

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΜΟΥΣΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

Διονύσης Μπατζάκης

Περιεχόμενα

1. ΚΙΝΗΣΗ, ΔΥΝΑΜΗ, ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Διάστημα	1
Ταχύτητα	2
Γραφική απεικόνιση κίνησης	2
Επιτάχυνση	3
Δύναμη, μάζα και ο νόμος του Νεύτωνα	5
Πίεση	6
Έργο και ενέργεια	6
Ισχύς	8
Σύστημα μονάδων	8

2. ΔΟΝΟΥΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Απλή αρμονική κίνηση	9
Ενέργεια και απόσβεση	11
Απλά δονούμενα συστήματα	12
Συστήματα με δύο και τρεις μάζες	14
Συστήματα με πολλούς τρόπους δόνησης	17
Δονήσεις σε μουσικά όργανα	17
Σύνθετες δονήσεις	20

3. ΚΥΜΑΤΑ

Χαρακτηριστικά κυμάτων	21
Μετάδοση κυμάτων	21
Παλμικά κύματα: Ανάκλαση	23
Άθροιση και συμβολή	25
Ηχητικά κύματα	27
Μετάδοση κύματος σε δύο και τρεις διαστάσεις	28
Το φαινόμενο Doppler	29
Ανάκλαση	30
Διάθλαση	32
Περίθλαση	33
Συμβολή	35

4. ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ

Συντονισμός στο σύστημα μάζας-ελατηρίου	36
Φάση ταλαντώσεων	37
Στάσιμα κύματα σε χορδή	38
Μερικοί, αρμονικοί και υπερτόνοι	40
Ανοικτοί και κλειστοί σωλήνες	40
Ακουστική εμπέδηση	42
Συντονιστής Helmholtz	42
Συμπαθητικές δονήσεις: αντηχία	43

5. ΑΚΟΗ

Εισαγωγή	44
Η λειτουργία της ακοής	44
Η δομή του αυτιού	45
Επεξεργασία σήματος στο ακουστικό σύστημα	49
Κρίσιμες ζώνες	50
Αμφιωτική ακοή και εντοπισμός	51
Μετρώντας τις αισθήσεις: ψυχοφυσική	52
Λογάριθμοι και δυνάμεις του δέκα	53
Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ήχου	54

6. ΠΙΕΣΗ ΗΧΟΥ, ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΗΧΗΡΟΤΗΤΑ

Στάθμη ηχητικής πίεσης	55
Στάθμη ισχύος και έντασης ήχου	56
Πολλαπλές πηγές	57
Στάθμη ηχηρότητας	59
Ηχηρότητα και απλοί τόνοι: sones	60
Ηχηρότητα και σύνθετοι τόνοι: κρίσιμες ζώνες	62
Ηχηρότητα συνήχησης ήχων	63
Μουσικές δυναμικές και ηχηρότητα	64
Κάλυψη	65
Μείωση ηχηρότητας λόγω κάλυψης	67
Ηχηρότητα και διάρκεια: παλμικοί ήχοι και προσαρμογή	68

7. ΤΟΝΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΑΙ ΗΧΟΧΡΩΜΑ

Κλίμακες	70
Διάκριση τονικού ύψους	71
Τονικό ύψος απλών τόνων	72
Τονικό ύψος σύνθετων τόνων: φαινομενικό ύψος	74
Η σειρά του Seebeck και ο νόμος του Ohm	74
Θεωρίες τονικού ύψους: ύψος περιοχής και ύψος περιοδικότητας	76
Απόλυτο ύψος	77
Πρότυπα τονικού ύψους	77
Ηχώχρωμα	78
Ανάλυση Fourier σύνθετων τόνων	79
Ηχώχρωμα και δυναμικά φαινόμενα: περιβάλλουσα και διάρκεια	82
Διαγράμματα Tristimulus	84
Vibrato	84
Μίξη σύνθετων τόνων	85

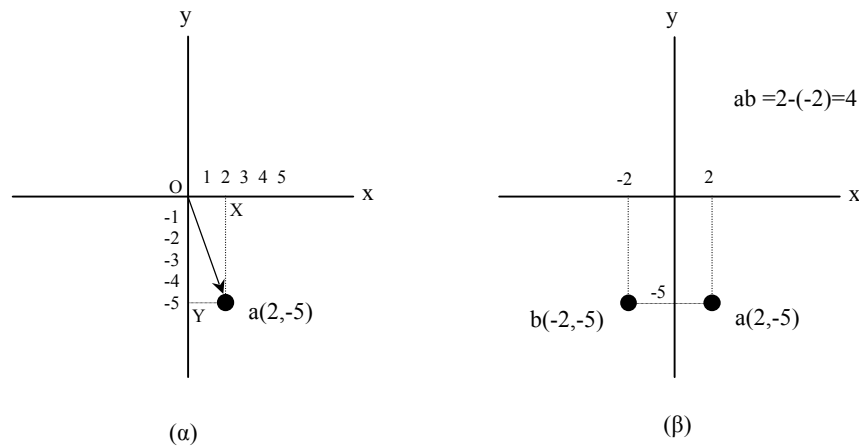
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86
---------------------	-----------

Οι εικόνες και τα σχήματα προέρχονται από το βιβλίο του T. D. Rossing 'The Science of Sound'.

1 Κίνηση, Δύναμη, Ενέργεια

Διάστημα

Η θέση ενός αντικειμένου μπορεί να εκφραστεί πλήρως αν γνωρίζουμε την απόσταση και διεύθυνσή του από κάποιο σημείο αναφοράς. Για να εκφράσουμε γραφικά τη θέση ενός αντικειμένου σε επίπεδο δύο διαστάσεων χρησιμοποιούμε το *σύστημα συντεταγμένων* του Σχήματος 1.1.



Σχήμα 1.1

Προσδιορισμός θέσης σημείου (α) και διαστήματος δύο σημείων (β)

Το σημείο a του Σχήματος 1.1 (α) προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες $x=2$, $y=-5$. Η απόσταση Oa μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Oa = \sqrt{OX^2 + OY^2} = \sqrt{2^2 + 5^2} = 5.38$$

Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός αντικειμένου στο χώρο απαιτείται σύστημα συντεταγμένων 3 διαστάσεων (με 3 άξονες).

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω σύστημα συντεταγμένων είναι δυνατό να υπολογιστεί το διάστημα μεταξύ δύο σημείων όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 (β).

Ως μονάδα διαστήματος θα χρησιμοποιούμε το *μέτρο* και τις δυνάμεις του:

- 1 χιλιόμετρο = 1 Km = 10^3 μέτρα
- 1 εκατοστό = 1 cm = 10^{-2} μέτρα
- 1 χιλιοστό = 1 mm = 10^{-3} μέτρα
- 1 μικρό = 1 μm = 10^{-6} μέτρα

Ταχύτητα

Η *ταχύτητα* ορίζεται ως ρυθμός μεταβολής διαστήματος. Το διάστημα που διανύει ένα κινητό αντικείμενο το οποίο κινείται με σταθερή ταχύτητα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{διαστημα} = \text{ταχυτητα} \times \text{χρονος}$$

Ο τύπος αυτός ισχύει και σε περιπτώσεις που γνωρίζουμε τη *μέση ταχύτητα*. Συνεπώς, η μέση ταχύτητα εξάγεται ως εξής:

$$\text{ταχυτητα} = \frac{\text{διαστημα}}{\text{χρονος}} \quad \text{ή} \quad u_{av} = \frac{d}{t}$$

Παράδειγμα 1.1: Ένα όχημα διανύει μία απόσταση 300 Km. Κατά τη διάρκεια της μισής διαδρομής η μέση ταχύτητα είναι 60 Km/h, ενώ κατά τη διάρκεια της άλλης μισής 30 Km/h. Ποια είναι η μέση ταχύτητα όλης της διαδρομής;

Λύση:

$$u_{av} = \frac{d}{t} = \frac{300}{t_1 + t_2}$$

$$t_1 = \frac{150 \text{ Km}}{60 \text{ Km/h}} = 2.5 \text{ h}$$

$$t_2 = \frac{150 \text{ Km}}{30 \text{ Km/h}} = 5 \text{ h}$$

συνεπώς η τιμή της μέσης ταχύτητας είναι:

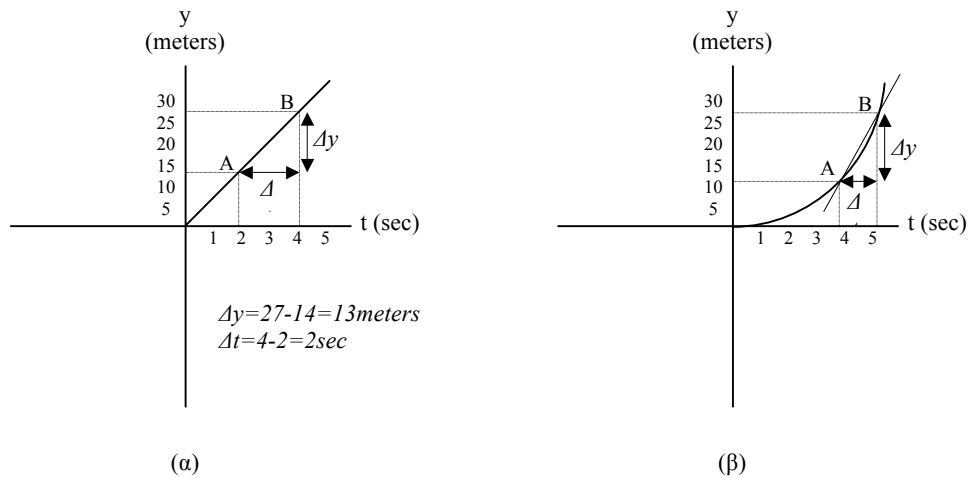
$$u_{av} = \frac{d}{t_1 + t_2} = \frac{300 \text{ Km}}{2.5 \text{ h} + 5 \text{ h}} = \frac{300 \text{ Km}}{7.5 \text{ h}} = 40 \text{ Km/h}$$

Γραφική απεικόνιση κίνησης

Η κίνηση ενός αντικειμένου μπορεί να απεικονιστεί γραφικά χρησιμοποιώντας ένα σύστημα συντεταγμένων με άξονες το διάστημα που διανύεται και τον χρόνο.

Η ευθεία γραμμή που απεικονίζει την κίνηση στο Σχήμα 1.2 (α) δηλώνει ότι το κινούμενο αντικείμενο κινείται με σταθερή ταχύτητα. Η ταχύτητα του κινητού από το σημείο *A* στο *B* της κίνησης μπορεί να εξαχθεί, μετρώντας από το γράφημα το διάστημα που έχει διανύσει και τον χρόνο στον οποίο το διάνυσε. Το σύμβολο Δ χρησιμοποιείται για να δηλώσει διαφορά μεγέθους. Συνεπώς, με Δt ($\Delta t = t_B - t_A$) συμβολίζουμε το χρόνο κίνησης από το *A* στο *B* και με Δy ($\Delta y = y_B - y_A$) το διάστημα που διανύθηκε στο χρόνο αυτό.

$$u = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{13 \text{ m}}{2 \text{ s}} = 6.5 \text{ m/s}$$



Σχήμα 1.2

Γραφική απεικόνιση σταθερής (α) και μεταβλητής (β) ταχύτητας

Στο Σχήμα 1.2 (β) απεικονίζεται μία *μη γραμμική* κίνηση, όπου στην αρχή της κίνησης το κινητό κινείται σχεδόν με μηδενική ταχύτητα, ενώ προς το τέλος της κίνησης (σημείο B) η ταχύτητα αυξάνει απότομα. Η ταχύτητα υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο, με τη διαφορά ότι για ίδια Δt η τιμή της ταχύτητας είναι διαφορετική σε διαφορετικά σημεία της κίνησης, σε αντίθεση με τη *γραμμική* κίνηση του Σχήματος 1.2 (α) όπου η τιμή της ταχύτητας παραμένει σταθερή.

Δεδομένου ότι η ταχύτητα μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της κίνησης του Σχήματος 1.2 (β), για να υπολογίσουμε με ακρίβεια τη *στιγμιαία ταχύτητα* του κινητού σε ένα σημείο της κίνησης, το Δt πρέπει να είναι απειροελάχιστο. Σε αυτή τη περίπτωση το τόξο AB ταυτίζεται με την εφαπτομένη της καμπύλης στο σημείο αυτό, οπότε η κλίση της εφαπτομένης αποτελεί μέτρο της τιμής της ταχύτητας.

Επιτάχυνση

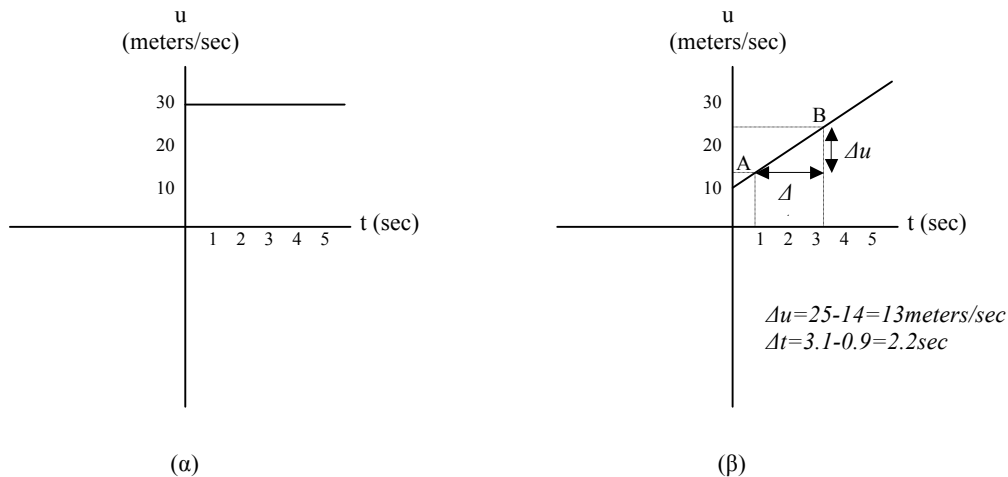
Η *επιτάχυνση* ορίζεται ως ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας. Η σχέση της μέσης επιτάχυνσης με την ταχύτητα εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$a_{av} = \frac{\Delta u}{\Delta t}$$

Η *στιγμιαία επιτάχυνση* προκύπτει όταν τα Δu και Δt είναι πολύ μικρά όπως και στην περίπτωση της στιγμιαίας ταχύτητας.

Το Σχήμα 1.3 (α) απεικονίζει μία κίνηση όπου η ταχύτητα του κινητού δε μεταβάλλεται, δηλαδή η επιτάχυνση είναι μηδενική. Στο Σχήμα 1.3 (β) η ταχύτητα της κίνησης αυξάνει σταθερά (γραμμική σχέση) και η επιτάχυνση είναι:

$$a = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{13 \text{ m/s}}{2.2 \text{ s}} = 5.9 \text{ m/s}^2$$



Σχήμα 1.3

Γραφική απεικόνιση σταθερής (α) και μεταβλητής (β) επιτάχυνσης

Ένα αντικείμενο το οποίο κάνει *ελεύθερη πτώση* στο πεδίο βαρύτητας της Γης, υφίσταται σταθερή επιτάχυνση της τάξης των 9.8 m/s^2 . Αν αφεθεί με μηδενική αρχική ταχύτητα μετά από 1 δευτερόλεπτο θα έχει ταχύτητα 9.8 m/s . Μετά από 2 δευτερόλεπτα η ταχύτητά του θα είναι 19.6 m/s .

Όταν ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας είναι θετικός, δηλαδή υπάρχει αύξηση της ταχύτητας, το φαινόμενο ονομάζεται *επιτάχυνση*. Αντίστοιχα, όταν ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας είναι αρνητικός, τότε το φαινόμενο ονομάζεται *επιβράδυνση*. Ένα παράδειγμα επιβράδυνσης είναι όταν ένα αντικείμενο εκτοξεύεται πάνω από την επιφάνεια της Γης, οπότε η ταχύτητά του μειώνεται σταθερά μέχρι να σταματήσει και να αρχίσει η κάθοδός του προς την επιφάνεια της Γης.

Παράδειγμα 1.2: Ένας ποδηλάτης επιταχύνει από 0 σε 10 m/s μέσα σε 20 s . Μετά από 20 s χρησιμοποιεί τα φρένα για να σταματήσει σε 5 s . Ποια είναι η μέση επιτάχυνση σε κάθε περίπτωση;

Λύση:

$$a_{av} = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{10 - 0 \text{ m/s}}{20 \text{ s}} = 0.5 \text{ m/s}^2$$

$$a_{av} = \frac{0 - 10 \text{ m/s}}{5 \text{ s}} = -2 \text{ m/s}^2$$

Παράδειγμα 1.3: Ένα σφαιρίδιο εκτοξεύεται προς τα επάνω με ταχύτητα 15 m/s . Πόσος χρόνος χρειάζεται για να φτάσει το μέγιστο ύψος;

Λύση:

$$a_{av} = \frac{\Delta u}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta u}{a} = \frac{0 - 15 \text{ m/s}}{-9.8 \text{ m/s}^2} = 1.53 \text{ s}$$

Δύναμη, μάζα και ο νόμος του Νεύτωνα

Δύναμη είναι ο παράγοντας ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει την ταχύτητα ενός σώματος. Ασκώντας μία δύναμη σε ένα αντικείμενο μπορούμε να προκαλέσουμε *παραμόρφωση* ή *επιτάχυνση* / *επιβράδυνση* (ή και τα δύο).

Αν μερικές δυνάμεις ασκηθούν σε ένα αντικείμενο η *συνισταμένη δύναμη* ορίζει την επιτάχυνσή του, δηλαδή η επιτάχυνση ενός σώματος είναι ανάλογη της δύναμης που ασκείται επάνω του. Η πρόταση αυτή εκφράζεται μαθηματικά από την παρακάτω σχέση:

$$a \propto F$$

όπου F η δύναμη που ασκείται στο αντικείμενο.

Η παραπάνω σχέση η οποία δηλώνει αναλογία μεγεθών μπορεί να εκφραστεί ως *εξίσωση* (δηλαδή ως σχέση που εκφράζει την ισότητα δύο ποσοτήτων) με τη χρήση *σταθεράς αναλογίας*, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι η μάζα m του αντικειμένου. Η εξίσωση που προκύπτει εκφράζει μαθηματικά τον *2^ο νόμο του Νεύτωνα*, ο οποίος δηλώνει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας ενός αντικειμένου εξαρτάται από τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό:

$$F = ma$$

Από τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα προκύπτει ότι η μάζα ενός σώματος είναι παράγοντας αντίστασης της μεταβολής της ταχύτητάς του ($a=F/m$).

Η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο από το πεδίο βαρύτητας της Γης ονομάζεται *βάρος*. Το βάρος w μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$w = mg$$

όπου $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ είναι η επιτάχυνση που υφίσταται ένα αντικείμενο από το πεδίο βαρύτητας της Γης. Ως μονάδα μέτρησης μάζας χρησιμοποιούμε συνήθως το *χιλιόγραμμα* (kg), ενώ ως μονάδα μέτρησης δύναμης χρησιμοποιούμε το *newton* (N). Συνεπώς το βάρος ενός αντικειμένου μάζας 1 χιλιόγραμμα είναι 9.8 newtons.

Παράδειγμα 1.4: Μία δύναμη 10 newton ασκείται σε ένα σώμα μάζας 4 χιλιόγραμμων για 5 δευτερόλεπτα. Να βρεθεί η επιτάχυνση και η ταχύτητά του στο τέλος των 5 δευτερολέπτων.

Λύση:

$$F = ma \Rightarrow a = \frac{F}{m} = \frac{10N}{4kg} = 2.5 \text{ m/s}^2$$

$$a = \frac{\Delta u}{\Delta t} \Rightarrow \Delta u = a\Delta t = (2.5 \text{ m/s}^2) * (5s) = 12.5 \text{ m/s}$$

Πίεση

Ο 2^{ος} νόμος του Νεύτωνα περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο μία συνισταμένη δύναμη επηρεάζει την κίνηση ενός σώματος χωρίς να περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται σε αυτό. Η δύναμη αυτή συνήθως συνίσταται από πολλές δυνάμεις, οι οποίες είναι κατανεμημένες στη μάζα του σώματος.

Ζυγίζοντας ένα αντικείμενο θεωρούμε ότι η δύναμη της βαρύτητας ασκείται μόνο σε ένα σημείο του το οποίο ονομάζεται *κέντρο βάρους* ή *κέντρο μάζας*, παρόλο που η δύναμη αυτή είναι κατανεμημένη σε όλη τη μάζα του σώματος.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου είναι σημαντικός ο τρόπος με τον οποίο ασκείται μία δύναμη σε ένα σώμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις σημαντικός παράγοντας είναι το εμβαδόν της επιφάνειας στην οποία κατανέμεται η δύναμη. Το μέγεθος το οποίο εκφράζει το αποτέλεσμα μίας δύναμης η οποία κατανέμεται σε μία επιφάνεια ονομάζεται *πίεση* και ορίζεται ως εξής:

$$p = F_{\perp} / A$$

Μονάδα της πίεσης είναι το N/m^2 ή *pascal* (Pa). Τα ρευστά (υγρά και αέρια) ασκούν δυνάμεις σε οτιδήποτε βυθιστεί μέσα τους. Μία σημαντική ιδιότητα των ρευστών είναι ότι η δύναμη που ασκούν στα αντικείμενα που είναι βυθισμένα σε αυτά είναι κάθετη στις επιφάνειές τους. Η πίεση που ασκείται σε ένα σημείο καθορίζεται από το βάρος του ρευστού πάνω από το σημείο αυτό. Το βάρος της ατμόσφαιρας πάνω μας στο επίπεδο της θάλασσας δημιουργεί πίεση $10^5 N/m^2$.

Παράδειγμα 1.5: Να βρεθεί η δύναμη που ασκείται σε ένα σφαιρικό αντικείμενο διαμέτρου 1 m λόγω της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Λύση:

$$p = F / A \Rightarrow F = pA$$

$$A = 4\pi r^2 = 4 \times 3.14 \times (0.5)^2 = 3.14 m^2$$

$$F = (10^5 N/m^2) \times (3.14 m^2) = 3.14 \times 10^5 N$$

Έργο και ενέργεια

Έργο παράγεται όταν ένα σώμα κινείται υπό την επίδραση μίας δύναμης. Το έργο που παράγεται ισούται με το γινόμενο της δύναμης που ασκείται σε αυτό και του διαστήματος που διανύεται παράλληλα με τη δύναμη:

$$W = Fd$$

Μονάδα μέτρησης έργου είναι το *newton-meter* ή *joule* (J). Αν μία δύναμη ενός newton προκαλέσει μετατόπιση ενός μέτρου, τότε το έργο που παράγεται είναι 1 joule. Το έργο που παράγεται από το πεδίο βαρύτητας όταν ένα αντικείμενο πέφτει από ύψος h δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$W = mgh$$

Αντίστοιχα, ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του έργου που απαιτείται για την ανύψωση ενός αντικειμένου σε ύψος h .

Ένα σώμα το οποίο παράγει έργο έχει *ενέργεια*. Η ενέργεια και το έργο έχουν τις ίδιες μονάδες. Υπάρχουν διάφορα είδη ενέργειας ανάλογα με το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα, π.χ. *μηχανική* σε περιπτώσεις κίνησης ενός αντικειμένου, *ηλεκτρική* σε ηλεκτρικά κυκλώματα, *χημική* σε χημικές διεργασίες, κλπ. Στη μελέτη ακουστικών φαινομένων ασχολούμαστε κυρίως με μηχανική ενέργεια. Ένα δονούμενο σύστημα έχει μηχανική ενέργεια η οποία μεταφέρεται από κινούμενα μόρια του αέρα σε ένα ηχητικό κύμα.

Η μηχανική ενέργεια χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: *κινητική ενέργεια*, η οποία εκδηλώνεται *κατά τη διάρκεια* της κίνησης ενός σώματος και *δυναμική ενέργεια*, ή οποία είναι *αποθηκευμένη ενέργεια από την κίνηση* ενός σώματος.

Η κινητική ενέργεια (*kinetic energy*) ενός σώματος εκφράζεται από τον τύπο:

$$KE = \frac{1}{2} mu^2$$

όπου m και u είναι η μάζα και η ταχύτητα του κινούμενου σώματος αντίστοιχα.

Η δυναμική ενέργεια (*potential energy*) εκδηλώνεται σε κίνηση εντός του πεδίου βαρύτητας της Γης (*βαρυτική*) ή σε παραμορφώσεις ελαστικών υλικών (*ελαστική*).

Αν ανυψώσουμε ένα αντικείμενο σε ύψος h , στο ύψος αυτό έχει ενέργεια:

$$PE = mgh$$

διότι θα αρχίσει να κινείται όταν το αφήσουμε να πέσει.

Ένα ελατήριο το οποίο έχει τεντωθεί (ή συμπιεστεί) έχει δυναμική ενέργεια, διότι όταν αφαιρεθεί η δύναμη η οποία προκάλεσε την παραμόρφωσή του θα παράγει έργο, δηλαδή θα επανέλθει (κινηθεί) στην αρχική του μορφή. Η δυναμική ενέργεια σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$PE = \frac{1}{2} Ky^2$$

όπου K είναι η σταθερά του ελατηρίου και y η επιμήκυνση / συμπίεσή του.

Ένα δοχείο με αέριο όγκου V του οποίου η πίεση είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση P_0 κατά μία μικρή ποσότητα p έχει δυναμική ενέργεια:

$$PE = \frac{1V}{2P_0} p^2$$

Στις παραπάνω περιπτώσεις υπάρχει μετατροπή κινητικής σε δυναμική ενέργεια και αντίστροφα. Η ανάλυση της κίνησης ενός αντικειμένου διευκολύνεται αν λάβουμε υπ' όψη τη μετατροπή της ενέργειας που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της κίνησης, δεδομένου ότι σύμφωνα με την *αρχή διατήρησης ενέργειας* η ενέργεια δεν χάνεται, αλλά μετατρέπεται από μία μορφή σε άλλη.

Συνεπώς, αν σηκώσουμε ένα αντικείμενο σε ύψος h και το αφήσουμε να πέσει, η ταχύτητα που αποκτά πριν προσκρούσει στο έδαφος υπολογίζεται ως εξής:

$$KE = PE \Rightarrow \frac{1}{2} mu^2 = mgh \Rightarrow u^2 = 2gh \Rightarrow u = \sqrt{2gh}$$

Ισχύς

Ο ορισμός του έργου δεν περιλαμβάνει τη χρονική διάρκεια στην οποία το έργο αυτό παράγεται. Η *ισχύς* ορίζεται ως ρυθμός μεταβολής του έργου:

$$P = W / t$$

Μονάδα ισχύος είναι το *joule/second* ή *watt (W)*. Η κατανάλωση ισχύος μίας ηλεκτρικής συσκευής ορίζεται σε watt. Ένας ηλεκτρικός λαμπτήρας κατανάλωσης 100 watt μετατρέπει ηλεκτρική ισχύς σε φως και θερμότητα με ρυθμό 100 joules/sec.

Σύστημα μονάδων

Το προτιμώμενο σύστημα μονάδων για έκφραση φυσικών ποσοτήτων ονομάζεται *SI (Système International)* ή *mks (meter-kilogram-second)*. Πέρα από τις μονάδες meter, kilogram και second περιλαμβάνει και άλλες μονάδες οι οποίες εξάγονται από τις βασικές μονάδες, π.χ., newton = kg*m/s². Οι μονάδες του συστήματος SI παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Ποσότητα	Σύμβολο	Μονάδα SI	Συντομογραφία	Τύπος
Διάστημα	d	meter	m	-
Μήκος	L	meter	m	-
Μάζα	m	kilogram	kg	-
Χρόνος	t	second	s	-
Ταχύτητα	u	meters/sec	m/s	$u = d/t$
Δύναμη	F	newton	N	$F = ma$
Ενέργεια	E	joule	J	
Έργο	W	joule	J	$W = Fy$
Πίεση	p	pascal	Pa	$p = F/A$
Ισχύς				
Μηχανική	P	watt	W	$P = W / t$
Ακουστική	W	watt	W	$W = pU$
Ηλεκτρική	P	watt	W	$P = I^2R = V^2/R$
Δυναμικό	V	volt	V	-
Ρεύμα	I	ampere	A	$I = V/R$
Αντίσταση	R	ohm	Ω	-
Σύνθετη αντίσταση	Z	ohm	Ω	-
Συχνότητα	f	hertz	Hz	$f = 1/T$

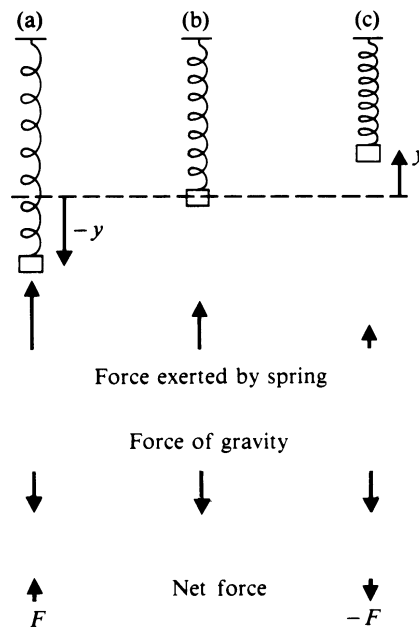
Πίνακας 1.1

Φυσικές ποσότητες και μονάδες στο σύστημα SI

2 Δονούμενα Συστήματα

Απλή αρμονική κίνηση

Το σύστημα του Σχήματος 2.1 αποτελείται από ένα ελατήριο του οποίου το ένα άκρο είναι στερεωμένο σε ένα σταθερό σημείο και στο άλλο άκρο είναι στερεωμένη μία μάζα m .



Σχήμα 2.1

Απλό δονούμενο σύστημα αποτελούμενο από ένα ελατήριο και μία μάζα m

Υποθέτουμε ότι η επιμήκυνση του ελατηρίου είναι ανάλογη με τη δύναμη επιμήκυνσης (το οποίο ισχύει για μικρές επιμηκύνσεις), έτσι ώστε για να το επιμηκύνουμε κατά l απαιτείται δύναμη Kl , όπου K είναι η σταθερά ελατηρίου.

Δεδομένου ότι το ελατήριο είναι στερεωμένο κατακόρυφα, η δύναμη της βαρύτητας ασκείται στη μάζα m η οποία επιμηκύνει το ελατήριο στη θέση ισορροπίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1(b). Στη θέση αυτή η δύναμη της βαρύτητας εξισορροπείται από τη δύναμη που ασκείται στη μάζα από το ελατήριο (η οποία έχει αντίθετη φορά) με συνέπεια να ισορροπεί η μάζα.

Αν επιμηκύνουμε το ελατήριο κατά y όπως στο Σχήμα 2.1(a), η σχέση της δύναμης που ασκείται και της επιμήκυνσης εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$F = -Ky$$

Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει από το γεγονός ότι η επιμήκυνση σύμφωνα με το σύστημα αξόνων που χρησιμοποιούμε είναι αρνητική. Η συνιστάμενη δύναμη F έχει φορά προς το σημείο ισορροπίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1(a), και έχει την τάση να επαναφέρει τη μάζα m στο σημείο ισορροπίας. Όταν η δύναμη επαναφοράς (*restoring force*) είναι ανάλογη με την επιμήκυνση, η κίνηση που εκτελεί το δονούμενο σύστημα ονομάζεται *απλή αρμονική κίνηση*.

(*simple harmonic motion*). Για ένα σύστημα που εκτελεί απλή αρμονική κίνηση η περίοδος T (*period*) είναι ανεξάρτητη από το πλάτος ταλάντωσης. Η συχνότητα f (*frequency*) της δόνησης ορίζεται ως ο αριθμός ταλαντώσεων ανά δευτερόλεπτο:

$$f = \frac{1}{T}$$

Η μονάδα μέτρησης συχνότητας είναι το *hertz* (Hz). Αν αφήσουμε τη μάζα να ταλαντωθεί από τη θέση (a) του Σχήματος 2.1, η μάζα περνάει από τη θέση ισορροπίας (b) και κινείται μέχρι να σταματήσει συμπιέζοντας το ελατήριο στη θέση (c), για να επιστρέψει πάλι στη θέση (a) ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο μίας ταλάντωσης. Ο αριθμός των Hz είναι ο αριθμός των κύκλων ταλάντωσης ανά δευτερόλεπτο. Στην περίπτωση του συστήματος μάζας-ελατηρίου, η συχνότητα δόνησης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Για να διπλασιαστεί η συχνότητα της δόνησης η μάζα πρέπει να μειωθεί στο $1/4$ της αρχικής μάζας ή εναλλακτικά η σταθερά K να τετραπλασιαστεί.

Παράδειγμα 2.1: Ένα ελατήριο επιμηκώνεται κατά 0.10 m όταν φορτώνεται με μία μάζα 2 kg . Ποια είναι η σταθερά K του ελατηρίου; Να βρεθεί η συχνότητα με την οποία θα δονηθεί όταν φορτωθεί με μάζα 2 kg και 0.5 kg .

Λύση:

Στην κατάσταση ισορροπίας η δύναμη του βάρους ισούται με τη δύναμη του ελατηρίου. Συνεπώς :

$$F = w \Rightarrow Kl = mg \Rightarrow K = \frac{mg}{l} \Rightarrow K = \frac{2 \times 9.8}{0.10} = 196\text{ N/m}$$

Με μάζα $m = 2\text{ kg}$:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2 \times 3.14} \sqrt{\frac{196}{2}} = 1.6\text{ Hz}$$

Με μάζα $m = 0.5\text{ kg}$:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2 \times 3.14} \sqrt{\frac{196}{0.5}} = 3.2\text{ Hz}$$

Ενέργεια και απόσβεση

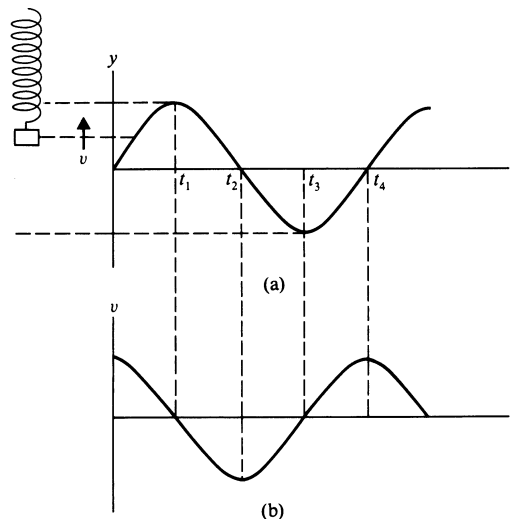
Η κινητική ενέργεια ΚΕ μίας κινούμενης μάζας είναι:

$$ΚΕ = \frac{1}{2} m v^2$$

Η δυναμική ενέργεια ΡΕ ενός ελατηρίου που έχει επιμηκυνθεί ή συμπιεστεί κατά y ισούται με:

$$ΡΕ = \frac{1}{2} K y^2$$

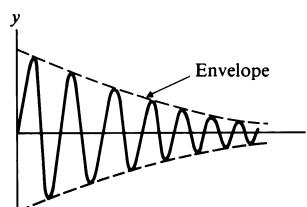
Από το Σχήμα 2.2 φαίνεται ότι όταν το u^2 φθάνει τη μέγιστη τιμή του το y^2 είναι μηδέν και αντίστροφα. Συνεπώς η συνολική μηχανική ενέργεια του συστήματος αλλάζει συνεχώς από κινητική σε δυναμική και αντίστροφα. Στους χρόνους t_1 και t_3 η δυναμική ενέργεια φθάνει τη μέγιστη τιμή της ενώ στις χρονικές στιγμές t_2 και t_4 η κινητική ενέργεια μεγιστοποιείται.



Σχήμα 2.2

Γραφική απεικόνιση απλής αρμονικής κίνησης

Όλα τα μηχανικά συστήματα τείνουν να χάνουν ενέργεια ως αποτέλεσμα μηχανικής τριβής και άλλων μηχανισμών απώλειας. Εκτός της περίπτωσης που η ενέργεια του συστήματος ανανεώνεται από κάποιο εξωτερικό παράγοντα, το πλάτος της δόνησης φθίνει με τον χρόνο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3

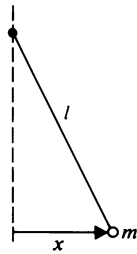
Γραφική παράσταση απόσβεσης κίνησης λόγω απώλειας ενέργειας

Κατά τη δόνηση ενός συστήματος, ένα μικρό κλάσμα της αρχικής ενέργειας χάνεται σε κάθε κύκλο της δόνησης. Η διακεκομμένη γραμμή του Σχήματος 2.3 απεικονίζει τη μεταβολή του πλάτους δόνησης με το χρόνο και ονομάζεται *περιβάλλουσα* (*envelope*). Ένα δονούμενο σύστημα του οποίου το πλάτος δόνησης φθίνει με αυτό τον τρόπο ονομάζεται *αποσβεσόμενο* (*damped*) και ο ρυθμός της μείωσης του πλάτους *σταθερά απόσβεσης* (*damped constant*).

Απλά δονούμενα συστήματα

Εκτός του συστήματος μάζας-ελατηρίου, τα ακόλουθα συστήματα είναι επίσης παραδείγματα απλής αρμονικής κίνησης:

α) *Εκκρεμές (μικρή γωνία απόκλισης)*: Το εκκρεμές του Σχήματος 2.4 αποτελείται από μία μάζα m στερεωμένη σε μία χορδή μήκους l .



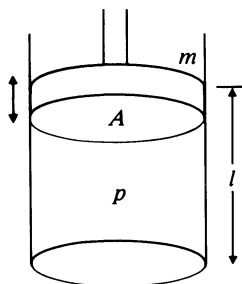
Σχήμα 2.4
Απλό εκκρεμές

Δεδομένου ότι $l \gg x$ και ότι η μάζα της χορδής είναι πολύ μικρότερη της μάζας m , το εκκρεμές εκτελεί απλή αρμονική κίνηση με συχνότητα:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

όπου g η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας. Η συχνότητα δεν εξαρτάται από τη μάζα m .

β) *Ελατήριο αέρος*. Ένα έμβολο μάζας m , ελεύθερο να κινηθεί σε έναν κύλινδρο επιφάνειας A και μήκους l , δονείται σχεδόν όπως μία μάζα στο σύστημα μάζας-ελατηρίου (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5
Ελεύθερη κίνηση εμβόλου σε κύλινδρο

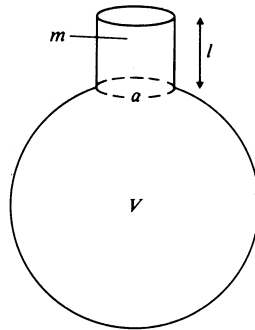
Η σταθερά ελατηρίου του αέρα στον κύλινδρο είναι:

$$K = \frac{\gamma p A}{l}$$

όπου p είναι η πίεση του αέρα, A το εμβαδόν του εμβόλου, m η μάζα του εμβόλου και γ είναι μία σταθερά της οποίας η τιμή για τον αέρα είναι 1.4. Συνεπώς η συχνότητα της ταλάντωσης είναι:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma p A}{ml}}$$

γ) *Συντονιστής Helmholtz*. Ένας κοινός τύπος ταλαντωτή αέρος περιγράφεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6
Συντονιστής Helmholtz

Η μάζα αέρος στο λαιμό του δοχείου λειτουργεί σαν έμβολο και ο αέρας στο μεγαλύτερο όγκο V σαν ελατήριο. Η συχνότητα δόνησης δίνεται από τον τύπο:

$$f = \frac{u}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{Vl}}$$

όπου a η επιφάνεια του λαιμού, l το μήκος του, V ο όγκος του συντονιστή και u η ταχύτητα του ήχου ($u=344\text{m/s}$).

Αν θεωρήσουμε ότι ο συντονιστής Helmholtz έχει μάζα m και σταθερά ελατηρίου K :

$$m = \rho a l \quad \text{και} \quad K = \frac{\rho a^2 u^2}{V}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα.

Οι συντονιστές Helmholtz μπορούν να έχουν διάφορα μεγέθη και σχήματα. Όσο πιο μικρή είναι η επιφάνεια του λαιμού τόσο πιο χαμηλή η συχνότητα ταλάντωσης.

Παράδειγμα 2.2: Μία φιάλη αποτελείται από σφαίρα διαμέτρου 9.8 cm και από λαιμό διαμέτρου 3 cm και ύψους 10 cm. Να βρεθεί η συχνότητα συντονισμού.

Λύση:

$$f = \frac{u}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{Vl}}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \times (3.14) \times (0.049\text{m})^3 = 4.93 \times 10^{-4} \text{m}^3$$

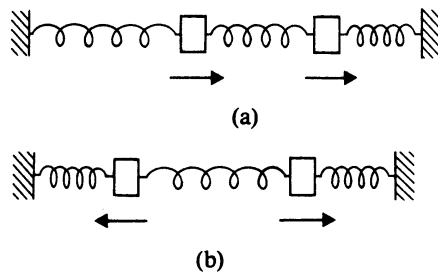
$$a = \pi r^2 = (3.14) \times (0.015\text{m})^2 = 7.07 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$f = \frac{344\text{m/s}}{2 \times (3.14)} \sqrt{\frac{7.07 \times 10^{-4} \text{m}^2}{(4.93 \times 10^{-4} \text{m}^3) \times (0.10\text{m})}} = 207\text{Hz}$$

Συστήματα με δύο και τρεις μάζες

Ο τρόπος με τον οποίο δονούνται τα παραπάνω συστήματα μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας μία μόνο συντεταγμένη ή βαθμό ελευθερίας. Συστήματα με δύο ή περισσότερους βαθμούς ελευθερίας έχουν περισσότερους από έναν τρόπο (*mode*) δόνησης, ο κάθε ένας με διαφορετική συχνότητα ταλάντωσης. Οι τρόποι δόνησης ενός μηχανικού συστήματος αποτελούν τους πιθανούς τρόπους κατά τους οποίους το σύστημα αυτό μπορεί να ταλαντωθεί υπό την επιρροή μίας εξωτερικής δύναμης.

Το σύστημα του Σχήματος 2.7 έχει δύο ‘κανονικούς’ (normal) ή ανεξάρτητους τρόπους δόνησης.



Σχήμα 2.7

Τρόποι δόνησης με δύο μάζες:

(a) κίνηση προς την ίδια κατεύθυνση, (b) κίνηση προς αντίθετη κατεύθυνση

Στην περίπτωση (a) οι μάζες κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση ενώ στην περίπτωση (b) κινούνται αντίθετα. Αν οι μάζες και τα ελατήρια είναι ίδια, οι συχνότητες των δύο τρόπων δόνησης είναι:

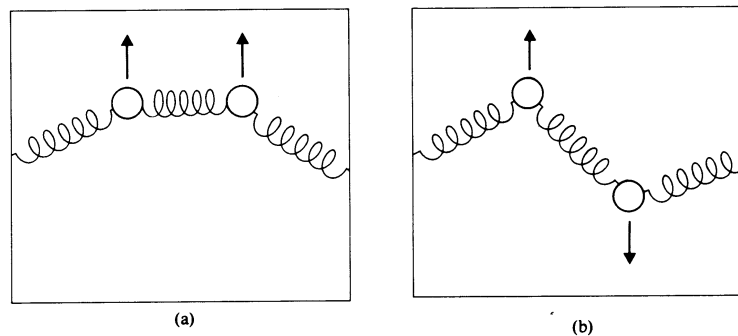
$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \text{και} \quad f_b = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3K}{m}}$$

Η συχνότητα του τρόπου (a) είναι ίδια με τη συχνότητα του απλού συστήματος μάζας-ελατηρίου ενώ η συχνότητα του τρόπου (b) έχει συχνότητα περίπου 1.7 ($\sqrt{3}$) φορές μεγαλύτερη.

Οι τρόποι (a) και (b) είναι εντελώς ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλο. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα μπορεί να δονηθεί κατά τον τρόπο ταλάντωσης (a) χωρίς να διεγερθεί ο τρόπος (b) και αντίστροφα, με την κατάλληλη μετατόπιση των δύο μαζών. Οι δύο αυτοί τρόποι ταλάντωσης αποτελούν ακραίες περιπτώσεις δόνησης του συστήματος. Γενικά, η δόνηση του συστήματος είναι η συνισταμένη των δύο αυτών τρόπων οι οποίοι διεγείρονται μερικώς, δηλαδή με διαφορετικό πλάτος ταλάντωσης. Για κάθε συνδυασμό διέγερσης των τρόπων ταλάντωσης το σύστημα θα δονηθεί διαφορετικά.

Στο Σχήμα 2.7 οι μάζες μπορούν να κινηθούν κατά τη διεύθυνση του άξονα των ελατηρίων ή κάθετα προς αυτόν. Στην πρώτη περίπτωση η δόνηση ονομάζεται *διαμήκης* (*longitudinal*) ενώ στη δεύτερη περίπτωση *εγκάρσια* (*transverse*).

Το σύστημα των δύο μαζών του Σχήματος 2.7 εκτός των δύο τρόπων διαμήκους ταλάντωσης έχει και δύο εγκάρσιους όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 2.8.

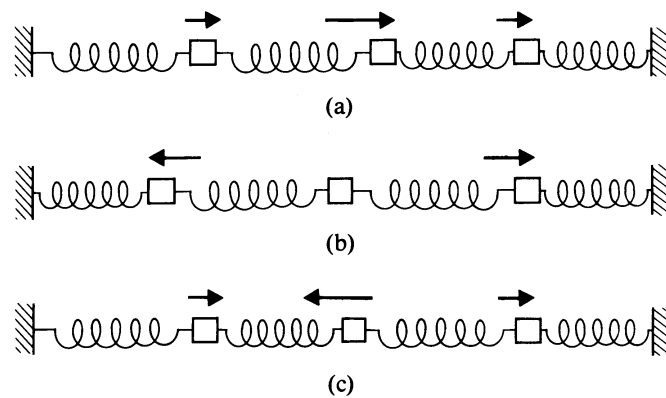


Σχήμα 2.8

Τρόποι εγκάρσιας δόνησης συστήματος δύο μαζών:

- (a) στον τρόπο της χαμηλότερης συχνότητας οι μάζες κινούνται στην ίδια κατεύθυνση
- (b) στον τρόπο της υψηλότερης συχνότητας οι μάζες κινούνται αντίθετα

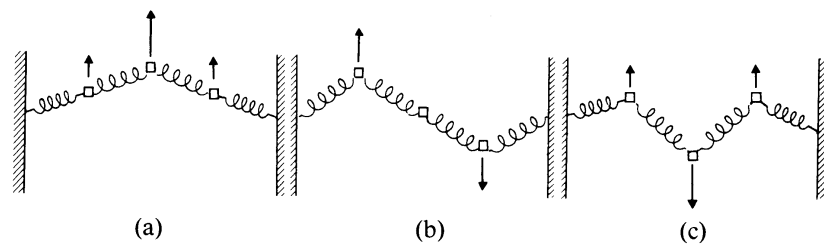
Προσθέτοντας μία επιπλέον μάζα στο σύστημα του Σχήματος 2.7 εμφανίζονται επιπλέον τρόποι ταλάντωσης. Στην περίπτωση που η ταλάντωση είναι διαμήκης εμφανίζεται ένας τρίτος τρόπος ταλάντωσης. Οι τρεις ανεξάρτητοι τρόποι ταλάντωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9

Τρεις ανεξάρτητοι τρόποι διαμήκους ταλάντωσης

Σε περίπτωση που το σύστημα μπορεί να κινηθεί εγκάρσιως, εκτός των τριών τρόπων του Σχήματος 2.9 θα υπάρχουν και τρεις ανεξάρτητοι τρόποι εγκάρσιας ταλάντωσης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10

Τρεις ανεξάρτητοι τρόποι εγκάρσιας ταλάντωσης

Οι ανεξάρτητοι τρόποι που απεικονίζονται στα Σχήματα 2.7, 2.8, 2.9 και 2.10 συχνά ονομάζονται *κανονικοί* τρόποι του δονούμενου συστήματος. Προκειμένου να δονηθεί ένα σύστημα σε έναν και μόνο τρόπο χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή και μπορεί σχετικά εύκολα να επιτευχθεί, όταν ένας εξωτερικός παράγοντας το θέσει σε ταλάντωση στη συγκεκριμένη συχνότητα του τρόπου δόνησης. Εναλλακτικά, η κάθε μία μάζα πρέπει να μετατοπιστεί καταλλήλως και να τεθεί σε κίνηση.

Παράδειγμα 2.3: Το δονούμενο σύστημα του Σχήματος 2.7 αποτελείται από δύο μάζες 0.5 kg και τρία ελατήρια με σταθερές 50 N/m. Να βρεθούν οι συχνότητες των τρόπων δόνησης.

Λύση:

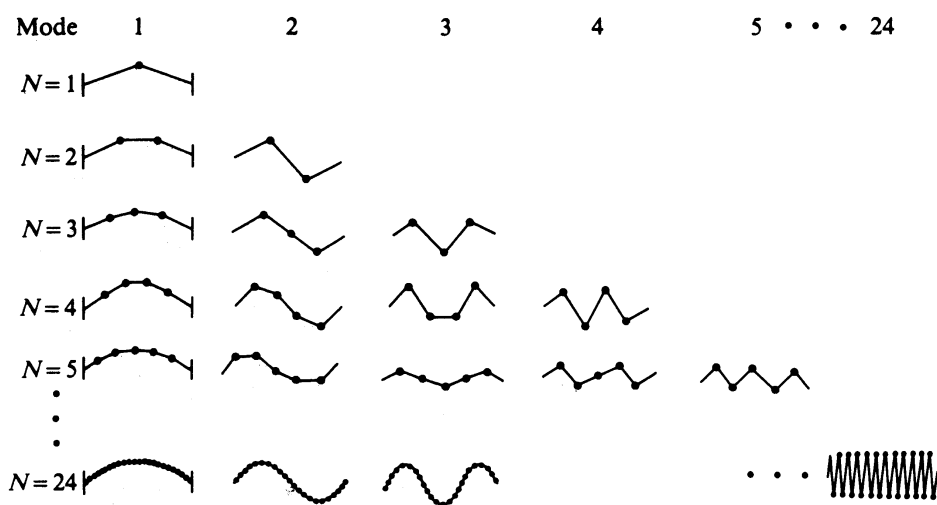
$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{50\text{N/m}}{0.5\text{kg}}} = 1.59\text{Hz}$$

$$f_b = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 \times (50\text{N/m})}{0.5\text{kg}}} = 2.76\text{Hz}$$

Συστήματα με πολλούς τρόπους δόνησης

Στην περίπτωση του συστήματος μάζας-ελατηρίου, κάθε μία επιπλέον μάζα προσθέτει ένα διαμήκη και έναν εγκάρσιο τρόπο ταλάντωσης. Γενικά, ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από N αριθμό μαζών θα έχει N διαμήκεις και N εγκάρσιους τρόπους ταλάντωσης. Αν οι μάζες μπορούν να κινηθούν σε τρεις διαστάσεις, το σύστημα θα έχει $2N$ εγκάρσιους τρόπους και N διαμήκεις, όπου N ο αριθμός των μαζών του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός των συχνοτήτων που σχετίζεται με τους εγκάρσιους τρόπους είναι N , διότι οι σχετικοί μεταξύ τους τρόποι σε δύο διαστάσεις έχουν συνήθως την ίδια συχνότητα.

Οι εγκάρσιοι τρόποι δόνησης για 1, 2, 3, 4, 5 και 24 μάζες διαγράφονται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11

Τρόποι εγκάρσιων δονήσεων για συστήματα μάζας-ελατηρίου με διαφορετικό αριθμό μαζών

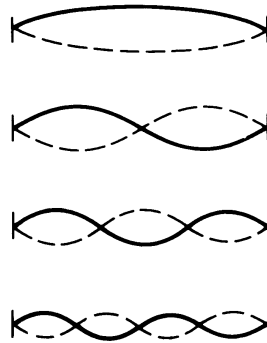
Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των εγκάρσιων τρόπων ισούται με τον αριθμό των μαζών (υπάρχει ίσος αριθμός από διαμήκεις τρόπους οι οποίοι όμως είναι δύσκολο να απεικονιστούν στο διάγραμμα). Ο τρόπος δόνησης με τη μεγαλύτερη συχνότητα είναι αυτός όπου οι παρακείμενες μάζες κινούνται με αντίθετη φορά. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των μαζών τόσο περισσότερο το σύστημα κατά τη δόνηση έχει κυματοειδή μορφή.

Δονήσεις σε μουσικά όργανα

Κάθε ακουστικό μουσικό όργανο είναι μία μηχανική κατασκευή μέσω της οποίας ο μουσικός μπορεί να προκαλέσει δονήσεις σε κάποιο υλικό προκειμένου να παραχθεί ήχος. Παρακάτω εξετάζονται συνοπτικά μερικές βασικές κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται ως βασικοί μηχανισμοί παραγωγής ήχου σε μουσικά όργανα:

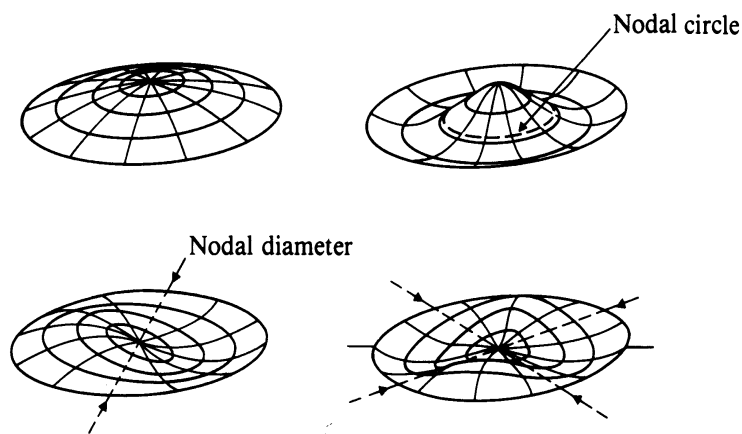
1. *Δονούμενη χορδή (Vibrating string)*. Η δονούμενη χορδή ως υλικό με μάζα και ελαστικότητα μπορεί να θεωρηθεί ως οριακή περίπτωση του συστήματος μάζας-ελατηρίου, όπου ο αριθμός των μαζών είναι πολύ μεγάλος (θεωρητικά άπειρος). Υπάρχουν πολλοί τρόποι δόνησης και όπως

προκύπτει, η συχνότητα των περισσότερων είναι πολλαπλάσια της συχνότητας του χαμηλότερου σε συχνότητα τρόπου ο οποίος ονομάζεται *θεμελιώδης (fundamental)*. Όταν η συχνότητα των υπόλοιπων τρόπων είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας του θεμελιώδη ονομάζονται *αρμονικοί (harmonics)*. Μερικοί τρόποι δόνησης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12
Τρόποι δόνησης χορδής

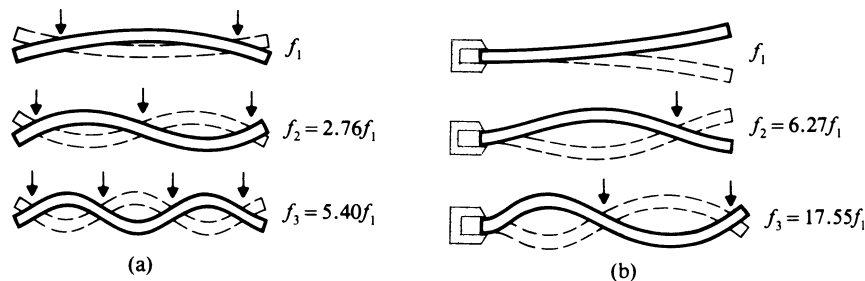
2. *Δονούμενη μεμβράνη (Vibrating membrane)*. Οι μεμβράνες τύμπανων κατασκευάζονται από δέρμα ή συνθετικό υλικό και διατηρούνται τεντωμένες από ειδικούς μηχανισμούς. Η δονούμενη μεμβράνη μπορεί να θεωρηθεί ως χορδή δύο διαστάσεων όπου η δύναμη επαναφοράς ασκείται από τα άκρα της. Οι μεμβράνες, δεδομένου ότι είναι δύο διαστάσεων, μπορούν να δονηθούν με πολλούς τρόπους οι οποίοι δεν είναι αρμονικοί. Τέσσερις τρόποι δόνησης κυκλικής μεμβράνης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13
Τρόποι δόνησης κυκλικής μεμβράνης

Οι πρώτοι δύο τρόποι έχουν κυκλική συμμετρία ενώ οι δύο δεύτεροι έχουν *κομβικές γραμμές (nodal lines)*, οι οποίες δρουν ως άξονες περιστροφής βάση των οποίων η μεμβράνη ταλαντώνεται.

3. *Δονούμενη ράβδος (Vibrating bar)*. Οι δονούμενοι ράβδοι χρησιμοποιούνται ως πηγή ήχου σε πολλά κρουστά όργανα. Η ακαμψία της ράβδου αποτελεί τη δύναμη επαναφοράς, συνεπώς τα άκρα της ράβδου στα περισσότερα κρουστά όργανα δεν είναι στερεωμένα. Οι πρώτοι τρόποι δόνησης μίας ομοιογενούς ράβδου με ελεύθερα (a) και στερεωμένα (b) άκρα απεικονίζονται στο Σχήμα 2.14.



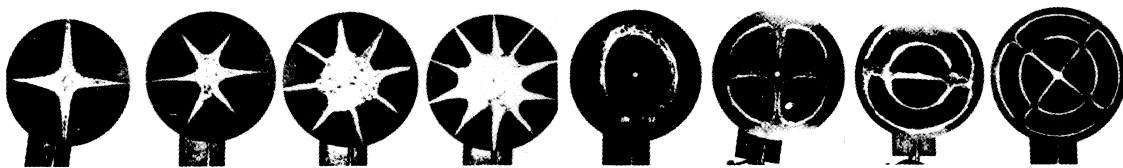
Σχήμα 2.14

Τρόποι δόνησης ράβδου με ελεύθερα (a) και στερεωμένα (b) άκρα

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14, ο λόγος της συχνότητας του θεμελιώδη τρόπου με τους υπόλοιπους δεν είναι αρμονικός. Οι ράβδοι που χρησιμοποιούνται σε όργανα όπως η μαρίμπα, το ξυλόφωνο και άλλα όργανα έχουν ειδικό σχήμα και ο λόγος της συχνότητας των διαφόρων τρόπων είναι διαφορετικός σε κάθε περίπτωση.

4. *Δονούμενη πλάκα (Vibrating plate)*. Στις δονούμενες πλάκες (κύμβαλα, gongs, κλπ) όπως και στις ράβδους, η ταλάντωση βασίζεται στη δύναμη επαναφοράς η οποία προέρχεται από την ακαμψία του υλικού. Οι πλάκες μπορούν να έχουν πολλούς τρόπους ταλάντωσης, μερικοί από τους οποίους αρκετά σύνθετοι.

Μία μέθοδος μελέτης των ταλαντώσεων δονούμενων πλακών είναι η χρήση *ιχνών Chladni*. Τέτοια ίχνη δημιουργούνται διασκορπίζοντας σωματίδια αλατιού ή άμμου στην επιφάνεια μίας πλάκας και διεγείροντάς την σε έναν από τους τρόπους ταλάντωσης. Τα ίχνη Chladni που δημιουργούνται σε κυκλική πλάκα εμφανίζονται στο Σχήμα 2.15.



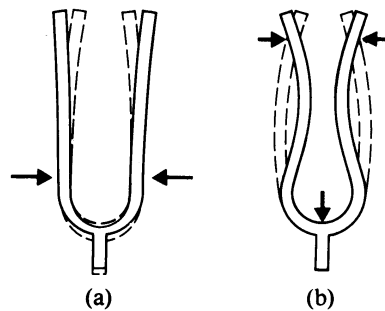
Σχήμα 2.15

Ίχνη Chladni σε κυκλική πλάκα

Οι πρώτοι τέσσερις τρόποι έχουν δύο, τρεις, τέσσερις και πέντε κομβικές γραμμές αλλά καθόλου κομβικούς κύκλους. Οι δεύτεροι τέσσερις τρόποι έχουν έναν ή δύο κομβικούς κύκλους.

5. *Διαπασών (Tuning fork)*. Το διαπασών αποτελείται από δύο ράβδους ενωμένες στο ένα άκρο. Συνεπώς, οι τρόποι δόνησης είναι όμοιοι με αυτούς της ράβδου η οποία είναι στερεωμένη στο ένα άκρο της όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14 (b). Το διαπασών χρησιμοποιείται ως συχνότητα αναφοράς για το κούρδισμα μουσικών οργάνων. Η συχνότητα του διαπασών μπορεί να ανυψωθεί κονταίνοντας το μήκος του ή αφαιρώντας υλικό κοντά στα ελεύθερα άκρα του. Η

συχνότητα μπορεί να μειωθεί αφαιρώντας υλικό κοντά στη βάση του αφού έτσι μειώνεται η ακαμψία του.



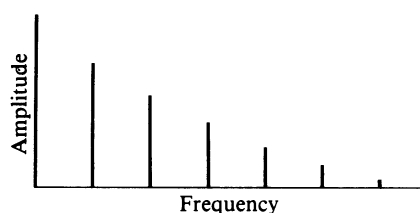
Σχήμα 2.16
Δονήσεις ενός διαπασών
(a) πρωτεύουσα δόνηση, (b) clang mode

Στο Σχήμα 2.16 απεικονίζονται οι δύο τρόποι δόνησης του διαπασών, ο κυρίως τρόπος (a) και ο δευτερεύων (clang mode) (b), ο οποίος έχει πολύ υψηλότερη συχνότητα (συνήθως τρεις οκτάβες υψηλότερη). Στον κυρίως τρόπο δόνησης, οι ράβδοι ταλαντώνονται γύρω από τους κόμβους που φαίνονται στο Σχήμα 2.16, προκαλώντας την κατακόρυφη δόνηση της λαβής. Συνεπώς, αν η λαβή έρθει σε επαφή με κάποιο αντικείμενο μπορεί να το θέσει σε ταλάντωση.

6. *Σωλήνας αέρος*. Τα πνευστά όργανα βασίζονται στη δόνηση μίας στήλης αέρος μέσα σε κάποιον σωλήνα. Η συμπεριφορά της στήλης αέρος είναι παρόμοια με αυτή του συστήματος ελατηρίου αέρος.

Σύνθετες δονήσεις

Στις προηγούμενες παραγράφους εξετάστηκε η δόνηση ορισμένων συστημάτων τα οποία μπορούν να δονηθούν με διάφορους τρόπους ταλάντωσης. Συνήθως, η συνισταμένη ταλάντωση ενός συστήματος το οποίο μπορεί να δονηθεί με πολλούς τρόπους δόνησης, είναι ένας συνδυασμός πολλών τρόπων δόνησης. Το *φάσμα* (*spectrum*) της δόνησης, είναι ένα διάγραμμα το οποίο απεικονίζει ποιοι τρόποι έχουν διεγερθεί κατά τη δόνηση ενός συστήματος και σε τι ποσοστό. Το Σχήμα 2.17 παρουσιάζει το φάσμα δόνησης μίας τραβηγμένης χορδής.



Σχήμα 2.17
Φάσμα δόνησης τραβηγμένης χορδής

Στο εργαστήριο, το φάσμα δόνησης εξάγεται από ένα όργανο το οποίο ονομάζεται *αναλυτής φάσματος* (*spectrum analyser*). Η φασματική ανάλυση ονομάζεται επίσης *ανάλυση Fourier*, από το όνομα του μαθηματικού που την παρουσίασε.

3 Κύματα

Χαρακτηριστικά κυμάτων

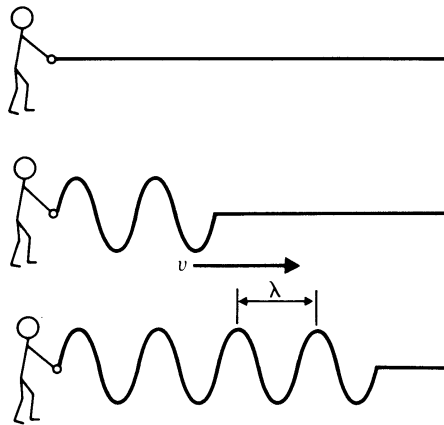
Κύμα είναι το φαινόμενο μεταφοράς ενέργειας από ένα σημείο ενός μέσου σε ένα άλλο. Η μεταφορά ενέργειας λαμβάνει χώρα μέσω της διατάραξης του μέσου μεταφοράς και όχι μέσω της μετακίνησής του. Η διατάραξη ή η μεταβολή σε μία φυσική ποσότητα μεταδίδεται από σημείο σε σημείο του μέσου καθώς το κύμα μεταφέρεται. Στην περίπτωση ηχητικών κυμάτων το μέσο μεταφοράς είναι ο αέρας και η μετάδοση του κύματος γίνεται μέσω της μεταβολής της πίεσης και της πυκνότητας του αέρα. Σε όλες τις περιπτώσεις, μετά την πάροδο του κύματος το μέσο μεταφοράς επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση ηρεμίας.

Όλα τα κύματα, ανεξαρτήτως μορφής, έχουν μερικά κοινά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα μπορούν να ανακλαστούν, να διαθλαστούν και να περιθλαστούν. Όλα τα κύματα αποτελούν έκφραση και μεταφορά ενέργειας.

Διαφορές μεταξύ διαφορετικών ειδών κυμάτων εντοπίζονται στη μορφή ενέργειας την οποία εκφράζουν, την ταχύτητα διάδοσης και το μέσο διάδοσης.

Μετάδοση κυμάτων

Το Σχήμα 3.1 απεικονίζει ένα σχοινί του οποίου το ένα άκρο είναι στερεωμένο σε ένα σταθερό σημείο και το άλλο άκρο κρατείται.



Σχήμα 3.1

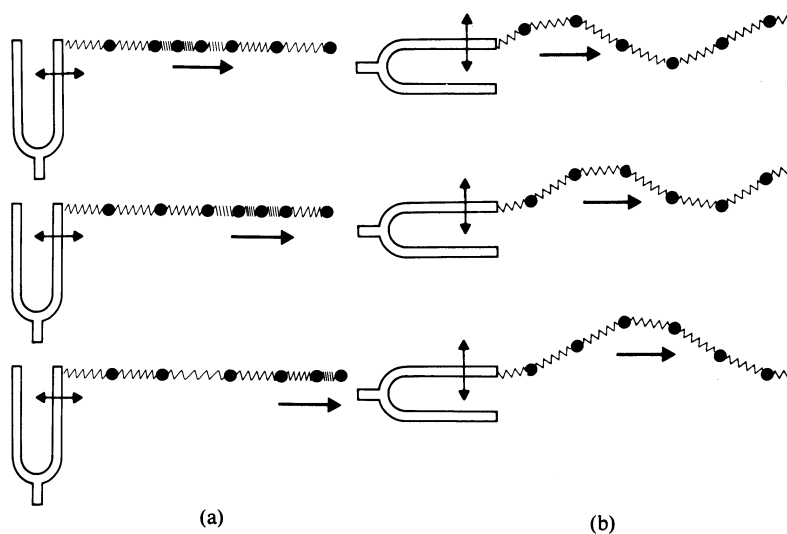
Δημιουργία κύματος κινώντας την άκρη ενός σχοινού

Αν το άκρο το οποίο κρατείται κινηθεί πάνω και κάτω f φορές ανά δευτερόλεπτο, θα δημιουργηθεί ένα κύμα με συχνότητα f το οποίο θα διαδοθεί προς το σταθερό άκρο. Το κύμα μεταδίδεται με ταχύτητα u η οποία εξαρτάται από τη μάζα του σχοινού και από το πόσο τεντωμένο είναι.

Στο Σχήμα 3.1 η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλωμάτων του κύματος έχουν ίση απόσταση μεταξύ τους. Η απόσταση αυτή ονομάζεται *μήκος κύματος* λ . Η ταχύτητα του κύματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$u = f\lambda$$

Στα στερεά σώματα είναι δυνατή η μετάδοση εγκάρσιων και επιμήκων κυμάτων, αλλά γενικά στα αέρια και υγρά μόνο τα επιμήκη κύματα μπορούν να μεταδοθούν. Το Σχήμα 3.2 απεικονίζει τη μετάδοση εγκάρσιων και επιμήκων κυμάτων του συστήματος μάζας-ελατηρίου. Το σύστημα αυτό είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο στερεών κρυστάλλων και εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο δονήσεις μεταδίδονται στα στερεά.



Σχήμα 3.2
Μετάδοση κύματος σε έναν βαθμό ελευθερίας:
(a) επίμηκες κύμα (b) εγκάρσιο κύμα

Σε ένα στερεό, η ταχύτητα μετάδοσης ενός επιμήκους κύματος δίνεται από τον τύπο:

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του στερεού και E το μέτρο ελαστικότητας (*Young's modulus*). Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι η ταχύτητα ενός επιμήκους κύματος σε μία στερεά ράβδος είναι ανεξάρτητη από τις διαστάσεις της. Αυτό δεν ισχύει για τα εγκάρσια κύματα, των οποίων η ταχύτητα εξαρτάται από τις διαστάσεις του υλικού. Ο παρακάτω τύπος δίνει την ταχύτητα ενός εγκάρσιου κύματος σε ένα σύρμα ή μία χορδή:

$$u = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

όπου T είναι η τάση της χορδής και μ η μάζα ανά μονάδα μήκους. Γενικά, τα επιμήκη κύματα ταξιδεύουν πολύ πιο γρήγορα από τα εγκάρσια στα στερεά.

Παράδειγμα 3.1: Η πυκνότητα χάλυβα είναι 7700 kg/m^3 και το μέτρο ελαστικότητας είναι $19.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$. Να βρεθεί η ταχύτητα των επιμηκών κυμάτων στις ατσάλινες ράβδους ενός μεταλλόφωνου.

Λύση:

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{19.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2}{7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}} = 5032 \text{ m/s}$$

Παράδειγμα 3.2: Τι τάση θα χρειαζόταν ένα ατσάλινο σύρμα διαμέτρου 1 mm προκειμένου οι ταχύτητες των επιμηκών και εγκάρσιων κυμάτων να είναι ίσες;

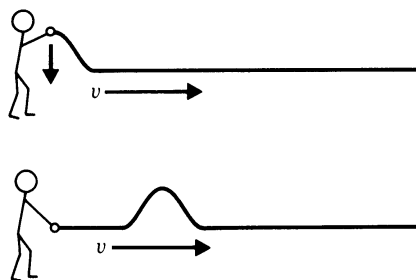
Λύση:

$$u = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \Rightarrow T = \mu u^2$$

$$T = \rho(\pi r^2)u^2 = 7700 \times (3.14) \times (5 \times 10^{-4})^2 \times (5032)^2 = 1.53 \times 10^5 \text{ N}$$

Παλμικά κύματα: Ανάκλαση

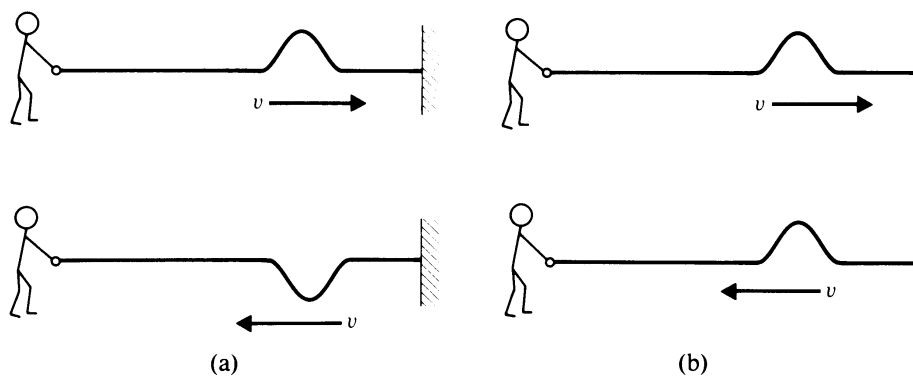
Αν στο σχοινί του Σχήματος 3.1 ανεβάσουμε και κατεβάσουμε γρήγορα το ελεύθερο άκρο του, ένα παλμικό κύμα θα ταξιδέψει με ταχύτητα u προς το σταθερό άκρο του σχοινοῦ με σταθερή μορφή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3

Παλμικό κύμα παραγόμενο από την απότομη κίνηση του ελεύθερου άκρου ενός σχοινοῦ

Καθώς το κύμα φθάνει στο σταθερό σημείο, ανακλάται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 (a). Το φαινόμενο το οποίο παρατηρείται σε αυτή την περίπτωση είναι ότι ο ανακλώμενος παλμός επιστρέφει ανάποδα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *αναστροφή φάσης (phase reversal)*.

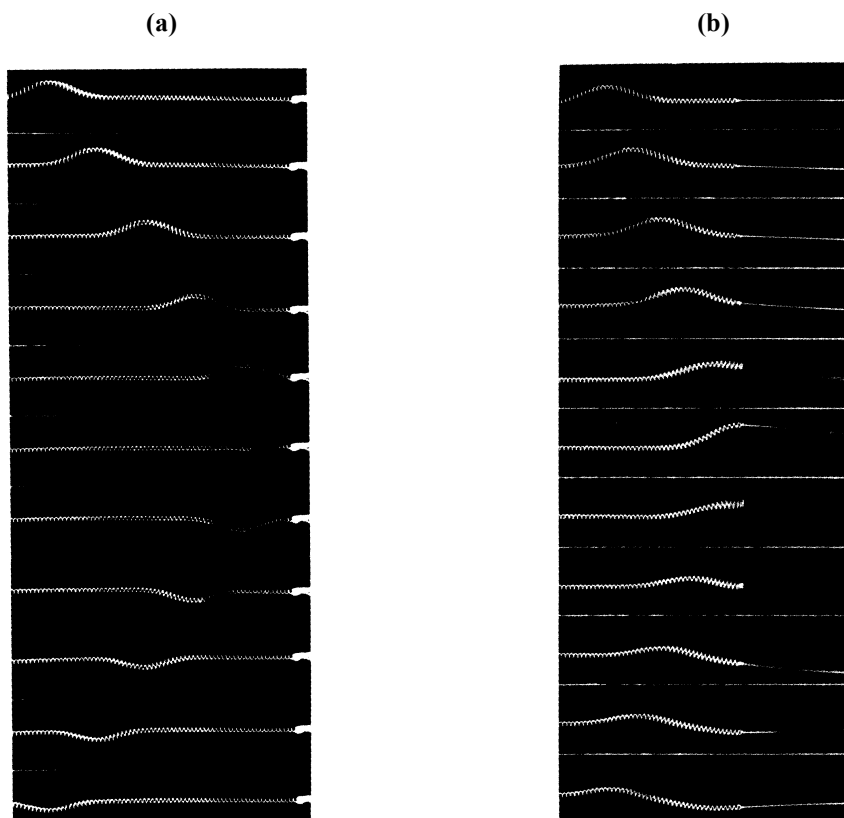


Σχήμα 3.4

Ανάκλαση παλμικού κύματος:
(a) σε σταθερό άκρο (b) σε ελεύθερο άκρο

Αν το σχοινί δεν είναι στερεωμένο στο άλλο άκρο του, ο ανακλώμενος παλμός επιστρέφει με σωστή φάση όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 (b).

Στο Σχήμα 3.5 (a) και (b) φαίνονται φωτογραφίες ενός μακριού ελατηρίου στο οποίο ταξιδεύει ένα παλμικό κύμα με σταθερό και ελεύθερο άκρο αντίστοιχα.



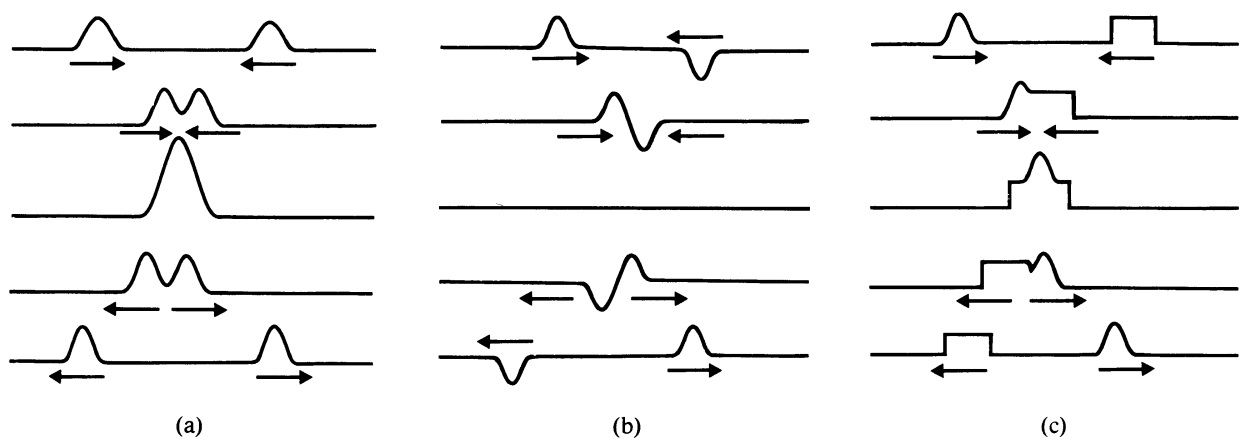
Σχήμα 3.5

Φωτογραφία ανάκλασης παλμικού κύματος:
(a) σε σταθερό άκρο (b) σε ελεύθερο άκρο

Στην περίπτωση που το σχοινί είναι στερεωμένο όπως στο Σχήμα 3.4 (a), η μετατόπιση του στερεωμένου σημείου είναι πάντα μηδενική, ακόμα και όταν το κύμα φθάνει στο σημείο αυτό. Λόγω του φαινομένου δράσης-αντίδρασης, η δύναμη που ασκεί το κύμα στο ακίνητο σημείο αντιμετωπίζεται από μία αντίθετη δύναμη. Αυτή η δύναμη δημιουργεί το ανακλώμενο παλμικό κύμα το οποίο έχει αντεστραμμένη φάση, λόγω του ότι η δύναμη που το προκαλεί έχει αντίθετη φορά με τη δύναμη που έχει ασκηθεί για τη δημιουργία του αρχικού κύματος. Όταν το άκρο είναι ελεύθερο όπως στο Σχήμα 3.5 (b), η μετατόπιση του ελεύθερου σημείου στιγμιαία διπλασιάζεται όταν φθάνει το κύμα, το οποίο είναι φαινόμενο ανάλογο με το φαινόμενο το οποίο προκάλεσε το αρχικό κύμα.

Άθροιση και συμβολή

Μία ιδιότητα των κυμάτων είναι ότι μπορούν να περάσουν το ένα μέσα από το άλλο χωρίς να υποστούν αλλοίωση στα αρχικά χαρακτηριστικά τους. Η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται από την αρχή της γραμμικής άθροισης (*principle of linear superposition*). Για παλμικά κύματα τα οποία μεταδίδονται σε σχοινί ή ελατήριο, η μετατόπιση σε κάθε σημείο ισούται με το άθροισμα των μετατοπίσεων λόγω του κάθε παλμού ξεχωριστά. Το Σχήμα 3.6 απεικονίζει γραφικά την αρχή της γραμμικής άθροισης.



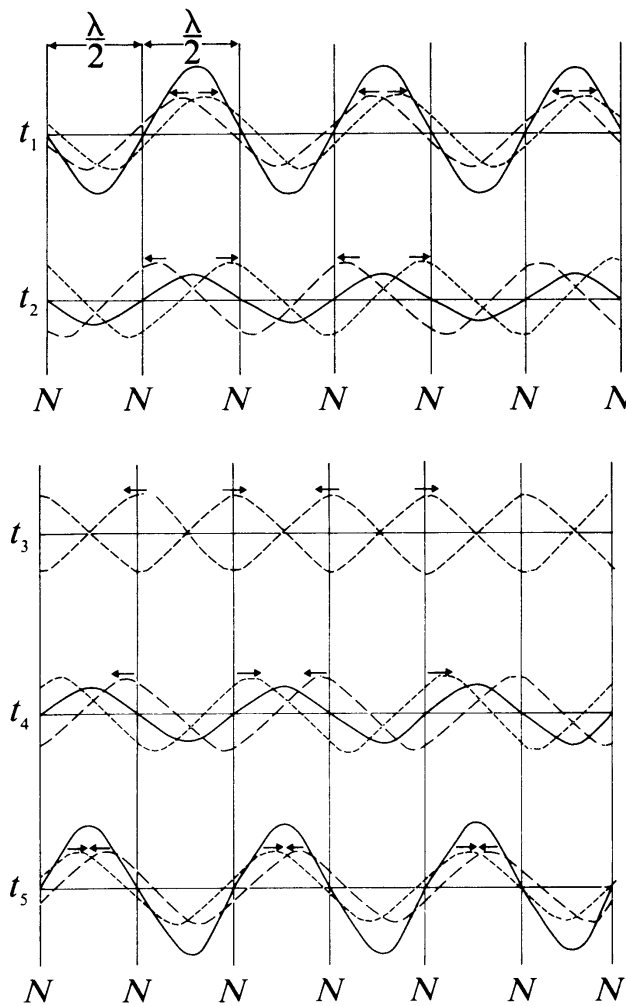
Σχήμα 3.6

Άθροιση παλμικών κυμάτων τα οποία ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις
(a) παλμοί με ίδια φάση (b) παλμοί με αντεστραμμένη φάση (c) παλμοί διαφορετικής μορφής

Όταν οι παλμοί έχουν την ίδια φάση προστίθενται, ενώ στην περίπτωση που έχουν αντίθετη φάση αφαιρούνται κατά τη συνάντησή τους. Αυτά είναι παραδείγματα *συμβολής* (*interference*) κυμάτων. Όταν οι παλμοί προστίθενται έχουμε *θετική συμβολή* (*constructive interference*), ενώ όταν αφαιρούνται *αρνητική συμβολή* (*destructive interference*).

Αν υποθέσουμε ότι και οι δύο άκρες του σχοινοῦ ανεβαίνουν και κατεβαίνουν ταυτόχρονα με την ίδια συχνότητα, δύο συνεχή κύματα ίδιας συχνότητας θα μεταδοθούν προς τη μέση του σχοινοῦ. Τα συνεχή κύματα συμβάλουν όπως και τα παλμικά κύματα. Αν έχουν διαφορετική φάση θα συμβάλουν αρνητικά, ενώ με την ίδια φάση συμβάλουν θετικά. Κάτω από αυτές τις συνθήκες δημιουργείται ένα κύμα το οποίο δεν φαίνεται να κινείται προς κάποια κατεύθυνση. Σε αυτή την περίπτωση το ακίνητο κύμα ονομάζεται *στάσιμο* (*standing wave*).

Όταν δύο πανομοιότυπα κύματα (ίδια συχνότητα και πλάτος) μεταδίδονται προς αντίθετη κατεύθυνση σε σχοινί ή ελατήριο, δημιουργούνται εναλλασσόμενες περιοχές θετικής και αρνητικής συμβολής όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7. Τα σημεία αρνητικής συμβολής έχουν πάντα μηδενική μετατόπιση και ονομάζονται *δεσμοί* (*nodes*) (συμβολίζονται με το γράμμα N). Μεταξύ των δεσμών υπάρχουν σημεία θετικής συμβολής όπου η μετατόπιση είναι μέγιστη και ονομάζονται *κοιλίες* (*antinodes*). Στις κοιλίες η ταλάντωση έχει την ίδια συχνότητα με τα δύο κύματα που δημιούργησαν το στάσιμο κύμα, ενώ το πλάτος είναι ίσο με το άθροισμα του πλάτους των δύο αυτών κυμάτων.



Σχήμα 3.7

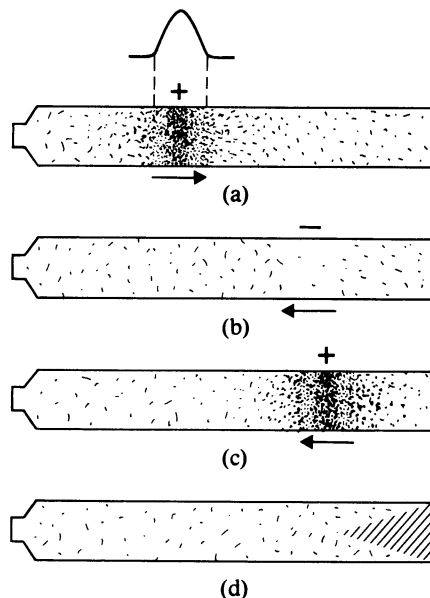
Συμβολή δύο ίδιων κυμάτων σε μέσο μίας διάστασης.

Στους χρόνους t_1 και t_5 υπάρχει θετική συμβολή, ενώ στο χρόνο t_3 αρνητική

Οι κοιλίες του Σχήματος 3.7 οι οποίες δημιουργούνται με τη συμβολή δύο πανομοιότυπων κυμάτων, έχουν απόσταση μισού μήκους κύματος. Ο όρος στάσιμο κύμα προκύπτει από το γεγονός ότι τα σημεία αυτά μέγιστης μετατόπισης δεν μετακινούνται στο μέσο μετάδοσης του κύματος. Στάσιμα κύματα δημιουργούνται όταν ανακλώμενα κύματα συναντούν προσπίπτοντα κύματα. Η περίπτωση του Σχήματος 3.7, όπου τα ανακλώμενα και προσπίπτοντα κύματα έχουν το ίδιο πλάτος, είναι ειδική περίπτωση η οποία οδηγεί σε πλήρη συμβολή. Αν τα δύο προσπίπτοντα κύματα δεν έχουν το ίδιο πλάτος, οι δεσμοί θα είναι πάλι σημεία ελάχιστης αλλά όχι μηδενικής μετατόπισης.

Ηχητικά κύματα

Τα κύματα ήχου είναι επιμήκη και μεταδίδονται σε στερεά, υγρά και αέρια σώματα. Στη διάταξη του Σχήματος 3.8 απεικονίζεται η δημιουργία και ο τρόπος μετάδοσης ενός ηχητικού κύματος.



Σχήμα 3.8

Ανάκλαση ενός ηχητικού παλμού σε σωλήνα

- (a) δημιουργία ηχητικού παλμού (b) ανάκλαση σε ανοιχτό άκρο
(c) ανάκλαση σε κλειστό άκρο (d) απουσία ανάκλασης σε απορροφητικό άκρο

Ένας σωλήνας έχει στο ένα άκρο του στερεωμένο ένα μεγάφωνο. Όταν δέχεται έναν ηχητικό παλμό, η μεμβράνη του κινείται απότομα συμπιέζοντας ελάχιστα τον αέρα που βρίσκεται εμπρός του (ακόμα και ένας πολύ δυνατός ήχος δημιουργεί αύξηση πίεσης λιγότερο από $1/10.000$ της ατμοσφαιρικής πίεσης). Ο δημιουργούμενος παλμός ατμοσφαιρικής συμπίεσης του Σχήματος 3.8(a) ταξιδεύει περίπου με ταχύτητα 340 m/s .

Αν το άλλο άκρο του σωλήνα είναι ανοιχτό όπως στο Σχήμα 3.8(b), η αυξημένη πίεση του παλμού μηδενίζεται όταν φθάνει στο ανοιχτό άκρο και επιστρέφει ως αρνητικός παλμός πίεσης (τα μόρια του αέρα είναι αραιωμένα). Αυτή η περίπτωση είναι ανάλογη με την περίπτωση του σχοινιού με στερεωμένο το ένα άκρο του, όπου το παλμικό κύμα επιστρέφει με αναστροφή φάσης.

Όταν το άλλο άκρο είναι κλειστό όπως στο Σχήμα 3.8(c), η πίεση του παλμού διπλασιάζεται όταν φθάνει στο κλειστό άκρο και επιστρέφει με θετική πίεση, δηλαδή με την ίδια φάση όπως στην περίπτωση του σχοινιού με ελεύθερο άκρο.

Στην περίπτωση που το άλλο άκρο είναι σφραγισμένο με ηχοαπορροφητικό υλικό όπως στο Σχήμα 3.8(d), δεν υπάρχει ανάκλαση του ηχητικού κύματος. Αυτή η διάταξη ονομάζεται ανηχοϊκή (*anechoic*), αφού δεν επιτρέπει τη δημιουργία *αντήχησης*, ένα φαινόμενο το οποίο βασίζεται στην ανάκλαση ήχου.

Η ταχύτητα ηχητικών κυμάτων σε αέρια δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$u = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

όπου T είναι η απόλυτη θερμοκρασία, M είναι το μοριακό βάρος του αερίου και γ , R σταθερές του αερίου. Για τον αέρα, $M=2.88 \times 10^{-2}$, $R=8.31$ και $\gamma=1.4$, οπότε $u=20.1\sqrt{T}$. Η απόλυτη θερμοκρασία, μετρούμενη σε βαθμούς Kelvin (K), προκύπτει προσθέτοντας τον αριθμό 273 στη θερμοκρασία της κλίμακας Κελσίου. Για παράδειγμα για $t=21$ °C, $T=294$ K, οπότε $u=344$ m/s. Γενικά, η ταχύτητα του ήχου αυξάνει κατά 0.6 m/s για κάθε βαθμό της κλίμακας Κελσίου σύμφωνα με τον παρακάτω προσεγγιστικό τύπο:

$$u = 331.3 + 0.6t \text{ m/s}$$

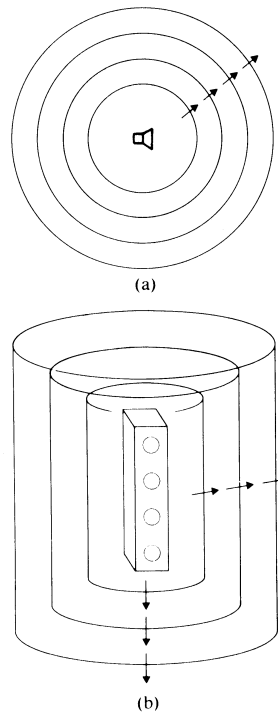
όπου t είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου. Ο ήχος μεταδίδεται στα υγρά και στερεά σώματα πολύ πιο γρήγορα από ότι μεταδίδεται στα αέρια.

Μετάδοση κύματος σε δύο και τρεις διαστάσεις

Τα παραδείγματα μετάδοσης ήχου που εξετάσαμε αφορούσαν μετάδοση σε μία διάσταση. Στις περισσότερες περιπτώσεις το κύμα μεταδίδεται σε δύο ή τρεις διαστάσεις.

Ο τρόπος εκπομπής ηχητικών κυμάτων εξαρτάται από τις γεωμετρικές διαστάσεις της πηγής ήχου. Μία σημειακή πηγή ή μία πηγή με σφαιρική συμμετρία εκπέμπει σφαιρικά κύματα. Μία γραμμική πηγή ή μία πηγή με κυλινδρική συμμετρία εκπέμπει κυλινδρικά κύματα. Μία μεγάλη επίπεδη επιφάνεια εκπέμπει επίπεδα κύματα. Οι πραγματικές πηγές κυμάτων μόνο κατά προσέγγιση πλησιάζουν τα παραπάνω γεωμετρικά σχήματα.

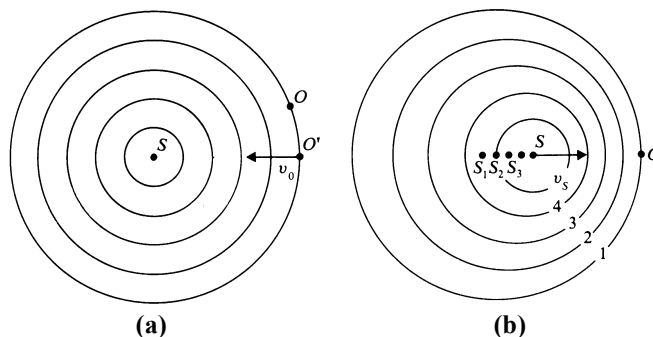
Οι πηγές ήχου των οποίων οι διαστάσεις είναι πολύ μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος που εκπέμπουν, προσεγγίζουν σημειακές πηγές και εκπέμπουν σφαιρικά ηχητικά κύματα. Ένα μικρό ηχείο συμπεριφέρεται σα σημειακή πηγή στις χαμηλές συχνότητες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9 (a). Η στήλη μεγαφώνων του Σχήματος 3.9 (b) προσεγγίζει μία γραμμική πηγή. Οι δύο αυτές διατάξεις εκπέμπουν σφαιρικά και κυλινδρικά ηχητικά κύματα μόνο όταν τοποθετηθούν σε *ελεύθερο πεδίο ήχου* (*free sound field*), δηλαδή σε ένα χώρο όπου δεν υπάρχουν αντικείμενα τα οποία προκαλούν ανακλάσεις, ή σε ανηχοϊκό χώρο.



Σχήμα 3.9
Εκπομπή ήχου από
(a) μικρό ηχείο (b) στήλη μεγαφώνων

Το φαινόμενο Doppler

Συνήθως η συχνότητα των ηχητικών κυμάτων που φθάνουν έναν παρατηρητή είναι ίδια με τη συχνότητα δόνησης της πηγής ήχου. Μία εξαίρεση στον κανόνα αυτό είναι όταν η πηγή ήχου ή ο παρατηρητής βρίσκονται σε κίνηση. Αν κινούνται το ένα προς το άλλο η παρατηρούμενη συχνότητα παρουσιάζει αύξηση, ενώ στην περίπτωση που απομακρύνονται η συχνότητα παρουσιάζεται μειωμένη. Αυτή η φαινομενική μεταβολή της συχνότητας ονομάζεται *φαινόμενο Doppler* και περιγράφεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10
Φαινόμενο Doppler
(a) παρατηρητής κινούμενος προς την πηγή ήχου
(b) πηγή ήχου κινούμενη προς τον παρατηρητή

Αν η πηγή στο σημείο S του Σχήματος 3.10 (α) εκπέμπει 100 κύματα ανά δευτερόλεπτο, ο ακίνητος παρατηρητής στο σημείο O θα αντιληφθεί την πάροδο 100 κυμάτων. Αν ο παρατηρητής κινείται προς την πηγή (O') θα αντιληφθεί περισσότερα κύματα ανά δευτερόλεπτο λόγω του ότι κινείται αντίθετα προς την μετάδοση των κυμάτων, δηλαδή η παρατηρούμενη συχνότητα θα είναι μεγαλύτερη. Η φαινομενική συχνότητα (ο ρυθμός με τον οποίο ο παρατηρητής συναντά τα κύματα) είναι:

$$f' = f_s \frac{u + u_o}{u}$$

όπου f_s είναι η συχνότητα της πηγής, u_o η ταχύτητα του παρατηρητή και u η ταχύτητα του ήχου. Όταν ο παρατηρητής περάσει την πηγή, η ταχύτητα u_o πρέπει να αφαιρεθεί από την ταχύτητα u . Συνεπώς, η συχνότητα μειώνεται απότομα όταν ο παρατηρητής προσπεράσει την πηγή.

Το φαινόμενο Doppler παρατηρείται και όταν η πηγή βρίσκεται σε κίνηση. Η περίπτωση αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 3.10 (β). Η πηγή έπεμψε το κύμα 1 όταν ήταν στη θέση S_1 , το κύμα 2 όταν ήταν στη θέση S_2 κλπ. Τα δημιουργούμενα μέτωπα κυμάτων μοιάζουν με σφαίρες των οποίων τα κέντρα μετακινούνται συνεχώς προς τα δεξιά καθώς κινείται η πηγή ήχου. Συνεπώς, ο ρυθμός κυμάτων που φθάνουν στον παρατηρητή είναι μεγαλύτερος από ότι θα ήταν στην περίπτωση μίας ακίνητης πηγής. Αν η ταχύτητα της πηγής είναι u_s , η φαινομενική συχνότητα θα είναι:

$$f' = f_s \frac{u}{u - u_s}$$

Παράδειγμα 3.3: Η κόρνα ενός αυτοκινήτου εκπέμπει ήχο συχνότητας 440 Hz. Να υπολογισθεί η φαινομενική συχνότητα, όταν το αυτοκίνητο πλησιάζει έναν παρατηρητή με ταχύτητα 25 m/s και η φαινομενική συχνότητα όταν τον προσπερνά με την ίδια ταχύτητα.

Λύση:

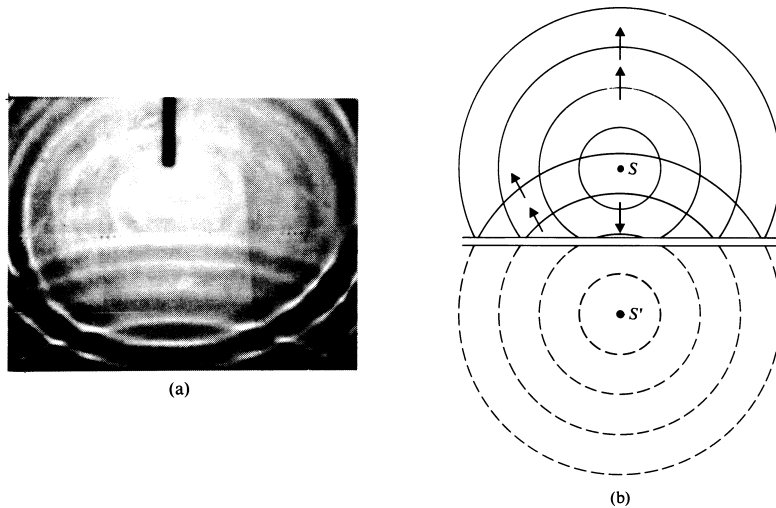
$$f' = f \frac{u}{u - u_s} = 440 \frac{343}{343 - 25} = 475 \text{ Hz}$$

$$f' = f \frac{u}{u + u_s} = 440 \frac{343}{343 + 25} = 410 \text{ Hz}$$

Η συχνότητα μειώνεται κατά 14 %.

Ανάκλαση

Κύματα τα οποία μεταδίδονται σε δύο και τρεις διαστάσεις όταν συναντούν ένα σταθερό εμπόδιο ανακλώνται με τρόπο ανάλογο με κύματα τα οποία μεταδίδονται σε μία διάσταση, όπως στην περίπτωση του σχοινιού και του σωλήνα. Στο Σχήμα 3.11 (α) φαίνεται η ανάκλαση κυμάτων νερού από επίπεδο εμπόδιο.



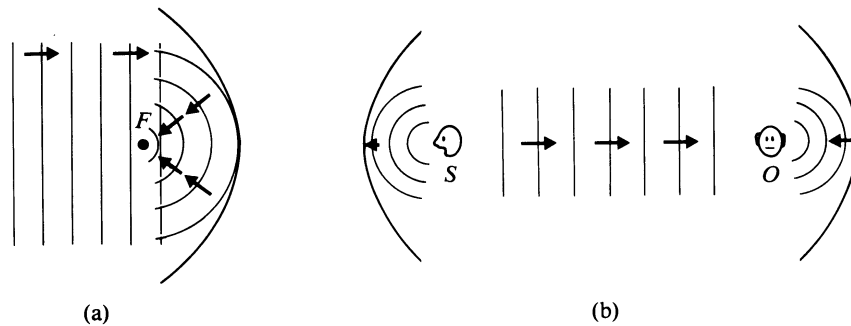
Σχήμα 3.11

Ανάκλαση κυμάτων από επίπεδο εμπόδιο

- (a) σχηματισμός κυμάτων σε δεξαμενή από σημειακή πηγή
 (b) τα ανακλώμενα κύματα φαίνεται σα να πηγάζουν από ένα είδωλο S' της πηγής

Στο Σχήμα 3.11 (b) απεικονίζεται σχηματικά η ανάκλαση κυμάτων τα οποία εκπέμπονται από ένα σημείο S . Τα σφαιρικά ανακλώμενα κύματα φαίνεται σα να προέρχονται από ένα σημείο S' πίσω από το εμπόδιο. Το σημείο αυτό ονομάζεται *είδωλο* και έχει την ίδια απόσταση από το εμπόδιο με το σημείο S .

Η ανάκλαση από κεκλιμένο εμπόδιο μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εστίαση ενέργειας σε ένα σημείο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12.



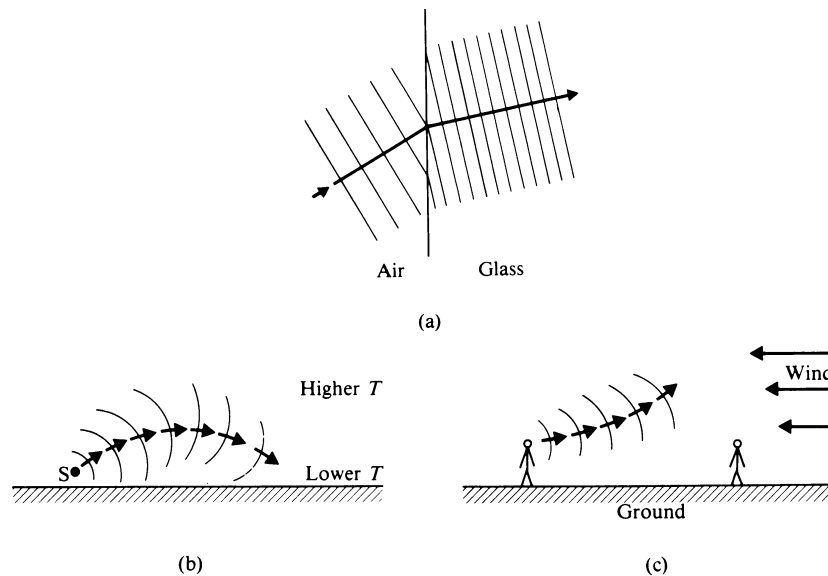
Σχήμα 3.12

Ανάκλαση κυμάτων από κεκλιμένο εμπόδιο

- (a) τα εισερχόμενα κύματα εστιάζονται στο σημείο F από τον κεκλιμένο ανακλαστήρα
 (b) “η γκαλερί των ψιθύρων” όπου δύο κεκλιμένοι ανακλαστήρες εστιάζουν τον ήχο της πηγής S στο σημείο O

Διάθλαση

Διάθλαση (refraction) ονομάζεται το φαινόμενο που παρατηρείται όταν η ταχύτητα ενός κύματος αλλάζει, έχοντας ως αποτέλεσμα την αλλαγή κατεύθυνσης του κύματος. Η αλλαγή της ταχύτητας μπορεί να συμβεί απότομα, καθώς το κύμα περνά από ένα μέσο μετάδοσης σε ένα άλλο ή σταδιακά μέσα στο ίδιο μέσο. Οι δύο αυτές περιπτώσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13

Διάθλαση κυμάτων

- (a) κύματα φωτός τα οποία περνούν από αέρα σε γυαλί
 (b) κύματα ήχου στην ατμόσφαιρα όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται με το ύψος
 (c) ήχος που ταξιδεύει αντίθετα στον άνεμο

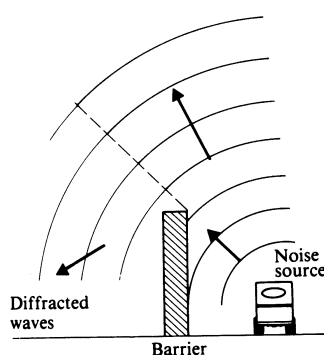
Το φαινόμενο της διάθλασης στο ίδιο μέσο εξηγείται στο Σχήμα 3.13 (b) και έχει ως αποτέλεσμα τη μετάδοση ήχου σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Ο ήχος μεταδίδεται πιο γρήγορα πάνω από το έδαφος λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κλίση του κύματος προς τα κάτω όπως φαίνεται στο σχήμα. Συνεπώς, ήχος ο οποίος θα χανόταν στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας διαθλάται προς το έδαφος.

Στο Σχήμα 3.13 (c) φαίνεται γιατί είναι δύσκολο να ακουστεί κάποιος φωνάζοντας αντίθετα στον άνεμο (αυτό δε συμβαίνει επειδή ο άνεμος σπρώχνει τα ηχητικά κύματα προς τα πίσω, αφού η ταχύτητα ακόμα και πολύ δυνατού ανέμου έχει ταχύτητα πολύ μικρότερη από αυτής του ήχου). Σε αυτή την περίπτωση, το φαινόμενο της διάθλασης υφίσταται λόγω του ότι η ταχύτητα του ανέμου κοντά στο έδαφος είναι μικρότερη από ότι είναι σε απόσταση από το έδαφος. Λόγω του ότι η ταχύτητα του ήχου είναι σταθερή σε σχέση με τον αέρα, η ταχύτητα αλλάζει με το ύψος. Σε αυτή την περίπτωση, η διάθλαση προκαλεί την αλλαγή κατεύθυνσης του ήχου, του οποίου ένα μέρος χάνει το στόχο του.

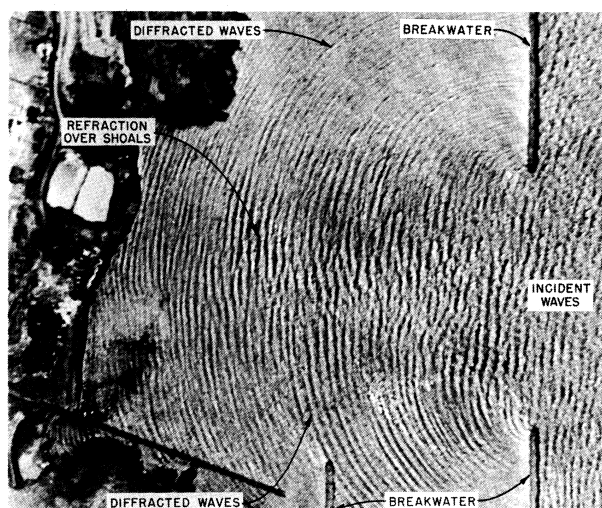
Περίθλαση

Όταν κύματα συναντούν κάποιο εμπόδιο κατά τη μετάδοσή τους, έχουν την τάση να κάμπτονται γύρω από το εμπόδιο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *περίθλαση* (*diffraction*). Περίθλαση επίσης παρατηρείται όταν κύματα περνούν μέσα από ένα στενό άνοιγμα και διαχέονται πέρα από αυτό. Παραδείγματα περίθλασης σε κύματα νερού, φως και ήχου φαίνονται στα Σχήματα 3.14, 3.15 και 3.16.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η σχέση του μεγέθους του ανοίγματος και του μήκους κύματος είναι αυτή που καθορίζει το ποσό της περίθλασης. Για παράδειγμα, ένα μεγάφωνο διαμέτρου 8 ιντσών (0.2 m) διαχέει κύματα συχνότητας 100 Hz ($\lambda=3.1$ m) προς όλες τις κατευθύνσεις, αλλά κύματα συχνότητας 2000 Hz ($\lambda=0.2$ m) θα ακουστούν αρκετά δυνατότερα από εμπρός παρά από δίπλα, αφού η περίθλαση σε αυτή τη συχνότητα είναι ελάχιστη.



(a)



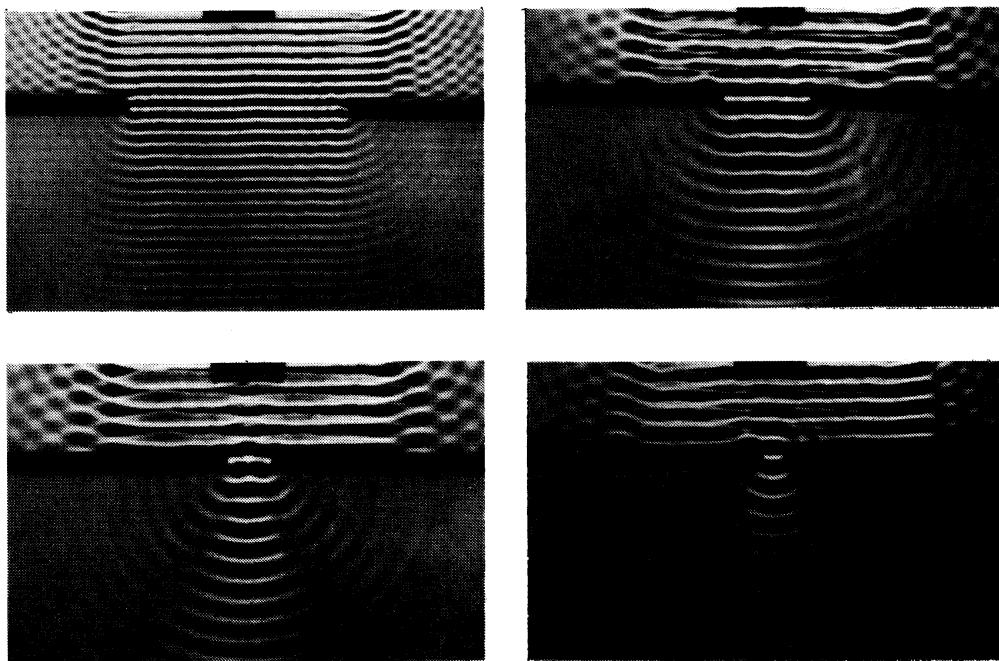
(b)

Σχήμα 3.14

Περίθλαση κυμάτων από εμπόδιο

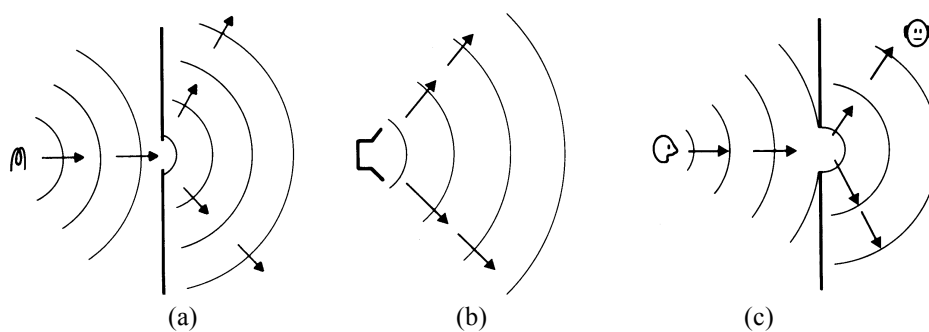
(a) η περίθλαση επιτρέπει τη διαρροή θορύβου γύρω από τον τοίχο

(b) κύματα ωκεανού σε λιμάνι



Σχήμα 3.15

Περίθλαση κυμάτων νερού τα οποία περνούν από ανοίγματα διαφόρων μεγεθών. Όσο στενότερο είναι το άνοιγμα (σε σύγκριση με το μήκος κύματος), τόσο μεγαλύτερη είναι η περίθλαση



Σχήμα 3.16

Περίθλαση κυμάτων από στενό πέρασμα

(a) κύματα φωτός από στενή σχισμή

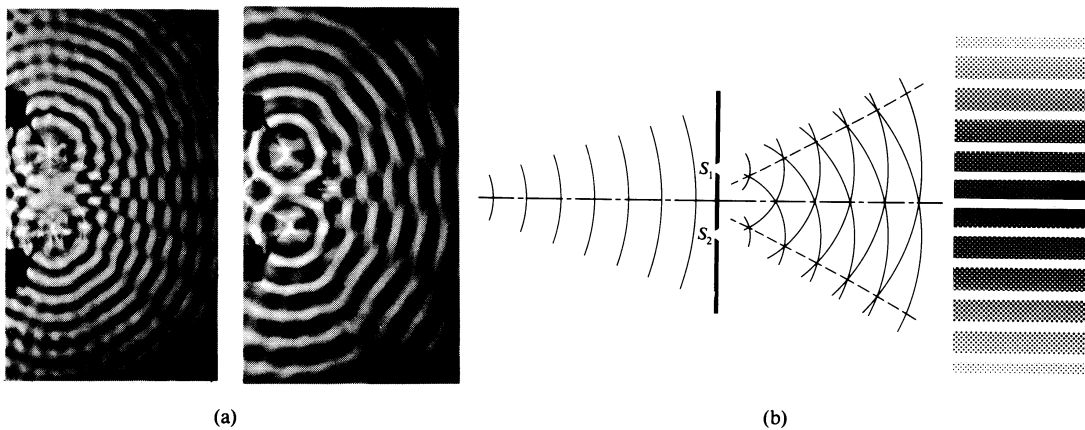
(b) κύματα ήχου από μεγάφωνο

(c) ήχος ο οποίος ακούγεται πίσω από άνοιγμα πόρτας λόγω περίθλασης

Συμβολή

Η συμβολή μεταξύ προσκείμενων και ανακλώμενων κυμάτων οδηγεί στη δημιουργία στάσιμων κυμάτων. Τα στάσιμα κύματα σε έναν κλειστό χώρο οφείλονται στη συμβολή ανακλώμενων κυμάτων από την οροφή, τους τοίχους και άλλες επιφάνειες.

Συμβολή κυμάτων μπορεί επίσης να δημιουργηθεί από δύο όμοιες πηγές. Θετική και αρνητική συμβολή δημιουργούν σημεία ελάχιστης και μέγιστης ταλάντωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17. Το ποσό της συμβολής καθορίζεται από την απόσταση των δύο πηγών σε σχέση με το μήκος κύματος που εκπέμπουν.



Σχήμα 3.17

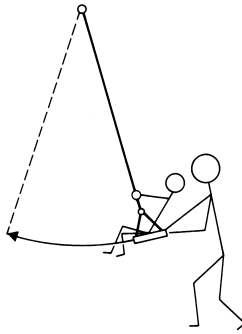
Συμβολή κυμάτων από δύο όμοιες πηγές

(a) κύματα νερού σε δεξαμενή

(b) κύματα φωτός από δύο σχισμές φωτισμένες από την ίδια πηγή

4 Συντονισμός

Το σύστημα του Σχήματος 4.1 έχει φυσική συχνότητα ταλάντωσης η οποία καθορίζεται από το μήκος του σχοινιού όπως στην περίπτωση του εκκρεμούς.

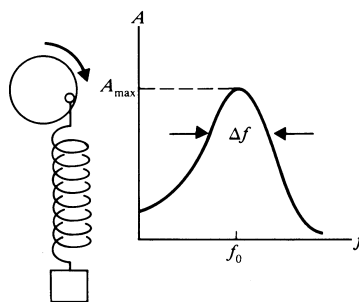


Σχήμα 4.1
Παράδειγμα συντονισμού

Αν στην κούνια δοθεί μία μικρή ώθηση την κατάλληλη στιγμή σε κάθε κύκλο ταλάντωσης, το πλάτος της ταλάντωσης σταδιακά αυξάνει. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *συντονισμός* (*resonance*). Η κούνια λαμβάνει μόνο ένα μικρό ποσό ενέργειας σε κάθε ώθηση. Δεδομένου ότι το ποσό αυτό είναι μεγαλύτερο από την απώλεια ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης, το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνει.

Συντονισμός στο σύστημα μάζας-ελατηρίου

Στο Σχήμα 4.2 ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου είναι στερεωμένο σε έναν στρόφαλο.



Σχήμα 4.2
Συντονισμός του συστήματος μάζας-ελατηρίου

Υποθέτουμε ότι ο στρόφαλος περιστρέφεται με συχνότητα f και ότι η φυσική συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος μάζας-ελατηρίου είναι f_0 . Αν η συχνότητα περιστροφής f μεταβληθεί αργά, παρατηρείται ότι το πλάτος A της ταλάντωσης φθάνει μία μέγιστη τιμή A_{max} όταν $f=f_0$. Η μάζα του συστήματος ταλαντώνεται με τη συχνότητα f του στρόφαλου, όταν όμως η συχνότητα του στρόφαλου φθάνει τη φυσική συχνότητα δόνησης του συστήματος f_0 , παρατηρείται το φαινόμενο του συντονισμού. Κατά το συντονισμό του συστήματος, η μεταφορά

ενέργειας από τον στρόφαλο στη μάζα είναι μέγιστη. Συνεπώς το πλάτος ταλάντωσης φθάνει τη μέγιστη τιμή του, η οποία καθορίζεται από την τριβή του συστήματος.

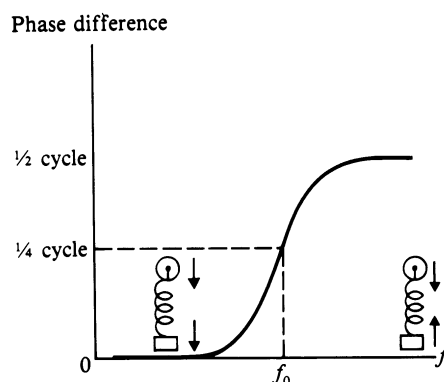
Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται η γραφική παράσταση του πλάτους ταλάντωσης A σε συνάρτηση με τη συχνότητα ταλάντωσης f . Παρατηρούμε ότι το γράφημα είναι μία καμπύλη σχεδόν συμμετρική ως προς το f_0 . Το πλάτος Δf ονομάζεται *εύρος (bandwidth)* και μετριέται σε πλάτος 71% του A_{max} ($A_{max}/\sqrt{2}$).

Όπως το A_{max} εξαρτάται από τον ρυθμό απώλειας ενέργειας (λόγω τριβής), ανάλογα το Δf εξαρτάται από την απώλεια ενέργειας. Για συστήματα μεγάλης απόσβεσης το Δf είναι μεγάλο και το A_{max} μικρό. Αντίστροφα, σε συστήματα με μικρές απώλειες το Δf είναι μικρό, ενώ το A_{max} μεγάλο. Ο λόγος $Q=f_0/\Delta f$ χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την οξύτητα της καμπύλης συντονισμού (το σύμβολο Q προέρχεται από τον όρο *quality factor*). Ένα σύστημα με υψηλό Q έχει καμπύλη συντονισμού μεγάλης οξύτητας, ενώ μία χαμηλή τιμή Q είναι ένδειξη πλατιάς καμπύλης συντονισμού.

Φάση ταλαντώσεων

Κατά την περιστροφή του στρόφαλου παρατηρείται ότι η διεύθυνση της κίνησης της μάζας και του στρόφαλου είναι ίδια για συχνότητες αρκετά χαμηλότερες της συχνότητας συντονισμού, ενώ για συχνότητες αρκετά μεγαλύτερες της συχνότητας συντονισμού κινούνται με αντίθετη φορά.

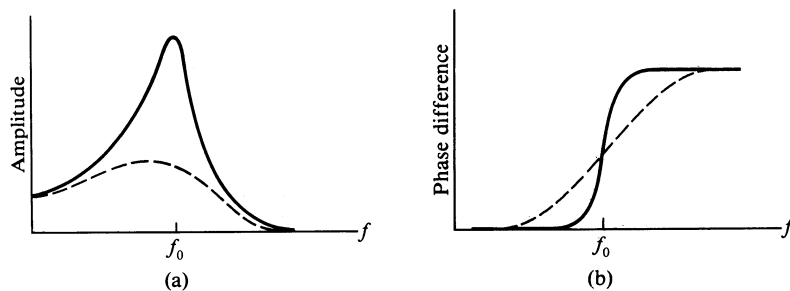
Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται με την έννοια της *φάσης (phase)*, η οποία αναφέρεται στο σημείο εκκίνησης μίας ταλάντωσης. Σε πολύ χαμηλές συχνότητες, ολόκληρο το σύστημα ακολουθεί την κίνηση του στρόφαλου ενώ το ελατήριο τεντώνεται ελάχιστα. Καθώς αυξάνεται η συχνότητα του στρόφαλου, η μετακίνηση της μάζας γίνεται δύσκολα και η κίνησή της καθυστερεί σε σχέση με την κίνηση του στρόφαλου. Κατά τον συντονισμό του συστήματος, η μάζα βρίσκεται ένα τέταρτο του κύκλου πίσω από τον κύκλο του στρόφαλου, αν και το πλάτος ταλάντωσης φθάνει τη μέγιστη τιμή του. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται ακόμα περισσότερο, η διαφορά φάσης μεγαλώνει μέχρι τελικά να γίνει μισός κύκλος, όπου η μάζα και ο στρόφαλος κινούνται αντίθετα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3

Διαφορά φάσης μεταξύ στρόφαλου και μάζας σε σύστημα μάζας-ελατηρίου

Όσο μεγαλύτερο το Q του συστήματος, τόσο πιο γρήγορα γίνεται η μετάβαση της κίνησης από εντός φάσης σε εκτός φάσης. Αντιθέτως, ένας ταλαντωτής μεγάλης απόσβεσης παρουσιάζει βαθμιαία αλλαγή φάσης όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.4.

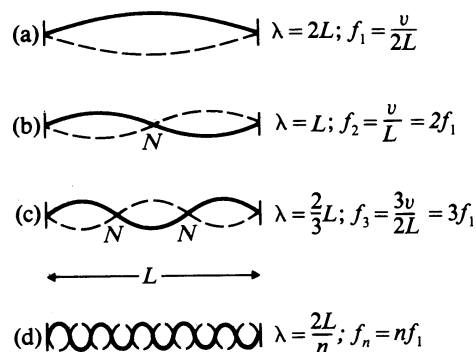


Σχήμα 4.4

(a) Αντίδραση και (b) διαφορά φάσης για ταλαντωτές με περισσότερο (διακεκομμένη καμπύλη) και λιγότερο (συνεχή καμπύλη) απόσβεση

Στάσιμα κύματα σε χορδή

Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζονται οι τρόποι δόνησης μίας χορδής μήκους L . Οι τρόποι δόνησης μπορούν να ερμηνευτούν με βάση τα φαινόμενα της ανάκλασης σε σταθερό άκρο και των στάσιμων κυμάτων τα οποία δημιουργούνται σε ένα μέσο, κατά τη μετάδοση κυμάτων αντίθετης κατεύθυνσης.



Σχήμα 4.5

Τρόποι δόνησης ή συντονισμοί δονούμενης χορδής ως στάσιμα κύματα. Οι δεσμοί συμβολίζονται με το γράμμα N . Οι επιπλέον τρόποι είναι αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας f_1

Στο Σχήμα 4.5 (a) απεικονίζεται ο θεμελιώδης τρόπος δόνησης, δηλαδή ένα στάσιμο κύμα με τη χαμηλότερη συχνότητα και το μεγαλύτερο μήκος κύματος. Το μήκος κύματος λ είναι διπλάσιο από το μήκος της χορδής, συνεπώς η συχνότητα δόνησης είναι $f_1 = v/2L$. Στον δεύτερο τρόπο δόνησης, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5 (b), το μήκος κύματος είναι λ , συνεπώς $f_2 = v/L = 2f_1$.

Συνεχίζοντας με υψηλότερους τρόπους ταλάντωσης, βρίσκουμε ότι έχουν συχνότητα $3f_1$, $4f_1$, κλπ. Η συχνότητα του n τρόπου ταλάντωσης θα είναι:

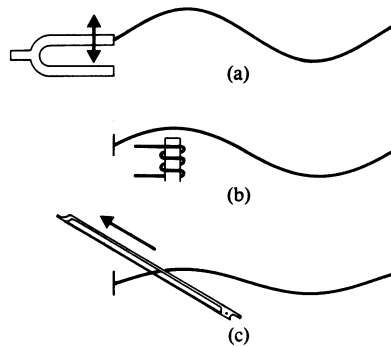
$$f_n = n \frac{u}{2L} = nf_1$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω έκφραση τον τύπο της ταχύτητας κύματος:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

όπου T είναι η τάση και μ είναι η μάζα ανά μονάδα μήκους.

Αν μία χορδή οδηγηθεί σε έναν από τους φυσικούς της τρόπους δόνησης, παρουσιάζεται το φαινόμενο του συντονισμού. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται μερικοί τρόποι με τους οποίους μία χορδή μπορεί να δονηθεί από εξωτερικά συστήματα δόνησης.



Σχήμα 4.6

Τρεις τρόποι οδήγησης χορδής σε συντονισμό
(a) με διαπασών (b) με ηλεκτρομαγνήτη (c) με δοξάρι

Η μαγνητική οδήγηση του Σχήματος 4.6 εφαρμόζεται μόνο σε χορδές από ατσάλι ή άλλο μαγνητικό υλικό. Στην περίπτωση του δοξαριού, η οδήγηση της χορδής είναι σύνθετη και συντίθεται από πολλές συχνότητες. Μία μη μαγνητική (αλλά μεταλλική) χορδή μπορεί επίσης να οδηγηθεί από *ηλεκτρομαγνητική δύναμη*, αν κοντά της τοποθετηθεί ένας μόνιμος μαγνήτης και από την χορδή περάσει εναλλασσόμενο ρεύμα στην επιθυμητή συχνότητα.

Παράδειγμα 4.1: Μία ατσάλινη χορδή κιθάρας διαμέτρου 0.3 mm και μήκους 65 cm έχει τάση 100 N. Να βρεθεί η συχνότητα των τριών πρώτων τρόπων δόνησης. Η πυκνότητα ατσαλιού είναι 7700 kg/m^3 .

Λύση:

$$\mu = \pi r^2 \rho = \pi (1.5 \times 10^{-4})^2 (7700) = 5.44 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \frac{1}{2(0.65)} \sqrt{\frac{100}{5.44 \times 10^{-4}}} = 330 \text{ Hz}, \quad f_2 = 2f_1 = 660 \text{ Hz}, \quad f_3 = 3f_1 = 990 \text{ Hz}$$

Μερικοί, αρμονικοί και υπέρτονοι

Ένα σύστημα μπορεί να δονηθεί με πολλούς τρόπους. Ο χαμηλότερος σε συχνότητα τρόπος δόνησης ονομάζεται *θεμελιώδης*. Οι τρόποι οι οποίοι είναι ακέραια πολλαπλάσια (ή σχεδόν ακέραια) ονομάζονται *αρμονικοί* (*harmonics*). Ο όρος *πρώτη αρμονική* αναφέρεται στον θεμελιώδη τρόπο δόνησης.

Πολλά δονούμενα συστήματα έχουν τρόπους δόνησης οι οποίοι δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια του θεμελιώδη τρόπου. Αυτοί οι τρόποι ονομάζονται *υπέρτονοι* (*overtones*). Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι αρμονικές είναι μία ειδική περίπτωση υπερτόνων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος αρμονικές περιλαμβάνει και τον θεμελιώδη τρόπο, ενώ αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση των υπερτόνων. Συνεπώς η δεύτερη αρμονική είναι ο πρώτος υπέρτονος, η τρίτη αρμονική είναι ο δεύτερος υπέρτονος, κλπ.

Μία ακόμα ονομασία που αναφέρεται στους τρόπους δόνησης ενός συστήματος είναι ο όρος *μερικοί* (*partials*). Οι μερικοί τρόποι δόνησης περιλαμβάνουν τον θεμελιώδη τρόπο και όλους τους υπέρτονους αρμονικούς ή μη. Ο όρος ανώτεροι μερικοί δεν περιλαμβάνουν τον θεμελιώδη, συνεπώς είναι συνώνυμος με τον όρο υπέρτονοι.

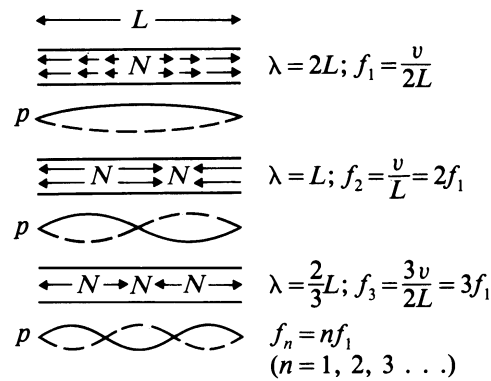
Η δόνηση ενός συστήματος είναι η συνισταμένη πολλών τρόπων δόνησης. Το πώς συνεισφέρει στην τελική δόνηση ο κάθε τρόπος περιγράφεται από το *φάσμα* (*spectrum*) της δόνησης. Το φάσμα δόνησης περιγράφει ποιοι τρόποι συμβάλουν στην τελική δόνηση ενός συστήματος και σε τι ποσοστό.

Ανοικτοί και κλειστοί σωλήνες

Αν σε έναν ανοικτό σωλήνα μεταδοθεί ένας θετικός παλμός πίεσης (πύκνωση) επιστρέφει ως αρνητικός παλμός (αραίωση), ενώ στην περίπτωση που ο σωλήνας είναι κλειστός επιστρέφει ως θετικός παλμός.

Λόγω του ότι τα κύματα σε σωλήνα είναι επιμήκη, είναι πιο δύσκολο να εξεταστεί η κίνηση του αέρα σε σωλήνα από την μετάδοση εγκάρσιων κυμάτων σε χορδή. Η μετατόπιση αέρος είναι μεγαλύτερη στο ανοικτό άκρο, ενώ η μεταβολή πίεσης είναι μέγιστη στο κλειστό άκρο. Στο Σχήμα 4.7 και 4.8 φαίνεται η κίνηση του αέρα και η μεταβολή πίεσης σε ανοικτό και κλειστό σωλήνα αντίστοιχα.

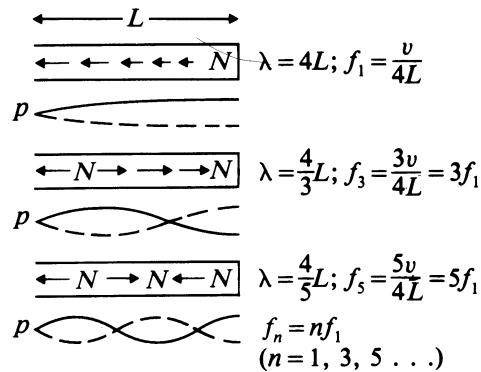
Στην πραγματικότητα, η μεταβολή πίεσης σε ανοικτό σωλήνα δε μηδενίζεται ακριβώς στο ανοικτό σημείο αλλά λίγο μακρύτερα. Συνεπώς, ο σωλήνας παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερο ακουστικό μήκος από το φυσικό του μήκος. Για έναν κυλινδρικό σωλήνα με ακτίνα r , το επιπρόσθετο μήκος, το οποίο ονομάζεται *διόρθωση άκρου* (*end correction*), είναι $0.61r$. Δύο φορές αυτό το μήκος πρέπει να προστεθεί σε ένα σωλήνα με δύο ανοικτά άκρα για τον υπολογισμό του ακουστικού του μήκους.



Σχήμα 4.7

Τρόποι δόνησης ή συντονισμοί σε ανοικτό σωλήνα. Στα ανοικτά άκρα η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση. Οι τρόποι δόνησης περιλαμβάνουν περιττές και άρτιες αρμονικές.

Ελάχιστη μετατόπιση υπάρχει στους δεσμούς N



Σχήμα 4.8

Τρόποι δόνησης ή συντονισμοί σε κλειστό σωλήνα. Στα κλειστά άκρα η κίνηση του αέρα είναι ελάχιστη ενώ η πίεση είναι μέγιστη. Οι τρόποι δόνησης περιλαμβάνουν μόνο περιττές αρμονικές. Ελάχιστη μετατόπιση υπάρχει στους δεσμούς N

Παράδειγμα 4.2: Να βρεθούν οι τρεις πρώτοι τρόποι δόνησης σε σωλήνα μήκους 0.75 m με ανοικτά άκρα (αγνοήστε τις διορθώσεις των άκρων).

Λύση:

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{343}{2 \times 0.75} = 229 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{2v}{2L} = \frac{2 \times 343}{2 \times 0.75} = 457 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{3v}{2L} = \frac{3 \times 343}{2 \times 0.75} = 685 \text{ Hz}$$

Παράδειγμα 4.3: Να βρεθούν οι τρεις πρώτοι τρόποι δόνησης σε σωλήνα μήκους 0.75 m με το ένα άκρο ανοικτό και το άλλο κλειστό (αγνοήστε τις διορθώσεις των άκρων).

Λύση:

$$f_1 = \frac{u}{4L} = \frac{343}{4 \times 0.75} = 114 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{3u}{4L} = \frac{3 \times 343}{4 \times 0.75} = 343 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{5u}{4L} = \frac{5 \times 343}{4 \times 0.75} = 572 \text{ Hz}$$

Ακουστική εμπέδηση

Το μέγεθος της *ακουστικής εμπέδησης* (*acoustical impedance*) εκφράζει το μέτρο δυσκολίας δημιουργίας ροής αέρα. Ορίζεται ως ο λόγος της πίεσης ήχου p προς την ταχύτητα όγκου U και έχει μονάδα το ακουστικό ohm:

$$Z_A = \frac{P}{U}$$

Η ταχύτητα όγκου U είναι το ποσό αέρα το οποίο ρέει από μία συγκεκριμένη επιφάνεια ανά δευτερόλεπτο, λόγω του περάσματος ενός ηχητικού κύματος. Στην περίπτωση του ήχου που μεταδίδεται σε σωλήνα, η επιφάνεια αυτή είναι η διατομή του.

Στην περίπτωση επίπεδων ηχητικών κυμάτων τα οποία μεταδίδονται σε σωλήνα:

$$Z_A = \frac{\rho u}{S}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (1.15 kg/m^3 σε θερμοκρασία δωματίου), u η ταχύτητα του ήχου και S η διατομή του σωλήνα. Συνεπώς $Z_A = 400/S$, όπου το S μετράται σε τετραγωνικά μέτρα και το Z_A μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το εμβαδόν S . Αυτό σημαίνει ότι όπου σε έναν σωλήνα υπάρχει στένωση, αλλαγή διαμέτρου ή διακλάδωση, η αλλαγή ακουστικής εμπέδησης οδηγεί σε ανάκλαση ηχητικών κυμάτων στο σημείο αυτό.

Συντονιστής Helmholtz

Ο *συντονιστής Helmholtz* έχει πολλές εφαρμογές στην ακουστική, μερικές από τις οποίες περιγράφονται παρακάτω:

1. Πριν την ανακάλυψη μικροφώνων, ενισχυτών και αναλυτών φάσματος, οι συντονιστές Helmholtz χρησιμοποιούνταν ως εργαλείο ανάλυσης ήχου. Σε μία τέτοια περίπτωση ο συντονιστής έχει δύο ανοίγματα, ένα για την είσοδο του μετρούμενου ήχου και ένα δεύτερο

για ακρόαση. Με μία σειρά από συντονιστές, ο παρατηρητής μπορεί να “μετρήσει” τους συντονισμούς ενός οργάνου.

2. Ο κύριος συντονισμός ενός βιολιού ή μίας κιθάρας είναι συντονισμός Helmholtz. Η συχνότητα μπορεί να καθοριστεί αν κάποιος φυσήξει στις οπές των οργάνων αυτών.
3. Τα ηχεία ανάκλασης χαμηλών είναι έτσι σχεδιασμένα, ώστε ο ήχος που εκπέμπεται από την πίσω επιφάνεια του κώνου του μεγαφώνου τους να διεγείρει τη συχνότητα Helmholtz της καμπίνας τους (η καμπίνα σε ένα τέτοιο ηχείο είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί ως συντονιστής Helmholtz). Ο συντονισμός παρουσιάζεται στην οπή ανάκλασης χαμηλών της καμπίνας σε φάση με τον άμεσο ήχο του μεγαφώνου.
4. Μερικές εξατμίσεις κάνουν χρήση ενός διακλαδωμένου συντονιστή Helmholtz, ο οποίος απορροφά ήχο όταν συντονίζεται.

Συμπαθητικές δονήσεις: αντηχεία

Η ποσότητα ήχου που εκπέμπει ένα δονούμενο σύστημα εξαρτάται από το ποσό του αέρα που το σύστημα αυτό μετακινεί κατά την κίνησή του. Μία δονούμενη χορδή ή ένα διαπασών, λόγω της μικρής επιφάνειάς τους μετακινούν πολύ λίγο αέρα, συνεπώς ηχούν πολύ λίγο. Αντιθέτως, ο κινούμενος κώνος ενός ηχείου ή η μεμβράνη ενός τύμπανου, λόγω της μεγάλης τους επιφάνειας ηχούν με μεγάλη ένταση.

Αν πιέσουμε τη λαβή ενός διαπασών σε μία ξύλινη επιφάνεια, η δόνηση του διαπασών περνά στην επιφάνεια θέτοντάς την σε κίνηση. Οι δονήσεις της ξύλινης επιφάνειας ονομάζονται *συμπαθητικές* και η επιφάνεια ονομάζεται *αντηχείο*. Οι συμπαθητικές δονήσεις μπορεί να είναι ή όχι κοντά στη συχνότητα συντονισμού της ξύλινης επιφάνειας, το αποτέλεσμα όμως είναι η ενίσχυση του ήχου του διαπασών λόγω της μεγάλης επιφάνειας του τίθεται σε ταλάντωση.

Όργανα όπως το βιολί, η κιθάρα, το τσέλο, το λαούτο και άλλα έγχορδα, βασίζονται σχεδόν αποκλειστικά στις συμπαθητικές δονήσεις του ξύλινου αντηχείου τους για την εκπομπή του ήχου τους. Ο ήχος σε αυτά τα όργανα προέρχεται κυρίως από τις συμπαθητικές δονήσεις της εμπρόσθιας επιφάνειας του ξύλινου κουτιού τους, οι οποίες μεταδίδονται από τις δονούμενες χορδές μέσω του καβαλάρη. Η εμπρόσθια επιφάνεια συντονίζεται σε πολλές συχνότητες σε όλη την κλίμακα ήχου του οργάνου και είναι αυτοί οι συντονισμοί οι οποίοι καθορίζουν κατά ένα μεγάλο ποσοστό την ποιότητα του συνολικού ήχου του οργάνου. Οι συμπαθητικές δονήσεις θέτουν επίσης σε δόνηση τον αέρα εσωτερικά του ξύλινου κουτιού τους ο οποίος εκπέμπεται από διάφορες οπές (ανάλογα με το όργανο), καθορίζοντας και αυτό σε κάποιο βαθμό τον τελικό ήχο του οργάνου.

5 Ακοή

Εισαγωγή

Ψυχοακουστική (ή ψυχολογία της ακοής) είναι η επιστήμη που ασχολείται με την αντίληψη του ήχου και είναι ένας συγκερασμός φυσικής, βιολογίας, ψυχολογίας, μουσικής και ακουστικής.

Η *ένταση*, το *τονικό ύψος*, το *ηχόχρωμα* και η *διάρκεια* είναι τα τέσσερα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός ήχου. Αυτά τα χαρακτηριστικά σχετίζονται με σύνθετους τρόπους με μετρήσιμα μεγέθη όπως η πίεση ήχου, η συχνότητα, το φάσμα, η διάρκεια και η περιβάλλουσα.

Ένα από τα κεντρικά θέματα της ψυχοακουστικής είναι ο συσχετισμός των υποκειμενικών χαρακτηριστικών του ήχου με φυσικές ποσότητες. Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι η χρήση πολύ ασθενών ερεθισμάτων για την αντίληψη της θέσης μίας πηγής ήχου, όπως επίσης η ακριβής αίσθηση της φύσης ενός ακουστικού περιβάλλοντος.

Η λειτουργία της ακοής

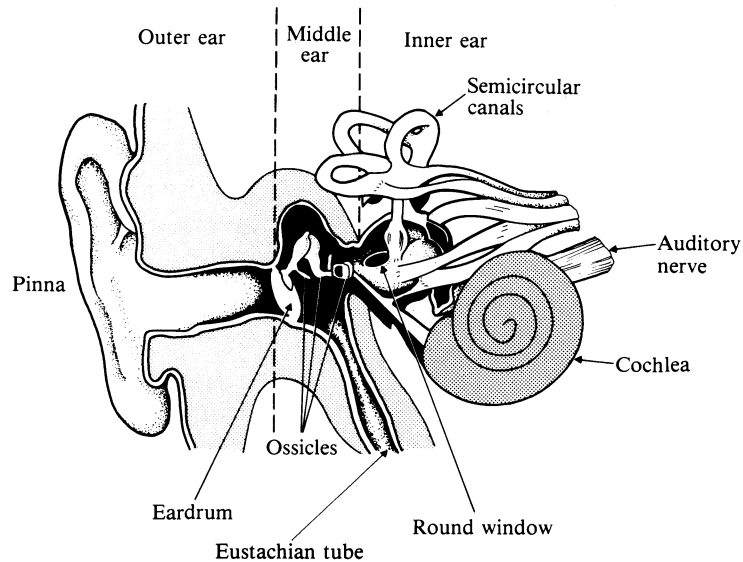
Το εύρος ερεθισμάτων πίεσης στο οποίο αντιδρά το ανθρώπινο αυτί αντιστοιχεί σε διαφοροποιήσεις που ξεπερνούν το εκατομμύριο. Η ενέργεια ενός πολύ δυνατού ήχου είναι περίπου ένα εκατομμύριο εκατομμύρια (10^{12}) φορές μεγαλύτερη από τον πιο χαμηλό ήχο που μπορεί να ακουστεί. Σε ορισμένες συχνότητες η δόνηση του τύμπανου μπορεί να έχει πλάτος μόλις 10^{-8} mm. Εκτιμάται ότι οι δονήσεις των εσωτερικών μεμβρανών τον αυτιού είναι περίπου 100 φορές μικρότερες προκειμένου να μεταδώσουν αυτές τις δονήσεις.

Το εύρος των ακουστών συχνοτήτων διαφέρει από άτομο σε άτομο. Γενικά, είναι σπάνιο φαινόμενο ένα άτομο να ακούει σε όλο το φάσμα ακουστικών συχνοτήτων, δηλαδή από 20Hz σε 20KHz. Το αυτί είναι σχετικά αναισθητο σε ήχους χαμηλής συχνότητας. Για παράδειγμα, η ευαισθησία του στα 100Hz είναι περίπου 1000 φορές μικρότερη από την ευαισθησία του στα 1000Hz. Η ευαισθησία σε ήχους υψηλής συχνότητας είναι υψηλότερη στα παιδικά χρόνια, ενώ μειώνεται στα επόμενα χρόνια έτσι ώστε ένας ενήλικας ενδέχεται να δυσκολεύεται να ακούσει συχνότητες μεγαλύτερες από 10 με 12KHz.

Ένα ακόμα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του ακουστικού μας συστήματος είναι η επιλεκτικότητα, όπου ένας ακροατής μπορεί να ξεχωρίσει συγκεκριμένους ήχους από ένα σύνθετο μίγμα ήχων, όπως ο ήχος μίας συμφωνικής ορχήστρας. Επίσης, σε έναν θορυβώδη χώρο μπορούμε να ξεχωρίσουμε τον ήχο ενός μεγαφώνου, όπως επίσης μπορούμε να εκπαιδεύσουμε τον εαυτό μας να κοιμάται στον θόρυβο ενός αυτοκινητοδρόμου, αλλά να ξυπνάμε στον ήχο ενός ξυπνητηριού ή ενός ασυνήθιστου ήχου.

Η δομή του αυτιού

Για λόγους ευκολίας συνήθως διαιρούμε το αυτί σε τρία μέρη: το *εξωτερικό αυτί*, το *μεσαίο αυτί* και το *εσωτερικό αυτί*. Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται μία σχηματική αναπαράσταση του αυτιού, όπου το μεσαίο και εσωτερικό αυτί είναι μεγεθυμένα σε σχέση με το εξωτερικό αυτί.

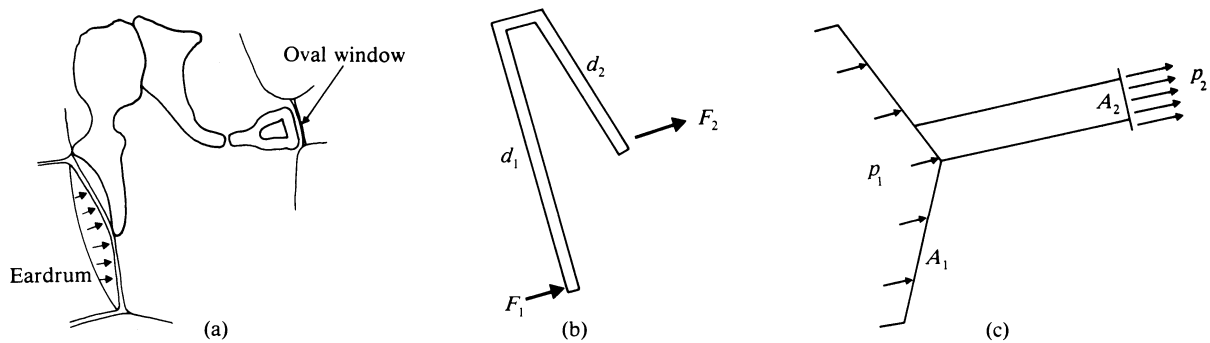


Σχήμα 5.1
Σχηματικό διάγραμμα του αυτιού

Το εξωτερικό αυτί αποτελείται από το *περύγιο (pinna)* και τον *ακουστικό πόρο (auditory canal)*, ο οποίος καταλήγει στο *τύμπανο (eardrum)*. Το περύγιο σε ένα βαθμό βοηθά στη συλλογή ήχων και συμβάλει στην ικανότητά μας να καθορίζουμε τη διεύθυνση πηγών ήχου. Ο ακουστικός πόρος λειτουργεί ως σωληνωτός συντονιστής, ο οποίος ενισχύει την ακουστική ευαισθησία στην περιοχή μεταξύ 2000 και 5000Hz.

Το μεσαίο αυτί ξεκινά από το τύμπανο στο οποίο είναι προσκολλημένη μία ομάδα τριών μικρών οστών τα οποία ονομάζονται *οστάρια (ossicles)*. Το τύμπανο, αποτελούμενο από κυκλικές και ακτινωτές ίνες, διατηρείται τεντωμένο από τον τυμπανικό μυς. Το τύμπανο μετατρέπει τις μεταβολές πίεσης του εισερχόμενου ήχου σε μηχανικές δονήσεις, οι οποίες μεταδίδονται στο εσωτερικό αυτί μέσω των οσταρίων.

Τα οστάρια επιτελούν μία πολύ σημαντική λειτουργία στην ακοή. Ο συνδυασμός των τριών λειτουργεί ως μοχλός, μετατρέποντας την πολύ μικρή πίεση που ασκεί ο ήχος στο τύμπανο σε πολύ μεγαλύτερη πίεση (μέχρι 30 φορές μεγαλύτερη) στην *ωοειδή θυρίδα (oval window)* του εσωτερικού αυτιού. Η λειτουργία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2. Η δράση του μοχλού των οσταρίων παρέχει περίπου 1.5 φορές πολλαπλασιασμό δύναμης, ενώ ο επιπλέον πολλαπλασιασμός επί 20 παρέχεται από τη διαφορά εμβαδού μεταξύ του τύμπανου και της ωοειδής θυρίδας.



Σχήμα 5.2

Ενίσχυση πίεσης από τα οστάρια:

- (α) τα τρία οστά συνδέουν το τύμπανο με το εσωτερικό αυτί
 (β) δράση μοχλών: μία μικρή δύναμη δρα σε μεγάλη απόσταση καταλήγοντας σε μία μεγαλύτερη δύναμη η οποία δρα σε μικρότερη απόσταση
 (γ) πολλαπλασιασμός πίεσης με δράση εμβόλου: μία μικρή πίεση σε μεγάλη επιφάνεια δημιουργεί την ίδια δύναμη με μία μεγάλη πίεση που ασκείται σε μία μικρή επιφάνεια

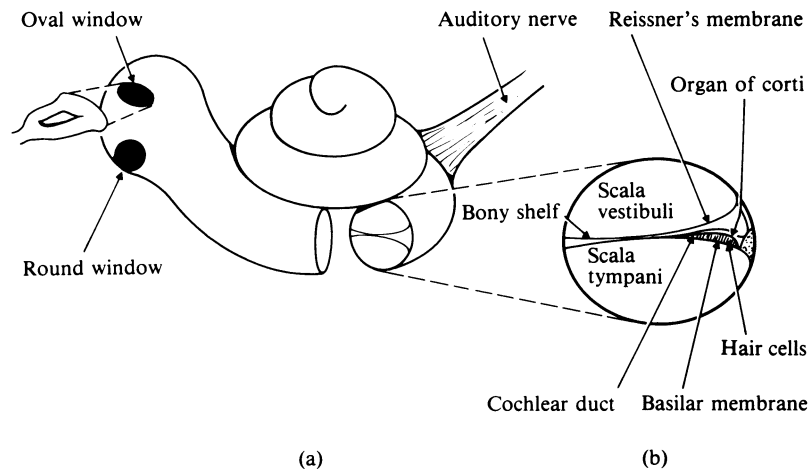
Μία άλλη λειτουργία των οσταρίων είναι η προστασία του εσωτερικού αυτιού από πολύ δυνατούς θορύβους και ξαφνικές μεταβολές πίεσης. Οι πολύ δυνατοί θόρυβοι ενεργοποιούν δύο ομάδες μυών. Η μία ομάδα τεντώνει το τύμπανο και η άλλη απομακρύνει τον αναβολέα (*stape*) (το τρίτο οστό των οσταρίων το οποίο έρχεται σε επαφή με την ωοειδή θυρίδα) από την ωοειδή θυρίδα του εσωτερικού αυτιού. Η αντίδραση αυτή στους δυνατούς θορύβους ονομάζεται *ακουστική αντίδραση (acoustic reflex)*.

Δεδομένου ότι το τύμπανο σφραγίζει αεροστεγώς το μεσαίο αυτί από το εξωτερικό, πρέπει να υπάρχει ένας τρόπος ισοστάθμισης πίεσης. Αυτή τη λειτουργία επιτελεί η *Ευσταχιανή σάλπιγγα (Eustachian tube)*, η οποία συνδέει το μεσαίο αυτί με τη στοματική κοιλότητα. Αν η Ευσταχιανή σάλπιγγα αργήσει να ανοίξει, ένας θόρυβος (*poping*) μπορεί να ακουστεί όταν η εξωτερική πίεση αλλάζει, όπως στην περίπτωση γρήγορης μεταβολής ύψους.

Το εσωτερικό αυτί περιέχει τα *ημικυκλικά κανάλια (semicircular canals)* και τον *κοχλία (cochlea)*. Τα ημικυκλικά κανάλια συνεισφέρουν λίγο ή τίποτα στην ακοή. Είναι οι αισθητήρες του σώματος οριζόντιου-κάθετου απαραίτητα για την ισορροπία. Ο σπειροειδής κοχλίας περιλαμβάνει τον μηχανισμό μετασχηματισμού των εισερχόμενων μεταβολών πίεσης σε κατάλληλα κωδικοποιημένους νευρικούς παλμούς.

Η διατομή του κοχλίας που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3 δείχνει τρεις θαλάμους οι οποίοι εκτείνονται σε όλο του το μήκος: την *αιθουσαία κλίμακα (scala vestibuli)*, τη *τυμπανική κλίμακα (scala tympani)* και τον *κοχλιακό πόρο (cochlear duct)*.

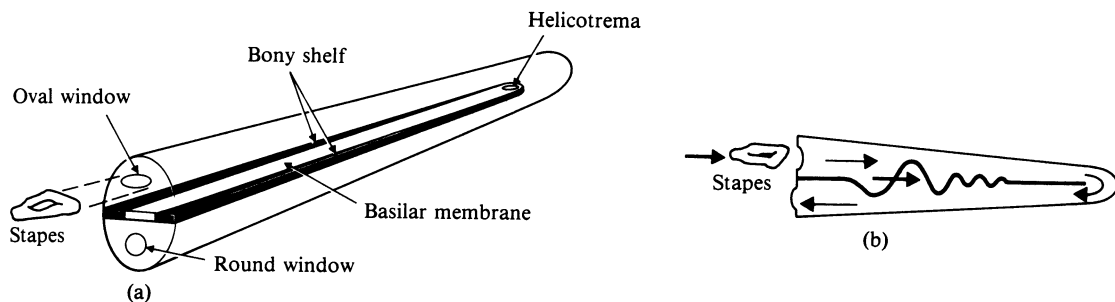
Ο κοχλίας είναι γεμάτος με δύο υγρά και περιβάλλεται από άκαμπτα τοιχώματα οστών. Το ένα υγρό ονομάζεται *περιλύμφη (perilymph)* και βρίσκεται στις κλίμακες, ενώ το άλλο ονομάζεται *ενδόλύμφη (endolymph)* και βρίσκεται στον κοχλιακό πόρο. Η συνολική χωρητικότητα του κοχλίας είναι ίση με κλάσμα μίας σταγόνας. Τα δύο υγρά διαχωρίζονται από δύο μεμβράνες: τη *μεμβράνη του Reissner* και τη *βασική μεμβράνη (basilar membrane)*. Η μεμβράνη του Reissner είναι υπερβολικά λεπτή, με πάχος περίπου δύο κυττάρων.



Σχήμα 5.3
 (a) κοχλίας
 (b) διατομή κοχλίας

Επάνω στη βασική μεμβράνη βρίσκεται το *όργανο του Corti* (*organ of Corti*), μία ζελατινώδη μάζα με μήκος περίπου 1.5 ίντσες. Αυτή η 'θέση της ακοής' περιέχει αρκετές σειρές από μικροσκοπικά *τριχοειδή κύτταρα* (*hair cells*) στα οποία είναι στερεωμένες νευρικές ίνες. Κάθε κύτταρο περιέχει πολλές τρίχες ή *clia* οι οποίες κάμπτονται όταν η βασική μεμβράνη αντιδρά σε έναν ήχο. Η καμπή των *clia* διεγείρει τα τριχοειδή κύτταρα τα οποία με τη σειρά τους διεγείρουν το *ακουστικό νεύρο* (*auditory nerve*).

Για την κατανόηση της λειτουργίας της βασικής μεμβράνης, στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται ο κοχλίας απλωμένος και απλοποιημένος.



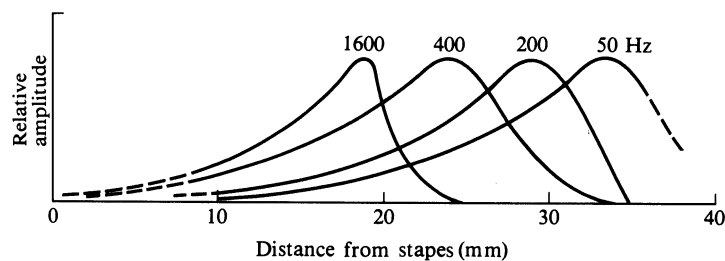
Σχήμα 5.4
 (a) σχηματικό διάγραμμα ανοιγμένου κοχλίας απεικονίζοντας τη βασική μεμβράνη, την ωοειδή και τη στρογγυλή θυρίδα
 (b) όταν ο αναβολέας πιέζει την ωοειδή θυρίδα, ένας παλμός πίεσης μεταδίδεται μέσω του κοχλιακού υγρού προς τη στρογγυλή θυρίδα, προκαλώντας κυματισμούς στη βασική μεμβράνη

Στο διάγραμμα ο κοχλίας εμφανίζεται ως κωνικός κύλινδρος χωρισμένος σε δύο τμήματα από τη βασική μεμβράνη (προσεγγιστικά θεωρούμε το μέγεθος του κοχλιακού πόρου αμελητέο και θεωρούμε ότι τα δύο τμήματα χωρίζονται από μία μεμβράνη). Στο μεγαλύτερο άκρο του κυλίνδρου βρίσκονται η ωοειδής και η κυκλική θυρίδα σφραγισμένες με μία λεπτή μεμβράνη και κοντά στο άλλο άκρο της βασικής μεμβράνης βρίσκεται μία μικρή οπή η οποία ονομάζεται

helicotrema και ενώνει τα δύο τμήματα. Η βασική μεμβράνη τελειώνει λίγο πριν το μικρότερο άκρο του κυλίνδρου, έτσι ώστε κύματα πίεσης μπορούν να μεταδοθούν από τα εσωτερικά υγρά.

Όταν ο αναβολέας δονείται στην ωοειδή θυρίδα, υδραυλικά κύματα πίεσης μεταδίδονται στην αιθουσαία κλίμακα μαζί με τους κυματισμούς της βασικής μεμβράνης. Υψηλές συχνότητες έχουν το μεγαλύτερο πλάτος κοντά στην ωοειδή θυρίδα, όπου η βασική μεμβράνη είναι περισσότερο στενή και άκαμπτη. Αντιθέτως, οι χαμηλές συχνότητες δημιουργούν μεγαλύτερους κυματισμούς κοντά στο άλλο άκρο όπου η βασική μεμβράνη είναι περισσότερο χαλαρή.

Το Σχήμα 5.5 δείχνει τη μετατόπιση της βασικής μεμβράνης σε συνάρτηση με την απόσταση από την ωοειδή θυρίδα για διάφορες συχνότητες. Συνεπώς, η αρχική ακουστική ανάλυση συχνότητας πραγματοποιείται σε πρώτη φάση εντός του κοχλίου.

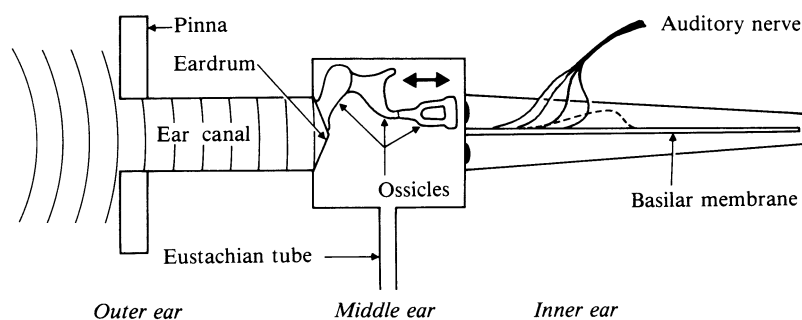


Σχήμα 5.5

Πλάτος μετατόπισης της βασικής μεμβράνης σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Η μετατροπή των μηχανικών δονήσεων στη βασική μεμβράνη σε ηλεκτρικούς παλμούς στο ακουστικό νεύρο πραγματοποιείται από το όργανο του Corti. Όταν η βασική μεμβράνη δονείται, οι τρίχες των τριχοειδών κυττάρων κάμπτονται παράγοντας νευρικούς παλμούς οι οποίοι μεταδίδονται στον εγκέφαλο. Ο ρυθμός των παλμών στο ακουστικό νεύρο εξαρτάται από την ένταση και τη συχνότητα.

Ο συνολικός μηχανισμός της ακοής εξηγείται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6

Σχηματική αναπαράσταση του αυτιού απεικονίζοντας το συνολικό μηχανισμό της ακοής. Ηχητικά κύματα από το εξωτερικό αυτί προκαλούν μηχανικές δονήσεις στο μεσαίο αυτί με αποτέλεσμα νευρικοί παλμοί να μεταφέρονται στον εγκέφαλο όπου ερμηνεύονται ως ήχος

Ηχητικά κύματα μεταδίδονται μέσω του ακουστικού πόρου στο τύμπανο. Η διέγερση του τύμπανου δημιουργεί μηχανικές δονήσεις στο μεσαίο αυτί. Τα οστάρια μεταδίδουν τις μηχανικές δονήσεις του τύμπανου στην ωοειδή θυρίδα προκαλώντας μεταβολές πίεσης στον κοχλία, ο οποίος με τη σειρά του διεγείρει μηχανικές δονήσεις στη βασική μεμβράνη. Οι δονήσεις της βασικής μεμβράνης προκαλούν τη διέγερση των τριχοειδών κυττάρων, τα οποία στέλνουν ηλεκτρικούς παλμούς στον εγκέφαλο μέσω του ακουστικού νεύρου.

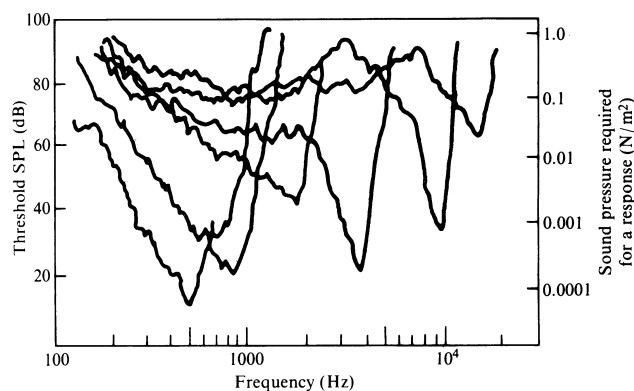
Μερικοί ήχοι ακούγονται μέσω των δονήσεων του κρανίου οι οποίοι φθάνουν το εσωτερικό αυτί. Η ακοή μέσω των οστών παίζει σημαντικό ρόλο στην ομιλία. Οι ήχοι μουρμουρητού και αυτοί που παράγονται από το κλείσιμο των δοντιών ακούγονται σχεδόν αποκλειστικά μέσω των οστών. Στη διάρκεια της ομιλίας ή του τραγουδιού, ο ήχος που αντιλαμβανόμαστε αποτελείται από δύο μέρη: το ένα φθάνει μέσω του αέρα και το άλλο μέσω των οστών. Αυτός είναι ο λόγος που όταν ακούμε τη φωνή μας ηχογραφημένη μας φαίνεται αφύσικη. Στην περίπτωση αυτή απουσιάζει ο ήχος που μεταδίδεται μέσω των οστών.

Επεξεργασία σήματος στο ακουστικό σύστημα

Η επεξεργασία σήματος στο ακουστικό σύστημα μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη: αυτό το οποίο πραγματοποιείται στο περιφερειακό ακουστικό σύστημα (το αυτί) και αυτό που πραγματοποιείται στο ακουστικό νευρικό σύστημα (εγκέφαλος). Το αυτί επεξεργάζεται ένα ακουστικό σήμα μετατρέποντάς το σε μηχανική δόνηση στη βασική μεμβράνη, όπου μετατρέπεται σε μία σειρά παλμών οι οποίοι μεταδίδονται μέσω του ακουστικού νευρικού συστήματος.

Τοποθετώντας ένα μικρό ηλεκτρόδιο στο ακουστικό νεύρο από τον κοχλία στον εγκέφαλο, μπορούμε να μετρήσουμε τα ηλεκτρικά σήματα τα οποία μεταδίδονται στις ίνες του. Το ηλεκτρικό σήμα αποτελείται από μία σειρά απότομων ηλεκτρικών κορυφώσεων, όπου κάθε κορυφή αντιστοιχεί στον ερεθισμό ενός τριχοειδούς κυττάρου. Οι κορυφώσεις σχετίζονται στενά με τη μηχανική δόνηση της βασικής μεμβράνης για συχνότητες μέχρι και 4000 ή 5000Hz.

Κάθε ίνα του ακουστικού νεύρου αντιδρά σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων και ακουστικής πίεσης. Οι καμπύλες του Σχήματος 5.7 δείχνουν το κατώφλι αντίδρασης 6 διαφορετικών ινών του ακουστικού νεύρου μίας γάτας.



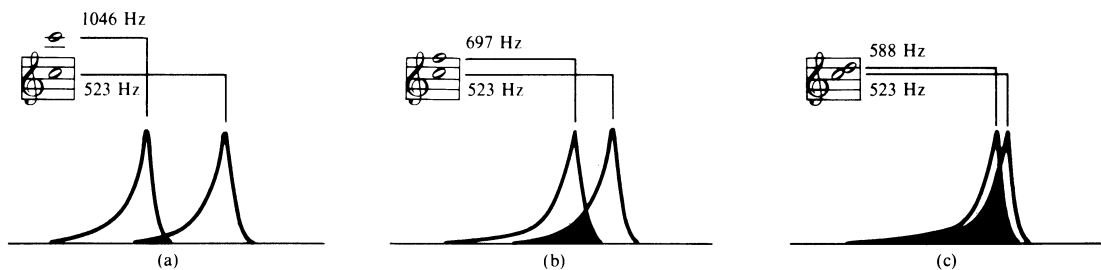
Σχήμα 5.7

Καμπύλες συντονισμού 6 ινών του ακουστικού νεύρου γάτας

Κάθε νευρική ίνα έχει μία *χαρακτηριστική συχνότητα CF* (*Characteristic Frequency*) όπου έχει μέγιστη ευαισθησία. Η ευαισθησία ινών με υψηλή χαρακτηριστική συχνότητα μειώνεται γρήγορα μετά τη χαρακτηριστική συχνότητα ενώ η μείωση της ευαισθησίας είναι σταδιακή πριν από αυτή. Αυτό έχει ως συνέπεια τη δόνηση και των 6 ινών με ένα ερέθισμα 90dB στα 500Hz.

Αν το ερέθισμα ήταν ένας καθαρός τόνος (μίας μόνο συχνότητας), ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών ηλεκτρικών κορυφώσεων στο ακουστικό νεύρο θα ήταν ίσος με μία, δύο ή περισσότερες περιόδους του τόνου, συνεπώς η ίνα ενεργοποιείται στην κορυφή της περιόδου δόνησης της βασικής μεμβράνης, αν και αυτό δε συμβαίνει σε κάθε κύκλο της δόνησης. Το φαινόμενο είναι πιο περίπλοκο όταν το ερέθισμα είναι ένας σύνθετος ήχος, αλλά και σε αυτή την περίπτωση το ηλεκτρικό σήμα του νεύρου περιέχει ακριβείς πληροφορίες για το φάσμα συχνοτήτων του ερεθίσματος.

Οι καμπύλες συντονισμού ενός ερεθίσματος το οποίο αποτελείται από δύο τόνους 523Hz (C_4) και 1046Hz (C_5) απεικονίζονται στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8

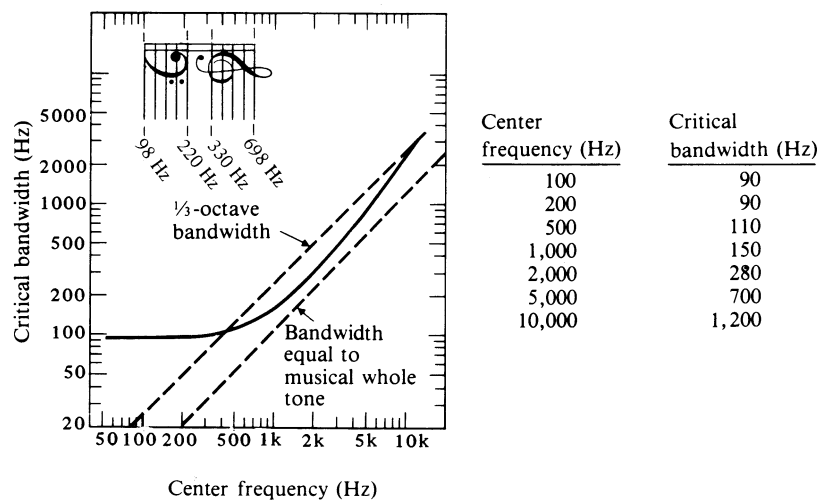
Απόκριση συχνότητας καμπυλών για δύο απλούς τόνους

Οι καμπύλες συντονισμού αλληλοκαλύπτονται ελάχιστα, πράγμα που σημαίνει ότι πολύ λίγα τριχοειδή κύτταρα ενεργοποιούνται και στις δύο συχνότητες. Η επεξεργασία του ενός τόνου από τον εγκέφαλο επηρεάζεται ελάχιστα από την ύπαρξη του άλλου τόνου. Όσο η διαφορά μεταξύ των δύο τόνων μειώνεται, τόσο αυξάνει ο αριθμός των τριχοειδή κυττάρων τα οποία ενεργοποιούνται και από τους δύο τόνους, φαινόμενο το οποίο οδηγεί στη δημιουργία πολλών ακουστικών φαινομένων.

Κρίσιμες ζώνες

Κρίσιμη ζώνη (critical band) είναι ένα εύρος συχνοτήτων στο οποίο δύο ή περισσότεροι απλοί τόνοι διεγείρουν πολλά κοινά τριχοειδή κύτταρα στη βασική μεμβράνη, συνεπώς είναι δύσκολο να διακριθούν ως ξεχωριστοί τόνοι. Η έννοια της κρίσιμης ζώνης είναι πολύ σημαντική στην κατανόηση πολλών ακουστικών φαινομένων.

Κάθε κρίσιμη ζώνη μπορεί να θεωρηθεί ως μονάδα συλλογής πληροφοριών πάνω στη βασική μεμβράνη. Περίπου 24 κρίσιμες ζώνες καλύπτουν το εύρος ακουστικών συχνοτήτων και οι περιοχές της βασικής μεμβράνης στις οποίες αντιστοιχούν έχουν περίπου μήκος 1.3mm. Το *κρίσιμο εύρος (critical bandwidth)* μεταβάλλεται με την κεντρική συχνότητα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9, έχοντας σχεδόν σταθερή τιμή σε χαμηλές συχνότητες και τιμή περίπου ανάλογη με τη συχνότητα στις υψηλές συχνότητες. Στο μεγαλύτερο μέρος του ακουστικού φάσματος (με εξαίρεση τις χαμηλές συχνότητες) η κρίσιμη ζώνη έχει εύρος σχεδόν 1/3 της οκτάβας.



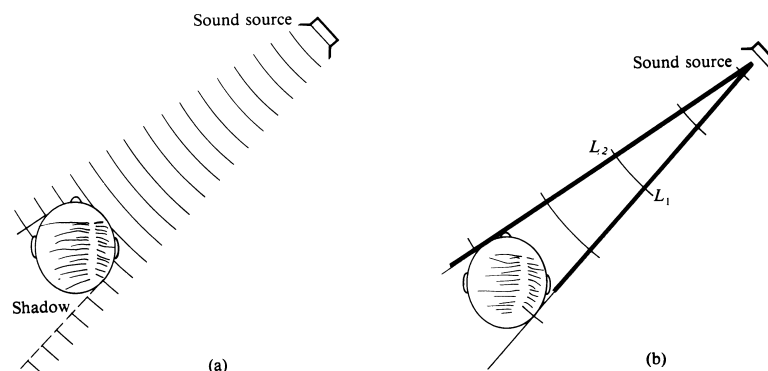
Σχήμα 5.9

Κρίσιμο εύρος ως συνάρτηση της κεντρικής συχνότητας κρίσιμης ζώνης

Αμφιωτική ακοή και εντοπισμός

Το πιο σημαντικό όφελος της αμφιωτικής (*binaural*) ακοής (με δύο αυτιά) είναι η δυνατότητα του εντοπισμού (*localisation*) της θέσης ηχητικών πηγών. Αν και αυτό γενικά είναι δυνατό ακούγοντας με το ένα αυτί μόνο, η ικανότητά μας αυξάνεται σημαντικά με διπλή ακοή.

Ο Rayleigh ήταν ένας από τους πρώτους επιστήμονες που εξήγησαν το φαινόμενο της αμφιωτικής εντόπισης ήχου. Κατόπιν πειραμάτων το 1876, παρατήρησε ότι ο εντοπισμός υψηλών συχνοτήτων είναι πιο εύκολος από τον εντοπισμό χαμηλών συχνοτήτων. Σύμφωνα με τον Rayleigh, ο ήχος προκαλεί πιο έντονο ερέθισμα από την πλευρά που προέρχεται λόγω του ότι το κεφάλι 'σκιάζει' τους ήχους υψηλής συχνότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10 (a), με αποτέλεσμα ο ήχος να προκαλεί μικρότερη διέγερση στο άλλο αυτί. Στις χαμηλές συχνοότητες όμως, λόγω του ότι το μήκος κύματος είναι μεγάλο, προκαλείται περίθλαση γύρω από το κεφάλι με αποτέλεσμα το ερέθισμα και στα δύο αυτιά να είναι σχεδόν το ίδιο.



Σχήμα 5.10

- (a) εντοπισμός για συχνότητες άνω των 4000Hz λόγω διαφοράς έντασης
 (b) εντοπισμός για συχνότητες κάτω των 1000Hz λόγω διαφοράς φάσης

Ήχοι χαμηλής συχνότητας μπορούν να εντοπιστούν, αν και με μικρότερη ακρίβεια από τους ήχους υψηλής συχνότητας. Το 1907 ο Rayleigh διατύπωσε μία δεύτερη θεωρία προκειμένου να εξηγήσει τον εντοπισμό ηχητικών πηγών χαμηλής συχνότητας. Ο ήχος που προέρχεται από τη μία πλευρά θα φθάσει το ένα αυτί γρηγορότερα από το άλλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10 (b). Η διαφορά φάσης είναι σημαντική παράμετρος για τον εντοπισμό ήχων χαμηλής συχνότητας.

Διάφορα πειράματα έχουν επιβεβαιώσει το γεγονός ότι για ήχους μέχρι περίπου 1000Hz, ο εντοπισμός γίνεται κυρίως λόγω της διαφοράς φάσης (για συνεχείς ήχους) ή της διαφοράς του χρόνου άφιξης (για κτύπους). Για συχνότητες μεγαλύτερες από 4000Hz ο εντοπισμός γίνεται λόγω της διαφοράς έντασης. Για συχνότητες μεταξύ 1000Hz και 4000Hz, η ακρίβεια εντοπισμού είναι μειωμένη με μέγιστο σφάλμα εντοπισμού γύρω στα 3000Hz, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει σημαντική αλληλοκάλυψη των δύο μηχανισμών.

Μία σημαντική συνέπεια του εντοπισμού ήχου είναι το *φαινόμενο προβαδίσματος* (*precedence effect* ή *Haas effect*), το οποίο σχετίζεται με τον εντοπισμό ηχητικής πηγής σε κλειστό χώρο. Αν παρόμοιοι ήχοι φθάσουν στο αυτί μέσα σε 35ms, ως φαινομενική κατεύθυνση της πηγής θεωρείται αυτή του πρώτου ήχου. Ο εγκέφαλος θεωρεί ότι αυτός είναι ο πρώτος ήχος που η πηγή εκπέμπει ευθέως σε αυτό, ενώ οι διαδοχικοί ήχοι θεωρούνται ανακλασμένοι μία ή περισσότερες φορές.

Μετρώντας τις αισθήσεις: ψυχοφυσική

Πληροφορίες σχετικά με τον κόσμο που μας περιβάλλει προέρχονται από τις αισθήσεις μας: την όραση, τη γεύση, την όσφρηση, την αφή και την ακοή. Κάθε αισθητήριο όργανο αντιδρά σε ένα συγκεκριμένο τύπο ερεθίσματος και σε ένα περιορισμένο φάσμα ενέργειας. Για παράδειγμα τα μάτια μας, αντιδρούν σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα ενός πολύ περιορισμένου εύρους συχνοτήτων, σε σχέση με την ευρεία κλίμακα ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών που μας περιβάλλουν.

Η *αντίληψη* (*perception*) δεν περιλαμβάνει μόνο τη λήψη πληροφοριών από τα κατάλληλα αισθητήρια όργανα, αλλά την κωδικοποίηση, τη μετάδοση και την επεξεργασία των πληροφοριών αυτών από το κεντρικό νευρικό σύστημα. Πολλές ικανότητες αντίληψης είναι έμφυτες, ενώ άλλες μπορούν να αποκτηθούν ή να αναπτυχθούν μέσω εμπειρίας και εξάσκησης. Η γνώση μας σχετικά με τους μηχανισμούς αντίληψης μέχρι σήμερα δεν είναι ολοκληρωμένη.

Η μελέτη της σχέσης μεταξύ των ερεθισμάτων και της υποκειμενικής αίσθησης που προκαλούν είναι το αντικείμενο της *ψυχοφυσικής*, ένας όρος που δόθηκε από έναν από τους κυριότερους ερευνητές του χώρου, τον G. T. Fechner. Ο Fechner επί έτη προσπάθησε να προσδιορίσει την ποσοτική σχέση μεταξύ ερεθίσματος και της προκαλούμενης αίσθησης. Ο *νόμος του Fechner* είναι μία απλή μαθηματική διατύπωση ενός μεγάλου μέρους της δουλειάς του και διατυπώνεται ως εξής: *όσο τα ερεθίσματα αυξάνουν με πολλαπλασιασμό, οι αισθήσεις αυξάνουν με πρόσθεση*. Στα μαθηματικά η σχέση αυτή ονομάζεται *λογαριθμική* (*logarithmic*). Ο νόμος του Fechner ορίζει ότι η αίσθηση μεγαλώνει λογαριθμικά με το ερέθισμα.

Λογάριθμοι και δυνάμεις του δέκα

Είναι δύσκολο να γραφούν αριθμοί όπως 1.530.000.000 και 0.000087. Οι αριθμοί αυτοί γράφονται καλύτερα ως 1.53×10^9 και 8.7×10^{-5} αντίστοιχα, δεδομένου ότι $10^9 = 1.000.000.000$ και $10^{-5} = 0.00001$. Ο αριθμός 10 ονομάζεται *βάση* (*base*), ενώ ο αριθμός στον οποίο η βάση είναι *υψωμένη* ονομάζεται *εκθέτης* (*exponent*). Άλλες δυνάμεις του δέκα είναι:

$$\begin{aligned} 10^3 &= 1000 \\ 10^2 &= 100 \\ 10^1 &= 10 \\ 10^0 &= 1 \\ 10^{-1} &= 0.1 \\ 10^{-2} &= 0.01 \\ 10^{-3} &= 0.001 \end{aligned}$$

Στους υπολογιστές τσέπης οι δυνάμεις συμβολίζονται με το γράμμα E (exponent). Συνεπώς, 10^3 συμβολίζεται ως E3 και 10^{-3} ως E-3. Ο αριθμός 1.530.000.000 συμβολίζεται ως 1.53E9 και ο αριθμός 0.000087 ως 8.7E-5.

Για να προσθέσουμε δύο δυνάμεις προσθέτουμε τους εκθέτες, ενώ για να τις διαιρέσουμε αφαιρούμε τους εκθέτες. Σε όλες τις περιπτώσεις οι βάσεις πρέπει να είναι ίδιες. Συνεπώς:

$$\begin{aligned} (10^3)(10^4) &= 10^7 \\ (5 \times 10^2)(3 \times 10^5) &= 15 \times 10^7 = 1.5 \times 10^8 \\ (3 \times 10^{-3})(2 \times 10^5) &= 6 \times 10^2 \\ 10^4 / 10^2 &= 10^2 \\ (6 \times 10^5) / (3 \times 10^3) &= 2 \times 10^2 \end{aligned}$$

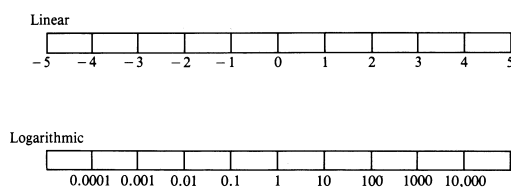
$$\text{Γενικά } (10^A)(10^B) = 10^{A+B} \text{ και } 10^A / 10^B = 10^{A-B}$$

Οι λογάριθμοι ορίζονται ως εξής: ο λογάριθμος με βάση το 10 ενός αριθμού x ισούται με τη δύναμη στην οποία το 10 πρέπει να υψωθεί προκειμένου να ισούται με το x . Δηλαδή, αν $x = 10^y$ τότε $y = \log x$.

Αν και στα μαθηματικά χρησιμοποιούνται λογάριθμοι και σε άλλη βάση, στην ακουστική χρησιμοποιούνται πάντα λογάριθμοι με βάση το 10. Οι παρακάτω ταυτότητες διευκολύνουν τους υπολογισμούς που περιέχουν λογάριθμους.

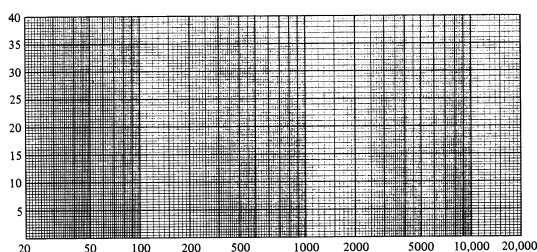
$$\begin{aligned} \log AB &= \log A + \log B \\ \log A/B &= \log A - \log B \\ \log A^n &= n \log A \end{aligned}$$

Λογαριθμική κλίμακα ονομάζεται εκείνη στην οποία ίσες αποστάσεις αντιπροσωπεύουν τον ίδιο λόγο οπουδήποτε στην κλίμακα, σε αντίθεση με μία γραμμική κλίμακα όπου ίσες αποστάσεις αντιπροσωπεύουν ίση αύξηση τιμής. Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζονται γραμμικές και λογαριθμικές κλίμακες.



Σχήμα 5.11
Γραμμική και λογαριθμική κλίμακα

Συχνότητες ήχου παρουσιάζονται συνήθως σε λογαριθμική κλίμακα. Στο Σχήμα 5.12, η απόσταση από 20 μέχρι 200Hz είναι η ίδια με την απόσταση 200 με 2000Hz ή 2000 με 20.000Hz.



Σχήμα 5.12
Τετραγωνισμένο χαρτί με λογαριθμική κλίμακα συχνότητας

Υποκειμενικά χαρακτηριστικά ήχου

Τέσσερα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται συνήθως για την περιγραφή ήχων: η ένταση (*loudness*), το τονικό ύψος (*pitch*), η χροιά (*timbre*) και η διάρκεια (*duration*). Κάθε ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά, εξαρτάται από μία ή περισσότερες φυσικές παραμέτρους οι οποίες μπορούν να μετρηθούν. Για παράδειγμα, η ένταση εξαρτάται κυρίως από την ακουστική πίεση αλλά επίσης από το φάσμα και τη διάρκεια. Το τονικό ύψος εξαρτάται κυρίως από τη συχνότητα αλλά επίσης, σε μικρότερο βαθμό, από την ακουστική πίεση και την περιβάλλουσα (*envelope*: *τρόπος αυξομείωσης ενός φυσικού μεγέθους*). Στον Πίνακα 5.1 σχετίζονται τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά με τον βαθμό εξάρτησής τους από διάφορες φυσικές ποσότητες.

Physical Parameter	Subjective Quality			
	Loudness	Pitch	Timbre	Duration
Pressure	+++	+	+	+
Frequency	+	+++	++	+
Spectrum	+	+	+++	+
Duration	+	+	+	+++
Envelope	+	+	++	+

+ = weakly dependent; ++ = moderately dependent; +++ = strongly dependent.
Note: Spectrum refers to the frequencies and amplitudes of all the partials (components) in the sound. The physical duration of a sound and its perceived (subjective) duration, though closely related, are not the same. Envelope includes the attack, the release, and variations in amplitude.

Πίνακας 5.1
Εξάρτηση υποκειμενικών ποσοτήτων από φυσικές παραμέτρους

6 Πίεση Ήχου, Ισχύς και Ηχηρότητα

Στάθμη ηχητικής πίεσης

Η ελάχιστη διακύμανση πίεσης στην οποία αντιδρά το αυτί είναι μικρότερη από 10^{-9} της ατμοσφαιρικής πίεσης. Αυτό το κατώφλι ακοής, το οποίο διαφέρει από άτομο σε άτομο, αντιστοιχεί σε πίεση ήχου $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ σε συχνότητα 1000Hz. Το κατώφλι ακουστικού πόνου αντιστοιχεί περίπου σε πίεση ένα εκατομμύριο μεγαλύτερη, αλλά λιγότερο από 1/1000 της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Λόγω της πολύ μεγάλης διαφοροποίησης πίεσης, για τη μέτρηση ήχου χρησιμοποιείται μία λογαριθμική κλίμακα η οποία ονομάζεται *decibel (dB)*. Η κλίμακα decibel είναι στην πραγματικότητα ένας τρόπος για τη σύγκριση δύο ήχων. Όσον αφορά τη μέτρηση στάθμης ήχου, ως ήχος αναφοράς (με τον οποίο συγκρίνεται ο υπό μέτρηση ήχος), χρησιμοποιείται η πίεση $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ (κατώφλι ακοής) προκειμένου να ορίσουμε τη μηδενική στάθμη ήχου. Συνεπώς, η *στάθμη πίεσης ήχου (sound pressure level ή SPL ή L_p)* ορίζεται ως εξής:

$$L_p = 20 \log \frac{P}{p_0} = 10 \log \frac{P^2}{p_0^2}$$

Ένας ήχος της ίδιας πίεσης με τον ήχο αναφοράς θεωρείται ότι έχει στάθμη πίεσης 0dB, αφού $\log 1 = 0$.

Η στάθμη πίεσης ήχου μετράται από *μετρητές στάθμης ήχου (sound level meters)*, οι οποίοι αποτελούνται από ένα μικρόφωνο, ενισχυτή και καταμετρητή βαθμονομημένο σε decibel. Τυπικές στάθμες για διάφορες πηγές ήχου δίνονται στον Πίνακα 6.1.

ΠΗΓΗ ΗΧΟΥ	ΣΤΑΘΜΗ ΠΙΕΣΗΣ	
Απογείωση jet (60 m)	120dB	Μη ανεκτός
Κατασκευαστική περιοχή	110dB	
Κραυγή (1.5 m)	100dB	
Βαρύ φορτηγό (15 m)	90dB	Πολύ θορυβώδης
Λεωφόρος	80dB	
Καμπίνα αυτοκινήτου	70dB	Θορυβώδης
Κανονική συνομιλία (1 m)	60dB	
Γραφείο/αίθουσα διδασκαλίας	50dB	Μέτριος
Καθιστικό δωμάτιο	40dB	
Υπνοδωμάτιο το βράδυ	30dB	Ήσυχος
Ραδιοφωνικό στούντιο	20dB	
Θρόισμα φύλλων	10dB	Ελάχιστα ακουστός
	0dB	

Πίνακας 6.1
Τυπικές στάθμες ήχου

Στάθμη ισχύος και έντασης ήχου

Άλλη μία στάθμη η οποία έχει ως μονάδα μέτρησης το decibel είναι η *στάθμη ισχύος ήχου* (*sound power level* ή *PWL* ή L_w), η οποία καθορίζει τη συνολική ισχύ ήχου που εκπέμπεται από την πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις.

Όπως στην περίπτωση της ηλεκτρικής ισχύος, η ακουστική ισχύς εκφράζεται σε watt. Στην περίπτωση του ήχου, τα ποσά ισχύος είναι πολύ μικρά, συνεπώς η ποσότητα αναφοράς για σύγκριση είναι το picowatt (10^{-12} watt). Η στάθμη ισχύος ήχου ορίζεται ως εξής:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

όπου W είναι η ισχύς ήχου που εκπέμπεται από την πηγή και $W_0 = 10^{-12}$ watt η ισχύς αναφοράς.

Η σχέση μεταξύ στάθμης πίεσης και στάθμης ισχύος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της γεωμετρίας της πηγής και του χώρου. Αν η στάθμη ισχύος αυξηθεί κατά 10dB, η στάθμη πίεσης αυξάνει επίσης 10dB, δεδομένου ότι όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ίδιες. Αν μία πηγή εκπέμπει ήχο εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις και δεν υπάρχουν κοντά στην πηγή ανακλούσες επιφάνειες (*ελεύθερο πεδίο*), η στάθμη πίεσης ήχου μειώνεται κατά 6dB κάθε φορά που η απόσταση από την πηγή διπλασιάζεται.

Μία άλλη παράμετρος που εκφράζεται σε decibel είναι η *ένταση ήχου* (*sound intensity*), η οποία εκφράζει τον ρυθμό ροής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας. Η ένταση αναφοράς είναι $I_0 = 10^{-12}$ watt/m² και η *στάθμη έντασης ήχου* (*sound intensity level* ή *IL* ή L_I) ορίζεται ως εξής:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Για ένα ελεύθερος μεταδιδόμενο κύμα στον αέρα, η στάθμη πίεσης ήχου και η στάθμη έντασης ήχου είναι σχεδόν ίσες ($L_p \approx L_I$). Αυτό γενικά δεν ισχύει λόγω του ότι κύματα ήχου συμβάλουν στην πίεση ήχου από πολλές κατευθύνσεις σε ένα σημείο. Όταν αναφέρεται ο όρος στάθμη ήχου, σχεδόν πάντα εννοούμε τη στάθμη πίεσης ήχου L_p , αφού αυτό είναι το μέγεθος που μετράται από τα όργανα μέτρησης ήχου.

Όταν μία σημειακή πηγή (η οποιαδήποτε πηγή η οποία εκπέμπει ισοδύναμα προς όλες τις κατευθύνσεις) εκπέμπει σε ελεύθερο πεδίο, η ένταση του ήχου μεταβάλλεται κατά $1/r^2$ (η πίεση μεταβάλλεται κατά $1/r$), όπου r είναι η απόσταση από την πηγή S . Αυτό μπορεί να κατανοηθεί ως ένα δεδομένο ποσό ηχητικής ισχύος το οποίο είναι κατανομημένο στην επιφάνεια μίας σφαίρας με εμβαδόν $4\pi r^2$. Συνεπώς η ένταση υπολογίζεται ως εξής:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

όπου W είναι η ισχύς της πηγής. Σε ελεύθερο πεδίο, η στάθμη έντασης ήχου μειώνεται κατά 6dB κάθε φορά που η απόσταση από την πηγή διπλασιάζεται. Η στάθμη έντασης ήχου (ή η στάθμη πίεσης ήχου) σε απόσταση 1 m από την πηγή σε ελεύθερο πεδίο είναι 11dB λιγότερο από την στάθμη ισχύος ήχου της πηγής. Αυτό εξάγεται ως εξής:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{W}{4\pi(1)}$$

$$L_I = 10 \log \frac{I}{10^{-12}} = 10 \log \frac{W}{10^{-12}} - 10 \log 4\pi = L_w - 11 \approx L_p$$

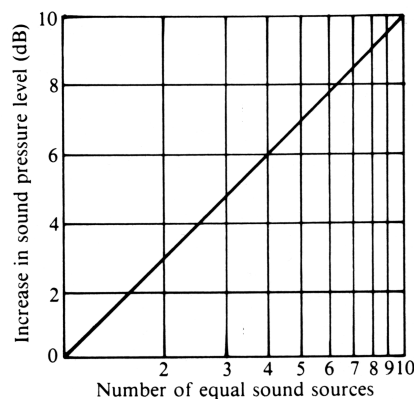
Με τον ίδιο τρόπο εξάγεται ότι σε απόσταση δύο μέτρων, η στάθμη L_I είναι 17dB μικρότερη από τη στάθμη L_w .

Πιο σύνηθες από το ελεύθερο πεδίο είναι το ημισφαιρικό πεδίο, όπου η πηγή βρίσκεται σε μία σκληρή επιφάνεια εκπέμποντας ημισφαιρικά κύματα. Υπό αυτές τις συνθήκες, η στάθμη έντασης ήχου L_I και η στάθμη πίεσης ήχου L_p σε απόσταση 1 m είναι κατά 8dB μικρότερες από τη στάθμη ισχύος. Η στάθμη τους και πάλι μειώνεται κατά 6dB κάθε φορά που η απόσταση διπλασιάζεται. Στην πράξη, λίγες πηγές εκπέμπουν ισοδύναμα προς όλες τις κατευθύνσεις και συνήθως υπάρχουν ανακλούσες επιφάνειες κοντά στην πηγή, οι οποίες καταστρέφουν τη συμμετρία των σφαιρικών ή ημισφαιρικών κυμάτων.

Πολλαπλές πηγές

Ο τρόπος με τον οποίο προστίθενται οι στάθμες ήχων φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Αν δύο ήχοι στάθμης 80dB ακουστούν ταυτόχρονα, όπως προκύπτει από το Σχήμα 6.1, η συνολική ένταση δεν θα είναι 160dB αλλά 83dB. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει συμβολή μεταξύ των ανεξάρτητων ηχητικών κυμάτων, αυτή η σχέση δεν ισχύει.

Όταν δύο κύματα ίδιας συχνότητας φθάσουν στο ίδιο σημείο ενδεχομένως να υπάρχει θετική ή αρνητική συμβολή. Αν και τα δύο έχουν το ίδιο πλάτος A , το τελικό πλάτος μπορεί να είναι από 0 έως $2A$. Η συνολική ένταση, η οποία είναι ανάλογη με το τετράγωνο του πλάτους, μπορεί να έχει τιμή από 0 έως $4A^2$. Αν τα κύματα έχουν διαφορετική συχνότητα, σαφώς καθορισμένα σημεία αρνητικής και θετικής συμβολής δεν υφίστανται.



Σχήμα 6.1

Σχέση άθροισης ίσων πηγών ήχου (χωρίς συμβολή κυμάτων)

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί η διαφορά μεταξύ της στάθμης πίεσης, ισχύος και έντασης ήχου, αφού όλα εκφράζονται σε decibel. Σχεδόν πάντα αυτό που μετράται είναι η στάθμη πίεσης ήχου. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέτρηση υπολογίζονται τα άλλα δύο μεγέθη. Η στάθμη ισχύος ήχου εκφράζει τη δύναμη του ήχου ανεξαρτήτως της θέσης της πηγής και του παρατηρητή. Η στάθμη έντασης ήχου εκφράζει τη ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας. Για ένα ελευθέρως μεταδιδόμενο κύμα, η ένταση είναι ανάλογη με το τετράγωνο της πίεσης ήχου (στην πραγματικότητα τη μέση τιμή του p^2). Συνεπώς, ο διπλασιασμός της πίεσης ήχου έχει ως αποτέλεσμα μία αύξηση της τάξης των 6dB στη στάθμη πίεσης ήχου L_p , ενώ ο διπλασιασμός της ισχύος ήχου έχει ως συνέπεια την αύξηση της στάθμης ισχύος L_W μόνο κατά 3dB. Ο Πίνακας 6.2 απεικονίζει διάφορες σχέσεις μεταξύ της αύξησης μίας παραμέτρου και της αντίστοιχης αύξησης της στάθμης που αφορά.

p/p_0	L_p	W/W_0	L_W
2	6dB	2	3dB
4	12dB	4	6dB
10	20dB	10	10dB
20	26dB	20	13dB
50	34dB	50	17dB
100	40dB	100	20dB
1000	60dB	1000	30dB

Πίνακας 6.2

Σχέση στάθμης πίεσης και στάθμης ισχύος ήχου

Αν η πίεση ήχου σε ένα συγκεκριμένο σημείο λόγω μίας πηγής είναι p_1 και η πίεση ήχου στο ίδιο σημείο από μία άλλη πηγή είναι p_2 , η συνολική πίεση στο σημείο αυτό είναι:

$$L_p = 10 \log \frac{p_1^2 + p_2^2}{p_0^2}$$

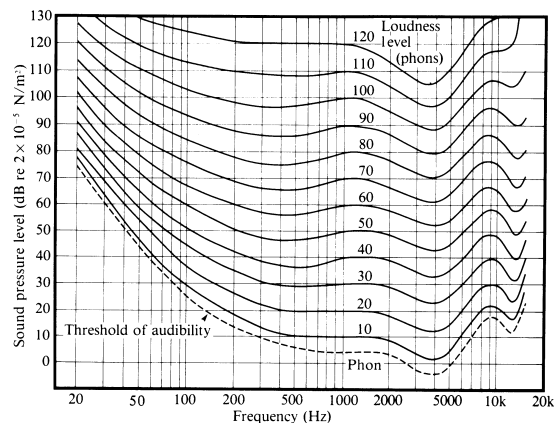
Στην περίπτωση που $p_1=p_2$:

$$L_p = 10 \log 2 \frac{p_1^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{p_1^2}{p_0^2} + 10 \log 2 = 20 \log \frac{p_1}{p_0} + 3 = L_p + 3$$

Συνεπώς, αν δύο πηγές ηχώντας ανεξάρτητα προκαλούν $L_p=40\text{dB}$ σε ένα συγκεκριμένο σημείο, ηχώντας ταυτόχρονα προκαλούν $L_p=43\text{dB}$.

Στάθμη ηχηρότητας

Αν και συνήθως ήχοι με υψηλότερο L_I και L_p ακούγονται δυνατότερα, αυτό δε συμβαίνει πάντα. Η ευαισθησία του αυτιού μεταβάλλεται με τη συχνότητα και την ποιότητα του ήχου. Το 1933 οι Fletcher και Munson καθόρισαν τα περιγράμματα ίσης στάθμης ηχηρότητας (*loudness level: L_L*) για απλούς ήχους (μίας συχνότητας). Οι καμπύλες του Σχήματος 6.2 οι οποίες προτάθηκαν από τον Διεθνή Οργανισμό Προτύπων (*International Standards Organisation: ISO*), είναι όμοιες με εκείνες που προτάθηκαν από τους Fletcher και Munson.



Σχήμα 6.2

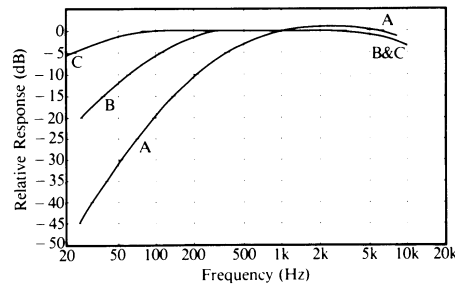
Περιγράμματα ίσης ηχηρότητας για απλούς τόνους

Από τις καμπύλες φαίνεται η μειωμένη ευαισθησία του αυτιού σε χαμηλές με μεσαίες στάθμες έντασης. Η ευαισθησία ακοής φθάνει τη μέγιστη τιμή της στην περιοχή μεταξύ 3500Hz και 4000Hz, η οποία είναι κοντά στη συχνότητα συντονισμού του ακουστικού πόρου. Η επόμενη κορύφωση είναι περίπου στα 13kHz όπου είναι η δεύτερη συχνότητα συντονισμού.

Οι καμπύλες ίσης ηχηρότητας βαθμονομούνται σε *phons*. Η στάθμη σε phon είναι αριθμητικά ίση με τη στάθμη πίεσης ήχου σε decibels σε συχνότητα 1000Hz. Το phon δε χρησιμοποιείται ευρέως για τη μέτρηση ήχου.

Δεδομένης της σχετικής αναισθησίας του αυτιού στις χαμηλές συχνότητες, στα όργανα μέτρησης ήχου χρησιμοποιούνται *κυκλώματα αντιστάθμισης (weighting networks)* τα οποία μειώνουν την ευαισθησία των οργάνων με ανάλογο τρόπο, προκειμένου η μετρούμενη στάθμη έντασης να είναι αυτή που αντιλαμβανόμαστε μέσω της ακοής.

Οι μετρητές στάθμης έντασης έχουν ένα ή περισσότερα κυκλώματα αντιστάθμισης, τα οποία παρέχουν την επιθυμητή *απόκριση συχνότητας (frequency response)*. Τα κυκλώματα αντιστάθμισης που γενικά χρησιμοποιούνται είναι τα τύπου A, B και C. Η απόκριση συχνότητας των τριών κυκλωμάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3

Απόκριση συχνότητας τριών κυκλωμάτων αντιστάθμισης

Το κύκλωμα αντιστάθμισης τύπου C έχει σχεδόν επίπεδη απόκριση συχνότητας, ενώ το κύκλωμα αντιστάθμισης τύπου A εισάγει μία μείωση κέρδους στις χαμηλές συχνότητες η οποία είναι όμοια με την απόκριση συχνότητας του αυτιού στις συχνότητες αυτές.

Οι μετρήσεις στάθμης ήχου γίνονται συνήθως χρησιμοποιώντας κυκλώματα αντιστάθμισης τύπου A. Τέτοιες μετρήσεις διακρίνονται με το ανάλογο σύμβολο, $L_p(A)$ ή $SPL(A)$ σε dB, αν και συνήθως χρησιμοποιείται η μονάδα dBA ή dB(A) υποδηλώνοντας μέτρηση τύπου A.

Πολλοί μετρητές στάθμης έντασης διαθέτουν γρήγορη και αργή αντίδραση. Η αργή αντίδραση μετρά τη μέση στάθμη. Μέσα σε ένα κτίριο η μέτρηση με κύκλωμα αντιστάθμισης τύπου C ενδέχεται να είναι σημαντικά υψηλότερη από τη μέτρηση με αντιστάθμιση τύπου A, λόγω του θορύβου χαμηλής συχνότητας που παράγεται από μηχανικό εξοπλισμό στον οποίο το αυτί είναι σχετικά αναισθητό. Αν και είναι δύσκολο να εκφραστεί ένα ηχητικό περιβάλλον από μία μόνο παράμετρο, για πολλές περιπτώσεις η μέτρηση με αντιστάθμιση τύπου A αρκεί. Σε χαμηλές με μεσαίες εντάσεις οι μετρήσεις είναι αρκετά κοντά στη πραγματική στάθμη έντασης, συνεπώς η μονάδα phons μπορεί να αντικατασταθεί από τη μονάδα dBA χωρίς μεγάλο σφάλμα.

Ηχηρότητα και απλοί τόνοι: sones

Η λογαριθμική σχέση που ο Fechner εξέφρασε στο νόμο του σχετίζοντας την αίσθηση με το ερέθισμα, προσέγγιζε με μικρή μόνο ακρίβεια τις εκτιμήσεις των ακροατών για τη δική τους αίσθηση της ηχηρότητας ήχων. Σε μία προσπάθεια προσδιορισμού μίας ποσότητας ανάλογης της αίσθησης της ηχηρότητας, αναπτύχθηκε μία κλίμακα ηχηρότητας με μονάδα το *sone*. Το *sone* ορίζεται ως η ηχηρότητα ενός απλού τόνου συχνότητας 1000Hz σε στάθμη 40dB (μία στάθμη ηχηρότητας 40 phons).

Για στάθμες ηχηρότητας 40 phons και άνω, η σχέση της ηχηρότητας S σε sones και της στάθμης ηχηρότητας L_L σε phons σύμφωνα με πρόταση του ISO είναι:

$$S = 2^{(L_L - 40)/10}$$

Μία ισοδύναμη έκφραση για την ηχηρότητα S η οποία αποφεύγει τη χρήση του L_L είναι η εξής:

$$S = Cp^{0.6}$$

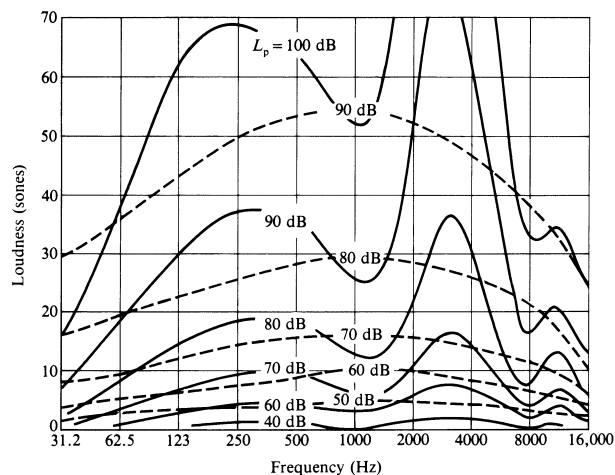
όπου p είναι η πίεση ήχου και C μία παράμετρος που εξαρτάται από τη συχνότητα.

Οι παραπάνω εξισώσεις βασίζονται στην έρευνα του Stevens σύμφωνα με την οποία η ηχηρότητα διπλασιάζεται με μία αύξηση στη στάθμη πίεσης ήχου κατά 10dB. Άλλοι ερευνητές διαπίστωσαν διπλασιασμό της ηχηρότητας με αύξηση της στάθμης πίεσης ήχου κατά 6dB. Αυτό παραπέμπει στη χρήση ενός τύπου όπου η ηχηρότητα είναι ανάλογη με την πίεση ήχου:

$$S = K(p - p_0)$$

όπου p είναι η πίεση ήχου και p_0 η πίεση σε κάποια στάθμη αναφοράς.

Ένας τρόπος να παραστήσουμε την ηχηρότητα γραφικά είναι να συνδυάσουμε τις παραπάνω ψυχοφυσικές μαθηματικές εκφράσεις με τα περιγράμματα ίσης ηχηρότητας του Σχήματος 6.2. Οι συνεχείς καμπύλες του Σχήματος 6.4 χρησιμοποιούν την πρώτη από τις παραπάνω εξισώσεις δίνοντας την ηχηρότητα απλών τόνων σε διαφορετικές συχνότητες. Μία μικρή διαφορά παρατηρείται μεταξύ ήχων οι οποίοι καταφθάνουν από εμπρός (εμπρόσθια πρόσπτωση) και αυτών που καταφθάνουν από όλες τις κατευθύνσεις (τυχαία πρόσπτωση). Οι καμπύλες του Σχήματος 6.4 αναφέρονται σε τυχαία πρόσπτωση όπως στην περίπτωση ενός κοινού χώρου. Οι κορυφώσεις που παρατηρούνται στην περιοχή των 4000Hz οφείλονται στην κυρίως συχνότητα συντονισμού του ακουστικού πόρου. Οι μικρότερες που υφίσταται στην περιοχή άνω των 10kHz οφείλονται στον δεύτερο συντονισμό περίπου τρεις φορές τη συχνότητα του κυρίως συντονισμού (ο ακουστικός πόρος μοιάζει με σωλήνα κλειστό στο ένα άκρο από το τύμπανο).



Σχήμα 6.4

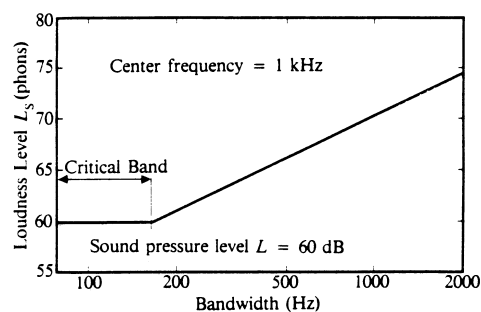
Υποκειμενική ηχηρότητα απλών τόνων (συνεχείς γραμμές) και “μουσικών” τόνων με 5 αρμονικές (διακεκομμένες καμπύλες) σε συνάρτηση με τη συχνότητα και τη στάθμη ήχου (L_p). Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν μέσες κρίσεις υποκειμενικής ηχηρότητας και η διαφοροποίηση από άτομο σε άτομο είναι σημαντική

Οι διακεκομμένες καμπύλες του Σχήματος 6.4 είναι θεωρητικά υπολογισμένες (η πραγματική μέτρηση θα χρησιμοποιούσε αντιστάθμιση τύπου C) και εκφράζουν την υποκειμενική ηχηρότητα “μουσικών” τόνων οι οποίοι αποτελούνται από θεμελιώδη και τέσσερις αρμονικές. Οι κορυφώσεις που παρατηρούνται στους απλούς τόνους έχουν εξομαλυνθεί στην περίπτωση μουσικών τόνων.

Ηχηρότητα και σύνθετοι τόνοι: κρίσιμες ζώνες

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5.1, η ηχηρότητα εξαρτάται κυρίως από την πίεση ήχου, αλλά επιπλέον από τη συχνότητα, το φάσμα και τη διάρκεια.

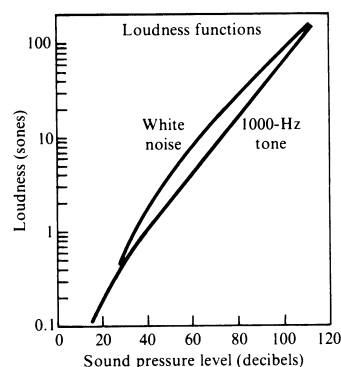
Αν ακούσουμε δύο απλούς τόνους με την ίδια στάθμη πίεσης αλλά με αυξανόμενη διαφοροποίηση συχνότητας, θα παρατηρήσουμε πως όταν η διαφορά συχνότητας ξεπεράσει το κρίσιμο εύρος, η συνολική ηχηρότητα αυξάνει. Ήχοι με μεγάλο εύρος συχνοτήτων όπως για παράδειγμα ο θόρυβος ενός αεροσκάφους, φαίνονται δυνατώτεροι από απλούς τόνους ή ήχους με περιορισμένο εύρος αλλά με την ίδια στάθμη πίεσης. Το Σχήμα 6.5 περιγράφει την εξάρτηση της ηχηρότητας από το εύρος με σταθερή στάθμη πίεσης ήχου και κεντρική συχνότητα. Η ηχηρότητα δεν επηρεάζεται μέχρι την υπέρβαση του κρίσιμου εύρους, το οποίο είναι περίπου 160Hz για κεντρική συχνότητα 1kHz.



Σχήμα 6.5

Η επιρροή του εύρους συχνοτήτων στην ηχηρότητα

Στο Σχήμα 6.6 συγκρίνεται η υποκειμενική ηχηρότητα λευκού θορύβου με αυτή ενός απλού τόνου συχνότητας 1000Hz ίδιου SPL. Σε στάθμη 55dB, ο λευκός θόρυβος κρίνεται περίπου δύο φορές δυνατώτερος από τον απλό τόνο, αλλά σε μικρότερες και υψηλότερες στάθμες η διαφορά είναι πολύ μικρότερη.



Σχήμα 6.6

Ηχηρότητα λευκού θορύβου συγκρινόμενη με αυτή ενός απλού τόνου συχνότητας 1000Hz

Η εξάρτηση της ηχηρότητας από παραμέτρους όπως η πίεση, η συχνότητα, το φάσμα και η διάρκεια φαίνεται να είναι ανεξάρτητη από το αν ο ήχος ακουστεί από ένα αυτί μόνο ή και από τα δύο ταυτόχρονα. Παρ' όλα αυτά, αν ο ήχος ακουστεί από το ένα αυτί μόνο, φαίνεται να έχει τη μισή ένταση από ότι αν ακουστεί και από δύο ταυτόχρονα.

Ηχηρότητα συνήχησης ήχων

Όταν δύο ή περισσότεροι τόνοι ηχούν ταυτόχρονα, ο τρόπος με τον οποίο η ηχηρότητά τους συμβάλει στη συνολική ηχηρότητα εξαρτάται από το πόσο διαφέρουν σε συχνότητα, σύμφωνα με τις παρακάτω τρεις περιπτώσεις:

1. Αν οι τόνοι έχουν την ίδια συχνότητα ή η συχνότητά τους βρίσκεται εντός της κρίσιμης ζώνης, η ηχηρότητα υπολογίζεται από τη συνολική ένταση $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$. Αν οι εντάσεις I_1, I_2, I_3 κλπ είναι ίσες, ο τρόπος αύξησης της στάθμης ήχου απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1. Η ηχηρότητα μπορεί κατόπιν να καθοριστεί από τη συνολική στάθμη ήχου χρησιμοποιώντας το Σχήμα 6.4.
2. Αν το εύρος συχνοτήτων υπερβαίνει το κρίσιμο εύρος, η συνολική ηχηρότητα είναι μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει από την απλή άθροιση των εντάσεων. Όσο αυξάνει το εύρος συχνοτήτων, η ηχηρότητα προσεγγίζει (αλλά παραμένει μικρότερη) την τιμή του αθροίσματος της ηχηρότητας του κάθε τόνου:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots$$

3. Αν η διαφορά συχνότητας των τόνων είναι πολύ μεγάλη η άθροιση γίνεται πολύπλοκη. Οι ακροατές τείνουν να εστιάζουν την προσοχή τους σε έναν συγκεκριμένο τόνο (π.χ. τον δυνατότερο ή τον υψηλότερο σε συχνότητα) και αποδίδουν συνολική ηχηρότητα σχεδόν ίση με την ηχηρότητα αυτού του τόνου που τράβηξε την προσοχή τους.

Για τον ακριβή καθορισμό της ηχηρότητας ενός σύνθετου ήχου σε *sones*, συνιστάται η μέτρηση στάθμης του ήχου σε 10 προκαθορισμένα διαστήματα *οκτάβας* (*octave*) (ή σε διαστήματα 1/3 οκτάβας). Μία οκτάβα είναι ένα διάστημα συχνοτήτων όπου η υψηλότερη συχνότητα είναι διπλάσια της χαμηλότερης. Οι αναλυτές οκτάβας περιέχουν φίλτρα τα οποία περιορίζουν τις μετρήσεις σε διαστήματα οκτάβας με κεντρικές συχνότητες 31, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 και 16.000Hz.

Για τον προσεγγιστικό καθορισμό της ηχηρότητας σε χαμηλές και μέτριες στάθμες, όπου η αντιστάθμιση τύπου A αποτελεί καλή προσέγγιση της απόκρισης συχνότητας του αυτιού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας απλός μετρητής στάθμης πίεσης ήχου. Θεωρώντας ότι 30 dB(A) είναι περίπου 1.5 *sones*, διπλασιάζοντας τον αριθμό των *sones* για κάθε αύξηση της τάξης των 10 dB σύμφωνα με τον Πίνακα 6.3, είναι δυνατό να υπολογιστεί με σχετικά καλή ακρίβεια η ηχηρότητα ενός ήχου σε *sones*.

$L_p(A)$	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85	90	dB
S	1.5	3	6	8	12	16	24	32	48	64	96	sones

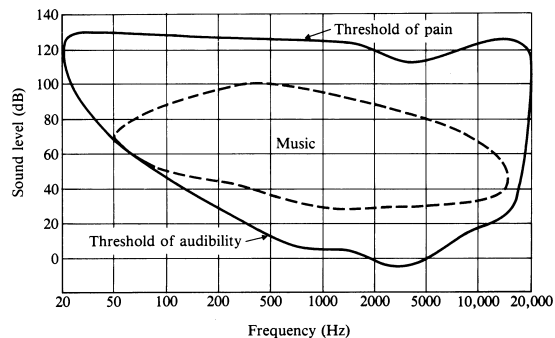
Πίνακας 6.3

Προσεγγιστικός υπολογισμός της ηχηρότητας σε *sones* σύνθετων ήχων από μέτρηση στάθμης ήχου με αντιστάθμιση τύπου A

Γενικά, το μέγεθος της ηχηρότητας είναι υποκειμενικό και η εκτίμησή του διαφέρει από άτομο σε άτομο. Κατά μέσο όρο, ένας ήχος 4 *sones* ηχεί δύο φορές πιο δυνατά από έναν ήχο ηχηρότητας 2 *sones*, αλλά ορισμένοι ακροατές μπορεί να τον θεωρήσουν τρεις ή μία και μισή φορές πιο δυνατό.

Μουσικές δυναμικές και ηχηρότητα

Το εύρος της στάθμης ήχου κατά τη διάρκεια μίας μουσικής εκτέλεσης, γνωστό ως *δυναμική περιοχή* (*dynamic range*), μπορεί να μεταβάλλεται από μερικά decibel μέχρι και 40dB ή περισσότερο, ανάλογα με τη μουσική. Το εύρος στάθμης και συχνότητας που ένας ακροατής ακούει κατά προσέγγιση απεικονίζεται στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7

Προσεγγιστικό εύρος συχνότητας και στάθμης ήχου μουσικής σε σύγκριση με το συνολικό εύρος της ακοής

Στη σύνθεση μουσικής χρησιμοποιούνται *δυναμικά σύμβολα* για να επισημαίνεται η ηχηρότητα στους εκτελεστές. Τα 6 δυναμικά σύμβολα περιέχονται στον Πίνακα 6.4.

Ονομασία	Σύμβολο	Έννοια
fortissimo	ff	πολύ δυνατά
forte	f	δυνατά
mezzo forte	mf	μετρίως δυνατά
mezzo piano	mp	μετρίως απαλά
piano	p	απαλά
pianissimo	pp	πολύ απαλά

Πίνακας 6.4

Στάθμες μουσικών δυναμικών

Μετρήσεις της έντασης ήχου σε ένα μεγάλο αριθμό περιπτώσεων έχουν δείξει ότι οι εκτελεστές σπανίως παίζουν και στις 6 δυναμικές στάθμες. Σε μία μελέτη, οι δυναμικές περιοχές 11 εκτελεστών (bassoon) βρέθηκε ότι διέφεραν κατά 6dB με 17dB με μέσο όρο 10dB. Μία αύξηση της τάξης των 10dB αντιστοιχεί περίπου σε διπλασιασμό της ηχηρότητας. Οι περισσότεροι ακροατές θα είχαν δυσκολία να αναγνωρίσουν 6 διαφορετικά επίπεδα σε 10dB. Οι δυναμικές περιοχές διαφόρων οργάνων δίνονται στον Πίνακα 6.5. Οι μετρήσεις αυτές αναφέρονται σε μία νότα η οποία παίζεται δυνατά και χαμηλά. Πολλά όργανα έχουν πολύ περισσότερη ισχύ στις υψηλές συχνότητες από ότι έχουν στις χαμηλές.

Μουσικό όργανο	Μέση δυναμική περιοχή (dB)	Μέγιστη δυναμική περιοχή (dB)
Violin	14	40
Viola	16	
Cello	14	
String bass	14	30
Recorder		10
Flute	7	30
Oboe	7	
English horn	5	
Clarinet	8	45
Bassoon	10	40
Trumpet	9	
Trombone	17	38
French horn	18	
Tuba	13	

Πίνακας 6.5
Δυναμική περιοχή μουσικών οργάνων

Κάλυψη

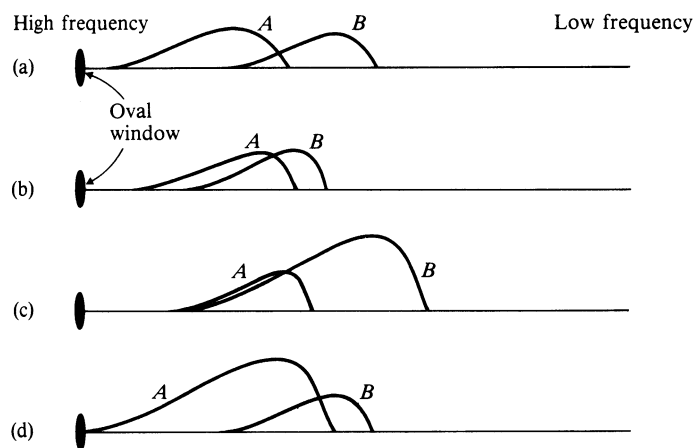
Όταν το αυτί εκτίθεται σε δύο ή περισσότερους διαφορετικούς ήχους ο ένας καλύπτει τον άλλο. Το φαινόμενο της *κάλυψης* (*masking*) εκφράζεται ως η ανύψωση του κατωφλίου ακοής ενός αδύναμου ήχου, λόγω της παρουσίας ενός δυνατότερου και εξαρτάται από τις συχνότητες των δύο τόνων. Απλοί τόνοι, σύνθετοι ήχοι, θόρυβοι με περιορισμένα και ευρεία φάσματα, παρουσιάζουν διαφορές στην ικανότητά τους να καλύπτουν άλλους ήχους. Κάλυψη ενός ήχου μπορεί επίσης να προκληθεί από έναν άλλο ήχο ο οποίος ηχεί κλάσματα δευτερολέπτου μετά τον ήχο που καλύπτεται.

Τα ακόλουθα συμπεράσματα προκύπτουν από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί για την έρευνα του φαινομένου της κάλυψης:

1. Απλοί τόνοι οι οποίοι έχουν μικρή διαφορά συχνότητας αλληλοκαλύπτονται περισσότερο από ήχους οι οποίοι έχουν μεγάλη διαφορά συχνότητας.
2. Ένας απλός τόνος καλύπτει τόνους υψηλότερης συχνότητας περισσότερο από ότι τόνους χαμηλότερης συχνότητας.
3. Όσο μεγαλύτερη ένταση έχει ο τόνος που προκαλεί κάλυψη, τόσο ευρύτερο είναι το φάσμα συχνοτήτων το οποίο καλύπτει.
4. Αν δύο τόνοι έχουν μεγάλη διαφορά συχνότητας, το φαινόμενο της κάλυψης είναι ελάχιστο ή μηδαμινό.
5. Η κάλυψη από θόρυβο περιορισμένου φάσματος έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την κάλυψη απλού τόνου. Και σε αυτή την περίπτωση τόνοι υψηλότερης συχνότητας καλύπτονται περισσότερο από ότι τόνοι χαμηλότερης συχνότητας.

6. Η κάλυψη τόνων από θόρυβο με ευρύ φάσμα (λευκός θόρυβος), χαρακτηρίζεται από μία σχεδόν γραμμική σχέση της κάλυψης με τη στάθμη του θορύβου. Μία αύξηση της τάξης των 10dB αυξάνει το κατώφλι ακουστότητας κατά το ίδιο ποσό. Ο θόρυβος με ευρύ φάσμα καλύπτει όλες τις συχνότητες.
7. *Πρώιμη κάλυψη (forward masking)* είναι η κάλυψη ενός τόνου από έναν άλλο ο οποίος τελειώνει ένα μικρό χρονικό διάστημα (20ms με 30ms) πριν τον τόνο που καλύπτεται. Το φαινόμενο της πρώιμης κάλυψης υποδηλώνει ότι πρόσφατα διεγερμένα κύτταρα δεν είναι όσο ευαίσθητα είναι τα κύτταρα τα οποία βρίσκονται σε κατάσταση ηρεμίας.
8. *Καθυστερημένη κάλυψη (backward masking)* είναι το φαινόμενο της κάλυψης ενός τόνου από έναν άλλο ο οποίος ξεκινά μερικά ms αργότερα. Ένας τόνος μπορεί να καλυφθεί από θόρυβο με ευρύ φάσμα ο οποίος ξεκινά μέχρι και 10ms μετά την παύση του τόνου, αν και η κάλυψη μειώνεται κατά την πάροδο αυτού του διαστήματος.
9. Κάλυψη ενός τόνου στο ένα αυτί μπορεί να προκληθεί από θόρυβο στο άλλο αυτί κάτω από ορισμένες συνθήκες. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *κεντρική κάλυψη (central masking)*.

Μερικά από τα συμπεράσματα που αφορούν το φαινόμενο της κάλυψης είναι δυνατόν να κατανοηθούν, παρατηρώντας τον τρόπο που απλοί τόνοι διεγείρουν τη βασική μεμβράνη. Οι τόνοι υψηλής συχνότητας διεγείρουν τη βασική μεμβράνη κοντά στην ωοειδή θυρίδα, ενώ οι τόνοι χαμηλής συχνότητας προκαλούν διέγερση προς το άλλο άκρο. Η διέγερση από απλούς τόνους είναι ασύμμετροι, παρουσιάζοντας μία “ουρά” προς το άκρο διέγερσης υψηλών συχνοτήτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8.

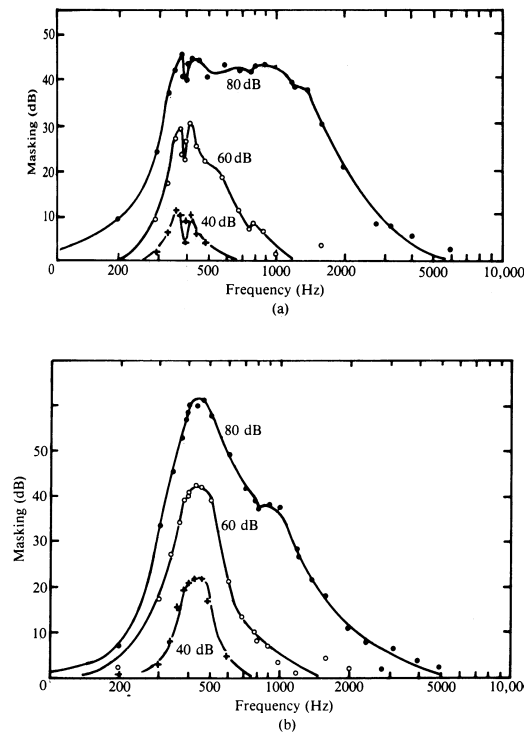


Σχήμα 6.8

Απλουστευμένη αντίδραση βασικής μεμβράνης για δύο απλούς τόνους A και B

Στην περίπτωση (a) οι διεγέρσεις αλληλοκαλύπτονται ελάχιστα, συνεπώς η κάλυψη είναι ελάχιστη. Στην περίπτωση (b) υπάρχει μεγάλη αλληλοκάλυψη και ανάλογα μεγάλη κάλυψη. Ο τόνος B καλύπτει τον τόνο A. Στην περίπτωση (c), ο μεγαλύτερης έντασης τόνος B καλύπτει τον υψηλότερης συχνότητας τόνο A και στην περίπτωση (d), ο μεγαλύτερης έντασης τόνος A δεν καλύπτει πλήρως τον χαμηλότερης συχνότητας τόνο B. Συνεπώς είναι ευκολότερη η κάλυψη ενός τόνου υψηλότερης συχνότητας από έναν τόνο χαμηλότερης συχνότητας. Όσο η ένταση ενός τόνου μεγαλώνει, τόσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα της ουράς του που μπορεί να προκαλέσει την κάλυψη ενός τόνου υψηλότερης συχνότητας.

Τα περιγράμματα του Σχήματος 6.9 απεικονίζουν το φαινόμενο της κάλυψης απλών τόνων και θορύβου περιορισμένου φάσματος.



Σχήμα 6.9

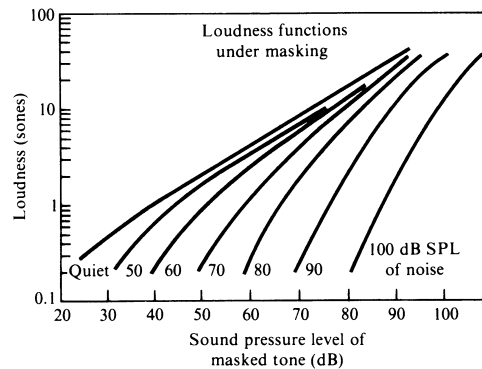
- (a) Κάλυψη από απλό τόνο συχνότητας 400Hz
 (b) από θόρυβο περιορισμένου φάσματος με κεντρική συχνότητα 410Hz

Η κάλυψη (σε dB) είναι η αύξηση της στάθμης ήχου ενός τόνου η οποία απαιτείται για να τον καταστήσει ακουστό στην παρουσία του τόνου που προκαλεί την κάλυψη. Στην παρουσία ενός τόνου στάθμης 60dB (Σχήμα 6.9 (α)), ένας τόνος 500Hz θα χρειαζόταν 22dB περισσότερη στάθμη για να φθάσει το κατώφλι ακουστότητας, αλλά στην περίπτωση θορύβου περιορισμένου φάσματος (Σχήμα 6.9 (b)), το κατώφλι για έναν τόνο ίδιας συχνότητας ανεβαίνει στα 40dB. Οι βυθίσεις των περιγραμμάτων οφείλονται σε φαινόμενα συμβολής.

Μείωση ηχηρότητας λόγω κάλυψης

Οι ήχοι σπανίως ακούγονται απομονωμένοι. Η παρουσία άλλων ήχων όχι μόνο ανεβάζουν το κατώφλι ακοής ενός δεδομένου ήχου, αλλά γενικότερα μειώνουν την ηχηρότητά του. Το φαινόμενο αυτό μερικές φορές ονομάζεται *μερική κάλυψη* (*partial masking*).

Στο Σχήμα 6.10 φαίνεται κατά πόσο ο λευκός θόρυβος μειώνει τη φαινομενική ηχηρότητα ενός τόνου συχνότητας 1000Hz. Ξεκινώντας από αυξημένο κατώφλι ακουστότητας, ο μερικώς καλυμμένος τόνος διατηρεί την μη καλυμμένη ηχηρότητά του όταν η στάθμη του θορύβου είναι μικρότερη από 80dB.



Σχήμα 6.10

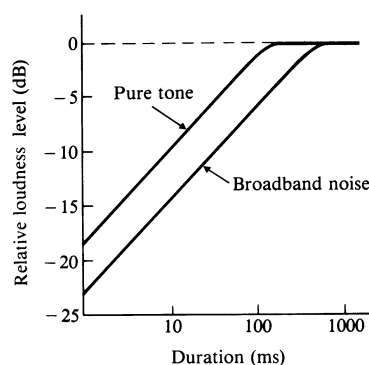
Συναρτήσεις ηχηρότητας για τόνο συχνότητας 1000Hz μερικώς καλυμμένο από λευκό θόρυβο σε διάφορες στάθμες πίεσης

Ηχηρότητα και διάρκεια: παλμικοί ήχοι και προσαρμογή

Πολλά πειράματα έχουν δείξει ότι το αυτί εξάγει τη μέση ηχητική ενέργεια που λαμβάνει σε διάστημα περίπου 0.2s (200ms). Συνεπώς η ηχηρότητα αυξάνει με τη διάρκεια μέχρι αυτή την τιμή. Η στάθμη ηχηρότητας θορύβου με ευρύ φάσμα εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη διάρκεια σε σχέση με την ηχηρότητα ενός απλού τόνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11.

Το αυτί, ως ευαίσθητο όργανο, χρειάζεται κάποιο μηχανισμό προστασίας προκειμένου να προστατεύεται από πολύ δυνατούς ήχους. Μέχρι 20dB προστασίας παρέχεται από τους μυς του τύμπανου και τα οστάρια στο μεσαίο αυτί. Όταν το αυτί εκτίθεται σε ήχους άνω των 85dB, οι μυς αυτοί τραβούν τα οστάρια με συνέπεια να απομονώνεται η ωοειδής θυρίδα του κοχλίου. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται *ακουστική αντίδραση (acoustic reflex)*.

Δυστυχώς η αντίδραση αυτή ξεκινά 30ms ή 40ms μετά την υπερφόρτωση ήχου και πλήρης προστασία λαμβάνει χώρα μετά από 150ms. Σε περίπτωση παλμικών ήχων (όπως μία έκρηξη ή ένας κρότος όπλου) είναι πολύ αργά για να προστατευτεί το αυτί.



Σχήμα 6.11

Μεταβολή της στάθμης ηχηρότητας με τη διάρκεια

Όπως και οι περισσότερες αισθήσεις, η αίσθηση ηχηρότητας μπορεί να μειωθεί με παρατεταμένη διέγερση. Αυτή η μείωση ονομάζεται *προσαρμογή (adaptation)*. Κάτω από τις περισσότερες συνθήκες ακρόασης όμως η προσαρμογή φαίνεται να είναι πολύ μικρή. Ένας

σταθερός τόνος στάθμης 50dB προκαλεί μικρή προσαρμογή, ενώ ένας τόνος του οποίου η στάθμη εναλλάσσεται μεταξύ 40dB και 60dB, η ηχηρότητά του φαίνεται να μειώνεται τα πρώτα 2 ή 3 λεπτά.

Η έκθεσή μας σε έναν δυνατό ήχο επηρεάζει την ικανότητά μας να ακούμε έναν άλλο ήχο κάποια στιγμή αργότερα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *κόπωση (fatigue)* και ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα *προσωρινή μετατόπιση ηχηρότητας (temporary loudness shift: TLS)* και *προσωρινή μετατόπιση κατωφλίου (temporary threshold shift: TTS)*.

7 Τονικό Ύψος και Ηχόχρωμα

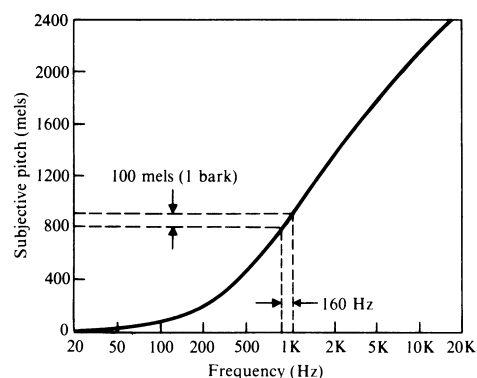
Κλίμακες

Το Εθνικό Ίδρυμα Προτύπων Αμερικής (ANSI) ορίζει το *τονικό ύψος* (*pitch*) ενός ήχου ως “ιδιότητα ακουστικής αίσθησης σύμφωνα με την οποία οι ήχοι μπορούν να καταταχθούν σε μία κλίμακα με έκταση από χαμηλά στα ψηλά”.

Το τονικό ύψος είναι υποκειμενική αίσθηση. Δύο άτομα τα οποία ακούν τον ίδιο ήχο ενδέχεται να τον κατατάξουν σε διαφορετική θέση σε μία τονική κλίμακα. Μερικοί ακροατές θα μπορούσαν ακόμα και να κατατάξουν τον ίδιο ήχο σε διαφορετικές θέσεις μίας κλίμακας, ανάλογα με το αν ο ήχος αυτός ακούγεται από το δεξί ή το αριστερό αυτί.

Η βασική μονάδα στις περισσότερες μουσικές κλίμακες είναι η *οκτάβα* (*octave*). Μουσικοί φθόγγοι οι οποίοι σχηματίζουν διάστημα μίας οκτάβας έχουν λόγο συχνοτήτων περίπου 2:1. Σφάλματα της τάξης μίας οκτάβας είναι συνήθη στην προσπάθεια εκτίμησης του τονικού ύψους μίας νότας. Στη δυτική μουσική η οκτάβα διαιρείται σε 12 διαστήματα τα οποία ονομάζονται *ημιτόνια* (*semitones*).

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει προκειμένου να καθιερωθεί μία κλίμακα ψυχοφυσικού τονικού ύψους. Αν ένας ακροατής ακούσει έναν απλό τόνο συχνότητας 4000Hz, ο οποίος ακολουθείται από έναν απλό τόνο χαμηλής συχνότητας και του ζητηθεί να ρυθμίσει έναν ταλαντωτή σε μία ενδιάμεση συχνότητα, η πιο πιθανή επιλογή θα είναι περίπου 1000Hz. Σε μία κλίμακα υποκειμενικού τονικού ύψους, η μέση συχνότητα μεταξύ 0 και 4000Hz είναι 1000Hz. Η μονάδα υποκειμενικού τονικού ύψους είναι το *mel*. Η κλίμακα είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε ο διπλασιασμός του αριθμού των mel να αντιστοιχεί σε διπλασιασμό του τονικού ύψους. Το εύρος 0 έως 2400mel αντιστοιχεί σε ένα εύρος συχνοτήτων 0 – 16kHz. Η αντιστοιχία μεταξύ των mel και των Hz δίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 7.1.



Σχήμα 7.1

Κλίμακες ύψους και συχνότητας. 100mel αντιστοιχούν σχεδόν στο πλάτος της κρίσιμης ζώνης το οποίο είναι 160Hz με κεντρική συχνότητα 1000Hz

Μία άλλη ψυχοφυσική κλίμακα βασίζεται στις κρίσιμες ζώνες ακοής. Η μονάδα που χρησιμοποιείται είναι το *bark* το οποίο αντιστοιχεί σε ένα κρίσιμο εύρος. Ένα bark είναι σχεδόν ίσο με 100 mel, συνεπώς οι δύο κλίμακες είναι αρκετά όμοιες.

Μία αριθμητική κλίμακα τονικού ύψους με μονάδα το mel δεν είναι τόσο χρήσιμη, όσο η αντίστοιχη αριθμητική κλίμακα ηχηρότητας με μονάδα το sone. Το τονικό ύψος συνήθως σχετίζεται με μουσικές τονικές κλίμακες όπου η οκτάβα, παρά το κρίσιμο εύρος, είναι το “φυσικό” διάστημα ύψους.

Διάκριση τονικού ύψους

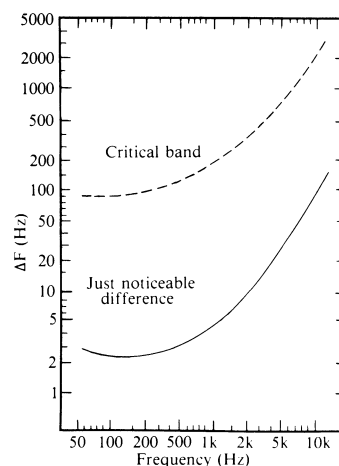
Στις ψυχοφυσικές μελέτες η ικανότητα διάκρισης μεταξύ δύο σχεδόν ίδιων ερεθισμάτων χαρακτηρίζεται από τη *μόλις αισθητή διαφορά* (*just noticeable difference: jnd* ή *difference limen*). Δύο ερεθίσματα θα θεωρηθούν “ίδια” αν διαφέρουν λιγότερο από αυτή τη διαφορά.

Το jnd για το τονικό ύψος εξαρτάται από τη συχνότητα, τη στάθμη ήχου, τη διάρκεια και από το πόσο ξαφνικά συντελούνται οι αρμονικές μεταβολές ενός ήχου. Επίσης εξαρτάται από την μουσική εξάσκηση του ακροατή και σε έναν βαθμό από τον τρόπο μέτρησης.

Το Σχήμα 7.2 απεικονίζει το μέσο jnd (τεσσάρων ατόμων) για απλούς τόνους στάθμης 80dB. Από 1000Hz έως 4000Hz, το jnd είναι περίπου 0.5 % της συχνότητας του απλού τόνου, περίπου 1/12 του ημιτόνιου. Μερικές φορές χρησιμοποιείται ο όρος *ανάλυση συχνότητας* (*frequency resolution*) για το λόγο $\Delta f/f$.

Συγκρίνοντας τα δύο περιγράμματα του Σχήματος 7.2, το κρίσιμο εύρος είναι περίπου ίσο με 30jnd σε όλες τις συχνότητες. Το γεγονός αυτό ενισχύει την υπόθεση ότι ο μηχανισμός του αυτιού υπεύθυνος για τις κρίσιμες ζώνες, είναι επίσης υπεύθυνος για τη διάκριση τονικού ύψους. Πιθανότατα αυτό να έχει σχέση με περιοχές ερεθισμού κατά μήκος της βασικής μεμβράνης.

Σε σύγκριση με τη διάκριση χρώματος, το ορατό φάσμα έχει έκταση μίας οκτάβας και περιέχει 128jnd (διακριτά χρώματα). Το ακουστικό φάσμα καλύπτει περίπου 10 οκτάβες και περιέχει 5000jnd.



Σχήμα 7.2

Μόλις αισθητή διαφορά (jnd) συχνότητας καθορισμένη διαμορφώνοντας τη συχνότητα ενός τόνου 4Hz. Το jnd σε κάθε συχνότητα είναι ένα σταθερό ποσοστό του κρίσιμου εύρους

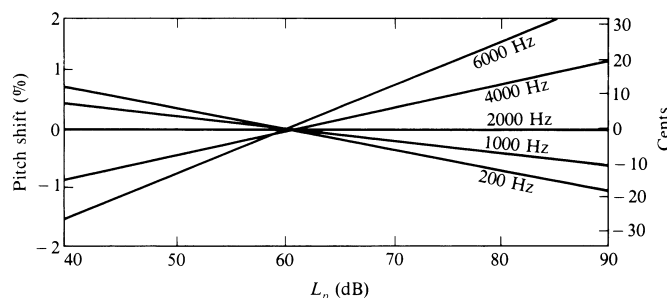
Τονικό ύψος απλών τόνων

Το τονικό ύψος ενός απλού τόνου εξαρτάται κυρίως από τη συχνότητα. Εξάρτηση υπάρχει επίσης από άλλα φυσικά μεγέθη όπως η πίεση ήχου, η διάρκεια, η περιβάλλουσα και η παρουσία άλλων ήχων.

Τονικό ύψος και στάθμη ήχου

Παλαιότερα πειράματα τα οποία διεξάχθηκαν για την έρευνα εξάρτησης του τονικού ύψους από τη στάθμη ήχου ανέφεραν αρκετά μεγαλύτερη εξάρτηση από ότι πιο πρόσφατες μελέτες. Τα πρώτα πειράματα του Stevens (1935) έδειξαν μεταβολές μέχρι και 2 ημιτόνια (φαινομενική μεταβολή συχνότητας της τάξης του 12%), καθώς η στάθμη απλών τόνων μεταβαλλόταν από 40dB σε 90dB. Το ύψος τόνων χαμηλής συχνότητας μειωνόταν με αυξανόμενη ένταση, το ύψος τόνων υψηλής συχνότητας αυξάνονταν με την ένταση και το ύψος μεσαίων συχνοτήτων (1-2kHz) έδειξε μικρή διαφοροποίηση (νόμος του Stevens). Ο Stevens μέτρησε τη μέγιστη πτώση ύψους στα 150Hz και την μεγαλύτερη αύξηση γύρω στα 8000Hz.

Πιο πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι το φαινόμενο είναι περιορισμένο, ακόμα και για απλούς τόνους, διαφέροντας ανάλογα με τον ακροατή. Σε ένα πείραμα, πέντε μουσικά εκπαιδευμένοι ακροατές διέκριναν πτώσεις τονικού ύψους από 0 μέχρι 75 cents (75 cents = 3/4 ημιτόνιου), όταν η στάθμη ενός τόνου 250Hz αυξήθηκε από 40dB σε 90dB. Ενώ η διαφοροποίηση τονικού ύψους φαίνεται να ακολουθεί το νόμο του Stevens, ο μέσος όρος που εξάγεται από πολλούς ακροατές δείχνει ότι οι μεταβολές είναι πάρα πολύ μικρές. Το Σχήμα 7.3 δείχνει τις μεταβολές ύψους απλών τόνων για συχνότητες από 200Hz μέχρι 6000Hz για 15 ακροατές.



Σχήμα 7.3

Μεταβολή τονικού ύψους σε συνάρτηση με τη στάθμη πίεσης ήχου. Τα περιγράμματα βασίζονται σε δεδομένα από 15 άτομα

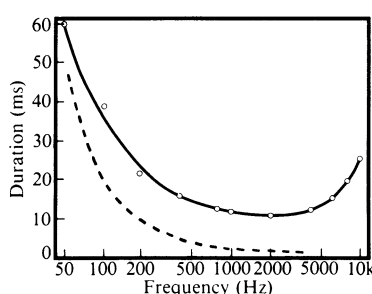
Οι μικρές διαφοροποιήσεις τονικού ύψους που απεικονίζονται στο Σχήμα 7.3, όπως και αυτές που παρατηρήθηκαν από παλαιότερους ερευνητές, αναφέρονται σε απλούς τόνους. Λιγότερες πληροφορίες είναι γνωστές για το φαινόμενο αυτό σε σύνθετους τόνους. Μελέτες με μουσικά όργανα έχουν γενικά δείξει πάρα πολύ μικρές διαφοροποιήσεις με την ένταση (περίπου 17 cents για αύξηση από 65dB στα 95dB). Κατά πόσο το ύψος ενός σύνθετου τόνου αυξάνεται ή μειώνεται με την αύξηση της έντασης φαίνεται να εξαρτάται από το ποιοι μερικοί έχουν μεγαλύτερη ένταση (άνω ή κάτω από 1000Hz). Ευτυχώς οι μεταβολές ύψους στην περίπτωση σύνθετων τόνων είναι πολύ μικρή, διαφορετικά η εκτέλεση μουσικής θα ήταν πολύ δύσκολη, αν υπήρχαν μεγάλες μεταβολές κατά τη διάρκεια δυναμικών διαφοροποιήσεων.

Σε αντίθεση με το Σχήμα 7.3, αυξάνοντας την ένταση σύντομων παλμών προκαλείται μείωση του ύψους σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

Το φαινόμενο διαφοροποίησης τονικού ύψους έχει επίσης παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια φθίνουσας αντήχησης, το οποίο εν μέρη μπορεί να οφείλεται στη μείωση της στάθμης ήχου αλλά και σε άλλα φαινόμενα. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται έντονα κατά την ακρόαση εκκλησιαστικού οργάνου σε εκκλησίες με μεγάλους χρόνους αντήχησης. Το ύψος σε αυτή την περίπτωση φαίνεται να αυξάνεται με τη μείωση της έντασης μετά από μία δυνατή συγχορδία.

Τονικό ύψος και διάρκεια

Αν και παλαιότερα πειράματα που διεξάχθηκαν από τον Savart (1840) έδειξαν ότι η αίσθηση του τονικού ύψους αναπτύσσεται μετά από δύο μόνο κύκλους, πιο πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι απαιτείται μεγαλύτερη διάρκεια (Σχήμα 7.4).



Σχήμα 7.4

Η διάρκεια ενός τόνου η οποία απαιτείται για τη δημιουργία καθορισμένου τονικού ύψους. Το συνεχές περίγραμμα εξάχθηκε από πρόσφατες έρευνες (Bürgck 1935), ενώ το διακεκομμένο περίγραμμα απεικονίζει τη διάρκεια δύο κύκλων (Savart 1840)

Η μεταβολή ενός ήχου από ένα “κλικ” σε τόνο εξαρτάται από τη στάθμη ήχου. Αν ο ήχος δεν ξεκινά απότομα αλλά με “μαλακό” ξεκίνημα, αναγνώριση τόνου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα σε 3ms, χρόνος μικρότερος του χρόνου ανάπτυξης του ήχου των περισσότερων μουσικών οργάνων.

Τονικό ύψος και περιβάλλουσα

Το φαινομενικό τονικό ύψος ενός σύντομου εκθετικά φθίνοντος ημιτονοειδή τόνου είναι υψηλότερο από αυτό ενός ημιτονοειδή τόνου ίδιας συχνότητας και ενέργειας, ο οποίος όμως ξεκινά και σταματά απότομα. Το ίδιο φαινόμενο έχει διαπιστωθεί στην περίπτωση ενός εκθετικά αναπτυσσόμενου ημιτονοειδή τόνου. Η μεταβολή του ύψους εξαρτάται επίσης από τη στάθμη ήχου και τον ρυθμό μεταβολής της στάθμης. Η εξάρτηση του ύψους από την περιβάλλουσα δεν έχει εξηγηθεί πλήρως, αλλά κατά πάσα πιθανότητα σχετίζεται με την εξάρτηση του ύψους από την ένταση ήχου.

Η επιρροή συμβολής ήχων

Οι ήχοι σπάνια ακούγονται σε απομόνωση. Ένας άλλος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει το τονικό ύψος ενός απλού τόνου είναι η παρουσία άλλων ήχων. Τα γενικά συμπεράσματα πειραμάτων με την παρεμβολή ενός δευτέρου τόνου αλλά και με θόρυβο είναι τα εξής:

1. Αν ο παρεμβαλλόμενος τόνος έχει συχνότητα μικρότερη από αυτή του κυρίως τόνου παρατηρείται πάντα αύξηση ύψους.
2. Αν ο παρεμβαλλόμενος τόνος έχει συχνότητα μεγαλύτερη από αυτή του κυρίως τόνου παρατηρείται μείωση ύψους στις χαμηλές συχνότητες.

3. Ο παρεμβαλλόμενος θόρυβος προκαλεί πάντα αύξηση του τονικού ύψους, αν έχει συχνότητα χαμηλότερη από αυτή του κυρίως τόνου (αλλά αν έχει υψηλότερη συχνότητα μπορεί να υπάρχει αύξηση ή μείωση).
4. Η μεταβολή του τονικού ύψους αυξάνει ανάλογα με το ποσό κατά το οποίο η στάθμη του παρεμβαλλόμενου τόνου ή θορύβου είναι μεγαλύτερη από αυτή του κυρίως ήχου.

Τονικό ύψος σύνθετων τόνων: φαινομενικό ύψος

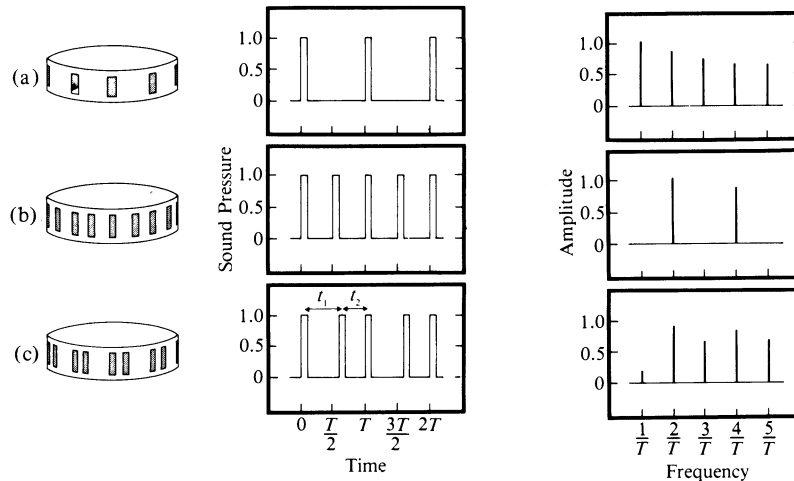
Όταν στο αυτί παρουσιάζεται ένας τόνος ο οποίος συντίθεται από σαφώς καθορισμένες αρμονικές, εύκολα υποθέτουμε ότι το τονικό ύψος που θα ακουστεί θα είναι αυτό της θεμελιώδους αρμονικής. Το αυτί μπορεί να καθορίσει το ύψος της θεμελιώδους ακόμα και όταν αυτή έχει πολύ χαμηλή ένταση, αλλά και στην περίπτωση που απουσιάζει. Για παράδειγμα, αν στο αυτί παρουσιαστεί ένας ήχος με αρμονικές συχνότητας 600Hz, 800Hz, 1000Hz και 1200Hz, το τονικό ύψος που θα αναγνωριστεί θα είναι σχεδόν πάντα αυτό ενός τόνου συχνότητας 200Hz, της “χαμένης θεμελιώδους”. Αυτό είναι ένα παράδειγμα *φαινομενικού ύψους (virtual pitch)*, αφού το αντιλαμβανόμενο ύψος δεν αντιστοιχεί σε κανέναν μερικό του σύνθετου τόνου. Η ικανότητα του αυτιού να καθορίζει το φαινομενικό ύψος, δίνει τη δυνατότητα στα πολύ μικρά ηχεία φορητών ραδιοφώνων να παράγουν μπάσους τόνους και αποτελεί τη βάση για ορισμένους συνδυασμούς στο εκκλησιαστικό όργανο.

Αν μία δυνατή αρμονική δεν απαιτείται για την αναγνώριση του ύψους ενός μουσικού τόνου, το ερώτημα είναι ποιες αρμονικές είναι πιο σημαντικές. Πειράματα έδειξαν ότι για τόνους με θεμελιώδη συχνότητα f_0 μέχρι 200Hz, το τονικό ύψος καθορίζεται κυρίως από την τέταρτη και πέμπτη αρμονική. Όσο η συχνότητα της θεμελιώδους αρμονικής αυξάνει, ο αριθμός των κυρίαρχων αρμονικών μειώνεται, εξαρτώμενο από τη θεμελιώδη σε συχνότητα 2500Hz και άνω. Για παράδειγμα, με θεμελιώδη συχνότητα $f_0 = 220\text{Hz}$, αν η συχνότητα της τέταρτης και πέμπτης αρμονικής αυξηθεί, το πιο πιθανό είναι ότι το ύψος του τόνου φαινομενικά θα αυξηθεί αν και η θεμελιώδης συχνότητα παρέμεινε αμετάβλητη.

Όταν οι μερικοί ενός τόνου δεν είναι αρμονικοί, ο καθορισμός του τονικού ύψους είναι περισσότερο σύνθετος. Σύμφωνα με πρόσφατες θεωρίες, το αυτί ανιχνεύει μία σειρά από σχεδόν αρμονικούς μερικούς κάπου κοντά το κέντρο του ακουστικού φάσματος και καθορίζει το ύψος ως τον μεγαλύτερο κοινό παράγοντα της σειράς των αρμονικών αυτών. Μουσικά παραδείγματα της ικανότητας του ακουστικού συστήματος να καθορίζει το φαινομενικό ύψος από σχεδόν αρμονικούς μερικούς σε σύνθετους τόνους είναι ο ήχος της καμπάνας.

Η σειρά του Seebeck και ο νόμος του Ohm

Στα μέσα του 18^{ου} αιώνα, στα πλαίσια ερευνών για την αντίληψη τονικού ύψους ο Seebeck, πραγματοποίησε μια σειρά πειραμάτων με σημαντικά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 7.5 φαίνεται η διάταξη σειράς η οποία χρησιμοποιήθηκε ως πηγή ήχου.



Σχήμα 7.5

Τρεις διαφορετικές σειρήνες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν από τον Seebeck με τις κυματομορφές και τα φάσματα που παράγουν

Η σειρήνα του Σχήματος 7.5(a) αποτελείται από ένα δίσκο με τακτά κατανομημένες παραλληλεπίπεδες οπές, οι οποίες κατά την περιστροφή του δίσκου παράγουν παλμούς πεπιεσμένου αέρα. Ο Seebeck παρατήρησε ότι ο ήχος της σειρήνας είχε τονικό ύψος το οποίο αντιστοιχούσε στο χρόνο μεταξύ των παλμών αέρος. Διπλασιάζοντας τις οπές όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.5(b), το τονικό ύψος αυξήθηκε κατά μία οκτάβα όπως ήταν αναμενόμενο. Στην περίπτωση του Σχήματος 7.5(c), το διάστημα μεταξύ των οπών είναι άνισο. Το τονικό ύψος σε αυτή την περίπτωση είναι αυτό που παράχθηκε από τη σειρήνα του Σχήματος 7.5(a). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί παρατηρώντας ότι η περίοδος της κυματομορφής του Σχήματος 7.5(c) (t_1+t_2) είναι ίση με αυτή του Σχήματος 7.5(a). Συνεπώς, οι δύο ήχοι θα έχουν τις ίδιες αρμονικές, αλλά με διαφορετική αναλογία (για παράδειγμα, η ένταση της θεμελιώδους στην περίπτωση (c) είναι πολύ μικρότερη από την περίπτωση (a)).

Την ίδια εποχή ο Ohm εφάρμοσε το θεώρημα αρμονικής ανάλυσης του Fourier στην ακουστική, διατυπώνοντας αυτό που συχνά ονομάζεται “ακουστικός νόμος του Ohm”. Ο Ohm πίστευε, ότι το τονικό ύψος που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη συχνότητα μπορούσε μόνο να ακουστεί αν το ακουστικό κύμα περιλάμβανε ισχύ σε αυτή τη συχνότητα. Συνεπώς, κατέκρινε τον Seebeck ο οποίος υποστήριζε ότι το τονικό ύψος οφείλεται στην περιοδικότητα ενός κύματος, υποστηρίζοντας ότι η θεμελιώδης συχνότητα είναι αυτή που καθορίζει τον ύψος ενός ήχου. Η θεμελιώδης στο φάσμα του Σχήματος 7.5(c) όμως ήταν πολύ αδύναμη για να εξηγηθεί το τονικό ύψος με τον νόμο του Ohm και έτσι τελικά ο Ohm υποστήριξε ότι το φαινόμενο αυτό οφείλονταν σε ακουστική ψευδαίσθηση.

Αργότερα ο Helmholtz υποστήριξε τον νόμο του Ohm, εισάγοντας τη σημαντική θεωρία της παραμόρφωσης που παράγει το ίδιο το αυτί, κατά τη διαδικασία αντίδρασης σε έναν ήχο. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, για έναν απλό τόνο το αυτί παράγει αρμονικές ως αποτέλεσμα αυτής της παραμόρφωσης (αρμονική παραμόρφωση). Στην περίπτωση όμως των κυμάτων των περιπτώσεων (a) και (c), θα υπήρχε τέτοια παραμόρφωση η οποία θα είχε ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της θεμελιώδους αρμονικής.

Θεωρίες τονικού ύψους: ύψος περιοχής και ύψος περιοδικότητας

Δύο σημαντικές θεωρίες σχετικά με την αντίληψη τονικού ύψους έχουν σταδιακά αναπτυχθεί μετά από πολυάριθμα πειράματα. Η *θεωρία περιοχής* (συχνότητας) και η *θεωρία της περιοδικότητας* (χρόνου).

Στη *θεωρία περιοχής* (*place theory*), υποστηρίζεται ότι δονήσεις διαφορετικών συχνοτήτων διεγείρουν διαφορετικές περιοχές της βασικής μεμβράνης. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, ο κοχλίας μετατρέπει μία δόνηση στο χρόνο σε ένα ίχνος δόνησης στο χώρο (κατά μήκος της βασικής μεμβράνης) και αυτό με τη σειρά του προκαλεί νευρική δραστηριότητα στο ακουστικό νεύρο. Η θεωρία αυτή εξηγεί πολλά, αλλά όχι όλα τα φαινόμενα ακουστικής αντίληψης.

Ο Helmholtz θεωρούσε τη βασική μεμβράνη σαν έναν αναλυτή συχνότητας με εγκάρσιες ίνες, οι οποίες μπορούσαν να συντονιστούν σε διάφορες συχνότητες ανάλογα με το μήκος, τη μάζα και την τάση τους. Ένας σύνθετος ήχος μπορεί να διεγείρει τα τμήματα αυτά της βασικής μεμβράνης των οποίων η συχνότητα συντονισμού αντιστοιχεί στις μερικές συχνότητες του ήχου. Οι υψηλές συχνότητες δρουν κοντά στην ωοειδή θυρίδα, ενώ οι χαμηλές συχνότητες δρουν κοντά στο άλλο άκρο της μεμβράνης όπου είναι παχιά και χαλαρή (η υπόθεση αυτή ήταν σχεδόν σωστή όπως απέδειξαν αργότερα άλλοι ερευνητές, με εξαίρεση το γεγονός ότι οι ίνες δεν είναι ελεύθερες ώστε να συντονίζονται ανεξάρτητα, αλλά η μεμβράνη σαν ένα αντικείμενο μπορεί να συντονιστεί σε διάφορες συχνότητες).

Πρόσφατα πειράματα υπέδειξαν τους περιορισμούς της θεωρίας περιοχής. Μία δυσκολία έγκειται στην εξήγηση της δυνατότητας του αυτιού να διακρίνει πολύ μικρές μεταβολές συχνότητας. Προκειμένου ένας συντονιστής να μπορεί να αντιδρά σε γρήγορες μεταβολές πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη απόσβεση. Αλλά η απόσβεση μειώνει την επιλεκτικότητα, δηλαδή τη δυνατότητα διάκρισης μικρών μεταβολών συχνότητας. Μία άλλη δυσκολία έγκειται στην εξήγηση της αντίληψης ενός σύνθετου ήχου ως μία οντότητα με ένα τονικό ύψος.

Σύμφωνα με τη *θεωρία της περιοδικότητας*, το αυτί λειτουργεί ως αναλυτής χρόνου στον εισερχόμενο ήχο. Ενδεχομένως, η χρονική κατανομή των ηλεκτρικών παλμών που μεταδίδονται στο ακουστικό νεύρο να περιέχει πληροφορίες σχετικά με τη χρονική κατανομή του ακουστικού κύματος. Αυτή η πληροφορία αποκωδικοποιείται με τη λειτουργία του *αυτοσυσχετισμού* (*autocorrelation*) στο κεντρικό ακουστικό σύστημα.

Η σημασία κάποιου είδους κεντρικού επεξεργαστή τονικού ύψους στο νευρικό σύστημα έχει τονιστεί με πειράματα, όπου μία αρμονική ενός ήχου με χαμένη θεμελιώδη παρουσιάζεται στο ένα αυτί ενώ μία δεύτερη αρμονική του ίδιου ήχου στο άλλο. Το φαινομενικό ύψος που ακούγεται με αυτό τον τρόπο είναι όσο συγκεκριμένο είναι και στην περίπτωση που οι δύο αυτές αρμονικές ακουστούν από το ένα αυτί μόνο.

Το αυτί πραγματοποιεί ανάλυση χρόνου και συχνότητας προκειμένου να καθορίσει το τονικό ύψος ενός ήχου. Αν και η αντίληψη του τονικού ύψους εξαρτάται από πληροφορίες που προέρχονται και από τους δύο μηχανισμούς, κάτω από ορισμένες συνθήκες ένας από τους δύο υπερσχύει. Για χαμηλές συχνότητες η θεωρία της περιοδικότητας φαίνεται να έχει μεγαλύτερη βαρύτητα, ενώ για υψηλές συχνότητες η ανάλυση συχνοτήτων που πραγματοποιεί η βασική μεμβράνη είναι πιο σημαντική. Η σχετική σημασία των δύο αυτών μηχανισμών καθώς και το εύρος συχνοτήτων όπου υπερσχύουν δεν είναι ακόμα γνωστά.

Απόλυτο ύψος

Ο όρος *απόλυτο ύψος* (*absolute pitch*) αναφέρεται στην ικανότητα αναγνώρισης του τονικού ύψους ενός ήχου χωρίς τη χρήση ήχου αναφοράς. Η ικανότητα αυτή συγκρίνεται συνήθως με την ικανότητα απόλυτης αναγνώρισης χρώματος, χωρίς καμία σύγκριση με κάποιο δεδομένο φάσμα. Ενώ το απόλυτο χρώμα συναντάται σε 98% του πληθυσμού, η ικανότητα απόλυτου ύψους είναι σπάνια, με ποσοστό μικρότερο του 0.01%.

Τα περισσότερα άτομα έχουν την ικανότητα σχετικού ύψους σε κάποιο βαθμό. Σχεδόν όλοι μπορούν να αναγνωρίσουν έναν τόνο ως υψηλότερο ή χαμηλότερο από έναν άλλο και άτομα με μουσική εκπαίδευση μπορούν να αναγνωρίσουν διαστήματα με διάφορους βαθμούς ακρίβειας. Η ικανότητα σχετικού ύψους είναι μία αξιοσημείωτη ικανότητα της ακουστικής αίσθησης, χωρίς να υπάρχει αντίστοιχη σε άλλες αισθήσεις. Για παράδειγμα, κανείς δεν μπορεί να κρίνει ότι ένα χρώμα έχει διπλάσια συχνότητα από ένα χρώμα αναφοράς.

Οι ψυχολόγοι επί 75 χρόνια προσπαθούν να εξηγήσουν το φαινόμενο του απόλυτου ύψους, χωρίς όμως να υπάρχει ακόμα μία ολοκληρωμένη εξήγηση για το φαινόμενο αυτό. Τέσσερις σημαντικές θεωρίες για την εξήγηση του φαινομένου είναι οι εξής:

1. *Θεωρία κληρονομικότητας*. Η ικανότητα κληρονομείται όπως η ικανότητα αναγνώρισης χρώματος. Το παιδί μαθαίνει τις ονομασίες ύψους σε πρώιμο στάδιο της ηλικίας του, όπως μαθαίνονται και τα χρώματα.
2. *Θεωρία εκμάθησης*. Η αντίθετη άποψη, σύμφωνα με την οποία η ικανότητα απόλυτου ύψους αποκτάται με την κατάλληλη εκπαίδευση.
3. *Θεωρία απεκμάθησης*. Υπάρχει ικανότητα ανάπτυξης απόλυτου ύψους, αλλά δεν καλλιεργείται στις περισσότερες περιπτώσεις σε μικρή ηλικία (δίνοντας έμφαση για παράδειγμα στο σχετικό ύψος).
4. *Θεωρία αποτύπωσης*. Ο όρος αποτύπωση αναφέρεται στη διαδικασία γρήγορης μη αναστρέψιμης εκμάθησης, η οποία λαμβάνει χώρα σε κάποιο συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης. Οι οπαδοί αυτής της θεωρίας πιστεύουν ότι όλα τα παιδιά μπορούν να διδαχθούν απόλυτο ύψος στο κατάλληλο στάδιο ανάπτυξής τους.

Τουλάχιστον ένα άτομο με απόλυτο ύψος έχει αναφέρει μεταβολή της ικανότητας αναγνώρισης με την πάροδο του χρόνου. Στην ηλικία των 52 ετών, παρατήρησε μία τάση να αποδίδει τονικό ύψος υψηλότερο κατά ένα ημιτόνιο από αυτό που αναγνώριζε μέχρι εκείνη την ηλικία. Στην ηλικία των 71 ετών, ανέφερε επιπλέον αύξηση της τάξης του ενός ημιτονίου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη μεταβολή ελαστικότητας της βασικής μεμβράνης με την ηλικία, συνεπώς η ίδια συχνότητα προκαλεί διέγερση σε διαφορετική περιοχή της βασικής μεμβράνης.

Πρότυπα τονικού ύψους

Τα πλεονεκτήματα ενός διεθνούς τονικού προτύπου είναι τόσο φανερά, που είναι αξιοσημείωτη η έλλειψή του για τόσο πολλά χρόνια. Τα εκκλησιαστικά όργανα ήταν κατασκευασμένα με το A (νότα λα) κουρδισμένα σε συχνότητα από 374Hz σε 567Hz (Helmholtz 1877). Το 1619 ο Praetorius πρότεινε συχνότητα 424Hz. Το διαπασών του Handel δονούνταν σε συχνότητα 422.5Hz. Αυτό το πρότυπο ύψους επικράτησε περίπου 2 αιώνες και είναι αυτό το πρότυπο με το οποίο συνέθεσαν τα έργα τους ο Hayden, ο Mozart, ο Bach και ο Beethoven.

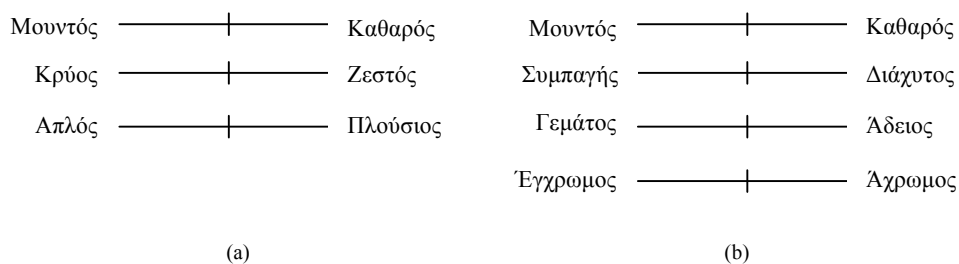
Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα το ύψος άρχισε να ανεβαίνει, πιθανόν λόγω της αυξημένης χρήσης χάλκινων οργάνων, τα οποία ηχούσαν περισσότερο λαμπρά σε υψηλότερο τονικό ύψος. Το 1859 μία επιτροπή η οποία συστάθηκε από τη Γαλλική κυβέρνηση (στην οποία συμμετείχαν ο Berlioz, ο Meyerbeer και ο Rossini), επέλεξε τη συχνότητα των 435Hz σαν πρότυπο ύψος. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα καθορίστηκε ένα “επιστημονικό ύψος”, όπου όλα τα C (νότα ντο) ήταν δυνάμεις του 2 (128, 256, 512 κλπ), το οποίο οδηγεί σε συχνότητα 431Hz για το A.

Το 1939 στο Λονδίνο, ένα διεθνές συνέδριο υιοθέτησε τη συχνότητα των 440Hz ως πρότυπο συχνότητας για το A₄, το οποίο χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα παγκοσμίως. Μερικές ορχήστρες τείνουν να κουρδίζουν τα όργανά τους σε συχνότητα 442Hz ή ακόμα 444Hz για μεγαλύτερη λαμπρότητα. Δυστυχώς, μουσικά όργανα τα οποία είναι σχεδιασμένα για ένα συγκεκριμένο κούρδισμα, ίσως να μη μπορούν να διατηρήσουν την ηχητική τους ποιότητα αλλά και την τονικότητά τους όταν κουρδιστούν διαφορετικά. Οι άριες του Mozart και του Beethoven τραγουδιούνται ένα ημιτόνιο ψηλότερα από ότι είχαν γραφτεί και τα περισσότερα παλαιά βιολιά κορυφαίων κατασκευαστών, χρειάστηκαν ειδική ενίσχυση για να μπορέσουν να αντέξουν την αυξημένη τάση από τα σημερινά υψηλότερα κούρδισματα.

Ηχώχρωμα

Το Εθνικό Ίδρυμα Προτύπων Αμερικής (ANSI) ορίζει το *ηχώχρωμα* (*timbre*) ενός ήχου ως “ιδιότητα ακουστικής αίσθησης σύμφωνα με την οποία δύο ήχοι ίδιας ηχηρότητας και τονικού ύψους ομοίως παρουσιασμένοι κρίνονται ως διαφορετικοί”. Επιπλέον, “το ηχώχρωμα εξαρτάται κυρίως από το φάσμα του ερεθίσματος, αλλά επίσης εξαρτάται από την κυματομορφή, την πίεση ήχου, την περιοχή συχνοτήτων του φάσματος και τα χρονικά χαρακτηριστικά του ερεθίσματος”.

Το ηχώχρωμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως “πολυδιάστατο χαρακτηριστικό” του ήχου. Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μία υποκειμενική κλίμακα όπως στην περίπτωση της ηχηρότητας (sones) και του τονικού ύψους (mels). Δύο πρόσφατες προσπάθειες απεικονίζονται στο Σχήμα 7.6. Και στις δύο περιπτώσεις η κλίμακα *Μουντός-Καθαρός* κρίθηκε ως η σημαντικότερη.



Σχήμα 7.6
Υποκειμενικές κλίμακες ηχοχρώματος
(a) Pratt και Doak, 1976 (b) von Bismarck, 1974

Σημαντική είναι η διάκριση του ηχοχρώματος *σταθερών* σύνθετων τόνων από το ηχώχρωμα σύνθετων τόνων που περιέχουν *μεταβατικά* (χρονικές διαφοροποιήσεις). Ο Plomp (1970) πρότεινε την πιθανότητα χρήσης του ηχοχρώματος για αναφορά στις αντιλαμβανόμενες διαφορές μεταξύ σταθερών σύνθετων τόνων. Η πρόταση αυτή δεν έχει γίνει αποδεκτή ευρέως.

Λεπτομερή έρευνα για το ηχόχρωμα σταθερών τόνων έχει πραγματοποιηθεί από τον Helmholtz (1877). Ο Helmholtz έδειξε ότι ο ήχος των περισσότερων μουσικών οργάνων (περιλαμβανομένου του ήχου των φωνητικών χορδών), αποτελείται από μία σειρά αρμονικών οι οποίες καθορίζουν το ηχόχρωμά τους. Επιπλέον, περιέγραψε τον τρόπο με τον οποίο το αυτί θα μπορούσε να ερμηνεύσει το ηχόχρωμα ενός ήχου. Βάση των πειραμάτων του εξήγαγε τους παρακάτω κανόνες:

1. Απλοί τόνοι, όπως αυτοί του διαπασών, έχουν απαλό ευχάριστο ήχο, χωρίς τραχύτητα, αλλά είναι μουντοί στις χαμηλές συχνότητες.
2. Μουσικοί τόνοι με μέτρια δυνατές αρμονικές μέχρι και την 6^η (όπως αυτοί του πιάνου, του Γαλλικού κόρνου και της ανθρώπινης φωνής), ηχούν πιο πλούσιοι και πιο μουσικοί από τους περισσότερους απλούς τόνους, παραμένοντας γλυκοί και μαλακοί όταν οι υψηλότερες αρμονικές απουσιάζουν.
3. Τόνοι οι οποίοι αποτελούνται μόνο από περιττές αρμονικές (κλαρινέτο) ηχούν κούφιοι και στην περίπτωση που πολλές αρμονικές είναι παρούσες, ένρινοι. Όταν η θεμελιώδης κυριαρχεί, η ποιότητα του ήχου είναι πλούσια, ενώ όταν η θεμελιώδης δεν είναι αρκετά δυνατή, η ποιότητα του ήχου είναι κακή.
4. Σύνθετοι τόνοι με δυνατές αρμονικές πέρα της 6^{ης} και της 7^{ης} έχουν καλή διακριτικότητα, αλλά είναι τραχείς με αιχμηρή ποιότητα ήχου.

Ο Helmholtz συνέχισε τα πειράματά του προκειμένου να προσδιορίσει την εξάρτηση του τονικού ύψους από τη σχετική φάση των αρμονικών. Συμπέρανε ότι το ηχόχρωμα δεν εξαρτάται από τη φάση των αρμονικών, αν και στα πειράματά του δεν μπόρεσε να ανιχνεύσει μικρές μεταβολές της φάσης, με συνέπεια να παραβλέψει μερικά ενδιαφέροντα δυναμικά φαινόμενα φάσης. Αν και η φάση των αρμονικών ενός ήχου έχει μικρή επίδραση στο ηχόχρωμα, το αυτί είναι ευαίσθητο στη μεταβολή της φάσης, ειδικά όταν η μεταβολή αυτή είναι περιοδική. Οι μελέτες του Helmholtz ήταν τόσο ολοκληρωμένες, που μέχρι το 1950 λίγες νέες σημαντικές πληροφορίες εμφανίστηκαν στη βιβλιογραφία.

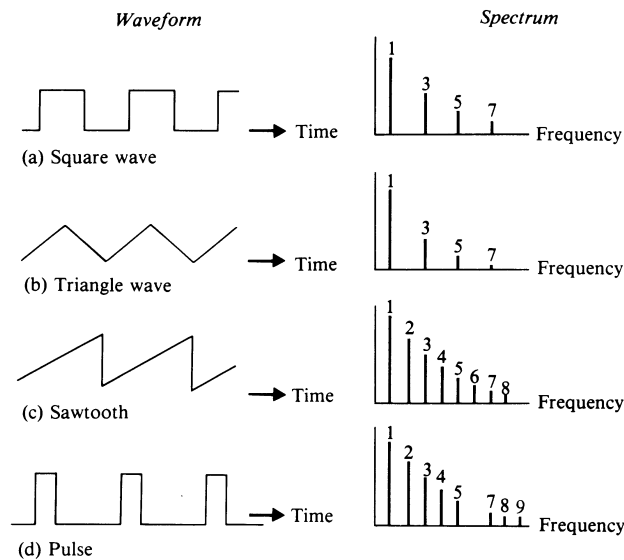
Ανάλυση Fourier σύνθετων τόνων

Ο προσδιορισμός των αρμονικών συστατικών μίας περιοδικής κυματομορφής ονομάζεται *ανάλυση Fourier*, από τον μαθηματικό Joseph Fourier (1768-1830) ο οποίος διατύπωσε το εξής θεώρημα:

Οποιαδήποτε περιοδική δόνηση, οσοδήποτε πολύπλοκη, μπορεί να δομηθεί από μία σειρά απλών δονήσεων των οποίων οι συχνότητες είναι αρμονικές μίας θεμελιώδους συχνότητας, δεδομένου ότι οι αρμονικές αυτές έχουν το κατάλληλο πλάτος και φάση.

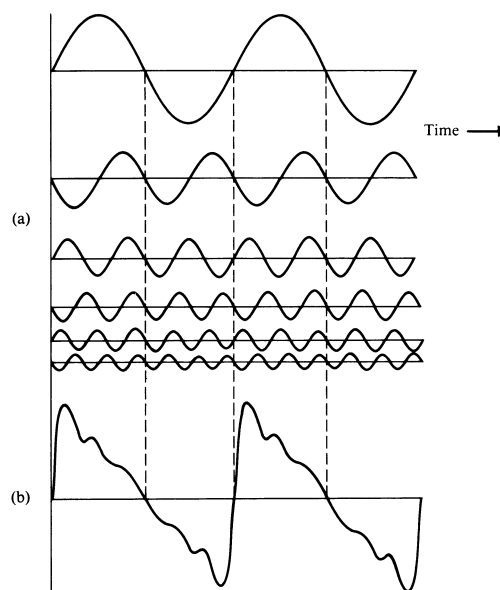
Η δόμηση ενός σύνθετου ήχου από τις αρμονικές του (το αντίθετο από την ανάλυση Fourier) ονομάζεται *σύνθεση Fourier*. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται οι όροι *ανάλυση φάσματος* (*spectrum analysis*), *αρμονική ανάλυση* (*harmonic analysis*) και *ανάλυση ήχου* (*sound analysis*) για να περιγράψουν την ανάλυση Fourier ενός ήχου. *Φάσμα* (*spectrum*) ονομάζεται το γράφημα όπου απεικονίζεται η σχετική δύναμη των αρμονικών.

Στο Σχήμα 7.7 απεικονίζονται φάσματα τεσσάρων διαφορετικών σύνθετων κυματομορφών. Οι κυματομορφές αυτές χρησιμοποιούνται συχνά στη σύνθεση ηλεκτρονικών ήχων. Η τετραγωνική κυματομορφή αποτελείται μόνο από περιττές αρμονικές με λόγο αρμονικών $1/n$. Αν η θεμελιώδης έχει συχνότητα f και πλάτος A , οι υπόλοιπες αρμονικές του φάσματος θα έχουν συχνότητα $3f, 5f, 7f \dots$, και πλάτος $A/3, A/5, A/7 \dots$. Η τριγωνική κυματομορφή έχει περιττές αρμονικές με σχέση πλάτους $1/n^2$ ($A, A/9, A/25 \dots$). Η οδοντωτή κυματομορφή έχει και περιττές και άρτιες αρμονικές με σχέση πλάτους $1/n$ ($A, A/2, A/3 \dots$).



Σχήμα 7.7
Φάσματα σύνθετων κυματομορφών

Το Σχήμα 7.8 δείχνει την τεχνική σύνθεσης Fourier.



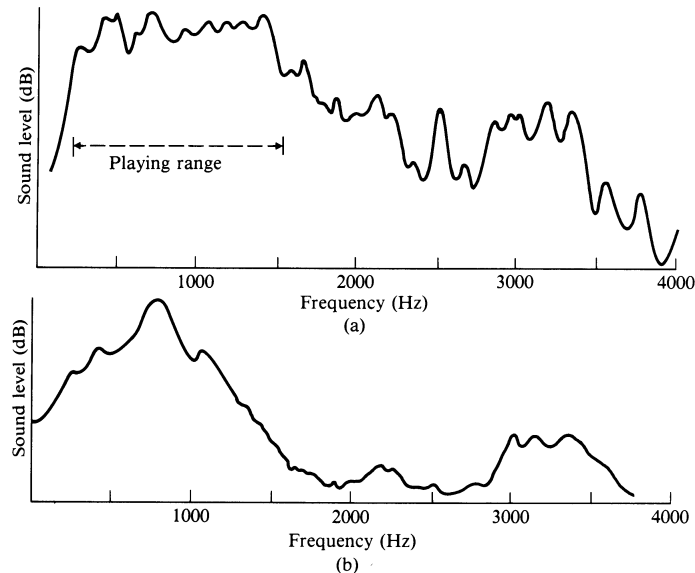
Σχήμα 7.8
Σύνθεση Fourier οδοντωτού κύματος
(a) οι πρώτες 6 αρμονικές (b) το άθροισμα των πρώτων 6 αρμονικών

Οι πρώτες έξι αρμονικές ενός οδοντωτού κύματος απεικονίζονται ξεχωριστά. Αν αναμιχθούν με τη σωστή φάση, το αποτέλεσμα της πρόσθεσης των αρμονικών προσεγγίζουν μία οδοντωτή κυματομορφή. Οι ανωμαλίες που παρουσιάζονται ελαχιστοποιούνται με την πρόσθεση υψηλότερων αρμονικών.

Πολλά βιβλία παρουσιάζουν “τυπικά” φάσματα μουσικών οργάνων. Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα φάσματα ενός οργάνου διαφέρουν σημαντικά και η μορφή τους εξαρτάται από το πώς παίζεται το όργανο (δυναμικές και περιοχή συχνότητας), όπως επίσης από τον τρόπο ηχογράφησης (περιβάλλον και απόσταση από το όργανο).

Για τον υπολογισμό των αρμονικών μίας κυματομορφής χρησιμοποιούνται *αναλυτές φάσματος*. Υπάρχουν δύο είδη αναλυτών: ψηφιακοί και αναλογικοί. Οι *ψηφιακοί αναλυτές φάσματος* καταγράφουν μία περίοδο του σήματος, μετρώντας το σήμα σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η περίοδος αυτή αναλύεται από τον Η/Υ του οργάνου ο οποίος υπολογίζει το ύψος των αρμονικών και τη φάση τους. Ο *αναλογικός αναλυτής* χρησιμοποιεί μία σειρά από ηλεκτρονικά φίλτρα τα οποία απομονώνουν τις αρμονικές μία προς μία. Αν η διαδικασία αυτή γίνει πολύ γρήγορα (σε μερικά milliseconds), ο αναλυτής ονομάζεται *αναλυτής φάσματος πραγματικού χρόνου*. Οι αναλυτές πραγματικού χρόνου είναι απαραίτητοι για την μελέτη μεταβαλλόμενων ήχων.

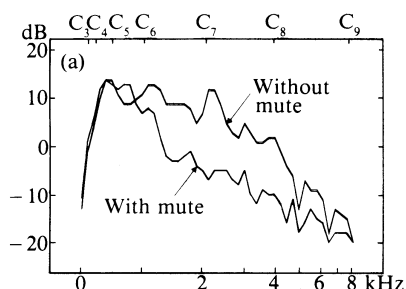
Μερικές ενδιαφέρουσες πληροφορίες για το ηχόχρωμα ενός οργάνου μπορούν να εξαχθούν υπολογίζοντας το μέσο όρο πολλών φασμάτων. Το Σχήμα 7.9 απεικονίζει το μέσο όρο 512 φασμάτων από ένα κλαρινέτο και μία ανδρική φωνή. Το τονικό ύψος μεταβάλλονταν κατά τη διάρκεια της ηχογράφησης.



Σχήμα 7.9
Μέσος όρος φασμάτων
(a) κλαρινέτο (b) φωνή τενόρου

Ο μακροπρόθεσμος μέσος όρος φασμάτων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από το Βασιλικό Ίδρυμα Τεχνολογίας της Στοκχόλμης για τη μελέτη μουσικών οργάνων και φωνής. Ένα τέτοιο φάσμα περιέχει πληροφορίες για τη γραφή της μουσικής, την εκτέλεση, το μουσικό όργανο και τον χώρο εκτέλεσης. Η επίδραση κάθε ενός από τους παραπάνω παράγοντες στον ήχο ερευνάται

διατηρώντας τους υπόλοιπους σταθερούς. Στο Σχήμα 7.10 απεικονίζεται ο μακροπρόθεσμος μέσος όρος φασμάτων ενός βιολιού το οποίο παίζεται με και χωρίς σουρντίνα.



Σχήμα 7.10

Μακροπρόθεσμος μέσος όρος φασμάτων ενός βιολιού με και χωρίς σουρντίνα

Ηχώχρωμα και δυναμικά φαινόμενα: περιβάλλουσα και διάρκεια

Μεταβατικά (transients) και άλλα δυναμικά φαινόμενα παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του ηχοχρώματος ενός ήχου. Αν ο ήχος ενός μουσικού οργάνου ηχογραφηθεί και αναπαραχθεί αντίστροφα, πιθανόν είναι να μην είναι αναγνωρίσιμος.

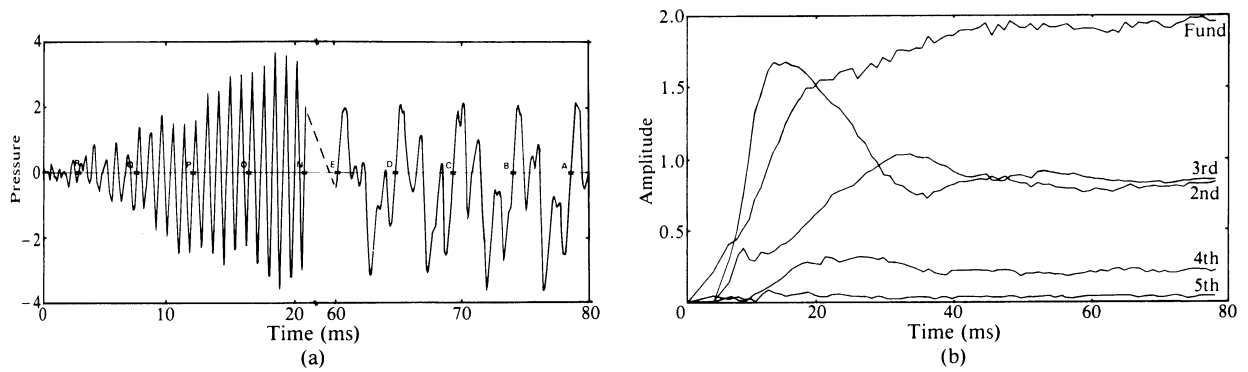
Ο Berger (1963) σε μία σειρά πειραμάτων παρουσίασε ήχους διαφόρων πνευστών μουσικών οργάνων σε μία ομάδα 30 μουσικών, αφαιρώντας το πρώτο και τελευταίο μισό δευτερόλεπτο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον “πίνακα σύγχυσης” του Πίνακα 7.1.

Stimulus	Response										
	Flute	Oboe	Clarinet	Tenor saxophone	Alto saxophone	Trumpet	Cornet	French horn	Baritone	Trombone	No answer
Flute	1	2		1	6	5	4			4	7
Oboe		28									2
Clarinet	1	1	20	4	3						1
Tenor saxophone			25	2	1						2
Alto saxophone				3	4		1	11	5	5	1
Trumpet	8				6	2	3	4	1	3	3
Cornet		1					12	15			2
French horn	1			2	3			5	6	6	7
Baritone			1	1	2	3	2	4	7	3	7
Trombone	2	1		5	3			1	5	9	4

Πίνακας 7.1

Αναγνώριση ηχογραφημένων πνευστών μουσικών οργάνων από ομάδα 30 μουσικών παρουσιασμένοι αφαιρώντας το πρώτο και τελευταίο μισό δευτερόλεπτο

Κατά τη διάρκεια του χρόνου ανάπτυξης (*attack*), οι μερικοί τόνοι ενός ήχου ενδέχεται να αναπτυχθούν σε διαφορετικούς χρόνους. Το Σχήμα 7.11 απεικονίζει τη μεταβολή της κυματομορφής ενός σωλήνα εκκλησιαστικού οργάνου στο χρόνο, παράλληλα με την ανάπτυξη των 5 πρώτων αρμονικών.



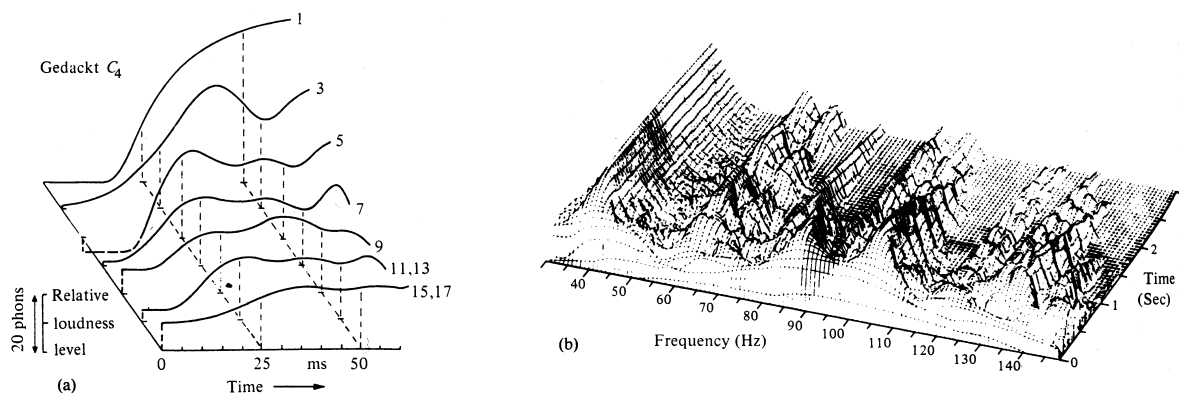
Σχήμα 7.11

(a) Κυματομορφή ανάπτυξης σωλήνα εκκλησιαστικού οργάνου
 (b) ανάπτυξη 5 πρώτων αρμονικών

Κατά τη διάρκεια ανάπτυξης η κυματομορφή δεν είναι ακριβώς περιοδική. Η δεύτερη αρμονική σε αυτή την περίπτωση αναπτύσσεται γρηγορότερα από τις υπόλοιπες αρμονικές.

Οι Strong και Clark (1967) στα πλαίσια μίας σειράς πειραμάτων, συνέθεσαν πολλούς ήχους πνευστών οργάνων χρησιμοποιώντας το φάσμα ενός ήχου με την περιβάλλουσα ενός άλλου. Στην περίπτωση του όμποε, κλαρινέτου, μπασούν, τούμπας και τρομπέτας, το φάσμα υπήρξε πιο σημαντικός παράγοντας για την αναγνώριση του ηχοχρώματος από την περιβάλλουσα. Στην περίπτωση του φλάουτου, η περιβάλλουσα ήταν πιο σημαντική από το φάσμα. Στις περιπτώσεις του τρομπονιού και του Γαλλικού κορνέτου, το φάσμα και η περιβάλλουσα ήταν εξίσου σημαντικά. Γενικά, το φάσμα αποκτά μεγαλύτερη σημασία όταν παρουσιάζει μεγάλη ένταση σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο.

Οι αναλυτές φάσματος πραγματικού χρόνου και οι H/Y, δίνουν τη δυνατότητα να απεικονιστούν τα μεταβατικά χαρακτηριστικά του φάσματος ενός ήχου σε τρισδιάστατα γραφήματα, τα οποία σχετίζουν τη στάθμη πίεσης ήχου με τη συχνότητα και το χρόνο. Το Σχήμα 7.12 απεικονίζει τα μεταβατικά ανάπτυξης σωλήνα εκκλησιαστικού οργάνου και bass drum.



Σχήμα 7.12

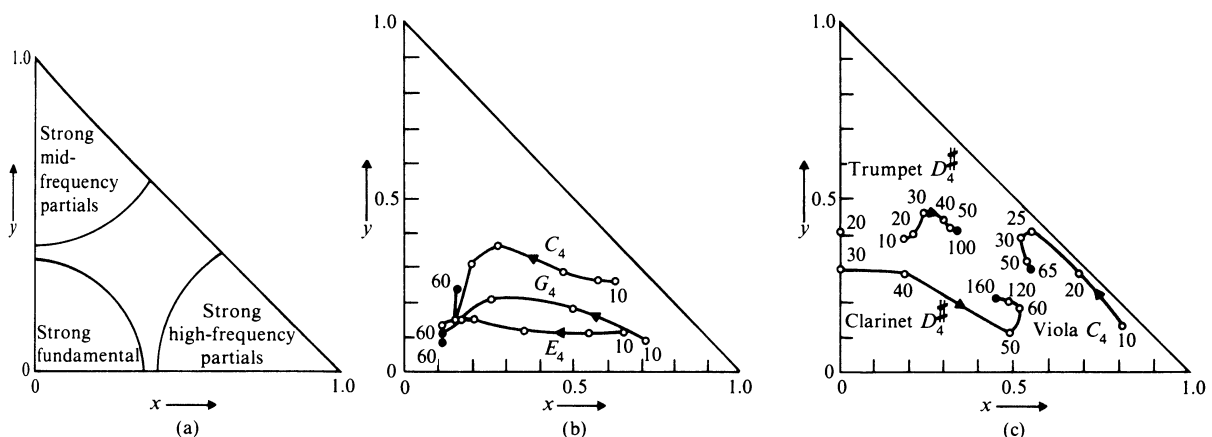
Τρισδιάστατα φάσματα τα οποία απεικονίζουν μεταβατικά ανάπτυξης μουσικών οργάνων.
 Η κάθετη συντεταγμένη συμβολίζει τη στάθμη πίεσης ήχου
 (a) σωλήνα εκκλησιαστικού οργάνου (b) bass drum

Διαγράμματα Tristimulus

Ένας αποτελεσματικός τρόπος γραφικής απεικόνισης του ηχοχρώματος είναι τα *διαγράμματα tristimulus* (τριών ερεθισμάτων). Ένα τέτοιο διάγραμμα αντιπροσωπεύει 3 μεταβλητές ερεθισμάτων x, y, z σε ένα διάγραμμα δύο διαστάσεων.

Ο μηχανισμός ακοής βέβαια δεν έχει τρία διαφορετικά αισθητήρια, αλλά οι However, Pollard και Jansson (1982), πρότειναν τη χρήση τέτοιων διαγραμμάτων προκειμένου να απεικονιστούν οι σχετικές εντάσεις τριών περιοχών του φάσματος.

Στα διαγράμματα του Σχήματος 7.13 η ένταση των μερικών 2, 3 και 4 απεικονίζονται στον άξονα y , ενώ το ποσοστό των ψηλών συχνοτήτων στον άξονα x . Η τρίτη μεταβλητή είναι το ποσοστό της θεμελιώδους συχνότητας.



Σχήμα 7.13

Διαγράμματα tristimulus απεικονίζοντας ηχοχρώματα διαφόρων οργάνων

Το διάγραμμα του Σχήματος 7.13(a) δείχνει ποιες περιοχές αντιστοιχούν στη θεμελιώδη, τις μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Ένας απλός τόνος θα βρισκόταν στο κέντρο των αξόνων. Στο Σχήμα 7.13(b) συγκρίνονται τρεις νότες εκκλησιαστικού οργάνου από 10ms μέχρι 60ms, ενώ στο Σχήμα 7.13(c) απεικονίζονται οι χρόνοι ανάπτυξης τρομπέτας, κλαρινέτου και βιόλας.

Vibrato

Ο ορισμός του ANSI για το *vibrato* (1960) είναι ο εξής: “το vibrato είναι μία οικογένεια ηχητικών φαινομένων στη μουσική, τα οποία χαρακτηρίζονται από μία περιοδική μεταβολή ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών του ηχητικού κύματος”. Επιπλέον, “όταν τα συγκεκριμένα αυτά χαρακτηριστικά είναι γνωστά, ο όρος “vibrato” θα πρέπει να τροποποιηθεί καταλλήλως, πχ vibrato συχνότητας, vibrato πλάτους, vibrato φάσης κλπ”. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, χρησιμοποιούμε τον όρο *vibrato συχνότητας* αναφερόμενοι στη *διαμόρφωση συχνότητας* (*frequency modulation* ή *FM*) και τον όρο *vibrato πλάτους* αναφερόμενοι στη *διαμόρφωση πλάτους* (*amplitude modulation* ή *AM*).

Στην πράξη είναι αδύνατο να υπάρξει vibrato συχνότητας χωρίς να υπάρξει vibrato πλάτους, λόγω των συντονισμών του χώρου και του οργάνου. Vibrato πλάτους χωρίς vibrato συχνότητας είναι δυνατό να υπάρξει (όπως στο βιμπράφωνο), αλλά είναι πολύ σπάνιο φαινόμενο.

Το vibrato φαίνεται να διαφέρει μεταξύ εκτελεστών. Ένας μέσος όρος (για όργανα και φωνή) είναι περίπου 7Hz, ενώ στα φωνητικά χρησιμοποιείται ελαφρώς μεγαλύτερο βάθος.

Μεταβάλλοντας τεχνητά τη συχνότητα του vibrato σε μία διάταξη διαμόρφωσης συχνότητας, η συχνότητα του vibrato είναι αναγνωρίσιμη μεταξύ 1Hz και 5Hz, ξεκινώντας ο ήχος να λαμβάνει ένα ενιαίο τονικό ύψος γύρω στα 6Hz, όπου το vibrato ακούγεται ως διακύμανση έντασης. Σε υψηλότερη συχνότητα (περίπου 12Hz), ο ήχος ακούγεται σαν μία κακή σύγχυση περισσότερων του ενός τόνου.

Οι παράμετροι του φυσικού vibrato μεταβάλλονται ελαφρώς κατά τη διάρκεια ενός τόνου. Ήχοι από ηλεκτρονικά μουσικά όργανα έχουν σταθερό ρυθμό και βάθος vibrato, με συνέπεια να ακούγονται “άκαμπτοι” και τεχνητοί.

Μίξη σύνθετων τόνων

Το σύστημα ακοής έχει την ικανότητα να συλλαμβάνει ήχους με διαφορετικούς τρόπους. Όταν ακούμε *αναλυτικά*, μπορούμε να διακρίνουμε τους μερικούς τόνους ξεχωριστά, ενώ όταν ακούμε *συνθετικά* ή ολιστικά, εστιάζουμε την προσοχή μας στον ήχο σαν μία οντότητα χωρίς να διακρίνουμε τα μερικά συστατικά του. Ο βαθμός με τον οποίο ακούμε αναλυτικά ή συνθετικά διαφέρει με το άτομο. Αν ένας ήχος δύο τόνων 800Hz και 1000Hz ακολουθηθεί από έναν άλλο με τόνους 750Hz και 1000Hz, ένας αναλυτικός ακροατής θα διακρίνει τον μερικό χαμηλότερης συχνότητας, ενώ ένας συνθετικός ακροατής θα ακούσει ένα φαινομενικό τονικό ύψος να αυξάνει από 200Hz στα 250Hz.

Ένας ήχος με αρμονικές των οποίων οι συχνότητες και τα σχετικά πλάτη παραμένουν σταθερά, γενικά ακούγεται ως ένας ήχος ακόμα και στην περίπτωση που η συνολική ένταση αλλάζει. Αν όμως μία από τις αρμονικές διακοπεί και επανέλθει, τότε αυτή ακούγεται καθαρά. Το ίδιο ισχύει αν σε μία αρμονική δοθεί vibrato.

Μία από τις πιο αξιοσημείωτες ικανότητες του ακουστικού μας συστήματος είναι η δυνατότητά του να ξεχωρίζει συγκεκριμένους ήχους σε ένα σύνθετο ηχητικό περιβάλλον, όπως για παράδειγμα τους ήχους των διαφορετικών οργάνων σε μία συμφωνική ορχήστρα. Στην περίπτωση αυτή, το αυτί αναγνωρίζει ότι κάποιοι μερικοί τόνοι ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο όργανο, άλλους σε κάποια άλλα κλπ. Οι μερικοί αυτοί τόνοι συμπύσσονται σε έναν ήχο, ενώ ταυτόχρονα ακούμε ένα μίγμα διαφορετικών ήχων. Ο μηχανισμός της λειτουργίας αυτής δεν είναι πλήρως κατανοητός.

Βιβλιογραφία

- Rossing, T. D. (1990). *The Science of Sound*. Reading: Addison-Wesley.
- Hall D. E. (2002). *Musical Acoustics*. California: Brooks/Cole.
- Backus J. (1977). *The Acoustical Foundations of Music*. New York: W. W. Norton.
- Pierce, J. R. (1983). *The Science of Musical Sound*. New York: Scientific American.