

Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Εισαγωγική Θεωρία

Ασκήσεις

Α. ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ Καθ. Φυσικής Τ.Ε.Ι. Αθήνας

Ανοιχτά
Ακαδημαϊκά
Μαθήματα στο ΤΕΙ
Αθήνας

Περιεχόμενα

1. Τι είναι ήχος ;.....	2
2. Η ταχύτητα του ήχου.....	3
3. Ηχητικά κύματα Ανάκλαση	5
Διάθλαση ήχου.....	6
Περίθλαση ηχητικών κυμάτων.....	7
Συμβολή ηχητικών κυμάτων	7
Απορρόφηση ηχητικών κυμάτων.....	8
Φαινόμενο Doppler.....	9
4. Τα χαρακτηριστικά ενός ήχου είναι : Το ύψος, η ένταση - ακουστότητα και η χροιά	10
Ύψος	10
Ένταση - Ακουστότητα	11
Χροιά	11
5. Μέτρηση ακουστότητας - έντασης ήχου (Phon - dB).....	11
6. Μουσικά Όργανα (Έγχορδα, Πνευστά, Κρουστά).....	14
7. Η ανθρώπινη φωνή	19
8. Αυτί, το ανθρώπινο αισθητήριο της ακοής.....	20
Λειτουργία ανθρώπινου αυτιού	20
Ευαισθησία ανθρώπινου αυτιού	21
9. Ήχος και ανάλυση κατά Fourier	22
10. Καταγραφή - Αναπαραγωγή ήχου	24
11. Δίσκος Ακτίνας (Compact Disk - CD).....	25
12. Ακουστική χώρων	27
13. Στερεοφωνικός ήχος.....	29
14. Κωδικοποίηση ήχου, Αναλογικός - Ψηφιακός ήχος	30
15. Θόρυβος και Περιβάλλον.....	32
16. Ερωτήσεις – Ασκήσεις	34
17. Βιβλιογραφία.....	37

1. Τι είναι ήχος ;

Γενικά

Η λέξη ήχος χρησιμοποιείται για να περιγράψει δυο σχεδόν διαφορετικά πράγματα, αφ' ενός μεν την αίσθηση που δίνει το αισθητήριο της ακοής (αυτί) και αφ' ετέρου την διαταραχή που υφίσταται ένα μέσο προκειμένου να δημιουργήσει αυτήν ακριβώς την αίσθηση. Ο ήχος διαδίδεται μέσω των ηχητικών κυμάτων. Ο κόσμος είναι γεμάτος από κύματα: ηχητικά κύματα, φωτεινά κύματα, υδάτινα κύματα, ηλεκτρομαγνητικά κύματα, ακτίνες Χ κ.α. Για παράδειγμα σε μια αίθουσα διδασκαλίας ενυπάρχουν ταυτόχρονα φωτεινά κύματα, ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως και ηχητικά κύματα σε διαφορετικές μάλιστα συχνότητες. Αν και τα ηχητικά κύματα είναι διαφορετικά από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή και τα υδάτινα κύματα εν τούτοις έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά όπως το γεγονός ότι μεταφέρουν ενέργεια και ότι έτσι μεταδίδουν κάποια πληροφορία από τη μια περιοχή σε άλλη.

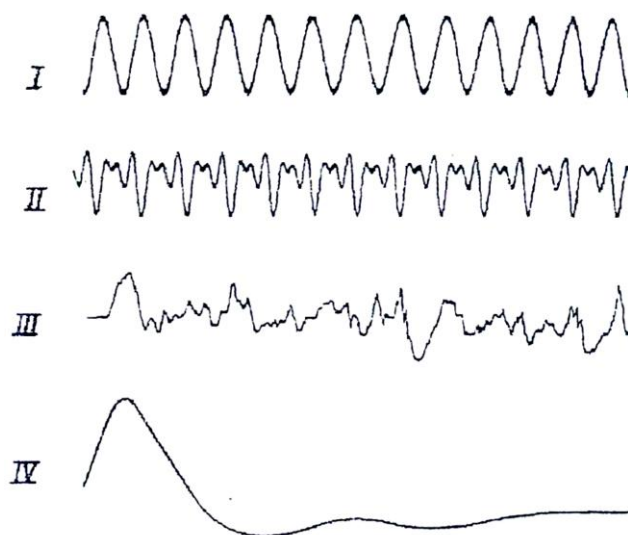
Τα ηχητικά κύματα διαδίδονται σε στερεά, υγρά ή και αέρια. Μάλιστα πρόκειται κυρίως για διαμήκη κύματα δηλαδή για κύματα στα οποία η ταλάντωση του μέσου έχει την ίδια διεύθυνση με την διεύθυνση στην οποία διαδίδεται και ο ήχος. Διαμήκη κύματα μπορεί να δημιουργήσει κανείς σε μια αέρια στήλη με την κατάλληλη μετακίνηση ενός εμβόλου. Έτσι, προκαλείται μικρή μεταβολή στην πίεση ενός στρώματος αέρα που γειτονεύει με αυτό. Η διάδοση αυτής της μεταβολής στο χώρο αντιστοιχεί με την διάδοση του ήχου σε αυτόν. Είναι προφανές ότι για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη διάδοση απαιτείται η υποχρεωτική παρουσία του συγκεκριμένου μέσου.

Ηχητικές πηγές είναι πολλών ειδών, στη συνέχεια αναφέρονται περιληπτικά η αρχή λειτουργίας στις κυριότερες εξ αυτών :

1. Ταλαντώσεις σωμάτων : Όταν μια χορδή κιθάρας τεθεί σε παλμική κίνηση δημιουργεί τα πυκνώματα και τα αραιώματα στον γειτονικό αέρα που την περιβάλλει με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός χαρακτηριστικού ήχου. Το ίδιο συμβαίνει και με την κίνηση της επιφάνεια ενός τυμπάνου.
2. Μεταβολές ροής αέρα : Όταν μιλάμε ή τραγουδάμε οι φωνητικές μας χορδές αυξομειώνουν τα διαστήματα μέσα από τα οποία διέρχεται ο εξερχόμενος από τους πνεύμονες αέρας και έτσι έχουμε τον ήχο της ομιλίας μας. Όμοιος μηχανισμός συμβαίνει και στην περίπτωση σειράς πνευστών οργάνων (τρομπέτα, κλαρίνο κ.α.).
3. Θερμική αιτία : Ένας ηλεκτρικός σπινθήρας προκαλεί έντονο ήχο λόγω της ταχύτατης υπερθέρμανσης μικρής ποσότητας αερίου. Για παράδειγμα ο ήχος της βροντής που ακολουθεί την ισχυρή λάμψη μιας αστραπής.
4. Υπερηχητική περίπτωση : Ένας επίσης έντονος ήχος προκαλείται όταν γρήγορα κινούμενο αντικείμενο (π.χ. σφαίρα, αεροπλάνο) κατορθώνει να κινηθεί σε συγκεκριμένο μέσο, με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του ήχου που το ίδιο δημιούργησε.

Το περιβάλλον είναι γεμάτο από διαφορετικούς ήχους, κάποιοι δημιουργούνται από ανθρώπους, άλλοι από ζώα, κάποιοι από μηχανές ή και κάποιοι άλλοι από φυσικές αιτίες

(π.χ. καιρός). Από τους ήχους αυτούς κάποιοι είναι ευπρόσδεκτοι (αγαπημένη μουσική, ενδιαφέρουσα ομιλία) και κάποιοι ανεπιθύμητοι (μονότονος, βιομηχανικός θόρυβος ή θόρυβος από κίνηση οχημάτων). Σχετικά πρόσφατα θεσπίζονται νομοθεσίες για τον έλεγχο του θορύβου (τουλάχιστον στις μεγαλουπόλεις) προκειμένου αυτός να κρατηθεί σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις ενός απλού ήχου (I), ενός σύνθετου ήχου (II), ενός θορύβου (III) όπως και ενός κρότου (IV). Στον κοινό κατακόρυφο άξονα αντιστοιχεί, σε όλες τις γραφικές παραστάσεις, η μεταβολή της πίεσης του αέρα. Είναι προφανές ότι η καμπύλη (II) που παριστά ένα μουσικό ήχο έχει σαφές επαναλαμβανόμενο σχήμα, κάτι βέβαια που δεν συμβαίνει στις περιπτώσεις του θορύβου αλλά, πολύ περισσότερο, σε αυτή του κρότου. Ιδιαίτερα για τον κρότο θα πρέπει να αναφερθεί ότι πρόκειται για ήχο πολύ σύντομης διάρκειας και αντιστοιχεί σε μικρό αριθμό ταλαντώσεων των οποίων το πλάτος ελαττώνεται απότομα. Οι κρότοι συνήθως προκαλούν δυσάρεστο συναίσθημα στον ακροατή.



Τέτοιες καμπύλες μπορεί εύκολα να δημιουργηθούν στην οθόνη ενός παλμογράφου όταν η είσοδος αυτής της συσκευής τροφοδοτηθεί κατάλληλα με την έξοδο (ηλεκτρικό σήμα) από ένα π.χ. μικρόφωνο. Η διαχωριστική γραμμή μεταξύ μουσικής και θορύβου φαίνεται να είναι ιδιαίτερα λεπτή και πάντως υποκειμενική. Αρκετοί θεωρούν ενδεχομένως θόρυβο την σύγχρονη μουσική ή και την μουσική άλλων πολιτισμών. Η διαφοροποίηση αυτών των τύπων μουσικής από τον θόρυβο είναι βεβαίως και υποκειμενικό ζήτημα αισθητικής, ωστόσο ο διαχωρισμός ενός μουσικού ήχου από τον θόρυβο δεν φαίνεται να αποτελεί πρόβλημα. Ακόμη και άνθρωπος με σοβαρό πρόβλημα ακοής θα μπορούσε να τα ξεχωρίσει παρατηρώντας τα δυο αυτά γραφήματα συγκριτικά, στην οθόνη ενός παλμογράφου.

2. Η ταχύτητα του ήχου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο ήχος αποτελεί μια διαμήκη κυρίως κύμανση σε ένα ελαστικό μέσο. Μάλιστα η κύμανση αυτή συνίσταται από διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα στα οποία δεν παρατηρείται η παραμικρή μεταφορά ύλης αλλά μόνο η σχετική μεταφορά

ενέργειας. Η ταχύτητα V με την οποία διαδίδεται ο ήχος συχνότητας ν και μήκους κύματος λ δίνεται από τη σχέση:

$$V = \nu \lambda$$

Μάλιστα, εάν ο ήχος της συγκεκριμένης συχνότητας ν εισέλθει σε ένα νέο μέσο όπου η ταχύτητα διάδοσης είναι τώρα διαφορετική τότε ο ήχος θα μεταβάλει το μήκος κύματός του έτσι ώστε να ικανοποιείται και πάλι η προηγούμενη σχέση για την νέα όμως τιμή της ταχύτητας.

Έχει βρεθεί ότι στους 16°C η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι 340 m/s ενώ στους 0°C η ταχύτητά του μειώνεται στη τιμή των 331 m/s . Η θεωρητική σχέση της ταχύτητας V του ήχου σε ένα οποιαδήποτε αέριο μέσο δίνεται από τη σχέση Laplace:

$$V = [p \gamma / d]^{1/2}$$

Όπου p η πίεση του αερίου, d η πυκνότητά του και γ το χαρακτηριστικό πηλίκιο c_p / c_v των ειδικών θερμοτήτων του συγκεκριμένου αερίου. Το πηλίκιο αυτό εξαρτάται από την ατομικότητα του αερίου και είναι 1.66 για όλα τα μόνο - ατομικά αέρια, 1.41 για τα διατομικά κ.λ.π. Ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί να θεωρηθεί ως διατομικό αέριο στο μέτρο που τα κύρια συστατικά του είναι τα διατομικά αέρια άζωτο (N_2) και οξυγόνο (O_2). Από τη σχέση Laplace προκύπτουν τα εξής χρήσιμα συμπεράσματα για την ταχύτητα V του ήχου.

- (1) Η ταχύτητα δεν εξαρτάται από την πίεση p του αερίου και αυτό διότι η πυκνότητα d αυτού μεταβάλλεται αναλογικά με την πίεση και έτσι το σχετικό πηλίκιο p / d διατηρεί σταθερή την όποια τιμή του.
- (2) Η ταχύτητα του ήχου στα αέρια δεν εξαρτάται από την συχνότητα ή το πλάτος ή την μορφή της ταλάντωσης του ηχητικού κύματος.
- (3) Η ταχύτητα εξαρτάται από την θερμοκρασία θ του αερίου σύμφωνα με την σχέση:

$$V_\theta = V_0 (1 + \alpha \theta)^{1/2}$$

Όπου V_θ η ταχύτητα του ήχου στους $\theta^\circ\text{C}$, V_0 η ταχύτητα του ήχου στους 0°C και $\alpha = 1/273\text{ grad}^{-1}$ ο συντελεστής διαστολής των αερίων. Έχει αποδειχθεί ότι η ταχύτητα του ήχου πρακτικά αυξάνει κατά 0.6 m/s για κάθε ένα βαθμό $^\circ\text{C}$. Η προσεγγιστική σχέση της ταχύτητας V_θ με την θερμοκρασία θ είναι η εξής:

$$V_\theta = 331.3 + 0.6 \theta$$

Όπου θ η θερμοκρασία σε $^\circ\text{C}$ και V_θ η ταχύτητα του ήχου (σε m/s).

Έχει βρεθεί από υπολογισμούς ότι η ταχύτητα του ήχου στα υγρά είναι σημαντικά μεγαλύτερη αυτής εντός των αερίων. Για παράδειγμα μέσα στο θαλασσινό νερό η ταχύτητα του ήχου είναι περίπου 1500 m/s . Τέλος, εντός των στερεών ο ήχος εμφανίζει ακόμη μεγαλύτερη ταχύτητα στο μέτρο όπου, σε σύγκριση με ένα αέριο, τα μόρια ενός στερεού

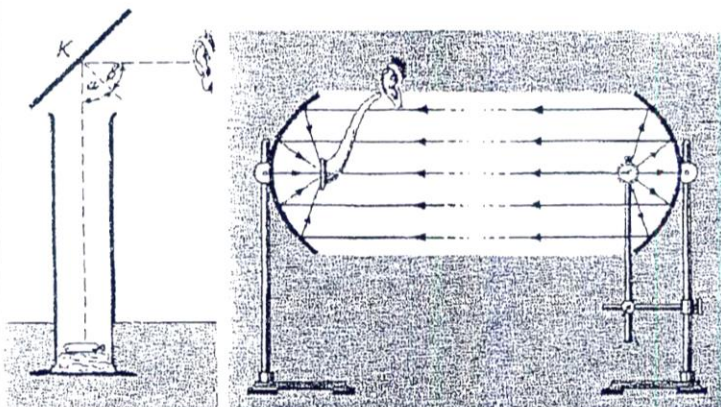
βρίσκονται πολύ πιο κοντά το ένα στο άλλο και έτσι η ηχητική διαταραχή διαδίδεται εύκολα και πολύ πιο γρήγορα. Έτσι, ενδεικτικές τιμές της ταχύτητας του ήχου σε διάφορα στερεά υλικά είναι : σε ξύλο 3500 m/s, σε γρανίτη 3950 m/s και σε χάλυβα 5000 m/s περίπου.

3. Ηχητικά κύματα

Ανάκλαση

Τα ηχητικά κύματα όταν προσπίπτουν σε κάποια επιφάνεια τότε ανακλώνται σύμφωνα με τους γνωστούς νόμους της ανάκλασης των οπτικών ακτίνων. Έτσι, εάν η επιφάνεια που τα ανακλά είναι επίπεδη τότε τα ανακλώμενα κύματα επιστρέφουν σαν να προέρχονται από μια ηχητική πηγή (φανταστικού χαρακτήρα) που είναι μάλιστα σε συμμετρική θέση της αρχικής πηγής ως προς την συγκεκριμένη επιφάνεια. Το φαινόμενο της ανάκλασης πραγματοποιείται προφανώς και σε καμπύλες επιφάνειες. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται (δεξιά) μια διάταξη από δυο κοίλες, σφαιρικές επιφάνειες στις οποίες τα κέντρα K και K' έχουν σχέση ηχητικής σύζευξης, δηλαδή εάν στο σημείο K τεθεί μια μικρού όγκου ηχητική πηγή (π.χ. μηχανικό ρολόι) οι ήχοι του, θα ακουστούν ιδιαίτερα έντονα στη περιοχή του συζυγούς σημείου K' και αντίστροφα.

Στο αριστερά τμήμα του ίδιου σχήματος απεικονίζεται μια διάταξη (ρολόι και γυάλινος δοκιμαστικός σωλήνας) στην οποία τα ηχητικά κύματα ανακλώνται στο κεκλιμένο επίπεδο K και γίνονται έτσι εύκολα αντιληπτά σε περιοχή εκτός του δοκιμαστικού σωλήνα.



Μια εφαρμογή του φαινομένου της ανάκλασης στον ήχο είναι και ο τηλεβόας ο οποίος στέλνει ιδιαίτερα μακριά τον ήχο όπως επίσης και ο ακουστικός σωλήνας που ενισχύει τους ασθενείς ήχους προκειμένου να γίνουν ακουστικά αντιληπτοί.

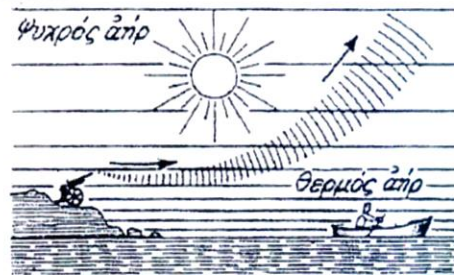
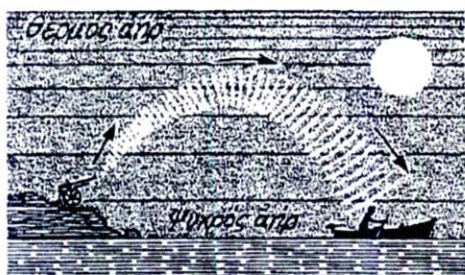
Άμεση συνέπεια του φαινομένου της ανάκλασης είναι και το γνωστό φαινόμενο της ηχούς. Πρόκειται για την επανάληψη ενός ήχου μετά την ανάκλαση του από κάποιο εμπόδιο. Βέβαια προκειμένου να δημιουργηθεί η ηχώ θα πρέπει το συγκεκριμένο εμπόδιο να απέχει από το σημείο που βρίσκεται η ηχητική πηγή με τον παρατηρητή – ακροατή απόσταση τουλάχιστον 17m. Η τιμή αυτή υπολογίζεται διότι η ακουστική εντύπωση ενός ήχου διατηρείται στον ακροατή 0.1sec μετά το τέλος του ηχητικού ερεθίσματος. Βέβαια αυτό

σημαίνει ότι στο χρονικό αυτό διάστημα ο ήχος θα διανύσει 34m (ταχύτητα ήχου στον αέρα 340m/sec). Έτσι, προκειμένου ο παρατηρητής να αντιληφθεί ξεχωριστά τον εξ ανακλάσεως ήχο από τον απευθείας θα πρέπει η επιφάνεια που εμποδίζει και ανακλά, να απέχει τουλάχιστον 17m από την ηχητική πηγή.

Εάν η συγκεκριμένη απόσταση είναι μικρότερη της προηγούμενης τιμής τότε ο παρατηρητής ακούει τον ανακλώμενο ήχο πριν εκλείψει ο απ' ευθείας και έτσι προκαλείται παράταση της πραγματικής διάρκειας του ήχου. Το φαινόμενο αυτό καλείται μετήχηση και έχει πολύ μεγάλη σημασία για την καλή ακουστική των θεάτρων, σε αίθουσες συναυλιών, διαλέξεων, σε στούντιο ραδιοφωνίας, τηλεόρασης κλπ. Η κατάλληλη εκλογή του σχήματος των χώρων αυτών καθώς και των υλικών που χρησιμοποιούνται συνήθως ως ανακλαστήρες επιτυγχάνει σημαντική μείωση του φαινομένου της ανεπιθύμητης μετήχησης. Η πραγματοποίηση πολλών διαδοχικών ανακλάσεων σε διάφορα εμπόδια σε συγκεκριμένες αποστάσεις δημιουργούν το φαινόμενο της πολλαπλής ηχούς.

Διάθλαση ήχου

Όταν ηχητικά κύματα προσπέσουν υπό γωνία σε διαχωριστική επιφάνεια δυο μέσων στα οποία ο ήχος διαδίδεται με διαφορετικές ταχύτητες τότε διαθλώνται σύμφωνα με τους γνωστούς νόμους της οπτικής διάθλασης. Από το φαινόμενο της διάθλασης και της ανάκλασης των ηχητικών κυμάτων ερμηνεύονται και οι ζώνες ηχητικής σιγής. Πρόκειται για περιοχές όπου αν και είναι σχετικά κοντά προς την ηχογόνο πηγή ο ήχος δεν ακούγεται έντονα κάτι το οποίο όμως φαίνεται να συμβαίνει σε μεγαλύτερη απόσταση από πριν. Ο σχηματισμός των ζωνών αυτών εξηγείται διαγραμματικά στα σχήματα που ακολουθούν.



Εάν ο αέρας είναι θερμότερος ψηλά από ότι σε χαμηλότερα στρώματα δημιουργείται καμπύλωση του ηχητικού κύματος προς τα κάτω. Αντίθετα, εάν ο ψυχρός αέρας είναι σε υψηλότερα στρώματα του θερμού τότε η αντίστοιχη καμπύλωση του ηχητικού κύματος συμβαίνει προς τα επάνω.

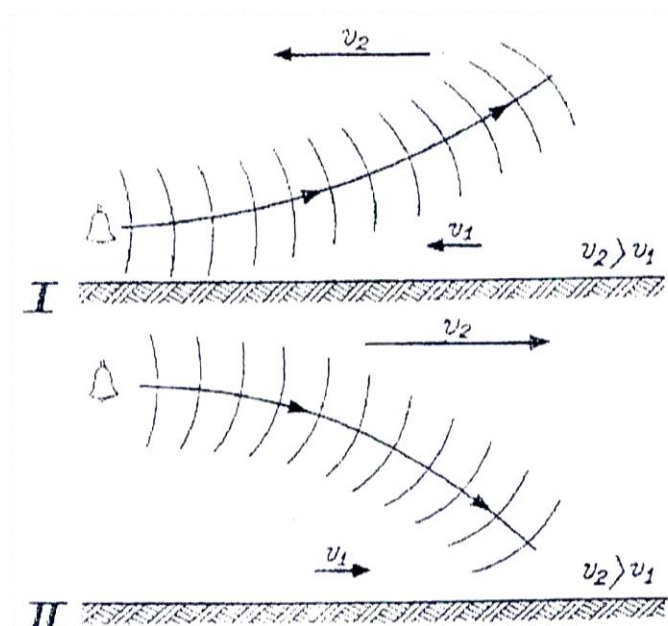
Όταν ο ήχος διέρχεται από ένα μέσο (1) σε ένα άλλο μέσο (2) η συχνότητά του ν παραμένει αμετάβλητη. Το μήκος κύματος λ όμως μεταβάλλεται ώστε να ικανοποιείται η σχέση:

$$\lambda_1 / \lambda_2 = V_1 / V_2$$

Για παράδειγμα ένα ηχητικό κύμα με συχνότητα 1000Hz όταν είναι στον αέρα ταχύτητα (V_1 , =332m/sec) έχει μήκος κύματος $\lambda_1 = 0.332m$ ενώ όταν περάσει μέσα στο νερό ταχύτητα (V_2 = 1500m/sec) το μήκος κύματος γίνεται $\lambda_2 = 1.5m$, δηλαδή γίνεται 4.5 περίπου φορές μεγαλύτερο. Όπως στην οπτική έτσι και εδώ το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης συμβαίνει

σε περιπτώσεις όπου ο ήχος προσπαθεί να διέλθει από μέσο στο οποίο η ταχύτητά του είναι μικρότερη σε άλλο στο οποίο η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη. Στο προηγούμενο παράδειγμα αέρα - νερού η ορική γωνία δ_0 ικανοποιεί την σχέση : $\eta\mu\delta_0 = 332/1500 = 0.221$ και έτσι $\delta_0 = 13^\circ$.

Αλλαγή κατεύθυνσης των ηχητικών κυμάτων παρατηρείται επίσης και όταν ο αέρας δεν είναι ακίνητος αλλά υπάρχει άνεμος. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί ότι εάν ο ήχος κινείται ομόρροπα με τον άνεμο υπάρχει κάμψη προς τα κάτω (επιφάνεια της γης) ενώ όταν ο ήχος κινείται αντίθετα από τον άνεμο τότε τα ηχητικά κύματα απομακρύνονται από την επιφάνεια της γης (κίνηση προς τα επάνω) με αποτέλεσμα ο ήχος, σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις, να «χάνεται».



Η εξήγηση αυτής της εκτροπής στηρίζεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή καθ' ύψος (κοντά στο έδαφος είναι μικρή ενώ ψηλά μεγαλώνει) με αποτέλεσμα και η σχετική ταχύτητα του ήχου ως προς το έδαφος να είναι και αυτή διαφορετική ανάλογα με το συγκεκριμένο ύψος.

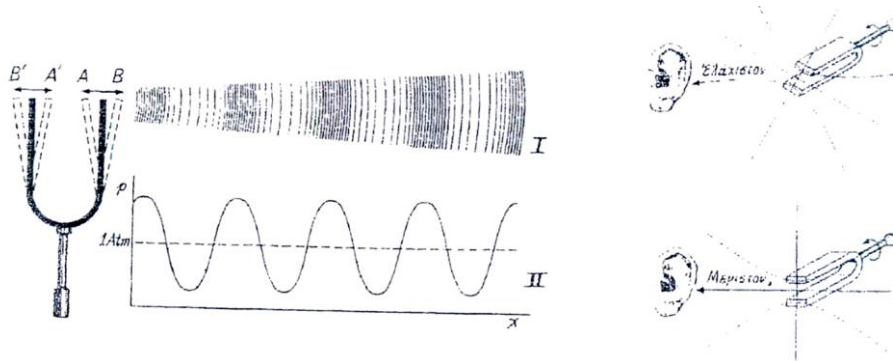
Περίθλαση ηχητικών κυμάτων

Το κυματικό φαινόμενο της περίθλασης (δηλαδή η εκτροπή από την ευθύγραμμη διάδοση μιας κύμανσης λόγω κάποιου ανοίγματος ή αντίστοιχα εμπόδιου) παρατηρείται και στον ήχο όπως άλλωστε και με το φως στην οπτική. Μάλιστα στον ήχο όπου τα μήκη κύματος είναι ιδιαίτερα μεγάλα, σε σχέση με το φως, (μέγεθος του $\lambda \sim 0.5\text{m}$) δεν απαιτούνται πολύ μικρά ανοίγματα όπως στην οπτική. Έτσι, για παράδειγμα, ο ήχος που προέρχεται από το εσωτερικό ενός δωματίου περιθλάται στο άνοιγμα του παράθυρου με αποτέλεσμα να γίνεται ακουστός και από άτομα που δεν βρίσκονται ακριβώς απέναντι του συγκεκριμένου ανοίγματος.

Συμβολή ηχητικών κυμάτων

Η συμβολή δεν παρατηρείται μόνο στη περίπτωση υδάτινων (μηχανικών) κυμάτων στην ήρεμη επιφάνεια μιας λίμνης αλλά διαπιστώνεται ότι συμβαίνει και με τα ηχητικά κύματα.

Μια πρόχειρη επιβεβαίωση του φαινομένου της συμβολής παρουσιάζεται, αξιοποιώντας ένα παλλόμενο διαπασών, στο σχήμα που ακολουθεί.



Τα δυο **μεταλλικά** σκέλη του διαπασών (σχ. αριστερά) κινούνται συντονισμένα και παράγουν ηχητικά κύματα τα οποία συμβάλουν στο γύρω χώρο και έτσι δημιουργούν τις γνωστές καμπύλες - υπερβολές μέγιστων και ελάχιστων εντάσεων εκατέρωθεν της μέσης ευθείας στην οποία συμβαίνει πάντοτε ενίσχυση. Με μια πλήρη περιστροφή του διαπασών (σχ. δεξιά) κατά 360° διαπιστώνεται η μείωση της έντασης του συνολικού ήχου σε ακριβώς τέσσερις διαφορετικές θέσεις. Πρόκειται για τις θέσεις όπου το αυτί - δέκτης βρίσκεται στη περιοχή του ελάχιστου της συνολικής ηχητικής έντασης.

Αποτέλεσμα της συμβολής των ηχητικών κυμάτων είναι και τα στάσιμα κύματα που συχνά δημιουργούνται σε διατάξεις που παράγουν ήχο. Το βασικό χαρακτηριστικό των στάσιμων κυμάτων είναι ότι η φάση τους παραμένει σταθερή. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην ακουστική έχουν τα στάσιμα κύματα που προέρχονται από την συμβολή δυο κυμάτων ίδιου πλάτους, ίδιας συχνότητας αλλά αντίθετης κατεύθυνσης. Κατά την συμβολή δυο ήχων των οποίων οι τιμές της συχνότητας ν_1, ν_2 διαφέρουν πολύ λίγο μεταξύ τους παρουσιάζεται το φαινόμενο των διακροτημάτων. Σύμφωνα με αυτό ακούγονται περιοδικές ενισχύσεις και μειώσεις της έντασης του συνολικού ήχου με συχνότητα ν_δ που ισούται ακριβώς με την διαφορά των δυο συχνοτήτων $\nu_\delta = \nu_1 - \nu_2$.

Απορρόφηση ηχητικών κυμάτων

Ο ήχος που διέρχεται μέσω κάποιου υλικού υφίσταται ελάττωση της έντασης του καθ' ότι μέρος της αρχικής του ενέργειας μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα. Εάν ο αρχικά προσπίπτον ήχος, σε υλικό πάχους l , έχει ένταση J_0 τότε ο εξερχόμενος ήχος έχει ένταση J που υπολογίζεται από την αναλυτική σχέση :

$$J = J_0 e^{-\mu l}$$

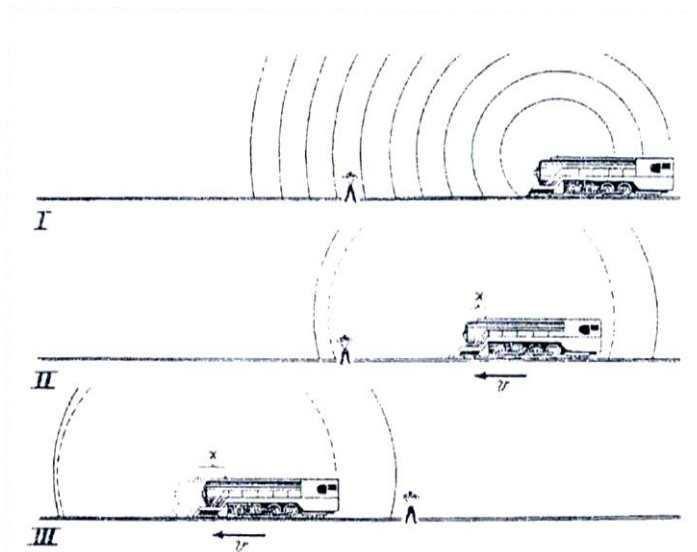
Όπου μ είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης ο οποίος εξαρτάται κυρίως από το υλικό που προκαλεί αυτή την απορρόφηση. Ο εκθετικός παράγοντας $e^{-\mu l}$ είναι καθαρός αριθμός και μικρότερος της μονάδας στο μέτρο όπου ο εξερχόμενος ήχος πρέπει να έχει μικρότερη ένταση από την αρχική. Καλοί απορροφητές του ήχου θεωρούνται τα πορώδη υλικά στα οποία το μεγαλύτερο τμήμα της ηχητικής ενέργειας μετατρέπεται εις τους πόρους αυτών σε θερμότητα. Τέτοια υλικά είναι τα χαλιά, οι κουρτίνες, η τσόχα, ή ακόμα οι σοβάδες, το φελιζόλ, το κόντρα πλακέ και άλλα οικοδομικά υλικά.

Φαινόμενο Doppler

Η συχνότητα του ήχου την οποία αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής εξαρτάται επακριβώς από το πλήθος των ηχητικών κυμάτων που φθάνουν στο αυτί του στη μονάδα του χρόνου. Έτσι, εάν ο παρατηρητής κινείται σε σχέση με την ηχογόνο πηγή θα συναντήσει διαφορετικό αριθμό κυμάτων από αυτόν που θα συναντούσε εάν παρέμενε ακίνητος. Συνέπεια των προηγούμενων είναι πως η συχνότητα που γίνεται αντιληπτή από τον παρατηρητή είναι διαφορετική από αυτή του ήχου που εκπέμπει η πηγή. Το φαινόμενο αυτό που ισχύει για όλα τα κύματα γενικά, ονομάζεται φαινόμενο Doppler προς τιμήν του Αυστριακού Φυσικού Christian Doppler (1803 - 1853) που πρώτος το ανέφερε σε δημοσίευση (1842) και αφορούσε το παρατηρούμενο χρώμα σε κινούμενα φωτεινά σώματα.

Αντίστοιχο ανάλογο για την κατανόηση του φαινομένου είναι η χαρακτηριστική περίπτωση ενός εμπορικού αντιπροσώπου ο οποίος ταξιδεύει συχνά μακριά από το σπίτι του. Έστω ότι ο συγκεκριμένος αντιπρόσωπος στέλνει προς την οικογένειά του μια επιστολή την εβδομάδα. Όταν λοιπόν ταξιδεύει απομακρυνόμενος τότε κάθε καινούργια επιστολή θα χρειαστεί να διανύσει λίγο μεγαλύτερη απόσταση από τη προηγούμενη με αποτέλεσμα να φτάνουν οι επιστολές του με κάπως βραδύτερο ρυθμό από μια επιστολή την εβδομάδα. Αντίθετα, όταν αυτός βρίσκεται στο δρόμο της επιστροφής κάθε καινούργια επιστολή θα χρειαστεί να διανύσει απόσταση λίγο μικρότερη από την αμέσως προηγούμενη και έτσι οι επιστολές θα φθάνουν συχνότερα από μια την εβδομάδα. Είναι λοιπόν προφανές ότι η συχνότητα λήψης των επιστολών μεταβάλλεται παρόλο που η συχνότητα αποστολής αυτών παραμένει σταθερή και ίση με μια επιστολή την εβδομάδα.

Για παράδειγμα, σε ότι αφορά την ακουστική, είναι γνωστό ότι διαφορετικά γίνεται αντιληπτό το άκουσμα της σειρήνας ενός αυτοκινήτου που μας πλησιάζει από αυτό στη περίπτωση που το ίδιο ακριβώς κινητό απομακρύνεται από εμάς. Στην πρώτη περίπτωση ο ήχος είναι οξύτερος ενώ στη δεύτερη αντίστοιχα χαμηλότερης συχνότητας. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η διάταξη των ηχητικών κυμάτων από βαγόνι τραίνου στη περίπτωση ακίνητου ακροατή. Τα μέτωπα κύματος εμφανίζονται αριστερά να "πυκνώνουν" ενώ αντίστοιχα δεξιά, πίσω από το βαγόνι, να "αραιώνουν".



Γενικά εάν v' είναι η συχνότητα που ακούει και αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής (Α) και v η συχνότητα η οποία εκπέμπεται από την ηχογόνο πηγή (Π) τότε αποδεικνύεται ότι είναι $v' > v$ εφόσον η κίνηση ελαττώνει την σχετική απόσταση πηγής - παρατηρητή ενώ στην αντίθετη περίπτωση ισχύει $v' < v$. Μάλιστα η ακριβής υπολογιστική σχέση είναι:

$$v' = v [(V +/- U_A) / (V -/+ U_{\Pi})]$$

Όπου τα πρόσημα +/- έχουν να κάνουν με τις φορές της κίνησης. Πιο συγκεκριμένα ισχύουν οι εξής επιμέρους περιπτώσεις :

(1) Η πηγή παραμένει ακίνητη ($U_{\Pi} = 0$) τότε εάν ο παρατηρητής πλησιάζει ισχύει:

$$v' = v [(V + U_A) / (V)]$$

ενώ εάν ο παρατηρητής απομακρύνεται αντίστοιχα ισχύει:

$$v' = v [(V - U_A) / (V)]$$

(2) Ο παρατηρητής παραμένει ακίνητος ($U_A = 0$) τότε εάν η πηγή πλησιάζει ισχύει:

$$v' = v [(V) / (V - U_{\Pi})]$$

ενώ εάν η πηγή απομακρύνεται αντίστοιχα ισχύει:

$$v' = v [(V) / (V + U_{\Pi})]$$

Σε όλες τις προηγούμενες σχέσεις το V συμβολίζει την ταχύτητα του ήχου, στο μέσο όπου γίνεται η συγκεκριμένη διάδοση, ενώ U_A και U_{Π} οι ταχύτητες του παρατηρητή και της πηγής αντίστοιχα.

4. Τα χαρακτηριστικά ενός ήχου είναι : Το ύψος, η ένταση - ακουστότητα και η χροιά

Ύψος

Το ύψος ενός ήχου συσχετίζεται με την συχνότητα. Δηλαδή, το ύψος είναι η υποκειμενική απόκριση του ανθρώπινου αυτιού στην συχνότητα, γρήγορες δονήσεις μιας πηγής ήχου παράγουν διαπεραστική, υψηλή νότα ενώ οι αντίστοιχες αργές δονήσεις παράγουν βαθιά, χαμηλή νότα. Σημειώνεται ότι το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται ήχους από περίπου 20 Hz έως και 20000 Hz. Βέβαια, το ανώτερο όριο της ανθρώπινης ακοής ελαττώνεται όσο μεγαλώνει η ηλικία. Το ύψος του μεσαίου ντο, για παράδειγμα, στη κλίμακα ενός πιάνου, αντιστοιχεί σε τιμή συχνότητας τα 264 Hz. Αλλάζοντας τη συχνότητα της δονούμενης πηγής παίρνουμε διαφορετικούς μουσικούς ήχους. Αυτό γίνεται συνήθως αλλάζοντας το μέγεθος, την τάση ή και την μάζα του δονούμενου αντικειμένου. Για παράδειγμα ο κιθαρίστας «αλλάζει» το μήκος της συγκεκριμένης χορδής που τον ενδιαφέρει «σταματώντας» την με το δάκτυλο. Ο μουσικός των πνευστών αλλάζει το μήκος της δονούμενης στήλης του αέρα για να μεταβάλλει κατάλληλα το ύψος (συχνότητα) του παραγόμενου ήχου.

Ένταση - Ακουστότητα

Η ένταση του ήχου εξαρτάται άμεσα από το πλάτος της ταλάντωσης που τον δημιουργεί, μάλιστα είναι ανάλογη με το τετράγωνο του συγκεκριμένου πλάτους. Ένα μέγεθος που συσχετίζεται με την ένταση αλλά έχει πολύ μεγάλη πρακτική σημασία είναι η ακουστότητα (η αποκαλούμενη και στάθμη έντασης) και μετρείται σε ντεσιμπέλ (dB). Η διαβάθμιση των ντεσιμπέλ έχει λογαριθμικό χαρακτήρα, ένας ήχος 10 dB είναι 10 φορές δυνατότερος από τον ήχο των 0 dB που είναι και το κάτω όριο της ανθρώπινης ακοής, τα 20 dB είναι 100 φορές δυνατότερα από το κατώφλι της ακοής. Οι βλάβες του φυσιολογικού αισθητηρίου της ακοής αρχίζουν από τα 85 dB ενώ ο βαθμός βλάβης εξαρτάται όχι μόνο από την συνολική διάρκεια που ακούγεται ο ήχος αλλά και από τα χαρακτηριστικά της συχνότητας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποιοι συνηθισμένοι ήχοι ηχητικών πηγών με τις αντίστοιχες στάθμες έντασης (ή επίπεδα έντασης) που αυτές φαίνεται να προκαλούν.

Ηχητική πηγή	(dB)
Αεριωθούμενο αεροπλάνο (στα 30μ)	140
Ενισχυμένη μουσική ντίσκο	115
Συζήτηση στο σπίτι	65
Θρόισμα φύλλων	10
Κατώφλι ακοής	0

Χροιά

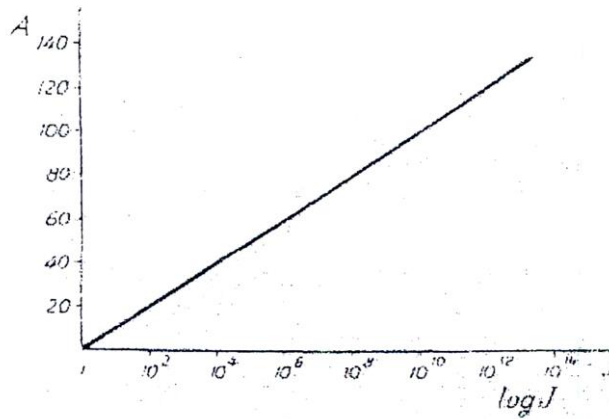
Χροιά: Κάθε μουσικό όργανο έχει σύνθετο, χαρακτηριστικό ήχο με διαφορετική όμως χροιά. Δεν υπάρχει καμιά δυσκολία να διακρίνει κανείς τον ήχο ενός πιάνου από τον ήχο ενός κλαρινέτου έστω αν και τα δυο μουσικά όργανα εκπέμπουν στην ίδια ακριβώς συχνότητα. Οι περισσότεροι μουσικοί ήχοι αποτελούνται από μια βασική συχνότητα και από ένα σύνολο ασθενέστερων γενικά τόνων με μεγαλύτερες συχνότητες που λέγονται ανώτεροι αρμονικοί. Οι περισσότεροι μουσικοί ήχοι προκύπτουν από υπέρθεση πολλών συχνοτήτων. Οι υψηλότερες συχνότητες, των ανώτερων αρμονικών, δίνουν την χαρακτηριστική χροιά. Οι συχνότητες των αρμονικών αποδεικνύεται ότι δεν έχουν τυχαίες τιμές αλλά, πρόκειται για ακέραια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας.

5. Μέτρηση ακουστότητας - έντασης ήχου (Phon - dB)

Δυο απλοί ήχοι της ίδιας ακριβώς συχνότητας αλλά με διαφορετική ένταση προκαλούν στον ακροατή την εντύπωση δυο ήχων με το ίδιο ύψος αλλά διαφορετική ακουστότητα. Έχει βρεθεί ότι η ακουστότητα A την οποία προκαλεί ένας ήχος σε κάποιο ακροατή εξαρτάται από την ένταση J του ίδιου του ήχου και μάλιστα όταν η ένταση είναι μικρότερη μιας τιμής αναφοράς J_0 ($J_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$) τότε η ακουστότητα A είναι ίση με μηδέν (0), δηλαδή ο ήχος δεν είναι πρακτικά ακουστός. Η τιμή της έντασης J_0 είναι γνωστή στη σχετική βιβλιογραφία με τον όρο "κατώφλι ακουστότητας". Αποδεικνύεται ότι η σχέση μεταξύ ακουστότητας A και ηχητικής έντασης J είναι λογαριθμική και δίνεται από :

$$A = C \log (J / J_0)$$

Όπου C είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τον παρατηρητή αλλά και την συχνότητα του κάθε ήχου. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η γραμμική σχέση μεταξύ της ακουστότητας και του λογαρίθμου της έντασης.



Από το διάγραμμα αποδεικνύεται ότι για να είναι σχετικά μεγάλη η ακουστότητα πρέπει η ένταση του ήχου να είναι πολύ μεγαλύτερη από την ένταση αναφοράς J_0 του κατωφλίου. Δηλαδή ένας πολύ ισχυρός ήχος μπορεί να έχει ένταση κατά 10^{13} φορές μεγαλύτερη από την τιμή της έντασης του κατωφλίου.

Η λογαριθμική σχέση μεταξύ της ακουστότητας (αποτέλεσμα) και της εντάσεως του προκαλούντος ήχου (αιτία) αποτελεί μια επί μέρους περίπτωση του ψυχοφυσικού νόμου των Weber - Fechner ο οποίος γενικά συσχετίζει την ένταση οποιουδήποτε υποκειμενικού αισθήματος με την ένταση του αντίστοιχου, σχετικού ερεθίσματος.

Η λογαριθμική σχέση που προηγήθηκε μπορεί επίσης να γραφεί και υπό την μορφή :

$$\Delta J_{\min} = (1/C) \Delta A_{\min} J$$

Όπου ΔA_{\min} είναι η ελάχιστη διαφορά από δυο ακουστότητες που μπορεί να γίνει οριακά αντιληπτή σε ήχο έντασης J. Παρατηρεί λοιπόν κανείς ότι η ελάχιστη διαφορά ΔJ_{\min} στις εντάσεις ήχων που γίνεται αντιληπτή είναι ευθέως ανάλογη της έντασης J του ήχου.

Το προηγούμενο σχόλιο είναι ακριβώς το περιγραφικό αποτέλεσμα της ισχύος του προαναφερθέντος νόμου Weber - Fechner και ισχύει κάθε φορά που πραγματοποιείται μια υποκειμενική, ανθρώπινη εκτίμηση. Αντίστοιχο, μηχανικό ανάλογο είναι η σύγκριση μεταξύ δυο σωμάτων με περίπου ίσα βάρη που θέλει να πραγματοποιήσει κάποιος τοποθετώντας τα στα δυο του χέρια. Το ελάχιστο βάρος που μπορεί αυτός να αντιληφθεί (ως συγκριτική διαφορά μεταξύ τους) είναι μεν 20g όταν πρόκειται για σώματα των 100g αλλά όμως 200g όταν τα συγκρινόμενα σώματα είναι κατά 10 φορές βαρύτερα (1000g).

Διαπιστώνει λοιπόν κανείς ότι όταν αντιμετωπίζει ήχους με πολύ μεγάλη ένταση δύσκολα διακρίνει τις μικρές διαφορές που ενδεχομένως αυτοί μπορεί να έχουν. Για την μέτρηση της ακουστότητας χρησιμοποιείται η μονάδα Phon, ο ήχος που γίνεται μόλις ακουστός θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε 1 Phon ενώ ο ήχος με μεγάλη ένταση ώστε να προκαλεί πόνο

αντιστοιχεί σε ακουστότητα 130 Phon. Για παράδειγμα ο κινητήρας ενός αεροπλάνου σε απόσταση 40 μέτρων προκαλεί ήχο με ακουστότητα περίπου 120 Phon, ενώ ο ήχος ενός σχετικά ήσυχου δρόμου αντιστοιχεί σε ακουστότητα 30 Phon.

Θεωρώντας ότι ο ήχος είναι συχνότητας 1000Hz (συχνότητα αναφοράς), η σταθερά C λαμβάνει την τιμή 10 και έτσι προκύπτει η σχέση:

$$A = 10 \log (J / J_0)$$

Βέβαια εάν $A = 1$ Phon, τότε $0.1 = \log (J / J_0)$ οπότε και $J = 1.259 J / J_0$, δηλαδή επί πλέον ακουστότητα ενός (1) Phon προκαλεί εκείνος ο ήχος του οποίου η ένταση είναι 1.259 φορές μεγαλύτερη από την ένταση του κατωφλιού. Πειραματικά έχει βρεθεί ότι δυο ήχοι με ακουστότητες που διαφέρουν μόλις κατά 1 Phon πολύ δύσκολα διακρίνονται από ένα "μέσο" ακροατή ως διαφορετικοί ήχοι.

Η προηγούμενη σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικά προκειμένου να οριστεί μια μονάδα η οποία ονομάζεται decibel (dB) και η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα για την σχετική σύγκριση των δυο εντάσεων J_1, J_2 . Δηλαδή η σχέση γίνεται:

$$A = 10 \log (J_1 / J_2),$$

Δηλαδή, δυο ήχοι διαφέρουν, ως προς την ένταση, κατά 1 dB όταν ο λογάριθμος του ηλίκου τους είναι ίσος προς 0.1 έτσι ισχύει: $0.1 = \log (J_1 / J_2)$ και άρα $J_1 = 1.259 J_2$. Οι εντάσεις λοιπόν δυο ήχων διαφέρουν κατά 1 dB όταν η ένταση του ενός είναι κατά 25% περίπου μεγαλύτερη από την ένταση του άλλου ήχου.

Επίσης όταν διπλασιάζεται η απόσταση από μια σημειακή πηγή αποδεικνύεται ότι η ένταση ελαττώνεται κατά 6 dB. Αυτό ισχύει διότι η ένταση στη νέα θέση ελαττώνεται με το τετράγωνο της απόστασης με αποτέλεσμα η νέα, μικρότερη ένταση να είναι ίση με το $\frac{1}{4}$ της αρχικής, οπότε και ισχύει:

$$A - 10 \log (J_1 / J_2) = 10 \log (J_1 / 0.25J_1) = 10 \log 4 = 6 \text{ dB.}$$

Λόγω λοιπόν του ότι το εύρος των μετρούμενων μεγεθών στην ακουστική είναι ιδιαίτερα μεγάλο (αρκετές τάξεις μεγέθους) χρησιμοποιούνται κατάλληλες λογαριθμικές μονάδες που ονομάζονται γενικά στάθμες (levels). Μια από αυτές τις μονάδες είναι και το decibel (dB) που όπως ήδη αναφέρθηκε ορίζεται σαν το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου μιας αδιάστατης ποσότητας. Αδιάστατες ποσότητες είναι οι λόγοι δυο ομοειδών φυσικών ποσοτήτων όπως π.χ. εντάσεις, ισχύς ή και πιέσεις. Μάλιστα εάν ο παρονομαστής του συγκεκριμένου κλάσματος θεωρηθεί ως ποσότητα αναφοράς τότε οι μονάδες decibel μπορούν και μετρούν απόλυτα μεγέθη.

Στην ακουστική χρησιμοποιούνται σήμερα οι εξής τρεις ηχητικές στάθμες:

(α) Στάθμη έντασης ήχου: $L_I = 10 \log (J / J_0)$, όπου J_0 η ένταση με σχετική τιμή αναφοράς: 10^{-12} W/m^2 .

(β) Στάθμη πίεσης ήχου $L_P = 10 \log (P^2 / P_0^2) = 20 \log (P / P_0)$, όπου P_0 η πίεση αναφοράς με τιμή: $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, και τέλος

(γ) Στάθμη ισχύος ήχου : $L_w = 10 \log (W / W_0)$, όπου W_0 η ισχύς αναφοράς με σχετική τιμή 10^{-12} Watt.

Θεωρητικά στον αέρα δεν μπορεί να παραχθεί ήχος με στάθμη πίεσης μεγαλύτερη από περίπου 200 dB και αυτό διότι η δημιουργούμενη υποπίεση δεν μπορεί να λαμβάνει αρνητικές τιμές. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι ηχητικές στάθμες δεν προστίθενται αριθμητικά. Δηλαδή, αν σε κάποιο χώρο υπάρχουν δυο ανεξάρτητες πηγές ήχων όπου η κάθε μια στην ίδια ακριβώς περιοχή παράγει ήχο στάθμης (σε dB) α και β αντίστοιχα, τότε η μετρούμενη συνολικά στάθμη ήχου δεν είναι η ποσότητα $(\alpha + \beta)$ σε dB.

Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζει κανείς τα συνολικά dB στην περίπτωση της ταυτόχρονης παρουσίας δυο ήχων με αντίστοιχες στάθμες L_1 και L_2 δίνεται από την σχέση :

$$L_{1+2} = 10 \log [10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}]$$

Για παράδειγμα, εάν μια ηχητική πηγή δημιουργεί στο χώρο 50dB και αρχίσει να λειτουργεί στον ίδιο χώρο και μια άλλη ακριβώς όμοιά της, τότε στην ίδια περιοχή με πριν τα συνολικά dB δεν είναι 100 (= 50 + 50) αλλά : $10 \log [10^5 + 10^5] = 53.0$ dB. Δηλαδή, πολύ λιγότερα από τα αναμενόμενα μιας απλής άθροισης.

Η αντίστοιχη αλγεβρική σχέση για την «αφαίρεση» των dB είναι η :

$$L_2 = 10 \log [10^{L_1+2/10} - 10^{L_1/10}]$$

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι γενικά στην πράξη δεν έχουν νόημα οι υπολογισμοί των dB με ακρίβεια μεγαλύτερη του 0.1dB.

6. Μουσικά Όργανα (Έγχορδα, Πνευστά, Κρουστά)

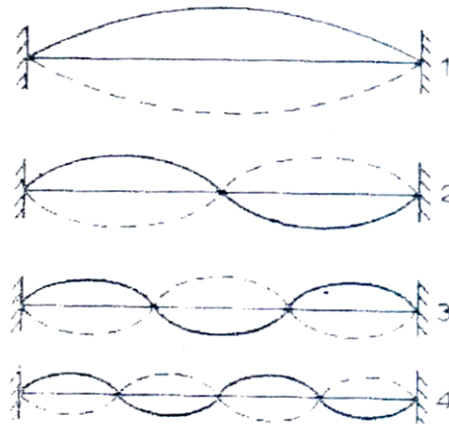
Τα συμβατικά μουσικά όργανα κατατάσσονται σε μια από τις εξής τρεις γενικές κατηγορίες: σε όσα ο ήχος παράγεται από δονούμενες χορδές, σε όσα παράγεται από δονούμενη στήλη αέρα και τέλος σε όσα παράγεται με την κρούση και τη δόνηση μιας δυσδιάστατης, ελαστικής επιφάνειας.

Σε ένα έγχορδο όργανο η δόνηση των χορδών μεταδίδεται κυρίως στο ηχείο και μετά στον περιβάλλοντα αέρα έξω από το όργανο, με μεγάλο όμως διασκορπισμό ενέργειας. Τα έγχορδα όργανα είναι χαμηλής σχετικά απόδοσης και για αυτό ακριβώς είναι αριθμητικώς πολλά σε κάθε ορχήστρα. Ο μικρότερος αριθμός των πνευστών οργάνων με την μεγαλύτερη επί μέρους απόδοση εξισορροπεί ικανοποιητικά τον μεγαλύτερο αριθμό π.χ. των βιολιών.

Η χορδή είναι συνήθως κυλινδρικής μορφής με κυκλική τομή της οποίας η διάμετρος είναι πολύ μικρή σε σχέση με το μήκος της. Η χορδή θεωρείται ότι δεν παρουσιάζει σημαντική αντίσταση σε κάμψη και δονείται μεταξύ δυο ακλόνητων στηριγμάτων. Στη παραγωγή μουσικών φθόγγων ενδιαφέρουν κυρίως οι εγκάρσιες δονήσεις. Όταν διεγείρουμε μια χορδή χτυπώντας την κάθετα σε κάποιο σημείο της τότε αυτό αρχίζει να εκτελεί εγκάρσια δόνηση η οποία διαδίδεται κατά μήκος της χορδής εκατέρωθεν του σημείου διεγέρσεως. Έτσι δημιουργούνται δυο εγκάρσια κύματα τα οποία εις τα άκρα στήριξης της χορδής ανακλώνται, επιστρέφουν και συμβάλλουν με το αρχικό δημιουργώντας δυο στάσιμα

κύματα. Εάν οι δεσμοί και οι κοιλίες των δυο στάσιμων κυμάτων συγκυριακά συμπίπτουν τότε δημιουργείται ένα μόνιμο στάσιμο κύμα διαφορετικά η χορδή εκτελεί πολύπλοκη κίνηση. Τα σταθερά άκρα της χορδής αποτελούν πάντοτε σημεία δεσμών για το στάσιμο κύμα και μάλιστα η απόσταση τους οφείλει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος.

Στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ταλαντώσεις που μπορεί να εκτελέσει μια χορδή η οποία είναι ακλόνητα στερεωμένη στα δυο της άκρα. Πρόκειται για τα διάφορα στάσιμα κύματα της θεμελιώδους ταλάντωσης καθώς και των ανώτερων όπως λέγονται αρμονικών της.



Η χορδή λοιπόν με γεωμετρικό μήκος l επιτρέπει την δημιουργία στάσιμων κυμάτων με μήκη κύματος λ που ικανοποιούν την γενική σχέση :

$$l = n \lambda / 2$$

όπου n ο ακέραιος αριθμός 1,2,3... Βέβαια για $n = 1$ δημιουργείται η θεμελιώδης ταλάντωση της χορδής με μήκος κύματος $\lambda = 2 l$, με την ίδια συχνότητα ν της θεμελιώδους ταλάντωσης δονούνται και τα γειτονικά μόρια του περιβάλλοντος αέρα και έτσι προκύπτει ήχος που καλείται θεμελιώδης ή πρώτος αρμονικός. Τα υπόλοιπα στάσιμα κύματα που μπορούν να δημιουργηθούν επί της ίδιας χορδής θα αντιστοιχούν σε μήκη κύματος : $2l/2$, $2l/3$, $2l/4$ κ.λπ. με συχνότητες 2ν , 3ν , 4ν ... που καλούνται δεύτερος αρμονικός, τρίτος αρμονικός κ.λπ. Κατά την παραγωγή κάποιου μουσικού φθόγγου η χορδή πάλλεται κατά πολύπλοκο τρόπο ο οποίος προκύπτει από την σύνθεση της θεμελιώδους ταλάντωσης και των δυνατών αρμονικών αυτής με διάφορα πλάτη. Η σύνθεση αυτή ρυθμίζει ακριβώς τη χροιά του μουσικού φθόγγου και εξαρτάται ουσιαστικά από τον τρόπο διέγερσης της χορδής.

Εάν F είναι η δύναμη με την οποία τείνεται η χορδή μήκους l , πυκνότητας υλικού d και ακτίνας r αποδεικνύεται ότι οι συχνότητες που δημιουργούνται κάθε φορά, ικανοποιούν την υπολογιστική σχέση:

$$\nu = (n/2lr) (F/\pi d)^{1/2}$$

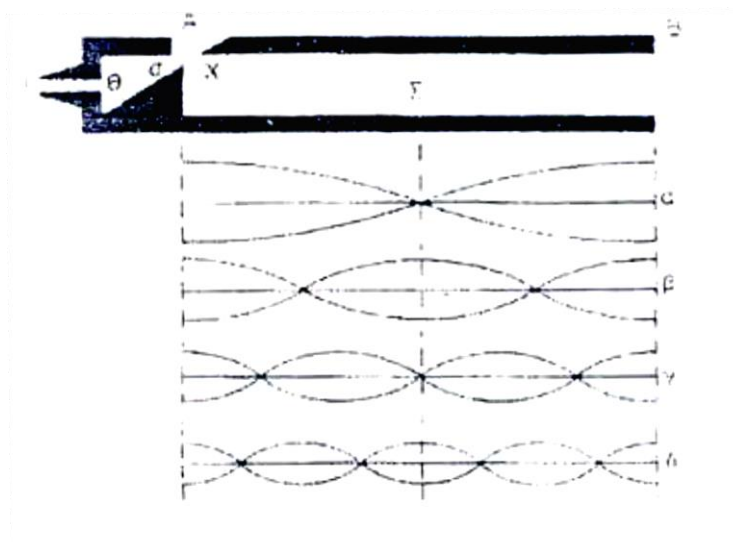
Από την προηγούμενη σχέση (ο νόμος των χορδών) συμπεραίνεται ότι η συχνότητα του θεμελιώδους ήχου ($n = 1$) είναι: αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της χορδής και της ακτίνας της τομής της, ανάλογη προς την τετραγωνική ρίζα της τείνουσας δύναμης και αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας της.

Στα πνευστά ο ήχος εκπέμπεται κατευθείαν από την παλλόμενη στήλη αέρα του οργάνου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να υποστεί δόνηση η στήλη του αέρα. Στις τρομπέτες, τα τρομπόνια και τα κόρνα οι δονήσεις των χειλιών του μουσικού δημιουργούν στάσιμα κύματα στην στήλη του αέρα με τα κύματα που ανακλώνται στην στυλιπνή εσωτερική επιφάνεια του οργάνου. Το μήκος της στήλης του αέρα ρυθμίζεται καθώς ο μουσικός χειρίζεται κατάλληλα βαλβίδες που προσθέτουν ή αφαιρούν συγκεκριμένα τμήματα της στήλης. Στα ξύλινα πνευστά όπως τα κλαρινέτα, τα όμποε και τα σαξόφωνα το ρεύμα αέρα που δημιουργεί ο μουσικός δονεί μια γλωσσίδα. Τέλος στις φλογέρες και τα φλάουτα ο μουσικός φυσά τον αέρα στη κόχη μιας οπής που αρχίζει να δονείται μεταδίδοντας έτσι αυτή την δόνηση στη στήλη του αέρα.

Οι ηχητικοί σωλήνες διακρίνονται σε ανοικτούς ή σε κλειστούς, οι μεν πρώτοι συγκοινωνούν και με τα δυο άκρα με την ατμόσφαιρα ενώ οι δεύτεροι μόνο με το ένα άκρο. Στους ανοικτούς ηχητικούς σωλήνες και στα δυο άκρα δημιουργούνται κοιλίες στάσιμων κυμάτων με αποτέλεσμα το μήκος του σωλήνα l να ικανοποιεί την γενική σχέση :

$$l = n \lambda / 2$$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η τομή ενός ανοικτού, ηχητικού σωλήνα καθώς και τις διαφορετικές μορφές δημιουργουμένων στάσιμων κυμάτων σε αυξανόμενη τάξη αρμονικών.



Εάν μάλιστα V είναι η ταχύτητα του ήχου εντός του αερίου του συγκεκριμένου σωλήνα τότε οι συχνότητες ν που δημιουργούνται ικανοποιούν την βασική σχέση :

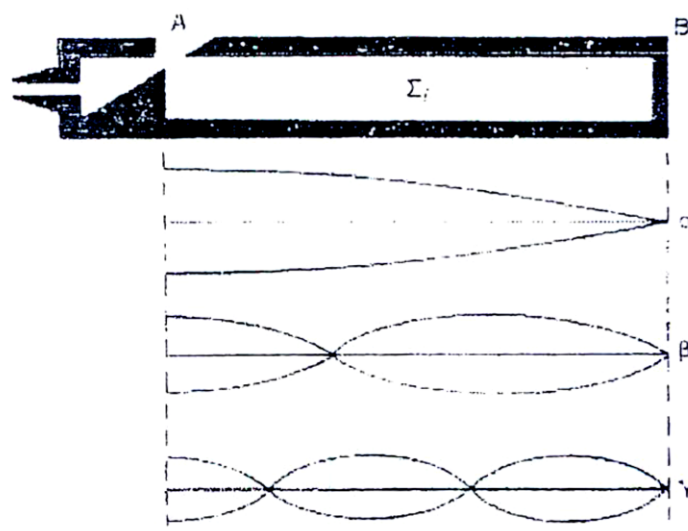
$$\nu = n (V / 2l)$$

όπου n ακέραιοι, διαδοχικοί αριθμοί και έτσι για $n = 1$ αντιστοιχεί η θεμελιώδης ταλάντωση, για $n = 2$ η συχνότητα του δεύτερου αρμονικού κ.λ.π.

Στους κλειστούς ηχητικούς σωλήνες το αέριο που τίθενται σε διέγερση δημιουργεί κάθε φορά στάσιμα κύματα τα οποία στο μεν ανοικτό άκρο δημιουργείται πάντα κοιλία ενώ στη περιοχή του κλειστού άκρου δεσμό. Εάν l είναι το μήκος του κλειστού σωλήνα τότε τα μήκη κύματος των ήχων που δημιουργούνται ικανοποιούν τη σχέση :

$$l = n \lambda / 4$$

Στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται σχηματικά η τομή ενός κλειστού ηχητικού σωλήνα καθώς και οι διαφορετικές μορφές δημιουργούμενων στάσιμων κυμάτων σε αυξανόμενη κάθε φορά τάξη αρμονικών.



Εάν μάλιστα V είναι η ταχύτητα του ήχου εντός του αερίου του κλειστού σωλήνα τότε οι συχνότητες ν που δημιουργούνται ικανοποιούν την βασική σχέση :

$$\nu = n (V / 4l)$$

όπου και πάλι για $n = 1$ αντιστοιχεί η θεμελιώδης ταλάντωση, για $n = 2$ η συχνότητα του δεύτερου αρμονικού κ.λ.π.

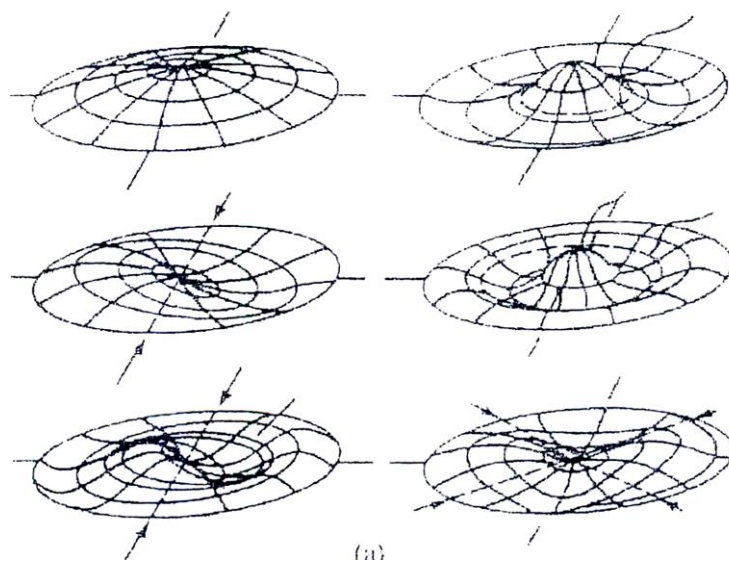
Διαπιστώνει λοιπόν συμπερασματικά κανείς ότι ο θεμελιώδης ήχος που παράγεται από ανοικτό (ή και κλειστό) ηχητικό σωλήνα είναι ανάλογος της ταχύτητας του ήχου και

αντιστρόφως ανάλογος προς το φυσικό μήκος του σωλήνα. Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι ο θεμελιώδης ήχος κλειστού σωλήνα έχει την ίδια συχνότητα με το θεμελιώδη ήχο ανοικτού σωλήνα με διπλάσιο όμως μήκος. Βέβαια σε ότι αφορά τη σειρά των αρμονικών στους μεν ανοικτούς οι συχνότητες ακολουθούν τη σειρά των διαδοχικών αριθμών 1, 2, 3, 4 κ.λπ. ενώ στους κλειστούς τη σειρά των αριθμών 1, 3, 5, 7... κ.λπ.

Στα κρουστά όργανα, τα τύμπανα, τα κύμβαλα ο ήχος παράγεται από την κρούση μιας δυσδιάστατης μεμβράνης ή ελαστικής επιφάνειας. Η βασική συχνότητα που παράγεται εξαρτάται από την γεωμετρία, την ελαστικότητα και το πόσο καλά τεντωμένη είναι η επιφάνεια που ταλαντώνεται. Η συχνότητα μεταβάλλεται εάν αλλάξουμε το τέντωμα της επιφάνειας. Για παράδειγμα πιέζοντας με το χέρι την άκρη της μεμβράνης του τυμπάνου αυξάνουμε την τάση. Μπορούμε να προκαλέσουμε διαφορετικές μορφές δονήσεων χτυπώντας την επιφάνεια σε διαφορετικές περιοχές. Και εδώ, όπως άλλωστε σε όλους τους μουσικούς ήχους, η χροιά εξαρτάται από τον αριθμό και την σχετική ένταση των ανώτερων αρμονικών.

Η μεμβράνη θεωρείται ότι έχει πάρα πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις δυο άλλες διαστάσεις, ακόμη η ίδια δεν παρουσιάζει αντίσταση στη κάμψη και όταν στερεωθεί εντός πλαισίου αποκτά μόνιμο σχήμα το οποίο τείνει σχεδόν αμέσως να επανακτήσει σε περίπτωση που παραμορφωθεί. Μπορούμε εύκολα να διεγείρουμε ταλαντώσεις σε δυο διαστάσεις όπως για παράδειγμα, σε μια μεμβράνη που είναι τεταμένη πάνω σε κυκλική στεφάνη, όπως σε ένα τύμπανο. Ο κύπος σε κάποια περιοχή της μεμβράνης δημιουργεί κύματα τα οποία μεταδίδονται στη στεφάνη από όπου ανακλώνται πίσω - εμπρός πολλές φορές. Ο παραγόμενος ήχος δεν είναι μελωδικός, αλλά παράγει κρότο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παλλόμενη μεμβράνη του τυμπάνου καθώς και το αντηχείο του δεν φιλτράρουν τον ήχο παράγοντας μια ή δυο σαφείς συχνότητες όπως τα έγχορδα ή και τα πνευστά μουσικά όργανα.

Στο σχήμα (α) που ακολουθεί παρουσιάζονται διαγραμματικά μερικές από τις πιθανές ταλαντώσεις μιας παλλόμενης, κυκλικής μεμβράνης.

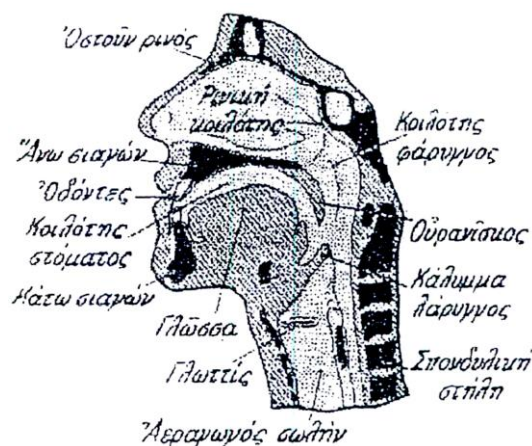


Οι δεσμοί τώρα δεν είναι πλέον σημεία όπως στη περίπτωση της μονοδιάστατης χορδής αλλά γραμμές που ονομάζονται μάλιστα δεσμικές γραμμές. Είναι προφανές ότι η ακίνητη περιμετρική στεφάνη του τυμπάνου είναι αναγκαστικά μια τέτοια δεσμική γραμμή. Η θεμελιώδης συχνότητα είναι η συμμετρική ταλάντωση με μια και μοναδική δεσμική καμπύλη την στεφάνη του τυμπάνου. Οι άλλες μορφές ταλάντωσης δεν αντιστοιχούν σε συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους και δεν αποτελούν αρμονική σειρά. Όταν χτυπούμε ένα τύμπανο διεγείρονται πολλές από αυτές τις ταλαντώσεις ταυτόχρονα, βέβαια οι υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις μειώνονται πολύ γρήγορα και έτσι επιβεβαιώνεται ότι τα τύμπανα παράγουν κυρίως κρότους και όχι κάποια μελωδία.

7. Η ανθρώπινη φωνή

Το όργανο δημιουργίας της ανθρώπινης φωνής θα έλεγε κανείς ότι ξεκινάει, από τους πνεύμονες οι οποίοι μέσω της τραχείας παρέχουν το αναγκαίο εκείνο ρεύμα αέρα ώστε ο λάρυγγας, που φέρει ειδικές πτυχώσεις, να παράγει την φωνή. Στη συνέχεια οι κοιλότητες του στόματος και της μύτης το διαμορφώνουν κατάλληλα. Το ρεύμα αέρα θέτει σε παλμική κίνηση τις φωνητικές χορδές οι οποίες είναι δυο μεμβράνες στη μικρή περιοχή που συναντάται ο αεραγωγός σωλήνας με τον λάρυγγα.

Το ύψος του ήχου της ανθρώπινης φωνής εξαρτάται από την συχνότητα της παλμικής κίνησης των φωνητικών χορδών δηλαδή από την τάση, το πάχος αλλά και το ενεργό μήκος αυτών. Η χροιά όμως του αντίστοιχου ήχου εξαρτάται από το σχήμα των δυο αεροθαλάμων που βρίσκονται σε συντονισμό, δηλαδή της κοιλότητας του στόματος με την αντίστοιχη κοιλότητα του λάρυγγα. Οι συγκεκριμένες κοιλότητες ενισχύουν ορισμένους ανώτερους αρμονικούς και έτσι συσχετίζεται η θέση της γλώσσας και των δοντιών με τη χροιά του παραγόμενου κάθε φορά ήχου.



Στο δίπλα σχήμα παρουσιάζονται διαγραμματικά τα φωνητικά όργανα του ανθρώπου. Έχει παρατηρηθεί στατιστικά ότι το μήκος των φωνητικών χορδών στους άνδρες είναι κατά μέσο όρο 1.5 φορά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των γυναικών με αποτέλεσμα την διαφορετικότητα, κυρίως της χροιάς, στην ομιλία. Ακόμη, στις χορωδίες οι φωνητικές χορδές των υψίφωνων είναι συγκριτικά μικρότερου μήκους από ότι στους βαθύφωνους και έτσι η φωνητική μεμβράνη των πρώτων κινείται με μεγαλύτερη συχνότητα.

Η εκφώνηση διαφόρων φωνηέντων στο ίδιο ύψος δεν μεταβάλλει τη συχνότητα ταλάντωσης των φωνητικών χορδών αλλά πραγματοποιείται με την κατάλληλη μεταβολή του σχήματος της κοιλότητας του στόματος και της γλώσσας. Οι μεταβολές αυτές ενισχύουν

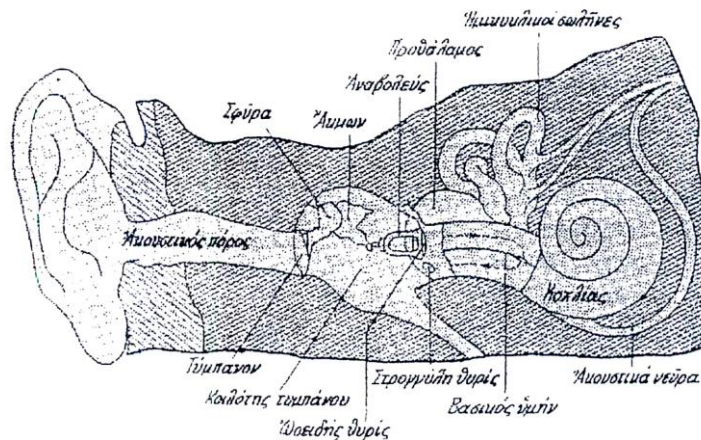
συγκεκριμένες αρμονικές και έτσι επιτυγχάνεται η μεταβολή της χροιάς του συγκεκριμένου ήχου.

8. Αυτί, το ανθρώπινο αισθητήριο της ακοής

Το ανθρώπινο αυτί διαιρείται μορφολογικά σε τρία μέρη: το εξωτερικό μέρος, το ενδιάμεσο (κοιλότητα) και το εσωτερικό (ακουστικός λαβύρινθος). Το εξωτερικό μέρος του αυτιού περιλαμβάνει το περύγιο και τον ακουστικό πόρο ο οποίος καταλήγει σε μια σχεδόν κυκλική μεμβράνη η οποία και καλείται τύμπανο.

Η κοιλότητα είναι πλήρης αέρα και χωρίζεται από μεν το εξωτερικό μέρος με το τύμπανο από δε τον λαβύρινθο με δυο θυρίδες διαφορετικού σχήματος την στρογγυλή και την ωσειδή. Μέσα στην κοιλότητα υπάρχουν τρία συνεργαζόμενα, ακουστικά οστά στη σειρά : η σφύρα, ο άκμων και ο αναβολέας. Η σφύρα ακουμπά στο τύμπανο και μέσω του άκμονα και του αναβολέα πραγματοποιείται η επικοινωνία με την ωσειδή θυρίδα. Η ευσταχιακή σάλπιγγα συνδέει τη συγκεκριμένη κοιλότητα με την κοιλότητα του στόματος και έτσι επιτυγχάνεται η ίδια ακριβώς πίεση στις δυο περιοχές (δεξιά, αριστερά) που διαχωρίζει η επιφάνεια του τυμπάνου.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση του ανθρώπινου αυτιού.



Ο λαβύρινθος είναι το εσωτερικό τμήμα του αυτιού και έχει ιδιαίτερα περίπλοκη μορφή, αποτελείται από την αίθουσα (στηρίζεται ο αναβολέας), από τους ημικυκλικούς σωλήνες και τέλος τον κοχλία. Όλα τα τμήματα αυτά είναι γεμάτα με υγρό, ο κοχλίας μάλιστα επικοινωνεί με σωλήνα ο οποίος χωρίζεται σε δυο μέρη μέσω του βασικού υμένα ο οποίος και διαθέτει το πλέον σημαντικό στοιχείο της ανθρώπινης ακοής που είναι το όργανο του Corti. Πρόκειται για ένα σύστημα πολυάριθμων λεπτών κυλίνδρων (στυλίσκοι, περίπου 6000 εξωτερικοί και 4000 εσωτερικοί). Οι στυλίσκοι αυτοί αφού διεγερθούν μεταδίδουν την συγκεκριμένη διέγερση στα ακουστικά νεύρα με τα οποία και συνδέονται. Τα ακουστικά νεύρα έχουν τελική κατάληξη τον ανθρώπινο εγκέφαλο.

Λειτουργία ανθρώπινου αυτιού

Ο ήχος διαδίδεται διαδοχικά στο εξωτερικό μέρος του αυτιού μέσω του υπάρχοντος αέρα, στη κοιλότητα μέσω των συνεργαζόμενων τριών οσταρίων και τέλος στο λαβύρινθο μέσω

του υγρού που βρίσκεται εκεί. Δηλαδή, οι μεταβολές της πίεσης του αέρα θέτουν το τύμπανο σε ταλάντωση η οποία διαδίδεται διαδοχικά μέσω των οσταρίων και της ωοειδούς θυρίδας στο υγρό του λαβυρίνθου. Οι ταλαντώσεις αυτές θέτουν σε εξαναγκασμένη ταλάντωση τον βασικό υμένα ο οποίος και πάλλεται με τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε συχνότητα να αντιστοιχεί και άλλη μικροσκοπική περιοχή έντονης ταλάντωσης. Η περιοχή αυτή που ταλαντώνεται εντονότερα από τις γειτονικές της διεγείρει τα αντίστοιχα κύτταρα του οργάνου Corti και έτσι οι συνδεδεμένες νευρικές ίνες τα μεταφέρουν στον εγκέφαλο. Τα ερεθίσματα που μεταφέρονται στον ανθρώπινο εγκέφαλο προκαλούν κάθε φορά το υποκειμενικό αίσθημα του ύψους του ήχου.

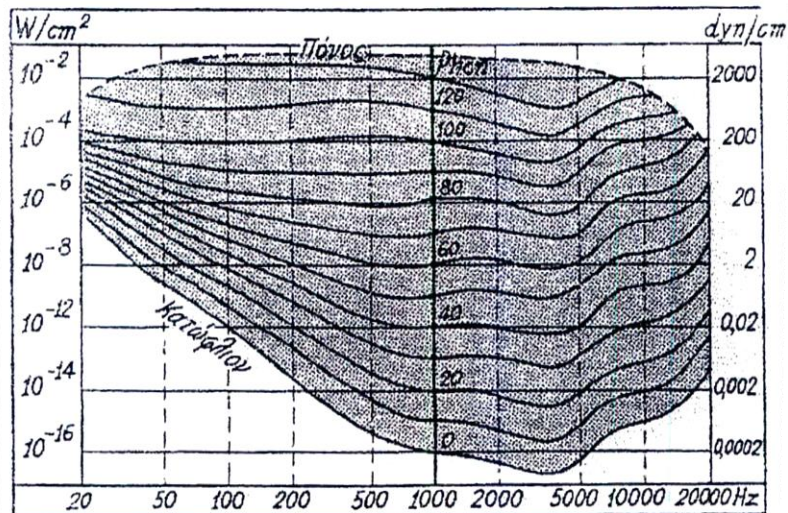
Έχει παρατηρηθεί ότι το αίσθημα ήχου με δεδομένο ύψος είναι συνυφασμένο με ορισμένη περιοχή του κοχλίου στο μέτρο που εάν «καταστραφεί» μόνο αυτή η περιοχή τότε συνεπάγεται απώλεια ακοής για συγκεκριμένες μόνο τιμές συχνότητας και δεν συμβαίνει πλήρης ακουστική απώλεια.

Η ικανότητα του ανθρώπου να προσδιορίζει την διεύθυνση από την οποία προέρχεται ο ήχος στηρίζεται στην αρμονική συνεργασία των δυο αυτιών του. Εάν ο ήχος δεν προέρχεται ακριβώς μπροστά ή και πίσω τότε για να φθάσει και στα δυο συνεργαζόμενα αυτιά διανύει γεωμετρικούς δρόμους με διαφορετικό μήκος, η διαφορά χρόνου που παρατηρείται μάλιστα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο η ηχητική πηγή βρίσκεται μακρύτερα από τον άξονα του προσώπου. Η μικρή αυτή διαφορά χρόνου λαμβάνει την μέγιστη τιμή της όταν ο ήχος προέρχεται από πλευρική απόλυτα διεύθυνση. Θεωρώντας ότι η μέση απόσταση των αυτιών είναι 17cm η χωρική αυτή διαφορά αντιστοιχεί σε $0.17 / 340 = 5\text{msec}$. Είναι προφανές ότι διαφορά δρόμων έστω κατά ένα μέτρο αντιστοιχεί σε χρονική διαφορά $1/340\text{sec}$ και έτσι γίνεται επακριβώς αντιληπτή η διεύθυνση της περιοχής από την οποία φαίνεται να προέκυψε ο συγκεκριμένος ήχος.

Ευαισθησία ανθρώπινου αυτιού

Όπως ήδη αναφέρθηκε το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται συχνότητες από 16Hz έως 20000Hz. Η μέγιστη τιμή των 20000Hz μάλιστα φαίνεται να εξαρτάται από την ηλικία και συγκεκριμένα μειώνεται με αυτή. Για παράδειγμα στην ηλικία των 50 χρόνων η μέγιστη αντιληπτή συχνότητα είναι μόλις στα 14000 Hz. Η ελάχιστη χρονική διάρκεια που απαιτείται προκειμένου να γίνει ένας ήχος αντιληπτός είναι για μεν τις μικρές συχνότητες (οξύς ήχος) 0.6sec (60 msec) ενώ για τις μεγάλες τιμές συχνότητας (βαρύς ήχος) 0.0006 sec (0.6 msec).

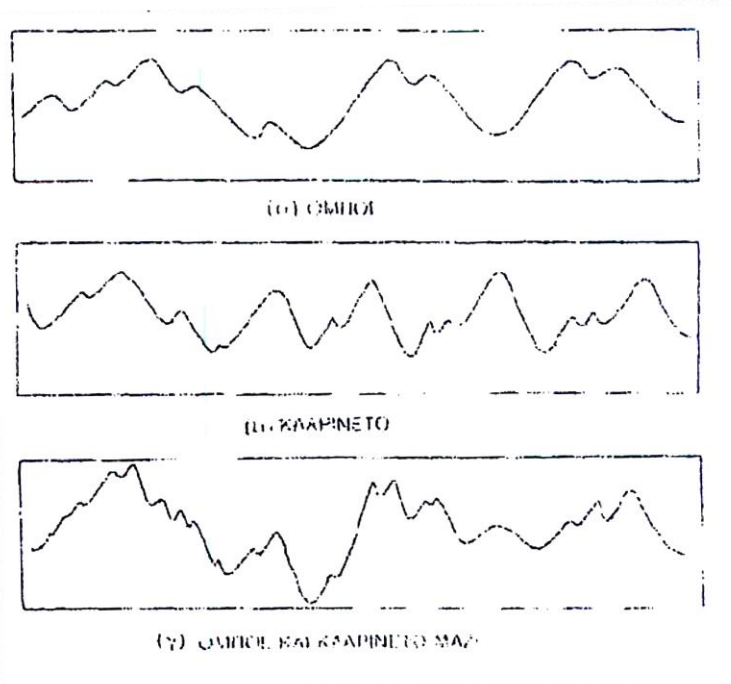
Η ευαισθησία του αυτιού δηλαδή η ελάχιστη τιμή έντασης του ήχου στην οποία το ανθρώπινο αυτί αντιδρά είναι εντυπωσιακά μεγάλη. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το πεδίο ακουστότητας. Πρόκειται για οικογένεια από καμπύλες όπου η κάθε μια αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη τιμή ακουστότητας (σε μονάδες Phon). Όλες οι καμπύλες εμφανίζουν ελάττωση της ευαισθησίας του αυτιού στις πολύ χαμηλές συχνότητες ενώ έχουν την καλλίτερη ευαισθησία στη περιοχή των συχνοτήτων από 2000 έως 5000 Hz.



Παρατηρεί λοιπόν κανείς ότι οι πιο ασθενείς ήχοι τους οποίους μπορεί να ανιχνεύσει το μέσο, ανθρώπινο αυτί στην συχνότητα (αναφοράς) των 1000Hz έχουν τιμή έντασης τα 10^{-12} W/m^2 περίπου, αυτός ο αριθμός ονομάζεται κατώφλι ακουστότητας. Εξάλλου οι πιο δυνατοί ήχοι (πάλι στη συχνότητα αναφοράς των 1000Hz) που ανέχεται το μέσο, ανθρώπινο αυτί αντιστοιχεί σε ένταση 1 W/m^2 (τιμή στο όριο πόνου). Είναι προφανές ότι για να γίνει αντιληπτός ένας ήχος θα πρέπει να έχει ένταση και συχνότητα τέτοια ώστε να βρίσκεται στη «κλειστή» περιοχή που περιλαμβάνεται μεταξύ της καμπύλης του κατωφλίου ακουστότητας και της καμπύλης του ορίου πόνου. Πρόκειται για την περιοχή με τη σκούρα διαγράμμιση στο προηγούμενο σχήμα.

9. Ήχος και ανάλυση κατά Fourier

Στο κάτω σχήμα απεικονίζεται ο ήχος ενός ηχητικού οργάνου (π.χ. όμποε) έτσι όπως κατάλληλα απεικονίζεται στην οθόνη ενός παλμογράφου. Τα μακρινά σημεία της καμπύλης αυτής αντιστοιχούν σε μεγάλο πλάτος. Το δεύτερο σχήμα απεικονίζει η αντίστοιχη εικόνα της οθόνης του ίδιου παλμογράφου για άλλο όργανο (π.χ. κλαρινέτο) ενώ η (γ) εικόνα απεικονίζει την εικόνα του παλμογράφου όταν το όμποε και το κλαρινέτο παίζουν μαζί.



Η μορφή του κύματος στην εικόνα (γ) είναι το συνολικό αποτέλεσμα των σχημάτων (α) και (β) όταν οι ήχοι συμβάλλουν μεταξύ τους. Εάν γνωρίζουμε τα (α) και (β) εύκολα δημιουργείται το (γ) όμως είναι πολύ διαφορετικό πρόβλημα όταν θέλουμε να διακρίνουμε στη μορφή της (γ) τα σχήματα των (α) και (β) που το σχημάτισαν. Πράγματι, εάν παρατηρηθεί το σχήμα (γ) δεν μπορεί να ξεχωρίσει κανείς το όμποε και το κλαρινέτο. Βέβαια εάν ακουστεί ο συγκεκριμένος ήχος τότε τα αυτιά του ακροατή θα αναγνωρίσουν αμέσως τα όργανα που παίζουν ταυτόχρονα και μάλιστα ποια είναι η σχετική μεταξύ τους ένταση.

Η ανθρώπινη ακοή διασπά αυτόματα (αλλά και ασυναίσθητα) το ολικό σήμα στα επί μέρους τμήματα που το αποτελούν. Ο Γάλλος μαθηματικός Joseph Fourier ανακάλυψε (το 1822) μια μαθηματική κανονικότητα στα συστατικά μέρη της κυματικής κίνησης. Ο Fourier ισχυρίστηκε πως ακόμη και η πιο πολύπλοκη κυματική κίνηση μπορεί να αναλυθεί σε απλά ημιτονοειδή κύματα το καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από μια και μόνο συχνότητα. Η μαθηματική πράξη που απαιτείται για να γίνει η προηγούμενη διαδικασία ονομάζεται ανάλυση Fourier. Με την ανάλυση αυτή είναι δυνατόν να ανακαλύψουμε τους καθαρούς ημιτονοειδείς τόνους που όλοι μαζί συνθέτουν τους μουσικούς ήχους π.χ. ενός βιολιού. Μάλιστα το ημιτονοειδές κύμα με την χαμηλότερη συχνότητα θεωρείται το θεμελιώδες και καθορίζει το ύψος του σύνθετου ήχου ενώ τα ημιτονοειδή κύματα με τις μεγαλύτερες συχνότητες είναι οι ανώτεροι αρμονικοί που δημιουργούν και την χαρακτηριστική χροιά του συγκεκριμένου ήχου. Έτσι λοιπόν η κυματική μορφή οποιουδήποτε μουσικού ήχου δεν είναι παρά το αθροιστικό αποτέλεσμα απλών ημιτονοειδών κυμάτων. Το ανθρώπινο λοιπόν αυτί εκτελεί αυτόματα ένα είδος ανάλυσης Fourier, ταξινομεί το σύνολο των παλμών του αέρα που προσπίπτουν πάνω του και τους μετατρέπει σε καθαρούς φθόγγους.

10. Καταγραφή - Αναπαραγωγή ήχου

Οι πρώτες συσκευές στις οποίες γινόταν πιστή καταγραφή ήχου ήταν οι φωνογράφοι. Ο φωνογράφος αποτελείται από κυλινδρικό τύμπανο που περιστρέφεται αξονικά και διαθέτει επιφάνεια από κερί. Στην εύπλαστη αυτή επιφάνεια χαράσσεται ο ήχος ο οποίος στην συνέχεια μπορούσε και να αναπαραχθεί. Η διαδικασία αποτύπωσης της ανθρώπινης φωνής ονομάζεται φωνοληψία.

Στην εξέλιξη αυτής της τεχνικής αντί για κυλίνδρους άρχισαν να χρησιμοποιούνται επιφάνειες δίσκων από κερί στους οποίους η βελόνα καταγράφει τον ήχο κατά μήκος σπειροειδούς γραμμής. Από τον κέρινο δίσκο σχηματίζεται, μέσω ηλεκτρόλυσης, μεταλλικό χάλκινο αρνητικό πρότυπο το οποίο χρησιμεύει ως μήτρα (καλούπι) για την μαζική παραγωγή φωνογραφικών δίσκων (πλακών) οι οποίοι και διατίθενται στο εμπόριο. Ακόμα πιο πρόσφατη τεχνική είναι και αυτή στην οποία η καταγραφή του ήχου γίνεται δια της μαγνητίσεως εύκαμπτης, πλαστικής ταινίας με επιστρώσεις από σιδηρούχο παρασκεύασμα.

Σήμερα η καταγραφή του ήχου γίνεται κυρίως μέσω μιας νέας τεχνικής που λέγεται «ψηφιακή ακουστική τεχνική» σε ένα μέσο που καλείται δίσκος ακτίνας (Compact Disk ή συνοπτικά CD). Στην καταγραφή αυτή αντί να χρησιμοποιείται δίσκος μεγάλης διάρκειας και μια συμβατική βελόνα χρησιμοποιείται μια στενή δέσμη laser η οποία κατευθύνεται σε συγκεκριμένη περιοχή του πλαστικού δίσκου στην οποία και καταγράφεται. Αντίστροφα, στη φάση της αναπαραγωγής το ανακλώμενο, οπτικό σήμα αναγνωρίζεται από ένα μικρό ανιχνευτή φωτός που βρίσκεται στη κεφαλή της συσκευής.

Στο συμβατικό δίσκο η βελόνα δονείται καθώς προχωρεί και εφάπτεται μηχανικά στο κατάλληλα μορφοποιημένο αυλάκι του δίσκου. Το αποτέλεσμα είναι ένα αναλογικό σήμα που χαρακτηρίζεται από μια συνεχή κυματική μορφή. Η μορφή αυτή μπορεί να περιγράφει την αριθμητική τιμή του πλάτους του σε κάθε χρονική στιγμή. Η ίδια βέβαια αριθμητική τιμή μπορεί να εκφραστεί με ένα αριθμητικό σύστημα κατάλληλο για επεξεργασία από υπολογιστές που λέγεται δυαδικό. Στο δυαδικό σύστημα κάθε αριθμός μπορεί να εκφραστεί σαν μια σειρά από χαρακτήρες 1 (ένα) ή και 0 (μηδέν). Για παράδειγμα ο αριθμός 1 συμβολίζεται σαν (0001), ο αριθμός 2 σαν (0010), το 3 σαν (0011), το 4 σαν (0100), το 5 είναι (0101), το 15 είναι το (1111) κτλ. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι η συνεχής κυματική μορφή του (αναλογικού) ήχου μπορεί πλέον να εκφραστεί με μια κατάλληλη σειρά από σήματα παλμών 1 (on) και 0 (off) του δυαδικού νέου, ψηφιακού συστήματος οπότε και υλοποιείται η δημιουργία ενός αρχείου δυαδικών αριθμών που μπορεί πλέον να αξιοποιηθεί από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Ο δίσκος ακτίνας, αντί των αυλακιών, διαθέτει μικροσκοπικά ίχνη με διαστάσεις 30 φορές λεπτότερα από το πάχος μιας ανθρώπινης τρίχας. Όταν η στενή, δέσμη laser προσπίπτει σε ένα επίπεδο τμήμα της επιφάνειας του δίσκου τότε ανακλάται εξ ολοκλήρου στο οπτικό σύστημα της συσκευής και αυτό αντιστοιχεί σε παλμό (on). Όταν όμως η ίδια δέσμη συναντήσει ένα από τα προηγούμενα μικροσκοπικά ίχνη που κινούμενα διέρχονται από το σημείο συνάντησης, τότε μικρό μόνο τμήμα θα επιστρέψει στο οπτικό σύστημα με αποτέλεσμα τώρα να δίνεται η πληροφορία για παλμό (off). Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι δημιουργήθηκε μια ακολουθία παλμών (on) και (off) που αντιστοιχεί (και έτσι αναπαράγει)

τα ψηφία 1 και 0 του δυαδικού συστήματος. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται (σε μεγέθυνση) τα ίχνη (pits) από ένα δίσκο ακτίνας.

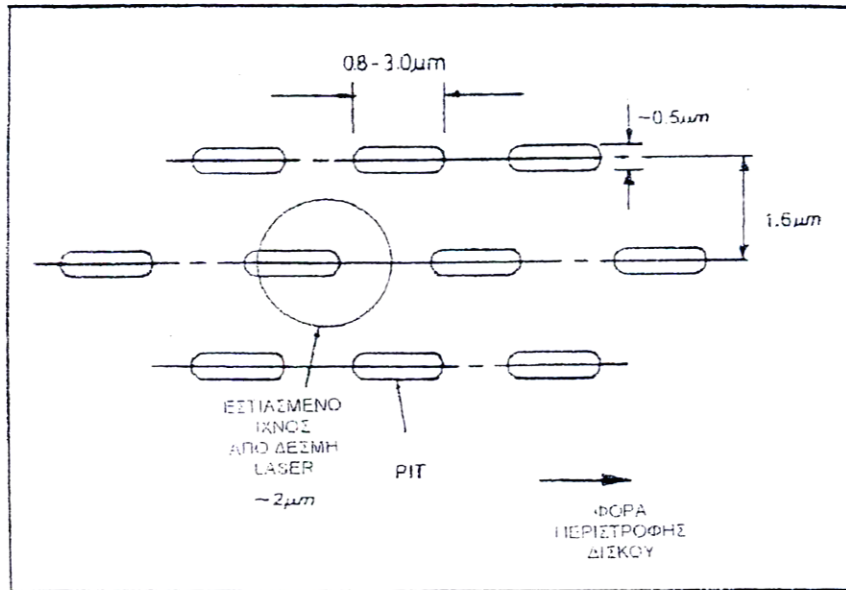


Ο ρυθμός με τον οποίο διαβάζονται οι προηγούμενες πληροφορίες είναι 44100 φορές το δευτερόλεπτο, ο δίσκος ακτίνας έχει μέγεθος το 1/6 του συμβατικού δίσκου μεγάλης διάρκειας και περιέχει τεράστιο όγκο πληροφορίας. Η πληροφορία αυτή κωδικοποιείται στην επιφάνεια που ανακλά η δέσμη και σκεπάζεται κατάλληλα από λεπτό, διαφανές προστατευτικό κάλυμμα. Επειδή η δέσμη laser εστιάζεται επάνω στην επιφάνεια των σημάτων, ακριβώς κάτω από το κάλυμμα η πληροφορία δεν προσβάλλεται από σκόνη, γρατζουνιές καθώς και από πιθανά ίχνη δακτυλικών αποτυπωμάτων. Δεν υπάρχουν πια ανεπιθύμητες μικρές διακοπές, τριξίματα ή και κρότοι, αυτά τα τόσο χαρακτηριστικά γνωρίσματα των δίσκων μακράς διάρκειας μέσω των οποίων άκουγαν μουσική οι παλαιότεροι. Μάλιστα επειδή η συγκεκριμένη δέσμη laser απλά «διαβάζει» την αναγλυφικότητα της επιφάνειας, χωρίς να αγγίζει τον δίσκο αυτός ουδέποτε καταστρέφεται άσχετα από το πόσες φορές επαναληπτικά παίζεται.

11. Δίσκος Ακτίνας (Compact Disk - CD)

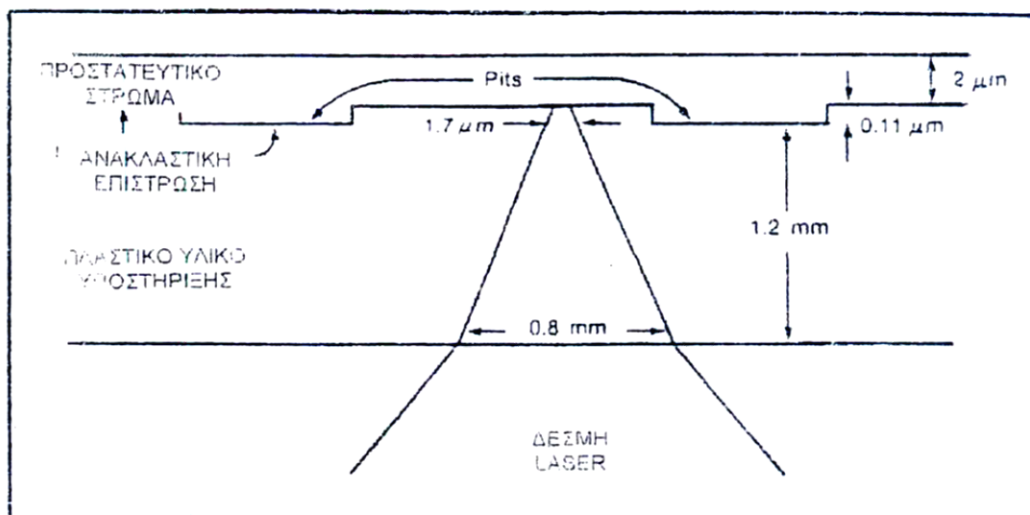
Ο δίσκος ακτίνας είναι ένα σχετικά πρόσφατο τεχνολογικό αποτέλεσμα αρμονικής συνεργασίας ανάμεσα στην Ολλανδική Philips και της Ιαπωνικής Sony. Ο δίσκος ακτίνας είναι σήμερα το καταλληλότερο μέσο για την ηχητική καταγραφή και αναπαραγωγή του ήχου. Έχει διάμετρο 12cm και μπορεί να αποθηκεύει περισσότερο από 6 εκατομμύρια bits δυαδικής πληροφορίας. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε 782Mbytes δηλαδή περί τις 275000 σελίδες γραπτού κειμένου των 2000 χαρακτήρων ανά σελίδα.

Το CD έχει ηχητική διάρκεια 74 λεπτά και ο αναπαραγόμενος ήχος διαθέτει πολύ μεγάλη πιστότητα σε εύρος συχνοτήτων από 20 σε 20000Hz. Η δυναμική περιοχή αλλά και το ηχητικό : σήμα προς θόρυβο (S/N) είναι της τάξεως των 90dB. Η ηχητική πληροφορία καταγράφεται υπό μορφή ιχνών - αυλακιών (pits) σε λεπτή επιφάνεια αλουμινίου που ανακλά την δέσμη laser. Κάθε ένα από τα pits έχει πάχος 0.5μm και βάθος 0.11μm, έχουν διάταξη σπείρας που θυμίζει την φωνογραφική πλάκα όμως τώρα η διάταξη είναι πιο πυκνή. Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σπειρών είναι περίπου 1.6 μm. Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει τα ίχνη των pits στην επιφάνεια ενός δίσκου ακτίνας.



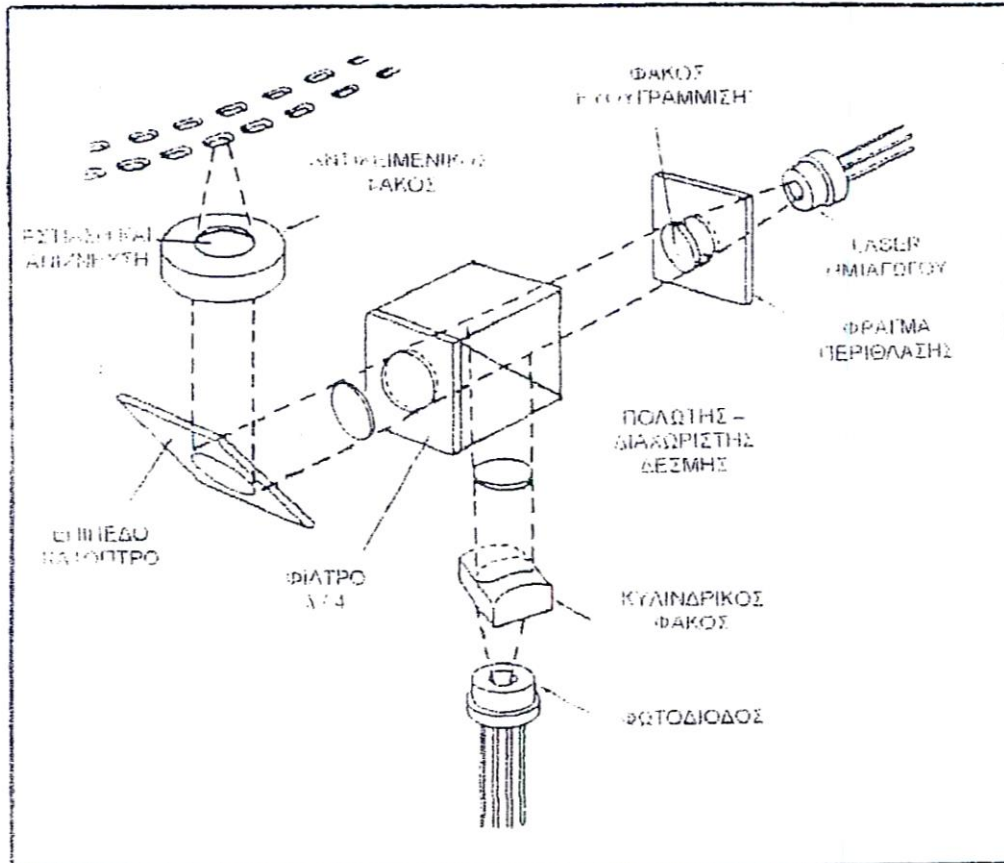
Το συνολικό μήκος της σπείρας των pits, που αρχίζει από μέσα και εκτείνεται στην περιφέρεια, είναι περίπου 4.8Km. Τα ίχνη των pits «δημιουργούνται» αλλά και πρέπει να «διαβάζονται» στη σταθερή ταχύτητα των 1.25m/s, έτσι η περιστροφή του δίσκου μεταβάλλεται από 8 σε 3.5 στροφές το δευτερόλεπτο καθώς η διάμετρος της σπείρας που συναντά τη δέσμη μεταβάλλεται. Κάθε pit συμβολίζει το δυαδικό 1 ενώ η περιοχή ανάμεσα στα pits ή και μεταξύ των σπειρών το δυαδικό 0.

Η δέσμη του laser κατευθύνεται συγκλίνουσα από κάτω (βλ. το σχήμα που ακολουθεί) και αφού διέλθει από το διαφανές, προστατευτικό στρώμα πάχους 1.2mm εστιάζεται στην επιφάνεια του αλουμινίου. Το κυκλικό ίχνος στο προστατευτικό στρώμα έχει διάμετρο 0.8mm όμως στην επιφάνεια των καταγραμμένων pits η διάμετρος είναι μόνο 1.7 μm .



Το σχηματικό πλήρες διάγραμμα της οπτικής διάταξης που αξιοποιεί ένα CD παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Ένα laser ημιαγωγού εκπέμπει μια στενή δέσμη υπέρυθρου, σύμφωνου φωτός (μήκος κύματος $\lambda = 790\text{nm}$) η οποία και εστιάζεται στην ανακλαστική

επιφάνεια με **τελικό** ίχνος διαστάσεων 1.7 μm . Η ανακλώμενη δέσμη κατευθύνεται προς μια φωτοδίοδο η οποία δημιουργεί ένα κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα το οποίο ενισχύεται και καταγράφεται. Στη διάταξη περιέχονται ακόμη φράγμα περίθλασης, διαχωριστής δέσμης, φίλτρο $\lambda/4$, κάτοπτρο και κάποιο φακοί.



Όταν το ίχνος της δέσμης προσπίπτει σε περιοχές εκτός pits (επιφάνεια βάσης) το φως ανακλάται πλήρως και επιστρέφει. Αντίθετα όταν η δέσμη προσπίπτει σε κάποιο pit (πρόκειται για εξόγκωμα με πάχος $\lambda/4$) η ανακλώμενη, επιστρέφουσα από αυτό αλληλοαναιρείται με αυτή που ανακλάται από την επιφάνεια - βάση και έτσι λοιπόν λίγο ή και καθόλου φως δεν επιστρέφει. Το ανακλώμενο λοιπόν φως που κατευθύνεται προς την φωτοδίοδο μεταφέρει, μέσω της έντασής του, το δυαδικό 1 (αλλαγή στην ένταση) ή το δυαδικό 0 (αμετάβλητη ένταση).

12. Ακουστική χώρων

Η συνηθέστερη διαδρομή ενός ήχου από την πηγή σε κάποιο δέκτη πραγματοποιείται μέσω του αέρα όμως όχι αναγκαστικά σε απευθείας διαδρομή. Συνήθως σε ένα δωμάτιο τα ηχητικά κύματα που φθάνουν στα αυτιά ενός ακροατή έχουν ήδη ανακλαστεί από μια ή περισσότερες επιφάνειες του ίδιου του δωματίου ή και στις επιφάνειες αντικειμένων εντός αυτού. Σε ένα τυπικό δωμάτιο αυτά τα ηχητικά κύματα υφίστανται δεκάδες ανακλάσεις προτού τελικώς γίνουν αντιληπτά. Έτσι δεν θα πρέπει να εκπλήσσει το γεγονός ότι ο κάθε χώρος παίζει ένα σημαντικό ρόλο στον τρόπο που τελικά ακούγεται ο ήχος. Θα πρέπει να

σημειωθεί ότι ο ήχος που φθάνει στον ακροατή - δέκτη χωρίς να υποστεί την παραμικρή ανάκλαση ονομάζεται άμεσος ή απ' ευθείας ήχος (direct sound). Αντίθετα, ο ήχος που φθάνει μέσα στα πρώτα 50 (ή κατά άλλους 80 msec) μετά την άφιξη του άμεσου ήχου ονομάζεται πρώιμος ήχος (early sound). Τον πρώιμο ήχο ακολουθεί σειρά ήχων μικρότερης έντασης που οφείλονται στις πολλαπλές ανακλάσεις.

Ένα περιβάλλον στο οποίο η ηχητική πίεση μεταβάλλεται σε κάθε του σημείο ανάλογα με το $1/r$ (όπου r είναι η απόσταση από την ηχητική πηγή) ονομάζεται «ελεύθερο ηχητικό πεδίο». Όταν η ηχητική πηγή είναι μικρών διαστάσεων και λειτουργεί στην ύπαιθρο, μακριά από αντικείμενα που ανακλούν τότε πρόκειται για ελεύθερο πεδίο. Εν προκειμένω τα ηχητικά κύματα απομακρύνονται συμμετρικά από την πηγή προς κάθε διεύθυνση και έτσι τα μέτωπα κύματος έχουν απόλυτα σφαιρική μορφή. Βέβαια η μεταβολή $1/r$ σημαίνει ότι η πίεση μειώνεται στο μισό όταν η απόσταση διπλασιάζεται ή και ακόμη (σε όρους dB) ότι υπάρχει ελάττωση κατά 6dB όταν η απόσταση r από την ηχητική πηγή διπλασιάζεται. Οι συνθήκες «ελεύθερου πεδίου» θεωρούνται ιδανικές και δύσκολα ικανοποιούνται ακόμη και στη περίπτωση εξειδικευμένων συναυλιακών χώρων με καλυμμένους τους εσωτερικούς τοίχους από κατάλληλο υλικό που απορροφά τον ήχο.

Ένας χαρακτηριστικός παράγοντας στις αίθουσες συναυλιών είναι κυρίως ο χρόνος αντήχησης. Αν και η λεπτομερής συμπεριφορά του φαινόμενου της αντήχησης δύσκολα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με ένα μόνο αριθμό, εν τούτοις ο χρόνος αντήχησης στις μεσαίες τουλάχιστον ακουστικές συχνότητες (500 - 2000 Hz) δίνει μια αρκετά καλή εικόνα της υπό εξέταση αίθουσας. Θεωρητικά είναι σχετικά εύκολο να υπολογιστεί ο χρόνος αντήχησης μιας αίθουσας. Η ηχητική ενέργεια που αποθηκεύεται στον χώρο εξαρτάται από την ισχύ της ηχητικής πηγής και τον συνολικό όγκο του δωματίου. Ο ρυθμός με τον οποίο απορροφάται η ενέργεια εξαρτάται από το εμβαδόν όλων των επιφανειών του δωματίου καθώς και των αντικειμένων εντός αυτού. Σε ένα εντελώς άδειο δωμάτιο και μάλιστα με όλες του τις επιφάνειες έστω ότι απορροφούν τον ήχο με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ο χρόνος αντήχησης T υπολογίζεται σε:

$$T = K (\text{όγκος} / \text{επιφάνεια})$$

Όπου K είναι ένας σταθερός συντελεστής αναλογίας. Προφανώς σε πολύ μεγάλες αίθουσες οι χρόνοι αντήχησης είναι αρκετά μεγαλύτεροι από ότι στις μικρότερες του ίδιου ακριβώς σχήματος.

Για πρακτικούς υπολογισμούς η προηγούμενη σχέση μετατρέπεται (με $K = 0.161\text{s/m}$) σε :

$$T = 0.161 (V/A)$$

Όπου ο όγκος V σε m^3 και A σε m^2 . Σημειώνεται ότι ο παρονομαστής, που εκφράζει την συνολική απορρόφηση, είναι το άθροισμα όλων των επί μέρους συνεισφορών για κάθε μια από τις επιφάνειες που συμμετέχουν ξεχωριστά. Δηλαδή ισχύει :

$$A = s_1 \alpha_1 + s_2 \alpha_2 + \dots s_n \alpha_n$$

Όπου s_i είναι οι επιφάνειες και α_i , οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης για τις διάφορες αυτές επιφάνειες. Ο παρονομαστής A μετριέται σε μονάδες Sabine (προς τιμήν του

Wallace Sabine) πρόκειται για μονάδα που αφορά την σχετική απορρόφηση του ήχου και έχει διαστάσεις εμβαδού. Το ένα (1) Sabine ισοδυναμεί με την ηχητική απορρόφηση που προκαλείται από ανοικτό παράθυρο επιφάνειας 1m^2 . Στη περίπτωση μάλιστα των μεγάλων αιθουσών υπάρχει ακόμη η επί πλέον απορρόφηση του ήχου (κυρίως στις υψηλές συχνότητες) από τον υπάρχοντα, εντός της αίθουσας, αέρα. Η απορρόφηση αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία καθώς και την σχετική υγρασία. Έτσι, ο χρόνος αντήχησης υπολογίζεται από την σχέση :

$$T = 0.161 [V/(A + mV)]$$

Όπου m είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται από την συχνότητα του ήχου. Για παράδειγμα στη συχνότητα των 2000 Hz (20 °C, 30% υγρασία) το m είναι ίσο με 0.012m^{-1} .

Τα κριτήρια συνολικά για μια καλή ακουστική απόδοση διαφέρουν από χώρο σε χώρο. Οι ακουστικές απαιτήσεις για αίθουσες ομιλιών, θεάτρων, συναυλιακών κέντρων ή ακόμη και εκκλησιών είναι αρκετά διαφορετικές. Όμως υπάρχουν μερικά γενικά κριτήρια που φαίνεται να είναι κοινά για κάθε μια από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Τα κοινά αυτά κριτήρια καλής ακουστικής απόδοσης είναι:

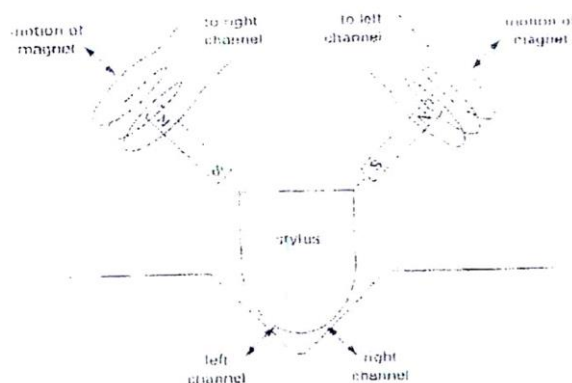
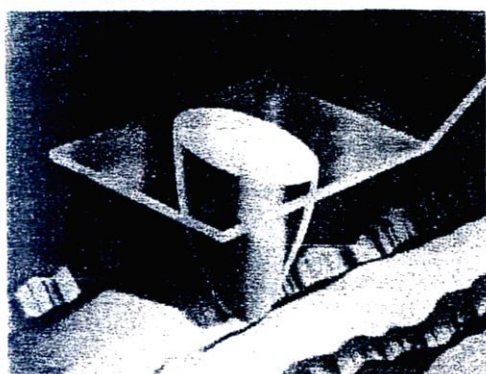
1. Επάρκεια στην ένταση ήχου: Καθένας πρέπει να ακούει καθαρά και χωρίς δυσκολία τον ομιλητή (ή τον ηθοποιό). Η αίθουσα δεν πρέπει να είναι ιδιαίτερα μεγάλη ή και με πολλές απορροφητικές επιφάνειες.
2. Ομοιομορφία: Όλοι οι παριστάμενοι ακροατές θα πρέπει να ακούν περίπου τον ίδιο ήχο ανεξάρτητα της σχετικής θέσης των. Δεν θα πρέπει δηλαδή να υπάρχουν μικρές ή μεγάλες, «νεκρές» ηχητικά περιοχές.
3. Σαφήνεια: Δεν θα πρέπει η αντήχηση να επικαλύπτει μεταγενέστερους, πρωτογενείς ήχους.
4. Ζωηρότητα - ζωντάνια: Ο ακροατής θα πρέπει να αισθάνεται "βυθισμένος" μέσα στον υπάρχοντα ήχο. Δηλαδή είναι απαραίτητο, ο ήχος να φαίνεται ότι τον «πλησιάζει» σχεδόν από παντού.
5. Απαλλαγή από την ηχώ: Δεν θα πρέπει ο ανακλώμενος ήχος να αποδίδεται σαν ξεχωριστό ηχητικό μήνυμα, τέλος
6. Χαμηλός θόρυβος: Οι παρασιτικοί ήχοι από εξωγενή συστήματα π.χ. θέρμανσης ή και εξαερισμού θα πρέπει να είναι όσο γίνεται μικρότερης έντασης.

13. Στερεοφωνικός ήχος

Το πιο δημοφιλές και ίσως το πιο πετυχημένο σύστημα αναπαραγωγής ήχου με χωρικό διαχωρισμό είναι το στερεοφωνικό σύστημα. Στη βασική του λειτουργία ο ήχος συλλέγεται από δυο μικρόφωνα, καταγράφεται ή και μεταδίδεται σε δυο διαφορετικά κανάλια (left - right channel) και στη συνέχεια αναπαράγεται μέσω δυο ξεχωριστών ηχείων. Αν και οι αρχικές πειραματικές μελέτες για τον στερεοφωνικό ήχο ξεκίνησαν το 1930 στα Εργαστήρια

Bell (USA) και στην εταιρεία EMI (England) τα πρώτα εμπορικά αποτελέσματα φάνηκαν αργότερα στα μέσα της δεκαετίας του 1950.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται (σε μεγέθυνση) η εικόνα από την άκρη μιας βελόνας που οδηγείται στην «ανάγνωση» του εσωτερικού ανάγλυφου των δύο καναλιών. Δεξιά παρουσιάζεται το διάγραμμα του πως αυτή η μηχανική επαφή της βελόνας στο εσωτερικό αυλάκι ενός στερεοφωνικού δίσκου μετατρέπεται σε κίνηση μαγνητών και τελικά σε ξεχωριστή δημιουργία ασθενούς ρεύματος για το κάθε ένα διαφορετικό κανάλι.



Ένα από τα σπουδαιότερα κριτήρια για την ρεαλιστικότητα της ακουστικής εντύπωσης είναι ότι θα πρέπει η αρχική ηχητική χωρική κατανομή, τη στιγμή της καταγραφής, να αναπαράγεται πλήρως. Οι ιδανικότερες θέσεις για την απόλαυση μιας στερεοφωνικής εγκατάστασης είναι συνήθως στη περιοχή του άξονα συμμετρίας στις θέσεις των δυο ηχείων. Μάλιστα η γωνία που σχηματίζεται από τις δυο ευθείες που ενώνουν τον ακροατή με τα ηχεία θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 40° και 90°. Εάν η συγκεκριμένη γωνία είναι ιδιαίτερα μικρή τότε ο ήχος εμφανίζεται να είναι μονοφωνικός ενώ αντίθετα εάν η γωνία είναι πολύ μεγάλη τότε ο ακροατής αντιλαμβάνεται δυο ξεχωριστές πηγές με ένα σημαντικό ηχητικό «κενό» στη μέση.

Σήμερα η εξέλιξη των στερεοφωνικών συστημάτων ήχου έχει οδηγήσει στα νέα συστήματα surround όπου ο ήχος δεν έχει δυο μόνο διακριτούς πομπούς αλλά ένα πλήθος από διαφορετικές πηγές που εκπέμπουν ταυτόχρονα, συνεργαζόμενες κατάλληλα μεταξύ τους.

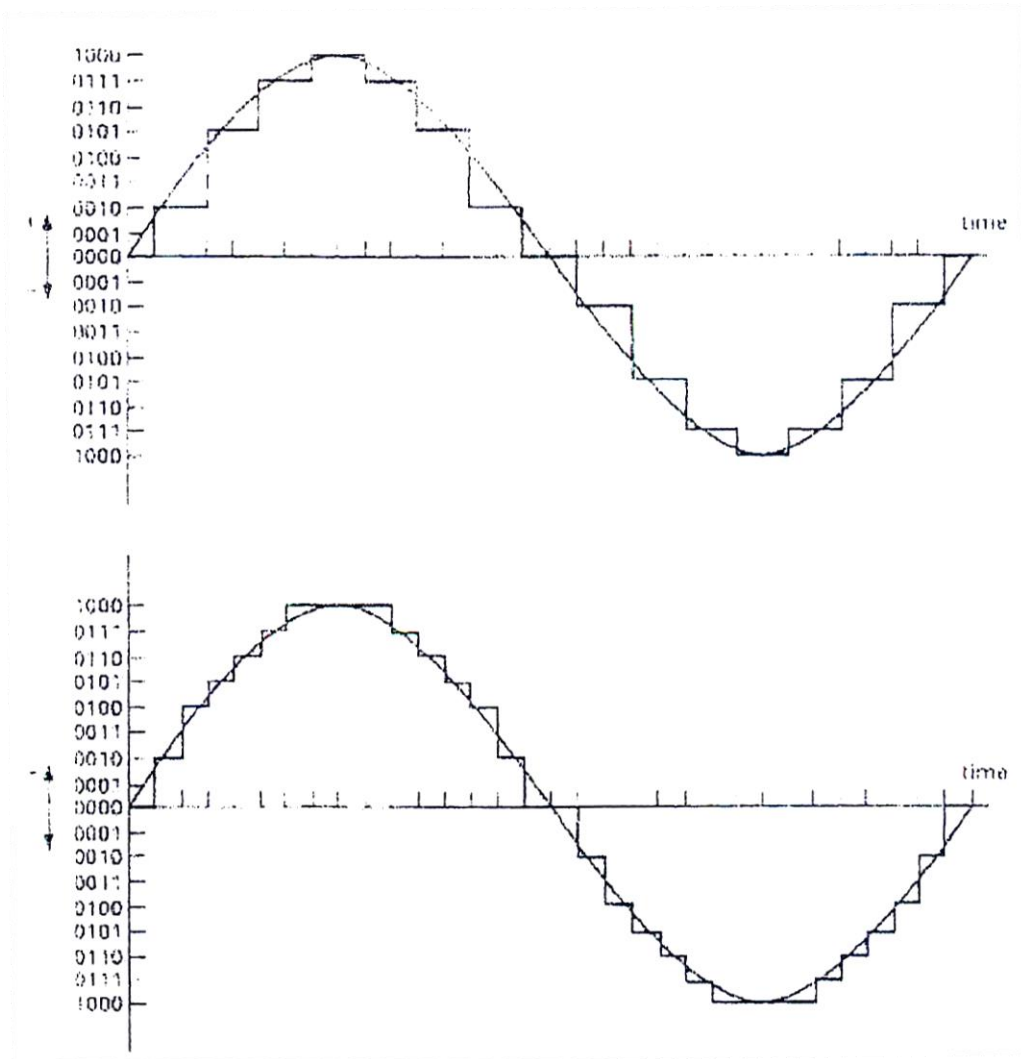
14. Κωδικοποίηση ήχου, Αναλογικός - Ψηφιακός ήχος

Η αναλογική διαχείριση του ήχου σημαίνει την μαγνητική διαμόρφωση μιας εύκαμπτης ταινίας ή την κατάλληλη χάραξη ίχνους στο αυλάκι ενός δίσκου. Αντίθετα, η ψηφιακή διαχείριση σημαίνει διαχείριση αριθμών. Η ερώτηση που συνήθως τίθεται είναι πως ακριβώς επιλέγονται οι αριθμοί αυτοί ; Με άλλα λόγια πως επιλέγονται τα σημεία της δειγματοληψίας σε μια μεταβαλλόμενη, συνεχή καμπύλη ; Η σωστή ψηφιοποίηση προϋποθέτει χρονική επιλογή σταθερών διαστημάτων προκειμένου να πραγματοποιηθεί. Ανάλογο παράδειγμα των διαφορών ενός ψηφιακού μουσικού συστήματος από ένα αναλογικό είναι και αυτό ενός ρολογιού (αναλογικό, ψηφιακό). Υποτίθεται ότι ο χρόνος κυλά με συνεχή, ομαλό τρόπο. Οι δείκτες ενός αναλογικού ρολογιού μετακινούνται συνεχώς και έτσι καθορίζουν από την θέση την οποία βρίσκονται την κάθε χρονική στιγμή.

Η ψηφιακή ανάγνωση μιας οθόνης ενός ρολογιού επίσης δηλώνει χρόνο ο οποίος όμως δεν είναι τίποτε άλλο παρά μια δειγματοληπτική τιμή χρόνου κατάλληλα επιλεγμένη.

Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με τον ήχο ο οποίος μεταβάλλεται συνεχώς (π.χ. ένα μουσικό κομμάτι) που μάλιστα καταγράφεται και αναπαράγεται είτε με συνεχή, αναλογικό τρόπο είτε ψηφιακά. Μάλιστα, όπως ακριβώς τα προηγούμενα ρολόγια δηλώνουν τον ίδιο χρόνο έτσι και οι δύο διαφορετικοί μηχανισμοί καταγραφής πρέπει να δημιουργούν τον ίδιο ήχο. Ο χρόνος δειγματοληψίας έχει ουσιαστική συμμετοχή στην ψηφιακή επεξεργασία καθορίζοντας την μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα. Εύλογες ερωτήσεις όπως : «Εάν το ψηφιακό σύστημα δειγματοληπτεί σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές τότε τι ακριβώς συμβαίνει στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δειγμάτων ; Μήπως χάνεται η πληροφορία που βρίσκεται ανάμεσα στους χρόνους που αντιστοιχούν τα δείγματα ;» Η απάντηση στα ερωτήματα αυτά είναι αρνητική. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες δειγματοληψίας καμία πληροφορία δεν χάνεται ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο ενός σήματος από μια ψηφιακή μονάδα. Τα δείγματα περιέχουν σχεδόν την ίδια ποσότητα πληροφορίας όπως ακριβώς και το αρχικό σήμα. Για παράδειγμα όπως τα ξεχωριστά φωτογραφικά στιγμιότυπα ενός φιλμ μπορούν να δημιουργήσουν μια κινούμενη εικόνα έτσι και τα σήματα μιας ψηφιακής καταγραφής δημιουργούν ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ήχο. Βέβαια όπως ήδη προαναφέρθηκε προκειμένου να μην χαθεί η πληροφορία θα πρέπει το αρχικό σήμα να υποστεί μια κατάλληλη επεξεργασία.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μετατροπή ενός αναλογικού σε ψηφιακό σήμα και αντίστροφα. Η μετατροπή πραγματοποιείται σε ένα απλό ημιτονικό κύμα από ένα σύνολο δυαδικών αριθμών τεσσάρων bits που αξιοποιούν μια δειγματοληψία με συχνότητα 16 φορές (επάνω) ή 32 φορές (κάτω) την συχνότητα του αρχικού κύματος.



Η μορφή των «σκαλοπατιών» αναπαράγεται αφού πρώτα διαβαστεί από τη δέσμη ενός laser και στη συνέχεια φιλτράρεται και ομαλοποιείται δημιουργώντας το αρχικό, ημιτονικό κύμα αναλογικού χαρακτήρα.

15. Θόρυβος και Περιβάλλον

Η ομιλία και η μουσική δεν είναι οι μόνες ανθρώπινες συνεισφορές στο κόσμο των ήχων. Με ελάχιστες εξαιρέσεις η πρόσφατη τεχνολογική ανάπτυξη έχει σαν αποτέλεσμα μια σημαντική αύξηση της ποσότητας ανεπιθύμητου ήχου. Ο ήχος αυτός καλείται γενικά θόρυβος. Βέβαια είναι ευτύχημα το γεγονός ότι ακόμη και η πιο θορυβώδης μηχανή μετατρέπει ένα μικρό μόνο μέρος της συνολικής της ενέργειας σε ήχο. Για παράδειγμα σύγχρονα αεροπλάνα ή και αυτοκίνητα δημιουργούν, στη φάση της πλήρους λειτουργίας τους, ποσότητα ήχου που αντιστοιχεί στο 0.001% της συνολικής τους ισχύος.

Είναι προφανές ότι ο καθορισμός του κριτηρίου με βάση το οποίο κάποιος ήχος χαρακτηρίζεται ανεπιθύμητος ή όχι, διαφέρει κατά περίπτωση. Για παράδειγμα ο ήχος της λειτουργίας ενός κινητήρα είναι δυνατόν να χαρακτηριστεί ως χρήσιμος ήχος ή ως θόρυβος

ανάλογα με την επιθυμία του ατόμου το οποίο την ακούει : να διαπιστώσει δηλαδή την ορθή λειτουργία του κινητήρα ή όχι. Από αυτή την άποψη λοιπόν η στάθμη της έντασης του ήχου δεν μπορεί γενικά να αποτελεί το μοναδικό κριτήριο για τον χαρακτηρισμό ενός ήχου σαν θόρυβο.

Συνήθως ο θόρυβος διακρίνεται, σε ότι αφορά τον τρόπο διάδοσής του, σε δυο κατηγορίες:

1. Ο ήχος του οποίου το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας ακτινοβολείται απ' ευθείας στον αέρα, κυρίως γύρω από την ηχογόνο πηγή, και
2. Ο ήχος ο οποίος παράγεται από μια μηχανική ταλάντωση και μεταδίδεται απ' ευθείας στην στέρεη επιφάνεια η οποία συνδέεται με την ηχητική πηγή.

Η μελέτη των επιπτώσεων του θορύβου στον άνθρωπο είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο, πρόβλημα με πολλές και διαφορετικές παραμέτρους. Μια ακραία τέτοια περίπτωση που όμως σπάνια συναντάται είναι η ολική απώλεια της ακοής. Πράγματι, η παρατεταμένη έκθεση σε ήχους πιο δυνατούς από 85dB είναι σε θέση να προκαλέσει σταδιακή απώλεια της ακοής. Η ένταση των ήχων σε μια κανονική συνομιλία δεν υπερβαίνει τα 60dB. Συνήθως ο θόρυβος προκαλεί σωματικές αλλά και ψυχολογικές βλάβες στην υγεία, προβλήματα συγκέντρωσης στο αντικείμενο εργασίας, εκνευρισμός, παρανοήσεις, μείωση αυτοπεποίθησης ή και ακόμη προβλήματα στις ανθρώπινες σχέσεις. Η παρατεταμένη έκθεση στον θόρυβο είναι δυνατόν να έχει μόνιμα, δυσάρεστα αποτελέσματα όπως υπέρταση, ισχαιμία, νευρική κατάσταση, παρενέργειες στο γαστρεντερικό σύστημα, διαταραχές στην αναπνοή κ.α. Τέλος, κυρίως στα παιδιά, ο θόρυβος φαίνεται να μειώνει σημαντικά την συγκέντρωση της προσοχής τους, όπως επίσης και να τα οδηγεί σε αντικοινωνική συμπεριφορά.

Η ύπαρξη αυξημένης στάθμης θορύβου σε μια αίθουσα οδηγεί έναν ομιλητή στην ανάγκη να αυξήσει την στάθμη ισχύος της φωνής του. Αυτό οδηγεί αφ' ενός σε γρήγορη κόπωση του ομιλητή αφ' ετέρου, εάν υπάρχουν και άλλες μικρές ομάδες ομιλητών στον ίδιο χώρο, σε συνολική περαιτέρω αύξηση της στάθμης του θορύβου. Προκειμένου να αυξηθεί ο λόγος του χρήσιμου προς τον επιβλαβή ήχο σε χώρους ομιλίας με αυξημένη στάθμη θορύβου συνίσταται η μείωση του χρόνου αντήχησης. Έχει φανεί ότι για συνθήκες καλής κατανόησης της ομιλίας η στάθμη θορύβου, στο επίπεδο του ακροατή, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον κατά 15dB μικρότερη από εκείνη της φωνής του ομιλητή. Μάλιστα σε ότι αφορά την μέγιστη στάθμη θορύβου για σχολικές αίθουσες ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) όσο και η Acoustical Society of America (ASA) προτείνουν στάθμη θορύβου σε κάθε σημείο της αίθουσας κατά 10 έως 15dB μικρότερο από τη στάθμη της φωνής του ομιλητή. Στην περίπτωση μεγαλύτερης στάθμης θορύβου προκαλείται κόπωση τόσο του εκπαιδευτικού όσο και των μαθητών που δύσκολα πλέον συγκεντρώνονται στο μάθημά τους.

Μερικοί τρόποι για να προστατευθεί κάποιος από την υψηλή στάθμη οικιακού θορύβου είναι: μείωση της έντασης σε όλες τις οικιακές συσκευές που είναι μεμονωμένες πηγές ήχων, τοποθέτηση διπλών τζαμιών που μειώνουν τον ήχο έως και 40dB, χρήση υαλότουβλων αντί για συμβατικό τοίχο, κλείσιμο της πόρτας σε χώρο που εργάζεται θορυβώδης οικιακή συσκευή, τα ηχεία της τηλεόρασης και του στερεοφωνικού δεν θα

πρέπει να εφάπτονται στο τοίχο ή στο πάτωμα και τέλος τοποθέτηση χαλιών που αποτελεί μια απλή και εύκολη ηχομονωτική λύση.

Ένας παράγοντας που χρησιμοποιείται στην διαχείριση του θορύβου είναι και αυτός της δόσης θορύβου. Στις ΗΠΑ έχει νομικά θεσπιστεί έτσι ώστε ο μέγιστος επιτρεπτός χρόνος έκθεσης ενός ανθρώπου σε περιβάλλον με συνεχή θόρυβο σταθερής στάθμης L_p , υπολογίζεται από την σχέση:

$$T \text{ (σε ώρες)} = 16 / 2^{0.2(L_p - 85)}$$

Για παράδειγμα, η εφαρμογή της προηγούμενης σχέσης δίνει για θόρυβο 85dB μέγιστο χρόνο παραμονής 16 ώρες ενώ για τιμή στάθμης 95dB οι αντίστοιχες ώρες επιτρεπτής διάρκειας μειώνονται στις 4. Βέβαια σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει ο εργαζόμενος να εργάζεται σε περιβάλλον με στάθμη θορύβου μεγαλύτερη από 120dB.

16. Ερωτήσεις - Ασκήσεις

1. Που διαδίδεται ταχύτερα ο ήχος ; στον ζεστό αέρα ή στον κρύο;
2. Μπορεί ένα ηχητικό κύμα να εξουδετερώσει κάποιο άλλο; δικαιολόγηση.
3. Γιατί η Σελήνη περιγράφεται σαν "σιωπηλό" ουράνιο σώμα;
4. Γιατί η δόνηση του εδάφους που προκαλεί μια μακρινή έκρηξη γίνεται αισθητή αρκετά πριν ακουστεί ο ήχος της;
5. Βυθίζετε το δάκτυλο σας επανειλημμένα σε μια λεκάνη με νερό και έτσι δημιουργούνται επιφανειακά κύματα. Τι θα συμβεί στο μήκος κύματος εάν βυθίζετε και απομακρύνετε το δάκτυλό σας με μεγαλύτερη συχνότητα;
6. Γιατί στα στερεά υλικά η ταχύτητα διάδοσης του ήχου είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τα αέρια;
7. Γιατί αντιλαμβανόμαστε την λάμψη της αστραπής πολύ πριν ακούσουμε το κρότο της βροντής; Υπάρχει ποτέ περίπτωση η αστραπή να μην συνοδεύεται από τον ήχο βροντής;
8. Που μπορεί να οφείλεται η ησυχία που παρατηρείται αμέσως μετά από μια έντονη χιονόπτωση; Γιατί συμβαίνει αυτή η ασυνήθιστη ησυχία;
9. Πως δημιουργείται ο χαρακτηριστικός εκείνος ήχος από τα γυμνά κλαδιά των δένδρων που τα φυσά ο άνεμος ; Είναι απαραίτητο για τον συγκεκριμένο ήχο να υπάρχει κίνηση των κλαδιών ή όχι ;
10. Φίλος μας μιλά ενώ μας έχει γυρίσει την πλάτη, πως είναι δυνατόν να τον ακούμε; Τι συμβαίνει στην αντίστοιχη περίπτωση του ψίθυρου ; Γιατί θα πρέπει το πρόσωπο του συνομιλητή μας να είναι απέναντι όταν αυτός μας ψιθυρίζει κάτι;

11. Όταν νερό από βρύση γεμίζει ένα ποτήρι, το ύψος του παραγόμενου ήχου μεγαλώνει ή μικραίνει; δικαιολόγηση.
12. Σε τι διαφέρει το φαινόμενο της ηχούς από το φαινόμενο της αντήχησης (ή μετήχησης);
13. Γιατί οι σφαίρες "σφυρίζουν" στον αέρα ; Μπορούν οι στρατιώτες σε μια μάχη να αντιληφθούν εάν οι εχθρικές σφαίρες τους πλησιάζουν ή εάν απομακρύνονται από αυτούς ;
14. Εάν ανοίξει για λίγα δευτερόλεπτα η στρόφιγγα του γκαζιού κάποιος που κάθεται μερικά μέτρα μακριά θα ακούσει το αέριο που θα βγαίνει πολύ πριν το μυρίσει. Τι δείχνει αυτό για τον τρόπο με το οποίο κινούνται στο χώρο τα ηχητικά κύματα;
15. "Εάν διαιρέσουμε τα δευτερόλεπτα που μεσολάβησαν μεταξύ αστραπής και βροντής με τον αριθμό 3 βρίσκουμε προσεγγιστικά την απόστασή μας (σε Km) από την περιοχή της αστραπής". Επιβεβαιώστε τον πρακτικό αυτό κανόνα, η ταχύτητα του ήχου στον αέρα θεωρείται γνωστή (340m/sec).
16. Παρατηρητής αφήνει πέτρα από το στόμιο πηγαδιού και μετά από 3 δευτερόλεπτα ακούει αυτή την πέτρα να κτυπά στον πυθμένα. Εάν η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι 340m/sec και η επιτάχυνση της βαρύτητας 9.81 m/s^2 , να υπολογιστεί το βάθος του πηγαδιού.
17. Το ανθρώπινο αυτί ακούει ήχους στη περιοχή των συχνοτήτων από 20 έως 20000Hz. Ποια είναι η αντίστοιχη περιοχή των μηκών κύματος ; Ταχύτητα ήχου στον αέρα: 340m/sec.
18. Να υπολογιστεί το μήκος κύματος λ των ραδιοκυμάτων που εκπέμπει ένας ραδιοφωνικός σταθμός των FM στη συχνότητα των 100MHz. Σημειώνεται ότι τα ραδιοκύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός ($c = 300000\text{Km/s}$).
19. Άνθρωπος βρίσκεται στην ύπαιθρο και παρατηρεί, από μακριά, τον ατμό της ατμομηχανής ενός τραίνου 2 δευτερόλεπτα προτού ακούσει τον αντίστοιχο ήχο. Σε πόση απόσταση από τον συγκεκριμένο παρατηρητή βρίσκεται το τρένο (ταχύτητα ήχου στον αέρα: 330m/s).
20. Να υπολογιστούν: η τιμή της θεμελιώδους συχνότητας καθώς και των δυο πρώτων αρμονικών σε κλειστό ηχητικό σωλήνα με μήκος 67cm, ταχύτητα ήχου: 343m/s. Τι θα συμβεί εάν ο προηγούμενος ηχητικός σωλήνας ήταν ανοικτός; Ποιες είναι τώρα οι αντίστοιχες τιμές των συχνοτήτων;
21. Με ποια ταχύτητα πρέπει να πλησιάζει μια ηχητική πηγή που εκπέμπει ήχο συχνότητας 300Hz ένα ακίνητο παρατηρητή ώστε αυτός να αντιλαμβάνεται τον συγκεκριμένο ήχο να έχει διπλάσια συχνότητα; (ταχύτητα ήχου στον αέρα 340m/s).

22. Αυτοκίνητο πλησιάζει ακίνητο παρατηρητή με ταχύτητα 20m/s ενώ εκπέμπει ήχο συχνότητας 1000Hz. (α) Εάν η ταχύτητα του ήχου στον αέρα θεωρηθεί ότι είναι 340m/s τι συχνότητας ήχο θα αντιληφθεί ο παρατηρητής; (β) Εάν το αυτοκίνητο είναι ακίνητο και ο παρατηρητής κινείται προς αυτό με την προηγούμενη ταχύτητα των 20m/s ποια συχνότητα θα αντιλαμβανόταν τώρα;
23. Ηχητική πηγή 80 W εκπέμπει ισοτροπικά στον ελεύθερο χώρο. Σε πόση απόσταση από αυτήν η ένταση του ήχου που δημιουργεί είναι 40dB;
24. Πόση είναι η ένταση (σε μονάδες W/m^2) σε απόσταση 3m από σχεδόν σημειακή ηχητική πηγή με ισχύ 80W;
25. Πόσα είναι τα dB ήχου σε περιοχή του χώρου όπου η ηχητική ένταση ακριβώς εκεί είναι: $10^{-4} W/m^2$;
26. Ποιο είναι το "κέρδος" σε dB ενός ενισχυτή όπου με είσοδο ηχητικού κύματος 0.01W δίνει έξοδο στα 10W;
27. Πόσα είναι τα dB ενός μεγαφώνου που εκπέμπει ισχύ 0.1W ;
28. Δυο ήχοι διαφέρουν κατά 1Phon, να υπολογιστεί το ηλίκο των δυο εντάσεων για τους δυο αυτούς ήχους.
29. Δυο ήχοι διαφέρουν κατά 1dB ποιο είναι το ηλίκο των δυο μεταβολών στις πιέσεις που αυτοί οι ήχοι προκαλούν;
30. Πόση είναι η δύναμη που ασκείται στο τύμπανο του ανθρώπινου αυτιού όταν ο ήχος που προσπίπτει σε αυτό έχει ένταση που αντιστοιχεί στο όριο πόνου (120dB); Σημειώνεται ότι το τύμπανο, στο ανθρώπινο αυτί, έχει κυκλικό σχήμα με διάμετρο περίπου 7mm.
31. Πόσα ακριβώς dB αντιστοιχούν σε πίεση (στο ανθρώπινο αυτί) της τάξεως των $10^{-3} N/m^2$;
32. Μια ηχητική πηγή δημιουργεί σε μια περιοχή ήχο 50dB. Τι θα συμβεί στην ίδια περιοχή εάν τρεις πηγές, πανομοιότυπες με την αρχική, λειτουργήσουν ταυτόχρονα;
33. Εάν δυο ηχητικές πηγές 1 και 2 δημιουργούν ανεξάρτητα στην ίδια περιοχή ήχο 50 και 53dB αντίστοιχα. Πόσα είναι τα συνολικά dB όταν και οι δυο προηγούμενες πηγές συνεισφέρουν ταυτόχρονα ηχητικά;
34. Να προσδιοριστούν τα συνολικά dB τα οποία δημιουργούν τρεις ηχητικές πηγές με αντίστοιχες επί μέρους εντάσεις 40, 45 και 50dB.

17. Βιβλιογραφία

1. Γενική Φυσική (Μηχανική - Ακουστική), Κ. Δ. Αλεξόπουλος, Αθήνα 1960.
2. Στοιχεία Φυσικής II (Κυματική), Θ. Κουγιουμτζή, Σ. Περιστεράκη, Βιβλιοπωλείο ΚΑΡΑΒΙΑ, Αθήνα 1963.
3. Στοιχεία Φυσικής (Μηχανική - Ακουστική), Β. Ι. Κάρκαλου, Αθήνα 1970.
4. Οι Έννοιες της Φυσικής, Paul G. Hewitt, Τόμος Ι, 3η έκδοση (μετάφραση) Παν. Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 1997.
5. Ακουστική και Κτιριακές εφαρμογές (Θεωρία και Πράξη), Δ. Ευθυμιάτος Καθ. ΕΜΠ, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007.
6. Εφαρμοσμένη Ακουστική, Δ. Σκαρλάτου Καθ. Παν. Πατρών, εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 1998.
7. Principles of Digital Audio, 2nd ed. Ken C. Pohlmann SAMS ed. USA, 1994.
8. The Science of Sound, 3rd ed. Rossing, Moore & Wheeler, Addison - Wesley ed. USA, 2002.
9. The Physics of Sound, 2nd ed., R. E. Berg, D. G. Stork, Prentice Hall, USA, 1995.