



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΑΚΥΡΩΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Δ. ΚΟΝΤΑΞΗΣ

Επιβλέπων : Καγιάφας Ελευθέριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΑΚΥΡΩΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Δ. ΚΟΝΤΑΞΗΣ

Επιβλέπων : Καγιάφας Ελευθέριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2008.

.....
Καγιάφας Ελευθέριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Λούμος Βασίλειος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Καμπουράκης Γεώργιος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2008

.....

Αλέξανδρος Δ. Κονταξής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός
Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αλέξανδρος Δ. Κονταξής, 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη των αρχών λειτουργίας των ακουστικών ακύρωσης θορύβου, αλλά και ο τρόπος με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τα διάφορα ηχητικά ερεθίσματα που δέχεται από το περιβάλλον.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη είναι ένα μεγάλο θεωρητικό μέρος κατά το οποίο αναλύονται λεπτομερώς ο τρόπος διάδοσης των ηχητικών σημάτων, ο τρόπος με τον οποίο ο άνθρωπος δέχεται και αντιλαμβάνεται τα σήματα αυτά, η φυσιολογία του ανθρώπινου αυτιού, η αντίληψη της ομιλίας και της μουσικής και πολλές ενδιαφέρουσες πτυχές της ψυχοακουστικής. Εν συνεχεία, μελετάται ο ακουστικός κυρίως θόρυβος και τα χαρακτηριστικά του καθώς και οι διάφοροι τρόποι μείωσης ή ακύρωσης του στη τεχνολογία των ακουστικών ακύρωσης θορύβου, τα οποία εφαρμόζουν τη θεωρία του ενεργού ελέγχου θορύβου.

Κατά το δεύτερο μέρος της εργασίας κατασκευάστηκε και μελετήθηκε κύκλωμα που χρησιμοποιείται για ακύρωση θορύβου σε ακουστικά και αναλύθηκαν τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Το κύκλωμα αυτό λαμβάνει το θόρυβο μέσω ενός μικροφώνου και παράγει ένα σήμα «αντιθορύβου», το οποίο είναι ένα πανομοιότυπο σήμα με αυτό του θορύβου με τη μόνη διαφορά ότι έχει διαφορά φάσης 180° . Με αυτόν τον τρόπο τα δύο σήματα αλληλοεξουδετερώνονται και στα ακουστικά μας έχουμε την αίσθηση της ακύρωσης του θορύβου.

Λέξεις Κλειδιά

ήχος, αντίληψη ήχου, αντίληψη ομιλίας, μουσική αντίληψη, ψυχοακουστική, ακουστικός θόρυβος, ακουστικά ακύρωσης θορύβου, ενεργός έλεγχος θορύβου

Abstract

The scope of this thesis was the study of the ways that man receives and perceives sounds and the study of the function principles of noise canceling headphones.

This thesis can be divided into two parts. The first part is the theoretical one, in which it is described in details how people receive and perceive sound, speech and music. Moreover, some very interesting aspects of psychoacoustics are analyzed. Furthermore, we go through the acoustic noise and the function principles of noise cancelling headphones, which are active noise reduction systems.

In the second part of this thesis, we built and studied an electronic circuit that is used for noise cancellation in the noise cancelling headphones and we analyzed the results we received. Our circuit collects the noise through a microphone and produces a signal that is exactly the same with the signal of noise but it is 180° out of phase. In that way, when the noise and the “antinoise” signal meet, they cancel each other.

KeyWords

Sound, sound perception, speech perception, musical perception, psychoacoustics, acoustic noise, noise canceling headphones, active noise control

Ευχαριστίες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την τελευταία μου πράξη ως φοιτητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα αποτελούσε αγνωμοσύνη εκ μέρους μου να παραλείψω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξή τους κατά τη συνολική διάρκεια των σπουδών μου.

Για την περάτωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καγιάφα, τον υπεύθυνο του εργαστηρίου ηλεκτρονικής κ. Κυπριανό, τον κ. Φειδερόπουλο για τις πρακτικές συμβουλές του καθώς και τους φίλους μου για την ψυχολογική τους στήριξη και ιδιαιτέρως το Θωμά για την κριτική του.

Ειδική μνεία αξίζει στο συνάδελφο Χάρη Παπαδόπουλο για την κοινή μας προσπάθεια και την αλληλοβοήθεια να καλύψουμε το χαμένο έδαφος όταν σε κάποιο χρονικό σημείο είχαμε μείνει πολύ πίσω.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή	11
1.1 Ήχος (Sound)	11
1.2 Χαρακτηριστικά του ήχου	12
1.3 Διάδοση ηχητικών κυμάτων	14
1.4 Ο ήχος ως σύνθετο σήμα	15
2. Αντίληψη ήχου (Sound perception)	16
2.1 Ένταση (Intensity)	16
2.2 Συχνότητα (Frequency)	17
2.3 Φαινόμενο Ντόπλερ (Doppler effect)	18
3. Ακουστική κλειστών χώρων	20
3.1 Βασική κυματική θεωρία	21
3.2 Το ηχητικό πεδίο σε κλειστούς χώρους	22
4. Το αυτί (The human ear)	25
4.1 Φυσιολογία του αυτιού	25
4.1.1 Έξω αυτί	26
4.1.2 Μέσο αυτί	27
4.1.3 Έσω αυτί	28
4.2 Λειτουργία του αυτιού	29
4.3 Αντίληψη	33
4.4 Ερμηνεία των ήχων	33
4.4.1 Ακουστότητα (Loudness)	33
4.4.2 Τονικό ύψος (Pitch)	35
4.4.3 Χροιά (Timbre)	36
4.4.4 Ακουστική επικάλυψη (Masking effect)	36
4.4.5 Εντοπισμός θέσης πηγής (Localization)	37
5. Αντίληψη ομιλίας/λόγου (Speech perception)	38
5.1 Βασικά της λεκτικής αντίληψης	38
5.1.1 Ακουστικά πρότυπα	39
5.1.2 Η γραμμικότητα και το πρόβλημα της κατάτμησης	40
5.1.3 Έλλειψη σταθερότητας	41
5.1.4 Αντιληπτική σταθερότητα και κανονικοποίηση	42
5.1.5 Κατηγορική αντίληψη	43
5.1.6 Επιρροές στη λεκτική αντίληψη	44
6. Ψυχοακουστική (Psychoacoustics)	44
6.1 Βασικά στοιχεία	45
6.2 Όρια αντίληψης	46
6.3 Masking effect	47
6.4 Phantom fundamentals	47

6.5 Ψυχοακουστική και μουσική	48
7. Μουσική αντίληψη (Musical perception)	48
7.1 Τόνος και beat	48
7.2 Στάσιμα κύματα και αντήχηση	49
7.3 Μουσική και ψυχοακουστική	49
7.3.1 Αρμονικές και υπερτόνια (Harmonics and overtones)	49
7.3.2 Σύνθετα κύματα και χροιά	50
7.3.3 Ακουστότητα	50
7.3.4 The missing fundamental – fundamental tracking	51
7.4 Χωρική αντίληψη (Spatial perception)	52
7.4.1 Δίωτα beat (Binaural beats)	52
7.4.2 Επίδραση προτεραιότητας (Precedence effect)	52
8. Θόρυβος	52
8.1 Ηλεκτρονικός θόρυβος	53
8.1.1 Θερμικός θόρυβος	53
8.1.2 Θόρυβος βολής	54
8.2 Χρώματα θορύβου	54
8.2.1 Λευκός θόρυβος	54
8.2.2 Ροζ θόρυβος	55
8.2.3 Καφέ ή κόκκινος θόρυβος	55
8.2.4 Μπλε ή κυανούς θόρυβος	55
8.2.5 Μωβ θόρυβος	56
8.2.6 Γκρι θόρυβος	56
8.3 Ακουστικός θόρυβος	56
8.3.1 Κατηγορίες θορύβου	57
8.3.2 Μέτρηση θορύβου	57
8.3.3 Ζυγισμένη μέτρηση θορύβου	58
8.4 Θόρυβος ευρείας και στενής ζώνης	60
8.5 Επιπτώσεις του θορύβου στον άνθρωπο	63
9. Ακύρωση θορύβου (Noise cancellation)	65
9.1 Τεχνολογία ακύρωσης θορύβου	66
9.1.1 Εισαγωγή	66
9.1.2 Παθητικός έλεγχος θορύβου (Passive noise control)	67
9.1.3 Ενεργός έλεγχος θορύβου (Active noise control)	68
9.2 Ακουστικά ακύρωσης θορύβου (Noise canceling headphones)	71
9.2.1 Εισαγωγή	71
9.2.2 Ιστορική αναδρομή	71
9.3 Συστήματα ακουστικών ενεργής ακύρωσης θορύβου (Active noise reduction headphone systems)	74
9.3.1 Εισαγωγή	74
9.3.2 Συστήματα ανοιχτού βρόχου (Open loop systems)	77
9.3.3 Συστήματα κλειστού βρόχου (Closed loop systems)	78
9.3.4 Προσαρμοζόμενα συστήματα (Adaptive noise reduction)	81
9.4 Περιγραφή υλοποιημένου κυκλώματος	83

9.5 Ακουστικά- Μικρόφωνα	86
9.5.1 Ακουστικά	87
9.5.2 Μικρόφωνα	89
9.6 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα	90
Βιβλιογραφία	98

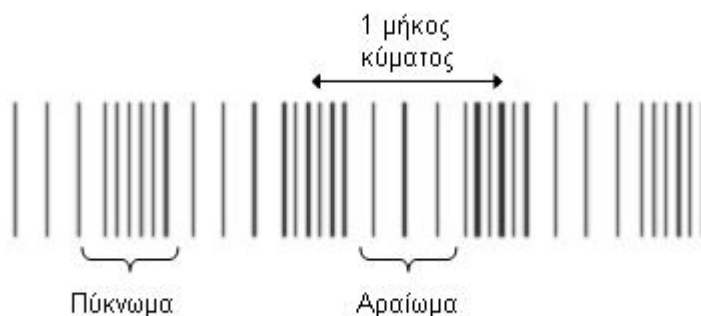
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΗΧΟΣ (SOUND)

Ο **ήχος** είναι η υποκειμενική εντύπωση (αίσθημα) που προκαλείται στον εγκέφαλο, λόγω της διέγερσης των αισθητηρίων οργάνων της ακοής, από ταχείες μεταβολές πίεσης (φυσικό αίτιο) του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτές οι μεταβολές πίεσης, διαδίδονται με τη μορφή **ηχητικών κυμάτων**. Πολλές φορές στην πράξη, ο όρος ήχος χρησιμοποιείται ως ταυτόσημος με την έννοια των ηχητικών κυμάτων, πχ διάδοση του ήχου αντί του ορθότερου διάδοση των ηχητικών κυμάτων.

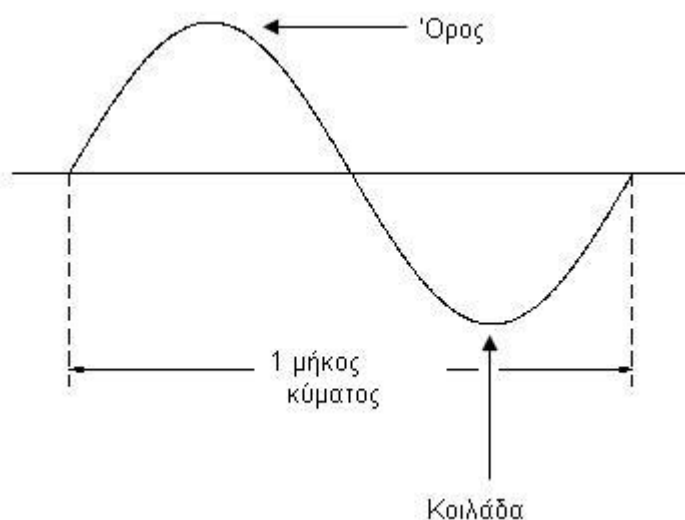
Τα ηχητικά κύματα παράγονται από σώματα που εκτελούν μηχανικές ταλαντώσεις (δονήσεις) και τα οποία στη συνέχεια διαδίδονται σε στερεά, υγρά και αέρια υλικά μέσα. Στο απόλυτο κενό, η ηχητική ενέργεια δεν διαδίδεται. Επομένως, τα ηχητικά κύματα είναι μηχανικά κύματα (ελαστικότητας), τα οποία μεταφέρουν μηχανική ενέργεια. Στα ρευστά (υγρά και αέρια) η ηχητική ενέργεια διαδίδεται πάντοτε με μία μορφή που είναι γνωστή ως **διαμήκη κύματα**, ενώ στα στερεά μπορεί να διαδίδεται επιπρόσθετα και με τη μορφή των **εγκάρσιων κυμάτων**.

Διαμήκη κύματα ονομάζονται τα κύματα εκείνα των οποίων η διεύθυνση διάδοσής των συμπίπτει με την διεύθυνση της ταλάντωσης.



Εικόνα 1 Στιγμιότυπο ενός διαμήκους κύματος

Εγκάρσια κύματα ονομάζονται εκείνα τα κύματα των οποίων η διεύθυνση διάδοσής των είναι κάθετη στη διεύθυνση της ταλάντωσης.



Εικόνα 2 Στιγμιότυπο ενός εγκάρσιου κύματος

1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Η παραγωγή απλού ήχου είναι αρκετά δύσκολη. Ο σύνθετος ήχος είναι μείγμα πολλών απλών ήχων και αποτελείται από ένα θεμελιακό ήχο με μεγαλύτερη ένταση και από λίγους ή πολλούς απλούς που λέγονται ανώτεροι ή αρμονικοί ήχοι. Κάθε ήχος χαρακτηρίζεται από τρία υποκειμενικά χαρακτηριστικά: το **ύψος**, την **ένταση** και το **ποιόν ή χροιά**.

Το τονικό ύψος ενός ήχου μας επιτρέπει να τον χαρακτηρίσουμε βαρύ ή οξύ κι εξαρτάται από τον αριθμό των παλμικών κινήσεων που κάνει το ηχογόνο σώμα, κατά τη διεγέρσή του, σε 1 δευτερόλεπτο (**συχνότητα**).

Όσο πιο μικρός είναι ο αριθμός των παλμικών κινήσεων, τόσο πιο βαρύς είναι ο ήχος, ενώ όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των παλμικών κινήσεων, τόσο πιο οξύς είναι ο παραγόμενος ήχος. Συχνότητα ήχου λέγεται ο αριθμός των παλμικών κινήσεων που εκτελεί ένα σώμα. Ανάλογα με τη συχνότητα, οι ήχοι διακρίνονται σε **υπόηχους**, **υπέρηχους** και **ακουστούς** ήχους.

Οι **ακουστοί** ήχοι είναι αυτοί που μπορούν να συλληφθούν από το ανθρώπινο αυτί και η συχνότητά τους βρίσκεται μεταξύ 16 παλμικών κινήσεων το δευτερόλεπτο και 20.000 παλμικών κινήσεων το

δευτερόλεπτο. Οι ήχοι που η συχνότητά τους είναι κάτω από 16 παλμικές κινήσεις ονομάζονται υπόηχοι και δε συλλαμβάνονται από το αυτί του ανθρώπου. Επίσης οι ήχοι που έχουν συχνότητα πάνω από 20.000 παλμικές κινήσεις καλούνται υπέρηχοι και δε γίνονται ακουστοί. Η παραγωγή υπέρηχων που χρησιμοποιούνται στην ιατρική για την καταστροφή ορισμένων κυτταρικών όγκων γίνεται με ειδικές συσκευές.

Η **ένταση** είναι η δύναμη του ήχου, δηλαδή αν ο ήχος είναι ισχυρός ή ασθενής και εξαρτάται από το πλάτος των παλμικών κινήσεων. Όσο μικρότερο είναι το πλάτος τόσο πιο ασθενής είναι ο ήχος κι όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος τόσο πιο ισχυρός είναι ο ήχος.

Είναι δυνατόν όμως δύο ήχοι να έχουν την ίδια συχνότητα και την ίδια ένταση και να διαφέρουν μεταξύ τους. Το ιδιαίτερο αυτό χαρακτηριστικό που μας επιτρέπει να ξεχωρίζουμε δύο, κατά τα άλλα, ίδιους ήχους μεταξύ τους, είναι η **χροιά**. Πχ αν ακούσουμε δύο ήχους ίδιας συχνότητας και ίδιας έντασης αλλά από δύο διαφορετικά μουσικά όργανα τους ξεχωρίζουμε αμέσως! Το παραπάνω εξηγείται από το ότι οι παραγόμενοι ήχοι είναι σύνθετοι και αποτελούνται από ένα θεμελιακό ήχο και πολλούς άλλους αρμονικούς που βρίσκονται σε μια ορισμένη σχέση με το θεμελιακό. Έτσι η συχνότητα κάθε αρμονικού είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας του θεμελιακού. Αν δηλαδή ο θεμελιακός παράγεται από 500 παλμικές κινήσεις στο 1 δευτερόλεπτο, οι αρμονικοί θα παράγονται από 1.000, 1.500, 2.000 παλμικές κινήσεις το δευτερόλεπτο.

Απλούς ήχους μπορούμε να πάρουμε από τα διαπασών και τους μακριούς ηχητικούς σωλήνες. Στην περίπτωση αυτή οι ήχοι δεν ξεχωρίζουν κατά τη χροιά, γιατί δεν έχουν αρμονικούς. Όπως είπαμε και παραπάνω, η διάδοση του ήχου στον αέρα γίνεται με τα ηχητικά κύματα. Η δημιουργία των ηχητικών κυμάτων είναι η εξής: Κάθε σώμα που παράγει ήχο μπαίνει σε παλμική κίνηση, που διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα στρώματα του αέρα, που βρίσκονται σ' επαφή με το ηχογόνο σώμα, διεγείρονται και μπαίνουν κι αυτά σε όμοια κίνηση με το σώμα, που μεταδίνεται παραπέρα. Έτσι τα ηχητικά κύματα φτάνουν στο αυτί μας. Δημιουργούνται στον αέρα πυκνώματα και αραιώματα σε σφαιρικό σχήμα, που, όταν φτάσουν στο αυτί μας, βάζουν σε παλμική κίνηση το ακουστικό τύμπανο και δημιουργείται

έτσι το αίσθημα της ακοής.

Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πυκνωμάτων ή αραιωμάτων λέγεται **μήκος του ηχητικού κύματος**. Τα μικρά μήκη κύματος αντιστοιχούν σε μεγάλες συχνότητες και τα μεγάλα μήκη κύματος σε μικρές συχνότητες.

Οι ήχοι, που γίνονται ακουστοί από το ανθρώπινο αυτί, έχουν μήκη κύματος από 14 εκατ. μέχρι 21,25 εκατ. Τα μήκη κύματος τα μικρότερα από 14 εκατ. ονομάζονται υπερηχητικά κύματα. Οι φυσικοί κατόρθωσαν να φτιάξουν υπερηχητικά κύματα με πολύ μικρό μήκος κύματος, της τάξης του χιλιοστού του εκατοστομέτρου.

Ένα ακόμα σημαντικό μέγεθος της ακουστικής είναι η ακουστική ή ηχητική πίεση. Ακουστική πίεση (p) είναι η υπερπίεση ή υποπίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) που δημιουργείται κατά τη διάδοση του ηχητικού κύματος. Πλάτος της πίεσης είναι η μέγιστη διαφορά της στιγμιαίας πίεσης από την ατμοσφαιρική πίεση. Το πλάτος σχετίζεται άμεσα με το πόσο έντονα θα «ακουσθεί» ένας ήχος. Η ακουστική πίεση είναι βαθμωτό μέγεθος.

Συνήθως μετράμε μέσες τιμές ηχητικής πίεσης :

$$p_s = \frac{1}{T} \int_0^T |p(t)| dt$$

ή rms τιμές :

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

1.3 ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Όταν ένα ηχογόνο σώμα παράγει ήχο, οι παλμικές κινήσεις μεταδίδονται στο περιβάλλον του σώματος και το βάζουν σε παλμική κίνηση. Δημιουργούνται λοιπόν στον αέρα σφαιρικά ηχητικά κύματα που εκπέμπονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Το κέντρο εκπομπής είναι το ηχογόνο σώμα.

Τα ηχητικά κύματα είναι αόρατα σε αντίθεση με τα κύματα στην επιφάνεια του νερού που είναι ορατά. Αν όμως σταθούμε κοντά σ' ένα

ηχογόνο σώμα καταλαβαίνουμε τον ήχο. Όσο πιο κοντά στο κέντρο εκπομπής βρισκόμαστε, τόσο δυνατότερος είναι και ο ήχος. Εάν απομακρυνθούμε πολύ από το κέντρο εκπομπής, θα φτάσει στιγμή που δε θα ακούμε πια τον ήχο, γιατί τα ηχητικά κύματα θα σβήνουν πριν φτάσουν στ' αυτιά μας.

Για να ακουστεί ένας ήχος, θα πρέπει μεταξύ ηχογόνου σώματος και δέκτη των ηχητικών κυμάτων να υπάρχει κάποια ύλη (στερεό, υγρό ή αέριο). Ο ήχος δεν μεταδίδεται στο κενό. Η **ταχύτητα** διάδοσης των ηχητικών κυμάτων στον αέρα είναι περίπου 340 μέτρα το δευτερόλεπτο. Στα υγρά είναι μεγαλύτερη και στα στερεά ακόμη πιο μεγάλη. Στο νερό των ποταμών πχ φτάνει τα 1.440 m/sec και στο θαλασσινό νερό τα 1.500 m/sec. Στο ξύλο είναι 4.000 και στο σίδηρο 5.100 m/sec.

Όταν τα ηχητικά κύματα στην πορεία τους συναντήσουν κάποιο εμπόδιο, αναγκάζονται να γυρίσουν πίσω. Το φαινόμενο αυτό λέγεται ανάκλαση. Αν το εμπόδιο βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από 17m, έχουμε το φαινόμενο της **ηχούς**, κατά το οποίο αν βρισκόμαστε σ' αυτήν την απόσταση από κάποιο εμπόδιο και φωνάξουμε, τότε ακούμε τη φωνή μας να επαναλαμβάνεται. Εάν υπάρχουν πολλά τέτοια εμπόδια τριγύρω, τότε ακούμε τη φωνή μας να επαναλαμβάνεται περισσότερες από μια φορές. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πολλαπλή ηχώ. Αν όμως το εμπόδιο βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από 17m, τότε ο ήχος απλώς δυναμώνει. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **αντήχηση** και στηρίζεται στο ότι τα ηχητικά κύματα ανακλώνται και επιστρέφουν ενισχυμένα, όταν συναντήσουν ένα πολύ κοντινό εμπόδιο.

1.4 Ο ΗΧΟΣ ΩΣ ΣΥΝΘΕΤΟ ΣΗΜΑ

Ο ήχος είναι σύνθετο σήμα και ουσιαστικά αντιστοιχεί στο άθροισμα περιοδικών σημάτων ή διαφορετικά περιοδικών μεταβολών πίεσης. Ο συνδιασμός των σημάτων αυτών σε κάποιο σημείο του χώρου μας δίνει το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα.

Ο ήχος μπορεί να διαχωριστεί σε 3 κατηγορίες :

- Τόνοι
- Αρμονικοί τόνοι
- Θόρυβος

Ανάλυση του ήχου είναι η αντίστροφη διαδικασία προσδιορισμού των βασικών συνιστωσών του ηχητικού κύματος. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της ανάλυσης Fourier, η οποία είναι η αναπαράσταση του ηχητικού κύματος στο πεδίο της συχνότητας. Η απεικόνισή του σήματος στο πεδίο της συχνότητας ονομάζεται φάσμα του σήματος.

Οι συνιστώσες της φασματικής απεικόνισης για περιοδικούς ήχους είναι η **θεμελιώδης συχνότητα** και τα **ακέραια πολλαπλάσια** της θεμελιώδους συχνότητας.

Ενώ οι συνιστώσες της φασματικής απεικόνισης για μη περιοδικούς ήχους είναι το **φάσμα** το οποίο στην πράξη είναι διακριτό, εφόσον έχουμε δειγματοληψία του σήματος εισόδου.

2. ΑΝΤΙΛΗΨΗ ΗΧΟΥ (SOUND PERCEPTION)

2.1 ΕΝΤΑΣΗ (INTENSITY)

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο διάδοσης ενός ηχητικού κύματος, θεωρούμε την ύπαρξη μιας σημειακής ηχητικής πηγής. Η σημειακή ηχητική πηγή εκπέμπει ηχητικά κύματα προς όλες τις κατευθύνσεις σε μια συνεχώς αναπτυσσόμενη σφαίρα από την πηγή. Όσο αυτή η σφαίρα μεγαλώνει, η επιφάνεια της όλο και απομακρύνεται από την σημειακή πηγή, με αποτέλεσμα η ίδια ποσότητα ηχητικής ενέργειας να διασκορπίζεται σε μεγαλύτερη περιοχή και η ένταση του ήχου να μειώνεται. Αυτή είναι η αιτία εξασθένησης του ήχου σε μεγάλες αποστάσεις.

Ακόμα και διαισθητικά καταλαβαίνουμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του κύματος τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ένταση. Στην πραγματικότητα η ένταση είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του κύματος. Η **ένταση** του ηχητικού κύματος ορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που μεταδίδεται από το κύμα ανά μονάδα επιφανείας κάθετης στη φορά διάδοσης του κύματος. Μονάδα μέτρησης της έντασης είναι Watts ανά τετραγωνικό μέτρο. Υπενθυμίζουμε ότι $1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joule/sec}$.

Παρόλα αυτά η ένταση του ήχου τις περισσότερες φορές εκφράζεται ως προς μια τιμή αναφοράς σε λογαριθμική κλίμακα και μετριέται σε decibels (dB). Αυτή η κλίμακα προσομοιάζει περισσότερο με την

υποκειμενική αντίληψη του ανθρώπου για την ένταση του ήχου και μας παρέχει μεγάλη ευχέρεια σε πρακτικούς υπολογισμούς. Ως τιμή αναφοράς χρησιμοποιείται η ελάχιστη τιμή έντασης που μπορεί να ακούσει ο άνθρωπος η οποία είναι 10^{-12} W/m^2 και αντιστοιχεί σε 0 dB. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται Στάθμη Έντασης Ήχου (Intensity Level) και η ακριβής σχέση που το συνδέει με την ένταση είναι:

$$\text{Intensity Level σε dB} = 10 \text{ (dB)} \times \log \left(\frac{\text{Ένταση σε } W/m^2}{10^{-12} W/m^2} \right)$$

Ακολουθεί πίνακας με εντάσεις συνηθισμένων ήχων:

ΗΧΟΣ (SOUND)	INTENSITY LEVEL (Db)	ΕΝΤΑΣΗ (W/m^2)
Κατώφλι Ακοής	0	10^{-12}
Ψίθυρος	10	10^{-11}
Φυσιολογική Συζήτηση	60	10^{-6}
Rock μουσική	115	0,3
Κατώφλι πόνου αυτιού	120	1
Ρήξη τυμπάνου αυτιού	160	10^4

2.2 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται την αύξηση της συχνότητας του ηχητικού κύματος ως αύξηση του τονικού ύψους του ήχου. Με άλλα λόγια ένα ηχητικό κύμα με μεγάλη συχνότητα το αντιλαμβανόμαστε σαν μια υψηλή νότα. Αντίστοιχα όταν η συχνότητα του κύματος μειώνεται αντιλαμβανόμαστε τον τόνο του ήχου να μικραίνει. Πχ η νότα middle C (NTO) έχει συχνότητα 261 Hz περίπου, ενώ η νότα E (MI), η οποία είναι λίγο υψηλότερη, έχει και μεγαλύτερη συχνότητα ίση με 330 Hz περίπου.

Για να είναι αντιληπτή από τον άνθρωπο μία ηχητική πηγή πρέπει να πάλλεται με συχνότητα από 20 Hz έως 20kHz. Η περιοχή αυτή ονομάζεται **ακουστικό φάσμα συχνοτήτων**. Δονήσεις συχνότητας μικρότερης των 20 Hz ονομάζονται υπόηχοι, ενώ δονήσεις συχνότητας

άνω των 20 kHz ονομάζονται υπέρηχοι.

Χωρισμός των ακουστών συχνοτήτων σε ζώνες σταθερού ή μεταβλητού εύρους. Κάθε ζώνη συχνότητας περιγράφεται από τις πλευρικές συχνότητες f_1 και f_2 και την κεντρική συχνότητα f_0 . Εύρος ζώνης είναι το πλήθος των συχνοτήτων που περιλαμβάνονται μεταξύ των πλευρικών συχνοτήτων. Για ζώνες μεταβλητού εύρους:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$$

Για ζώνες σταθερού εύρους (γραμμική κλίμακα συχνοτήτων):

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

Κυριότερες ζώνες μεταβλητού εύρους είναι:

– Οκτάβες $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/1}$

– Τριτοκτάβες $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/3}$

– Δεκατοκτάβες $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/10}$

2.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΝΤΟΠΛΕΡ (DOPPLER EFFECT)

Το φαινόμενο Ντόπλερ παρατηρείται όταν υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα στην ηχητική πηγή και τον παρατηρητή. Αυτό που παρατηρούμε είναι η αύξηση της συχνότητας του ήχου όταν η ηχητική πηγή πλησιάζει έναν ακίνητο παρατηρητή ή όταν ένας κινούμενος παρατηρητής πλησιάζει μια ακίνητη ηχητική πηγή. Το ακριβώς αντίθετο παρατηρείται όταν ο παρατηρητής και η πηγή απομακρύνονται, δηλαδή η συχνότητα του ήχου μειώνεται.

Η εξήγηση του φαινομένου εντοπίζεται στη μεταβολή του ενεργού μήκους κύματος όταν η απόσταση μεταξύ ηχητικής πηγής και

παρατηρητή μεταβάλλεται. Όταν πχ ο παρατηρητής πλησιάζει την πηγή ή η πηγή πλησιάζει τον παρατηρητή, το ενεργό μήκος κύματος μειώνεται. Όμως η ταχύτητα του ήχου παραμένει σταθερή με συνέπεια περισσότερα μήκη κύματος να φτάνουν στον παρατηρητή σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οπότε η συχνότητα του ήχου αυξάνεται.

Το φαινόμενο αυτό πήρε το όνομά του από το μεγάλο φυσικό του 19^{ου} αιώνα Christian Johann Doppler. Το φαινόμενο Ντόπλερ γίνεται αντιληπτό στην καθημερινή μας ζωή πολύ έντονα λόγω της μεταβολής του τονικού ύψους του ήχου όταν μεταβάλλεται η συχνότητα.

Ακολουθεί πίνακας με εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του και της πηγής:

Πηγή κινούμενη προς παρατηρητή	$f' = f \times \left(\frac{V}{V - V_s}\right)$
Πηγή απομακρυνόμενη από παρατηρητή	$f' = f \times \left(\frac{V}{V + V_s}\right)$
Παρατηρητής κινούμενος προς πηγή	$f' = f \times \left(\frac{V + V_o}{V}\right)$
Παρατηρητής απομακρυνόμενος από πηγή	$f' = f \times \left(\frac{V - V_o}{V}\right)$

Στον παραπάνω πίνακα, όπου:

f' : η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής

f : η συχνότητα που εκπέμπει η ηχητική πηγή

V : η ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων στο συγκεκριμένο μέσο.

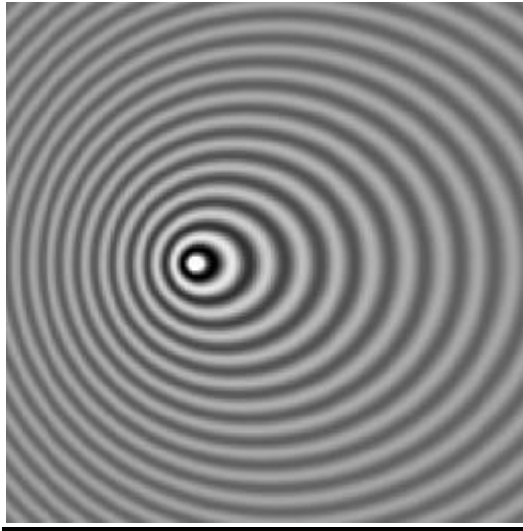
Στην περίπτωση του αέρα για θ βαθμούς Celsius είναι:

$$332 \times \left(1 + \frac{\theta}{273}\right)^{1/2}$$

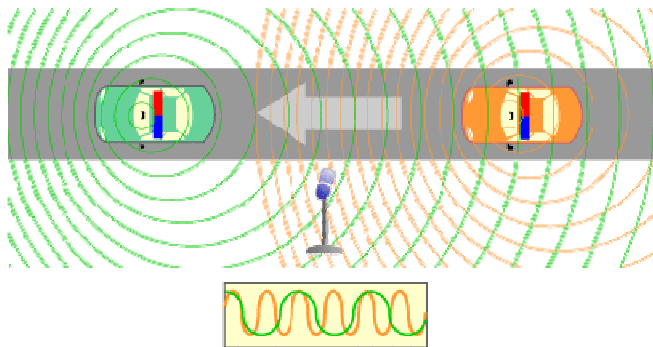
V_s : η ταχύτητα της ηχητικής πηγής

V_o : η ταχύτητα του παρατηρητή

Ακολουθούν δύο σχηματικά παραδείγματα για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου:



Εικόνα 3 Η πηγή κινείται προς τα αριστερά με αποτέλεσμα η συχνότητα να είναι μεγαλύτερη αριστερά και μικρότερη δεξιά της πηγής.



Εικόνα 4 Ακίνητο μικρόφωνο καταγράφει τις σειρήνες δύο κινούμενων περιπολικών. Είναι εμφανής η διαφορά ανάμεσα στις δύο κυματομορφές.

3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

Ο χώρος είναι σημαντικό κομμάτι της αλυσίδας ηχητικής αναπαραγωγής. Η ποιότητα της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου ονομάζεται Room fidelity.

Οι πρώτες γνώσεις διάδοσης του ήχου σε κλειστούς χώρους προέρχονται από την αρχαιότητα και τα αρχαία θέατρα. Οι επιστημονικές βάσεις της ακουστικής μελέτης κλειστών χώρων τέθηκαν από το 1900 έως το 1960. Οι σύγχρονες τεχνικές εκτίμησης και ανάλυσης ακουστικής συμπεριφοράς χρησιμοποιούν τεχνικές προσομοίωσης σε υπολογιστή, διεξάγουν μελέτη απόδοσης των ηλεκτροακουστικών εγκαταστάσεων και εφαρμόζουν την αμφυωτική ακουστική – DSP. Η αφαίρεση των παραμορφώσεων που εισάγει ο χώρος παραμένει πρόβλημα άλυτο.

Υπάρχουν δύο κύριες αναλυτικές μέθοδοι ακουστικής κλειστών χώρων.

Η μία είναι η παραδοσιακή που χρησιμοποιεί ως εργαλείο την κυματική θεωρία και όλοι οι υπολογισμοί γίνονται στο πεδίο της συχνότητας. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αδύνατη εφαρμογή της σε σύνθετους γεωμετρικά χώρους.

Η άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί τη γεωμετρική θεωρία διάδοσης του ήχου και οι υπολογισμοί γίνονται στο πεδίο του χρόνου. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι είναι κατάλληλη για υλοποίηση σε υπολογιστικά συστήματα.

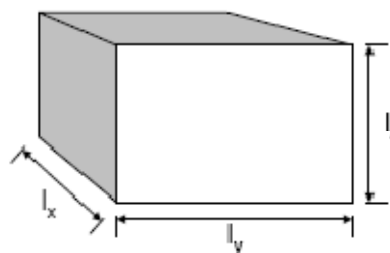
3.1 ΒΑΣΙΚΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Ο ήχος θεωρείται ως κύμα. Αφού μιλάμε για κλειστό χώρο, μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών (σε απόσταση l) δημιουργείται ένα στάσιμο κύμα για συχνότητες πηγής :

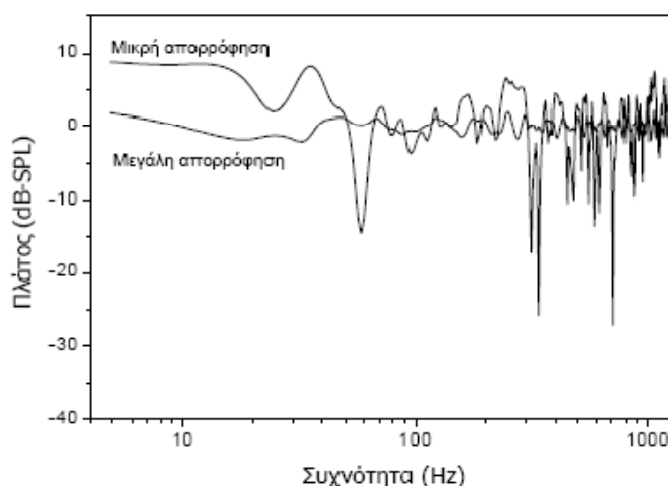
$$f_n = \frac{nc}{2l}$$

Στο τρισδιάστατο πεδίο του χώρου έχουμε:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$



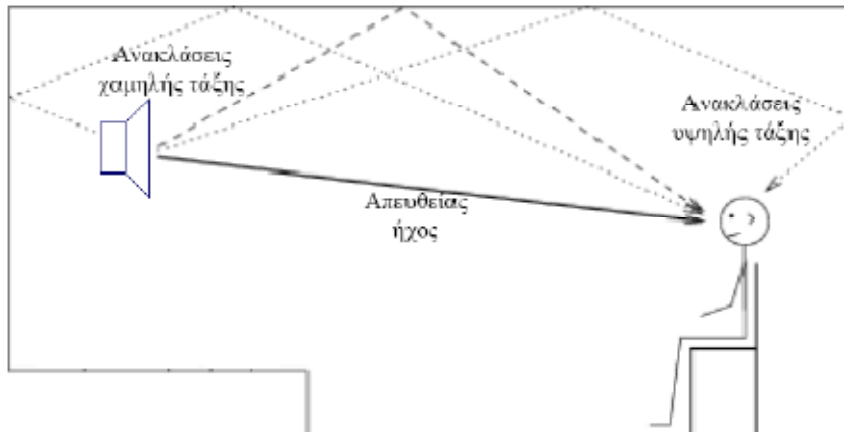
Η απόκριση του χώρου σε σήμα διέγερσης ευρέως φάσματος εξαρτάται από τη θέση πηγής – δέκτη και τα χαρακτηριστικά απορρόφησης των υλικών του χώρου.



Εικόνα 5 Απόκριση χώρου σε σήμα διέγερσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά απορρόφησης υλικών.

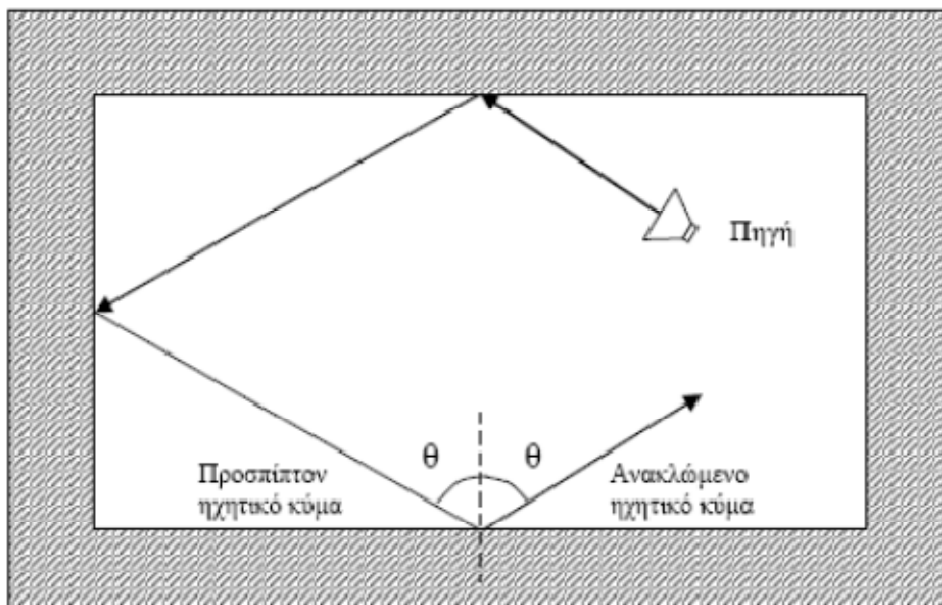
3.2 ΤΟ ΗΧΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Η ακουστική πίεση σε κάποιο σημείο εξαρτάται από το απευθείας σήμα, από το ανακλώμενο σήμα και από την απορρόφηση που έχει ο χώρος, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6 Παράδειγμα

Επειδή αναφερόμαστε σε κλειστό χώρο, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει το φαινόμενο της ανάκλασης. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό οι ανακλάσεις είναι πολλαπλές.



Εικόνα 7 Ανακλάσεις σε ένα κλειστό χώρο.

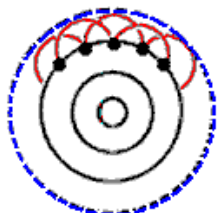
Απορρόφηση ορίζεται ο λόγος της ανακλώμενης προς της προσπίπτουσας ενέργειας. Η απορρόφηση εξαρτάται από το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται για μια συγκεκριμένη συχνότητα και εκφράζεται μέσω ενός συντελεστή.

Υλικό	Συχνότητες					
	125	250	500	1000	2000	4000
Αέρας	0	0	0	0,003	0,007	0,02
Επίπεδος τοίχος	0,15	0,3	0,75	0,85	0,75	0,4
Τοίχος - Ταύβλο	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
Πάτωμα - Μπετόν	0,02	0,02	0,2	0,04	0,05	0,05
Πάτωμα - Ξύλο	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Πάτωμα - χαλί	0,1	0,15	0,25	0,3	0,3	0,3
Κουρτίνες	0,05	0,12	0,15	0,27	0,37	0,50
Καθιστός άνθρωπος	0,18	0,4	0,46	0,46	0,51	0,46

Εικόνα 6 Συντελεστές απορρόφησης υλικών.

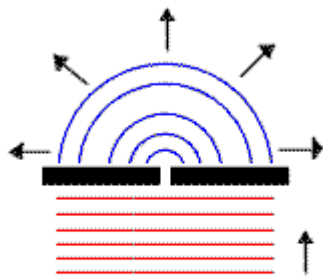
Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στη θεωρία των ηχητικών κυμάτων είναι η διάθλαση. Οι συνέπειες της διάθλασης διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ακουστική και θα κατανοηθούν καλύτερα αν μελετήσουμε πρώτα την αρχή του Huygen. Σύμφωνα με αυτή μια ηχητική πηγή διαβιβάζει τον ήχο προς όλες τις κατευθύνσεις έτσι ώστε η κυματομορφή να είναι ουσιαστικά μια σφαίρα. Ο φυσικός Christian Huygen θεώρησε πως όλα τα κύματα αποτελούνται από έναν άπειρο αριθμό μικροσκοπικών κυκλικών (για διδιάστατη κυματομορφή) ή σφαιρικών (για τρισδιάστατη) κυμάτων. Δηλαδή, η τελική κυματομορφή είναι το άθροισμα του απείρου αριθμού στοιχειωδών σφαιρικών κυμάτων.

Εικόνα 7 Huygen's Principle.

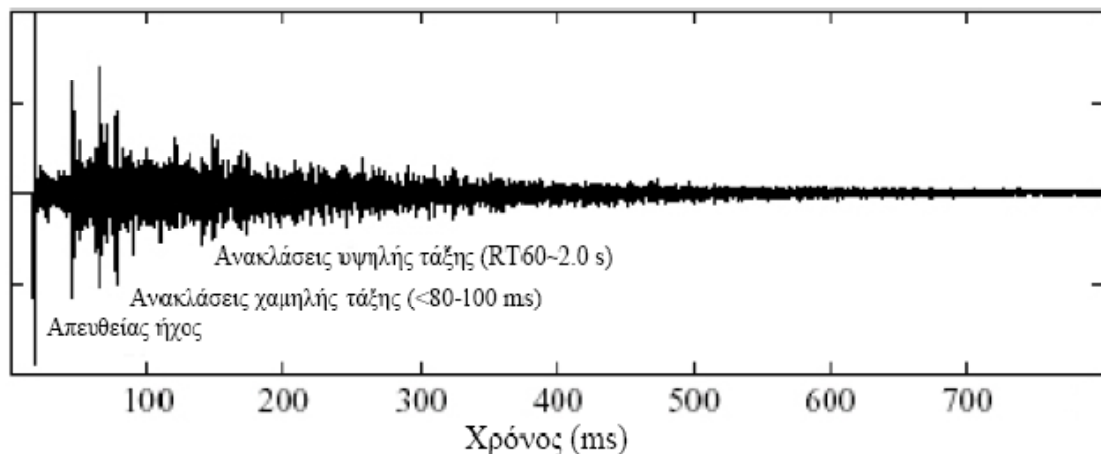


Μια συνέπεια της αρχής Huygen είναι ότι τα κύματα μπορούν να παρακάμψουν γωνίες. Εάν ένα κύμα χτυπήσει σε έναν τοίχο με ένα άνοιγμα, ένα «κύμα Huygen» περνάει από την άλλη πλευρά. Τα ηχητικά κύματα είναι περισσότερο εύκαμπτα από τα φωτεινά κύματα (έτσι κάποιος μπορεί να ακούσει αλλά δεν μπορεί να δει γύρω από τις γωνίες), και οι χαμηλές συχνότητες περνούν ευκολότερα από τις υψηλές συχνότητες.

Εικόνα 8 Διάθλαση - Diffraction.



Τέλος, ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του χώρου αποτελεί η κρουστική του απόκριση.



Εικόνα 9 Κρουστική απόκριση κλειστού χώρου.

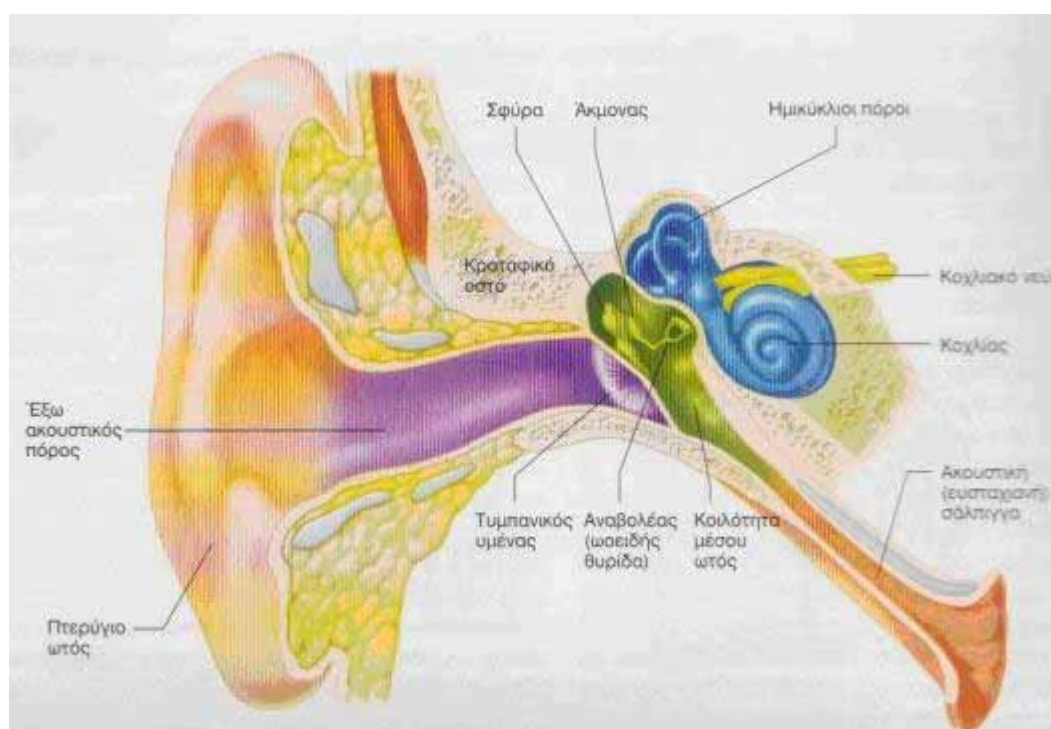
Με βάση την κρουστική απόκριση γίνεται ο υπολογισμός των ακουστικών παραμέτρων του χώρου.

4. ΤΟ ΑΥΤΙ (THE HUMAN EAR)

Το αυτί είναι το αισθητήριο όργανο της ακοής. Δηλαδή έχει την ικανότητα να ανιχνεύει ήχους. Όμως η λειτουργία του δεν περιορίζεται μόνο σε αυτό. Διαδραματίζει μεγάλο ρόλο στην αίσθηση ισορροπίας του ανθρώπινου σώματος.

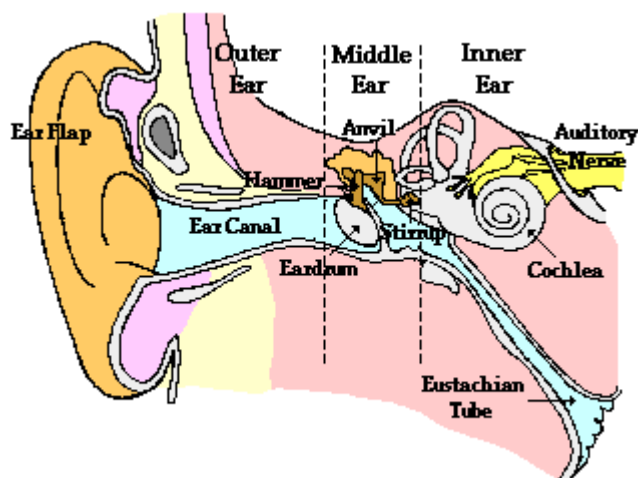
4.1 ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΑΥΤΙΟΥ

Φυσιολογικά το ανθρώπινο αυτί (το ανθρώπινο ους) βρίσκεται ένα δεξιά και ένα αριστερά του κρανίου και στο μεγαλύτερο μέρος του, με εξαίρεση το πτερύγιο, περικλείεται από κροταφικό οστό. Είναι το μέσο με το οποίο τα εγκεφαλικά νεύρα και τα αντίστοιχα τμήματα του εγκεφάλου αντιλαμβάνονται και επεξεργάζονται τους ήχους. Το κύριο μέσο μετάδοσης του ήχου είναι ο αέρας. Το φάσμα συχνοτήτων που μπορεί να ακούσει το ανθρώπινο αυτί είναι από 20 έως 20.000 Hz. Τα ηχητικά κύματα με αλληλουχίες τόνων γίνονται αντιληπτά ως μουσικοί ήχοι. Μπορούμε να διακρίνουμε περισσότερους από 400.000 διαφορετικούς ήχους.



Εικόνα 10 Το ανθρώπινο αυτί.

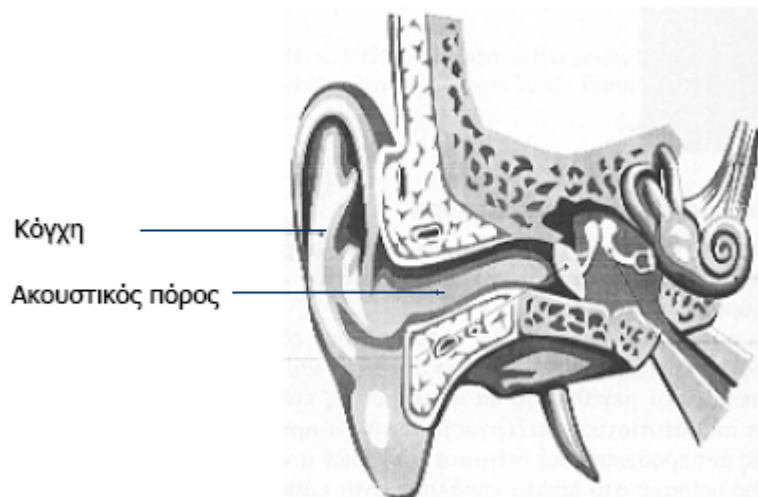
Το αυτί χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη: το έξω αυτί (outer ear), το μέσο αυτί (middle ear) και το έσω αυτί (inner ear).



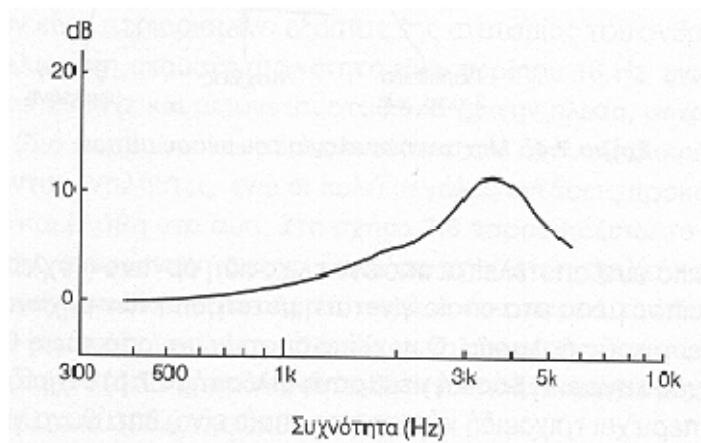
Εικόνα 11 Τα τρία μέρη του ανθρώπινου αυτιού.

4.1.1 Έξω αυτί.

Το έξω αυτί αποτελείται από το πτερύγιο, τον έξω ακουστικό πόρο και τον τυμπανικό υμένα. Με την είσοδο του ηχητικού σήματος στον έξω ακουστικό πόρο τα ηχητικά κύματα που αντηχούν στις διάφορες πλευρές και στο πέρας του έξω ακουστικού πόρου γεμίζουν το έξω αυτί με συνεχείς δονήσεις κυμάτων πίεσης. Μετά, φτάνουν στον τυμπανικό υμένα ο οποίος εκτείνεται στο τέλος του έξω ακουστικού πόρου, τον οποίο και αποφράσσει. Ο τυμπανικός υμένας διαχωρίζει τον έξω ακουστικό πόρο από την κοιλότητα του μέσου αυτιού και είναι εξαιρετικά ευαίσθητος. Όταν δονείται αργά έχουμε χαμηλής συχνότητας ήχους. Όταν δονείται γρήγορα έχουμε υψηλής συχνότητας ήχους.



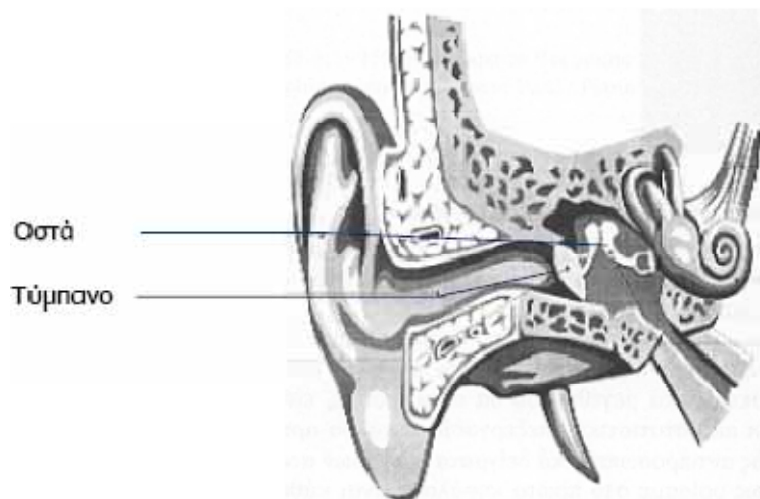
Εικόνα 12 Το έξω αυτί.



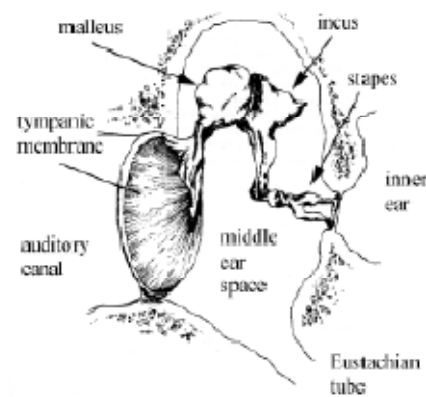
Εικόνα 13 Απόκριση συχνότητας ακουστικού πόρου.

4.1.2 Μέσο αυτί.

Το μέσο αυτί αποτελείται από την ευσταχιανή σάλπιγγα, τη σφύρα, τον άκμονα και τον αναβολέα. Η κοιλότητα του μέσου αυτιού είναι μία αεροφόρα κοιλότητα που επικοινωνεί με την ατμόσφαιρα διά της ευσταχιανής σάλπιγγας η οποία συνδέει το μέσο αυτί με το φάρυγγα. Το ένα άκρο της ευσταχιανής (στη μεριά του φάρυγγα) είναι φυσιολογικά κλειστό αλλά ανοίγει με τις κινήσεις του φάρυγγα κατά τη μάσηση και την κατάποση, οπότε η πίεση στο μέσο αυτί εξισώνεται με την ατμοσφαιρική.



Εικόνα 14 Το μέσο αυτί.

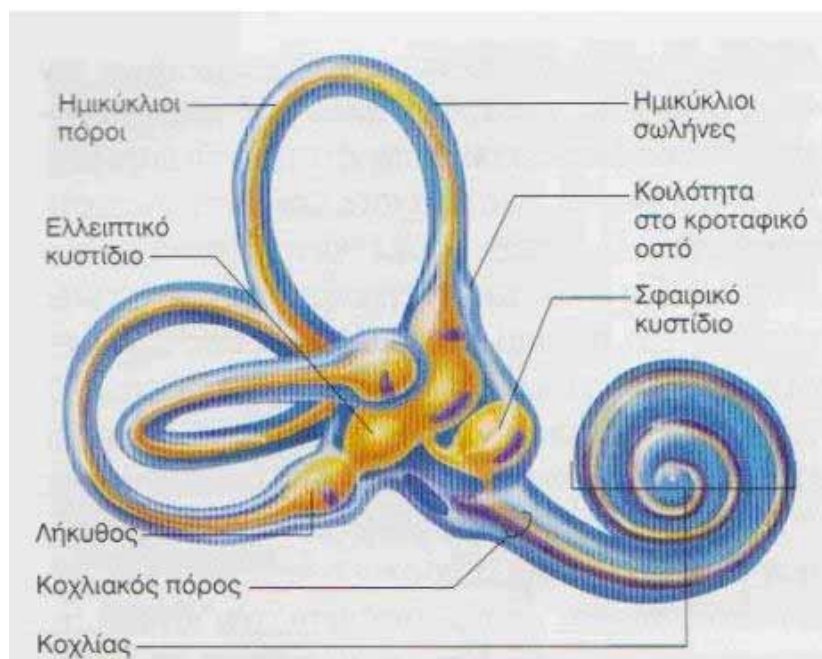


Εικόνα 15 Το μέσο αυτί πιο αναλυτικά.

4.1.3 Έσω αυτί.

Το έσω αυτί αποτελείται από τον κοχλία, το κοχλιακό νεύρο και τους ημικύκλιους πόρους - σωλήνες. Όλο το έσω αυτί περικλείεται από λεμφικό υγρό και περιβάλλεται από κροταφικό οστό. Το έσω αυτί χωρίζεται με το μέσο αυτί από ένα άνοιγμα το οποίο καλύπτεται από μια μεμβράνη, την ωσειδή θυρίδα. Ο κοχλίας σε όλο σχεδόν το μήκος του διαχωρίζεται πλήρως από ένα μεμβρανώδη σωλήνα γεμάτο υγρό, τον κοχλιακό πόρο. Στην άλλη μεριά του κοχλιακού πόρου βρίσκουμε την αιθουσαία κλίμακα, η οποία είναι σε εκείνη τη μεριά του κοχλίου που καταλήγει στον αναβολέα και την τυμπανική κλίμακα η οποία βρίσκεται κάτω από τον κοχλιακό πόρο και καταλήγει στη στρογγυλή θυρίδα. Η ακουστική και η τυμπανική κλίμακα συναντώνται στο τέλος

του κοχλιακού πόρου στο ελικότριμα. Η αιθουσαία συσκευή αποτελείται από 3 μεμβρανώδεις σωλήνες γεμάτους υγρό τους ημικύκλιους πόρους και δύο ασκοειδείς διογκώσεις, το ελλειπτικό και το σφαιρικό κυστίδιο. Οι οστέινες σήραγγες του έσω αυτιού στις οποίες εδράζονται η αιθουσαία συσκευή και ο κοχλίας, λόγω του περίπλοκου σχήματος καλούνται λαβύρινθος.



Εικόνα 16 Το έσω αυτί.

4.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΥΤΙΟΥ

Στη μεταφορά των ηχητικών μηνυμάτων συμμετέχουν και συνεργάζονται όλα τα τμήματα και οι δομές του αυτιού. Η συνεργασία αυτή έχει σα στόχο όχι μόνο την αγωγή των ηχητικών κυμάτων, αλλά συγχρόνως και την ενίσχυση της έντασης του ήχου, έτσι ώστε να εξουδετερωθεί η ακουστική αντίσταση των στερεών ανατομικών στοιχείων και κυρίως των υγρών του λαβυρίνθου και συγκεκριμένα, της περιλήμφου, που παρουσιάζει μεγάλη ακουστική αντίσταση. Με τον τρόπο αυτό η ηχητική ενέργεια καθίσταται ικανή να δημιουργήσει κυματισμό της περιλήμφου.

Μέσω του έξω ακουστικού πόρου, η ηχητική ενέργεια θέτει σε κίνηση, υπό μορφή δονήσεων, το τυμπανοοσταριώδες σύστημα του μέσου

ωτός και λαμβάνει χώρα μετασχηματισμός της ηχητικής σε μηχανική ενέργεια. Αυτή φέρεται διαδοχικά στη βάση του αναβολέα, την περίλεμφο του κοχλία και τέλος, στα τριχωτά αισθητικά κύτταρα, όπου λαμβάνει χώρα δεύτερος μετασχηματισμός ενέργειας, της μηχανικής σε βιοηλεκτρική. Η ενίσχυση της έντασης του ήχου προς εξουδετέρωση της ακουστικής αντίστασης επιτυγχάνεται με:

- Τη γεωμετρία του έξω ακουστικού πόρου.
- Την υφή και τη γεωμετρία της τυμπανικής μεμβράνης.
- Τη δομή της ακουστικής αλυσίδας.

Επίσης, το τυμπανοοσταριώδες σύστημα προστατεύει τις θυρίδες του ακρωτηρίου από την απ' ευθείας επ' αυτών πρόσκρουση των ηχητικών κυμάτων και εξασφαλίζει μία διαφορά πίεσης μεταξύ της κλίμακας της αίθουσας και της κλίμακας του τυμπάνου.

Ο έξω ακουστικός πόρος, πλην της αγωγής των ηχητικών κυμάτων, δρα παράλληλα σαν αντηχείο και ενισχύει την ένταση του προσπίπτοντος επί του τυμπάνου ήχου μέχρι και 20 dB στις συχνότητες από 2800-3000 Hz.

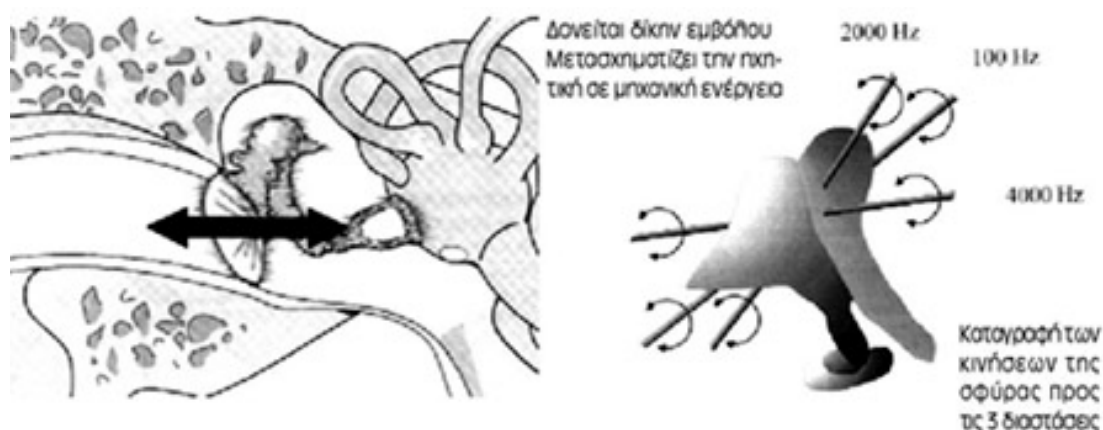
Η δράση αυτή του έξω ακουστικού πόρου εξαρτάται από τη γεωμετρία του, δηλαδή το μήκος, τη χωρητικότητα και το εύρος της εισόδου αυτού.

Το πιο αξιόλογο ανατομικό στοιχείο που εξυπηρετεί την ακοή είναι η τυμπανική μεμβράνη. Η θέση, το σχήμα και η υφή αυτής προσδίδουν σε αυτήν ιδιαίτερες δονητικές ικανότητες που είναι αδύνατον να παραχθούν από οποιαδήποτε άλλη μεμβράνη. Το σχήμα της τυμπανικής μεμβράνης παρουσιάζει κωνική μορφή με το βαθύτερο σημείο στον ομφαλό και εκατέρωθεν, μπροστά και πίσω αυτού, είναι κυρτό με την κυρτότητα προς τον έξω ακουστικό πόρο. Τόσο το σχήμα, όσο και η υφή καθιστούν το τύμπανο αναντικατάστατο μέσο στη μετάδοση των ηχητικών κυμάτων και στην προστασία του αυτιού έναντι των μεγάλων ηχητικών πιέσεων και μεταβολών.

Με νεότερες τεχνικές έχουν καταγραφεί οι δονήσεις της τυμπανικής μεμβράνης και έχει διαπιστωθεί ότι η μορφή αυτών εξαρτάται από τη συχνότητα των ηχητικών κυμάτων. Η αλυσίδα των ακουστικών

οσταρίων δέχεται τις δονήσεις της τυμπανικής μεμβράνης και πρακτικά δονείται σαν ενιαίο σύνολο δίκην εμβόλου, μεταφέροντας την κίνηση στη βάση του αναβολέα.

Ειδικότερα η σφύρα, υπό την επίδραση των δονήσεων της τυμπανικής μεμβράνης, εκτελεί ένα σύμπλεγμα κινήσεων προς τις 3 διαστάσεις του χώρου, ο άξονας των οποίων μεταβάλλεται ανάλογα με τη συχνότητα του προσπίπτοντος ήχου.



Εικόνα 17 Δομή ακουστικής αλυσίδας.

Ο κατ' αυτόν τον τρόπο μετασχηματισμός της ηχητικής σε μηχανική ενέργεια εξασφαλίζει την ασφαλή μεταφορά των ηχητικών μηνυμάτων προς τον κοχλία, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται μία σημαντική ενίσχυση της εντάσεως του ήχου προς εξουδετέρωση της ακουστικής αντίστασης και η οποία προκύπτει:

1. Από τη σχέση εμβαδού μεταξύ της τυμπανικής μεμβράνης και της βάσεως του αναβολέα 1:18. Η δε ενίσχυση του ήχου εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου ανερχόμενη στα 20 dB επί 500 Hz, στα 25 dB επί 1000 Hz και στις υψηλότερες συχνότητες κατά 6 dB ανά οκτάβα.
2. Μία μικρότερη ενίσχυση του ήχου, που υπολογίζεται στο 1:3, επιτυγχάνεται μέσω της ιδιαίτερης, δίκην μοχλού, κίνησης της ακουστικής αλυσού.



Αλλά όλα αυτά δε θα γίνονταν εάν δεν υπήρχε η ευσταχιανή σάλπιγγα. Αυτή βασικά ρυθμίζει τη συμπεριφορά του μέσου ωτός έναντι των μεταβολών της ατμοσφαιρικής πίεσης.

- Εξισορροπεί τις πιέσεις μεταξύ ατμόσφαιρας και μέσου ωτός.
- Προστατεύει το μέσο ους από ηχητικές πιέσεις και εκκρίσεις του ρινοφάρυγγα.



4.3 ΑΝΤΙΛΗΨΗ

Η διαδικασία που έχει περιγραφεί έως τώρα είναι μόνο η αρχή της ανθρώπινης αντίληψης του ήχου. Οι μηχανισμοί ερμηνείας του ήχου δεν έχουν αποσαφηνιστεί ακόμα ούτε είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε αν όλοι οι άνθρωποι ερμηνεύουν τους ήχους με τον ίδιο τρόπο. Μέχρι πρόσφατα δεν είχε βρεθεί τρόπος ανίχνευσης της αντίδρασης του εγκεφάλου και του νευρικού συστήματος σε ηχητικό ερέθισμα. Στις μέρες μας διεξάγονται σοβαρές έρευνες για την αποσαφήνιση κάποιων τουλάχιστον μυστηρίων του θέματος αυτού.

Η σημερινή θεωρία που αφορά τη νευρική λειτουργία της ακοής έχει ως εξής: Έχουμε παρατηρήσει ότι ο ήχος μιας συγκεκριμένης κυματομορφής με συγκεκριμένη συχνότητα οργανώνει μία χαρακτηριστική δομή των ενεργών θέσεων των βασικών μεμβρανών του αυτιού. Εάν αυτή η δομή επαναλαμβάνεται συχνά, μαθαίνουμε να αντιστοιχίζουμε τη δομή αυτή σε έναν ορισμένο ήχο. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται ευκολότερα κατά την παιδική ηλικία. Η συνολική λειτουργία των νευρών υπολογίζει προσεγγιστικά την κυματομορφή του ήχου. Με ποιο τρόπο ο εγκέφαλος αξιοποιεί ή χρησιμοποιεί αυτή την πληροφορία δεν είναι ακόμα γνωστό.

4.4 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΗΧΩΝ

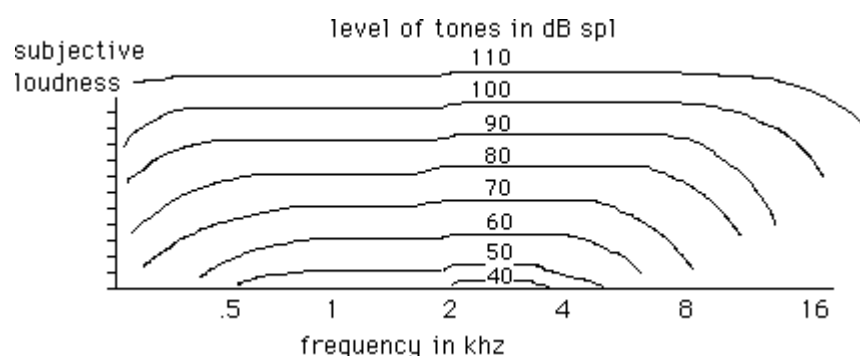
Οι περισσότερες έρευνες στην ψυχοακουστική ασχολούνται με την ευαισθησία και την ακρίβεια της ακοής. Οι ερευνητές ενδιαφέρονται για την λειτουργία της ακοής του μέσου ανθρώπου και γι' αυτό το λόγο αποκλείονται από τις έρευνες τους πχ μουσικοί ή άλλες ομάδες πληθυσμού με «εξασκημένη ακοή». Τα αποτελέσματα που εξάγουν χρησιμοποιούνται στην ιατρική και στις τηλεπικοινωνίες.

4.4.1 ΑΚΟΥΣΤΟΤΗΤΑ (LOUDNESS)

Το πλάτος του ηχητικού κύματος αντιστοιχεί σε αυτό που ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται ως ακουστότητα. Το αυτί ανταποκρίνεται σε ένα πολύ μεγάλο φάσμα πλατών ηχητικών κυμάτων. Η αναλογία ανάμεσα στο κατώφλι του πόνου του αυτιού και στο κατώφλι της αίσθησης ενός ήχου είναι της τάξεως των 130dB ! Η διακριτική ικανότητα του αυτιού

όσον αφορά την ακουστότητα εκτείνεται από τα 3 dB για ήχους κοντά στο κατώφλι της ακοής ως το εντυπωσιακό 0,5 dB για ηχηρούς ήχους. Είναι ενδεικτικό ότι ο άνθρωπος δεν έχει καταφέρει να κατασκευάσει ηλεκτρομηχανικά συστήματα συλλογής ηχητικών σημάτων με τέτοιες επιδόσεις στην διακριτικότητα. Μονάδα μέτρησης της ακουστότητας είναι το phon. Τόνος συχνότητας 1kHz έχει ακουστότητα τόσα phons, όσο και η στάθμη ηχητικής πίεσης σε dB.

Η αίσθηση της ακουστότητας επηρεάζεται και από την συχνότητα του λαμβανομένου ηχητικού κύματος. Μια σειρά ερευνών έχουν οδηγήσει στο ακόλουθο διάγραμμα:



Εικόνα 20 Αντιλαμβανόμενη ακουστότητα των ήχων.

Κοντά στο κάτω φράγμα του φάσματος των ακουστικών συχνοτήτων, το αυτί είναι λιγότερο ευαίσθητο σε απαλούς ήχους αντίθετα με το κατώτερο όριο πόνου και την ικανότητα διάκρισης ηχηρών ήχων που δεν επηρεάζονται σημαντικά. Στις υψηλές συχνότητες η αλλαγή στην ευαισθησία είναι πιο απότομη, με την αίσθηση να διακόπτεται εξ ολοκλήρου στην περιοχή των 20 kHz.

Η ανθρώπινη ικανότητα διάκρισης της ακουστότητας των ήχων περιορίζεται για ήχους διάρκειας μικρότερης των 200 msec. Κάτω από αυτό το όριο η αντίληψη της ακουστότητας επηρεάζεται από τη διάρκεια. Μικρότερη διάρκεια σημαίνει και μικρότερη ακουστότητα. Ηχητικά σήματα διάρκειας μεγαλύτερης των 200 msec δεν επηρεάζουν την διακριτική ικανότητα του ανθρώπου για την ακουστότητα, αν

εξαιρέσουμε το γεγονός ότι ο άνθρωπος τείνει να αγνοεί ηχητικά σήματα μεγάλης διάρκειας αμετάβλητου τόνου.

4.4.2 ΤΟΝΙΚΟ ΥΨΟΣ (PITCH)

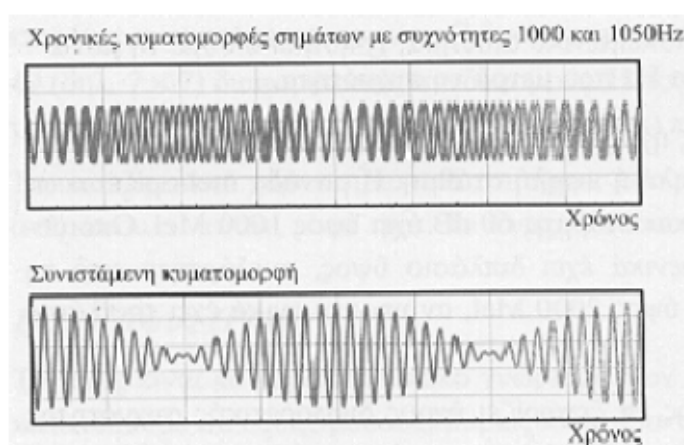
Το ύψος είναι η «υποκειμενική» απόκριση του αυτιού μας στη συχνότητα και μας επιτρέπει να κατατάξουμε τους ήχους σε οξείς, μέσους και βαρείς.

Το ύψος μεταβάλλεται μη γραμμικά με τη συχνότητα, δηλαδή ίσες μεταβολές στη συχνότητα δεν προκαλούν ίδιες μεταβολές στην «αίσθηση» του ύψους.

Επίσης καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει και η στάθμη του ήχου. Αν η στάθμη ενός τόνου 180Hz αυξηθεί χωρίς αλλαγή της συχνότητας, η αίσθηση του ύψους χαμηλώνει. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα ισχυρό για συχνότητες μικρότερες των 300Hz. Αντίθετα, στην περιοχή από 500 έως 3000Hz η στάθμη δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το ύψος. Τέλος, στην περιοχή άνω των 4000Hz η αίσθηση του ύψους για την ίδια συχνότητα αυξάνει με τη στάθμη.

Μονάδα μέτρησης του ύψους είναι το Mel. Ήχος συχνότητας 1kHz και στάθμης 60dB έχει ύψος 1000Mel.

Ο άνθρωπος έχει περιορισμένη διακριτική ικανότητα συχνοτήτων. Εάν οι κεντρικές συχνότητες f_1 και f_2 δύο ήχων είναι πολύ κοντινές, ο διαχωρισμός τους είναι δύσκολος έως αδύνατος. Αυτό συμβαίνει διότι οι περιοχές της βασικής μεμβράνης που διεγείρονται είναι πολύ κοντά. Ο εγκέφαλος «αναγνωρίζει» ήχο με συχνότητα $(f_1+f_2)/2$ και πλάτους που μεταβάλλεται με συχνότητα $(f_1-f_2)/2$. Το διάγραμμα που προκύπτει ονομάζεται διακρότημα.



Εικόνα 21 Διακρότημα.

Όπως και με την αντίληψη της ακουστότητας, έτσι και η αντίληψη του ύψους γίνεται δυσκολότερη όταν η διάρκεια του ηχητικού σήματος είναι μικρότερη από 200msec και αδύνατη για σήματα διάρκειας μικρότερα από 50 msec. Τέλος, η αντίληψη του τονικού ύψους επηρεάζεται και από το φασματικό περιεχόμενο του ηχητικού σήματος. Όσο το φασματικό περιεχόμενο παρεκκλίνει από το αρμονικό μοντέλο, η αίσθηση του τόνου μειώνεται.

4.4.3 ΧΡΟΙΑ (TIMBRE)

Χροιά είναι τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου που κάνουν δυνατό το διαχωρισμό δύο τόνων της ίδιας έντασης και θεμελιώδους συχνότητας.

Χρησιμοποιείται κυρίως για τον χαρακτηρισμό ήχων μουσικών οργάνων και της ανθρώπινης φωνής. Πχ φλάουτο και όμποε ακούγονται διαφορετικά αν και παίζουν την ίδια νότα.

Η διαφοροποίηση της χροιάς οφείλεται κυρίως στη διαφορά του πλήθους και της σχετικής στάθμης των αρμονικών ως προς τη στάθμη της θεμελιώδους συχνότητας.

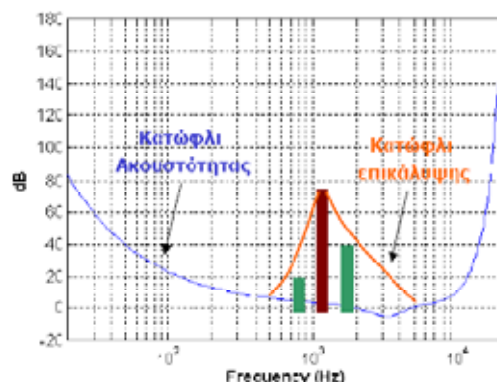
Ο αντίστοιχος φυσικός όρος για τη χροιά είναι το φάσμα...

4.4.4 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ (MASKING EFFECT)

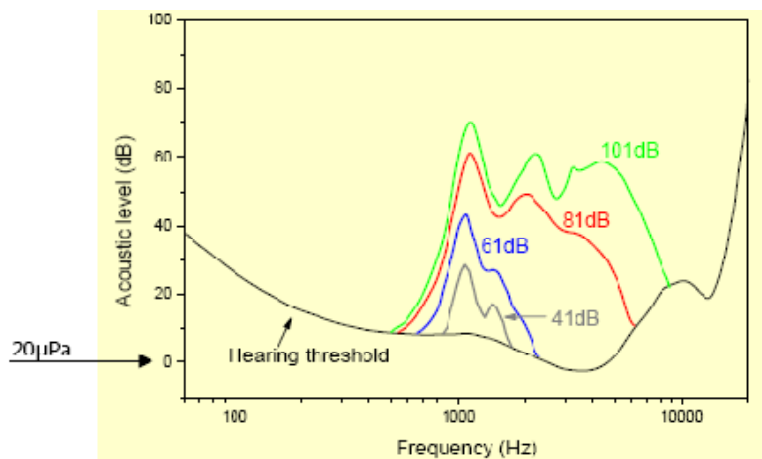
Ακουστική Επικάλυψη ή Masking effect ονομάζεται η περίπτωση κατά την οποία η ύπαρξη ενός ήχου μεταβάλλει το κατώφλι ακουστότητας.

Το φαινόμενο αυτό γίνεται περισσότερο κατανοητό μέσω των παρακάτω διαγραμμάτων:

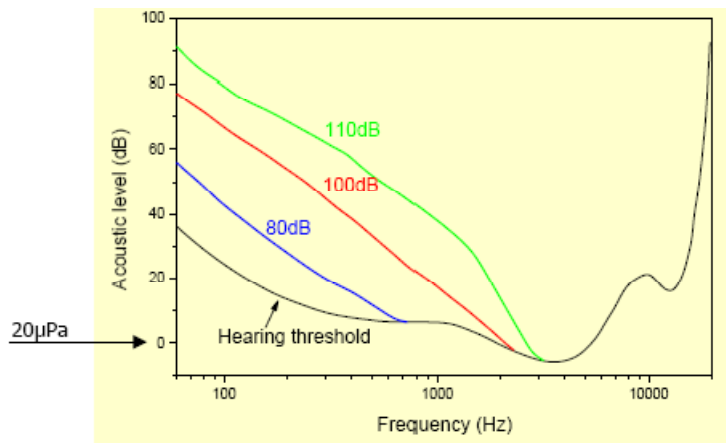
■ **Masker sound**
■ **Masked sound**



Εικόνα 22 Masking effect.



Εικόνα 23 Κατώφλι ακουστικής επικάλυψης για ημιτονικό σήμα.



Εικόνα 24 Κατώφλι ακουστικής επικάλυψης για ημιτονικό σήμα.

4.4.5 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΠΗΓΗΣ (LOCALIZATION)

Ο άνθρωπος έχει την ικανότητα να αντιληφθεί την θέση της ηχητικής πηγής με σχετική ακρίβεια. Η κρίση για το αν η πηγή βρίσκεται δεξιά μας ή αριστερά μας βασίζεται στην αντίληψη της διαφοράς των χρόνων άφιξης ή της διαφοράς φάσης των ηχητικών σημάτων σε κάθε αυτί. Εάν συμβαίνουν παραπάνω από δύο αφίξεις, επιλέγουμε την κατεύθυνση του πρώτου ηχητικού σήματος που φτάνει. Ο εντοπισμός της θέσης της πηγής είναι ακριβέστερος όταν έχουμε ήχους μεγάλης συχνότητας.

Η κρίση για το ύψος της θέσης της πηγής βασίζεται στη γεωμετρία των αυτιών μας. Όταν ένας ήχος μεγάλης συχνότητας αφικνύεται από θέση

που βρίσκεται μπροστά μας, μια μικρή ποσότητα ενέργειας αντανακλάται από την πίσω ακμή του λοβού του αυτιού. Αυτή η αντανάκλαση δεν είναι σε φάση για μια συγκεκριμένη συχνότητα. Λόγω του σχήματος του λοβού η συχνότητα αυτή εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και έτσι ανιχνεύουμε το ύψος της πηγής. Η ανίχνευση του ύψους της πηγής δεν είναι ακριβής για ήχους που προέρχονται από πηγές που δεν βρίσκονται μπροστά μας ή είναι μικρής συχνότητας.

5. ΑΝΤΙΛΗΨΗ ΟΜΙΛΙΑΣ/ΛΟΓΟΥ

(SPEECH PERCEPTION)

Η **λεκτική αντίληψη** αναφέρεται στις διαδικασίες από τις οποίες οι άνθρωποι είναι σε θέση να ερμηνεύσουν και να καταλάβουν τους ήχους που χρησιμοποιούνται στη γλώσσα. Η μελέτη της λεκτικής αντίληψης συνδέεται στενά με τους τομείς της φωνητικής και της φωνολογίας στη γλωσσολογία και τη γνωστικής ψυχολογίας και της αντίληψης στην ψυχολογία. Η έρευνα στη λεκτική αντίληψη επιδιώκει να καταλάβει πώς οι άνθρωποι αναγνωρίζουν τους λεκτικούς ήχους και χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για να καταλάβουν την προφορική γλώσσα. Η λεκτική έρευνα έχει εφαρμογές στην κατασκευή υπολογιστικών συστημάτων που μπορούν να αναγνωρίσουν την ομιλία, καθώς επίσης και να βελτιώσουν τη λεκτική αναγνώριση σε ανθρώπους μειωμένης ακουστικής δυνατότητας.

5.1 ΒΑΣΙΚΑ ΤΗΣ ΛΕΚΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΛΗΨΗΣ

Η διαδικασία της **λεκτικής αντίληψης** ξεκινά από το στάδιο του ηχητικού σήματος και της διαδικασίας της ακοής. Αφού επεξεργαστεί το αρχικό ακουστικό σήμα, οι λεκτικοί ήχοι υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία ώστε να εξαχθούν ακουστικά πρότυπα και φωνητικές πληροφορίες. Αυτές οι λεκτικές πληροφορίες μπορούν έπειτα να χρησιμοποιηθούν για τις υψηλότερου επιπέδου γλωσσικές διαδικασίες, όπως η αναγνώριση λέξης.

5.1.1 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

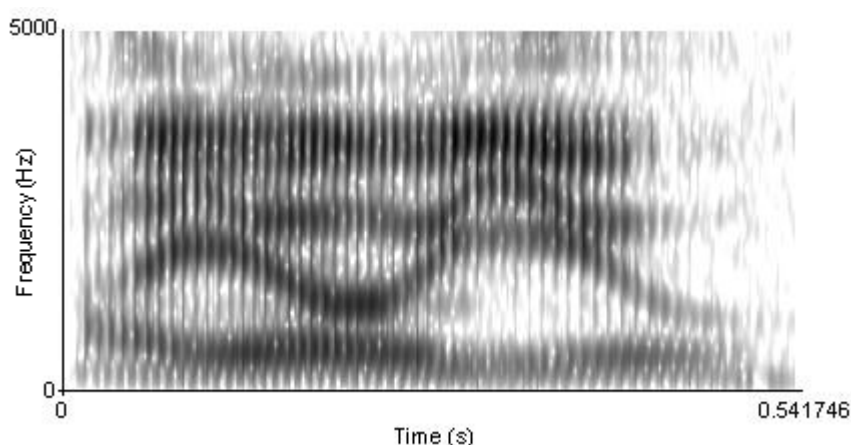
Ένα σήμα λεκτικού ήχου περιέχει διάφορα ακουστικά πρότυπα που χρησιμοποιούνται στη λεκτική αντίληψη. Μέσω των προτύπων διαφοροποιούνται οι λεκτικοί ήχοι που ανήκουν σε διαφορετικές φωνητικές κατηγορίες. Παραδείγματος χάριν, ένα από τα γνωστά πρότυπα στην ομιλία είναι χρόνος έναρξης φωνής (voice onset time) ή VOT. Το VOT είναι ένα βασικό πρότυπο, το οποίο επισημαίνει τη διαφορά μεταξύ ενός άηχου και ενός ηχηρού συμφώνου, όπως το “b” και το “p”. Άλλα πρότυπα διαφοροποιούν τους ήχους που παράγονται από διαφορετικές χρήσεις της άρθρωσης. Το λεκτικό σύστημα πρέπει επίσης να συνδυάζει τα πρότυπα για να καθορίσει την κατηγορία ενός συγκεκριμένου λεκτικού ήχου. Αυτό θεωρείται συχνά για τις αφηρημένες απεικονίσεις των φωνημάτων. Αυτές οι απεικονίσεις μπορούν έπειτα να συνδυαστούν κατά τη διαδικασία αναγνώρισης λέξης και άλλων γλωσσικών διαδικασιών.

Δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί σε ποια ακουστικά πρότυπα ο άνθρωπος έχει μεγαλύτερη ευαισθησία κατά την αντίληψη ενός συγκεκριμένου λεκτικού ήχου. Αν ο άνθρωπος μπορούσε να αντιστοιχίσει συγκεκριμένα σημεία της κυματομορφής του ακουστικού σήματος με συγκεκριμένες μονάδες της αντίληψης, τότε ο δρόμος από τον ήχο στη νόηση θα είχε ολοκληρωθεί. Όμως παρά τις έρευνες δεκαετιών η χαρτογράφηση αυτής της διαδρομής παραμένει πολύ δύσκολη.

Επίσης, αν μπορούσαμε να αντιστοιχίσουμε μια συγκεκριμένη ακουστική κυματομορφή με μια γλωσσική μονάδα τότε με τη βοήθεια κάποιων δοκιμών και με χρήση λεκτικών synthesiser, θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε αυτά τα πρότυπα. Παρ’ όλα αυτά όμως συναντάται και σ’ αυτή την προσπάθεια σοβαρά εμπόδια.

5.1.2 Η ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΤΜΗΣΗΣ

Αν και ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται την ομιλία σαν διαδοχή διακριτών μονάδων (συλλαβές, λέξεις κτλ), αυτή η γραμμικότητα εμφανίζεται δύσκολα σε φυσικά λεκτικά σήματα.



Εικόνα 25 Spectrogram της φράσης "I owe you". Δεν υπάρχει κανένα σαφώς διακριτό όριο μεταξύ των λεκτικών ήχων.

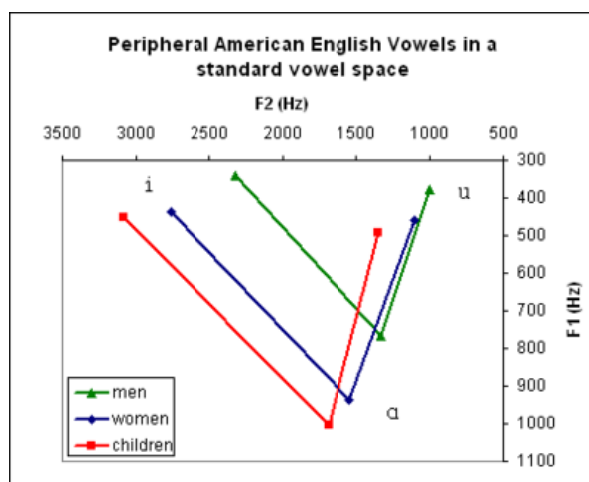
Οι λεκτικοί ήχοι περισσότερο επικαλύπτονται παρά ακολουθούν αυστηρά ο ένας τον άλλο. Ο λεκτικός ήχος επηρεάζεται από αυτόν που προηγείται και από αυτόν που ακολουθεί. Αυτή η επιρροή μπορεί να ασκηθεί και μεταξύ πιο «απομακρυσμένων» γλωσσικών τμημάτων εκτός των ορίων μια συλλαβής και των ορίων μιας λέξης.

Αμφισβητώντας τη γραμμικότητα του λεκτικού σήματος, το πρόβλημα της κατάτμησης προκύπτει: κάποιος συναντά σοβαρές δυσκολίες προσπαθώντας να οριοθετήσει ένα τέντωμα του λεκτικού σήματος σε μια ενιαία αντιληπτική μονάδα.

5.1.3 ΕΛΛΕΙΨΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ

Η έρευνα και η εφαρμογή της λεκτικής αντίληψης πρέπει να εξετάσουν διάφορα προβλήματα που προκύπτουν από αυτό που ονομάζουμε έλλειψη σταθερότητας. Όπως έχει προαναφερθεί, οι αξιόπιστες σταθερές σχέσεις μεταξύ ενός φωνήματος μιας γλώσσας και της ακουστικής εκδήλωσής της στην ομιλία είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για αυτή την έλλειψη σταθερότητας:

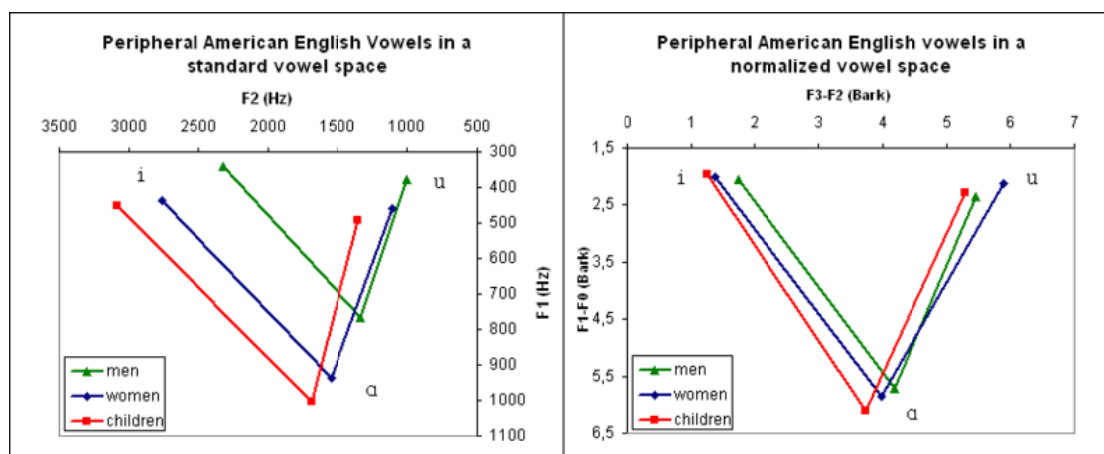
Καταρχήν, το φωνητικό περιβάλλον έχει επιπτώσεις στις ακουστικές ιδιότητες των λεκτικών ήχων. Επίσης ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας είναι ο διαφορετικός ρυθμός ομιλίας. Τέλος, η προκύπτουσα ακουστική δομή των συγκεκριμένων λεκτικών παραγωγών εξαρτάται από τις φυσικές και ψυχολογικές ιδιότητες των μεμονωμένων ομιλητών. Άνδρες, γυναίκες, και παιδιά γενικά έχουν διαφορετική τονικότητα.



Εικόνα 26 Η διαφορά μεταξύ ανδρών, γυναικών και παιδιών είναι εμφανής.

5.1.4 ΑΝΤΙΛΗΠΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

Λαμβάνοντας υπόψη την έλλειψη σταθερότητας, είναι αξιοπρόσεκτο ότι οι ακροατές θεωρούν τα φωνήεντα και τα σύμφωνα που παράγονται υπό διαφορετικές συνθήκες και από διαφορετικούς ομιλητές ως σταθερές κατηγορίες. Έχει προταθεί ότι αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας διαδικασίας αντιληπτικής κανονικοποίησης κατά την οποία ο ακροατής φιλτράρει το θόρυβο ώστε να φτάσει σε μια θεμελιώδη κατηγορία. Επομένως ένας ακροατής πρέπει να ρυθμίσει το αντιληπτικό σύστημά του/της στα ακουστικά χαρακτηριστικά ενός ιδιαίτερου ομιλητή. Αυτή η διαδικασία έχει κληθεί κανονικοποίηση φωνητικών κομματιών (**vocal tract normalization**).



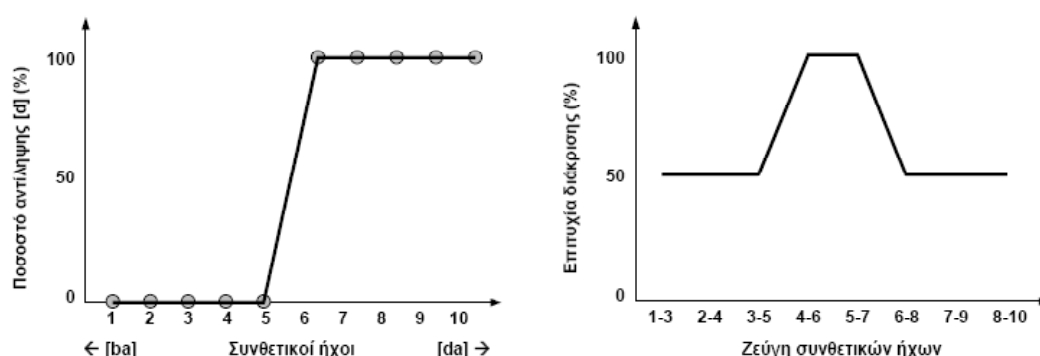
Εικόνα 27 Το αριστερό σχήμα είναι αυτό της εικόνας 13. Το δεξιό σχήμα χρησιμοποιεί τη διαδικασία κανονικοποίησης που προτάθηκε από τους Syrdal και Gopal το 1986.

Ομοίως οι ακροατές θεωρείται ότι προσαρμόζουν την αντίληψη της διάρκειας σύμφωνα με το ρυθμό ομιλίας που ακούν τη συγκεκριμένη στιγμή. Αυτό έχει αναφερθεί ως κανονικοποίηση λεκτικού ρυθμού (**speech rate normalization**).

Εάν η κανονικοποίηση πραγματοποιείται ή όχι πραγματικά και ποια είναι η ακριβής φύση της είναι ένα θέμα θεωρητικής διαμάχης. Η αντιληπτική σταθερότητα δεν είναι ένα φαινόμενο συγκεκριμένο για τη λεκτική αντίληψη μόνο, αλλά υπάρχει και σε άλλους τύπους αντιλήψεων επίσης.

5.1.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΚΗ ΑΝΤΙΛΗΨΗ

Η κατηγορική αντίληψη τεκμηριώνεται με βάση δύο βασικές ιδιότητες. Η πρώτη είναι η απότομη αντιληπτική μετάβαση από μια κατηγορία σε άλλη και η δεύτερη η συστηματική διακύμανση στην ικανότητα διάκρισης μεταξύ ήχων. Η απότομη μετάβαση μπορεί να μετρηθεί παρουσιάζοντας ακουστικά ερεθίσματα από μια σειρά ενδιάμεσων ήχων μεταξύ δύο φθόγγων, π.χ. μεταξύ [b] και [d], και καταγράφοντας για κάθε ήχο πόσο συχνά γίνεται αντιληπτός ως ο ένας από τους δύο φθόγγους, π.χ. σε τι ποσοστό ακούγεται ως [d]. Ποσοστό 0% σημαίνει ότι ποτέ δεν γίνεται αντιληπτός ως [d], ενώ 100% σημαίνει ότι πάντα γίνεται αντιληπτός [d]. Αν ένας ακουστικά ενδιάμεσος ήχος γίνεται αντιληπτός ως [d] κατά 50% σημαίνει ότι είναι ένας *αντιληπτικά ενδιάμεσος* φθόγγος, αφού δεν έχει σταθερό αντιληπτικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 28 Σχηματική απεικόνιση των αντιληπτικών ευρημάτων που χαρακτηρίζουν την κατηγορική αντίληψη. Αριστερά: Καμπύλη κατηγοριοποίησης, στην οποία φαίνεται η απότομη μετάβαση από τη μια φωνητική κατηγορία στην άλλη ενώ η ακουστική διαφοροποίηση μεταξύ των συνθετικών ήχων μεταβάλλεται σταδιακά. Δεξιά: Καμπύλη διάκρισης μεταξύ ζευγών «κοντινών» συνθετικών ήχων, στην οποία φαίνεται η αδυναμία διάκρισης μεταξύ ήχων που ανήκουν στην ίδια φωνητική κατηγορία και η αυξημένη διακριτική ικανότητα μεταξύ ήχων από διαφορετικές κατηγορίες

Αν πολλοί ήχοι ήταν αντιληπτικά ενδιάμεσοι τότε το γράφημα απόκρισης θα ήταν μια ομαλή καμπύλη μετάβασης από 0% ως 100%. Στην πραγματικότητα όμως λαμβάνουμε μια καμπύλη απόκρισης που δείχνει κάθε ήχο να γίνεται αντιληπτός σχεδόν πάντα ως ένας από τους φθόγγους αναφοράς και όχι ως κάτι ενδιάμεσο. Η αντιληπτική μετάβαση δηλαδή (από τον ένα φθόγγο στον άλλο) είναι απότομη και όχι σταδιακή, παρότι η ακουστική μετάβαση (δηλαδή η ηχητική διαφοροποίηση) είναι σταδιακή.

5.1.6 ΕΠΙΡΡΟΕΣ ΣΤΗΝ ΛΕΚΤΙΚΗ ΑΝΤΙΛΗΨΗ

Η διαδικασία της λεκτικής αντίληψης δεν είναι απαραίτητως ομοιοκατευθυνόμενη. Δηλαδή οι υψηλότερου επιπέδου γλωσσικές διαδικασίες που συνδέονται με τη μορφολογία, τη σύνταξη, ή τη σημασιολογία μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τις βασικές διαδικασίες λεκτικής αντίληψης στην ενίσχυση της αναγνώρισης των λεκτικών ήχων. Δεν είναι απαραίτητο και ίσως ακόμα και μη πιθανό για τον ακροατή να αναγνωρίσει τα φωνήματα πριν αναγνωρίζει τις υψηλότερες μονάδες, όπως τις λέξεις παραδείγματος χάριν. Αφού λάβουν τουλάχιστον ένα θεμελιώδες κομμάτι των πληροφοριών για τη φθογγική δομή του ακουστικού σήματος, οι ακροατές είναι σε θέση να αντικαταστήσουν τους φθόγγους που λείπουν ή είναι καλυμμένοι με θόρυβο χρησιμοποιώντας τη γνώση τους περί της προφορικής γλώσσας.

Σύμφωνα με ένα κλασσικό πείραμα που εκτέλεσε ο Richard M. Warren, αντικατέστησε ένα φώνημα μιας λέξης με έναν ήχο που προσομοίαζε σε βήχα. Οι άνθρωποι που συμμετείχαν στο πείραμα αντικατέστησαν το λεκτικό ήχο που έλλειπε αντιληπτικά χωρίς δυσκολία και επιπλέον δεν μπορούσαν να υποδείξουν πιο φώνημα είχε αλλοιωθεί. Αυτό είναι γνωστό ως φθογγική επίδραση αποκατάστασης. Αυτό είναι γνωστό ως επίδραση φθογγικής αποκατάστασης (phonemic restoration effect).

6. ΨΥΧΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ (PSYCOACOUSTICS)

Η ψυχοακουστική (Psychoacoustics) αποτελεί τον κλάδο της ακουστικής, ο οποίος μελετά τον υποκειμενικό τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο σύστημα ακοής αντιλαμβάνεται τους διάφορους ήχους, συμπεριλαμβανόμενης και της μουσικής (συνειδητοποίηση της ηχητικής πληροφορίας σε γνωστικό επίπεδο).

Σε ζητήματα που απασχολούν την επιστήμη της ψυχοακουστικής έχουμε ήδη αναφερθεί όπως πχ στο κεφάλαιο 3.4, αλλά θεωρείται σκόπιμο να αναφέρουμε και σε αυτό το σημείο κάποια επιπλέον στοιχεία.

6.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ακρόαση δεν είναι ένα καθαρώς μηχανικό φαινόμενο της διάδοσης κυμάτων, αλλά είναι επίσης ένα αισθητήριο και αντιληπτικό γεγονός. Όταν ένα πρόσωπο ακούει κάτι, κάτι φθάνει στο αυτί του ως μηχανικό κύμα που ταξιδεύει μέσω του αέρα, αλλά μέσα στο αυτί μετασχηματίζεται σε νευρική δράση. Αυτοί οι σφυγμοί των νεύρων ταξιδεύουν έπειτα στον εγκέφαλο όπου γίνονται αντιληπτοί. Ως εκ τούτου, σε πολλά προβλήματα στην ακουστική είναι συμφέρον να ληφθούν υπόψη όχι μόνο οι μηχανικοί του περιβάλλοντος, αλλά και το γεγονός ότι και το αυτί και ο εγκέφαλος περιλαμβάνονται στην εμπειρία ακούσματος ενός προσώπου.

Το αυτί παραδείγματος χάριν, παίρνει μια φασματική αποσύνθεση του ήχου ως τμήμα της διαδικασίας της μετατροπής του ήχου σε νευρικό ερέθισμα, έτσι ορισμένα αποτελέσματα χρονικών περιοχών είναι μη ακουόμενα. Η τεχνολογία MP3 χρησιμοποιεί αυτό το γεγονός. Επιπλέον το αυτί έχει μια λογαριθμική δυναμική απόκριση. Τα τηλεφωνικά δίκτυα χρησιμοποιούν αυτό το γεγονός με το να συμπιέζουν λογαριθμικά τα δείγματα στοιχείων πριν από τη μετάδοση, και έπειτα εκθετικά να τα επεκτείνουν για την αναπαραγωγή ήχου. Μια άλλη παρενέργεια της μη γραμμικής λογαριθμικής απόκρισης του αυτιού είναι ότι οι ήχοι που εμφανίζονται στο τύμπανο των αυτιών και έχουν μεγάλη φασματική συγγένεια προκαλούν τονική παραίσθηση. Τέτοιες ψυχολογικές επιδράσεις που οφείλονται στην ανατομία του αυτιού καλούνται ψυχολογικές-ακουστικές επιδράσεις.

Υπάρχουν αληθινά ψυχοακουστικά αποτελέσματα που εισάγονται από τον εγκέφαλο. Παραδείγματος χάριν, όταν ακούει ένα πρόσωπο κάποιον παλαιό δίσκο μουσικής, σταματά σύντομα να προσέχει τον παρασιτικό θόρυβο, και απολαμβάνει τη μουσική. Ένα πρόσωπο που το κάνει αυτό εμφανίζεται συνήθως να ξεχνά για το θόρυβο συνολικά, και μπορεί να μην είναι σε θέση να προσδιορίσει μετά εάν όντως υπήρξε θόρυβος. Αυτή η επίδραση καλείται ψυχοακουστική κάλυψη (psycho-acoustical masking). Η δυνατότητα του εγκεφάλου να εκτελεί τέτοια κάλυψη είναι σημαντική για την εξέλιξη διάφορων τεχνολογιών. Σαν ένα άλλο παράδειγμα μιας ψυχοακουστικής επίδρασης, ο εγκέφαλος

εμφανίζεται να χρησιμοποιεί μια συσχετική διαδικασία για την αναγνώριση προτύπων. Όταν ο άνθρωπος ακούει ένα συγκεκριμένο ηχητικό ερέθισμα μεγάλης σχετικά διάρκειας σε ένα όμως αρκετά θορυβώδες περιβάλλον κάποια μέρη του ηχητικού σήματος επικαλύπτονται από το θόρυβο. Ο εγκέφαλος έχει την τάση να συμπληρώνει αυτά τα μέρη που λείπουν, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι τα συμπληρώνει σωστά. Αυτό είναι μια ψυχοακουστική παραίσθηση (psycho-acoustic phantom effect). Πχ όταν ένας χειριστής ασυρμάτου προσπαθεί να ακούσει ένα σήμα κώδικα Μορς, ενώ βρίσκεται σε ένα θορυβώδες περιβάλλον, αντιλαμβάνεται συχνά τόνους μικρών τελειών ή παυλών ακόμα και όταν αυτές δεν υπάρχουν.

6.2 ΟΡΙΑ ΑΝΤΙΛΗΨΗΣ

Το ανθρώπινο αυτί μπορεί να ακούσει ήχους από 20 Hz έως 20.000 Hz (20 kHz). Αυτό το ανώτερο όριο τείνει να μειωθεί με την ηλικία. Οι περισσότεροι ενήλικοι είναι ανίκανοι να ακούσουν επάνω από 16 kHz. Το ίδιο το αυτί δεν αποκρίνεται στις συχνότητες κάτω από 20 Hz, αλλά αυτές μπορούν να γίνουν αντιληπτές μέσω της αίσθησης της αφής.

Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται αλλαγές στο τονικό ύψος μεγαλύτερες από 2 Hz . Εντούτοις, ακόμα και μικρότερες διαφορές στο ύψος μπορούν να γίνουν αντιληπτές μέσω άλλων μέσων. Πχ, η παρεμβολή δύο τονικών υψών μπορεί συχνά να ακουστεί ως ένας τόνος διαφορετικής συχνότητας. Αυτή η επίδραση ονομάζεται «beating».

Εντούτοις, η επίδραση της συχνότητας στο ανθρώπινο αυτί έχει μια λογαριθμική βάση. Με άλλα λόγια, το αντιλαμβανόμενο τονικό ύψος ενός ήχου συσχετίζεται με τη συχνότητα εκθετικά. Ο αντίκτυπος αυτού είναι ότι η κλίμακα που χρησιμοποιείται στη δυτική μουσική δεν είναι μια γραμμική κλίμακα συχνότητας αλλά λογαριθμική.

Το φάσμα ακουστών εντάσεων του ήχου είναι τεράστιο. Τα τύμπανα αυτιών μας είναι ευαίσθητα στις μεταβολές της ηχητικής πίεσης. Το χαμηλότερο όριο της ακουστικότητας καθορίζεται σε 0 dB, αλλά το ανώτερο όριο δεν είναι σαφώς καθορισμένο. Το ανώτερο όριο έχει περισσότερο να κάνει με το όριο τραυματισμού του αυτιού. Αυτό το όριο εξαρτάται επίσης από το χρόνο που εκτίθεται το αυτί μας στον

ήχο. Το αυτί μπορεί να εκτεθεί μόνο για μικρές χρονικές περιόδους σε εντάσεις άνω των 120 dB χωρίς να υποστεί μόνιμη βλάβη.

Μια εξερεύνηση των χαμηλότερων ορίων της ακουστικότητας καθορίζει ότι το κατώτατο όριο στο οποίο ένας ήχος μπορεί να ακουστεί είναι εξαρτώμενο από τη συχνότητα. Με τη μέτρηση αυτής της ελάχιστης έντασης μέσω πειραματικών δοκιμών προέκυψε το εξαρτώμενο από τη συχνότητα απόλυτο κατώτατο όριο της ακοής (Absolute Threshold of Hearing (ATH)). Το αυτί παρουσιάζει μια αιχμή της ευαισθησίας μεταξύ 1 kHz και 5 kHz, ενώ ηλικιωμένα άτομα παρουσιάζουν μειωμένη ευαισθησία σε συχνότητες άνω των 2 kHz.

6.3 MASKING EFFECT

Σε μερικές καταστάσεις ένας ειδιάλλως σαφώς ευδιάκριτος ήχος μπορεί να καλυφθεί από έναν άλλο ήχο. Παραδείγματος χάριν, η συνομιλία σε μια στάση λεωφορείου μπορεί να είναι απολύτως αδύνατη εάν ένα λεωφορείο περάσει από μπροστά. Αυτό το φαινόμενο καλείται κάλυψη. Ένας πιο αδύνατος ήχος είναι καλυμμένος εάν γίνεται μη ακουόμενος παρουσία ενός δυνατότερου ήχου. Το φαινόμενο κάλυψης εμφανίζεται επειδή οποιοσδήποτε δυνατός ήχος θα διαστρεβλώσει το απόλυτο κατώτατο όριο της ακρόασης, που καθιστά τους πιο ήρεμους ήχους μη ακουόμενους.

Εάν δύο ήχοι εμφανίζονται ταυτόχρονα και κάποιος καλύπτεται από τον άλλον, αυτό αναφέρεται ως ταυτόχρονη κάλυψη. Η ταυτόχρονη κάλυψη επίσης μερικές φορές καλείται κάλυψη συχνότητας. Η τονικότητα ενός ήχου καθορίζει μερικώς τη δυνατότητά του να καλύψει άλλους ήχους.

6.4 'PHANTOM' FUNDAMENTALS

Χαμηλά ύψη μπορούν μερικές φορές να ακουστούν χωρίς να υπάρχει καμία προφανής πηγή. Αυτή η αντίληψη οφείλεται στον εγκέφαλο που ερμηνεύει με αυτόν τον τρόπο την ύπαρξη κάποιων αρμονικών στο χώρο που βρισκόμαστε.

6.5 ΨΥΧΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΜΟΥΣΙΚΗ

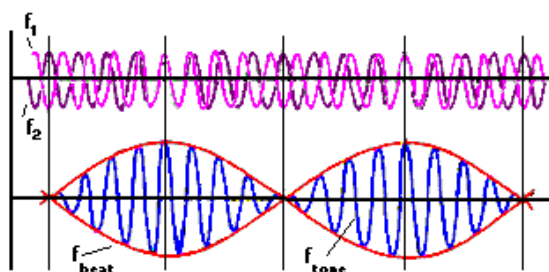
Η ψυχοακουστική περιλαμβάνει θέματα και έρευνες που σχετίζονται με τη μουσική ψυχολογία. Κάποιοι θεωρητικοί, όπως ο Benjamin Boretz, πιστεύουν ότι ορισμένα συμπεράσματα της ψυχοακουστικής έχουν νόημα μόνο όταν το ηχητικό ερέθισμα είναι μουσικού περιεχομένου.

7. ΜΟΥΣΙΚΗ ΑΝΤΙΛΗΨΗ (MUSICAL PERCEPTION)

Τα περισσότερα στοιχεία που έχουν να κάνουν με τη μουσική αντίληψη έχουν ήδη αναφερθεί και σε άλλα κεφάλαια αλλά σε αυτό το σημείο θα επαναλάβουμε τα βασικά, αφού μέσω της μουσικής αντίληψης γίνεται ευκολότερη η κατανόηση ορισμένων στοιχείων της ακουστικής και της ψυχοακουστικής για τον απλούστατο λόγο ότι όλοι οι άνθρωποι, άλλοι περισσότερο και άλλοι λιγότερο, έχουν κάποια επαφή με τη μουσική.

7.1 ΤΟΝΟΣ ΚΑΙ BEAT

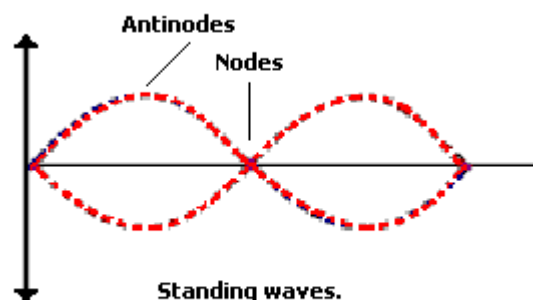
Όταν δύο κύματα με ελάχιστα διαφορετικές συχνότητες συνδυάζονται παράγουν ένα ταλαντευόμενο ήχο, ο οποίος καλείται beat και χαρακτηρίζεται από δύο μεγέθη: τη συχνότητα του beat (beat frequency (f_b)) και τη συχνότητα του τόνου (tone frequency (f_t)) για τις οποίες ισχύει: $f_b = f_2 - f_1$ και $f_t = (f_1 + f_2)/2$.



Beat waves form when two waves that are close in frequency combine.

Εικόνα 29 Τόνος και beat.

7.2 ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΗΧΗΣΗ



Εικόνα 30 Στάσιμο κύμα.

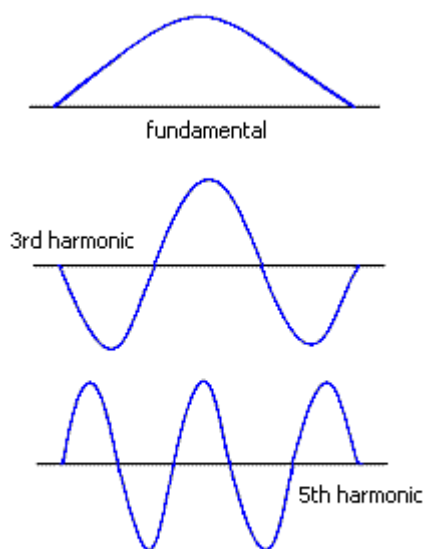
Ένα στοιχείο ενός στάσιμου κύματος είναι αντήχηση. Κανονικά, εάν ένα αντικείμενο δονείται, η δόνηση θα εξασθενίσει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Εντούτοις, όλα τα αντικείμενα έχουν μια χαρακτηριστική συχνότητα δόνησης η οποία ονομάζεται συχνότητα αντήχησης, στην οποία οι δονήσεις ενισχύονται από στάσιμα κύματα που δημιουργούνται μέσα στο ίδιο το αντικείμενο. Ένα αντικείμενο που δονείται με την συχνότητα αντήχησης θα ηρεμήσει τελικά, αλλά σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη συχνότητα. Η αντήχηση είναι ένα συστατικό του ήχου των μουσικών οργάνων, αλλά είναι και το μεγάλο πρόβλημα της ακουστικής ενός χώρου, ο οποίος δεν πρέπει να ενισχύει οποιοδήποτε συχνότητα ή σύνολο συχνοτήτων έναντι κάποιων άλλων. Τα μεγάφωνα και τα ακουστικά σχεδιάζονται έτσι ώστε να μειώσουν ή να εξαλείψουν τα αποτελέσματα της αντήχησης.

7.3 ΜΟΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΨΥΧΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

7.3.1 ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΤΟΝΙΑ (HARMONICS AND OVERTONES)

Μια σειρά αρμονικών ή υπερτονιών αποτελείται από μια θεμελιώδη συχνότητα και διαδοχικές συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους. Αν f είναι η θεμελιώδης τότε οι αρμονικές θα είναι f ,

$2f, 3f, 4f, 5f...$ Οι αρμονικές παίζουν κεντρικό ρόλο στη μουσική αντίληψη.



Odd harmonic series: $n = 1, 3, 5$

Εικόνα 31 Σειρά περιττών αρμονικών.

Το περιεχόμενο των ήχων των μουσικών οργάνων είναι αυτές οι αρμονικές. Όταν οι ενισχυτές υπερφορτώνουν ή ψαλιδίζουν, παράγουν αρμονικές. Κατά συνέπεια, ακόμα κι αν το ψαλίδισμα πραγματοποιείται σε χαμηλή συχνότητα, ένας ενισχυτής μπορεί να παράγει αρκετές αρμονικές υψηλής συχνότητας να βλάψει το μεγάφωνο. Όταν οι ενισχυτές με διπολικά τρανζίστορ υπερφορτώνουν, παράγουν περισσότερες περιττές αρμονικές. Όταν οι ενισχυτές με MOSFET υπερφορτώνουν, παράγουν περισσότερες άρτιες αρμονικές.

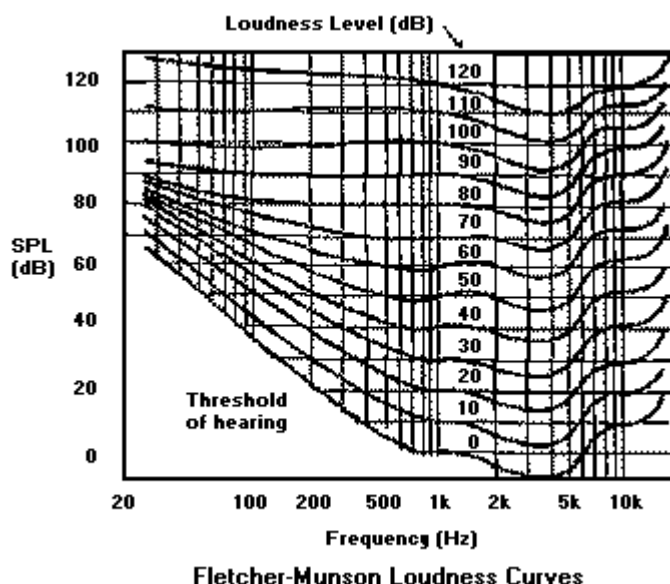
7.3.2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΡΟΙΑ

Ένα σύνθετο κύμα είναι το άθροισμα δύο ή περισσότερων αρμονικών. Το ανθρώπινο αυτί ακούει τη χροιά ενός ήχου ενός μουσικού οργάνου βασιζόμενο στη θεμελιώδη νότα (τονικό ύψος - pitch) και τα χαρακτηριστικά πλάτους και φάσης των αρμονικών που βρίσκονται στον ήχο.

7.3.3 ΑΚΟΥΣΤΟΤΗΤΑ

Οι καμπύλες Fletcher-Munson μετρούν την ακουστική αντίληψη της

ανθρώπινης ακοής σε ερεθίσματα διαφορετικών ηχητικών πιέσεων (SPL).



Εικόνα 32 Οι καμπύλες Fletcher-Munson .

7.3.4 THE MISSING FUNDAMENTAL – FUNDAMENTAL TRACKING

Εάν δύο ή περισσότερες νότες που παίζονται ταυτόχρονα είναι διαδοχικές αρμονικές σε μια αρμονική σειρά, το ανθρώπινο αυτί θα ακούσει μια τρίτη νότα: τη θεμελιώδη συχνότητα της σειράς. Αυτή η επίδραση καλείται «the Missing Fundamental». Εάν τα ζευγάρια των μουσικών νοτών που παίζονται διαδοχικά έχουν μια αναλογία συχνότητας 3 προς 2 και έχουν διαφορετικές θεμελιώδεις συχνότητες, το ανθρώπινο αυτί θα κατασκευάσει μια θεμελιώδη συχνότητα για κάθε νότα. Αυτό το φαινόμενο καλείται «Fundamental Tracking». Τα ακουστικά στα περισσότερα φορητά στερεοφωνικά συγκροτήματα εκμεταλλεύονται και τις δύο αρχές για να εξομοιώσουν μια απόκριση χαμηλής συχνότητας.

7.4 ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΤΙΛΗΨΗ (SPATIAL PERCEPTION)

7.4.1 ΔΙΩΤΑ BEAT (BINAURAL BEATS)

Εάν δύο απαλές νότες που έχουν μικρή διαφορά στη συχνότητα ακουστούν ξεχωριστά σε κάθε αυτί (χωρίς φυσική μίξη), ο ακροατής θα ακούσει τα δίωτα beat, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα τη μίξη των ήχων στον εγκέφαλο. Τα δίωτος beat δεν έχουν σχέση από τα beat που προέρχονται από τη μίξη των ήχων στον αέρα και είναι η εξήγηση γιατί τα ακουστικά ηχούν διαφορετικά από τα μεγάφωνα.

7.4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ (PRECEDENCE EFFECT)

Η επίδραση προτεραιότητας εντοπίζει τον ήχο βασιζόμενη στο πρώτο κύμα που φθάνει στο αυτί, ανεξάρτητα από την ηχηρότητα οποιωνδήποτε πιο πρόσφατων κυμάτων άφιξης. Επομένως, εάν διάφορα ηχεία αναπαράγουν την ίδια μουσική, θα εμφανίζεται να προέρχεται από το κοντινότερο ηχείο, ακόμα κι αν τα πιο απόμακρα ηχεία είναι δυνατότερα. Εάν η ηχητική πηγή είναι ένας καθαρός τόνος σε ένα αντηχητικό δωμάτιο, ένας ακροατής που εισέρχεται στο δωμάτιο και δεν έχει ακούσει την έναρξη του ήχου θα το βρεί πολύ δύσκολο να εντοπίσει την ηχητική πηγή.

8. ΘΟΡΥΒΟΣ

«Μια μέρα ο άνθρωπος θα αγωνίζεται ενάντια στο θόρυβο με την ίδια επιμονή που παλεύει με τη χολέρα και την πανώλη»

Robert Koch (1843-1910)

Η λέξη θόρυβος έχει ευρεία έννοια και στις μέρες μας χρησιμοποιείται σε πολλές επιστήμες. Στην καθημερινή μας ζωή χρησιμοποιείται για να δηλώσει την ύπαρξη ενός ανεπιθύμητου ήχου ή την ηχορρόπανση. Στην επιστήμη της ηλεκτρονικής, ο θόρυβος είναι ένα ηλεκτρονικό σήμα το

οποίο, σε αναλογία με τον ακουστικό θόρυβο, αλλοιώνει ή παραμορφώνει το ηλεκτρονικό σήμα που αναμένουμε. Η χρησιμοποίηση της λέξης είναι ατέρμονη. Στην θεωρία πληροφορίας ο όρος θόρυβος μπορεί να αναφέρεται σε μια άχρηστη πληροφορία. Ακόμα και οι διαφημίσεις που δεν μας ενδιαφέρουν σε κάποιες ιστοσελίδες μπορούν να χαρακτηριστούν ως θόρυβος.

Γενικά, ο θόρυβος μπορεί να αλλάξει ή να διαστρεβλώσει το περιεχόμενο ενός μηνύματος σε όλες τις μορφές της ανθρώπινης επικοινωνίας.

Στην παρούσα διπλωματική περισσότερο μας ενδιαφέρει ο ακουστικός θόρυβος. Όμως θα αναφερθούμε εν συντομία και στον ηλεκτρονικό θόρυβο αφού και αυτός εμπλέκεται στην κατασκευή του κυκλώματος ακύρωσης θορύβου που κατασκευάσαμε. Επίσης θα αναφερθούμε συνοπτικά στα χρώματα του θορύβου και θα καταλήξουμε με την περιγραφή του ακουστικού θορύβου.

8.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

Ο ηλεκτρονικός ή κυκλωματικός θόρυβος είναι ένα ανεπιθύμητο ηλεκτρονικό σήμα που υπάρχει σε ένα κύκλωμα. Αναλόγως με το κύκλωμα, ο ηλεκτρονικός θόρυβος που παράγεται από αυτό μπορεί να ποικίλει και οφείλεται σε διάφορα ηλεκτρονικά φαινόμενα.

Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες ηλεκτρονικού θορύβου. Οι δύο κυριότερες όμως είναι ο **θερμικός θόρυβος** και ο **θόρυβος βολής**. Τα δύο αυτά διαφορετικά είδη θορύβου είναι τα κυριότερα διότι εμπεριέχονται σε όλες τις ηλεκτρονικές διατάξεις.

8.1.1 ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

Η τυχαία κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε μια αντίσταση της οποίας η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από το απόλυτο μηδέν δημιουργεί τάση θορύβου στα άκρα της. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί τον θερμικό θόρυβο (thermal noise ή Johnson-Nyquist noise).

Στις συνήθεις θερμοκρασίες (μέχρι 300 K) και για συχνότητες μέχρι 600 GHz, η φασματική πυκνότητα ισχύος του θερμικού θορύβου προσεγγίζεται με πολύ καλή ακρίβεια από τη σχέση: $S_n(f) = 2 \times k \times T_s$,

όπου $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K η σταθερά του Boltzmann και T_s η φυσική θερμοκρασία της αντίστασης σε K.

8.1.2 ΘΟΡΥΒΟΣ ΒΟΛΗΣ

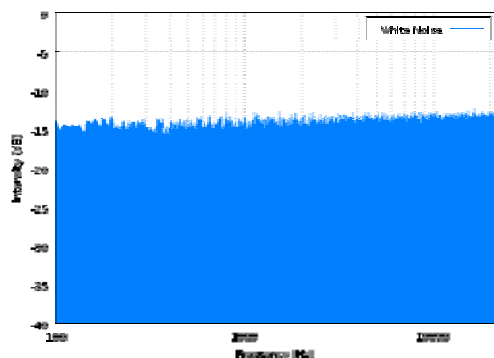
Ο θόρυβος βολής (Shot noise) οφείλεται στην κατά τυχαίο τρόπο διακύμανση της παραγωγής φορέων (ηλεκτρονίων) σε ένα ενεργό στοιχείο.

Υπάρχουν όμως και άλλα είδη ηλεκτρονικού θορύβου τα οποία οφείλονται σε μη ικανοποιητική κατασκευαστική ποιότητα και σε ατέλειες ημιαγωγών, όπως ο Flicker noise για κυκλώματα συνεχούς ρεύματος, ο Burst noise που είναι ένας χαμηλής συχνότητας θόρυβος που συναντάται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα και ο Avalanche noise που προκαλείται από τη δίοδο Zener ή από το φαινόμενο Avalanche breakdown σε μια p-n ένωση.

8.2 ΧΡΩΜΑΤΑ ΘΟΡΥΒΟΥ

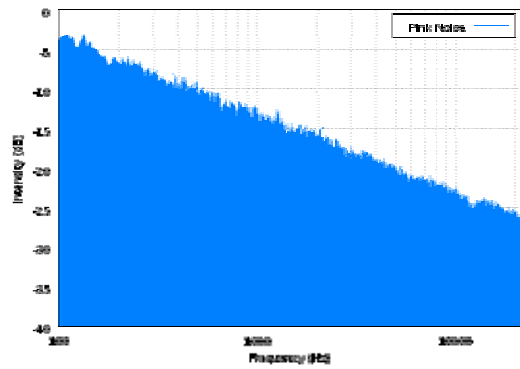
Παρά το γεγονός ότι ο θόρυβος είναι ένα τυχαίο σήμα, έχει ορισμένες στατιστικές χαρακτηριστικές ιδιότητες. Η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι μια τέτοια ιδιότητα και χρησιμοποιείται για τη διάκριση των διαφόρων ειδών του θορύβου. Το κάθε είδος ονομάστηκε με ένα διαφορετικό χρώμα, σε αναλογία με τα φωτεινά κύματα. Πχ εάν το σήμα του μπλε θορύβου «μετασχηματιζόταν» σε φωτεινό κύμα, τότε το αποτέλεσμα του θα ήταν μπλε φως! Παρακάτω παρατίθενται τα διάφορα χρώματα του θορύβου μαζί με τις φασματικές πυκνότητες ισχύος των.

8.2.1 ΛΕΥΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ



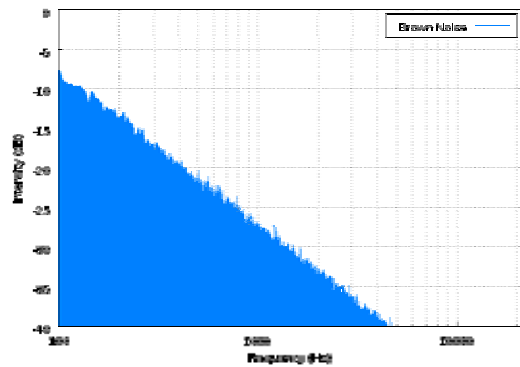
Εικόνα 33 Λευκός θόρυβος.

8.2.2 ΡΟΖ ΘΟΡΥΒΟΣ



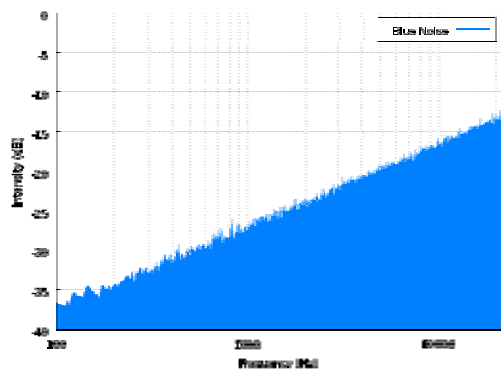
Εικόνα 34 Ροζ θόρυβος.

8.2.3 ΚΑΦΕ Ή ΚΟΚΚΙΝΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ



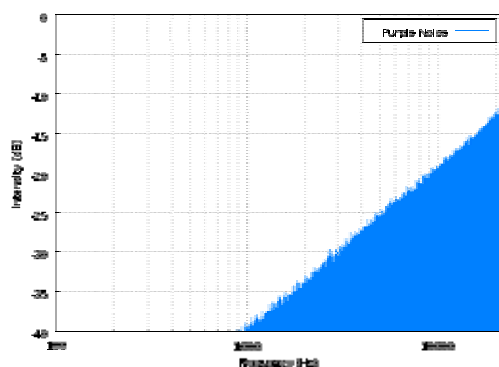
Εικόνα 35 Καφέ θόρυβος.

8.2.4 ΜΠΛΕ Ή ΚΥΑΝΟΥΣ ΘΟΡΥΒΟΣ



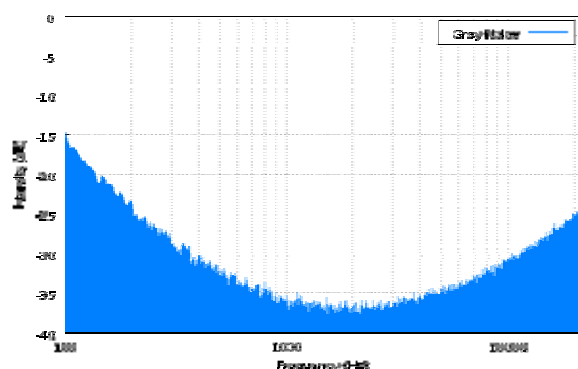
Εικόνα 36 Μπλε θόρυβος.

8.2.5 ΜΩΒ ΘΟΡΥΒΟΣ



Εικόνα 37 Μωβ θόρυβος.

8.2.6 ΓΚΡΙ ΘΟΡΥΒΟΣ



Εικόνα 38 Γκρι θόρυβος.

8.3 ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

Όταν αναφερόμαστε στον ακουστικό θόρυβο στην καθημερινότητα συνήθως εννοούμε έναν ανεπιθύμητο ήχο, ο οποίος υπάρχει ταυτόχρονα με έναν άλλο ήχο που μας ενδιαφέρει, ή κάποιο ήχο χωρίς νόημα. Παρόλα αυτά με τον όρο θόρυβο μερικές φορές αναφερόμαστε και σε χρήσιμους ήχους όπως πχ σε έναν ήχο μεγάλης έντασης (μουσική από γειτονικό διαμέρισμα) ή μια συνομιλία στην οποία δε συμμετέχουμε.

Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης) δίνονται δύο ορισμοί του ακουστικού θορύβου:

- «Θόρυβος ονομάζεται κάθε δυσάρεστος ή ανεπιθύμητος ήχος»

– «Θόρυβος ονομάζεται κάθε απεριοδικός σύνθετος ήχος που η στιγμιαία τιμή του αυξομειώνεται με τυχαίο τρόπο»

8.3.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ

Ο ακουστικός θόρυβος διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

Στον **θόρυβο περιβάλλοντος** (ambient noise), ο οποίος ορίζεται ως ο θόρυβος που εκπέμπεται από συγκεκριμένες πηγές που δεν μας ενδιαφέρουν κατά τη στιγμή της μέτρησης ή της παρατήρησης, όπως για παράδειγμα ο θόρυβος ενός κλιματιστικού σε μια αίθουσα διδασκαλίας κατά τη διάρκεια του μαθήματος και στον **θόρυβο βάθους** (background noise), ο οποίος ορίζεται ως ο θόρυβος που εκπέμπεται από όλες τις πηγές που βρίσκονται στο περιβάλλον και δεν μας ενδιαφέρουν.

Επίσης ο θόρυβος κατηγοριοποιείται και ανάλογα με τον τρόπο που μεταβάλλεται. Έτσι έχουμε τον **σταθερό θόρυβο** ο οποίος παρουσιάζει αμελητέες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της μέτρησης ή της παρατήρησης, τον **μεταβλητό θόρυβο** ο οποίος δεν είναι σταθερός αλλά δεν μεταβάλλεται ραγδαία και τον **κυμαινόμενος θόρυβο** η στάθμη του οποίου αλλάζει συνεχώς και σε σημαντικό βαθμό κατά τη διάρκεια της μέτρησης ή της παρατήρησης.

8.3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ

Η μέτρηση της στιγμιαίας ηχητικής στάθμης δεν είναι ακριβής ούτε πολύ εύκολη. Στην ειδική περίπτωση βέβαια που επιθυμούμε να μετρήσουμε τη στιγμιαία στάθμη ενός κυμαινόμενου θορύβου, η δυσκολία αυξάνει πολύ σημαντικά.

Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε ένα άλλο μέγεθος, την **ισοδύναμη στάθμη θορύβου (L_{eq})** μονάδα μέτρησης του οποίου είναι το dB. Η ισοδύναμη στάθμη θορύβου είναι ο χρονικός μέσος όρος της στάθμης του θορύβου ή διαφορετικά είναι η ισοδύναμη στάθμη του σταθερού θορύβου.

Η ισοδύναμη στάθμη θορύβου υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_o(t)} \right)^2 dt$$

Η ευκολία που μας παρέχεται από τη χρησιμοποίηση της ισοδύναμης στάθμης θορύβου είναι μεγάλη, διότι έχουν κατασκευαστεί ειδικά όργανα τα οποία μπορούν να την μετρήσουν με αρκετά καλή ακρίβεια.



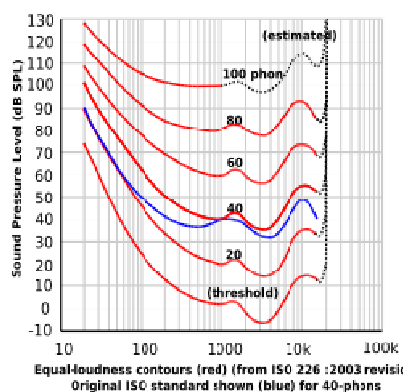
Εικόνα 39 An integrating-averaging sound level meter.

Τέλος, ένα ακόμα χρήσιμο μέγεθος για τη μέτρηση του θορύβου σε ένα χώρο είναι η **μέση στάθμη θορύβου** (L_p) δηλαδή η μέση τιμή της στάθμης της ακουστικής πίεσης σε διάφορα σημεία του χώρου:

$$L_p = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N L_{pk}$$

8.3.3 ΖΥΓΙΣΜΕΝΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ

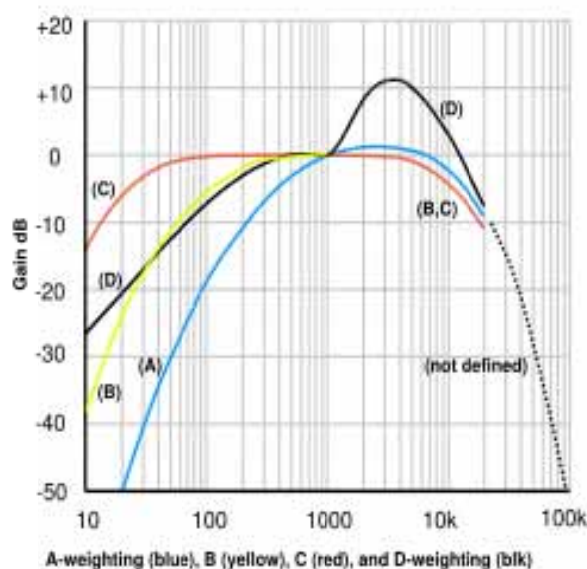
Τις πιο πολλές φορές μας ενδιαφέρει η μέτρηση της καταληπτότητας του θορύβου από τον άνθρωπο περισσότερο παρά η στάθμη του θορύβου αυτή καθαυτή. Γι' αυτό το λόγο κατασκευάστηκαν έπειτα από πειραματικές διαδικασίες οι καμπύλες ίσης ακουστότητας (μονάδα μέτρησης το phon).



Εικόνα 40 Καμπύλες ίσης ακουστότητας.

Οι καμπύλες αυτές παρόλα αυτά παρουσιάζουν το μειονέκτημα της δύσκολης υλοποίησης. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το ανθρώπινο αυτί είναι περισσότερο ευαίσθητο σε κάποιες συχνότητες σε σχέση με κάποιες άλλες οδήγησε στη **ζύγιση των μετρούμενων τιμών πίεσης του θορύβου με καμπύλες**. Γενικά, οι ήχοι, άρα και οι θόρυβοι, μικρής και μεγάλης συχνότητας αντιλαμβάνονται από τον άνθρωπο ως λιγότερο ηχηροί σε σχέση με τους μεσαίας συχνότητας ήχους. Επομένως, οι μετρητές στάθμης θορύβου εμπλουτίστηκαν με κάποια **φίλτρα** τα οποία δεν υπολογίζουν τη συνεισφορά των χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων και εξάγουν ένα αποτέλεσμα το οποίο προσομοιάζει περισσότερο με αυτό που αντιλαμβανόμαστε ότι ακούμε. Τα φίλτρα που υπάρχουν είναι το φίλτρο A (για μεσαίες εντάσεις), τα φίλτρα B και C (υψηλές εντάσεις) και το φίλτρο D. Αυτά που χρησιμοποιούνται πλέον στις μέρες μας είναι τα φίλτρα A (συχνότερα) και C.

Παρακάτω εμφανίζονται οι αντίστοιχες καμπύλες των τεσσάρων φίλτρων καθώς και οι συναρτήσεις μεταφοράς για το καθένα από αυτά:



Εικόνα 41 Καμπύλες A,B,C και D .

Οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς των τεσσάρων φίλτρων είναι:

ΦΙΛΤΡΟ A

$$G_A(s) = \frac{k_A \cdot s^4}{(s + 129.4)^2 (s + 676.7) (s + 4636) (s + 76655)^2}$$

Όπου $k_A \approx 7.39705 \times 10^9$

ΦΙΛΤΡΟ Β

$$G_B(s) = \frac{k_B \cdot s^3}{(s + 129.4)^2 (s + 995.9) (s + 76655)^2}$$

Όπου $k_B \approx 5.99185 \times 10^9$

ΦΙΛΤΡΟ C

$$G_C(s) = \frac{k_C \cdot s^2}{(s + 129.4)^2 (s + 76655)^2} \quad \text{Όπου } k_C \approx 5.91797 \times 10^9$$

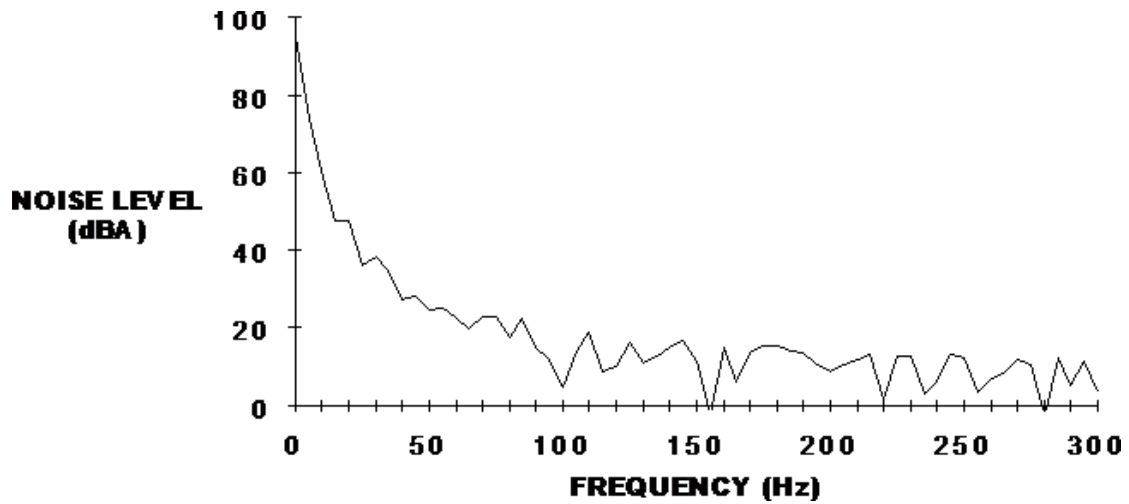
ΦΙΛΤΡΟ D

$$G_D(s) = \frac{k_D \cdot s \cdot (s^2 + 6532s + 4.0975 \times 10^7)}{(s + 1776.3) (s + 7288.5) (s^2 + 21514s + 3.8836 \times 10^8)}$$

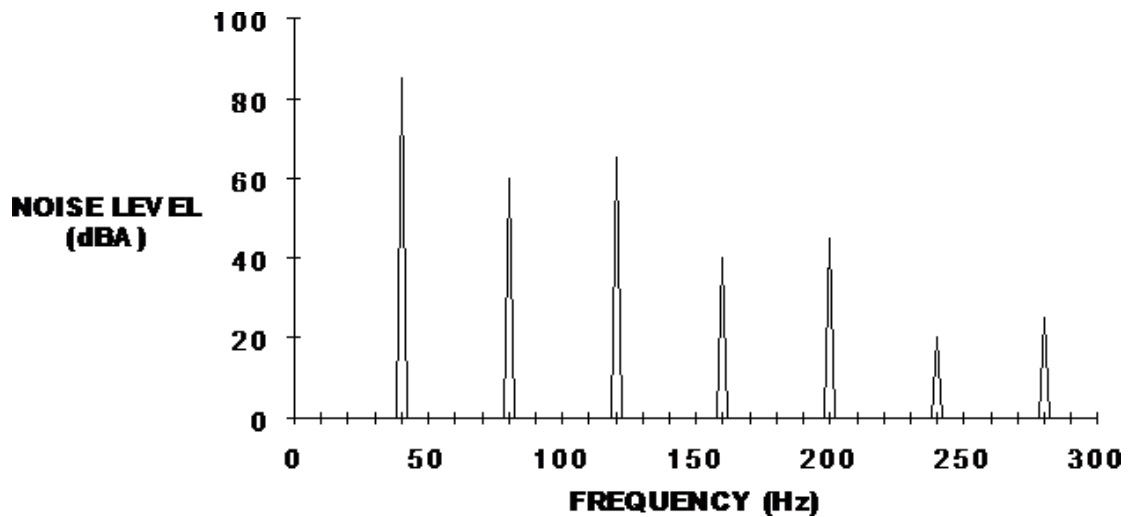
Όπου $k_D \approx 91104.32$

8.4 ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΥΡΕΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ

Δύο είδη θορύβου υπάρχουν στο περιβάλλον: ευρείας ζώνης και στενής ζώνης. Ο διαχωρισμός του θορύβου σε αυτά τα δύο είδη είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τον Ενεργό Έλεγχο Θορύβου που θα συναντήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο, διότι το ένα είδος είναι εξαιρετικά μη προβλέψιμο ενώ το άλλο είναι προβλέψιμο σε πολύ μεγάλο βαθμό. Τα φάσματα των δύο αυτών ειδών ενδεικτικά είναι:



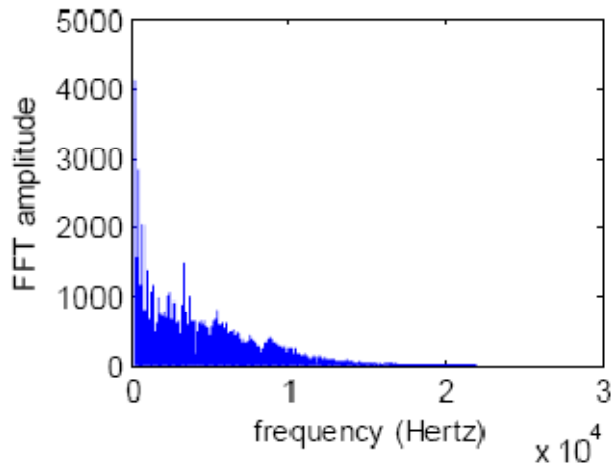
Εικόνα 42 Φάσμα θορύβου ευρείας ζώνης.



Εικόνα 43 Φάσμα θορύβου στενής ζώνης.

Ο θόρυβος ευρείας ζώνης έχει κατανεμημένη την ενέργειά του σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Ο θόρυβος αυτού του είδους δημιουργείται από τυχαίες διαδικασίες και είναι μη προβλέψιμος.

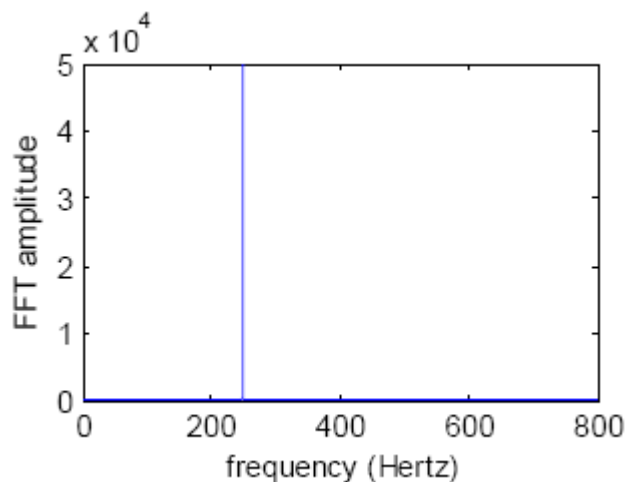
Παραδείγματα θορύβου ευρείας ζώνης είναι ο θόρυβος που δημιουργείται από την κυκλοφοριακή κίνηση στους δρόμους μια μεγαλούπολης, ο θόρυβος που δημιουργείται από την τυχαία ροή αέρα σε αγωγούς και ο θόρυβος της μηχανής ενός αυτοκινήτου.



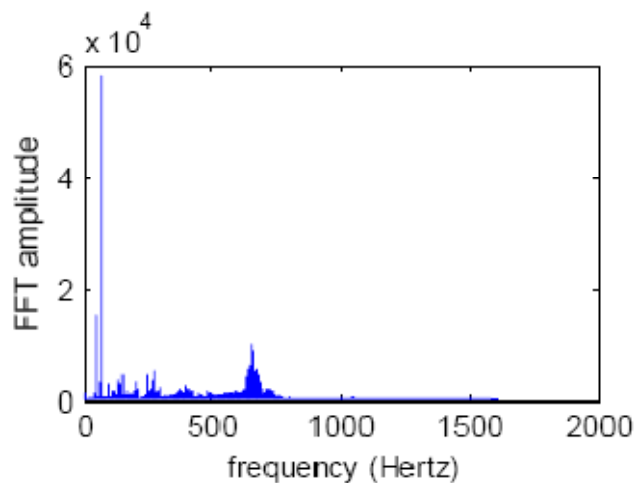
Εικόνα 44 Φάσμα θορύβου μηχανής αυτοκινήτου.

Αντίθετα, ο θόρυβος στενής ζώνης συγκεντρώνει την ενέργεια του σε συγκεκριμένες συχνότητες. Ο θόρυβος αυτού του είδους σχετίζεται περισσότερο με ηλεκτρικές περιστρεφόμενες μηχανές. Πχ ο εξοπλισμός των μηχανών εσωτερικής καύσης περιέχει περιστρεφόμενα ηλεκτρομηχανολογικά εξαρτήματα, τα οποία δημιουργούν θόρυβο σε αρμονικές και υπαρμονικές της συχνότητας περιστροφής του περιστρεφόμενου μέρους. Ως αποτέλεσμα, ο θόρυβος στενής ζώνης είναι περιοδικός ή σχεδόν περιοδικός και συνεπώς σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμος.

Το πιο απλό παράδειγμα θορύβου στενής ζώνης είναι ένας θόρυβος αποτελούμενος από μία μοναδική συχνότητα, έστω 250Hz. Άλλο παράδειγμα είναι ο θόρυβος που δημιουργείται από έναν ηλεκτρικό διάδρομο γυμναστηρίου.



Εικόνα 45 Φάσμα μονοχρωματικού θορύβου στα 250 Hz.



Εικόνα 46 Θόρυβος που παράγεται κατά τη λειτουργία ηλεκτρικού διαδρόμου με ταχύτητα 0,5km/h

8.5 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ

Οι επιπτώσεις του θορύβου στον άνθρωπο καθορίζονται κυρίως από την διάρκεια και την ένταση, αλλά σχετίζονται και με τη συχνότητα. Θόρυβοι μεγάλης διάρκειας και έντασης είναι γενικά περισσότερο επικίνδυνοι και ενοχλητικοί. Θόρυβοι υψηλών συχνοτήτων είναι περισσότερο επικίνδυνοι και ενοχλητικοί σε σχέση με θορύβους χαμηλών συχνοτήτων. Σημασία έχει και ο τρόπος με τον οποίο διαδίδεται ο θόρυβος σε σχέση με το χρόνο. Για παράδειγμα ο περιοδικός θόρυβος φαίνεται να είναι λιγότερο επικίνδυνος στην ακοή, σε σχέση με τον συνεχή θόρυβο, γιατί το αυτί έχει την ικανότητα να επουλώνεται και να αναζωογονείται στα ενδιάμεσα ήσυχια χρονικά διαστήματα. Παλμικοί όμως θόρυβοι είναι συνήθως περισσότερο ενοχλητικοί, κυρίως επειδή είναι απρόβλεπτοι και ξαφνιάζουν τον ανθρώπινο οργανισμό.

Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, η συνεχής έμφαση σε όλο και πιο γρήγορα, ισχυρά και ελαφριά κατασκευής μηχανήματα, είχε σαν αποτέλεσμα υψηλότερα επίπεδα θορύβου σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας, τα μέσα συγκοινωνιών, τα εργοτάξια, τις κατασκευές και σχεδόν όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ο θόρυβος είναι σήμερα μαζί μας παντού, στα σπίτια, τα γραφεία, τα σχολεία, τα νοσοκομεία και οι δυσμενείς συνέπειες του στην ανθρώπινη υγεία

έχουν κινήσει το ενδιαφέρον όλων των σύγχρονων κοινωνιών που αναζητούν τρόπους αντιμετώπισης του.

Αν και η πιο κατανοητή παθολογική συνέπεια του θορύβου στον άνθρωπο είναι η απώλεια της ακοής (χιλιάδες εργαζόμενοι κάθε χρόνο χάνουν την ακοή τους), υπάρχουν πάρα πολλές άλλες παθολογικές επιδράσεις του στην ανθρώπινη υγεία, όπως φαίνεται από εκθέσεις σύγχρονων ιατρικών ερευνητικών κέντρων. Σήμερα έχουμε αποδείξεις ότι ο υψηλός θόρυβος μπορεί να σκοτώσει ζώα και να καταστρέψει υλικά όπως τζάμια και παλιά κτίρια. Η έκθεση νεαρών ατόμων σε θορυβώδη μουσική τύπου "Rock" συνήθως τους επιφέρει την ασθένεια "Κωφότητα Γέρου", πριν ακόμα φθάσουν στην ηλικία των 30 ετών. Ιατρικές έρευνες σήμερα συσχετίζουν το θόρυβο με επιληπτικούς σπασμούς, αύξηση της χοληστερίνης, της πίεσης του αίματος, της εγκληματικότητας, των αυτοκτονιών, των ψυχασθενειών, μείωση της όρασης, απώλεια του libido, νευρική υπερένταση και άλλες παθολογικές καταστάσεις.

Το ευρύ κοινωνικό ενδιαφέρον και η ανησυχία των ανθρώπων όλου του κόσμου για τις συνέπειες του θορύβου επέφερε νομοθεσίες ανωτάτων ορίων θορύβου στους χώρους εργαζομένων, κατοικημένων περιοχών, αεροδρομίων, τραίνων, αυτοκινητόδρομων, μηχανημάτων, συσκευών κλπ. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ερευνητικών κέντρων, εταιρειών ακουστικής και άλλων οργανισμών με σκοπό την εξεύρεση λύσεων στο πρόβλημα του θορύβου.

Στην χώρα μας το πρόβλημα της ηχορύπανσης είναι έντονο για πολλούς λόγους, οι κυριότεροι των οποίων είναι η έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού, η έλλειψη καθορισμού χρήσεων γης, και η μη εφαρμογή της υπάρχουσας νομοθεσίας προστασίας περιβάλλοντος και εργαζομένων από τον θόρυβο. Πρόσφατα ανακοινώθηκε ότι ο ένας στους τρεις Έλληνες πάσχει από ψυχολογικά προβλήματα εξαιτίας του θορύβου και άλλων περιβαλλοντικών αιτιών. Οι περισσότερες διεθνείς νομοθεσίες (και η Ελληνική) θέτουν σαν ανώτερη στάθμη θορύβου στους χώρους κατοικίας DNL level 45 dB(A) θεωρώντας σαν μέσο όρο τα 35 dB(A), αλλά στις Ελληνικές μεγαλουπόλεις επικρατούν επίπεδα 65 – 80 dB(A) τα οποία διαταράσσουν σοβαρά τον ύπνο και την ξεκούραση του οργανισμού. Αποδεδειγμένες είναι επίσης και οι αρνητικές

συνέπειες του θορύβου στην κοινωνική συμπεριφορά ατόμων. Για παράδειγμα, οι ερευνητές Matthews και Cannon σε εργαστηριακή έρευνα διαπίστωσαν ότι πολύ λιγότεροι άνθρωποι έδειχναν διάθεση να βοηθήσουν κάποιον συνάνθρωπο τους, όταν στο περιβάλλον επικρατούσαν επίπεδα θορύβου 85 dB σε αντίθεση με όταν επικρατούσαν επίπεδα θορύβου κάτω από 65 dB. Ο θόρυβος, εκτός από τις αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, έχει συντελέσει και στην περιβαλλοντική παρακμή των αστικών κέντρων και την οικονομική υποβάθμιση πολλών περιοχών.

9. ΑΚΥΡΩΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ (NOISE CANCELLATION)

Ο αρχικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν μετά από μια μεγάλη ανάλυση του ήχου, του τρόπου με τον οποίο ο άνθρωπος τον αντιλαμβάνεται, του θορύβου και τις επιπτώσεις του στον άνθρωπο να φτάσουμε τελικά σε αυτό το κεφάλαιο: στο κεφάλαιο που θα ασχοληθούμε με την **ακύρωση του θορύβου (Noise Cancellation)** και ιδιαίτερα με τα **ακουστικά ακύρωσης θορύβου (Noise-Cancelling Headphones)**. Βέβαια, όπως θα διαπιστώσουμε λίγο αργότερα πιο σωστό θα ήταν να μιλούσαμε για **μείωση θορύβου (Noise Reduction)** και όχι για ακύρωση.

Θα δούμε λοιπόν κάποια βασικά στοιχεία της θεωρίας της ακύρωσης θορύβου στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου και στην συνέχεια θα ασχοληθούμε επισταμένα με τα Noise-Cancelling Headphones ανατρέχοντας λίγες δεκαετίες παλαιότερα ως μια μικρή ιστορική τους αναδρομή, αναλύοντας τις βασικές αρχές του σχεδιασμού τους και των εσωτερικών κυκλωμάτων τους (**Ενεργός Έλεγχος Θορύβου – Active Noise Control**) και θα ολοκληρώσουμε το κεφάλαιο αυτό με την ανάλυση του κυκλώματος που υλοποιήσαμε για τη χρησιμοποίηση του σε ακουστικά ακύρωσης θορύβου και με τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που εξάγαμε από αυτό.

Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να δοθούν πολύ συνοπτικά ορισμένα βασικά στοιχεία του μικροφώνου και των ακουστικών, αφού διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στην ποιότητα του τελικού αποτελέσματος.

9.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΚΥΡΩΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ

9.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο θόρυβος έχει αυξηθεί από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης. Ο θόρυβος έχει επιπτώσεις στην υγεία μας, στην ασφάλειά μας, παρεμποδίζει την ανθρώπινη επικοινωνία και μειώνει γενικά την ποιότητα ζωής μας. Ο έλεγχος του θορύβου μέσω παθητικών μέτρων (**passive noise control**) αποτελεί μια συνεχή προσπάθεια. Ενώ όμως ο **παθητικός έλεγχος θορύβου** μας παρείχε ικανοποιητικά αποτελέσματα για θορύβους υψηλής συχνότητας, αποδείχτηκε ανεπιτυχής για τον έλεγχο θορύβων μικρής συχνότητας (της τάξεως των 500 Hz και κάτω). Η ιδέα του Ενεργού Ελέγχου για χαμηλής συχνότητας θορύβους προτάθηκε για πρώτη φορά περισσότερα από 50 χρόνια πριν, όμως τότε ήταν ανεφάρμοστη. Παρόλα αυτά, η ραγδαία εξέλιξη στην επιστήμη και την τεχνολογία των υπολογιστών μετέτρεψαν τον ενεργό έλεγχο θορύβου μια πρακτική λύση για πολλά προβλήματα σχετιζόμενα με τον ακουστικό θόρυβο.

Η τεχνολογία του ενεργού ελέγχου θορύβου δεν καλύπτει τον θόρυβο. Ο θόρυβος μειώνεται λόγω της δημιουργίας ενός **σήματος αντιθορύβου (anti-noise signal)** το οποίο έχει το ίδιο πλάτος αλλά και διαφορά φάσης 180° με το σήμα του θορύβου. Μέσω κάποιων συγκεκριμένων τεχνικών, που θα δούμε παρακάτω, το σήμα του αντιθορύβου εισάγεται στο σήμα του θορύβου με αποτέλεσμα τα δύο σήματα να αλληλοεξουδετερώνονται και ο θόρυβος που υπάρχει είτε να ακυρώνεται είτε να μειώνεται κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό. Το πρώτο μεγάλο βήμα στην ιστορία του ενεργού ελέγχου θορύβου έγινε στα μέσα της δεκαετίας του 70 με τη χρήση **προσαρμοζόμενων φίλτρων (adaptive filters)** για τη δημιουργία του σήματος του αντιθορύβου. Αυτό ενίσχυσε πολύ την αποτελεσματικότητα των συστημάτων δεδομένου ότι μπορούσαν συνεχώς να προσαρμόζονται στις αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος τους καθώς επίσης και στις αλλαγές των στοιχείων τους.

Η δεύτερη σημαντικότερη εξέλιξη, η οποία έγινε ακριβώς την ίδια περίοδο, και διαδραμάτισε καταλυτικό ρόλο ήταν η παρατήρηση ότι πολλές πηγές θορύβου, ιδίως μηχανές που έχει κατασκευάσει ο ίδιος ο

άνθρωπος, παράγουν περιοδικό ή σχεδόν περιοδικό θόρυβο. Αυτό το γεγονός οδήγησε σε πιο αποτελεσματικές λύσεις καθώς η περιοδικότητα του θορύβου κατέστησε την προβλεψιμότητά του πολύ πιο ακριβή και επομένως και τη δημιουργία ενός σήματος αντιθορύβου πολύ πιο ακριβές. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να υπενθυμίσουμε και το πόσο σημαντικός ήταν ο διαχωρισμός μεταξύ θορύβου ευρείας ζώνης και στενής ζώνης που αναλύθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Η πρακτική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας έπρεπε ακόμα να περιμένει δεδομένου ότι η διαθέσιμη ηλεκτρονική τεχνολογία εκείνη την περίοδο δεν ήταν ικανοποιητική για την εφαρμογή των συστημάτων ενεργής ακύρωσης θορύβου. Τώρα η τεχνολογία ψηφιακών υπολογιστών έχει εξελιχθεί στο σημείο όπου οικονομικοί και αποδοτικοί μικροϋπολογιστές επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (Digital Signal Processing - DSP) μπορούν να εκτελέσουν τους σύνθετους υπολογισμούς που περιλαμβάνονται στην ακύρωση θορύβου. Αυτή η πρόοδος της τεχνολογίας έχει καταστήσει εφικτή την εφαρμογή της ενεργούς ακύρωσης σε χαμηλής συχνότητας θορύβους με λογικό κόστος.

9.1.2 ΠΑΘΗΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΟΡΥΒΟΥ (PASSIVE NOISE CONTROL)

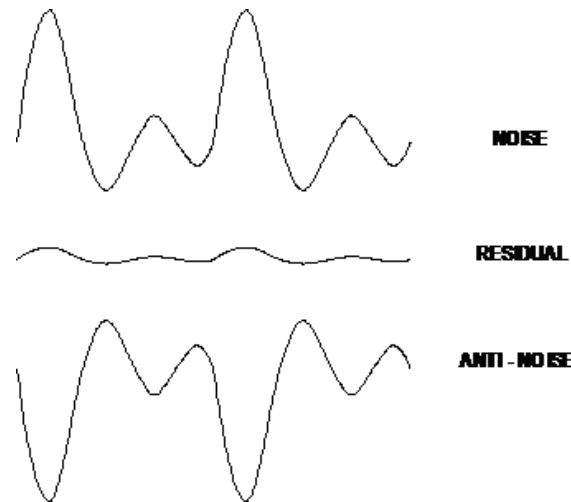
Ο παθητικός έλεγχος θορύβου βασίζεται στην ορθή πρακτική της Μηχανικής καθώς και στην απορρόφηση της ενέργειας.

Η πρώτη γραμμή αντίστασης έναντι στο θόρυβο είναι το ορθό σχέδιο. Η συμμετρία στο σχεδιασμό, η προσεκτική κατασκευή και η σωστή αεροδυναμική μπορούν να μειώσουν σημαντικά το θόρυβο.

Η δεύτερη γραμμή άμυνας είναι η χρησιμοποίηση παθητικών υλικών για την απορρόφηση της ενέργειας του θορύβου και των δονήσεων. Η τεχνική αυτή όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως έχει αποτέλεσμα για θορύβους συχνότητας μικρότερης των 500 Hz.

9.1.3 ΕΝΕΡΓΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΟΡΥΒΟΥ (ACTIVE NOISE CONTROL)

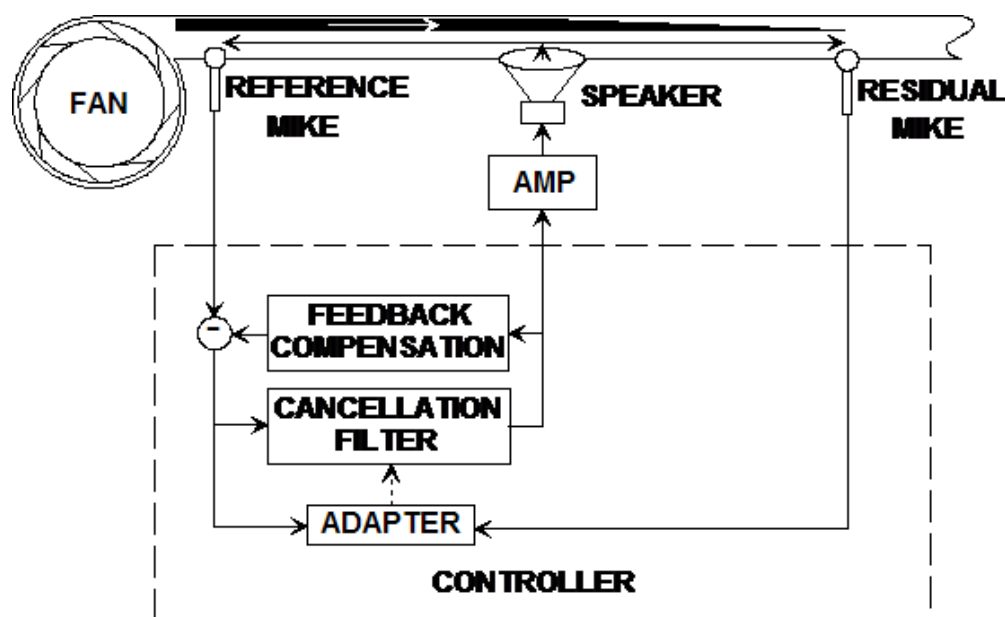
Η ιδέα της δημιουργίας ενός «αντίγραφου» του θορύβου, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως αντιθόρυβος για την ακύρωσή του φαίνεται σχηματικά στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 47 Το σήμα του θορύβου(Noise), του αντιθορύβου(Anti-Noise) και ο εναπομένων Θόρυβος (residual).

Τα συστήματα ενεργού ελέγχου θορύβου διακρίνονται σε δύο είδη. Στα συστήματα που χρησιμοποιούν **Feed Forward** έλεγχο και σε αυτά που χρησιμοποιούν **Feedback** έλεγχο.

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται ο Feed Forward ενεργός έλεγχος θορύβου ενός αεραγωγού, ο οποίος αποτελεί και το κλασικότερο παράδειγμα της ενεργούς ακύρωσης θορύβου.

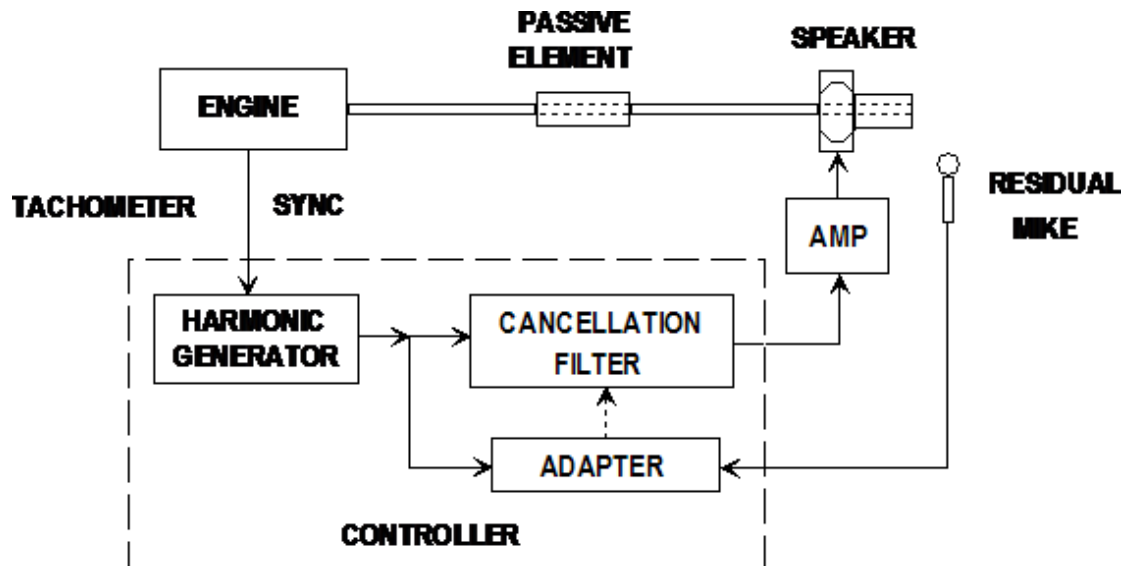


Εικόνα 48 Feed Forward Cancellation.

Ο feedforward ενεργός έλεγχος θορύβου χρησιμοποιεί κατά κανόνα δυο μικρόφωνα. Το πρώτο μικρόφωνο τοποθετείται κοντά στην πηγή του θορύβου και ονομάζεται *μικρόφωνο αναφοράς*. Το δεύτερο μικρόφωνο τοποθετείται σε ένα κεντρικό σημείο της περιοχής, στην οποία θέλουμε να δημιουργήσουμε μία ήσυχη ζώνη και ονομάζεται *μικρόφωνο σφάλματος*. Ο ρόλος του μικρόφωνου αναφοράς, το οποίο τροφοδοτεί στον ANC ελεγκτή το *σήμα αναφοράς*, είναι να παρέχει πληροφορία στον ελεγκτή σχετικά με τον επερχόμενο θόρυβο. Με αυτόν τον τρόπο ο ελεγκτής δύναται να προβλέψει το θόρυβο, ο οποίος θα αφιχθεί στην επιθυμητή ήσυχη ζώνη, και να τον εξασθενίσει. Ο ρόλος του μικρόφωνου σφάλματος είναι να μετράει τον εναπομείναντα θόρυβο και να τροφοδοτεί στον ANC ελεγκτή το λεγόμενο *σήμα σφάλματος*. Ο ελεγκτής οδηγεί το *ηχείο εξασθένισης* με ένα κατάλληλο σήμα, ονομαζόμενο αντι-θόρυβος, τέτοιο ώστε το σήμα σφάλματος να μειώνεται και συνεπώς και ο εναπομείναντας θόρυβος. Οι διατάξεις του feedforward ενεργού έλεγχου θορύβου, λειτουργούν αποτελεσματικά τόσο για θόρυβο στενής ζώνης όσο και για θόρυβο ευρείας ζώνης.

Αξίζει να σημειώσουμε, ότι ακόμα και όταν ο κύριος θόρυβος είναι σε υψηλό ποσοστό τυχαίος, εάν το σήμα αναφοράς αφιχθεί στον ANC ελεγκτή πιο γρήγορα από το διαδιδόμενο θόρυβο από την πηγή του στην περιοχή της ήσυχης ζώνης, τότε ο ελεγκτής έχει τη δυνατότητα να προβλέψει την κυματομορφή του θορύβου όταν αυτός προσεγγίζει την ήσυχη ζώνη, και συνεπώς εγκαίρως να συνθέσει το κατάλληλο σήμα αντιθορύβου. Η παραπάνω διάταξη πρακτικά επιτυγχάνει 6 με 10 dB (50% με 70%) μείωση του θορύβου στις χαμηλές συχνότητες.

Από την άλλη πλευρά ο Feedback ενεργός έλεγχος θορύβου αναπτύχθηκε κατά τα μέσα της δεκαετίας του 70 από τον G. B. B. Charlin. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ο Feedback ενεργός έλεγχος θορύβου της εξάτμισης μιας μηχανής.



Εικόνα 49 Ακύρωση θορύβου στενής ζώνης (Narrow Band Noise Cancellation).

Ο feedback ενεργός έλεγχος θορύβου χρησιμοποιεί κατά κανόνα μόνο ένα μικρόφωνο. Στην παραπάνω διάταξη δεν υπάρχει μικρόφωνο αναφοράς. Αυτό συνεπάγεται ότι ο ANC ελεγκτής δε δύναται να έχει κάποια εκ των προτέρων πληροφορία σχετικά με το θόρυβο, ο οποίος πλησιάζει την ήσυχη ζώνη. Παρόλα αυτά, αυτό, το οποίο δύναται να κάνει ο ελεγκτής, είναι αφού αφιχθεί ο θόρυβος, να αρχίσει να τον προβλέπει βασιζόμενος στα προηγούμενα δείγματα του. Συνεπώς, εάν ο κύριος θόρυβος είναι ευρείας ζώνης και συνεπώς μη προβλέψιμος, τότε ο ελεγκτής δε θα λειτουργήσει ικανοποιητικά, καθώς δεν υπάρχει κανένας τρόπος να προβλεφτεί ένα τυχαίο σήμα από τις προηγούμενες τιμές του. Έτσι, ο feedback ενεργός έλεγχος θορύβου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν ο θόρυβος προς εξασθένιση αποτελείται στο μεγαλύτερο ποσοστό του από περιοδικότητες, δηλαδή για θορύβους στενής ζώνης. Η χρησιμότητα του feedback ANC έγγυται στις περιπτώσεις εφαρμογών, όπου δεν είναι δυνατόν ή πρακτικό να χρησιμοποιηθεί μικρόφωνο αναφοράς.

Τα δύο παραπάνω είδη ενεργού ελέγχου θορύβου έχουν πάρα πολλές πρακτικές εφαρμογές. Μια από αυτές είναι τα ακουστικά ακύρωσης θορύβου (noise cancelling headphones), τα οποία θα μελετηθούν διεξοδικά αμέσως μετά.

9.2 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΑΚΥΡΩΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ (NOISE CANCELLING HEADPHONES)

9.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ακουστικά ακύρωσης θορύβου (Noise-cancelling headphones - NCH) μειώνουν τον ανεπιθύμητο ήχο, δηλαδή τον ακουστικό θόρυβο μέσω του ενεργού ελέγχου θορύβου (active noise control - ANC). Αυτό συνεπάγεται τη χρησιμοποίηση ενός μικροφώνου, τοποθετημένο κοντά στο αυτί, και ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος το οποίο παράγει το σήμα του αντιθορύβου με διαφορά φάσης 180° από το σήμα του θορύβου που λαμβάνει το μικρόφωνο. Αυτό οδηγεί στην ακύρωση του θορύβου εντός των ακουστικών.

Η μείωση του θορύβου μας επιτρέπει να απολαύσουμε τη μουσική με πολύ μεγαλύτερη ποιότητα, αλλά και να απολαύσουμε ένα «αθόρυβο» ταξίδι μέσα σε ένα μέσο μεταφοράς που παράγει θόρυβο, όπως πχ το αεροπλάνο.

Τα NCH χρησιμοποιούν τον ANC για να ακυρώσουν τον χαμηλής συχνότητας θόρυβο και παραδοσιακές τεχνικές παθητικού ελέγχου για να μειώσουν τους θορύβους υψηλότερων συχνοτήτων. Αυτή η προσέγγιση έχει τρία σημαντικά πλεονεκτήματα.

Πρώτον, το ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι αρκετά απλοποιημένο.

Δεύτερον, δεν χρησιμοποιείται ANC για υψηλότερης συχνότητας θορύβους, ο οποίος ενεργός έλεγχος δεν είναι ούτως ή άλλως πολύ αποτελεσματικός για αυτές τις συχνότητες λόγω του μικρότερου μήκους κύματος αυτών των σημάτων και επιπλέον για να είχε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα θα έπρεπε το μικρόφωνο να τοποθετηθεί πολύ κοντά στο τύμπανο του αυτιού, πράγμα πρακτικά σχεδόν αδύνατο.

Τρίτον, ο παθητικός έλεγχος είναι πιο αποτελεσματικός για υψηλές συχνότητες λόγω του μικρότερου μήκους κύματος.

9.2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τα πρώτα συστήματα ακουστικών ακύρωσης θορύβου που δημιουργήθηκαν είχαν ως σκοπό να ακυρώσουν το θόρυβο στα

πυλοτήρια ελικοπτέρων και αεροπλάνων. Αυτά τα συστήματα κατοχυρώθηκαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Lawrence J. Fogel στη δεκαετία του 50 και του 60. Ο Amar Bose (ιδρυτής της εταιρίας Bose) άρχισε την εργασία του για τα ακουστικά ακύρωσης θορύβου το 1978 σε ένα αεροπλάνο. Κατά τη διάρκεια της διεθνούς πτήσης, του παραδόθηκαν ακουστικά από την αερογραμμή και αμέσως συνειδητοποίησε πόσο δυσάρεστος ήταν με την ποιότητά τους σε συνδυασμό με το δυνατό θόρυβο των μηχανών. Μετά από μια δεκαετία έρευνας, ο Bose ολοκλήρωσε τα πρώτα ακουστικά ακύρωσης θορύβου που βγήκαν ποτέ στην αγορά το 1989. Από τότε πολλές άλλες εταιρίες (όπως η Panasonic και η Sony) έχουν συμβάλει με τα δικά τους NCH. Η εταιρία Sennheiser ήταν επίσης πρωτοπόρος στα NCH.



Εικόνα 50 Τα πρώτα ακουστικά ακύρωσης θορύβου (1989).

Στις μέρες μας, οι περισσότερες εταιρείες που κατασκευάζουν NCH χρησιμοποιούν αναλογική τεχνολογία συμπεριλαμβανομένων των εταιριών Bose, Panasonic, AKG, Sony, Sennheiser και άλλων. Αυτό είναι σε αντίθεση με άλλες μορφές ενεργού ελέγχου θορύβου στις οποίες η ψηφιακή επεξεργασία είναι μονόδρομος.



Εικόνα 51 Σύγχρονα ακουστικά (2002)



Εικόνα 52 Σύγχρονα ακουστικά (2006)

Η Sony υπήρξε η πρώτη εταιρία που κατασκεύασε ακουστικά ακύρωσης θορύβου που τοποθετούνται στο εσωτερικό του αυτιού (οι γνωστές σε όλους μας ψείρες)!



Εικόνα 53 Sony noise cancellation in-ear Headphone.

Σήμερα κάποιες αεροπορικές εταιρίες προμηθεύουν τους επιβάτες τους με NCH. Τα NCH είναι πολύ αποτελεσματικά στην ακύρωση του θορύβου της μηχανής του αεροπλάνου. Σε αυτά τα ακουστικά το ηλεκτρονικό κύκλωμα που παράγει το σήμα του αντιθορύβου είναι τοποθετημένο στο μπράτσο του καθίσματος του επιβάτη.

9.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΗΣ

ΑΚΥΡΩΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ (ACTIVE NOISE REDUCTION HEADPHONE SYSTEMS)

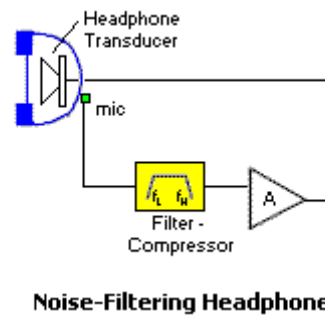
Τα ακουστικά ακύρωσης θορύβου, τα οποία στο εξής θα τα αναφέρουμε ως NCHs (Noise cancellation headphones), συμπληρώνουν τα ηχομονωτικά χαρακτηριστικά των ακουστικών με τον ενεργό έλεγχο θορύβου. Από το σχεδιασμό τους τα NCHs μπλοκάρουν ένα ποσοστό του εξωτερικού θορύβου διότι τα ακουστικά τον απορροφούν. Όμως τα NCHs προχωρούν ένα βήμα παραπέρα και μειώνουν τον θόρυβο που καταφέρνει να περάσει από τα ακουστικά στο αυτί. Σε ένα θορυβώδες εργασιακό περιβάλλον, τα NCHs προστατεύουν την ακοή των εργατών οι οποίοι υποβάλλονται σε υψηλά επίπεδα θορύβου καθημερινώς. Στις επικοινωνίες τα NCHs διευκολύνουν την αντιληπτικότητα της ομιλίας. Στον μέσο καταναλωτή τα NCHs επιτρέπουν να απολαύσει τη μουσική της αρεσκείας του σε αεροπλάνα, τρένα ή σε άλλες περιπτώσεις παρουσία συνεχούς και ενοχλητικού θορύβου.

Όλα τα NCHs βασίζονται στην παραγωγή ενός σήματος αντιθορύβου για να ακυρώσουν ή να μειώσουν τον θόρυβο. Παρόλα αυτά, για την επίτευξη αυτού του σκοπού χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε τα κυριότερα συστήματα NCHs, τα οποία είναι: **ανοιχτού βρόχου (open loop), κλειστού βρόχου (closed loop) και προσαρμοζόμενα (adaptive).**

9.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πρώτα συστήματα ακουστικών που χρησιμοποιούσαν ηλεκτρονικές μεθόδους για να περιορίσουν το θόρυβο εμφανίστηκαν στις δεκαετίες του 60 και του 70. Ουσιαστικά ήταν ακουστικά φιλτραρίσματος θορύβου (noise filtering headphones), στα οποία το ηλεκτρονικό τους

μέρος αποτελούνταν από ζωνοπερατά φίλτρα και περιοριστές (audio limiters), ώστε να ελαττώνουν τον θόρυβο ψαλιδίζοντας τις υψηλές και τις χαμηλές συχνότητες του ηχητικού σήματος και εξομαλύνοντας το πλάτος πριν την τελική έξοδο στα ακουστικά.

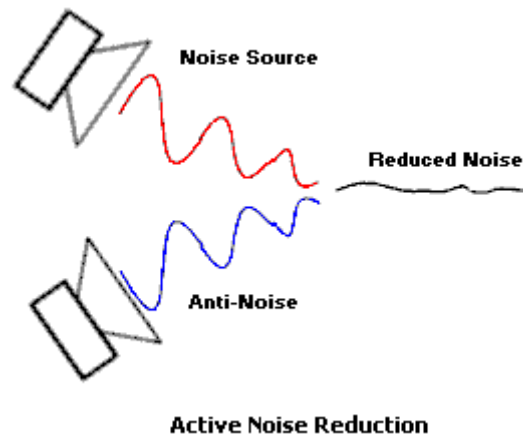


Εικόνα 54 Ακουστικά φιλτραρίσματος θορύβου.

Τα ακουστικά αυτά βασίζονταν περισσότερο στην παθητική μείωση του θορύβου. Τα ζωνοπερατά φίλτρα δεν ήταν τόσο αποδοτικά στη μείωση του θορύβου και για αυτό το λόγο δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που απαιτούσαν μεγαλύτερη αξιοπιστία. Τα noise filtering headphones εξελίχθηκαν στα NCHs, τα οποία ακυρώνουν το θόρυβο με ενεργές μεθόδους μέσω του σήματος του αντιθορύβου.

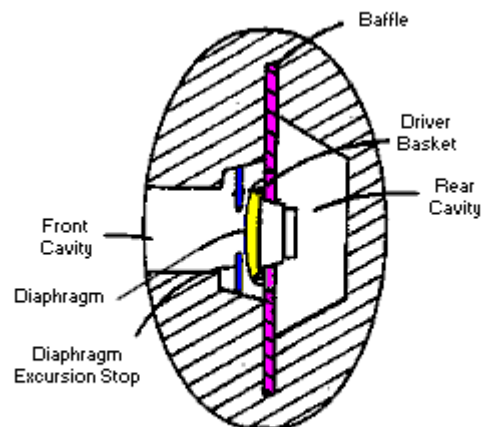
Η τεχνική αυτή που χρησιμοποιεί τον αντιθόρυβο βασίζεται στην Αρχή της Υπέρθεσης. Όταν συνδυάζονται δύο σήματα τα οποία είναι ακριβώς ίσα αλλά έχουν διαφορά φάσης 180° , τότε το αποτέλεσμα της υπέρθεσης τους είναι να αλληλοεξουδετερωθούν. Εάν το σήμα του αντιθορύβου δεν είναι ακριβές αντίγραφο του σήματος του θορύβου ή εάν δεν έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης ακριβώς 180° , τότε η υπέρθεση τους θα εξασθενίσει το θόρυβο, αλλά δεν θα τον ακυρώσει.

Τα NCHs έχουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα που παράγουν το σήμα του αντιθορύβου. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται συστήματα ενεργής μείωσης θορύβου (active noise reduction -ANR-systems).



Εικόνα 55 Ενεργή μείωση θορύβου.

Τα NCHs βασίζονται τόσο στην παθητική ηχομόνωση των ακουστικών όσο και στην ANR ώστε να παρέχουν μείωση θορύβου ευρείας ζώνης. Τα ακουστικά μπορούν να αποκλείσουν με παθητικές μεθόδους τον θόρυβο υψηλής συχνότητας (άνω των 500 Hz). Σε αυτές τις υψηλές συχνότητες τα καλά σχεδιασμένα ακουστικά μπορούν να μειώσουν παθητικά τον θόρυβο κατά 30 dB περίπου. Η απόδοση τους εξαρτάται από το πόσο καλά τα ακουστικά εφαρμόζουν στο αυτί ώστε να μην δημιουργούνται κενά και εισχωρεί θόρυβος στο αυτί, από την ποιότητα κατασκευής των ακουστικών και από την ηχητική απορροφητικότητα των υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί.



High Compliance Driver For Headphone ANR

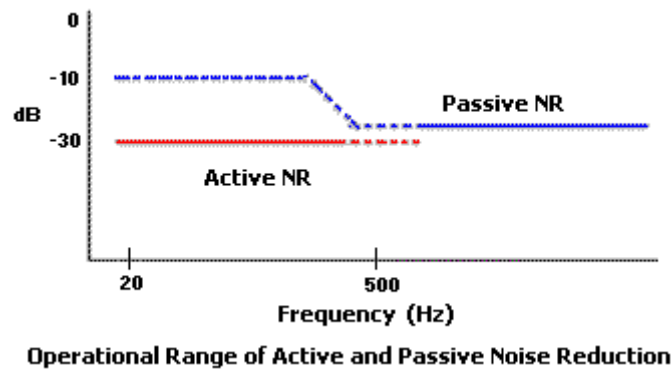
(Src: R. Sapiejewski, Patent No. 5,181,252)

Εικόνα 56 Σχεδίαση ακουστικού για βέλτιστο παθητικό έλεγχο.

Στις χαμηλές συχνότητες που η παθητική μείωση δεν είναι αποδοτική, χρησιμοποιείται η ANR, η οποία ενεργή μείωση δεν είναι τόσο

αποδοτική στις υψηλές συχνότητες λόγω των περιορισμών των φίλτρων που χρησιμοποιεί και των μετατροπών των ακουστικών να αναπαράγουν ακριβή σήματα αντιθορύβου μεγάλης συχνότητας.

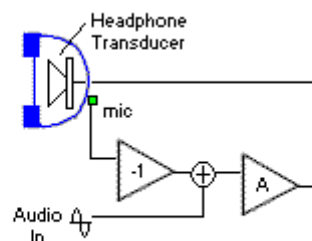
Μείωση θορύβου ευρείας ζώνης δεν απαιτείται σε όλες τις εφαρμογές και πολλά NCH είναι αποδοτικά στη μείωση θορύβου χαμηλής συχνότητας μόνο.



Εικόνα 57 Λειτουργικό εύρος ενεργής και παθητικής μείωσης.

9.3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ (OPEN LOOP SYSTEMS)

Τα ANR συστήματα δημιουργούν το σήμα του αντιθορύβου, αφού πρώτα συλλέξουν το θόρυβο μέσω ενός μικροφώνου. Στα συστήματα ανοιχτού βρόχου το μικρόφωνο τοποθετείται ακριβώς έξω από το ακουστικό.



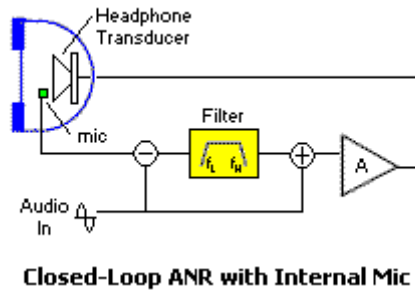
Open-Loop ANR with External Mic

Εικόνα 58 Σύστημα ανοιχτού βρόχου.

Ένας αναστρέφων ενισχυτής παράγει το σήμα αντιθορύβου, το οποίο εν συνεχεία οδηγείται στον μετατροπέα(transducer) του ακουστικού μαζί με το επιθυμητό ηχητικό σήμα. Το σήμα του αντιθορύβου ακυρώνει τον εξωτερικό θόρυβο καθιστώντας το επιθυμητό ηχητικό σήμα ευκολότερα καταληπτό. Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου έχουν το πλεονέκτημα της απλότητας, αλλά δεν λειτουργούν τόσο ικανοποιητικά όσο άλλοι τύποι NCH. Αυτό συμβαίνει διότι το μικρόφωνο είναι τοποθετημένο στο εξωτερικό μέρος του ακουστικού και ο θόρυβος που συλλέγει δεν είναι ακριβές αντίγραφο του θορύβου στο εσωτερικό του ακουστικού και του αυτιού. Επομένως, σε κάποιες περιπτώσεις, το σήμα του αντιθορύβου μπορεί ακόμα και να εισάγει θόρυβο στα ακουστικά! Σε ένα μέσο σύστημα ANR ανοιχτού βρόχου επιτυγχάνεται μείωση θορύβου κατά 10 με 15 dB. Αρκετά NCH που κυκλοφορούν στην αγορά χρησιμοποιούν ANR συστήματα ανοιχτού βρόχου.

9.3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ(CLOSED LOOP SYSTEMS)

Ένα πιο ακριβές σήμα αντιθορύβου επιτυγχάνεται αν το μικρόφωνο τοποθετηθεί εντός του ακουστικού. Έτσι δημιουργείται ένα κλειστό ηλεκτρονικό ANR κύκλωμα διότι το μικρόφωνο σε αυτήν την περίπτωση συλλέγει και τον θόρυβο που υπάρχει μέσα στο ακουστικό και το ηχητικό σήμα που ο μετατροπέας εκπέμπει. Αυτό το σήμα επιστέφει μέσω αρνητικής ανάδρασης στο επιθυμητό ηχητικό σήμα σαν ένα σήμα διόρθωσης σφάλματος του θορύβου. Ως εκ τούτου αυτά τα NCHs καλούνται συστήματα κλειστού βρόχου. Η λειτουργία τους είναι χαρακτηριστική λόγω της αρνητικής ανάδρασης και αποτελεί αντικείμενο της θεωρίας αυτομάτου ελέγχου. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτομάτου ελέγχου ο θόρυβος αντιμετωπίζεται σαν μια μη γραμμικότητα, η οποία μπορεί να αμβλυνθεί ή να εξαλειφθεί εφαρμόζοντας ένα σήμα διόρθωσης στο σύστημα. Στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα φαίνεται ένα NCH με κλειστού βρόχου ANR.

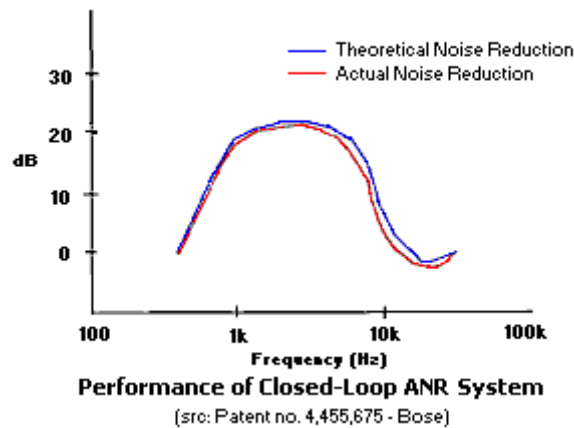


Εικόνα 59 Σύστημα ANR κλειστού βρόχου.

Ένα μικρόφωνο τοποθετείται εντός του ακουστικού και συλλέγει τον ήχο που είναι μίξη του επιθυμητού σήματος και του θορύβου. Το πρώτο στάδιο της ANR αφαιρεί το επιθυμητό ηχητικό σήμα και αντιστρέφει το εναπομένον σήμα που είναι το σήμα του θορύβου. Το επόμενο στάδιο αντισταθμίζει το αντεστραμμένο σήμα του θορύβου για λόγους ευστάθειας του συστήματος κλειστού βρόχου. Το στάδιο εξόδου οδηγεί το σήμα του αντιθορύβου και το επιθυμητό σήμα στα ακουστικά. Λόγω της αρνητικής ανάδρασης, τα συστήματα κλειστού βρόχου είναι δυνατόν να γίνουν ασταθή κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Η μείωση του θορύβου σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου υπολογίζεται από την εξίσωση: $H = H_c / (1 - H_c * H_f)$, όπου H_c είναι η συνάρτηση μεταφοράς του κοιλώματος του ακουστικού και H_f η συνάρτηση μεταφοράς της ανάδρασης της ANR. Όσο μεγαλύτερη είναι η H_f τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση του θορύβου. Το σημείο της μεγαλύτερης εξασθένισης είναι στη θέση του μικροφώνου.

Η ευστάθεια ενός συστήματος με αρνητική ανάδραση μπορεί να καθοριστεί από την ανάλυση κατά Nyquist-Bode στο πεδίο της συχνότητας. Ενώ η ευστάθεια των συστημάτων ανοιχτού βρόχου είναι ανεξάρτητη του κέρδους, τα συστήματα κλειστού βρόχου με αρνητική ανάδραση είναι ευσταθή μέσα σε συγκεκριμένα όρια κέρδους και φάσης. Έξω από αυτά τα όρια, το κέρδος πρέπει να είναι μικρότερο της μονάδας για να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.

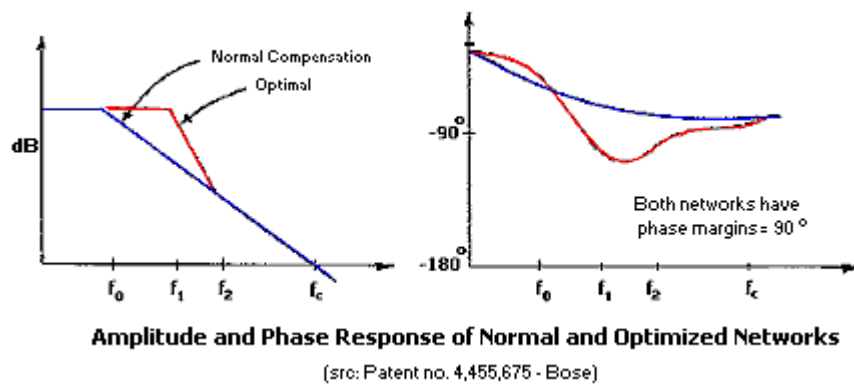


Εικόνα 60 Συμπεριφορά συστήματος ANR κλειστού βρόχου.

Πιο συγκεκριμένα τα συστήματα ANR κλειστού βρόχου είναι επιρρεπή σε μεταπτώσεις λόγω των μεγάλων μετατοπίσεων φάσης του σήματος της ανάδρασης, η οποία προκαλείται από τη χρονική καθυστέρηση λόγω της απόστασης του μικροφώνου με τον μετατροπέα και λόγω εγγενών καθυστερήσεων του μικροφώνου και του μετατροπέα. Η πρώτη αιτία μετατοπίσεως της φάσης αντιμετωπίζεται τοποθετώντας το μικρόφωνο όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον μετατροπέα.

Η δεύτερη αιτία αντιμετωπίζεται με ένα βαθυπερατό φίλτρο το οποίο προσαρμόζει τις υψηλές συχνότητες του σήματος της ανάδρασης, γεγονός όμως που περιορίζει το λειτουργικό εύρος του ANR συστήματος σε χαμηλές συχνότητες. Τέλος, ένα υψιπερατό φίλτρο εμποδίζει τις μεταπτώσεις που προκαλούνται από απότομες κινήσεις του κεφαλιού του ακροατή.

Το κύκλωμα αντιστάθμισης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του συστήματος αφού εξασφαλίζει την ευστάθεια. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται δύο ειδών κυκλώματα αντιστάθμισης: το κανονικό (**normal**) και το βελτιστοποιημένο (**optimized**). Στο επόμενο σχήμα παρατηρούμε την απόκριση πλάτους και φάσης του καθενός.

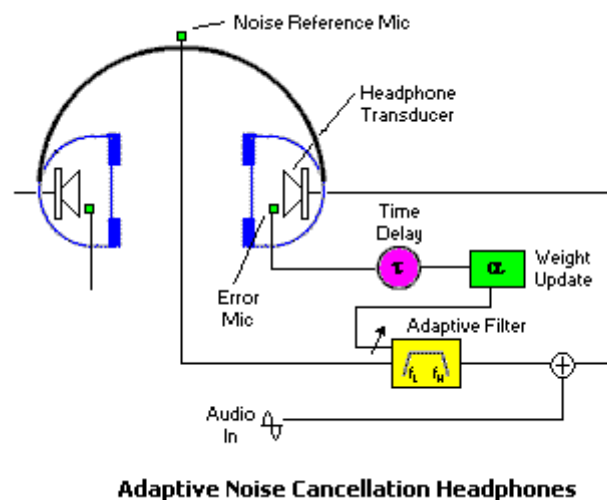


Εικόνα 61 Απόκριση πλάτους και ύψους κυκλώματος αντιστάθμισης.

Τα συστήματα ANR κλειστού βρόχου μας παρέχουν μείωση θορύβου μέχρι και 30 dB όταν συνδυάζουν την ANR με υψηλού επιπέδου παθητικό έλεγχο θορύβου.

9.3.4 ΠΡΟΣΑΡΜΟΖΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ(ADAPTIVE NOISE REDUCTION)

Τα συστήματα ANR κλειστού και ανοιχτού βρόχου χρησιμοποιούν αναλογικά φίλτρα κατά την παραγωγή του σήματος αντιθορύβου. Τα ψηφιακά φίλτρα όμως είναι πιο ευέλικτα και πιο λειτουργικά. Τα ψηφιακά φίλτρα που χρησιμοποιούνται στην ακύρωση θορύβου ονομάζονται προσαρμοζόμενα φίλτρα και έχουν την ικανότητα να διορθώνουν σφάλματα φάσης και πλάτους.

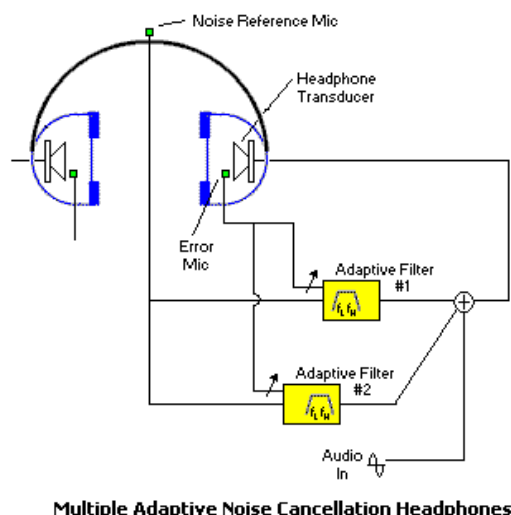


Εικόνα 62 NCH με προσαρμοζόμενα φίλτρα.

Ένα μικρόφωνο αναφοράς που είναι τοποθετημένο στην κορυφή του συστήματος των ακουστικών λαμβάνει ένα σήμα θορύβου. Το προσαρμοζόμενο φίλτρο επιχειρεί να προβλέψει το θόρυβο μέσα στα ακουστικά εφαρμόζοντας στο σήμα αυτό μια συγκεκριμένη συνάρτηση μεταφοράς. Έπειτα, το αντίστροφο σήμα του προβλεπόμενου θορύβου μαζί με το επιθυμητό ηχητικό σήμα οδηγούνται στον μετατροπέα (μεγάφωνο) του ακουστικού. Ένα δεύτερο μικρόφωνο τώρα που βρίσκεται εντός του ακουστικού λαμβάνει τον ήχο που προκύπτει από τη μίξη των δύο σημάτων και παράγει ένα σήμα σφάλματος για τη δημιουργία πιο ακριβούς σήματος αντιθορύβου. Είναι προφανές ότι σωστή πρόβλεψη σημαίνει ότι το σήμα σφάλματος θα τείνει στο μηδέν.

Ο ελεγκτής στο προσαρμοζόμενο φίλτρο χρησιμοποιεί τον LMS (least means square) αλγόριθμο, ο οποίος είναι προορισμένος για ευρυζωνική λειτουργία. Το μειονέκτημα του LMS φίλτρου είναι ότι χρειάζεται εκ νέου ρύθμιση σε τυχούσες αλλαγές στο μονοπάτι της ανάδρασης (πχ θερμοκρασιακές μεταβολές, κάποιο άλλο άτομο να δοκιμάσει τα ακουστικά κτλ). Εάν ο θόρυβος είναι στενής ζώνης, η απόδοση του LMS φίλτρου θα μειωθεί. Η λύση σε αυτή την περίπτωση είναι η χρησιμοποίηση ενός IIR (infinite impulse response) φίλτρου. Το φίλτρο αυτό μοντελοποιεί καλύτερα το ακουστικό σύστημα και το μονοπάτι της ανάδρασης, διότι έχει το χαρακτηριστικό να παρέχει άπειρη απόκριση και επιπλέον έχει feedforward και feedback τμήματα που παράγουν πόλους και μηδενικά. Ο επαναλαμβανόμενος LMS αλγόριθμος, ο οποίος αποτελείται από δύο LMS φίλτρα, δύναται να προσαρμόσει το συντελεστή του φίλτρου. Το επαναλαμβανόμενο LMS φίλτρο μπορεί να προσαρμοστεί σε αλλαγές στο μονοπάτι της ανάδρασης, χωρίς επαναρύθμιση, μεταβάλλοντας τους συντελεστές του φίλτρου μέσω μιας σταθεράς χρονικής καθυστέρησης, η οποία επιλέγεται για συγκεκριμένη περιοχή ευστάθειας. Η σταθερά χρονικής καθυστέρησης εξομοιώνει τη συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ του μικροφώνου σφάλματος και του μεγαφώνου του ακουστικού αλλά και είναι ικανή να αντισταθμίσει τη μετατόπιση φάσης ανάμεσα στη συνάρτηση μεταφοράς του μικροφώνου σφάλματος και του ηχείου, η οποία μετατόπιση είναι η αιτία της αστάθειας στα συμβατικά προσαρμοζόμενα φίλτρα. Το προσαρμοζόμενο φίλτρο πρέπει να είναι

ευσταθές ώστε να τείνει στην μόνιμή του κατάσταση. Εάν μια χρονική καθυστέρηση οδηγεί σε μια ευσταθή περιοχή που είναι πάρα πολύ περιορισμένη σε εύρος ζώνης, ο θόρυβος μπορεί να διαιρεθεί σε δύο ή περισσότερες ζώνες συχνότητας και κάθε ζώνη να αντιμετωπιστεί από ένα ξεχωριστό προσαρμοζόμενο φίλτρο με διαφορετικές καθυστερήσεις (Εικόνα 62).

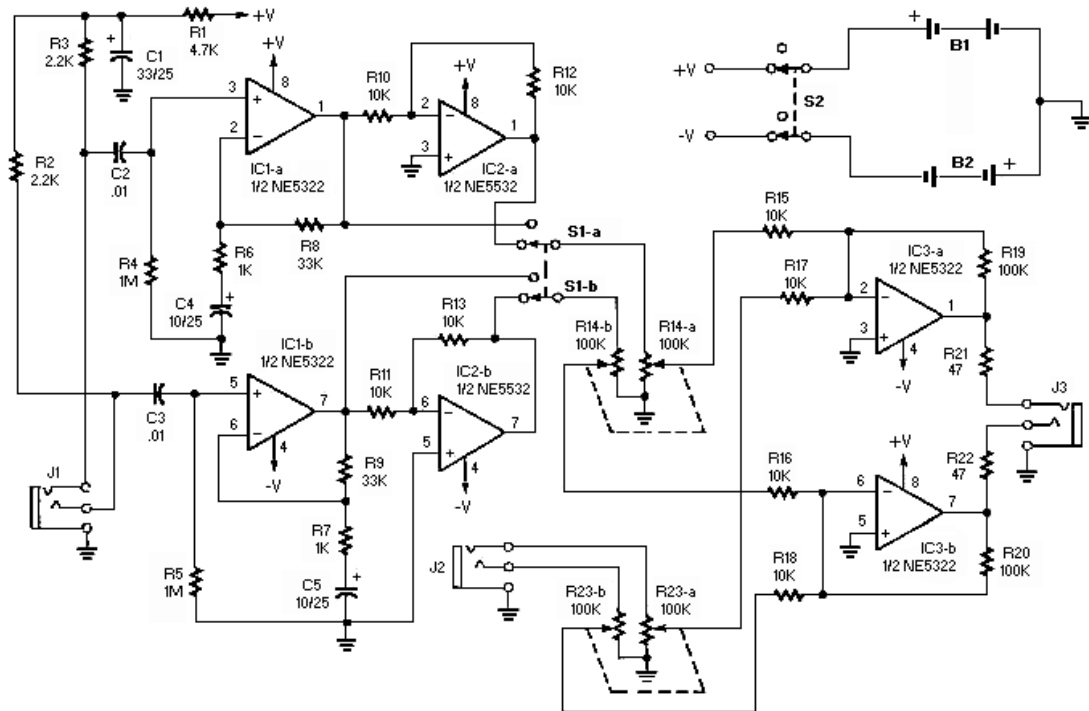


Εικόνα 63 Επαναλαμβανόμενο (recursive) LMS filter .

Μια καθυστέρηση μπορεί να έχει μια απόκριση φάσης η οποία να είναι ανίκανη να σταθεροποιήσει τη φάση του συστήματος.

9.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Το κύκλωμα που κατασκευάσαμε είναι ένα κύκλωμα ανοιχτού βρόχου. Το κύκλωμα αποτελείται από τρία στάδια. Κάθε στάδιο είναι κατασκευασμένο γύρω από ένα NE5532 dual op-amp. Το κάθε ολοκληρωμένο χρησιμοποιείται σε κάθε στάδιο σε διαφορετική διάταξη. Το πρώτο στάδιο είναι ένας μη αναστρέφων προενισχυτής, το δεύτερο είναι ένας αντιστροφέας φάσης μοναδιαίου κέρδους και το τρίτο είναι ένας αναστρέφων ενισχυτής για οδήγηση σε ακουστικά. Αφού η διάταξη μας είναι στερεοφωνική, το κύκλωμα μας αποτελείται από δύο πανομοιότυπα κυκλώματα, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η περιγραφή του ενός μόνο καναλιού. Η λειτουργία του δεύτερου καναλιού είναι ακριβώς η ίδια. Το κύκλωμα που κατασκευάστηκε είναι το παρακάτω:



Εικόνα 64 Το κύκλωμά μας για noise cancelling headphones.

Όπου,

R1 - 4.7Kohm

R2, R3 - 2.2Kohm

R4, R5 - 1M

R6, R7 - 1Kohm

R8, R9 - 33Kohm

R10-13, R15-18 - 10Kohm

R14, R23 - 100Kohm pot, dual-gang, linear taper

R19, R20 - 100Kohm

R21, R22 - 47 ohm

IC1-3 - NE5532 dual audio op-amp

C1 - 33uF, 25WVDC, electrolytic capacitor

C2, C3 - 0.01uF Mylar capacitor

C4, C5 - 10uF, 25 WVDC, electrolytic capacitor

J1-3 - Audio jacks, 1/8-inch, stereo

S1- Dpdt toggle switch

Ένα μικρόφωνο τοποθετείται στην υποδοχή J1, η οποία είναι ένα 1/8-inch stereo jack. Αναλόγως του είδους του, ένα μικρόφωνο απαιτεί μία

τάση γύρω στα 2-10V για να λειτουργήσει το εσωτερικό του κύκλωμα.

Αυτή η τάση παρέχεται από την τάση τροφοδοσίας μέσω της αντίστασης R2. Ένας διαιρέτης τάσης δημιουργείται από την αντίσταση R1 και τον πυκνωτή C1. Ο διαιρέτης τάσης είναι απαραίτητος λόγω του μεγάλου κέρδους της διαδρομής που ακολουθεί το σήμα.

Το σήμα από το μικρόφωνο οδηγείται στο πρώτο ολοκληρωμένο, το IC1-a, το οποίο έχει τη διάταξη ενός τυπικού μη αναστρέφοντος προενισχυτή. Το κέρδος του είναι $1 + R_8/R_6$. Το συνολικό κέρδος του σταδίου είναι περίπου 31 dB. Η αντίσταση R4 παρέχει μία ground reference για τον προενισχυτή. Δύο υψιπερατά φίλτρα σχηματίζονται: το ένα από την R4 και τον C2 και το δεύτερο από τον C4 και την R6.

Αυτά τα φίλτρα μπλοκάρουν κάθε DC που προσπαθεί να περάσει από τον προενισχυτή.

Από την έξοδο του προενισχυτή το σήμα ακολουθεί δύο διαφορετικά μονοπάτια. Οδηγείται και στον ένα πόλο του διακόπτη S1-a και στο δεύτερο στάδιο, αυτό του αντιστροφέα φάσης. Ο αντιστροφέας φάσης δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένα δεύτερο NE5532 σε διάταξη ενός τυπικού αντιστροφέα μοναδιαίου κέρδους (IC2-a). Η έξοδος του IC2-a συνδέεται με τον άλλο πόλο του διακόπτη S1-a. Με αυτόν τον τρόπο ο διακόπτης μπορεί να επιλέξει είτε το αντεστραμμένο είτε το μη αντεστραμμένο σήμα. Το επιλεγμένο σήμα από το διακόπτη S1-a οδηγείται στο ποτενσιόμετρο R14-a. Το ποτενσιόμετρο αυτό θέτει τη στάθμη του σήματος που θα εισέλθει στον ενισχυτή ακουστικών.

Ο ενισχυτής ακουστικών είναι κατασκευασμένος γύρω από το IC3-a, ένα τρίτο NE5532 σε διάταξη αναστρέφοντος ενισχυτή. Το κέρδος του καθορίζεται από το λόγο R_{19}/R_{15} . Αυτός ο τρόπος συνδεσμολογίας μπορεί να τροποποιηθεί εύκολα για την πρόσθεση κι άλλου γνωρίσματος μέσω της συμπίληψης της αντίστασης R17. Η δεύτερη είσοδος είναι μια βοηθητική είσοδος η στάθμη της οποίας καθορίζεται από το ποτενσιόμετρο R23-a.

Ο λόγος που επιλέξαμε οι τιμές των αντιστάσεων R15 και R17 να είναι 10K Ω είναι αφενός για να έχουμε τις τιμή της αντίστασης R19 ελέγξιμη (σε λογικά επίπεδα) και αφετέρου για να αποκτήσουν τα ποτενσιόμετρα λογαριθμική συμπεριφορά, λόγω της αλληλεπίδρασης των αντιστάσεων R17 και R15 των 10K Ω με τα δύο γραμμικά ποτενσιόμετρα των 100K Ω .

Ο ένας ακροδέκτης του ποτενσιόμετρου συνδέεται στη γη διότι το χρησιμοποιούμε σαν διαιρέτη τάσης. Επειδή ο μη αναστρέφων ακροδέκτης εισόδου (3) είναι γειωμένος, η $10\text{K}\Omega$ αντίσταση είναι και αυτή θεωρητικά γειωμένη. Αυτό επηρεάζει την απόκριση του ποτενσιόμετρου: όσο το ποτενσιόμετρο περιστρέφεται, υπάρχει μια ευδιάκριτη αύξηση της εξόδου καθώς το ποτενσιόμετρο πλησιάζει το τέλος της διαδρομής του. Αυτό προκαλεί μια αύξηση της αντιλαμβανόμενης ακουστότητας του σήματος.

Η έξοδος του αναστρέφοντος ενισχυτή συνδέεται μέσω της αντιστάσεως R21 στην υποδοχή J3. Η αντίσταση αυτή παρέχει προστασία υπερφόρτωσης στο ολοκληρωμένο IC3-a. Το NE5532 παρέχει ένα 10-volt rms σήμα στο φορτίο των 600-ohm με πολύ μικρή παραμόρφωση. Αυτό ισοδυναμεί με ισχύ 166 mW, την ώρα που τα περισσότερα στερεοφωνικά συγκροτήματα παρέχουν 20 με 30 mW ισχύ στα ακουστικά.

Μία τελευταία σημείωση για τα op-amp. Τα πιο συνηθισμένα δεν είναι ικανά να παρέχουν το ηλεκτρικό ρεύμα που απαιτείται για τη λειτουργία του κυκλώματος. Κάποια άλλα ολοκληρωμένα που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στη θέση του NE5532 είναι το OP275 της Analog Devices, το OPA2604 της Burr Brown και το LM833 της National Semiconductor.

9.5 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ-ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ

Σε αυτό το σημείο και πριν παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που εξάγαμε από τη δοκιμή της πλακέτας μας, θα ήταν πολύ χρήσιμο να παρουσιάσουμε πολύ σύντομα κάποια χαρακτηριστικά των μικροφώνων και των ακουστικών, αφού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του τελικού αποτελέσματος.

9.5.1 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ

Τα ακουστικά που χρησιμοποιήσαμε κατά τη δοκιμή της πλακέτας ήταν τα ακουστικά HD 465 της sennheiser.



Εικόνα 65 sennheiser HD 465.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μοντέλου είναι τα εξής:
ΕΜΠΕΔΗΣΗ

Η εμπέδηση εκφράζει την AC αντίσταση του σετ των ακουστικών. Η εμπέδηση εξαρτάται από τη συχνότητα και τυπικά δίδεται το μέγεθος της για συχνότητα 1 kHz, η οποία ονομάζεται ονομαστική εμπέδηση. Η ονομαστική εμπέδηση των ακουστικών μας είναι 32 Ω.

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ

Χρησιμοποιεί ηλεκτροδυναμικούς μετατροπείς. Αυτοί οι μετατροπείς αποτελούνται από ένα μόνιμο μαγνήτη σχήματος δακτυλιδιού και από ένα ταλαντευόμενο πηνίο, το οποίο είναι προσαρμοσμένο στο διάφραγμα του δέκτη. Όταν μια συχνότητα διέρχεται από το πηνίο, του προκαλεί δονήσεις ανάλογες της συχνότητας και μεταβάλλεται το ρεύμα που το διαρρέει, με αποτέλεσμα το διάφραγμα να δονείται με τον ίδιο τρόπο.

ΕΥΡΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Τα ακουστικά αποκρίνονται αποδοτικά για συχνότητες 18 - 21500 Hz.

ΣΤΑΘΜΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Με πίεση αναφοράς τα 0 dB (κατώφλι ακοής), τα ακουστικά έχουν στάθμη ηχητικής πίεσης ίση με 110 dB.

ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

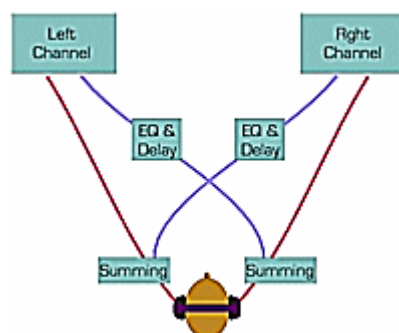
Η συνολική αρμονική παραμόρφωση (total harmonic distortion) είναι το μέτρο της μη γραμμικής αρμονικής παραμόρφωσης και μετρείται σε

ποσοστιαίες μονάδες. Οι μη γραμμικές αρμονικές παραμορφώσεις είναι σήματα τα οποία δεν ήταν παρόντα στο αρχικό σήμα πριν τη μετατροπή του από τα ακουστικά. Αυτά τα ανεπιθύμητα σήματα προκαλούνται από το διάφραγμα λόγω της χρονικής καθυστέρησης που εισάγεται από τις αντιδράσεις του στο ηλεκτρικό σήμα. Σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα μια συνολική αρμονική παραμόρφωση της τάξεως του 1% είναι μη αντιληπτή όταν αναφερόμαστε σε συχνότητες από 100 ως 2000 Hz, ενώ για συχνότητες μικρότερες των 100 Hz η μη αντιληπτή συνολική αρμονική παραμόρφωση είναι περίπου 10%.

Τα ακουστικά που χρησιμοποιήσαμε έχουν συνολική αρμονική παραμόρφωση της τάξεως του 0,2%.

ΨΥΧΟΑΚΟΥΣΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Ένα πρόβλημα που παρατηρείται με τη χρήση των ακουστικών είναι η αδυναμία του εγκεφάλου να εντοπίζει τους ήχους στο χώρο. Αυτό συμβαίνει σε στερεοφωνικά ακούσματα κατά τη διάρκεια των οποίων ορισμένοι «αφύσικα» απομονωμένοι ήχοι εμφανίζονται κυρίως στο ένα αυτί και δημιουργούν την αίσθηση ότι το άλλο αυτί είναι κουφό. Ο εγκέφαλος δεν μπορεί να εντοπίζει τους ήχους και οδηγείται σε αδιέξοδο! Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που δεν μπορούμε να χρησιμοποιούμε ακουστικά για πολλές ώρες συνεχόμενα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση ηλεκτρονικών εφαρμογών οι οποίες εισάγουν χρονικές καθυστερήσεις και άλλες παραμέτρους ώστε να βελτιστοποιήσουν την ακρόαση με ακουστικά. (Εικόνα 66)



Εικόνα 66 Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος.

9.5.2 ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ

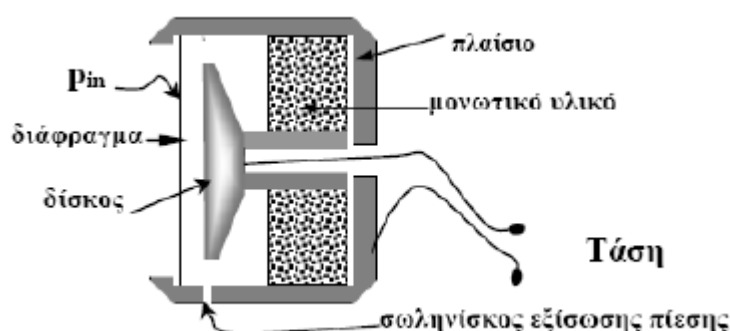
Κατά τη διάρκεια των δοκιμών της πλακέτας μας χρησιμοποιήσαμε δύο μικρόφωνα: ένα κλασσικό δυναμικό μικρόφωνο της Audyn και το μικρόφωνο του PC HEADSET 120 της LOGITECH.

ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ

Το δυναμικό (moving coil) μικρόφωνο είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος τύπος μικροφώνου διότι είναι φθηνό, αξιόπιστο και έχει χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο.



Εικόνα 67 Δυναμικό μικρόφωνο.



Εικόνα 68 Λειτουργία δυναμικού μικροφώνου.

Τα χαρακτηριστικά της απόδοσης του δυναμικού μικροφώνου είναι η πολύ υψηλή πιστότητα, η επίπεδη απόκριση, ο μικρός θόρυβος και η ικανοποιητική ευαισθησία, η οποία δίδεται από τη σχέση

$$S \cong \frac{v_0}{x_0} \frac{R^2}{8F_T}$$

όπου F_T η μηχανική τάση του διαφράγματος

x_0 η απόσταση διαφράγματος-δίσκου

v_0 η τάση πόλωσης και

R η ακτίνα του διαφράγματος.

ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ PC HEADSET 120 ΤΗΣ LOGITECH

Τα βασικά χαρακτηριστικά του μικροφώνου αυτού είναι:

Συχνότητες Απόκρισης: 100-10,000 Hz.

Ευαισθησία Μικροφώνου: -59 dBV/"Bar και -39 dBV/Pa +/-4dB.

Το κύριο όμως γνώρισμά του είναι ότι διαθέτει ειδικά φίλτρα για αποτροπή των ανεπιθύμητων θορύβων και μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Ουσιαστικά διαθέτει λειτουργία Noise Cancelling.

9.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δοκιμή της πλακέτας που κατασκευάσαμε αποτέλεσε μια μακρά και επίπονη διαδικασία. Από τις πρώτες δοκιμές έγινε αντιληπτό ότι η λειτουργία του κυκλώματος δεν ήταν η αναμενόμενη. Αυτό που παρατηρούσαμε ήταν η ύπαρξη σημάτων μεγάλων συχνοτήτων, της τάξεως δεκάδων MHz, στα διάφορα στάδια του κυκλώματος. Η ύπαρξη των σημάτων αυτών ήταν ανεξήγητη αφού για δοκιμαστικούς λόγους χρησιμοποιούσαμε για είσοδο ημιτονικά σήματα συχνοτήτων από 50-1000 Hz.

Αυτό που έπρεπε να εντοπίσουμε καταρχήν ήταν το εάν αυτά τα σήματα ήταν ηλεκτρονικός θόρυβος που παρήγαγε το ίδιο το κύκλωμά μας ή εάν επρόκειτο για σήματα από παρεμβολές που λάμβανε η πλακέτα μας. Αυτό έγινε ξεκάθαρο όταν μέσω των ακουστικών ακούσαμε το πρόγραμμα ραδιοφωνικού σταθμού των Αθηνών. Αυτό το γεγονός επαναλήφθηκε αρκετές φορές και μας κατέστησε σαφές ότι δυστυχώς το κύκλωμά μας δεχόταν παρεμβολές.

Η πρώτη λύση που εφαρμόσαμε ήταν να τοποθετήσουμε βαθυπερατά φίλτρα RC με $W=1\text{kHz}$ τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του κυκλώματός μας ώστε τα σήματα μεγαλύτερης συχνότητας να αποκόπτονται. Μετά από νέες δοκιμές παρατηρήσαμε ότι το κύκλωμα μας διατηρούσε την ίδια συμπεριφορά με προηγουμένως παρά την ύπαρξη των φίλτρων. Αυτό το γεγονός αποτέλεσε μεγάλη έκπληξη, αφού παρά την ύπαρξη βαθυπερατού φίλτρου ακριβώς πριν την έξοδο, στην έξοδο λαμβάναμε σήμα πολύ μεγαλύτερης συχνότητας.

Είχαμε ελέγξει την σχεδιαστική ορθότητα του κυκλώματος και την ορθότητα των διαφόρων κολλήσεων επανειλημμένως. Επίσης είχαμε αντικαταστήσει και τα τρία ολοκληρωμένα για να απαλείψουμε την πιθανότητα μη ορθής λειτουργίας κάποιου ή κάποιων εξ αυτών. Οπότε το επόμενο μας βήμα ήταν να κατασκευάσουμε ολόκληρο το κύκλωμα

από την αρχή για να βεβαιωθούμε ότι δεν ήταν αυτό η αιτία των μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων. Αυτό τελικά πιστοποιήθηκε αφού και μετά την κατασκευή της νέας πλακέτας, λαμβάναμε παρόμοια αποτελέσματα.

Η επόμενη λύση που δοκιμάστηκε ήταν η δοκιμή του κυκλώματος σε χώρο εκτός του εργαστηρίου. Η λογική αυτής της ιδέας ήταν ότι το εργαστήριο που βρίσκεται στο νέο κτήριο των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου είναι πολύ κοντά στις κεραίες του Υμητού και ίσως οι παρεμβολές προέρχονταν από αυτό το γεγονός. Επίσης εντός της Πολυτεχνειούπολης λειτουργούσε ραδιοφωνικός σταθμός των φοιτητών του οποίου το πρόγραμμα είχαμε ακούσει σε μερικές δοκιμές. Μεταφέρθηκε λοιπόν εξοπλισμός από το εργαστήριο στην οικία του γράφοντος στην περιοχή Αμαρουσίου Αττικής για εκ νέου δοκιμές της πλακέτας. Τα αποτελέσματα ίδια. Ήμασταν δέκτες ραδιοφωνικών παρεμβολών.

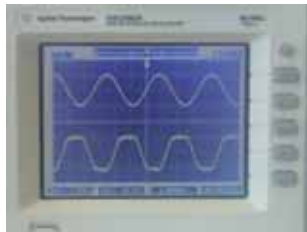
Τελικά όπως συμβαίνει συνήθως η λύση ήταν η απλούστερη: Τα καλώδια του μικροφώνου και των ακουστικών δημιουργούσαν κεραία που λάμβανε τα ραδιοφωνικά σήματα. Όταν λοιπόν εφαρμόσαμε ως σήμα στην είσοδο ένα σήμα απευθείας από τη γεννήτρια η συμπεριφορά του κυκλώματος ήταν η επιθυμητή και αρκετά ικανοποιητική. Για δοκιμαστικούς λόγους εφαρμόσαμε σήματα ημιτόνου διαφόρων συχνοτήτων για να εντοπίσουμε το εύρος λειτουργίας του κυκλώματος μας. Παρακάτω απεικονίζονται τα σήματα εισόδου και τα αντεστραμμένα σήματα: (Σε όλες τις εικόνες πάνω είναι το σήμα εισόδου και κάτω το σήμα εξόδου).



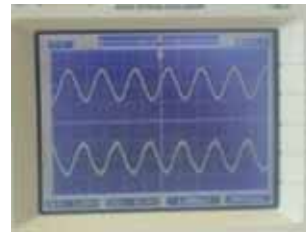
Εικόνα 69 Σήμα εισόδου 50 Hz.



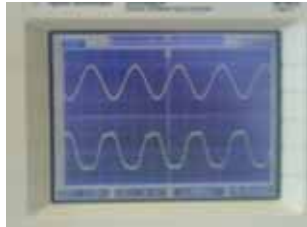
Εικόνα 70 Σήμα εισόδου 100 Hz.



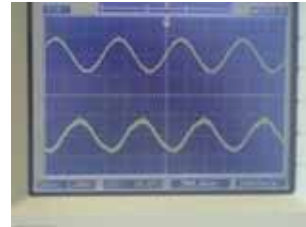
Εικόνα 71 Σήμα εισόδου 150 Hz.



Εικόνα 76 Σήμα εισόδου 550 Hz.



Εικόνα 72 Σήμα εισόδου 200 Hz.



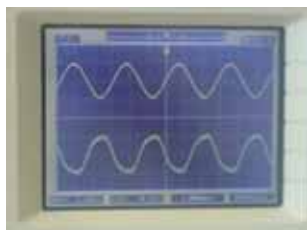
Εικόνα 77 Σήμα εισόδου 650 Hz.



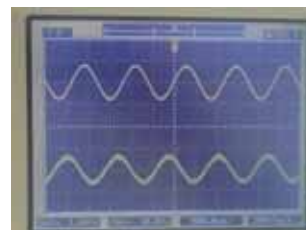
Εικόνα 73 Σήμα εισόδου 250 Hz.



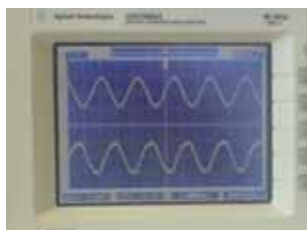
Εικόνα 78 Σήμα εισόδου 750 Hz.



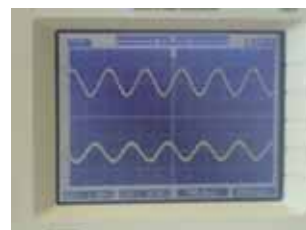
Εικόνα 74 Σήμα εισόδου 350 Hz.



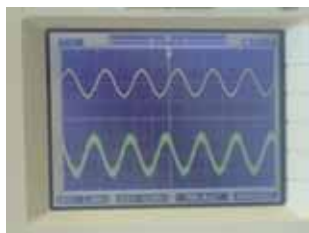
Εικόνα 79 Σήμα εισόδου 850 Hz.



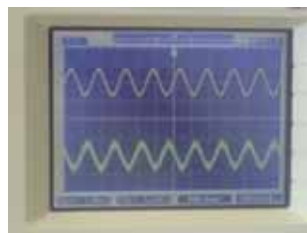
Εικόνα 75 Σήμα εισόδου 450 Hz.



Εικόνα 80 Σήμα εισόδου 950 Hz.



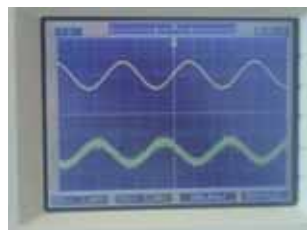
Εικόνα 81 Σήμα εισόδου 1000 Hz.



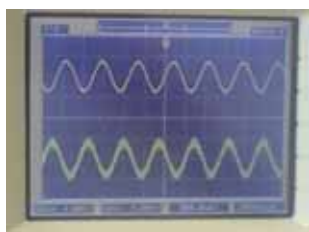
Εικόνα 85 Σήμα εισόδου 1400 Hz.



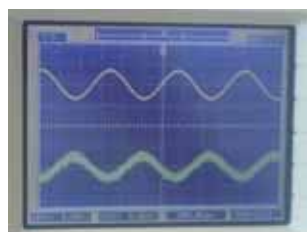
Εικόνα 82 Σήμα εισόδου 1100 Hz.



Εικόνα 86 Σήμα εισόδου 1500 Hz.



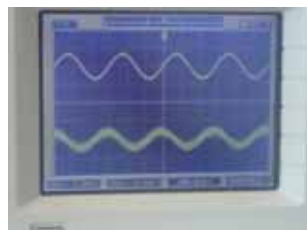
Εικόνα 83 Σήμα εισόδου 1200 Hz.



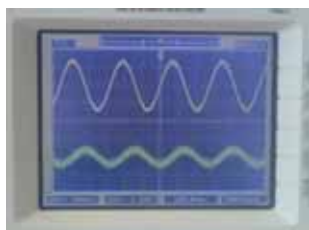
Εικόνα 87 Σήμα εισόδου 1600 Hz.



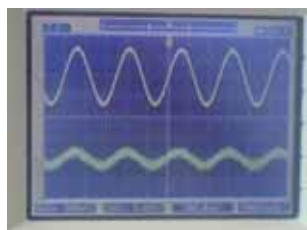
Εικόνα 84 Σήμα εισόδου 1300 Hz.



Εικόνα 88 Σήμα εισόδου 1700 Hz.



Εικόνα 89 Σήμα εισόδου 1800 Hz.



Εικόνα 90 Σήμα εισόδου 2000 Hz.

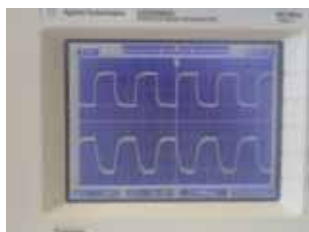
Παρατηρούμε ότι το κύκλωμά μας εμφανίζει πολύ καλή συμπεριφορά μέχρι και τη συχνότητα των 950 Hz. Για τις συχνότητες από 1 kHz έως 1,7 kHz, αν και το κύκλωμα παράγει σήμα με 180° διαφορά φάσης η απόκριση του δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτεως σταθεροποιημένη. Παρόλα αυτά η συμπεριφορά του κρίνεται ικανοποιητική. Από τα 1,8

kHz και άνω όμως το κύκλωμα παύει να λειτουργεί ικανοποιητικά.

Ωστόσο, αν λάβουμε υπόψη ότι το σήμα ημιτόνου είναι ένα ιδιαιτέρως απλό σήμα μπορούμε να υποψιαστούμε ότι το εύρος λειτουργίας της πλακέτας σε πιο σύνθετες εισόδους θα είναι πιο μικρό των 1,8 kHz.

Σε αυτό συντείνουν και οι προδιαγραφές του σχεδιαστή του κυκλώματος, Jules Ryskebusch, ο οποίος αναφέρει ότι το κύκλωμα έχει την ικανότητα να ακυρώνει θορύβους συχνότητας έως 1kHz. Αυτό αποδεικνύεται και στις παρακάτω εικόνες, στις οποίες χρησιμοποιήσαμε ως είσοδο παλμούς συχνότητας από 200 – 500Hz.

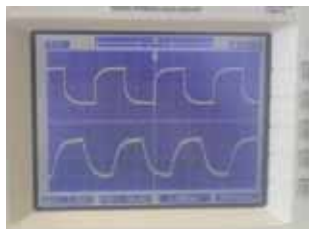
Είναι εμφανές ότι είτε λόγω σφάλματος της γεννήτριας είτε λόγω σφάλματος των καλωδίων οι παλμοί φτάνουν στην είσοδο ελαφρώς αλλοιωμένοι.



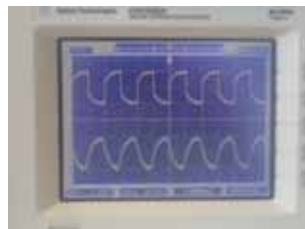
Εικόνα 91 Παλμός 200 Hz.



Εικόνα 93 Παλμός 400 Hz.



Εικόνα 92 Παλμός 300 Hz.



Εικόνα 94 Παλμός 500 Hz.

Δύο είναι τα βασικά ζητήματα που προκύπτουν. Το πρώτο είναι το μικρόφωνο δεν αναπαριστά το πλάτος του σήματος του θορύβου με ακρίβεια. Το δεύτερο είναι η μετατόπιση φάσης που προκύπτει λόγω της χρονικής καθυστέρησης μετάδοσης του σήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του θορύβου αντί για τη μείωση του και αντιμετωπίζεται με τη σωστή τοποθέτηση του μικροφώνου. Όσο πιο κοντά στα ακουστικά τόσο καλύτερα.

Έχοντας λοιπόν ως δεδομένα ότι για το εάν ένα σήμα θορύβου

ακυρωθεί, αυτό εξαρτάται από τη συχνότητά του και ότι η χρονική καθυστέρηση, η οποία είναι το αίτιο της μετατόπισης φάσης, γίνεται εντονότερη με την αύξηση της συχνότητας, οδηγούμαστε στα εξής συμπεράσματα για την βελτίωση του κυκλώματος:

Στο στάδιο του αναστρέφοντος ενισχυτή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ποτενσιόμετρα αντί για σταθερές αντιστάσεις. Αυτό θα μας επιτρέψει να έχουμε μεταβλητό κέρδος και να ελέγχουμε «πόσος» θόρυβος θα ακυρωθεί. Με άλλα λόγια, το μεταβλητό κέρδος θα μας επιτρέπει να ακυρώνουμε «περισσότερο» θόρυβο διότι θα έχουμε τη δυνατότητα να αυξάνουμε το πλάτος του σήματος του θορύβου. Επιπλέον, θα μειώνουμε το πλάτος θορύβων μεγάλων συχνοτήτων και με αυτόν τον τρόπο θα περιορίζουμε την επίδραση του προσθετικού θορύβου.

Επίσης, θα πρέπει να είμαστε σε θέση να ελέγχουμε τη φάση και το πλάτος του θορύβου στην είσοδο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη τοποθέτηση φίλτρων στην είσοδο. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να προσέξουμε ότι και τα φίλτρα έχουν μια απόκριση φάσης. Αυτό το γεγονός είναι δυνατόν να επηρεάσει την ακύρωση θορύβου με τον ίδιο τρόπο που την επηρέαζε η χρονική καθυστέρηση μετάδοσης.



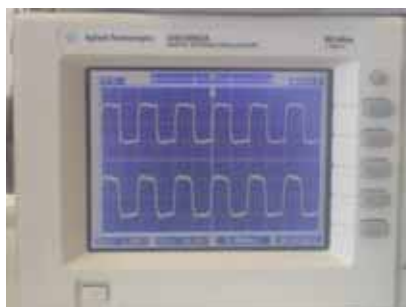
Εικόνα 95 Μια φωτογραφία της πλακέτας μας.



Εικόνα 96 Ομοίως με εικόνα 95.

Όπως είχε αναφερθεί και σε προηγούμενα, το κύκλωμα μας διαθέτει διακόπτη από τη θέση του οποίου μπορούμε να επιλέξουμε την ορθή ή την ανάστροφη λειτουργία. Με άλλα λόγια το αν το σήμα εισόδου θα αντιστρέφεται ή όχι. Η δεύτερη αυτή λειτουργία έχει ως σκοπό την ενίσχυση κάποιων επιθυμητών ακουστικών σημάτων χαμηλής έντασης όπως π.χ. το θρόισμα των φύλλων ή το κελάηδισμα των πουλιών κατά τη διάρκεια μιας εκδρομής στην εξοχή. Βασικός σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η μελέτη της λειτουργίας ακύρωσης θορύβου και για αυτό

το λόγο για την μη αναστρέφουσα λειτουργία θα δοθεί ένα ενδεικτικό παράδειγμα για ένα παλμό συχνότητας 100 Hz.



Εικόνα 97 Μη αναστρέφουσα λειτουργία.

Ως τελευταία αναφορά θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η συμπεριφορά του κυκλώματος που υλοποιήσαμε κρίνεται σαφώς ικανοποιητική. Δεν θα πρέπει να μας διαφύγει το γεγονός ότι το κύκλωμα αυτό κατασκευάστηκε από ένα και μόνο φοιτητή για ερευνητικούς λόγους κυρίως και όχι κάτω από τις καλύτερες συνθήκες. Αξίζει να τονιστεί ότι όλα τα noise cancelling headphones που κυκλοφορούν στην αγορά διαθέτουν κύκλωμα πρόβλεψης του εισερχόμενου θορύβου, όπως έχει περιγραφεί λεπτομερώς σε προηγούμενο κεφάλαιο, και κανένα δεν λειτουργεί σε real time όπως το κύκλωμα που κατασκευάσαμε. Παρόλα αυτά μερικά από αυτά τα συστήματα που κυκλοφορούν στην αγορά λειτουργούν ικανοποιητικά σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων σε σχέση με το δικό μας κύκλωμα!

Η πλακέτα που κατασκευάσαμε μπορεί να συσκευαστεί και να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές που απαιτείται μείωση του θορύβου. Καταρχήν, μας παρέχει τη δυνατότητα να απολαύσουμε τη μουσική της αρεσκείας μας χωρίς την ύπαρξη θορύβου. Η ανυπαρξία θορύβου καθιστά δυνατή την ακρόαση της μουσικής σε χαμηλότερα επίπεδα έντασης ήχου σε σχέση με ένα θορυβώδες περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται και η περίπτωση βλάβης της ακοής μας λόγω της δυνατής μουσικής. Επίσης, μια άλλη εφαρμογή είναι να χρησιμοποιήσουμε την κατασκευή μας χωρίς μουσική είσοδο. Αυτό θα μας επιτρέψει να απολαύσουμε την ησυχία που μας διαθέτει χαλαρώνοντας, διαβάζοντας ένα βιβλίο ή οτιδήποτε άλλο. Ακόμα μια πολύ συνηθισμένη εφαρμογή είναι η χρησιμοποίηση της ακύρωσης θορύβου κατά την παραμονή μας σε μέσα μαζικής μεταφοράς και

κυρίως στο αεροπλάνο το οποίο είναι πολύ θορυβώδες. Γενικά, οι εφαρμογές είναι απεριόριστες για τον απλούστατο λόγο ότι στο σύγχρονο κόσμο ο θόρυβος είναι «πανταχού παρών»...

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Τόμος Α, Sedra/Smith
2. Εισαγωγή στα Σήματα και Συστήματα, Γ. Καραγιάννης/Κ. Τζιτζιράχου
3. Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, R. Dorf/H. Bishop
4. Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο, Τόμος Α, Π.Ν. Παρασκευόπουλος
5. Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Τόμος Β, Sedra/Smith
6. Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική, Τόμος Α, Millman/Χαλκιάς
7. Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική, Τόμος Β, Millman/Χαλκιάς
8. Handbook of acoustics / Malcom J. Crocker, editor-in-chief
9. On the perception of phase differences in acoustic signals / Theodorus Johannes Franciscus Buunen
10. Speech analysis synthesis and perception by James L. Flanagan
11. Ακουστική & Ψυχοακουστική, Φλώρος Ανδρέας, Δρ. Ηλ/γος Μηχ/κός και Τεχνολογίας Υπολογιστών
12. Ενεργός Έλεγχος Θορύβου (Active Noise Control), Μ. Τσακίρης
13. Engineering Silence: Active Noise Cancellation, M. Benoit/C. Camastra/M. Kenny/K. Li/R. Romanowski/K. Shannon
14. Active Noise Cancellation, K. Brett/ J. Kohler/ J. Tavares
15. NOISE CANCELLATION: QUIETING THE ENVIRONMENT, J.N. Denenberg, PhD
16. Build These Noise-Canceling Headphones, Jules Ryckebusch (http://headwize.com/projects/showfile.php?file=noise_prj.htm)
17. Active Noise Reduction Headphone Systems, Chu Moy (http://headwize.com/tech/anr_tech.htm)