

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ Ι

Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων

Πασχαλίδου Στέλλα

ΑΣΚΗΣΗ 1

Μέτρηση ηχητικής στάθμης πίεσης 1ο

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπό της άσκησης αποτελεί η μέτρηση της 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:

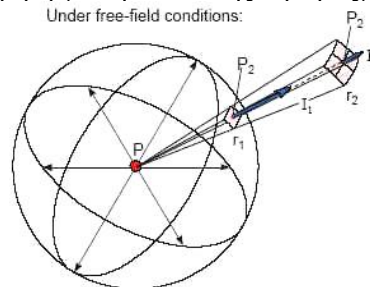
(α) σημειακή πηγή ή οποιαδήποτε άλλη πηγή που εκπέμπει ομοιόμορφα σε όλες τις διευθύνσεις, δηλαδή έχει σφαιρικό μέτωπο κύματος

(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:

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

, 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:

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

¹Ελεύθερο 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 ανηχητικό 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 ακουστός από τον άνθρωπο ήχους παρουσιάζουν ένα τεράστιο εύρος τιμών και κατ' επέκταση θα απαιτούνταν η αναγραφή πολλών δεκαδικών ψηφίων για την αναπαράστασή 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):

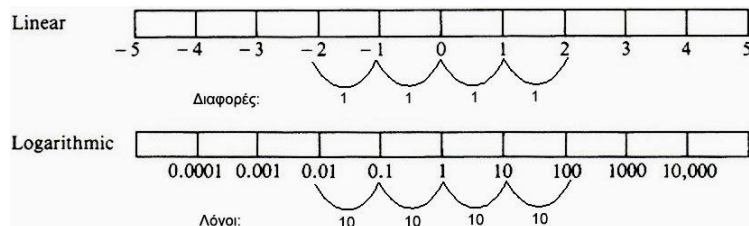
- Πίεση: 1000000:1 περίπου (περίπου 20 Pa – 20 μPa), δηλαδή 0,0000001

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

Ένας τρόπος να συμπίεσουμε 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 λογαρίθμου).

- 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.

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

- Στην ακουστική, πολλαπλασιάζοντας με το 10 ή το 20 λαμβάνουμε ακριβώς ακέραιες τιμές στάθμης έντασης για μόλις ακουστές μεταβολές έντασης.
- Επειδή ανάλογα με το A_1 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**:

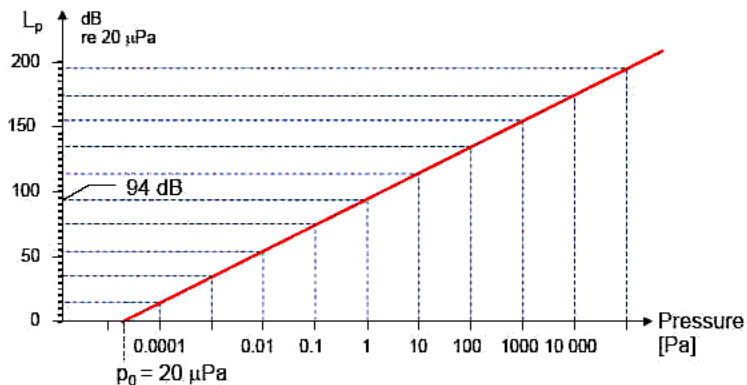
$$SIL = L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}}, \text{ με } I_{ref} = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$$

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

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

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

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



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

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

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

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

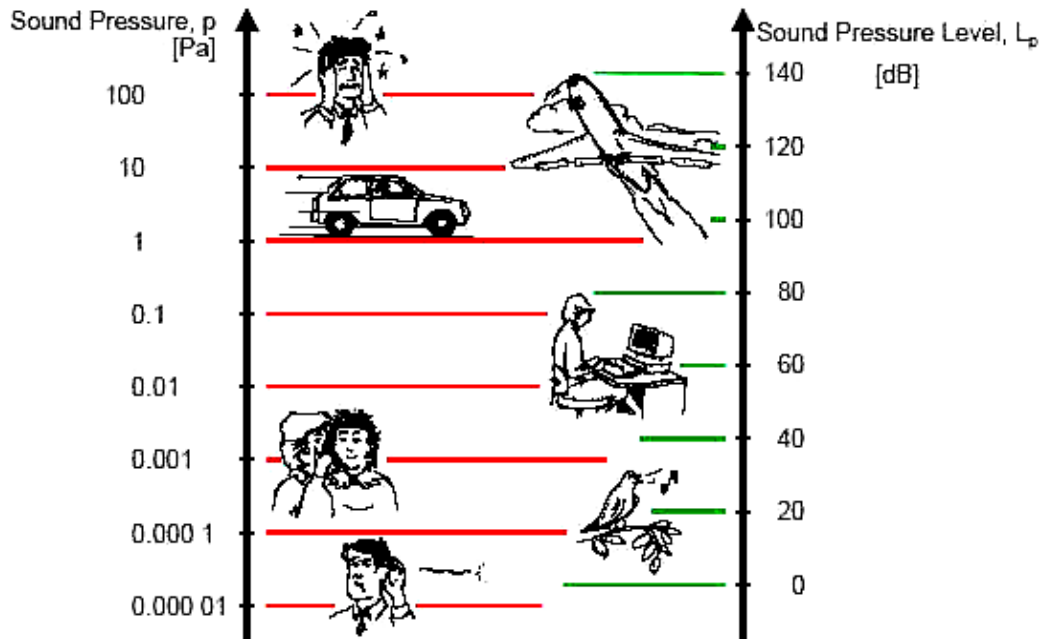
Συνοπτικά έχουμε τα ακόλουθα:

	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	$[L_I] = dB$ $[I] = \text{Watt}/m^2$	$[L_p] = dB$ $[p] = Pa = \text{Watt}/m^2$	$[L_W] = dB$ $[W] = \text{Watt}$
Τιμή αναφοράς/ κατώφλι ακουστότητας	$I_{ref} = 10^{-12} \text{Watt}/m^2$	$p_{ref} = 20 \mu Pa = 2 \cdot 10^{-5} N/m^2$	$W_{ref} = 10^{-12} \text{Watt}$
Όριο πόνου	$I_{max} = 10 \text{Watt}/m^2$	$p_{max} = 63 Pa = 63 N/m^2$	
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]

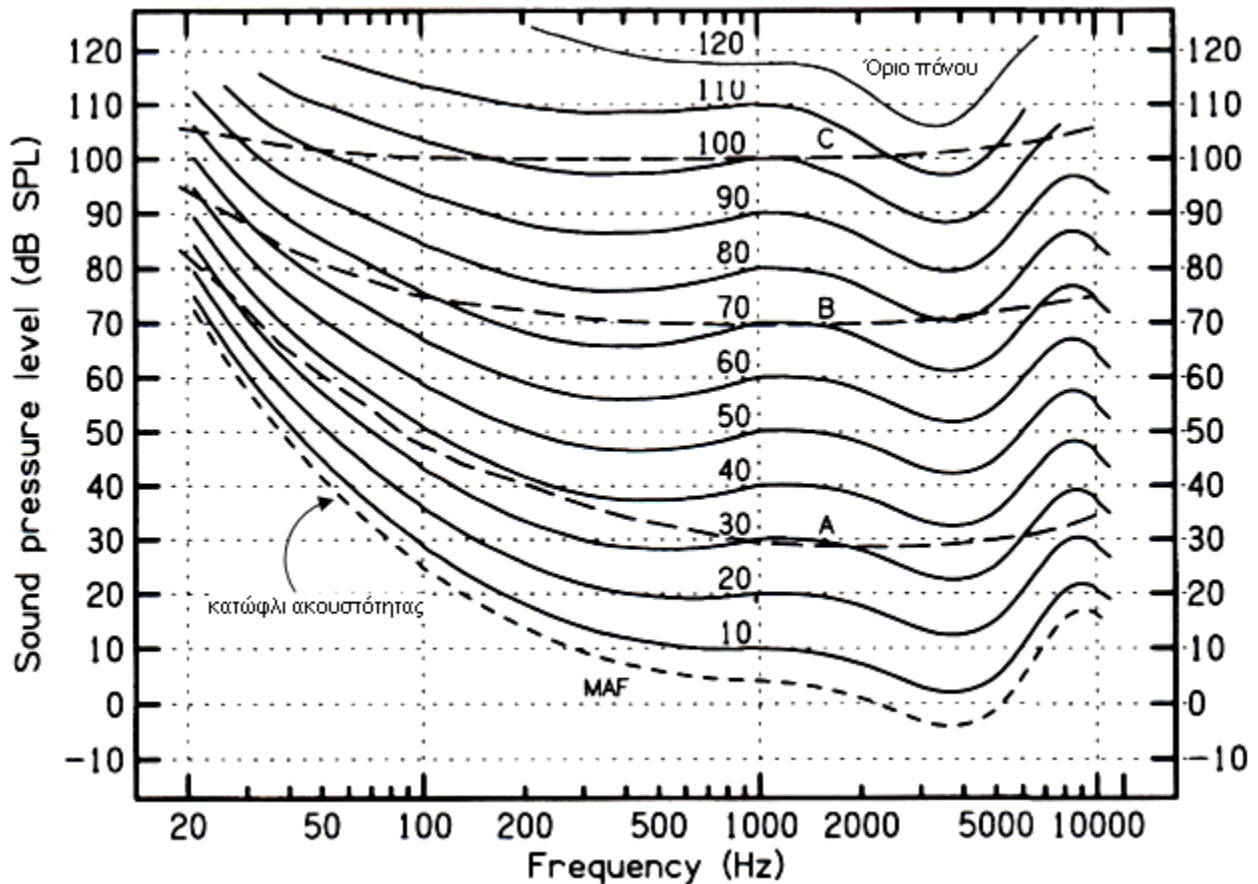
Table 2.1 Typical sound levels in the environment

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 συχνοτήτων 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 ότι 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' ότι 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.

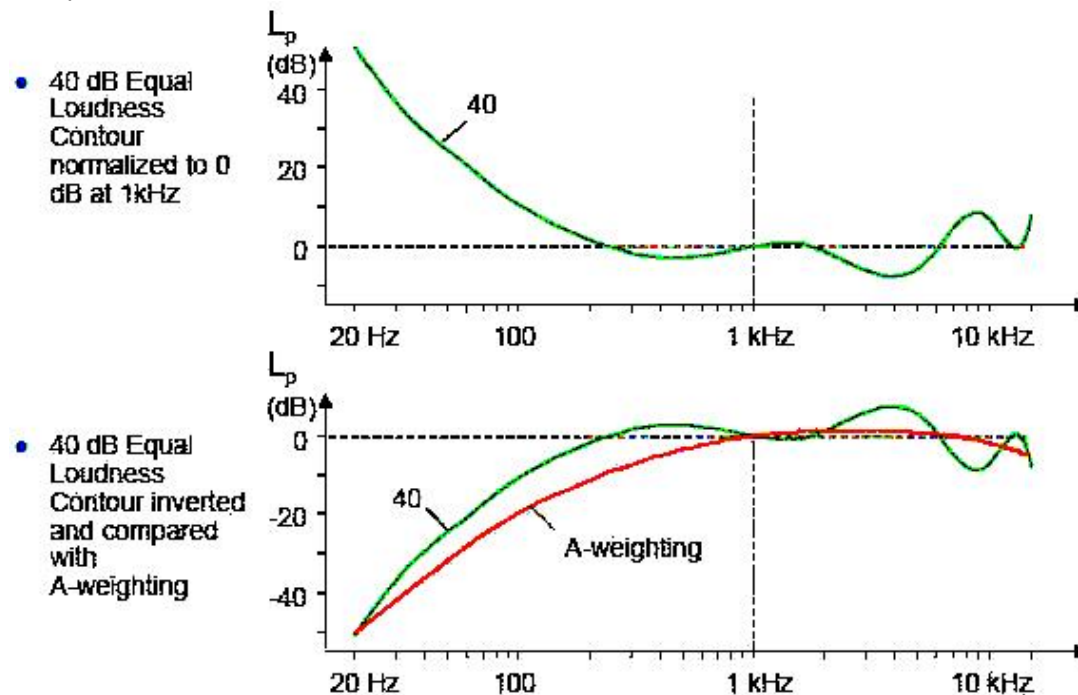
Και τα δύο εξαρτώνται από τη συχνότητα.

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).

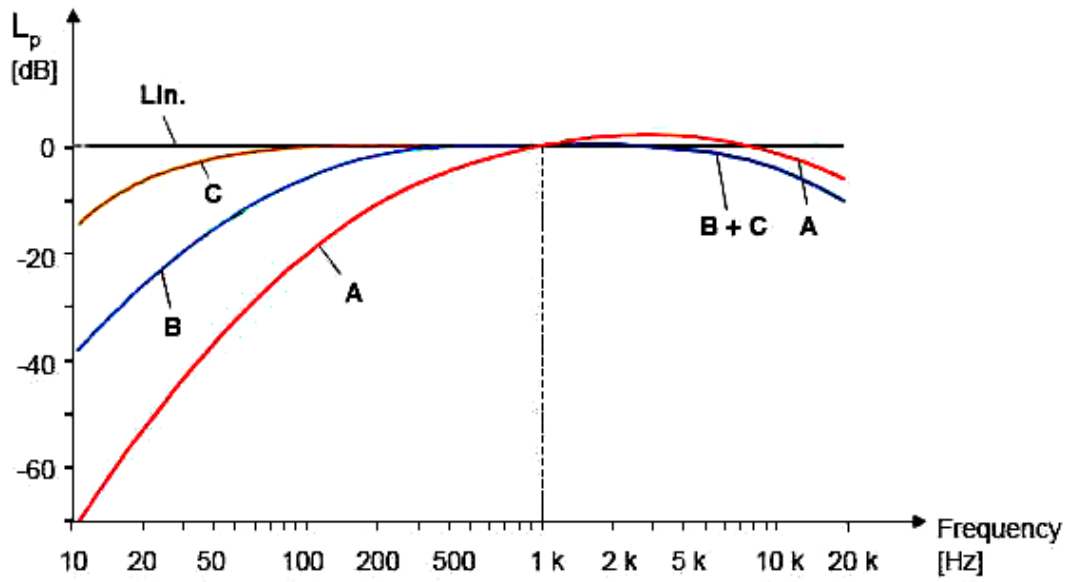
Στις μετρήσεις που λαμβάνουμε με ένα όργανο μέτρησης, όπως το ηχόμετρο, πολλές φορές θέλουμε να λάβουμε υπ' όψιν μας αυτή τη μη-γραμμική συμπεριφορά του αυτιού που παρουσιάζεται στις καμπύλες Fletcher-Munson, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να αποτελεί πραγματικά μέτρο της ανθρώπινης αντίληψης του πόσο δυνατά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

³Ετσι 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 στάθμων 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 στάθμων 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 οποιοδήποτε 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:

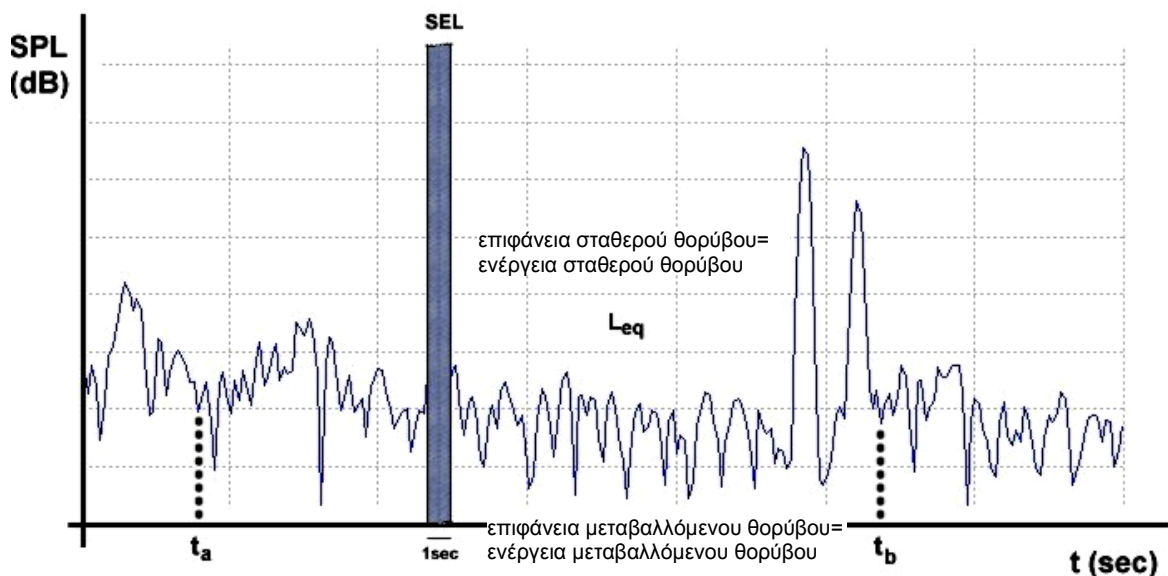
Δίπλα στην τιμή του L_{eq} αναγράφουμε πάντα το αντίστοιχο χρονικό διάστημα T για το οποίο μετρήθηκε.

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. Θόρυβος βάθους (background noise)

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 στάθμων

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

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

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

Σε κάθε περίπτωση:

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

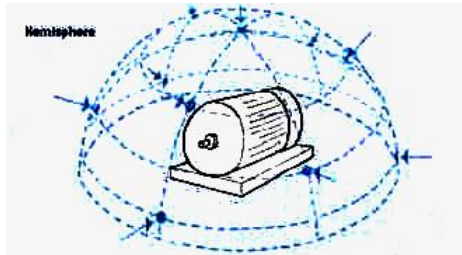
Για παράδειγμα για να προσθέσουμε δύο διαφορετικούς ήχους στάθμης 80dB έκαστος:

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

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

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. ημισφαιρίου) γύρω από την πηγή, που να περικλείει μόνο αυτή. Ηχητική ισχύ μετράμε όταν ενδιαφερόμαστε για το χαρακτηρισμό μιας πηγής ως προς το θόρυβο που εκπέμπει.



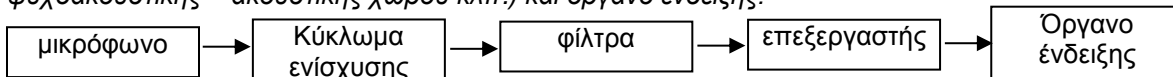
Σχήμα 9. Μέτρηση ηχητικής ισχύος σε ημισφαιρική επιφάνεια γύρω από την πηγή ήχου [11]

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

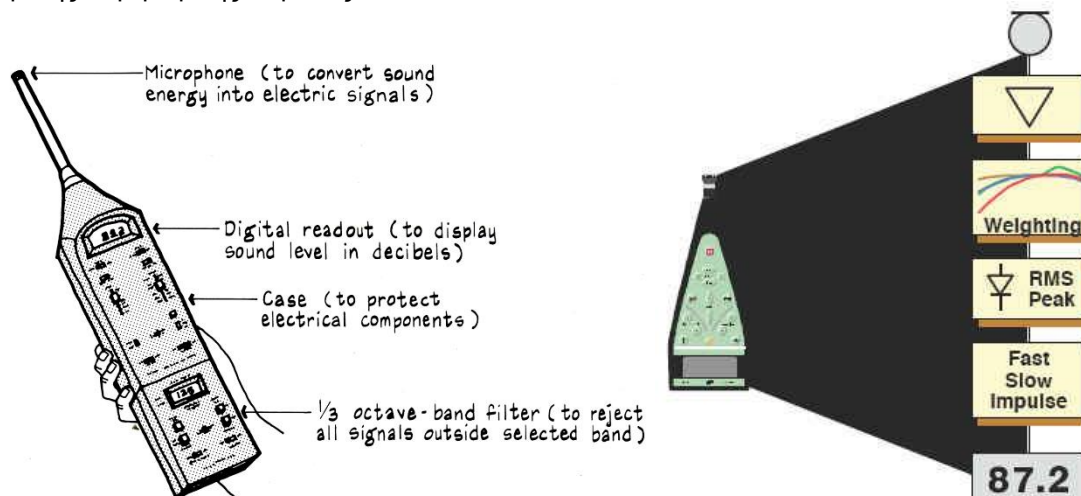
- Ηχητική ένταση μετράμε για τον εντοπισμό και χαρακτηρισμό μιας πηγής ως προς το θόρυβο που εκπέμπει. Η μέτρηση της ηχητικής έντασης, όντας διανυσματικό μέγεθος, παρουσιάζει κάποιες πρακτικές δυσκολίες στη μέτρηση (ανάγκη χρήσης δύο μικροφώνων σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, συγκεκριμένη φασική σχέση 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. Ηχόμετρα [2], [11]

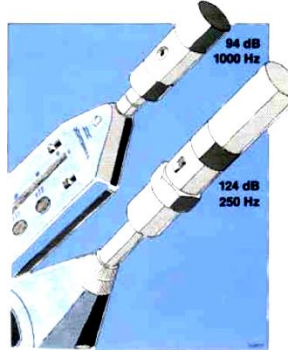
1.12.1. Κατηγορίες ηχομέτρων

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. Διαφορική ευαισθησία ακοής [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] Rossing T., Moore R., Wheeler P. (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] Everest A. (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 μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάθους (backgroundnoise) της αίθουσας (γραμμικά):

$$B = \dots\dots\dots dB.$$

2. Για πηγή ήχου λευκού θορύβου φιλτραρισμένου στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα τα $125 Hz$ από το ηχείο 1 να μετρηθεί η στάθμη πίεσης με τρεις τρόπους: γραμμικά, με φίλτρο A και με φίλτρο C:

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

3. Για πηγή ήχου λευκού θορύβου φιλτραρισμένου στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα το $1 kHz$ από το ηχείο 2 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 συνήχηση των δύο πηγών της μέτρησης 2 και 3 να μετρηθεί η στάθμη πίεσης γραμμικά και με φίλτρο A.

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

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 2 και 3; 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 2) και να γίνει σύγκριση με τις πειραματικές τιμές.
3. Λαμβάνοντας υπόψιν τις μετρήσεις 2 και 3 υπολογίστε τη στάθμη του ήχου (γραμμικά και με φίλτρο A) και συγκρίνετέ την με την πειραματική μέτρηση 4. Πως αιτιολογούνται τυχών αποκλίσεις?

Άσκηση για εργασία

Να υπολογιστεί η στάθμη ισοδύναμου θορύβου L_{eq} για έναν εργάτη που εκτίθεται στις παρακάτω στάθμες θορύβου και διάρκειες (ΑΓΟ = Αριθμός γραμμάτων ονόματος και ΑΓΕ=αριθμός γραμμάτων επωνύμου):

$L_p (dB_A)$	$t (h)$
91	3
84	2
98	ΑΓΕ/12
ΑΓΕ*8	ΑΓΟ/6

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 σύνθετος.

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 στάθμων 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 ηχογράφηση 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:

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

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: $p_{\text{ολ-uncorrelated}}(t) = A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(\omega t + \phi_2)$

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:

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

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

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:

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

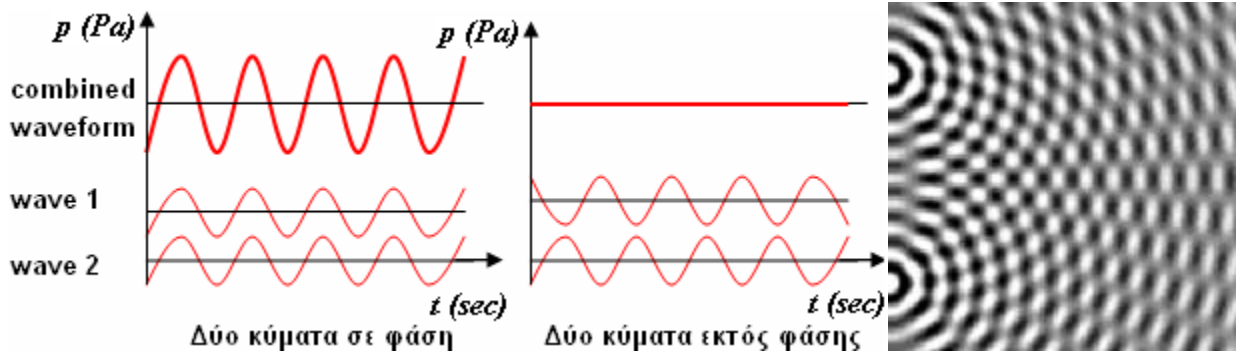
$$P_{\text{ολ-σχευμένη}}(t) = A \cdot \sin(\omega t) + A \cdot \sin(\omega t + 2\pi) = A \cdot \sin(\omega t) - A \cdot \sin(\omega t) = 0$$

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:

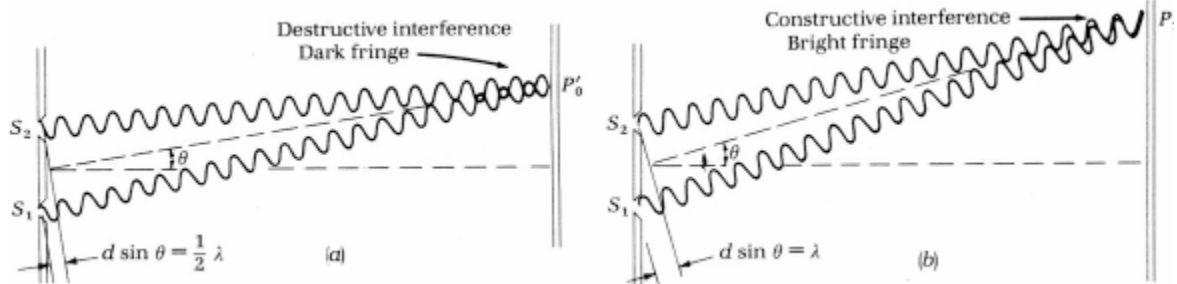
$$\begin{aligned} 0 < P_{\text{ολ-σχευμένη}} < 2A \\ 0 < I_{\text{ολ-σχευμένη}} < 4A^2 \end{aligned} \quad (1.2)$$

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.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Η υπόθεση ημιτονοειδούς μεταβολής της πίεσης έγινε αποκλειστικά και μόνο για την απλοποίηση των υπολογισμών και υπό καμία έννοια δεν υπονοείται ότι το παραπάνω φαινόμενο παρατηρείται μόνο για ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενες πηγές.

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$= 20 \cdot \log \sqrt{(10^{L_{p-1}/20} - 10^{L_{p-2}/20})^2}$$

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

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

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

$$= 20 \cdot \log(10^{L_p/20}) + 20 \cdot \log 2 = 20 \cdot \frac{L_p}{20} \log 10 + 20 \cdot \log 2 = L_p + 20 \cdot 0,3$$

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

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

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

Επομένως:

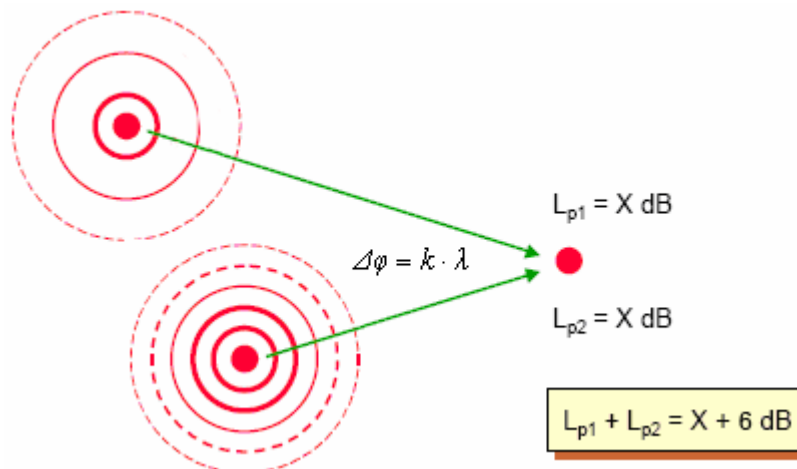
Στην περίπτωση **2 σύμφωνων** πηγών η συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών **min-max** που δίνονται από τη σχέση:

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

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

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.

(1.2) 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:

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

Ειδικά για την περίπτωση των ανεξάρτητων πηγών θα έχουμε:

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

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

Εφόσον η ένταση I είναι ανάλογη του τετραγώνου της ενεργού πίεσης (εργαστηριακή άσκηση Ι) 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:

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

Πρόσθεση στάθμεων ηχητικής πίεσης

Για τη στάθμη ηχητικής πίεσης ισχύει:

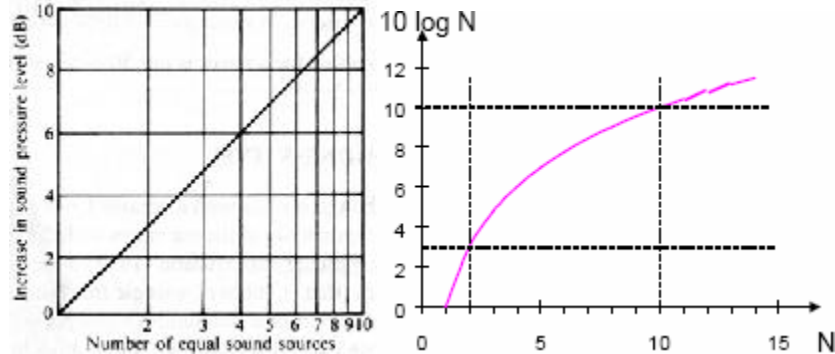
$$\begin{aligned} (L_{p-\text{ολ}})_{\text{uncorrelated}} &= 10 \cdot \log \frac{p_{\text{ολ}}^2}{p_{\text{ref}}^2} = 10 \cdot \log \frac{p_{\text{rms},1}^2 + p_{\text{rms},2}^2 + \dots + p_{\text{rms},N}^2}{p_{\text{ref}}^2} \\ &= 10 \cdot \log \left(\frac{p_{\text{rms},1}^2}{p_{\text{ref}}^2} + \frac{p_{\text{rms},2}^2}{p_{\text{ref}}^2}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

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

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

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

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 $L_{p-1} = L_{p-2} = L_p$

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

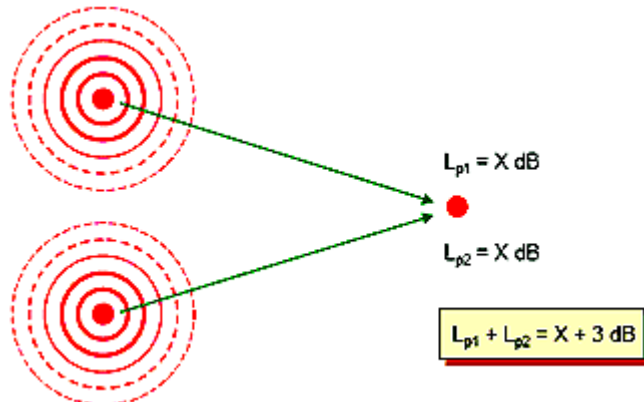
$\Leftrightarrow (P_{ολ-uncorrelated})_{rms}^2 = P_{rms,1}^2 + P_{rms,2}^2 = 2 \cdot P_{rms}^2 \Leftrightarrow (P_{ολ-uncorrelated})_{rms} = \sqrt{2} \cdot P_{rms}$

\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:

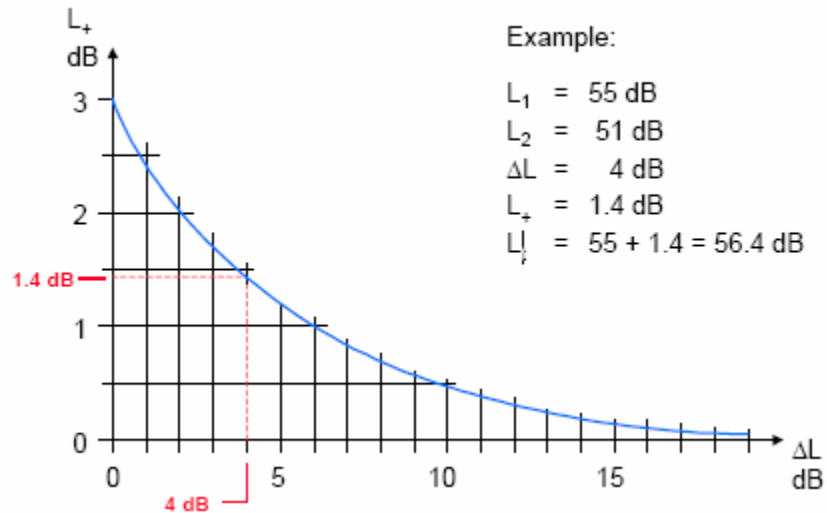
$$(L_{p-ολ})_{uncorrelated} = 10 \cdot \log(10^{L_{p-1}/10} + 10^{L_{p-2}/10}) \quad (2.4)$$

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 στάθμων ηχητικής πίεσης

Κατά αντιστοιχία της πρόσθεσης γίνεται και η αφαίρεση στάθμων. 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):

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

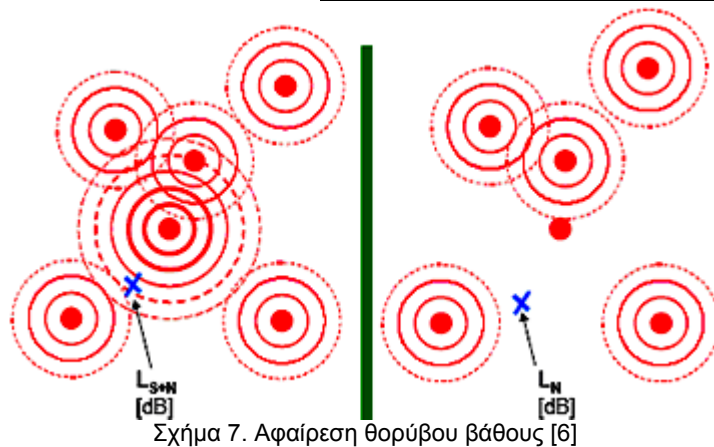
Λύνοντας ως προς τη στάθμη της πηγής $L_{p-\pi}$ έχουμε:

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

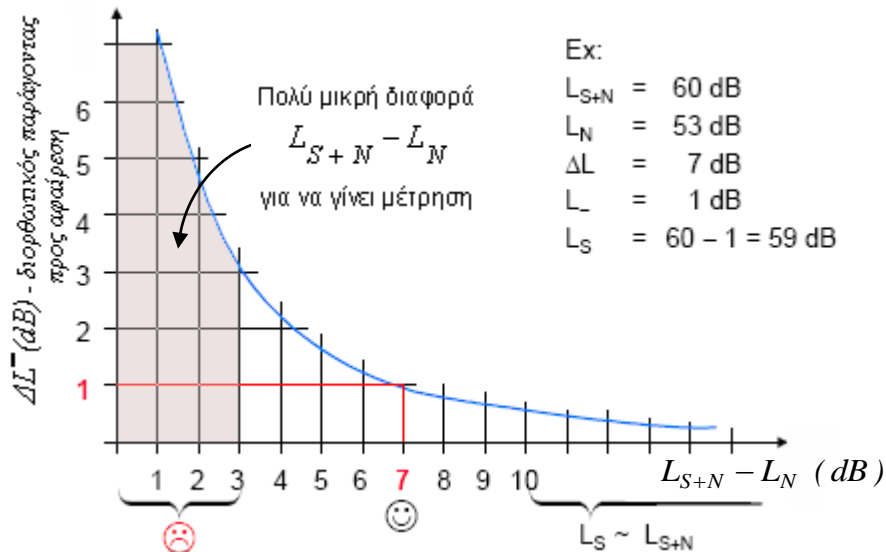
$$\Leftrightarrow 10^{L_{p-ολ-uncorr}/10} = 10^{L_{p-\pi}/10} + 10^{L_{p-\theta\beta}/10} \Leftrightarrow 10^{L_{p-\pi}/10} = 10^{L_{p-ολ-uncorr}/10} - 10^{L_{p-\theta\beta}/10}$$

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

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



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 (1.5) 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:

$$(L_{p-\text{ολ}}) = L_1 \oplus L_2$$

$$(L_{p-\text{ολ}}) = L_1 \ominus L_2$$

Για παράδειγμα:

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

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

(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

αντίστοιχου χρονικού 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': $T = 50\mu\text{s}$

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 35ms 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 στάθμων 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 ($50\mu\text{s}$!), 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 ίσχυαν για διάφορα ποσοστά του συνολικού χρόνου μέτρησης.

Έτσι:

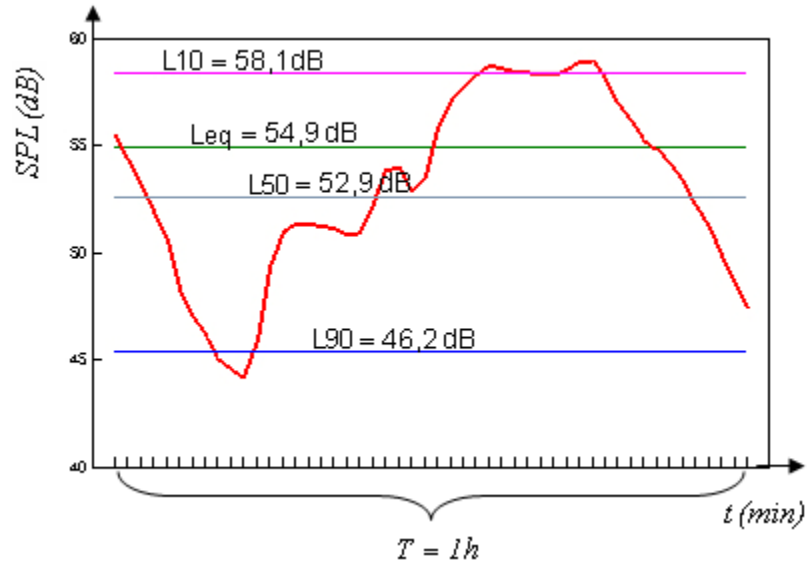
- Εφόσον L_1 είναι η κατώτατη στάθμη που ισχύει για μόλις το 1% του χρόνου, δηλαδή ξεπερνιέται μόνο κατά τη διάρκεια ενός πολύ μικρού μέρους του συνολικού χρόνου, θα εκφράζει την περιοχή των μέγιστων τιμών ηχητικής στάθμης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Το L_{10} χρησιμοποιείται για μετρήσεις κυκλοφοριακού 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 Β της αίθουσας σε L_{eq} για 1 min με τρεις τρόπους: γραμμικά, με φίλτρο Α και με φίλτρο C.

$L_{eq(lin)}$	$L_{eq(A)}$	$L_{eq(C)}$
84,5	38,5	50,3

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

Σταθερά ολοκλήρωσης	Λευκός θόρυβος	
	$L_{eq(A)}$	$L_{eq(A)-max}$
'Fast' (0,125 s)	69,4	70,0
'Slow' (1 s)	69,4	69,7

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	$L_{eq(A)}$	$L_{1(A)}$	$L_{10(A)}$	$L_{50(A)}$	$L_{90(A)}$	$L_{99(A)}$
	65,1	66,7	65,8	65,1	64,2	64
2	$L_{eq(A)}$	$L_{1(A)}$	$L_{10(A)}$	$L_{50(A)}$	$L_{90(A)}$	$L_{99(A)}$
	72,5	78	65,8	65,2	64,3	64

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	69,6	70,0	73,0

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	68,6	67,0	50,0

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;