

Σημειώσεις Εργαστηρίου

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ Ι

Σ. Πασχαλίδου

Μ. Σηφάκης

Σ. Κουζούπης (Σχόλια)

Οκτώβρης 2016

Περιεχόμενα

1. Μέτρηση ηχητικής στάθμης πίεσης μίας πηγής	1
2. Μέτρηση ηχητικής στάθμης πίεσης δύο πηγών	20
3. Φασματική ανάλυση	36
4. Μέτρηση χρόνου αντήχησης	53
5. Κρίσιμη απόσταση & μελέτη ηχητικής στάθμης σε κλειστό χώρο	80
6. Στάσιμα κύματα και ιδιορυθμοί σε μικρούς χώρους	96
7. Μέτρηση στάθμης ηχητικής <u>ισχύος</u> μιας πηγής	118

ΑΣΚΗΣΗ 1

Μέτρηση ηχητικής στάθμης πίεσης 1ο

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπό της άσκησης αποτελεί η μέτρηση της ~~ακουστότητας~~ ακουστότητας μιας ηχητικής πηγής, δηλαδή η ποσοτικοποίηση της αίσθησης του πόσο δυνατά την αντιλαμβανόμαστε. Στη συγκεκριμένη άσκηση θα ασχοληθούμε μόνο με την απλή περίπτωση *ΜΙΑΣ* μόνο ηχητικής πηγής. Επιπλέον, θα γίνει εκμάθηση της χρήσης του φορητού ηχόμετρου και της βαθμονόμησής του.

Μετρούμενα μεγέθη: στάθμη ηχητικής πίεσης, σταθμισμένες τιμές, ισοδύναμη στάθμη συνεχούς θορύβου, SoundExposureLevel.

1.ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

1.1. Ορισμός Ακουστότητας

Ακουστότητα είναι η υποκειμενική απόκριση του αυτιού στη στάθμη του ήχου που εκπέμπεται από μια ηχητική πηγή, δηλαδή η αίσθηση του πόσο δυνατά αντιλαμβανόμαστε έναν ήχο (ο όρος “ένταση” αποφεύγεται, για να μη γίνει σύγχυση με το φυσικό μέγεθος της έντασης, I).

1.2. Φυσικά μεγέθη που συνδέονται με την ακουστότητα

Βασικό φυσικό μέγεθος που αποτελεί μέτρο της ακουστότητας είναι η εκπεμπόμενη ενέργεια από την ηχητική πηγή, E . Παρ’ όλα αυτά συνήθως ενδιαφερόμαστε περισσότερο για το ρυθμό ροής της ηχητικής ενέργειας και μάλιστα σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Συνεπώς, καταλήγουμε στο φυσικό μέγεθος της ηχητικής έντασης I που δίνει την ηχητική ενέργεια που διαπερνάει στη μονάδα του χρόνου τη μονάδα επιφάνειας που βρίσκεται κάθετα στη διάδοση.

Θεωρώντας ότι έχουμε:

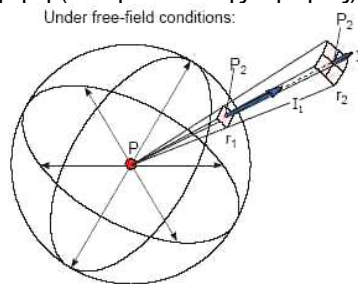
(α) σημειακή πηγή ή οποιαδήποτε άλλη πηγή που εκπέμπει ομοιόμορφα σε όλες τις διευθύνσεις, δηλαδή έχει σφαιρικό μέτωπο κύματος

(β) σε ελεύθερο πεδίο¹,

η ένταση υπολογίζεται από τη διαίρεση της εκπεμπόμενης από την πηγή ισχύος με την επιφάνεια μιας σφαίρας (σε κάποια απόσταση r από την πηγή, όπου βρίσκεται ο παρατηρητής), δηλαδή είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης, r . Οπότε:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}, \text{ με μονάδες: } [I] = \text{Watt}/\text{m}^2$$

, όπου W η εκπεμπόμενη ηχητική ισχύς από την πηγή και r η απόσταση πηγής-παρατηρητή (και η ακτίνα της σφαίρας).



Σχήμα 1. Υπολογισμός της έντασης σε ελεύθερο πεδίο, για σφαιρικό μέτωπο κύματος [11]

Η σχέση που συνδέει το φυσικό μέγεθος της ηχητικής έντασης με την ηχητική πίεση για πηγή με σφαιρικό μέτωπο κύματος (π.χ. σημειακή πηγή) σε ελεύθερο πεδίο είναι:

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$

όπου p_{rms} η ενεργή τιμή της πίεσης, ρ η πυκνότητα του αέρα και, c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα.

Από τα παραπάνω έχουμε:

$$\boxed{W \propto I \text{ και } I \propto p^2}, \text{ όπου } \begin{cases} W \text{ ακουστική ισχύς, σε Watt} \\ I \text{ ακουστική ένταση, σε Watt/m}^2 \\ p \text{ ακουστική πίεση, σε Pa ή N/m}^2 \end{cases}$$

¹ Ελεύθερο πεδίο ονομάζουμε ένα πεδίο στο οποίο δεν υπάρχουν όρια, κατά συνέπεια δεν υπάρχουν καθόλου ανακλάσεις. Συνθήκες τέτοιου πεδίου μπορούμε να έχουμε είτε σε ανοιχτό χώρο είτε σε ανηχοϊκό θάλαμο.

² Σε διάχυτο αντηχητικό πεδίο ισχύει: $|I| = 0$ μέσα στο χώρο και $I = \frac{p_{rms}^2}{4\rho c}$ σε διαχωριστική επιφάνεια

1.3. Λογαριθμική κλίμακα – Αναλογίες έναντι διαφορών

Υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι που αντί να παρουσιάζουμε τις απόλυτες τιμές των μεγεθών, χρησιμοποιούμε λογαριθμικές κλίμακες:

(1) Ο ψυχοφυσικός νόμος των Weber-Fechner, σύμφωνα με τον οποίο *σχεδόν όλες οι υποκειμενικές ανθρώπινες αισθήσεις είναι ανάλογες προς το λογάριθμο (της έντασης) του ερεθίσματος.*

(2) Το γεγονός ότι τα φυσικά μεγέθη που σχετίζονται με την ακοή (όπως ηχητική πίεση και ηχητική ένταση) για ακουστούς από τον άνθρωπο ήχους παρουσιάζουν ένα τεράστιο εύρος τιμών και κατ' επέκταση θα απαιτούνταν η αναγραφή πολλών δεκαδικών ψηφίων για την αναπαράσταση τους.

Συγκεκριμένα:

(1) Στην περίπτωση της ανθρώπινης ακοής έχει παρατηρηθεί πράγματι ότι: Αύξηση της πίεσης:

- από 1 μονάδα πίεσης --> σε 10 μονάδες πίεσης (=> διαφορά=9 μ.π. και λόγος=10-μ.π.) και
- από 1000 μονάδες πίεσης --> σε 10000 μονάδες πίεσης (διαφορά=9999μ.π. και λόγος=10-μ.π.)

προκαλεί την ίδια μεταβολή στην υποκειμενική αίσθηση της ακουστότητας του ηχητικού ερεθίσματος και συγκεκριμένα διπλασιασμό.

Βλέπουμε λοιπόν, ότι ο λόγος πιέσεων, δηλαδή η σχετική μεταβολή της πίεσης και όχι η διαφορά τους (η απόλυτη μεταβολή της) προκαλεί το ίδιο ακουστικό αποτέλεσμα στο ανθρώπινο αυτί.

(2) Σχετικό εύρος μέγιστης-ελάχιστης πίεσης και έντασης (όριο πόνου - κατώφλι ακουστότητας, στο 1 kHz):

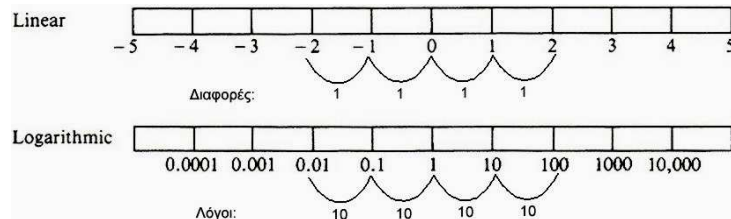
- Πίεση: 1000000:1 περίπου (περίπου 20 Pa – 20 μPa), δηλαδή 0,0000001

- Ένταση: 1000000000000:1 περίπου (περίπου 10 Watt/m² – 10⁻¹² Watt/m²), δηλαδή 1.000.000.000.000

Ένας τρόπος να συμπιέσουμε αυτό το τεράστιο εύρος τιμών και ταυτόχρονα να προσομοιάσουμε τον τρόπο που λειτουργεί το αυτί μας είναι να μεταφερθούμε από γραμμική σε λογαριθμική κλίμακα (διαίρεση και εξαγωγή λογάριθμου).

- Στη γραμμική κλίμακα: ίσες διαφορές αναπαρίστανται με ίσες αποστάσεις, ενώ

- Στη λογαριθμική κλίμακα: ίσοι λόγοι αναπαρίστανται με ίσες αποστάσεις.



Σχήμα 2. Γραμμικές και λογαριθμικές σχέσεις [1]

Ο λογάριθμος ενός λόγου ορίζει τη μονάδα bel. Δεν είναι φυσική μονάδα, αλλά χαρακτηρίζει τον λόγο δύο ομοειδών μεγεθών, γι' αυτό πρέπει να αναγράφεται πάντα δίπλα στο αποτέλεσμα.

$$L_A (bel) = \log \frac{A_2}{A_1}$$

1 bel αντιστοιχεί σε λόγο εντάσεων 10:1.

Η παραπάνω σχέση *πολλαπλασιαζόμενη με το 10 (ή το 20)* ονομάζεται στάθμη, με μονάδα το dB και έχει την ιδιότητα να δίνει το ίδιο αποτέλεσμα για ίδιους λόγους. Π.χ. ο λόγος 10^{0,1} δύο μεγεθών αντιστοιχεί σε 1 dB διαφορά.

$$L_A (dB) = 10 \cdot \log \frac{A_2}{A_1}$$

- Επειδή ανάλογα με το A₁ το αποτέλεσμα αλλάζει και δίνει μια σχετική τιμή, ορίζουμε μία συγκεκριμένη τιμή αναφοράς για κάθε μέγεθος, A_{ref}. Στην περίπτωση των ηχητικών μεγεθών χρησιμοποιούμε τις τιμές που αντιστοιχούν στο κατώφλι ακουστότητας, στο 1 kHz.

- Έτσι έχουμε το εξής για τη **στάθμη ηχητικής έντασης**:

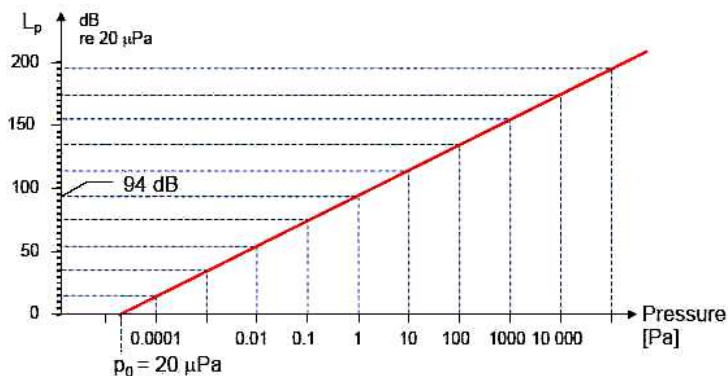
$$\boxed{SIL = L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}}}, \text{ με } I_{ref} = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$$

- Εφόσον $I = \frac{P_{rms}^2}{\rho c}$ (και γενικά $I \propto p^2$) \Rightarrow Για τη **στάθμη ηχητικής πίεσης**:

$$SPL = L_p = 10 \cdot \log \frac{\frac{P_{rms}^2}{\rho c}}{\frac{P_{rms,ref}^2}{\rho c}} = 10 \cdot \log \frac{P_{rms,2}^2}{P_{rms,1}^2} \stackrel{\curvearrowright}{=} 10 \cdot \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{rms,ref}} \right)^2 = 2 \cdot 10 \cdot \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{rms,ref}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \boxed{SPL = L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{rms,ref}} \right)}, \text{ με } p_{ref} = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της στάθμης ηχητικής πίεσης πολλαπλασιάζουμε με **20**.



Σχήμα 3. Γραμμική σχέση σχετικών τιμών (λόγων) πίεσης και στάθμης πίεσης [11]

- Αντίστοιχα, εφόσον $I = \frac{W}{4\pi r^2}$ ($W \propto I$) \Rightarrow Για τη **στάθμη ηχητικής ισχύος**:

$$SWL = L_W = 10 \cdot \log \frac{\frac{W}{4\pi r^2}}{\frac{W_{ref}}{4\pi r^2}}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{SWL = L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_{ref}}}, \text{ με } W_{ref} = 10^{-12} \text{ Watt}$$

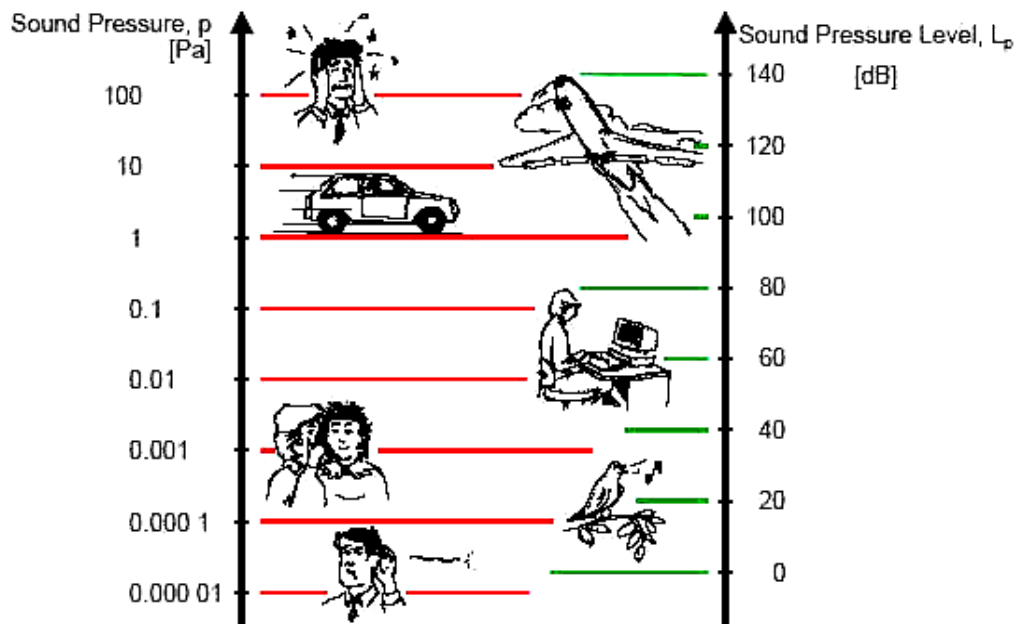
Συνοπτικά έχουμε τα ακόλουθα:

	Στάθμη έντασης	Στάθμη πίεσης	Στάθμη ισχύος
Σύμβολο	SIL ή L_I	SPL ή L_p	SWL ή L_w
Σχέση	$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}}$	$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_{ref}}$	$L_w = 10 \cdot \log \frac{W}{W_{ref}}$
Μονάδες	$[L_I] = dB$ $[I] = \text{Watt}/m^2$	$[L_p] = dB$ $[p] = Pa = \text{N}/m^2$	$[L_w] = dB$ $[W] = \text{Watt}$
Τιμή αναφοράς/ κατώφλι ακουστότητας	$I_{ref} = 10^{-12} \text{Watt}/m^2$	$p_{ref} = 20 \mu Pa = 2 \cdot 10^{-5} \text{N}/m^2$	$W_{ref} = 10^{-12} \text{Watt}$
Όριο πόνου	$I_{max} = 10 \text{Watt}/m^2$	$p_{max} = 63 Pa = 63 \text{N}/m^2$	
Στάθμη κατωφλίου ακουστότητας	$L_I = 0dB$	$L_p = 0dB$	$L_w = 0dB$
Στάθμη όριου πόνου	$L_I = 130dB$	$L_p = 130dB$	

Πίνακας 1. Συνοπτικός πίνακας φυσικών μεγεθών και αντίστοιχων στάθμεων

Αν και χάριν απλότητας συνηθίζουμε να θεωρούμε στην ακουστική ότι $L_I = L_p$, αυτό ισχύει μόνο στην περίπτωση ελεύθερου πεδίου (χωρίς ανακλάσεις) και σημειακής πηγής, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η σχέση τους εξαρτάται από το χώρο. Αντίθετα, το L_w είναι πιο θεμελιώδες μέγεθος και χαρακτηρίζει την ίδια την πηγή ανεξάρτητα από το περιβάλλον στο οποίο είναι τοποθετημένη (αποτελεί μέτρο της συνολικής ισχύος που εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις από μια ηχητική πηγή) [2].

1.4. Παραδείγματα τιμών ηχητικής στάθμης πίεσης:



Σχήμα 4. Παραδείγματα θορύβων σε τιμές πίεσης και στάθμης πίεσης [11]

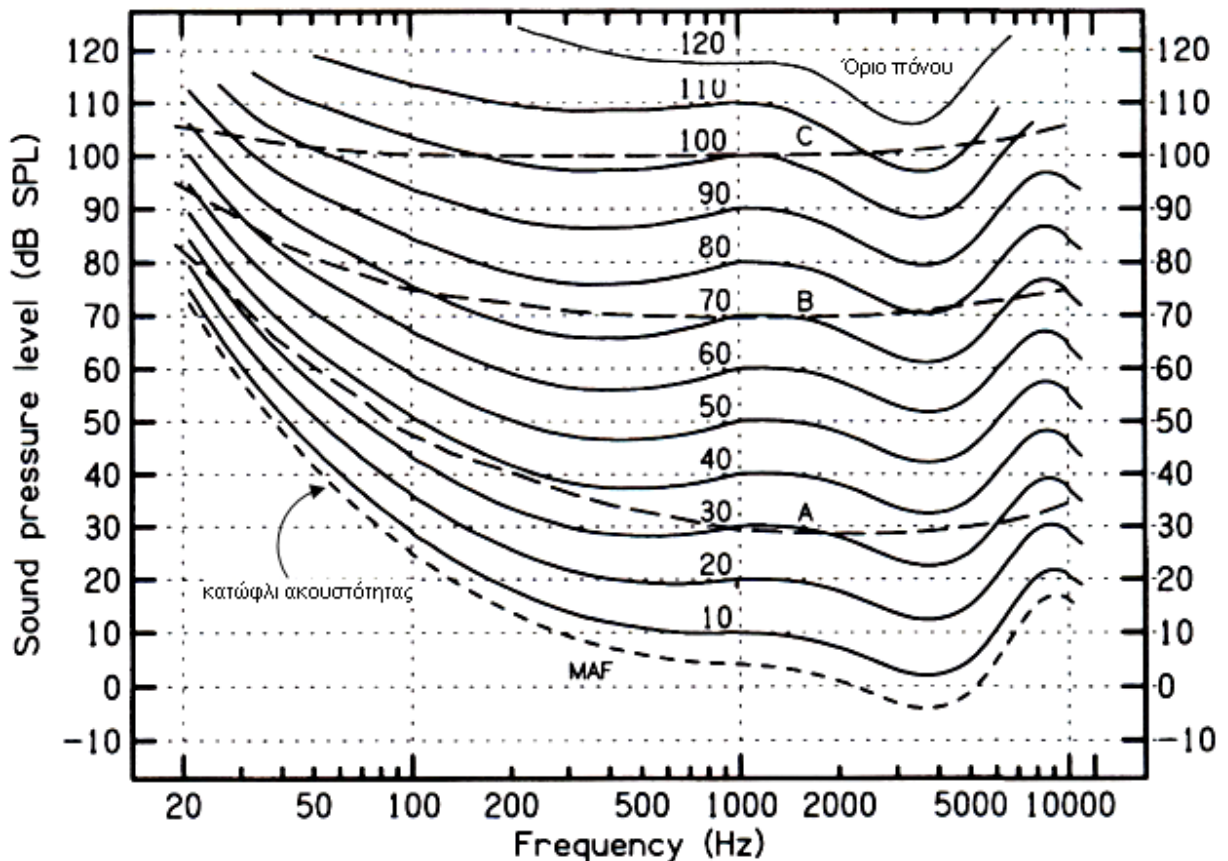
Table 2.1 Typical sound levels in the environment

Example sound	dB(SPL)	Description
Long range gunfire at gunner's ear	140	
Threshold of pain	130	Ouch!
Jet take-off at approximately 100 m	120	
Peak levels on a night club dance floor	110	
Loud shout at 1 m	100	Very noisy
Heavy truck at about 10 m	90	
Heavy car traffic at about 10 m	80	
Car interior	70	Noisy
Normal conversation at 1 m	60	
Office noise level	50	
Living room in a quiet area	40	Quiet
Bedroom at night time	30	
Empty concert hall	20	
Gentle breeze through leaves	10	Just audible
Threshold of hearing for a child	0	

Πίνακας 2. Παραδείγματα θορύβων σε τιμές πίεσης και στάθμης πίεσης [9]

1.5. Καμπύλες ίσης ακουστότητας των Fletcher-Munson

Οι καμπύλες ίσης ακουστότητας μας δίνουν τις συνθήκες που πρέπει να εκπληρώνονται για συχνότητα και ηχητική στάθμη, ώστε ένα άτομο με φυσιολογική ακοή να αντιλαμβάνεται τους ήχους αυτούς εξίσου δυνατά. Πρόκειται για πειραματικές καμπύλες που σχηματίστηκαν από σειρά ψυχοακουστικών πειραμάτων, όπου τα υποκείμενα ρύθμιζαν την ακουστότητα ενός απλού ήχου (μίας καθαρής συχνότητας), ώστε αυτός να ηχεί εξίσου δυνατά. Σημειώνεται ότι οι καμπύλες ίσης ακουστότητας αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές από σειρά πειραμάτων, εφ' όσον στην πράξη υπάρχει κάποια απόκλιση από άτομο σε άτομο (με βάση την ηλικία κλπ.).



Σχήμα 5. Καμπύλες ίσης ακουστότητας [3]

Αυτό που αποκαλύπτουν οι εμπειρικές καμπύλες Fletcher-Munson είναι ότι η ένταση του ηχοαισθήματος του ανθρώπου εξαρτάται από τη συχνότητα και την ηχητική στάθμη εκπομπής της πηγής και μάλιστα όχι με γραμμικό τρόπο. Συγκεκριμένα:

(1) Το αυτί παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στις διάφορες συχνότητες. Παρατηρούμε μέγιστη ευαισθησία γύρω στα 3-4 kHz (περιοχή συχνότητων ομιλίας), λιγότερη ευαισθησία στις υψηλές συχνότητες και ελάχιστη στις χαμηλές συχνότητες. Έτσι, για να ακουστεί ένας ήχος σταθερής ηχητικής ισχύος εξίσου δυνατά στις διάφορες συχνότητες, απαιτείται στις χαμηλές συχνότητες μεγαλύτερη ηχητική στάθμη από ό τι στις υψηλές συχνότητες, ενώ σε συχνότητες γύρω στα 4 kHz (περιοχή μέγιστης ευαισθησίας του αυτιού) απαιτείται η ελάχιστη δυνατή στάθμη.

Για παράδειγμα, η ελάχιστη ισχύς μιας πηγής ήχου που προκαλεί έναν ήχο μόλις αντιληπτό από το ανθρώπινο αυτί στα 30 Hz είναι κάπου ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη απ' ό τι στα 4 kHz [4]. Επίσης, αντίστροφα, αν τοποθετήσουμε το 'volume' ενός ηχητικού συστήματος σε σταθερή θέση και κάνουμε μια σάρωση στις ακουστές συχνότητες, η ακουστότητα του ήχου θα μεταβάλλεται, σύμφωνα με τις παραπάνω καμπύλες.

(2) Για μεγαλύτερες στάθμες, οι καμπύλες ίσης ακουστότητας γίνονται πιο επίπεδες από ότι σε χαμηλές στάθμες, δηλαδή εξασθενεί η διαφορά της ηχητικής στάθμης μεταξύ χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων που απαιτείται για να ακούγονται εξίσου δυνατά. Για υψηλές στάθμες έχουμε μικρές διαφορές, ενώ για χαμηλές στάθμες μεγάλες διαφορές.

Αυτό έχει επίδραση στην αναπαραγωγή ενός σύνθετου ήχου, π.χ. μουσική. Εφ' όσον η ακουστότητα στις διάφορες συχνοτικές περιοχές μεταβάλλεται σύμφωνα με τη συνολική ένταση του ήχου, κατά την αναπαραγωγή, η «τονική ισορροπία» θα μεταβληθεί, εκτός κι αν η αναπαραγωγή γίνει στην ίδια στάθμη με αυτήν της εγγραφής³.

Στο διάγραμμα φαίνονται επίσης:

- *Το κατώφλι ακουστότητας*: Δίνει την ελάχιστη τιμή της στάθμης ενός τόνου που μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο αυτί ενός ατόμου νεαρής ηλικίας

- *Το όριο του πόνου*: Δίνει την ανώτατη στάθμη, ανεκτή από το ανθρώπινο αυτί.

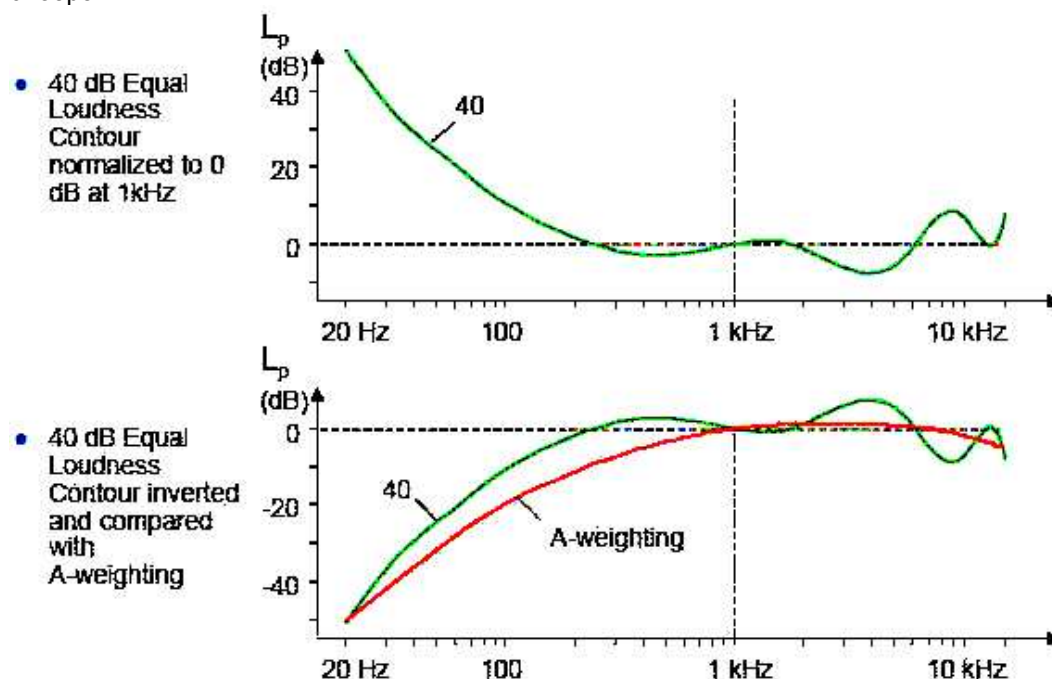
Και τα δύο εξαρτώνται από τη συχνότητα.

1.6. Προσέγγιση της Υποκειμενικής Αίσθησης της Ακουστότητας με τη Χρήση Σταθμισμένων φίλτρων

Όπως είδαμε παραπάνω, το ανθρώπινο αισθητήριο της ακοής δεν έχει ευθεία απόκριση σε όλο το φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων (και ηχητικών στάθμων).

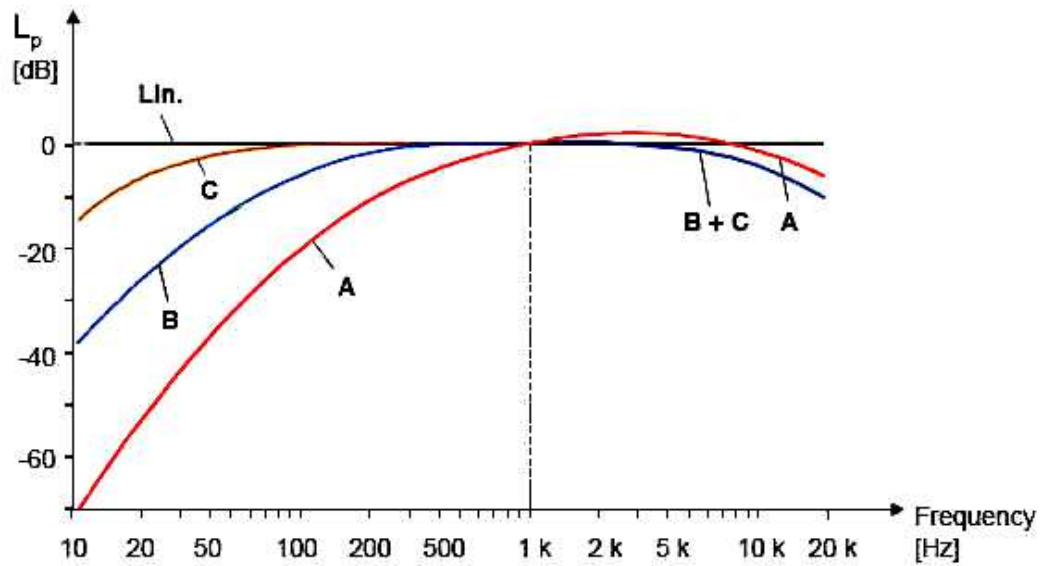
Στις μετρήσεις που λαμβάνουμε με ένα όργανο μέτρησης, όπως το ηχώμετρο, πολλές φορές θέλουμε να λάβουμε υπ' όψιν μας αυτή τη μη-γραμμική συμπεριφορά του αυτιού που παρουσιάζεται στις καμπύλες Fletcher-Munson, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να αποτελεί πραγματικά μέτρο της ανθρώπινης αντίληψης του πόσο δυνατά ακούστηκε ένας ήχος.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τις 3 χονδροειδείς καμπύλες του σχήματος 7, που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του αυτιού ως προς τη συχνότητα και στάθμη του ερεθίσματος. Έχοντας το αντίστροφο πρόβλημα (του υπολογισμού της υποκειμενικής τιμής μιας στάθμης από μια γραμμική μέτρηση), καταλήγουμε στις τρεις χονδροειδείς καμπύλες του παρακάτω διαγράμματος (μία για κάθε μία περιοχή στάθμων), που είναι κατοπτρικές των προηγούμενων. Αυτές μας δίνουν το πλήθος των *dB* που πρέπει να αφαιρέσουμε από μια γραμμική τιμή στάθμης πίεσης για να προσομοιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο ακούμε.



Σχήμα 6. Σταθμισμένο φίλτρο A – σύγκριση με αντίστοιχη καμπύλη ίσης ακουστότητας A [11]

³Έτσι εξηγείται γιατί όταν παίζουμε σε ένα ηχητικό σύστημα δυνατά μουσική, παρατηρούνται δυσανάλογα πιο έντονα το μπάσα και τα ψηλά, ενώ όταν παίζουμε την ίδια μουσική χαμηλόφωνα χάνεται το σώμα (body) και η λαμπρότητά του [4].



Σχήμα 7. Σταθμισμένα φίλτρα A, B και C [11]

Συχνότητα (Hz)	Συνάρτηση A	Συνάρτηση B	Συνάρτηση C
10	-70.4		
12.5	-63.4		
16	-56.7		
20	-50.5		
25	-44.7	-20.4	-4.4
31.5	-39.4	-17.1	-3
40	-34.6	-14.2	-2
50	-30.2	-11.6	-1.3
63	-26.2	-9.3	-0.8
80	-22.5	-7.4	-0.5
100	-19.1	-5.6	-0.3
125	-16.1	-4.2	-0.2
160	-13.4	-3	-0.1
200	-10.9	-2	0
250	-8.9	-1.3	0
315	-6.6	-0.8	0
400	-4.8	-0.5	0
500	-3.2	-0.3	0
630	-1.9	-0.1	0
800	-0.8	0	0
1000	0	0	0
1250	0.6	0	0
1600	1	0	-0.1
2000	1.2	-0.1	-0.2
2500	1.3	-0.2	-0.3
3150	1.2	-0.4	-0.5
4000	1	-0.7	-0.8
5000	0.5	-1.2	-1.3
6300	-0.1	-1.9	-2
8000	-1.1	-2.9	-3
10000	-2.5	-4.3	-4.4
12500	-4.3	-6.1	-6.2
16000	-6.6	-8.4	-8.5
20000	-9.3	-11.1	-11.2

Πίνακας 3. Τιμές συναρτήσεων βάρους A, B και C [7]

Έτσι, για παράδειγμα, στην περίπτωση πολύ χαμηλών συχνοτήτων (όπου το αυτί έχει τη λιγότερη ευαισθησία \Rightarrow ακούμε πιο χαμηλόφωνα) πρέπει να αφαιρέσουμε περισσότερα dB από ότι στις μεσαίες περιοχές (σχετικά μεγαλύτερη ευαισθησία \Rightarrow ακούμε πιο δυνατά). Οι ακριβείς τιμές εξαρτώνται από την καμπύλη που χρησιμοποιούμε.

Έχουμε τις ακόλουθες τρεις βασικές περιπτώσεις:

Ηχοστάθμη	Τιμές ηχοστάθμης	Καμπύλη ίσης ακουστότητας	Χρήση φίλτρου
Χαμηλή	20 – 55 dB	40 dB	A
Μεσαία	55- 85 dB	70 dB	B
Υψηλή	85 – 140 dB	100 dB	C

Πίνακας 4. Επιλογή φίλτρων

Σημειώσεις:

- (1) Η διαφορά των τριών φίλτρων είναι ότι το A αφαιρεί μεγάλο μέρος της ηχητικής ενέργειας των χαμηλών συχνοτήτων, το B αφαιρεί λιγότερο και το C σχεδόν καθόλου (είναι γραμμικό για 200 – 1250 Hz).
- (2) Παρατηρούμε ότι και οι τρεις καμπύλες συμπίπτουν στο 1 kHz , που σημαίνει ότι οι τιμές και των τριών σταθμισμένων στάθμεων θα είναι ίδιες.
- (3) Παρά το γεγονός ότι η στάθμιση με φίλτρο A είναι η καταλληλότερη για χαμηλές στάθμες, συχνά γίνεται χρήση του για οποιαδήποτε ηχοστάθμη, έτσι ώστε όλες οι μετρήσεις να λαμβάνονται με τον ίδιο τρόπο.

Προσοχή:

Στην περίπτωση σταθμισμένων ηχητικών στάθμεων πρέπει πάντοτε να σημειώνουμε το είδος του φίλτρου τόσο στο μέγεθος όσο και στις μονάδες, π.χ. $[L_{pA}] = dB_A$.

Στην πράξη, στο ηχόμετρο χρησιμοποιούμε φίλτρα (σταθμιστικά) με συνάρτηση μεταφοράς της παραπάνω μορφής.

Αν και οι σταθμισμένες ηχοστάθμες δεν παρέχουν άμεσα κάποια πληροφορία για το συχνοτικό περιεχόμενο του υπό εξέταση ήχου, μας δίνουν τη δυνατότητα να βγάλουμε ένα γενικό συμπέρασμα, για το αν η ηχητική ενέργεια είναι κατά κύριο λόγο στις χαμηλές ή στις υψηλότερες συχνότητες. Συγκεκριμένα:

Αν η τιμή που μετράται με φίλτρο A είναι μικρότερη αυτής που μετράται με φίλτρο C, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο μετρούμενος ήχος βρίσκεται κυρίως στις χαμηλές συχνότητες

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Σε όλα τα παραπάνω θεωρήσαμε ότι το πλάτος των ηχητικών κυμάτων δε μεταβάλλονταν με το χρόνο. Επειδή εν γένει αυτό δεν ισχύει, καταφεύγουμε σε στάθμες που αντιπροσωπεύουν ένα είδος μέσης τιμής σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

1.7. Ισοδύναμη στάθμη συνεχούς θορύβου

Είναι εκείνη η ηχοστάθμη ενός σταθερού θορύβου που για το χρονικό διάστημα της μέτρησης παρέχει τόση σταθμισμένη ηχητική ενέργεια όση και ο μεταβαλλόμενος πραγματικός θόρυβος.

Δηλαδή στο διάγραμμα (8) θα πρέπει η επιφάνεια που περικλείεται ανάμεσα στη οριζόντια γραμμή ενός υποτιθέμενου ήχου σταθερής έντασης και του άξονα του χρόνου για το χρονικό διάστημα T να είναι ίση με την επιφάνεια που περικλείεται ανάμεσα στη γραφική παράσταση του μεταβλητού θορύβου και του άξονα του χρόνου για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Στα διακριτά μαθηματικά χωρίζουμε τον άξονα των x σε μικρά κομμάτια και υπολογίζουμε τη συνολική επιφάνεια από το άθροισμα της επιφάνειας των μικρών ράβδων που σχηματίζονται με την κυματομορφή, δηλαδή:

$$L_{eq(A)} = 10 \cdot \log \left(\frac{t_1 \cdot 10^{L_1/10} + t_2 \cdot 10^{L_2/10} + t_3 \cdot 10^{L_3/10} + \dots + t_n \cdot 10^{L_n/10}}{T} \right), \text{ όπου } T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n$$

(Ο χρόνος μπορεί να δοθεί σε οποιοσδήποτε μονάδες, εφόσον οι μονάδες του απαλείφονται μέσα στο λογάριθμο).

Αντίστοιχα, μπορούμε να εκφράσουμε το παραπάνω με ένα ολοκλήρωμα:

$$L_{eq(A)} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} \cdot dt \right), \text{ όπου } T = t_b - t_a$$

Προσοχή:

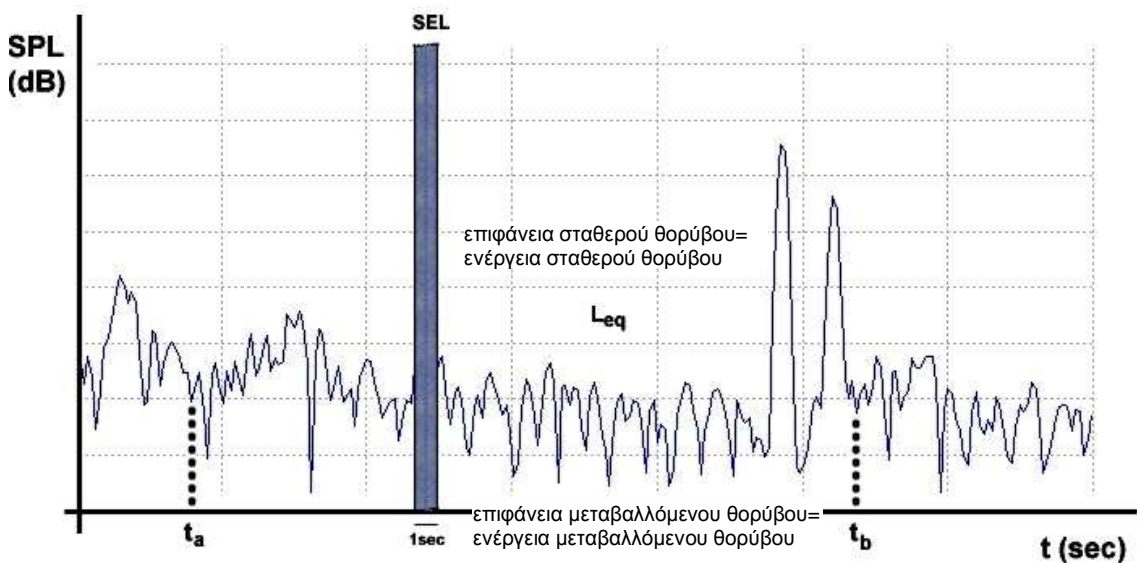
Δίπλα στην τιμή του L_{eq} αναγράφουμε πάντα το αντίστοιχο χρονικό διάστημα T για το οποίο μετρήθηκε.

1.8. SoundExposureLevel

Συνήθως η έκθεση σε κάποιο θόρυβο (π.χ. οδικό) για κάποια συνολική χρονική διάρκεια οδηγεί στην καταγραφή διάφορων ανεξάρτητων μεταξύ τους γεγονότων σε διαφορετικές ή μη χρονικές στιγμές, με ποικίλες διάρκειες το καθένα. Θα ήταν καλύτερο για τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων γεγονότων να υπολογίζαμε το μέσο όρο του θορύβου από όλες τις πηγές στην ίδια χρονική περίοδο. Έτσι ορίζουμε το παρακάτω εναλλακτικό μέγεθος:

Το SoundExposureLevel ορίζεται ως η ηχοστάθμη ενός σταθερού θορύβου που επιδρώντας για χρονικό διάστημα 1 s παρέχει την ίδια ενέργεια με το μεταβαλλόμενο θόρυβο.

$$SEL = L_{AE} = L_{eq(A)} + 10 \log T, \text{ όπου } T \text{ το συνολικό χρονικό διάστημα σε } s.$$



Σχήμα 8. L_{eq} και SEL

1.9. Θόρυβος

Βρίσκουμε διάφορους ορισμούς του θορύβου:

- (1) Είναι κάθε ήχος τυχαίας πηγής και φάσματος χωρίς καθαρούς τόνους.
- (2) Είναι κάθε ηχητικό ερέθισμα που είναι ανεπιθύμητο στον ακροατή είτε διότι δεν είναι ευχάριστο ή ενοχλητικό είτε διότι παρεμποδίζει την αντίληψη ωφέλιμων ήχων είτε διότι είναι βλαπτικό.
- (3) Είναι κάθε ακανόνιστος απεριοδικός ήχος που η στιγμιαία του τιμή αυξομειώνεται γενικά με τυχαίο τρόπο.

1.9.1. Θόρυβοςβάθους (backgroundnoise)

Θόρυβος βάθους μιας περιοχής ορίζεται ως ο συνολικός θόρυβος που υπάρχει στην περιοχή όταν η ηχητική πηγή που μας ενδιαφέρει δε λειτουργεί.

Όταν η στάθμη του θορύβου βάθους είναι συγκρίσιμη με τη στάθμη της πηγής που επιθυμούμε να μετρήσουμε (συγκεκριμένα διαφέρουν λιγότερο από 10 dB σε οποιαδήποτε συχνοτική περιοχή), πρέπει να γίνουν διορθώσεις. Θα πρέπει να μετρήσουμε ξεχωριστά μόνο το θόρυβο βάθους και να αφαιρέσουμε τη στάθμη του (λογαριθμικά) από τη συνολικά μετρούμενη στάθμη. Μπορούμε επίσης για ευκολία να χρησιμοποιήσουμε τους παρακάτω πίνακες:

Διαφορά σε dB μεταξύ μέτρησης και θορύβου βάθους	Διόρθωση σε dB (αφαιρείται από την μέτρηση)	Διαφορά (dB)	Διόρθωση (dB)
6	1.3	3	-3
7	1	4-5	-2
8	0.8	6-9	-1
9	0.6		
10	0.4		
11	0.3		
12	0.3		
13	0.2		
14	0.2		
15	0.1		

Πίνακας 5. Διόρθωση λόγω θορύβου βάθους [7]

1.10. Πρόσθεση και αφαίρεση στάθμεων

Αν και με αυτό το ζήτημα θα ασχοληθούμε αναλυτικά στην Άσκηση 2, εν συντομία:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \log \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right)$$

$$L_2 \ominus L_1 = 10 \cdot \log \left(10^{L_2/10} - 10^{L_1/10} \right)$$

Σε κάθε περίπτωση:

ΠΟΤΕ δεν προσθέτουμε ή αφαιρούμε δύο στάθμες **ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ!!!**

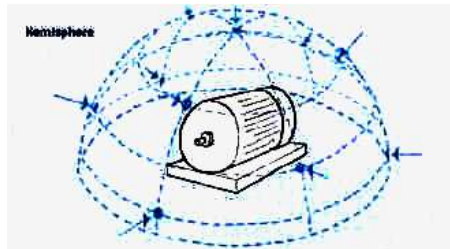
Για παράδειγμα για να προσθέσουμε δύο διαφορετικούς ήχους στάθμης 80dB έκαστος:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \log \left(10^{80/10} + 10^{80/10} \right) = 10 \cdot \log (2 \cdot 10^8) = 10 \cdot \log 10^8 + 10 \cdot \log 2 = 8 \cdot 10 + 10 \cdot \log 2$$

$$\Leftrightarrow L_1 \oplus L_2 = 80 + 10 \cdot \log 2 = 80 + 10 \cdot 0,3 = 80 + 3 = 83dB$$

1.11. Μετρούμενο φυσικό μέγεθος

- Η ηχητική ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από τις τιμές της ηχητικής πίεσης ή έντασης με χωρική ολοκλήρωση σε κατάλληλη επιφάνεια (π.χ. ημισφαίριο) γύρω από την πηγή, που να περικλείει μόνο αυτή. Ηχητική ισχύς μετράμε όταν ενδιαφερόμαστε για το χαρακτηρισμό μιας πηγής ως προς το θόρυβο που εκπέμπει.



Σχήμα 9. Μέτρηση ηχητικής ισχύος σε ημισφαιρική επιφάνεια γύρω από την πηγή ήχου [11]

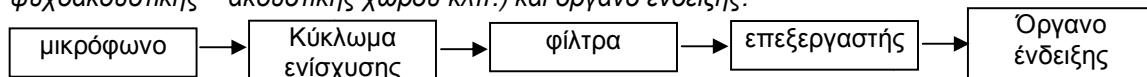
Η ηχητική πίεση και η ηχητική ένταση μπορούν να μετρηθούν απευθείας με τη χρήση κατάλληλων οργάνων.

- Ηχητική ένταση μετράμε για τον εντοπισμό και χαρακτηρισμό μιας πηγής ως προς το θόρυβο που εκπέμπει. Η μέτρηση της ηχητικής έντασης, όντας διανυσματικό μέγεθος, παρουσιάζει κάποιες πρακτικές δυσκολίες στη μέτρηση (ανάγκη χρήσης δύο μικροφώνων σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, συγκεκριμένη φασική σχέση μεταξύ των μικροφώνων κλπ).

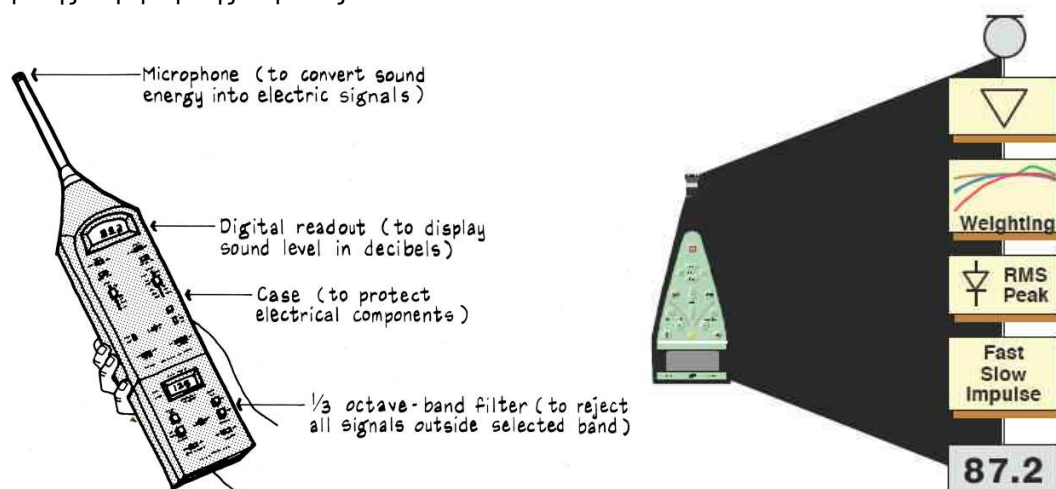
- Στην πράξη συνηθίζουμε να μετράμε ηχητική πίεση (p_{rms}), μέσω της οποίας και (υπό συνθήκες) δύναται να υπολογιστεί η ηχητική ισχύς/ένταση [11]. Άλλωστε και το ανθρώπινο αυτί αντιδρά σε μεταβολές της ηχητικής πίεσης.

1.12. Όργανο μέτρησης - Ηχόμετρο

Στο εργαστήριο θα χρησιμοποιήσουμε ένα φορητό ηχόμετρο. Τα ηχόμετρα αποτελούνται από τα εξής: Μικρόφωνο, κύκλωμα ενίσχυσης, σταθμιστικά φίλτρα, ολοκληρωτής (για τον υπολογισμό του L_{eq} και των στατιστικών δεικτών, βλ. παρακάτω), επεξεργαστής (για φασματική ανάλυση, υπολογισμό παραμέτρων ψυχοακουστικής – ακουστικής χώρου κλπ.) και όργανο ένδειξης:



Τα ηχόμετρα με τη βοήθεια του μικροφώνου ουσιαστικά μετρούν μεταβολές στις τιμές της ενεργού πίεσης, p_{rms} , στη διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος (βλέπε 'σταθερές ολοκλήρωσης'). Οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια ενισχύεται εσωτερικά, διέρχεται από σταθμιστικά φίλτρα και μια συστοιχία φίλτρων (για φασματική ανάλυση) και καταλήγει στην οθόνη, ως τιμή κάποιας σταθμισμένης λογαριθμικής κλίμακας.



Σχήμα 10. Ηχόμετρο [2], [11]

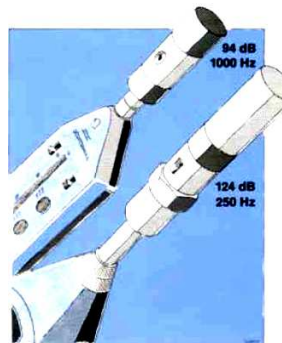
1.12.1. Κατηγορίες ηχομέτρων

Ανάλογα με την ακρίβειά τους τα ηχώμετρο διακρίνονται σε τρεις κύριους τύπους:

- Τύπου 1 (κατηγορία υψηλής ακρίβειας και τιμής)
- Τύπου 2 (μέτριας ακρίβειας με αρκετή απόκλιση σε υψηλές συνήθως συχνότητες)
- Τύπου εκτίμησης (survey).

1.12.2. Βαθμονόμηση

Βασική προϋπόθεση για έγκυρες ηχητικές μετρήσεις αποτελεί η σωστή βαθμονόμηση του ηχομέτρου πριν από κάθε χρήση. Αυτό γίνεται συνήθως με τη βοήθεια ενός φορητού ακουστικού βαθμονομητή, ο οποίος εκπέμπει συγκεκριμένη ηχητική στάθμη σε συγκεκριμένη συχνότητα (πχ. 94 dB στο 1 kHz) και τοποθετείται απευθείας στο μικρόφωνο.



Σχήμα 11. Φορητοί βαθμονομητές [11]

1.12.3. Σταθερές ολοκλήρωσης

Τα ηχώμετρα ουσιαστικά μετρούν τιμές ενεργού πίεσης, p_{rms} στη διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος. Συνήθως μάλιστα είναι εφοδιασμένα με περισσότερες από μια σταθερές χρόνου ολοκλήρωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά ολοκλήρωσης, τόσο πιο αργά αντιδρά το ηχώμετρο και τόσο πιο εύκολα αγνοεί πολύ σύντομα γεγονότα. Έχουμε εν γένει τις παρακάτω σταθερές ολοκλήρωσης:

- Fast (1/8 s, δηλαδή 125 ms)
- Slow (1 s)
- Impulse (35 ms)
- Peak (<100 μs).

Σε καμία περίπτωση αυτό που μας δίνει το ηχώμετρο δεν είναι η στάθμη που αντιστοιχεί σε στιγμιαίες τιμές πίεσης, $p(t)$!

1.13. Διαφορική ευαισθησία της ακοής

Διαφορική ευαισθησία της ακοής ονομάζουμε το ποσό κατά το οποίο πρέπει να μεταβληθεί η ένταση ή η συχνότητα ενός ήχου, ώστε αυτή να γίνει μόλις αντιληπτή από τον άνθρωπο.

Όπως είδαμε, το ανθρώπινο αυτί αντιδρά σε ηχητικά ερεθίσματα ενός πολύ μεγάλου εύρους συχνοτήτων. Το εντυπωσιακό είναι ότι ταυτόχρονα παρουσιάζει και πολύ μεγάλη διακριτική ικανότητα σε μικρές διαφορές έντασης ενός ήχου.

Αν και αυτή η διακριτική ικανότητα εξαρτάται από τη συχνότητα αλλά και από άλλους παράγοντες (διάρκεια του ήχου και ψυχολογικούς παράγοντες), μπορούμε σε γενικές γραμμές να πούμε τα παρακάτω:

Μεταβολή στάθμης (dB)	Μεταβολή στη φαινομενική αίσθηση της ακουστότητας
1	Μη αντιληπτή (εκτός καθαρών τόνων)
3	Μόλις αντιληπτή
6	Καθαρά αντιληπτή
10	Περίπου 2 φορές πιο δυνατός
20	Περίπου τέσσερις φορές πιο δυνατός

Πίνακας6. Διαφορικήευαισθησίαακοής [2]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΟΓΑΡΙΘΜΩΝ

$$\log(A \cdot B) = \log A + \log B$$

$$\log\left(\frac{A}{B}\right) = \log A - \log B$$

$$\log A^n = n \cdot \log A$$

Για επίλυση ως προς x:

$$\text{Αν } \log_{10} x = y \Leftrightarrow 10^{\log x} = 10^y \Leftrightarrow x = 10^y$$

$$\text{Αν } \ln x = y, \text{ δηλαδή } \log_e x = y \Leftrightarrow e^{\log_e x} = e^y \Leftrightarrow x = e^y$$

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] RossingT., MooreR., WheelerP. (2002). "The science of sound"
- [2] Egan D. (1988), "Architectural acoustics"
- [3] Moore B. (1997), "Psychology of hearing"
- [4] Kinsler L., Frey A., Coppens A., Sanders J. (2000), "Fundamentals of acoustics"
- [5] Porges G. (1977), "Applied acoustics"
- [6] Davis D., Davis C. (1997), "Sound system engineering"
- [7] Σκαρλάτος Δ. (2003), "Εφαρμοσμένη ακουστική"
- [8] EverestA. (1998), "Εγχειρίδιο ακουστικής"
- [9] Howard D., Angus J. (1996), "Acoustics and Psychoacoustics"
- [10] Κουτσοδημάκης Χ., Σηφάκης Μ., "Εργαστηριακό Φυλλάδιο Μηχανικής Ήχου Ι"
- [11] Brüel&Kjær, "Handbooks&Lectures", <http://www.bksv.com/3975.asp>

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές
 - Σχήμα
- (Να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)

Πειραματική διαδικασία

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βόθους (backgroundnoise) της αίθουσας (γραμμικά):
 $B = \dots\dots\dots dB$.
3. Για πηγή ήχου λευκού θορύβου φιλτραρισμένου στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα τα $125 Hz$ να μετρηθεί η στάθμη πίεσης με τρεις τρόπους: γραμμικά, με φίλτρο A και με φίλτρο C:

$$L_{P(lin)} = \dots\dots\dots dB, L_{P(A)} = \dots\dots\dots dB_A, L_{P(C)} = \dots\dots\dots dB_C.$$

4. Για πηγή ήχου λευκού θορύβου φιλτραρισμένου στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα το $1 kHz$ να μετρηθεί η στάθμη πίεσης με τρεις τρόπους, γραμμικά, με φίλτρο A και με φίλτρο C:

$$L_{P(lin)} = \dots\dots\dots dB, L_{P(A)} = \dots\dots\dots dB_A, L_{P(C)} = \dots\dots\dots dB_C.$$

Για πηγή ήχου να μετρηθεί η στάθμη ισοδύναμου θορύβου και να σημειωθεί ο χρόνος μέτρησης: $L_{eq} = \dots\dots\dots dB_A$ για $t = \dots\dots s$.

Η διαδικασία να επαναληφθεί για τον ήχο: $L_{eq} = \dots\dots\dots dB_A$ για $t = \dots\dots s$.

Επεξεργασία μετρήσεων

1. Τί παρατηρείτε στις τιμές των στάθμεων $L_{P(A)}$, $L_{P(C)}$ ως προς την $L_{P(lin)}$ στην εκάστοτε περίπτωση των μετρήσεων 3 και 4; Επιβεβαιώνεται η θεωρία;
2. Να υπολογιστούν τα $L_{P(A)}$ και $L_{P(C)}$ από την αντίστοιχη γραμμική μέτρηση για την οκτάβα με κεντρική συχνότητα τα $125 Hz$ (μέτρηση 3) και να γίνει σύγκριση με τις πειραματικές τιμές.
3. Να βρεθεί το συνολικό L_{eq} για κάποιον που εκτέθηκε διαδοχικά στους ήχους του και του Να γίνει μετατροπή του L_{eq} των ήχων σε SEL .

Άσκηση για εργασία

Να υπολογιστεί η στάθμη ισοδύναμου θορύβου L_{eq} στο διάστημα των 8 ωρών για έναν εργάτη που εκτίθεται στις παρακάτω στάθμες θορύβου και διάρκειες:

$L_p (dB_A)$	$t (h)$
94	3
89	2
98	0.5
83	2.5

ΑΣΚΗΣΗ 2

Μέτρηση ηχητικής στάθμης πίεσης 2^ο

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Στη συγκεκριμένη άσκηση θα ασχοληθούμε με την εξέταση των διαφορών ανάμεσα στις σταθερές ολοκλήρωσης του ηχόμετρου, με τους στατιστικούς δείκτες για τη μέτρηση του θορύβου και τέλος με τη μέτρηση της συνολικής ηχητικής στάθμης δύο πηγών που ηχούν ταυτόχρονα.

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

Στην προηγούμενη εργαστηριακή άσκηση ασχοληθήκαμε με τη στάθμη ηχητικής πίεσης που προέρχεται από μία μεμονωμένη ηχητική πηγή (στην πραγματικότητα με την παρουσία του θορύβου βάθους). Για το σκοπό αυτό κατά την εργαστηριακή άσκηση χρησιμοποιήσαμε ένα μόνο ηχείο.

Στο συγκεκριμένο εργαστήριο θα ασχοληθούμε με τη συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης που προέρχεται από περισσότερες από μία πηγές, που είναι και το πιο σύνηθες.

Όταν δύο πηγές εκπέμπουν ταυτόχρονα ηχητική ενέργεια, συμβάλλουν και οι δύο στη συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάποιο σημείο του χώρου.

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις, οι οποίες διαφοροποιούν το τελικό αποτέλεσμα του υπολογισμού της συνολικής ηχητικής στάθμης, όταν γνωρίζουμε τις επιμέρους στάθμες των πηγών που δημιουργούνται στο συγκεκριμένο σημείο του χώρου.

(I) Συνδυασμός στάθμεων ηχητικής πίεσης

(I.1) Ηχητικές πηγές με φασική εξάρτηση

Πρόκειται για την περίπτωση κατά την οποία οι πηγές σχετίζονται φασικά μεταξύ τους. Η έννοια της στατιστικής εξάρτησης για δύο ομάδες δεδομένων χρησιμοποιείται όταν σε κάθε χρονική στιγμή τα στοιχεία της μίας ομάδας μπορούν να συσχετιστούν, συνήθως με γραμμικό τρόπο, με τα στοιχεία της άλλης. Στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει σημαίνει ότι ο ήχος προέρχεται από δύο πηγές, οι οποίες εκπέμπουν ηχητικά κύματα με τα ίδια χαρακτηριστικά (δηλαδή ίδια κυματομορφή, ίδιο πλάτος και συχνοτικό περιεχόμενο ανά χρονική στιγμή), σε φάση ή με κάποια σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ τους.

Οι πλέον συνήθεις περιπτώσεις που απαντώνται στην πράξη είναι οι ακόλουθες:

(α) Αν χρησιμοποιούμε ένα ή παραπάνω ηχεία, τα οποία τροφοδοτούνται με το ίδιο (μονοφωνικό) σήμα από **κοινή ηλεκτρική πηγή**. Σε αυτή την περίπτωση, επειδή τα ηχεία είναι τοποθετημένα σε διάφορα σημεία του χώρου και εκπέμπουν ταυτόχρονα το ίδιο σήμα, λειτουργούν ως σύμφωνες πηγές.

(β) Αν έχουμε το συνδυασμό του σήματος μιας πηγής με μια **απλή ανάκλαση** σε κοντινή επιφάνεια του χώρου. Στην περίπτωση αυτή είναι σαν να έχουμε δύο πηγές, την αρχική και ένα είδωλό της. Αν η διαφορά χρόνου (λόγω δρόμου) με την οποία συμβάλλουν τα κύματα αυτών των δύο πηγών είναι μικρή, τότε ο ήχος που προήλθε από ανάκλαση θα είναι όμοιος με τον αρχικό. Αυτό μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να δημιουργήσει προβλήματα κατά την ηχογράφιση ή την ενίσχυση του σήματος από ένα μικρόφωνο, όταν αυτό λαμβάνει ταυτόχρονα τον απευθείας ήχο και τον ανακλώμενο, οπότε εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής.

Στην περίπτωση των σύμφωνων πηγών εμφανίζονται **φαινόμενα συμβολής**. Έτσι η συνολική πίεση, άρα και η συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης, εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο συμβάλλουν μεταξύ τους τα ηχητικά κύματα των δύο αυτών πηγών. Το αν θα έχουμε πλήρως καταστρεπτική (αποσβεστική) ή πλήρως εποικοδομητική (ενισχυτική) συμβολή ή κάτι ενδιάμεσο εξαρτάται από τη σχετική διαφορά φάσης με την οποία συμβάλλουν στο υπό παρατήρηση σημείο. Αυτή με τη σειρά της εξαρτάται από τη διαφορά φάσης με την οποία εκπέμπονται τα δύο κύματα (ή και αυτή που εισάγεται στην περίπτωση των ανακλάσεων λόγω διαφοράς διαδρομών), από τη σχετική θέση των πηγών και τη θέση του σημείου παρατήρησης ως προς αυτές και από τη συχνότητά τους. Αυτό δείχνει ότι *το είδος της συμβολής αλλάζει έντονα καθώς κινούμαστε στο χώρο*.

Στην περίπτωση των σύμφωνων ηχητικών πηγών, λόγω της αρχής της επαλληλίας που ισχύει για τα κύματα, προσθέτουμε τις στιγμιαίες τιμές ηχητικής πίεσης από τις διάφορες πηγές:

$$P_{\text{ολ-σχετικη}}(t) = p_1(t) + p_2(t) + \dots + p_N(t) \quad (I.1), \text{ όπου } p_N(t) = A_N \cdot \sin(\omega t + \phi_N)$$

και το αποτέλεσμα εξαρτάται από τον τρόπο συμβολής.

Έστω η γενική περίπτωση δύο σύμφωνων πηγών, τα σήματα των οποίων φτάνουν στο σημείο παρατήρησης με μια διαφορά φάσης $\Delta\phi$ μεταξύ τους και με πλάτη A_1 και A_2 αντίστοιχα. Τότε για τη συνολική πίεση στο σημείο αυτό θα έχουμε:

$$P_{\text{ολ-σχετικη}}(t) = A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(\omega t + \phi_2)$$

Ενισχυτική συμβολή:

Έστω η περίπτωση δύο σύμφωνων πηγών που δημιουργούν κύματα που έχουν ίδια πλάτη και βρίσκονται σε ίδια απόσταση από το σημείο παρατήρησης. Αυτό σημαίνει ότι θα έχουν διαφορά φάσης μηδενική ή πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, δηλαδή θα είναι σε φάση μεταξύ τους. Οπότε έχουμε:

$$A_1 = A_2 = A \text{ και } \Delta\phi = 0 \text{ ή γενικά } \Delta\phi = 2k \cdot \pi, \text{ όπου } k = 0, 1, 2, 3, \dots \Rightarrow$$

$$p_{\text{ολ-}correlated}(t) = A \cdot \sin(\omega t) + A \cdot \sin(\omega t) = 2A \cdot \sin(\omega t)$$

Επομένως το πλάτος της πίεσης σε αυτή την περίπτωση θα είναι $2A$, δηλαδή διπλάσιο της μίας πηγής. Αυτή είναι και η **μέγιστη** τιμή.

Αποσβεστική συμβολή:

Έστω η περίπτωση δύο σύμφωνων πηγών που δημιουργούν κύματα που έχουν ίδια πλάτη και διαφορά φάσης π ή περιττό πολλαπλάσιο αυτού, δηλαδή είναι εκτός φάσης. Δηλαδή:

$$A_1 = A_2 = A \text{ και } \Delta\phi = \pi \text{ ή γενικά } \Delta\phi = (2k + 1) \cdot \pi, \text{ όπου } k = 0, 1, 2, 3, \dots \Rightarrow$$

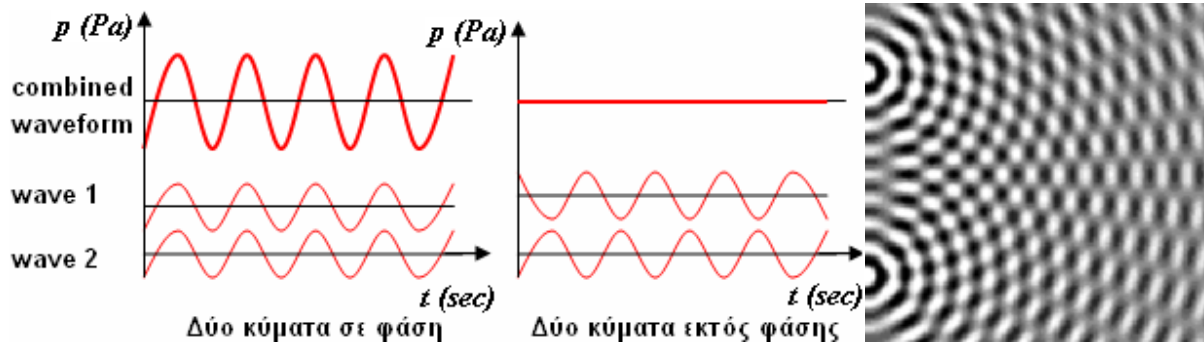
$$p_{\text{ολ-}correlated}(t) = A \cdot \sin(\omega t) + A \cdot \sin(\omega t + 2\pi) = A \cdot \sin(\omega t) - A \cdot \sin(\omega t) = 0$$

Αυτή είναι και η **ελάχιστη** τιμή.

Εφ' όσον η ένταση είναι ανάλογη του τετραγώνου της πίεσης, βλέπουμε ότι στην περίπτωση που δύο κύματα έχουν ίδια πλάτη (πράγμα που μπορεί π.χ. να γίνει με δύο ηχεία που τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή) έχουμε τα εξής:

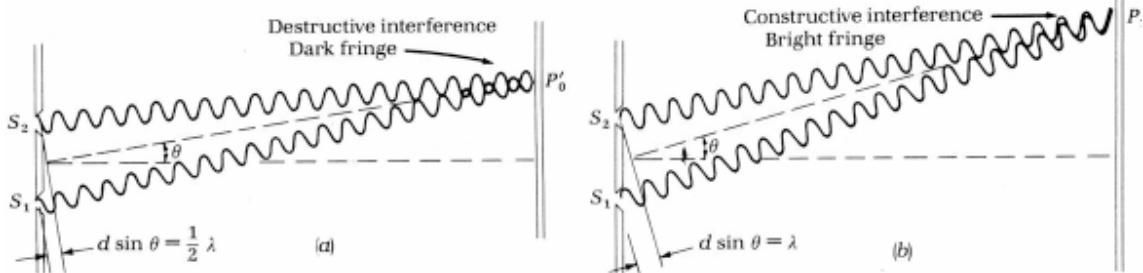
$$\begin{aligned} 0 < p_{\text{ολ-}correlated} < 2A \\ 0 < I_{\text{ολ-}correlated} < 4A^2 \end{aligned} \quad (1.2)$$

αναλόγως με τον τρόπο συμβολής.



Σχήμα 1. (α) Ενισχυτική & αποσβεστική συμβολή και (β) Κροσσοί συμβολής

Ο τρόπος συμβολής εξαρτάται από τη διαφορά φάσης ή τη διαφορά δρόμων ανάμεσα στα δύο κύματα.



Σχήμα 2. (α) Καταστρεπτική και (β) Ενισχυτική συμβολή για ακραίες διαφορές φάσης/δρόμου [1]

Η διαφορά φάσης ή δρόμων μπορεί επίσης να εκφραστεί και σε πολλαπλάσια του μήκους κύματος ως εξής:

Εν γένει δύο σύμφωνες πηγές:

- συμβάλλουν **ενισχυτικά** όταν $\Delta\phi = k \cdot \lambda$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

δηλαδή η διαφορά φάσης τους είναι ίση με ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος και

- συμβάλλουν **αποσβεστικά** όταν $\Delta\phi = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

δηλαδή η διαφορά φάσης τους είναι ίση με περιττό ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος.

Πρόσθεση στάθμεων ηχητικής πίεσης

Έστω δύο σύμφωνες ηχητικές πηγές με **ίδια πλάτη** ηχητικής πίεσης.

- **Ενισχυτική συμβολή.** Έχουμε διπλασιασμό της πίεσης σε σχέση με τη μία πηγή ($A_{ολ-correlated} = 2A$)

$$\Rightarrow (L_{p-ολ})_{correlated}^{max} = 20 \cdot \log \frac{P_{max}}{P_{ref}} = 20 \cdot \log \frac{2P_1}{P_{ref}} = 20 \cdot \log \frac{P_1}{P_{ref}} + 20 \cdot \log 2 = L_{p-1} + 6dB$$

- **Αποσβεστική συμβολή.** Έχουμε μηδενική ηχητική πίεση

$$\Rightarrow (L_{p-ολ})_{correlated}^{min} = 0dB$$

Η γενική σχέση που δίνει τη συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης σε ένα σημείο παρατήρησης, όταν γνωρίζουμε τη στάθμη της κάθε μίας πηγής ξεχωριστά και τη σχετική τους φάση στο ίδιο σημείο είναι:

$$(L_{p-ολ})_{correlated} = 20 \cdot \log \sqrt{(10^{L_{p-1}/20})^2 + (10^{L_{p-2}/20})^2 + 2(10^{L_{p-1}/20} \cdot 10^{L_{p-2}/20}) \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

Από αυτήν μπορούμε να καταλήξουμε στα προηγούμενα αποτελέσματα ως εξής:

(1.3)

Για τις ακραίες περιπτώσεις διαφοράς φάσης έχουμε:

$$(α) \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} L_{p-ολ} &= 20 \cdot \log \sqrt{(10^{L_{p-1}/20})^2 + (10^{L_{p-2}/20})^2 + 2(10^{L_{p-1}/20} \cdot 10^{L_{p-2}/20})} \\ &= 20 \cdot \log \sqrt{(10^{L_{p-1}/20} + 10^{L_{p-2}/20})^2} \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow (L_{p-ολ})_{correlated}^{max} = 20 \cdot \log(10^{L_{p-1}/20} + 10^{L_{p-2}/20}), \text{ που είναι η } \underline{\text{μέγιστη}} \text{ δυνατή τιμή, και}$$

$$(β) \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \pi \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} L_{p-ολ} &= 20 \cdot \log \sqrt{(10^{L_{p-1}/20})^2 + (10^{L_{p-2}/20})^2 + 2(10^{L_{p-1}/20} \cdot 10^{L_{p-2}/20}) \cdot \cos(\pi)} \\ &= 20 \cdot \log \sqrt{(10^{L_{p-1}/20})^2 + (10^{L_{p-2}/20})^2 + 2(10^{L_{p-1}/20} \cdot 10^{L_{p-2}/20}) \cdot (-1)} \\ &= 20 \cdot \log \sqrt{(10^{L_{p-1}/20})^2 + (10^{L_{p-2}/20})^2 - 2(10^{L_{p-1}/20} \cdot 10^{L_{p-2}/20})} \\ &= 20 \cdot \log \sqrt{(10^{L_{p-1}/20} - 10^{L_{p-2}/20})^2} \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow (L_{p-ολ})_{correlated}^{min} = 20 \cdot \log(10^{L_{p-1}/20} - 10^{L_{p-2}/20}), \text{ που είναι η } \underline{\text{ελάχιστη}} \text{ δυνατή τιμή.}$$

Σε περίπτωση που: $L_{p-1} = L_{p-2} = L_p \Rightarrow$

$$\begin{aligned} (α) (L_{p-ολ})_{correlated}^{max} &= 20 \cdot \log(10^{L_p/20} + 10^{L_p/20}) = 20 \cdot \log(2 \cdot 10^{L_p/20}) \\ &= 20 \cdot \log(10^{L_p/20}) + 20 \cdot \log 2 = 20 \cdot \frac{L_p}{20} \log 10 + 20 \cdot \log 2 = L_p + 20 \cdot 0,3 \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow (L_{p-ολ})_{correlated}^{max} = L_p + 6dB \text{ η } \underline{\text{μέγιστη}} \text{ τιμή και}$$

$$(β) (L_{p-ολ})_{correlated}^{min} = 20 \cdot \log(10^{L_p/20} - 10^{L_p/20}) = 20 \cdot \log 0$$

$$\Leftrightarrow (L_{p-ολ})_{correlated}^{min} = 0dB \text{ η } \underline{\text{ελάχιστη}} \text{ τιμή}$$

Επομένως:

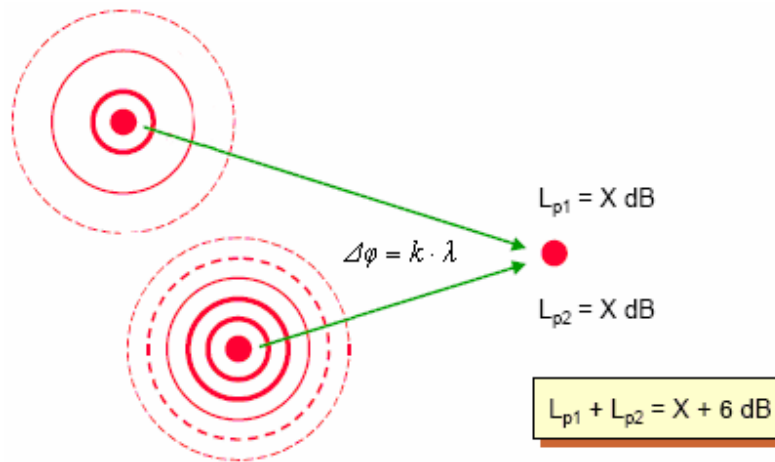
Στην περίπτωση **2 σύμφωνων** πηγών η συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών **min-max** που δίνονται από τη σχέση:

$$(L_{p-ολ})_{correlated}^{min} = 20 \cdot \log(10^{L_{p-1}/20} - 10^{L_{p-2}/20}) \quad (1.4.1)$$

$$(L_{p-ολ})_{correlated}^{max} = 20 \cdot \log(10^{L_{p-1}/20} + 10^{L_{p-2}/20}) \quad (1.4.2)$$

Στην περίπτωση που έχουμε **ίδιο πλάτος** ηχητικής πίεσης ($\Rightarrow L_{p-1} = L_{p-2} = L_p$) οι τιμές της συνολικής ηχητικής στάθμης κυμαίνονται μεταξύ:

$$(L_{p-ολ})_{correlated}^{min} = 0dB$$

$$(L_{p-ολ})_{correlated}^{max} = L_p + 6dB \quad (1.5)$$


Σχήμα 3. Πρόσθεση δύο φασικά εξαρτημένων πηγών, με ίδια ηχητική στάθμη & μηδενική διαφορά φάσης [6]

Με βάση τη γενική σχέση (1.3) καταλήγουμε στις τιμές του παρακάτω πίνακα για τις διάφορες περιπτώσεις:

Signal 1 Amplitude, L_p (dB)	Signal 1 Phase (degree)	Signal 2 Amplitude, L_p (dB)	Signal 2 Phase (degree)	Combined Signal Amp, L_p (dB)
90	0	+90	0	96.02
90	0	+90	10	95.99
90	0	+90	20	95.89
90	0	+90	30	95.72
90	0	+90	40	95.48
90	0	+90	50	95.17
90	0	+90	60	94.77
90	0	+90	70	94.29
90	0	+90	80	93.71
90	0	+90	90	93.01
90	0	+90	100	92.18
90	0	+90	110	91.19
90	0	+90	120	90.00
90	0	+90	130	88.54
90	0	+90	140	86.70
90	0	+90	150	84.28
90	0	+90	160	80.81
90	0	+90	170	74.83
90	0	+90	180	0.00

Πίνακας 1. Συνολική στάθμη συσχετισμένων πηγών για ποικίλες διαφορές φάσης [3]

Σε όλα τα παραπάνω είχαμε λάβει υπ' όψιν μας την περίπτωση μιας *καθαρής συχνότητας*. Στη φύση παρ' όλα αυτά οι πηγές είναι συνήθως *σύνθετες*, δηλαδή περιέχουν περισσότερες συχνότητες. Στην περίπτωση δύο πηγών θορύβου, για παράδειγμα, το κύμα διαθέτει μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων, με αποτέλεσμα το φαινόμενο της ενισχυτικής και αποσβεστικής συμβολής να μην είναι τόσο έντονο. Εφ' όσον τα παραπάνω φαινόμενα δεν αναμένονται, μπορούμε να προσθέσουμε απλώς την ενέργεια που διέρχεται από μια επιφάνεια ή αλλιώς την ένταση που προέρχεται από κάθε πηγή, όπως ακριβώς κάνουμε και με τις ανεξάρτητες πηγές.

(I.2) Ανεξάρτητες πηγές

Είναι η πιο γενική περίπτωση, στην οποία πρόκειται για δύο ή παραπάνω πηγές που ηχούν ταυτόχρονα, αλλά ανεξάρτητα η μία από την άλλη.

Αυτό μπορεί να ισχύει στην περίπτωση τελείως διαφορετικών πηγών (π.χ. δύο μουσικά όργανα) που ηχούν ταυτόχρονα ή στην περίπτωση μίας κοινής πηγής και των ανακλάσεων της σε μακρινές επιφάνειες (μεγάλη χρονική υστέρηση).

Στην πρώτη περίπτωση έχουμε δύο διαφορετικές κυματομορφές με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο, ακόμα κι αν οι δύο πηγές παίζουν π.χ. ταυτόχρονα την ίδια μουσική φράση.

Στη δεύτερη περίπτωση, αν και πρόκειται για κοινή πηγή, λόγω της μεγάλης χρονικής υστέρησης η πρωτογενής πηγή θα έχει αλλάξει τελείως χαρακτηριστικά (συχνότητα, πλάτος, κυματομορφή), έτσι ώστε να μην εμφανίζεται κάποια συσχέτιση με τις ανακλάσεις της.

Εφαρμόζοντας τη γενική αρχή της επαλληλίας για τα κύματα, έχουμε:

$$P_{ολ-uncorrelated}(t) = p_1(t) + p_2(t) + \dots + p_N(t), \text{ όπου } p_N(t) = A_N \cdot \sin(\omega t + \phi_N)$$

Ειδικά για την περίπτωση των ανεξάρτητων πηγών θα έχουμε:

$$(P_{ολ-uncorrelated})_{rms} = \sqrt{P_{rms,1}^2 + P_{rms,2}^2 + \dots + P_{rms,N}^2} \quad (2.1)$$

$$(P_{ολ-uncorrelated})_{rms}^2 = P_{rms,1}^2 + P_{rms,2}^2 + \dots + P_{rms,N}^2, \text{ όπου } P_{rms,N}^2 = \frac{A_N^2}{2} \Leftrightarrow P_{rms,N} = \frac{A_N}{\sqrt{2}}$$

Εφόσον η ένταση I είναι ανάλογη του τετραγώνου της ενεργού πίεσεως (εργαστηριακή άσκηση I) και η ένταση με τη σειρά της είναι ανάλογη της ηχητικής ισχύος την οποία εκπέμπει η πηγή, η παραπάνω σχέση εκφράζει το άθροισμα της ενέργειας που προέρχεται από τις επιμέρους πηγές, δηλαδή:

$$I_{ολ-uncorrelated} = I_1 + I_2 + \dots + I_N \text{ και } W_{ολ-uncorrelated} = W_1 + W_2 + \dots + W_N$$

Πρόσθεση στάθμεων ηχητικής πίεσης

Για τη στάθμη ηχητικής πίεσης ισχύει:

$$\begin{aligned} (L_{p-ολ})_{uncorrelated} &= 10 \cdot \log \frac{P_{ολ}^2}{P_{ref}^2} = 10 \cdot \log \frac{P_{rms,1}^2 + P_{rms,2}^2 + \dots + P_{rms,N}^2}{P_{ref}^2} \\ &= 10 \cdot \log \left(\frac{P_{rms,1}^2}{P_{ref}^2} + \frac{P_{rms,2}^2}{P_{ref}^2} + \dots + \frac{P_{rms,N}^2}{P_{ref}^2} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Από τη σχέση της στάθμης ηχητικής πίεσης: } L_{p-i} = 10 \cdot \log \frac{P_{rms,i}^2}{P_{ref}^2} \Leftrightarrow \frac{L_{p-i}}{10} = \log \frac{P_{rms,i}^2}{P_{ref}^2} \Leftrightarrow$$

$$10^{L_{p-i}/10} = \frac{P_{rms,i}^2}{P_{ref}^2} \Rightarrow$$

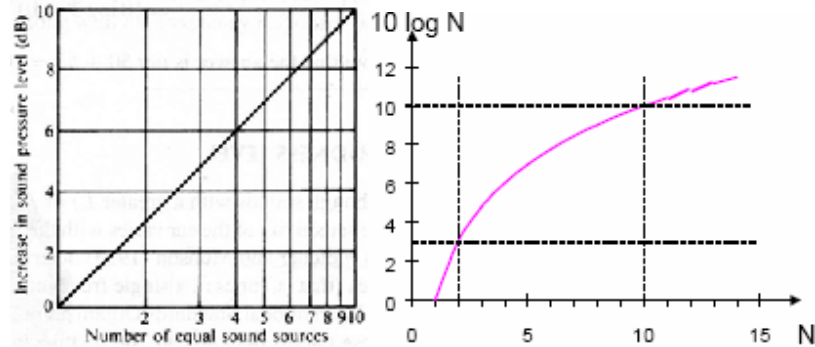
$$\text{έχουμε για } N \text{ πηγές: } (L_{p-ολ})_{uncorrelated} = 10 \cdot \log(10^{L_{p-1}/10} + 10^{L_{p-2}/10} + \dots + 10^{L_{p-N}/10}) \quad (2.2)$$

Στην ειδική περίπτωση όπου $L_{p-1} = L_{p-2} = \dots = L_{p-N} = L_p \Rightarrow$

$$(L_{p-ολ})_{uncorrelated} = 10 \cdot \log(10^{L_p/10} + 10^{L_p/10} + \dots + 10^{L_p/10}) = 10 \cdot \log(N \cdot 10^{L_p/10}) \Leftrightarrow$$

$$(L_{p-ολ})_{uncorrelated} = 10 \cdot \log(10^{L_p/10}) + 10 \cdot \log N = 10 \cdot \frac{L_p}{10} \log 10 + 10 \cdot \log N \Leftrightarrow$$

$$(L_{p-ολ})_{uncorrelated} = L_p + 10 \cdot \log N \quad (2.3)$$



Σχήμα 4. Αύξηση στάθμης με προσθήκη όμοιων πηγών [2]

\Rightarrow Για **δύο πηγές** έχουμε: $(L_{p-ολ})_{uncorrelated} = 10 \cdot \log(10^{L_{p-1}/10} + 10^{L_{p-2}/10})$

Στην ειδική περίπτωση όπου $L_{p-1} = L_{p-2} = L_p$

$$\Leftrightarrow 10 \cdot \log \frac{p_{rms,1}^2}{p_{ref}^2} = 10 \cdot \log \frac{p_{rms,2}^2}{p_{ref}^2} \Leftrightarrow 10 \log \frac{p_{rms,1}^2}{p_{ref}^2} = 10 \log \frac{p_{rms,2}^2}{p_{ref}^2} \Leftrightarrow \frac{p_{rms,1}^2}{p_{ref}^2} = \frac{p_{rms,2}^2}{p_{ref}^2} \Leftrightarrow p_{rms,1}^2 = p_{rms,2}^2$$

$$\Leftrightarrow (p_{ολ-uncorrelated})_{rms}^2 = p_{rms,1}^2 + p_{rms,2}^2 = 2 \cdot p_{rms}^2 \Leftrightarrow (p_{ολ-uncorrelated})_{rms} = \sqrt{2} \cdot p_{rms}$$

\Rightarrow έχουμε: $(L_{p-ολ})_{uncorrelated} = L_p + 10 \cdot \log 2 = L_p + 3dB$

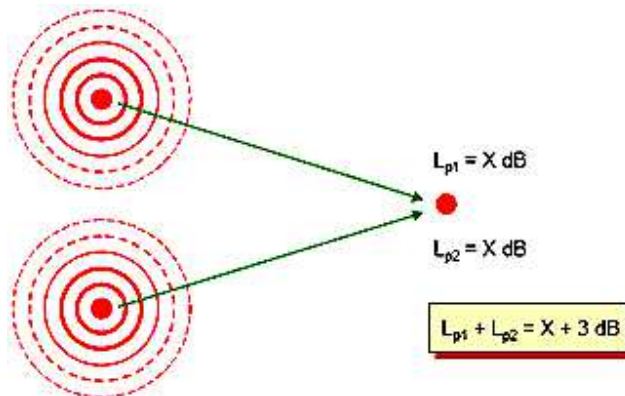
Στην περίπτωση **2 ανεξάρτητων** πηγών η συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης έχει τιμή που δίνεται από τη σχέση:

$$(L_{p-ολ})_{uncorrelated} = 10 \cdot \log(10^{L_{p-1}/10} + 10^{L_{p-2}/10}) \quad (2.4)$$

Στην περίπτωση που έχουμε **ίδιο πλάτος** ηχητικής πίεσης ($\Rightarrow L_{p-1} = L_{p-2} = L_p$)

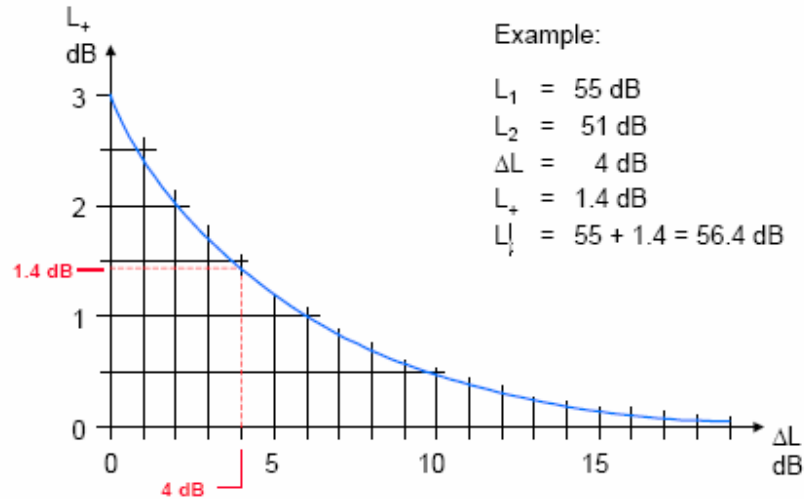
η συνολική στάθμη παίρνει την τιμή:

$$(L_{p-ολ})_{uncorrelated} = L_p + 3dB \quad (2.5)$$



Σχήμα 5. Άθροισμα δύο ανεξάρτητων πηγών με ίδια στάθμη [6]

Αν οι στάθμες δύο διαφορετικών πηγών έχουν μετρηθεί ξεχωριστά και θέλουμε να υπολογίσουμε τη συνολική στάθμη που θα προκύψει, αν λειτουργήσουν ταυτόχρονα, μπορούμε είτε να υπολογίσουμε επακριβώς την τιμή από τη (2.4) είτε να χρησιμοποιήσουμε την επόμενη γραφική παράσταση ή τον πίνακα, για έναν γρήγορο υπολογισμό.



Σχήμα 6. Διορθωτικός παράγοντας άθροισης για ανεξάρτητες πηγές [6]

Διαφορά μεταξύ των δύο στάθμεων [dB_A]	Προσθετικός διορθωτικός παράγοντας στην υψηλότερη στάθμη [dB_A]
0	3.0
1	2.5
2	2.0
3	1.8
4	1.4
5	1.2
6	1.0
7	0.8
8	0.7
9	0.6
>10	0.5

Πίνακας 2. Προσθετικός διορθωτικός παράγοντας για ανεξάρτητες πηγές

Δηλαδή, βρίσκουμε πρώτα τη διαφορά των στάθμεων των δύο πηγών και στη συνέχεια προσθέτουμε στη μεγαλύτερη στάθμη από τις δύο τον διορθωτικό παράγοντα του πίνακα που αντιστοιχεί σε αυτή τη διαφορά.

Αφαίρεση στάθμεων ηχητικής πίεσης

Κατά αντιστοιχία της πρόσθεσης γίνεται και η αφαίρεση στάθμεων. Η πιο συνήθης εφαρμογή της βρίσκεται στην αφαίρεση του θορύβου βάθους, όταν θέλουμε να μετρήσουμε την εκπεμπόμενη ηχητική στάθμη πίεσης από μια πηγή που μας ενδιαφέρει, η οποία όμως λειτουργεί σε ένα θορυβώδες περιβάλλον.

Έτσι έχουμε για δύο ανεξάρτητες πηγές (την πηγή ενδιαφέροντος και το θόρυβο βάθους):

$$(L_{p-\text{ολ}})_{\text{uncorr}} = 10 \cdot \log(10^{L_{p-\pi}/10} + 10^{L_{p-\theta\beta}/10})$$

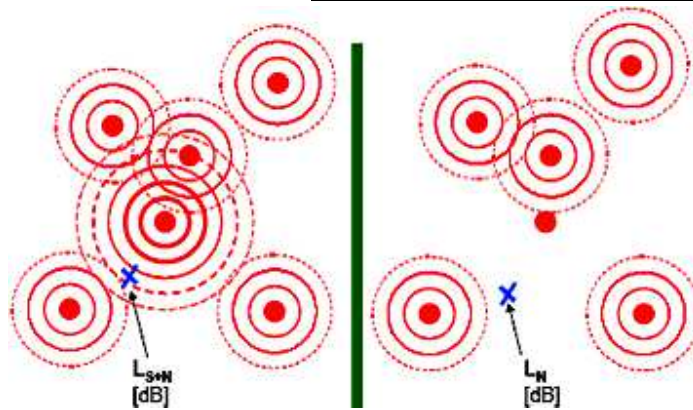
Λύνοντας ως προς τη στάθμη της πηγής $L_{p-\pi}$ έχουμε:

$$\frac{L_{p-\text{ολ-uncorr}}}{10} = \log(10^{L_{p-\pi}/10} + 10^{L_{p-\theta\beta}/10}) \Leftrightarrow 10^{L_{p-\text{ολ-uncorr}}/10} = 10^{\log(10^{L_{p-\pi}/10} + 10^{L_{p-\theta\beta}/10})}$$

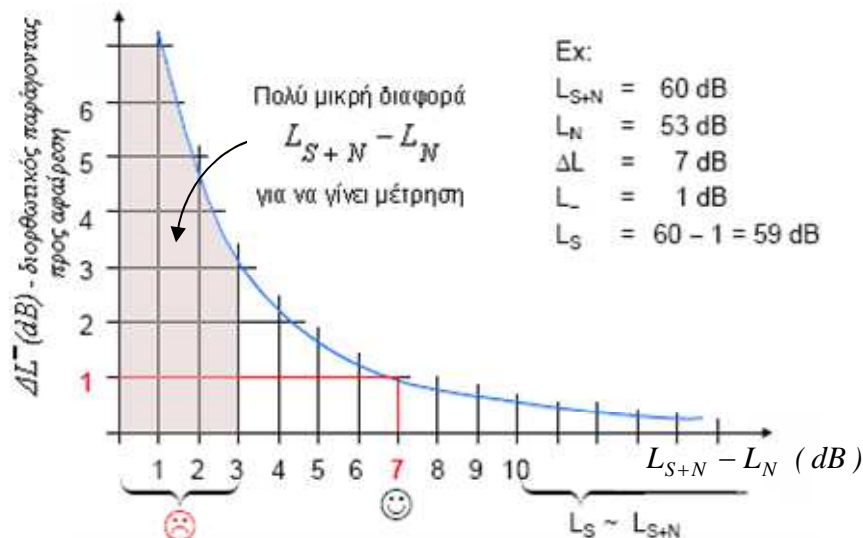
$$\Leftrightarrow 10^{L_{p-\text{ολ-uncorr}}/10} = 10^{L_{p-\pi}/10} + 10^{L_{p-\theta\beta}/10} \Leftrightarrow 10^{L_{p-\pi}/10} = 10^{L_{p-\text{ολ-uncorr}}/10} - 10^{L_{p-\theta\beta}/10}$$

$$\Leftrightarrow \log 10^{L_{p-\pi}/10} = \log(10^{L_{p-\text{ολ-uncorr}}/10} - 10^{L_{p-\theta\beta}/10}) \Leftrightarrow$$

$$\frac{L_{p-\pi}}{10} = \log(10^{L_{p-\text{ολ-uncorr}}/10} - 10^{L_{p-\theta\beta}/10}) \Leftrightarrow L_{p-\pi} = 10 \cdot \log(10^{L_{p-\text{ολ-uncorr}}/10} - 10^{L_{p-\theta\beta}/10}) \quad (2.6)$$



Σχήμα 7. Αφαίρεση θορύβου βάθους [6]



Σχήμα 8. Διόρθωση για θόρυβο βάθους (L_{S+N} συνολικός θόρυβος, L_N θόρυβος βάθους) [6]

Για τον γρήγορο υπολογισμό της στάθμης μιας πηγής που λειτουργεί μέσα σε θορυβώδες περιβάλλον, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το παραπάνω διάγραμμα. Από τις δύο μετρήσεις, τη συνολική στάθμη

L_{S+N} & τη στάθμη θορύβου βάθους L_N , υπολογίζουμε τη διαφορά. Από το διάγραμμα βρίσκουμε τον αντίστοιχο διορθωτικό παράγοντα, τον οποίο αφαιρούμε από τη συνολική L_{S+N} . (με την προϋπόθεση ότι έχουν μια διαφορά τουλάχιστον 3 dB, αλλιώς δεν έχει νόημα η μέτρηση).

(I.3) Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω σχέσεις διαπιστώνουμε ότι η άθροιση περισσότερων ανεξάρτητων πηγών παρουσιάζει μεγάλες διαφορές ως προς την άθροιση *σύμφωνων* πηγών.

(α) Η άθροιση σύμφωνων πηγών δεν εξαρτάται μόνο από την τιμή των στάθμεων από τις διάφορες πηγές, αλλά και από τη θέση τους στο χώρο, δηλαδή τη διαφορά διαδρομής ως προς το σημείο παρατήρησης.

Αντίθετα, στην περίπτωση των ανεξάρτητων πηγών το άθροισμα δίνεται απλώς από το άθροισμα των ισχύων (κατά συνέπεια τετραγωνικών πιέσεων) ανεξάρτητα από διαφορά φάσης και θέση στο χώρο.

Αυτό σημαίνει ότι η προσθήκη ανεξάρτητων ηχητικών πηγών πάντα προκαλεί αύξηση της συνολικής στάθμης, σε αντίθεση με την περίπτωση των σύμφωνων πηγών, όπου μπορούμε να έχουμε μέχρι και μηδενισμό της πίεσης.

(β) Πάντως, από τις σχέσεις (2.5) και (I.5) φαίνεται ότι η αύξηση της στάθμης στην περίπτωση των ανεξάρτητων πηγών είναι πάντοτε μικρότερη από την αντίστοιχη των σύμφωνων πηγών.

(I.4) Προσοχή!

Σε κάθε περίπτωση λόγω του γεγονότος ότι οι στάθμες αντιπροσωπεύονται από λογαρίθμους, **ΟΙ ΣΤΑΘΜΕΣ ΠΟΤΕ ΔΕΝ ΠΡΟΣΤΙΘΕΝΤΑΙ / ΑΦΑΙΡΟΥΝΤΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ!**

Γι' αυτό και συχνά την πρόσθεση και την αφαίρεση δύο στάθμεων τις συμβολίζουμε ως εξής:

$$(L_{p-ολ}) = L_1 \oplus L_2$$

$$(L_{p-ολ}) = L_1 \ominus L_2$$

Για παράδειγμα:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \log\left(10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{80}{10}}\right) = 10 \cdot \log(2 \cdot 10^8) = 10 \cdot \log 10^8 + 10 \cdot \log 2 = 8 \cdot 10 \cdot \log 10 + 10 \cdot \log 2$$

$$\Leftrightarrow L_1 \oplus L_2 = 80 + 10 \cdot \log 2 = 80 + 10 \cdot 0,3 = 80 + 3 = 83dB$$

(II) Σταθερές ολοκλήρωσης του ηχομέτρου

Όπως γνωρίζουμε, το φυσικό μέγεθος που μετρά ένα ηχώμετρο είναι η πίεση. Επειδή συνήθως η ένταση του ήχου μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο, το ίδιο ισχύει και για την πίεση.

Αν και θα θέλαμε να μετρήσουμε τις τιμές της πίεσης όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια, θα ήταν δύσκολη έως αδύνατη η ανάγνωση των τιμών, με τόσο γρήγορες διακυμάνσεις. Γι' αυτό και θα πρέπει να κάνουμε μια ολοκλήρωση στο χρόνο και να πάρουμε μια τιμή, η οποία θα αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Έτσι στην πράξη το ηχώμετρο δε μας δίνει εν γένει μετρήσεις για τις στιγμιαίες τιμές της πίεσης, $p(t)$, αλλά για τις ενεργές τιμές πίεσης, p_{rms} . Οι ενεργές τιμές της πίεσης υπολογίζονται από την ολοκλήρωση του τετραγώνου των στιγμιαίων πιέσεων σε κάποιο χρονικό διάστημα, οπότε έχουμε:

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt \quad (3.1)$$

Από αυτές το ηχώμετρο υπολογίζει τις αντίστοιχες στάθμες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν μια μέση τιμή της ηχητικής στάθμης πίεσης στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και μας δίνει το αποτέλεσμα στο τέλος του

αντίστοιχο χρονικό διαστήματος ολοκλήρωσης. Η τιμή αυτή εξαρτάται βεβαίως από το χρονικό διάστημα της ολοκλήρωσης.

Γι' αυτό τα ηχόμετρα είναι εφοδιασμένα με διάφορες σταθερές χρόνου ολοκλήρωσης, τις οποίες ο χρήστης μπορεί να αλλάζει ανάλογα με την περίπτωση. Έτσι έχουμε:

- 'S' - 'Slow': $T = 1\text{ s}$

- 'F' - 'Fast': $T = \frac{1}{8}\text{ s} = 125\text{ ms}$

Κάποια ηχόμετρα διαθέτουν και τις παρακάτω επιπλέον ρυθμίσεις:

- 'I' - 'Impulse': $T = 35\text{ ms}$

- 'P' - 'Peak': $T = 50\text{ }\mu\text{s}$

Οι παραπάνω σταθερές καθορίζουν το χρόνο αντίδρασης του ηχομέτρου, δηλαδή ποιο θα είναι το χρονικό διάστημα της ολοκλήρωσης και πόσο συχνά θα μας δίνει νέα ένδειξη το ηχόμετρο για τη μέση τιμή της SPL, σύμφωνα με τις στιγμιαίες διακυμάνσεις του ήχου. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά ολοκλήρωσης, τόσο πιο αργά αντιδρά το ηχόμετρο και τόσο πιο εύκολα αγνοεί πολύ σύντομα γεγονότα.

Η επιλογή της κατάλληλης σταθεράς ολοκλήρωσης εξαρτάται από το είδος του υπό μέτρηση ήχου / θορύβου και το σκοπό των μετρήσεων, ενώ πολλές φορές υπαγορεύεται από τα χρησιμοποιούμενα πρότυπα, στα οποία θα βασιστεί η μελέτη.

Η ρύθμιση 'slow' καθιστά το ηχόμετρο λιγότερο ευαίσθητο στις γρήγορες διακυμάνσεις της ηχητικής στάθμης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ήχους που εμφανίζουν αργές μεταβολές. Στην περίπτωση αυτή οι ενδείξεις αντιπροσωπεύουν μια πιο χονδροειδή μέση τιμή των στιγμιαίων τιμών πίεσης, ενώ παράλληλα μειώνουν τις διακυμάνσεις των ενδείξεων, τόσο ως προς το χρόνο μεταβολής όσο και ως προς τις τιμές τους. Χρησιμοποιείται περισσότερο στη μέτρηση περιβαλλοντικού θορύβου και θορύβου στο εργασιακό περιβάλλον.

Η ρύθμιση 'fast' αντιστοιχεί σε πιο γρήγορη αντίδραση του ηχομέτρου, η οποία επιτρέπει την παρακολούθηση πιο γρήγορων διακυμάνσεων στις τιμές της πίεσης. Λαμβάνει περισσότερες μετρήσεις από ότι η 'slow' στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα για τον υπολογισμό της (μέσης) ηχητικής στάθμης, με αποτέλεσμα να είναι πιο κατάλληλη για τέτοιου ήχους με γρήγορες διακυμάνσεις. Αρχικά, μάλιστα, η ρύθμιση 'fast' εισήχθη, γιατί θεωρείται ότι προσεγγίζει καλύτερα το χρόνο ολοκλήρωσης που χρησιμοποιεί το σύστημα της ανθρώπινης ακοής.

Σε περίπτωση που ένας ήχος παρουσιάζει σχετικά γρήγορες διακυμάνσεις και γίνει χρήση της ρύθμισης 'slow', σύντομες μεταβολές (που αντιπροσωπεύονται από μια στενή κορυφή στην κυματομορφή) δε θα γίνουν αντιληπτές από το ηχόμετρο κι έτσι η (μέση) τιμή της στάθμης θα είναι χαμηλότερη από ότι αν χρησιμοποιούσαμε τη ρύθμιση 'fast'. Στις περισσότερες περιπτώσεις βιομηχανικού θορύβου οι ενδείξεις του ηχομέτρου με τη 'slow' ρύθμιση μεταβάλλονται πολύ λιγότερο από ότι με τη 'fast'.

Στην περίπτωση σταθερών θορύβων / ήχων ο χρόνος ολοκλήρωσης δεν παίζει προφανώς ιδιαίτερο ρόλο, εφ' όσον αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο των διακυμάνσεων.

Αν τώρα ο υπό μέτρηση θόρυβος αποτελείται από έναν μεμονωμένο ή μια ριπή από παλμούς, τότε ούτε η ρύθμιση 'fast' είναι επαρκής, οπότε χρησιμοποιούμε τη ρύθμιση 'I' (impulse). Τα 35 ms αυτής της ρύθμισης (τέσσερις φορές πιο γρήγορη από ότι η 'fast') είναι ικανά να εντοπίσουν transient σήματα θορύβου. Επομένως οι ενδείξεις σε αυτή τη ρύθμιση θα είναι αντιπροσωπευτικές της ακουστότητας και της ενόχλησης ενός πολύ σύντομου (παλμικού) ήχου.

Το πόσο δυνατά αντιλαμβανόμαστε έναν ήχο εξαρτάται και από τη διάρκειά του. Έτσι έχει αποδειχτεί ότι η ακουστότητα ενός πολύ σύντομου παλμού είναι μικρότερη από ότι ενός αντίστοιχου σταθερού ήχου της ίδιας έντασης (I) που διαρκεί περισσότερο. Παρ' όλα αυτά, ο κίνδυνος ακουστικής βλάβης δε μειώνεται απαραίτητα. Πρόσφατα έχει αποδειχτεί ότι οι μέσες τιμές των ηχητικών στάθμεων δεν είναι επαρκής ένδειξη του κινδύνου αυτού. Γι' αυτό το λόγο κάποια ηχόμετρα έχουν τη δυνατότητα να μετρούν το πραγματικό μέγιστο / την κορυφή της στιγμιαίας πίεσης (peak) στο διάστημα ολοκλήρωσης ($50\text{ }\mu\text{s}$!), το οποίο είναι πιο

ενδεικτικό του κινδύνου ακουστικής βλάβης (αν και δεν υπάρχει ακόμα ένα παγκοσμίως αποδεκτό κριτήριο γι' αυτό).

Έτσι, κάποια ηχόμετρα με ψηφιακή οθόνη διαθέτουν και ένα κύκλωμα συγκράτησης, το οποίο έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει είτε τη μέγιστη τιμή της στιγμιαίας πίεσης είτε τη μέγιστη τιμή της RMS πίεσης που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια του τελευταίου 1 s, πράγμα το οποίο δίνει μια λύση στο πρόβλημα της έντονης και γρήγορης διακύμανσης των ενδείξεων.

(III) Στατιστικοί δείκτες

Όπως έχουμε δει, ένας τρόπος για να παρουσιάσουμε τα επίπεδα ενός μεταβαλλόμενου θορύβου κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος είναι η ισοδύναμη στάθμη συνεχούς θορύβου, L_{eq} .

Ένας άλλος τρόπος περιγραφής ενός μεταβαλλόμενου θορύβου είναι οι στατιστικοί δείκτες, L_N , όπου το N παίρνει τιμές από 1 έως 99. Οι στατιστικοί δείκτες εκφράζουν την ηχητική εκείνη στάθμη που ξεπερνιέται για κάποιο ποσοστό του συνολικού χρόνου παρατήρησης. Συγκεκριμένα, L_N είναι η κατώτατη εκείνη στάθμη θορύβου που ισχύει για N % του συνολικού χρόνου μέτρησης.

Στην πράξη, οι πλέον χρησιμοποιούμενοι δείκτες είναι οι: $L_1, L_{10}, L_{50}, L_{90}$ και L_{99}

Αν και η χρήση των στατιστικών δεικτών προέρχεται από αδυναμία της παλαιότερης τεχνολογίας, οι L_N έχουν πλέον καθιερωθεί και χρησιμοποιούνται ακόμα και τώρα (ιδιαίτερα στις Αγγλοσαξωνικές χώρες), ειδικά ως μια γρήγορη ένδειξη των διακυμάνσεων στη στάθμη του μετρούμενου θορύβου.

Για το σκοπό αυτό χωρίζουμε το συνολικό χρονικό διάστημα της μέτρησης σε πολλά μικρότερα ανάλογα με τη σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης που χρησιμοποιούμε. Σε κάθε διάστημα αντιστοιχεί μια τιμή στάθμης ηχητικής πίεσης και από τη στατιστική ανάλυση αυτών των τιμών μπορούμε να καταλήξουμε σε τιμές στάθμης που ισχύουν για διάφορα ποσοστά του συνολικού χρόνου μέτρησης.

Έτσι:

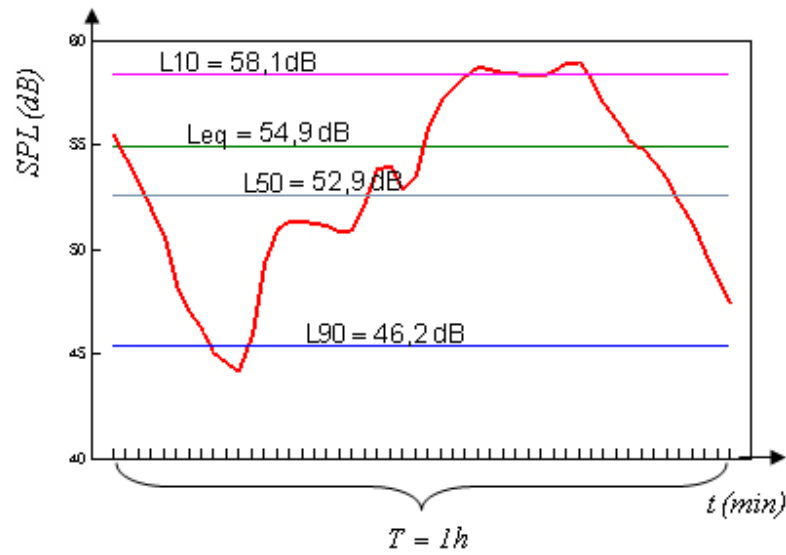
- Εφόσον L_1 είναι η κατώτατη στάθμη που ισχύει για μόλις το 1% του χρόνου, δηλαδή ξεπερνιέται μόνο κατά τη διάρκεια ενός πολύ μικρού μέρους του συνολικού χρόνου, θα εκφράζει την περιοχή των μέγιστων τιμών ηχητικής στάθμης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Το L_{10} χρησιμοποιείται για μετρήσεις κυκλοφοριακού θορύβου.
- Το L_{50} κατά αντιστοιχία εκφράζει την κατώτατη στάθμη που ισχύει για το μισό χρονικό διάστημα των μετρήσεων (50%).
- Το L_{90} χρησιμοποιείται συνήθως ως μια ένδειξη του θορύβου βάθους της περιοχής.
- Εφόσον L_{99} είναι η κατώτατη στάθμη που ισχύει για το 99% του χρόνου, δηλαδή ξεπερνιέται κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου μέτρησης, χρησιμοποιείται ως ένδειξη της ελάχιστης στάθμης του θορύβου βάθους κατά το χρόνο μέτρησης.

Η διαφορά μεταξύ $L_1 - L_{99}$ ή $L_{10} - L_{90}$ είναι ενδεικτική του εύρους διακύμανσης στην ηχητική στάθμη του θορύβου.

Όταν παρουσιάζουμε τιμές στατιστικών δεικτών θα πρέπει να παρουσιάζουμε ταυτόχρονα και τη συνολική χρονική διάρκεια των μετρήσεων και τη σταθερά χρόνου που χρησιμοποιήθηκε.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε τις τιμές των στατιστικών δεικτών, καθώς και του L_{eq} . Η στάθμη που αντιστοιχεί στο L_{90} βρίσκεται χαμηλά (θόρυβος βάθους), λίγο πιο ψηλά βρίσκεται ο L_{50} και κοντά στην κορυφή βρίσκεται ο L_{10} . Επίσης παρατηρούμε εδώ ότι το L_{eq} βρίσκεται λίγο πιο ψηλά από τον L_{50}

σε αυτό το διάγραμμα $t - L_p$ (dB). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το L_{eq} αντιπροσωπεύει ενέργεια, που δεν είναι λογαριθμικό μέγεθος, γι' αυτό το λόγο τείνει περισσότερο προς τις υψηλές στάθμες.



Σχήμα 9. Παράδειγμα στατιστικών δεικτών [8]

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Gettys E., Keller F., Skove M. (1992). "PHYSICS Classical and Modern"
- [2] Davis D., Davis C. (1997), "Sound system engineering"
- [3] Σκαρλάτος Δ. (2003), "Εφαρμοσμένη ακουστική"
- [4] Howard D., Angus J. (1996), "Acoustics and Psychoacoustics"
- [5] Κουτσοδημάκης Χ., Σηφάκης Μ., "Εργαστηριακό Φυλλάδιο Μηχανικής Ήχου Ι"
- [6] Brüel & Kjær. (1998), "Basic concepts of sound". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [7] Brüel & Kjær. (1998), "Environmental Noise". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [8] PDA Acoustics Consultants. (2005). At: <http://www.pdaltd.com/Pages/leq.htm>

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές
 - Σχήμα
- (Να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)

Πειραματική διαδικασία

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάθους B της αίθουσας σε L_{eq} για 1 min με τρεις τρόπους: γραμμικά, με φίλτρο A και με φίλτρο C.

$L_{eq(lin)}$	$L_{eq(A)}$	$L_{eq(C)}$

3. Για πηγή ήχου λευκό θόρυβο να γίνουν μετρήσεις $L_{eq(A)}$, L_{max} διάρκειας 30 s με δύο σταθερές ολοκλήρωσης: 'Fast' (0,125 s) και 'Slow' (1 s). Να αναγραφούν τα αποτελέσματα.

Σταθερά ολοκλήρωσης	Λευκός θόρυβος	
	$L_{eq(A)}$	L_{max}
'Fast' (0,125 s)		
'Slow' (1 s)		

4. Για πηγή ήχου ροζ θόρυβο να γίνουν μετρήσεις διάρκειας 1 min των $L_{eq(A)}$, $L_{1(A)}$, $L_{10(A)}$, $L_{50(A)}$, $L_{90(A)}$ και $L_{99(A)}$ με σταθερά ολοκλήρωσης Fast. Να επαναληφθεί η μέτρηση, αλλά με την προσθήκη ενός δυνατού ήχου μικρής διάρκειας (π.χ. ένα παλαμάκι) κατά τη διάρκεια του 1 min.

1	$L_{eq(A)}$	$L_{1(A)}$	$L_{10(A)}$	$L_{50(A)}$	$L_{90(A)}$	$L_{99(A)}$
2	$L_{eq(A)}$	$L_{1(A)}$	$L_{10(A)}$	$L_{50(A)}$	$L_{90(A)}$	$L_{99(A)}$

5. Να τοποθετηθεί το δωδεκάεδρο ηχείο σε συγκεκριμένο σημείο της αίθουσας, να τροφοδοτηθεί με σήμα λευκού θορύβου από την πρότυπη ηχητική πηγή και να πραγματοποιηθεί μέτρηση της στάθμης ηχητικής πίεσης (σε L_{eq} για 1 min). Το ίδιο να επαναληφθεί για λευκό θόρυβο από το ένα ηχείο του φορητού συστήματος τοποθετημένο σε άλλο σημείο του χώρου. Τέλος, να ληφθεί μέτρηση της στάθμης ηχητικής πίεσης (σε L_{eq} για 1 min) για συνήχηση των δύο πηγών.

	SPL ₁ - Πηγή 1	SPL ₂ - Πηγή 2	SPL _{1&2} - Πηγές 1 & 2
Λευκός θόρυβος			

6. Να τοποθετηθούν τα δύο ηχεία του φορητού συστήματος σε συγκεκριμένα σημεία, έτσι ώστε οι στάθμες όταν λειτουργούν η κάθε μια ξεχωριστά να είναι σχεδόν ίδιες. Να τροφοδοτηθούν με καθαρό τόνο συχνότητας 1 kHz από τον υπολογιστή. Στη συνέχεια να ληφθούν μετρήσεις ηχητικής πίεσης (σε L_{eq} για 1 min) στις εξής περιπτώσεις:

	SPL ₁ - Ηχείο 1	SPL ₂ - Ηχείο 2	SPL _{1&2} - Ηχεία 1 & 2
Καθαρός τόνος 1 kHz			

Επεξεργασία μετρήσεων

1. Να σχολιαστούν τα αποτελέσματα της μέτρησης 3.
2. Να συγκριθούν οι τιμές των επιμέρους δεικτών για τη μέτρηση 4 και να σχολιαστούν. Συμφωνούν με τη αναμενόμενη τιμή σύμφωνα με τη θεωρία;
3. Να υπολογιστεί θεωρητικά το άθροισμα των στάθμων πίεσης των δύο πηγών για τη μέτρηση 5. Συμφωνεί η πειραματική τιμή με αυτό; Πού πιστεύετε ότι θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες ανάλογες μετρήσεις στην πράξη (αν π.χ. γνωρίζαμε τις τιμές στάθμης πίεσης για τη μία πηγή και τη συνήχηση των δύο πηγών);
4. Να σχολιαστούν τα αποτελέσματα της μέτρησης 6. Ποιά/ές θα ήταν η/οι αναμενόμενη/ες τιμή/ές της στάθμης πίεσης για τη συνήχηση των δύο αυτών πηγών θεωρητικά;

ΑΣΚΗΣΗ 3

Φασματική Ανάλυση

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπός αυτής της άσκησης είναι η φασματική ανάλυση διάφορων ήχων με το φορητό ηχόμετρο και η εξέτασή τους με βάση τα φάσματά τους.

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

Διπλή περιγραφή ήχων: Κυματομορφή - Φάσμα

Κάθε σήμα / ηχητικό κύμα έχει δύο ισοδύναμους τρόπους περιγραφής του:

- (1) Το πλάτος της πίεσης (ή έντασης ή ενέργειας ή ισχύος) ως προς το χρόνο (κυματομορφή) και
- (2) Το πλάτος της πίεσης (ή έντασης ή ενέργειας ή ισχύος) ως προς τη συχνότητα (φάσμα).

Τον πρώτο τον λαμβάνουμε με έναν παλμογράφο, το δεύτερο με έναν αναλυτή φάσματος.

Και οι δύο περιγραφές αποτελούν δύο όψεις του ίδιου νομίσματος. Κάποιες φορές μπορεί είναι ευκολότερος στην περιγραφή και κατανόηση ο ένας και κάποιες φορές ο άλλος. Επίσης, κάποιες φορές μπορεί να αναδεικνύει τις πληροφορίες που αναζητούμε ο ένας και κάποιες ο άλλος. Επίσης, όποια επεξεργασία υποστεί το σήμα στο ένα πεδίο περιγραφής, κάποια αντίστοιχη θα υποστεί και στο άλλο.

Το ισοδύναμο των δύο περιγραφών βασίζεται στο θεώρημα του Fourier, σύμφωνα με το οποίο κάθε σύνθετη κυματομορφή (με κάποιους περιορισμούς) μπορεί να αναλυθεί (ή να κατακερματιστεί) σε μια σειρά από ημίτονα με συγκεκριμένες συχνότητες, πλάτη και φάσεις. Μπορούμε, λοιπόν, να ορίσουμε μια σύνθετη κυματομορφή ως ένα σύνθετο τόνο που αποτελείται από ένα πλήθος απλών τόνων.

Το ίδιο το ανθρώπινο αυτί, πάντως, πρώτα ανιχνεύει αλλαγές στην πίεση με το χρόνο και στη συνέχεια αναλύει το κύμα στις αρμονικές του.

Η γενική σχέση που συνδέει χρόνο και συχνότητα είναι: $f = 1/T$.

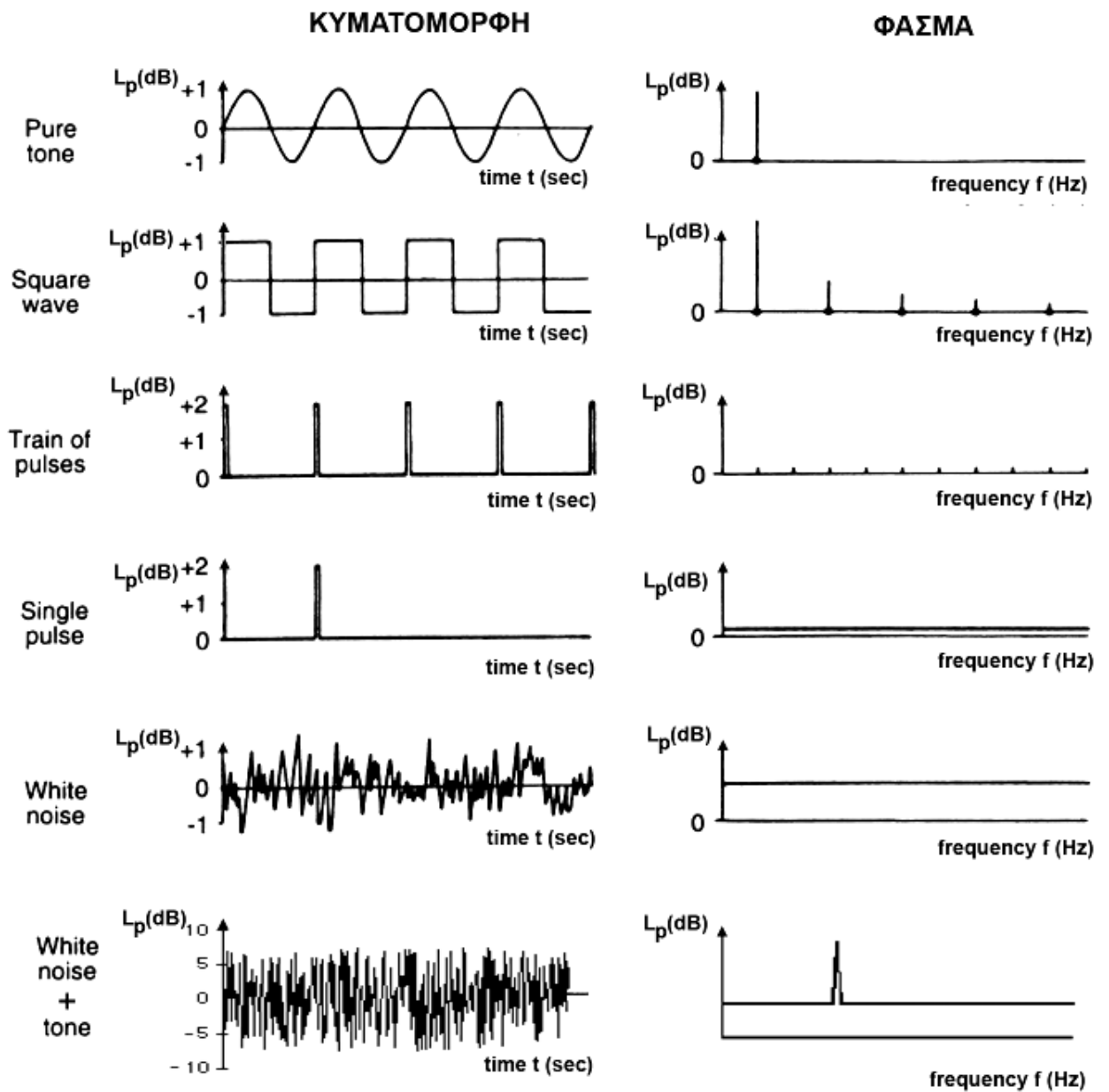
Παρακάτω δίνουμε τα διαγράμματα και στα δύο πεδία κάποιων βασικών ηχητικών κυμάτων:

Για περιοδικούς ήχους μακράς διάρκειας η ενέργεια κατανέμεται σε συγκεκριμένες διακριτές συχνότητες (linespectrum), όπως για παράδειγμα:

- (α) το καθαρά ημιτονοειδές κύμα, που περιέχει μία και μόνη συχνότητα
- (β) το τετραγωνικό κύμα, που αποτελείται από τις περιττές αρμονικές της θεμελιώδους, με ελαττούμενα πλάτη και
- (γ) η σειρά στενών παλμών που περιέχει όλες τις αρμονικές σε ίσα πλάτη (πολύ χαμηλά)

Επίσης, παρατηρούμε ότι ο λευκός θόρυβος και ο παλμός έχουν συνεχές και σταθερό φάσμα, δηλαδή τα πλάτη δε μεταβάλλονται (ισχύει μόνο για πολύ σύντομους παλμούς). Αν και τα φάσματα φαίνονται να είναι ίδια, υπάρχουν οι εξής ουσιαστικές διαφορές:

- (1) Το φάσμα (τα πλάτη) του παλμού είναι πολύ χαμηλότερο, αφού η ηχητική ενέργεια ενός τόσο σύντομου ήχου διαμοιράστηκε σε όλες τις συχνότητες και
- (2) Διαφέρουν στις σχετικές φάσεις των επιμέρους συχνοτήτων από τις οποίες αποτελούνται. Στον παλμό όλες έχουν αρχική φάση 90° (στο $t = 0$), ενώ στο λευκό θόρυβο οι φάσεις είναι κατανεμημένες με τυχαίο τρόπο.

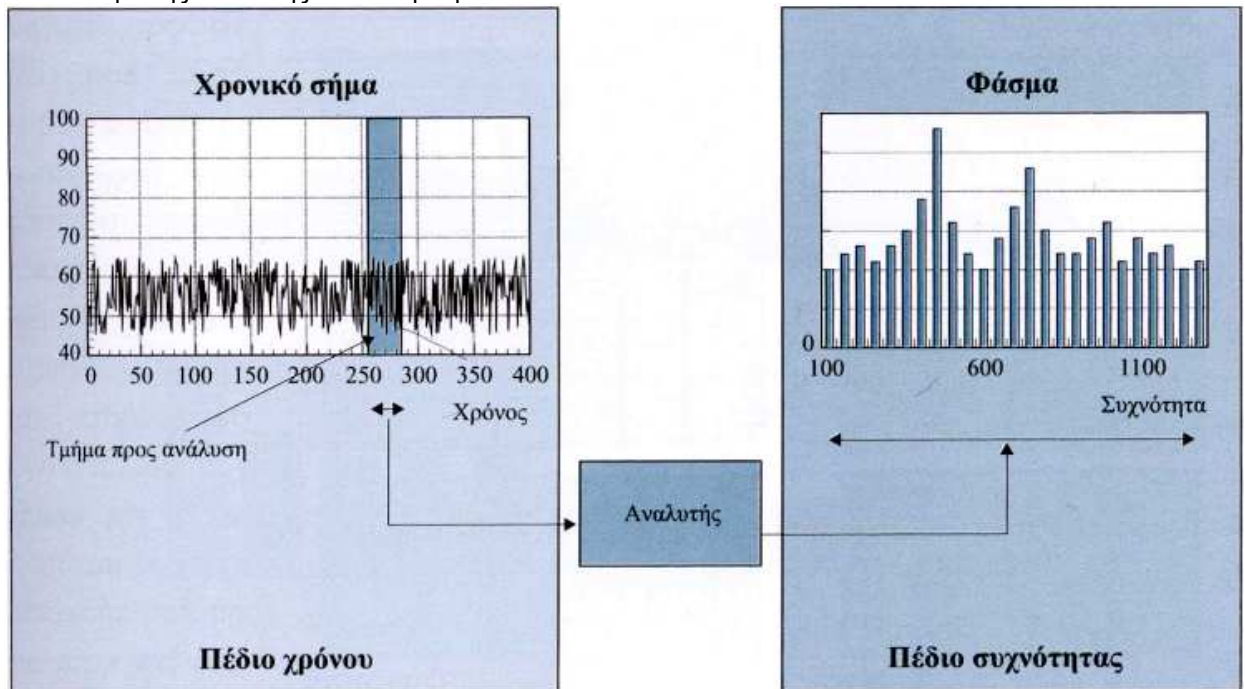


Σχήμα 1. Τυπικά φάσματα [8]

Φασματικοί Αναλυτές

Το ηχόμετρο μας δίνει μία μόνο τιμή που χαρακτηρίζει ένα ευρύ συχνοτικό φάσμα (ακουστό). Για να αναδείξουμε τα μεμονωμένα συχνοτικά χαρακτηριστικά που το συνθέτουν πρέπει να αναλύσουμε το μετρούμενο κύμα στο πεδίο των συχνοτήτων.

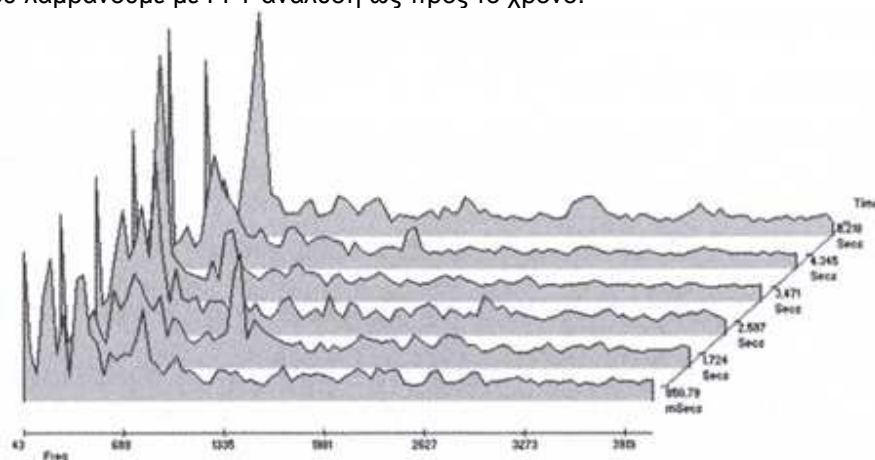
Η διαδικασία της μεταφοράς από τη χρονική στη συχνοτική απεικόνιση του ηχητικού κύματος ονομάζεται φασματική ανάλυση του ήχου. Οι συσκευές με τις οποίες γίνεται λέγονται φασματικοί αναλυτές και το αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι το φάσμα.



Σχήμα 2. Συχνοτική ανάλυση σήματος – φασματικός αναλυτής [8]

Φασματογράφημα

Στο φάσμα που λαμβάνουμε χάνουμε τη σχέση με τη χρονική εξέλιξη του ήχου. Όταν θέλουμε να τα συνδέσουμε λαμβάνουμε ένα φασματογράφημα. Αυτό είναι μια τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής των συχνοτήτων που λαμβάνουμε με FFT ανάλυση ως προς το χρόνο.



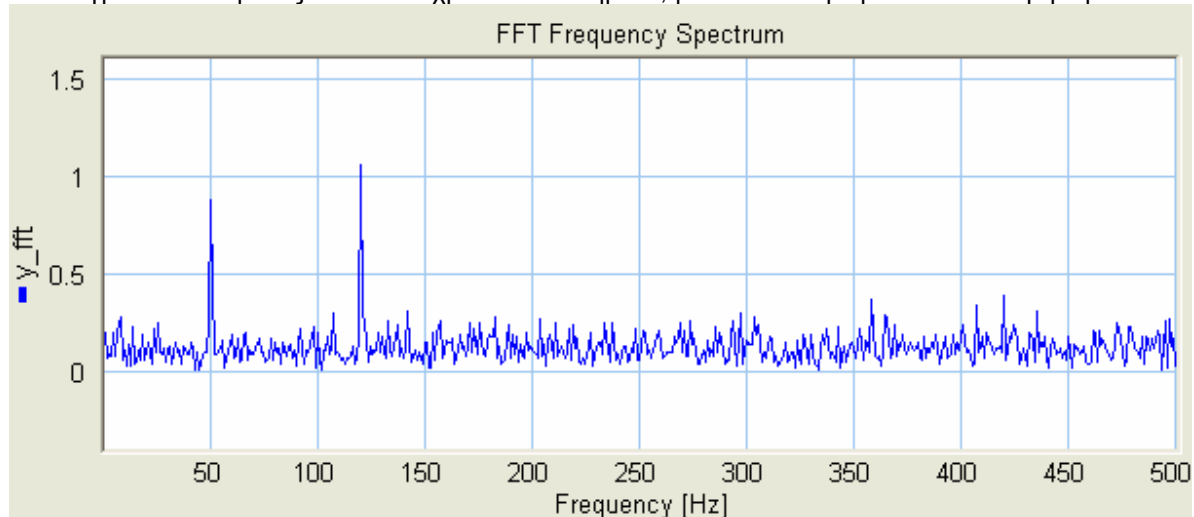
Σχήμα 3. Φασματογράφημα [8]

Κατηγορίες φασματικών αναλυτών

Οι φασματικοί αναλυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

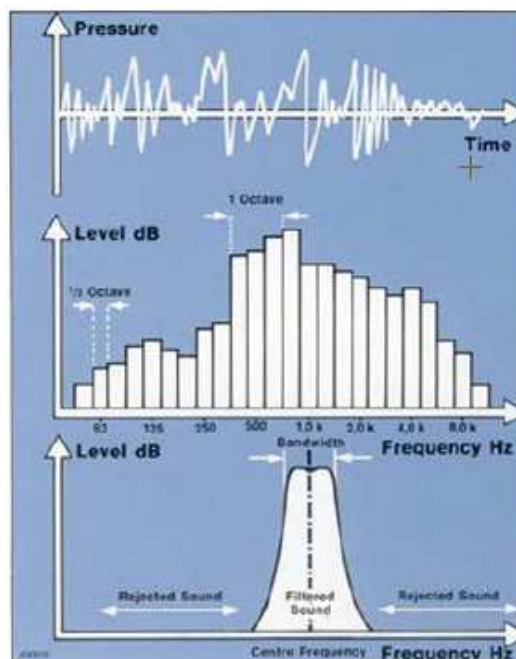
- (1) Τους **ψηφιακούς - FFT** και
- (2) Τους **αναλογικούς - πραγματικού χρόνου**.

- (1) Στην FFT ανάλυση (Fast Fourier Transform – γρήγορος μετασχηματισμός Fourier) το σύστημα λαμβάνει δείγματα του κύματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με τα οποία τροφοδοτεί τον αλγόριθμο του FFT.



Σχήμα 4. FFT ανάλυση [16]

- (2) Στην περίπτωση των φασματικών αναλυτών πραγματικού χρόνου οδηγούμε το σήμα, παράλληλα, μέσα από ζωνο-περατά φίλτρα, τα οποία επιτρέπουν μόνο σε συγκεκριμένες κάθε φορά συχνοτικές περιοχές του κύματος να περάσουν. Το πλάτος της εξόδου των φίλτρων απεικονίζεται στον κάθετο άξονα (L_p), ενώ η συχνότητα του ήχου απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα (f). Έτσι λαμβάνουμε ένα φάσμα με την παρακάτω μορφή, δηλαδή με ράβδους. Κάθε ράβδος αντιστοιχεί σε μία ζώνη, όπου το πλάτος της είναι ίσο με το εύρος της ζώνης, ενώ το ύψος της είναι ίσο με την ηχητική στάθμη που αντιστοιχεί στη ζώνη (ζωνική στάθμη).



Σχήμα 5. Ανάλυση πραγματικού χρόνου [4]

Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- (α) Σαρώνοντας με ένα φίλτρο όλο το ακουστικό φάσμα που μας ενδιαφέρει και
 (β) Κάνοντας χρήση μιας σειράς φίλτρων, όπου καθένα καλύπτει διαδοχικά κομμάτια του συνολικού φάσματος.

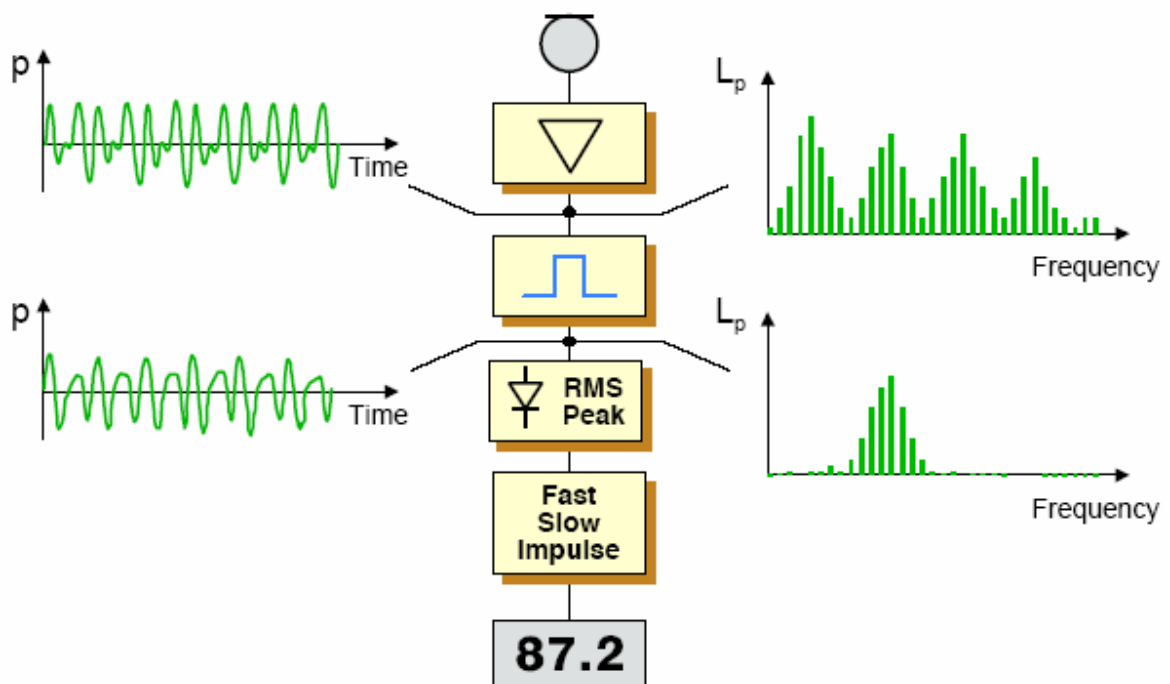
Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα:

- (α) Σειριακή ανάλυση: Ένα φίλτρο χρησιμοποιείται κάθε στιγμή →

- η ανάλυση θα είναι χρονοβόρα
- προϋπόθεση: το σήμα να παραμένει σταθερό, αλλά
- χαμηλότερο κόστος.

- (β) Παράλληλη ανάλυση: Όλα τα φίλτρα λειτουργούν ταυτόχρονα →

- η ανάλυση γίνεται πολύ ταχύτερα
- το σήμα μπορεί να μεταβάλλεται, αλλά
- το κόστος αυτών των αναλυτών είναι υψηλότερο.



Σχήμα 6. Ανάλυση σήματος με φορητό ηχόμετρο [2]

Φίλτρα

Ζώνες συχνοτήτων

Υπάρχουν δύο τύποι φίλτρων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στη φασματική ανάλυση:

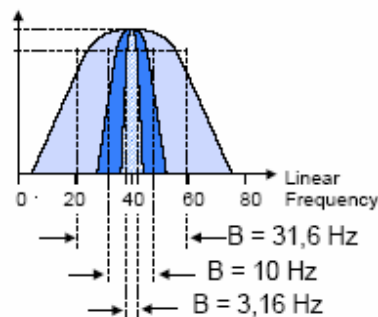
- (1) Σταθερού εύρους ζώνης (constant bandwidth filter) και
- (2) Σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης (constant percentage bandwidth – CPB filters).

- Σταθερού εύρους ζώνης

Στα φίλτρα σταθερού εύρους ζώνης αυτό που παραμένει σταθερό μεταξύ τους είναι το εύρος της ζώνης τους, δηλαδή η διαφορά των ακριανών συχνοτήτων που την ορίζουν, ανεξάρτητα από την κεντρική συχνότητα:

$$f_2 - f_1 = \text{σταθ.}$$

$$B = x \text{ Hz}$$



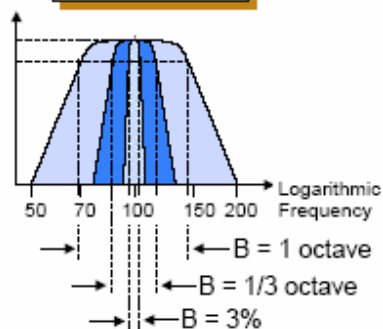
Σχήμα 7. Φίλτρο με ζώνη σταθερού εύρους [6]

- Μεταβλητού (σταθερού ποσοστιαίου) εύρους ζώνης

Στα φίλτρα σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης αυτό που παραμένει σταθερό είναι το ποσοστό της κεντρικής συχνότητας που αντιπροσωπεύει το εύρος της ζώνης, δηλαδή ο λόγος των ακριανών συχνοτήτων που την ορίζουν:

$$\frac{f_2}{f_1} = \text{σταθ.}$$

$$B = y\% = \frac{y \times f_c}{100}$$



Σχήμα 8. Φίλτρο με ζώνη σταθερού ποσοστιαίου εύρους [6]

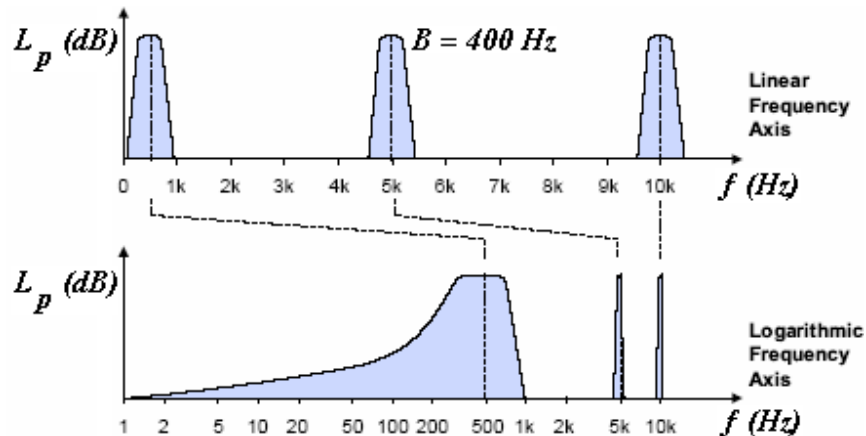
Αυτό σημαίνει βεβαίως ότι στην πρώτη περίπτωση έχουμε ένα είδος γραμμικής ανάλυσης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση έχουμε ένα είδος λογαριθμικής ανάλυσης.

Παρουσίαση ανάλυσης

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι αν απεικονίσουμε τις παραπάνω αναλύσεις σε γραμμικό διάγραμμα, στην πρώτη περίπτωση όλες οι ζώνες θα είναι ίσες, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι ζώνες θα γίνονται μεγαλύτερες με την αύξηση της συχνότητας.

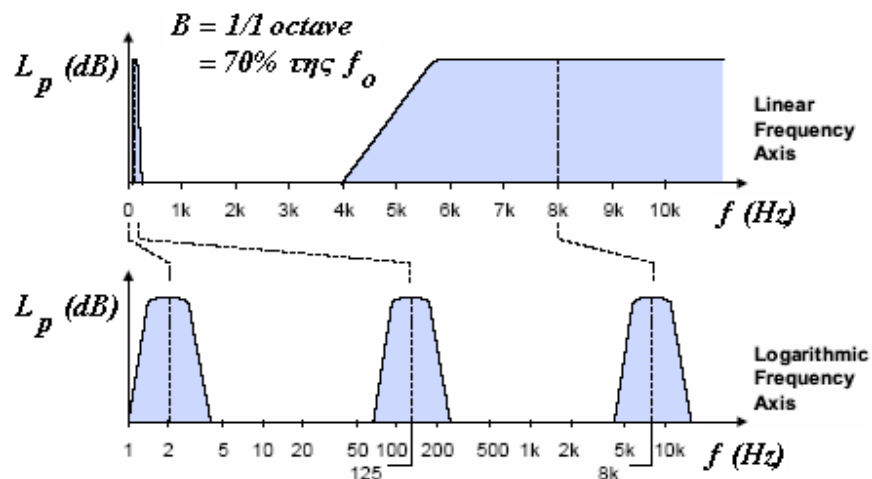
Επίσης, αν απεικονίσουμε τις παραπάνω αναλύσεις σε (ημι-)λογαριθμικό διάγραμμα, στην πρώτη περίπτωση οι ζώνες θα μικραίνουν με την αύξηση της συχνότητας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση όλες θα είναι ίσες.

Φασματική ανάλυση σταθερού εύρους ζώνης



Σχήμα 9. Φασματική ανάλυση σταθερού εύρους ζώνης σε γραμμική & λογαριθμική κλίμακα [6]

Φασματική ανάλυση σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης



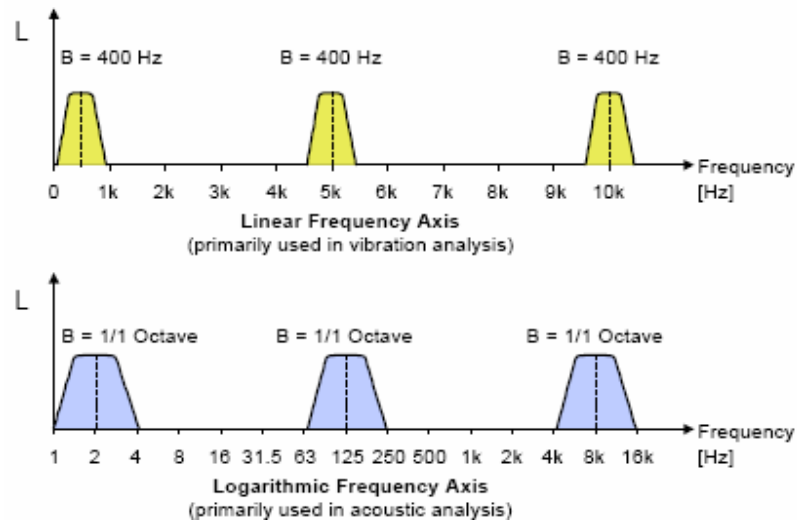
Σχήμα 10. Φασματική ανάλυση σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης σε γραμμική & λογαριθμική κλίμακα [6]

Συμπέρασμα

Σε κάθε είδος ανάλυσης επιλέγουμε και τον αντίστοιχο τρόπο γραφικής αναπαράστασης, δηλαδή:

Για αναλυτή σταθερού εύρους ζώνης → γραμμική κλίμακα

Για αναλυτή σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης → λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 11. Ζώνες σταθερού εύρους και 1/1 οκτάβας [2]

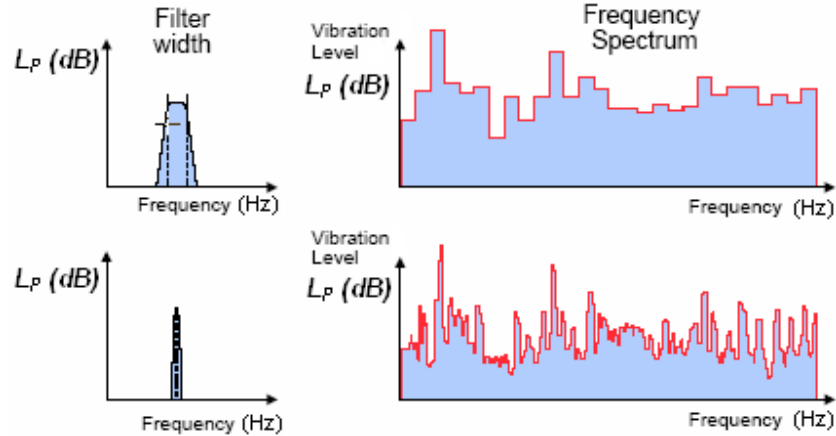
Κριτήριο επιλογής τύπου του φίλτρου

- Φασματική ανάλυση με φίλτρα σταθερού εύρους ζώνης (και γραμμική κλίμακα) γίνεται συνήθως σε μετρήσεις μηχανικών δονήσεων. Αυτό γίνεται, επειδή σε αυτές τις περιπτώσεις εμφανίζονται κάποια αρμονικά χαρακτηριστικά μέσα στο φάσμα που πρέπει να μελετηθούν και τα οποία είναι πιο εύκολα αναγνωρίσιμα σε γραμμική κλίμακα. Ειδικά στις υψηλές συχνότητες η γραμμική κλίμακα παρέχει μεγαλύτερη συχνотική ανάλυση για τον παραπάνω σκοπό. Το μειονέκτημά της είναι ότι το ακουστικό φάσμα έχει πολύ μεγάλο εύρος το οποίο είναι δύσκολο να αναπαρασταθεί ολόκληρο σε γραμμική κλίμακα (θα χαθεί η λεπτομέρεια).

- Η φασματική ανάλυση με φίλτρα σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης (και λογαριθμική κλίμακα) γίνεται κατά κανόνα σε ακουστικές μετρήσεις, γιατί η λογαριθμική ανάλυση προσομοιάζει καλύτερα τον τρόπο απόκρισης της ανθρώπινης ακοής. Έχει το πλεονέκτημα ότι η λογαριθμική κλίμακα συμπιέζει την κλίμακα των συχνοτήτων, αλλά ταυτόχρονα υπολείπεται λεπτομέρειας σε σχέση με τη γραμμική.

Κριτήριο επιλογής εύρους ζώνης του φίλτρου

Σαφώς όσο στενότερη είναι μια ζώνη, τόσο πιο λεπτομερής είναι η ανάλυση και η πληροφορία που εξάγουμε. Ταυτόχρονα όμως θα πρέπει να έχει ένα λογικό μέγεθος, ώστε η ανάλυση να γίνεται σε λογικό χρόνο.

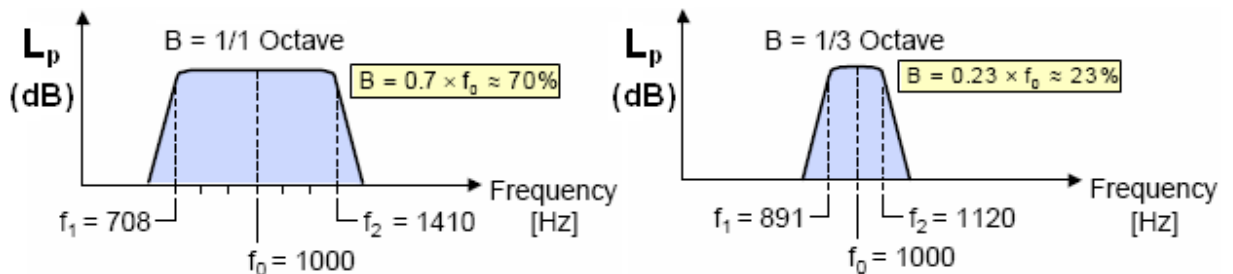


Σχήμα 12. Επιλογή εύρους ζώνης του φίλτρου [6]

Στους αναλυτές πραγματικού χρόνου είθισται να χρησιμοποιείται μία από τις παρακάτω ζώνες:

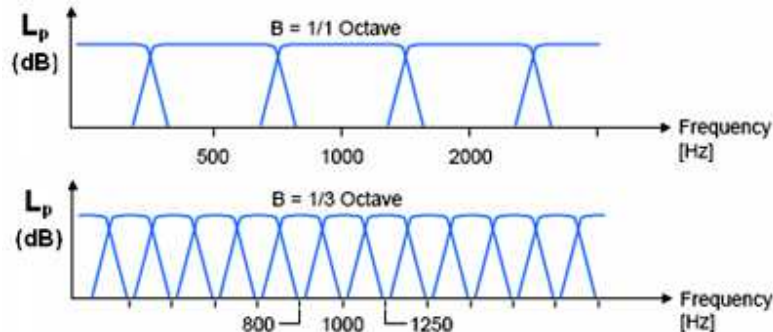
- **Οκταβική (1/1 oct)**, όπου $\frac{f_2}{f_1} = 2 = \text{σταθ.}$ (διπλάσια συχνότητα) και

- **Τριτο-οκταβική (1/3 oct)**, όπου $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/3} = \text{σταθ.}$



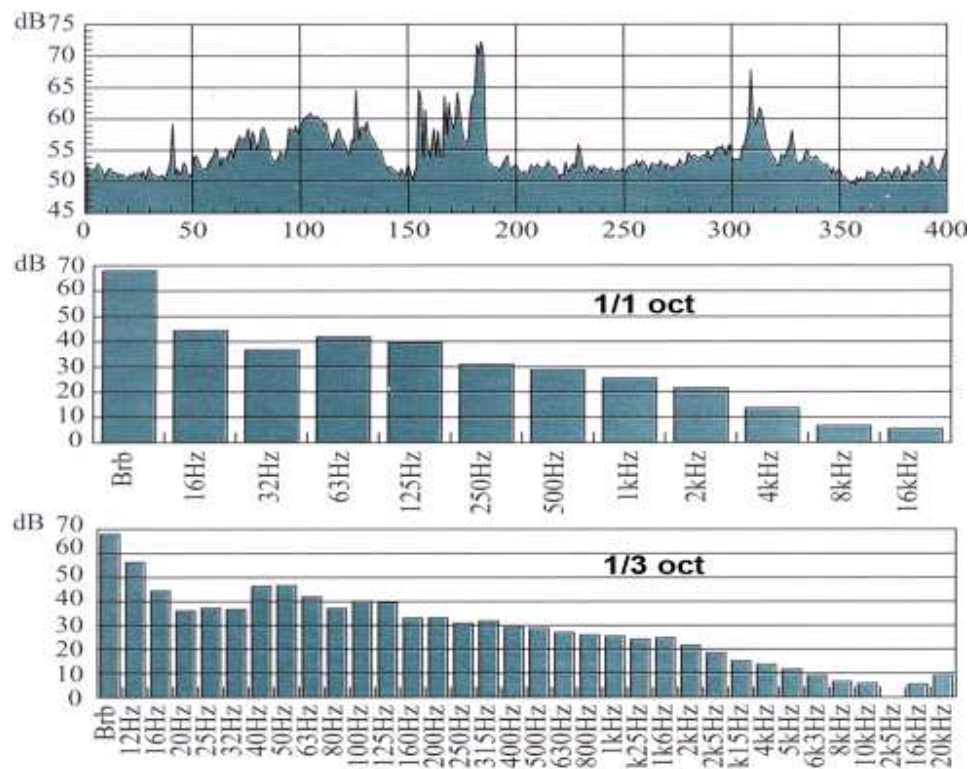
Σχήμα 13. Φίλτρα 1/1-οκτάβας και 1/3-οκτάβας [6]

1 οκτάβα αποτελείται από 3 τριτο-οκτάβες:



Σχήμα 14. 3 φίλτρα 1/3-οκτάβας = 1 φίλτρο 1/1-οκτάβας [2]

- Εν γένει, για **n-οκταβική (1/n oct)** ανάλυση έχουμε: $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/n} = \text{σταθ.}$



Σχήμα 15. Φάσμα από 1/1-οκταβική και 1/3-οκταβική ανάλυση τυχαίου θορύβου [8]

Στο σχήμα φαίνονται οι κεντρικές συχνότητες της κλασικής 1/1-οκταβικής & 1/3-οκταβικής ανάλυσης.

Κεντρική συχνότητα

Στις ζώνες σταθερού εύρους η κεντρική συχνότητα κάθε ζώνης υπολογίζεται ως ο αριθμητικός μέσος των ακριανών συχνοτήτων, δηλαδή:

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

Στις ζώνες σταθερού ποσοστιαίου εύρους η κεντρική συχνότητα κάθε ζώνης υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος των ακριανών συχνοτήτων, δηλαδή:

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

Υπολογισμός πλήθους οκτάβων

Αν για μια τυχαία περιοχή συχνοτήτων $f_{min} - f_{max}$ θέλουμε να γνωρίζουμε

- πόσες οκταβες χωράνε, τότε έχουμε:

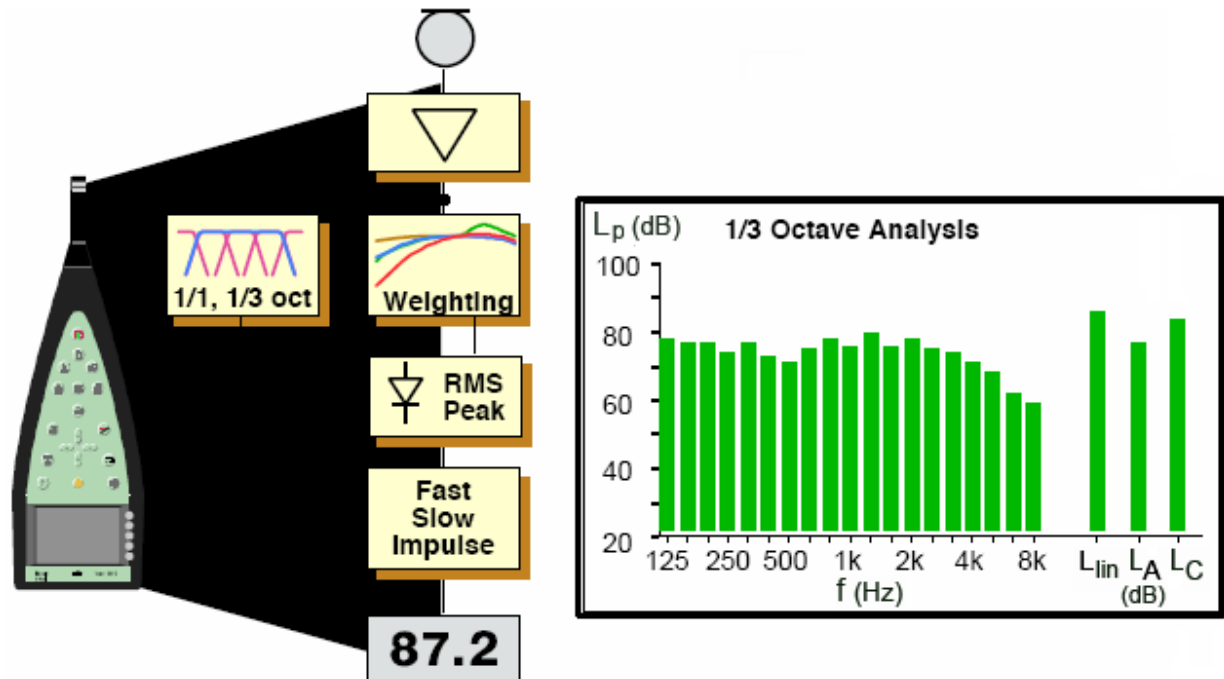
$$\frac{f_{max}}{f_{min}} = 2^k \Leftrightarrow k_{oct} = \log_2 \frac{f_{max}}{f_{min}}$$

- Κάτι ανάλογο ισχύει και για τις 1/3-οκτάβες:

$$\frac{f_{max}}{f_{min}} = (2^{1/3})^k = 2^{k/3} \Leftrightarrow \log_2 \left(\frac{f_{max}}{f_{min}} \right) = \frac{k}{3} \Leftrightarrow k_{1/3-oct} = 3 \cdot \log_2 \frac{f_{max}}{f_{min}}$$

- Και για 1/n-οκτάβες: $k_{1/n-oct} = n \cdot \log_2 \frac{f_{max}}{f_{min}}$

Φασματικός αναλυτής φορητού ηχομέτρου



Σχήμα 16. Φασματική ανάλυση φορητού ηχομέτρου [2]

Τα φορητά ηχώμετρα πραγματοποιούν αναλύσεις πραγματικού χρόνου, σε οκτάβες ή τρίτο-οκτάβες και μας δίνουν το φάσμα στη μορφή που φαίνεται (με ράβδους). Ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας σταθμιστικά φίλτρα μας παρέχουν και τη συνολική στάθμη του ήχου που προέρχεται από όλες τις ζώνες.

Στην οθόνη του φορητού ηχομέτρου ένας ήχος που έχει ίσα ποσά ενέργειας σε κάθε οκτάβα θα παρουσιάζει επίπεδη απόκριση.

Υπολογισμός συνολικής στάθμης από τη στάθμη των επιμέρους φασματικών περιοχών

Αν από τη φασματική ανάλυση γνωρίζουμε την ηχητική στάθμη που αντιστοιχεί σε κάθε επιμέρους ζώνη (δηλαδή την τιμή κάθε μίας ράβδου στο φάσμα που μας δίνει το ηχώμετρο), τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική στάθμη εκπομπής του ήχου για μία περιοχή του φάσματος.

Θα πρέπει όμως να λάβουμε υπ' όψιν μας τη διαφορετική ευαισθησία και μη γραμμική απόκριση της ανθρώπινης ακοής ως προς τη συχνότητα. Γι' αυτό και θα πρέπει οι στάθμες που θα προσθέσουμε (λογαριθμικά) να είναι πρώτα σταθμισμένες με το κατάλληλο φίλτρο

Έτσι, θα έχουμε:

$$(L_{p-ολ})_A = 10 \cdot \log(10^{(L_{p-f1})_A/10} + 10^{(L_{p-f2})_A/10} + \dots)$$

Σε περίπτωση που η φασματική ανάλυση μας δίνει τις γραμμικές τιμές του L_p , τότε θα πρέπει να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες σταθμισμένες τιμές από τα σταθμιστικά φίλτρα και στη συνέχεια να κάνουμε τη λογαριθμική πρόσθεση.

Μελέτη / Φασματική ανάλυση θορύβου

Θόρυβος

Όπως έχουμε δει, υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για το «θόρυβο». Σύμφωνα με τον κανονισμό του ΕΛ.Ο.Τ.: *Θόρυβος ονομάζουμε κάθε απεριοδικό σύνθετο ήχο, που η στιγμιαία του τιμή αυξομειώνεται γενικά με τυχαίο τρόπο.*

Ο θόρυβος οφείλεται στις ηχητικές συνθήκες του χώρου και προκαλείται από τη συμβολή πολλών ηχογόνων παραγόντων.

Υπάρχουν δύο ειδικά είδη θορύβου, τα οποία μάλιστα χρησιμοποιούνται συχνά και σε ακουστικές μετρήσεις:

Λευκός θόρυβος

Ο λευκός θόρυβος περιέχει ένα ευρύ φάσμα από τυχαίους θορύβους (τυχαία κατανομή στάθμης). Η ηχητική του ενέργεια κατανέμεται ομοιόμορφα σε ολόκληρο το φάσμα των συχνοτήτων, δηλαδή έχει σταθερή ηχητική πυκνότητα ή αλλιώς περικλείει την ίδια ηχητική ενέργεια (ή στάθμη) ανά Hz .

Σύμφωνα με τον κανονισμό του ΕΛ.Ο.Τ.:

Λευκός θόρυβος είναι ο θόρυβος που έχει συνεχές ηχητικό φάσμα σε μία ευρεία περιοχή συχνοτήτων που ενδιαφέρει και σταθερή φασματική πυκνότητα.

$$p_f^2 = \text{σταθ.}$$

Ροζ θόρυβος

Ο ροζ θόρυβος περιέχει επίσης ένα ευρύ φάσμα από τυχαίους θορύβους. Διαθέτει όμως περισσότερη ηχητική ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες και μπορεί να προκύψει από το λευκό με φιλτράρισμα. Το χαρακτηριστικό του είναι ότι περικλείει την ίδια ηχητική ενέργεια ανά οκτάβα.

Σύμφωνα με τον κανονισμό του ΕΛ.Ο.Τ.:

Ροζ θόρυβος είναι ο θόρυβος που έχει συνεχές ηχητικό φάσμα με σταθερή ηχητική ισχύ σε κάθε φασματική ζώνη μεταβλητού ζωνικού εύρους.

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

Σύμφωνα με αυτά που αναφέραμε για τους δύο διαφορετικούς τύπους φίλτρων και τις αντίστοιχες κλίμακες: Αν πραγματοποιήσουμε φασματική ανάλυση με σταθερό εύρος ζώνης και απεικονίσουμε το λευκό θόρυβο σε γραμμική κλίμακα, θα πρέπει αυτός να απεικονίζεται με μία κατά μέσον όρο σταθερή γραμμή, παράλληλη προς τον άξονα των συχνοτήτων. Στην αντίστοιχη ανάλυση, εφ' όσον ο ροζ περιέχει μεγαλύτερα ποσά ηχητικής ενέργειας στις χαμηλές συχνότητες, θα παριστάνεται στην ίδια (γραμμική)

κλίμακα από μια ευθεία με κλίση -3 dB/oct

Αν πραγματοποιήσουμε φασματική ανάλυση με σταθερό ποσοστιαίο εύρος ζώνης και απεικονίσουμε το λευκό θόρυβο σε λογαριθμική κλίμακα, εφ' όσον οι ζώνες γίνονται μεγαλύτερες με αύξηση της συχνότητας (και μάλιστα για οκταβική ανάλυση διπλασιάζονται), θα πρέπει αυτός να απεικονίζεται από μια ευθεία με

κλίση $+3 \text{ dB/oct}$. Αντίστοιχα, επειδή όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο μεγαλώνει το εύρος των ζωνών

ο ροζ έχει περισσότερη ενέργεια στις χαμηλότερες συχνότητες,

Δηλαδή αναλόγως με το είδος της ανάλυσης, θα έχουμε και διαφορετική κλίση στις ευθείες που αντιπροσωπεύουν τους θορύβους.

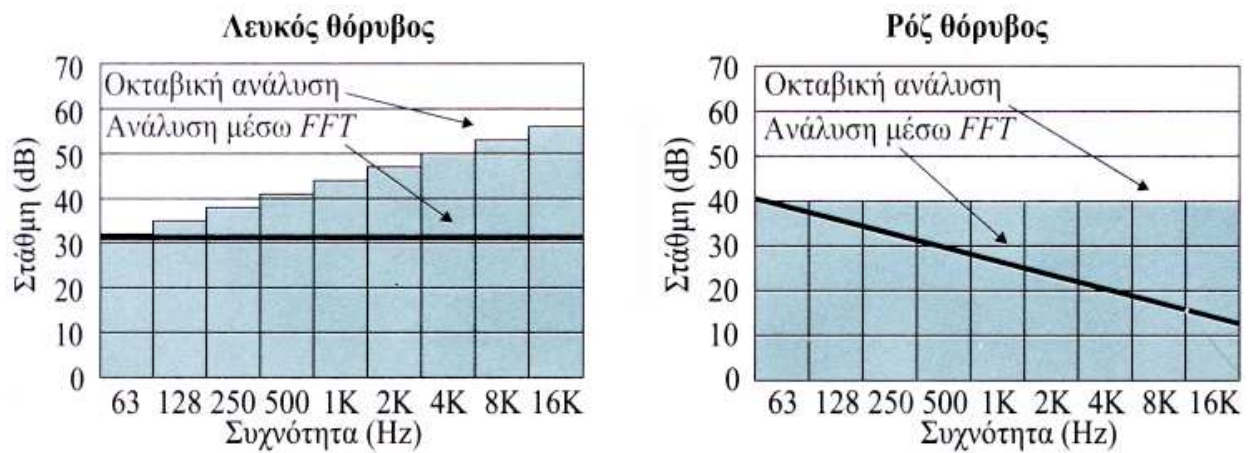
Επομένως έχουμε:

Σε **ανάλυση σταθερού εύρους ζώνης / γραμμική κλίμακα:**

- Λευκός θόρυβος: σταθερός
- Ροζ θόρυβος: -3dB/oct

Σε **ανάλυση σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης / λογαριθμική κλίμακα:**

- Λευκός θόρυβος: $+3\text{dB/oct}$
- Ροζ θόρυβος: σταθερός



Σχήμα 17. Λευκός και Ροζ θόρυβος σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα [8]

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Brüel&Kjær. (1998), "*Basic concepts of sound*". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [2] Brüel & Kjær. (1998), "*Basic frequency analysis*". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [3] Brüel & Kjær. (1998), "*Environmental Noise*". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [4] Brüel& Kjær. (1998), "*Measuring sound*". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [5] Brüel& Kjær. (1998), "*Measuring vibration*". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [6] Brüel& Kjær. (1998), "*Vibration measurement and analysis*". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [7] Moore C. B. (2001), "*An introduction to the psychology of hearing*".
- [8] Σκαρλάτος Δ. (2003), "*Εφαρμοσμένη ακουστική*".
- [9] Howard D., Angus J. (1996), "*Acoustics and Psychoacoustics*".
- [10] Rossing T., Moore R., Wheeler P. (2002). "*The science of sound*".
- [11] Κουτσοδημάκης Χ., Σηφάκης Μ., "*Εργαστηριακό Φυλλάδιο Μηχανικής Ήχου Ι*".
- [12] Russel A. Daniel, "*Introduction to Frequency Analyzers*". At: <http://www.gmi.edu/~drussell/GMI-Acoustics/Frequency-Frame.html>
- [13] PDA Acoustics Consultants. (2005). At: <http://www.pdaltd.com/Pages/leq.htm>
- [14] Acoustical Society of America, "*Classroom Acoustics*". At: <http://www.nonoise.org/quietnet/qc/booklet.htm>
- [15] Dodge C., Jerse T., (1997). "*Computer music – Synthesis, Composition and Performance*".
- [16] At: http://www.20sim.com/webhelp4/Toolboxes/frequency_domain/FFT_Analysis/FFTAnalysis.htm

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΜΕΡΟΣ

Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές
 - Σχήμα
- (Να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)

Πειραματική διαδικασία

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάθους (background noise) της αίθουσας: $B = \dots\dots\dots dB$.
3. Να πραγματοποιηθεί φασματική ανάλυση 1/1 οκτάβας λευκού και ροζ θορύβου γραμμικά. Να μετρηθεί και η συνολική στάθμη σε κάθε περίπτωση, γραμμικά και με φίλτρο A:

Θόρυβος / f (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	$L_{p(lin)ολ}$	$L_{p(A)ολ}$
Λευκός θόρυβος, $L_{p(lin)}$										
Ροζ θόρυβος, $L_{p(lin)}$										

4. Να πραγματοποιηθεί φασματική ανάλυση 1/3 οκτάβας για τα εξής δύο ηχητικά σήματα: φιλτραρισμένο λευκό θόρυβο στην οκτάβα του 1 kHz και καθαρό τόνο του 1 kHz. Να ληφθούν για κάθε περίπτωση 5 μετρήσεις, μία στη συχνότητα με τη μέγιστη στάθμη και οι υπόλοιπες σε 4 γειτονικές της συχνότητες.

Ήχος / f (Hz)
Λευκός θόρυβος $L_{p(lin)}$					
Καθαρός τόνος $L_{p(lin)}$					

5. Να πραγματοποιηθεί φασματική ανάλυση εύρους 1/1 οκτάβας για δύο διαφορετικές περιπτώσεις παλμικών ήχων.

Παλμικός ήχος / f (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Παλμικός ήχος 1, $L_{p(lin)}$								
Παλμικός ήχος 2, $L_{p(lin)}$								

Επεξεργασία μετρήσεων

1. Να κατασκευαστούν τα διαγράμματα $\log(f) - SPL$ των γραμμικών μετρήσεων 1 σε **κοινό** ημιλογαριθμικό χαρτί. Τί παρατηρείτε; Επιβεβαιώνεται η σχετική θεωρία; Πού πιστεύετε ότι οφείλονται τυχούσες αποκλίσεις;
2. Να υπολογιστούν για το λευκό θόρυβο (μέτρηση 3) οι σταθμισμένες τιμές των στάθμεων πίεσης με φίλτρο A για κάθε συχνότητα. Από αυτές να υπολογιστεί θεωρητικά η συνολική σταθμισμένη στάθμη πίεσης με φίλτρο A. Τέλος να γίνει σύγκριση της θεωρητικής και πειραματικής τιμής και να σχολιαστούν τα αποτελέσματα.
3. Να υπολογιστούν οι κεντρικές συχνότητες των 1/3 oct της μέτρησης 4.
4. Να σχολιαστούν τα αποτελέσματα της μέτρησης 4. Τί περιμέναμε και τί πήραμε; Επιβεβαιώνεται η θεωρία;
5. Να συγκριθούν ποιοτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων 5 για τους παλμικούς ήχους ως προς το φάσμα τους. Συμβαδίζουν τα αποτελέσματα με τη θεωρία;

Άσκηση για εργαστηριακή αναφορά

Να χωρίσετε το διάστημα $1 \text{ kHz} - 2 \text{ kHz}$ σε τρίτο-οκτάβες, δίνοντας και τις επιμέρους κεντρικές τιμές συχνοτήτων των ζωνικών περιοχών.

ΑΣΚΗΣΗ 4

Μέτρηση του Χρόνου Αντήχησης

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπός της άσκησης είναι η μελέτη και μέτρηση του χρόνου αντήχησης με το ηχώμετρο σε μεγάλους χώρους. Θα παρατηρήσουμε επίσης ποια είναι η επίδραση της ύπαρξης ακροατηρίου σε ένα χώρο σε σχέση με τον ίδιο χώρο όταν είναι άδειος.

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

Ακουστική κλειστών χώρων

Όταν βρισκόμαστε σε ανοιχτό χώρο, χωρίς εμπόδια/ανακλαστικές επιφάνειες και θεωρώντας ότι η πηγή είναι σημειακή, η πίεση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα ως προς την απόσταση από την πηγή, ή αλλιώς έχουμε μείωση της στάθμης του κατά 6 dB σε κάθε διπλασιασμό απόστασης.

Όταν όμως μελετούμε τη διάδοση του ήχου σε κλειστό χώρο θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας την αλληλεπίδρασή του με αυτόν.

Στην ακουστική διαχωρίζουμε τους χώρους σε δύο κατηγορίες:

- (1) Στους ακουστικά **μικρούς** χώρους, όπου $\lambda \approx$ διαστάσεις του χώρου και
- (2) Στους ακουστικά **μεγάλους** χώρους, όπου $\lambda \ll$ διαστάσεις του χώρου.

Στην πρώτη περίπτωση τα κυματικά φαινόμενα είναι πολύ έντονα και προσεγγίζουμε τη συμπεριφορά του ήχου σύμφωνα με τις αρχές της **Κυματικής Ακουστικής**.

Στη δεύτερη περίπτωση τα κυματικά φαινόμενα είναι τόσο πολύπλοκα και η χωρική διακύμανση του ηχητικού πεδίου τόσο μικρή, που η προσέγγιση της συμπεριφοράς του ήχου γίνεται με στατιστικό τρόπο. Έτσι, θεωρούμε ότι ο ήχος διαδίδεται σε ευθεία γραμμή μεταξύ ανακλαστικών επιφανειών (ακτίνες), τα φαινόμενα περίθλασης αγνοούνται κι έτσι η μελέτη μπορεί να γίνει με βάση τις αρχές της **Γεωμετρικής Ακουστικής**.

Στην άσκηση αυτή θα ασχοληθούμε με τη μελέτη του χρόνου αντήχησης σε *μεγάλους χώρους*.

Δημιουργία Αντηχητικού Πεδίου

Αντήχηση είναι η μη ακαριαία απόσβεση του ήχου με το σταμάτημα μιας πηγής και είναι αποτέλεσμα των πολλαπλών ανακλάσεων στα τοιχώματα (και άλλα αντικείμενα) ενός χώρου.

Όπως γνωρίζουμε, όταν ένα ηχητικό κύμα προσπέσει σε μία επιφάνεια, τότε ένα μέρος του απορροφάται από το υλικό (μετατρεπόμενο σε θερμική ενέργεια) και ένα μέρος του ανακλάται (με γωνία ίδια με τη γωνία της πρόσπτωσης), ενώ υπάρχει και ένα ποσό που υφίσταται περίθλαση.

Ο συντελεστής ανάκλασης, r , αντιπροσωπεύει το ποσοστό εκείνο της προσπίπτουσας ενέργειας (για όλες τις δυνατές γωνίες πρόσπτωσης) που ανακλάται κατά την πρόσπτωσή του στο υλικό και επιστρέφει στο

χώρο, δηλαδή:

$$r = \frac{E_r}{E_i}$$

όπου E_r η ανακλώμενη ενέργεια από το υλικό και E_i η προσπίπτουσα σε αυτό ενέργεια.

Ο συντελεστής απορρόφησης, a , αντιπροσωπεύει το ποσοστό εκείνο της προσπίπτουσας ενέργειας (για όλες τις δυνατές γωνίες πρόσπτωσης) που απορροφάται από το υλικό (μετατρεπόμενο σε θερμική ενέργεια). Είναι το υπόλοιπο ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας που δεν ανακλάστηκε στο χώρο και μπορεί να υπολογιστεί μέσω του συντελεστή ανάκλασης ως εξής:

$$a = 1 - r \quad (1)$$

εφόσον $r + a = 1$, δηλαδή το ποσοστό ανάκλασης και το ποσοστό απορρόφησης δίνουν το ολικό ποσοστό της ενέργειας, δηλαδή 1.

Για το συντελεστή απορρόφησης, a , θα ισχύουν επομένως τα εξής:

1. $0 \leq a \leq 1$ και
2. a αδιάστατη ποσότητα, που εξαρτάται από το μήκος κύματος.

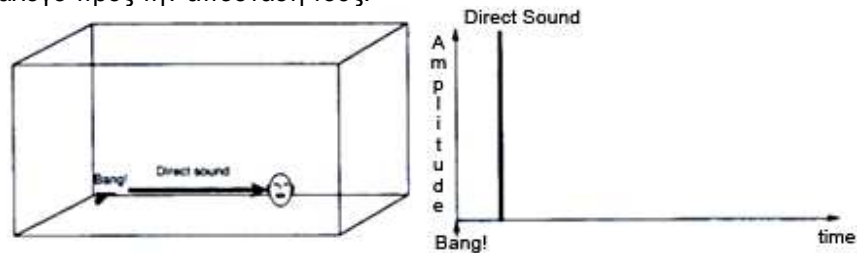
Η σταδιακή απόσβεση του ήχου μπορεί να φανεί με δύο τρόπους:

- (α) με έναν **παλμικό ήχο** ή
- (β) με μια πηγή που εκπέμπει **συνεχόμενα** ηχητική ενέργεια και διακόπτεται ξαφνικά.

Παλμικός ήχος

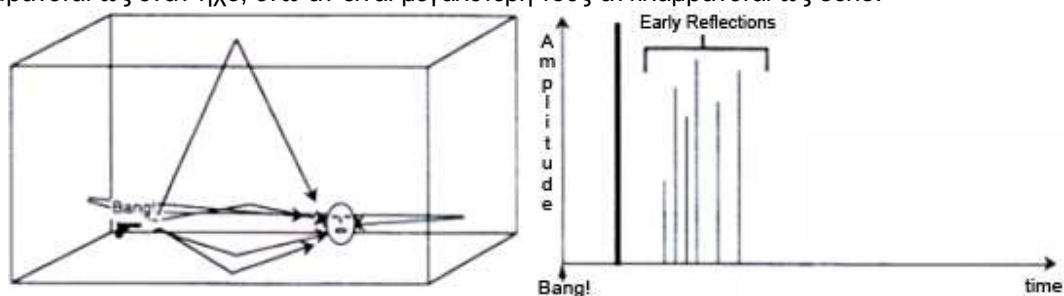
Έστω ένας παλμικός ήχος στο $t = 0s$ σε κάποιο σημείο του χώρου.

- Ο πρώτος ήχος που φτάνει στον παρατηρητή είναι αυτός που θα διανύσει τη μικρότερη διαδρομή από την πηγή, δηλαδή ο **απευθείας ήχος**. Αυτός κινούμενος με ταχύτητα $c = 344m/s$ θα φτάσει μετά από μικρό χρονικό διάστημα που εξαρτάται από την απόστασή τους. Ο απευθείας ήχος συμπεριφέρεται όπως ο ήχος σε ελεύθερο πεδίο, αφού δεν έχει αλληλεπιδράσει με το χώρο, δηλαδή το πλάτος της πίεσης είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την απόστασή τους.



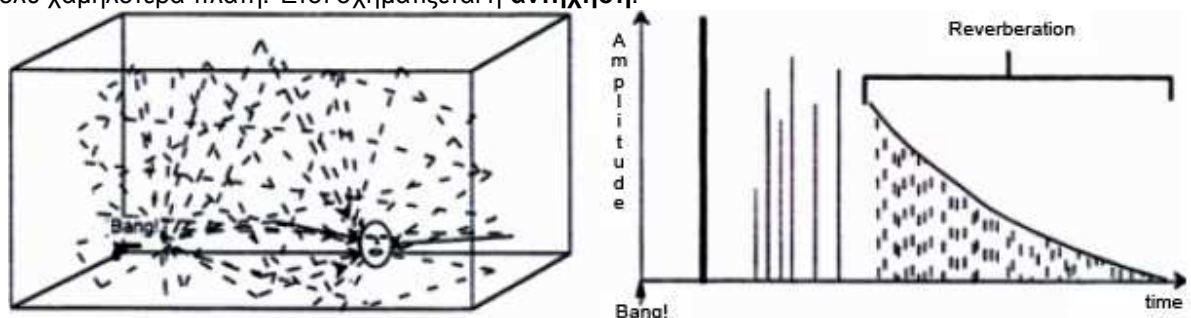
Σχήμα 1. Παλμική διέγερση ενός ιδανικού δωματίου – Απευθείας ήχος στη θέση του παρατηρητή [3]

- Αμέσως μετά και πολύ σύντομα θα φτάσουν στον παρατηρητή μία ή περισσότερες ανακλάσεις του ίδιου ήχου στα τοιχώματα (και άλλα αντικείμενα) του χώρου. Αυτοί οι ήχοι ονομάζονται **πρώτες ανακλάσεις (early reflections)** και είναι σχετικά διακριτοί ως προς το χρόνο άφιξης και ως προς την κατεύθυνσή τους σε σχέση με τον απευθείας. Αν η χρονική τους καθυστέρηση είναι μικρότερη από $35ms$, τότε το αυτί μας τους αντιλαμβάνεται ως έναν ήχο, ενώ αν είναι μεγαλύτερη τους αντιλαμβάνεται ως echo.



Σχήμα 2. Πρώτες ανακλάσεις του χώρου [3]

- Τέλος, ακόμα πιο αργά φτάνουν όλες οι υπόλοιπες ανακλάσεις (**laterelections**). Ο αρχικός ήχος έχει ανακλαστεί πλέον τόσες πολλές φορές και από τόσες πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις, που οι διαδοχικές ανακλάσεις φτάνουν με μεγάλη πυκνότητα στον παρατηρητή (μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους) και με πολύ χαμηλότερα πλάτη. Έτσι σχηματίζεται η **αντήχηση**.



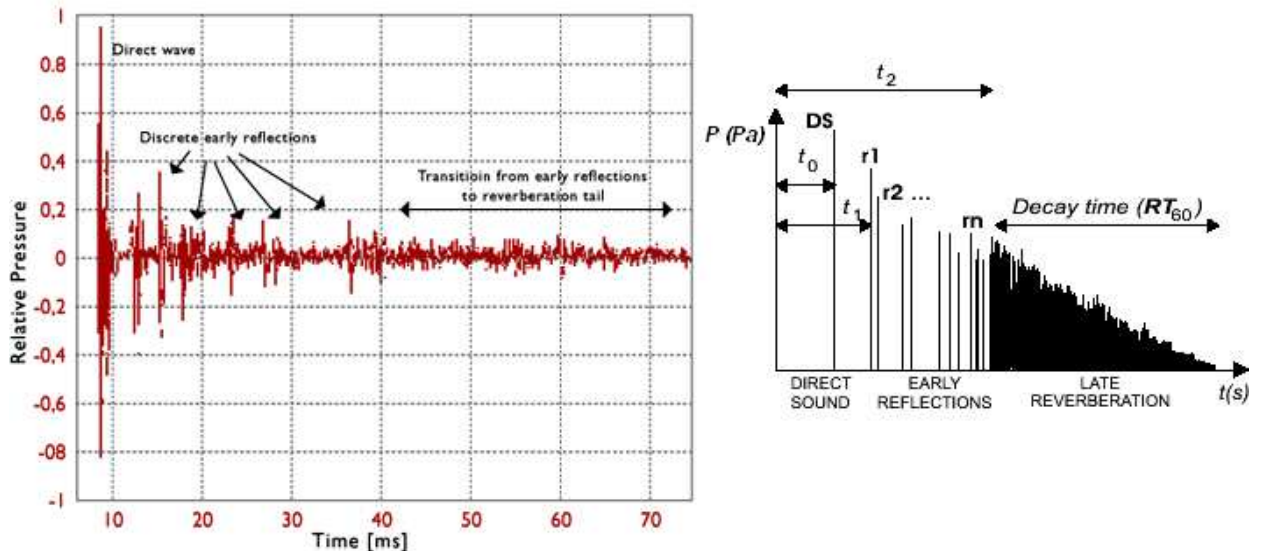
Σχήμα 3. Πρώτες ανακλάσεις του χώρου [3]

Λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων η ηχητική πίεση σε κάποιο σημείο του χώρου θα είναι μεγαλύτερη από ότι θα ήταν για την ίδια απόσταση από την πηγή σε ελεύθερο πεδίο. Για τον ίδιο λόγο, ο ήχος δεν αποσβένει αμέσως μετά την παύση του ήχου, αλλά εξασθενεί (λόγω διαδοχικών απορροφήσεων από τα τοιχώματα) σταδιακά. Αυτή η παράταση του ήχου είναι και το χαρακτηριστικό της αντήχησης. Μάλιστα, λόγω της μη-γραμμικής απορρόφησης των υλικών στις διάφορες συχνότητες, η χροιά του ήχου διαμορφώνεται από αυτές τις ανακλάσεις.

Room Impulse Response (RIR)

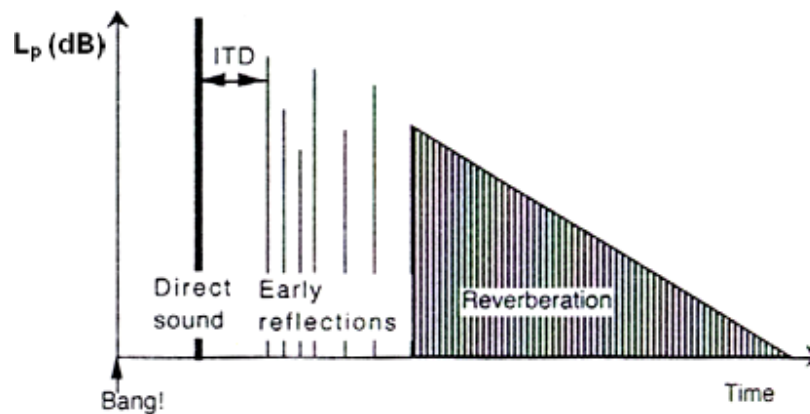
Ένας τρόπος να μετρήσουμε την αντήχηση ενός χώρου είναι να εκπέμψουμε σε ένα σημείο του ένα σύντομο (παλμικό) ήχο (π.χ. πιστόλι, παλαμάκι ή μπαλόνι που σκάει), να μετρήσουμε τη δημιουργούμενη πίεση σε άλλο σημείο του και να σχεδιάσουμε αυτήν ή τη στάθμη της ως προς το χρόνο. Το διάγραμμα που προκύπτει δείχνει την απόκριση του χώρου σε έναν παλμό, γι' αυτό και ονομάζεται **Room Impulse Response (RIR)**. Στην ιδανική περίπτωση όπου το πεδίο είναι τελείως διάχυτο:

- αν σχεδιάσουμε την πίεση ως προς το χρόνο παρατηρούμε ότι η απόσβεση αυτή είναι εκθετική:



Σχήμα 4. Διάγραμμα RIR ($t - p$) [10]

- αν σχεδιάσουμε τη στάθμη πίεσης (λογαριθμική κλίμακα) ως προς το χρόνο παρατηρούμε ότι η απόσβεση αυτή είναι γραμμική:

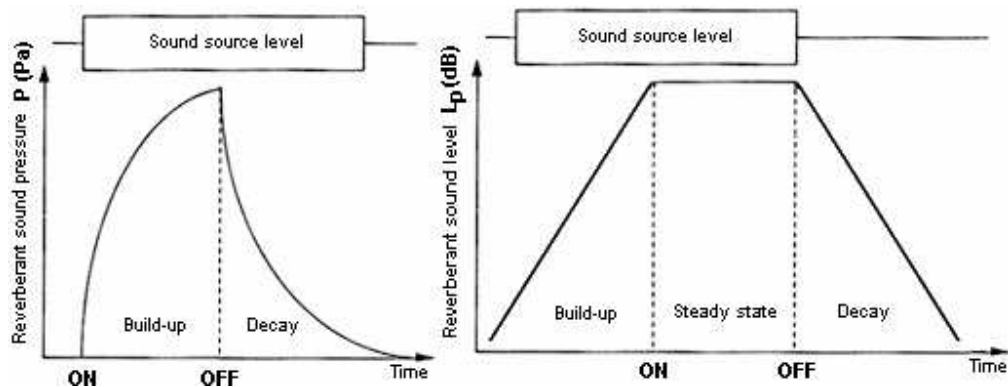


Σχήμα 5. Διάγραμμα RIR ($t - L_p$) – διαχωρισμός σε Direct Sound, Early Reflections και Late Reverberation [3]

Συνεχόμενα εκπεμπόμενος θόρυβος - απότομη διακοπή

Αν έχουμε έναν ήχο που εκπέμπει ηχητική ενέργεια σταθερά, τότε αυτή «αποθηκεύεται» στο χώρο και η ηχητική στάθμη αυξάνεται μέχρι ένα σημείο ισορροπίας, όπου το ποσό της ηχητικής ενέργειας που αποδίδεται από την πηγή είναι ίσο με το ποσό της ενέργειας που χάνεται από απορρόφηση. Όταν διακόψουμε την πηγή απότομα, η ηχητική ενέργεια μειώνεται σταδιακά μέχρι απόσβεσης.

Αν η ηχητική ενέργεια είναι κατανομημένη ομοιόμορφα στο χώρο, η μείωσή της θα είναι εκθετική ως προς το χρόνο. Αντίστοιχα, ο λογάριθμος της (στάθμη) θα παρουσιάζει γραμμική πτώση με το χρόνο. Η στάθμη της κατάστασης ισορροπίας, αλλά και οι ρυθμοί αύξησης στην αρχή και μείωσης μετά τη διακοπή εξαρτώνται από τα επίπεδα απορρόφησης και την κατανομή των απορροφητικών υλικών στο χώρο. Γι' αυτό και εξαρτώνται από το μέγεθός του (επιφάνεια απορροφητικών επιφανειών).



Σχήμα 6. Διαγράμματα $t-p$, $t-L_p$ για συνεχόμενα εκπεμπόμενο θόρυβο & μηδενισμό πηγής [3]

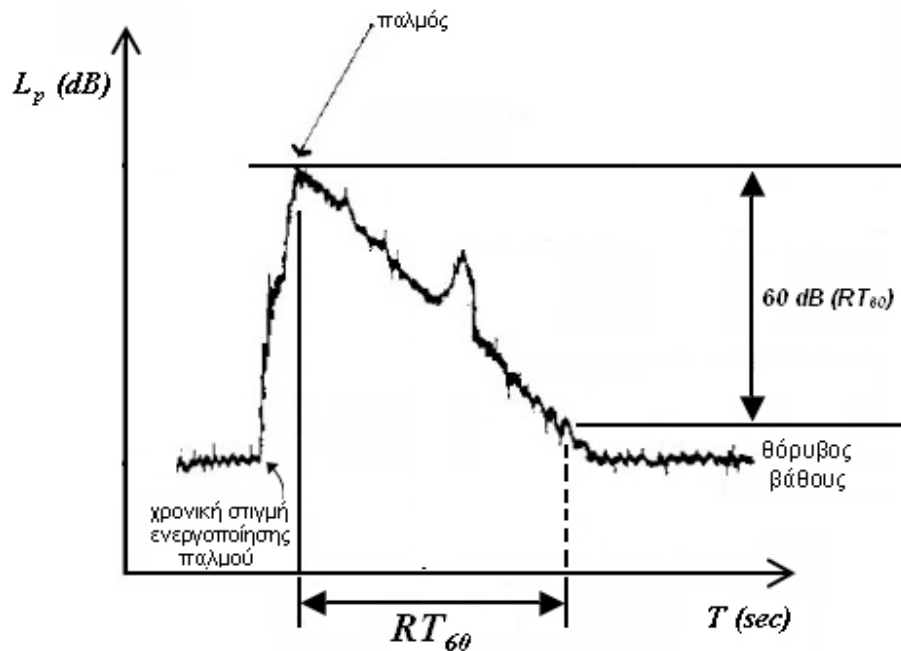
Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να φανταστούμε το ηλεκτρικό ανάλογο του χώρου, ως έναν πυκνωτή σε ένα κύκλωμα που περιέχει επίσης πηγή και αντίσταση. Η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι το ηλεκτρικό ανάλογο του χώρου, αφού συσσωρεύει ενέργεια σταδιακά μέχρι ενός σημείου. Η εκφόρτιση γίνεται εκθετικά με το χρόνο καθώς καταναλώνεται ως θερμότητα στην αντίσταση, που είναι το ηλεκτρικό ανάλογο της απορρόφησης των υλικών στην ηχητική ενέργεια. Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος είναι το ηλεκτρικό ανάλογο του χρόνου αντήχησης, δηλαδή του χρόνου που απαιτείται μέχρι την απόσβεση.

(Στην περίπτωση του παλμικού ήχου η μείωση της στάθμης ξεκινάει αμέσως και δεν υπάρχει κατάσταση ισορροπίας).

Χρόνος Αντήχησης, RT_{60}

Ως χρόνος αντήχησης RT_{60} ορίζεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε η στάθμη του ήχου (L_p), σε ένα κλειστό χώρο, να ελαττωθεί κατά 60 dB από την αρχική του τιμή.

Ο χρόνος αυτός είναι διαφορετικός για διαφορετικές συχνότητες, εφ' όσον τα διάφορα υλικά παρουσιάζουν διαφορετική απορρόφηση ανάλογα με τη συχνότητα.



Σχήμα 7. Χρόνος αντήχησης σε διάγραμμα RIR ($t - L_p$) παλμού, από [6]

RT_{60} - Προσεγγιστική σχέση υπολογισμού κατά Sabine

Στην πρώτη σχέση για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης κατέληξε εμπειρικά ο Wallace Sabine το 1898 όταν του δόθηκε η ευκαιρία να πραγματοποιήσει μια σειρά πειραμάτων διάρκειας 2 ετών με σκοπό τη βελτίωση της ακουστικής μιας αίθουσας διαλέξεων (του Fogg Art Museum) στο πανεπιστήμιο του Harvard, όπου εργαζόταν ως νέος καθηγητής φυσικής. Οι αίθουσες που χρησιμοποίησε για τις μελέτες του ήταν η προβληματική αίθουσα διαλέξεων, μια εξαιρετικής ακουστικής αίθουσα θεάτρου, ένας ιδιαίτερος αντηχητικός χώρος και μια αίθουσα με ανεκτή ακουστική. Ο Sabine χρησιμοποίησε τα μαξιλαράκια από τα καθίσματα του θεάτρου ως τα απορροφητικά υλικά για τις μελέτες του και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αντήχηση ενός χώρου εξαρτάται από τον όγκο του, τη γεωμετρία του και την ανακλαστικότητα των επιφανειών του. Η σχέση για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης στην οποία κατέληξε είναι:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \bar{a}} \quad (2)$$

ή αλλιώς $RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_S} \quad (3)$

με απορρόφηση $A_S = S \cdot \bar{a} \quad (4)$

όπου:

A_S η **απορρόφηση** του χώρου, σε [Sabines] ή [μετρικά Sabines] ή [m^2] (SI), αλλιώς σε [feet Sabins] ή [ft^2]

\bar{a} ο **μέσος συντελεστής απορρόφησης** του χώρου (αδιάστατος),

S η συνολική επιφάνεια του χώρου που παρουσιάζει απορρόφηση, σε [m^2] και

V ο όγκος του χώρου, σε [m^3].

(Οι μονάδες στη σχέση προκύπτουν σωστά, αν λάβουμε υπ' όψιν μας ότι στον παρονομαστή της σχέσης υπάρχει και η ταχύτητα του ήχου (σε m/s), της οποίας η τιμή έχει ήδη αντικατασταθεί).

Στη σχέση παρουσιάζεται μια μέση τιμή συντελεστή απορρόφησης κι αυτό, γιατί μέσα σε ένα χώρο υπάρχει πληθώρα διαφορετικών υλικών, με διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης, ο οποίος μάλιστα είναι διαφορετικός για διαφορετικές συχνότητες και διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης της ακτίνας του ήχου. Η μέση τιμή υπολογίζεται από το γινόμενο των επιμέρους συντελεστών απορρόφησης με την αντίστοιχη επιφάνειά τους διαιρεμένη με τη συνολική επιφάνεια, δηλαδή:

$$\bar{a} = \frac{S_1 \cdot a_1 + S_2 \cdot a_2 + \dots + S_n \cdot a_n}{S} \quad (5)$$

$$\text{όπου } S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$$

a_i είναι ο συντελεστής απορρόφησης των επιμέρους επιφανειών και S_i τα αντίστοιχα εμβαδά τους.

Κατά το Sabine η απορρόφηση του χώρου δίνεται από τον αριθμητή της σχέσης, δηλαδή:

$$A_S = S_1 \cdot a_1 + S_2 \cdot a_2 + \dots + S_n \cdot a_n \quad (6)$$

Η παραπάνω σχέση (2) του **Sabine ισχύει ικανοποιητικά για $\bar{a} \ll 1$, π.χ. $\bar{a} < 0.1$** , αφού τα πειράματα του Sabine με τα οποία οδηγήθηκε σε αυτή τη σχέση έγιναν σε χώρο με μικρή απορρόφηση. Όπως θα δούμε παρακάτω, σε περιπτώσεις που η προϋπόθεση αυτή δεν ισχύει υπάρχουν πιο ακριβείς σχέσεις για τον υπολογισμό του RT_{60} .

Η σχέση (2) δείχνει ότι ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από δύο ανεξάρτητες παραμέτρους: το μέγεθος του χώρου και την απορρόφηση που παρουσιάζει στον ήχο.

Όσο μεγαλύτερος ο χώρος και χαμηλότερη η απορρόφηση, τόσο περισσότερο διαρκεί η εξασθένιση. Αυτό είναι και ένα από τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται από την ανθρώπινη ακοή, σε συνδυασμό με το 'Initial Time Delay' για τον προσδιορισμό του μεγέθους ενός χώρου.

RT_{60} - Σχέση υπολογισμού κατά Norris - Eyring

Η σχέση υπολογισμού του RT_{60} που προτάθηκε από τους Norris και Eyring βασίζεται στη μέση ελεύθερη διαδρομή του ήχου μεταξύ δύο διαδοχικών ανακλάσεων και μπορεί να εξαχθεί κάνοντας κάποιες θεωρήσεις.

Η εξαγωγή της σχέσης βασίζεται στη γεωμετρική ακουστική, δηλαδή γίνεται η θεώρηση ότι ο ήχος διαδίδεται σε ακτίνες, δηλαδή σε ευθείες γραμμές μεταξύ δύο διαδοχικών ανακλάσεων. Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι μετά από μεγάλο αριθμό ανακλάσεων το ηχητικό πεδίο του χώρου γίνεται διάχυτο μακριά από την πηγή, δηλαδή η πυκνότητα της ενέργειας είναι σταθερή σε ολόκληρο το χώρο μακριά από αυτήν και όλες οι κατευθύνσεις των ανακλάσεων έχουν ίση πιθανότητα.

Αυτό το μοντέλο είναι μια υπεραπλούστευση της πραγματικής συμπεριφοράς του ήχου σε ένα χώρο, ιδιαίτερα σε χαμηλές συχνότητες και υψηλές απορροφήσεις, γιατί απαιτεί έναν τεράστιο αριθμό ανακλάσεων για να μπορούμε να αγνοήσουμε την ύπαρξη στάσιμων κυμάτων, την ύπαρξη διαφορετικών υλικών και το σχήμα του χώρου. Για κατάλληλες πάντως τιμές του A μπορεί η παραπάνω σχέση (2) να μας οδηγήσει σε έγκυρα αποτελέσματα, ειδικά σε πολύ μεγάλους χώρους.

Με τη θεώρηση του διάχυτου πεδίου και τις ευθύγραμμες διάδοσης του ήχου μεταξύ ανακλαστικών επιφανειών, πάντως, έχουμε τα εξής:

Μπορεί να αποδειχτεί (δεν παρουσιάζουμε την απόδειξη εδώ) ότι η μέση ελεύθερη διαδρομή (MFP – MeanFreePath) δίνεται από τη σχέση $MFP = \frac{4V}{S}$, όπου S η συνολική επιφάνεια του χώρου που παρουσιάζει απορρόφηση, σε $[m^2]$, και V ο όγκος του χώρου, σε $[m^3]$, επομένως το πλήθος των ανακλάσεων σε χρόνο t θα είναι: $n = \frac{s}{MFP} = \frac{c \cdot t}{MFP} \Leftrightarrow n = t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}$ (7)

- Έστω απευθείας ήχος με ένταση I_0 .
 - 1^η ανάκλαση: θα απορροφηθεί \bar{a} ποσοστό του I_0 ,
επομένως $(1 - \bar{a})$ ποσοστό του θα επιστρέψει στο χώρο $\Rightarrow I_1 = (1 - \bar{a}) \cdot I_0$
 - 2^η ανάκλαση: $I_2 = (1 - \bar{a}) \cdot I_1 = (1 - \bar{a}) \cdot (1 - \bar{a}) \cdot I_0 = (1 - \bar{a})^2 \cdot I_0$
 - 3^η ανάκλαση: $I_3 = (1 - \bar{a})^3 \cdot I_0$
 - ...
 - n^η ανάκλαση: $I_n = (1 - \bar{a})^n \cdot I_0$
- $$\Leftrightarrow \frac{I_n}{I_0} = (1 - \bar{a})^n, \text{ όπου } n \text{ το πλήθος των ανακλάσεων.}$$

Από τη σχέση (7) θα έχουμε:

$$\frac{I_n}{I_0} = (1 - \bar{a})^{t \cdot \frac{S \cdot c}{4V}} \Leftrightarrow \log\left(\frac{I_n}{I_0}\right) = \log\left[(1 - \bar{a})^{t \cdot \frac{S \cdot c}{4V}}\right] \Leftrightarrow 10 \cdot \log\left(\frac{I_n}{I_0}\right) = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}\right) \cdot \log(1 - \bar{a})$$

$$\Leftrightarrow 10 \cdot \log\left(\frac{I_n}{I_{ref}} \cdot \frac{I_{ref}}{I_0}\right) = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}\right) \cdot \log(1 - \bar{a})$$

$$\Leftrightarrow 10 \cdot \log\left(\frac{I_n}{I_{ref}}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{I_0}{I_{ref}}\right) = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}\right) \cdot \log(1 - \bar{a})$$

$$\Leftrightarrow L_{I_n} - L_{I_0} = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}\right) \cdot \log(1 - \bar{a})$$

$$\Leftrightarrow \Delta L_I = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V} \right) \cdot \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\ln 10}$$

Ο χρόνος αντήχησης ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για πτώση της στάθμης κατά 60 dB, επομένως:

$$\text{Για } \Delta L_I = -60 \text{ dB} \Rightarrow -60 = 10 \cdot \left(RT_{60} \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V} \right) \cdot \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\ln 10}$$

Με επίλυση ως προς RT_{60} και αντικατάσταση της ταχύτητας του ήχου στον αέρα και του $\ln 10 (=2,3)$, έχουμε:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{a})} \quad (8)$$

δηλαδή μπορούμε να πούμε ότι ισχύει και πάλι:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_{NE}} \quad (9)$$

$$\text{αλλά με } A_{NE} = -S \cdot \ln(1 - \bar{a}) \quad (10)$$

Η σχέση αυτή των **Norris και Eyring** ισχύει **και για $\bar{a} > 0.1$** .

Αποδεικνύεται εύκολα ότι η σχέση του Sabine είναι μια ειδική περίπτωση, που ισχύει μόνο για πολύ μικρούς μέσους συντελεστές απορρόφησης, δηλαδή $\bar{a} \ll 1$, εφόσον ο παράγοντας $\ln(1 - \bar{a})$ μπορεί να αναπτυχθεί σε αριθμητική σειρά ως:

$$-\ln(1 - \bar{a}) = \bar{a} + \frac{\bar{a}^2}{2} + \frac{\bar{a}^3}{3} + \dots + \frac{\bar{a}^n}{n}$$

$$\Rightarrow \text{πχ.} \begin{cases} \text{για } \alpha = 0.1 \Rightarrow -\ln(1 - \bar{a}) = 0.1 + \frac{0.01}{2} + \frac{0.001}{3} + \dots \rightarrow 0.105 \approx 0.1 \Rightarrow -\ln(1 - \bar{a}) \rightarrow \bar{a} \\ \text{για } \alpha = 0.9 \Rightarrow -\ln(1 - \bar{a}) = 0.9 + \frac{0.81}{2} + \frac{0.729}{3} + \dots \rightarrow 1.83 \gg 0.9 \Rightarrow -\ln(1 - \bar{a}) \not\rightarrow \bar{a} \end{cases}$$

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι για πολύ μικρά \bar{a} η σχέση του Sabine ισχύει και δίνει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με τη σχέση των Norris-Eyring, ενώ για μεγάλα \bar{a} η απόκλιση στις τιμές είναι μεγάλη.

RT_{60} – Απορρόφηση από τον αέρα

Η πτώση της στάθμης του ήχου μετά τη διακοπή μιας πηγής οφείλεται εν γένει σε 3 παράγοντες:

- (1) Απόσταση από την πηγή (στο ελεύθερο πεδίο: -6 dB για κάθε διπλασιασμό απόστασης),
- (2) Απορρόφηση από τοιχώματα και άλλα αντικείμενα (\bar{a}) και
- (3) Απορρόφηση από τον αέρα (\bar{m} , μόνο σε τεράστιους χώρους).

Ειδικά στην περίπτωση που μιλάμε για τεράστιους χώρους (π.χ. εκκλησίες, θέατρα κλπ.) η παραπάνω σχέση του χρόνου αντήχησης (3) πρέπει να συμπληρωθεί με την απορρόφηση που οφείλεται στην απορρόφηση από τον αέρα και γίνεται:

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{A + 4 \cdot m \cdot V} \quad (11)$$

δηλαδή υπάρχει η προσθήκη του όρου $4 \cdot m \cdot V$ όπου m ο συντελεστής εξασθένισης στον αέρα (αδιάστατο μέγεθος).

Η απορρόφηση από τον αέρα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του, τη σύστασή του, το σχηματισμό σταγονιδίων νερού (υγρασία) και τη συχνότητα του ήχου. Γίνεται μάλιστα πιο αισθητή στις μεσαίες και υψηλότερες συχνότητες, δηλαδή για $f > 2 \text{ kHz}$.

Σημειώνεται ότι η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα είναι μοριακό φαινόμενο και έχει να κάνει με τις ενεργειακές στάθμες ταλάντωσης των μορίων υδρατμών που υπάρχουν στον αέρα.

RT_{60} - Σχέση υπολογισμού του Fitzroy

Στην περίπτωση ανομοιόμορφης απορρόφησης, δηλαδή στην περίπτωση ύπαρξης σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις ισχυρά ανακλαστικών επιφανειών όπως οι υαλοπίνακες και ειδικά για ορθογώνιους χώρους, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης τον προσεγγιστικό τύπο του Fitzroy, ο οποίος χωρίζει τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης στους 3 άξονες:

$$\text{Για } \bar{a} \ll 0.1: RT_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{S^2} \cdot \left(\frac{S_X}{\bar{a}_X} + \frac{S_Y}{\bar{a}_Y} + \frac{S_Z}{\bar{a}_Z} \right) \quad (12)$$

$$\text{Για } \bar{a} \geq 0.1: RT_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{S^2} \cdot \left(\frac{S_X}{\ln(1 - \bar{a}_X)^{-1}} + \frac{S_Y}{\ln(1 - \bar{a}_Y)^{-1}} + \frac{S_Z}{\ln(1 - \bar{a}_Z)^{-1}} \right) \quad (13)$$

Για ορθογώνιο χώρο θα έχουμε:

$$S_X = 2 \cdot X \cdot Y$$

$$S_Y = 2 \cdot X \cdot Z$$

$$S_Z = 2 \cdot Y \cdot Z$$

RT_{60} - Σχέση υπολογισμού των Sette - Millington

Όταν σε έναν κλειστό χώρο υπάρχουν επιφάνειες με ιδιαίτερα μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ($a > 0.63$), ο τύπος των Norris-Eyring μπορεί να δώσει ως αποτέλεσμα συντελεστές απορρόφησης μεγαλύτερους της μονάδας (1)! Στις περιπτώσεις αυτές, όπου δηλαδή υπάρχουν μεγάλες διαφορές στους συντελεστές απορρόφησης των διάφορων επιφανειών του χώρου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος των Sette - Millington που δίνει πάντα συντελεστή απορρόφησης μικρότερο της μονάδας.

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_M} \quad (14)$$

$$\text{όπου } A_M = -[S_1 \cdot \ln(1 - a_1) + S_2 \cdot \ln(1 - a_2) + \dots] \quad (15)$$

RT_{60} – Σχέσεις υπολογισμού RT_{60} – συνοπτικός πίνακας

Όπως είδαμε, η γενική σχέση που δίνει το χρόνο αντήχησης σε χώρο όπου δεν παρουσιάζει απορρόφηση ο αέρας είναι:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A} \quad (16)$$

όπου η απορρόφηση A δίνεται από διαφορετικές σχέσεις ανάλογα με την περίπτωση.

Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι οι παρακάτω σχέσεις δίνουν έγκυρα αποτελέσματα στις αναγραφόμενες συνθήκες:

	(μέσος) συντ/στής απορρόφησης \bar{a}	Απορρόφηση A (Sabine)	Χρόνος αντήχησης RT_{60} (sec)
Sabine	$\bar{a} \ll 0.1$	επιφάνεια $\sum_i (S_i \cdot a_{i,f})$	$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_S}$
Norris-Eyring	$\bar{a} \geq 0.1$ και $a_{i,f} \rightarrow 1$	$-S \cdot \ln \left\{ 1 - \sum_i \frac{\text{επιφάνεια } S_i \cdot a_{i,f}}{S} \right\}$	$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_{NE}}$
Sette - Millington	$\bar{a} \geq 0.1$ με $a > 0.63$	επιφάνεια $\sum_i [S_i \cdot \ln(1 - a_{i,f})^{-1}]$	$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_M}$
Fitzroy	σύμφωνα με τα παραπάνω	σύμφωνα με τα παραπάνω	$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{S^2} \cdot \left(\frac{S_X}{\bar{a}_X} + \frac{S_Y}{\bar{a}_Y} + \frac{S_Z}{\bar{a}_Z} \right)$
με απορρόφηση από τον αέρα	σύμφωνα με τα παραπάνω	σύμφωνα με τα παραπάνω	$RT_{60} = \frac{0,161V}{A + 4 \cdot m \cdot V}$
<p>όπου:</p> <p>S_i το εμβαδόν της επιφάνειας του υλικού i [m^2] και $a_{i,f}$ ο συντελεστής απορρόφησης που παρουσιάζει η επιφάνεια i στη συχνότητα f.</p>			

Πίνακας 1. Συνοπτικός πίνακας σχέσεων υπολογισμού RT_{60} για διάφορες συνθήκες

Για την αποφυγή σύγχυσης σημειώνουμε επίσης τα εξής:

	όνομα	τιμές	διαστάσεις	επεξήγηση
a	συντ/στής απορρόφησης (absorptioncoefficient)	$0 \leq a \leq 1$	αδιάστατο	χαρακτηρίζει το υλικό και δίνει το ποσοστό της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργειας που το υλικό απορροφά
\bar{a}	μέσος συντ/στής απορρόφησης (averageabsorptioncoeffi- cient)	$0 \leq \bar{a} \leq 1$	αδιάστατο	η μέση τιμή των συντελεστών από όλα τα υλικά του χώρου (σχέση (5))
A	Απορρόφηση (effective absorption area)	$A \geq 0$	[Sabine] (μετρικά ή σε πόδια) ή [m^2] ή [ft^2]	το γινόμενο του συντελεστή απορρόφησης ενός υλικού με την αντίστοιχη επιφάνειά του

Πίνακας 2. Επεξηγηματικός πίνακας: συντελεστής απορρόφησης a , μέσος συντελεστής απορρόφησης \bar{a} , απορρόφηση A

Εξάρτηση RT_{60} - \bar{a}

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις (Sabine, Norris-Eyring κλπ.), βλέπουμε ότι ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από τον όγκο και το μέσο συντελεστή απορρόφησης, δηλαδή: $RT_{60} = f(V, \bar{a})$.

Αυτό σημαίνει ότι αν βρισκόμαστε σε ένα χώρο με κάποιο μέσο συντελεστή απορρόφησης, \bar{a} και εισάγουμε κάποιο επιπλέον απορροφητικό υλικό, ο μέσος συντελεστής απορρόφησης θα αυξηθεί και αντίστοιχα θα μειωθεί ο χρόνος αντήχησης.

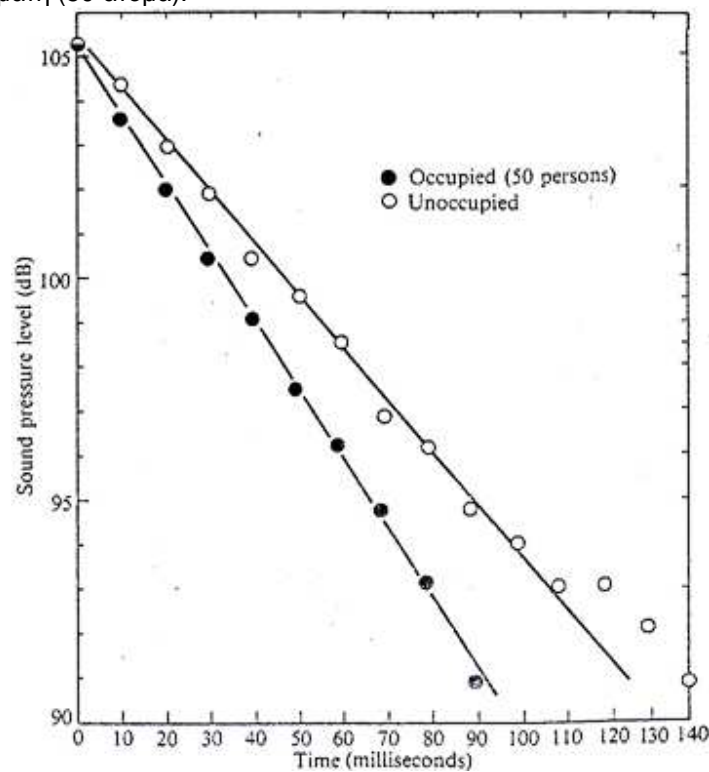
Σύμφωνα με τον Πίνακα 3, βλέπουμε ότι και ο άνθρωπος παρουσιάζει κάποια απορρόφηση στον ήχο, η οποία μάλιστα είναι μεγαλύτερη στις υψηλότερες συχνότητες. Αυτός είναι ο λόγος που η ακουστική μιας άδειας αίθουσας αλλάζει αισθητά με την παρουσία του κοινού.

Με την είσοδο του κοινού αυξάνεται η απορρόφηση και άρα θα πρέπει να αναμένεται μείωση του αντίστοιχου χρόνου αντήχησης.

Έτσι, σε ένα χώρο με ακροατήριο ο ήχος αποσβένει γρηγορότερα από ότι αν αυτός είναι άδειος.

Η χροιά του ήχου μιας γεμάτης αίθουσας επηρεάζεται επίσης, σύμφωνα με τη μη γραμμική απορρόφηση που παρουσιάζει ένα άτομο ως προς τη συχνότητα.

Εδώ φαίνονται τα διαγράμματα πτώσης του αντηχητικού πεδίου σε μια αίθουσα συναυλιών, όταν αυτή είναι άδεια και όταν είναι γεμάτη (50 άτομα).



Σχήμα 8. Πτώση αντηχητικού πεδίου στην άδεια και γεμάτη (50 άτομα) αίθουσα [2]

Τα παραπάνω ισχύουν και στην περίπτωση που σε ένα δωμάτιο ανοίξουμε παράθυρό του.

Θεωρητικά ένα **ανοιχτό παράθυρο** παρουσιάζει μέγιστη απορρόφηση, $a = 1$

αφού όλο το ποσό της ενέργειας διαφεύγει από αυτό χωρίς επιστροφή.

Έτσι, ανοίγοντας ένα παράθυρο αυξάνουμε το μέσο συντελεστή απορρόφησης του χώρου.

Εξάρτηση $RT_{60} - f$

Η μη προφανής εξάρτηση είναι αυτή της συχνότητας. Τα διάφορα υλικά παρουσιάζουν μη-γραμμική συμπεριφορά στην απορρόφηση των διάφορων συχνοτήτων, δηλαδή απορροφούν διαφορετικά ποσοστά της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργειας ανάλογα με τη συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι: $\bar{a} = g(f)$

$$\Rightarrow RT_{60} = f(V, \bar{a}, f)$$

Στην ειδική περίπτωση, μάλιστα, που έχουμε και σημαντική απορρόφηση από τον αέρα, ο χρόνος αντήχησης θα εξαρτάται και από τον συντελεστή εξασθένησής του, m , ο οποίος επίσης εξαρτάται από τη συχνότητα $\Rightarrow RT_{60} = f(V, \bar{a}, m, f)$

Αυτό σημαίνει ότι η απόκριση του δωματίου θα πρέπει να αλλάζει με τη συχνότητα, δηλαδή το RIR θα πρέπει να παρουσιάζει **διαφορετικούς ρυθμούς μείωσης για τις διάφορες συχνότητες** (δηλαδή διαφορετικές κλίσεις στην ευθεία της πτώσης), μιλώντας πάντοτε για τον ίδιο χώρο.

Κατά συνέπεια, λόγω της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των διάφορων υλικών στις διάφορες συχνότητες, το αντηχητικό πεδίο διαμορφώνει και τη χροιά του τελικά παραγόμενου ήχου.

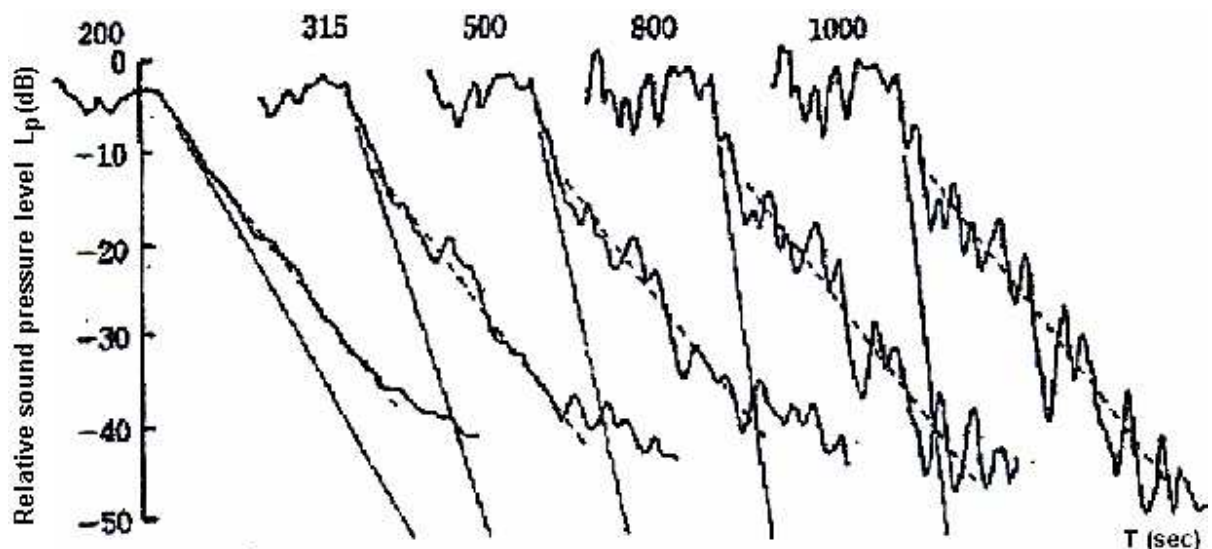
Για παράδειγμα, έστω η ακραία περίπτωση όπου μία συχνότητα έχει πολύ πιο αργό ρυθμό μείωσης από όλες τις άλλες. Τότε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα μπορεί όλες οι άλλες συχνότητες να έχουν αποσβεστεί και να παραμείνει μόνο αυτή στο χώρο.

Για τους παραπάνω λόγους:

Όταν κάνουμε ακουστικές μελέτες σε κλειστούς χώρους, δίνουμε το χρόνο αντήχησης **σε κάθε οκτάβα**.

Όταν δίνεται ένας και μοναδικός αριθμός αυτός εξ' ορισμού αναφέρεται στη συχνότητα των **500 Hz**.

Αυτό προέρχεται από τις αποκλειστικές μελέτες αντήχησης του Sabine στα 512 Hz. Αν και η συμπεριφορά του αντηχητικού ήχου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη για να περιγραφεί από ένα μόνο αριθμό, ο χρόνος αντήχησης των 500 Hz είναι αρκετά ενδεικτικός της «ζωντάνιας» του χώρου.



Σχήμα 9. Πτώση αντηχητικού πεδίου για διάφορες συχνότητες [5]

Προϋποθέσεις ισχύος των σχέσεων υπολογισμού RT_{60}

Το θεωρητικό μοντέλο από το οποίο προήλθαν όλες οι παραπάνω εξισώσεις προϋποθέτει 2 πράγματα:

- (1) **μεγάλο χώρο**, για την έγκυρη χρήση των αρχών της Γεωμετρικής Ακουστικής και
- (2) το **αντηχητικό πεδίο** να είναι απολύτως **διάχυτο**, δηλαδή η κατανομή της ηχητικής ενέργειας μέσα στο χώρο να είναι ομοιόμορφη (και η μείωση της στάθμης να είναι γραμμική).

Στην πράξη, αυτή η προϋπόθεση εκπληρώνεται επαρκώς όταν:

- (α) οι διαστάσεις του χώρου δεν είναι ιδιαίτερας διαφορετικές μεταξύ τους,
- (β) οι διαστάσεις του χώρου είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος και
- (γ) η απορρόφηση είναι κατανεμημένη αρκετά ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια των τοιχωμάτων.

Σφάλματα – αποκλίσεις

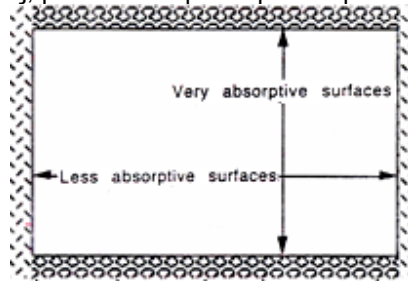
Τις περισσότερες φορές παρουσιάζονται αποκλίσεις από την ιδανική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα ο ρυθμός μείωσης του θορύβου με το χρόνο να μην είναι ομαλός, δηλαδή η πτώση να μην είναι απολύτως ευθύγραμμη.

(I) Απόκριση δωματίου με διπλή κλίση

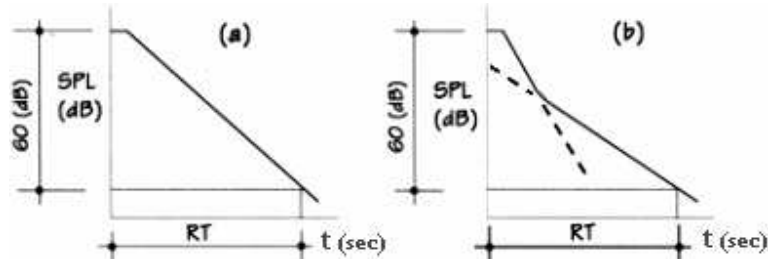
Συχνά η πτώση της στάθμης του αντηχητικού πεδίου εμφανίζει ένα σημείο καμπής, δηλαδή δύο κλίσεις, ιδιαίτερας στην αρχή της πτώσης. Αυτό οφείλεται σε ανισότροπη απορρόφηση του ήχου από το χώρο και μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους:

(I.1) Μη διάχυτο αντηχητικό πεδίο

Όταν η απορρόφηση που παρουσιάζει ο χώρος στον ήχο είναι ανισότροπη, δηλαδή η κατανομή των απορροφητικών υλικών στο χώρο δεν είναι ομοιόμορφη, τότε το δημιουργούμενο πεδίο δεν είναι διάχυτο. Για παράδειγμα, όταν δύο παράλληλες επιφάνειες του χώρου (π.χ. δύο απέναντι τοίχοι) παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση από τις υπόλοιπες, τότε ο ήχος αποσβένει πολύ γρηγορότερα από αυτές τις επιφάνειες από ότι από τις υπόλοιπες, με αποτέλεσμα να βλέπουμε δύο διαφορετικές κλίσεις στο RIR.



Σχήμα 10. Δωμάτιο με δύο πλευρές μεγάλης απορρόφησης στον ήχο [3]



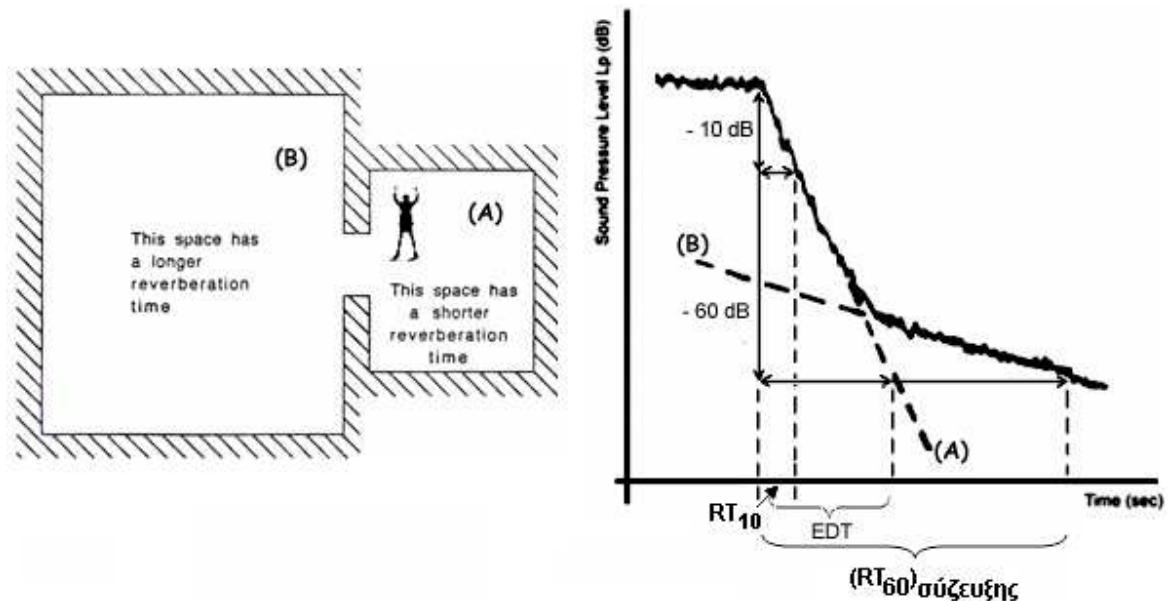
Σχήμα 11. Τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εξασθένισης του αντηχητικού πεδίου:
(α) ομοιόμορφη πτώση ιδανικά διάχυτου αντηχητικού πεδίου,
(β) διπλή κλίση σε μη διάχυτο πεδίο, με απότομη αρχική πτώση [11]

Έτσι, συχνά αντί να μετράμε το συνολικό ρυθμό πτώσης, μετράμε μόνο τον πρώιμο, ο οποίος περιλαμβάνει τις πρώτες ανακλάσεις. Αυτή είναι και η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια που παίζει τον ουσιαστικότερο ρόλο στη διαμόρφωση της ακουστικής, αφού οι καθυστερημένες ανακλάσεις χάνουν μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους.

(β) Σύζευξη δύο χώρων

Στην περίπτωση που έχουμε δύο χώρους που συγκοινωνούν (όπως ο κυρίως ναός και μια πτέρυγά του ή δύο διαφορετικά δωμάτια με την ενδιάμεση πόρτα τους ανοιχτή), η ηχητική ενέργεια παρουσιάζει δύο διαφορετικούς ρυθμούς πτώσης που προέρχονται από τους δύο χώρους (λόγω διαφορετικών απορροφήσεων και διαστάσεων). Αυτή η καμπύλη με τις δύο ευθύγραμμες πτώσεις προκύπτει, επειδή τα ηχητικά κύματα με την ταχύτερη εξασθένιση αποσβένουν γρηγορότερα από ότι αυτά με την πιο αργή εξασθένιση και έτσι κυριαρχούν προς το τέλος του χρόνου.

Στην περίπτωση που βρισκόμαστε μέσα σε ένα χώρο με μικρό χρόνο αντήχησης και ανοίξουμε την πόρτα σε έναν περισσότερο αντηχητικό χώρο, η σύζευξη των δύο προκαλεί αύξηση του χρόνου αντήχησης. Δηλαδή ανοίγοντας την πόρτα και εφ' όσον βρισκόμαστε κοντά στο άνοιγμα, θα ακούσουμε δύο ρυθμούς πτώσης και ο χώρος θα γίνει συνολικά πιο ζωντανός.

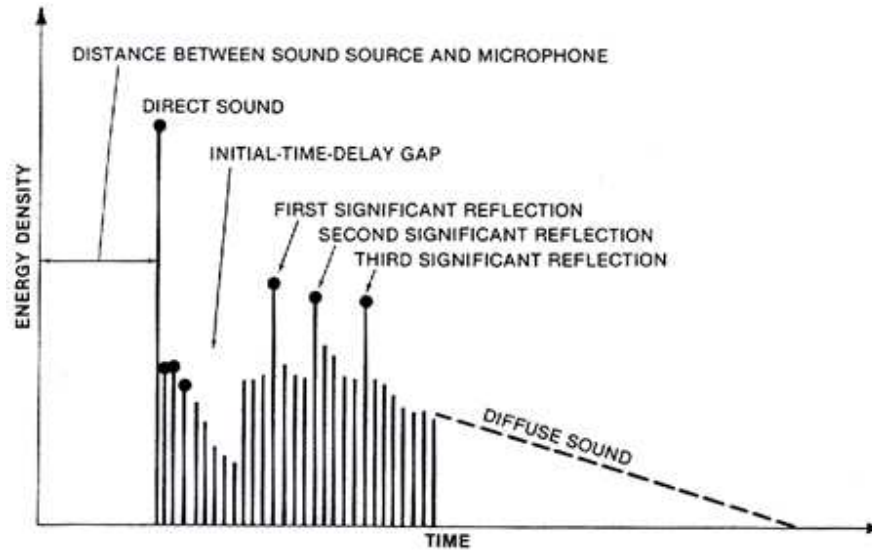


Σχήμα 12. Παρατηρητής μέσα σε δωμάτιο με μικρή αντήχηση – σύζευξη με περισσότερο αντηχητικό δωμάτιο [6]

Στην αντίθετη περίπτωση που βρισκόμαστε μέσα σε ένα χώρο με μεγάλο χρόνο αντήχησης και ανοίξουμε την πόρτα σε ένα λιγότερο αντηχητικό χώρο, η σύζευξη των δύο προκαλεί μείωση του χρόνου αντήχησης.

(II) Παρουσία κορυφών στο RIR

Η εμφάνιση κορυφών στο διάγραμμα μαρτυρεί είτε την αποθήκευση ενέργειας στο χώρο με τη μορφή συντονισμών (στάσιμων κυμάτων) κυρίως στις χαμηλές συχνότητες ή την παρουσία echo.



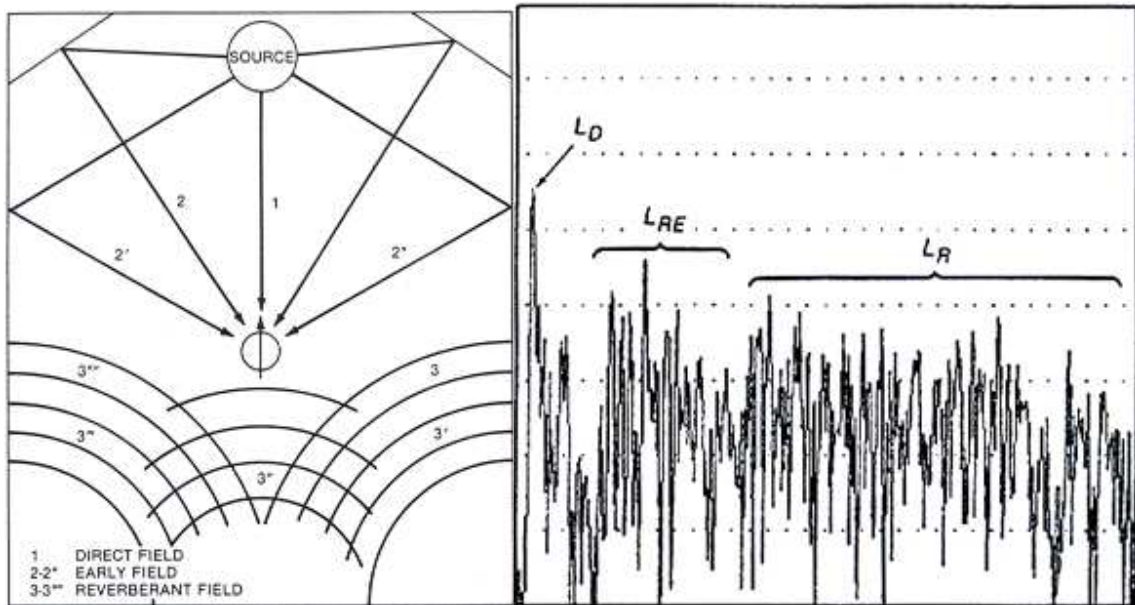
Σχήμα 13. Παρουσία κορυφών στο RIR λόγω δημιουργίας στάσιμων κυμάτων (κυρίως στις χαμηλές συχνότητες) [1]

RIR – αντίληψη του ήχου σε κλειστό χώρο

Όπως είδαμε, το διάγραμμα RIR μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές:

- (1) Απευθείας Ήχο (DirectSound - DS),
- (2) (Διακριτές) Πρώτες Ανακλάσεις (EarlySound - ES): ανακλάσεις που φτάνουν σε 50-80 ms από τον απευθείας ήχο και
- (3) Καθυστερημένες Ανακλάσεις (LateReverberation): Απαιτείται κάποιος χρόνος για τη δημιουργία και στη συνέχεια την απόσβεσή του.

Η ανάλυση της ακουστικής χώρων πολλές φορές βασίζεται σε αυτά τα τρία κομμάτια.



Σχήμα 14. Διαχωρισμός RIR σε: Direct Sound, Early Reflections και Late Reverberation [1]

Ο απευθείας ήχος και οι πρώτες ανακλάσεις μπορούμε να πούμε ότι συμπεριφέρονται όπως ο ήχος σε ελεύθερο πεδίο, δηλαδή τα πλάτη τους είναι αντιστρόφως ανάλογα ως προς την απόσταση από την πηγή (στις πρώτες ανακλάσεις λαμβάνουμε υπ' όψιν μας και την επίδραση των απορροφήσεων από ανακλάσεις στα πλάτη τους, τα οποία αλλάζουν ανάλογα με τη θέση μας στο χώρο). Αντίθετα, το καθαρά αντηχητικό κομμάτι του ήχου (late reflections) παραμένει σταθερό, ανεξάρτητα από τη θέση του παρατηρητή στο χώρο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εμφανίζονται πλέον όλες οι δυνατές ανακλάσεις και αθροίζονται σε κάθε σημείο του με όλες τις δυνατές καθυστερήσεις, πλάτη και κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα ο μέσος όρος τους να είναι ο ίδιος παντού.

Απευθείας ήχος (Direct Sound)

- Η στάθμη του σε κάποιο σημείο του χώρου (παρατηρητής) εξαρτάται μόνο από την απόσταση από την πηγή (λειτουργεί όπως ο ήχος στο ελεύθερο πεδίο, δηλαδή έχει μείωση στάθμης κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό απόστασης).
- Το αυτί χρησιμοποιεί τον απευθείας ήχο για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής ήχου (Hass, 1951). Έχει μάλιστα την ιδιότητα να την εντοπίζει ακόμα και αν οι πρώτες ανακλάσεις είναι κάπως πιο δυνατές από αυτόν.
- Όπως προαναφέραμε, το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα εντοπίζει τη θέση της πηγής του ήχου στη διεύθυνση από την οποία ήρθε ο απευθείας ήχος, με την προϋπόθεση όμως ότι οι πρώτες ανακλάσεις:
 - (α) φθάνουν εντός 35 ms από τον απευθείας ήχο,
 - (β) δεν είναι πολύ πιο δυνατές από τον απευθείας ήχο και
 - (γ) έχουν φάσματα και χρονικές περιβάλλουσες αρκετά πανομοιότυπες με τον απευθείας ήχο.

Πρώτες Ανακλάσεις (Early reflections)

- Το ανθρώπινο αυτί έχει την ικανότητα να διαχωρίζει τον απευθείας ήχο από τις ανακλάσεις, γιατί οι ανακλάσεις:
 - (α) έχουν χρονική καθυστέρηση,
 - (β) έχουν συνήθως χαμηλότερη στάθμη και
 - (γ) έχουν επηρεαστεί φασματικά λόγω της απορρόφησης στον αέρα και στα απορροφητικά υλικά, η οποία συχνά είναι μεγαλύτερη στις υψηλές συχνότητες (λειτουργεί ως χαμηλοπερατό φίλτρο) [Roa96].

Μελέτες έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι κάποια από τα πιο ενδιαφέροντα ακουστικά χαρακτηριστικά σχετίζονται με το πρώτο κομμάτι της κρουστικής απόκρισης του δωματίου, δηλαδή τις Πρώτες Ανακλάσεις.

- Συγκεκριμένα, το χρονικό διάστημα εμφάνισης (της τάξης των μερικών δεκάδων ms) και το ενεργειακό περιεχόμενο των πρώτων ανακλάσεων (οι στάθμες τους) αποτελούν σημαντικά στοιχεία, γιατί επηρεάζουν την αίσθηση της γεωμετρίας και του μεγέθους του χώρου.

• Η καθυστέρηση των πρώτων ανακλάσεων ('InitialTimeDelay' gap – ITD) δίνει την αίσθηση του μεγέθους του χώρου.

• Ο λόγος των σταθμών απευθείας ήχου – πρώτων ανακλάσεων δίνει την αίσθηση της απόστασης πηγής – παρατηρητή.

- Σε ένα μεγαλύτερο χώρο ο ήχος κάνει περισσότερο χρόνο να φτάσει σε ένα ανακλαστικό του τοίχωμα και γι' αυτό το χρονικό διάστημα μεταξύ των ανακλάσεων είναι μεγαλύτερο. Όταν οι πρώτες ανακλάσεις φτάσουν στο ανθρώπινο αυτί εντός $35 ms$, αυτό δεν τους αντιλαμβάνεται ως ξεχωριστούς ήχους. Αντίθετα ενισχύουν τον απευθείας ήχο, πράγμα σημαντικό για έναν ακροατή που βρίσκεται μακριά από την πηγή. Αν ο χώρος είναι πολύ μεγάλος, η καθυστέρηση μπορεί να είναι πολύ μεγάλη ($>50 ms$) και οι πρώτες ανακλάσεις να ακουστούν ως ξεχωριστά echo. Αντίστροφα, πολύ μικρή καθυστέρηση ($<5 ms$) μπορεί να δημιουργήσει την αίσθηση στον ακροατή ότι ο χώρος είναι μικρός [DJ97].
- Οι στάθμες των πρώτων ανακλάσεων εξαρτώνται από την απόσταση πηγής – παρατηρητή και από την απορροφητικότητα των υλικών στα οποία έχουν υποστεί ανάκλαση [HA96]. Επειδή όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή τόσο μειώνεται η διαφορά διαδρομών μεταξύ του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων, γι' αυτό και μειώνεται η καθυστέρηση και η διαφορά των στάθμωμένων τους στο RIR [HA96].
- Το κομμάτι του διαγράμματος RIR που συμβάλλει στην καταληπτότητα του λόγου είναι τα πρώτα περίπου $50 ms$, ενώ η διαύγεια της μουσικής τα πρώτα περίπου $80 ms$ (από το $t = 0s$).

Καθυστερημένες ανακλάσεις (Late Reverberation)

- Σε αντίθεση με τον απευθείας ήχο και τις πρώτες ανακλάσεις, οι καθυστερημένες ανακλάσεις καταφτάνουν σε κάθε σημείο με πολύ μικρή χρονική καθυστέρηση μεταξύ τους και η στάθμη τους (δηλαδή της ουράς στο διάγραμμα της απόκρισης δωματίου) είναι σταθερή σε όλα τα σημεία του χώρου μακριά από την πηγή ανεξάρτητα από την απόσταση πηγής – παρατηρητή. Αυτό βεβαίως ισχύει κατά βάση σε ένα ιδανικά διάχυτο πεδίο.
- Εν γένει τα απορροφητικά υλικά των τοιχωμάτων κλειστών χώρων έχουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα στις υψηλές συχνότητες, με αποτέλεσμα αυτές να φθίνουν πιο γρήγορα από ότι οι χαμηλές. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της απορρόφησης στον αέρα.

Στοιχεία καλής ακουστικής

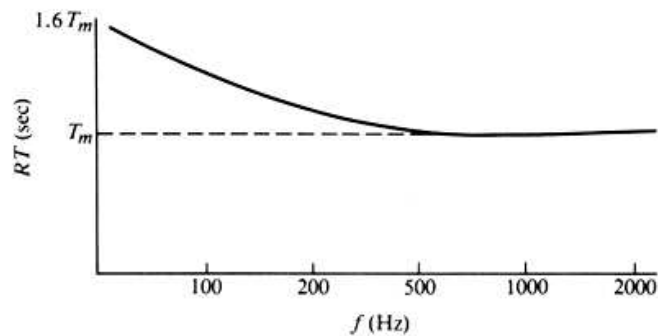
Ο χρόνος αντήχησης είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ακουστικής των χώρων. Αν είναι μεγάλος, μας δίνει την εντύπωση ενός 'ζωντανού' χώρου, ενώ αν είναι μικρός μας δίνει την εντύπωση ενός 'νεκρού' χώρου.

Η ιδανική απόκριση του χώρου εξαρτάται από τη χρήση του. Για παράδειγμα, στις αίθουσες συναυλιών (μουσική) θέλουμε μεγαλύτερη αντήχηση ('ζωντάνια') ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες (η έντονη παρουσία των μπάσων είναι απαραίτητη στη μουσική), ενώ σε μία αίθουσα ομιλιών χρειαζόμαστε μικρότερους χρόνους αντήχησης. Επίσης 'νεκρός' χώρος προτιμάται όταν αναπαράγουμε μουσική, δεδομένου ότι η αντήχηση του χώρου στον οποίο πραγματοποιήθηκε η ηχογράφιση είναι ήδη καταγεγραμμένη. Η αντήχηση προσθέτει στην αίσθηση της ζωντάνιας του ήχου, αλλά επιπλέον αυξάνει την αλληλοεπικάλυψη των ήχων, που σημαίνει ότι μειώνει την αντίληψή τους.

Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ καταληπτότητας του ήχου (που απαιτεί μικρό χρόνο αντήχησης), της έντασης της αντήχησης (που απαιτεί υψηλή στάθμη του αντηχητικού πεδίου) και της ζωντάνιας (που απαιτεί μεγάλο χρόνο αντήχησης).

Κάποιες βασικές απαιτήσεις ενός χώρου με καλή ακουστική αποτελούν η επαρκής ακουστότητα, η ομοιόμορφη συμπεριφορά του ήχου στο χώρο, η καταληπτότητα του ήχου, η αίσθηση του ακροατή ότι περιβάλλεται από αυτόν (αντήχηση), η έλλειψη ηχούς και ο ελάχιστος θόρυβος βόθους.

Για παράδειγμα, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχέση του χρόνου αντήχησης και της συχνότητας σε μία αίθουσα συναυλιών με καλή ακουστική.



Σχήμα 15. Συχνότητα – χρόνος αντήχησης σε αίθουσα συναυλιών με καλή ακουστική (ισορροπημένα μπάσα) [2]

EDT – ‘EarlyDecayTime’

Πειραματικές μελέτες (Schroeder) έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι κάποια από τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά της ακοής μας σχετίζονται με το πρώτο κομμάτι της πτώσης στο διάγραμμα της κρουστικής απόκρισης του δωματίου (RIR), δηλαδή με τις Πρώτες Ανακλάσεις.

Έχει παρατηρηθεί ότι ο **πρώιμος** ρυθμός πτώσης του ανακλώμενου ήχου (μέχρι τα πρώτα 20-30 dB) παίζει πιο σημαντικό ρόλο στην ανθρώπινη ακοή από ότι ο συνολικός χρόνος αντήχησης (μη διάχυτο πεδίο). Συγκεκριμένα έχει διαπιστωθεί ότι η πλειοψηφία των ακροατών όταν χαρακτηρίζουμε ένα χώρο ως ζωντανό το κάνουμε βασιζόμενοι στη χρονική καθυστέρηση των πρώτων ανακλάσεων ως προς τον απευθείας ήχο και στις στάθμες των πρώτων ανακλάσεων και όχι το υπόλοιπο κομμάτι της απόκρισης του δωματίου.

Ο χρόνος πτώσης που αντιστοιχεί στις πρώτες ανακλάσεις του RIR ονομάζεται ‘**EarlyDecayTime**’ (EDT) και αντιπροσωπεύει συνήθως την αίσθηση που έχουμε όταν διακόπτουμε απότομα μια πηγή, αλλά εξακολουθούμε να την ακούμε για λίγη ώρα μέχρι να σβήσει τελείως.

Ο χρόνος αντήχησης RT_{60} , από την άλλη, που περιλαμβάνει τις καθυστερημένες ανακλάσεις, αντιστοιχεί

Το EDT ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση των πρώτων 10dB στη στάθμη του ήχου ($\times 6$).

στην αίσθηση του ‘γεμάτου’ ήχου (λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων).

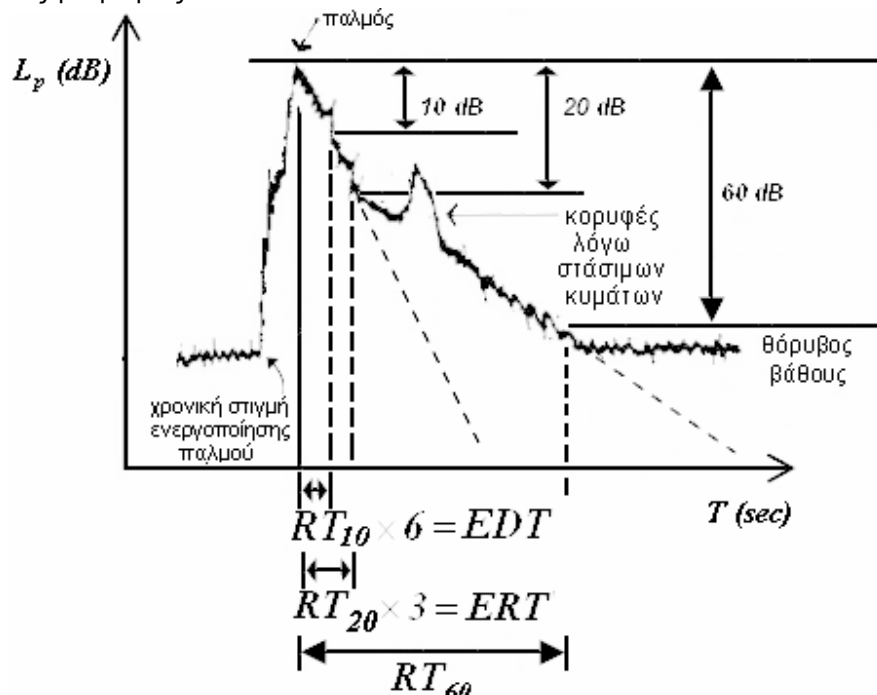
Το EDT αναφέρεται σε μεμονωμένες πρώτες ανακλάσεις, σε αντίθεση με το RT_{60} που αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος τυχαίων ανακλάσεων. Γι’ αυτό το λόγο το EDT αποκαλύπτει στοιχεία της γεωμετρίας του

Το EDT συνδέεται περισσότερο με την υποκειμενική αίσθηση της αντήχησης ενός χώρου από ότι ο παραδοσιακός χρόνος αντήχησης (RT_{60}).

χώρου (αφού οι πρώτες ανακλάσεις προέρχονται από συγκεκριμένες επιφάνειες), σε αντίθεση με το RT_{60} , όπου οι ανακλάσεις προέρχονται από πρακτικά όλες τις επιφάνειες του χώρου, με αποτέλεσμα αυτό να

Αν οι πρώτες ανακλάσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη κλίση από τις καθυστερημένες, δηλαδή $EDT < RT_{60}$, ένα τέτοιο σημείο καμπής θα μας κάνει να αντιληφθούμε τον ήχο πιο στεγνό από ότι μας δείχνει ο υπολογισμός του RT_{60} .

είναι ανεξάρτητο τις γεωμετρίας του.



Σχήμα 16. $EDT \neq RT_{60}$ στην περίπτωση δύο κλίσεων (μη διάχυτο πεδίο) [6]

Μέτρηση RT_{60} μέσω $RT_{10} - RT_{20} - RT_{30}$

Συχνά η στάθμη του θορύβου βάθους είναι αρκετά υψηλή, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να πέσουμε κατά 60 dB (πέφτουμε κάτω από το θόρυβο βάθους, οπότε μια τέτοια μέτρηση θα ήταν εσφαλμένη). Σε αυτή την περίπτωση συνηθίζουμε να μετράμε το χρόνο που αντιστοιχεί σε μικρότερη πτώση ($20\text{-}30\text{ dB}$) και να ανάγουμε αυτή την τιμή στην πτώση των 60 dB πολλαπλασιάζοντας κατάλληλα. Δηλαδή κάνουμε ένα είδος extrapolation θεωρώντας ότι η πτώση είναι γραμμική, δηλαδή το πεδίο είναι διάχυτο.

Στην πράξη το αντηχητικό πεδίο δεν είναι ποτέ απολύτως διάχυτο, δηλαδή έχουμε αποκλίσεις από την ευθύγραμμη πτώση. Γι' αυτό το λόγο όσο μεγαλύτερη δυναμική περιοχή μέτρησης διαθέτουμε, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά σταθμών μεταξύ παλμού/θορύβου και θορύβου βάθους, τόσο ασφαλέστερη η μέτρηση.

Έτσι, ορίζουμε τους παρακάτω χρόνους:

- **EDT - 'EarlyDecayTime':**

Το EDT ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση των πρώτων 10 dB στη στάθμη του ήχου ($\times 6$).

- **ERT - 'ExtendedReverberationTime':**

Το ERT ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση του ήχου από -5 dB έως -35 dB ($\times 2$).

- **RT_{20} :**

Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση του ήχου από από -5 dB έως -25 dB ($\times 3$).

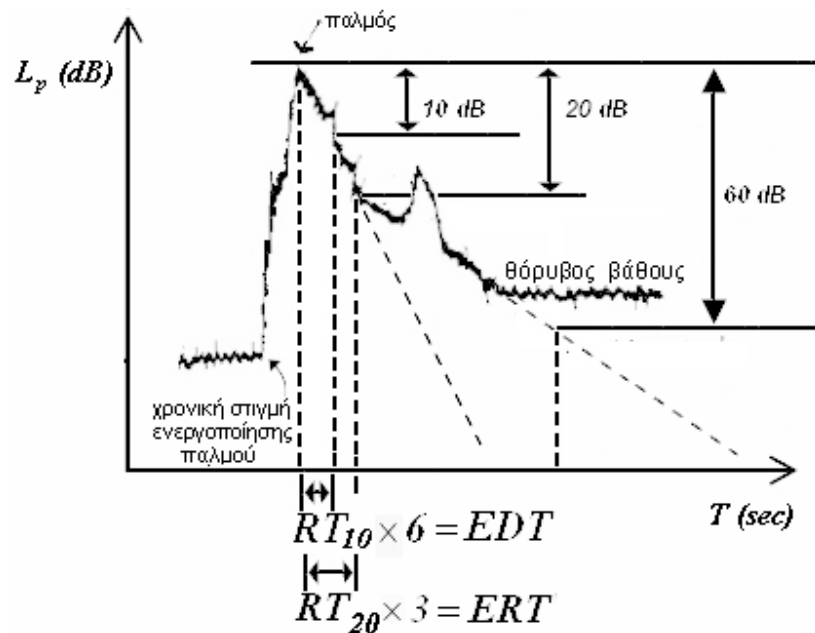
- **RT_{10} :**

Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση του ήχου από από -5 dB έως -15 dB ($\times 6$).

Όλοι οι παραπάνω χρόνοι ορίζονται για κάθε συχνότητα, όπως ακριβώς και ο χρόνος αντήχησης RT_{60} .

Αν το αντηχητικό πεδίο είναι διάχυτο όλοι οι παραπάνω χρόνοι είναι ίδιοι.

Αν το αντηχητικό πεδίο δεν είναι διάχυτο (πραγματική περίπτωση), οι παραπάνω χρόνοι διαφέρουν.



Σχήμα 17. Υψηλός θόρυβος βάθους

Μέθοδοι μέτρησης χρόνου αντήχησης

Για να μετρήσουμε το χρόνο αντήχησης χρειαζόμαστε καταρχήν μια πηγή ήχου για τη διέγερση του χώρου και τη δημιουργία του αντηχητικού πεδίου. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι μέτρησης του χρόνου αντήχησης:

(α) Μέθοδος του Παλμού

Διεγείρουμε ένα χώρο με έναν παλμό, για παράδειγμα πιστόλι (πρόχειρα με παλαμάκι ή μπαλόκι που σκάει) και καταγράφουμε απευθείας τη μείωση της ηχοστάθμης του αντηχητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου μέχρι το μηδενισμό της. Για την καταγραφή χρησιμοποιούμε ένα ηχώμετρο με φασματικό αναλυτή, έτσι ώστε να γίνεται ξεχωριστή μέτρηση στις διάφορες οκτάβες (διαφορετικός ρυθμός πτώσης με συχνότητα). Από τις κλίσεις των καμπύλων υπολογίζουμε και παρουσιάζουμε το χρόνο αντήχησης RT_{60} (ή $RT_{10} \rightarrow EDT$) σε κάθε οκτάβα.

Η μέθοδος αυτή έχει δύο μειονεκτήματα:

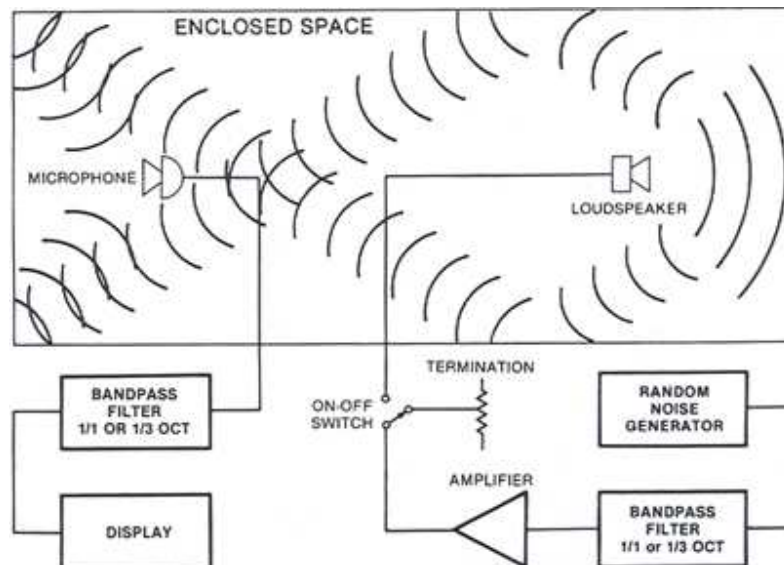
- (1) Έλλειψη ηχητικής ενέργειας στις χαμηλές συχνότητες (εκτός και αν χρησιμοποιηθούν εκρηκτικές ύλες) και
- (2) Αδυναμία ακριβούς επαναληψιμότητας.

(β) Μέθοδος του μηδενισμού της πηγής (θορύβου)

Διεγείρουμε ένα χώρο με θόρυβο, λευκό ή ροζ, μέχρι την κατάσταση ισορροπίας (ο χρόνος αυτός διαφέρει ανάλογα με το χώρο) και στη συνέχεια το διακόπτουμε ακαριαία. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με τη μέθοδο του παλμού από τη στιγμή της διακοπής της πηγής.

Πλεονεκτήματα:

- (1) Η πηγή θορύβου παράγει μεγαλύτερα ποσά ηχητικής ενέργειας (απαραίτητη προϋπόθεση για μετρήσεις σε χώρους με υψηλή στάθμη θορύβου βάθους) και
- (2) Εκπέμπει ηχητική ενέργεια σε όλες τις συχνότητες.



Σχήμα 18. Πειραματική διάταξη μέτρησης RT_{60} / EDT [1]

(γ) Μέθοδος ακολουθίας μεγίστου μήκους (MLS – MaximumLengthSequence)

Για τον προσδιορισμό της απόκρισης σε κλειστούς χώρους αναπτύχθηκε από τους Schröder και Alrutz η μέθοδος της εκπομπής μιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας που έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται μεγίστου μήκους MLS – MaximumLengthSequence. Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο MLS έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πολύ λίγο ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή επιτυγχάνουμε μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N).

Η ακολουθία είναι στάσιμη και έχει περίοδο $l = 2^n - 1$ (όπου n θετικός αριθμός). Κάθε δείγμα της ακολουθίας έχει τιμή +1 ή -1, αποτελείται δηλαδή από συναρτήσεις δέλτα του Dirac.

Παρατηρήσεις για τη διαδικασία μέτρησης του RT_{60}

- Η πηγή διέγερσης πρέπει να είναι μεγάφωνο όσο το δυνατόν μη κατευθυντικό.
- Οι μετρήσεις πρέπει να γίνουν σε τρεις (3) τουλάχιστον θέσεις του ηχομέτρου και από αυτές να υπολογίσουμε μέσες τιμές, αφού όπως είδαμε τις περισσότερες φορές το αντηχητικό πεδίο δεν είναι διάχυτο.
- Το ηχώμετρο θα πρέπει:
(α) να βρίσκεται καθαρά στο αντηχητικό πεδίο, δηλαδή μακριά από την πηγή, ανάλογα με το χώρο,
(β) να βρίσκεται τουλάχιστον 1 m μακριά από τους τοίχους και από οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο (π.χ. τον παρατηρητή).
- Ο εκπεμπόμενος θόρυβος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερος από το θόρυβο βάρους, ώστε να μπορούμε να κάνουμε μια ασφαλή μέτρηση του χρόνου αντήχησης (με extrapolation).

Συντελεστές απορρόφησης και απορρόφηση διάφορων υλικών

Description	Frequency (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
	<i>Sabine Absorptivity a</i>					
Occupied audience, orchestra, chorus	0.40	0.55	0.80	0.95	0.90	0.85
Upholstered seats, cloth-covered, perforated bottoms	0.20	0.35	0.55	0.65	0.60	0.60
Upholstered seats, leather-covered	0.15	0.25	0.35	0.40	0.35	0.35
Carpet, heavy on undercarpet (1.35 kg/m ² felt or foam rubber)	0.08	0.25	0.55	0.70	0.70	0.75
Carpet, heavy on concrete	0.02	0.06	0.14	0.35	0.60	0.65
Acoustic plaster (approximate)	0.07	0.17	0.40	0.55	0.65	0.65
Acoustic tile on rigid surface	0.10	0.25	0.55	0.65	0.65	0.60
Acoustic tile, suspended (false ceiling)	0.40	0.50	0.60	0.75	0.70	0.60
Curtains, 0.48 kg/m ² velour, draped to half area	0.07	0.30	0.50	0.75	0.70	0.60
Wooden platform with airspace	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10
Wood paneling, 3/8-1/2 in. over 2-4 in. airspace	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
Plywood, 1/4 in. on studs, fiberglass backing	0.60	0.30	0.10	0.09	0.09	0.09
Wooden walls, 2 in.	0.14	0.10	0.07	0.05	0.05	0.05
Floor, wooden	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Floor, linoleum, flexible tile, on concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Floor, linoleum, flexible tile, on subfloor	0.02	0.04	0.05	0.05	0.10	0.05
Floor, terrazzo	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Concrete (poured, unpainted)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Gypsum, 1/2 in. on studs	0.30	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Plaster, smooth on lath	0.14	0.10	0.06	0.04	0.04	0.03
Plaster, smooth on lath on studs	0.30	0.15	0.10	0.05	0.04	0.05
Plaster, 1 in. damped on concrete block, brick, lath	0.14	0.10	0.07	0.05	0.05	0.05
Glass, heavy plate	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Glass, windowpane	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Brick, unglazed, no paint	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Brick, smooth plaster finish	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
Concrete block, no paint	0.35	0.45	0.30	0.30	0.40	0.25
Concrete block, painted	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Concrete block, smooth plaster finish	0.12	0.09	0.07	0.05	0.05	0.04
Concrete block, slotted two-well	0.10	0.90	0.50	0.45	0.45	0.40
Perforated panel over isolation blanket, 10% open area	0.20	0.90	0.90	0.90	0.85	0.85
Fiberglass, 1 in. on rigid backing	0.08	0.25	0.45	0.75	0.75	0.65
Fiberglass, 2 in. on rigid backing	0.21	0.50	0.75	0.90	0.85	0.80
Fiberglass, 2 in. on rigid backing, 1 in. airspace	0.35	0.65	0.80	0.90	0.85	0.80
Fiberglass, 4 in. on rigid backing	0.45	0.90	0.95	1.00	0.95	0.85
	<i>Sound Absorption A in m²</i>					
Single person or heavily upholstered seat (± 0.10 m ²)	0.40	0.70	0.85	0.95	0.90	0.80
Wooden chair, table, furnishing, for one person	0.02	0.03	0.05	0.08	0.08	0.05

Πίνακας 3. Συντελεστές απορρόφησης (a) υλικών & απορρόφηση (A) ανά άτομο ως προς συχνότητα [4]

Συντελεστές απορρόφησης του αέρα

Σχετική υγρασία %	Θερμοκρασία (°)	Κεντρικές συχνότητες οκτάβων (Hz)			
		2000	4000	6300	8000
30%	15	0.0143	0.0486	0.1056	0.1360
	20	0.01190	0.0379	0.0840	0.1360
	25	0.0114	0.0313	0.685	0.1360
	30	0.0281	0.0281	0.0564	0.1360
50%	15	0.0099	0.0286	0.0626	0.0860
	20	0.0096	0.0244	0.0503	0.0860
	25	0.0095	0.0235	0.0444	0.0860
	30	0.0092	0.0233	0.0426	0.0860
70%	15	0.0088	0.0223	0.0454	0.0600
	20	0.0085	0.0213	0.0399	0.0600
	25	0.0084	0.0211	0.0388	0.0600
	30	0.0082	0.0207	0.0383	0.0600

Πίνακας 4. Συντελεστές εξασθένησης ($4 m$) του αέρα ως προς θερμοκρασία, υγρασία και συχνότητα [8]

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Davis D., Davis C. (1997), "Sound system engineering"
- [2] RossingT., MooreR., WheelerP. (2002). "The science of sound"
- [3] Howard D., Angus J. (1996), "Acoustics and Psychoacoustics"
- [4] Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V. (2000), "Fundamentals of Acoustics"
- [5] Κουτσοδημάκης Χ., Σηφάκης Μ., "Εργαστηριακό Φυλλάδιο Μηχανικής Ήχου Ι"
- [6] Egan D. (1988), "Architectural acoustics"
- [7] Brüel & Kjær. (1998), "Measurements in building acoustics". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [8] ΣκαρλάτοςΔ. (2003), "Εφαρμοσμένηακουστική"
- [9] RoadsC. (1996), "The computer music tutorial"
- [10] Vaananen R. (2003), "Parametrization, Auralization and Authoring of Room Acoustics for Virtual Reality Applications", PhD thesis, University of Helsinki. Available at: <http://lib.hut.fi/Diss/2003/isbn9512265443/>
- [11] Mehta M., Johnson J., Rocafort J. (1999), "Architectural Acoustics Principles and Design", New Jersey, Prentice-Hall.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΡΟΣ

Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές
 - Σχήμα
- (Να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)

Πειραματική διαδικασία

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάθους (backgroundnoise) της αίθουσας: $B = \dots\dots\dots dB$.
3. Να μετρηθούν οι διαστάσεις της αίθουσας.
4. Να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης RT_{60} της αίθουσας διδασκαλίας με χρήση της μεθόδου *παλμικής διέγερσης*:

f (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT_{60} (s)								

5. Να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης της ίδιας αίθουσας με τη μέθοδο της *διακοπτόμενης πηγής* (με λευκό θόρυβο) για τρεις διαφορετικές θέσεις του μικροφώνου μέσα σε αυτήν και με τους φοιτητές καθισμένους σε 2 σειρές στο πίσω μέρος της αίθουσας. Να σημειωθούν ο αριθμός των ατόμων μέσα στην αίθουσα και ο μέσος όρος για κάθε περιοχή συχνοτήτων:

f (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT_{60} (s) – 1								
RT_{60} (s) – 2								
RT_{60} (s) – 3								
RT_{60} (s) – M.O.								

6. Να επαναληφθεί η ίδια μέτρηση χωρίς τους φοιτητές μέσα στην αίθουσα:

f (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT_{60} (s) – 1								
RT_{60} (s) – 2								
RT_{60} (s) – 3								
RT_{60} (s) – M.O.								

Επεξεργασία μετρήσεων

1. Αφού υπολογίσετε τις μέσες τιμές ανά συχνότητα για κάθε περίπτωση, να συγκρίνετε ποιοτικά τις τιμές της πρώτης (παλμική διέγερση) και της δεύτερης (διακοπτόμενη πηγή) μεθόδου (συμβαδίζουν;).
2. Από τους μέσους όρους του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα της μέτρησης 5 να υπολογίσετε τη μέση απορρόφηση της γεμάτης αίθουσας (ανά συχνότητα).
3. Από τους μέσους όρους του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα της μέτρησης 6 να υπολογίσετε τη μέση απορρόφηση της άδειας αίθουσας (ανά συχνότητα).
4. Από τις τιμές απορρόφησης της γεμάτης και άδειας αίθουσας να υπολογίσετε τη μέση απορρόφηση ανά άτομο (ανά συχνότητα). Σχολιασμός: είναι λογικές οι τιμές αυτές;

ΑΣΚΗΣΗ 5

ΚΡΙΣΙΜΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ &

ΜΕΛΕΤΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΧΩΡΟ

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπό της άσκησης αποτελεί ο υπολογισμός και ο γραφικός πειραματικός προσδιορισμός της κρίσιμης απόστασης ενός χώρου χρησιμοποιώντας ως ηχητική πηγή το δωδεκάεδρο ηχείο του εργαστηρίου.

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

Συμπεριφορά του ήχου – ηχητικά πεδία

Αναφερόμαστε σε ηχητικά πεδία όταν θέλουμε να δηλώσουμε τον τρόπο διάδοσης του ήχου σε ένα χώρο. Το είδος του δημιουργούμενου πεδίου από μια πηγή εξαρτάται από την απόσταση από αυτήν και από το χώρο στον οποίο γίνεται η διάδοση.

Ελεύθερο πεδίο

Αν θεωρήσουμε ότι σε ένα (εξωτερικό) χώρο λειτουργεί σημειακή πηγή (σφαιρικό μέτωπο διάδοσης κύματος) και τα εκπεμπόμενα ηχητικά κύματα δε βρίσκουν καμιά ανακλαστική επιφάνεια στην πορεία διάδοσής τους, τότε ονομάζουμε το δημιουργούμενο πεδίο **ελεύθερο**.

Ο ήχος σε ελεύθερο πεδίο δεν αποκλίνει από την πορεία του, δηλαδή κινείται σε ευθεία. Δεν ανακλάται, δεν απορροφάται, δε διαθλάται, δεν περιθλάται και δε διαχέεται. Η συμπεριφορά του ήχου σε αυτό έχει τις εξής ιδιότητες:

$$\begin{aligned}
 I &\propto 1/r^2 \quad \text{ή} \\
 p &\propto 1/r \Rightarrow \\
 \Delta L_p &= -20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1} \quad \text{ή} \\
 \Delta L_p &= -6 \text{ dB} \quad \text{για κάθε } r \rightarrow 2r
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

δηλαδή η ηχητική πίεση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα ως προς την απόσταση από αυτήν, με αποτέλεσμα η στάθμη της ηχητικής πίεσης να μειώνεται κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό απόστασης. Στην πράξη πρόκειται για ένα πεδίο στο οποίο η επίδραση των ορίων θεωρείται αμελητέα στην περιοχή που ενδιαφέρει. Τέτοια πεδία έχουμε σε *ανηχοϊκούς θαλάμους* (πλήρης απορρόφηση από τα τοιχώματα) και σε εξωτερικούς χώρους όταν βρισκόμαστε αρκετά ψηλά ως προς το έδαφος.

Αντηχητικό πεδίο

Σε ένα διάχυτο αντηχητικό πεδίο η πυκνότητα της ηχητικής ενέργειας παραμένει ίδια σε όλα τα σημεία του και η πιθανότητα ροής της ηχητικής ενέργειας είναι ίση προς όλες τις κατευθύνσεις.

$$\Delta L_p = \text{σταθ. για κάθε } r
 \tag{2}$$

Αυτό ισχύει σε χώρους με μηδενική απορρόφηση, δηλαδή σε αντηχητικούς θαλάμους.

Ημι-αντηχητικό πεδίο

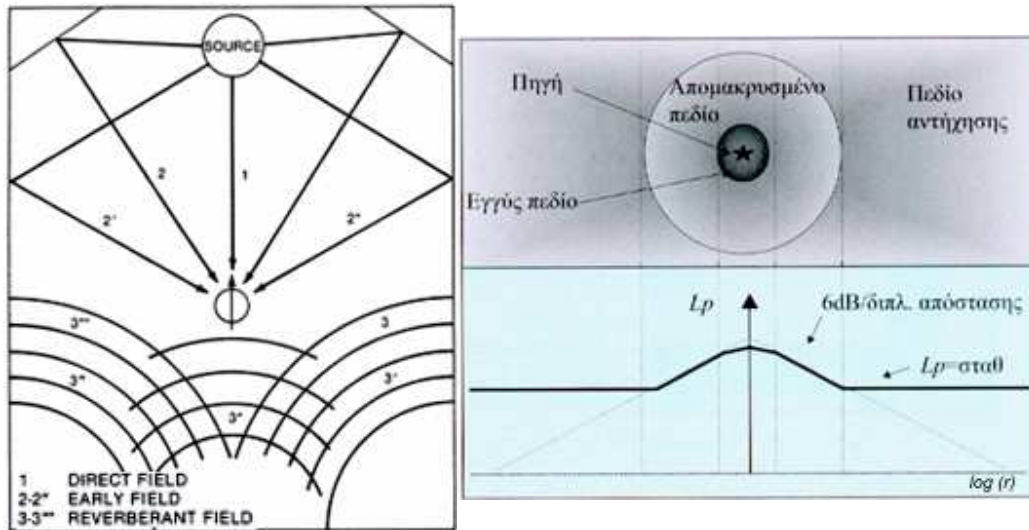
Στις περισσότερες περιπτώσεις τα παραπάνω δεν υφίστανται και αυτό που έχουμε στην πράξη στους περισσότερους κλειστούς χώρους είναι μια ενδιάμεση κατάσταση, δηλαδή ένα ημι-αντηχητικό πεδίο. Σε ένα τέτοιο πεδίο η ηχητική ενέργεια επιδέχεται τόσο ανάκλαση όσο και απορρόφηση, από ημι-ανακλαστικά τοιχώματα. Ένα μεγάλο μέρος αυτής προέρχεται από το διάχυτο πεδίο και η ροή της γίνεται σε περισσότερες κατευθύνσεις, αλλά σε ορισμένα σημεία του χώρου (κυρίως κοντά στην πηγή) παρουσιάζεται έντονη κατευθυντικότητα.

Ηχητικό πεδίο σε εσωτερικούς χώρους

Σε κλειστό χώρο ο ήχος που εκπέμπεται από μια πηγή αλληλεπιδρά με τα τοιχώματα (και πιθανώς τον αέρα), τα οποία αλλάζουν τη διεύθυνση της διάδοσής του και την ενέργεια που μεταφέρει. Οι διαδοχικές και τυχαίες ανακλάσεις (και απορροφήσεις) δημιουργούν ένα πεδίο, μέσα στο οποίο η συμπεριφορά του ήχου αποκλίνει από αυτήν του ελεύθερου πεδίου ($p \propto 1/r$) και εξαρτάται από το λόγο των στάθμων απευθείας ήχου και αντηχητικού πεδίου. Αυτή η ισορροπία με τη σειρά της μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του ακροατή μέσα στο χώρο ως προς την πηγή.

Αυτόκαθιστά δύσκολη την επιλογή του σημείου μετρήσεων.

Έτσι συνηθίζουμε να χωρίζουμε το ηχητικό πεδίο που δημιουργείται σε εσωτερικούς χώρους στα εξής μέρη ανάλογα με την απόσταση από την ηχητική πηγή που το δημιουργεί:



Σχήμα 1. Διαχωρισμός πεδίου σε κλειστό χώρο: Κοντινό πεδίο, απομακρυσμένο πεδίο – ελεύθερο & αντηχητικό [5]

Κοντινό ή εγγύς πεδίο (Nearfield)

Σε πολύ κοντινές αποστάσεις από την πηγή, αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί σημειακή. Η ηχητική πίεση τόσο κοντά στην πηγή μεταβάλλεται έντονα από σημείο σε σημείο και μάλιστα με τρόπο μη προβλέψιμο, αφού εξαρτάται από τις διαστάσεις της πηγής, τη γεωμετρία της, το υλικό κλπ. Η σωματιδιακή ταχύτητα και η ηχητική πίεση στο κοντινό πεδίο δε βρίσκονται απαραίτητα σε φάση.

Το κοντινό πεδίο μπορεί να εκτίνεται σε απόσταση:

- μικρότερη από το μήκος κύματος της χαμηλότερης συχνότητας που εκπέμπεται από την πηγή ή
- μικρότερη από το διπλάσιο της μεγαλύτερης διάστασής της

αναλόγως με το ποια από τις δύο παραπάνω αποστάσεις είναι μεγαλύτερη.

Γι' αυτό το λόγο αποφεύγονται οι μετρήσεις σε αποστάσεις μικρότερες τουλάχιστον από το διπλάσιο της μεγαλύτερης διάστασης της πηγής.

Στο διάγραμμα του σχήματος 2 η περιοχή αυτή έχει σκιαστεί, αφού η τιμή της στάθμης σε αυτή την περιοχή δεν είναι εύκολα υπολογίσιμη.

Μακρινό πεδίο (Farfield)

Ένα σημείο του χώρου βρίσκεται στο μακρινό πεδίο όταν ικανοποιεί τις ακόλουθες σχέσεις:

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi}, \quad r \gg l, \quad r \gg \frac{\pi l^2}{2\lambda}$$

όπου λ το μήκος κύματος του ήχου και l η μεγαλύτερη διάσταση της πηγής.

Το μακρινό πεδίο το χωρίζουμε στο ελεύθερο πεδίο και στο αντηχητικό πεδίο, σύμφωνα με την απόστασή μας από την πηγή.

Ελεύθερο πεδίο (Απευθείας ήχος & Πρώτες ανακλάσεις)

Αν τοποθετήσουμε ένα μικρόφωνο αρκετά κοντά στην πηγή αλλά εκτός των ορίων του κοντινού πεδίου, αυτό που λαμβάνεται είναι κυρίως ο απευθείας ήχος από την πηγή καθότι το πεδίο λόγω ανακλάσεων έχει πολύ χαμηλότερη στάθμη. Δηλαδή λαμβάνει το μέρος εκείνο του ήχου που προέρχεται κατευθείαν από την πηγή χωρίς να έχει υποστεί προηγουμένως μεταβολή στη διεύθυνση διάδοσης και την ενέργεια που μεταφέρει (απορρόφηση). Γι' αυτό και σε σχετικά κοντινές αποστάσεις εξακολουθεί να ισχύει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου της απόστασης (για την ένταση), ή αλλιώς $\Delta L_p = -6 \text{ dB}$ για κάθε $r \rightarrow 2r$.

Ο υπολογισμός της στάθμης στο ελεύθερο πεδίο μπορεί να γίνει με βάση την εκπεμπόμενη από την πηγή ηχητική στάθμη ισχύος ως εξής:

$$(L_p)_{\text{ελ.πεδίου}} = (L_w)_{\text{πηγής}} + 10 \log \left[\frac{Q}{4 \pi r^2} \right] \quad (3)$$

όπου $(L_w)_{\text{πηγής}}$ η ηχητική στάθμη ισχύος που εκπέμπει η πηγή, Q ο παράγοντας κατευθυντικότητας της πηγής και r η απόσταση από την πηγή.

Παρατηρούμε ότι η στάθμη του ελεύθερου πεδίου εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής της πηγής, από την κατευθυντικότητα της πηγής και από την απόσταση.

Αντηχητικό πεδίο

Καθώς απομακρυνόμαστε κι άλλο από την πηγή, η στάθμη που οφείλεται στον απευθείας ήχο, δηλαδή το ελεύθερο πεδίου, εξασθενεί (κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό απόστασης). Ταυτόχρονα, σε απομακρυσμένα σημεία από την πηγή εισερχόμαστε πλέον στο αντηχητικό πεδίο που οφείλεται στις καθυστερημένες ανακλάσεις. Σε αντίθεση με τον απευθείας ήχο και τις πρώτες ανακλάσεις, το αντηχητικό πεδίο έχει σταθερή ηχητική στάθμη σε όλα τα σημεία του χώρου μακριά από την πηγή ανεξάρτητα από την απόσταση πηγής – παρατηρητή (αυτό βεβαίως ισχύει κατά βάση σε ένα ιδανικά διάχυτο πεδίο). Με άλλα λόγια, αυτό σημαίνει ότι αν έχουμε ένα ηχομέτρο και μετακινούμαστε μέσα στο αντηχητικό πεδίο, η ένδειξη στάθμης του ηχομέτρου θα παραμένει σταθερή.

Καθώς απομακρυνόμαστε, λοιπόν από την πηγή, εξασθενεί η στάθμη του ελεύθερου πεδίου, ενώ αρχίζει να παίζει σημαντικό ρόλο η στάθμη του αντηχητικού πεδίου.

Σε πολύ απομακρυσμένα σημεία, δηλαδή όταν βρισκόμαστε στο καθαρά αντηχητικό πεδίο, η ηχητική ισχύς είναι παντού ίδια και μπορεί να υπολογιστεί από την ηχητική ισχύ που εκπέμπεται από την πηγή ως εξής:

$$W_{\text{αντ.πεδίου}} = W_{\text{πηγής}} \cdot 4 \cdot \frac{1 - \bar{\alpha}}{S \cdot \bar{\alpha}}$$

Επομένως, ο υπολογισμός της (σταθερής) στάθμης σε ένα οποιοδήποτε σημείο του καθαρά αντηχητικού πεδίου μπορεί να γίνει με βάση την εκπεμπόμενη από την πηγή ηχητική στάθμη ισχύος ως εξής:

$$(L_p)_{\text{αντ.πεδίου}} = (L_w)_{\text{πηγής}} + 10 \log \left[4 \cdot \frac{1 - \bar{\alpha}}{S \cdot \bar{\alpha}} \right] \quad (4)$$

όπου $(L_w)_{\text{πηγής}}$ η ηχητική στάθμη ισχύος που εκπέμπει η πηγή, $\bar{\alpha}$ ο μέσος συντελεστής απορρόφησης του χώρου και S η επιφάνεια του χώρου.

Μπορούμε μάλιστα να γράψουμε αυτή τη σχέση ως προς τη λεγόμενη **σταθερά δωματίου** R , όπου:

$$R = \frac{S \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (5), \text{ σε } [m^2]$$

επομένως έχουμε:

$$(L_p)_{\text{αντ.πεδίου}} = (L_w)_{\text{πηγής}} + 10 \log \left[\frac{4}{R} \right] \quad (6)$$

Παρατηρούμε ότι η στάθμη του αντηχητικού πεδίου εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής της πηγής και από την απορρόφηση (συντελεστή απορρόφησης και μέγεθος χώρου), ενώ δεν εξαρτάται από την απόσταση.

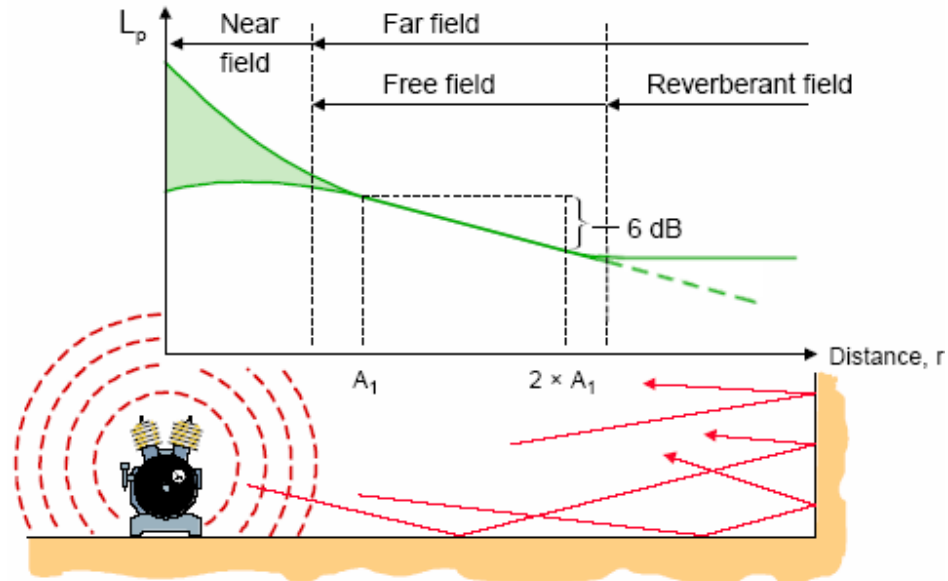
Παρατήρηση: Το $(L_w)_{\text{πηγής}}$ στις παραπάνω σχέσεις είναι η στάθμη ισχύος που εκπέμπεται από την πηγή και χαρακτηρίζει αποκλειστικά την πηγή, που σημαίνει ότι δεν είναι μέγεθος που εξαρτάται από την απόσταση.

Σχέση υπολογισμού στάθμης – συνδυασμός πεδίων σε κλειστό χώρο

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3) & (6) καταλήγουμε στη σχέση που μας δίνει το συνολικό αποτέλεσμα των δύο πεδίων σε σημεία, όπου παίζουν σημαντικό ρόλο και τα δύο πεδία, ελεύθερο και αντηχητικό:

$$(L_p)_{\text{πεδίου}} = (L_w)_{\text{πηγής}} + 10 \log \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right] \quad (7)$$

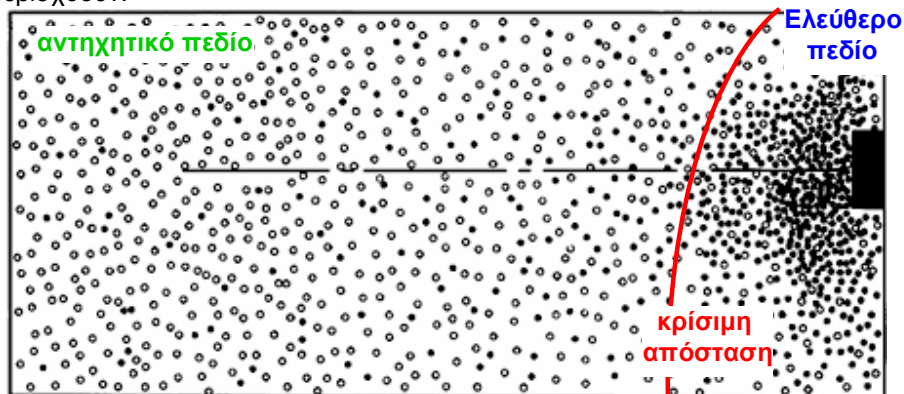
Εδώ φαίνονται οι περιοχές στις οποίες συνηθίζουμε να υποδιαιρούμε το ηχητικό πεδίο σε ένα διάγραμμα απόστασης – ηχητικής στάθμης.



Σχήμα 2. Διαχωρισμός Κοντινό πεδίο & μακρινό πεδίο – ελεύθερο & αντηχητικό [6]

Στο παρακάτω σχήμα έχουμε μια αναπαράσταση του συνδυασμού των δύο πεδίων. Έστω μια πηγή που εκπέμπει ημισφαιρικά. Αναπαριστούμε με μαύρα σημεία την ενέργεια του απευθείας ήχου και με άσπρα σημεία του αντηχητικού πεδίου. Η πυκνότητα της ενέργειας αναπαρίσταται από την πυκνότητα των σημείων στο χαρτί.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι κοντά στην πηγή τα μαύρα σημεία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δηλαδή έχουμε μεγάλη πυκνότητα ενέργειας από τον απευθείας ήχο και όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή αυτή μειώνεται. Τα λευκά σημεία που αναπαριστούν το αντηχητικό πεδίο βλέπουμε ότι έχουν σταθερή πυκνότητα σε όλο το χώρο, που σημαίνει ότι το αντηχητικό πεδίο έχει σταθερή πυκνότητα ενέργειας παντού. Κοντά στην πηγή, ο απευθείας ήχος επικρατεί, ενώ καθώς απομακρυνόμαστε από αυτήν ο λόγος των μαύρων προς τα λευκά σημεία μεταβάλλεται, μέχρι που τα λευκά (ηχητική ενέργεια αντηχητικού πεδίου) αρχίζουν να υπερισχύουν.

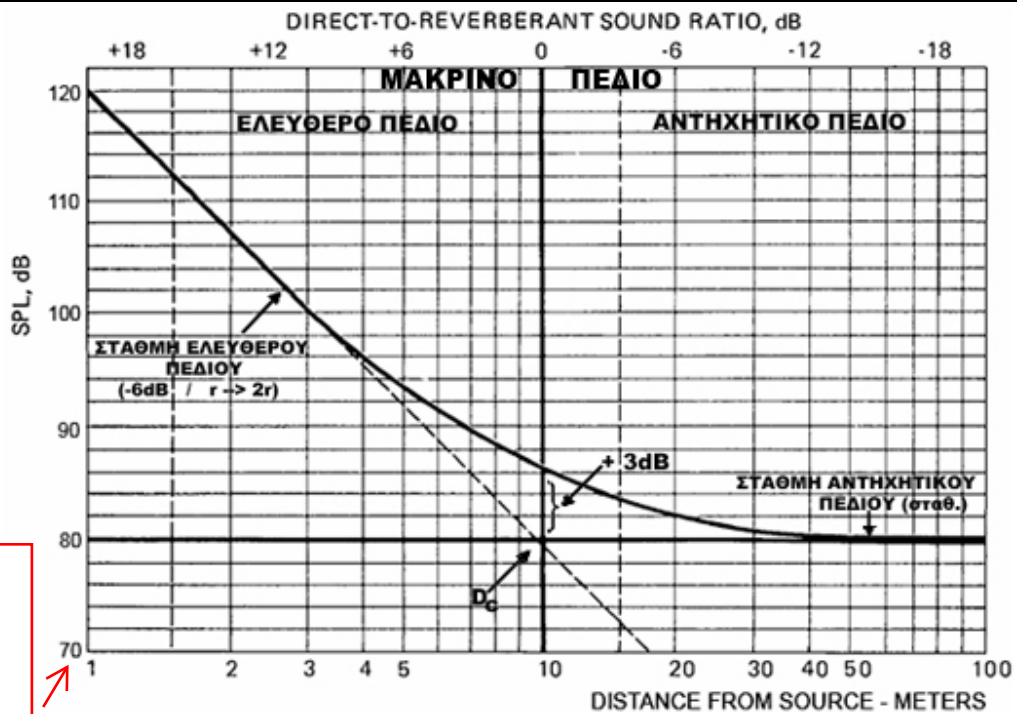


Σχήμα 3. Πυκνότητα ενέργειας απευθείας ήχου και αντηχητικού πεδίου στο χώρο [2]

Κρίσιμη απόσταση

Όλα τα παραπάνω φαίνονται και στο επόμενο διάγραμμα απόστασης – στάθμης. Σε αυτό φαίνεται καθαρά η αρχική γραμμική πτώση ($\Delta L_p = -6 \text{ dB}$ για κάθε $r \rightarrow 2r$) με την απόσταση πηγής – ακροατή στο ελεύθερο πεδίο και η μετάβαση (μακριά από την πηγή) προς τη σταθερή στάθμη του αντηχητικού πεδίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτό σημαίνει ότι όσο είμαστε σχετικά κοντά στην πηγή, υπερισχύει ο απευθείας ήχος, έτσι ώστε καθώς απομακρυνόμαστε από αυτήν να αντιλαμβανόμαστε μια πτώση της στάθμης. Αν συνεχίσουμε να απομακρυνόμαστε από την πηγή, τόσο το αντηχητικό πεδίο αρχίζει και υπερισχύει του ελεύθερου έτσι ώστε από κάποια απόσταση και πέρα η στάθμη παραμένει σταθερή παντού στο χώρο λόγω του διάχυτου αντηχητικού πεδίου. Σε ενδιάμεσες αποστάσεις η στάθμη προκύπτει από το συνδυασμό των στάθμεων από τα δύο πεδία.

Το σημείο όπου οι στάθμες των δύο πεδίων, ελεύθερου και αντηχητικού, γίνονται ίσες (σημείο τομής της προέκτασης των γραμμών στο παραπάνω διάγραμμα) ονομάζεται **κρίσιμη απόσταση** D_C



Σχήμα 4. Γραφικός προσδιορισμός κρίσιμης απόστασης, D_C , από [2]

Στην κρίσιμη απόσταση, D_C , ισχύει: $(L_p)_{\text{αντ.πεδίου}} = (L_p)_{\text{ελ.πεδίου}} = (L_p)_{\text{κρ.απ.}} \Rightarrow$

$$(a) \quad (L_p)_{\text{πεδίου}} = (L_p)_{\text{κρ.απ.}} + 3 \text{ dB} \quad (8)$$

$$(b) \quad (L_w)_{\text{πηγής}} + 10 \log \left[\frac{Q}{4\pi D_C^2} \right] = (L_w)_{\text{πηγής}} + 10 \log \left[\frac{4}{R} \right] \Leftrightarrow D_C = \frac{\sqrt{Q \cdot R}}{7} \quad (9)$$

$$\text{Στην ειδική περίπτωση όπου } \bar{a} \ll 1, \text{ π.χ. } \bar{a} < 0.1: R = \frac{S \cdot \bar{a}}{1 - \bar{a}} = S \cdot \bar{a} = A_S \Rightarrow D_C = \frac{\sqrt{Q \cdot A_S}}{7} \quad (10)$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η κρίσιμη απόσταση εξαρτάται από την κατευθυντικότητα της πηγής και την απορρόφηση του χώρου (συντελεστή απορρόφησης και μέγεθος του χώρου). Αυτό σημαίνει ότι η κρίσιμη απόσταση μεγαλώνει με πιο κατευθυντικές πηγές και μεγαλύτερη απορρόφηση από το χώρο.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να εκφραστεί και ως προς το χρόνο αντήχησης, με αντικατάσταση του A_S :

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_S} \Leftrightarrow A_S = \frac{0,161 \cdot V}{RT_{60}} \Rightarrow D_C = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot V}{RT_{60}}} \quad (11)$$

Επεξήγηση / ορισμός μεγεθών

Παράγοντας κατευθυντικότητας ηχείου

Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης άσκησης χαρακτηρίζουμε τις ηχητικές πηγές με βάση την εκπεμπόμενη ισχύ και την κατευθυντικότητά τους. Η κατευθυντικότητα της πηγής εκφράζεται με δύο μεγέθη, τον παράγοντα κατευθυντικότητας και το δείκτη κατευθυντικότητας.

- Ο **παράγοντας κατευθυντικότητας**, Q , είναι αδιάστατο μέγεθος, ορίζεται πάντα για ένα σημείο και δίνεται από το λόγο της έντασης σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο συγκεκριμένης απόστασης και διεύθυνσης από την πηγή (I_d) προς τη μέση τιμή της έντασης από όλες τις διευθύνσεις (I_0).

$$Q = \frac{I_d}{I_0} \quad (12)$$

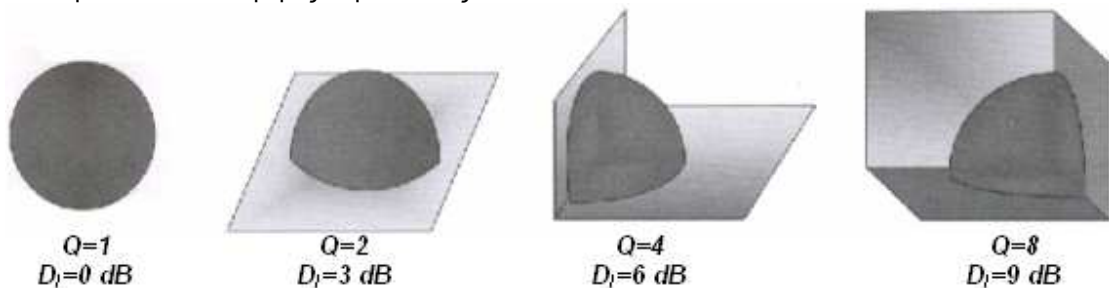
Εξ' ορισμού η μέση τιμή του Q προς όλες τις διευθύνσεις γύρω από την πηγή είναι ίση με τη μονάδα, 1.

- Ο **δείκτης κατευθυντικότητας**, D_I , ορίζεται από τον παράγοντα κατευθυντικότητας Q ως:

$$D_I = 10 \cdot \log Q \quad (13) \Leftrightarrow D_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I_d}{I_0}\right), \text{ σε dB.}$$

Μία ισότροπη πηγή, δηλαδή μια πηγή που εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω της, σε ελεύθερο πεδίο (δηλαδή σε χώρο μακριά από ανακλαστικές επιφάνειες) έχει σταθερό παράγοντα κατευθυντικότητας, $Q = 1$, παντού.

Αν τοποθετήσουμε μια τέτοια πηγή κοντά σε τέλεια ανακλαστικές επιφάνειες, περιορίζουμε την εκπομπή της ηχητικής ενέργειας προς ορισμένες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα να καθιστούμε την πηγή μη-ισότροπη και κατά συνέπεια να επηρεάζουμε τον παράγοντα κατευθυντικότητάς της. Στην πράξη αυτό συμβαίνει συχνά, αφού τα ηχεία συχνά τοποθετούνται σε τοίχους (ημι-σφαιρική εκπομπή), σε γωνίες 2 τοίχων (εκπομπή από τεταρτημόριο της σφαίρας) ή και γωνίες 3 τοίχων (εκπομπή από 1/8 της σφαίρας). Παρακάτω φαίνονται οι διάφορες περιπτώσεις:



Σχήμα 5. Παράγοντας κατευθυντικότητας πηγής, Q , σύμφωνα με την τοποθέτηση [5]

Θέση πηγής	Παράγοντας κατευθυντικότητας	Δείκτης Κατευθυντικότητας (dB)	
Ελεύθερο πεδίο	1	0	$L = L_p$
Σε επίπεδη επιφάνεια	2	3	$L = L_p + 3 \text{ dB}$
Στη γωνία 2 επιφανειών	4	6	$L = L_p + 6 \text{ dB}$
Στη γωνία 3 επιφανειών	8	9	$L = L_p + 9 \text{ dB}$

Πίνακας 1. Παράγοντας, Q , & δείκτης, D_I , κατευθυντικότητας πηγής ανάλογα με τη θέση της [2]

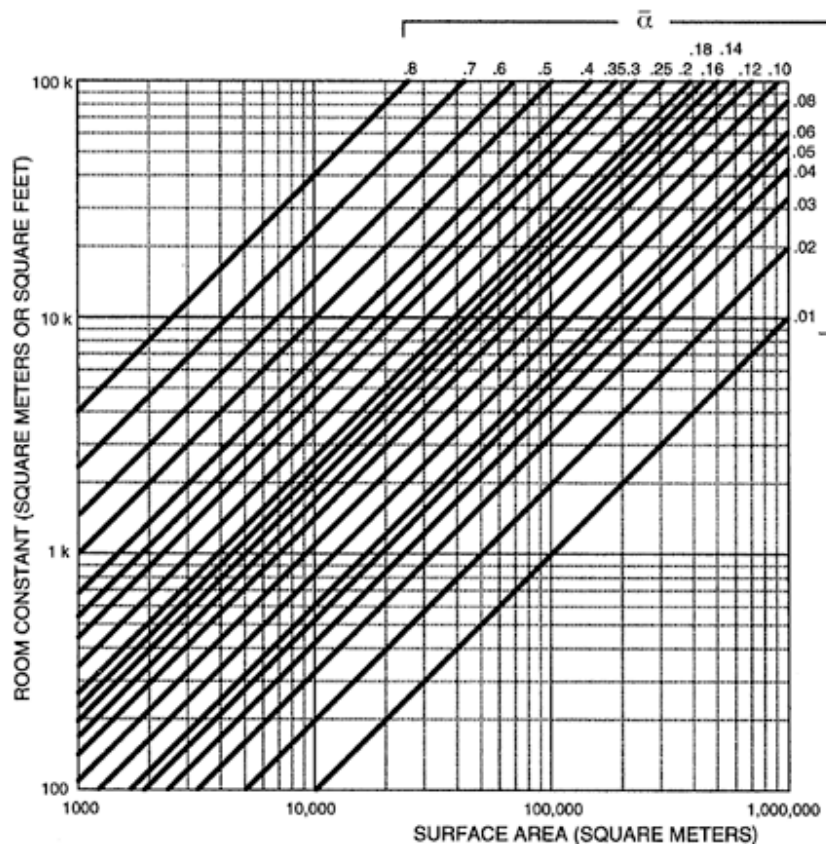
Κατά κανόνα μια πηγή καθίσταται περισσότερο κατευθυντική στις υψηλότερες συχνότητες, δηλαδή εκεί όπου το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου ήχου είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις της.

Σταθερά δωματίου

Η σταθερά δωματίου είναι ένας λόγος που αντιπροσωπεύει απευθείας ήχο προς αντηχητικό πεδίο. Το R είναι ένα ακαδημαϊκό μέγεθος και δεν έχει από μόνο του κάποια ιδιαίτερη σημασία, απλώς χρησιμοποιείται στις πράξεις.

Από τη σχέση (5) πάντως καταλαβαίνουμε ότι ο λόγος $\frac{\bar{a}}{1-\bar{a}}$ θα δίνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας για

μεγάλη απορρόφηση και μικρότερες της μονάδας για μικρή απορρόφηση. Το γινόμενο αυτού του αριθμού με την επιφάνεια του χώρου δίνει τη σταθερά δωματίου. Επομένως, μιλώντας για ένα χώρο συγκεκριμένων διαστάσεων, θα έχουμε μεγαλύτερη τιμή R για μεγάλη απορρόφηση και μικρότερη για μικρή απορρόφηση, δηλαδή μεγάλο R για λιγότερο αντηχητικούς χώρους και μικρό R για αντηχητικούς χώρους ίδιων διαστάσεων. Αυτό φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 6. Εξάρτηση σταθεράς δωματίου R από συντελεστή απορρόφησης, \bar{a} [2]

Λόγω της εξάρτησης του συντελεστή απορρόφησης από τη συχνότητα, η σταθερά δωματίου εξαρτάται και αυτή από τη συχνότητα.

Παράγοντες εξάρτησης της κρίσιμης απόστασης D_c

Κρίσιμη απόσταση είναι, όπως είδαμε, εκείνη η απόσταση όπου το ελεύθερο και το αντηχητικό πεδίο έχουν ίσες στάθμες. Συνοπτικά παρουσιάζουμε κάποιες σχέσεις που είδαμε ως τώρα:

- Στο ελεύθερο πεδίο: $(L_p)_{ελ.πεδίου} = (L_w)_{πηγής} + 10 \log \left[\frac{Q}{4 \pi r^2} \right]$ (3)

- Στο αντηχητικό πεδίο: $(L_p)_{αντ.πεδίου} = (L_w)_{πηγής} + 10 \log \left[\frac{4}{R} \right]$ (6), όπου $R = \frac{S \cdot \bar{a}}{1 - \bar{a}}$ (5)

- Κρίσιμη απόσταση: $D_c = \frac{\sqrt{Q \cdot R}}{7} = 0,14 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot S \cdot \bar{a}}{1 - \bar{a}}}$ (9)ή

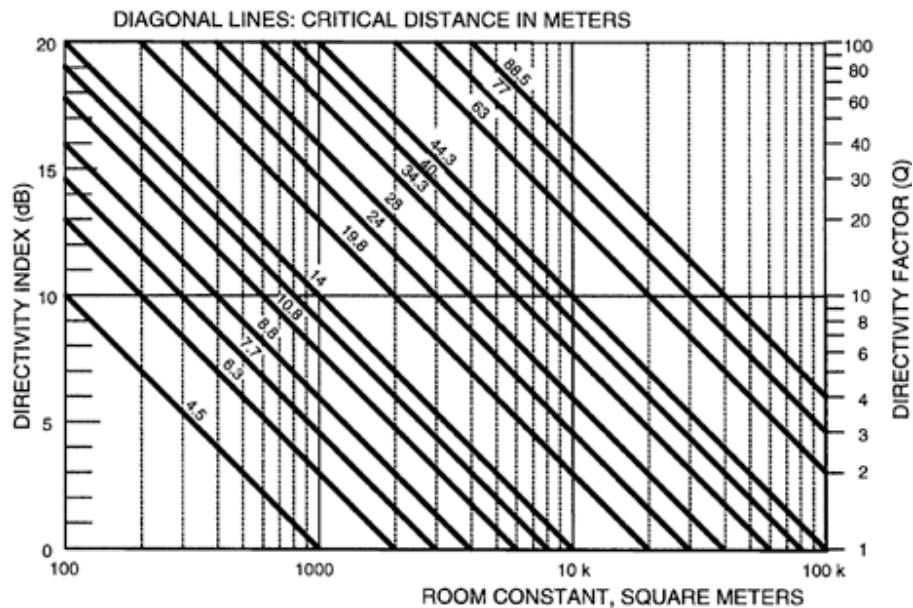
$$D_c = \frac{\sqrt{Q \cdot A_s}}{7} = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot V}{RT_{60}}} \text{ για } \bar{a} \ll 1 \quad (10), (11)$$

Από τη σχέση (9) διαπιστώνουμε ότι η κρίσιμη απόσταση εξαρτάται από τα εξής:

$$D_c = f(Q, R, f) \quad \text{ή} \quad D_c = f(Q, \bar{a}, V, f) \quad (14)$$

(Η εξάρτηση από τη συχνότητα προκύπτει εμμέσως λόγω εξάρτησης από το συντελεστή απορρόφησης).

Η εξάρτηση από τον παράγοντα κατευθυντικότητας και τη σταθερά δωματίου φαίνεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα:



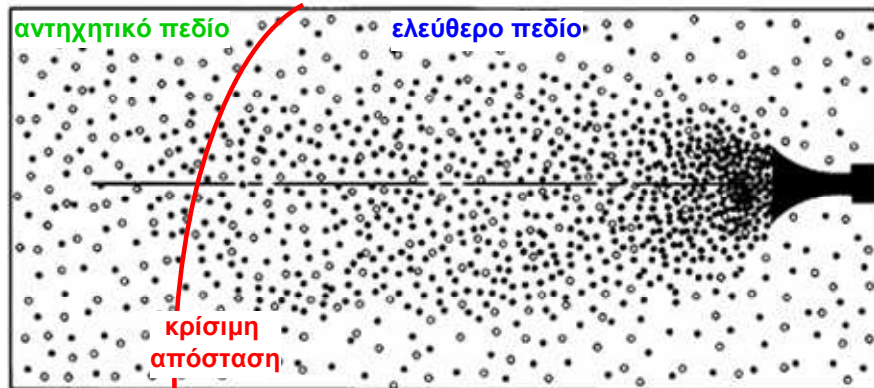
Σχήμα 7. Εξάρτηση της κρίσιμης απόστασης D_c από τον παράγοντα κατευθυντικότητας της πηγής, Q , και τη σταθερά δωματίου, R [2]

(1) Παράγοντας κατευθυντικότητας πηγής, Q :

Οι πιο κατευθυντικές πηγές προκαλούν μεγαλύτερη κρίσιμη απόσταση.

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3) και (6) το Q επηρεάζει μόνο τον απευθείας ήχο - ελεύθερο πεδίο (αύξηση στάθμης για πιο κατευθυντικές πηγές), ενώ αφήνει ανεπηρέαστη τη στάθμη του αντηχητικού πεδίου.

Στο παρακάτω σχήμα έχουμε την αναπαράσταση της πυκνότητας ενέργειας από μία πηγή πιο κατευθυντική από αυτή του Σχήματος 3. Διαπιστώνουμε ότι σε αυτή την περίπτωση το σημείο όπου η πυκνότητα ενέργειας από το ελεύθερο (μαύρα σημεία) και από το αντηχητικό πεδίο (άσπρα σημεία) είναι ίσες (D_C) είναι πιο μακριά από την πηγή από ότι στην προηγούμενη περίπτωση.

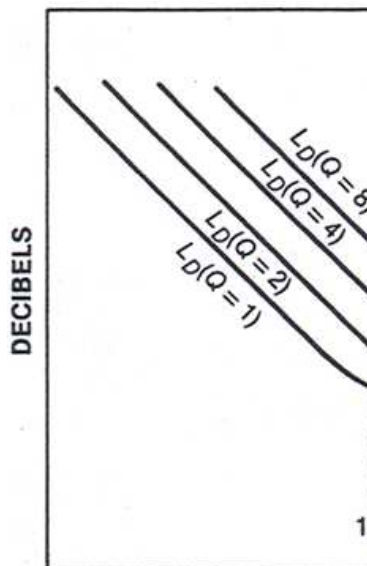


Σχήμα 8. Πυκνότητα ηχείο [2]

ενέργειας απευθείας ήχο και αντηχητικού πεδίου στο χώρο για πιο κατευθυντικό

Η εξάρτηση της κρίσιμης επόμενου διάγραμμα

απόστασης από τον παράγοντα κατευθυντικότητας Q φαίνεται και στο απόστασης – στάθμης:



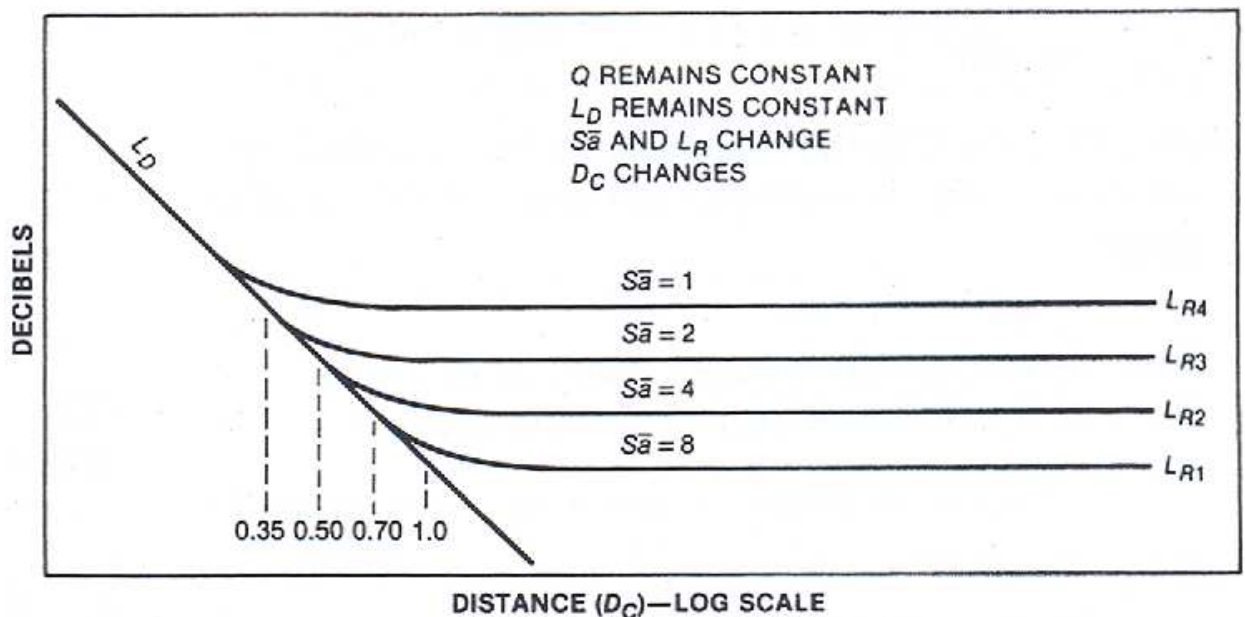
Σχήμα 9. Μεταβολή κρίσιμης απόστασης D_C για διαφορετικά Q [1]

(2) Σταθερά δωματίου, R :

Η σταθερά δωματίου R εξαρτάται από το συντελεστή απορρόφησης (\bar{a}) (ή την απορρόφηση (A)) και το μέγεθος του χώρου (S) ή αλλιώς από το χρόνο αντήχησης (RT_{60}). Έτσι:

Όσο πιο αντηχητικός είναι ο χώρος τόσο μικραίνει η κρίσιμη απόσταση και το αντίστροφο.

Όπως φαίνεται και από τις σχέσεις (3) και (6) τα παραπάνω επηρεάζουν μόνο τη στάθμη του αντηχητικού πεδίου και όχι του ελεύθερου, αφού η στάθμη του αντηχητικού πεδίου εξαρτάται από το πόσο γρήγορα απορροφάται ο ήχος στο χώρο (σε χώρο με χαμηλή απορρόφηση ο ήχος παραμένει στο χώρο για περισσότερο χρόνο και έχει μεγαλύτερη στάθμη). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σημείο τομής των ευθειών του ελεύθερου και του αντηχητικού πεδίου να μετακινείται σύμφωνα με αυτήν, όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα:



Σχήμα 10. Μεταβολή κρίσιμης απόστασης D_c για διαφορετικά R ($S \cdot \bar{a}$) [1]

(3) Συχνότητα, f :

Λόγω της εξάρτησης του συντελεστή απορρόφησης από τη συχνότητα, η κρίσιμη απόσταση είναι και αυτή διαφορετική ανάλογα με τη συχνότητα του εκπεμπόμενου ήχου.

Σημασία της κρίσιμης απόστασης

Όπως είδαμε, η κρίσιμη απόσταση δίνει την απόσταση από την πηγή για την οποία η στάθμη του απευθείας ήχου και η στάθμη της αντήχησης είναι ίσες. Αυτό μας δείχνει τα εξής:

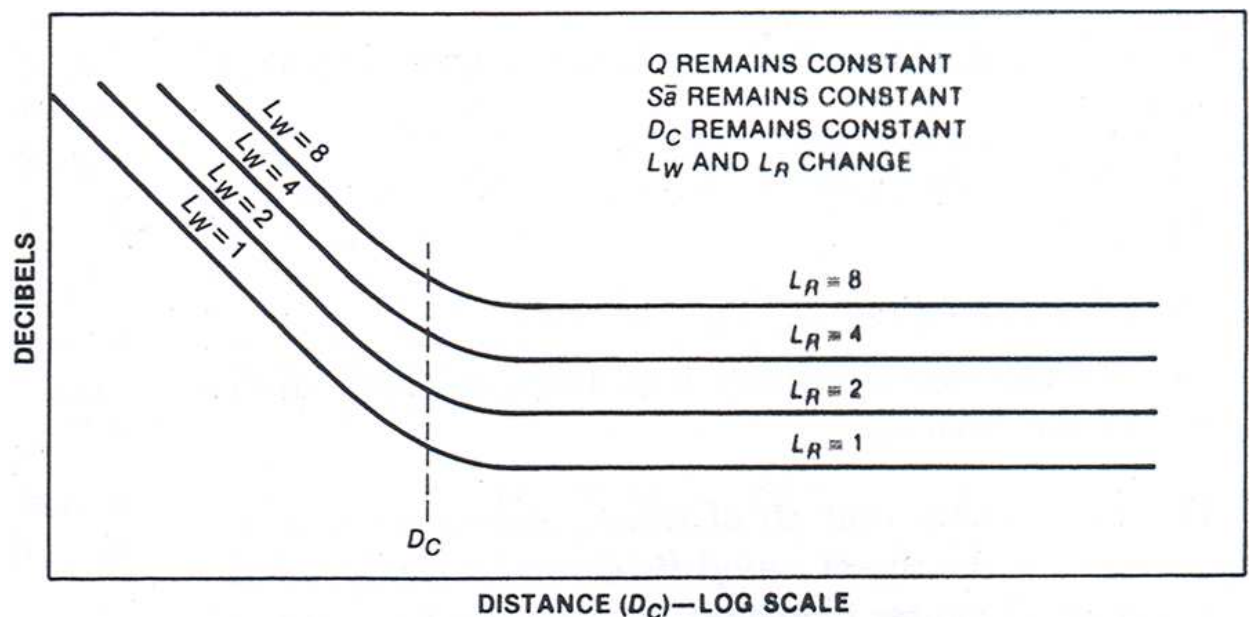
(α) **Σε μία αίθουσα:** Για αποστάσεις ενός ακροατή από την πηγή (ομιλητή ή ηχείο για ενισχυμένο ήχο) πολύ μεγαλύτερες από την κρίσιμη απόσταση, γίνεται όλο και πιο δύσκολη η κατανόηση της ομιλίας, αφού αυτό που δέχεται είναι κυρίως η αντήχηση και

(β) **Σε μία ηχογράφιση:** Αν τοποθετήσουμε το μικρόφωνο σε μια απόσταση από την πηγή μεγαλύτερη από την κρίσιμη, αυτό που θα ηχογραφήσουμε θα είναι κυρίως οι ανακλάσεις και όχι ο επιθυμητός, απευθείας ήχος.

(α) Σε μία αίθουσα:

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι αν το πρόβλημα είναι ο θόρυβος βάθους, τότε η καταληπτότητα του ήχου / της ομιλίας μπορεί να βελτιωθεί με ενίσχυσή του, δηλαδή αύξηση της στάθμης ηχητικής ισχύος που εκπέμπει η πηγή (volume). Κάτι τέτοιο αυξάνει σαφώς τη στάθμη του συνολικού μακρινού πεδίου, δηλαδή τον απευθείας ήχο και το αντηχητικό πεδίο, όπως φαίνεται από τις σχέσεις (3) και (6).

Αν όμως το πρόβλημα είναι ο χαμηλός λόγος του απευθείας ήχου προς την αντήχηση, τότε θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αυξήσουμε τη στάθμη μόνο του ελεύθερου πεδίου και να αφήσουμε αμετάβλητη ή και να μειώσουμε αν είναι δυνατό (και επιθυμητό) τη στάθμη του αντηχητικού πεδίου. Με αυτό τον τρόπο ουσιαστικά μετακινούμε και την κρίσιμη απόσταση πιο μακριά από την πηγή, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα (9) και (10), ώστε να βρεθούμε σε σημείο που να δεχόμαστε μεγαλύτερο μέρος του απευθείας ήχου. Κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό απλώς με ενίσχυση του ήχου (αύξηση του $(L_w)_{πηγής}$), αφού αυτό θα επηρέαζε και τα δύο πεδία, ελεύθερο και αντηχητικό, και ο λόγος θα παρέμενε ο ίδιος, με αποτέλεσμα η κρίσιμη απόσταση να μη μετακινηθεί, όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα:



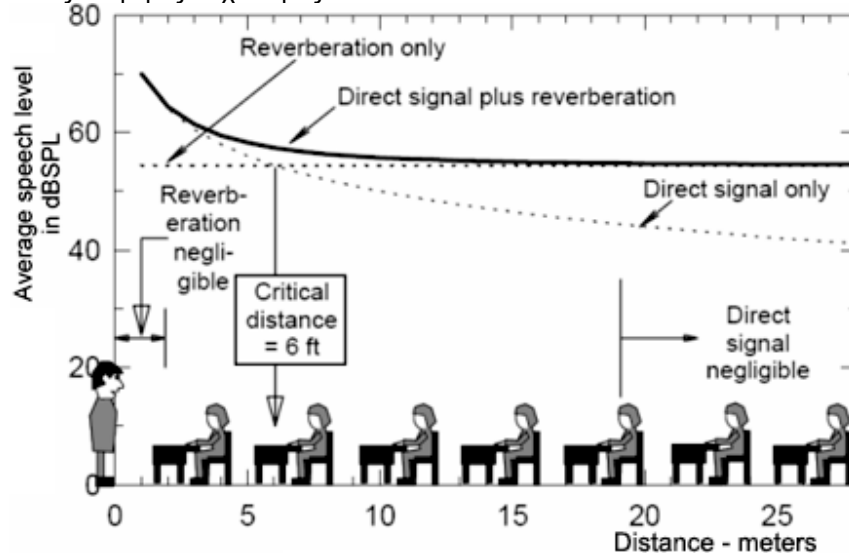
Σχήμα 11. Αύξηση της ηχητικής στάθμης που εκπέμπει η πηγή, $(L_w)_{πηγής}$ [1]

Για να αυξήσουμε την κρίσιμη απόσταση, D_c , μπορούμε να κάνουμε τα εξής:

(α) Για να αυξήσουμε μόνο τον απευθείας ήχο, θα πρέπει να αυξήσουμε τον παράγοντα κατευθυντικότητας, Q , της πηγής, δηλαδή να χρησιμοποιήσουμε πιο κατευθυντική πηγή ή να τοποθετήσουμε την ήδη υπάρχουσα κοντά σε ανακλαστικές επιφάνειες. (Στην περίπτωση ενός ομιλητή και του ακροατή που βρίσκονται ο ένας απέναντι από τον άλλο, αυτό μπορεί να γίνει αν ο ομιλητής βάλει τα χέρια του γύρω από το στόμα του).

(β) Για να μειώσουμε μόνο το αντηχητικό πεδίο, θα πρέπει να μειώσουμε το χρόνο αντήχησής του RT_{60} ή αλλιώς να αυξήσουμε την απορρόφησή του A , με χρήση κατάλληλων απορροφητικών υλικών (στις κατάλληλες συχνότητες).

Ο γενικός κανόνας λέει ότι (ανάλογα βέβαια με τη χρήση) σε μία αίθουσα με καλή ακουστική θα πρέπει η κρίσιμη απόσταση να είναι όσο το δυνατόν πιο μακριά από την πηγή και το αντηχητικό πεδίο όσο το δυνατό χαμηλό και ομαλό στις διάφορες συχνότητες.



Σχήμα 12. Λόγος απευθείας ήχου / αντηχητικού πεδίου σε αίθουσα διδασκαλίας

Συνήθως στα δωμάτια των σπιτιών η κρίσιμη απόσταση είναι πολύ μικρή, λιγότερη από 1 m. Επειδή οι περισσότεροι άνθρωποι κάθονται σε μια απόσταση πάνω από 2 m μακριά από τα ηχεία, αυτό που επικρατεί στην ακρόασή μας στο σπίτι είναι το αντηχητικό πεδίο και όχι ο απευθείας ήχος. Επειδή αυτό έχει άμεση εξάρτηση από τη συχνότητα, η ποιότητα του αντηχητικού πεδίου (συχνотική απόκριση) είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην απόδοση ενός ηχητικού συστήματος.

(β) Σε μία ηχογράφιση:

Θα πρέπει να τοποθετήσουμε το μικρόφωνο σε απόσταση πολύ μικρότερη της κρίσιμης, που σημαίνει ότι θα πρέπει να τη γνωρίζουμε. Ο γενικός κανόνας λέει ότι:

- Ένα παντο-κατευθυντικό μικρόφωνο θα πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μέχρι $0,3 \cdot D_c$ και
- Ένα κατευθυντικό μικρόφωνο θα πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μέχρι $0,5 \cdot D_c$.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Davis D., Davis C. (1997), "Sound system engineering"
- [2] Eargle J. (1999), "JBL - Sound System Design Reference Manual"
- [3] Rossing T., Moore R., Wheeler P. (2002). "The science of sound"
- [4] Howard D., Angus J. (1996), "Acoustics and Psychoacoustics"
- [5] Σκαρλάτος Δ. (2003), "Εφαρμοσμένη ακουστική"
- [6] Brüel&Kjær. (1998), "Basic concepts of sound". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [7] Κουτσοδημάκης Χ., Σηφάκης Μ., "Εργαστηριακό Φυλλάδιο Μηχανικής Ήχου Ι"
- [8] Egan D. (1988), "Architectural acoustics"

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές
 - Σχήμα
- (Να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)

Πειραματική διαδικασία

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάθους (backgroundnoise) της αίθουσας: $B = \dots\dots\dots dB$.
3. Να μετρηθούν οι διαστάσεις της αίθουσας του εργαστηρίου.
4. Χρησιμοποιώντας λευκό θόρυβο φιλτραρισμένο στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα το $1 kHz$, να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας διδασκαλίας στο $1 kHz$ με τη μέθοδο της διακοπτόμενης πηγής για τρεις διαφορετικές θέσεις του μικροφώνου μέσα σε αυτήν και με τους φοιτητές καθισμένους σε 2 σειρές στο πίσω μέρος της αίθουσας.

$f (Hz)$	1000
$RT_{60} (s) - 1$	
$RT_{60} (s) - 2$	
$RT_{60} (s) - 3$	
$RT_{60} (s) - M.O.$	

5. Να γίνουν μετρήσεις της ηχητικής στάθμης λευκού θορύβου φιλτραρισμένου στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα το $1 kHz$ στις παρακάτω αποστάσεις καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή. Επίσης να ληφθεί μία μέτρηση σε πολύ μεγάλη απόσταση από την πηγή, έτσι ώστε να θεωρείται ότι βρισκόμαστε στο καθαρά αντηχητικό πεδίο.

α/α	Απόσταση r από την πηγή (m)	Ηχοστάθμη $L_p (dB_{SPL})$
1	0.20	
2	0.40	
3	0.60	
4	0.80	
5	1.00	
6	1.20	
7	1.40	
8	1.60	
9	1.80	
10	2.00	
11	

Επεξεργασία μετρήσεων

1. Να γίνει η γραφική παράσταση της ηχοστάθμης L_p συναρτήσει της απόστασης r από την πηγή για τις μετρήσεις 5 σε ημιλογαριθμικό χαρτί ($\log(r)$).
2. Από το διάγραμμα να βρεθεί η κρίσιμη απόσταση D_C .
3. Επίσης, η κρίσιμη απόσταση να υπολογιστεί θεωρητικά και το αποτέλεσμα να συγκριθεί με αυτό που βρέθηκε γραφικά.
4. Από την πολύ μακρινή και μια κοντινή μέτρηση να υπολογιστεί ο χρόνος αντήχησης, θεωρώντας ότι η πηγή εκπέμπει σφαιρικά.

ΑΣΚΗΣΗ 6

ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ & ΤΡΟΠΟΙ ΔΟΝΗΣΗΣ

ΣΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ


ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπός της άσκησης είναι ο υπολογισμός των πρώτων ιδιοσυχνοτήτων του χώρου του εργαστηρίου, η επίδειξη και χαρτογράφηση των αντίστοιχων τρόπων δόνησης.

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

Ακουστικά μικροί / μεγάλοι χώροι

Όπως έχουμε δει ξανά ανάλογα με τις διαστάσεις τους, στην ακουστική διαχωρίζουμε τους χώρους σε δύο βασικές κατηγορίες, διότι ο ήχος συμπεριφέρεται διαφορετικά στις δύο περιπτώσεις. Ο διαχωρισμός γίνεται σύμφωνα με τη συχνότητα / μήκος κύματος του ήχου σε σχέση με τις διαστάσεις του χώρου:

- (1) Ακουστικά **μεγάλοι** χώροι, για $\lambda \ll$ διαστάσεις του χώρου και 
 (2) Ακουστικά **μικροί** χώροι, για $\lambda \approx$ διαστάσεις του χώρου (της ίδιας τάξης μεγέθους).

Στην πρώτη περίπτωση τα κυματικά φαινόμενα είναι τόσο πολύπλοκα και η χωρική διακύμανση του ηχητικού πεδίου τόσο μικρή που η προσέγγιση της συμπεριφοράς του ήχου γίνεται με στατιστικό τρόπο. Έτσι, θεωρούμε ότι ο ήχος διαδίδεται σε ευθεία γραμμή μεταξύ ανακλαστικών επιφανειών (ακτίνες), ανακλάται με ίση πιθανότητα από όλες τις επιφάνειες του χώρου και το δημιουργούμενο πεδίο είναι διάχυτο, με αποτέλεσμα η μελέτη να μπορεί να γίνει με βάση τις αρχές της **Γεωμετρικής Ακουστικής**.

Στη δεύτερη περίπτωση τα κυματικά φαινόμενα είναι πολύ έντονα, η έννοια της διάδοσης σε ακτίνες δεν ισχύει πλέον και παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις της στάθμης καθώς ένας ακροατής κινείται μέσα στο χώρο. Στην περίπτωση αυτή προσεγγίζουμε τη συμπεριφορά του ήχου με βάση τις αρχές τις **Κυματικής Ακουστικής**.

Όλοι οι χώροι πάντως εμφανίζουν φαινόμενα συντονισμών σε κάποια περιοχή χαμηλών συχνοτήτων, με αποτέλεσμα από κάποια συχνότητα και κάτω (που εξαρτάται από το συγκεκριμένο χώρο) οι συντονισμοί να κυριαρχούν και το πεδίο να μην μπορεί να θεωρηθεί διάχυτο.

Στις προηγούμενες ασκήσεις ασχοληθήκαμε με την πρώτη περίπτωση, δηλαδή με χώρους των οποίων οι διαστάσεις θεωρήσαμε ότι ήταν μεγαλύτερες από τα μήκη κύματος των υπό εξέταση ήχων. Σε αυτή την υπόθεση βασίστηκε μάλιστα και η εξαγωγή των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων.

Στη συγκεκριμένη άσκηση θα ασχοληθούμε με τις χαμηλές εκείνες συχνότητες που καθιστούν ένα χώρο **ακουστικά μικρό**, λόγω της εμφάνισης έντονων στάσιμων κυμάτων. Σε αυτή την περίπτωση οι εξισώσεις που είδαμε στις προηγούμενες εργαστηριακές ασκήσεις πρέπει να τροποποιηθούν.

Διαίρεση ακουστικού φάσματος

Το παρακάτω διάγραμμα των Bolt – Beranek - Newman που ονομάζεται «Ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου», παρουσιάζει το διαχωρισμό της συμπεριφοράς ενός χώρου σύμφωνα με τη συχνότητα ή αλλιώς το μήκος κύματος του ήχου ως προς τις διαστάσεις του χώρου:

- (1) **Ζώνη πίεσης (pressurezone / cut-offregion):** για $f \leq f_{min}$, όπου $f_{min} = \frac{c}{2 L_{max}}$ (1)

Αντιστοιχεί στην περιοχή που βρίσκεται κάτω από την κατώτατη συχνότητα συντονισμού, δηλαδή στην περιοχή όπου οι διαστάσεις του χώρου είναι μικρότερες από το μισό μήκος κύματος του ήχου, όπως μπορεί να συμβεί στο εσωτερικό των ηχείων και των μουσικών οργάνων. Αυτό δε σημαίνει ότι δεν υπάρχει τόσο χαμηλή συχνότητα, αλλά ότι δεν ενισχύεται από τους συντονισμούς του χώρου.

- (2) **Ζώνη στάσιμων κυμάτων (modalzone):** για $f_{min} \leq f \leq f_c$, όπου f_c η συχνότητα αποκοπής. Αντιστοιχεί στην περιοχή όπου το μήκος κύματος του ήχου είναι της τάξης μεγέθους του χώρου, και συγκεκριμένα στην περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στην κατώτατη συχνότητα συντονισμού, f_{min} , και τη συχνότητα αποκοπής, f_c . Η συχνότητα αποκοπής δεν είναι ορισμένη, αλλά δίνεται κατά

προσέγγιση από τη σχέση: $f_c = k \cdot \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}$ (2), όπου καταθερά, $k=2102$ (στο S.I. σύστημα),

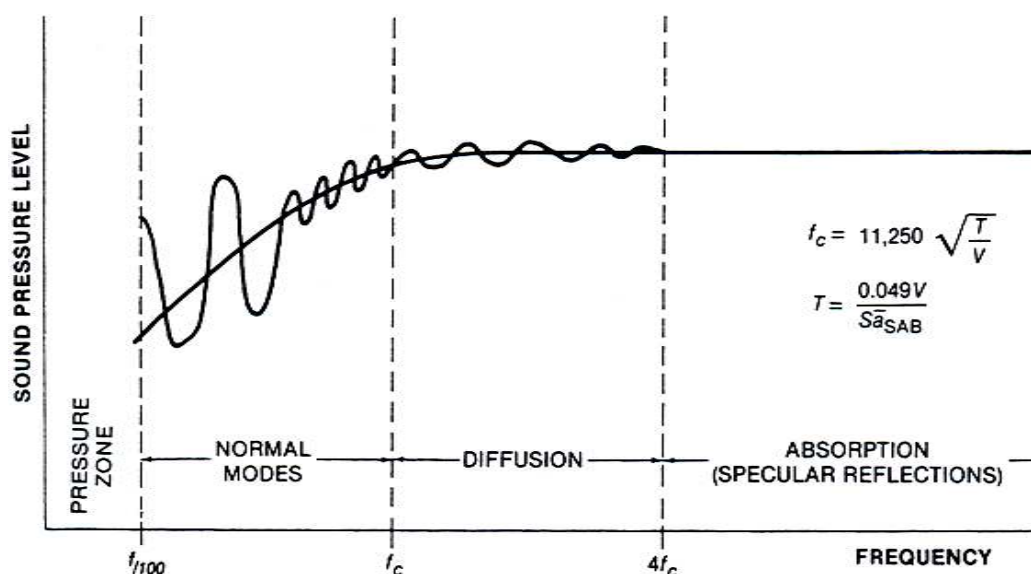
RT_{60} χρόνος αντήχησης σε sec και V ο όγκος του χώρου σε m^3 . Σε αυτή την περιοχή εφαρμόζουμε τις αρχές της Κυματικής Ακουστικής και το πεδίο δεν μπορεί να θεωρηθεί διάχυτο.

- (3) **Ζώνη διάχυσης (diffusionzone):** $f_c \leq f \leq 4 \cdot f_c$ περίπου.

Είναι η περιοχή μετάβασης μεταξύ της προηγούμενης και της επόμενης ζώνης. Είναι μια δύσκολη συχνοτική περιοχή, γιατί ο χώρος θεωρείται αρκετά μικρός για τη χρήση της Γεωμετρικής Ακουστικής και της στατιστικής (αφού εμφανίζονται ακόμα έντονοι συντονισμοί), αλλά και αρκετά μεγάλος για την εφαρμογή της Κυματικής Ακουστικής, σύμφωνα με το μήκος κύματος.

- (4) **Ζώνη ανακλάσεων (specularreflectionzone):** $f \geq 4 \cdot f_c$.

Εδώ τα κυματικά φαινόμενα εξασθενούν, επικρατούν οι τυχαίες ανακλάσεις, ο ήχος διαδίδεται σε ευθείες (ακτίνες) και εφαρμόζονται πλέον οι αρχές τις Γεωμετρικής Ακουστικής.



Σχήμα 1. Διάγραμμα Bolt-Beranek-Newmann: «Ελεγκτής σταθερής κατάστασης ακουστικής απόκρισης δωματίου» [1]

Η συχνότητα f_c (συχνότητα αποκοπής) είναι το όριο διαχωρισμού ανάμεσα σε ένα ακουστικά μεγάλο και ένα ακουστικά μικρό δωμάτιο.

Από τη σχέσεις $f_c = k \cdot \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}$ και $RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A} \Rightarrow f_c = k \cdot \sqrt{\frac{0,161}{S \cdot a}}$ (3), δηλαδή προκύπτει ότι:

Η συχνότητα αποκοπής των μεγαλύτερων χώρων είναι εν γένει μικρότερη από αυτή των μικρότερων χώρων. Γι' αυτό οι μεγάλοι χώροι είναι και ακουστικά μεγάλοι.

Σε έναν ακουστικά μεγάλο χώρο η συχνότητα αποκοπής είναι μικρότερη από τη χαμηλότερη συχνότητα που θα παραχθεί εντός του. Σε έναν ακουστικά μικρό χώρο η συχνότητα αποκοπής θα εμφανιστεί στη συχνοτική περιοχή εμφάνισης συντονισμών.

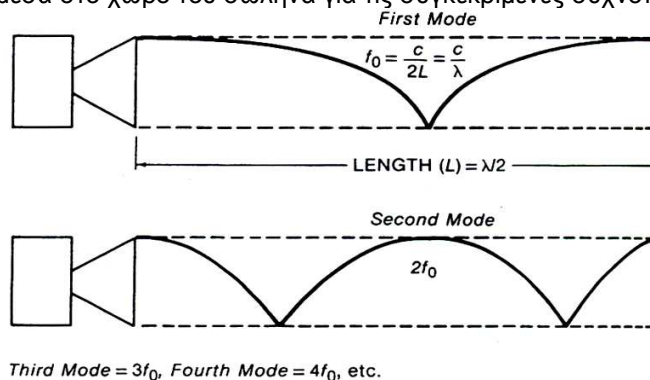
Παραδείγματα ακουστικά μεγάλων χώρων αποτελούν αίθουσες συναυλιών, καθεδρικοί ναοί και μεγάλα studio ηχογραφήσεων. Στις περισσότερες πάντως περιπτώσεις παραγωγής και αναπαραγωγής μουσικής βρισκόμαστε σε ακουστικά μικρούς χώρους, όπως τα δωμάτια ενός σπιτιού, το μπάνιο κλπ.

Παρακάτω θα μελετήσουμε τη δημιουργία στάσιμων κυμάτων και τους συντονισμούς ενός χώρου, αφού σε χαμηλές συχνότητες το άθροισμά τους αποτελεί το ίδιο το ηχητικό πεδίο του χώρου.

Δημιουργία στάσιμων κυμάτων

Σωλήνας κλειστός – κλειστός

Έστω ένας σωλήνας κλειστός και στα δύο του άκρα, τα οποία είναι τελείως ανακλαστικά. Ο ήχος ενός καθαρού τόνου που παράγεται στο ένα του άκρο διαδίδεται μέσα στο σωλήνα, ανακλάται στο απέναντι άκρο του και στη συνέχεια συμβάλλει με τον προσπίπτοντα ήχο. Κάτω από ορισμένες συνθήκες μήκους κύματος (f συχνότητας) του ήχου ως προς το μήκος του σωλήνα, το αποτέλεσμα της συμβολής του οδεύοντος και του ανακλώμενου κύματος παρουσιάζει συγκεκριμένα σημεία μέγιστης πίεσης (δεσμούς) και μηδενικής (κοιλίες) πίεσης (το αντίστροφο ισχύει για τη μετατόπιση των σωματιδίων από τη θέση ισορροπίας). Τότε λέμε ότι έχει δημιουργηθεί ένα *στάσιμο κύμα*, ένας χαρακτηρισμός που αναφέρεται στο γεγονός ότι το κύμα φαίνεται να μη μετακινείται στο χώρο (οι δεσμοί και οι κοιλίες δε μετακινούνται), ενώ η ενέργεια εγκλωβίζεται μέσα στο χώρο του σωλήνα για τις συγκεκριμένες συχνότητες.



Σχήμα 2. Σχηματισμός στάσιμων κυμάτων σε σωλήνα [1]

Οι συχνότητες εμφάνισης αυτών των τρόπων δόνησης ικανοποιούν τη σχέση:

$$f_n = n \frac{c}{2L} \quad (4)$$

όπου c η ταχύτητα του ήχου (m/s),

L το μήκος του σωλήνα (m) και

n η τάξη του στάσιμου κύματος, δηλαδή ακέραιος αριθμός που χαρακτηρίζει τον τρόπο δόνησης (*mode*).

Από τη σχέση $c = \lambda \cdot f$ προκύπτει η συνθήκη για το μήκος κύματος ως προς το μήκος του σωλήνα:

$$\frac{c}{\lambda_n} = n \frac{c}{2L} \Leftrightarrow L = n \cdot \frac{\lambda_n}{2} \quad (5)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι υπάρχει ένα άπειρο πλήθος δυνατών τρόπων δόνησης, οι οποίοι εμφανίζονται όταν χωράει στο μήκος του σωλήνα ακριβώς ένας ακέραιος πλήθος (n) μισού μήκους κύματος ($\lambda/2$).

Η χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού εμφανίζεται για $n = 1$, δηλαδή όταν χωράει ακριβώς ένα μισό μήκος κύματος στο μήκος του σωλήνα, ενώ οι υπόλοιπες συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια αυτής ($n = 2, n = 3, n = 4$, κλπ.), δηλαδή έχουμε ένας πλήθος αρμονικών.

Έτσι, θα έχουμε τους παρακάτω τρόπους δόνησης:

- Για $n=1$: $f_{1-min} = \frac{c}{2L}$
- Για $n=2$: $f_2 = 2 \frac{c}{2L} = 2 \cdot f_{1-min}$
- Για $n=3$: $f_3 = 3 \frac{c}{2L} = 3 \cdot f_{1-min}$ κλπ.

Όπως φαίνεται και στα προηγούμενα σχήματα, σε όλους τους τρόπους δόνησης παρουσιάζονται πάντα μέγιστα πίεσης (κοιλίες) στα άκρα του σωλήνα, ενώ ενδιάμεσα έχουμε ένα πλήθος δεσμών και κοιλιών, διαφορετικό ανάλογα με τον τρόπο δόνησης.

Γενίκευση στις 3 διαστάσεις – ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο δωμάτιο

Αναφερόμενοι στην ακουστική χώρων, η εμφάνιση στάσιμων κυμάτων στον τρισδιάστατο χώρο αποτελεί γενίκευση της παραπάνω μονοδιάστατης περίπτωσης. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αντί για τα κλειστά άκρα ενός σωλήνα έχουμε τους 6 τοίχους.

Στην ιδανική περίπτωση ενός χώρου όπου ο ήχος ανακλάται από όλες τις επιφάνειες με την ίδια πιθανότητα, έχουμε τη δημιουργία ενός διάχυτου πεδίου. Στην πράξη όμως, η ενέργεια δεν ανακλάται μόνο με τον παραπάνω τυχαίο τρόπο, αφού ένα μέρος της διαδίδεται σε κλειστές διαδρομές μεταξύ συγκεκριμένων τοίχων, όταν στο μήκος τους χωράει ακριβώς ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος. Υπάρχει ένα άπειρο πλήθος τέτοιων κλειστών διαδρομών, για διάφορες συχνότητες.

Έτσι εμφανίζονται τα στάσιμα κύματα, των οποίων η χωρική κατανομή της ηχητικής πίεσης στο χώρο είναι συγκεκριμένη υπό την έννοια ότι δε μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου (έτσι σε κάθε χώρο οι θέσεις λ.χ. στις οποίες εμφανίζονται μέγιστα πίεσης είναι συγκεκριμένες σε κάθε συχνότητα).

Σε σχέση με τις υποθέσεις που κάναμε για την εφαρμογή των αρχών της γεωμετρικής ακουστικής, τα στάσιμα κύματα:

- Δεν ανακλώνται σε όλους τους τοίχους με την ίδια πιθανότητα. Αντιθέτως, κινούνται μεταξύ κάποιων συγκεκριμένων από αυτούς.
- Δεν προσπίπτουν σε αυτούς σε τυχαίες γωνίες. Αντιθέτως, συγκεκριμένες γωνίες εμπλέκονται στο σχηματισμό των στάσιμων κυμάτων.
- Ως συνέπεια των παραπάνω, τα στάσιμα κύματα απορροφώνται εν γένει με διαφορετικό ρυθμό από τα κύματα των υψηλότερων συχνοτήτων στα οποία ισχύουν οι αρχές της στατιστικής ακουστικής.
- Είναι απαραίτητη η επιστροφή του κύματος σε έναν αρχικό τοίχο, δηλαδή η διάδοση του κύματος σε κάποια κλειστή κυκλική διαδρομή, μήκους πολλαπλάσιου του μισού μήκους κύματος.

Οι συχνότητες εμφάνισης συντονισμών καθορίζονται από τη γεωμετρία του χώρου.

Κατά συνέπεια:

Σε δωμάτια απλού γεωμετρικού σχήματος μπορούμε συχνά να εξάγουμε μια αναλυτική σχέση για τις συχνότητες εμφάνισης συντονισμού.

Στην κλασική περίπτωση ενός χώρου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου οι συχνότητες εμφάνισης στάσιμων κυμάτων δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (6)$$

, όπου c η ταχύτητα του ήχου (m/s),

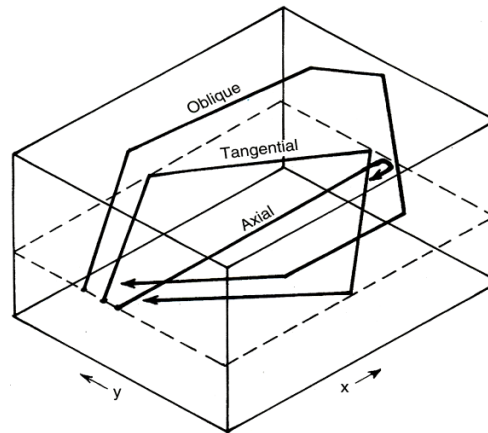
L_x, L_y, L_z οι διαστάσεις του χώρου στους αντίστοιχους άξονες και

n_x, n_y, n_z η τάξη του στάσιμου κύματος στον αντίστοιχο άξονα.

Σε αυτές τις συχνότητες λέμε επίσης ότι συμβαίνει ένας *συντονισμός* ή ότι έχουμε έναν *τρόπο δόνησης* ή έναν *τρόπο ταλάντωσης* (*resonancemode*). Αντί για την τιμή της συχνότητας, μάλιστα, χρησιμοποιούμε συχνά το είδος του τρόπου δόνησης με βάση την τάξη του στάσιμου κύματος στους τρεις άξονες, δηλαδή: $(n_x; n_y; n_z)$. Για να υπολογίσουμε από την παραπάνω σχέση τις αντίστοιχες συχνότητες συντονισμού

απλώς δίνουμε τιμές για τα $n_x, n_y, n_z, L_x, L_y, L_z$.

Η συνθήκη του ακέραιου πολλαπλάσιου του μισούμήκους κύματος μπορεί να εκπληρωθεί για διαφορετικές συχνότητες από την ανάκλαση του ήχου σε διαφορετικό πλήθος τοίχων. Σε ένα χώρο σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου έχουμε τις παρακάτω βασικές περιπτώσεις:

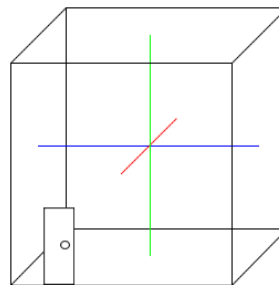


Σχήμα 3. Όλοι οι τρόποι δόνησης στον τρισδιάστατο χώρο [3]

Οι **αξονικοί τρόποι δόνησης** εμφανίζονται όταν έχουμε διαδοχικές ανακλάσεις του ήχου και δημιουργία στάσιμων κυμάτων ανάμεσα σε **δύο (2)** παράλληλους τοίχους του δωματίου, δηλαδή εμφανίζονται λόγω της δημιουργίας στάσιμου κύματος σε μία διάσταση από τις τρεις (είναι η περίπτωση που ισοδυναμεί με αυτήν του σωλήνα). Μπορούμε να έχουμε τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις από ζεύγη παράλληλων επιφανειών: ανάμεσα στους δύο απέναντι τοίχους από τους τέσσερις και ανάμεσα σε ταβάνι – πάτωμα ή αλλιώς τους παρακάτω τρόπους:

$$(n_x; 0; 0) \text{ ή } (0; n_y; 0) \text{ ή } (0; 0; n_z)$$

,όταν δηλαδή ένας μόνο από τους n_x, n_y, n_z είναι διάφορος του μηδενός και δύο ίσοι με το μηδέν.



Σχήμα 4 Αξονικά modes [13]

Σε κάθε άξονα μπορούμε να έχουμε μια σειρά από στάσιμα κύματα, των οποίων η συχνότητα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της χαμηλότερης αξονικής συχνότητας στον αντίστοιχο άξονα, π.χ.

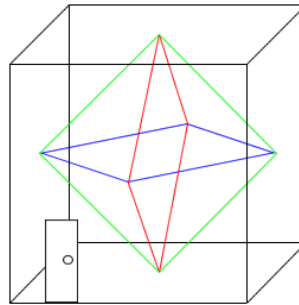
$(1; 0; 0)$	$(0; 1; 0)$	$(0; 0; 1)$
$(2; 0; 0)$	$(0; 2; 0)$	$(0; 0; 2)$
$(3; 0; 0)$	$(0; 3; 0)$	$(0; 0; 3)$
...

Οι **εφαπτομενικοί τρόποι δόνησης** εμφανίζονται όταν έχουμε ανάκλαση του ήχου και δημιουργία στάσιμων κυμάτων ανάμεσα σε **τέσσερις (4)** τοίχους του δωματίου, δηλαδή όταν χωρά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο μισού μήκους κύματος στις δύο διαστάσεις.

Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

$$(n_x; n_y; 0) \text{ ή } (0; n_y; n_z) \text{ ή } (n_x; 0; n_z)$$

όταν δηλαδή δύο από τους $(n_x; n_y; n_z)$ είναι διάφοροι του μηδενός και ένας μόνο ίσος με μηδέν.

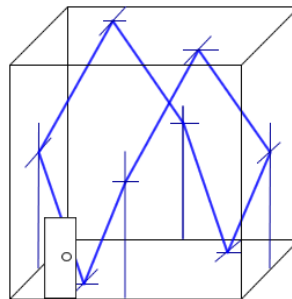


Σχήμα 5 Εφαπτομενικά modes [13]

Οι **πλάγιοι τρόποι δόνησης** εμφανίζονται όταν έχουμε ανάκλαση του ήχου και δημιουργία στάσιμων κυμάτων ανάμεσα και στους **έξι (6)** τοίχους του δωματίου ή αλλιώς και στα τρία ζεύγη παράλληλων επιφανειών. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

$$(n_x; n_y; n_z)$$

όταν δηλαδή όλοι οι n_x, n_y, n_z είναι διάφοροι του μηδενός.



Σχήμα 6 Πλάγια modes [13]

ΠΡΟΣΟΧΗ:

Σε όλους τους τρόπους δόνησης παρουσιάζονται **μέγιστα** πίεσης (κοιλίες) στις **γωνίες** του δωματίου, ενώ ενδιάμεσα έχουμε ένα πλήθος δεσμών και κοιλιών, διαφορετικό ανάλογα με τον τρόπο δόνησης.

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω περιπτώσεις έχουμε ένα πλήθος συχνοτήτων όπου έχουμε την εμφάνιση στάσιμων κυμάτων. Σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες έχουμε την εμφάνιση στάσιμων κυμάτων σε μια ελάχιστη συχνότητα και μια σειρά αρμονικών αυτής. Κοιτώντας, όμως, τις συχνότητες συντονισμού ενός χώρου στο σύνολό τους, αυτές δε σχετίζονται όλες αρμονικά μεταξύ τους. Πάντως:

Η **χαμηλότερη συχνότητα** εμφάνισης συντονισμού είναι η συχνότητα εκείνου του **αξονικού** συντονισμού για $n=1$ που αντιστοιχεί στη **μεγαλύτερη διάσταση** του χώρου, δηλαδή:

$$f_{min} = \frac{c}{2 L_{max}} \quad (7)$$

Το γεγονός ότι οι εφαιπτομενικοί και ακόμα περισσότερο οι πλάγιοι τρόποι δόνησης προκύπτουν από ανάκλαση σε περισσότερες επιφάνειες από ότι οι αξονικοί, οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι (στην περίπτωση που τα απορροφητικά υλικά είναι ισοκαταμεμημένα στο χώρο) μεγαλύτερη απορρόφηση υφίστανται οι πλάγιοι τρόποι δόνησης, στη συνέχεια οι εφαιπτομενικοί και λιγότερο από όλους οι αξονικοί. Κατά συνέπεια:

Οι αξονικοί τρόποι δόνησης τείνουν να έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από ότι οι εφαιπτομενικοί και ακόμα περισσότερο οι πλάγιοι.

Συγκεκριμένα:

- Οι εφαιπτομενικοί τρόποι δόνησης έχουν το $\frac{1}{2}$ της ενέργειας των αξονικών, άρα 3 dB χαμηλότερη στάθμη και
- Οι πλάγιοι τρόποι δόνησης έχουν το $\frac{1}{4}$ της ενέργειας των αξονικών, άρα 6 dB χαμηλότερη στάθμη.

Τρόποι δόνησης	Πλήθος ανακλάσεων	Ενέργεια	Στάθμη
Αξονικοί	2 επιφάνειες	1	0
Εφαιπτομενικοί	4 επιφάνειες	1/2	- 3 dB
Πλάγιοι	6 επιφάνειες	1/4	- 6 dB

Αυτό δεν ισχύει πάντως σε όλες τις περιπτώσεις, αφού στην περίπτωση ανώμαλης κατανομής των απορροφητικών υλικών στις διάφορες επιφάνειες ανάλογα με τα απορροφητικά υλικά του κάθε τοίχου μπορεί να τύχει ένας εφαιπτομενικός τρόπος ταλάντωσης να είναι πιο έντονος από έναν αξονικό.

Ακριβώς επειδή οι αξονικοί τρόποι δόνησης φέρουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας και είναι διακριτοί είναι και αυτοί που προκαλούν και τα μεγαλύτερα προβλήματα.

Το γεγονός ότι στους εφαιπτομενικούς τρόπους δόνησης (δύο διαστάσεις) χωρούν περισσότερα μισά μήκη κύματος από ότι στους αξονικούς για την ίδια συχνότητα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι:

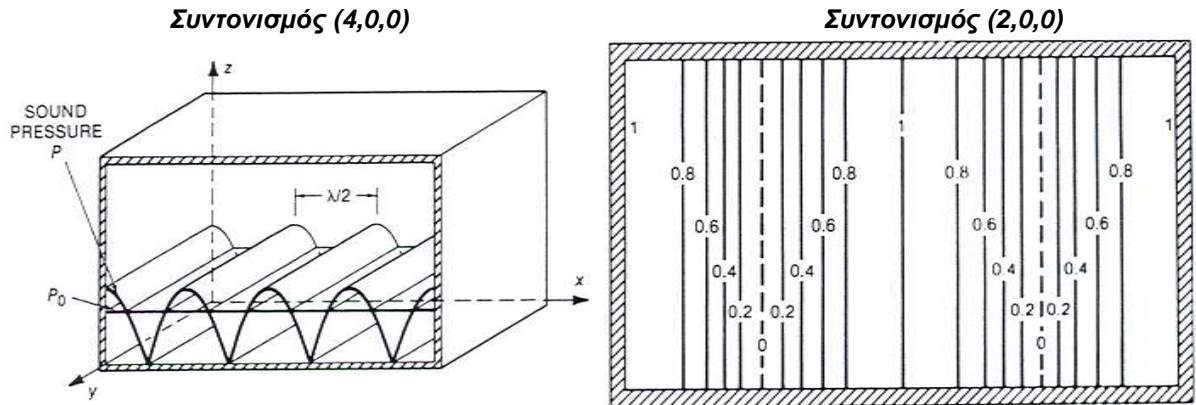
Οι συχνότητες των αξονικών τρόπων δόνησης εμφανίζονται εν γένει σε χαμηλότερες συχνότητες από ότι οι συχνότητες των εφαιπτομενικών και ακόμη περισσότερο των πλάγιων τρόπων δόνησης.

Απεικόνιση των τρόπων δόνησης στο χώρο

Κατά αντιστοιχία της περίπτωσης του μονοδιάστατου σωλήνα μπορούμε να σχεδιάσουμε και τους τρόπους δόνησης ενός τρισδιάστατου χώρου.

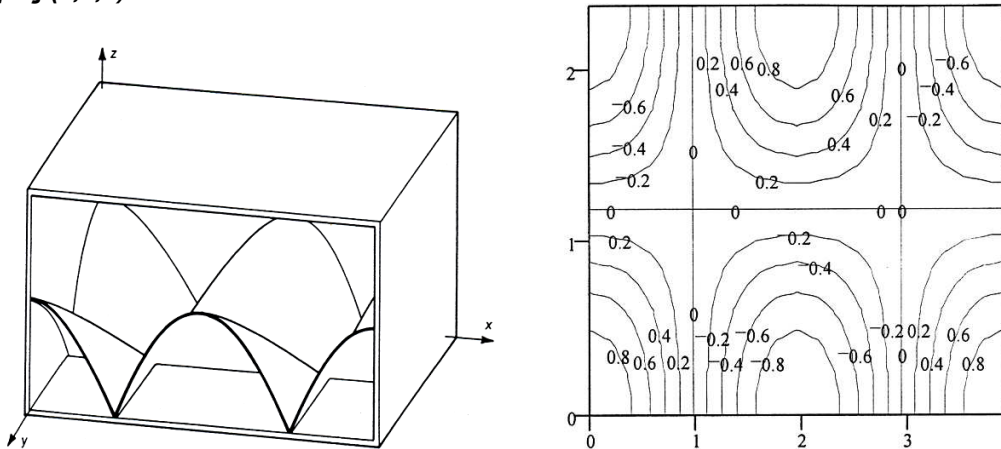
Αυτό μπορεί να γίνει είτε με ένα τρισδιάστατο σχέδιο είτε με χαρτογράφηση σε ένα δισδιάστατο σχέδιο με τη χρήση ισούψων καμπυλών (contourplots), όπως γίνεται και με τη σχεδίαση των βουνών στους γεωφυσικούς χάρτες.

Παρακάτω δίνουμε μερικά παραδείγματα για έναν παραλληλεπίπεδο χώρο με το ηχείο σε μία γωνία του:



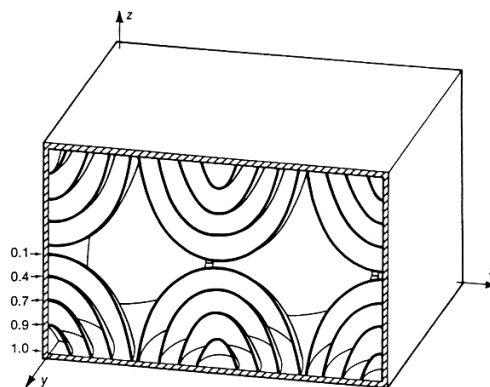
Σχήμα 7. Αξονικός τρόπος δόνησης (α) (4,0,0) - τρισδιάστατη απεικόνιση, (β) (2,0,0) - χαρτογράφηση ισούψων καμπυλών [1]

Συντονισμός (2,1,0)



Σχήμα 8 Εφαπτομενικός τρόπος δόνησης, (α) τρισδιάστατη απεικόνιση [1], (β) χαρτογράφηση ισούψων καμπυλών [10]

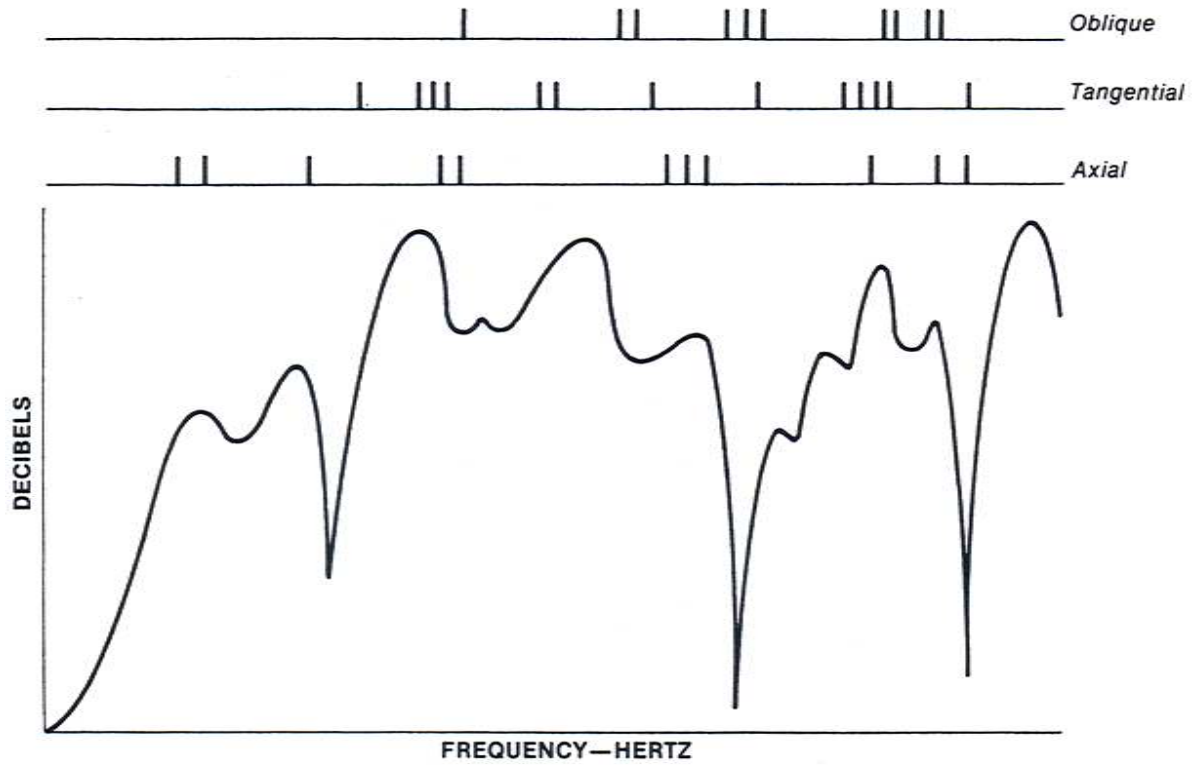
Συντονισμός (2,1,1)



Σχήμα 9 Πλάγιος τρόπος δόνησης, τρισδιάστατη απεικόνιση [1]

Απεικόνιση των συχνοτήτων των τρόπων δόνησης

Μπορούμε να σχεδιάσουμε τις συχνότητες των τρόπων δόνησης σε ένα διάγραμμα ή να αναπαραστήσουμε με απλές γραμμές σε ξεχωριστούς άξονες τις αξονικές, εφαπτομενικές και πλάγιες συχνότητες συντονισμού.



Σχήμα 10 Σχεδίαση συχνοτήτων συντονισμού [1]

Πυκνότητα τρόπων ταλάντωσης

Το πλήθος των συντονισμών ενός χώρου αυξάνεται με τη συχνότητα και τις διαστάσεις του χώρου.

(1) Εξίσωση για τον υπολογισμό του πλήθους των στάσιμων κυμάτων N ανά συχνότητα f :

$$N \cong \frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f^2}{4c^2} + \frac{L f}{8c} \quad (8)$$

όπου N το πλήθος των συντονισμών, f η συχνότητα σε Hz , c η ταχύτητα του ήχου σε m/s , V ο όγκος του χώρου σε m^3 , S η συνολική επιφάνεια και L η συνολική περιμετρική απόσταση του δωματίου.

(2) Εξίσωση για τον υπολογισμό του πλήθους των στάσιμων κυμάτων ΔN ανά ζώνη συχνοτήτων εύρους Δf κεντραρισμένου στη συχνότητα f :

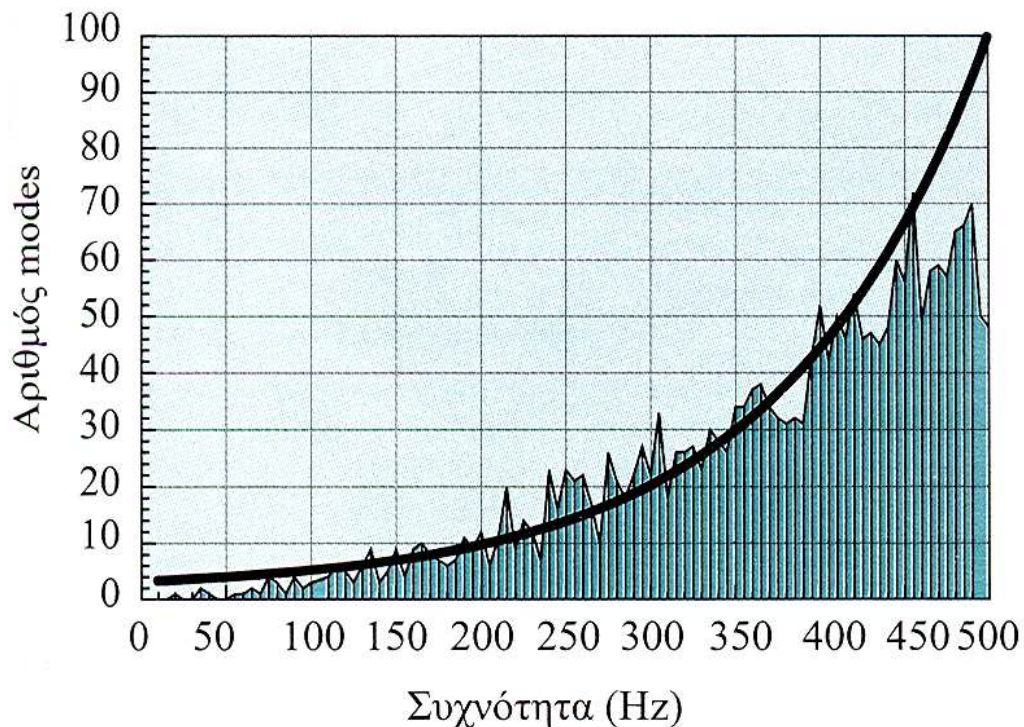
$$\Delta N \cong \left[4\pi V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi S}{2} \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8} \left(\frac{f}{c}\right) \right] \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (9)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι το πλήθος των τρόπων δόνησης ενός χώρου αυξάνεται με τη συχνότητα και τις διαστάσεις του χώρου, δηλαδή:

$$N \propto V \quad \text{και}$$

$$N \propto f^3$$

Το παρακάτω διάγραμμα δίνει το πλήθος των τρόπων δόνησης ενός χώρου συναρτήσει της συχνότητας που έχει σχηματιστεί με σταθερό εύρος ζώνης 5 Hz . Από αυτό φαίνεται καθαρά ότι το πλήθος των συντονισμών αυξάνει εκθετικά με τη συχνότητα.



Σχήμα 11 Πλήθος τρόπων ταλάντωσης συναρτήσει της συχνότητας για ζώνες σταθερού εύρους 5 Hz [8]

Επίδραση των συντονισμών στην ακουστική του χώρου

Η βασική επίδραση των στάσιμων κυμάτων στην ακουστική ενός χώρου είναι οι χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις, δηλαδή:

- (α) οι έντονες διακυμάνσεις της ηχητικής στάθμης από σημείο σε σημείο του χώρου και
- (β) η επιλεκτική ενίσχυση ή εξασθένηση συγκεκριμένων συχνοτήτων.

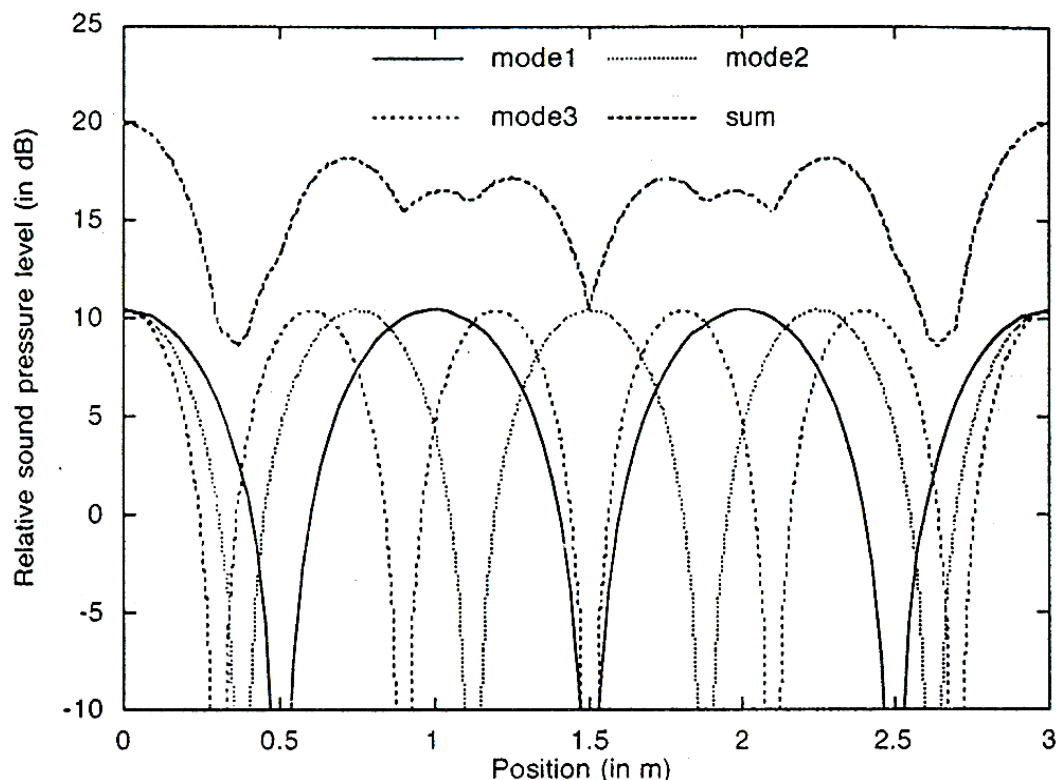
Έντονες διακυμάνσεις της στάθμης στο χώρο

Για συχνότητες της πηγής που συμπίπτουν με κάποια από τη συχνότητα συντονισμού του χώρου, ένας ακροατής που θα κινηθεί μέσα σε αυτόν θα αντιληφθεί έντονες αυξομειώσεις της στάθμης πίεσης από σημείο σε σημείο αυτού.

Όπως προαναφέραμε, οι συχνότητες εμφάνισης των τρόπων δόνησης όπως και οι σχηματισμοί τους εξαρτώνται από τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του χώρου και από τη συχνότητα του ήχου.

Από τη σχέση (8) φαίνεται ότι καθώς οι διαστάσεις ενός χώρου αυξάνονται, το πλήθος των συντονισμών στην ακουστή περιοχή του φάσματος αυξάνεται επίσης ραγδαία. Σε ένα μεγάλο δωμάτιο υπάρχουν τόσοι πολλοί συντονισμοί, που οι διακυμάνσεις της στάθμης στο χώρο δεν γίνονται πλέον αισθητές και τελικά ο χώρος εμφανίζει μια σχετικά ομαλή συχνοτική απόκριση, αν και μπορεί να εμφανίζει κάποια έμφαση ή εξασθένηση σε κάποια/ες περιορισμένη/ες συχνοτική/ές περιοχή/ές.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, με μία συχνότητα μπορούμε να διεγείρουμε περισσότερες από μία γειτονικές συχνότητες συντονισμού και να δημιουργήσουμε περισσότερα στάσιμα κύματα στον ίδιο χώρο. Το αποτέλεσμα αυτού είναι οι χωρικές διακυμάνσεις της στάθμης (όπως και οι συχνοτικές) να παρουσιάζουν έντονη ύφεση. Κάτι τέτοιο φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα, το οποίο δείχνει το αποτέλεσμα του αθροίσματος τριών γειτονικών τρόπων δόνησης που διεγέρθηκαν από κάποια συχνότητα:



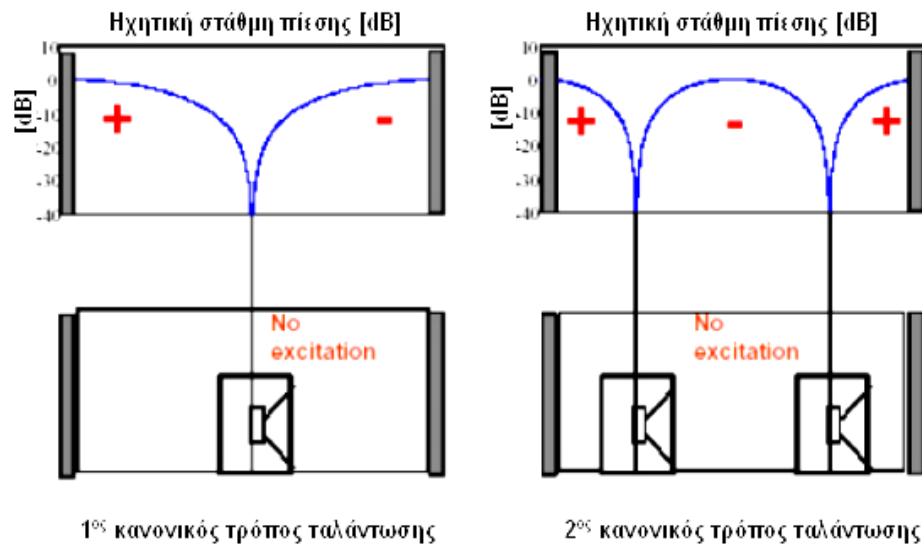
Σχήμα 12 Το χωρικό αποτέλεσμα του αθροίσματος τριών γειτονικών τρόπων δόνησης σε ένα χώρο [2]

Το αντίθετο συμβαίνει σε μικρούς χώρους, όπου διεγείρονται μεμονωμένα στάσιμα κύματα με μία συχνότητα, με αποτέλεσμα οι διακυμάνσεις που αυτά προκαλούν στην ηχητική στάθμη μέσα στο χώρο να είναι πολύ πιο έντονες.

Οι αξονικοί τρόποι δόνησης έχοντας περισσότερη ενέργεια από τους άλλους και όντας διακριτοί στο φάσμα είναι συνήθως και οι πιο αισθητοί, άρα και οι περισσότερο προβληματικοί.

Η διάταξη των δεσμών και κοιλιών των στάσιμων κυμάτων στο χώρο εξαρτάται τόσο από τον τρόπο δόνησης, δηλαδή τη συχνότητα συντονισμού, όσο και από τη γεωμετρία του χώρου (σχήμα και αναλογίες). Για παράδειγμα, η κατασκευή των κλασικών παραλληλεπίπεδων χώρων οδηγεί στην εμφάνιση συμμετρικών διατάξεων των δεσμών και κοιλιών, ενώ χώροι με ακανόνιστες διαστάσεις οδηγούν στην ακανόνιστη εμφάνισή τους, πράγμα επιθυμητό.

Οι έντονες διακυμάνσεις στο χώρο μπορούν να αποτελέσουν σοβαρό πρόβλημα και στην τοποθέτηση των ηχείων σε ένα δωμάτιο, σε περίπτωση που τύχει να πέσουμε σε θέση δεσμού, όπως στο παρακάτω σχήμα:



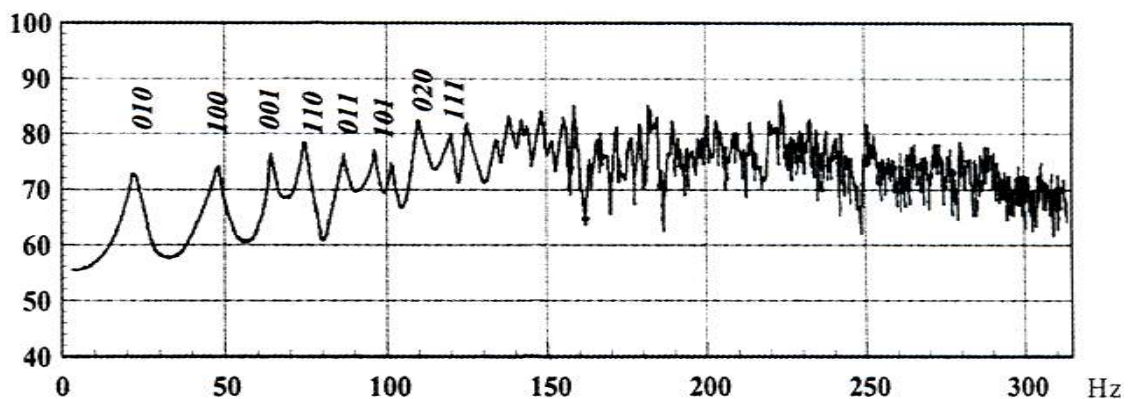
Σχήμα 13 Τοποθέτηση ηχείων σε θέσεις δεσμών [12]

Συχνοτική απόκριση δωματίου

Η παρουσία στάσιμων κυμάτων σε ένα μικρό χώρο ακρόασης, όπως είναι κατά βάση τα δωμάτια ενός σπιτιού, μπορεί να χρωματίσει τον ήχο και να μειώσει ακόμα και την απόδοση ενός πολύ καλού ηχητικού συστήματος. Κάτι τέτοιο συμβαίνει όταν οι συχνότητες συντονισμού δεν είναι ισοκαταμεμημένες στο φάσμα. Αυτό εξαρτάται από την περιοχή συχνοτήτων, την απορρόφηση του χώρου, τις διαστάσεις, τις αναλογίες και τη γεωμετρία του.

Από τη σχέση (9) είχαμε διαπιστώσει ότι το πλήθος των κανονικών τρόπων ταλάντωσης ανά σταθερό εύρος συχνοτήτων αυξάνει με τη συχνότητα. Αυτό σημαίνει, ότι στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων οι συχνότητες συντονισμού απέχουν πολύ μεταξύ τους, ενώ σε υψηλότερες συχνότητες πλησιάζουν μεταξύ τους. Από μια συγκεκριμένη συχνότητα και πάνω δημιουργούνται μάλιστα τόσοι πολλοί συντονισμοί ανά οκτάβα που είναι δύσκολο να τους διακρίνουμε. Κατά κανόνα οι συντονισμοί τείνουν να είναι προβληματικοί μέχρι περίπου τα $200 \text{ Hz} - 300 \text{ Hz}$.

Για παράδειγμα, στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η απόκριση ενός χώρου με όγκο 180 m^3 σε ήχους μέχρι περίπου 300 Hz . Στις πιο χαμηλές συχνότητες φαίνεται ότι οι τρόποι δόνησης είναι διακριτοί, που σημαίνει ότι κάθε συντονισμός διεγείρει κάποιο μεμονωμένο στάσιμο κύμα. Αν ηχήσει στο χώρο μια από αυτές τις συχνότητες, θα ενισχυθεί έντονα, ενώ οποιαδήποτε άλλη συχνότητα θα είναι ασθενική. Αντίθετα, στις υψηλότερες συχνότητες οι συχνότητες συντονισμού πλησιάζουν μεταξύ τους, έτσι ώστε από κάποιο σημείο και πέρα να μην μπορούμε πλέον να τις διακρίνουμε και ο χώρος να συμπεριφέρεται πλέον ως μεγάλος, δηλαδή το ηχητικό πεδίο να είναι διάχυτο και η μελέτη του να γίνεται με τη βοήθεια της στατιστικής ακουστικής.

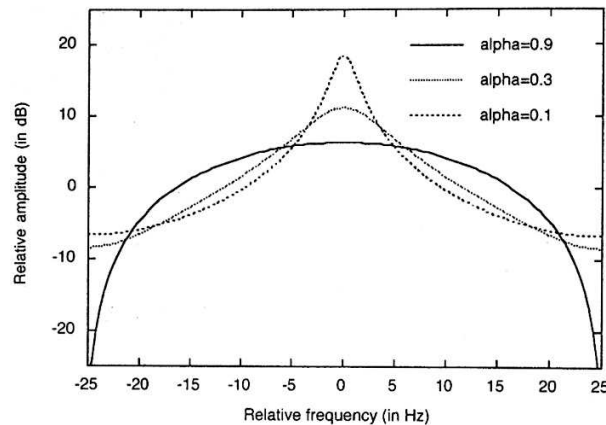


Σχήμα 14 Συμπεριφορά κλειστού χώρου σε υψηλές και χαμηλές συχνότητες [8]

Η απόκριση του δωματίου στην πραγματικότητα αποτελείται από συνδυασμένες αποκρίσεις τρόπων ταλάντωσης. Κάθε τρόπος ταλάντωσης έχει την κορυφή του στη συχνότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (6), αλλά έχει και ένα ορισμένο συχνοτικό εύρος ζώνης που εξαρτάται από το χρόνο αντήχησης ως εξής:

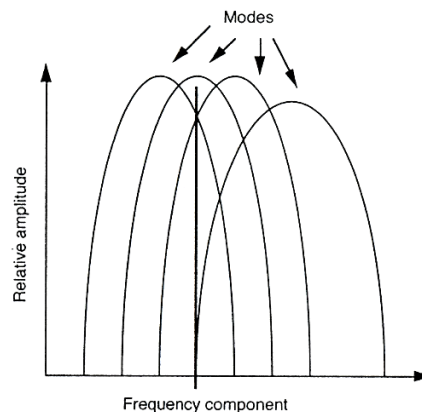
$$BW_{mode} \approx \frac{2.2}{RT_{60}} \quad (10)$$

Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος αντήχησης ή όσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση (για τη συγκεκριμένη συχνότητα), τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης του συντονισμού. Αυτό σημαίνει ότι γειτονικοί τρόποι δόνησης έχουν την τάση να υπερκαλύπτονται σε δωμάτιο με μικρό χρόνο αντήχησης.



Σχήμα 15 Συχνοτικό εύρος ζώνης τρόπων δόνησης ως προς διάφορες τιμές συντελεστή απορρόφησης [2]

Έτσι, ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων (το πλήθος των modes που διεγείρονται) και το εύρος ζώνης των συχνοτήτων συντονισμού, μία συχνότητα από μια πηγή μπορεί να διεγείρει μόνο έναν τρόπο δόνησης ή περισσότερους. Αν μια συχνότητα διεγείρει μόνο έναν τρόπο δόνησης, τότε οι συχνοτικές διακυμάνσεις θα είναι πολύ έντονες. Αν όμως αυτή η μία συχνότητα διεγείρει περισσότερους από έναν (γειτονικούς) τρόπους δόνησης, τότε οι συχνοτικές διακυμάνσεις θα μειωθούν. Για παράδειγμα, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ότι μια συχνότητα διεγείρει περισσότερες συχνότητες συντονισμού:



Σχήμα 16 Το συχνοτικό αποτέλεσμα του αθροίσματος τριών γειτονικών τρόπων δόνησης [2]

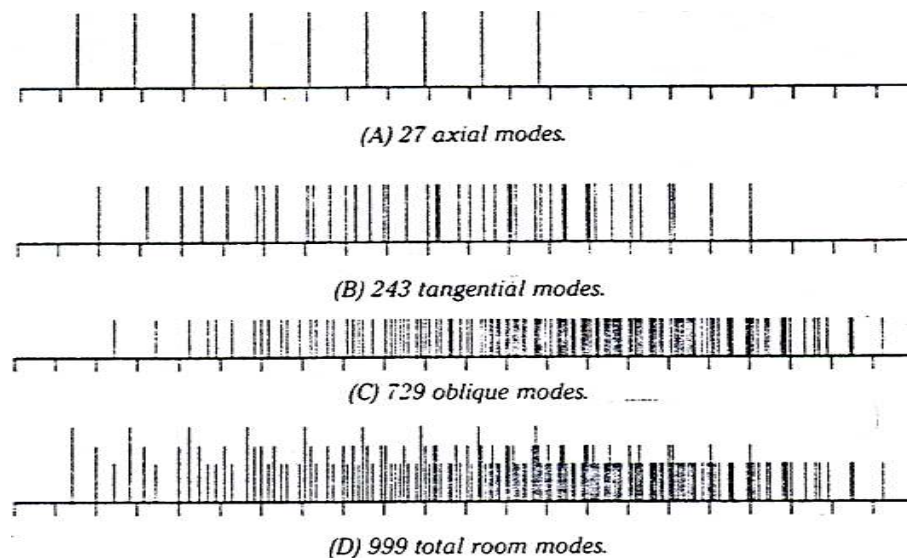
Αφού μπορούν να διεγερθούν περισσότερες συχνότητες συντονισμού σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο του χώρου, μπορεί να ενισχύονται κάποιες συχνότητες από αυτές (κοιλία) και να αποσβένονται άλλες (δεσμός). Ο συνδυασμός των παραπάνω είναι συγκεκριμένος και διαφορετικός ανάλογα με τη θέση μας στο χώρο. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικό χρωματισμό του ήχου ανάλογα με τη θέση του ακροατή, δηλαδή έντονες διακυμάνσεις και του ηχοχρώματος (εκτός της στάθμης) μέσα στο χώρο.

Ένας άλλος λόγος χρωματισμού του ήχου στις χαμηλότερες συχνότητες προέρχεται από την ιδιότητα των αξονικών στάσιμων κυμάτων να χάνουν μικρότερο μέρος της ενέργειας τους από ότι τα υπόλοιπα, λόγω λιγότερων ανακλάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να φθίνουν πιο αργά από ότι τα εφαπτομενικά και τα πλάγια και πολύ περισσότερο από τις συχνότητες που αντιστοιχούν στο διάχυτο πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι επικρατούν τα αξονικά στάσιμα κύματα σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες συχνότητες και να χρωματίζουν τον ήχο.

Η κατανομή των συχνοτήτων συντονισμού εξαρτάται επίσης από τις αναλογίες των διαστάσεων του χώρου, σύμφωνα με τη σχέση (6).

Δωμάτια με διαστάσεις που είναι ακέραια πολλαπλάσια μεταξύ τους προκαλούν την εμφάνιση κάποιων συντονισμών σε κοινές συχνότητες, με αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη ενίσχυσή των συγκεκριμένων συντονισμών, πράγμα προς αποφυγή.

Η χειρότερη περίπτωση χώρου είναι ένα κυβικό δωμάτιο, όπου δηλαδή και οι τρεις διαστάσεις του είναι ίσες. Σε αυτή την περίπτωση αρκετές συχνότητες συντονισμού συμπίπτουν επακριβώς δημιουργώντας ακόμα μεγαλύτερη ενίσχυση κάποιων συγκεκριμένων συχνοτήτων. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζουμε τις θεωρητικές συχνότητες συντονισμού ενός τέτοιου δωματίου, διαστάσεων 40 x 40 x 40 ft .



Σχήμα 17 Συχνότητες συντονισμού για τη χειρίστη περίπτωση κυβικού δωματίου, διαστάσεων 40 x 40 x 40 feet [4]

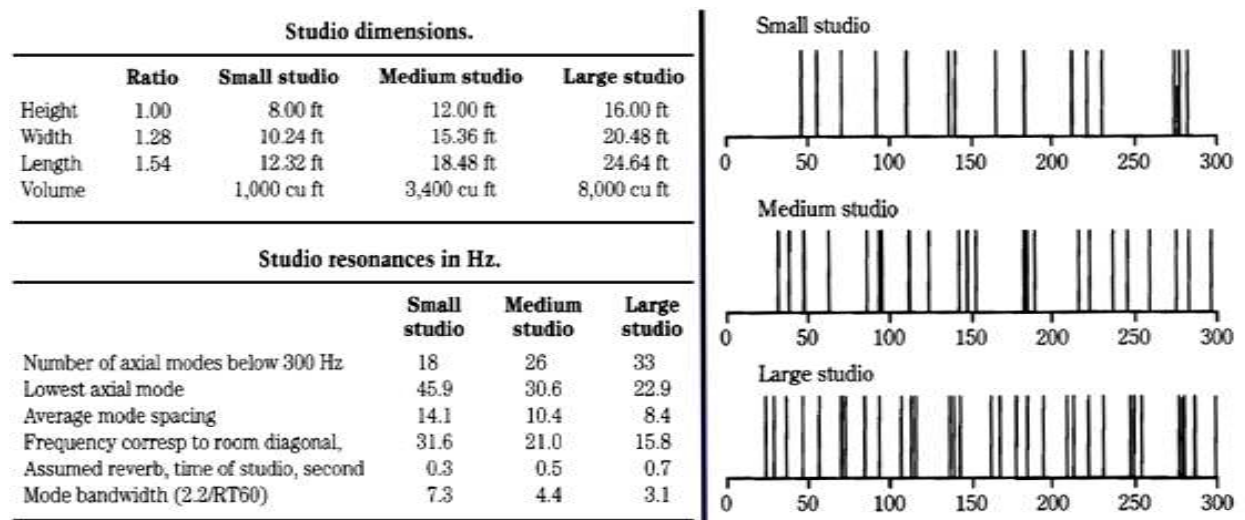
Στο παραπάνω διάγραμμα έχουμε υπολογίσει τους συντονισμούς για τη συχνοτική περιοχή: 14.13 – 220.19 Hz και για $0 < n < 9$, δηλαδή υπολογίσαμε $3 \times 9 = 27$ αξονικούς τρόπους ταλάντωσης. Παρ' όλα αυτά μπορούμε να διακρίνουμε μόνο 9 γραμμές. Οι υπόλοιπες γραμμές δε λείπουν, απλώς συμπίπτουν με αυτές που βλέπουμε. Έτσι, σχηματίζονται συχνότητες υπερβολικής ενίσχυσης και ενδιάμεσες μεγάλες περιοχές χωρίς ενίσχυση. Αν και οι υπόλοιποι τρόποι δόνησης, εφαπτομενικοί και πλάγιοι, είναι αρκετά πυκνοί, μπορούμε παρ' όλα αυτά να εξάγουμε κάποια γενικά συμπεράσματα.

Δύο χώροι με τις ίδιες αναλογίες x:y:z αλλά διαφορετικό όγκο (πολλαπλασιασμός διαστάσεων με τον ίδιο αριθμό) παρουσιάζουν τις ίδιες σχέσεις συχνοτήτων συντονισμού, αλλά με μετατόπιση ολόκληρου του φάσματος προς τις χαμηλότερες ή υψηλότερες συχνότητες ανάλογα. Για παράδειγμα, στον επόμενο πίνακα έχουμε πολλαπλάσια των διαστάσεων της περίπτωση D για βέλτιστες αναλογίες του χώρου (από αυτές που παρουσιάζουμε πιο κάτω):

Διαστάσεις (feet)			Συχνότητες συντονισμού (Hz)		Κλίμακα συχνοτήτων (Hz/υποδιαίρεση)
X	Y	Z	Υψηλές	Χαμηλές	
32.36068	20	12.36158	17.46	508.50	20
64.72136	40	24.72316	8.73	254.25	10
129.44272	80	49.44632	4.37	127.13	5

Πίνακας 1. Συντονισμοί για χώρους διαφορετικού όγκου, αλλά ίσων αναλογιών [4]

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι περιπτώσεις κάποιων studio ηχογραφήσεων, των οποίων οι διαστάσεις είναι ίσα πολλαπλάσια, δηλαδή οι αναλογίες παραμένουν οι ίδιες, αλλά αυξάνει ο όγκος:



Σχήμα 18 Συντονισμοί για χώρους διαφορετικού όγκου, αλλά ίσων αναλογιών [12]

Συχνά οι αγοραστές καλών ηχητικών συστημάτων απογοητεύονται από την απόδοσή τους όταν τα τοποθετούν στον προσωπικό τους χώρο, αφού οι έντονοι συντονισμοί στα συνηθισμένα δωμάτια ακρόασης (που δεν υπήρχαν πιθανώς στο χώρο δοκιμής του καταστήματος) προκαλούν συχνά και έντονους χρωματισμούς. Γι' αυτό το λόγο κάποια καταστήματα επιτρέπουν τη δοκιμή του συστήματος από τους καταναλωτές στο σπίτι τους.

Επίδραση στο χρόνο αντήχησης

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα των ιδιοτήτων των στάσιμων κυμάτων που αναφέρθηκαν νωρίτερα είναι το γεγονός ότι στη συχνотική ζώνη των στάσιμων κυμάτων ο χώρος δεν υποστηρίζει πλέον ένα διάχυτο πεδίο κι έτσι η μέθοδος υπολογισμού του χρόνου αντήχησης δεν έχει πλέον ισχύ σε αυτή τη συχνотική περιοχή. Εξάλλου, η εξαγωγή της σχέσης του χρόνου αντήχησης είχε γίνει με αυτή την προϋπόθεση της ύπαρξης διάχυτου πεδίου. Ακριβώς για το λόγο αυτό η έννοια του υπολογισμού του χρόνου αντήχησης σύμφωνα με αυτά που γνωρίζουμε ως τώρα δεν έχει ισχύ για τη συχνотική ζώνη των στάσιμων κυμάτων.

Εφ' όσον τα στάσιμα κύματα προσπίπτουν σε λιγότερες επιφάνειες, δεν απορροφώνται τόσο γρήγορα όσο οι συχνότητες που αντιστοιχούν στο αντηχητικό πεδίο. Η εξασθένιση της ηχητικής ενέργειας στο χώρο δεν είναι πλέον εκθετική με χρονική σταθερά ανάλογη της μέσης απορρόφησης του δωματίου. Αντίθετα, υπάρχουν διάφοροι χρόνοι εξασθένισης. Ο συντομότερος αντιστοιχεί στο διάχυτο πεδίο, ενώ ο μεγαλύτερος οφείλεται στους συντονισμούς του δωματίου, για λόγους που αναφέραμε πιο πάνω.

Οι συντονισμοί κάνουν την εμφάνισή τους σε ένα διάγραμμα RIR ως κορυφές που αποκλίνουν από την ομαλή πτώση του διάχυτου πεδίου.

Τρόποι ελέγχου των συντονισμών

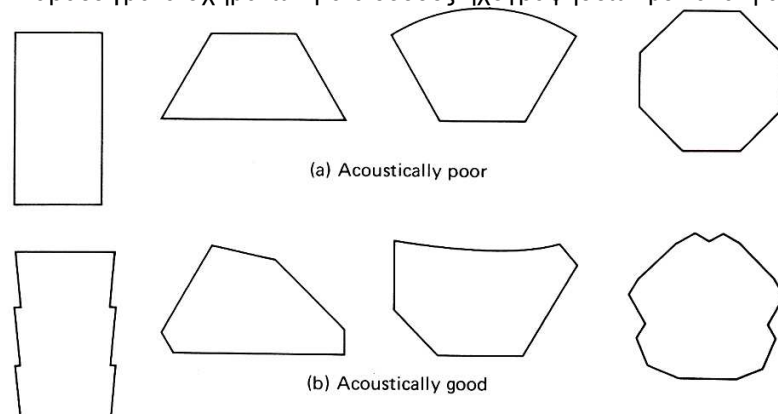
Κατάλληλες αναλογίες του χώρου

Εφ' όσον οι συντονισμοί των χαμηλών συχνοτήτων δεν μπορούν να αποφευχθούν, εκτός και αν χρησιμοποιήσουμε τελείως απορροφητικά υλικά για αυτές, ο στόχος μας κατά το σχεδιασμό ενός χώρου είναι να ελέγξουμε τουλάχιστον την επίδρασή τους μεταβάλλοντας τις αναλογίες τους με σκοπό να πετύχουμε ίσες αποστάσεις μεταξύ των συχνοτήτων.

Αν και δεν είναι πάντα δυνατόν να προσδιορίσει κανείς με μαθηματικό τρόπο το καλύτερο σχήμα και τις βέλτιστες διαστάσεις ενός χώρου βασιζόμενος στα στάσιμα κύματα, η φυσική ιδέα οδηγεί σε κάποια γενικά συμπεράσματα για τη δημιουργία ενός χώρου με καλά ακουστικά χαρακτηριστικά.

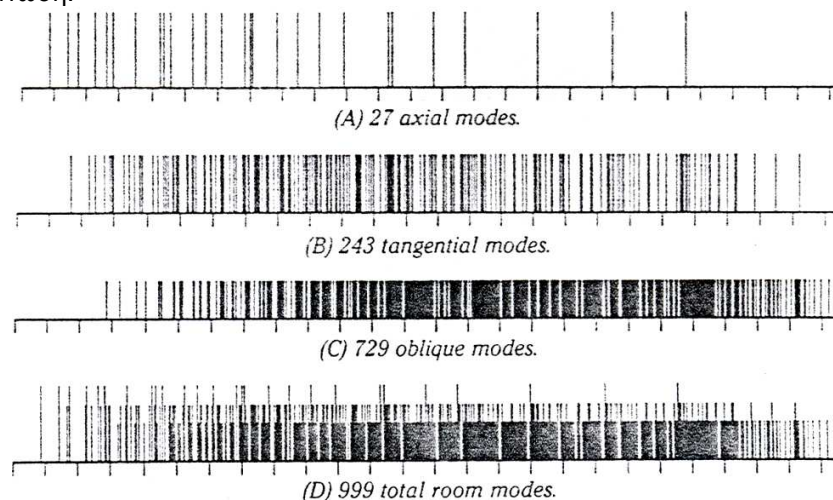
Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι για να επιτύχει κανείς μια ομοιόμορφη κατανομή στις πιθανές συχνοτήτες συντονισμού και για να δημιουργήσει την εμφάνιση όσο το δυνατόν περισσότερων από αυτές, οι κύριες διαστάσεις του χώρου **δε** θα πρέπει να είναι **ακέραια πολλαπλάσια** μεταξύ τους. Μάλιστα, ένας χώρος με ακανόνιστο σχήμα θα δημιουργήσει καλύτερη διάχυση από ένα χώρο με συμμετρία.

Τα παρακάτω είναι παραδείγματα σχημάτων για αίθουσες ηχογραφήσεων με καλά ή άσχημα ακουστικά χαρακτηριστικά:



Σχήμα 19. Σχήματα αιθουσών συναυλιών (α) κακής και (β) καλής ακουστικής [11]

Γι' αυτό ενδείκνυται η κατασκευή ακανόνιστων και μη συμμετρικών χώρων, έτσι ώστε να διασφαλίσουμε ένα φάσμα με συχνότητες συντονισμών όσο το δυνατόν πιο διάσπαρτες και ισοκατανεμημένες. Σε έναν καλοσχεδιασμένο χώρο οι συχνότητες συντονισμού θα πρέπει να κατανέμονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην προκαλούν υπερβολική ενίσχυση ή εξασθένηση κάποιου τμήματος του φάσματος, όπως είναι η παρακάτω περίπτωση:



Σχήμα 20. Συχνότητες συντονισμού για χώρο με βέλτιστες αναλογίες: 64.72136 x 40 x 24.72136 feet (D) [4]

Η σύγκριση με τη χειρίστη περίπτωση του κυβικού δωματίου (Σχήμα 15.) αποκαλύπτει τη διαφορά στα φάσματα των δύο περιπτώσεων.

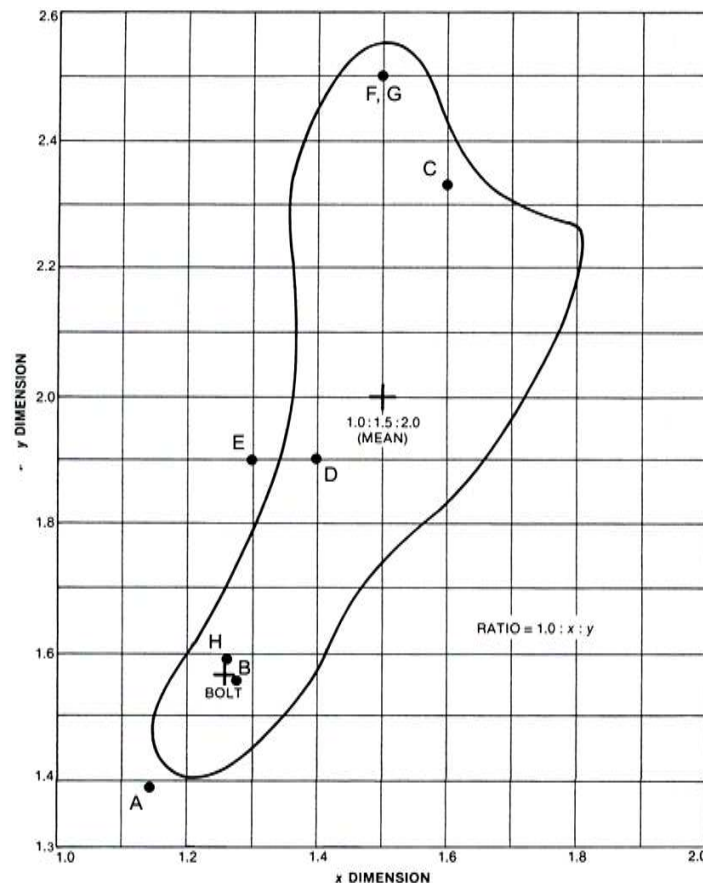
Αρκετές μελέτες έχουν γίνει για τον προσδιορισμό των βέλτιστων αναλογιών ενός χώρου και υπάρχει μια σειρά από τέτοιες προτάσεις, όπως οι παρακάτω:

		Height	Width	Length
Sepmeyer	A	1.00	1.14	1.39
	B	1.00	1.28	1.54
	C	1.00	1.60	2.33
Louden	D	1.00	1.40	1.90
	E	1.00	1.30	1.90
	F	1.00	1.50	2.50
Volkmann	G	1.00	1.50	2.50
Boner	H	1.00	$\sqrt[3]{2} = 1.26$	$\sqrt[3]{4} = 1.59$

Πίνακας 2. Διάφορες προτάσεις για βέλτιστες αναλογίες ενός χώρου [2], [4], [10]

Αυτό δε σημαίνει ότι είναι και οι μοναδικές.

Ο Bolt δίνει τις βέλτιστες αναλογίες ενός παραλληλεπίπεδου δωματίου, το οποίο έχει ηπιότερη συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες με το διάγραμμα του επόμενου σχήματος. Η περιοχή μέσα από τις διακεκομμένες γραμμές ονομάζεται «περιοχή Bolt».



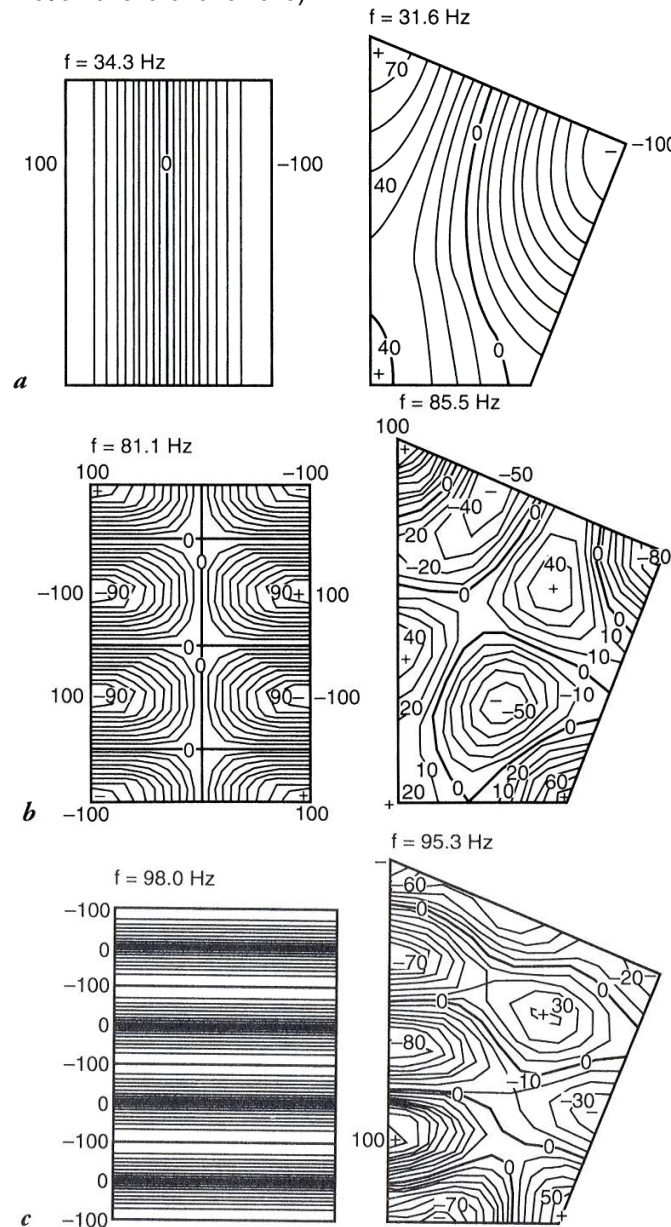
Σχήμα 21. Διάγραμμα Bolt για προτεινόμενες βέλτιστες αναλογίες διαστάσεων δωματίου [1]

Πάντως, κατά κανόνα μεγαλύτερα δωμάτια δημιουργούν πιο ευχάριστο ήχο από ότι τα μικρά. Αυτό συμβαίνει, επειδή στα μεγάλα δωμάτια οι συχνότητες συντονισμού είναι τόσο κοντά μεταξύ τους που δεν επιτρέπουν σε κάποιες συγκεκριμένες να ξεχωρίσουν. Δυστυχώς, υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος του χώρου λόγω της παραμέτρου του χρόνου αντήχησης.

Μη παράλληλοι τοίχοι

Όπως είδαμε νωρίτερα, η κατασκευή χώρων με ακανόνιστες διαστάσεις οδηγεί και στην ακανόνιστη εμφάνιση κοιλιών και δεσμών, πράγμα επιθυμητό.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ισούψεις καμπύλες των στάσιμων κυμάτων που αντιστοιχούν στους ίδιους τρόπους δόνησης (παραπλήσιες συχνότητες) για δύο δωμάτια με ίδιες διαστάσεις αλλά διαφορετικό σχήμα (ένα παραλληλεπίπεδο και ένα ακανόνιστο).

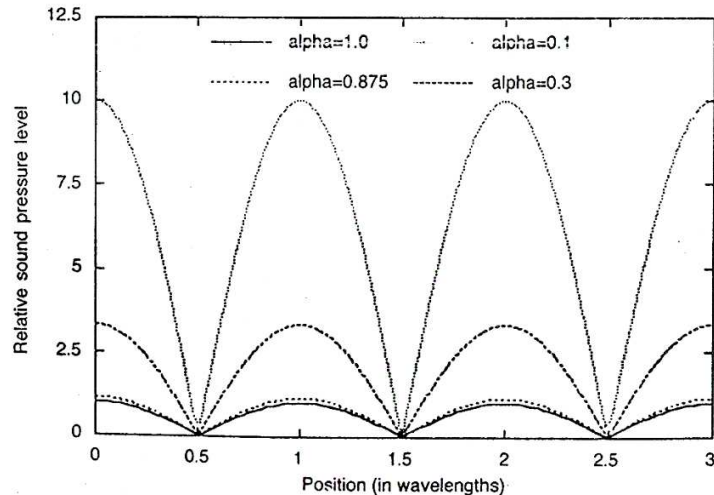


Σχήμα 22. Χαρτογράφηση Ισούψων καμπύλων για τους τρόπους δόνησης (α) (1,0,0), (β) (3,1,0) και (γ) (4,0,0) [5]

Πρέπει, βέβαια, να σημειώσουμε εδώ ότι η εμφάνιση στάσιμων κυμάτων ενυπάρχει σε κάθε χώρο. Κατασκευάζοντας ένα χώρο όπου οι τοίχοι δεν είναι παράλληλοι δεν αποφεύγουμε τη δημιουργία τους, απλώς μεταβάλλουμε το φάσμα τους, καθιστώντας μάλιστα πιο δύσκολο τον υπολογισμό των συχνοτήτων εμφάνισής τους. Άλλωστε, οι εφαιπτομενικοί και πλάγιοι τρόποι ταλάντωσης εξακολουθούν να δημιουργούνται.

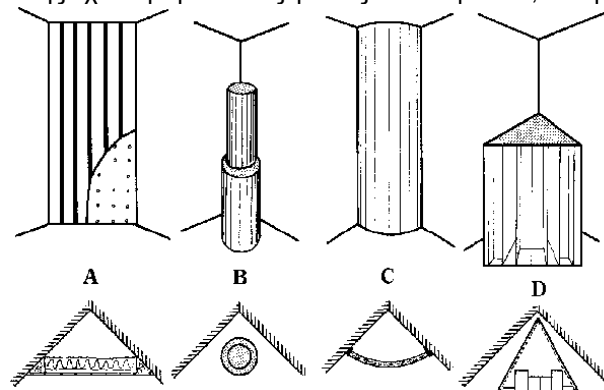
Προσθήκη ηχοαπορροφητικών υλικών χαμηλών συχνοτήτων – BASSTRAPS

Οι αξονικοί, εφαπτομενικοί και πλάγιοι τρόποι ταλάντωσης εξασθενούν με διαφορετικές ταχύτητες. Μπορούμε να μειώσουμε τη στάθμη κάποιου τρόπου ταλάντωσης χρησιμοποιώντας κάποιο απορροφητικό υλικό για τη συχνότητα που μας ενδιαφέρει.



Σχήμα 23. Χωρικές διακυμάνσεις της ηχητικής στάθμης των modes για διάφορες τιμές συντελεστή απορρόφησης [2]

Αυτό θα πρέπει να τοποθετηθεί σε επιφάνειες κοντά στις οποίες η πίεση δεδομένου τρόπου ταλάντωσης είναι μεγάλη, αν θέλουμε να είναι αποτελεσματικό στην απορρόφηση αυτού του τρόπου ταλάντωσης. Εφ' όσον όλοι οι τρόποι ταλάντωσης έχουν μέγιστα στις γωνίες του δωματίου, αυτή είναι και η συνήθης επιλογή.



Σχήμα 23. Basstraps [12]

Περαιτέρω διάχυση του ήχου μπορούμε να επιτύχουμε με μια ακανόνιστη κατανομή των απορροφητικών υλικών στο χώρο, αλλά η υπερβολή αυτού μπορεί να οδηγήσει στο εξίσου μη επιθυμητό αποτέλεσμα της έντονης μείωσης της ηχητικής στάθμης κοντά στα απορροφητικά υλικά και την αύξησή της σε άλλα σημεία του χώρου.

Απορρόφηση χώρου

Αυξάνοντας το εύρος της ζώνης κάθε τρόπου δόνησης μπορούμε να πετύχουμε καλύτερη επικάλυψη των γειτονικών συντονισμών, πράγμα επιθυμητό, ώστε οι διαφορές στις στάθμες των διαφόρων συχνοτήτων να μειωθούν και να λάβουμε ένα πιο ομαλό και ισοκατανεμημένο συχνотικό αποτέλεσμα, χωρίς ενίσχυση συγκεκριμένων συχνοτικών περιοχών (δηλαδή χρωματισμό). Σύμφωνα με τη σχέση (10) αυτό το επιτυγχάνουμε ανάλογα με τη συχνотική περιοχή με αύξηση της απορρόφησης του χώρου.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Davis D., Davis C. (1997), "Sound system engineering"
- [2] Howard D., Angus J. (1996), "Acoustics and Psychoacoustics"
- [3] Everest A. F. (1998), "Εγχειρίδιο ακουστικής"
- [4] Woram J. (1989), "Sound Recording Handbook"
- [5] Huber M. D., Runstein R. E. (1997), "Modern Recording Techniques"
- [6] Everest A. F. (1997), "Sound Studio Construction on a Budget"
- [7] Rumsey F., McCormick T. (2002), "Sound and Recording"
- [8] Σκαρλάτος Δ. (2003), "Εφαρμοσμένη ακουστική"
- [9] Rossing T., Moore R., Wheeler P. (2002). "The science of sound"
- [10] Κουτσοδημάκης Χ., Σηφάκης Μ., "Εργαστηριακό Φυλλάδιο Μηχανικής Ήχου Ι"
- [11] Porges G. (1977), "Applied acoustics"
- [12] Bistafa S. R. (2002), "Acoustics of small rooms", *First Pan-American Iberian Meeting on Acoustics* Cancun, Mexico, at www.acoustics.org/smallrooms.pdf
- [13] Wiczorek M. (2006), "Acoustics Crash Course 1 – Modes", at <http://www.marktaw.com/recording/Acoustics/AcousticsCrashCourse1-Mod.html>

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΡΟΣ

Είναι πολύ εύκολο να ακούσουμε τους τρόπους ταλάντωσης ενός χώρου, εάν παράξουμε έναν καθαρό τόνο από μια γεννήτρια, τοποθετήσουμε το ηχείο σε μια από τις γωνίες του δωματίου (αφού γνωρίζουμε ότι εκεί έχουμε μέγιστο) και μετακινηθούμε μέσα στο χώρο. Σε συγκεκριμένες συχνότητες που συμπίπτουν με τις συχνότητες συντονισμού του δωματίου θα διαπιστώσουμε ότι σε άλλα σημεία ενισχύεται έντονα ο ήχος, ενώ σε άλλα μειώνεται.

Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές
- Σχήμα (να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)

Πειραματική διαδικασία

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάθους (backgroundnoise) της αίθουσας: $B = \dots\dots\dots dB$.
3. Να μετρηθούν οι διαστάσεις της αίθουσας του εργαστηρίου.
4. Να υπολογιστούν οι ιδιοσυχνότητες των εφαπτομενικών στάσιμων κυμάτων (1,0,0), (0,1,0), (1,1,0), (1,2,0) και (2,1,0).
5. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, τοποθετείστε την ιδιοσυχνότητα $f_{(2,1,0)} = \dots\dots Hz$ στη γεννήτρια συχνοτήτων (σε μία γωνία της αίθουσας) και λάβετε μετρήσεις στάθμης ηχητικής πίεσης σε ένα πλέγμα 45 σημείων του δωματίου.

Θέση (m;m)	(0;0)	(0;0,78)	(0;1,56)	(0;2,35)	(0;3,13)	(0;3,91)	(0;4,69)	(0;5,48)	(0;6,26)
(0;0)									
(1,21;0)									
(2,42;0)									
(3,64;0)									
(4,85;0)									

Επεξεργασία μετρήσεων

1. Να περιγράψετε το φαινόμενο των στάσιμων κυμάτων για την περίπτωση της παραπάνω ιδιοσυχνότητας.
2. Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις να σχεδιάσετε τις ~~ισοφασικές~~ ~~ισοφασικές~~ καμπύλες για την αίθουσα και τη συγκεκριμένη συχνότητα. Συμφωνούν εν γένει με τις θεωρητικά αναμενόμενες; Πού πιστεύετε ότι οφείλονται τυχούσες αποκλίσεις;

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ Ι

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ

Σηφάκης Μηνάς
Έκδοση 1.0- 12/2006

Περίληψη

Σκοπός του εργαστηρίου είναι επίδειξη της μεθοδολογίας που ακολουθείται για τη μέτρηση, σε περιβάλλον αντηχητικού πεδίου, της εκπεμπόμενης ηχητικής ισχύος μιας ηχητικής πηγής. Στα πλαίσια του εργαστηρίου θα γίνει αναφορά στις διάφορες μεθόδους μέτρησης και θα σχολιαστούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Ως εφαρμογή της μεθόδου θα πραγματοποιηθεί, στο χώρο του εργαστηρίου, εκτίμηση ηχητικής ισχύος οικιακής συσκευής.

Θεωρητική Εισαγωγή 1.

Γενικά

Η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση διεθνώς για θέματα που σχετίζονται με το θόρυβο οδήγησαν την ευρωπαϊκή ένωση (αλλά και τα κράτη μέλη ανεξάρτητα) στην έκδοση μιας σειράς κανονισμών και οδηγιών, η εφαρμογή των οποίων είναι υποχρεωτική, που καθορίζουν την μέγιστη επιτρεπτή έκθεση των ανθρώπων στο θόρυβο τόσο στο εργασιακό και οικιακό περιβάλλον όσο και στις υπόλοιπες εκδηλώσεις της κοινωνικής τους ζωής.

Προκειμένου να ελεγχθεί η συμμόρφωση οποιασδήποτε νέας εγκατάστασης (λ.χ. εγκαταστάσεις αναψυχής, βιομηχανικές, τουριστικές, κλπ) προς τις εν λόγω οδηγίες, είναι συνήθως κατ' ελάχιστον απαραίτητος ο υπολογισμός της συνολικής στάθμης ηχητικής πίεσης που θα προκληθεί από την εγκατάσταση.

Το βασικό στοιχείο που απαιτείται για την εκπόνηση των παραπάνω υπολογισμών είναι η γνώση του φάσματος εκπομπής της πηγής. Όταν είναι γνωστή η ηχητική ισχύς που εκπέμπει κάποια ηχητική πηγή είναι στη συνέχεια σχετικά εύκολο να προσδιοριστεί η στάθμη ηχητικής πίεσης σε οποιοδήποτε θέση σε απόσταση από την πηγή, τόσο σε ανοικτό όσο και σε κλειστό χώρο (προκειμένου για παντοκατευθυντικές πηγές, σε διαφορετική περίπτωση είναι απαραίτητη είναι και η γνώση της γωνιακής κατευθυντικότητας).

Προς διευκόλυνση των παραπάνω με την κοινοτική οδηγία 2000/14/ΕΚ με ημερομηνία επικύρωσης 8/05/2000 καθορίστηκε ότι όλα τα μηχανήματα που προορίζονται για χρήση ή τοποθέτηση σε εξωτερικούς χώρους και πωλούνται ή κατασκευάζονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση θα πρέπει μαζί με τη σήμανση CE να αναγράφεται και την εκπεμπόμενη στάθμη ηχητικής ισχύος.

2. Μέθοδοι-Κανονισμοί για τη Μέτρηση της Ηχητικής Ισχύος

Οι μέθοδοι μέτρησης της ηχητικής ισχύος ηχητικής πηγής χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Μετρήσεις βασιζόμενες στην μέτρηση της ηχητική πίεση

Με χρήση ηχόμετρου ακριβείας (κατηγορίας I, ή II ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια και τον τύπο της μέτρησης) μετράται η στάθμη ηχητικής πίεσης που προκαλεί η πηγή σε καθορισμένες θέσεις στην επιφάνεια μιας φανταστικής επιφάνειας σε συγκεκριμένη απόσταση από την πηγή.

Οι βασικές υπο-κατηγορίες αυτού του τύπου μετρήσεων είναι:

1.1. Μετρήσεις σε ανηχοϊκό θάλαμο

1.2. Μετρήσεις σε θάλαμο αντήχησης

1.3. Μετρήσεις σε ελεύθερο/ημιανηχοϊκό πεδίο (δλ με μια μόνο ανακλαστική επιφάνεια - το έδαφος)

1.4. Μετρήσεις πεδίου – σε ημιαντηχητικό πεδίο (δλ σε κανονικούς χώρους)

2. Μετρήσεις βασιζόμενες στην μέτρηση του διανύσματος της ηχητικής έντασης

Με χρήση ειδικού οργάνου μέτρησης του διανύσματος της ηχητικής έντασης (αποτελείται από ζεύγος μικροφώνων με συγκεκριμένη φασική εξάρτηση σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και ειδικό λογισμικό επεξεργασίας) μετράται το διάνυσμα (πλάτος, φάση, κατεύθυνση) στην επιφάνεια μιας φανταστικής επιφάνειας και σε συγκεκριμένη απόσταση από την πηγή

Ανάλογα με την ακρίβεια των μετρήσεων διακρίνουμε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Μετρήσεις υψηλής ακριβείας

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται οι μετρήσεις σε ανηχοϊκό και ημι-ανηχοϊκό θάλαμο καθώς επίσης και η μετρήσεις με χρήση του διανύσματος της έντασης (μετρήσεις με κωδικοποίηση 1.1, 1.3, 2 παραπάνω) – εφόσον ο χώρος μέτρησης και τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιηθούν ικανοποιούν τις απαιτήσεις της κατηγορίας υψηλής ακριβείας.

2. Μετρήσεις μετρίας ακριβείας (γνωστές και ως engineering methods)

Σε αυτήν την κατηγορία υπάγονται οι μετρήσεις σε αντηχητικό (1.2) και ημι-αντηχητικό πεδίο (1.4). Συνήθως πραγματοποιούνται με όργανα της κατηγορίας υψηλής ακριβείας (I) αν και σε αρκετές περιπτώσεις επιτρέπεται και η χρήση οργάνων κατηγορίας κανονικής ακριβείας (II).

3. Μετρήσεις εκτίμησης.

Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται επιτόπου στο χώρο τοποθέτησης της ηχητικής πηγής (τύπου 1.4, παραπάνω) και παρέχουν μια ένδειξη της ακτινοβολούμενης ηχητικής ενέργειας. Πραγματοποιούνται συνήθως με όργανα κατηγορίας κανονικής ακριβείας (II).

Στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση θα ασχοληθούμε με μετρήσεις τύπου 2, δηλαδή μετρήσεις μετρίας ακριβείας. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις υπόλοιπες μεθόδους οι αναγνώστες παραπέμπονται στα αντίστοιχα πρότυπα και οδηγίες (βλ. βιβλιογραφία παρακάτω).

Πέραν από τις παραπάνω γενικές μεθόδους - κανονισμούς έχουν ενσωματωθεί στην Ελληνική νομοθεσία και κάποιοι εξειδικευμένοι κανονισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης (για συγκεκριμένους τύπους ηχητικών πηγών ιδιαίτερου δημοσίου ενδιαφέροντος) οι οποίοι έχουν την ισχύ νόμου του Ελληνικού κράτους και κατ' επέκταση η τήρησή τους είναι υποχρεωτική σε κάθε αντίστοιχη περίπτωση.

Επί της ουσίας οι εν λόγω μέθοδοι δεν αποτελούν παρά παραλλαγές των παραπάνω γενικών μεθόδων τροποποιημένων ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και συνθήκες λειτουργίας κάποιων ηχητικών πηγών ειδικού ενδιαφέροντος για το κοινό (λ.χ. εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε εργοστάσια).

Ενδεικτικά και όχι περιοριστικά αναφέρονται οι κυριότεροι εξ' αυτών:

ΦΕΚ 570-09/09/1986 «Καθορισμός Ηχητικής Εκπομπής Μηχανημάτων και Συσκευών Εργοταξίων»

ΦΕΚ 751-18/10/1988 «Έγκριση τύπου ΕΟΚ για το θόρυβο Μηχανημάτων Εργοταξίου»

ΦΕΚ 532B-18/08/92 «ΚΥΑ περί μέτρων για τον περιορισμό της ηχορύπανσης που προέρχεται από Μοτοσικλές σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις των Οδηγιών 78/1015/ΕΟΚ, 87/56/ΕΟΚ και 89/235/ΕΟΚ» και ΦΕΚ 295B- 11/04/1997 «Τροποποίηση της υπ' αριθμ. 765/91 - ΦΕΚ 81/Β Υπ. Αποφ. Για τον περιορισμό του θορύβου των υδραυλικών πτύων με καλώδια, των προωθητών γαιών, των φορτωτών και των φορτωτών- εκσκαφέων, σε συμμόρφωση με την οδηγία 95/27/ΕΚ» Αναφέρεται σε αποδεκτές ηχητικές στάθμες, εγκρίσεις τύπου ΕΟΚ, μεθόδους μέτρησης κλπ

ΦΕΚ 523B- 13/07/93 «ΚΥΑ για τιμές αποδεκτής ηχοστάθμης οχημάτων - συμμόρφωση με διατάξεις της οδηγίας 92/97/ΕΟΚ» και ΦΕΚ 79B- 7/02/1997 «Τροποποίηση της ΚΥΑ 25006/2234 - ΦΕΚ 523/Β/97 για τιμές αποδεκτής ηχοστάθμης οχημάτων - συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 70/157/ΕΟΚ περί προσεγγίσεως των νομοθεσιών των κρατών - μελών» Αναφέρεται σε αποδεκτές ηχητικές στάθμες, εγκρίσεις τύπου ΕΟΚ, μεθόδους μέτρησης κλπ

3. Μέτρηση της Ηχητικής Ισχύος Πηγής σε Ημιαντιχητικό Πεδίο

3.1. Γενικά

Η εν λόγω μέθοδο περιγράφεται αναλυτικά στο ISO 3743-1 (βλ. βιβλιογραφία παρακάτω) και παρουσιάζεται εδώ διότι έχει άμεση εφαρμογή στο πλείστο των περιπτώσεων που απαντώνται στην πράξη. Ουσιαστικά πρόκειται για μια μέθοδο εκτίμησης (με ικανοποιητική σε γενικές γραμμές ακρίβεια) της ηχητικής ισχύος μιας μικρής φορητής ηχητικής πηγής τοποθετώντας την απλώς σε ένα κλειστό χώρο και λαμβάνοντας μετρήσεις της ηχητικής πίεσης που προκαλεί η πηγή.

Κατά τις μετρήσεις η πηγή θα πρέπει να τοποθετηθεί σε θέση αντίστοιχη αυτής που αντιστοιχεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και να λειτουργήσει στο κανονικό φορτίο λειτουργίας της. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατόν προτείνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων σε λίγο πολύ οριακές συνθήκες ούτως ώστε να καλυφθούν οι άκρες τιμές λειτουργίας. Πιθανές τέτοιες συνθήκες είναι:

1. Λειτουργίας άνευ φορτίου
2. Λειτουργία σε πλήρες φορτίο
3. Λειτουργία με εξομοίωση του φορτίου που αναμένεται στη συγκεκριμένη εφαρμογή
4. Λειτουργία υπό συνθήκες μεγίστων ηχητικών εκπομπών (εφόσον διαφέρουν από τις 1-2)

3.2. Γεωμετρικός Χαρακτηρισμός Ηχητικής Πηγής: Ορθογώνιο Αναφοράς – Χαρακτηριστική Διάσταση

Δεδομένου ότι μια ηχητική πηγή μπορεί να έχει γενικά ακανόνιστο σχήμα (π.χ. ένας συμπίεστης ή ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος) και προκειμένου να υπάρχει μια κοινή βάση αναφοράς όλες οι πηγές μοντελοποιούνται ως ορθογώνια παραλληλεπίπεδα.

Δημιουργούμε δηλαδή ένα φανταστικό «κουτί» που περιβάλλει πλήρως την ηχητική πηγή και το οποίο ονομάζουμε *ορθογώνιο αναφοράς* της ηχητικής πηγής (βλ και σχήμα I παρακάτω).

Οι μετρήσεις της ηχητικής πίεσης λαμβάνονται σε συγκεκριμένες αποστάσεις από το ορθογώνιο αναφοράς, λαμβάνοντας πάντα υπόψη και τους εκάστοτε χωρικούς περιορισμούς (οριακές επιφάνειες του χώρου - βλ παρακάτω).

Ο χαρακτηρισμός της ηχητικής πηγής ως προς της φυσικές της διαστάσεις πραγματοποιείται με τον υπολογισμό της *χαρακτηριστικής της διάστασης* (d_o) και εξάγεται από τις διαστάσεις του παραλληλεπίπεδου μέτρησης και της συνθήκες τοποθέτησης της ηχητικής πηγής στο χώρο (ήτοι τη γειτνίαση της με ανακλαστικές επιφάνειες). Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

1. Πηγή τοποθετημένη σε μία ανακλαστική επιφάνεια (λ.χ. στο δάπεδο)

$$d_o = \sqrt{(l_1/2)^2 + (l_2/2)^2 + (l_3)^2}$$

2. Πηγή τοποθετημένη σε γωνία μεταξύ δύο ανακλαστικών επιφανειών (λ.χ. στο δάπεδο/οροφή δίπλα σε ένα πλευρικό τοίχο)

$$d_o = \sqrt{(l_1/2)^2 + (l_2)^2 + (l_3)^2}$$

3. Πηγή τοποθετημένη σε γωνία μεταξύ τριών ανακλαστικών επιφανειών (λ.χ. στο δάπεδο/οροφή και δίπλα σε γωνία δύο τοίχων)

$$d_o = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}$$

3.3. Επιλογή Θέσεων Μέτρησης

Έχοντας καθορίσει το ορθογώνιο αναφοράς και τη χαρακτηριστική διάσταση της πηγής καθορίζεται η «*επιφάνεια μέτρησης*» (βλ σχήμα II) η οποία είναι μια φανταστική επιφάνεια η οποία περιβάλλει το ορθογώνιο αναφοράς της πηγής και επί της οποίας πραγματοποιούνται οι μετρήσεις ηχητικής πίεσης.

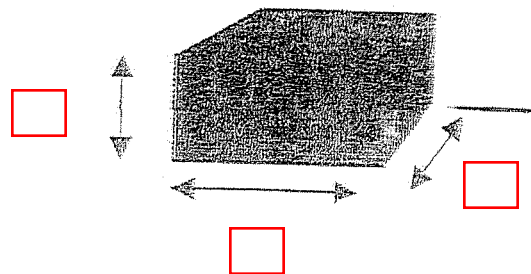
Η επιφάνεια μέτρησης δύναται να είναι ημισφαιρική ή παραλληλεπίπεδο. Στη παρούσα εργαστηριακή άσκηση θα ασχοληθούμε με παραλληλεπίπεδη επιφάνεια μέτρησης επειδή είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη στην πράξη.

Η επιφάνεια μέτρησης πρέπει να απέχει συγκεκριμένη απόσταση $d = (0.15, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 \text{ m})$ από την επιφάνεια αναφοράς. Η τιμή του d επιλέγεται στην πράξη ανάλογα με τις διαστάσεις της πηγής, το συχνотικό εύρος των μετρήσεων και τους περιορισμούς του χώρου στον οποίο είναι τοποθετημένη η ηχητική πηγή. Γενικά συνιστάται η απόσταση αυτή να είναι εκτός των ορίων τους εγγύτατου πεδίου (near field) της ηχητικής πηγής, ήτοι σε αποστάσεις μεγαλύτερες από:

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi}, \quad r \gg l, \quad r \gg \frac{\pi l^2}{2\lambda}$$

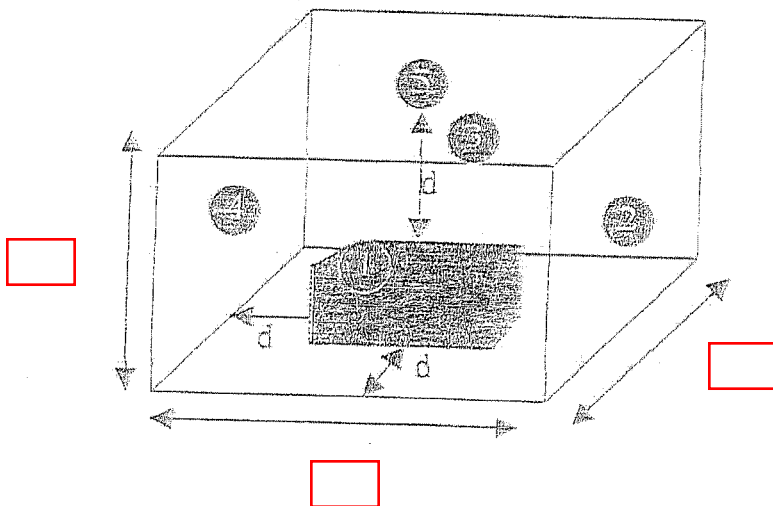
Όπου: λ το μήκος κύματος του ήχου στην συγκεκριμένη συχνότητα
 l η μεγαλύτερη διάσταση της ηχητικής πηγής

Προκειμένου για ηχητικές πηγές μικρών διαστάσεων ($d_0 < 1m$) πραγματοποιείται από μία μέτρηση στο κέντρο κάθε πλευρικής επιφάνειας μέτρησης. Για μεγαλύτερες πηγές η κάθε πλευρική επιφάνεια χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα στο κέντρο κάθε ενός από τα οποία λαμβάνεται από μια μέτρηση. Εναλλακτικά, και εφόσον η πηγή εκπέμπει κατά τρόπο στατιστικά ομοιόμορφο δύναται να πραγματοποιηθεί συνεχής σάρωση της κάθε επιμέρους επιφάνειας με το ηχώμετρο (κινούμενο με σταθερή και μικρή ταχύτητα κίνησης - όχι μεγαλύτερη από $0,1m/s$) και να ληφθεί έτσι ο χωρικός μέσος όρος της ηχητικής πίεσης στην επιφάνεια μέτρησης.



Σχήμα I

Επιφάνεια αναφοράς ηχητικής πηγής



Σχήμα II

Παράλληλεπιπέδη επιφάνεια μέτρησης ηχητικής πηγής επί αναιχλαστικού επιπέδου

3.4. Μεθοδολογία Μέτρησης

Με την πηγή εκτός λειτουργίας μετριέται ο θόρυβος βάθους (συμβολισμός $L_{B,i}$) σε κάθε επιμέρους θέση μέτρησης (συμβολισμός, i).

Τίθεται η πηγή σε λειτουργία και επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις ($L_{s,i}$).

Από τις επιμέρους μετρήσεις υπολογίζεται η μέση στάθμη ηχητικής πίεσης σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$L_B = 10 \text{ LOG } [\sum (10^{L_{B,i}/10}) / N]$$

, για το θόρυβο βάθους και

$$L_s = 10 \text{ LOG } [\sum (10^{L_{s,i}/10}) / N]$$

, για τη στάθμη που προκαλείται από την ηχητική πηγή.

- Όπου: L_s η στάθμη ηχητικής πίεσης της πηγής που μετρήθηκε
 L_B η στάθμη ηχητικής πίεσης του θορύβου βάθους
 N το πλήθος των σημείων μέτρησης

Εφόσον σε οποιαδήποτε συχνотική περιοχή η διαφορά (ΔL) μεταξύ της μετρούμενης μέσης στάθμης ηχητικής πίεσης από τη στάθμη του θορύβου βάθους είναι μικρότερη από 9dB τότε πρέπει να πραγματοποιηθεί διόρθωση των μετρήσεων για την απαλοιφή της επίδρασης του θορύβου. Σημειώνεται ότι αν σε κάποια συχνотική περιοχή η διαφορά αυτή είναι μικρότερη ή ίση με 3dB η μέτρηση θεωρείται ανακριβείς και πρέπει να επαναληφθεί.

Η διόρθωση για το θόρυβο βάθους βασίζεται στην υπόθεση ότι ο θόρυβος που εκπέμπεται από την προς μέτρηση ηχητική πηγή και ο θόρυβος βάθους είναι μεταξύ τους μεγέθη στατιστικά ανεξάρτητα (υπόθεση η οποία είναι έγκυρη για το πλείστο των περιπτώσεων). Υπό αυτούς τους όρους και σύμφωνα με όσα διδάχθηκαν στην αντίστοιχη εργαστηριακή άσκηση της Μηχανικής Ηχου I (εργαστηριακή άσκηση Νο2 «Μέτρηση Ηχητικής Πίεσης») δύναται να χρησιμοποιηθεί η σχέση για την αφαίρεση ηχητικών πηγών.

$$L_{s-cor} = 10 \text{ LOG} (10^{-L_s/10} - 10^{-L_B/10})$$

Όπου: L_s η στάθμη ηχητικής πίεσης της πηγής που μετρήθηκε
 L_B η στάθμη ηχητικής πίεσης του θορύβου βάθους
 L_{s-cor} η στάθμη ηχητικής πίεσης της ηχητικής πηγής διορθωμένη για την επίδραση του θορύβου βάθους

Η εκπεμπόμενη στάθμη ηχητικής ισχύος της ηχητικής πηγής υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$L_{ws} = L_{s-cor} - 10 \text{ LOG} (1 + 4 S/A) + 10 \text{ LOG} (S/S_0)$$

Όπου: L_{ws} η στάθμη ηχητικής ισχύος της πηγής (σε dB SWL)
 L_{s-cor} η στάθμη ηχητικής πίεσης της ηχητικής πηγής διορθωμένη για την επίδραση του θορύβου βάθους (σε dB SPL)
 A η συνολική απορρόφηση του χώρου μέτρησης (σε Sabin)
 S το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας μέτρησης (σε m^2)
 S_0 η επιφάνεια αναφοράς,

Παρατήρηση: Προκειμένου να θεωρείται έγκυρη μια μέτρηση αυτού του τύπου απαιτείται η καταγραφή από τον εκτελούντα τη μέτρηση των παρακάτω στοιχείων:

1. Χώρος Μέτρησης: Διαστάσεις χώρου, χαρακτηριστικά (υφή - υλικά κατασκευής των διαφόρων επιφανειών), χρόνος αντήχησης, σκαρίφημα (όπου θα απεικονίζεται και η θέση της πηγής)
2. Όργανα Μέτρησης: Κατηγορία ακριβείας οργάνου, τύπος, κατασκευαστής, πιστοποιητικό βαθμονόμησης
3. Ηχητική Πηγή: Είδος (π.χ. ανεμιστήρας, ψυγείο κ.α.), κατασκευαστής, τύπος, σειριακός αριθμός, τεχνικά χαρακτηριστικά (ηλεκτρική - μηχανική ισχύς, συχνότητα λειτουργίας, διαστάσεις, βάρος κλπ).
4. Συνθήκες Μέτρησης: Θόρυβος βάθους, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, θέση τοποθέτησης πηγής, συνθήκες έδρασης πηγής, διαστάσεις ορθογωνίου αναφοράς, διαστάσεις επιφάνειας αναφοράς, θέση και αριθμός των ανακλαστικών επιφανειών, αριθμός και κωδικοποίηση των θέσεων μέτρησης σε κάθε επίπεδο της επιφάνειας αναφοράς, κάθε μορφής ειδικές συνθήκες.

Πειραματικό Μέρος

1. Να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης.
2. Να μετρηθεί η θερμοκρασία: $\theta = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$
3. Να μετρηθούν και να καταγραφούν οι διαστάσεις της αίθουσας του εργαστηρίου: $L_x = \dots\dots\dots\text{m}$, $L_y = \dots\dots\dots\text{m}$, $L_z = \dots\dots\dots\text{m}$.
4. Να μετρηθούν και να καταγραφούν οι διαστάσεις του ορθογωνίου αναφοράς της ηχητικής πηγής: $l_x = 0,42\text{m}$, $l_y = 0,21\text{m}$, $l_z = 1,22\text{m}$. ←
5. Να πραγματοποιηθεί μέτρηση και συχνοτική ανάλυση του θορύβου βάθους της αίθουσας του εργαστηρίου.

63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dBA

6. Τοποθετώντας το δωδεκαεδρικό ηχείο αναφοράς στην θέση όπου θα τοποθετηθεί η προς μέτρηση ηχητική πηγή να πραγματοποιηθεί μέτρηση του χρόνου αντήχησης της αίθουσας σε τρεις διαφορετικές θέσεις στην αίθουσα:

Θέση Μέτρησης	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dBA

7. Να καταγραφούν οι διαστάσεις της ορθογωνικής επιφάνειας μέτρησης της ηχητικής πηγής: $l_x = \dots\dots\dots\text{m}$, $l_y = \dots\dots\dots\text{m}$, $l_z = \dots\dots\dots\text{m}$. Να σχεδιασθεί σκαρίφημα της επιφάνειας μέτρησης στο τετράδιο σας όπου και θα σημειωθούν οι θέσεις μέτρησης της ηχητικής πίεσης.
8. Να καταγραφούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Θέση Μέτρησης	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dBA

Υποσημείωση: Προκειμένου να περιοριστεί ο χρόνος εκτέλεσης του πειράματος και λόγω των μικρών διαστάσεων της προς μέτρησης πηγής δε θα πραγματοποιηθεί μέτρηση του θορύβου βάθους της αίθουσας σε κάθε θέση μέτρηση όπως προβλέπεται από το σχετικό πρότυπο. Να χρησιμοποιηθούν οι τιμές που μετρήθηκαν στην 5 για όλες τις θέσεις.

9. Να τοποθετηθεί η ηχητική πηγή στη γωνία μεταξύ ενός τοίχου και του δαπέδου και να επαναληφθούν οι μετρήσεις.
Να καταγραφούν τα αποτελέσματα:

Θέση Μέτρησης	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dBA

10. Να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης.

Επεξεργασία Μετρήσεων – Ερωτήσεις

1. Να υπολογισθεί η χαρακτηριστική διάσταση d_0 της ηχητικής πηγής για τοποθέτηση σε μία ανακλαστική επιφάνεια (δάπεδο).
2. Να υπολογισθεί η στάθμη ηχητικής ισχύος της ηχητικής πηγής στην περίπτωση τοποθέτησης σε μία ανακλαστική επιφάνεια (μετρήσεις υπ' αριθμ.8). Σε όσες μετρήσεις απαιτείται να πραγματοποιηθεί διόρθωση για το θόρυβο βάθους.
3. Να σχολιασθεί το ηχητικό φάσμα εκπομπής της πηγής.
4. Να υπολογισθεί η χαρακτηριστική διάσταση d_0 της ηχητικής πηγής για τοποθέτηση σε γωνία δύο ανακλαστικών επιφανειών (δάπεδο πλευρική τοιχοποιία).
5. Να υπολογισθεί η στάθμη ηχητικής ισχύος της ηχητικής πηγής στην περίπτωση τοποθέτησης σε γωνία δύο ανακλαστικών επιφανειών (μετρήσεις υπ' αριθμ.9). Σε όσες μετρήσεις απαιτείται να πραγματοποιηθεί διόρθωση για το θόρυβο βάθους.
6. Να συγκριθούν και να σχολιασθούν τα αποτελέσματα των ερωτήσεων 2 & 5.

Αναφορές - βιβλιογραφία

- [1]. Δημήτρης Σκαρλάτος «Εφαρμοσμένη Ακουστική», Εκδόσεις Φιλομάθεια
- [2]. ISO 3741, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for broad-band sources in reverberation rooms
- [3]. ISO 3743-1, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields - Part 1: Comparison method for hard-walled test rooms
- [4]. ISO 3743-2, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields - Part 2: Methods for special reverberation test rooms
- [5]. ISO 3744:1994, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources Engineering methods for free-field conditions over a reflecting plane
- [6]. ISO 3745, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms
- [7]. ISO 6926:1999, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Requirements for the performance and calibration of reference sound sources
- [8]. ISO 9614-1, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Part 1: Measurement at discrete points
- [9]. Σ. Πασχολίδου «Σημειώσεις Εργαστηρίου Μηχανικής Ήχου Β»