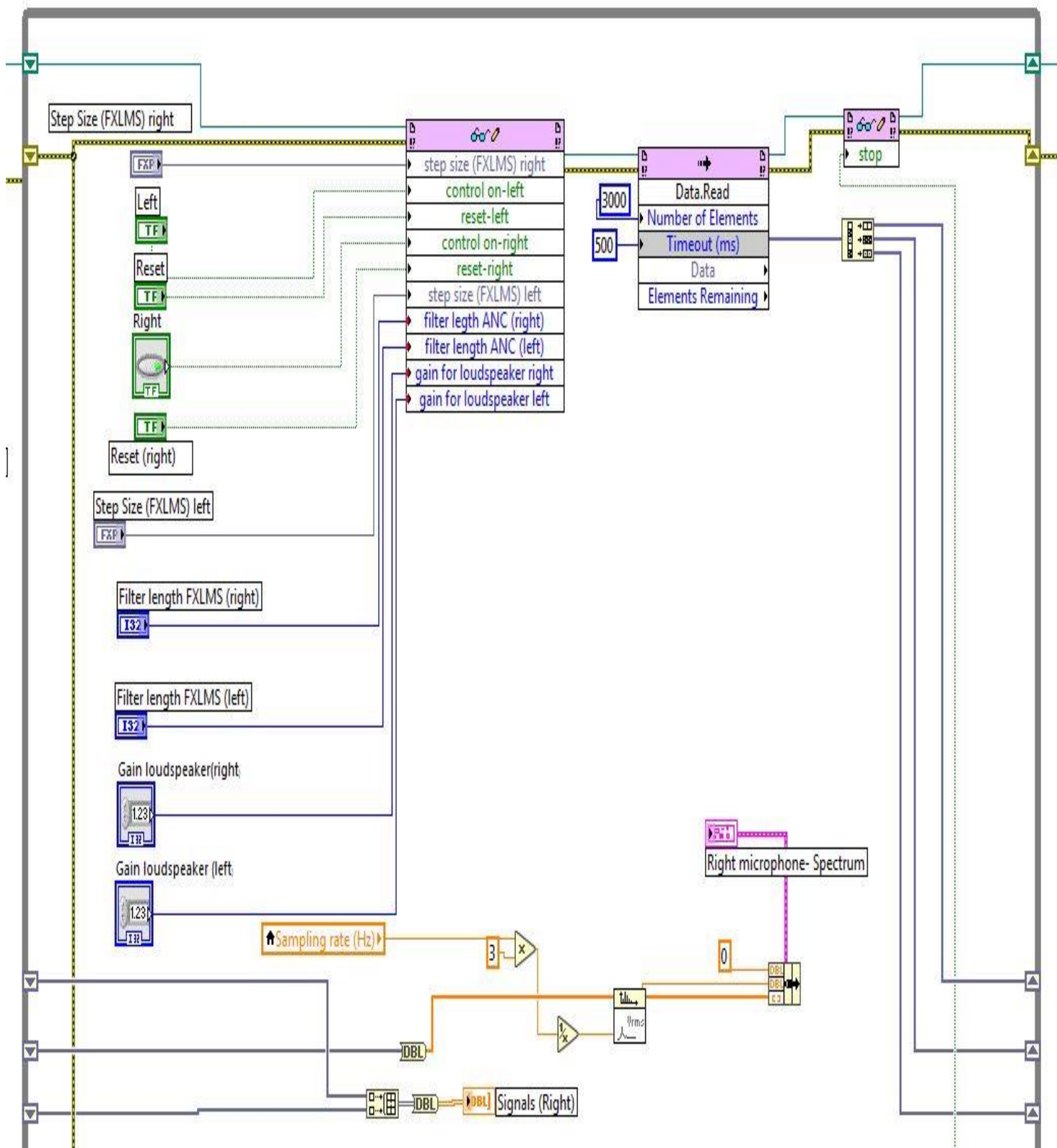
Σχήμα 13: Real time εφαρμογή για την μοντελοποίηση των δευτερογενών μονοπατιών

Υπολογισμός σήματος antinoise

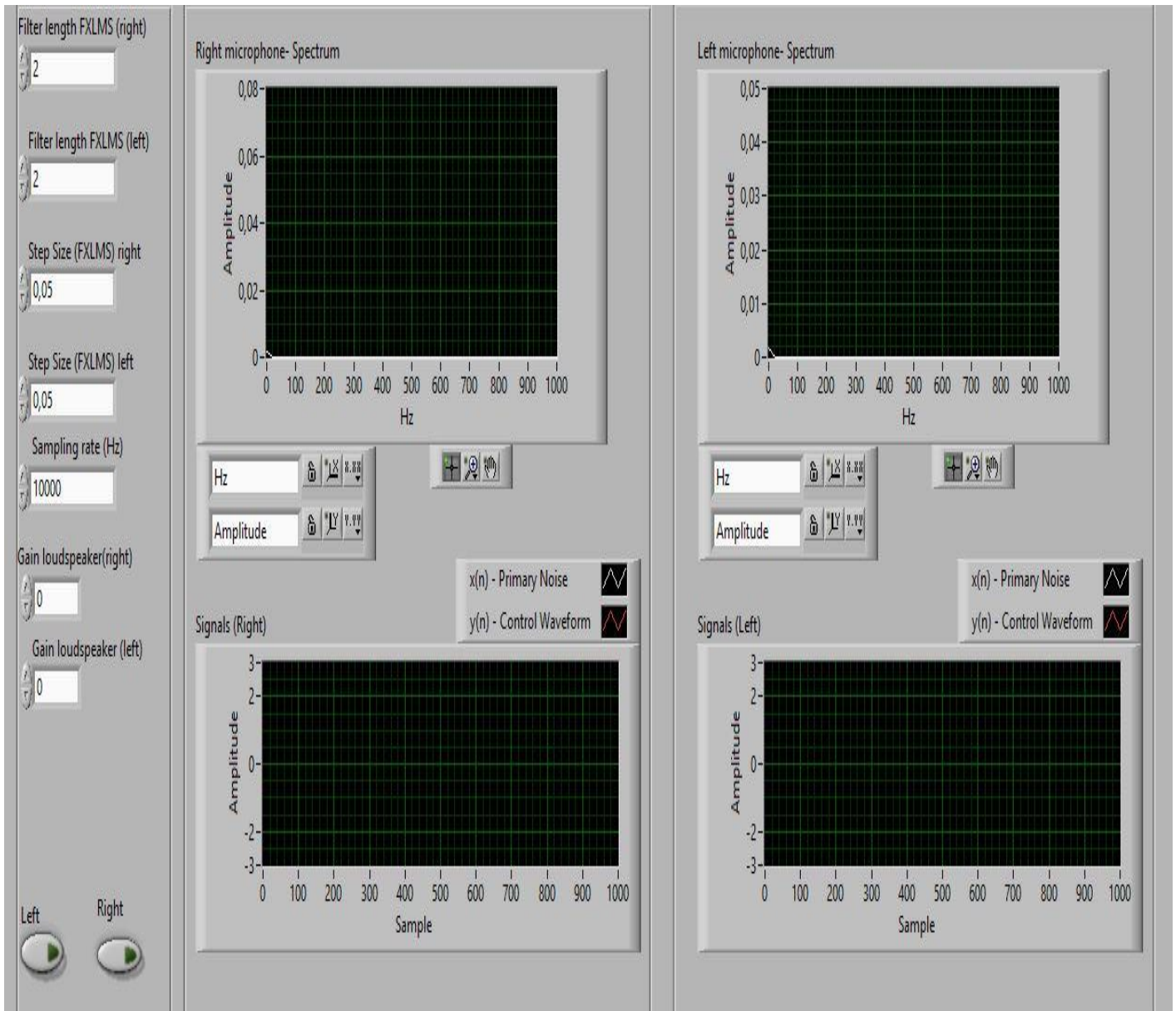
Ο υπολογισμός του σήματος που οδηγεί τα antinoise μεγάφωνα γίνεται για κάθε μεγάφωνο ξεχωριστά στο FPGA. Οι επιμέρους παράμετροι (συχνότητα δειγματοληψίας, συντελεστές κέρδους, step size, μήκος φίλτρου) καθορίζονται στην real time εφαρμογή, και μέσω αυτής ανακτώνται από το FPGA. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο κώδικας για μία θέση, στην οποία αντιστοιχούν δυο μεγάφωνα και δυο μικρόφωνα.



Σχήμα 14: Υπολογισμός σήματος ελέγχου των antinoise μεγαφώνων



Σχήμα 15: Πέρασμα παραμέτρων από την real time εφαρμογή στο FPGA



Σχήμα 16: GUI (graphical user interface) της εφαρμογής

Βιβλιογραφία

- [1] Ardekani, I. T. (2012). *Stability Analysis of Adaptation Process in FxLMS-Based Active Noise Control*. Auckland.
- [2] B.Widrow, Glover, J., McCool, J., Kaunitz, J., C.Williams, Hearn, R., . . . Goodlin, R. (1975). Adaptive noise cancelling: principles and applications. *Proceedings of the IEEE*, 63, 1692–1716.
- [3] Dumitrescu, C. I., Moise, I., Soare, B., & Dumitru, N. (2013). Adaptive Noise Cancellation using LabVIEW. *2013 IEEE 19th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging*. Galați, Romania: IEEE.
- [4] Fogel, L., & Heights, J. (1958). *Method of improving intelligence under random noise interference*.
- [5] Guldenschuh, M. (2013). Secondary-Path Models in Adaptive-Noise-Control Headphones. *3rd International Conference on Systems and Control*. Algiers, Algeria : IEEE.
- [6] Haykin, S. O. (2013). *Adaptive Filter Theory*. Pearson.
- [7] Haykin, S., & Widrow, B. (n.d.). *Least Mean Square Adaptive Filters*. Wiley.
- [8] National Instruments (n.d.). *NI cRIO-9030 user manual*.
- [9] Johansson, S., & Claesson, I. (2001). *Active Noise Control in Propeller Aircraft*. Ronneby, Sweden: Department of Telecommunications and Signal Processing.
- [10] Kletschkowski, T., & Sachau, D. (n.d.). *Active Noise Control In Aircraft Cabins*.

- [11] Kuo, S. M., & Morgan, D. R. (1999, June). Active Noise Control: A Tutorial Review. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 87.
- [12] Kuo, S. M., Panahi, I., Chung, K. M., Horner, T., Nadeski, M., & Chyan, J. (1996). *Design of Active Noise Control Systems With The TMS320 Family*. National Instruments.
- [13] Oinonen, M. (2006). *Development of Active Noise Control and Voice Communication Systems for Personal Hearing Protectors*. Tampere: Tampere University of Technology.
- [14] Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Discrete-Time Signal Processing*. Pearson.
- [15] Pabst, O., Kletschkowski, T., & Sachau, D. (n.d.). Active Noise Control in Light Jet Aircraft.
- [16] Ryu, S., & Lee, Y.-S. (2016). Characteristics of Relocated Quiet Zones Using Virtual Microphone Algorithm in an Active Headrest System. *Journal of Sensors*.
- [17] Sachau, D. (2012). Feedback Active Noise Control in a Crew Rest Compartment Mock-Up. *Tech Science Press*, 23-35.
- [18] Szopos, E., & Hedesiu, H. (2009). LABVIEW FPGA BASED NOISE CANCELLING USING THE LMS. *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Electronics and Telecommunications*, 50.
- [19] Szopos, E., Saracut, I., & Hedesiu, H. (2016). EFFICIENT FPGA IMPLEMENTATION OF AN ADAPTIVE FILTER FOR. 57. Cluj-Napoca: ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Electronics and Telecommunications.

[19] Αργυρόπουλος Α. (2013). *Προσαρμοστική Ακύρωση Θορύβου*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.