



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Σχεδίαση Συστήματος Ψηφιακής Επεξεργασίας για την Βελτίωσης Σήματος Ομιλίας

Φοιτητής: Κατσιφής Παναγιώτης Νεκτάριος
ΑΜ: 19387095

Επιβλέπων Καθηγητής

Οδυσσεύς Τσακιρίδης
Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Design of a Digital Processing System for Speech Signal Enhancement

Student: Katsifis Panagiotis Nektarios
Registration Number: 19387095

Supervisor

Odyssefs Tsakiridis
Assistant Professor

ATHENS-EGALEO, JULY 2024

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Τσακίριδης Οδυσσεύς Επίκουρος Καθηγητής	Φωτόπουλος Παναγιώτης Αναπληρωτής Καθηγητής	Γαλατά Σωτηρία Επίκουρη Καθηγήτρια

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Κατσιφής Παναγιώτης Νεκτάριος, Ιούλιος, 2024

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΚΑΤΣΙΦΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ του ΣΩΚΡΑΤΗ, με αριθμό μητρώου 19387095 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι επ' αόριστον και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών

Κατσιφής Παναγιώτης Νεκτάριος

Περίληψη

Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια οι απαιτήσεις των ανθρώπων για υψηλή ποιότητα ήχου έχουν αυξηθεί. Ολοένα και περισσότεροι καταναλωτές προσπαθούν διαρκώς να βρουν τρόπους αύξησης ποιότητας και της πιστότητας των συστημάτων αναπαραγωγής φωνής. Ωστόσο, ο θόρυβος που εισάγεται στα συστήματα αυτά, όπως επίσης και η πολυπλοκότητα του συγκεκριμένου θέματος θέτουν σημαντικές προκλήσεις. Για την αντιμετώπιση του θορύβου, η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνει ένα κύκλωμα ενός συστήματος ψηφιακής επεξεργασίας για την βελτίωση σημάτων ομιλίας. Η εργασία αυτή αποτελείται από μια εκτενή μελέτη των ηχητικών κυμάτων και της αλληλεπίδρασής τους στον χώρο και από μια λεπτομερή ανάλυση ορισμένων παθητικών και ενεργών τρόπων ηχομείωσης. Έπειτα, πραγματοποιείται μια εξέταση των αναπτυξιακών εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό του κυκλώματος δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στο πρόγραμμα γραφικού προγραμματισμού SigmaStudio και στον DSP επεξεργαστή που επιλέχθηκε. Έπειτα, αναλύεται η φυσική συνδεσμολογία του συστήματος και στην συνέχεια μελετάται ο προγραμματισμός του κυκλώματος με την βοήθεια του προγράμματος SigmaStudio. Τέλος, διεξάγονται συνολικά δύο πειράματα κατά τα οποία επιβεβαιώνεται και αξιολογείται η ορθή λειτουργία του συστήματος.

Λέξεις – κλειδιά

Θόρυβος, Ηχομείωση, Αλγόριθμοι Μείωσης Θορύβου, SigmaStudio, ADAU1701

Abstract

It's widely known that the last decades people's demands for high sound quality have increased. More and more consumers are constantly trying to find ways to increase the quality and fidelity of voice reproduction systems. However, the noise introduced into these systems, as well as the complexity of the specific subject, pose significant challenges. To deal with noise, this thesis proposes a circuit of a digital processing system for the improvement of speech signals. This work consists of an extensive study of sound waves and their interaction in space and a detailed analysis of some passive and active sound reduction methods. Next, an examination of the development tools used to design the circuit is performed, paying particular attention to the SigmaStudio graphical programming program and the DSP processor chosen. Then, the physical wiring of the system is analyzed and afterwards the programming of the circuit is studied with the help of the SigmaStudio program. Finally, a total of two experiments are conducted in which the correct operation of the system is confirmed and evaluated.

Keywords

Noise, Noise Reduction, Noise Reduction Algorithms, SigmaStudio, ADAU1701

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	9
Κατάλογος Εικόνων	9
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	15
Σκοπός και στόχοι	15
Μεθοδολογία.....	15
Καινοτομία.....	16
Δομή	16
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: Ήχος.....	17
1.1 Ο Ορισμός του Ήχου	17
1.1.1 Υπέρηχοι και Υπόηχοι.....	17
1.1.2 Ακουστοί Ήχοι.....	19
1.2 Ψυχοακουστική	20
1.2.1 Υποκειμενική Αντίληψη του Ήχου	21
1.2.2 Υποκειμενικά Χαρακτηριστικά του Ήχου.....	22
1.2.3 Αμφιωτική Ακοή.....	25
1.3 Η κυματική φύση του ήχου.....	26
1.3.1 Μέτρηση του Ήχου.....	27
1.3.2 Ζώνες Συχνοτήτων.....	28
1.4 Θόρυβος	28
1.4.1 Λευκός Θόρυβος.....	28
1.4.2 Ροζ Θόρυβος.....	29
1.4.3 Brownian Θόρυβος.....	29
1.4.4 Άλλοι Τύποι Θορύβου	30
1.5 Ακουστική Ανοιχτών Χώρων.....	30
1.5.1 Ανάκλαση	30
1.5.2 Περίθλαση.....	34
1.5.3 Διάθλαση	35
1.5.4 Σκέδαση	36
1.5.5 Φαινόμενο Doppler.....	37
1.6 Ηχορύπανση & Νομοθεσίες.....	38
1.6.1 Επιπτώσεις Θορύβου στον Άνθρωπο	39
1.6.2 Νομοθεσίες	41
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Παθητικοί και Ενεργοί Τρόποι Ηχομείωσης	44
2.1 Παθητικοί Τρόποι Ηχομείωσης.....	44
2.1.1 Αλλοίωση του Ήχου λόγω Φυσικών Φαινομένων	44
2.1.2 Ακουστική Ηχομείωση	47
2.1.3 Ηχομείωση από Φράγματα	52
2.2 Ενεργοί Τρόποι Ηχομείωσης.....	54
2.2.1 Ενεργός Έλεγχος Θορύβου.....	54
2.2.2 Τεχνικές Ενεργού Ελέγχου Θορύβου	55
2.2.3 Μείωση Θορύβου	64
3 Κεφάλαιο 3ο: Εκτέλεση και Αξιολόγηση Ορθής Λειτουργίας Συστήματος.....	72
3.1 Αναπτυξιακά Εργαλεία.....	72
3.1.1 SigmaStudio.....	72
3.1.2 ADAU1701.....	74
3.2 Σχεδίαση και Προγραμματισμός Κυκλώματος.....	76
3.2.1 Συνδεσμολογία Κυκλώματος.....	76
3.2.2 Προγραμματισμός Κυκλώματος.....	77
3.3 Διεξαγωγή Πειραμάτων και Αποτελέσματα.....	81

3.3.1	Πείραμα Πρώτο	83
3.3.2	Πείραμα Δεύτερο	87
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93
	Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	94
	Παράρτημα Α.....	107
	Παράρτημα Β.....	109

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Ενδεικτικές τιμές μηκών κύματος υπερήχων και υπόηχων (Τιμές ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς 340m/s για τον αέρα και 1500m/s για το νερό) [3]	18
Πίνακας 1.2 Επιπτώσεις θορύβου χαμηλής συχνότητας [8]	18
Πίνακας 1.3 Επιπτώσεις θορύβου χαμηλής συχνότητας [8]	18
Πίνακας 2.1 Συντελεστής απορρόφησης M κατά τον Sutherland [50] [121]	46
Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων σήματος εξόδου και υπολογισμός πλάτους μείωσης θορύβου για -40dB πλάτος σήματος και -60dB πλάτος θορύβου	83
Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων σήματος εξόδου και υπολογισμός πλάτους μείωσης θορύβου για -50dB πλάτος σήματος και -60dB πλάτος θορύβου	85
Πίνακας 0.1 Παραδείγματα θορύβων και τιμών dBA [199]	107
Πίνακας 0.2 Πίνακας σύγκρισης αλγορίθμων ANC [156].....	108
Πίνακας 0.1 Ποσοστό πληθυσμού που εκτίθεται σε $L_{den} \geq 55dB$ εξαιτίας θορύβων αυτοκινητοδρόμων (δρόμων), σιδηροδρόμων, αεροπλάνων (αέρος) και εργοστασίων των περιοχών που καλύπτονται από το END (Environmental Noise Directive) [107] [106].....	109

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Ανατομία ανθρώπινου αυτιού [11]	19
Εικόνα 1.2 Ανατομία του κοχλίου [13].....	20
Εικόνα 1.3 Εύρος ακουστικών συχνοτήτων ορισμένων μουσικών οργάνων και διαφόρων ήχων [17].....	21
Εικόνα 1.4 Περιγράμματα ίσης έντασης [18]	22
Εικόνα 1.5 Καμπύλη συσχέτισης ύψους και συχνότητας [22].....	23
Εικόνα 1.6 Καμπύλες ίσης στάθμης ακουστότητας για τόνους κατά ISO R 226-1987 [25]	24
Εικόνα 1.7 (A) Κυματομορφές πλάτους (πάνω) και φασματογράμμο (κάτω) για μια γυναικεία φωνή που ομιλεί το φωνήεν "A" (B) ένα τεχνητό "A" (C) Ήχοι ενός αρσενικού κουναβιού (D-F) Κυματομορφές πλάτους και φασματογράμμο για (D) πιάνο, (E) ακορντεόν, (F) Ομπόε που παίζουν την ίδια νότα [28]...	25
Εικόνα 1.8 Ο εντοπισμός της κατεύθυνσης της πηγής ήχου εξαρτάται από τις διαφορές έντασης και φάσης των ηχητικών κυμάτων που προσπίπτουν στα δύο αυτιά του ακροατή [33]	26
Εικόνα 1.9 Παράδειγμα κύματος αρχικά χαμηλής συχνότητας και χαμηλού πλάτους και έπειτα υψηλής συχνότητας και υψηλού πλάτους [39].....	27
Εικόνα 1.10 Χαρακτηριστικές φίλτρων λευκού θορύβου, ροζ θορύβου και αναλυτή τυχαίου θορύβου του οποίου το εύρος ζώνης διέλευσης ισούται με ένα ποσοστό της συχνότητας στην οποία είναι συντονισμένος [19].....	29
Εικόνα 1.11 Ανάκλαση ήχου από σημειακή ηχητική πηγή από μια επίπεδη επιφάνεια [10]	31

Εικόνα 1.12 Ανάκλαση του ήχου από επίπεδη επιφάνεια στην οποία αναγράφονται η γωνία πρόσπτωσης και η κατεύθυνση του ανακλώμενου κύματος [4].....	32
Εικόνα 1.13 Ανάκλαση επίπεδων ηχητικών κυμάτων από κυρτή ανομοιόμορφη επιφάνεια [19].....	32
Εικόνα 1.14 Αναπαράσταση συμβόλων εξίσωσης ηχητικής πίεσης που διατύπωσε ο Kirchhoff [61]	33
Εικόνα 1.15 Ανάκλαση επίπεδων ηχητικών κυμάτων που προσπίπτουν σε μια κοίλη ανομοιόμορφη επιφάνεια [19]	33
Εικόνα 1.16 Γεωμετρικό σχήμα στο οποίο διακρίνεται μια κοίλη επιφάνεια με την θέση της ηχητικής πηγής S και την θέση του σημείου συγκέντρωσης των ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων M [64].....	34
Εικόνα 1.17 Παράδειγμα περίθλασης του ήχου εξαιτίας εμποδίου (diffracting object) ανάμεσα από την ηχητική πηγή (source) και τον ακροατή (listener) [66].....	34
Εικόνα 1.18 Περίθλαση ηχητικών κυμάτων εξαιτίας εμποδίου [70].....	35
Εικόνα 1.19 Σκέδαση ηχητικού κύματος από τραχεία επιφάνεια [78]	37
Εικόνα 1.20 Υγρή (αριστερά) και κατεστραμμένα μερικώς (δεξιά) τριχοειδή κύτταρα κοχλία [50].....	40
Εικόνα 1.21 Εκτιμώμενο ποσοστό πληθυσμού των χωρών της Ε.Ε. που εκτίθεται σε $L_{den} \geq 55dB$ εξαιτίας κυκλοφοριακού θορύβου σε κύριους αυτοκινητοδρόμους εκτός αστικών ιστών το 2017 [106] [107]	41
Εικόνα 1.22 Ποσοστά πληθυσμού που εκτίθενται σε ζώνες θορύβου L_{den} και L_{night} (dB) ανά πολεοδομικά συγκροτήματα και συνολικά [111]	42
Εικόνα 2.1 Πείραμα των Henry και Tyndall το 1873 για την μελέτη διάδοσης του ήχου σε μεγάλες αποστάσεις σε συνθήκες βροχής, χιονόπτωσης και ομίχλης [116].....	45
Εικόνα 2.2 Διάθλαση μετώπων ήχου ως αποτέλεσμα θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην ατμόσφαιρα [119].....	46
Εικόνα 2.3 Γράφημα συνάρτησης δείκτη ηχομείωσης με χαρακτηριστικά του τοίχου και της περιοχής ακτινοβολίας [122].....	48
Εικόνα 2.4 Τυπικό φάσμα 1/3 οκτάβας κυκλοφοριακού θορύβου σε σχέση με το επίπεδο ηχητικής πίεσης (SPL) 0dB [122].....	48
Εικόνα 2.5 Γράφημα συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για διάφορα είδη απορροφητικών υλικών [126]	49
Εικόνα 2.6 Συντονιστής Helmholtz [129].....	51
Εικόνα 2.7 Γράφημα αναπαράστασης απωλειών μετάδοσης και συχνότητας [130]	51
Εικόνα 2.8 Διαδρομή των ηχητικών κυμάτων παρουσία ηχοπετάσματος [131]	53
Εικόνα 2.9 Εγκατάσταση διάφανων ηχοπετασμάτων σε αυτοκινητόδρομο στην Αττική, Ελλάδα [132]	53
Εικόνα 2.10 Μονοκάναλο σύστημα ενεργού ελέγχου θορύβου [140].....	55
Εικόνα 2.11 Πολυκάναλο σύστημα ενεργού ελέγχου θορύβου [145]	55
Εικόνα 2.12 Σύστημα ANC με χρήση φίλτρου προσαρμογής [146]	56

Εικόνα 2.13 Απλοποιημένο διάγραμμα ροής ενός συστήματος ANC με χρήση φίλτρου προσαρμογής [146]	57
Εικόνα 2.14 Μπλοκ διάγραμμα ενός ANC συστήματος χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FxLMS [154].....	58
Εικόνα 2.15 Μπλοκ διάγραμμα ANC προσαρμοστικής ανάδρασης [159].....	60
Εικόνα 2.16 Φάσμα ισχύος κατά το οποίο διακρίνεται η επίδραση της μεταβολής του a σε καθορισμένο εύρος [163].....	61
Εικόνα 2.17 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος ANC με βάση τον αλγόριθμο FxRLS [163]	62
Εικόνα 2.18 Μπλοκ διάγραμμα υβριδικού συστήματος ANC [158]	63
Εικόνα 2.19 Μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού μονοκάναλου συστήματος μείωσης θορύβου [174].....	65
Εικόνα 2.20 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος μείωσης θορύβου που πρότεινε ο Schroeder [174].....	66
Εικόνα 2.21 Μπλοκ διάγραμμα φίλτρου Wiener [182]	67
Εικόνα 2.22 Γράφημα απεικόνισης της διακύμανσης της απόκρισης συχνότητας φίλτρου Wiener με το φάσμα σήματος για πρόσθετο λευκό θόρυβο [181].....	69
Εικόνα 2.23 Γενική μορφή αλγορίθμου αφαίρεσης φάσματος [188]	71
Εικόνα 3.1 Περιβάλλον SigmaStudio κατά την έναρξη του προγράμματος.....	73
Εικόνα 3.2 Περιβάλλον σχεδίασης κυκλώματος του SigmaStudio	74
Εικόνα 3.3 Μπλοκ διάγραμμα του επεξεργαστή ADAU1701 [198]	75
Εικόνα 3.4 Κύκλωμα εισόδου ADC [198].....	76
Εικόνα 3.5 Συνδεσμολογία Κυκλώματος.....	77
Εικόνα 3.6 Διάταξη σύνδεσης ηλεκτρονικών συσκευών με το SigmaStudio.....	77
Εικόνα 3.7 Διάταξη κυκλώματος τμήματος εισόδου	78
Εικόνα 3.8 Απαραίτητες μπλοκ διατάξεις για την σχεδίαση του δεύτερου τμήματος επεξεργασίας σήματος εισόδου	79
Εικόνα 3.9 Υψηλεπατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 120Hz	79
Εικόνα 3.10 Διάταξη βασικού κυκλώματος επεξεργασίας σήματος εισόδου.....	80
Εικόνα 3.11 Κύκλωμα εξόδου του συστήματος μείωσης θορύβου	81
Εικόνα 3.12 Θόρυβος που εισάγουν τα αναπτυξιακά εργαλεία όπως φαίνεται στον αναλυτή φάσματος (αριστερά) και στον παλμογράφο (δεξιά)	82
Εικόνα 3.13 Απεικόνιση ημιτονικού σήματος 1kHz.....	82
Εικόνα 3.14 Απεικόνιση θορύβου πλάτους -10dB (αριστερά) και -30dB (δεξιά) όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος	83
Εικόνα 3.15 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 150Hz.....	84

Εικόνα 3.16 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 300Hz.....	84
Εικόνα 3.17 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 600Hz.....	84
Εικόνα 3.18 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 1200Hz.....	85
Εικόνα 3.19 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 5000Hz.....	85
Εικόνα 3.20 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος θορύβου για συχνότητα 600Hz.....	86
Εικόνα 3.21 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 1200Hz.....	86
Εικόνα 3.22 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 2500Hz.....	86
Εικόνα 3.23 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 5000Hz.....	87
Εικόνα 3.24 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 150Hz.....	87
Εικόνα 3.25 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 300Hz.....	88
Εικόνα 3.26 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 600Hz.....	88
Εικόνα 3.27 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 1200Hz.....	88
Εικόνα 3.28 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 2500Hz.....	89
Εικόνα 3.29 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 5000Hz.....	89
Εικόνα 3.30 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 150Hz.....	90
Εικόνα 3.31 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 300Hz.....	90

Εικόνα 3.32 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 600Hz.....	90
Εικόνα 3.33 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 1200Hz.....	91
Εικόνα 3.34 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 2500Hz.....	91
Εικόνα 3.35 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 5000Hz.....	91
Εικόνα 0.1 Παραδείγματα θορύβου [91].....	107
Εικόνα 0.1 Δείκτης L_{den} πολεοδομικού συγκροτήματος Αθήνας [200].....	110
Εικόνα 0.2 Δείκτης L_n πολεοδομικού συγκροτήματος Αθήνας [200].....	110
Εικόνα 0.3 Δείκτης L_{den} πολεοδομικού συγκροτήματος Βόρειας Αθήνας [200].....	111
Εικόνα 0.4 Δείκτης L_n πολεοδομικού συγκροτήματος Βόρειας Αθήνας [200].....	111

Αλφαβητικό Ευρετήριο

RMS: Root Mean Square

TL: Transmission Loss

SPL: Sound Pressure Level

SWL: Sound Power Level

SIL: Sound Intensity Level

DR: Dynamic Range

ISO: International Standard Organization

ITD: Interaural Time Difference

ILD: Interaural Level Difference

ΕΛΟΤ: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης

FFT: Fast Fourier Transform

REM: Rapid Eye Movement

GBD: Global Burden of Disease

END: Environmental Noise Directive

ΠΟΥ: Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση

ΕΟΠ: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος

ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Κατσιφής Παναγιώτης Νεκτάριος

SRI: Sound Reduction Index

ANC: Active Noise Control

LMS: Least Mean Square

FxLMS: Filtered-x Least Mean Square

FxRLS: Filtered-x Recursive Least Square

NLMS: Normalized Least Mean Square

FLMS: Fractional Least Mean Square

VSSLMS: Variable Step Size Least Mean Square

VSSNLMS: Variable Step Size Normalized Least Mean Square

FULMS: Filtered-U Least Mean Square

IIR: Infinite Impulse Response

FIR: Finite Impulse Response

SaS: Symmetric alpha Stable

DSP: Digital Signal Processing

MMSE: Minimum Mean Square Error

MLSAE: Maximum-Likelihood Spectral Amplitude Estimator

ML: Maximum Likelihood

KLT: Karhunen-Loève Transform

DFT: Discrete Fourier Transform

ACD: Analog to Digital Converter

DAC: Digital to Analog Converter

SPI: Serial Peripheral Interface

I2C: Inter-Integrated Circuit

ESD: Electro Magnetic Compatibility

GPIO: General Purpose Input/Output

EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

IC: Integrated Circuit

RCA: Radio Corporation of America

Aux: Auxiliary

USB: Universal Serial Bus

IEEE: The Institute for Electrical and Electronics Engineers

λ.χ.: λόγου χάρη

κ.λπ.: και λοιπά

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την αρχή της μελέτης των ηλεκτρονικών διατάξεων μέχρι και σήμερα, ο θόρυβος πάντα αποτελεί το ανεπιθύμητο σήμα το οποίο ο μηχανικός καλείται να εξαλείψει. Θόρυβος συναντάται σε διάφορους τομείς ανεξαρτήτου πεδίου μελέτης· από τη οπτοηλεκτρονική και τις τηλεπικοινωνίες μέχρι και την ιατρική. Σημαντικό ενδιαφέρον προκαλεί ο θόρυβος που εισάγεται στα συστήματα ήχου καθώς στις περιπτώσεις αυτές η παραμόρφωση που προκαλείται είναι ακουστή από τον άνθρωπο. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη και εξάλειψη του θορύβου σε συστήματα ήχου και ειδικότερα στην επισταμένη βελτίωση της ομιλίας..

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το γενικό πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός κυκλώματος βελτίωσης της καταληπτότητας σημάτων ομιλίας. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση ενός κυκλώματος μείωσης θορύβου αποτελεί κρίσιμο βήμα για την ανάπτυξη ενός συστήματος ήχου υψηλής πιστότητας. Το συγκεκριμένο θέμα αποτελεί πόλο έλξης για πολλούς επιστήμονες και ερευνητές καθώς έγκειται στην ευρεία εφαρμογή συστημάτων ήχου και συνεπώς κυκλώματα μείωσης θορύβου συναντώνται εξαιρετικά συχνά. Επίσης, λόγω της συχνούς προόδου της τεχνολογίας των συστημάτων ήχου και της ανάγκης των ακροατών για υψηλή ευκρίνεια ήχου, τα τελικά συστήματα ήχου πρέπει να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις αυτές των ακροατών. Η μελέτη και η κατασκευή ενός αξιόπιστου κυκλώματος μείωσης θορύβου αποτελεί πρόκληση και ευκαιρία για την ανάπτυξη νέων τεχνολογικών μεθόδων που θα βελτιστοποιήσουν την απόδοση και την πιστότητα των συστημάτων ήχου.

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, η ανάλυση και η ανάπτυξη ενός συστήματος ψηφιακής επεξεργασίας για την βελτίωση της ομιλίας. Οι στόχοι της εργασίας αναλύονται στα εξής σημεία:

- Μελέτη απαιτήσεων: πρωταρχικός στόχος είναι η μελέτη και η κατανόηση των απαιτήσεων του συγκεκριμένου κυκλώματος. Στο στόχο αυτό περιλαμβάνεται η ανάλυση του εύρους συχνοτήτων που θα εστιασθεί η μείωση του θορύβου (εύρος συχνότητας ομιλίας).
- Σχεδιασμός του κυκλώματος: σε αυτό τον στόχο περιλαμβάνεται το κύκλωμα ψηφιακής επεξεργασίας μείωσης θορύβου έχοντας πάντα υπ' όψιν τις απαιτήσεις του προηγούμενου στόχου.
- Δοκιμή και Αξιολόγηση Ορθής Λειτουργίας: ο τελευταίος στόχος περιλαμβάνει τα τελευταία στάδια της μελέτης. Αναλυτικότερα, το κύκλωμα δοκιμάζεται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και έπειτα αναλύεται η απόδοση, η ακρίβεια του κυκλώματος, η εξέταση και διόρθωση τυχόν προβλημάτων και εν τέλη η αξιολόγηση των τελικών αποτελεσμάτων.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τα παρακάτω πέντε βήματα:

1. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εκτενής έρευνα βιβλιογραφίας με σκοπό την ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών των ηχητικών κυμάτων όπως επίσης και το ο ήχος αλληλοεπιδρά στον χώρο. Η συγκέντρωση βιβλιογραφίας περιλάμβανε επιστημονικά άρθρα, βιβλία και πηγές από τον ακαδημαϊκό και ερευνητικό τομέα.

2. Με βάση την βιβλιογραφική μελέτη, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των απαιτήσεων του παρόντος κυκλώματος. Στο βήμα αυτό περιλαμβάνεται η επιλογή του κατάλληλου ψηφιακού επεξεργαστή και η ανάλυση των χαρακτηριστικών του ήχου που θα μελετηθεί.
3. Βασιζόμενοι στις απαιτήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του κυκλώματος. Αυτό περιλαμβάνει την επιλογή της κατάλληλης αναπτυξιακής πλακέτας που θα ενσωματώνει τον επεξεργαστή που αναφέρθηκε παραπάνω καθώς επίσης και το κατάλληλο πρόγραμμα γραφικού προγραμματισμού.
4. Ύστερα από τον σχεδιασμό πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση του συγκεκριμένου κυκλώματος. Το βήμα αυτό περιλαμβάνει την κατασκευή του κυκλώματος, την ορθή τοποθέτηση των εξαρτημάτων, την σύνδεση των αναπτυξιακών εργαλείων με τον υπολογιστή και την διεξαγωγή των απαιτούμενων δοκιμών με σκοπό την αξιολόγηση του κυκλώματος.
5. Τέλος, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της απόδοσης του κυκλώματος ψηφιακής επεξεργασίας σήματος για την μείωση θορύβου σημάτων ομιλίας.

Καινοτομία

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία διαθέτει ορισμένα στοιχεία τα οποία θεωρούνται καινοτόμα. Ένα από αυτά είναι η νέα μέθοδος προσέγγισης σχεδιασμού του κυκλώματος ψηφιακής επεξεργασίας βελτίωσης σημάτων ομιλίας μέσω του προγράμματος SigmaStudio. Επίσης, στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν καινοτόμα εξαρτήματα όπως ο DSP επεξεργαστής ADAU1701 και η αναπτυξιακή πλακέτα που τον ενσωματώνει. Τέλος, για την εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν πειράματα και μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο με σκοπό την απόδειξη της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας του συγκεκριμένου κυκλώματος μείωσης θορύβου σημάτων ομιλίας.

Δομή

Κατά το πρώτο κεφάλαιο παρατίθεται βιβλιογραφική μελέτη των χαρακτηριστικών των ηχητικών κυμάτων, το πώς αλληλοεπιδρούν στον χώρο και περιγράφεται το ανθρώπινο σύστημα ακοής. Επίσης, αναφέρονται οι επιπτώσεις του θορύβου στον άνθρωπο και τις πράξεις και νομοθεσίες που έχουν θεσπίσει οι αρχές με σκοπό την προστασία του. Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται ορισμένοι από τους πιο γνωστούς τρόπους ηχομείωσης και έπειτα στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται μερικές από τις μεθόδους μείωσης θορύβου σε συστήματα ομιλίας. Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο περιγράφονται όλα τα αναπτυξιακά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, τα κύκλωμα που υλοποιήθηκε καθώς επίσης και η αξιολόγηση της ορθής λειτουργίας του κυκλώματος.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: Ήχος

1.1 Ο Ορισμός του Ήχου

Οι πρώτες επιστημονικές έρευνες για την μελέτη του ήχου έγιναν από τον διάσημο μαθηματικό και φιλόσοφο Πυθαγόρα περίπου το 580 με 500 π.Χ. Το ενδιαφέρον του Πυθαγόρα για την εξερεύνηση του ήχου φαίνεται να πυροδοτήθηκε καθώς περνούσε μπροστά από έναν σιδηρουργό την στιγμή όπου χτυπούσε με το σφυρί του ένα μεταλλικό αμόνι. Παρατήρησε ότι ο ήχος των σφυριών ήταν άλλοτε ευχάριστος και άλλοτε δυσάρεστος, δηλαδή σύμφωνος ή παράφωνος αντίστοιχα. Ύστερα από πολλά πειράματα τα οποία πραγματοποίησε ο ίδιος με διάφορα υλικά όπως ποτήρια, βάζα, κουδούνια και χορδές, διαπίστωσε ότι μπορούσαν να παραχθούν αντίστοιχοι αρμονικοί ήχοι με τα σφυριά του σιδηρουργού με σκοπό την δημιουργία σύμφωνων ήχων. Στην συνέχεια, κατασκεύασε ένα μονόχορδο το οποίο αποτελούνταν από μια ξύλινη σανίδα με μια χορδή τεντωμένη πάνω σε μια κινητή γέφυρα. Χρησιμοποιώντας το μονόχορδο, ανακάλυψε ότι δύο τεντωμένες χορδές με διπλάσια μήκη, παρήγαγαν την ίδια νότα με διαφορά μια οκτάβα με την μεγαλύτερη χορδή να παράγει την χαμηλότερη συχνότητα [1].

Γενικά, ο ήχος αποτελεί πόλος έλξης και πεδίο ενδιαφέροντος για πολλούς ερευνητές και επιστήμονες εδώ και πολλές δεκαετίες. Πώς όμως ορίζεται ο ήχος; Τρία βασικά στοιχεία απαιτούνται για την παραγωγή ενός ήχου. Αρχικά, θα πρέπει να παραχθεί μια δόνηση. Ύστερα, η δόνηση αυτή θα πρέπει να συμβαίνει σε ένα μέσο διάδοσης του οποίου τα μόρια μπορούν να τεθούν σε κίνηση, όπως για παράδειγμα ο αέρας και το νερό. Τέλος, το μέσο διάδοσης θα πρέπει να απορροφά και να μεταδίδει τις αρχικές δονήσεις με την μορφή μεταβολών πίεσης [2]. Γενικά, ο ήχος αποτελεί μια διαταραχή των μορίων του μέσου διάδοσης κατά το οποίο μεταφέρεται ενέργεια χωρίς να μεταφέρεται ύλη.

1.1.1 Υπέρηχοι και Υπόηχοι

Οι υπέρηχοι και οι υπόηχοι διαφέρουν από τους συνηθισμένους ακουστους ήχους για τρεις βασικούς λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι το γεγονός ότι έχουν εξαιρετικά ασυνήθιστες συχνότητες συγκριτικά με τις ακουστές συχνότητες και συνεπώς κανένας άνθρωπος δεν μπορεί να ακούσει. Από την μια πλευρά, οι υπέρηχοι βρίσκονται πάνω από τα όρια της ανθρώπινης ακοής καθώς κυμαίνονται από τα 15kHz έως και τα 200kHz. Από την άλλη πλευρά, οι υπόηχοι βρίσκονται κάτω από τα όρια της ανθρώπινης ακοής και κυμαίνονται από τα 0.1Hz έως τα 20Hz [3]. Οι ήχοι αυτοί έχουν πολλά ενδιαφέρον πεδία τα οποία απασχολούν αρκετούς ερευνητές και επιστήμονες. Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική τόσο για διαγνωστικούς σκοπούς όσο για θεραπευτικούς σκοπούς όπως λόγου χάρη το υπερηχογράφημα [4]. Ως προς τους υπόηχους, οι συγκεκριμένοι ήχοι εξαιτίας της χαμηλής τους συχνότητας μπορούν να διαδοθούν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις, όπως για παράδειγμα οι εκρήξεις από στρατιωτικά κανόνια [5]. Ο δεύτερος λόγος που ξεχωρίζει τους υπόηχους και τους υπέρηχους από τους άλλους ήχους είναι το μήκος κύματός τους. Η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος και ως εκ τούτου οι υπόηχοι έχουν μεγάλα μήκη κύματος, ενώ οι υπέρηχοι έχουν μεγάλα μήκη κύματος (Πίνακας 1.1). Τέλος, ο τρίτος λόγος είναι το γεγονός ότι οι ήχοι υψηλής συχνότητας απορροφούνται εύκολα από τον αέρα, ενώ ήχοι χαμηλής συχνότητας έχουν την ικανότητα να διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες. Έτσι, οι υπόηχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις και οι υπέρηχοι είναι αποτελεσματικοί μόνο στις μικρές αποστάσεις [3].

Πίνακας 1.1 Ενδεικτικές τιμές μηκών κύματος υπερήχων και υπόηχων (Τιμές ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς 340m/s για τον αέρα και 1500m/s για το νερό) [3]

Υπέρηχοι			Υπόηχοι		
Συχνότητα (kHz)	Μήκος Κύματος (mm)		Συχνότητα (kHz)	Μήκος Κύματος (mm)	
	Αέρας	Νερό		Αέρας	Νερό
200	1.7	7.5	100	3.4	15
100	3.4	15	0	17	75
20	17	75	1	340	1500
10	34	150	0.1	3400	15000

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η έκθεση σε εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες έχει σοβαρά αποτελέσματα στην υγεία του ακροατή. Οι πρώτες σημαντικές μελέτες σχετικά με τις επιπτώσεις πολύ χαμηλών συχνοτήτων στον άνθρωπο αφορούσαν τον θόρυβο που δημιουργούνταν από τα διαστημικά πειράματα από διάφορα αεροδιαστημικά συστήματα, όπως για παράδειγμα πύραυλοι, κατά την εκτόξευσή τους. Οι μελέτες αυτές έδειξαν ότι για σύντομες εκθέσεις (που διαρκούσαν τον πολύ τρία λεπτά), το περιβάλλον χαμηλής συχνότητας μπορεί ανεκτό γίνει με μικρή ή και καθόλου υποβάθμιση της απόδοσης (βλ. Πίνακας 1.2, Πίνακας 1.3) [6]. Πράγματι, έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες μελέτες κατά τις οποίες μελετώνται οι επιπτώσεις των χαμηλών συχνοτήτων στον άνθρωπο και ορισμένες από αυτές κατέληξαν στο γεγονός ότι οι ήχοι χαμηλών συχνοτήτων (και κατά συνέπεια οι υπόηχοι) προκαλούν σοβαρά αποτελέσματα στην υγεία του ακροατή [7]. Οι επιπτώσεις όμως του ήχου στον άνθρωπο είναι ένα ζήτημα το οποίο μελετάται παρακάτω.

Πίνακας 1.2 Επιπτώσεις θορύβου χαμηλής συχνότητας [8]

Έκθεση	Δεδομένα Ανοχής-Παρατηρούμενη Συμπεριφορά
0 έως 50 Hz Έως 145 dB	Δόνηση θώρακος, αλλαγές στον αναπνευστικό ρυθμό, κόπωση μετά την έκθεση
50 έως 100 Hz Έως 154 dB	Πονοκέφαλος, βήχας, προβλήματα στην όραση, κόπωση μετά την έκθεση

Πίνακας 1.3 Επιπτώσεις θορύβου χαμηλής συχνότητας [8]

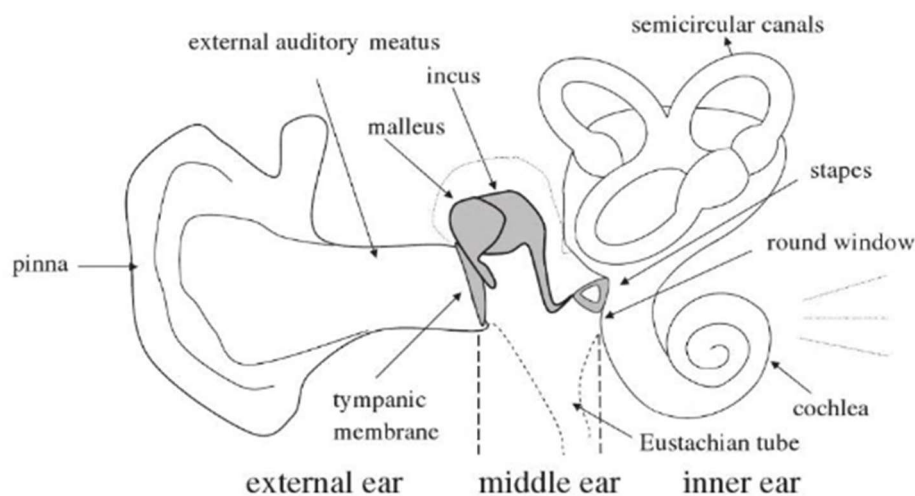
Συχνότητες	Συμπτώματα Ορίου Ανοχής
100 Hz στα 153 dB	Ήπια ναυτία, ζάλη, δυσφορία, δερματική έξαψη
60 Hz στα 154 dB 73 Hz στα 150 dB	Βήχας, αίσθημα πνιγμού, σιελόρροια, πόνος κατά την κατάποση, ζάλη

1.1.2 Ακουστοί Ήχοι

Η ακοή είναι μια από τις πιο σπουδαίες αισθήσεις του ανθρώπου η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για επικοινωνία και είναι εξαιρετικά σημαντική για την επιβίωσή του. Η ακοή είναι μια συνειδητή εκτίμηση μιας δόνησης η οποία μέσω του εγκεφάλου λαμβάνεται ως ήχος. Πρακτικά, η βασικότερη λειτουργία του αυτιού είναι η μετατροπή της φυσικής δόνησης σε μια κωδικοποιημένη νευρική ώθηση. Για παράδειγμα, το ανθρώπινο αυτί λειτουργεί όπως ακριβώς ένα μικρόφωνο: στο μικρόφωνο η δόνηση που δέχεται στην είσοδό του μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, ενώ στο αυτί η δόνηση αυτή μετατρέπεται σε νευρική ώθηση και στην συνέχεια επεξεργάζεται από τις κεντρικές νευρικές οδούς του εγκεφάλου [9]. Έτσι, προτού αναλυθούν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των ακουστών ήχων θα πρέπει πρώτα να μελετηθεί ο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα.

1.1.2.1 Η φυσιολογία του αυτιού

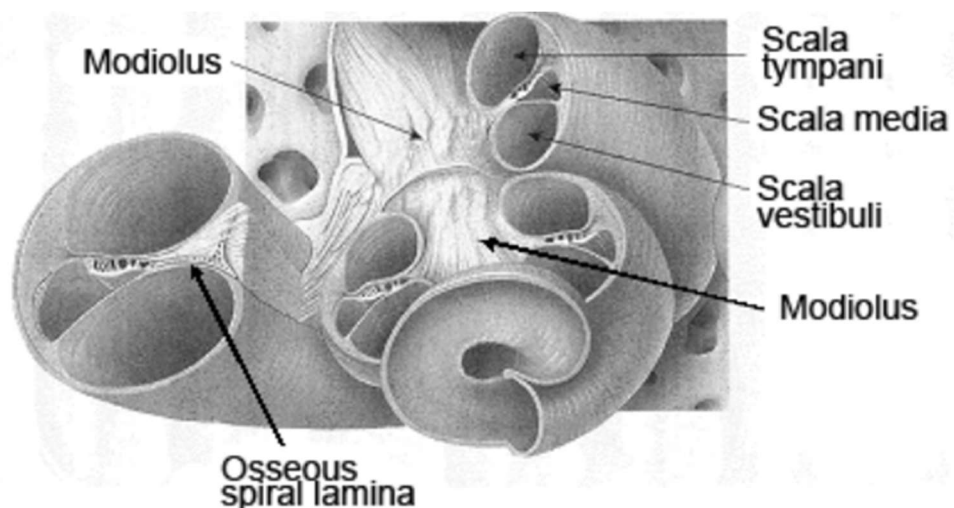
Το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα διακρίνεται σε τρία βασικά τμήματα: το έξω αυτί, το μέσο αυτί και το έσω αυτί όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1. Το έξω αυτί αποτελείται από το περυγίο (pinna) και το ακουστικό κανάλι (external auditory meatus) το οποίο τερματίζεται στην τυμπανική μεμβράνη (tympanic membrane). Η σημαντικότερη λειτουργία του έξω αυτιού είναι η συλλογή των ήχων μέσω του περυγίου [10]. Το σχήμα του περυγίου είναι τέτοιο ώστε να οδηγεί όλα τα ηχητικά κύματα προς το ακουστικό κανάλι [11]. Επίσης, άλλη μια σημαντική λειτουργία του περυγίου είναι η αποτύπωση της κατεύθυνσης της πληροφορίας για όλους τους ήχους που λαμβάνονται από το αυτί. Συνεπώς, ο εγκέφαλος μέσω του περυγίου έχει την δυνατότητα όχι μόνο να ερμηνεύσει το περιεχόμενο του ήχου αλλά και να αναγνωρίσει την κατεύθυνση από την οποία προέρχονται οι ήχοι και να τους διαχωρίσει αναλόγως [10].



Εικόνα 1.1 Ανατομία ανθρώπινου αυτιού [11]

Συνεχίζοντας, το μέσο αυτί απαρτίζεται από μια κοιλότητα η οποία διαμερίζεται από τρία οστά: την σφύρα (malleus), τον άκμονα (incus) και τον αναβολέα (stapes). Η βασικότερη λειτουργία του μέσου αυτιού είναι η μετάδοση των δονήσεων που προέρχονται από την τυμπανική μεμβράνη στο υγρό του περιέχει το έσω αυτί. Λεπτομερέστερα, τα τρία οστά τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σχηματίζουν μια μηχανική σύνδεση μεταξύ του τυμπάνου και του ελλειψοειδές παραθύρου (round window). Ξεκινώντας από το πρώτο οστό, η σφύρα, είναι συνδεδεμένη με την τυμπανική μεμβράνη και τον άκμονα δηλαδή το δεύτερο οστό και στη συνέχεια ο άκμονας είναι συνδεδεμένος με το τρίτο οστό, τον αναβολέα, οποίος συνδέεται με το ελλειψοειδές παράθυρο (στην πραγματικότητα αποτελεί μέρος του ελλειψοειδές παραθύρου). Τέλος, η κοιλότητα του μέσου αυτιού συνδέεται με το πίσω μέρος της μύτης μέσω μιας μακριάς λεπτής οδού, της ευσταχιανής σάλπιγγας (Eustachian Tube). Η

ευσταχιανή σάλπιγγα είναι υπεύθυνη στο να διατηρεί την ίδια μέση πίεση και στις δύο πλευρές της τυμπανικής μεμβράνης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μεταφορά των δονήσεων από το τύμπανο στο τρίτο μέρος του αυτιού, τον έσω ούς [10]. Το έσω αυτί είναι το τελευταίο και ίσως το πιο περίπλοκο στάδιο της ακοής. Αποτελείται από τον κοχλία (cochlea) και τα ημικυκλικά κανάλια (semicircular canals) [12]. Τα όργανα από τα οποία αποτελείται το μέσο αυτί είναι υπεύθυνα για την διαρκή ενημέρωση του εγκεφάλου για την θέση του κεφαλιού και των οργάνων για την ισορροπία του σώματος. Συνεπώς μόνο ο κοχλίας συνδέεται με την διαδικασία της ακοής. Ο κοχλίας είναι ένας σπειροειδής σωλήνας με δύομιση περιελίξεις του οποίου το σχήμα μοιάζει με αυτό του σαλιγκαριού. Στο εσωτερικό του ο κοχλίας περιέχει ένα διάφραγμα το οποίο λέγεται βασική μεμβράνη (basilar membrane). Η διατομή του κοχλίας που φαίνεται στην Εικόνα 1.2 διακρίνονται τρεις σωληνοειδής περιοχές από τις οποίες οι δύο βρίσκονται πάνω και κάτω από την βασική μεμβράνη. Πάνω από την βασική μεμβράνη βρίσκεται η αιθουσαία κλίμακα (scala vestibuli) και ο κοχλιακός πόρος. Ενώ κάτω από την βασική μεμβράνη βρίσκεται η τυμπανική κλίμακα (scala tympani). Στην συνέχεια, πάνω στην βασική μεμβράνη βρίσκεται το όργανο του Corti το οποίο ευθύνεται για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρικές ωθήσεις [13]. Το όργανο του Corti αποτελείται από αισθητήρια κύτταρα ή ακουστικά κύτταρα τα οποία συνδέονται με τις ίνες του στατοακουστικού νεύρου. Τα τριχοειδή αυτά κύτταρα διαθέτουν τριχοειδής εκβλαστήσεις οι οποίες εισέρχονται σε μια γλωσσοειδή απόφυση σκληρού οστού γνωστή και ως καλυπτήρια μεμβράνη και πάνω σε αυτή, πιεζόμενα, αναγκάζονται να καμφθούν κάθε φορά που η βασική μεμβράνη δονείται. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, το κάθε τριχίδιο της μεμβράνης του κοχλίας συντονίζεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα ενώ παράλληλα όλη η μεμβράνη ταλαντώνεται και το ερέθισμα το οποίο είναι μια πιεζοηλεκτρική τάση, μεταφέρεται μέσω των νεύρων στον εγκέφαλο όπου προκαλείται το ανάλογο αίσθημα. Η ταλάντωση που δημιουργείται στην βασική μεμβράνη έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία στάσιμων κυμάτων, των οποίων η θέση των μεγίστων των πλατών μεταβάλλονται καθώς αλλάζει η συχνότητα του ήχου που προκαλεί την διέγερση. Για παράδειγμα, ένας ήχος χαμηλής συχνότητας θα έχει σαν αποτέλεσμα μέγιστο πλάτος κοντά στο απομακρυσμένο άκρο της βασικής μεμβράνης. Ωστόσο, ένας ήχος υψηλής συχνότητας έχει μέγιστο πλάτος κοντά στο άκρο της βασικής μεμβράνης (στο ελλειψοειδές παράθυρο) [10].



Εικόνα 1.2 Ανατομία του κοχλία [13]

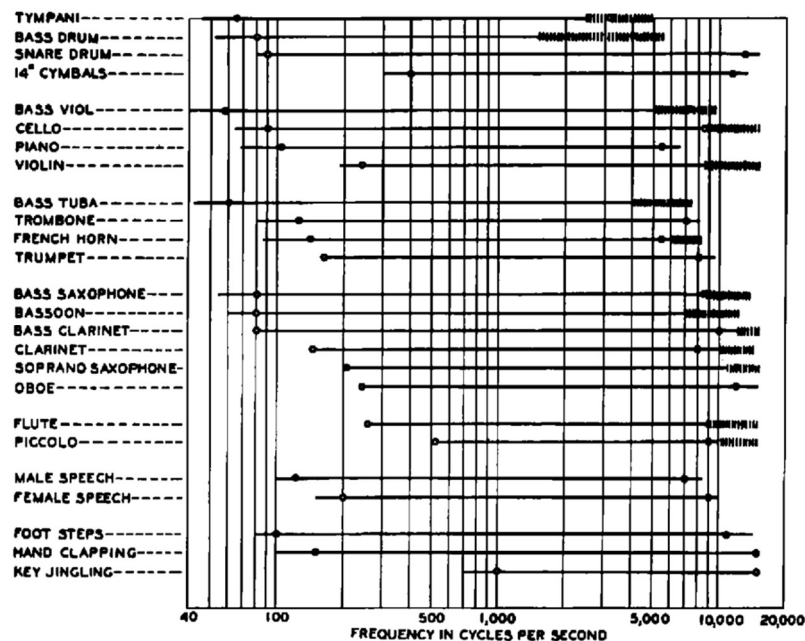
1.2 Ψυχοακουστική

Η επιστήμη της ακουστικής μελετά τα φυσικά χαρακτηριστικά του ήχου και την αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα το φάσμα συχνοτήτων των ήχων, τη διάδοσή του και τα

διάφορα φαινόμενα διάδοσής του στην φύση. Ωστόσο, η ψυχοακουστική ερευνά την διαδικασία αντίληψης του ήχου από τον άνθρωπο [14]. Αποτελεί τον επιστημονικό κλάδο όπου μελετά τον ανθρώπινο ακουστικό μηχανισμό και την επίδραση του ήχου στο νευρικό σύστημα και στον εγκέφαλο [15]. Έχοντας περιγράψει το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα (1.1.2.1) στο κεφάλαιο αυτό πρόκειται να περιγραφεί η υποκειμενική αντίληψη του ήχου, δηλαδή το πώς ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται ορισμένους ήχους καθώς επίσης τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου όπως για παράδειγμα το ύψος, η ακουστότητα και η χροιά.

1.2.1 Υποκειμενική Αντίληψη του Ήχου

Όπως αποδείχθηκε παραπάνω, το ακουστικό σύστημα είναι ένα εξαιρετικά περίπλοκο αλλά και συνάμα ενδιαφέρον σύστημα του ανθρώπινου σώματος. Έχοντας αναλύσει το σύστημα αυτό, στην συνέχεια θα αναλυθούν μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά των ακουστών ήχων. Ξεκινώντας από το εύρος των ακουστικών συχνοτήτων, το ανθρώπινο αυτί είναι ικανό να εντοπίσει συχνότητες μεταξύ 20Hz και 20 kHz [16]. Ωστόσο, οι τιμές αυτές φαίνεται να διαφέρουν από άνθρωπο σε άνθρωπο για διάφορους λόγους όπως για παράδειγμα η ηλικία και η ακουστική τους ικανότητα [16]. Στην Εικόνα 1.3 διακρίνεται το εύρος των ακουστικών συχνοτήτων καθώς επίσης και ορισμένα παραδείγματα από μουσικά όργανα και ήχους που ακούει συχνά ο άνθρωπος στην καθημερινότητά του. Για παράδειγμα, παρατηρείται ότι το εύρος των συχνοτήτων μιας αντρικής φωνής βρίσκεται χαμηλότερο συχνοτικά σε σχέση με το αντίστοιχο εύρος μιας γυναικείας φωνής γεγονός το οποίο οφείλεται στην φύση των αντρικών φωνών να τείνουν να είναι χαμηλότεροι. Ωστόσο, ο ήχος που παράγει το φλάουτο είναι πιο υψηλός από την γυναικεία και την αντρική φωνή, ενώ ο ήχος των μεταλλικών κλειδιών χτυπώντας τα μεταξύ τους είναι πιο ψηλά από όλες τις συχνότητες [17].



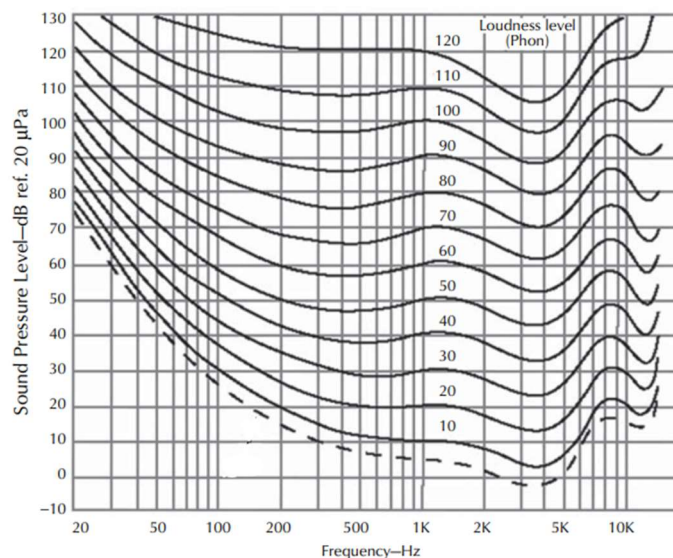
Εικόνα 1.3 Εύρος ακουστικών συχνοτήτων ορισμένων μουσικών οργάνων και διαφόρων ήχων [17]

Συνεχίζοντας, το κατώφλι της ανθρώπινης ακοής είναι περίπου 0.00002 Pascals (Pa) στις μεσαίες συχνότητες, ενώ το μέγιστο του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος είναι έως και 200 Pa στις ίδιες συχνότητες. Συνεπώς το εύρος του συστήματος ακοής είναι:

$$DR = 20 \log \frac{200}{2 \cdot 10^5} = 140 \text{ dB}$$

Το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα δεν μπορεί να πρέπει να εκτίθεται σε έκθεση σε αυτό το επίπεδο για μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς κινδυνεύει να προκληθεί βλάβη. Τα συστήματα ομιλίας είναι συχνά σχεδιασμένα για 80 dB αναφοράς 20 μPa και τα μουσικά συστήματα για 90 dB αναφοράς 20 μPa για τις μεσαίες συχνότητες [18].

Το ακουστικών σύστημα των ανθρώπων δεν είναι επίπεδο αλλά η απόκρισή του ποικίλει ανάλογα με το επίπεδο των συχνοτήτων. Εκτενέστερα, σε χαμηλά επίπεδα η ευαισθησία του αυτιού είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις μεσαίες συχνότητες. Καθώς το επίπεδο των συχνοτήτων αυξάνεται, η διαφορά μεταξύ της ευαισθησίας των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων είναι μικρότερη. Ως αποτέλεσμα, παράγεται μια πιο ομοιόμορφη φασματική απόκριση όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4 Περιγράμματα ίσης έντασης [18]

Παρατηρείται επίσης, ότι η μέγιστη ευαισθησία της ανθρώπινης ακοής βρίσκεται στην περιοχή των 3kHz. Συνεπώς, ένας ήχος 3kHz χαμηλού επιπέδου προκαλεί μεγαλύτερη απόκριση κατωφλιού συγκριτικά με υψηλότερες ή χαμηλότερες συχνότητες [19].

1.2.2 Υποκειμενικά Χαρακτηριστικά του Ήχου

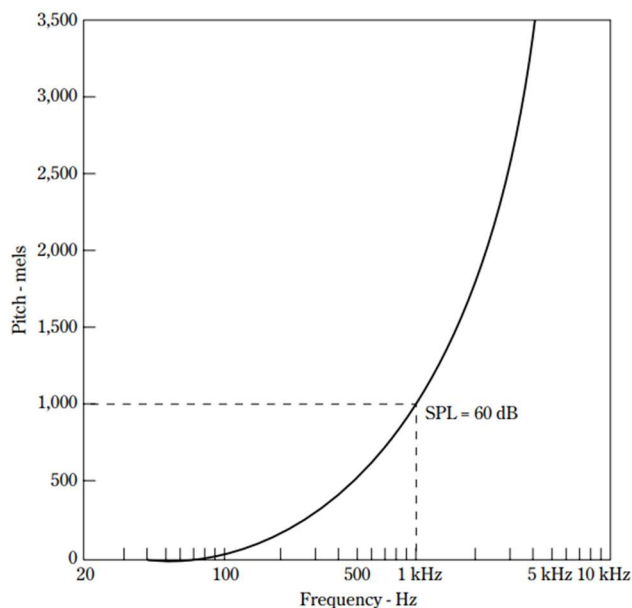
Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου τα οποία σχετίζονται με την απόκριση του ανθρώπου σε αυτόν είναι:

- Το ύψος (Pitch)
- Η ακουστότητα (Loudness)
- Η χροιά (Timbre)

1.2.2.1 Το Ύψος

Ως ύψος ενός ήχου ορίζεται η υποκειμενική απόκριση του αυτιού στην συχνότητα του συγκεκριμένου ήχου. Παρόλο που το ύψος συνδέεται άμεσα με την συχνότητα, η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη δεν είναι γραμμική. Πιο συγκεκριμένα, ίσες μεταβολές στην συχνότητα δεν συνεπάγονται ίσες μεταβολές στο ύψος του ήχου [20]. Γι' αυτό τον λόγο η μονάδα μέτρησης της συχνότητας είναι τα Hertz, ενώ η μονάδα μέτρησης του ύψους είναι τα mel. Υποθέτοντας ότι ένα σήμα 1kHz κατά την αύξηση της τιμής του ύψους του η συχνότητα παραμένει σταθερή, συνεπάγεται ότι το ύψος ενός ήχου εξαρτάται από το επίπεδο της ηχητικής πίεσης. Η σχέση μεταξύ του ύψους και της συχνότητας

που προκύπτει ύστερα από μια σειρά πειραμάτων φαίνεται στην Εικόνα 1.5. Παρατηρείται ότι ένα σήμα αναφοράς 1000 mel συμπίπτει με το ύψος ενός τόνου 1000 Hz και συνεπώς το επίπεδο της ηχητικής πίεσης είναι 60 dB [19]. Παράλληλα, ένας ήχος ακούγεται δύο φορές υψηλότερος λαμβάνει τιμή ύψους 2000 mel, ενώ ένας υποδιπλασιασμένος ήχος λαμβάνει τιμές 500 mel [21].



Εικόνα 1.5 Καμπύλη συσχέτισης ύψους και συχνότητας [22]

1.2.2.2 Η Ακουστότητα

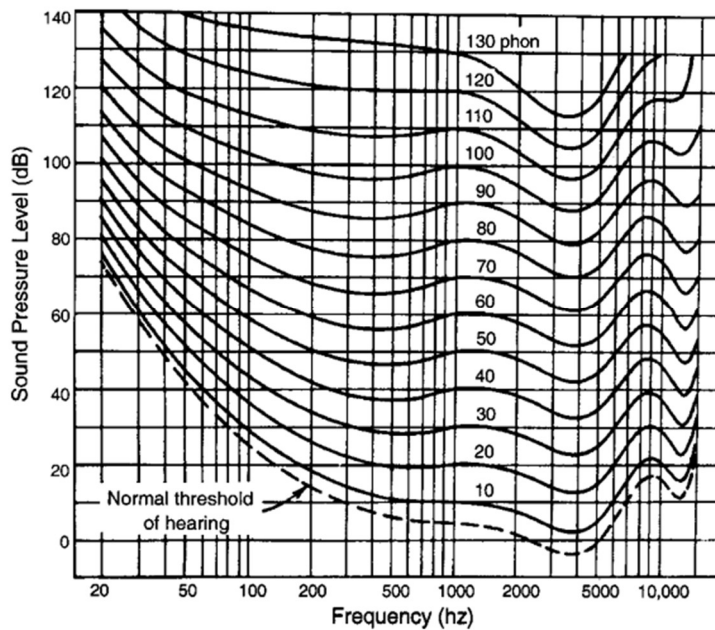
Η ακουστότητα (loudness) είναι ένας ψυχολογικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μέγεθος μιας ακουστικής αίσθησης. Το μέγεθος της ακουστικής αίσθησης εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των νευρικών ερεθισμάτων που καταλήγουν στον εγκέφαλο κατά μήκος της ακουστικής οδού [23]. Η ακουστότητα κυρίως εξαρτάται από την ηχητική πίεση, αλλά και από την συχνότητα και την κυματομορφή του ηχητικού σήματος. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι τα όργανα μέτρησης του ήχου (ηχόμετρα) δεν μετράνε την ακουστότητα του ήχου, αλλά την στάθμη της ηχητικής πίεσης (SPL-Sound Pressure Level), την οποία ύστερα την μετατρέπουν σε τιμή έντασης ήχου χρησιμοποιώντας φίλτρα οκτάβας ζώνης. Η μονάδα μέτρησης της ακουστότητας είναι το sone, το οποίο ορίζεται ως η ένταση που ακούγεται από τυπικούς ακροατές όταν έρχονται αντιμέτωποι με έναν τόνο 1000Hz σε επίπεδο ηχητικής πίεσης 40 phon. Η ακουστότητα ενός ήχου υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$S = 2^{\frac{P-40}{10}}$$

όπου P η μετρούμενη ηχητική πίεση η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$P = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

όπου p είναι η στάθμη ακουστότητας μετρούμενη σε phon και p₀ η ηχητική πίεση 0.0002 microbars [24].

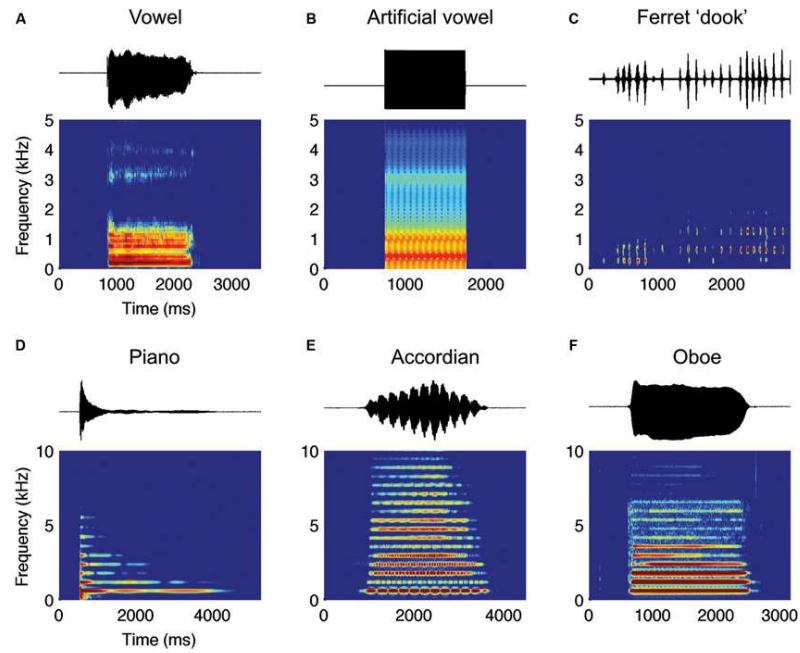


Εικόνα 1.6 Καμπύλες ίσης στάθμης ακουστότητας για τόνους κατά ISO R 226-1987 [25]

Για την μέτρηση, κατά προσέγγιση, της στάθμης ακουστότητας σύνθετων ήχων λαμβάνονται υπόψη οι καμπύλες ίσης ακουστότητας της Εικόνα 1.6. Σύμφωνα με το ISO R 226-1987 ο τόνος των 1000Hz πρέπει να είναι ελεύθερα διαδιδόμενο επίπεδο κύμα το οποίο κατευθύνεται προς τον ακροατή από εμπρός και ο παρατηρητής πρέπει να ακούει με τα δύο αυτιά για το ίδιο χρονικό διάστημα (0.5-1 sec). Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τις καμπύλες αυτές ένας τόνος συχνότητας 100Hz και στάθμη ηχητικής πίεσης 40dB είναι το ίδιο ακουστός με ένα τόνο συχνότητας 1000Hz και στάθμη 20dB και συνεπώς στάθμης ακουστότητας 20 phon [25].

1.2.2.3 Η Χροιά

Ένας σημαντικός ρόλος της ακουστικής αντίληψης είναι η αντίληψη της πιθανής πηγής ενός ήχου, όπως για παράδειγμα η αναγνώριση μιας γνώριμης φωνής κατά την διάρκεια μιας τηλεφωνικής κλήσης. Η χροιά, που συχνά αναφέρεται ως το χρώμα του ήχου, παίζει βασικό ρόλο στην διαδικασία αυτή [26]. Η χροιά (timbre) ορίζεται ως τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου τα οποία κάνουν δυνατό τον διαχωρισμό δύο τόνων της ίδιας έντασης και θεμελιώδους συχνότητας αλλά διαφορετικών κυματομορφών [27].



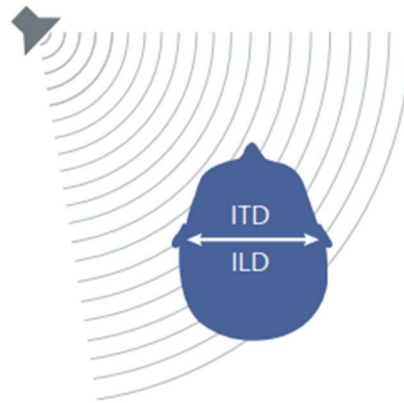
Εικόνα 1.7 (A) Κυματομορφές πλάτους (πάνω) και φασματογράμμο (κάτω) για μια γυναικεία φωνή που ομιλεί το φωνήεν "Α" (B) ένα τεχνητό "Α" (C) Ήχοι ενός αρσενικού κουναβιού (D-F) Κυματομορφές πλάτους και φασματογράμμο για (D) πιάνο, (E) ακορντεόν, (F) Ομπόε που παίζουν την ίδια νότα [28]

Η ανάλυση των προφορικών φωνημάτων και τα πειράματα αναπαραγωγής με συνθετικούς ήχους ομιλίας υποδεικνύουν ότι τα διάφορα format των ήχων παίζουν κρίσιμο ρόλο στην αντίληψη των φωνηέντων και των συμφώνων. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.7A-B τα format του ήχου είναι οι κορυφές στο φάσμα συχνότητας-πλάτους σταθερής κατάστασης που εισάγονται από τις ιδιότητες συντονισμού της φωνητικής οδού. Επίσης, η χροιά διακρίνει μουσικές νότες ίδιου ύψους, ακουστότητας και διάρκειας που παίζονται από διαφορετικά μουσικά όργανα. Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου που οφείλονται για τις διαφορές της χροιάς μπορούν να διερευνηθούν συγκρίνοντας τις ακουστικές ιδιότητες των οργάνων. Οι συγκρίσεις αυτές δείχνουν ότι τα φασματικά και τα χρονικά χαρακτηριστικά του ήχου καθορίζουν την χροιά του. Ως προς την φασματική ανάλυση των μουσικών οργάνων, τις περισσότερες φορές εκπέμπουν αρμονικούς συντονισμούς. Πιο συγκεκριμένα, παράγεται ενέργεια σε ακέραια πολλαπλάσια μιας θεμελιώδους συχνότητας. Τέτοιες αρμονικές μοιάζουν με αυτές που εισάγονται στην ομιλία εξαιτίας της δόνησης των φωνητικών χορδών. Παράλληλα με τα φωνηέντα, μια βασική διαφορά μεταξύ των μουσικών οργάνων είναι η κατανομή της ενέργειας σε διαφορετικές αρμονικές. Για παράδειγμα το πιάνο (Εικόνα 1.7D) έχει διατηρήσει ενέργεια μόνο στην θεμελιώδη συχνότητα, ενώ το βιολί και το ακορντεόν (Εικόνα 1.7E) έχουν ενέργεια κατανομημένη σε πολλές αρμονικές και το ομπόε έχει κατανομημένη την ενέργειά του στις πρώτες πέντε αρμονικές (Εικόνα 1.7F) [28]. Ορισμένα όργανα όπως το κλαρίνο έχουν ενέργεια μόνο στις περιττές αρμονικές, ωστόσο στο τρομπόνι οι νότες έχουν ενέργεια μόνο στην πρώτη και την δεύτερη αρμονική [29].

1.2.3 Αμφιωτική Ακοή

Ο όρος αμφιωτική ακοή αναφέρεται στον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος όπου χρησιμοποιούνται δύο αυτιά για τον εντοπισμό πηγών ήχου [30]. Συγκρίνοντας το σήμα που φτάνει στο ένα αυτί με το σήμα που φτάνει στο άλλο αυτί παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Οι διαφορές αυτές ευθύνονται στην διαφορά έντασης του ήχου και στην διαφορά του χρόνου άφιξης (φάση) του ήχου που φτάνει στα δύο αυτιά. Υποθέτοντας ότι μια ηχητική πηγή εκπέμπει στα αριστερά ενός ακροατή (Εικόνα 1.8), ο ήχος θα φτάσει γρηγορότερα στο αριστερό αυτί παρά στο δεξί καθώς το δεξί αυτί βρίσκεται πιο μακριά και προσπίπτει σε αυτό με μικρότερη ένταση ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Καταιφής Παναγιώτης Νεκτάριος

αφού ο ήχος συναντά ως εμπόδιο το κεφάλι του ακροατή. Γενικά, όσο πιο αριστερά είναι η πηγή τόσο πιο μεγάλες θα είναι οι διαφορές μεταξύ των δύο σημάτων [31]. Αυτή η διαφορά χρόνου άφιξης στα δύο αυτιά ονομάζεται αμφιωτική χρονική διαφορά (ITD- Interaural Time Difference). Η αμφιωτική χρονική διαφορά διαφέρει ανάλογα με την γωνία της ηχητικής πηγής και αποτελεί την κύρια μέθοδο προσδιορισμού της κατεύθυνσης ήχων χαμηλής συχνότητας. Επίσης, η διαφορά του επιπέδου έντασης του ήχου εξαιτίας του ανθρώπινου κεφαλιού ονομάζεται αμφιωτική διαφορά επιπέδου (ILD-Interaural Level Difference) [32].



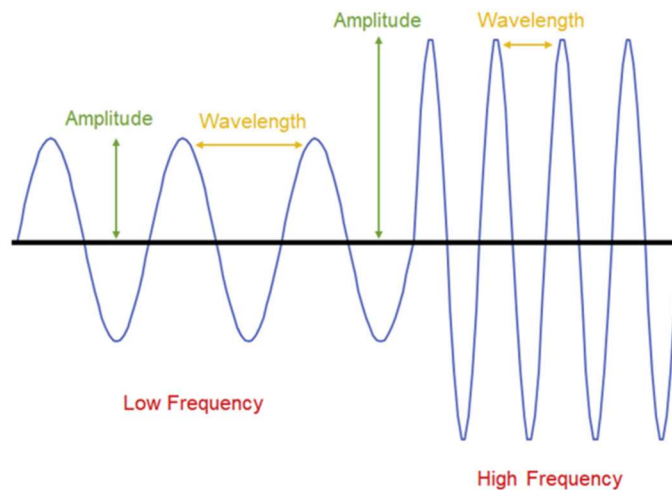
Εικόνα 1.8 Ο εντοπισμός της κατεύθυνσης της πηγής ήχου εξαρτάται από τις διαφορές έντασης και φάσης των ηχητικών κυμάτων που προσπίπτουν στα δύο αυτιά του ακροατή [33]

Σημαντικό χαρακτηριστικό της αμφιωτικής ακοής είναι ο εντοπισμός της κατεύθυνσης του ήχου. Το 1838 ο Johannes Müller ήταν ο πρώτος ο οποίος ανακάλυψε ότι ο εντοπισμός της κατεύθυνσης των ηχητικών κυμάτων εξαρτάται από τις διαφορές των σημάτων αυτών καθώς προσπίπτουν στα αυτιά του ακροατή [34]. Ο εντοπισμός αυτός βασίζεται στην νευρωνική επεξεργασία των ακουστικών σημάτων από τον εγκέφαλο που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των ηχητικών κυμάτων από τον κορμό, το κεφάλι και τα αυτιά του ακροατή. Η κατευθυντική ακοή στο οριζόντιο επίπεδο εξαρτάται από το ITD το οποίο ισχύει κυρίως για συχνότητες μικρότερες από 1.5kHz, ενώ για συχνότητες μεγαλύτερες από 3kHz εξαρτάται από τον παράγοντα ILD, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Ο εντοπισμός της κατεύθυνσης (αριστερά-δεξιά, μπροστά-πίσω) αλλά και του ύψους (πάνω-κάτω) απαιτεί την φασματική ανάλυση των σημάτων που προκύπτουν από τις ανακλάσεις εξαιτίας του πτερυγίου του ανθρώπινου αυτιού [35] [36]. Ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος είναι εξαιρετικά σημαντικός στον εντοπισμό της κατεύθυνσης του ήχου είναι η διαφορά της ακουστικής ικανότητας των δύο αυτιών. Πιο συγκεκριμένα, η γενική ευαισθησία του αυτιού, η ευαισθησία συναρτήσει της συχνότητας και η παραμόρφωση είναι όλα παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα του ανθρώπου να εντοπίσει την κατεύθυνση της ηχητικής πηγής [37]. Μάλιστα, όπως αναφέρουν οι E. Colin Cherry και Bruce Mc. A. Sayers, η ικανότητα ορισμένων ανθρώπων να εντοπίζουν τις πηγές ήχου προέρχεται και από την εμπειρία του καθενός, όπως για παράδειγμα την γνώση του πώς ακούγονται οι άνθρωποι όταν μιλούν σε γωνίες δωματίων, σε πόρτες, σε παράθυρα κ.λπ. [38].

1.3 Η κυματική φύση του ήχου

Ένα ηχητικό κύμα περιγράφεται από δύο βασικά μεγέθη· την συχνότητα και το πλάτος. Ως συχνότητα ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που διαδίδεται μια διαταραχή κατά την διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος. Μονάδα μέτρησης της συχνότητας είναι τα Hertz (Hz) και είναι ίσο με τον αριθμό των πυκνωμάτων και των αραιωμάτων της διαταραχής του ηχητικού κύματος στο μέσο

διάδοσης ανά δευτερόλεπτο. Ως πλάτος ορίζεται η μέγιστη μετατόπιση ενός επαναλαμβανόμενου γεγονότος από ένα ουδέτερο σημείο εκκίνησης [39].



Εικόνα 1.9 Παράδειγμα κύματος αρχικά χαμηλής συχνότητας και χαμηλού πλάτους και έπειτα υψηλής συχνότητας και υψηλού πλάτους [39]

1.3.1 Μέτρηση του Ήχου

Εξαιτίας του μεγάλου εύρους της ακουστικής ($20\mu\text{Pa}$ έως 10^8Pa), έχει θεσπιστεί η χρήση λογαριθμικών κλιμάκων με σκοπό την ευκολότερη διαχείριση των μεγεθών αυτών. Συνεπώς, για την μέτρηση των μονάδων της ακουστικής χρησιμοποιούνται οι λογαριθμικές μονάδες που ονομάζονται στάθμες (levels). Μια αντίστοιχη μονάδα είναι η Decibel [40]. Η μονάδα Decibel ορίζεται ως το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου με βάση το δέκα μιας αδιάστατης ποσότητας. Γενικά, η μονάδα Decibel, για ενεργειακά μεγέθη, ορίζεται από την σχέση:

$$A = 10 \log \frac{Q}{Q_{ref}}$$

Όπου Q_{ref} είναι η τιμή αναφοράς της ποσότητας Q η οποία μπορεί να συμβολίζει οποιαδήποτε ποσότητα, όπως για παράδειγμα ισχύς, ένταση, πίεση κ.λπ. [41].

Οι βασικότερες ηχητικές στάθμες είναι:

- Η στάθμη πίεσης ήχου (SPL-Sound Pressure Level) η οποία ορίζεται από την σχέση:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2} \quad \text{ή} \quad L_p = 20 \log \frac{p}{p_{ref}}$$

Όπου p η πίεση του ήχου σε κάποιο σημείο και p_{ref} η πίεση αναφοράς $20\mu\text{Pa}$ [42].

- Η στάθμη έντασης ήχου (Sound Intensity Level) η οποία ορίζεται από την σχέση:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}$$

Όπου I_{ref} η ένταση αναφοράς η οποία προκύπτει από την σχέση:

$$I_{ref} = \frac{p_{ref}^2}{(pc)_{ref}} = \frac{(20\mu\text{Pa})^2}{400\text{Rayls}} = 1 \text{ pW} / \text{m}^2 \quad [43]$$

- Η στάθμη ισχύος ήχου (Sound Power Level) η οποία ορίζεται από την σχέση:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_{ref}}$$

Όπου W_{ref} η ισχύς αναφοράς που προκύπτει από την σχέση:

$$W_{ref} = I_{ref} S_{ref} = 1 \text{ pW} / \text{m}^2 \cdot 1 \text{ m}^2 = 1 \text{ pW} \quad [42]$$

- Η ισοδύναμη ηχοστάθμη L_{eq} η οποία εκφράζει την στάθμη που θα πρέπει να έχει ένας σταθερής στάθμης ήχος που περικλείει την ίδια ακουστική ενέργεια με τον κυμαινόμενο ορίζεται από την σχέση:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt$$

Όπου T ο χρόνος παρατήρησης και $L(t)$ η στιγμιαία στάθμη θορύβου μετρούμενη σε dB [44].

1.3.2 Ζώνες Συχνότητων

Οι ακουστικές ιδιότητες των υλικών αλλά και η απόκριση ενός τυπικού ακουστικού συστήματος (πηγή-μέσο διάδοσης-δέκτης) δεν είναι ούτε σταθερή ούτε γραμμική συγκριτικά με την συχνότητα [45]. Συνεπώς, για την μελέτη ενός ακουστικού φαινομένου απαιτείται η μελέτη σε όλες τις συχνότητες του ακουστικού φάσματος. Ωστόσο, η μελέτη αυτή είναι αρκετά χρονοβόρα και για αυτό τον λόγο όλη η περιοχή συχνοτήτων χωρίζεται σε διαδοχικές περιοχές που ονομάζονται ζώνες συχνοτήτων ή φασματικές ζώνες [10]. Οι σπουδαιότερες ζώνες συχνοτήτων είναι οι οκτάβες, οι τριτοοκτάβες και οι δεκατοοκτάβες. Αναλυτικότερα, σε μια ζώνη συχνοτήτων f_1 και f_2 , έχουμε οκτάβες ($1/1$ oct) όταν $\frac{f_2}{f_1} = 2$, τριτοοκτάβες ($1/3$ oct) όταν $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/3}$ και δεκατοοκτάβες όταν $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/10}$ και γενικά $1/N$ οκτάβες όταν $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/N}$ [46]. Η εκλογή των οκτάβων δεν είναι αυθαίρετη αλλά τυποποιημένη από διάφορους οργανισμούς αναλόγως την χώρα. Στην Ελλάδα ισχύουν οι κανονισμοί που έχει θεσπίσει ο ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης) και ο ISO (International Standard Organization) που ισχύει γενικά στην Ευρώπη.

1.4 Θόρυβος

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, ο ήχος αποτελεί ένα είδος διαταραχής των μορίων του αέρα κατά την οποία μεταφέρεται πληροφορία την οποία ο δέκτης μπορεί να ερμηνεύσει κατάλληλα. Σε ένα τυπικό ακουστικό σύστημα, ο πομπός (λ.χ. ηχείο) στέλνει ένα ακουστικό σήμα και αναλόγως το μέσο διάδοσης το σήμα φτάνει στον δέκτη (π.χ. ακροατής) όπου ιδανικά μπορεί να ερμηνεύει την πληροφορία που έχει στείλει ο πομπός. Ωστόσο, ένα τέτοιο σύστημα δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες εξαιτίας ενός προσθετικού σήματος το οποίο ονομάζεται θόρυβος. Ο θόρυβος επομένως είναι ένα ανεπιθύμητο σήμα το οποίο εισάγεται σε κάθε ηλεκτρακουστικό σύστημα και αλλοιώνει την μεταδιδόμενη πληροφορία. Οι θόρυβοι χωρίζονται μεταξύ τους ανάλογα με την φασματική τους πυκνότητα.

1.4.1 Λευκός Θόρυβος

Ο λευκός θόρυβος (white noise) ορίζεται ως ο ήχος του αθροίσματος όλων των πιθανών συχνοτήτων. Έχει συνεχές ηχητικό φάσμα σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων και σταθερή φασματική πυκνότητα,

όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.10Α [47]. Κατά μέσο όρο, σε μια περιοχή συχνοτήτων με εύρος ζώνης Δf έχει παντού την ίδια ποσότητα ισχύος [4]. Συνεπώς ισχύει:

$$p_f^2 = \text{σταθερό} \quad [48]$$

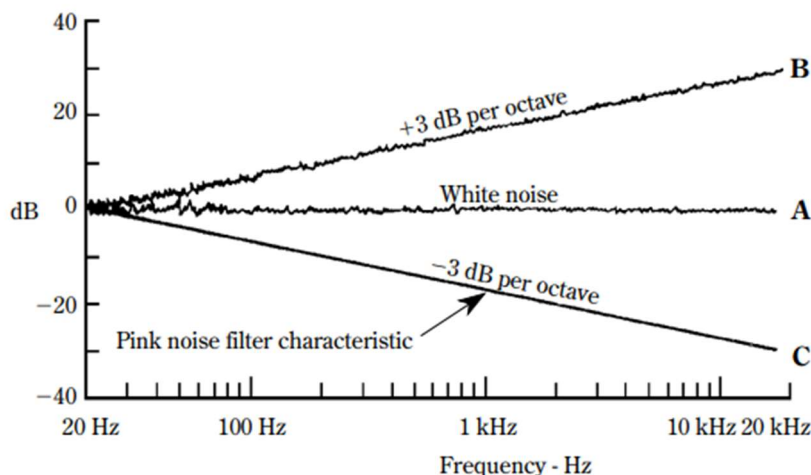
Το εύρος αυτό για διαδοχικές οκτάβες διπλασιάζεται σύμφωνα με τον ορισμό συνεπώς η στάθμη ζώνης του λευκού θορύβου θα παρουσιάζει μια αύξηση +3dB/οκτάβα. Επομένως, αν αποτυπωθεί σε ένα FFT (Fast Fourier Transform) θα εμφανιστεί ως ευθεία γραμμή [49].

1.4.2 Ροζ Θόρυβος

Ο ροζ θόρυβος ορίζεται ως ο θόρυβος που έχει συνεχές ηχητικό φάσμα με σταθερή ηχητική ισχύ σε κάθε φασματική ζώνη σταθερού σχετικού ζωνικού εύρους [50]. Συνεπώς ισχύει:

$$p_f^2 = \frac{k}{f}$$

Όπου k σταθερά [48]. Ο ροζ θόρυβος είναι θόρυβος που έχει την ίδια μέση ισχύ σε κάθε ζώνη οκτάβας ή τριτοοκτάβας. Καθώς κάθε επόμενη οκτάβα ενσωματώνει διαδοχικά μεγαλύτερες περιοχές συχνοτήτων, ο ροζ θόρυβος έχει μεγαλύτερη ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες. Πιο διεξοδικά, ο ροζ θόρυβος προσδιορίζεται ως θόρυβος με μεγαλύτερη ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες με συγκεκριμένη κλίση -3dB/οκτάβα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.10C. Η κατανομή της ενέργειας του ροζ θορύβου προσεγγίζει περισσότερο τον τρόπο που το ανθρώπινο αυτί συλλαμβάνει υποκειμενικά τους ήχους [10].



Εικόνα 1.10 Χαρακτηριστικές φίλτρων λευκού θορύβου, ροζ θορύβου και αναλυτή τυχαίου θορύβου του οποίου το εύρος ζώνης διέλευσης ισούται με ένα ποσοστό της συχνότητας στην οποία είναι συντονισμένος [19]

Γενικά, ο ροζ θόρυβος χρησιμοποιείται συχνά για ακουστικές μετρήσεις, ενώ ο λευκός θόρυβος για ηλεκτρικές μετρήσεις [49].

1.4.3 Brownian Θόρυβος

Ο Brownian θόρυβος, επίσης γνωστός και ως Κόκκινος θόρυβος, είναι ο τύπος θορύβου που παράγεται από την κίνηση Brown¹. Η φασματική πυκνότητα του είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας γεγονός το οποίο συνεπάγεται με μεγαλύτερη ένταση του θορύβου σε

¹ Η κίνηση Brown προέρχεται από τον Robert Brown ο οποίος κατέγραψε την ακανόνιστη κίνηση για πολλαπλούς τύπους σωματιδίων στο νερό [51].

χαμηλότερες συχνότητες συγκριτικά με τον ροζ θόρυβο. Αναλυτικότερα, παρατηρείται μια κλίση 6dB/oct και κατά το άκουσμα του έχει αποσβεσμένη ποιότητα σε σύγκριση με τον λευκό θόρυβο και τον ροζ θόρυβο [51]. Η κίνηση Brown έχει κατανομή πιθανότητας Gauss, ωστόσο, ο κόκκινος θόρυβος μπορεί να ισχύει σε οποιοδήποτε σήμα με το φάσμα συχνοτήτων $\frac{1}{f^2}$ [52].

1.4.4 Άλλοι Τύποι Θορύβου

παραπάνω περιεγράφηκαν ορισμένοι από τους πιο γνωστούς τύπους θορύβου. Όμως στην μηχανική του ήχου, οι επιστήμονες έχουν θεσπίσει και άλλους τύπους θορύβων με σκοπό την διευκόλυνση των μελετών τους και τον διαχωρισμό των θορύβων με βάση το φάσμα ισχύος τους. Έτσι, προκύπτουν τέσσερεις ακόμα τύποι θορύβου:

- Μπλε Θόρυβος: αποτελεί τον θόρυβο του οποίου η πυκνότητα ισχύος αυξάνεται κατά 3dB/oct με αυξανόμενη συχνότητα [53].
- Ιώδες Θόρυβος: αποτελεί τον θόρυβο του οποίου η πυκνότητα ισχύος αυξάνεται κατά 6dB/oct με αυξανόμενη συχνότητα [54].

1.5 Ακουστική Ανοιχτών Χώρων

Οι αρχιτέκτονες συχνά επικεντρώνονται στον σχεδιασμό εντυπωσιακών κτιρίων και αιθουσών που αρκετές φορές προορίζονται για αίθουσες συναυλιών, μουσικές παραστάσεις, όπερα, εκκλησίες, θέατρα κ.λπ. Συνεπώς, η σωστή ακουστική σχεδίαση ενός τέτοιου χώρου, με καλή κατανομή ήχου είναι εξαιρετικά σημαντική [55] [56]. Σε αντίθεση με τις αίθουσες συναυλιών όπου απαιτείται η καλύτερη δυνατή ακουστική σχεδίαση του χώρου, στην περίπτωση κεντρικών δρόμων, γενικότερα περιοχών με υψηλή ηχορύπανση στόχος είναι η, όσο το δυνατό περισσότερη, μείωση του εκπεμπόμενου θορύβου. Όταν πρόκειται για τους εσωτερικούς χώρους ενός κτιρίου δεν πρέπει να είναι μονάχα εμφανισιακά εντυπωσιακοί, αλλά χρειάζεται επίσης να είναι ακουστικά ορθά σχεδιασμένοι. Η δημιουργία ενός ευχάριστου ακουστικού περιβάλλοντος είναι το ίδιο σημαντική με την δημιουργία ενός οπτικά ελκυστικού περιβάλλοντος με σκοπό την άνεση του κάθε ακροατή που βρίσκεται στον χώρο αυτό. Δωμάτια ή χώροι με κακή ή λανθασμένη ακουστική σχεδίαση μπορούν να προκαλέσουν δυσφορία, ζάλη και συνεχή έκθεση σε υπερβολική ποσότητα ανεπιθύμητου ήχου που θα επηρεάσει την ανθρώπινη υγεία σωματικά και ψυχολογικά [57]. Συνεπώς, η σωστή ακουστική σχεδίαση ενός χώρου είναι ζωτικής σημασίας για την ανθρώπινη υγεία και ψυχολογία. Για την σχεδίαση ενός τέτοιου χώρου όμως, προηγείται η μελέτη και κατανόηση των κυματικών φαινομένων του ήχου σε αντίστοιχους χώρους.

1.5.1 Ανάκλαση

Υποθέτοντας ότι μια πηγή ήχου εκπέμπει σε ένα δωμάτιο, ο ήχος ταξιδεύει ακτινικά προς όλες τις κατευθύνσεις. Καθώς τα ηχητικά κύματα συναντούν εμπόδια ή επιφάνειες, όπως για παράδειγμα τοίχους, η κατεύθυνση τους αλλάζει δηλαδή ανακλώνται [19]. Μια σημαντική παράμετρος του φαινομένου της ανάκλασης είναι ο συντελεστής ανάκλασης a_r . Ο συντελεστής ανάκλασης αντιπροσωπεύει τον λόγο της ανακλώμενης, από την επιφάνεια ανάκλασης, ηχητική ενέργεια (W_r) προς την προσπίπτουσα (W_i):

$$a_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad [58]$$

Η ανάκλαση του ήχου από εμπόδια εξαρτάται από το σχήμα, το υλικό των εμποδίων, την γωνία πρόσπτωσης και πολλές άλλες παραμέτρους [59]. Επομένως, για την σωστή μελέτη του φαινομένου της ανάκλασης πρέπει να αναλυθεί η κάθε επιφάνεια ξεχωριστά.

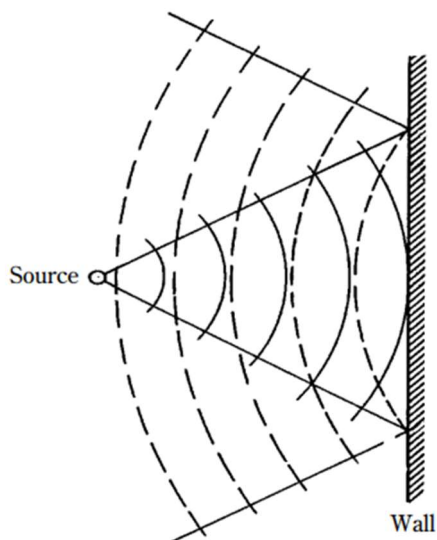
1.5.1.1 Ανάκλαση από επίπεδες επιφάνειες

Το φαινόμενο της ανάκλασης ενός ηχητικού κύματος από μια επίπεδη επιφάνεια είναι απλό. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.11 τα σφαιρικά μέτωπα του κύματος (συνεχείς γραμμές) προσπίπτουν στην άκαμπτη επιφάνεια και ύστερα τα ανακλώμενα μέτωπα του κύματος (διακεκομμένες γραμμές) επιστρέφουν προς την πηγή. Ο τύπος αυτός της ανάκλασης ονομάζεται κατευθυνόμενη ανάκλαση (specular reflection) και είναι παρόμοιος με την ανάκλαση του φωτός σε ένα κάτοπτρο [10].

Υπάρχουν πολλά μοντέλα τα οποία περιγράφουν το φαινόμενο της ηχητικής ανάκλασης. Παρ' όλα αυτά ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων βασίζεται στην εξίσωση Helmholtz-Kirchhoff:

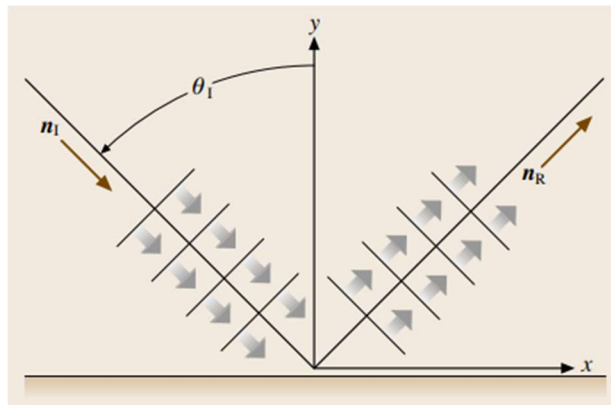
$$\Delta p(r) + k^2 p(r) = -q(r)$$

Όπου $p(r)$ είναι η ακουστική πίεση, $q(r)$ είναι η συνάρτηση που χαρακτηρίζει την πηγή ήχου, k είναι ο αριθμός του κύματος και Δ είναι ο τελεστής Laplace. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι, εφαρμόζοντας την εξίσωση Helmholtz-Kirchhoff σε πιο πολύπλοκα συστήματα είναι εξαιρετικά δύσκολο. Γι' αυτό τον λόγο εμφανίστηκαν ορισμένες απλοποιήσεις και προσπάθειες προσέγγισης των τύπων. Οι πιο συχνές προσεγγίσεις είναι η προσέγγιση Fresnel-Kirchhoff και κυριότερα η απλοποίησή της η οποία προτείνεται από τον Rendel (1986, 1990) [60].



Εικόνα 1.11 Ανάκλαση ήχου από σημειακή ηχητική πηγή από μια επίπεδη επιφάνεια [10]

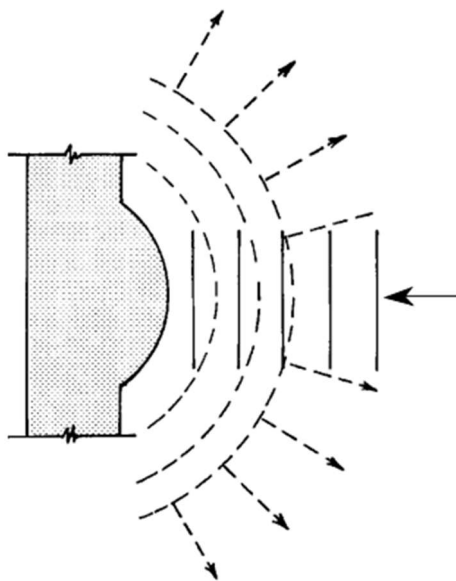
Κατά το φαινόμενο της ανάκλασης, το εισερχόμενο ηχητικό κύμα προσπίπτει πάνω στην ανακλαστική επιφάνεια με μια γωνία θ_1 . Σύμφωνα με τον νόμο των κατόπτρων, η γωνία πρόσπτωσης (θ_1) ισούται με την γωνία ανάκλασης (Εικόνα 1.12) [4].



Εικόνα 1.12 Ανάκλαση του ήχου από επίπεδη επιφάνεια στην οποία αναγράφονται η γωνία πρόσπτωσης και η κατεύθυνση του ανακλώμενου κύματος [4]

1.5.1.2 Ανάκλαση από κυρτές επιφάνειες

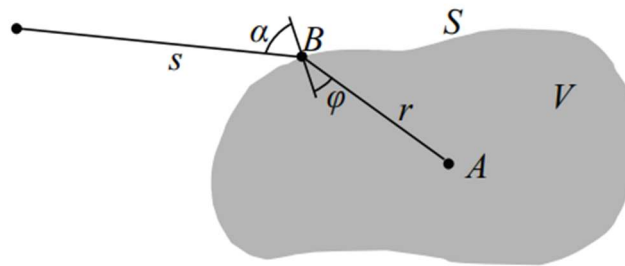
Ένας εύκολος τρόπος μελέτης των φαινομένων του ήχου είναι η θεώρησή του ως ακτίνες. Ειδικότερα, κάθε ακτίνα αντιστοιχεί σε μια δέσμη ακτινικά διαδιδόμενου ήχου με σφαιρικά μέτωπα κύματος [10]. Τα σφαιρικά μέτωπα κύματος τείνουν να γίνονται επίπεδα σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή. Γι' αυτόν τον λόγο ο ήχος που θα προσπίπτει στις διάφορες επιφάνειες θεωρείται ως επί το πλείστον επίπεδα μέτωπα κύματος. Η ανάκλαση των επίπεδων μετώπων κύματος του ήχου από μια κυρτή ανομοιόμορφη κυρτή επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα την σκέδαση της ηχητικής ενέργειας σε διάφορες κατευθύνσεις όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.13 [19].



Εικόνα 1.13 Ανάκλαση επίπεδων ηχητικών κυμάτων από κυρτή ανομοιόμορφη επιφάνεια [19]

Γενικά, η βασική αρχή υπολογισμού της ηχητικής πίεσης πάνω σε μια ανομοιόμορφη επιφάνεια βασίζεται στην αρχή του Huygens. Η αρχή του Huygens δηλώνει ότι κάθε σημείο στο πρωτεύον μέτωπο του κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως πομπός δευτερευόντων κυμάτων. Τα δευτερεύοντα κύματα συνδυάζονται και δημιουργούν ένα νέο μέτωπο κύματος προς την κατεύθυνση διάδοσης. Σύμφωνα με το θεώρημα του Green και την εξίσωση Helmholtz, ο Kirchhoff διατύπωσε την ακόλουθη σχέση για την ηχητική πίεση σε ένα σημείο A όγκου V σε μια επιφάνεια S (για ημιτονοειδές σήμα με γωνιακή συχνότητα ω):

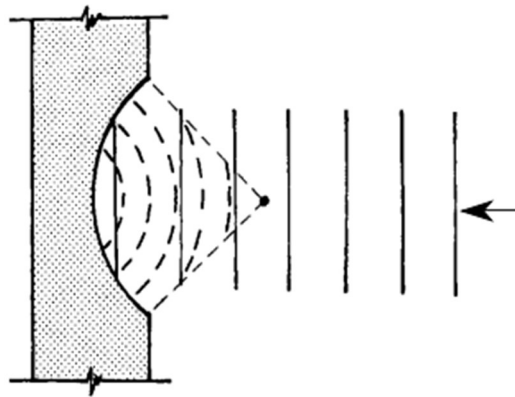
$$p(A, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_S (p(B, \omega) \frac{1+jkr}{r} \cos \varphi \frac{e^{-jkr}}{r} + j\omega \rho v_n(B, \omega) \frac{e^{-jkr}}{r}) dS \quad [61]$$



Εικόνα 1.14 Αναπαράσταση συμβόλων εξίσωσης ηχητικής πίεσης που διατύπωσε ο Kirchhoff [61]

1.5.1.3 Ανάκλαση από κοίλες επιφάνειες

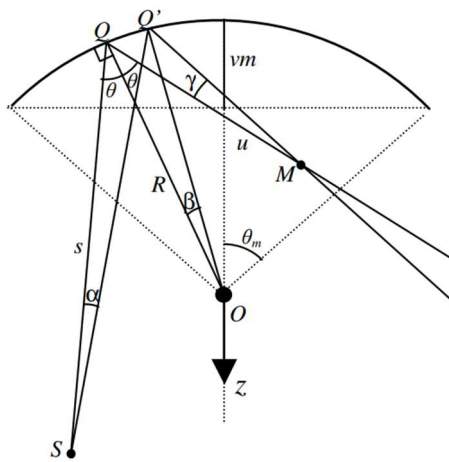
Είναι γνωστό ότι όταν επίπεδα ηχητικά κύματα προσπίπτουν πάνω σε μια κοίλη ανομοιόμορφη επιφάνεια τείνουν να συγκεντρώνονται σε ορισμένες θέσεις, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.15 [62]. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προβλεφθεί μέσω της ανίχνευσης ακτινών εφόσον η γεωμετρία της καμπυλωμένης επιφάνειας είναι δεδομένη [63]. Κοίλες επιφάνειες μπορούν να φανούν εξαιρετικά χρήσιμες σε πολλές εφαρμογές εξαιτίας αυτού του φαινομένου. Για παράδειγμα, μια συνήθης εφαρμογή είναι η κατασκευή μικροφώνων υψηλής κατευθυντικότητας τοποθετώντας το μικρόφωνο στο σημείο συγκέντρωσης του ήχου [10].



Εικόνα 1.15 Ανάκλαση επίπεδων ηχητικών κυμάτων που προσπίπτουν σε μια κοίλη ανομοιόμορφη επιφάνεια [19]

Σύμφωνα με την Εικόνα 1.16, η ηχητική πίεση σε ένα σημείο Q πάνω σε μια κοίλη επιφάνεια, πλήρως ανακλώμενη, με ακτίνα R εξαιτίας ανάκλασης ηχητικών κυμάτων από μια πηγή S σε απόσταση s, μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$p(s) = \hat{p} \frac{e^{-jks}}{s} [64]$$

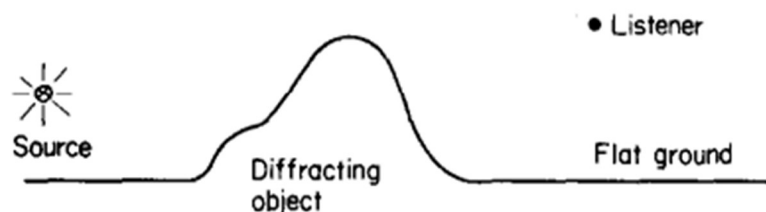


Εικόνα 1.16 Γεωμετρικό σχήμα στο οποίο διακρίνεται μια κοίλη επιφάνεια με την θέση της ηχητικής πηγής S και την θέση του σημείου συγκέντρωσης των ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων M [64]

1.5.2 Περίθλαση

Είναι γνωστό ότι όταν το φως περνά από την άκρη ενός αντικειμένου, μια σκιά δημιουργείται από πίσω του. Σύμφωνα με τον Grimaldi (1919-1963), η μετάβαση της διάδοσης του φωτός από το φως στην σκιά πραγματοποιείται σταδιακά. Αυτή η σταδιακή μετάβαση ονομάζεται περίθλαση [65]. Το αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται και στην διάδοση του ήχου. Για παράδειγμα, η μουσική η οποία αναπαράγεται σε ένα δωμάτιο ενός σπιτιού μπορεί να ακουστεί και στα υπόλοιπα δωμάτια. Ωστόσο, θα ακουστεί διαφορετικά στα απομακρυσμένα σημεία του σπιτιού. Πιο συγκεκριμένα, οι χαμηλές συχνότητες θα είναι ενισχυμένες γεγονός το οποίο οφείλεται στα μεγαλύτερα μήκη κύματος που χαρακτηρίζουν τις χαμηλές συχνότητες και συνεπώς περιθλώνται ευκολότερα γύρω από γωνίες και εμπόδια [10].

Το φαινόμενο της περίθλασης του ήχου γύρω εξαιτίας ενός εμποδίου (Εικόνα 1.17) παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον από αρκετούς μηχανικούς που ασχολούνται με την φραγμών ως μέσο μείωσης του θορύβου, όπως για παράδειγμα θόρυβος εξαιτίας της κυκλοφορίας, εργοστασίων ή αεροσκαφών [66]. Η γεωμετρική ακουστική προσέγγιση είναι μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις της θεωρίας της περίθλασης εξαιτίας της σχετικής ευκολίας στην αριθμητική εφαρμογή και η ακρίβειά της είναι επαρκής από άποψη των εφαρμογών μηχανικής [67]. Μια πιο τυποποιημένη προσέγγιση έχει προκύψει από τον Maekawa ([68]) κατά την οποία αποδίδεται η εξασθένιση στην περιοχή σκίασης για ένα ημιάπειρο λεπτό ανακλαστικό φράγμα χρησιμοποιώντας μια αδιάστατη παράμετρο, τον αριθμό Fresnel [66].



Εικόνα 1.17 Παράδειγμα περίθλασης του ήχου εξαιτίας εμποδίου (diffracting object) ανάμεσα από την ηχητική πηγή (source) και τον ακροατή (listener) [66]

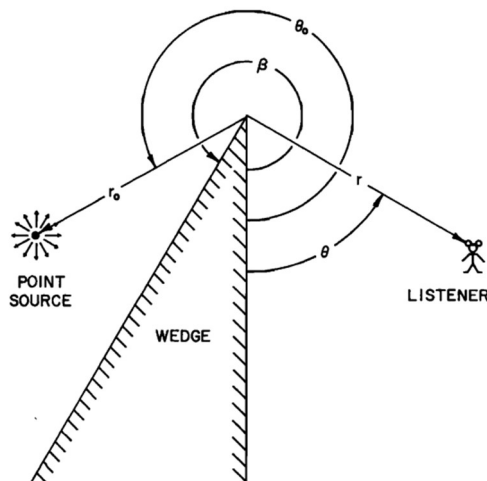
Έστω μια ηχητική πηγή, ένας ακροατής και ανάμεσά τους ένα άκαμπτο εμπόδιο του οποίου η άκρη βρίσκεται κατά μήκος του άξονα z , όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.17. Χρησιμοποιούμε κυλινδρικές συντεταγμένες (r, θ, z) με δύο όψεις να λαμβάνονται για $\theta = 0$ και $\theta = \beta$ έτσι ώστε η

περιοχή έξω από το εμπόδιο να εκτείνεται από $\theta = 0$ έως $\theta = \beta$ (με $\beta > \pi$). Η πηγή του ήχου είναι μια αρμονική πηγή με γωνιακή συχνότητα ω και κυματάριθμο $k = \omega/c$. Η πηγή αυτή βρίσκεται στο σημείο (r_0, θ_0, z_0) και έχει ισχύ τέτοια ώστε το πεδίο ακουστικής πίεσης p να δίνεται από τον τύπο e^{ikr}/R όπου R η απόσταση από την πηγή η οποία είναι μικρότερη από την απόσταση της πηγής από την άκρη του εμποδίου. Η ακουστική πίεση αντιστοιχεί στην εξίσωση του Green $G(x|x_0)$ η οποία ικανοποιεί την εξίσωση Helmholtz με τον όρο $-4\pi\delta(x - x_0)$ στην δεξιά πλευρά των οριακών συνθηκών όπου $\partial G/\partial\theta = 0$ για $\theta = 0$ και $\theta = \beta$ αντίστοιχα. Ως προς την περίπτωση μας, οι Ambaud και Bergassoli [69] καταλήγουν στην παρακάτω μορφή:

$$G(x|x_0) = \sum_{i=1}^4 [G(\zeta_i)U(\pi - \zeta_i) + V(\zeta_i)]$$

όπου $\zeta_1 = |\theta - \theta_0|$, $\zeta_2 = 2\beta - |\theta - \theta_0|$, $\zeta_3 = \theta + \theta_0$, $\zeta_4 = 2\beta - |\theta + \theta_0|$ και $U(\zeta)$ είναι η συνάρτηση Heaviside. Ο όρος $G(\zeta_i)U(\pi - \zeta_i)$ για $i = 1, 3, 4$ αντιστοιχεί σε κύματα με γεωμετρικά κριτήρια όπου για $i = 1$ άμεσο κύμα, $i = 3$ ανακλώμενο κύμα από την πλευρά όπου $\theta = 0$ και $i = 4$ ανακλώμενο κύμα από την πλευρά όπου $\theta = \pi$. Ο όρος $G(\zeta_2)U(\pi - \zeta_2)$ είναι πάντα μηδέν αφού το ζ_2 είναι μεγαλύτερο από π αλλά εισάγεται στην εξίσωση για λόγους συμμετρίας. Ο όρος $G(\zeta)$ αποτελεί ένα σφαιρικά διασκορπιζόμενο κύμα που γενικά δηλώνεται με τον όρο e^{ikr}/R όπου:

$$R = [r^2 + r_0^2 + (z - z_0)^2 - 2rr_0 \cos \zeta]^{1/2} \quad [70]$$



Εικόνα 1.18 Περίθλαση ηχητικών κυμάτων εξαιτίας εμποδίου [70]

1.5.3 Διάθλαση

Αποτελεί κοινή γνώμη η θεώρηση ότι η διαδρομή που ακολουθεί ο ήχος είναι ευθεία. Ασφαλώς, κατά την διάδοσή του διαρρέει γύρω από κτίρια, ανακλάται από τοίχους όμως ως επί το πλείστον ο άνθρωπος είναι ικανός να εντοπίσει την κατεύθυνση της πηγής του ήχου. Εάν παραχθεί ένας δυνατός θόρυβος, όπως για παράδειγμα ο ήχος από ένα κανόνι και φτάσει στον ακροατή ασυνήθιστα αδύναμος τότε πιθανόν να είναι το αποτέλεσμα κάποιας άλλης απώλειας ενέργειας κατά την μετάδοση του ήχου. Τι γίνεται όμως όταν η διαδρομή του ήχου δεν είναι ευθεία; Τι θα γινόταν αν ο ήχος καμπυλωνόταν και περνούσε πάνω από τον ακροατή; Όσο παράξενη κι αν ακούγεται αυτή η θεώρηση είναι πολύ πιθανή. Η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται κυρίως από το μέσο διάδοσης αλλά και από την θερμοκρασία και την ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου. Οι παράμετροι αυτοί είναι που

προκαλούν την κάμψη των ηχητικών κυμάτων προς τα «εμπρός» ή προς τα «πίσω» και η μεταβολή αυτή της κατεύθυνσης του ήχου ονομάζεται διάθλαση [71].

Το ατμοσφαιρικό επιφανειακό στρώμα (περίπου 50 έως 100 m πάνω από το έδαφος) χαρακτηρίζεται από έντονες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, την θερμοκρασία και την υγρασία. Αυτές τα χαρακτηριστικά διαθλούν τον ήχο, προκαλώντας μια σημαντική μείωση ή αύξηση των επιπέδων του ήχου σε σχέση με μια ομοιογενή ατμόσφαιρα [72]. Ως προς την επίδραση του ανέμου στον ήχο είναι κοινής παρατήρησης. Για παράδειγμα, ένας δυνατός ήχος όπως εκπυρσοκρότηση ενός όπλου ενάντια σε δυνατό άνεμο δεν θα ακουγόταν σε απόσταση 500m όμως εάν συνέβαινε το αντίστοιχο χωρίς δυνατό αέρα θα ακουγόταν σε απόσταση από 16 έως 32km. Όμως, η μεταβολή του ήχου δεν είναι μόνο εμφανής στους δυνατούς ανέμους. Όλοι οι αθλητές γνωρίζουν τη σημασία του να μπαίνουν στο γήπεδο χωρίς δυνατό αέρα. Ωστόσο, σε ήπιους ανέμους το αποτέλεσμα δεν είναι τόσο σίγουρο όσο στους δυνατούς ανέμους (εξαρτάται πάντα η ακουστική ικανότητα του ακροατή) καθώς ήχοι από μικρή απόσταση συχνά φαίνονται να εντείνονται παρά να μειώνονται έναντι των πολύ ελαφριών ανέμων [73]. Υπάρχουν πολλές ενδιαφέρον πτυχές στην διάθλαση ενός επίπεδου ηχητικού κύματος εξαιτίας σταδιακών αλλαγών στις ακουστικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν εύκολα να υπολογιστούν βασίζοντας στην θεώρηση ότι οι μεταβολές της ταχύτητας του ήχου είναι μια γραμμική συνάρτηση της θέσης, όταν αυτές οι αλλαγές συμβαίνουν σε απόσταση που εκτείνεται σε πολλά μήκη κύματος [74]. Η επίδραση όμως του ανέμου, της θερμοκρασία και γενικότερα των μετεωρολογικών φαινομένων στον ήχο αναλύεται και μελετάται παρακάτω.

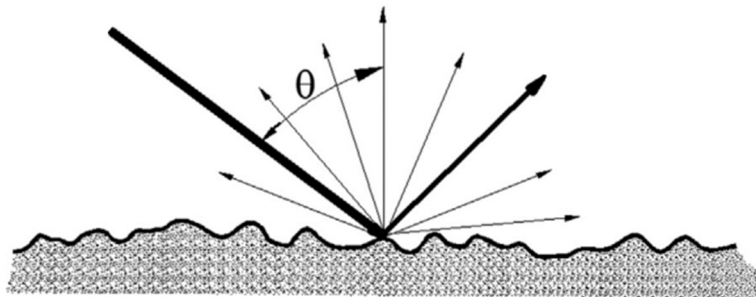
Εκτός από τον αέρα και την θερμοκρασία υπάρχει άλλος ένας σημαντικός παράγοντας διάθλασης του ήχου. Η ατμόσφαιρα όταν επικρατεί ομίχλη αποτελείται από ένα μείγμα από σταγόνες νερού, αερίου και υδρατμών με ακουστικές ιδιότητες οι οποίες διαφέρουν από τον καθαρό αέρα. Κατά το φαινόμενο της ομίχλης, οι θερμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του αέρα και των σταγόνων νερού έχουν ως αποτέλεσμα την εξάτμιση ή την συμπύκνωση στην επιφάνεια των σταγονιδίων. Συνεπώς, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε μάζα των σταγόνων του νερού, ο συντελεστής απόσβεσης του ήχου μειώνεται. Επομένως, εάν τοποθετηθεί μια πηγή ήχου σε μια περιοχή όπου επικρατεί ομίχλη θα ακουστεί πιο καθαρά συγκριτικά αν δεν υπήρχε ομίχλη [75]. Γενικά το φαινόμενο αυτό έχει εκμεταλλευτεί σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, στις Η.Π.Α. κατά την απογείωση ενός διαστημικού λεωφορείου, ελευθερώνονται περίπου 1135m³ νερού με σκοπό την καταστολή της ισχύος των ηχητικών κυμάτων που ανακλώνται από το έδαφος και παράγονται από τις εξατμίσεις του διαστημοπλοίου [76] [77].

1.5.4 Σκέδαση

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια μπορεί να ανακλαστεί, να διαδοθεί και να απορροφηθεί. Εάν όμως η επιφάνεια στην οποία προσπίπτει το ηχητικό κύμα δεν είναι ομαλή τότε μπορεί να ανακλαστεί προς διάφορες κατευθύνσεις, δηλαδή να προκαλέσει σκέδαση του ήχου [78]. Η σκέδαση η οποία προκαλείται εξαιτίας πρόσπτωσης των ηχητικών κυμάτων σε ανώμαλη επιφάνεια (Εικόνα 1.19) αποτελεί έναν μηχανισμό απώλειας (εξασθένισης), αντηχητικής παρεμβολής και διακύμανσης. Ένας συνήθης τύπος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ανακλαστικότητας μιας ανώμαλης επιφάνειας είναι:

$$R'(\theta) = R(\theta)\exp\left(-\frac{\Gamma^2}{2}\right)$$

Όπου $R(\theta)$ ο συντελεστής ανάκλασης της εάν η επιφάνεια ήταν ομαλή και Γ η παράμετρος τραχύτητας του Rayleigh που ορίζεται ως $\Gamma = 2k\sigma \sin \theta$ όπου $k = 2\pi/\lambda$ όπου λ το μήκος κύματος και σ το ύψος της τραχύτητας (rms τιμή) [79].



Εικόνα 1.19 Σκέδαση ηχητικού κύματος από τραχεία επιφάνεια [78]

Το διάσπαρτο πεδίο που δημιουργείται κατά την σκέδαση συχνά αναφέρεται και ως αντήχηση. Η ισχύς σκέδασης (S) της επιφάνειας (S), του πυθμένα μιας θάλασσας (B) ή του όγκου (V) αποτελεί μια απλή παραμετροποίηση της αντήχησης και ορίζεται ως η αναλογία των dB του ήχου που σκεδάζεται από μια μονάδα επιφάνειας ή όγκου που αναφέρεται ως I_{scat} και υποδηλώνει την ένταση του ήχου που είναι διάσπαρτη από μια μοναδιαία επιφάνεια ή μια μονάδα όγκου που μετρείται σε απόσταση 1m από το ακουστικό κέντρο της επιφάνειας προς την ένταση του προσπίπτοντος κύματος I_{inc} :

$$S_{S,B,V} = 10 \log \frac{I_{scat}}{I_{inc}} [78] [4]$$

1.5.5 Φαινόμενο Doppler

Υποθέτοντας ότι ένα αντικείμενο κατευθύνεται προς έναν άνθρωπο, είναι ζωτικής σημασίας να το αντιληφθεί και να το αναγνωρίσει. Ακόμα κι αν δεν είναι έχει άμεση οπτική επαφή μαζί του, η επεξεργασία των ακουστικών πληροφοριών δίνει την δυνατότητα να αναγνωρίσει την κατεύθυνση των κινούμενων ήχων. Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί που μας επιτρέπουν κάτι τέτοιο με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο, οι οποίοι μπορεί να βασίζονται σε διαφορές των επιπέδων του ήχου ή σε διαφορές των χρονικών στιγμών των εισερχόμενων ήχων [80]. Ένας από αυτούς του μηχανισμούς είναι και το φαινόμενο Doppler.

Το φαινόμενο Doppler είναι η αντιληπτή μεταβολή της συχνότητας του ήχου που εκπέμπεται από μια πηγή η οποία κινείται σε σχέση με τον παρατηρητή. Για παράδειγμα, ο ήχος ενός αεροπλάνου καθώς πετάει από πάνω από έναν ακροατή γίνεται αισθητά πιο «μπάσα» (χαμηλότερης συχνότητας) όπως ακόμα και ο θόρυβος μιας σειρήνας ενός οχήματος έκτακτης ανάγκης καθώς περνάει γρήγορα δίπλα από έναν άνθρωπο. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Christian Doppler το 1842 και χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε πολλούς τομείς όπως για παράδειγμα στην ιατρική για την μέτρηση του αίματος στις αρτηρίες και στην αστυνομία για την μέτρηση της ταχύτητας των διερχόμενων αυτοκινήτων στους αυτοκινητοδρόμους [81] [82].

Εάν σε ένα σύστημα πηγής-παρατηρητή, η μεταξύ τους απόσταση αυξάνει, η παρατηρούμενη συχνότητα μειώνεται, ενώ όταν η απόσταση αυτή μειώνεται η παρατηρούμενη συχνότητα αυξάνεται. Γενικά, η παρατηρούμενη συχνότητα από τον παρατηρητή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f = \frac{c \pm u_r}{c \mp u_s} f_0$$

Όπου c η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο μέσο διάδοσης (π.χ. αέρας), f, f_0 η παρατηρούμενη και εκπεμπόμενη συχνότητα αντίστοιχα και u_r, u_s οι ταχύτητες του παρατηρητή και της πηγής αντίστοιχα. Τα πρόσημα λαμβάνονται υπόψιν ως εξής: Αρχικά, θεωρώντας την πηγή ακίνητη και ο παρατηρητής κινείται προς την πηγή παίρνουμε στον αριθμητή το θετικό πρόσημο, ενώ όταν ο παρατηρητής απομακρύνεται από την πηγή παίρνουμε το αρνητικό πρόσημο στον αριθμητή. Ύστερα, θεωρώντας τον παρατηρητή ακίνητο και η πηγή κατευθύνεται προς αυτόν στον παρονομαστή παίρνουμε αρνητικό πρόσημο, ενώ όταν η πηγή απομακρύνεται από τον παρατηρητή παίρνουμε θετικό πρόσημο στον παρονομαστή. Ωστόσο, αυτή η σχέση ισχύει μόνο όταν το μέσο διάδοσης είναι ο αέρας και γενικά το μέσο διάδοσης είναι σταθερό. Στην περίπτωση που το μέσο διάδοσης κινείται με ταχύτητα u_m η παραπάνω εξίσωση παίρνει την εξής μορφή:

$$f = \frac{c \pm u_m \pm u_r}{c \mp u_m \mp u_s} f_0$$

Όπου το θετικό πρόσημο στην σχέση $c \pm u_m$ λαμβάνεται όταν η ταχύτητα του ανέμου u_m και του ήχου c στην κατεύθυνση του παρατηρητή είναι ομόσημες [81] [83].

Μια σημαντική εφεύρεση η οποία βασίζεται στο φαινόμενο Doppler είναι η ανίχνευση χειρονομιών από τους υπολογιστές. Βασική αρχή της κατασκευής αυτής είναι η δημιουργία ενός μη ακουστού ήχου από τα ηχεία του υπολογιστή και εξαιτίας της ανάκλασης του ήχου από διάφορα κινούμενα αντικείμενα, όπως για παράδειγμα το χέρι ενός ανθρώπου, προκαλείται μεταβολής της συχνότητας και έτσι ο υπολογιστής αντιλαμβάνεται την κίνηση του χεριού. Αναλυτικότερα, όταν η αρχική πηγή (ηχεία) και ο ακροατής (μικρόφωνα) είναι ακίνητα και δεν υπάρχει καμία κίνηση δεν παρατηρείται αλλαγή συχνότητας. Όταν όμως ένας χρήστης κινεί το χέρι του τότε αυτό ανακλά τα κύματα προκαλώντας μια αλλαγή της συχνότητας [84]. Η συχνότητα αυτή μετριέται από τα μικρόφωνα του υπολογιστή και ταυτίζεται με την παραπάνω εξίσωση [85].

Παράλληλα, το φαινόμενο Doppler είναι ιδιαίτερα χρήσιμο και στον τομέα της ιατρικής [86]. Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές του φαινομένου είναι για την μέτρηση της ταχύτητας αλλά και της κατεύθυνσης του αίματος στις αρτηρίες [87]. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται μέσω του υπερηχογραφήματος Doppler κατά το οποίο εκπέμπονται υπερηχητικά κύματα και εξαιτίας των ερυθρών αιμοσφαιρίων² στο αίμα τα κύματα αυτά σκεδάζονται και συνεπώς προκαλείται μεταβολή της συχνότητας. Η αλλαγή της συχνότητας λόγω της σκέδασης ονομάζεται συχνότητα μετατόπισης Doppler και ισούται με την διαφορά της συχνότητας του εκπεμπόμενου υπερήχου και εκείνης των ήχων που επιστρέφουν [88].

1.6 Ηχορύπανση & Νομοθεσίες

Είναι πλέον γνωστό ότι η συνεχής έκθεση σε περιβάλλον με υψηλή ηχορύπανση μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Η ηχορύπανση ολοένα και αυξάνεται σε έκταση, συχνότητα αλλά και σοβαρότητα ως συνέπεια της ραγδαίας αύξησης πληθυσμού, της αστικοποίησης και της προόδου της τεχνολογίας [89] [90]. Ο θόρυβος ευθύνεται για πολλά υγειονομικά και ψυχολογικά προβλήματα όπως για παράδειγμα απώλεια ακοής, διαταραχή ύπνου

² Το αίμα αποτελείται από λευκά αιμοσφαίρια, ερυθρά αιμοσφαίρια και αιμοπετάλια. Τα ερυθρά αιμοσφαίρια είναι τα κυρίαρχα κύτταρα τα οποία προκαλούν σκέδαση [88].

και καρδιαγγειακές διαταραχές καθώς διαταράσσει την καθημερινότητα και την ισορροπία του τρόπου ζωής του ανθρώπου [91]. Συνεπώς, η κάθε χώρα έχει θεσπίσει ορισμένους κανόνες και νομοθεσίες με σκοπό να προφυλάξει τους πολίτες της από αντίστοιχες επιβλαβές συνθήκες.

Η στάθμη του ήχου αποτελεί την βασική μέτρηση από την οποία προκύπτουν όλες οι βιοφυσικές μετρήσεις για τις επιπτώσεις του θορύβου στον άνθρωπο. Από τα κυμαινόμενα επίπεδα ήχου προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \int_T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt$$

Όπου $L_{Aeq,T}$ η ισοδύναμη στάθμη ήχου για μια χρονική περίοδο T , όπου συνήθως είναι 24 ώρες (διάρκεια μιας ημέρας) ή 8 ώρες (διάρκεια μιας εργάσιμης ημέρας). Για λόγους αξιολόγησης της περιβαλλοντικής υγείας έχει θεσπιστεί η στάθμη ημέρας-νύχτας L_{dn} , η οποία ισοδυναμεί με την στάθμη ήχου 24 ωρών με τα επίπεδα ήχου κατά τη διάρκεια της νύχτας (11μ.μ-7π.μ) αυξημένα κατά 10 dB(A). Επίσης, χρησιμοποιείται μια ακόμα στάθμη, η στάθμη ημέρας-απογεύματος-νύχτας L_{den} η οποία έχει παρόμοιο τρόπο λειτουργίας, δηλαδή ισοδυναμεί με τα επίπεδα του ήχου το απόγευμα (7μ.μ-11μ.μ) τα οποία είναι αυξημένα κατά 5dB(A) και αυτά κατά την διάρκεια της νύχτας (11μ.μ-7π.μ) αυξημένα κατά 10dB(A). Οι συντελεστές προσαρμογής των 5dB(A) και 10dB(A) χρησιμοποιούνται με σκοπό να εξισορροπήσουν τον θόρυβο μεταξύ της ημέρας και της νύχτας καθώς ο θόρυβος το απόγευμα και την νύχτα είναι πιο ενοχλητικός από τον αντίστοιχο θόρυβο της ημέρας [90].

1.6.1 Επιπτώσεις Θορύβου στον Άνθρωπο

Υπάρχουν σημαντικές επιπτώσεις του θορύβου στον άνθρωπο. Μια από αυτές είναι η διαταραχή του ύπνου. Η διαρκή έκθεση σε θορυβώδες περιβάλλοντα διαταράσσει τον ύπνο, ανάλογα βέβαια με την ποσότητα του θορύβου που βιώνει ο κάθε άνθρωπος [92]. Είναι πιθανό να προκύψει διαταραχή του ύπνου εάν υπάρχουν περισσότερες από 50 ενοχλήσεις κατά την διάρκεια του ύπνου εξαιτίας θορύβου με μέγιστη τιμή θορύβου 50dBA (σε εσωτερικούς χώρους). Η έκθεση σε θόρυβο κατά την διάρκεια του ύπνου είναι ικανή να προκαλέσει αύξηση αρτηριακής πίεσης, καρδιακού ρυθμού καθώς επίσης παρενέργειες κατά την διάρκεια της ημέρας εξαιτίας του διαταραγμένου ύπνου [93]. Μάλιστα μελέτες έχουν αποδείξει ότι η μείωση των επιπέδων θορύβου σε εσωτερικούς έχει ως συνέπεια την αύξηση της ποσότητας του ύπνου REM³ και του ύπνου γενικά [94].

Συνεχίζοντας, ο θόρυβος αποτελεί την κύρια αιτία απώλειας ακοής. Η απώλεια ακοής εξαιτίας θορύβου μπορεί να προκληθεί είτε εξαιτίας μιας μακροχρόνιας έκθεσης σε περιβάλλοντα υψηλής ηχητικής πίεσης με μέγιστες τιμές SPL από 75dB έως 85dB, είτε από έκθεση σε έναν εξαιρετικά έντονο ήχο, όπως για παράδειγμα η εκπυρσοκρότηση ενός όπλου [91]. Ως συνέπεια της βαρηκοΐας που προκαλείται από τον θόρυβο είναι τις περισσότερες φορές η καταστροφή των τριχοειδών κυττάρων στο όργανο του Corti εντός του κοχλίου του αυτιού. Με την πάροδο του χρόνου, η συνεχής επαφή με υψηλά επίπεδα θορύβου είναι ικανή να οδηγήσει σε εξασθενημένη μετάδοση χαμηλών αλλά και υψηλών συχνοτήτων στον εγκέφαλο. Ο μέσος άνθρωπος έχει περίπου 16,000 τριχοτά κύτταρα στο όργανο του Corti, ενώ ένας άνθρωπος με οποιοδήποτε μετρήσιμο επίπεδο βαρηκοΐας

³ Ο ύπνος REM (Rapid Eye Movement) περιγράφει τις τυχαίες κινήσεις των ματιών του ανθρώπου κατά την διάρκεια του ύπνου. Θεωρείται κάτι θετικό για την υγεία του ανθρώπου καθώς ενισχύει την μνήμη, την συγκέντρωση και την πνευματική διαύγεια [201].

έχει από 30% έως 50% λιγότερα τριχωτά κύτταρα (Εικόνα 1.20). Συνεπώς, η καταστροφή των τριχοειδών κυττάρων που σχετίζεται με την απώλεια ακοής είναι μη αναστρέψιμη και δεν μπορεί να αποκατασταθεί με την χρήση ακουστικού βαρηκοΐας [95]. Η απώλεια της ακοής μπορεί να οδηγήσει και σε άλλα αποτελέσματα τα οποία επηρεάζουν την καθημερινότητα του κάθε ανθρώπου, όπως για παράδειγμα η αδυναμία κατανόησης της ομιλίας που μπορεί να μεταβεί σε πολύ σοβαρό κοινωνικό ζήτημα. Είναι ικανή επίσης να επηρεάσει την νοητική απόδοση και να μειώσει την προσοχή στο επάγγελμα του ασθενή. Έρευνες έχουν δείξει ότι η απώλεια ακοής ευθύνεται για τα ατυχήματα και τις πτώσεις με μέγιστη θνησιμότητα σε 10% με 20% σε 20 χρόνια [96].



Εικόνα 1.20 Υγιή (αριστερά) και κατεστραμμένα μερικώς (δεξιά) τριχοειδή κύτταρα κοχλία [50]

Η απώλεια ακοής εξαιτίας θορύβου είναι ένα πρόβλημα δημόσιας υγείας. Το GBD (Global Burden of Disease) το 2010 υπολόγισε ότι 1.3 δισεκατομμύρια έχουν προβλήματα ακοής εξαιτίας θορύβου και οι ερευνητές αξιολόγησαν την βαρηκοΐα ως το 13^ο σημαντικότερο παράγοντα για τα παγκόσμια χρόνια ζωής με αναπηρία [97]. Στις Η.Π.Α. και στην Ευρώπη το 26% των ενηλίκων έχει αμφίπλευρη απώλεια ακοής που τους διαταράσσει την ακοή τους σε θορυβώδη περιβάλλοντα και το 2% επιπλέον έχει σημαντικά μονομερή προβλήματα ακοής [91]. Παρόμοια προβλήματα έχουν και οι άνθρωποι στην Ασία [98]. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Π.Ο.Υ. (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας), το 10% του πληθυσμού εκτίθεται σε περιβάλλοντα με επίπεδα ηχητικής πίεσης ικανά να απώλεια ακοής [95].

Συνεχίζοντας, η έκθεση στον θόρυβο μπορεί να προκαλέσει αύξηση των καρδιακών παλμών, της αρτηριακής πίεσης και περιφερειακή αγγειοσυστολή τα οποία συνεπώς θα οδηγήσουν σε αυξημένη περιφερειακή αγγειακή αντίσταση. Όταν η έκθεση στον θόρυβο είναι σύντομη υπάρχει ταχεία εξοικείωση, ωστόσο σε συνεχή θόρυβο δεν ισχύει πάντα το ίδιο [99]. Παράλληλα, πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι τα άτομα τα οποία εκτίθενται σε θορύβους τουλάχιστον 85dB για αρκετά χρόνια έχουν υψηλότερη αρτηριακή πίεση από εκείνα τα οποία δεν εκτίθενται [100] [101]. Επίσης, μια έρευνα κατά την οποία μελετάται ο θόρυβος στα εργοστάσια κατέληξε στο γεγονός ότι εξαιτίας των επιπέδων θορύβου, παρατηρούνταν αυξημένη συστολική και διαστολική πίεση σε όσους εκτελούν περίπλοκες εργασίες και προβλέπει αυξημένο κίνδυνο θνησιμότητας [102].

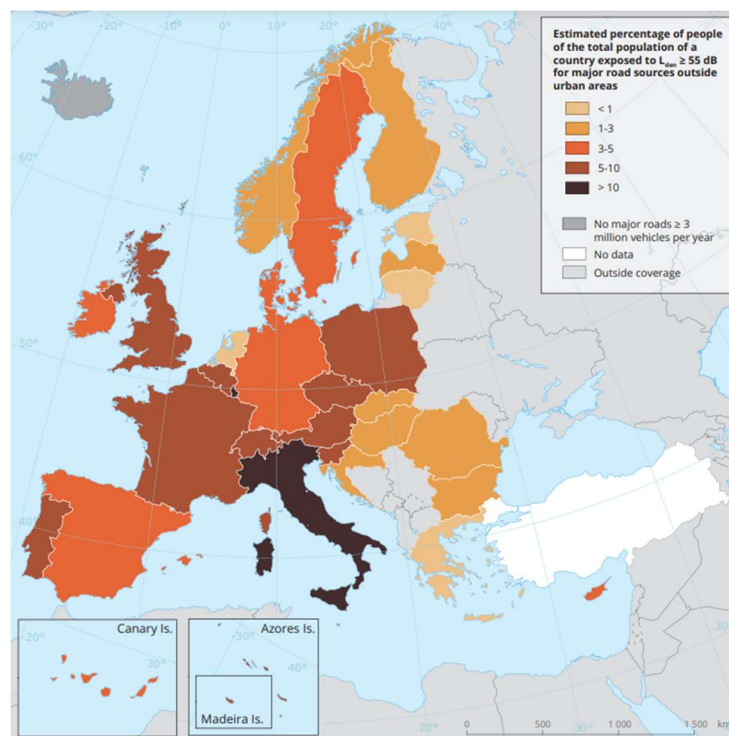
Υποστηρίζεται συχνά ότι η έκθεση στον θόρυβο δημιουργεί μια ενόχληση η οποία μπορεί να εξελιχθεί σε μια σοβαρή ψυχολογική πάθηση [93]. Η ενόχληση που προκαλείται από τον θόρυβο αποτελεί ένα αίσθημα αγανάκτησης, δυσαρέσκειας και δυσφορίας κατά τα οποία ο θόρυβος παρεμβαίνει στις σκέψεις, τα συναισθήματα και τις πραγματικές δραστηριότητες κάποιου. Αυτή η θεώρηση βέβαια δεν είναι ακόμα επιβεβαιωμένη καθώς δεν είναι δυνατό να προβλεφθεί η ενόχληση του θορύβου σε ατομική βάση εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας ενδογενών και εξωγενών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την ενόχληση [90].

1.6.2 Νομοθεσίες

Ιστορικές αναφορές φανερώνουν ότι ο θόρυβος αποτελεί έναν παλιό εχθρό του ανθρώπου. Σύμφωνα με τον πάπυρο του Ebers αναφέρεται ότι οι κάτοικοι που ζούσαν κοντά στους καταρράκτες του Νείλου έπασχαν από βαρηκοΐα [103]. Ως προς τα σημερινά δεδομένα, έρευνα του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας έδειξε ότι μετά την ατμοσφαιρική ρύπανση, η ηχορύπανση έρχεται δεύτερη στην κατάταξη επικινδυνότητας των περιβαλλοντικών απειλών για την υγεία [104]. Συνεπώς, έχουν θεσπιστεί ορισμένες νομοθεσίες με σκοπό την μείωση του θορύβου σε όλους τους κατοίκους των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.).

1.6.2.1 Ευρώπη

Η κύρια πηγή ηχορύπανσης στην Ευρώπη είναι ο κυκλοφοριακός θόρυβος σύμφωνα με την έκθεση του Ε.Ο.Π. (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος), ενώ τα επίπεδα θορύβου πρόκειται να αυξηθούν εξαιτίας της αστικής ανάπτυξης και της αυξημένης ζήτησης για μεταφορές. Στις περισσότερες χώρες της Ευρώπης πάνω από το 50% των κατοίκων εντός των αστικών ιστών εκτίθεται σε επίπεδα θορύβου οδικής κυκλοφορίας 55dB ή περισσότερα κατά την διάρκεια της ημέρας [105]. Όπως φαίνεται και στον χάρτη της Εικόνα 1.21 το ποσοστό των ανθρώπων που εκτίθεται σε θόρυβο από μεγάλους αυτοκινητόδρομους κυμαίνεται λιγότερο από 1% σε χώρες όπως η Ολλανδία, η Λιθουανία, η Ελλάδα και η Εσθονία και έως 10% με 12% σε χώρες όπως η Ιταλία, το Λιχτενστάιν και το Λουξεμβούργο [106] [107]. Η προσέγγιση της Ε.Ε. για την αντιμετώπιση της ηχορύπανσης είναι διττή. Αποτελείται αρχικά από γενικό πλαίσιο για τον προσδιορισμό των επιπέδων ηχορύπανσης που απαιτούν δράση τόσο σε επίπεδο κρατών μελών όσο και σε επίπεδο Ε.Ε.. Και εν συνεχεία, μια δέσμη νομοθετικών πράξεων σχετικά με τις κύριες πηγές θορύβου, όπως για παράδειγμα ο θόρυβος που εκπέμπεται από τις οδικές, αεροπορικές και σιδηροδρομικές μεταφορές [108].



Εικόνα 1.21 Εκτιμώμενο ποσοστό πληθυσμού των χωρών της Ε.Ε. που εκτίθεται σε $L_{den} \geq 55dB$ εξαιτίας κυκλοφοριακού θορύβου σε κύριους αυτοκινητοδρόμους εκτός αστικών ιστών το 2017 [106] [107]

Η οδηγία 2002/49/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου σχετικά με την αξιολόγηση και τη διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου προβλέπει την δημιουργία μιας κοινής βάσης για ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Κατσιφής Παναγιώτης Νεκτάριος

όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης με σκοπό την καταπολέμηση των επιπτώσεων που προκαλούνται εξαιτίας της έκθεσης των ανθρώπων σε υψηλά επίπεδα θορύβου. Σύμφωνα με την οδηγία αυτή, όλα τα κράτη μέλη είναι υποχρεωμένα να εφαρμόσουν ένα εθνικό σχέδιο δράσης όπου θα χρειαστεί να χαρτογραφήσουν τις περιοχές θορύβου, σύμφωνα με κοινές στα κράτη μέλη μεθόδους αξιολόγησης και θεσπίσουν σχέδια δράσης, με γνώμονα τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης του θορύβου, με στόχο την πρόληψη και τον περιορισμό του θορύβου όπου χρειάζεται, και ιδιαίτερα όπου τα επίπεδα έκθεσης μπορούν να αποβούν επιβλαβή για την υγεία των ανθρώπων, καθώς και τη διαφύλαξη της ηχητικής ποιότητας του περιβάλλοντος όπου είναι καλή. Οι χάρτες περιοχών θορύβου και τα σχέδια δράσης θα πρέπει να εκπονούνται κάθε πέντε χρόνια και να περιέχουν πληροφορίες για όλα τα μεγάλα πολεοδομικά συγκροτήματα, μεγάλα αεροδρόμια, μεγάλους αυτοκινητοδρόμους και σιδηρόδρομους [109].

1.6.2.2 Ελλάδα

Η Ελλάδα, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 0.1 του Παράρτημα Α, συγκαταλέγεται στις χώρες με την μικρότερη ηχορύπανση. Το γεγονός αυτό όμως δεν ισχύει για όλες τις περιοχές της Ελλάδας. Η αλήθεια είναι ότι η Αθήνα βρίσκεται αποτελεί μια από τις πιο θορυβώδεις περιοχές της Ευρώπης. Σύμφωνα με την τελευταία χαρτογράφηση περιβαλλοντικού θορύβου της Αθήνας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 99% του πληθυσμού του Δήμου Αθηναίων διαμένει σε γειτονίες όπου η ισοδύναμη στάθμη του ήχου για ένα 24ωρο ξεπερνά τα 55dB, ενώ το 98% των Αθηναίων ζει σε περιοχές όπου ο δείκτης του δωρου νυχτερινού θορύβου υπερβαίνει την τιμή των 50dB [110]. Από τον σχεδιασμό των σχεδίων χαρτογράφησης θορύβου για 16 πολεοδομικά συγκροτήματα (προσμετρώντας 3 περιοχές της Αθήνας: Κέντρο, Βόρεια και Νότια, χωρίς όμως Ανατολική και Δυτική Αθήνα), συνολικού πληθυσμού 3,14 εκατομμυρίων κατοίκων (Εικόνα 1.22), προκύπτει ότι ένα σημαντικό τμήμα των κατοίκων της Ελλάδας εκτίθενται σε υψηλά επίπεδα θορύβου, κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας. Σχεδόν ένας στους πέντε κατοίκους ζει σε περιοχές όπου η στάθμη L_{den} είναι μεγαλύτερη από 70dB, ενώ ένας στους τέσσερεις διαμένει σε ζώνες L_{night} άνω του εθνικού ορίου των 60dB [111].



Εικόνα 1.22 Ποσοστά πληθυσμού που εκτίθενται σε ζώνες θορύβου L_{den} και L_{night} (dB) ανά πολεοδομικά συγκροτήματα και συνολικά [111]

Επομένως, η Ελλάδα εκτός από τα σχέδια χαρτογράφησης θορύβου (Εικόνα 0.1, Εικόνα 0.2, Εικόνα 0.3, Εικόνα 0.4 από το Παράρτημα Β) που πρέπει να σχεδιάσει σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω, έχει θεσπίσει και ορισμένες νομοθεσίες οι οποίες αποσκοπούν κυρίως στον έλεγχο του θορύβου των επιχειρήσεων μαζικής εστίασης και αναψυχής. Σύμφωνα με το άρθρο 14 του Υπουργείου Υγείας, τα κέντρα διασκέδασης είναι στεγασμένοι ή υπαίθριοι χώροι όπου η μέγιστη τιμή στάθμης ήχου είναι 100dB(A), ενώ για χώρους όπου κάνουν χρήση της μουσικής και μουσικών οργάνων ή διαθέτουν στερεοφωνικό συγκρότημα μικρής ισχύος με μέγιστη τιμή στάθμης ήχου κατά την λειτουργία του καταστήματος τα 80dB(A) δεν θεωρούνται κέντρα διασκέδασης και γι' αυτό τον λόγο αυτή είναι και η επιτρεπόμενη μέγιστη τιμή. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται είτε από μηχανικό με ειδικευση σε θέματα ηχομόνωσης και ακουστικής είτε από άλλο επιστήμονα σχετικής ειδικότητας. Τέλος, συντάσσεται η τεχνική έκθεση κατά την οποία θα επιβεβαιώνονται όλες οι παραπάνω πληροφορίες με ευθύνη του εκάστοτε αρμόδιου, καθώς επίσης και η τεκμηρίωση ότι η ισχύς των ηχείων, η θέση, η απόσταση από κατοικίες, καθώς και τα τυχόν μέτρα ηχοπροστασίας, που έχουν ληφθεί δεν δημιουργούν προβλήματα στα σημεία προστασίας [112].

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Παθητικοί και Ενεργοί Τρόποι Ηχομείωσης

Ως θόρυβος, όπως αναφέρεται και παραπάνω, χαρακτηρίζεται συχνά το ανεπιθύμητο σήμα που εισάγεται σε ένα κύκλωμα παρά την θέληση του κατασκευαστή και ως επί το πλείστον είναι εξαιρετικά ενοχλητικός. Για παράδειγμα, ο θόρυβος που εισάγεται στις αίθουσες ηχογράφησης, στις αίθουσες συναυλιών, στα δωμάτια ακρόασης και γενικότερα σε όλους τους ακουστικά ευαίσθητους χώρους θα πρέπει να μειωθεί, εάν αυτοί οι χώροι χρησιμοποιηθούν για τον αρχικό τους σκοπό. Βουητά, δονήσεις, κρότοι, κυκλοφοριακός θόρυβος και άλλοι παρόμοιοι θόρυβοι είναι πιο φορτικοί όταν είναι ακουστοί. Τέτοιου τύπου ήχοι ίσως να περνούν αδιάφοροι σε εξωτερικούς χώρους όταν αποτελούν μέρος της καθημερινότητας, ωστόσο στη διάρκεια ενός μουσικού κομματιού ή μιας συζήτησης είναι αρκετά δυσάρεστοι [50].

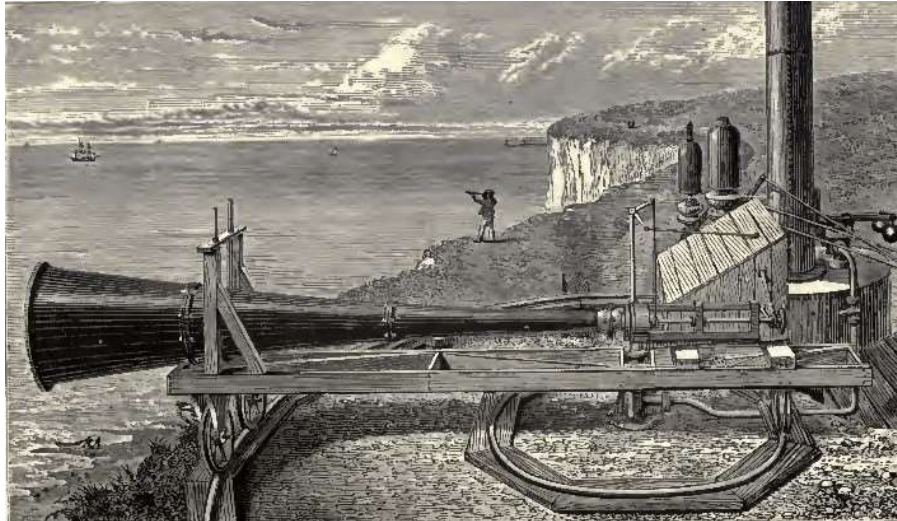
Το πρόβλημα του ελέγχου θορύβου αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στον κλάδο της αρχιτεκτονικής ακουστικής. Η διαχείριση και ο σχεδιασμός του εσωτερικού χώρου είναι εξαιρετικά σημαντικός, αλλά ακόμη και ένας ορθά σχεδιασμένος χώρος συχνά καθίσταται μη χρήσιμος εάν ο θόρυβος διεισδύει στο εσωτερικό του. Παράλληλα, εάν σε γειτονικούς χώρους ο ήχος που δημιουργείται στον ένα χώρο εισάγεται στον άλλον τότε μπορεί να προκαλέσει σοβαρό πρόβλημα [113]. Δεδομένου ότι οι χαμηλές στάθμες θορύβου περιβάλλοντος αποτελούν κρίσιμη προϋπόθεση για τις περισσότερες εφαρμογές, δυσκολεύει το έργο της σχεδίασης ενός δωματίου. Για να είναι λειτουργικός ένας σχεδιασμός, θα πρέπει να μειώνει όσο το δυνατόν περισσότερο κάθε εσωτερικά δημιουργούμενο θόρυβο, λόγω χάρη ο θόρυβος ενός συστήματος εξαερισμού, και επίσης να παρέχει μόνωση από κάθε εξωτερικό θόρυβο, για παράδειγμα τον κυκλοφοριακό θόρυβο στον δρόμο [50]. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές κατά τις οποίες μπορεί να μειωθεί ο θόρυβος μεταξύ δύο δωματίων, όπως για παράδειγμα η εγκατάσταση ενός ηχομονωτικού τοίχου ή φράγματος. Η ικανότητα της κατασκευής αυτής να εξασθενεί το θόρυβο που διέρχεται, μπορεί να καθοριστεί από την απώλεια μετάδοσης ή αλλιώς την ηχομείωση (Transmission Loss, TL). Η ηχομείωση εκφράζει την απώλεια κατά την διέλευση του ήχου μέσω ενός φράγματος. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ηχομείωσης, τόσο υψηλότερη είναι η εξασθένιση που προσφέρει το υλικό. Η ηχομείωση μπορεί να εκφραστεί και ως η διαφορά μεταξύ της στάθμης πίεσης του ήχου στην πλευρά του φράγματος με όψη προς την πηγή προς την στάθμη πίεσης ήχου στην πλευρά του δέκτη:

$$TL = SPL_{source\ side} - SPL_{receiver\ side} [114]$$

2.1 Παθητικοί Τρόποι Ηχομείωσης

2.1.1 Αλλοίωση του Ήχου λόγω Φυσικών Φαινομένων

Η μελέτη της διάδοσης του ήχου στον αέρα ξεκίνησε το 1704, όταν ο Dehram έλαβε μια επιστολή στην οποία αναφερόταν ότι η ακουστότητα του ήχου στην Αγγλία ήταν καλύτερη από αυτή της Ιταλίας. Έτσι, ο Dehram και ο Ιταλός Averroni ξεκίνησαν μια σειρά πειραμάτων σε Αγγλία και Ιταλία, όπου κατέληξαν ότι η επίδραση του ανέμου και στις δύο χώρες ήταν όμοια. Ο Tyndall το 1873 με την βοήθεια της κατασκευής που φαίνεται στην Εικόνα 2.1, μελέτησε την διάδοση του ήχου στον αέρα και κατέληξε ότι ο αέρας θερμαινόμενος από μια φλόγα εξασθενεί τον ήχο [115]. Ύστερα από έναν αιώνα περίπου, το 1950, ο Αυστραλός McAllister απέδειξε ότι παρατηρείται ηχώ από αντικείμενα που βρίσκονται στον αέρα σε ύψος μερικών εκατοντάδων μέτρων. Με βάση την παρατήρηση αυτή βασίστηκε η κατασκευή των SODAR (Atmospheric Acoustic Echosounder), τα οποία χρησιμοποιούνται στην μελέτη της ατμόσφαιρας [116].



Εικόνα 2.1 Πείραμα των Henry και Tyndall το 1873 για την μελέτη διάδοσης του ήχου σε μεγάλες αποστάσεις σε συνθήκες βροχής, χιονόπτωσης και ομίχλης [116]

Συνεπώς, τα διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα έχουν σημαντική επίδραση στην διάδοση του ήχου. Η Διάθλαση των ηχητικών κυμάτων που περιγράφεται από τον νόμο του Snell έχει σημαντικό ρόλο στην εξασθένιση του ήχου. Γενικά, αν L_0 η στάθμη πίεσης σε κάποιο σημείο, τότε η στάθμη πίεσης σε κάποιο άλλο σημείο θα είναι:

$$L = L_0 - \sum A_i$$

Όπου A_i η μείωση σε dB που οφείλεται σε αιτίες όπως για παράδειγμα η απορρόφηση, η απόσταση και η επίδραση της βροχής.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, από μετρήσεις που έγιναν, διαπιστώθηκε ότι η επίδραση της βροχής, της ομίχλης και άλλων μετεωρολογικών φαινομένων είναι αμελητέα. Η μόνη σημαντική επίδραση στην διάδοση του ήχου η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν, είναι η ταχύτητα του ανέμου, όπως επίσης και της θερμοκρασίας (θερμοκρασιακές αναστροφές) [117].

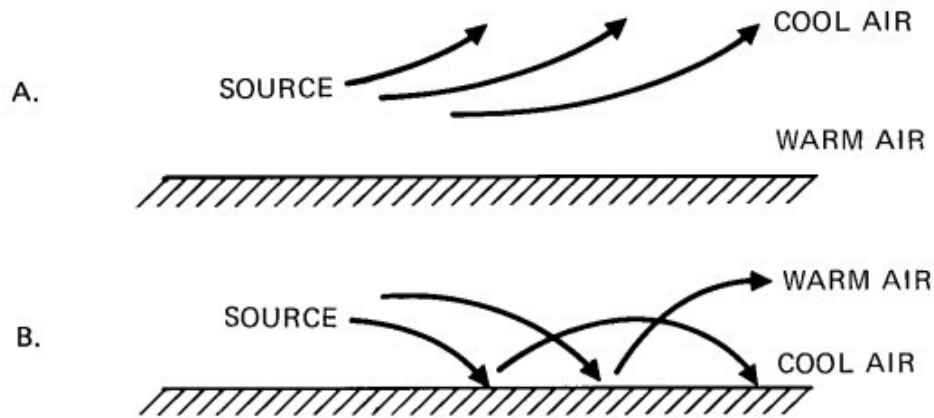
2.1.1.1 Επίδραση του Ανέμου και της Θερμοκρασίας

Σε περιπτώσεις ισχυρών ανέμων, εξαιτίας της τριβής του ανέμου με το έδαφος, τα κατώτερα στρώματα αέρα έχουν μικρότερη ταχύτητα συγκριτικά με τα ανώτερα στρώματα και συνεπώς η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με το ύψος. Η ταχύτητα του ήχου είναι διανυσματικά συνδεδεμένη με την ταχύτητα του ανέμου στα διάφορα αέρια στρώματα. Έτσι, παρατηρείται μεταβολή της ταχύτητας του ήχου με το ύψος και την ταχύτητα του ανέμου και συνεπώς το φαινόμενο της Διάθλασης. Τα ηχητικά κύματα κινούνται άλλοτε προς τα πάνω και άλλοτε προς τα κάτω, ανάλογα με την φορά του ανέμου σε σχέση με την διεύθυνση διάδοσης του ήχου γεγονός το οποίο οφείλεται στην Διάθλαση. Παράλληλα, πρέπει να τονιστεί ότι ο ήχος εξαρτάται και από την τραχύτητα του εδάφους. Για παράδειγμα, εάν ο ήχος εκπέμπεται πάνω από γρασίδι θα επηρεαστεί αρκετά, ενώ εάν εκπέμπεται πάνω από νερό δύσκολα θα επηρεαστεί [118].

Επιπλέον, εφ' όσον η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από την θερμοκρασία, το φαινόμενο της διάθλασης θα είναι εμφανή ακόμα και κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας. Η μεταβολή της ταχύτητας του ήχου σε σχέση με την κλίση της θερμοκρασίας υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{dc}{dh} = 10.3 \frac{d\theta}{dh} \frac{1}{\sqrt{\theta + 273}}$$

Όπου Θ η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου [50].



Εικόνα 2.2 Διάθλαση μετώπων ήχου ως αποτέλεσμα θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην ατμόσφαιρα [119]

Σύμφωνα με την Εικόνα 2.2B υπάρχει μια μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ του ψυχρού αέρα κοντά στην επιφάνεια της γης και του θερμού αέρα πιο πάνω. Γενικά, ο ήχος διαδίδεται πιο γρήγορα στο θερμό αέρα παρά στον ψυχρό. Έτσι τα μέτωπα κύματος αναγκάζονται να κινηθούν ταχύτερα συγκριτικά με τα χαμηλότερα μέρη και συνεπώς η κλίση αυτή των μετώπων κύματος οδηγεί τις ηχητικές ακτίνες προς τα κάτω. Ως αποτέλεσμα, ο ήχος που παράγεται από την πηγή παίρνει μια κλίση προς την επιφάνεια της γης και ακολουθεί την καμπυλότητά της και συνεπώς μπορεί να ακουστεί σε μεγάλες αποστάσεις. Ως προς την Εικόνα 2.2A, η θερμοκρασιακή διακύμανση είναι αντίθετη από αυτή του προηγούμενου σχήματος αφού ο αέρας κοντά στην επιφάνεια της γης είναι πιο θερμός σε σχέση με τον αέρα πιο πάνω. Έτσι, τα κατώτερα μέτωπα κύματος διαδίδονται γρηγορότερα από τα ανώτερα, και συνεπώς παρατηρείται ανοδική Διάθλαση των ακτινών του ήχου. Σε αυτή την περίπτωση, ο ήχος θα κατευθυνθεί στο ανώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα οι πιθανότητες να ακουστεί σε οποιαδήποτε μεγάλη απόσταση στην επιφάνεια της γης να είναι εξαιρετικά μικρές [120].

2.1.1.2 Επίδραση της Απορρόφησης του Αέρα

Η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα όταν αυτός είναι ισότροπος⁴, είναι συνάρτηση της συχνότητας του ήχου και της θερμοκρασίας και υπολογίζεται κατά τον Sutherland από την παρακάτω σχέση:

$$A = Mx$$

Όπου M ο συντελεστής απορρόφησης κατά τον Sutherland που δίνεται στον Πίνακα 2.1 και x η απόσταση σε χιλιόμετρα (km) [50].

Πίνακας 2.1 Συντελεστής απορρόφησης M κατά τον Sutherland [50] [121]

Υγρασία	Θερμοκρασία (°C)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8kHz
25%	15.0	0.2	0.6	1.3	2.4	5.9	19.3	66.9	198

⁴ Ο αέρας είναι ισότροπος όταν όλες οι ιδιότητές του είναι ίδιες προς όλες τις κατευθύνσεις.

25%	20.0	0.2	0.6	1.5	2.6	5.4	15.5	53.7	180.5
25%	25.0	0.2	0.6	1.6	3.1	5.6	13.5	43.6	153.4
25%	30.0	0.1	0.5	1.7	3.7	6.5	13.0	37.0	128.2
50%	15.0	0.1	0.4	1.2	2.4	4.3	10.3	33.2	118.4
50%	20.0	0.1	0.4	1.2	2.8	5.0	10.0	28.1	97.4
50%	25.0	0.1	0.3	1.2	3.2	6.2	10.8	25.6	82.2
50%	30.0	0.1	0.3	1.1	3.4	7.4	12.8	25.4	72.4
75%	15.0	0.1	0.3	1.0	2.4	4.5	8.7	23.7	81.6
75%	20.0	0.1	0.3	0.9	2.7	5.5	9.6	22.0	69.1
75%	25.0	0.1	0.2	0.9	2.8	6.5	11.5	22.4	61.5
75%	30.0	0.1	0.2	0.8	2.7	7.4	14.2	24.0	58.4

2.1.2 Ακουστική Ηχομείωση

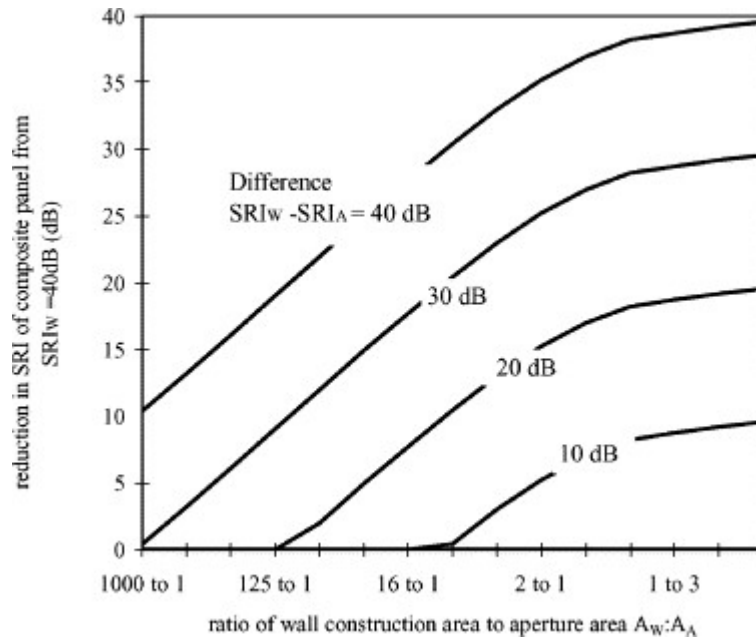
Κατά την ακουστική ηχομείωση ή μόνωση, μελετάται η ικανότητα των δομικών στοιχείων μιας εγκατάστασης να μειώσει τον θόρυβο που εισάγεται στον υπό μελέτη χώρο. Η απορρόφηση του ήχου από τα τοιχώματα παίζει σπουδαίο ρόλο στην ακουστική των κλειστών χώρων. Η απορρόφηση αυτή συνήθως οφείλεται σε δύο φαινόμενα:

- Το ηχητικό κύμα καθώς εισχωρεί στο υλικό που συχνά είναι πορώδες, το μέσο διάδοσης (συνήθως αέρας) ξεκινά να ταλαντώνει και συνεπώς λόγω τριβών με το υλικό χάνει ενέργεια. Αναλυτικότερα, κατά το φαινόμενο αυτό παρατηρείται μετατροπή ηχητικής ενέργειας σε θερμική.
- Το ηχητικό κύμα διεγείρει προς ταλάντωση τα μόρια του απορροφητικού υλικού, οπότε η ενέργεια του ηχητικού κύματος μειώνεται.

Η τιμή του δείκτη μείωσης του ήχου (SRI-Sound Reduction Index) αναφέρεται συνήθως για ένα δομικό στοιχείο και περιγράφει την μείωση της ηχητικής ενέργειας σε όλη την πρόσοψη μιας εγκατάστασης όταν εκτίθεται σε μια τυχαία πρόσπτωση ήχου. Η τυπική εξίσωση για τον SRI ενός σύνθετου πάνελ που αποτελείται από μια επιφάνεια εμβαδού A_A , δείκτη μείωσης ήχου SRI_A σε έναν τοίχο εμβαδού A_W και δείκτη μείωσης ήχου SRI_W είναι:

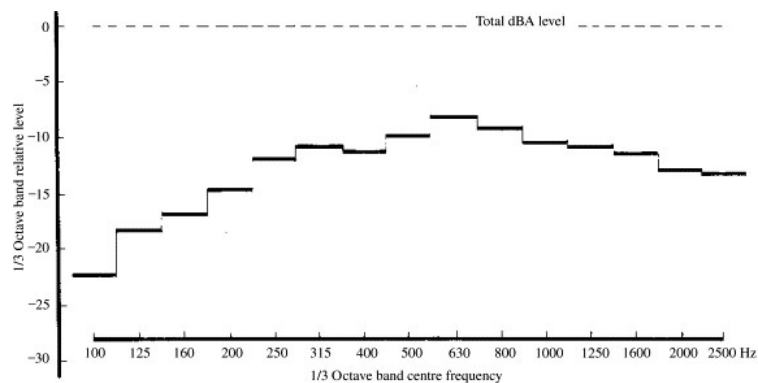
$$SRI_{W+A} = -10 \log A_W 10^{\frac{-SRI_W}{10}} + A_A 10^{\frac{-SRI_A}{10}} (A_W + A_A)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η ηχομείωση μιας πρόσοψης είναι συνάρτηση των δεικτών μείωσης θορύβου των σχετικών περιοχών του πάνελ. Με περισσότερη λεπτομέρεια, το γράφημα της Εικόνα 2.3 περιγράφει την σχέση αυτή καθώς δείχνει ότι η αρχική τιμή SNR 40dB ενός τοίχου είναι συνάρτηση του τοίχου αυτού και της περιοχής ακτινοβολίας του [122].



Εικόνα 2.3 Γράφημα συνάρτησης δείκτη ηχομείωσης με χαρακτηριστικά του τοίχου και της περιοχής ακτινοβολίας [122]

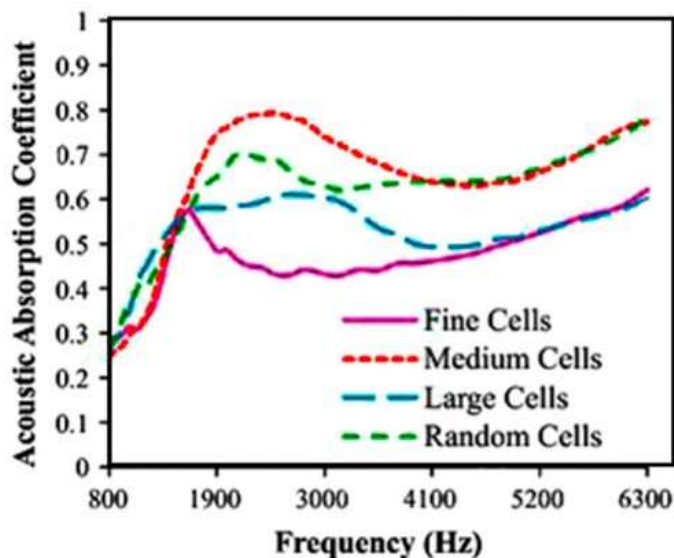
Σε περιοχές με υψηλή ηχορύπανση, μια θεμελιώδης πηγή θορύβου είναι η οδική κυκλοφορία. Ο κυκλοφοριακός θόρυβος είναι ο κυριότερος παράγοντας ηχορύπανσης και η έκθεση σε αυτόν τον θόρυβο είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με άλλες πηγές θορύβου, όπως λόγου χάρη θόρυβος αεροσκαφών, τραίνων κ.λπ. Ο κυκλοφοριακός θόρυβος προέρχεται κυρίως από τον θόρυβο των ελαστικών στο οδόστρωμα και από το σύστημα κίνησης των οχημάτων [123]. Για τον καθορισμό της ικανότητας ηχομείωσης μιας επιφάνειας καθορίζεται ο συντελεστής απορρόφησης για κάθε κεντρική συχνότητα 1/1 οκτάβας ή 1/3 οκτάβας από τα 125Hz έως τα 8kHz. Ο συντελεστής απορρόφησης a_a εκφράζει την απορρόφηση των υλικών και εξαρτάται από το είδος της επιφάνειας. Ένα τυπικό παράδειγμα 1/3 οκτάβας μιας πηγής κυκλοφοριακού θορύβου φαίνεται στο γράφημα της Εικόνα 2.4. Πιο συγκεκριμένα, το φάσμα κυκλοφοριακού θορύβου είναι κανονικοποιημένο έτσι ώστε όταν αθροίζεται σε όλες τις ζώνες 1/3 οκτάβας να δίνει στο σύνολο 0dB. Με σκοπό να εκτιμηθεί η ικανότητα ηχομείωσης μιας πρόσοψης όταν εκτίθεται σε αυτή μια αντίστοιχη πηγή θορύβου ο SRI θα πρέπει να υπολογιστεί με την βοήθεια της παραπάνω εξίσωσης, σε ζώνες συχνοτήτων και να εφαρμοστεί στο φάσμα θορύβου της πηγής για να δώσει σαν αποτέλεσμα ένα εξασθενημένο φάσμα. Για να ληφθεί ένας ενιαίος δείκτης SRI θα πρέπει τα επίπεδα ζωνών συχνοτήτων στο εξασθενημένο φάσμα να αθροιστούν λογαριθμικά και έπειτα να αφαιρεθούν από το λογαριθμικό άθροισμα των επιπέδων ζωνών συχνοτήτων του αρχικού μη εξασθενημένου φάσματος [122].



Εικόνα 2.4 Τυπικό φάσμα 1/3 οκτάβας κυκλοφοριακού θορύβου σε σχέση με το επίπεδο ηχητικής πίεσης (SPL) 0dB [122]

2.1.2.1 Απορρόφηση του ήχου από πορώδη υλικά

Τα πορώδη υλικά αποτελούνται από πολλαπλά μικρά διάκενα τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με τον εξωτερικό χώρο ο οποίος περιβάλλει το υλικό [124]. Στα πορώδη υλικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η απορρόφηση του ήχου επιτυγχάνεται με την εκτέλεση ταλαντώσεων του μέσου διάδοσης με το υλικό και συνεπώς με την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμική. Εφόσον η απορρόφηση γίνεται λόγω τριβών, καθώς ο αέρας κινείται στους πόρους, η τριβή αυτή θα είναι ανάλογη με τη δυναμική πίεση του κινούμενου αέρα. Επομένως, τα πορώδη υλικά προκαλούν μεγαλύτερη απορρόφηση όταν αυτά βρίσκονται σε θέσεις στις οποίες η ταχύτητα σωματιδίων του ηχητικού κύματος είναι μέγιστη. Πιο διεξοδικά, όσο μικρότερη είναι η εμπέδηση του αέρα και του υλικού τόσο πιο μικρή είναι η ανάκλαση και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη είναι η διάδοση. Επομένως, για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο θα πρέπει η πυκνότητα των απορροφητικών υλικών να είναι μικρή και επίσης το πάχος του υλικού θα πρέπει να είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος του ήχου. Γενικά, η απορροφητική ικανότητα στα πορώδη απορροφητικά υλικά εξαρτάται από την συχνότητα και αυξάνεται από αυτή, όπως φαίνεται στο γράφημα της Εικόνα 2.5 [125].



Εικόνα 2.5 Γράφημα συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για διάφορα είδη απορροφητικών υλικών [126]

Ο συντελεστής απορρόφησης για ένα πορώδες απορροφητικό υλικό μπροστά από μια σταθερή επιφάνεια σε απόσταση d από αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$a(f) = \frac{4R_f}{\left(\frac{R_f}{\rho c} + 1\right)^2 + \cot^2\left(\frac{2\pi f d}{c}\right)^2} \quad [126]$$

Όπου ρ η πυκνότητα, c η ταχύτητα του ήχου και R_f η αντίσταση ροής που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_f = \frac{\Delta p}{u}$$

Όπου Δp είναι η διαφορά πίεσης στις δύο επιφάνειες μεταξύ του υλικού και u η ταχύτητα των σωματιδίων.

Για υψηλές συχνότητες ο συντελεστής απορρόφησης μετασχηματίζεται ως εξής:

$$a_\infty = \frac{4\Pi}{(1+\Pi)^2}$$

Όπου Π είναι το πορώδες των υλικών και ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού όγκου των οπών προς τον συνολικό όγκο του υλικού, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\Pi = \frac{V_{\pi}}{V_s} = 1 - \frac{m_s}{V_s \rho_s}$$

Όπου V_{π} είναι ο όγκος των οπών και V_s είναι ο συνολικός όγκος του υλικού, m_s η συνολική μάζα του δείγματος και ρ_s η πυκνότητα του υλικού αν αυτό είναι συμπαγές .

Κατά την πρόσπτωση των ηχητικών κυμάτων πάνω σε μια επιφάνεια σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Σε αποστάσεις πολλαπλάσιες του $\lambda/4$ ($\lambda/4, 3\lambda/4$ κ.λπ.) όπου λ το μήκος κύματος, η ταχύτητα ταλάντωσης παίρνει την μέγιστη τιμή της. Επομένως, όταν το πορώδες υλικό τοποθετείται σε επαφή με την ανακλαστική επιφάνεια, στην οποία η ταχύτητα των μορίων είναι μικρή, η απορρόφηση είναι αμελητέα. Αντίθετα, θα έχουμε μεγάλη απορρόφηση όταν το ίδιο υλικό τοποθετηθεί σε απόσταση $\lambda/4$ ή το πάχος του υλικού να φτάνει τουλάχιστον μέχρι την απόσταση αυτή [127].

2.1.2.2 Απορρόφηση του ήχου από απορροφητικά τύπου μεμβράνης

Τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης αποτελούνται από μια λεπτή μεμβράνη, συνήθως υφασμάτινη, η οποία βρίσκεται σε μικρή απόσταση από κάποιο σκληρό υλικό (τοίχος). Όταν τα ηχητικά κύματα προσπίπτουν πάνω στην μεμβράνη τότε η μεμβράνη αρχίζει να ταλαντώνεται και συνεπώς η ενέργεια του ηχητικού κύματος μειώνεται λόγω της εσωτερικής τριβής του υλικού. Στα υλικά αυτά ο συντελεστής απορρόφησης είναι μεγάλος σε χαμηλές συχνότητες και παράλληλα παρουσιάζει ένα μέγιστο στην περιοχή αυτή το οποίο συμπίπτει με τη φυσική συχνότητα ταλάντωσης της μεμβράνης. Η συχνότητα συντονισμού των υλικών αυτών και ως αποτέλεσμα η συχνότητα που η απορρόφηση γίνεται μέγιστη υπολογίζεται ως εξής:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{mL}}$$

Όπου m είναι η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας με μονάδα μέτρησης kg/m^2 , L η απόσταση από την σκληρή επιφάνεια σε μέτρα, ρ η πυκνότητα του αέρα και c η ταχύτητα του ήχου.

Στις περιπτώσεις που το υλικό είναι ελαστικό και επιτρέπει την διάδοση καμπτικών κυμάτων, η συχνότητα συντονισμού όταν βρίσκονται σε ορθογώνια επιφάνεια δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{mL} + \frac{\pi^4}{m} \left[\left(\frac{p}{a} \right)^2 + \left(\frac{q}{b} \right)^2 \right] \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)}}$$

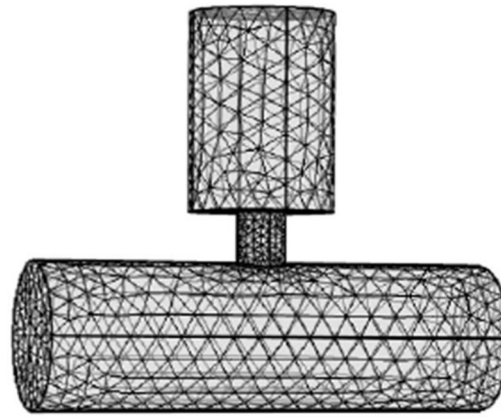
Όπου p, q είναι αυθαίρετες σταθερές, E το μέτρο του Young της μεμβράνης και σ ο λόγος Poisson.

Γενικά, τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης έχουν τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Η απορρόφηση είναι μεγαλύτερη όσο πιο λεπτό είναι το απορροφητικό υλικό καθώς στην περίπτωση αυτή η ταλάντωση είναι πιο εύκολη.
- Ο απορροφητές αυτοί απορροφούν συχνότητες μεταξύ 50Hz και 500Hz. Τα μέγιστα της απορρόφησης είναι κάτω από τα 300Hz και καθώς το βάρος του υλικού αυξάνεται, τα μέγιστα αυτά μειώνονται σε χαμηλότερες συχνότητες.
- Αν τοποθετηθεί πορώδες υλικό πίσω από τα απορροφητικά αυτά, το πλάτος του μεγίστου αυξάνεται [50].

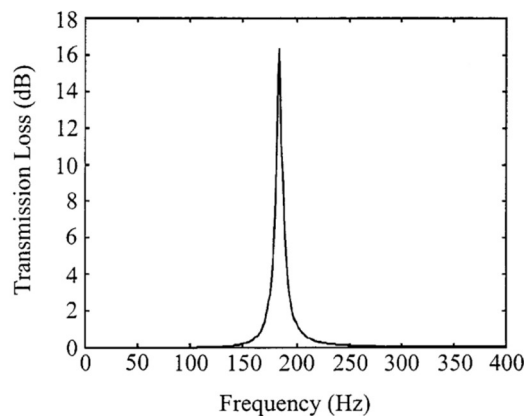
2.1.2.3 Συντονιστής Helmholtz

Ο συντονιστής ή συνηχητής Helmholtz (Εικόνα 2.6) είναι μια κοιλότητα στο υλικό κατά την οποία όταν τα ηχητικά κύματα πέσουν πάνω στο στόμιο της κοιλότητας διεγείρει τον αέρα που βρίσκεται στον συντονιστή και ως αποτέλεσμα η ενέργεια του ηχητικού κύματος απορροφάτε. Η απορροφητική ικανότητα ενός συντονιστή Helmholtz εξαρτάται την αντίσταση της ροής στο λαιμό του συντονιστή και από τον συντελεστή απορρόφησης του υλικού που βρίσκεται μέσα στον συντονιστή [48]. Γενικά, ο συντονιστής Helmholtz λειτουργεί όπως το σύστημα ελατήριο μάζα και συνιστάται για χώρους όπου υπάρχουν τόνοι χαμηλής συχνότητας [128].



Εικόνα 2.6 Συντονιστής Helmholtz [129]

Χρησιμοποιώντας πολλούς συντονιστές Helmholtz με διαφορετικές συχνότητες συντονισμού επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απορρόφηση συγκριτικά με έναν συντονιστή. Ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών που αποτελούνται από συντονιστές Helmholtz, έχουν συνήθως ένα μέγιστο γύρω από μια συχνότητα (συχνότητα συντονισμού) που συνήθως βρίσκεται στις χαμηλές συχνότητες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7 Γράφημα αναπαράστασης απωλειών μετάδοσης και συχνότητας [130]

Η συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l+\delta)}}$$

Όπου A το εμβαδόν του λαιμού του συντονιστή, l το μήκος του λαιμού, V ο όγκος της κοιλότητας και $\delta = 0.8r$ όπου r η ακτίνα του λαιμού [48].

2.1.2.4 Απορρόφηση ήχου από διατρητές επιφάνειες

Οι διατρητές επιφάνειες αποτελούν ένα είδος Συντονιστής Helmholtz και συχνά χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση του ήχου τόσο σε κλειστούς όσο σε ανοιχτούς χώρους. Οι επιφάνειες αυτές συνήθως κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως το κόντρα πλακέ και η λαμαρίνα. Οι διατρητές επιφάνειες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το σχήμα των διατρήσεων· τις κυκλικές οπές και τις σχισμές. Πρακτικά, κάθε οπή λειτουργεί σαν τον λαιμό ενός Συντονιστής Helmholtz. Στις περιπτώσεις που επιθυμούμε μέγιστο απορρόφησης σε διαφορετικές συχνότητες, χρησιμοποιούμε δύο ή περισσότερα είδη διατρήσεων στην ίδια ή ακόμα και σε διαφορετικές

επιφάνειες. Προσθήκη απορροφητικού υλικού (συνήθως υαλοβάμβακας) κάτω από την διατρητή επιφάνεια πλαταίνει την καμπύλη συντονισμού.

Ως προς τις διατρητές επιφάνειες με κυκλικές οπές τότε ορίζουμε την συχνότητα συντονισμού ως εξής:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(l+b)}}$$

Όπου P το ποσοστό διάτρησης που ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού των οπών προς το συνολικό εμβαδό ανά μονάδα επιφάνειας, L η απόσταση της επιφάνειας από τον τοίχο, l το μήκος του λαιμού κάθε οπής σε μέτρα και $b=0.8d$ όπου d η διάμετρος του λαιμού. Γενικά, αυξάνεται η απόδοση σε υψηλές συχνότητες με την επιλογή οπών μικρής διαμέτρου.

Ως προς τις διατρητές επιφάνειες με σχισμές, οι επιφάνειες αυτές έχουν παρόμοιο τρόπο λειτουργίας όπως και οι επιφάνειες με οπές. Οι σχισμές αυτές έχουν σκοπό να αυξήσουν την απορροφητική ικανότητα του υλικού και δρουν σαν Συντονιστής Helmholtz. Η συχνότητα συντονισμού μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(l+Kb)}}$$

Όπου στην περίπτωση σχισμών πεπερασμένου μήκους:

$$K = \frac{1}{\pi} + \frac{2}{\pi} \ln \frac{2}{b}$$

Πρακτικά, οι διατρητές επιφάνειες είναι ο συνδυασμός των τριών τύπων απορροφητικών υλικών που περιεγράφηκαν παραπάνω. Οι διατρητές επιφάνειες λειτουργούν σαν Απορρόφηση του ήχου από απορροφητικά τύπου μεμβράνης, οι οπές σαν Συντονιστής Helmholtz και το ενδιάμεσο υλικό σαν πορώδης απορροφητής. Πιο συγκεκριμένα, οι οπές μειώνουν την απόδοση της μεμβράνης στις χαμηλές συχνότητες, την ενισχύουν στις μεσαίες συχνότητες και την μειώνουν την απόδοση των πορωδών απορροφητικών υλικών στις υψηλές συχνότητες.

2.1.3 Ηχομείωση από Φράγματα

Ένας άλλος τρόπος ηχομείωσης είναι η εγκατάσταση ηχητικών φραγμάτων (ηχοφραγμάτων ή ηχοπετασμάτων). Με τον όρο φράγμα εννοείται μια στερεή επιφάνεια η οποία είναι κατασκευασμένη από κάποιο απορροφητικό υλικό και είναι τοποθετημένη μεταξύ μιας πηγής θορύβου και της περιοχής που επιθυμούμε να μειώσουμε τον θόρυβο. Το φράγμα αυτό δημιουργεί συνολικά δύο περιοχές· μια περιοχή «σκιάς» όπου ο θόρυβος είναι σαφώς μειωμένος συγκριτικά με την περίπτωση όπου δεν θα υπήρχε το φράγμα και μια περιοχή όπου βρίσκεται η πηγή του θορύβου στην οποία η στάθμη είναι αυξημένη εξαιτίας της ανάκλασης. Σε πραγματικές συνθήκες, η διάδοση του ήχου στη περιοχή της γεωμετρικής σκιάς επιτυγχάνεται μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την απόδοση των ηχοπετασμάτων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην διάδοση του ήχου μέσα από το υλικό του φράγματος καθώς επίσης και εξαιτίας της περίθλασης του ήχου από το πάνω όριο της επιφάνειας του φράγματος. Η διάδοση του ήχου μέσω του ηχοπετάσματος οφείλεται κυρίως από την ικανότητα ηχομείωσης του φράγματος, ενώ η επίδραση του φαινομένου της περίθλασης εξαρτάται από τις διαστάσεις, την γεωμετρία του φράγματος αλλά και από το μήκος κύματος του ήχου.

Κατά την κατασκευή πρέπει να τηρούνται τρεις βασικοί κανόνες σχεδιασμού:

- Το υλικό του φράγματος πρέπει να προσφέρει ηχομείωση τουλάχιστον 5dB μεγαλύτερη από την επιθυμητή.
- Το ύψος του πετάσματος πρέπει να είναι δύο φορές μεγαλύτερο από το ύψος της πηγής.
- Το μήκος του φράγματος πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ύψος του.

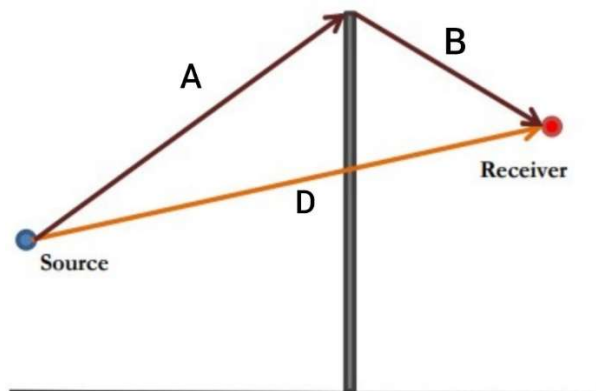
Κατά τον Maekawa η ηχομείωση που προσφέρουν τα φράγματα μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια του παρακάτω τύπου:

$$R_b = 10 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} + 5 \text{ για } N > 0$$

Ενώ για $N < 0$ ισχύει $R_b = 0$, όπου N είναι ο αριθμός Fresnel που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$N = \frac{2(A+B-D)}{\lambda}$$

Όπου A η απόσταση πηγής-κορυφής, B η απόσταση παρατηρητή-κορυφής του φράγματος και D η απευθείας απόσταση πηγής-παρατηρητή.



Εικόνα 2.8 Διαδρομή των ηχητικών κυμάτων παρουσία ηχοπετάσματος [131]

Στην περίπτωση όπου ο αριθμός Fresnel είναι μεγαλύτερος από την μονάδα μπορούμε να υπολογίσουμε την ηχομείωση χρησιμοποιώντας τον προσεγγιστικό τύπο:

$$R_b = 10 \log(20N)$$



Εικόνα 2.9 Εγκατάσταση διάφανων ηχοπετασμάτων σε αυτοκινητόδρομο στην Αττική, Ελλάδα [132]

Τα ηχοφράγματα συνήθως είναι κατασκευασμένα από γυαλί, πολυκαρβονικά φύλλα (πλεξιγκλάς), μεταλλικές επιφάνειες ή μπετόν. Συνήθως, τα ηχοφράγματα κατασκευάζονται από διάφορα στρώματα υλικών μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταλλικών επιφανειών με σκοπό να επιτευχθεί μεγάλος συντελεστής απορρόφησης.

2.2 Ενεργοί Τρόποι Ηχομείωσης

2.2.1 Ενεργός Έλεγχος Θορύβου

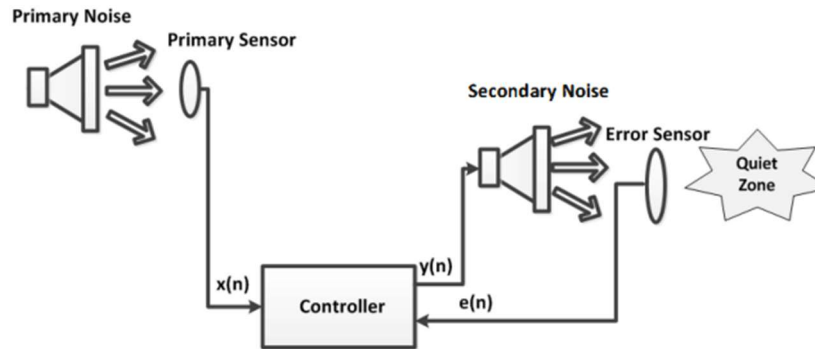
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο θόρυβος αποτελεί ένα μείζον ζήτημα εδώ και πολλές δεκαετίες καθώς είναι ικανός να προκαλέσει σοβαρές Επιπτώσεις Θορύβου στον Άνθρωπο στην ψυχική αλλά και σωματική υγεία των ανθρώπων. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις μείωσης του θορύβου όπως για παράδειγμα η Ηχομείωση από Φράγματα, σιγαστήρες κ.λπ. είναι ικανές να μειώσουν τον θόρυβο καθώς έχουν υψηλή εξασθένιση σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων όμως οι τεχνικές αυτές είναι αρκετά δαπανηρές, ογκώδεις και αναποτελεσματικές στις χαμηλές συχνότητες [133] [14]. Ο ενεργός έλεγχος θορύβου (ANC-Active Noise Control) αποτελεί την λύση αυτού του προβλήματος καθώς έχει εισαχθεί με σκοπό την συμπληρωματική δράση κατά των ανεπαρκειών των παθητικών μεθόδων ηχομείωσης [135]. Στόχος ενός συμβατικού συστήματος ενεργού ελέγχου θορύβου είναι να μειώσει όσο το δυνατό περισσότερο τον θόρυβο που εισάγεται στο σύστημα από πρωτογενείς πηγές [136]. Η βασική αρχή λειτουργίας των συστημάτων ελέγχου θορύβου είναι η δημιουργία μιας ακυρωτικής πηγής ήχου με σκοπό την εξασθένιση του πρωτεύοντος θορύβου [137]. Ο ενεργός έλεγχος θορύβου χρησιμοποιεί την αρχή της υπέρθεσης για να μειώσει τον θόρυβο παράγοντας έναν «αντιθόρυβο» ο οποίος μόλις προστεθεί με το αρχικό σήμα (θόρυβος) το τελικό σήμα που λαμβάνεται στην έξοδο είναι ιδανικά μηδέν. Ωστόσο, στην πραγματικότητα δεν μπορεί να συμβεί κάτι τέτοιο για διάφορους λόγους όπως για παράδειγμα η ακουστική του υπό μελέτη χώρου κ.λπ. Η ποσότητα της εξασθένισης εξαρτάται από την ακρίβεια του πλάτους και της φάσης του «αντιθορύβου» συγκριτικά με αυτά του θορύβου. Το ANC παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1936 στις Η.Π.Α. από τον Paul Lueg κατά τον οποίο ο ανεπιθύμητος ήχος λαμβάνεται από ένα ή περισσότερα μικρόφωνα, ύστερα ενισχύονται και έπειτα οδηγούνται σε μεγάφωνα έτσι ώστε το ηχητικό σήμα να βρίσκεται σε «αντίθεση φάση» με τον πρωτεύοντα ανεπιθύμητο ήχο και συνεπώς να το ακυρώνει [138].

2.2.1.1 Είδη Ενεργού Ελέγχου Θορύβου

Ένα σύστημα ANC διακρίνεται σε δύο διαφορετικές κατηγορίες· μονοκάναλο και πολυκάναλο σύστημα ελέγχου θορύβου. Το μονοκάναλο σύστημα ANC αποτελείται από έναν αισθητήρα οποίος εντοπίζει τον θόρυβο, μια πηγή ακύρωσης του ήχου και έναν αισθητήρα για τον εντοπισμό των σφαλμάτων. Το πολυκάναλο σύστημα ANC είναι όμοιο με το μονοκάναλο σύστημα όμως διαθέτει περισσότερους αισθητήρες και πηγές. Ένα μονοκάναλο σύστημα ANC χρησιμοποιείται κυρίως στις περιπτώσεις που η πηγή θορύβου είναι σημειακή όπως λόγου χάρι οι αεραγωγοί ενός κλιματιστικού, ενώ ένα πολυκάναλο χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου διατίθενται πολλαπλές πηγές θορύβου, όπως για παράδειγμα οι καμπίνες οχημάτων [133].

2.2.1.2 Μονοκάναλο Σύστημα Ενεργού Ελέγχου Θορύβου

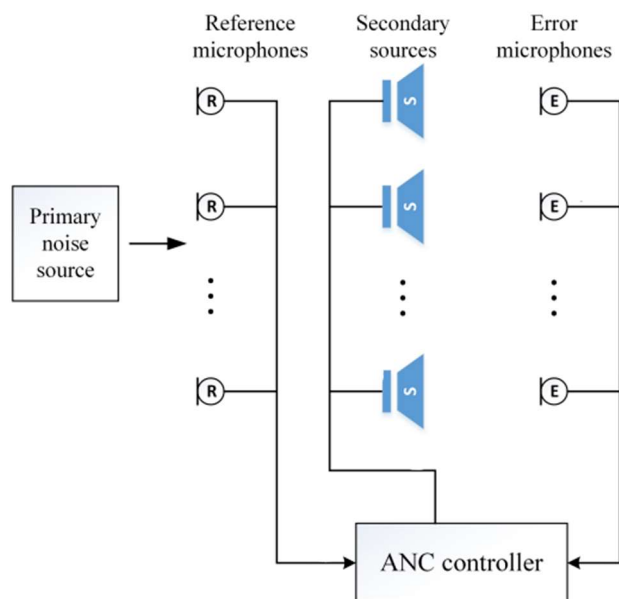
Το μονοκάναλο σύστημα ANC (Εικόνα 2.10), όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αποτελείται από ένα ζεύγος μικροφώνων, ένα ηχείο και έναν ελεγκτή. Το μικρόφωνο που βρίσκεται στην πρώτη ηχητική πηγή (πηγή θορύβου) αποτελεί το μικρόφωνο αναφοράς, ενώ το μικρόφωνο το οποίο βρίσκεται στην δεύτερη πηγή είναι το μικρόφωνο σφάλματος. Το σήμα αναφοράς του πρωτεύοντος ήχου εισάγεται στο ελεγκτή για την κατάλληλη επεξεργασία του και έπειτα μέσω της δεύτερης ηχητικής πηγής εκπέμπεται στον χώρο. Στην περίπτωση αυτή, εξαιτίας της συμβολής των δύο ηχητικών κυμάτων ο αρχικός ήχος (θόρυβος) εξασθενεί και ταυτόχρονα μέσω του μικροφώνου σφάλματος εντοπίζεται το υπολειπόμενο σήμα σφάλματος και με την βοήθεια του ελεγκτή το τελικό σήμα τροποποιείται με σκοπό την βέλτιστη καταστολή του θορύβου. Επομένως, χρησιμοποιώντας τα δύο μικρόφωνα· το μικρόφωνο αναφοράς και το μικρόφωνο σφάλματος, ο παραγόμενος «αντιθόρυβος» μπορεί να προσαρμοστεί αποτελεσματικά στις μεταβολές του πρωτεύοντα θορύβου, επιτρέποντάς του να μετριάσει αποτελεσματικά διάφορους τύπους θορύβου [139].



Εικόνα 2.10 Μονοκάνναλο σύστημα ενεργού ελέγχου θορύβου [140]

2.2.1.3 Πολυκάνναλο Σύστημα Ενεργού Ελέγχου Θορύβου

Το μονοκάνναλο σύστημα ANC χρησιμοποιείται συνήθως για τον τοπικό έλεγχο θορύβου, όπως για παράδειγμα ο θόρυβος των αεραγωγών ενός συστήματος εξαερισμού. Στις περιπτώσεις όπου η περιοχή «ήσυχης ζώνης» (quiet zone) δεν είναι ένα μικρό περιβάλλον ελεύθερου πεδίου αλλά ένα μεγάλο δωμάτιο το μονοκάνναλο σύστημα ANC δεν είναι αποτελεσματικό. Μάλιστα, στο ελεύθερο πεδίο η περιοχή «ήσυχης ζώνης» που δημιουργείται από τα συστήματα ANC μονού καναλιού είναι περίπου το 1/10 του ακουστικού μήκους κύματος το οποίο είναι ανεπαρκές για μεγαλύτερες περιοχές ελέγχου, όπως στον έλεγχο του θορύβου μέσω ανοιχτών παραθύρων για κατοικίες [141] [142] [143]. Συνεπώς, σε αυτές τις καταστάσεις χρησιμοποιούνται πολυκάνναλα συστήματα ενεργού ελέγχου θορύβου τα οποία αποτελούνται από πολλαπλά ζεύγη μικροφώνων και πηγών (Εικόνα 2.11) με σκοπό την αποτελεσματικότερη μείωση του θορύβου [144].



Εικόνα 2.11 Πολυκάνναλο σύστημα ενεργού ελέγχου θορύβου [145]

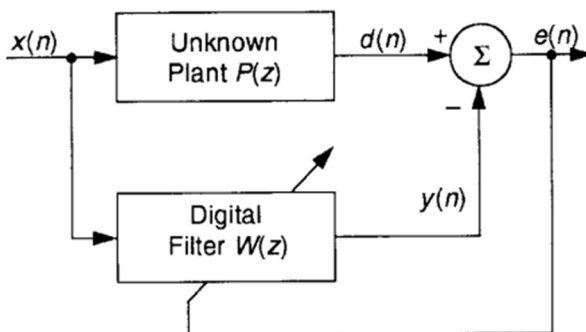
2.2.2 Τεχνικές Ενεργού Ελέγχου Θορύβου

Είναι πλέον γνωστό ότι τα χαρακτηριστικά της πηγής του θορύβου αλλά και του περιβάλλοντος είναι διαφορετικά. Συνεπώς, το πλάτος, η συχνότητα, η φάση και η ταχύτητα του θορύβου δεν είναι σταθερά αλλά μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος ή ακόμα και με τον χρόνο. Επομένως, ένα σύστημα ενεργού ελέγχου θορύβου πρέπει να προσαρμοστεί στις αλλαγές αυτές με σκοπό την βέλτιστη εξασθένιση του θορύβου. Μια λύση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση κατάλληλων φίλτρων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σήματος σφάλματος. Η πιο κοινή

μορφή αντίστοιχου φίλτρου προσαρμογής είναι το φίλτρο το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ελαχίστων μέσων τετραγώνων [146].

2.2.2.1 Φίλτρο Προσαρμογής

Ένα τυπικό σύστημα ANC με χρήση φίλτρου προσαρμογής με σκοπό την εκτίμηση μιας άγνωστης κατάστασης η οποία επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του θορύβου φαίνεται στην Εικόνα 2.12. Η κύρια διαδρομή αποτελείται από την απόκριση του αισθητήρα αναφοράς στον αισθητήρα σφάλματος από όπου πρέπει να εκτιμηθεί η εξασθένιση του θορύβου. Αναλυτικότερα, ο στόχος του φίλτρου προσαρμογής $W(z)$ είναι να ελαχιστοποιήσει το σήμα σφάλματος $e(n)$. Γνωρίζοντας ότι το σήμα σφάλματος στο z -πεδίο είναι μηδέν, μετά την εφαρμογή του φίλτρου $W(z)$ και $P(z)=W(z)$ για $X(z)\neq 0$ όπου $X(z)$ είναι το σήμα εισόδου $x(n)$ μετασχηματισμένο στο z -πεδίο και $P(z)$ είναι το φίλτρο το οποίο αντιπροσωπεύει την κύρια διαδρομή (από το μικρόφωνο αναφοράς στον ελεγκτή). Επομένως, συνεπάγεται ότι $y(n)=d(n)$ όπου $y(n)$ και $d(n)$ είναι τα σήματα εξόδων των φίλτρων $P(z)$ και $W(z)$ αντίστοιχα. Ως αποτέλεσμα, συνδυάζοντας τα δύο αυτά σήματα προκύπτει η σχέση $e(n)=d(n)-y(n)=0$ και οδηγείται σε τέλεια ακύρωση των δύο ηχητικών κυμάτων με βάση της αρχή της υπέρθεσης [139].



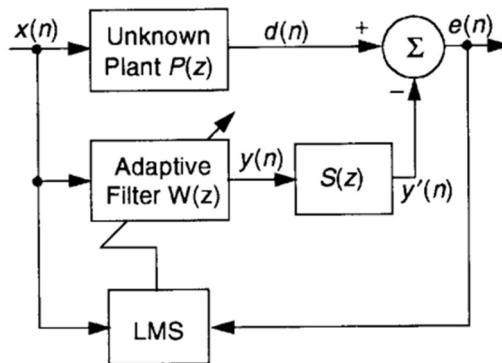
Εικόνα 2.12 Σύστημα ANC με χρήση φίλτρου προσαρμογής [146]

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.10, αφού ληφθεί το σήμα θορύβου από τον αισθητήρα αναφοράς, ο ελεγκτής χρειάζεται λίγο χρόνο για να υπολογίσει την κατάλληλη έξοδο στην δεύτερη ηχητική πηγή δηλαδή την πηγή του «αντιθορύβου». Εάν αυτή η ηλεκτρική καθυστέρηση γίνει μεγαλύτερη από την καθυστέρηση από το μικρόφωνο αναφοράς στο μεγάφωνο ακύρωσης του θορύβου (ακουστική καθυστέρηση), η απόδοση του συνολικού συστήματος θα μειωθεί σημαντικά. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι η απόκριση του ελεγκτή δεν είναι προβλέψιμη όταν η ηλεκτρική καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη από την ακουστική καθυστέρηση. Όταν η απόκριση αυτή είναι προβλέψιμη τότε το σύστημα ANC είναι ικανό να μειώσει τον θόρυβο ευρείας ζώνης [146].

Η χρήση φίλτρου προσαρμογής σε ένα ANC σύστημα περιπλέκεται καθώς όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.12, στο σημείο όπου τα σήματα $d(n)$ και $y(n)$ συναντώνται, παρατηρείται ακουστική υπέρθεση στον χώρο από το μεγάφωνο ακύρωσης του θορύβου και το μικρόφωνο σφάλματος όπου ο θόρυβος συνδυάζεται με την έξοδο του φίλτρου προσαρμογής. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η αναδιάταξη της δευτερεύουσας διαδρομής προσθέτοντας μια ακόμα διαδρομή με ένα μπλοκ το οποίο περιέχει διατάξεις όπως για παράδειγμα ο αναλογηφιακός μετατροπέας και το ανταλλοιωτικό φίλτρο και χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ελαχίστων μέσων τετραγώνων (LMS) ο οποίος περιγράφεται παρακάτω, δημιουργείται έτσι το διάγραμμα της Εικόνα 2.13. Έτσι το σήμα σφάλματος $e(n)$ μετασχηματισμένο στο z -πεδίο είναι:

$$E(z) = [P(z) - S(z)W(z)]X(z)$$

Βασικό πλεονέκτημα αυτής της αναδιάταξης είναι ότι με ένα κατάλληλο μοντέλο της εγκατάστασης, το σύστημα μπορεί να ανταποκριθεί στιγμιαία σε αλλαγές στο σήμα εισόδου $x(n)$ που μπορεί να προκληθούν από αλλαγές στις πηγές θορύβου [137].



Εικόνα 2.13 Απλοποιημένο διάγραμμα ροής ενός συστήματος ANC με χρήση φίλτρου προσαρμογής [146]

Ωστόσο, η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος ANC εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την συνάρτηση μεταφοράς της δευτερεύουσας διαδρομής. Όμως, εισάγοντας έναν ισοσταθμιστή (equalizer) επιτυγχάνεται μια πιο ομοιόμορφη απόκριση συχνότητας της δευτερεύουσας διαδρομής και συνεπώς αυξάνεται σημαντικά η μείωση του θορύβου [147].

2.2.2.2 Αλγόριθμος Ελαχίστων Μέσων Τετραγώνων

Ο αλγόριθμος ελαχίστων μέσων τετραγώνων (LMS-Least Mean Square) αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους Widrow και Hoff το 1960 και αποτελεί τον πρώτο γραμμικό αλγόριθμο προσαρμοστικού φιλτραρίσματος και χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση προβλημάτων όπως η πρόβλεψη και η ισοστάθμιση καναλιών επικοινωνίας [148]. Έστω ένα σύστημα το οποίο διεγείρεται από ένα διάνυσμα εισόδου $x_M(i)$ όπου i είναι η χρονική στιγμή όπου εφαρμόζεται το ερέθισμα στο σύστημα και M ο αριθμός των ερεθισμάτων και λαμβάνει στην έξοδο ένα σήμα $y(i)$. Έτσι έχουμε:

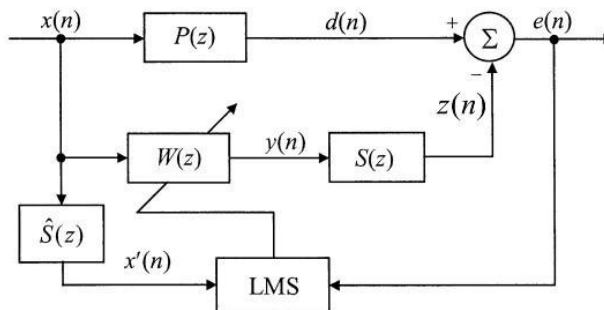
$$F: \{X(i), d(i); i = 1, 2, \dots, n\}$$

Όπου $X(i) = [X_1(i), X_2(i), \dots, X_M(i)]^T$. Ως αποτέλεσμα γεννιέται το ερώτημα για το πώς μπορεί να σχεδιαστεί ένα σύστημα πολλαπλών εισόδων-μονής εξόδου σε ένα άγνωστο σύστημα, βασίζοντας σε ένα μεμονωμένο γραμμικό νευρώνα. Την λύση αυτού του προβλήματος δίνει ένας κατάλληλος αλγόριθμος ο οποίος ελέγχει τις προσαρμογές που πρέπει να γίνουν στα συναπτικά βάρη του νευρώνα και ονομάζεται αλγόριθμος ελαχίστων μέσων τετραγώνων [149]. Το νευρωνικό δίκτυο που μόλις περιεγράφηκε αποτελεί και ένα είδους φίλτρο προσαρμογής το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω.

2.2.2.3 Ο Αλγόριθμος FxLMS

Στην περίπτωση της Εικόνα 2.13, η εισαγωγή μιας δευτερεύουσας διαδρομής σε έναν ελεγκτή χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ελαχίστων μέσων τετραγώνων πρόκειται να προκαλέσει αστάθεια στο συνολικό κύκλωμα [150]. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μη ευθυγράμμιση του σήματος σφάλματος με το σήμα αναφοράς λόγω της παρουσίας του $S(z)$ [151]. Η ακριβής εκτίμηση αυτή της δευτερεύουσας διαδρομής κάνει το σύστημα ANC πιο αποτελεσματικό. Η διαδρομή αυτή μπορεί να εκτιμηθεί με τους εξής δύο τρόπους. Ως προς τον πρώτο τρόπο, η δευτερεύουσα διαδρομή εκτιμάται πριν από την λειτουργία του συστήματος. Ως προς τον δεύτερο τρόπο, η εκτίμηση της δευτερεύουσας διαδρομής πραγματοποιείται ενώ το σύστημα ANC είναι σε λειτουργία. Αυτός ο τρόπος εκτίμησης απαιτείται όταν η δευτερεύουσα διαδρομή μεταβάλλεται χρονικά. Αναμφίβολα ένα τέτοιο σύστημα γίνεται περίπλοκο καθώς περιλαμβάνει πολλά κυκλώματα και στοιχεία για την παρακολούθηση και την ανίχνευση της δευτερεύουσας διαδρομής ενώ το σύστημα είναι σε λειτουργία [152]. Υπάρχουν

διάφορες προσεγγίσεις για την εκτίμηση αυτής της διαδρομής, όμως οι δύο πιο επικρατέστερες είναι αυτές που πρότεινε ο Morgan [151]. Η πρώτη λύση είναι η τοποθέτηση ενός αντίστροφου φίλτρου $1/S(z)$ σε σειρά με το $S(z)$ με σκοπό την αφαίρεση του αποτελέσματός του. Η δεύτερη λύση είναι η τοποθέτηση ενός πανομοιότυπου φίλτρου στην διαδρομή του σήματος αναφοράς με σκοπό την ενημέρωση του αλγόριθμου μέσω των τετραγώνων ο οποίος υλοποιεί τον αλγόριθμο φιλτραρισμένου x LMS (FxLMS) [153].



Εικόνα 2.14 Μπλοκ διάγραμμα ενός ANC συστήματος χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FxLMS [154]

Ένα τυπικό μπλοκ διάγραμμα μονοκάναλου συστήματος ANC με χρήση του αλγόριθμου FxLMS φαίνεται στην Εικόνα 2.14. Το σήμα $d(n)$ είναι το σήμα θορύβου που πρέπει να ακυρωθεί, η συνάρτηση μεταφοράς $P(z)$ αντιπροσωπεύει την κύρια διαδρομή από το μικρόφωνο αναφοράς στο μικρόφωνο σφάλματος και το $S(z)$ είναι η δευτερεύουσα συνάρτηση μεταφοράς της διαδρομής μεταξύ της εξόδου του φίλτρου προσαρμογής $W(z)$ και της εξόδου του μικροφώνου σφάλματος. Η συνάρτηση μεταφοράς $S(z)$ μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο προσαρμογής $\hat{S}(z)$ [139]. Ορίζουμε το διάνυσμα βάρους του φίλτρου ελέγχου $W(z)$ με δείκτη χρόνου n ως $w(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{N_w-1}(n)]^T$ όπου N_w το μήκος του διανύσματος. Το σήμα $d(n)$ λαμβάνεται από το μικρόφωνο αναφοράς και στην συνέχεια φιλτράρεται από το φίλτρο προσαρμογής για την δημιουργία ενός ακυρωτικού σήματος $y(n)$ το οποίο έπειτα οδηγείται στο ηχείο όπου:

$$y(n) = x^T(n)w(n)$$

Όπου $x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N_w+1)]^T$ είναι το διάνυσμα σήματος αναφοράς. Το ακυρωτικό σήμα $y(n)$ φιλτράρεται στην συνέχεια από το $S(z)$ στην δευτερεύουσα διαδρομή και λαμβάνεται το σήμα ελέγχου $z(n)$ στην θέση του μικροφώνου σφάλματος και έτσι προκύπτει:

$$z(n) = \bar{y}^T(n)s$$

Όπου $\bar{y}(n) = [y(n), y(n-1), \dots, y(n-N_s+1)]^T$ και $s = [s_0, s_1, \dots, s_{N_s-1}]^T$ είναι το διάνυσμα βάρους της δευτερεύουσας διαδρομής με μήκος N_s . Το υπολειπόμενο σήμα σφάλματος που λαμβάνεται από το μικρόφωνο σφάλματος είναι:

$$e(n) = d(n) + z(n)$$

Όπου $d(n)$ είναι το σήμα διαταραχής στο μικρόφωνο σφάλματος. Ο αλγόριθμος FxLMS χρησιμοποιείται συχνά για την ενημέρωση του διανύσματος βάρους όπου:

$$w(n+1) = w(n) - \mu x'(n)e(n)$$

Όπου μ είναι το μέγεθος του βήματος και $x'(n) = [u'(n), u(n-1), \dots, u(n-N_w+1)]^T$ το φιλτραρισμένο σήμα αναφοράς όπου το $u(n)$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$u(n) = x_s^T(n)\hat{s}$$

Όπου $x_s(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N_s+1)]^T$ και $\hat{s} = [\widehat{s}_0, \widehat{s}_1, \dots, \widehat{s}_{N_s-1}]^T$ είναι μια εκτίμηση του πραγματικού διανύσματος βάρους της δευτερεύουσας διαδρομής [155] [156].

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι παρόλο που ο αλγόριθμος FxLMS χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα ANC, η πολυπλοκότητα όμως του αλγορίθμου αυξάνεται γραμμικά με το μήκος του φίλτρου. Μάλιστα, σε ορισμένες εφαρμογές το φίλτρο ελέγχου είναι της τάξης πολλών χιλιάδων. Μολονότι ο αλγόριθμος είναι υπολογιστικά απλός όπου υπάρχουν δευτερεύουσες διαδρομές, η ταχύτητα σύγκλισής του είναι αργή [152]. Επομένως, ο αλγόριθμος FxLMS και γενικά όλοι οι αλγόριθμοι τέτοιου τύπου μπορούν να γίνουν εξαιρετικά πολύπλοκοι και ως αποτέλεσμα δεν χρησιμοποιούνται συχνά σε αντίστοιχα συστήματα [155]. Ενδεικτικά στον Πίνακα 0.2 του Παράρτημα Α συγκρίνονται ορισμένοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ANC ως προς την πολυπλοκότητά τους, την σταθερότητά τους, την ανθεκτικότητά τους καθώς και την ταχύτητα σύγκλισής τους.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σύστημα ANC που φαίνεται στην Εικόνα 2.10 χρησιμοποιεί ένα μικρόφωνο αναφοράς για να εντοπίσει τον θόρυβο και να παράξει ένα «αντιθόρυβο» με σκοπό την ακύρωση του αρχικού θορύβου. Εξαιτίας όμως της δεύτερης ηχητικής πηγής, δηλαδή του μεγάλου που παράγει τον «αντιθόρυβο», ο ήχος αυτός εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις και συνεπώς στο μικρόφωνο αναφοράς με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ανεπιθύμητη ακουστική ανάδραση η οποία εν τέλει προκαλεί αστάθεια στο συνολικό σύστημα. Μια απλή προσέγγιση για την επίλυση αυτού του προβλήματος ανάδρασης είναι η τοποθέτηση ενός φίλτρου ακύρωσης της ανάδρασης η οποία μοντελοποιεί την διαδρομή από την δευτερεύουσα ηχητική πηγή προς το μικρόφωνο αναφοράς [157]. Επειδή όμως, ο θόρυβος από την πρωτεύουσα ηχητική πηγή σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την «αντιθόρυβο» από την δευτερεύουσα ηχητική πηγή, η προσαρμογή του ακυρωτικού φίλτρου ανάδρασης πρέπει να εμποδίζεται όταν τον σύστημα είναι σε λειτουργία. Συνεπώς, το φίλτρο ακύρωσης της ανάδρασης χρησιμοποιείται συνήθως μέσω μιας μοντελοποίησης της ανάδρασης εκτός της διαδρομής ανάδρασης, η οποία μπορεί να εκτελεστεί ταυτόχρονα με την μοντελοποίηση της δευτερεύουσας διαδρομής [158].

Σε αντίστοιχα συστήματα όπου υπάρχει μια διαδρομή ανάδρασης, η βέλτιστη λύση είναι η τοποθέτηση ενός φίλτρου άπειρης κρουστικής απόκρισης (Infinite Impulse Response-IIR). Η προσέγγιση αυτή μπορεί να αποβεί καλύτερη από την τοποθέτηση ενός φίλτρου πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (Finite Impulse Response-FIR) καθώς ένα φίλτρο IIR απαιτεί λιγότερους συντελεστές από ένα φίλτρο FIR για την μοντελοποίηση οποιουδήποτε συστήματος. Συνεπώς, συστήματα με φίλτρα IIR είναι συχνά πιο αποτελεσματικά για τον έλεγχο ευζωνικών συχνοτήτων [158].

2.2.2.4 Ενεργός Έλεγχος Θορύβου με Προσαρμοστική Ανάδραση

Η τεχνική προσαρμοστικής ανάδρασης (Adaptive Feedback) μονού καναλιού συστήματος ANC φαίνεται στην Εικόνα 2.15 και βασίζεται στην τεχνική αναπαραγωγής ενός σήματος αναφοράς $x(n)$ χρησιμοποιώντας μόνο το σήμα σφάλματος και την έξοδο του φίλτρου προσαρμογής που φιλτράρεται από την δευτερεύουσα διαδρομή. Πιο αναλυτικά, παρατηρείται ότι αν $\widehat{S}(z) \approx S(z)$ τότε προκύπτει η αρχική εκτίμηση του θορύβου $\widehat{d}(n) \approx d(n)$. Επειδή η εκτίμηση του θορύβου $d(n)$ χρησιμοποιείται ως σήμα αναφοράς για την επόμενη επανάληψη (δηλαδή την χρονική στιγμή $n+1$) η διαδικασία δημιουργίας ενός σήματος αναφοράς λειτουργεί ως πρόβλεψη ενός σταδίου και συνεπώς η διαδικασία αυτή να ακυρώσει τον προβλέψιμο θόρυβο. Ο πρωτεύον θόρυβος $d(n)$

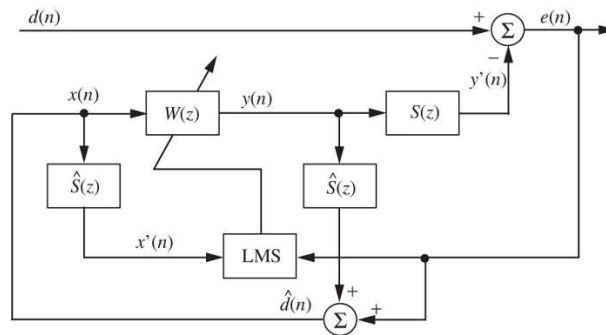
προκύπτει από το φιλτράρισμα του αρχικού θορύβου με την κύρια διαδρομή $P(z)$ έτσι ώστε να μπορεί να προβλεφθεί ο πρωτεύον θόρυβος [158]. Η δευτερεύουσα διαδρομή χρησιμοποιείται για την σύνθεση του σήματος αναφοράς το οποίο προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$x(n) \equiv \widehat{d}(n) = e(n) + \sum_{m=0}^{M-1} \widehat{S}_m y(n-m)$$

Όπου $\widehat{S}_m, m = 0, 1, \dots, M-1$ είναι οι συντελεστές της M τάξης του FIR φίλτρου $\widehat{S}(z)$ το οποίο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της δευτερεύουσας διαδρομής $S(z)$. Το δευτερεύον σήμα $y(n)$ δίνεται από:

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

Όπου $w_l(n), l = 0, 1, \dots, L-1$ είναι οι συντελεστές του φίλτρου $W(z)$ την χρονική στιγμή n .



Εικόνα 2.15 Μπλοκ διάγραμμα ANC προσαρμοστικής ανάδρασης [159]

Με σκοπό την βελτίωση της ανθεκτικότητας του αλγορίθμου χρησιμοποιείται ο κανονικοποιημένος αλγόριθμος FxLMS. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$w_l(n+1) = w_l(n) + \frac{\mu}{\widehat{P}_x(n) + c} x'(n-l)e(n)$$

Όπου $l = 0, 1, \dots, L-1$ και το φιλτραρισμένο σήμα αναφοράς δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$x'(n) \equiv \sum_{m=0}^{M-1} \widehat{S}_m x(n-m)$$

Και η ισχύς:

$$\widehat{P}_x(n) = (1-a)\widehat{P}_x(n-1) + ax^2(n-1)$$

Όπου αναφέρεται σε ένα φίλτρο πρώτης τάξης και η σταθερά c ορίζει το μέγιστο όριο στο κέρδος του φίλτρου προσαρμογής όταν η εκτιμώμενη ισχύς $\widehat{P}_x(n)$ είναι πολύ μικρή [160].

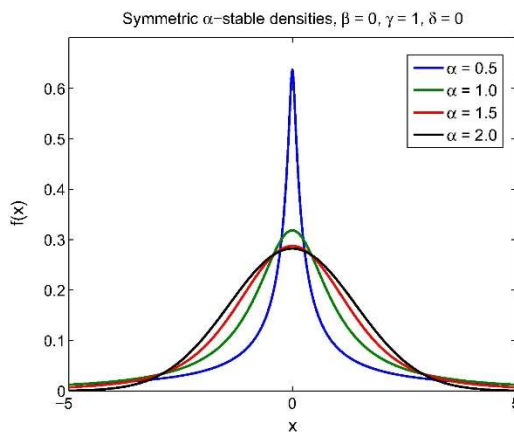
2.2.2.5 Ο Αλγόριθμος FxRLS

Ένας από τους πιο γνωστούς τύπους θορύβων στην καθημερινότητα των ανθρώπων είναι ο κρουστικός ή παλμικός θόρυβος. Για παράδειγμα, ο ήχος μιας αντλίας έγχυσης σε νοσοκομεία, οι παρεμβολές επικοινωνιών γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας τα διάφορα υποβρύχια ακουστικά σήματα

και γενικά όλα τα είδη ανθρωπογενούς θορύβου τα οποία δεν είναι Gaussian θόρυβος [161]. Τα σήματα κρουστικών θορύβων μπορούν να μοντελοποιηθούν με την συμμετρική α κατανομή (Symmetric alpha Stable-SaS) [162]. Η SaS κατανομή έχει την παρακάτω μορφή:

$$\varphi(t) = e^{-\gamma|t|^a}$$

Όπου $0 < a < 2$ και περιγράφει την κατανομή της μεταβλητής γι' αυτό και ονομάζεται χαρακτηριστικός εκθέτης και γ ($\gamma > 0$) η διασπορά. Εάν το a είναι κοντά στο μηδέν τότε ο θόρυβος παρουσιάζει υψηλό κρουστικό χαρακτήρα, ενώ εάν είναι κοντά στο 2 τότε τείνει να μοιάσει στο Gaussian θόρυβο (Εικόνα 2.16). Ομοίως, εάν το γ είναι ίσο με τη μονάδα τότε η κατανομή SaS ονομάζεται τυπική κατανομή SaS [163].



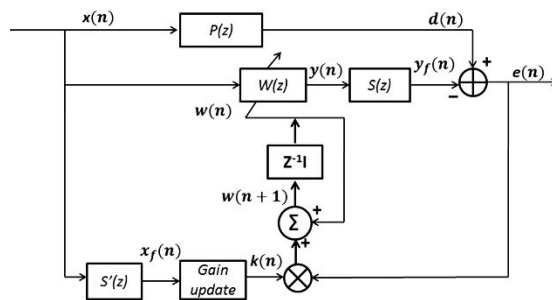
Εικόνα 2.16 Φάσμα ισχύος κατά το οποίο διακρίνεται η επίδραση της μεταβολής του a σε καθορισμένο εύρος [163]

Για αντίστοιχα σήματα όμως έχει αποδειχθεί ότι ο αλγόριθμος FxLMS είναι αρκετά ασταθής και συνεπώς δεν αποτελεί την σωστή επιλογή για ένα τέτοιο σύστημα ANC [162]. Συνεπώς στα συστήματα αυτά χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος φιλτραρισμένου x αναδρομικού ελαχίστου τετραγώνου (Filtered x Recursive Least Square-FxRLS). Ο βασικότερος περιορισμός του αλγόριθμου FxLMS είναι ο χαμηλότερος ρυθμός σύγκλισης και γενικά το μεγάλο μέσο τετραγωνικό σφάλμα σταθερής κατάστασης σε σχέση με τον αλγόριθμο FxRLS. Ο αλγόριθμος FxRLS παρέχει καλύτερη σύγκλιση από τον αλγόριθμο FxLMS και τις παραλλαγές του, όμως στερείται στιβαρότητας παρουσία υψηλού παλμικού θορύβου [164].

Το μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος ANC βασισμένο στον αλγόριθμο FxRLS φαίνεται στην Εικόνα 2.17. Στο διάγραμμα αυτό, παρατηρείται ότι το φίλτρο $W(z)$ είναι ένα FIR φίλτρο με μήκος L το οποίο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$w(n) = [w(n), w(n-1), \dots, w(n-L+1)]^T$$

όπου $w(0) = 0$ και $P(0) = \delta^{-1}I$.



Εικόνα 2.17 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος ANC με βάση τον αλγόριθμο FxRLS [163]

Το σήμα $x(n)$ είναι το σήμα θορύβου που πρέπει να ακυρωθεί και $P(z)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς που αντιπροσωπεύει την κύρια διαδρομή, από το μικρόφωνο αναφοράς στο μικρόφωνο σφάλματος και $S(z)$ είναι η δευτερεύουσα συνάρτηση μεταφοράς της διαδρομής μεταξύ της εξόδου του φίλτρου προσαρμογής $W(z)$ και της εξόδου του μικροφώνου σφάλματος. Το σήμα $d(n)$ λαμβάνεται από το μικρόφωνο αναφοράς και στην συνέχεια φιλτράρεται από το φίλτρο προσαρμογής για την δημιουργία ενός ακυρωτικού σήματος $y(n)$ το οποίο έπειτα οδηγείται στο ηχείο. Το ακυρωτικό σήμα $y(n)$ φιλτράρεται στην συνέχεια από το $S(z)$ στην δευτερεύουσα διαδρομή και λαμβάνεται το σήμα ελέγχου $y_f(n)$ στην θέση του μικροφώνου σφάλματος. Κατά την εκτιμώμενη δευτερεύουσα διαδρομή χρησιμοποιείται ένα φίλτρο προσαρμογής $S'(z)$ από όπου λαμβάνεται το σήμα $X_f(n)$ και ύστερα οδηγείται σε έναν ενισχυτή όπου λαμβάνεται το σήμα $k(n)$ το οποίο αντιπροσωπεύει το κέρδος του FxRLS αλγορίθμου και προκύπτει ότι:

$$k(n) = \frac{P(n-1)X_f(n)}{X_f^H(n)P(n-1)X_f(n) + \lambda}$$

Όπου λ ο συντελεστής σφάλματος και $P(n)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς κύριας διαδρομής η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P(n) = \lambda^{-1}P(n-1) - \lambda^{-1}k(n)X_f^H(n)P(n-1)$$

Στην συνέχεια το σήμα $k(n)$ συναντά το σήμα σφάλματος:

$$e(n) = d(n) - s(n)[W^H(n-1)X_f(n)]$$

Έπειτα λαμβάνεται το σήμα $W(n+1)$ όπου:

$$W(n+1) = W(n) + k(n)e(n)$$

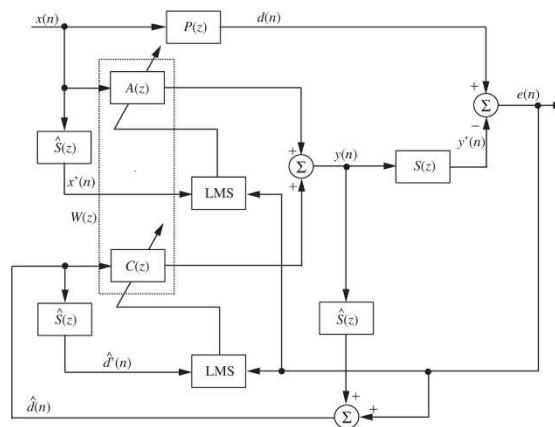
Το $x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]^T$ είναι το διάνυσμα σήματος θορύβου αναφοράς και $x'(n)$ είναι το σήμα θορύβου αναφοράς το οποίο φιλτράρεται από το εκτιμώμενο δευτερεύον φίλτρο της διαδρομής $S'(z)$ [163].

Η αρχικοποίηση του αλγορίθμου FxRLS είναι ένα κρίσιμο σημείο για την σύγκλιση του αλγορίθμου. Η παράμετρος κανονικοποίησης δ εξαρτάται από την τιμή του SNR και γενικά την διακύμανση του σήματος εισόδου $x'(n)$. Όταν το επίπεδο θορύβου στην είσοδο είναι χαμηλό, ο αλγόριθμος FxRLS εμφανίζει εξαιρετικά υψηλό ρυθμό σύγκλισης. Ωστόσο, εάν το επίπεδο θορύβου είναι αρκετά υψηλό είναι προτιμότερο να αρχικοποιηθεί ο αλγόριθμος με μεγάλη τιμή δ [164]. Έχει αποδειχθεί μέσω διάφορων πειραμάτων ότι ο αλγόριθμος FxRLS υπερτερεί όλων των αλγορίθμων FxLMS ως προς το ταχύτερο ρυθμό σύγκλισης για συστήματα ANC παλμικού θορύβου [165]. Στην περίπτωση όμως που ο θόρυβος δεν είναι σταθερός δηλαδή η παράμετρος δ δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Κατσιφής Παναγιώτης Νεκτάριος

χρονικά, ο αλγόριθμος FxRLS πρέπει να αρχικοποιηθεί εκ νέου κάτι το οποίο είναι εξαιρετικά δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο κατά την διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος [164]. Επομένως, εάν το επίπεδο θορύβου μεταβληθεί τότε ο αλγόριθμος στερείται στιβαρότητας και γίνεται εξαιρετικά ασταθής.

2.2.2.6 Υβριδικό Σύστημα ANC

Τα συστήματα ANC τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω αναφερόντουσαν σε συστήματα τροφοδοσίας (feedforward ANC) τα οποία αποτελούνταν από δύο αισθητήρες: έναν αισθητήρα αναφοράς και έναν αισθητήρα σφάλματος. Ο αισθητήρας αναφοράς είναι υπεύθυνος για τον εντοπισμό του θορύβου που πρέπει να ακυρωθεί, ενώ ο αισθητήρας σφάλματος είναι υπεύθυνος για τον εντοπισμό των σφαλμάτων. Τα συστήματα Ενεργός Έλεγχος Θορύβου με Προσαρμοστική Ανάδραση (adaptive feedback ANC) χρησιμοποιούν μόνο έναν αισθητήρα σφάλματος με σκοπό να ακυρώσουν τα προβλέψιμα στοιχεία του πρωτεύοντος θορύβου. Ο συνδυασμός των δύο αυτών δομών ενεργού ελέγχου θορύβου αποτελεί το υβριδικό σύστημα ANC και απεικονίζεται στην Εικόνα 2.18 [137] [166].



Εικόνα 2.18 Μπλοκ διάγραμμα υβριδικού συστήματος ANC [158]

Το ακυρωτικό σήμα $y(n)$ προκύπτει από τον συνδυασμό των δύο εξόδων των αισθητήρων αναφοράς $A(z)$ και σφάλματος $C(z)$. Ο συνδυασμένος ελεγκτής $W(z)$ έχει δύο εισόδους αναφοράς: το σήμα $x(n)$ από τον αισθητήρα αναφοράς και $d(n)$ το εκτιμώμενο πρωτεύον σήμα. Τα φιλτραρισμένα σήματα $x'(n)$ και $d'(n)$ χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή των συντελεστών των φίλτρων $A(z)$ και $C(z)$ αντίστοιχα [137]. Το υβριδικό σύστημα ANC παίζει διπλό ρόλο στην ακύρωση του πρωτεύοντος θορύβου που συλλέγεται από τον αισθητήρα αναφοράς του feedforward ANC, $A(z)$, και του υπολειπόμενου θορύβου ο οποίος συλλέγεται από τον αισθητήρα σφάλματος του adaptive feedback ANC, $C(z)$ [158]. Το σήμα $\widehat{d}(n)$ προκύπτει από το άθροισμα των σημάτων $e(n)$ και $y(n)$ φιλτραρισμένο από το $\widehat{S}(z)$. Το σήμα $e(n)$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$e(n) = d(n) - \sum_{i=0}^{N_s-1} S_i y(n-i)$$

Και το σήμα $y(n)$:

$$y(n) = \sum_{j=0}^{N_a-1} a_j(n) X(n-j) + \sum_{k=0}^{N_c-1} c_k(n) \widehat{d}(n-k)$$

Το σήμα $\widehat{d}(n)$ προκύπτει από το σήμα $e(n)$ και την έξοδο του $C(z)$ φιλτραρισμένο από το $\widehat{S}(z)$:

$$\widehat{d}(n) = e(n) + \sum_{l=0}^{N_s-1} \widehat{s}_l \sum_{m=0}^{N_c-1} c_m(n-l) d(n-l-m)$$

Όπου N_a και N_c είναι οι συντελεστές των φίλτρων προσαρμογής $\{a_i(n)\}$ και $\{c_i(n)\}$ αντίστοιχα και ισχύει $N_s \ll N_a, N_c$ και επίσης $N_s - 1$ είναι η σειρά των $S(z)$ και $\widehat{S}(z)$ [166].

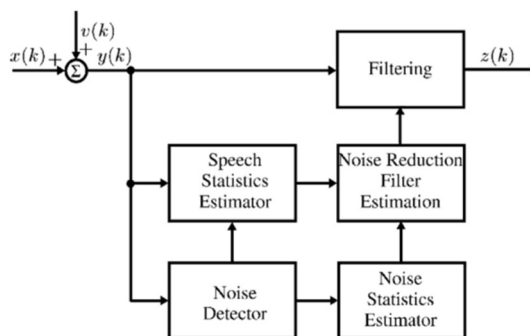
Τα υβριδικά συστήματα ANC προσφέρουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά τις ακυρώσεις θορύβου στενής ζώνης και ευρυζωνικότητας καθώς επίσης παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία από τα συστήματα feedback και feedforward ANC [167] [168]. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα των υβριδικών συστημάτων ANC μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας χαμηλότερη τάξη φίλτρων FIR ή IIR για την επίτευξη της ίδιας απόδοσης με αυτή χρησιμοποιώντας μονάχα το σύστημα feedforward ή feedback ANC [139].

2.2.3 Μείωση Θορύβου

Ο θόρυβος όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εντοπίζεται σχεδόν παντού και μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις τόσο στην ποιότητα της ομιλίας μεταξύ δύο ανθρώπων, όπως για παράδειγμα η υποβάθμιση της ποιότητας και της αντίληψης της ομιλίας επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο την αντίληψη του ακροατή, όσο και στην ψυχική υγεία των ανθρώπων [169]. Η ύπαρξη του θορύβου γενικά είναι αναπόφευκτη. Σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές που σχετίζονται με την φωνή και την ομιλία, από τις τηλεπικοινωνίες έως και την εγγραφή ήχου, το σήμα ενδιαφέροντος είναι επηρεασμένο από τον θόρυβο [170]. Προκειμένου να καταστεί η επικοινωνία μεταξύ δύο ανθρώπων εφικτή και καταληπτή, παρουσία θορύβου, χρειάζεται να αναπτυχθούν ορισμένες τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακών σημάτων για την εξασθένιση του θορύβου από το αρχικό σήμα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διαδικασία μείωσης θορύβου (Noise Reduction) ή αλλιώς διαδικασία βελτίωσης της ομιλίας (Speech Enhancement). Η διαδικασία αυτή αποτελεί ερευνητικό τομέα από την εποχή που εφευρέθηκε η τεχνική της φασματικής αφαίρεσης στα μέσα της δεκαετίας του 1960 [171] [172]. Γενικά, η τεχνική αυτή διακρίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τον αριθμό των καναλιών μικροφώνου: μονοκάναλη και πολυκάναλη τεχνική.

Ως προς την πρώτη τεχνική, χρησιμοποιείται ένα μόνο μικρόφωνο και το σήμα ενδιαφέροντος μοντελοποιείται ως υπέρθεση της καθαρής ομιλίας και του θορύβου. Κατά την διαδικασία αυτή, το σήμα εισόδου (θορυβώδη ομιλία) περνά μέσα από ένα γραμμικό (χρονικά μεταβαλλόμενο) φίλτρο και στην έξοδο λαμβάνεται μια εκτίμηση του καθαρού σήματος ομιλίας. Γνωρίζοντας ότι τα σήματα του θορύβου και της ομιλίας έχουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά, το φίλτρο αυτό μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να μειώνει σημαντικά το επίπεδο θορύβου χωρίς να παραμορφώνει αρκετά το σήμα ομιλίας. Η μονοκάναλη τεχνική μείωσης του θορύβου παρουσιάζει πολλές ελκυστικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, μπορεί να εγκατασταθεί σε αρκετές συσκευές επικοινωνίας χωρίς να απαιτούνται σημαντικές αλλαγές στον σχεδιασμό τους και γενικά είναι οικονομική στην εφαρμογή της [169]. Από την άλλη πλευρά, κατά την τεχνική αυτή η παραμόρφωση της ομιλίας είναι αναπόφευκτη και η ποσότητα της παραμόρφωσης ομιλίας είναι γενικά ανάλογη με την ποσότητα της μείωσης του θορύβου [173]. Συνεπώς, όσο μειώνεται ο θόρυβος τόσο παραμορφώνεται η ομιλία. Ένα τυπικό μοντέλο ενός μονοκάναλου συστήματος μείωσης θορύβου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.19. Το διάγραμμα ξεκινά με το «καθαρό» σήμα $x(k)$ το οποίο έχει αλλοιωθεί από το ανεπιθύμητο πρόσθετο θόρυβο $u(k)$. Το «θορυβώδες» σήμα $y(k)$ το οποίο αποτελεί μια υπέρθεση των σημάτων $x(k)$ και $u(k)$ υφίσταται αρχικά επεξεργασία για να προσδιοριστεί εάν η επιθυμητή ομιλία είναι παρούσα ή απουσιάζει. Με βάση τους πίνακες συνδυακόμενης και τις φασματικές πυκνότητες ισχύος

προκύπτουν ορισμένα στατιστικά στοιχεία, τα οποία εκτιμώνται με βάση τα αποτελέσματα ανίχνευσης και το θορυβώδες σήμα εισόδου. Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του φίλτρου επαναδιόρθωσης του θορύβου. Το εκτιμώμενο φίλτρο εφαρμόζεται στην «θορυβώδη» ομιλία για να φιλτράρει το θορυβώδες σήμα, παράγοντας με αυτό τον τρόπο ένα σήμα εξόδου $z(k)$ το οποίο είναι μια εκτίμηση της καθαρής ομιλίας $x(k)$ [174].



Εικόνα 2.19 Μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού μονοκάναλου συστήματος μείωσης θορύβου [174]

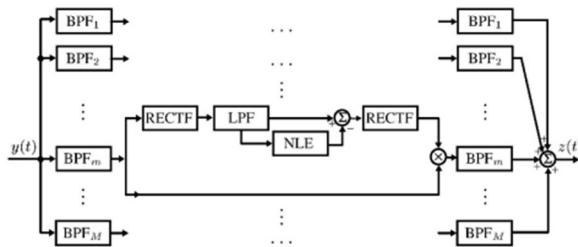
Ως προς την πολυκάναλη τεχνική μείωσης θορύβου, χρησιμοποιούνται πολλαπλά μικρόφωνα με σκοπό τον έλεγχο της ποσότητας της παραμόρφωσης της ομιλίας και ταυτόχρονα την μείωση του θορύβου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε έξοδος του μικροφώνου μοντελοποιείται ως το σήμα ομιλίας μιας πηγής η οποία συνδυάζεται με την αντίστοιχη απόκριση του παλμού ακουστικού καναλιού και στην συνέχεια αλλοιώνεται από τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Η διαδικασία μείωσης του θορύβου τυπικά διαμορφώνεται ως ένα πρόβλημα εκτίμησης του σήματος της πηγής από τις παρατηρήσεις των μικροφώνων. Υποθέτοντας ότι τα ακουστικά κανάλια δεν έχουν αντήχηση, τα σήματα σε όλους τους αισθητήρες μπορούν να συγχρονιστούν καθυστερώντας ή προωθώντας κάθε έξοδο μικροφώνου κατά ένα κατάλληλο χρονικό διάστημα. Όταν αυτά τα συγχρονισμένα σήματα αθροιστούν μεταξύ τους, τα στοιχεία του σήματος θα συνδυαστούν και εν τέλη θα ενισχυθούν. Ωστόσο, τα σήματα θορύβου αθροίζονται ασυνάρτητα (ως προς την ισχύ) εξαιτίας της τυχαίας φύσης τους [169].

Στόχος της μείωσης θορύβου είναι να βελτιώσει μια ή περισσότερες αντιληπτικές πτυχές της θορυβώδους ομιλίας κυρίως την ποιότητα και την ευκρίνειά της. Παρ' όλα αυτά, η βελτίωση της ποιότητας της θορυβώδους ομιλίας μπορεί να μην οδηγήσει απαραίτητα σε βελτίωση της αντιληπτικότητας. Στην πραγματικότητα, η βελτίωση της ομιλίας πιθανόν να οδηγήσει σε μείωση της κατανοητότητας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παραμόρφωση που προσδίδεται στο σήμα καθαρής ομιλίας από την υπερβολική καταστολή του θορυβώδους σήματος. Πράγματι, σε ορισμένες εφαρμογές ο βασικός στόχος των μείωσης θορύβου της ομιλίας είναι η βελτίωση της ποιότητας της ομιλίας με δευτερεύοντα στόχο τη διατήρηση της ευκρίνειας της ομιλίας [175].

2.2.3.1 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή

Οι πρώτες προσπάθειες μελέτης της μείωσης θορύβου για την βελτίωση σημάτων ομιλίας έλαβαν χώρα την δεκαετία του 1960. Εκείνη την εποχή, στα εργαστήρι της εταιρίας Bell, ο Schroeder παρουσίασε ένα σύστημα (Εικόνα 2.20) για την μείωση του θορύβου στο περιβάλλον των τηλεπικοινωνιών. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, το σήμα εισόδου θορύβου $y(t)$, (όπου t συνεχής χρόνος) που είναι η υπέρθεση της καθαρής ομιλίας $x(t)$ και του θορύβου $v(t)$ δηλαδή: $y(t) = x(t) + v(t)$, χωρίζεται σε M υποζώνες. Για κάθε υποζώνη εφαρμόζεται ένας ανορθωτής και ένα χαμηλοπερατό φίλτρο παράλληλα, με σκοπό την εκτίμηση του θορυβώδους σήματος της ομιλίας. Στην συνέχεια, το επίπεδο θορύβου στην αντίστοιχη υποζώνη υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ένα αναλογικό κύκλωμα με αντιστάσεις, πυκνωτές και διόδους και η εκτίμηση του θορύβου έπειτα αφαιρείται από το θορυβώδες σήμα ομιλίας, καταλήγοντας έτσι σε μια εκτίμηση της καθαρής ομιλίας για την κάθε υποζώνη. Συνεχίζοντας, εφαρμόζεται μια δεύτερη διαδικασία διόρθωσης για να

μηδενιστούν τα αρνητικά αποτελέσματα εξαιτίας της αφαίρεσης. Έπειτα, η εκτίμηση του διορθωμένου καθαρού σήματος ομιλίας η οποία εξυπηρετείται ως φίλτρο απολαβής, πολλαπλασιάζεται με το μη τροποποιημένο σήμα υποζώνης. Τέλος, το τελικό σήμα $z(t)$ απαρτίζεται από όλες τις εξόδους υποζώνης όπου $z(t)$ είναι βασικά μια εκτίμηση του σήματος $x(t)$. Το σύστημα του Schroeder είναι στην πραγματικότητα μια τεχνική φασματικής αφαίρεσης χρησιμοποιώντας αναλογική υλοποίηση. Ωστόσο, το έργο αυτό ήταν σχετικά άγνωστο στην ερευνητική κοινότητα αφαίρεσης θορύβου έως ότου αναπτύχθηκαν πιο επίσημες μέθοδοι στα τέλη της δεκαετίας του 1970.



Εικόνα 2.20 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος μείωσης θορύβου που πρότεινε ο Schroeder [174]

Η δεκαετία του 1970 αποτέλεσε μια σημαντική χρονική περίοδος για την ανάπτυξη τεχνικών μείωσης θορύβου βασιζόμενες στην φασματική τροποποίηση. Αυτό το μεγάλο κύμα ενδιαφέροντος οφειλόταν κυρίως στη συμβολή των αλγορίθμων ψηφιακού σήματος (Digital Signal Processing-DSP) και των συσκευών DSP τα οποία ήταν ευρέως διαδεδομένα εκείνη την εποχή [174]. Το 1974, οι Weiss, Aschkenasy και Parsons ανέπτυξαν μια μέθοδο «διαμόρφωσης φάσματος» κατά την οποία χρησιμοποιούνταν τα ψαλίδισμα πλάτους σε κάθε φίλτρο για την αφαίρεση των χαμηλών σημάτων (πιθανώς τον θόρυβο) [176]. Λίγα χρόνια αργότερα ο Boll εφηύρε εκ νέου τη μέθοδο φασματικής αφαίρεσης αλλά στον ψηφιακό τομέα [172]. Έπειτα, οι Lim και Oppenheim παρουσίασαν μια από τις πρώτες ολοκληρωμένες τεχνικές μείωσης θορύβου και ενίσχυσης της ομιλίας [177]. Επίσης, οι Sondhi, Schmidt και Rabiner δημοσίευσαν αποτελέσματα από μια σειρά μελετών εφαρμογής που βασίζονται στο έργο του Schroeder τη δεκαετία του 1960 [178].

Τη δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκαν πολλές θεμελιώδεις ιδέες για την μείωση του θορύβου. Γενικά, οι ιδέες αυτές ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: φασματική αποκατάσταση με βάση τη θεωρία εκτίμησης και μεθόδους που βασίζονται σε μοντέλα ομιλίας. Η τεχνική φασματικής αποκατάστασης αντιμετωπίζει την μείωση του θορύβου ως ένα ισχυρό πρόβλημα φασματικής εκτίμησης, δηλαδή εκτιμώντας το φάσμα της «καθαρής» ομιλίας από αυτό της θορυβώδους ομιλίας [174]. Το 1984 οι Ephraim και Malah ανέπτυξαν ένα βέλτιστο φασματικό πλάτος και ορισμένους εκτιμητές φασματικής φάσης χρησιμοποιώντας τη θεωρία στατιστικής εκτίμησης [179]. Η εργασία τους (μαζί με το έργο των McAulay και Malpass) είναι η πρώτη που αποδεικνύει θεωρητικά ότι η βέλτιστη εκτίμηση της φασματικής φάσης «καθαρής» ομιλίας είναι η φασματική φάση της «θορυβώδους» ομιλίας, γι' αυτό και η εργασία αυτή είναι η πιο αξιοσημείωτη ως μια πρόωμη προσπάθεια εφαρμογής της στατιστικής θεωρίας στη μείωση του θορύβου. Μετά από αυτή την εργασία, αναπτύχθηκαν πολλοί στατιστικοί φασματικοί εκτιμητές, όπως για παράδειγμα τον εκτιμητή ελαχίστου μέσου τετραγώνου σφάλματος (Minimum Mean Squared Error-MMSE), τον εκτιμητή φασματικού πλάτους μέγιστης πιθανότητας (Maximum Likelihood Spectral Amplitude Estimator-MLSAE) και τον εκτιμητή φασματικής ισχύος ML (Maximum Likelihood) [174].

2.2.3.2 Αλγόριθμοι Μείωσης Θορύβου

Ο θόρυβος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των ανεπιθύμητων στοιχείων σε ένα σήμα. Ο θόρυβος δεν είναι κάτι άλλο παρά οι αλλαγές που μπορεί να συμβούν σε ένα σήμα κατά την αποθήκευση, τη μετάδοση, την επεξεργασία

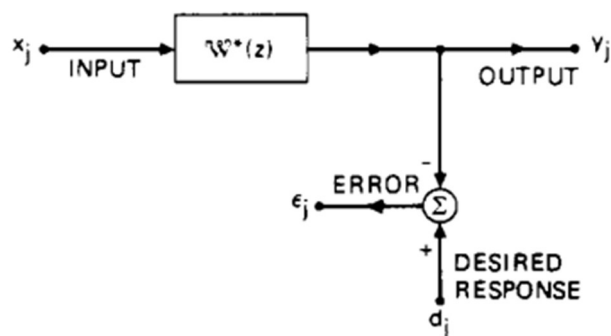
και τη μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και αντίστροφα. Η μείωση του θορύβου και συνεπώς η ανάκτηση του αρχικού σήματος είναι ο βασικότερος στόχος ενός φίλτρου στα συστήματα επεξεργασίας σημάτων. Ένας αντίστοιχος θόρυβος χωρίζεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τις στατιστικές του ιδιότητες:

- Προσθετικός θόρυβος όπου είναι ο θόρυβος που προστίθεται στο σήμα ενδιαφέροντος.
- Πολλαπλασιαστικός θόρυβος όπου είναι ο θόρυβος που πολλαπλασιάζεται στο ενδιαφερόμενο σήμα.

Ο θόρυβος στα συστήματα ήχου μπορεί να είναι θόρυβος παρασκηνίου εξαιτίας ψευδών ήχων κατά την εγγραφή ομιλίας ή μπορεί να είναι θόρυβος που προστίθεται για να γεμίσει σιωπηλά κενά στην ομιλία. Ως αποτέλεσμα, η εκτίμηση και η μείωση/ακύρωση του θορύβου αποτελεί ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα, καθώς οι ιδιότητες των σημάτων θορύβου διαφέρουν ανάλογα με τον χρόνο. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος υπάρχει η ανάγκη εγκατάστασης ενός ευέλικτου αλγορίθμου που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Ενδεικτικά δύο βασικές αρχές που πρέπει να ληφθούν υπόψιν είναι η εξάλειψη του θορύβου από το σήμα ενδιαφέροντος για την βελτίωση της αναλογίας σήματος προς θόρυβο και την διατήρηση των χαρακτηριστικών του αρχικού σήματος. Στην ενότητα αυτή, αναλύονται ορισμένοι από τους πιο γνωστούς αλγόριθμους μείωσης θορύβου με σκοπό την βελτίωση της καταληπτότητας της ομιλίας [180].

2.2.3.3 Φίλτρο Wiener

Η θεωρία Wiener, η οποία διατυπώθηκε από τον Norbert Wiener, αποτελεί τη βάση των γραμμικών φίλτρων ελαχίστων τετραγώνων σφαλμάτων που εξαρτώνται από δεδομένα εισόδου [181]. Τα φίλτρα Wiener βασίζονται στις στατιστικές ιδιότητες τόσο του καθαρού σήματος όσο και του «θορυβώδους» σήματος [180]. Η Εικόνα 2.21 παρουσιάζει ένα τυπικό φίλτρο Wiener μονής εισόδου μονής εξόδου. Το σήμα εισόδου x_j και το σήμα εξόδου y_j θεωρούνται χρονικά διακριτά, ενώ το σήμα εισόδου και η επιθυμητή απόκριση d_j θεωρούνται στατιστικά σταθερά. Το σήμα σφάλματος είναι $e_j = d_j - y_j$. Το φίλτρο είναι γραμμικό, διακριτό και σχεδιασμένο να είναι βέλτιστο από την πλευρά του ελαχίστου μέσου τετραγώνου σφάλματος (MMSE) [182].



Εικόνα 2.21 Μπλοκ διάγραμμα φίλτρου Wiener [182]

Ο Wiener διατύπωσε το πρόβλημα εκτίμησης συνεχούς χρόνου, ελαχίστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος στο κλασικό του έργο για την παρεμβολή, την παρέκταση και την εξομάλυνση των χρονοσειρών [183]. Η επέκταση της θεωρίας Wiener από συνεχή χρόνο σε διακριτό χρόνο είναι απλή και πιο πρακτική στην εφαρμογή της σε επεξεργαστές ψηφιακού σήματος. Ένα φίλτρο Wiener μπορεί να είναι ένα φίλτρο IIR ή ένα φίλτρο FIR. Γενικά, η διαμόρφωση ενός φίλτρου IIR Wiener καταλήγει σε ένα σύνολο μη γραμμικών εξισώσεων, ενώ η διαμόρφωση ενός φίλτρου FIR Wiener οδηγεί σε ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων. Το βασικότερο μειονέκτημα των φίλτρων FIR συγκριτικά με τα φίλτρα IIR είναι το γεγονός ότι μπορεί να χρειάζονται μεγάλο αριθμό συντελεστών για να προσεγγίσουν την επιθυμητή απόκριση [181].

Έστω ένα σήμα $x(m)$ το οποίο παρατηρείται σε ένα πρόσθετο θόρυβο ευρείας ζώνης $n(m)$ και μοντελοποιείται ως εξής:

$$y(m) = x(m) + n(m) \quad [184]$$

Υποθέτοντας ότι το σήμα $x(m)$ και ο θόρυβος $n(m)$ δεν σχετίζονται προκύπτει ο πίνακας αυτοσυσχέτισης του θορυβώδους σήματος ο οποίος είναι το άθροισμα του πίνακα αυτοσυσχέτισης του σήματος $x(m)$ και του θορύβου $n(m)$:

$$R_{yy} = R_{xx} + R_{nn}$$

Η αλλιώς: $r_{xy} = r_{xx}$, όπου R_{yy} , R_{xx} , και R_{nn} είναι οι πίνακες αυτοσυσχέτισης του θορυβώδους σήματος, του «καθαρού» σήματος και του θορύβου αντίστοιχα. Το r_{xy} είναι το διάνυσμα αλληλοσυσχέτισης του θορυβώδους σήματος και του σήματος χωρίς θόρυβο. Η τιμή του MMSE προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$R_{yy}w = r_{yx}$$

Όπου w είναι ο συντελεστής του φίλτρου Wiener. Με αντικατάσταση του δύο πρώτων σχέσεων στην τελευταία εξίσωση προκύπτει:

$$w = (R_{xx} + R_{nn})^{-1}r_{xx}$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την εξίσωση του βέλτιστου γραμμικού φίλτρου για την αφαίρεση προσθετικού θορύβου.

Ως προς το πεδίο της συχνότητας, το θορυβώδες σήμα $Y(f)$ δίνεται από την σχέση:

$$Y(f) = X(f) + N(f)$$

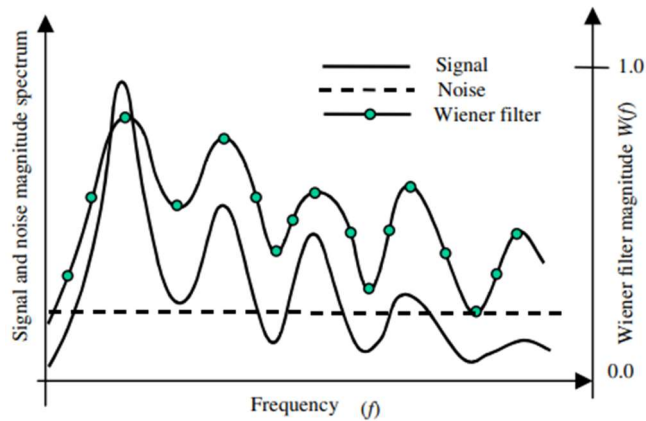
Όπου $X(f)$ και $N(f)$ είναι τα φάσματα σήματος και θορύβου αντίστοιχα. Για ένα σήμα που προστίθεται τυχαίος θόρυβος το φίλτρο Wiener στον τομέα της συχνότητας μετασχηματίζεται ως εξής:

$$W(f) = \frac{P_{xx}(f)}{P_{xx}(f) + P_{NN}(f)}$$

Όπου $P_{xx}(f)$ και $P_{NN}(f)$ είναι τα φάσματα ισχύος σήματος και θορύβου αντίστοιχα. Με διαίρεση του αριθμητή και του παρονομαστή της παραπάνω εξίσωσης με $P_{NN}(f)$ και η αντικατάσταση της μεταβλητής: $SNR = \frac{P_{xx}(f)}{P_{NN}(f)}$ προκύπτει:

$$W(f) = \frac{SNR(f)}{SNR(f) + 1}$$

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι το SNR εκφράζει τον λόγο σήματος προς θόρυβο με βάση τον λόγο φασματικής ισχύος και όχι με τους όρους λογαριθμικής ισχύος. Επομένως, $SNR=0$ αντιστοιχεί σε $-\infty$ dB.



Εικόνα 2.22 Γράφημα απεικόνισης της διακύμανσης της απόκρισης συχνότητας φίλτρου Wiener με το φάσμα σήματος για πρόσθετο λευκό θόρυβο [181]

Με βάση την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι για τον πρόσθετο θόρυβο, η απόκριση συχνότητας του φίλτρου Wiener είναι ένας πραγματικός θετικός αριθμός στην περιοχή $0 \leq W(f) \leq 1$. Έστω δύο διαφορετικές περιπτώσεις: ένα σήμα χωρίς θόρυβο δηλαδή με $SNR = \infty$ και ένα εξαιρετικά θορυβώδες σήμα δηλαδή με $SNR = 0$. Στην πρώτη περίπτωση ισχύει $W(f) \approx 1$ και το φίλτρο παρουσιάζει ελάχιστη ή καθόλου εξασθένιση ως προς την συχνότητα χωρίς θόρυβο. Στην δεύτερη περίπτωση ισχύει $W(f) = 0$. Επομένως, για τον πρόσθετο θόρυβο, το φίλτρο Wiener εξασθενεί κάθε στοιχείο συχνότητας αναλογικά με μια εκτίμηση του SNR. Το σχήμα της Εικόνα 2.22 παρουσιάζει την ομοιότητα μεταξύ της απόκρισης συχνότητας του φίλτρου Wiener $W(f)$ και του φάσματος σήματος για την περίπτωση ενός προσθετικού λευκού θορύβου. Παρατηρείται ότι μια φασματική κορυφή του φάσματος σήματος, όπου το $SNR(f)$ είναι υψηλό, η απόκριση συχνότητας του φίλτρου Wiener είναι επίσης υψηλή και το φίλτρο παρουσιάζει μικρή εξασθένιση. Σε ένα ελάχιστο ακρότατο, η τιμή του SNR είναι χαμηλή, όπως και η απόκριση του φίλτρου Wiener. Συνεπώς, για τον πρόσθετο λευκό θόρυβο, η απόκριση του φίλτρου Wiener ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό το φάσμα του σήματος [181].

2.2.3.4 Μετασχηματισμός Karhunen–Loève

Ο μετασχηματισμός Karhunen-Loève (Karhunen-Loève Transform-KLT) αποτελεί τον πιο ανεπτυγμένο μαθηματικά αλγόριθμο. Χρησιμοποιείται ευρέως από το 2008 επιτυγχάνοντας μείωση θορύβου και συμπίεση πληροφορίας για οποιαδήποτε σήματα [185]. Ο μετασχηματισμός KL βασίζεται στην χρήση των ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα αυτοσυσχέτισης των δεδομένων εισόδου. Για ένα πραγματικό τυχαίο διάνυσμα $N \times 1$, $\{u(n), n=0, \dots, N-1\}$, τα βασικά διανύσματα (φ_k) του μετασχηματισμού KL (Φ) προκύπτουν από τα ορθοκανονικά ιδιοδιανύσματα του πίνακα αυτοσυσχέτισης, R , δηλαδή:

$$R\varphi_k = \lambda_k\varphi_k \text{ όπου } 0 \leq k \leq N - 1$$

Ο μετασχηματισμός KL του u ορίζεται ως εξής:

$$v = \Phi^*T u$$

Και ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι:

$$u = \Phi v = \sum_{k=0}^{N-1} u(k)\varphi_k$$

Η βασική ιδέα σε ένα σύστημα μείωσης θορύβου είναι να θεωρηθεί το σήμα εισόδου ως διάνυσμα σε διαστατικό χώρο και να μετατραπεί το θορυβώδες σήμα ομιλίας σε μη συσχετισμένα στοιχεία. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται βελτίωση του σήματος της ομιλίας και μείωση του θορύβου. Αρχικά

πραγματοποιείται μια εκτίμηση του «καθαρού» τμήματος του σήματος. Στη συνέχεια, το καθαρό σήμα συντίθεται εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό στην εκτίμηση των καθαρών μερών του σήματος [186]. Ο μετασχηματισμός KL έχει καλή απόδοση σε προσομοιώσεις όταν ο θόρυβος είναι λευκός Gaussian, ωστόσο δεν είναι τόσο αποτελεσματικός όταν ο θόρυβος είναι μεταβαλλόμενος έγχρωμος θόρυβος όσο όταν ο θόρυβος είναι λευκός σταθερός [187].

2.2.3.5 Αλγόριθμος Φασματικής Αφαίρεσης

Ο αλγόριθμος φασματικής αφαίρεσης είναι ιστορικά ένας από τους πρώτους αλγορίθμους που προτάθηκαν για την μείωση του θορύβου [188]. Είναι απλός και εύκολος στην εφαρμογή του καθώς βασίζεται στην αρχή ότι όταν δεν υπάρχει σήμα ομιλίας υπάρχει η δυνατότητα να εκτιμηθεί και να ενημερωθεί το φάσμα του θορύβου και έπειτα να αφαιρεθεί από το θορυβώδες σήμα ομιλίας με σκοπό την απόκτηση του καθαρού φάσματος των σημάτων ομιλίας.

Έστω ένα θορυβώδες σήμα ομιλίας $y(n)$ το οποίο αποτελείται από το καθαρό σήμα ομιλίας $x(n)$ και το πρόσθετο σήμα θορύβου $d(n)$, όπου ισχύει:

$$y(n) = x(n) + d(n)$$

Πολλοί από τους αλγόριθμους μείωσης θορύβου λειτουργούν με βάση τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform-DFT). Οι αλγόριθμοι αυτοί υποθέτουν ότι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος των συντελεστών DFT της καθαρής ομιλίας μπορούν να μοντελοποιηθούν από τους διαφορετικούς αλγόριθμους βελτίωσης της ομιλίας. Επομένως, εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Fourier έχουμε:

$$Y(w) = X(w) + D(w)$$

Το $Y(w)$ μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Y(w) = |Y(w)|e^{j\varphi_y}$$

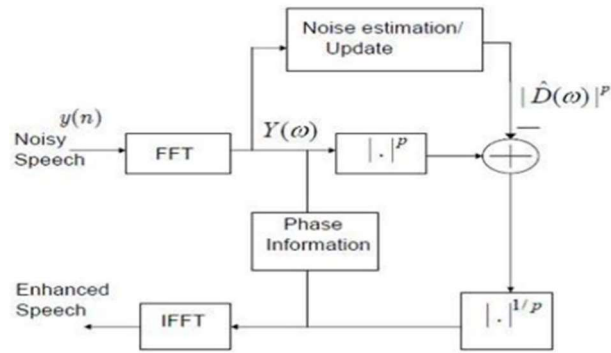
Όπου $|Y(w)|$ είναι το φάσμα μεγέθους και φ είναι το φάσμα της φάσης του θορυβώδους σήματος ομιλίας. Το φάσμα του θορύβου εκφράζεται ομοίως ως:

$$D(w) = |D(w)|e^{j\varphi_d}$$

Το μέγεθος του φάσματος του θορύβου $|D(w)|$ είναι άγνωστο όμως μπορεί να αντικατασταθεί από την μέση τιμή ή τον εκτιμώμενο θόρυβο $|D_e(w)|$ ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί κατά την διάρκεια παύσεων της ομιλίας [189]. Η φάση του θορύβου αντικαθίσταται από την φάση του θορυβώδους σήματος ομιλίας φ_y που δεν επηρεάζει την ακατάληπτη ομιλία [188]. Αφαιρώντας το φάσμα θορύβου από το φάσμα του θορυβώδους σήματος ομιλίας, υπολογίζεται το καθαρό σήμα ομιλίας ως εξής:

$$X_e(w) = [|Y(w)| - |D_e(w)|]e^{j\varphi_y}$$

Όπου $X_e(w)$ είναι το εκτιμώμενο καθαρό σήμα ομιλίας.



Εικόνα 2.23 Γενική μορφή αλγορίθμου αφαίρεσης φάσματος [188]

Γενικά, υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι αφαίρεσης φάσματος ανάλογα με τις παραμέτρους που χρειάζεται να αφαιρεθούν, όπως για παράδειγμα η φασματική αφαίρεση μεγέθους, η φασματική αφαίρεση ισχύος και η φασματική αφαίρεση αυτοσυσχέτισης. Η εκτίμηση του φάσματος του καθαρού σήματος ομιλίας είναι:

$$X_e(w) = |Y(w)| - |D_e(w)|$$

Ομοίως για το φάσμα ισχύος η αφαίρεση είναι:

$$X_e(w)^2 = |Y(w)|^2 - |D_e(w)|^2$$

Ως προς την φασματική αφαίρεση μεγέθους, το βελτιωμένο σήμα ομιλίας λαμβάνεται τελικά με τον υπολογισμό του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier της εκτιμώμενης καθαρής ομιλίας $|X_e(w)|$. Ως προς την αφαίρεση φάσματος ισχύος χρησιμοποιείται η φάση του θορυβώδους σήματος ομιλίας. Η γενικότερη έκδοση των αλγορίθμων φασματικής αφαίρεσης είναι:

$$X_e(w)^P = |Y(w)|^P - |D_e(w)|^P$$

Όπου P είναι ο εκθέτης ισχύος. Κατά την γενική μορφή φασματικής αφαίρεσης, όταν P=1 αποδίδει στον αλγόριθμο φασματικής αφαίρεση μεγέθους και όταν P=2 αποδίδει στον αλγόριθμο φασματικής αφαίρεσης ισχύος [189].

2.2.3.6 Αλγόριθμος MMSE

Οι αλγόριθμοι μείωσης θορύβου που βασίζονται στην εκτίμηση του ελαχίστου μέσου τετραγώνου σφάλματος (Minimum Mean-Square Error-MMSE Estimator) αποτελούν πόλο έλξης για πολλούς ερευνητές και επιστήμονες εδώ και πολλές δεκαετίες [179] [190]. Η αρχή λειτουργίας των αλγορίθμων MMSE είναι ότι τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη των συντελεστών του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) του καθαρού σήματος μπορούν να μοντελοποιηθούν με μια Gaussian κατανομή. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση ισχύει ασυμπτωτικά για τα πλαίσια ανάλυσης μεγάλης διάρκειας για τα οποία το εύρος της συσχέτισης του σήματος είναι πολύ μικρότερο από το μέγεθος του DFT. Παρά το γεγονός ότι αυτή η υπόθεση ισχύει για τους συντελεστές DFT του θορύβου, δεν ισχύει για τους συντελεστές DFT της ομιλίας, οι οποίοι συνήθως υπολογίζονται χρησιμοποιώντας σχετικά μικρές τιμές χρονικής διάρκειας. Γι' αυτό τον λόγο, αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει την χρήση μη Gaussian κατανομών για τη μοντελοποίηση των πραγματικών και των φανταστικών μερών των συντελεστών DFT ομιλίας [191] [192]. Αναλυτικότερα, για την μοντελοποίηση αυτή χρησιμοποιούνται οι Γ-κατανομές ή οι Λαπλασιανές κατανομές. Έχει αποδειχθεί από πολλούς επιστήμονες ότι οι Γ και Λαπλασιανές κατανομές παρέχουν καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα συγκριτικά με την Gaussian κατανομή [193] [194].

3 Κεφάλαιο 3ο: Εκτέλεση και Αξιολόγηση Ορθής Λειτουργίας Συστήματος

Έχοντας αναλύσει ορισμένες από τις πιο δημοφιλής τεχνικές ηχομείωσης, καθώς επίσης και την μείωση του θορύβου σε συστήματα τηλεπικοινωνιών, σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί ο σχεδιασμός, η εκτέλεση και η αξιολόγηση του θέματος της παρούσας εργασίας, η μείωση του θορύβου ακουστών συχνοτήτων. Προτού όμως γίνει αυτό θα πρέπει πρώτα να αναλυθούν τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται, όπως επίσης και το λογισμικό στο οποίο πραγματοποιείται ο παρών σχεδιασμός.

3.1 Αναπτυξιακά Εργαλεία

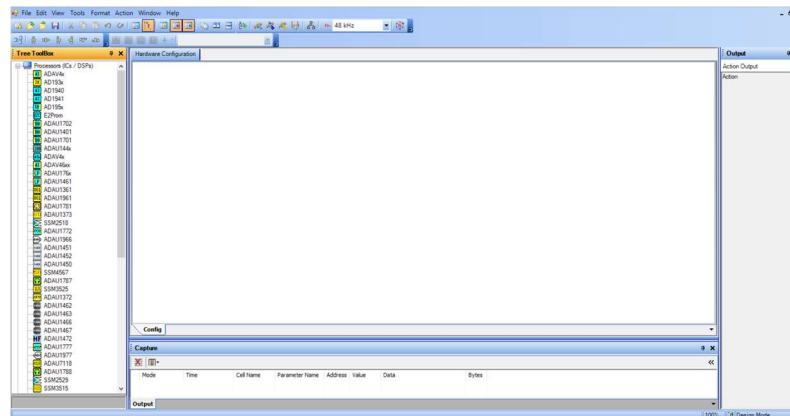
Τα αναπτυξιακά εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του συστήματος μείωσης θορύβου χωρίζονται σε εργαλεία υλικού (hardware) και εργαλεία λογισμικού (software). Ως προς την πρώτη κατηγορία χρησιμοποιείται ο επεξεργαστής ADAU1701, ενώ ως προς την κατηγορία λογισμικού χρησιμοποιείται το πρόγραμμα SigmaStudio.

3.1.1 SigmaStudio

Το SigmaStudio είναι ένα δωρεάν πρόγραμμα γραφικού προγραμματισμού που αναπτύχθηκε από την Analog Devices με σκοπό την διευκόλυνση του προγραμματισμού των επεξεργαστών ήχου SigmaDSP. Το SigmaStudio έχει μια φιλική προς τον χρήστη διεπαφή που παρέχει σε μηχανικούς και σχεδιαστές να κατασκευάσουν οπτικά αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος χρησιμοποιώντας προγραμματισμό βάσει μπλοκ διαγραμμάτων (block-based programming). Το SigmaStudio είναι ένα πρόγραμμα που επικεντρώνεται κυρίως στην επεξεργασία ήχου. Προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση για την αντιμετώπιση πολλών προκλήσεων όπως για παράδειγμα ο διαχωρισμός καναλιών ήχου, η εξαγωγή φίλτρων και πειραματικών αποτελεσμάτων. Η οργάνωση του περιβάλλοντος του SigmaStudio είναι ομαλή και απλή επιτρέποντας στον χρήστη άμεσες και εύκολες τροποποιήσεις του μπλοκ κυκλώματος. Το περιβάλλον αυτό προσφέρει ένα ευρύ φάσμα μπλοκ επεξεργασίας σήματος, τα οποία έχουν κατασκευαστεί ειδικά για να καλύπτουν τις απαιτήσεις διαφόρων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC). Ο χρήστης μπορεί εύκολα να αποθέσει τα μπλοκ αυτά σε ένα καμβά και να τα συνδέσει, για να δημιουργήσει εν τέλει μια σύνθετη αλυσίδα μπλοκ επεξεργασίας ήχου. Τα μπλοκ αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν φίλτρα, ενισχυτές, μίκτες, συμπίεστες, ισοσταθμιστές κ.λπ. Εάν οι βιβλιοθήκες δεν διαθέτουν τις απαραίτητες λειτουργίες ή τα κατάλληλα μπλοκ που επιθυμεί ο χρήστης, μπορεί να δημιουργηθεί ένα επιμέρους μπλοκ διάγραμμα για την δημιουργία προσαρμοσμένων αλγορίθμων [195]. Επίσης, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσαρμόσει τις παραμέτρους των μπλοκ και να διαμορφώσει τους αλγόριθμους ώστε να ικανοποιούν τις αντίστοιχες απαιτήσεις επεξεργασίας ήχου. Μόλις ολοκληρωθεί η σχεδίαση του εκάστοτε κυκλώματος η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω ενσύρματων συνδέσεων σε φυσικό πάγκο δοκιμών που παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και έλλειψη ελαττωμάτων και σφαλμάτων [196].

Το SigmaStudio διαθέτει ένα ευρύ φάσμα από DSP επεξεργαστές και είναι ικανό να υποστηρίξει την ανάπτυξη συστημάτων που χρησιμοποιούν πολλαπλά DSP. Ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει διατάξεις που περιλαμβάνουν περισσότερα από ένα DSP και να διαχειρίζεται τη συνεργασία μεταξύ αυτών των συσκευών. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ ή που χρειάζονται διαφορετικές λειτουργίες επεξεργασίας να εκτελούνται παράλληλα. Αναλυτικότερα, κατά την έναρξη του προγράμματος το περιβάλλον που συναντά ο χρήστης είναι αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Στο αριστερό μέρος της οθόνης βρίσκεται η εργαλειοθήκη του προγράμματος όπου στο σημείο αυτό βρίσκονται όλοι οι διαθέσιμοι επεξεργαστές, όπως επίσης και όλοι οι φυσικοί

είσοδοι του υπολογιστή (λ.χ. USB). Στο κεντρικό μέρος της οθόνης ο χρήστης συναντά το σημείο από όπου μέσω της μεθόδου «drag n drop» μπορεί να επιλέξει ένα μπλοκ από την εργαλειοθήκη να το τοποθετήσει στο κύκλωμα.



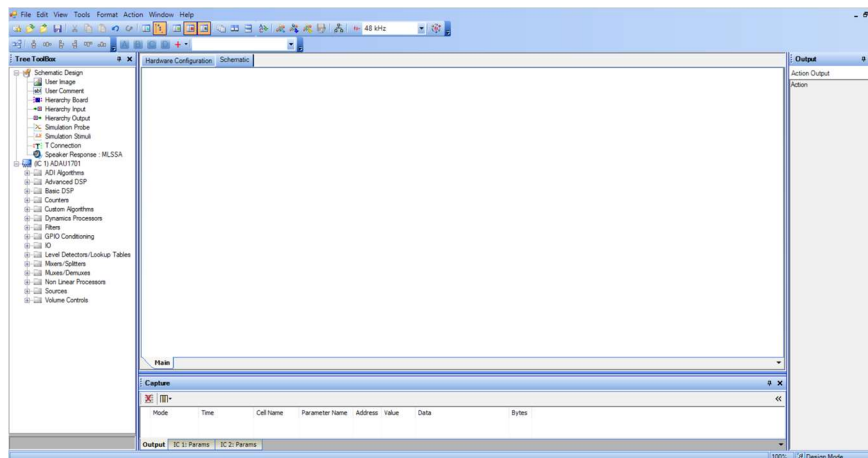
Εικόνα 3.1 Περιβάλλον SigmaStudio κατά την έναρξη του προγράμματος

Μόλις ο χρήστης επιλέξει τον κατάλληλο επεξεργαστή και μπλοκ εισόδου του υπολογιστή τότε αυτόματα εμφανίζεται το περιβάλλον σχεδίασης κυκλώματος όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2. Στο αριστερό μέρος της οθόνης βρίσκονται οι βιβλιοθήκες που διαθέτει το SigmaStudio ανάλογα με τον επεξεργαστή που έχει ο χρήστης. Το SigmaStudio περιλαμβάνει εκτενείς βιβλιοθήκες με διαμορφωμένα μπλοκ επεξεργασίας σήματος, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν ή να προσαρμοστούν στις ανάγκες του χρήστη. Αυτά τα μπλοκ καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών, από βασικά φίλτρα και ενισχυτές, μέχρι πιο εξειδικευμένες λειτουργίες, όπως ανιχνευτές φάσης και αλγόριθμους ANC. Εκτενέστερα, ορισμένες από τις πιο σπουδαίες κατηγορίες της βιβλιοθήκης είναι οι εξής:

- **ADΙ Αλγόριθμοι:** Οι ADΙ αλγόριθμοι είναι μια κατηγορία της βιβλιοθήκης του SigmaStudio που περιέχει διάφορους έτοιμους αλγόριθμους όπως για παράδειγμα το «Wind Noise Suppressor» που είναι ικανό να εντοπίσει και να μειώσει τον θόρυβο του αέρα. Σημαντικό μπλοκ είναι και το «Dynamic Bass Boost» το οποίο ενισχύει τις χαμηλές συχνότητες όταν το απαιτήσει το κύκλωμα.
- **Advanced & Basic DSP:** Οι δύο αυτές κατηγορίες της βιβλιοθήκης διαθέτουν μπλοκ τα οποία χρησιμοποιούνται σε προηγμένες DSP εφαρμογές. Για παράδειγμα περιέχει μπλοκ μετασχηματισμού Hilbert, μπλοκ πράξεων μεταξύ σημάτων όπως πολλαπλασιασμός, διαίρεση κ.λπ. και μπλοκ απεικόνισης τιμών «Real Time Display».
- **Φίλτρα:** Η βιβλιοθήκη του SigmaStudio περιλαμβάνει μια ποικιλία φίλτρων όπως φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων, φίλτρα υψηλών συχνοτήτων, φίλτρα ζώνης διέλευσης και φίλτρα στενής ζώνης διέλευσης.
- **Πολυπλέκτες και Αποπολυπλέκτες:** Στην κατηγορία αυτή συναντώνται τα μπλοκ πολυπλέκτη (multiplexer) και αποπολυπλέκτη (demultiplexer) όπως για παράδειγμα το μπλοκ «Switch» που δρομολογεί ένα σήμα εισόδου σε μια από τις πιθανές εξόδους.
- **Πηγές:** Η κατηγορία αυτή διαθέτει μια ευρεία γκάμα από πηγές εισόδου όπως για παράδειγμα πηγή ημιτόνου, τετραγωνικού παλμού, τριγωνικού παλμού, λευκού θορύβου και DC τάσης.

Γενικά, οι βιβλιοθήκες εργαλείων του SigmaStudio διευκολύνουν την ανάπτυξη και την προσαρμογή σύνθετων συστημάτων ήχου, επιτρέποντας στους χρήστες να εστιάσουν στη σχεδίαση και την παραμετροποίηση χωρίς να χρειάζεται να δημιουργήσουν κάθε λειτουργία από την αρχή. Παρέχουν

μια ισχυρή βάση για την ανάπτυξη και την προσαρμογή συστημάτων επεξεργασίας σήματος. Με τις προκαθορισμένες και προσαρμόσιμες μονάδες επεξεργασίας που διαθέτει, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει σύνθετα συστήματα επεξεργασίας ήχου με ευκολία. Συνεχίζοντας, στο πάνω μέρος της οθόνης συναντάται επιλογές όπως για παράδειγμα η συχνότητα δειγματοληψίας (sampling rate), όπως επίσης και επιλογές εγκατάστασης του κυκλώματος στο φυσικό κύκλωμα μέσω μιας εισόδου του υπολογιστή. Επίσης, στο ίδιο σημείο κανείς συναντά τις επιλογές αποθήκευσης του κυκλώματος και διάφορες άλλες επιλογές που αφορούν την διάταξη της εργαλειοθήκης του προγράμματος ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη. Στο κάτω μέρος της οθόνης είναι το σημείο που παρατηρούνται οι μεταβολές που προκαλούνται στο κύκλωμα όπως για παράδειγμα κατά την μεταβολή ενός ποτενσιόμετρου, ενώ στο δεξί μέρος της οθόνης κανείς συναντά τις αλλαγές που μπορεί να προκληθούν στην έξοδο του κυκλώματος.



Εικόνα 3.2 Περιβάλλον σχεδίασης κυκλώματος του SigmaStudio

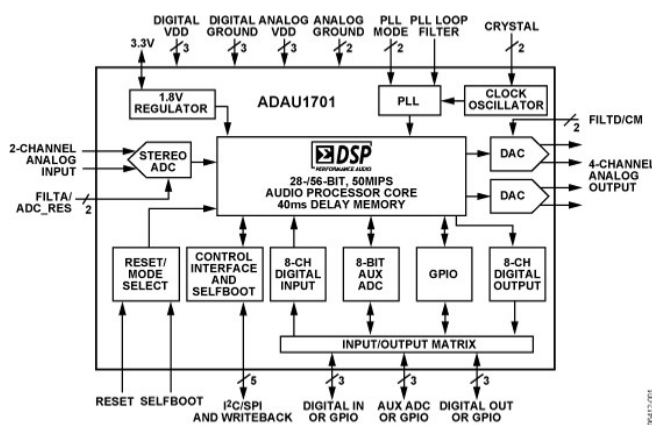
Το SigmaStudio μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά διάφορες πλατφόρμες υλικού της Analog Devices, επιτρέποντας στους χρήστες να αναπτύξουν συστήματα για διαφορετικές ανάγκες και εφαρμογές. Αυτή η ευελιξία καθιστά το εργαλείο αυτό κατάλληλο για μια μεγάλη ποικιλία έργων, από μικρές φορητές συσκευές μέχρι μεγάλα επαγγελματικά ηχητικά συστήματα. Παράλληλα, η Analog Devices παρέχει εκτενή τεκμηρίωση και υποστήριξη για το SigmaStudio. Αυτό περιλαμβάνει οδηγούς χρήσης, εκπαιδευτικά βίντεο, και φόρουμ υποστήριξης όπου οι χρήστες μπορούν να μοιράζονται τις εμπειρίες τους και να λαμβάνουν βοήθεια από την κοινότητα και τους ειδικούς της εταιρείας. Επίσης, η Analog Devices ενημερώνει και βελτιώνει το SigmaStudio, προσθέτοντας νέες λειτουργίες και βελτιώσεις με βάση τα σχόλια των χρηστών και τις εξελίξεις στην τεχνολογία επεξεργασίας σήματος.

3.1.2 ADAU1701

Οι επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (Digital Signal Processor-DSP) είναι απαραίτητοι στον σημερινό τομέα ηλεκτρονικών για την επεξεργασία σήματος ήχου. Η επεξεργασία των ηχητικών σημάτων στον ψηφιακό τομέα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με το αντίστοιχο αναλογικό κύκλωμα. Για παράδειγμα, ένα κύκλωμα το οποίο βασίζεται σε DSP υπάρχει η δυνατότητα επαναπρογραμματισμού του επεξεργαστή ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του σχεδιαστή, γεγονός το οποίο θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να εφαρμοστεί με μια αναλογική προσέγγιση η οποία συχνά θα απαιτούσε επανασχεδιασμό του αναλογικού κυκλώματος [197].

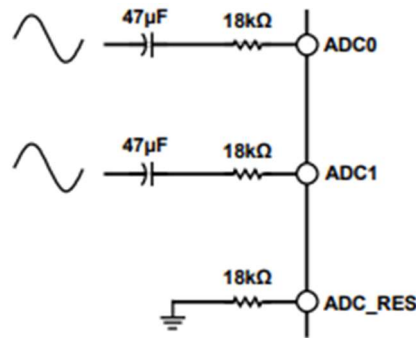
Ο επεξεργαστής ADAU1701 έχει σχεδιαστεί για να παρέχει όλες τις λειτουργίες επεξεργασίας σήματος ήχου που χρησιμοποιούνται συνήθως σε στερεοφωνικά ή πολυκαναλικά συστήματα

αναπαραγωγής. Η ροή επεξεργασίας σήματος έχει σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό SigmaStudio, το οποίο επιτρέπει γραφική καταχώρηση και έλεγχο σε πραγματικό χρόνο όλων των λειτουργιών επεξεργασίας σήματος. Ο ADAU1701 είναι ένας 28-/56-bit DSP επεξεργαστής ήχου ο οποίος διαθέτει υποκυκλώματα αναλογηφιακού (Analog to Digital Converter-ADC) και ψηφιοαναλογικού (Digital to Analog Converter-DAC) μετατροπέα και διεπαφές ελέγχου ηχητικών κυμάτων που μοιάζουν με μικροελεγκτές (microcontroller-like). Η επεξεργασία σήματος περιλαμβάνει ισοστάθμιση, crossover, ενίσχυση χαμηλών συχνοτήτων, επεξεργασία δυναμικής πολλαπλών ζωνών, αντιστάθμιση καθυστέρησης και ηχείων και διερεύνηση στερεοφωνικής εικόνας [198]. Η επεξεργασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει τους πραγματικούς περιορισμούς των ηχείων και των περιβαλλόντων ακρόασης παρέχοντας παράλληλα σημαντικές βελτιώσεις στην αντίληψη του ήχου. Διαθέτει δυο Σ - Δ ADC και τέσσερα Σ - Δ DAC τα οποία παρέχουν δυναμική αναλογική είσοδο σε αναλογική έξοδο 98.5 dB, ενώ οι ψηφιακές θύρες εισόδου και εξόδου επιτρέπουν την εύκολη σύνδεση επιπλέον ADC και DAC. Ο επεξεργαστής ADAU1701 επικοινωνεί μέσω ενός διαύλου I2C ή μιας θύρας SPI τεσσάρων καλωδίων [195].



Εικόνα 3.3 Μπλοκ διάγραμμα του επεξεργαστή ADAU1701 [198]

Αναλυτικότερα, ο ADAU1701 έχει δύο Σ - Δ ADC με λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) 100dB. Οι εισοδοί των αναλογηφιακών μετατροπών στερεοφωνικού ήχου είναι εισοδοί ρεύματος, επομένως απαιτείται μια αντίσταση εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι το επίπεδο τάσης των σημάτων εισόδου στο σύστημα μπορεί να ρυθμιστεί σε οποιοδήποτε επίπεδο. Μόνο οι αντιστάσεις εισόδου πρέπει να κλιμακωθούν για να παρέχουν την κατάλληλη τιμή ρεύματος εισόδου. Οι ακίδες εισόδου ADC0 και ADC1, καθώς και το ADC_RES, διαθέτουν εσωτερική αντίσταση 2k Ω για προστασία ESD (Electro Magnetic Compatibility). Η τάση που εμφανίζεται απευθείας στις ακίδες εισόδου ADC είναι 1.5V και η εξωτερική αντίσταση που είναι συνδεδεμένη στο ADC_RES ρυθμίζει την είσοδο ρεύματος πλήρους κλίμακας των ADC. Το πλήρες εύρος των εισόδων ADC είναι 100 μ A (rms) με εξωτερική αντίσταση 18k Ω στο ADC_RES (20k Ω συνολικά, επειδή είναι σε σειρά με τα εσωτερικά 2k Ω) [198].



Εικόνα 3.4 Κύκλωμα εισόδου ADC [198]

Επίσης, ο επεξεργαστής διαθέτει τέσσερα Σ - Δ DAC των οποίων το SNR είναι ίσο με 104dB. Η έξοδος πλήρους κλίμακας είναι 0.9V_{rms} (2.5V_{p-p}). Οι ψηφιοαναλογικοί μετατροπείς βρίσκονται σε αντιστρεπτική διαμόρφωση. Έτσι, εάν μια αναστροφή σήματος από την είσοδο στην έξοδο είναι ανεπιθύμητη, μπορεί να αντιστραφεί είτε χρησιμοποιώντας μια διαμόρφωση αναστροφής για το φίλτρο εξόδου είτε απλά αναστρέφοντας το σήμα στη ροή του προγράμματος SigmaDSP.

Ο ADAU1701 διαθέτει 12 ακροδέκτες πολλαπλών χρήσεων, 15k Ω κάθε μια, που μπορούν να προγραμματιστούν ξεχωριστά για χρήση ως σειριακές εισοδοί δεδομένων, έξοδοι σειριακών δεδομένων, εισοδοί/έξοδοι ψηφιακού ελέγχου από και προς τον πυρήνα του DSP ή ακόμα και εισοδοί στο βοηθητικό ADC 4 καναλιών. Αυτές οι ακίδες επιτρέπουν στο ADAU1701 να χρησιμοποιείται με εξωτερικούς ADC και DAC. Διαθέτει επίσης αναλογικές ή ψηφιακές εισόδους για τον έλεγχο ρυθμίσεων όπως ο έλεγχος της έντασης ήχου ή την είσοδο ψηφιακών σημάτων εξόδου για την κίνηση ενδείξεων LED.

Ο ADAU1701 είναι ένας πλήρως προγραμματιζόμενος DSP επεξεργαστής ο οποίος μέσω του SigmaStudio μπορεί εύκολα να διαμορφώσει γραφικά μια προσαρμοσμένη ροή επεξεργασίας σήματος χρησιμοποιώντας μπλοκ όπως για παράδειγμα στοιχεία ελέγχου επιπέδου έντασης και στοιχεία ελέγχου διεπαφής GPIO. Τα προγράμματα αυτά μπορούν να φορτωθούν είτε μέσω μιας σειριακής EEPROM μέσω του μηχανισμού αυτόματης εκκίνησης είτε από έναν εξωτερικό μικροελεγκτή. Κατά την απενεργοποίηση, η τρέχουσα κατάσταση των παραμέτρων μπορεί να γραφτεί στο EEPROM από τον ADAU1701 για ανάκληση την επόμενη φορά που θα εκτελεστεί το πρόγραμμα [198].

3.2 Σχεδίαση και Προγραμματισμός Κυκλώματος

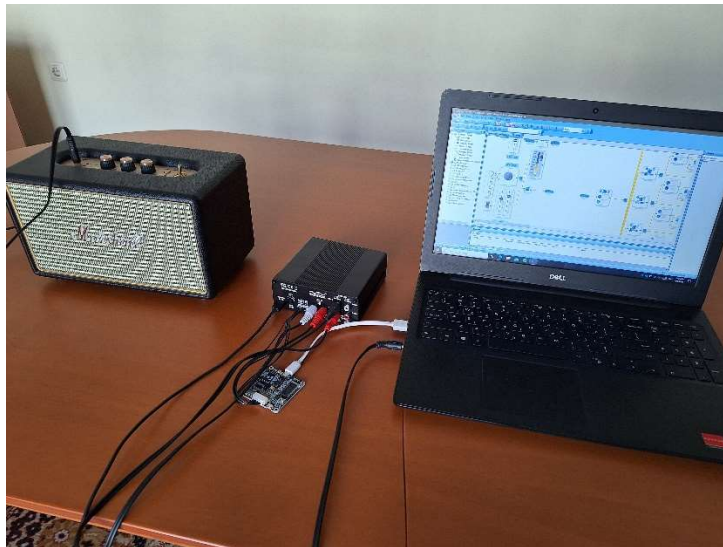
Η ανάπτυξη του πειραματικού μέρους του συστήματος μείωσης θορύβου χωρίζεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το είδος του κυκλώματος. Η πρώτη κατηγορία αφορά την φυσική συνδεσμολογία του κυκλώματος όπου περιλαμβάνει όλα τα ηλεκτρονικά μέρη του συστήματος (hardware), ενώ η δεύτερη κατηγορία έχει να κάνει με τον προγραμματισμό του αναπτυξιακού υλικού μέσω του υπολογιστή χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SigmaStudio.

3.2.1 Συνδεσμολογία Κυκλώματος

Η συνδεσμολογία του κυκλώματος περιλαμβάνει όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία του συστήματος μείωσης θορύβου. Πιο συγκεκριμένα, για την ανάπτυξη του παρόντος συστήματος απαιτούνται τα παρακάτω ηλεκτρονικά μέρη:

- Αναπτυξιακή πλακέτα με ενσωματωμένο τον επεξεργαστή ADAU1701
- Μνήμη EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)

- PH-6Pos καλώδιο μεταφοράς δεδομένων
- Δύο καλώδια RCA σε Aux
- Καλώδιο USB σε micro USB
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής με ενσωματωμένο το πρόγραμμα SigmaStudio
- Ολοκληρωμένος ενισχυτής με ενσωματωμένο ηχείο

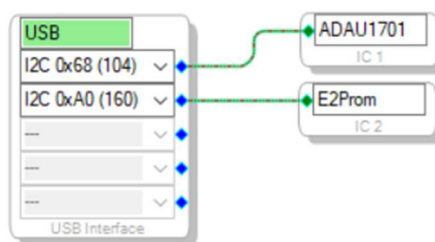


Εικόνα 3.5 Συνδεσμολογία Κυκλώματος

Πρωτίστως συνδέουμε την μνήμη EEPROM με τον υπολογιστή μέσω του καλωδίου USB σε micro USB. Ύστερα συνδέουμε την μνήμη με την αναπτυξιακή πλακέτα μέσω του καλωδίου PH-6Pos και έπειτα συνδέουμε την είσοδο της αναπτυξιακής πλακέτας με μια οποιαδήποτε πηγή ήχου και την έξοδο με το ηχοσύστημα με τη βοήθεια των καλωδίων RCA σε Aux. Τέλος, τροφοδοτούμε όλες τις συσκευές και η συνδεσμολογία του φυσικού κυκλώματος του συστήματος μείωσης θορύβου έχει ολοκληρωθεί. Η Εικόνα 3.5 παρουσιάζει την συνδεσμολογία που μόλις περιεγράφηκε.

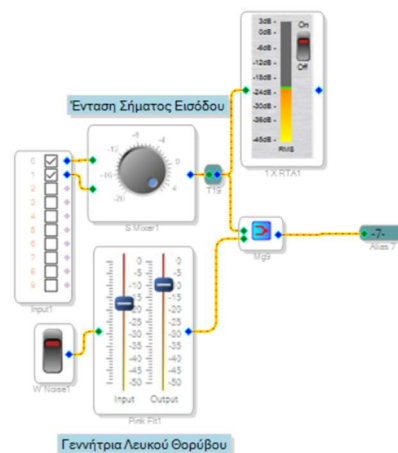
3.2.2 Προγραμματισμός Κυκλώματος

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο προγραμματισμός του συστήματος μείωσης θορύβου πραγματοποιείται με το πρόγραμμα γραφικού προγραμματισμού SigmaStudio. Πρώτου, ξεκινήσει η σχεδίαση του κυκλώματος θα πρέπει πρώτα να εξασφαλιστεί η φυσική σύνδεση των συσκευών με τις αντίστοιχες θύρες του υπολογιστή. Αρχικά, επιλέγουμε το μπλοκ USB Interface καθώς η σύνδεση που θα πραγματοποιηθεί θα είναι από μια θύρα USB του υπολογιστή. Έπειτα επιλέγουμε το μπλοκ του επεξεργαστή που διαθέτουμε (ADAU1701) και το μπλοκ της μνήμης. Τέλος, συνδέουμε την μνήμη EEPROM σε μια θύρα USB του υπολογιστή και μόλις το μπλοκ USB Interface πάρει πράσινο χρώμα (Εικόνα 3.6) τότε η φυσική σύνδεση των συσκευών με τον υπολογιστή είναι επιτυχής και δίνεται η δυνατότητα να προχωρήσει στην σχεδίαση του βασικού κυκλώματος.



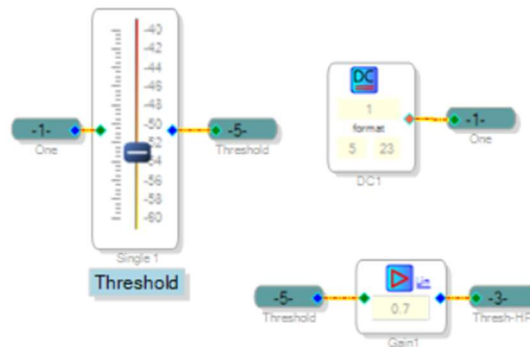
Εικόνα 3.6 Διάταξη σύνδεσης ηλεκτρονικών συσκευών με το SigmaStudio

Για την ευκολότερη κατανόηση του κυκλώματος η διάταξη χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα: το τμήμα εισόδου, το τμήμα της επεξεργασίας του σήματος εισόδου και το τμήμα εξόδου. Αρχίζοντας από το τμήμα εισόδου, έχοντας εισάγει το μπλοκ Input προσδιορίζονται και εισάγονται οι εισοδοί του συστήματος (Left+Right). Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα μπλοκ μίκτη των δύο σημάτων εισόδου και έπειτα συνδέεται ένα T-connection όπου συνδέει ένα μπλοκ ένδειξης ισχύος (του σήματος εισόδου) και ένα μπλοκ (merger) που ενώνει το σήμα αυτό και το σήμα το οποίο προέρχεται από μια πηγή λευκού θορύβου ακολουθούμενη από ένα φίλτρο ροζ θορύβου. Το φίλτρο ροζ θορύβου είναι υπεύθυνο για την μετατροπή του λευκού θορύβου που ισούται με ενέργεια ανά Hertz σε ροζ θόρυβο που ισούται με ενέργεια ανά αναλογική ή λογαριθμική ζώνη. Πιο συγκεκριμένα, το φίλτρο αυτό λαμβάνει οποιοδήποτε σήμα εισόδου και εξάγει ένα σήμα με πτώση 3dB/oct. Μετά την συγχώνευση των δύο αυτών σημάτων ακολουθεί ένας ακροδέκτης εξόδου και η σχεδίαση ανάλυση του τμήματος εισόδου έχει ολοκληρωθεί. Η Εικόνα 3.7 παρουσιάζει την διάταξη που μόλις περιεγράφηκε.



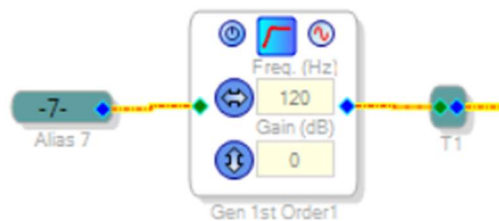
Εικόνα 3.7 Διάταξη κυκλώματος τμήματος εισόδου

Προτού αναλυθεί η σχεδίαση του βασικού κυκλώματος επεξεργασίας του σήματος εισόδου θα πρέπει πρώτα να παρουσιαστούν τρεις μπλοκ διατάξεις οι οποίες είναι απαραίτητες για την σχεδίαση του επόμενου κυκλώματος. Η πρώτη διάταξη είναι μια πηγή DC τάσης όπου καταλήγει στον ακροδέκτη 1. Η πηγή αυτή παράγει συνεχή τάση που θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο ορισμένων σημάτων που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Η δεύτερη διάταξη είναι ένα μπλοκ ελέγχου επιπέδου έντασης όπου η είσοδος του είναι ο ακροδέκτης 1 και σαν έξοδο ο ακροδέκτης 5. Στην πραγματικότητα η λειτουργία του θα προσομοιωνόταν με την λειτουργία ενός ποτενσιόμετρου το οποίο ελέγχει την ένταση ενός DC ρεύματος. Η τρίτη και τελευταία διάταξη αποτελείται από ένα μπλοκ ενίσχυσης του σήματος κατά 0.7 που σαν σήμα εισόδου έχει τον ακροδέκτη 5 και σαν σήμα εξόδου έχει τον ακροδέκτη 3. Λεπτομερέστερα, οι τρεις αυτές διατάξεις λειτουργούν ως εξής: ένα DC σήμα σε μορφή 5.23 (5 bits για τον ακέραιο αριθμό και 23 για τον δεκαδικό) περνάει μέσα από μια ενίσχυση -53dB που στην περίπτωση αυτή δεν λειτουργεί σαν ενίσχυση αλλά σαν εξασθένιση καθώς έχει αρνητική τιμή και εν τέλει καταλήγει σε μια ενίσχυση 0.7 όπου επειδή είναι μικρότερη από την μονάδα λειτουργεί και αυτή σαν εξασθένιση. Στο τελευταίο στάδιο έχει επιλεγεί ο όρος “no slew” που υποδηλώνει ότι το μπλοκ της ενίσχυσης δεν επιβάλλει περιορισμό του ρυθμού μεταβολής του σήματος και συνεπώς επιτρέπει πιο άμεσες αλλαγές στο κέρδος.



Εικόνα 3.8 Απαραίτητες μπλοκ διατάξεις για την σχεδίαση του δεύτερου τμήματος επεξεργασίας σήματος εισόδου

Η σχεδίαση του βασικού κυκλώματος επεξεργασίας σήματος ξεκινά με τον ακροδέκτη 7 και την σύνδεσή του με ένα υπερπαρατό φίλτρο πρώτης τάξης με συχνότητα αποκοπής 120Hz, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.9. Αναλυτικότερα, το σήμα εισόδου του φίλτρου προέρχεται από την συγχώνευση των δύο σημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω (λευκός θόρυβος με φίλτρο ροζ θορύβου και σήμα εισόδου) και εισάγεται συχνότητα αποκοπής 120Hz καθώς η συχνότητα αυτή είναι το κατώτατο όριο της ομιλίας και συνεπώς οποιοσδήποτε θόρυβος κάτω από την συχνότητα αυτή θεωρείται θόρυβος και ως αποτέλεσμα κόβεται. Στην συνέχεια ακολουθεί ένα T-connection και έπειτα ακολουθεί μια σειρά από παρόμοιες διατάξεις κατά τις οποίες μεταβάλλεται μόνο μια τιμή.

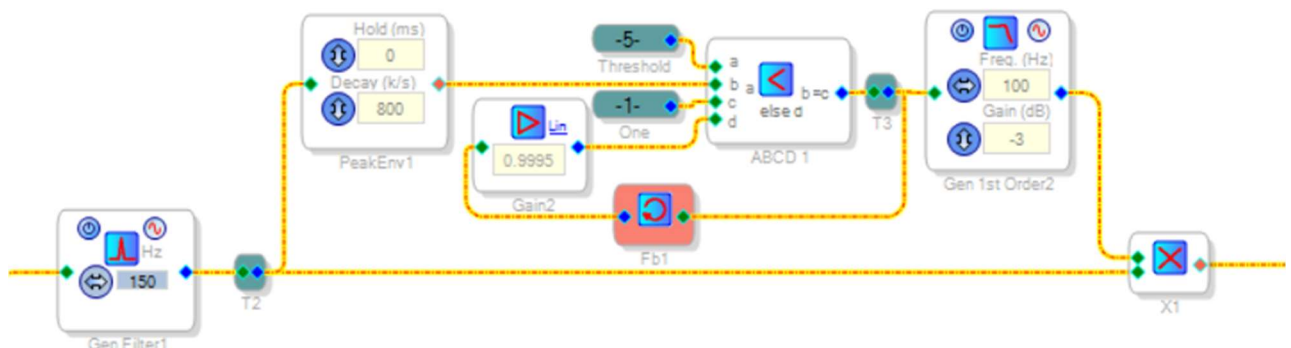


Εικόνα 3.9 Υψηπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 120Hz

Η βασική διάταξη η οποία αναφέρθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.10. Πιο αναλυτικά, το σήμα το οποίο προέρχεται από το T-connection που αναφέρθηκε παραπάνω, συναντά ένα φίλτρο στενής ζώνης διέλευσης με συντελεστή επιλεκτικότητας $Q=2.50$ και με κεντρική συχνότητα η οποία μεταβάλλεται σε κάθε διάταξη. Ύστερα ακολουθεί ένα T-connection όπου διακρίνονται δύο διαφορετικές διαδρομές. Η πρώτη διαδρομή αποτελείται από το μπλοκ “envelope peak” κατά το οποίο αναλύεται το σήμα εισόδου όπου εντοπίζονται οι μέγιστες (ακραίες) τιμές της κυματομορφής της απόλυτης τιμής του και ύστερα αποκόπτονται με ρυθμό 800k/s. Εκτενέστερα, το μπλοκ “envelope peak” είναι υπεύθυνο για την σχεδίαση μιας περιβάλλουσας στο σήμα φωνής ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων που έχει. Ρυθμίζοντας την τιμή hold ίση με το μηδέν συμπεραίνουμε ότι το σήμα δεν κρατάει την μέγιστη τιμή του (peak) ωστόσο ξεκινά αμέσως να εξασθενεί και εισάγοντας την τιμή 800k/s στο πεδίο decay καταλήγουμε ότι ο ρυθμός με τον οποίο εξασθενεί το σήμα είναι 800 μονάδες ανά 10^3 δευτερόλεπτο. Μετά το μπλοκ “envelope peak” ακολουθεί ένα μπλοκ σύγκρισης δύο σημάτων και εξόδου ενός από δύο σήματα. Με περισσότερη λεπτομέρεια, το μπλοκ αυτό έχει τέσσερις εισόδους “a,b,c,d” και μια έξοδο. Στην “a” είσοδο εισάγεται το σήμα από τον ακροδέκτη 5 που αναλύθηκε παραπάνω, στην “b” είσοδο εισάγεται το σήμα της περιβάλλουσας από το μπλοκ “envelope peak” και στην “c” είσοδο εισάγεται το σήμα από τον ακροδέκτη 1. Το μπλοκ αυτό συγκρίνει τα πλάτη των σημάτων εισόδων “a” και “b” και ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης εξάγει το αντίστοιχο σήμα. Η πρώτη συνθήκη είναι όταν η τιμή “a” είναι μεγαλύτερη από

την τιμή “b” που στην περίπτωση αυτή εξάγεται το σήμα “c”, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη συνθήκη εξάγεται το σήμα της εισόδου “d”. Το σήμα εισόδου “d” είναι το σήμα το οποίο προέρχεται από την έξοδο του μπλοκ σύγκρισης και αποτελείται από ένα μπλοκ ανάδρασης που δημιουργεί μια καθυστέρηση ίση με ένα τετραγωνικό παλμό στη διαδρομή του σήματος και επαναδρομολογεί το σήμα στην είσοδο “d” αφού πρώτα περάσει μέσα από ένα μπλοκ ενίσχυσης με τιμή περίπου ίση με τη μονάδα (0.9995). Το μπλοκ ενίσχυσης με τιμή 0.9995 προσφέρει στο σήμα μια ήπια εξασθένιση το οποίο βοηθά στην μείωση του συνολικού θορύβου χωρίς να επηρεάζει το συνολικό σήμα. Πιο συγκεκριμένα, εάν η περιβάλλουσα του σήματος φωνής είναι μεγαλύτερη από ένα απλό DC σήμα τότε το σήμα αυτό θεωρείται σήμα πληροφορίας και εξάγεται ένα DC σήμα το οποίο ύστερα δεν θα επηρεάσει καθόλου το σήμα πληροφορίας, ενώ εάν η περιβάλλουσα είναι μικρότερη από το ίδιο DC σήμα τότε μέσω της εισόδου “d” δημιουργείται ένας αναδραστικός παράγοντας που συνεχώς μειώνει το σήμα της περιβάλλουσας καθώς εξαιτίας του μικρού του πλάτους θεωρείται θόρυβος. Η τιμή ενίσχυσης του ενισχυτή δεν μπορεί να είναι πολύ μικρή εξαιτίας της Ψυχοακουστικής καθώς σε μια τέτοια περίπτωση η απότομη αλλαγή στο σήμα θα ήταν αντιληπτή και θα δημιουργούσε ένα ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό στον ήχο. Συνεχίζοντας, στην έξοδο του μπλοκ σύγκρισης εισάγεται ένα T-connection και ακολουθεί η διαδρομή ανάδρασης που αναλύθηκε και μια άλλη διαδρομή όπου βρίσκεται ένα χαμηλοπερατό φίλτρο πρώτης τάξης με συχνότητα αποκοπής 100Hz και κέρδος -3dB. Το φίλτρο αυτό είναι υπεύθυνο για την επαναφορά του σήματος της περιβάλλουσας στην αρχική τιμή και λειτουργεί σαν την τιμή “release” του μπλοκ “peak envelope”. Τέλος, το σήμα αυτό πολλαπλασιάζεται με το αρχικό σήμα φωνής που προέρχεται από το πρώτο T-connection με σκοπό είτε να μείνει αλώβητο το σήμα (πρώτη περίπτωση του μπλοκ σύγκρισης) είτε να μειωθεί ο θόρυβος (δεύτερη περίπτωση του μπλοκ σύγκρισης).

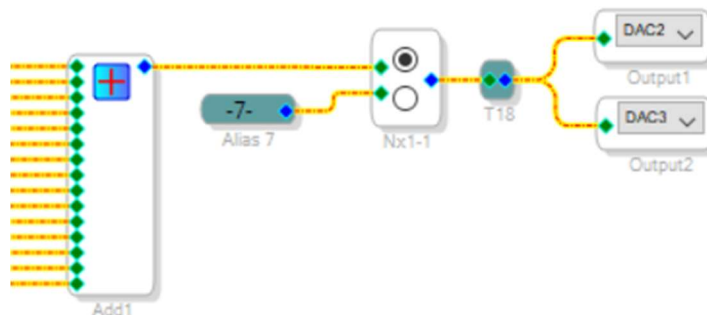
Το συνολικό κύκλωμα που περιεγράφηκε αντιπροσωπεύει ένα μοναδικό κανάλι φωνής το οποίο εξαρτάται από την τιμή της κεντρικής συχνότητας του φίλτρου στενής ζώνης διέλευσης που είναι τοποθετημένο στην αρχή του κυκλώματος. Το εύρος ζώνης συχνοτήτων της φωνής των ανθρώπων είναι περίπου από 120Hz έως περίπου 5kHz. Συνεπώς, για να καλυφθεί το εύρος αυτό θα πρέπει να προστεθούν περισσότερα αντίστοιχα κανάλια με διαφορετικές κεντρικές συχνότητες του αρχικού φίλτρου. Ο επεξεργαστής ADAU1701 έχει χωρητικότητα για να επεξεργαστεί ταυτόχρονα από 12 έως 16 κανάλια ήχου και επομένως μπορεί να καλύψει το εύρος συχνοτήτων ομιλίας σε ζώνες 1/3 οκτάβας. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται 16 κανάλια ξεκινώντας από το πρώτο κανάλι με κεντρική συχνότητα 150Hz και καταλήγοντας στο τελευταίο κανάλι με συχνότητα 4.8kHz.



Εικόνα 3.10 Διάταξη βασικού κυκλώματος επεξεργασίας σήματος εισόδου

Οι παράμετροι των μπλοκ των 16 καναλιών είναι όμοιες με εξαίρεση την είσοδο “a” του μπλοκ σύγκρισης η οποία αλλάζει μετά το 9^ο κανάλι με κεντρική συχνότητα 950Hz. Πιο διεξοδικά, στην είσοδο “a” του μπλοκ σύγκρισης εισάγεται το σήμα από τον ακροδέκτη 3 όπου είναι το DC σήμα

από τον ακροδέκτη 5 προερχόμενο από έναν ενισχυτή με γραμμικό κέρδος 0.7. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην ανάγκη εξισορρόπησης των δύο τιμών σύγκρισης (“a” και “b”) καθώς κατά το 10^ο κανάλι η κεντρική συχνότητα λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 1kHz και συνεπώς η περιβάλλουσα που δημιουργείται στην έξοδο του μπλοκ “peak envelope” είναι μεγαλύτερη από αυτή στα προηγούμενα κανάλια. Σε υψηλές συχνότητες, οι συνιστώσες θορύβου έχουν μικρότερο πλάτος και συνεπώς πρέπει να συγκριθούν με μια αντίστοιχη μικρότερη σταθερά. Επομένως, για να υπάρχει μια πιο δίκαιη σύγκριση στο μπλοκ σύγκρισης θα πρέπει να μεταβληθεί και το σήμα εισόδου “a”.



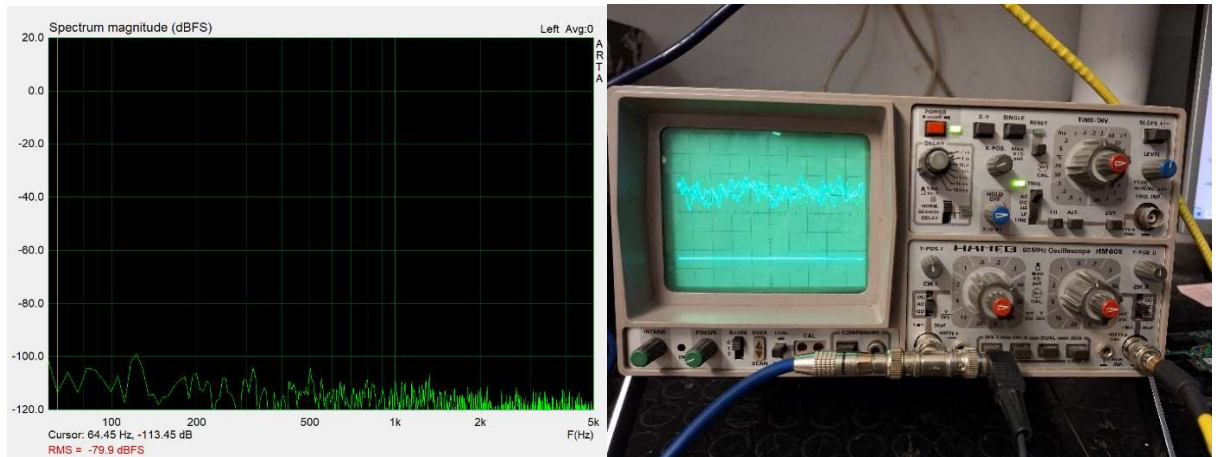
Εικόνα 3.11 Κύκλωμα εξόδου του συστήματος μείωσης θορύβου

Κατά το τελευταίο τμήμα του κυκλώματος μείωσης θορύβου (Εικόνα 3.11), τα κανάλια που αναφέρθηκαν παραπάνω προστίθενται και εξάγεται ένα μοναδικό σήμα. Το σήμα αυτό εισάγεται στην πρώτη είσοδο ενός διακόπτη (switch) και στην δεύτερη είσοδο εισάγεται ο ακροδέκτης 7 όπου είναι το αρχικό σήμα πληροφορίας και το σήμα θορύβου. Μεταβάλλοντας το κύκλωμα μείωσης θορύβου και το σήμα χωρίς το κύκλωμα αυτό καθίσταται ευκολότερη η αξιολόγηση της λειτουργικότητας του συνολικού κυκλώματος. Τέλος, το σήμα της εξόδου του διακόπτη καταλήγει στις δύο εξόδους (Left+Right) του αναπτυξιακού κυκλώματος αφού πρώτα διέλθει από ένα T-connection.

3.3 Διεξαγωγή Πειραμάτων και Αποτελέσματα

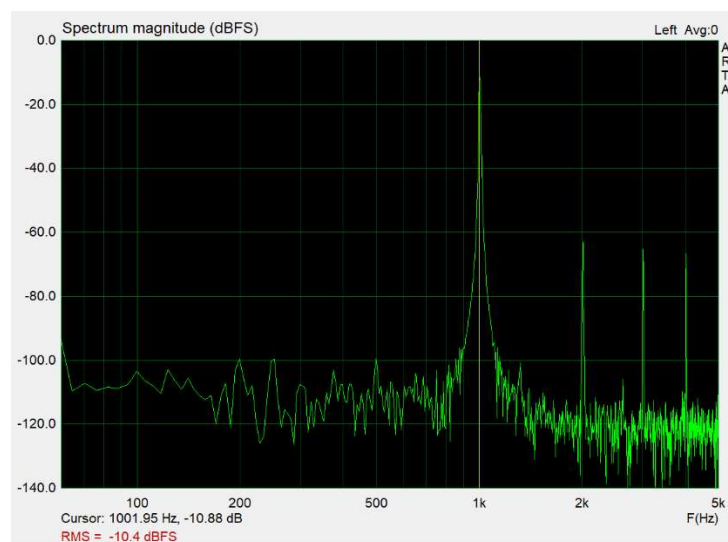
Προτού αξιολογηθεί η ορθή λειτουργία του κυκλώματος θα πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθούν ορισμένες δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες. Έτσι, έλαβαν χώρα συνολικά δύο διαφορετικά πειράματα ενώ παράλληλα εξετάστηκαν η ακρίβεια, η απόδοση του κυκλώματος και επίσης διορθώθηκαν τυχόν προβλήματα.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια μιας γεννήτριας σήματος, ενός παλμογράφου και του προγράμματος Arta. Το πρόγραμμα αυτό αποτελεί ένα είδους λογισμικό που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του ήχου σε ακουστικά και τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό αυτό με σκοπό την ανάλυση του φάσματος του ήχου. Έπειτα από την σύνδεση όλων των αναπτυξιακών εργαλείων παρατηρείται ο θόρυβος που φαίνεται στον αναλυτή φάσματος και στον παλμογράφο (πάνω μέρος) όπως στην Εικόνα 3.12.



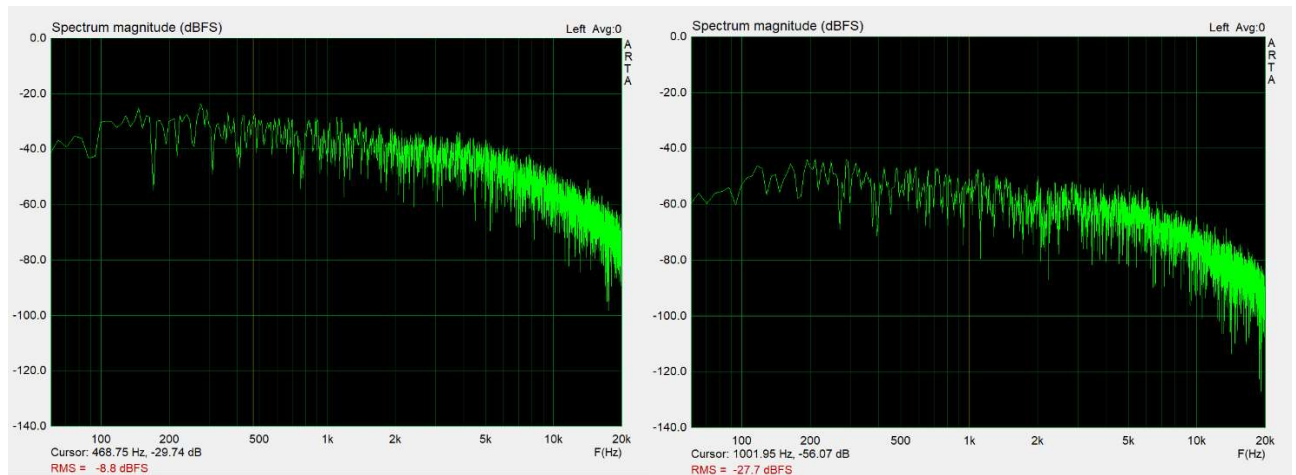
Εικόνα 3.12 Θόρυβος που εισάγουν τα αναπτυξιακά εργαλεία όπως φαίνεται στον αναλυτή φάσματος (αριστερά) και στον παλμογράφο (δεξιά)

Παρακάτω φαίνεται και μια απεικόνιση του ψηφιακού αναλυτή φάσματος ενός ημιτονικού 1kHz καθώς επίσης και η απεικόνιση του θορύβου για τιμές πλάτους -10dB και -30dB. Στην Εικόνα 3.13 παρατηρείται η κύρια αρμονική στην συχνότητα του 1kHz και τρεις ακόμα δευτερεύουσες αρμονικές στις συχνότητες 2kHz, 3kHz, 4kHz και 5kHz.



Εικόνα 3.13 Απεικόνιση ημιτονικού σήματος 1kHz

Οι αρμονικές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι η γεννήτρια του σήματος δεν είναι γραμμική και συνεπώς εισάγει αρμονικές. Γι' αυτό τον λόγο οι συχνότητες των δευτερεύουσων αρμονικών είναι ανά 1kHz αφού αυτή είναι η συχνότητα του σήματος εισόδου.



Εικόνα 3.14 Απεικόνιση θορύβου πλάτους -10dB (αριστερά) και -30dB (δεξιά) όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος

Παρατηρείται ότι η απεικόνιση του θορύβου δεν είναι επίπεδη αλλά φθίνει καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο θόρυβος που εισάγεται στο κύκλωμα δεν είναι λευκός αλλά ροζ, **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** όπως αναφέρεται και παραπάνω. Συνεπώς, ο αναλυτής φάσματος θα εμφανίσει υψηλότερα επίπεδα θορύβου σε χαμηλές συχνότητες και χαμηλότερα επίπεδα θορύβου σε υψηλότερες συχνότητες, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.10.

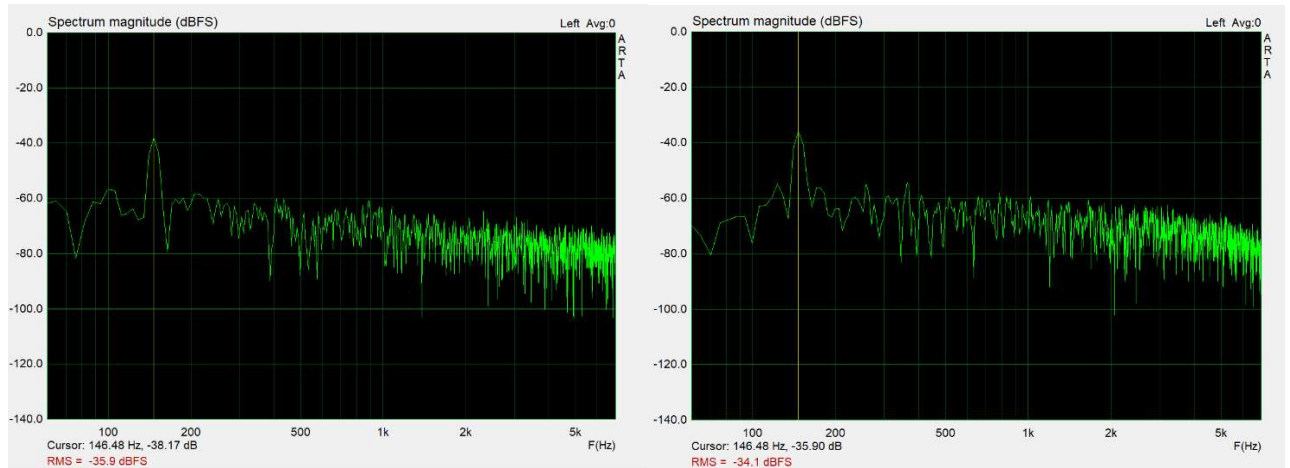
3.3.1 Πείραμα Πρώτο

Κατά την πρώτη δοκιμή κυκλώματος, πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις σε επτά διαφορετικές συχνότητες. Αναλυτικότερα, μετρήθηκε η τιμή του πλάτους μετά την παρεμβολή του κυκλώματος μείωσης του θορύβου για -40dB πλάτος σήματος και -60dB πλάτος θορύβου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

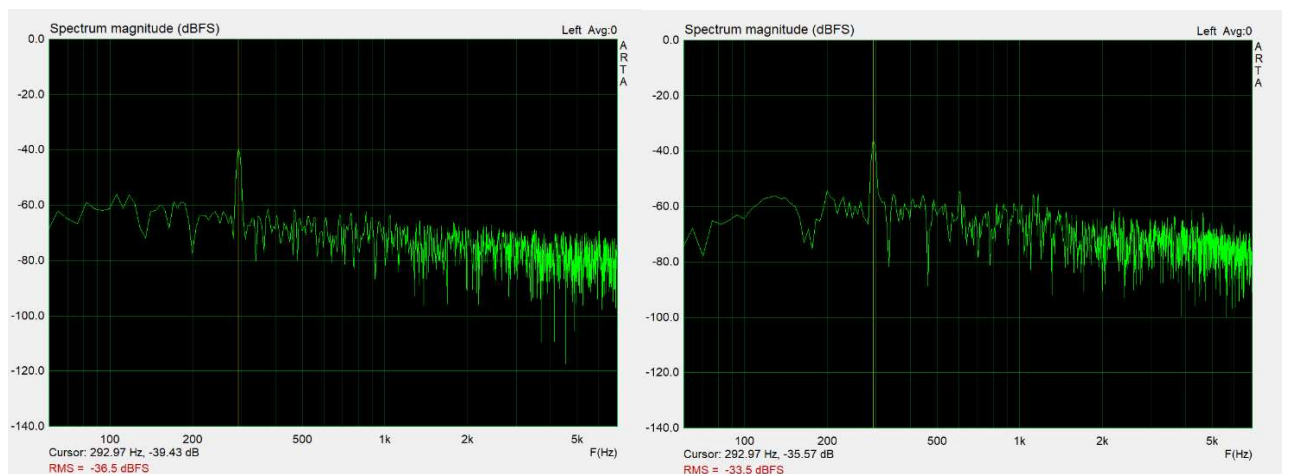
Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων σήματος εξόδου και υπολογισμός πλάτους μείωσης θορύβου για -40dB πλάτος σήματος και -60dB πλάτος θορύβου

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB)	
	Σήμα Εξόδου	Βελτίωση
150	-36	4
300	-35.5	4.5
600	-36	4
1200	-35	5
2500	-34.5	5.5
5000	-36	4

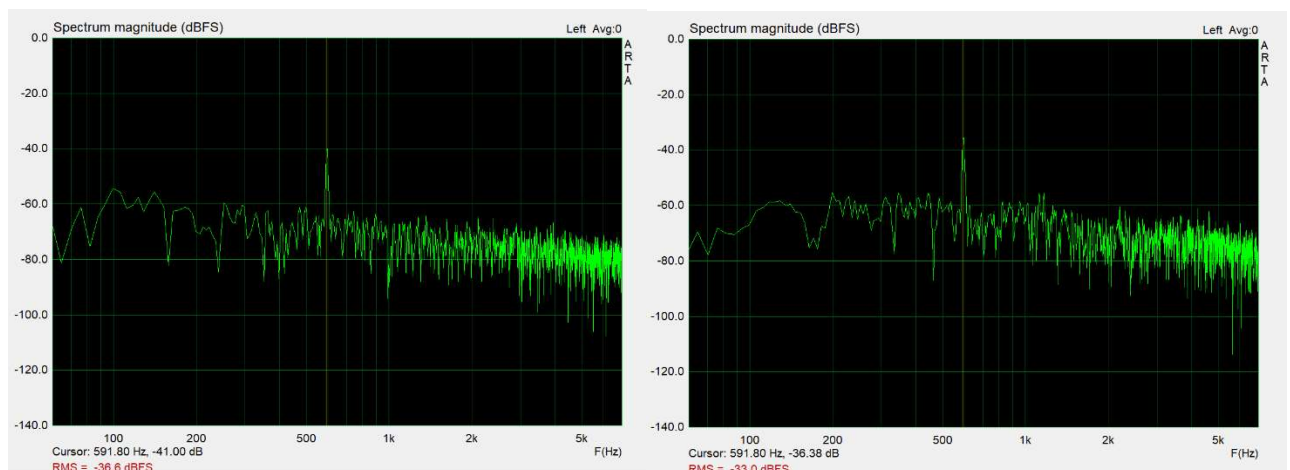
Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται ενδεικτικά οι τιμές των πλατών του σήματος εξόδου χωρίς το κύκλωμα μείωσης θορύβου και αντίστοιχα οι τιμές των πλατών του σήματος εξόδου με το κύκλωμα βελτίωσης ομιλίας για τις συχνότητες 150Hz, 300Hz, 600Hz, 1200Hz και 5000Hz.



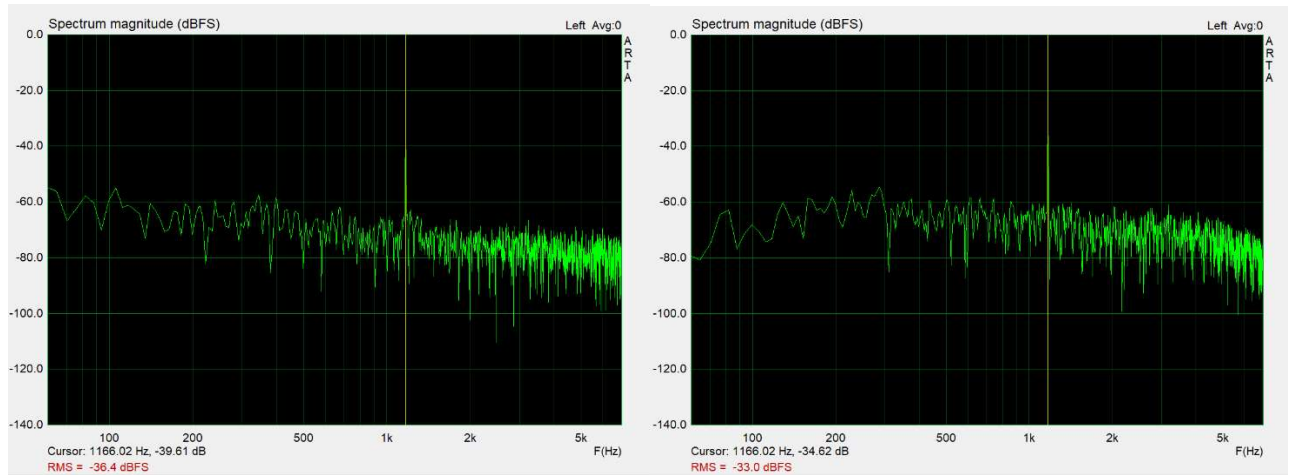
Εικόνα 3.15 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 150Hz



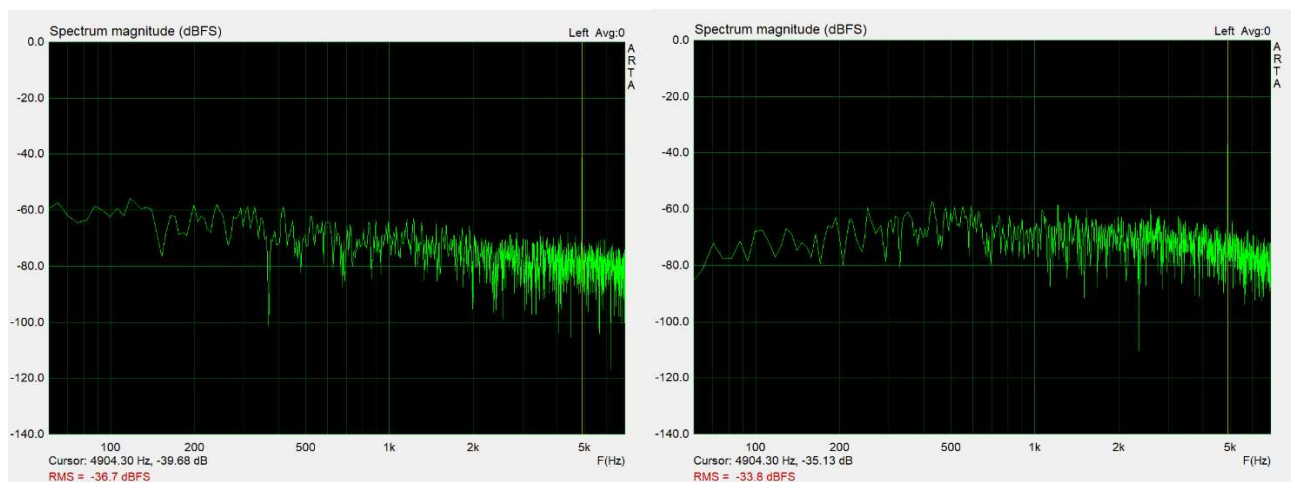
Εικόνα 3.16 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 300Hz



Εικόνα 3.17 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 600Hz



Εικόνα 3.18 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 1200Hz



Εικόνα 3.19 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 5000Hz

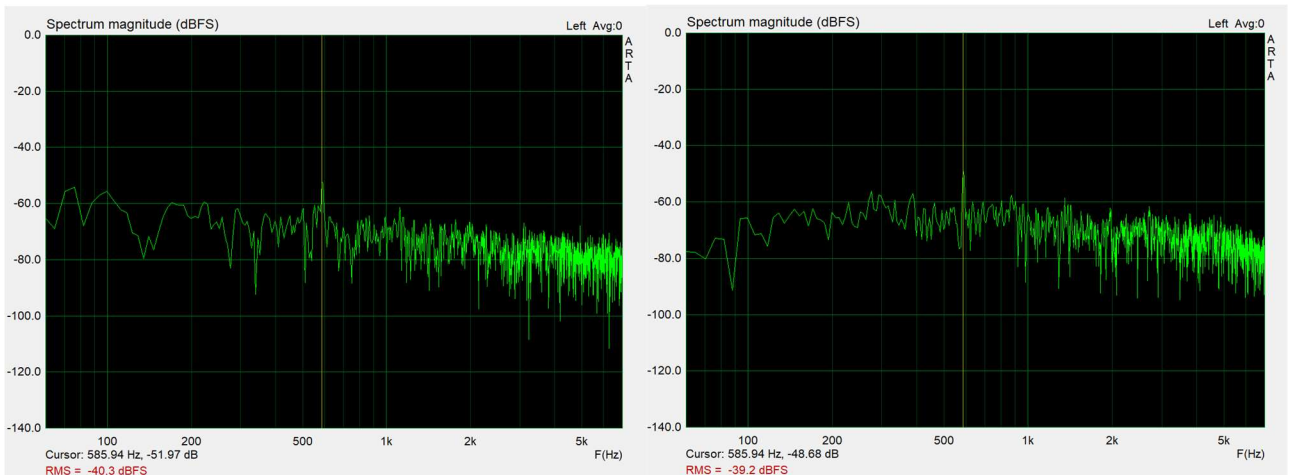
Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τα αποτελέσματα των ίδιων μετρήσεων για πλάτος σήματος εισόδου -50dB και πλάτος θορύβου -60dB.

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων σήματος εξόδου και υπολογισμός πλάτους μείωσης θορύβου για -50dB πλάτος σήματος και -60dB πλάτος θορύβου

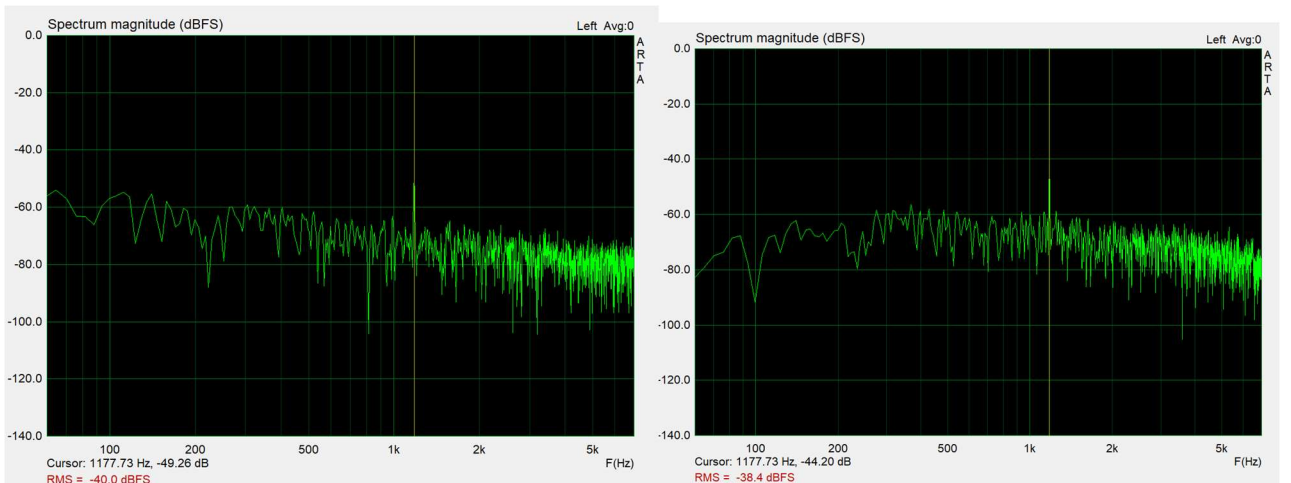
Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB)	
	Σήμα Εξόδου	Βελτίωση
150	47.5	2.5
300	47	3
600	47.5	2.5
1200	44.5	5.5
2500	45.5	4.5

5000	46	4
------	----	---

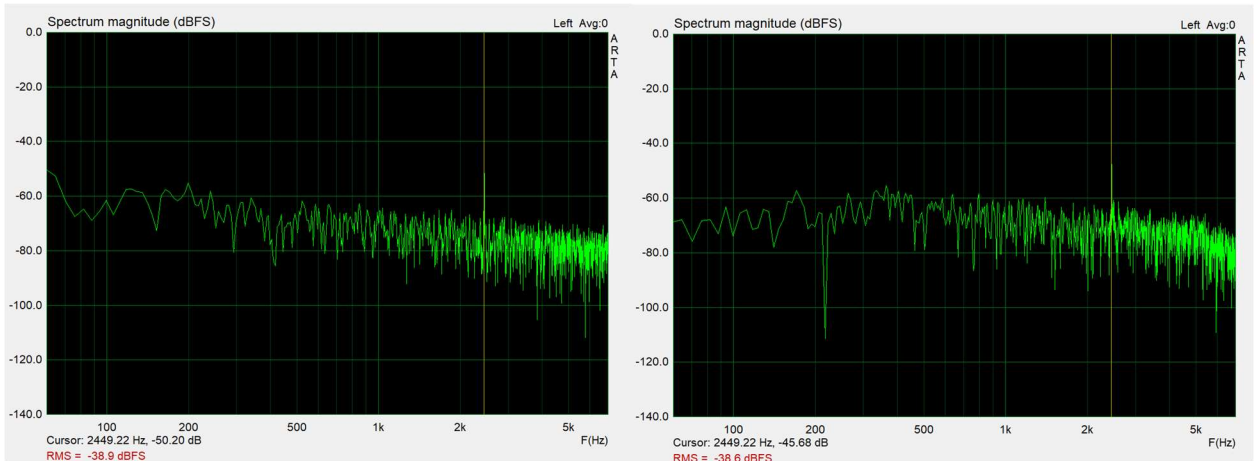
Ομοίως, στις παρακάτω εικόνες φαίνονται ενδεικτικά οι τιμές των πλατών του σήματος εξόδου χωρίς το κύκλωμα μείωσης θορύβου και αντίστοιχα οι τιμές των πλατών του σήματος εξόδου με το κύκλωμα βελτίωσης ομιλίας για τις συχνότητες 600Hz, 1200Hz, 2500Hz και 5000Hz.



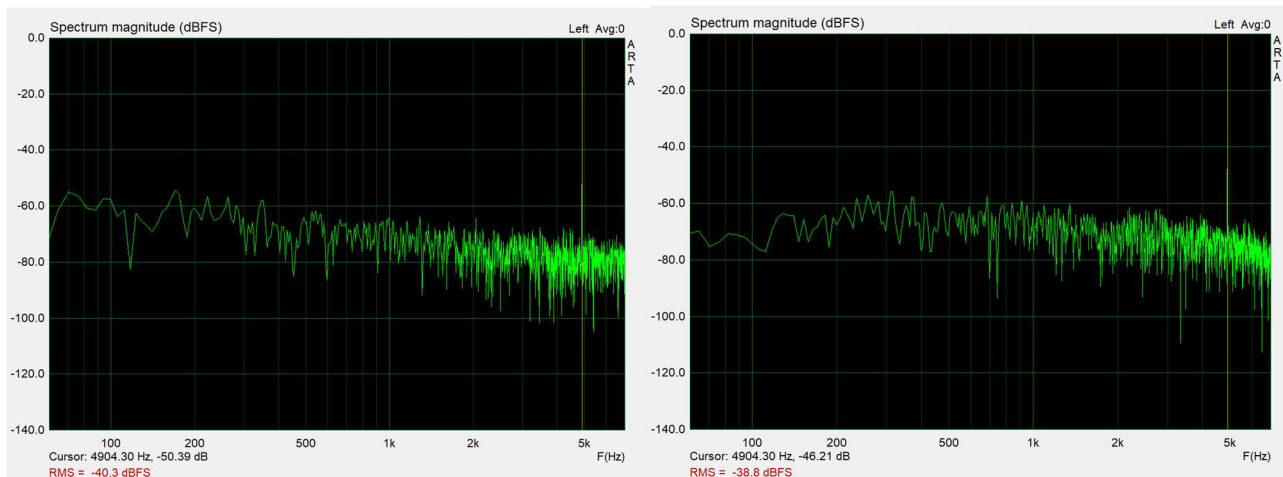
Εικόνα 3.20 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος θορύβου για συχνότητα 600Hz



Εικόνα 3.21 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 1200Hz



Εικόνα 3.22 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 2500Hz

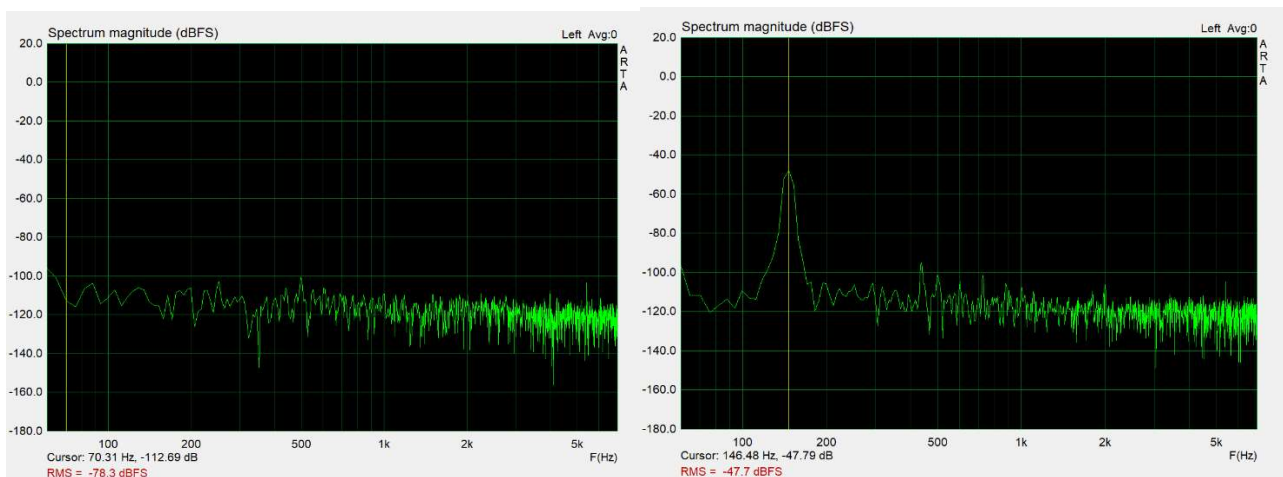


Εικόνα 3.23 Απεικόνιση σήματος εξόδου με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) το κύκλωμα μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 5000Hz

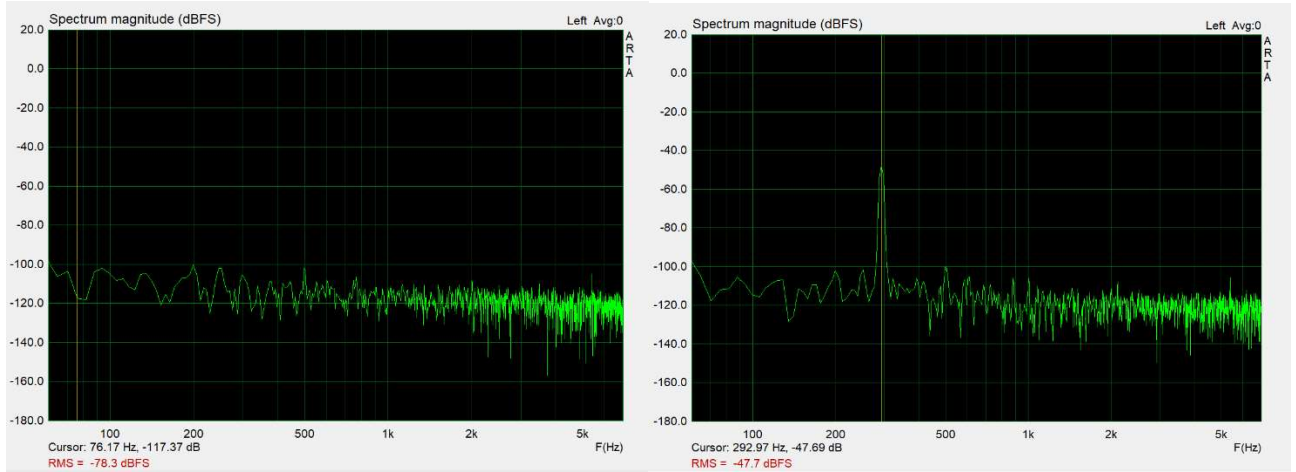
Πραγματοποιώντας τις δύο πειραματικές μετρήσεις παρατηρείται βελτίωση περίπου 5dB σε κάθε συχνότητα μέτρησης συγκριτικά με το σήμα εξόδου χωρίς το κύκλωμα μείωσης θορύβου.

3.3.2 Πείραμα Δεύτερο

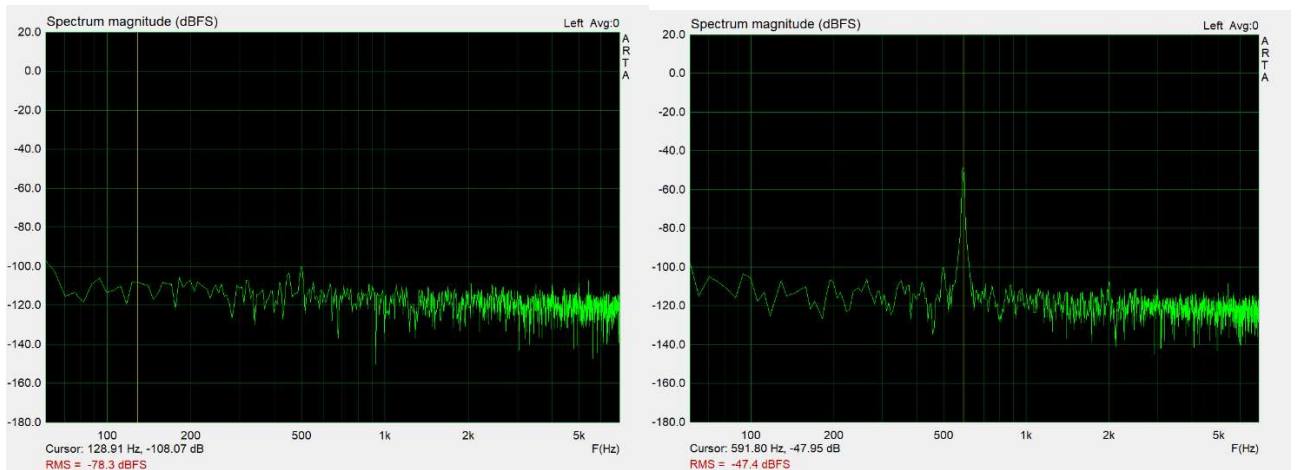
Το δεύτερο πείραμα αφορά τις αλλαγές που παρατηρούνται στο τελικό σήμα κατά την μεταβολή του πλάτους. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις για έξι διαφορετικές τιμές συχνοτήτων και οι μετρήσεις αυτές έγιναν με την βοήθεια του παλμογράφου και του ψηφιακού αναλυτή φάσματος από όπου και λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες.



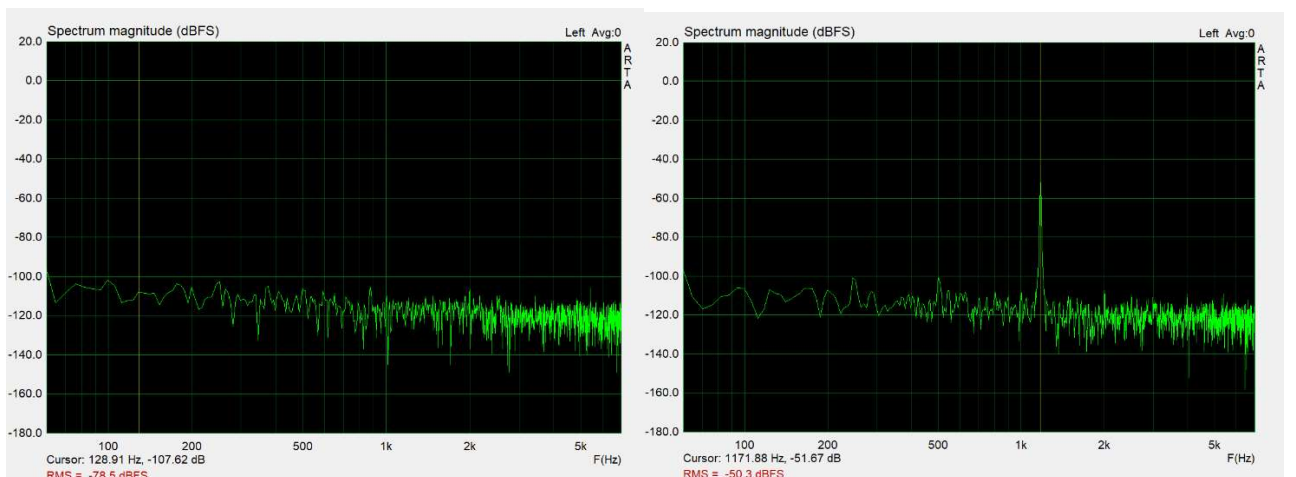
Εικόνα 3.24 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 150Hz



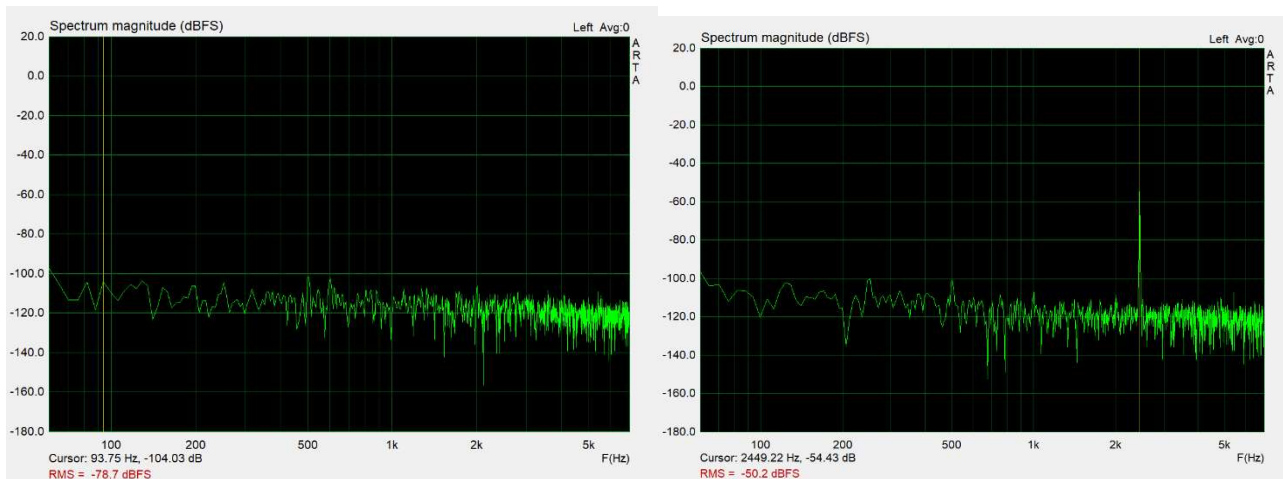
Εικόνα 3.25 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 300Hz



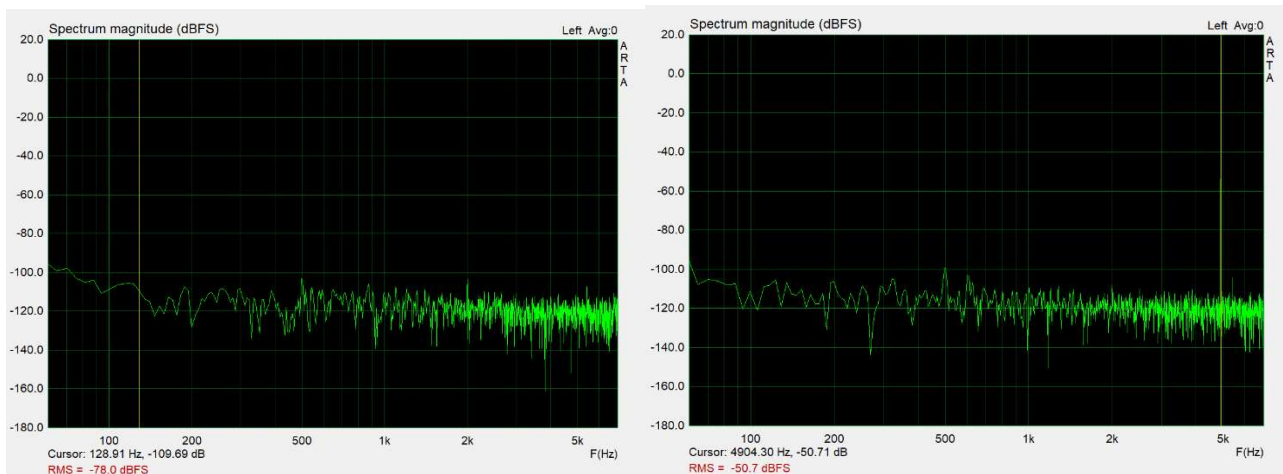
Εικόνα 3.26 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 600Hz



Εικόνα 3.27 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 1200Hz

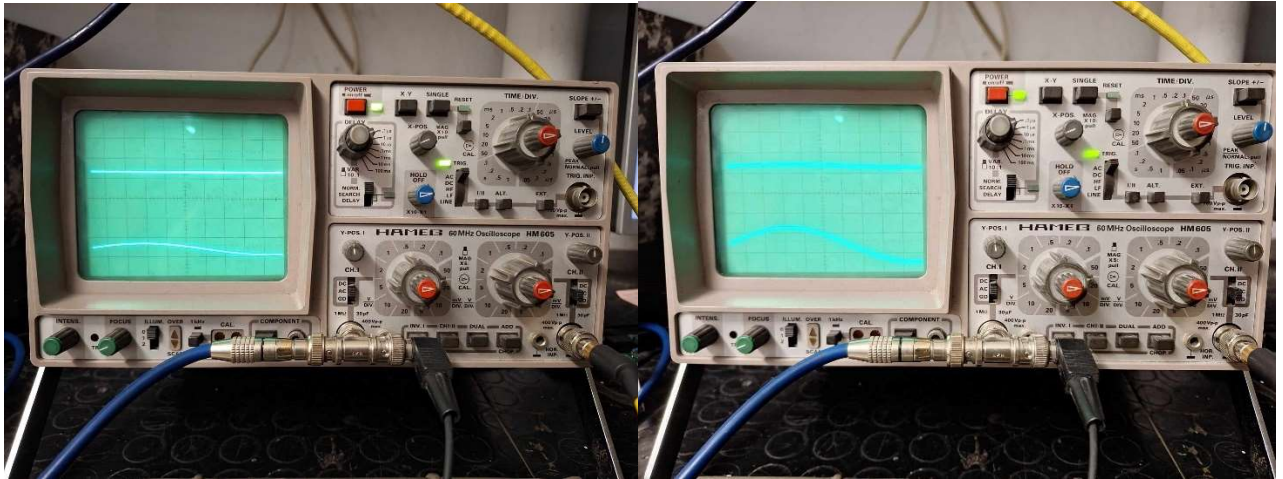


Εικόνα 3.28 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 2500Hz

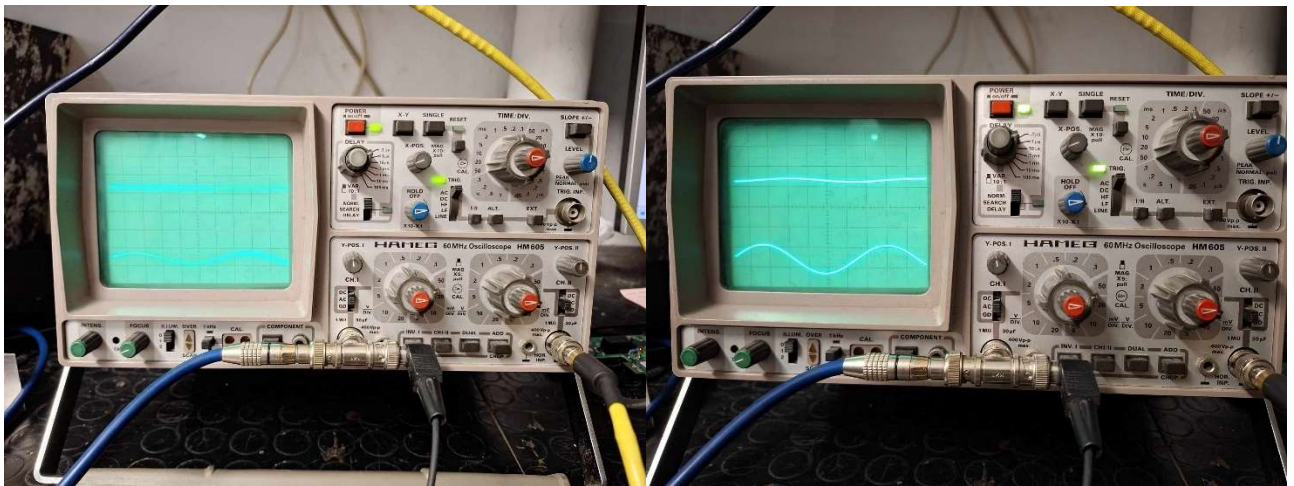


Εικόνα 3.29 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον αναλυτή φάσματος για συχνότητα 5000Hz

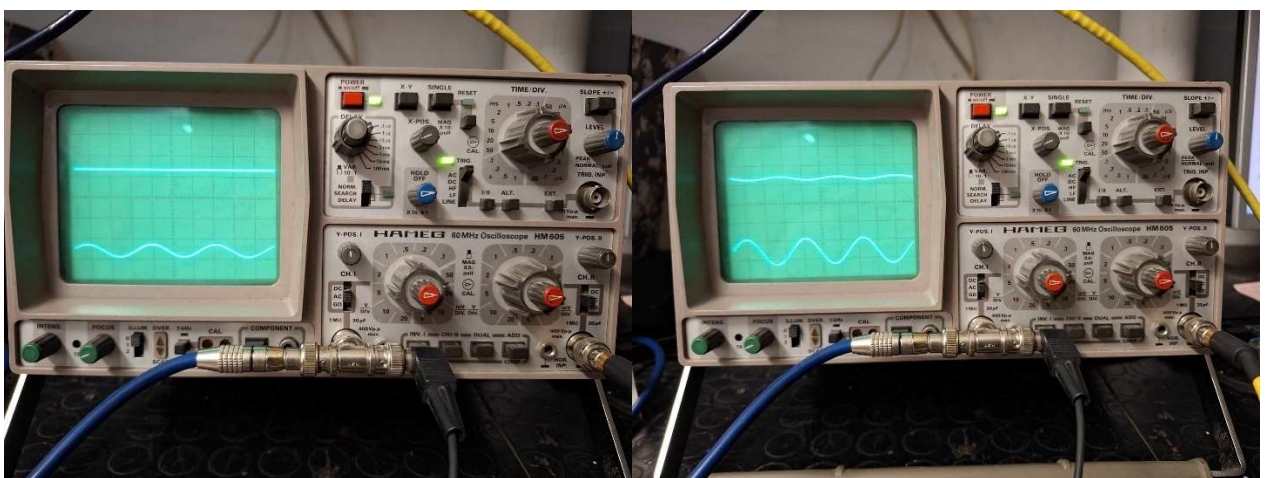
Ακολουθούν οι κυματομορφές του σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμές πλάτους μικρότερες και οριακά μεγαλύτερες από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο. Σε όλες τις παρακάτω εικόνες φαίνεται το σήμα εισόδου του κυκλώματος στο πάνω μέρος και το σήμα εξόδου στο κάτω μέρος της οθόνης του παλμογράφου αντίστοιχα.



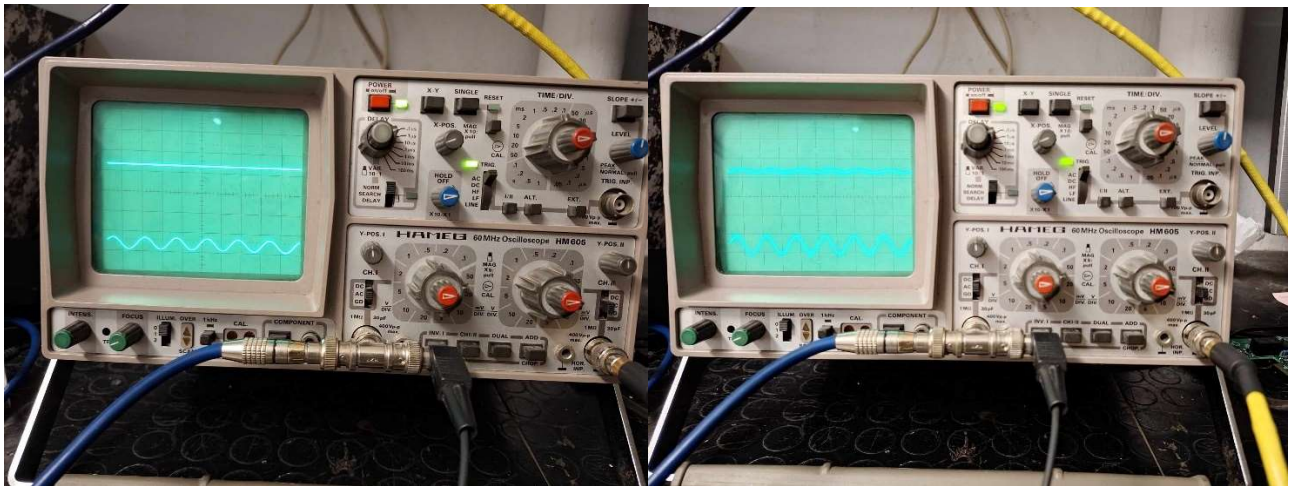
Εικόνα 3.30 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 150Hz



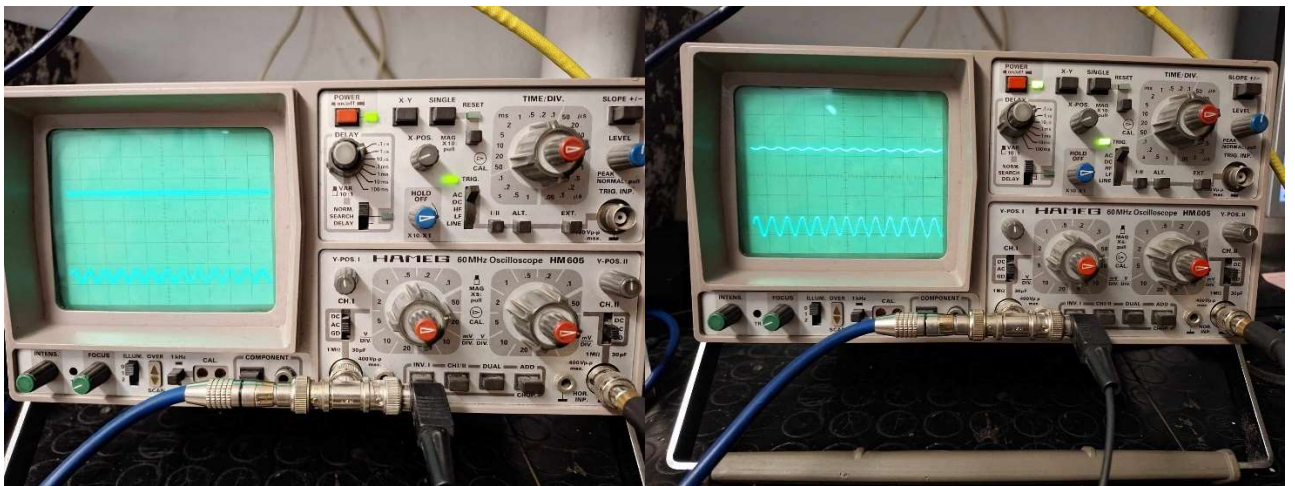
Εικόνα 3.31 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 300Hz



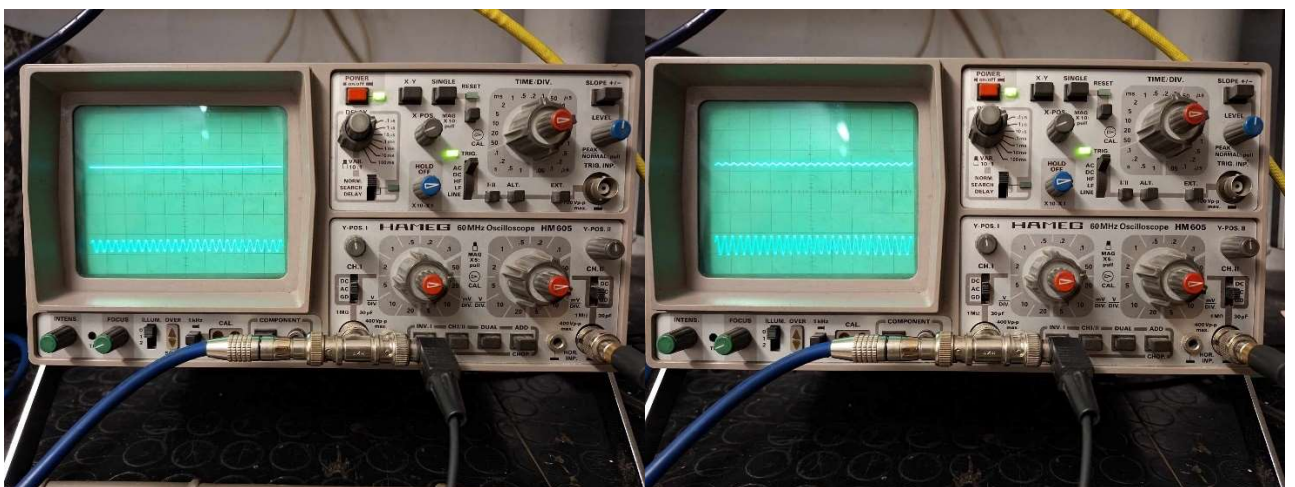
Εικόνα 3.32 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 600Hz



Εικόνα 3.33 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 1200Hz



Εικόνα 3.34 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 2500Hz



Εικόνα 3.35 Απεικόνιση σήματος εξόδου του κυκλώματος μείωσης θορύβου για τιμή πλάτους μικρότερη (αριστερά) και οριακά μεγαλύτερη (δεξιά) από το κατώφλι μείωσης θορύβου όπως προκύπτει από τον παλμογράφο για συχνότητα 5000Hz

Παρατηρείται ότι για τιμές πλάτους μικρότερες από 63mV το σήμα εισόδου αποκόπτετε καθώς θεωρείται θόρυβος, ενώ για τιμές πλάτους μεγαλύτερες από 63mV το σήμα θεωρείται αξιοποιήσιμη πληροφορία και το κύκλωμα δεν το επηρεάζει και λαμβάνεται αλώβητο στην έξοδο του κυκλώματος.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας την μελέτη που πραγματοποιήθηκε μέσα από την παρούσα διπλωματική εργασία προκύπτει ότι η σχεδίαση ενός συστήματος ψηφιακής επεξεργασίας για την βελτίωση σήματος ομιλίας αποτελεί μια διαδικασία που χρειάζεται μεγάλη προσοχή αλλά είναι συνάμα ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα μελέτης. Κατά την διεξαγωγή του πειραματικού μέρους πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στην επιλογή του επεξεργαστή όπως επίσης και στην επιλογή του κατάλληλου πλάτους του σήματος εισόδου. Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να υπάρξει και στην επιλογή της κατάλληλης τιμής τάσης του μπλοκ σύγκρισης καθώς με την μεταβολή της τάσης αυτής αλλάζει το κατώτατο όριο το οποίο ρυθμίζει το κατώφλι αποκοπής του σήματος (εφόσον θεωρείται θόρυβος). Αναλυτικότερα, εάν η τιμή της τάσης μειωθεί αρκετά τότε οι συνιστώσες του θορύβου θα εξαλειφθούν όμως υπάρχει περίπτωση να αποκοπεί και ένα μέρος αξιοποιήσιμης πληροφορίας. Απεναντίας, εάν η τιμή της τάσης ρυθμιστεί πολύ ψηλά τότε πιθανόν να ένα μέρος του θορύβου να μην αποκοπεί και να καταλήξει στην έξοδο του συστήματος.

Ως προς την επιλογή των φίλτρων πρέπει να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι το σύστημα αυτό αφορά σήματα ομιλίας. Επομένως, οι συχνότητες αποκοπής των φίλτρων του κυκλώματος πρέπει να επιλεγούν με βάση τις συχνότητες ομιλίας των ανθρώπων. Εκτενέστερα, το εύρος συχνοτήτων της ανθρώπινης ομιλίας είναι μεταξύ 120Hz και 5kHz. Συνεπώς, εάν οριστεί συχνότητα μεγαλύτερη ή μικρότερη από το εύρος αυτό, το σύστημα δεν θα λειτουργήσει ορθά. Παράλληλα, σημαντικό ρόλο παίζει και το εύρος συχνοτήτων του σήματος εισόδου καθώς εάν επιλεγεί σήμα μεγαλύτερης συχνότητας από τα 5kHz το σύστημα δεν θα μειώσει τον θόρυβο καθώς δεν προορίζεται για αντίστοιχα σήματα εισόδου.

Τέλος, ο θόρυβος αποτελεί ένα μείζον πρόβλημα εδώ και πολλά χρόνια, το οποίο απασχολεί πολλούς επιστήμονες και ερευνητές. Βοητά, δονήσεις, κρότοι, κυκλοφοριακός θόρυβος και άλλοι παρόμοιοι θόρυβοι είναι πιο φορτικοί όταν είναι ακουστοί. Τέτοιου τύπου ήχοι ίσως να περνούν αδιάφοροι σε εξωτερικούς χώρους όταν αποτελούν μέρος της καθημερινότητας, ωστόσο στη διάρκεια ενός μουσικού κομματιού ή μιας συζήτησης είναι αρκετά δυσάρεστοι. Στη συγκεκριμένη εργασία επιτεύχθηκε ο θόρυβος που εισάγεται σε ένα σύστημα ομιλίας να μειωθεί όσο το δυνατό περισσότερο. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και ορισμένες σημαντικές προεκτάσεις αυτής της εργασίας. Οι μελλοντικές καινοτομίες μπορεί να περιλαμβάνουν έναν πιο ισχυρό DSP επεξεργαστή ο οποίος να μπορεί να διαχειριστεί περισσότερο κανάλια με σκοπό την κάλυψη όλου του εύρους ζώνης των ακουστών συχνοτήτων. Επίσης, ένα σύστημα μείωσης κυκλοφοριακού θορύβου θα μπορούσε να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμο στις οικείες και γενικά στους χώρους οι οποίοι βρίσκονται, για παράδειγμα, πλησίον ενός αυτοκινητοδρόμου.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] C. Imelda S and S. R, "From Pythagoras to Sauveur: tracing the history of ideas about the nature of sound," *Physics Education*, pp. 173-179, March 2007.
- [2] R. Altman, *Sound Theory Sound Practice*, New York: Psychology Press, 1992.
- [3] P. J. D. and L. J. W. R., *Animal Acoustic Communication: Sound Analysis and Research Methods*, Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [4] A. Iskander, A. Yoichi, A. Keith, W. W. Au, R. Bader, B. Kirk W., B. Mack A., C. James V., C. Antoine, C. Perry R., D. Mark F., C. James, D. Barbrina, F. Neville H., G. Anders C., G. Colin, H. William M., J. Finn, K. Yang-Hann, K. William A., K. Thomas, L. Marc O., L. Werner, L. Björn, M. J. George C., M. Michael, M. Nils-Erik, M. Brian C.J., O. Kanji, P. Alan D., R. Thomas D., R. Philippe, S. Johan, S. Gregory W., W. George S.K. and Y. Eric D., *Springer Handbook of Acoustics*, Stanford: Springer, 2013.
- [5] R. W. Whitaker and D. E. Norris, *Infrasound Propagation*, New York: Springer New York, 2008.
- [6] G. J. C. and C. R. R. A., "Effects of infrasonic vibration on the hearing," in *5th International Congress on Acoustics*, Liège, 1956.
- [7] N. Broner, "The effects of low frequency noise on people—A review," *Journal of Sound and Vibration*, pp. 483-500, 1978.
- [8] G. C. Mohr, C. J. N., G. E. and V. G. H. E., "Effects of Low Frequency and Infrasonic Noise on Man," in *Aerospace Medicine*, 1965, pp. 817-824.
- [9] P. W. Alberti, "THE ANATOMY AND PHYSIOLOGY OF THE EAR AND HEARING," in *Occupational exposure to noise: Evaluation, prevention, and control*, Toronto, 2001, pp. 53-62.
- [10] E. F. Alton and P. Ken C., *Εγχειρίδιο Ακουστικής*, ΤΖΙΟΛΑ, 2022.
- [11] V. E. Newton, P. J. Vallely and J. Irwin, "Basic anatomy and physiology of the ear," in *Infection and Hearing Impairment*, John Wiley & Sons, 2006, pp. 8-13.
- [12] P. A. Heine, "Anatomy of the ear," *Veterinary Clinics*, pp. 379-395, March 2004.
- [13] D. C. Emanuel and T. Letowski, *Hearing Science*, Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams and Wilkins, 2009.
- [14] Λ. Χαδέλλης, "ΑΡΧΕΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΨΥΧΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ," in *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΧΟΥ*, Πάτρα, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ, 2010, pp. 49-54.
- [15] W. A. Yost, "Overview: Psychoacoustics," in *Human Psychophysics*, New York, Springer-Verlag, 1993, pp. 1-12.
- [16] O. Evgeny L., I. Vladislav V., O. Yuliya V. and P. Pavel V., "Real Human Hearing: Damage Detection and Monitoring of the Treatment Effectiveness," *Key Engineering Materials*, pp. 997-1004, 31 July 2013.

- [17] W. B. Snow, "Audible frequency ranges of music, speech and noise," *The Bell System Technical Journal*, pp. 616-627, 4-5 May 1931.
- [18] G. M. Ballou and P. Brown, "Fundamentals of Audio and Acoustics," in *Handbook for Sound Engineers*, Oxford, Focal Press, 2008, pp. 21-39.
- [19] F. Everest, *Master Handbook of Acoustics*, New York: McGraw-Hill, 2001.
- [20] F. L. Wightman and D. M. Green, "The Perception of Pitch: The pitch of a sound wave is closely related to its frequency or periodicity—but the exact nature of that relation remains a mystery," *American Scientist*, pp. 208-215, March-April 1974.
- [21] B. C. Moore and A. J. M. Houtsma, "Pitch Perception," in *Hearing*, Academic Press, 1995, pp. 267-270.
- [22] J. Volkman and S. Stevens, "The relation of pitch to frequency: a revised scale," *The American Journal of Psychology*, pp. 329-353, July 1940.
- [23] H. FLETCHER and W. A. MUNSON, "Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation*," *The Bell System Technical Journal*, pp. 377-430, October 1933.
- [24] H. F. Olson, "The Measurement of Loudness," *Audio Magazine* 56, pp. 18-22, 1972.
- [25] P. D. Schomer, Y. Suzuki and F. Saito, "Evaluation of loudness-level weightings for assessing the annoyance of environmental noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, p. 2390–2397, 1 November 2001.
- [26] S. Handel, *Listening: An introduction to the perception of auditory events*, Cambridge: MIT Press, 1993.
- [27] P. Kailash, D. Pressnitzer, S. Shihab and E. Mounya, "Music in Our Ears: The Biological Bases of Musical Timbre Perception," *PLOS Computational Biology*, 1 November 2012.
- [28] S. Town and J. Bizley, "Neural and behavioral investigations into timbre perception," *Frontiers in Systems Neuroscience*, 13 November 2013.
- [29] M. Campbell and C. Greated, *The Musician's Guide to Acoustics*, OUP Oxford, 1994.
- [30] J. Braasch, "Modelling of Binaural Hearing," in *Communication Acoustics*, Montréal, Springer-Verlag, 2005, p. 75–108.
- [31] P. Avan, F. Giraudet and B. Büki, "Importance of Binaural Hearing," *Audiol Neurotol*, pp. 3-6, 1 May 2015.
- [32] M. A. Akeroyd, "The psychoacoustics of binaural hearing," *International Journal of Audiology*, pp. 25-33, 1 January 2006.
- [33] K. van der Heijden, J. P. Rauschecker, B. de Gelder and E. Formisano, "Cortical mechanisms of spatial hearing," *Nature Reviews Neuroscience*, p. 609–623, October 2019.
- [34] E. G. BORING, *Sensation and Perception in the History of Experimental Psychology*, New York: APPLETON-CENTURY-CROFTS, 1942.

- [35] M. M. Van Wanrooij and A. J. Van Opstal, "Sound Localization Under Perturbed Binaural Hearing," *Journal of Neurophysiology*, pp. 715-726, 1 January 2007.
- [36] R. A. Humanski and R. A. Butler, "The contribution of the near and far ear toward localization of sound in the sagittal plane," *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 2300–2310, 1 June 1988.
- [37] M. BERGMAN, "Binaural Hearing," *Archives of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, pp. 572-578, November 1957.
- [38] E. C. Cherry and B. M. A. Sayers, "'Human 'Cross-Correlator'" -A Technique for Measuring Certain Parameters of Speech Perception," *THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, pp. 889-895, September 1956.
- [39] J. E. Katz, R. I. Clavijo, P. Rizk and R. Ramasamy, "The Basic Physics of Waves, Soundwaves, and Shockwaves for Erectile Dysfunction," *Sexual Medicine Reviews*, pp. 100-105, 14 November 2019.
- [40] N. Lawson, K. Thompson, G. Saunders, J. Saiz, J. Richardson, D. Brown, N. Ince, M. Caldwell and D. Pope, "SOUND INTENSITY AND NOISE EVALUATION IN A CRITICAL CARE UNIT," *AMERICAN JOURNAL OF CRITICAL CARE*, 1 November 2010.
- [41] S. STEVENS, "Perceived Level of Noise by Mark VII and Decibels (E)," *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 575-601, 17 February 1971.
- [42] J. G. Švec and S. Granqvist, "Tutorial and Guidelines on Measurement of Sound Pressure Level in Voice and Speech," *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, pp. 441-461, 15 March 2018.
- [43] Indrayani, S. Asfiati, R. M. Ndruru and J. Rajagukguk, "Measurement and Evaluation of Sound Intensity at The Medan Railway Station Using a Sound Level Meter," *Journal of Physics: Conference Series*, 2020.
- [44] A. Kumar, S. Claire, J. Khanna, N. Dhadwal, N. Ninama and A. K. Bagha, "Experimental study to measure the sound transmission loss and equivalent continuous sound pressure level of composite material for various disturbances," *Materials Today: Proceedings*, pp. 2782-2786, 2020.
- [45] Y. Wang, "Sound quality estimation for nonstationary vehicle noises based on discrete wavelet transform," *Journal of Sound and Vibration*, pp. 1124-1140, 2009.
- [46] R. VERMEULEN, "OCTAVES AND DECIBELS," *PHILIPS TECHNICAL REVIEW*, pp. 47-56, February 1937.
- [47] S. Connor, "Michel Serres's Milieux," in *Mediations*, Belo Horizonte, 2002.
- [48] M. Kleiner, "Absorbers, Reflectors, and Diffusers," in *ACOUSTICS and AUDIO TECHNOLOGY*, U.S.A., J. Ross Publishing, 2012, pp. 165-196.
- [49] E. Winer, "Audio Basics," in *THE AUDIO EXPERT: EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT AUDIO*, New York, Routledge, 2018.
- [50] Δ. Σκαρλάτος, Εφαρμοσμένη Ακουστική Ηχοπροστασία, Πάτρα: Gotsis, 2021.

- [51] D. Krapf, E. Marinari, R. Metzler, G. Oshanin, X. Xu and A. Squarcini, "Power spectral density of a single Brownian trajectory: What one can and cannot learn from it," *New Journal of Physics*, pp. 1-25, 9 January 2018.
- [52] J. A. Barnes and D. W. Allan, "A statistical model of flicker noise," *Proceedings of the IEEE*, pp. 176-178, February 1966.
- [53] Institute for Telecommunication Sciences, "Waybackmachine," 24 June 2023. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20210608074403/https://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/dir-005/_0685.htm. [Accessed 10 June 2024].
- [54] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "Transactions," The Society, Michigan, 2009.
- [55] A. R. Othman, C. M. Harith, N. Ibrahim and S. S. Ahmad, "The Importance of Acoustic Design in the Mosques towards the Worshipers' Comfort," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pp. 45-54, 2016.
- [56] K. Brawata and T. Kamisiński, "Effect of Stage Curtain Legs Arrangement on Sound Distribution in Opera Houses," *2018 Joint Conference - Acoustics*, pp. 1-4, 11-14 September 2018.
- [57] M. Krishna and Manickam, "Environmental Management," *United Kingdom: Elsevier Inc.*, p. 403, 2017.
- [58] H. S. RIBNER, "Reflection, Transmission, and Amplification of Sound by a Moving Medium," *THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, pp. 435-441, April 1957.
- [59] B. Giyasov, V. Ledenyov and I. Matveeva, "Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound," *Magazine of Civil Engineering*, pp. 13-22, 2018.
- [60] A. SZELĄG, T. KAMISIŃSKI, M. LEWIŃSKA, J. RUBACHA and A. PILCH, "The Characteristic of Sound Reflections from Curved Reflective Panels," *ARCHIVES OF ACOUSTICS*, p. 549-558, 24 April 2014.
- [61] M. Vercammen, "Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part I: Wave Field Approximation," *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, pp. 82-91, 2010.
- [62] J. W. S. B. Rayleigh, "REFLECTION FROM CURVED SURFACES," in *The Theory of Sound: Volume 1*, London, Macmillan, 1894, pp. 124-128.
- [63] Y. Yamada and T. Hidaka, "Reflection of a spherical wave by acoustically hard, concave cylindrical walls based on the tangential plane approximation," *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 818-831, 1 August 2005.
- [64] M. L. Vercammen, "Reflection of sound by concave surfaces," *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, 23-27 August 2010.
- [65] J. Stamnes, "Introduction to image formation and focusing," in *Waves in Focal Regions: Propagation, Diffraction and Focusing of Light, Sound and Water Waves*, Abington, Taylor & Francis Group, 1986, p. 12.

- [66] R. SEZNEC, "DIFFRACTION OF SOUND AROUND BARRIERS: USE OF THE BOUNDARY ELEMENTS TECHNIQUE," *Journal of Sound and Vibration*, pp. 195-209, 21 January 1980.
- [67] H.-S. Kim, J.-S. Kim, H.-J. Kang, B.-K. Kim and S.-R. Kim, "Sound diffraction by multiple wedges and thin screens," *Applied Acoustics*, pp. 1102-1119, September 2005.
- [68] Z. Maekawa, "Noise reduction by screens," *Applied Acoustics*, pp. 157-173, 1 January 1968.
- [69] P. AMBAUD and A. BERGASSOLI, "Le probleme du diedre en acoustique," *Acta Acustica united with Acustica*, pp. 291-298, 1 November 1972.
- [70] J. W. James Hadden and A. D. Pierce, "Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations," *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 1266-1276, 12 July 1980.
- [71] T. B. Gabrielson, "REFRACTION OF SOUND IN THE ATMOSPHERE," *Acoustics Today*, pp. 7-16, April 2006.
- [72] D. K. Wilson, "The sound-speed gradient and refraction in the near-ground atmosphere," *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 750-757, February 2003.
- [73] O. Reynolds, "On the refraction of sound by the atmosphere," *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 531-548, 1 January 1874.
- [74] S. L. Garrett, "Reflection, Transmission, and Refraction," in *Understanding Acoustics*, Pine Grove Mills, Springer, Cham, 2020, pp. 513-542.
- [75] V. S. Shagapov and V. V. Sarapulova, "Features of Sound Refraction in the Atmosphere in Fog," *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, p. 602-609, November 2014.
- [76] R. ISHII and H. MATSUHISA, "Steady reflection, absorption and transmission of small disturbances by a screen of dusty gas," *Journal of Fluid Mechanics*, pp. 259 - 277, May 1983.
- [77] C. R. Hall , P. A. Schmalzer, D. R. Breininger, B. W. Duncan, J. H. Drese, D. A. Scheidt, R. H. Lowers, E. A. Reyier, K. G. Holloway-Adkins, D. M. Oddy, N. R. Cancro, J. A. Provanca, T. E. Foster and E. D. Stolen, "Ecological Impacts of the Space Shuttle Program at John F. Kennedy Space Center, Florida," National Aeronautics and Space Administration, Florida, 2014.
- [78] L. Bjørnø and D. Bradley, "Scattering of Sound," in *Applied Underwater Acoustics*, Taastrup, Elsevier, 2017, pp. 297-362.
- [79] J. A. Ogilvy, "Wave scattering from rough surfaces," *Reports on Progress in Physics*, pp. 1553-1608, 1987.
- [80] M. Oechslin, M. Neukom and G. Bennett, "The Doppler Effect – an Evolutionary Critical Cue for the Perception of the Direction of Moving Sound Sources," in *2008 International Conference on Audio, Language and Image Processing*, Shanghai, 2008.
- [81] M. Fowler, "The Doppler Effect," 2009.

- [82] S. L. Vesely, C. A. Dolci and S. R. Dolci, "The Doppler effect in the perception of sound," in *AIP Conference Proceedings*, Rome, 2017.
- [83] S. Klinaku, "The Doppler effect is the same for both optics and acoustics," *Optik*, 2021.
- [84] S. Gupta, D. Morris, S. N. Patel and D. Tan, "SoundWave: using the doppler effect to sense gestures," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, Association for Computing Machinery, 2012, p. 1911–1914.
- [85] R. Ditchburn, *Light*, New York: Dover publications, 1991.
- [86] E. DH, M. WN, S. R and W. JP, Wiley, Chichester, 1989.
- [87] B.-R. Lee, H. K. Chiang, C.-D. Kuo, W.-L. Lin and S.-K. Lee, "Doppler Angle and Flow Velocity Estimations Using the Classic and Transverse Doppler Effects," *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL*, pp. 252-256, 1 January 1999.
- [88] F. W. Kremkau, "Doppler principles," *Seminars in Roentgenology*, pp. 6-16, 1992.
- [89] T. Hsu, E. Ryherd, K. P. Waye and J. Ackerman, "Noise Pollution in Hospitals: Impact on Patients," *Journal of Science Communication*, July 2012.
- [90] W. F. Passchier and W. Passchier-Vermeer, "Noise exposure and public health," *Environmental Health Perspectives*, pp. 123-131, 1 March 2000.
- [91] M. Basner, W. Babisch, A. Davis, M. Brink, C. Clark, S. Janssen and S. Stansfeld, "Auditory and non-auditory effects of noise on health," *The Lancet*, pp. 1325-1332, 30 October 2013.
- [92] E. Öhrström, R. Rylander and M. Björkman, "Effects of night time road traffic noise—an overview of laboratory and field studies on noise dose and subjective noise sensitivity," *Journal of Sound and Vibration*, pp. 441-448, 1988.
- [93] S. A. Stansfeld and M. P. Matheson, "Noise pollution: non-auditory effects on health," *British Medical Bulletin*, p. 243–257, December 2003.
- [94] V. M., G. J.M. and C. J.M., "Heart rate reactivity to aircraft noise after a long-term exposure," *Noise as a Public Health Problem*, pp. 965-971, 1983.
- [95] E. DANIEL, "Noise and Hearing Loss: A Review," *Journal of School Health*, pp. 25-231, May 2007.
- [96] M. J. Karpa, B. Gopinath, K. Beath, E. Rochtchina, R. G. Cumming, J. J. Wang and P. Mitchell, "Associations Between Hearing Impairment and Mortality Risk in Older Persons: The Blue Mountains Hearing Study," *Annals of Epidemiology*, pp. 452-459, 2010.
- [97] T. Vos, A. D. Flaxman and M. Naghavi, "Years lived with disability (YLDs) for 1160 sequelae of 289 diseases and injuries 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010," *The Lancet*, p. 2163–2196, 15 December 2012.
- [98] A. Fuente and L. Hickson, "Noise-induced hearing loss in Asia," *International Journal of Audiology*, pp. S3-S10, 2011.

- [99] V. M, G. J, C. JM and L. D., "Heart rate reactivity to aircraft noise after a long-term exposure," *Noise as a Public Health Problem*, pp. 965-975, 1983.
- [100] Y. M. Zhao, S. Z. Zhang, S. Selvin and R. C. Spear, "A dose response relation for noise induced hypertension," *British Journal of Industrial Medicine*, p. 179–184, March 1991.
- [101] T. Lang, C. Fouriaud and M.-C. Jacquinet-Salord , "Length of occupational noise exposure and blood pressure," *International Archives of Occupational and Environmental Health*, p. 369–372, February 1992.
- [102] M. Samuel, K.-B. Estela and F. Paul, "Industrial Noise Exposure and Risk Factors for Cardiovascular Disease: Findings from the CORDIS Study," *Noise and Health*, pp. 49-56, July-September 1999.
- [103] C. H. V. KLEIN, "THE MEDICAL FEATURES OF THE PAPYRUS EBERS," *JAMA: The Journal of the American Medical Association*, p. 1928–1935, 23 December 1905.
- [104] World Health Organization, "Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe," World Health Organization, Denmark, 2011.
- [105] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, "Θόρυβος στην Ευρώπη," European Environment Agency, Luxembourg, 2020.
- [106] M. J. Ramos, "Noise indicators under the Environmental Noise Directive: Methodology for estimating missing data," European Topic Centre on Air pollution, transport, noise and industrial pollution, Barcelona, 2019.
- [107] European Environment Agency, "Transport: increasing oil consumption and greenhouse gas emissions hamper EU progress towards environment and climate objectives," 2020.
- [108] M.-M. Curmei and C. Kurrer, "Θεματολογικά δελτία για την Ευρωπαϊκή Ένωση," Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2023.
- [109] ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟ ΚΑΙ ΤΟ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΈΝΩΣΗΣ, "32002L0049," Λουξεμβούργο, 2002.
- [110] Χ. Δούκας, "Για μια Αθήνα χωρίς ηχορύπανση," *TA NEA*, 2023.
- [111] Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης (ΕΚΠΑΑ), "Ελλάδα Έκθεση Κατάστασης Περιβάλλοντος," Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης (ΕΚΠΑΑ), Αθήνα, 2018.
- [112] Υπουργείο Υγείας: Δικτυακός Τόπος Διαβουλεύσεων, "Άρθρο 14 – Κατηγορία IV. Επιχειρήσεις Μαζικής Εστίασης & Αναψυχής," 26 Μάρτιος 2016. [Online]. Available: <http://www.opengov.gr/yyka/?p=1345>. [Accessed 31 Ιανουάριος 2024].
- [113] H. Brumm and H. Slabbekoorn, "Acoustic Communication in Noise," in *Advances in the Study of Behavior*, Academic Press, 2005, pp. 151-209.
- [114] W.-H. Tan, E. Lim, H. Chuah, E. Cheng and C. Lam, "Sound Transmission Loss of Natural Fiber Panel," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, pp. 33-42, December 2016.

- [115] U. Ingård, "A Review of the Influence of Meteorological Conditions on Sound Propagation," *THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, pp. 405-411, May 1953.
- [116] B. Edmund H. and H. J. Freeman F., "Advances in Atmospheric Acoustics," *REVIEWS OF GEOPHYSICS AND SPACE PHYSICS*, pp. 47-110, February 1978.
- [117] O. Reynolds, "On the refraction of sound by the atmosphere," *Royal Society*, pp. 531-548, 1 January 1874.
- [118] T. F. W. Embleton, "Tutorial on sound propagation outdoors," *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 31-48, July 1996.
- [119] J. Eargle, *Sound System Design Reference Manual*, JBL, 1999.
- [120] L. Hannah, "Wind and Temperature Effects on Sound Propagation," *Factors Affecting Outdoor Sound Propagation*, pp. 22-29, 2006.
- [121] L. C. SUTHERLAND and G. A. DAIGLE, "ATMOSPHERIC SOUND PROPAGATION," in *HANDBOOK OF ACOUSTICS*, Toronto, John Wiley & Sons, 1998, pp. 305-314.
- [122] D. S. M.H.F., O. D.J. and S. S., "Noise control strategies for naturally ventilated buildings," *Building and Environment*, pp. 471-484, 2002.
- [123] T. Subramani, M. Kavitha and K. Sivaraj, "Modelling Of Traffic Noise Pollution," *International Journal of Engineering Research and Applications*, pp. 3175-3182, May-June 2012.
- [124] Π. Ιωάννης, "Ακουστική-Υπολογισμοί Συντελεστών Απορρόφησης Υλικών," *Μεσολόγγι*, 2010.
- [125] Γ. Κάσινος, "Μελέτη της τεχνολογίας ηχοαπορρόφησης και ανάπτυξη λογισμικού πρόβλεψης του συντελεστή απορρόφηση σύνθετων ηχοαπορροφητικών διατάξεων," *Ρέθυμνο*, 2009.
- [126] C. Leitao, F. Qiuxia, S. Yang, D. Bin and Y. Jianyong, "Porous materials for sound absorption," *Composites Communications*, pp. 25-35, 2018.
- [127] D. Oliva and V. Hongisto, "Sound absorption of porous materials – Accuracy of prediction methods," *Applied Acoustics*, pp. 1473-1479, 12 July 2013.
- [128] L. Fei, P. Alex, H. Stephen, N. Khai, C. Louis, N. Toshikazu and S. Mark, "Acoustic energy harvesting using an electromechanical Helmholtz resonator," *Acoustical Society of America*, p. 1983–1990, 2008.
- [129] J. D.P., D. J. and J. V.G., "Demonstration of effective acoustic properties of different configurations of Helmholtz resonators," *Applied Acoustics*, pp. 371-382, 2019.
- [130] G. Steve, A. L. Steven and H. Steve, "Coupled Helmholtz Resonators for Acoustic Attenuation," *Journal of Vibration and Acoustics*, pp. 11-17, January 2001.
- [131] G. Claudio, Q. Joseph and N. E. Mastorakis, "Analysis of Methods to Evaluate the Noise Reduction due to Acoustic Barriers Installation," *INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICS*, pp. 258-266, 2014.

- [132] DynAcoustics, "ΑΤΤΙΚΗ ΟΔΟΣ Α.Ε. – ΑΤΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ Α.Ε.," DynAcoustics, [Online]. Available: <https://dynacoustics.gr/αττικη-οδος-α-ε-αττικες-διαδρομες-α-ε/>. [Accessed 2023].
- [133] S. Elliott and P. Nelson, "Active noise control," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 12-35, October 1993.
- [134] S. Dongyuan, L. Bhan, G. Woon-Seng, C. Jordan and E. Stephen J., "Active Noise Control in The New Century: The Role and Prospect of Signal Processing," Institute of Noise Control Engineering, Chiba, 2023.
- [135] P. Lueg, "Process of silencing sound oscillations," *U.S. Patent*, 9 June 1936.
- [136] B. Lam, W.-S. Gan, D. Shi, M. Nishimura and S. Elliott, "Ten questions concerning active noise control in the built environment," *Building and Environment*, 2021.
- [137] S. Kuo and D. Morgan, "Active noise control: a tutorial review," *Proceedings of the IEEE*, pp. 943 - 973, June 1999.
- [138] D. Guicking, "On the invention of active noise control by Paul Lueg," *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 2251-2254, 11 January 1990.
- [139] S. M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*, New York: Wiley, 1996.
- [140] M. Batool, Y. Chen, M. A. Shah, Y. Zhang, S. Wang and M. Zhang, "Design and Simulation using MATLAB/Simulink on Active Noise Control System for Power Transformer," *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, pp. 465-468, 25-28 September 2016.
- [141] S. J. Elliott and J. Cheer, "Modeling local active sound control with remote sensors in spatially random pressure fields," *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 1936–1946, 1 April 2015.
- [142] B. Lam, C. Shi, D. Shi and W.-S. Gan, "Active control of sound through full-sized open windows," *Building and Environment*, pp. 16-27, 15 August 2018.
- [143] T. Murao, C. Shi, W.-S. Gan and M. Nishimura, "Mixed-error approach for multi-channel active noise control of open windows," *Applied Acoustics*, pp. 305-315, 1 December 2017.
- [144] C. Shi, H. Li, D. Shi, B. Lam and W.-S. Gan, "Understanding Multiple-Input Multiple-Output Active Noise Control from a Perspective of Sampling and Reconstruction," in *Proceedings of APSIPA Annual Summit and Conference 2017*, Malaysia, 2017.
- [145] D. Shi, "Algorithms and implementations to overcome practical issues in active noise control systems," Nanyang Technological University, Nanyang, 2020.
- [146] S. M. KUO and D. R. MORGAN, "Active Noise Control: A Tutorial Review," *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, pp. 943 - 973, June 1999.
- [147] S. M. Kuo and J. Tsai, "Acoustical mechanisms and performance of various active duct noise control systems," *Applied Acoustics*, pp. 81-91, 1994.

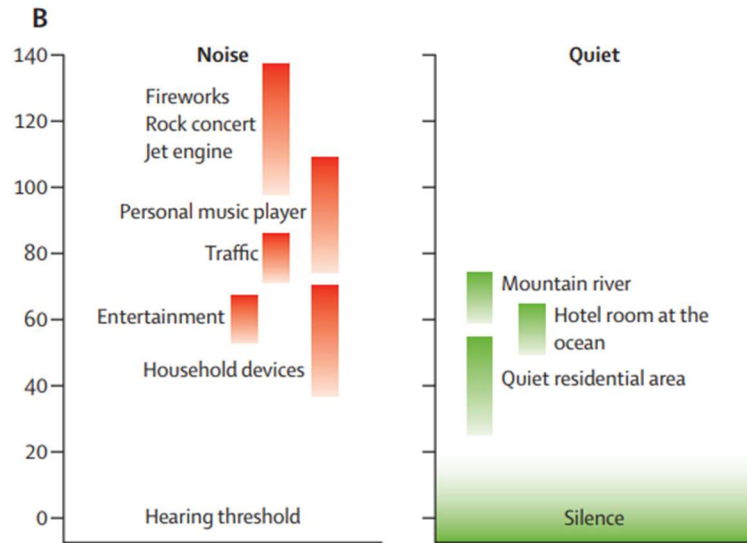
- [148] B. WIDROW, J. McCOOL and M. BALL, "The Complex LMS Algorithm," *Proceedings of the IEEE*, pp. 719 - 720, April 1975.
- [149] H. Simon, "Ο Αλγόριθμος Ελαχίστων Μέσων Τετραγώνων," in *Νευρωνικά Δίκτυα & Μηχανική Μάθηση*, Ontario, Παπασωτηρίου, 2010, pp. 91-102.
- [150] E. S. J. and N. P. A., "The application of adaptive filtering to the active control of sound and vibration," *NASA STI/Recon Technical Report N*, September 1985.
- [151] D. R. Morgan, "An analysis of multiple correlation cancellation loops with a filter in the auxiliary path," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 454 - 467, August 1980.
- [152] S. Gaur and V. K. Gupta, "A Review on Filtered-X LMS Algorithm," *International Journal of Signal Processing Systems*, pp. 172-176, April 2016.
- [153] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, New Jersey: Prentice-Hall, 1985.
- [154] S. M. Kuo and H.-T. Wu, "Nonlinear Adaptive Bilinear Filters for Active Noise Control Systems," *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS-I: REGULAR PAPERS*, pp. 617-624, March 2005.
- [155] F. Yang, Y. Cao, M. Wu, F. Albu and J. Yang, "Frequency-Domain Filtered-x LMS Algorithms for Active Noise Control: A Review and New Insights," *Applied Sciences*, 20 November 2018.
- [156] A. Deb, A. Kar and M. Chandra, "Advanced Linear Adaptive Filtering Methods for Active Noise Control: A Technical Survey," in *2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS -2015)*, Coimbatore, 2015.
- [157] K. S. M. and J. Minjiang, "Passband disturbance reduction in periodic active noise control systems," *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, pp. 96-103, March 1996.
- [158] K. Yoshinobu, G. Woon-Seng and K. Sen M., "Recent advances on active noise control: open issues and innovative applications," *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 28 August 2012.
- [159] D. R. Morgan and S. M. Kuo, *Active Noise Control Systems-Algorithms and DSP Implementations*, New York: Wiley, 1996.
- [160] S. M. Kuo, X. Kong and W. S. Gan, "Applications of Adaptive Feedback Active Noise Control System," *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, pp. 216-220, 20 March 2003.
- [161] Y. L. Zhou, Y. X. Yin and Q. Z. Zhang, "An optimal repetitive control algorithm for periodic impulsive noise attenuation in a non-minimum phase ANC system," *Applied Acoustics*, pp. 1175-1181, October 2013.
- [162] C. Nikias and M. Shao, *Signal processing with alpha – stable distribution and applications*, New York: Wiley, 1995.
- [163] A. Zeb, A. Mirza, Q. U. Khan and S. A. Sheikh, "Improving performance of FxRLS algorithm for active noise control of impulsive noise," *Applied Acoustics*, pp. 364-374, 15 January 2017.

- [164] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [165] A. Zeb, A. Mirza and S. A. Sheikh, "Filtered-x RLS algorithm based active noise control of impulsive noise," *2015 7th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, pp. 1-5, 2015.
- [166] H. Sakai, T. Someda and S. Miyagi, "ANALYSIS OF AN ADAPTIVE FILTER ALGORITHM FOR HYBRID ANC SYSTEM," *2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 13-17 May 2002.
- [167] L. R. Ray, J. A. Solbeck, A. D. Streeter and R. D. Collier, "Hybrid feedforward-feedback active noise reduction for hearing protection and communication," *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 2026–2036, 1 October 2006.
- [168] M. T. Akhtar and W. Mitsuhashi, "Improving Performance of Hybrid Active Noise Control Systems for Uncorrelated Narrowband Disturbances," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, pp. 2058-2066, 7 February 2011.
- [169] J. Chen, J. Benesty and Y. A. Huang, "A Minimum Distortion Noise Reduction Algorithm With Multiple Microphones," *IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO, SPEECH, AND LANGUAGE PROCESSING*, pp. 481-493, March 2008.
- [170] J. Chen, J. Benesty, Y. A. Huang and E. J. Diethorn, "Fundamentals of Noise Reduction," in *Springer Handbook of Speech Processing*, Warren, New Jersey, Springer, 2008, pp. 843-871.
- [171] M. R. Schroeder, "Processing of communications signals to reduce effects of noise," Bell Telephone Laboratories, New York, 1965.
- [172] S. F. Boll, "Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 113-120, April 1979.
- [173] J. Chen, J. Benesty, Y. Huang and S. Doclo, "New insights into the noise reduction Wiener filter," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, pp. 1218-1234, 19 June 2006.
- [174] J. Benesty, J. Chen, Y. Huang and I. Cohen, "Introduction," in *Noise Reduction in Speech Processing*, Heidelberg, Springer Science & Business Media, 2009, pp. 1-14.
- [175] Y. Hu and P. C. Loizou, "A comparative intelligibility study of single-microphone noise reduction algorithms," *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 1777–1786, 1 September 2007.
- [176] M. . R. Weiss, E. Aschkenasy and T. W. Parsons, "Processing speech signals to attenuate interference," *Proceedings of the IEEE Symposium on Speech Recognition*, p. 292–295, 1974.
- [177] J. S. Lim and A. V. Oppenheim, "Enhancement and Bandwidth Compression of Noisy Speech," *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, pp. 1586-1604, December 1979.
- [178] M. M. Sondhi, C. E. Schmidt and L. R. Rabiner, "Improving the Quality of a Noisy Speech Signal," *Bell System Technical Journal*, p. 1847–1859, October 1981.

- [179] Y. Ephraim and D. Malah, "Speech enhancement using a minimum-mean square error short-time spectral amplitude estimator," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 1109-1121, December 1984.
- [180] K. Garg and G. Jain, "A Comparative Study of Noise Reduction Techniques for Automatic Speech Recognition Systems," in *2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Jaipur, 2016.
- [181] S. V. Vaseghi, "Wiener Filters," in *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*, John Wiley & Sons, Ltd, 2001, pp. 178-204.
- [182] B. WIDROW, J. R. GLOVER, JR., J. M. MCCOOL, J. KAUNITZ, C. S. WILLIAMS, R. H. HEAN, J. R. ZEIDLER, E. DONG, JR., and R. C. GOODLIN, "Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications," *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, pp. 1692-1716, December 1975.
- [183] N. Wiener, *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series: With Engineering Applications*, Massachusetts: The MIT Press, 1949.
- [184] J. Benesty, J. Chen, S. Doclo and Y. A. Huang, "Study of the Wiener Filter for Noise Reduction," in *Speech Enhancement: Signals and Communication Technology*, New York, Springer, 2005, pp. 9-42.
- [185] Claudio Maccone, "A simple introduction to the KLT," in *Deep Space Flight and Communications: Exploiting the Sun as a Gravitational Lens*, Chichester, Springer, 2009, pp. 151-180.
- [186] A. Rezayee and S. Gazor, "An adaptive KLT approach for speech enhancement," *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, pp. 87-95, February 2001.
- [187] Y. Ephraim and H. L. Van Trees, "A signal subspace approach for speech enhancement," *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, pp. 251-266, July 1995.
- [188] P. C. Loizou, *Speech Enhancement: Theory and Practice*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007.
- [189] A. R. Fukane and S. L. Sahare, "Different Approaches of Spectral Subtraction method for Enhancing the Speech Signal in Noisy Environments," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, May 2011.
- [190] I. Cohen and B. Berdugo, "Speech enhancement for non-stationary noise environments," *Signal Processing*, pp. 2403-2418, November 2001.
- [191] M. Rainer and C. Breithaupt, "SPEECH ENHANCEMENT IN THE DFT DOMAIN USING LAPLACIAN SPEECH PRIORS," in *International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control (IWAENC)*, Kyoto, 2003.
- [192] B. Chen and P. C. Loizou, "Speech enhancement using a MMSE short time spectral amplitude estimator with Laplacian speech modeling," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 23 March 2005.
- [193] T. Lotter and P. Vary, "NOISE REDUCTION BY MAXIMUM A POSTERIORI SPECTRAL AMPLITUDE ESTIMATION WITH SUPERGAUSSIAN SPEECH MODELING," in *International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control (IWAENC)*, Kyoto, 2003.

- [194] R. Martin, "Speech enhancement using MMSE short time spectral estimation with gamma distributed speech priors," *2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, p. 504–512, 13-17 May 2002.
- [195] S. Merchel and L. Kormann, "FREEDSP: A LOW-BUDGET OPEN-SOURCE AUDIO-DSP MODULE," in *Proc. of the 17th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-14)*, Erlangen, 2014.
- [196] W. Zhaohan, "A Low-cost and Portable Active Noise Control Unit," Nanyang Technological University, Singapore, 2022.
- [197] A. Hofmann, "Graphical development environment for DSP-based audio-specific applications," *ATZelektronik worldwide*, pp. 36-39, 2 December 2013.
- [198] Analog Devices, "Datasheet of the ADAU1701 Digital Signal Processor," [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADAU1701.pdf>. [Accessed 14 2024].
- [199] *National Institute on Deafness and Other Communication Disorders, Environmental Protection Agency, Noise Pollution Clearinghouse.*
- [200] DynAcoustics ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ Α.Ε.: ΑΝΤΙΘΟΡΥΒΙΚΗ & ΑΝΤΙΔΟΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ, "ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CadnaA : ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ (ΕΥΡΩΠΑΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ 2002/49/ΕΚ & 2015/996/ΕΚ)," DynAcoustics ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ Α.Ε., 2014. [Online]. Available: <https://dynacoustics.gr/μοντελα-προβλεψησ-θορυβου-λογισμικο-cad/>. [Accessed 31 Ιανουάριος 2024].
- [201] M. S. Blumberg, J. A. Lesku, P.-A. Libourel, M. H. Schmidt and N. C. Rattenborg, "What Is REM Sleep?," *Current Biology*, pp. R38-R49, 6 January 2020.
- [202] D. Zhou and V. DeBrunner, "Efficient Adaptive Nonlinear Filters for Nonlinear Active Noise Control," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, pp. 669-681, 12 March 2007.

Παράρτημα Α



Εικόνα 0.1 Παραδείγματα θορύβου [91]

Πίνακας 0.1 Παραδείγματα θορύβων και τιμών dBA [199]

Πηγή Θορύβου	dBA ⁵
Ήσυχο Δωμάτιο	28-33
Ηλεκτρονικός Υπολογιστής	37-45
Ανεμιστήρας Δαπέδου	38-70
Καταψύκτης	40-43
Συζήτηση Ανθρώπων	40
Εξαερισμός Αέρα Συστήματος Θέρμανσης	42-52
Πλυντήριο Ρούχων	47-78
Πλυντήριο Πιάτων	54-85
Εξαερισμός Μπάνιου	54-55
Φούρνος Μικροκυμάτων	55-59
Πιστολάκι Μαλλιών	59-90
Εκτυπωτής	59-90
Ξυπνητήρι	60-80
Ηλεκτρική Σκούπα	62-85
Χλοοκοπτική Μηχανή	63-72
Ραπτομηχανή	64-74
Αυτοκίνητο ταξιδεύοντας με 50km/h (κλειστά παράθυρα)	68-73

⁵ Οι μετρήσεις είναι κατά προσέγγιση και ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με την πηγή θορύβου.

Αυτοκίνητο ταξιδεύοντας με 50km/h (ανοιχτά παράθυρα)	72-76
Μοτοσυκλέτα (Μέση)	90
Φυσητήρας	95-105
Αλυσοπρίονο	110
Μέγιστη έξοδος στερεοφωνικού	100-120
Κροτίδα (Μέση)	140
Ροκ Συναυλία (Μέση)	140

Πίνακας 0.2 Πίνακας σύγκρισης αλγορίθμων ANC [156]

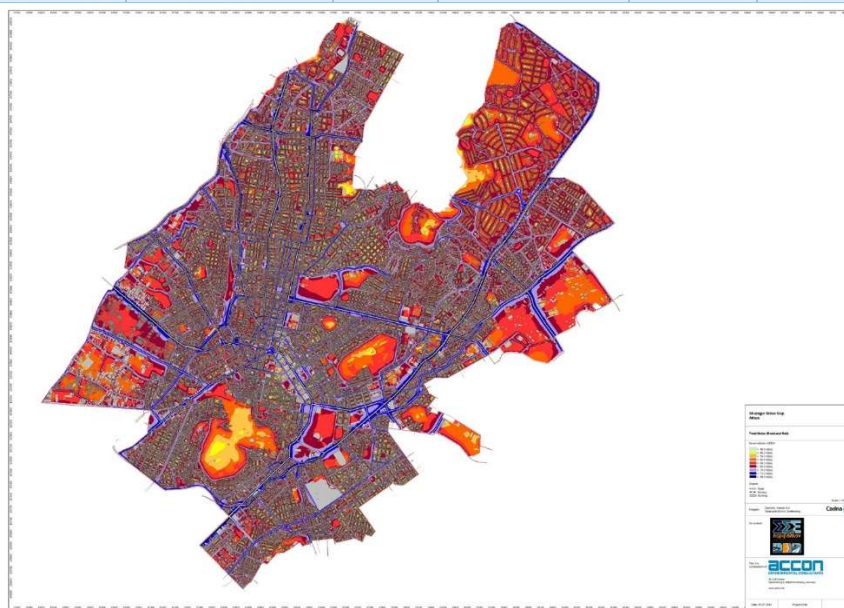
Αλγόριθμος	Υπολογιστική Πολυπλοκότητα (σε δευτερόλεπτα)	Σταθερότητα	Ανθεκτικότητα	Ταχύτητα σύγκλισης
<i>LMS</i>	3.3	Σταθερός	Χαμηλή	Αργή
<i>NLMS</i>	3.6	Πιο σταθερός από τον LMS	Χαμηλή	Ταχύτερη από τον LMS
<i>FLMS</i>	3.9	Πιο σταθερός από τον LMS	Μέτρια	Ταχύτερη από τον LMS
<i>FxLMS</i>	3.5	Αρκετά σταθερός	Χαμηλή	Πιο αργή από τον LMS
<i>FxRLS</i>	4.2	Ασταθής	Υψηλή	Ταχύτερη από τον NLMS
<i>VSSLMS</i>	3.6	Πιο σταθερός από τον LMS	Υψηλότερη από τον LMS	Ταχύτερη από τον LMS
<i>VSSNLMS</i>	3.8	Πιο σταθερός από τον NLMS	Υψηλότερη από τον NLMS	Ταχύτερη από τον NLMS
<i>FULMS</i>	4.0	Αρκετά ασταθής	Μέτρια	Ταχύτερη από τον FxLMS και πιο αργή από τον NLMS
<i>Feedback LMS</i>	3.2	Πιο ασταθής από τον NLMS	Υψηλότερη από τον FLMS	Ταχύτερη από τον NLMS και τον VSSLMS
<i>Hybrid LMS</i>	4.2	Αρκετά πιο σταθερός από τον Feedback LMS	Η πιο ανθεκτική	Ταχύτερη από τον Feedback LMS

Παράρτημα Β

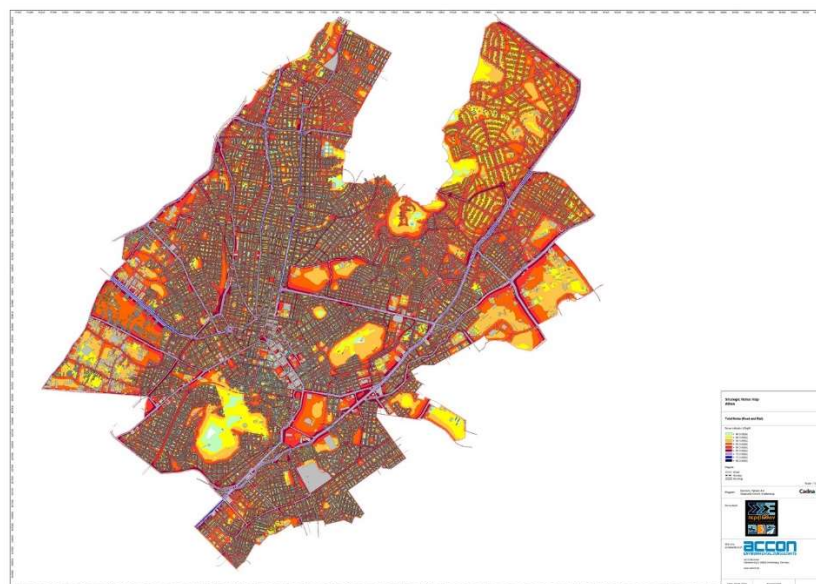
Πίνακας 0.1 Ποσοστό πληθυσμού που εκτίθεται σε $L_{den} \geq 55dB$ εξαιτίας θορύβων αυτοκινητοδρόμων (δρόμων), σιδηροδρόμων, αεροπλάνων (αέρος) και εργοστασίων των περιοχών που καλύπτονται από το END (Environmental Noise Directive) [107] [106]

	Εντός αστικών περιοχών				Εκτός αστικών περιοχών		
	Δρόμων	Σιδηροδρόμων	Αέρος	Εργοστασίων	Δρόμων	Σιδηροδρόμων	Αέρος
Αυστρία	24.2	6.6	0.1	0.1	8.2	5.7	0.1
Βέλγιο	14.0	1.0	0.6	0.2	8.6	2.2	0.6
Βουλγαρία	28.8	0.6	0.1	0.0	1.5	-	-
Κροατία	7.7	0.6	0.0	0.0	2.8	0.0	-
Κύπρος	49.2	3.2	0.9	1.0	4.7	-	-
Τσεχία	16.7	0.7	0.1	0.0	6.9	1.8	0.1
Δανία	18.5	0.5	0.1	0.0	5.0	1.5	0.0
Εσθονία	22.7	0.5	0.2	0.2	0.5	-	-
Φινλανδία	8.8	1.6	0.1	0.0	2.1	0.6	0.4
Γαλλία	23.5	3.6	0.7	0.2	9.8	3.9	0.0
Γερμανία	6.9	3.7	0.7	0.1	3.3	4.0	0.4
Ελλάδα	7.9	1.3	0.4	0.1	0.2	0.0	0.0
Ουγγαρία	16.4	1.3	0.0	0.0	1.8	0.9	0.3
Ισλανδία	16.6	-	0.5	0.2	-	-	0.5
Ιρλανδία	14.4	0.6	0.6	-	4.8	0.3	0.0
Ιταλία	13.7	0.9	0.7	0.1	11.4	3.3	0.3
Λετονία	27.0	2.0	0.0	0.7	12.0	0.1	0.1
Λιχτενστάιν	-	-	-	-	1.2	-	-
Λιθουανία	26.3	0.4	0.4	0.3	0.8	0.0	-
Λουξεμβούργο	24.5	1.5	10.1	0.0	11.2	3.3	1.1
Μάλτα	22.4	-	1.9	0.0	3.7	-	-
Ολλανδία	19.3	1.3	0.4	0.3	1.0	0.5	0.0
Νορβηγία	15.2	2.2	0.2	0.0	2.6	0.2	0.1
Πολωνία	11.6	0.6	0.1	0.1	5.7	0.5	0.0

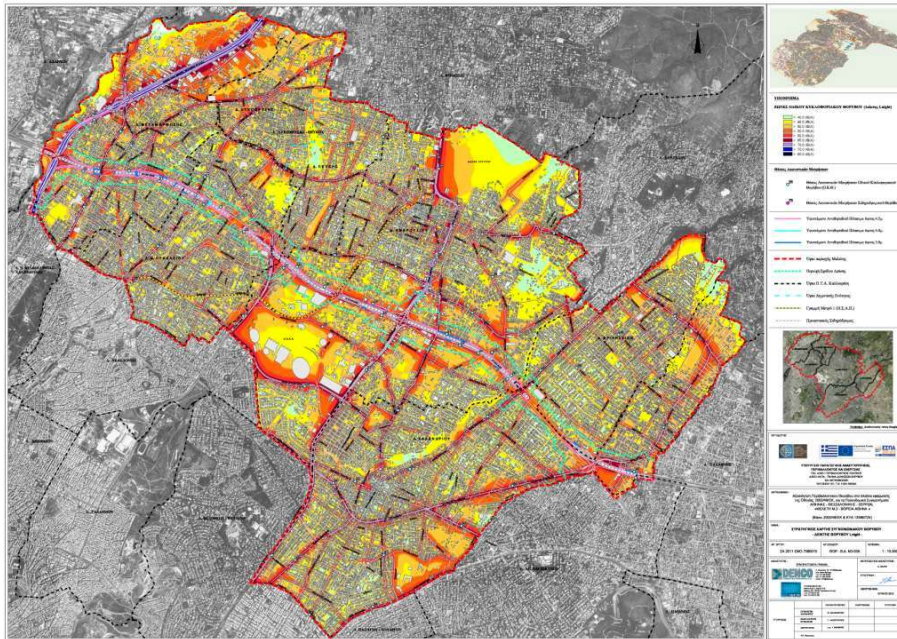
Πορτογαλία	5.2	0.4	0.9	0.0	8.6	1.0	1.3
Ρουμανία	13.3	1.5	0.2	1.2	1.6	0.1	0.0
Σλοβακία	6.7	2.4	0.0	0.0	2.9	2.0	-
Σλοβενία	9.8	1.2	-	0.0	5.5	1.1	-
Ισπανία	24.8	1.1	0.2	0.2	4.2	0.7	0.3
Σουηδία	13.2	2.9	0.2	0.0	3.3	2.7	0.2
Ελβετία	30.6	3.4	1.1	0.2	5.1	2.4	0.0
Ηνωμένο Βασίλειο	14.5	1.9	1.5	0.2	6.5	0.7	0.2



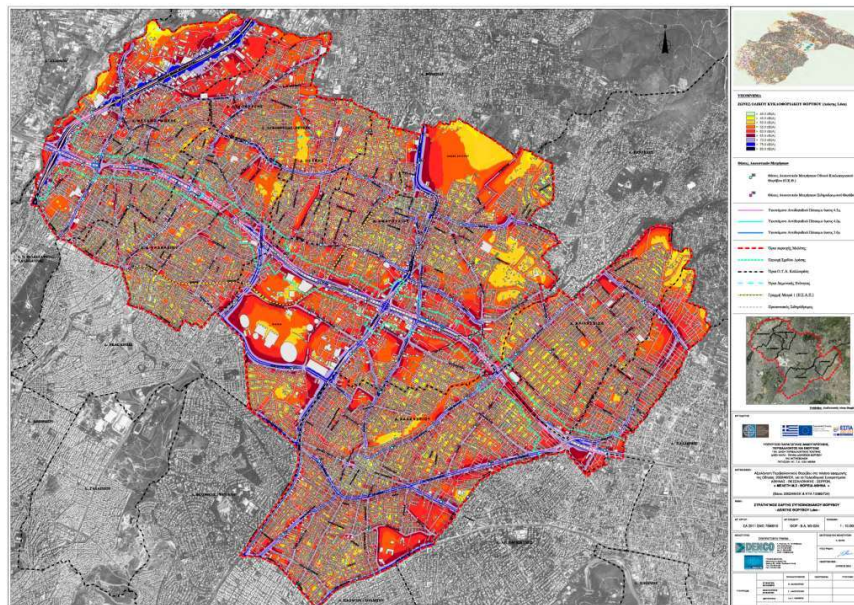
Εικόνα 0.1 Δείκτης L_{den} πολυεδομικού συγκροτήματος Αθήνας [200]



Εικόνα 0.2 Δείκτης L_n πολυεδομικού συγκροτήματος Αθήνας [200]



Εικόνα 0.3 Δείκτης L_{den} πολυεδομικού συγκροτήματος Βόρειας Αθήνας [200]



Εικόνα 0.4 Δείκτης L_n πολυεδομικού συγκροτήματος Βόρειας Αθήνας [200]