



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ηλεκτρονικά Μ.Μ.Ε

Ασκήσεις «Ήχου»

Γεώργιος Καλλίρης – Χαράλαμπος Δημούλας

Τμ. Δημοσιογραφίας και Μ.Μ.Ε Α.Π.Θ.

Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα. Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.



Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Περιεχόμενα

Άδειες Χρήσης	2
Χρηματοδότηση.....	2
Περιεχόμενα	3
Άσκηση 1 ^η : Ηχητικό Πεδίο & Συνθήκες Ακρόασης σε Ανοιχτούς Χώρους	5
Ερώτημα 1	6
Ερώτημα 2	6
Ερώτημα 3	6
Ερώτημα 4	6
1η Παρατήρηση – παραδοχή: Νόμος Αντιστρόφου Τετραγώνου	6
2η Παρατήρηση – παραδοχή: Υπέρθυση ηχητικών πηγών	6
3 ^η Παρατήρηση: Προσδιορισμός ποιότητας ακρόασης	8
Απάντηση 1.....	9
Απάντηση 2.....	9
Απάντηση 3.....	9
Απάντηση 4.....	10
Συμπεράσματα – τελικές παρατηρήσεις	10
Άσκηση 2 ^η : Ηχητικό Πεδίο & Συνθήκες Ακρόασης σε Κλειστούς Χώρους.....	11
Ερώτημα 1	12
Ερώτημα 2	12
1 ^η Παρατήρηση – παραδοχή: Υπέρθυση απευθείας & αντηχητικού πεδίου	12
2 ^η Παρατήρηση-παραδοχή: Ποιότητα ακρόασης σε αντηχητικό πεδίο.....	12
Απάντηση 1.....	14
Απάντηση 2.....	16
Συμπεράσματα – τελικές παρατηρήσεις	17
Άσκηση 3 ^η : Εγκατάσταση συστήματος ηχοτροφοδοσίας.....	20
Ερώτημα 1	20
Ερώτημα 2	20
Παρατήρηση: Συνθήκες ευστάθειας & μικροφωνισμός.....	20
Απάντηση 1.....	22
Απάντηση 2.....	22

Συμπεράσματα – τελικές παρατηρήσεις	22
Άσκηση 4 ^η : Συστήματα ηχητικής εγγραφής.....	24
Ερώτημα 1	24
Ερώτημα 2	24
Ερώτημα 3	24
Ερώτημα 4	24
Ερώτημα 5	24
Γενικές Παρατηρήσεις Ηχοληψίας - Ηχογράφησης.....	24
Απάντηση 1.....	26
Απάντηση 2.....	26
Απάντηση 3.....	26
Απάντηση 4.....	26
Απάντηση 5.....	27
Άσκηση 5 ^η : Ψηφιακός Ήχος.....	28
Ερώτημα 1	28
Ερώτημα 2	28
Ερώτημα 3	28
Ερώτημα 4	28
Γενικές Παρατηρήσεις για τον Ψηφιακό Ήχο	28
Απάντηση 1.....	29
Απάντηση 2.....	29
Απάντηση 3.....	29
Απάντηση 4.....	29
Παράρτημα – Νόμος Αντιστρόφου Τετραγώνου	30
Απόδειξη εξίσωσης (1): -6dB/διπλασιασμό απόστασης	30
Ιδιότητες λογαρίθμων.....	30
Υπέρθωση Ηχητικών Πηγών.....	31
Υπολογισμός συνολικής στάθμης έντασης N πηγών	31
Υπολογισμός συνολικής στάθμης πίεσης N ασυσχέτιστων πηγών.....	32
Υπολογισμός συνολικής στάθμης πίεσης N συμφασικών (coherent) πηγών.....	32

Άσκηση 1^η: Ηχητικό Πεδίο & Συνθήκες Ακρόασης σε Ανοιχτούς Χώρους

Ένα θερινό σχολείο «Περιβαλλοντικής Δημοσιογραφίας» διεξάγεται σε ένα πάρκο και ειδικότερα σε χώρο καλυπτόμενο από πυκνό γρασίδι και χωρίς εμπόδια· δηλαδή όλα τα δένδρα βρίσκονται σε απομακρυσμένες θέσεις από τον ομιλητή και το ακροατήριο (εικόνα 1). Για την ηχοπροστασία του πάρκου από τον παρακείμενο δρόμο ταχείας κυκλοφορίας έχει τοποθετηθεί πυκνή δενδροστοιχία που εξασφαλίζει μια ηχομείωση της τάξης των 15 dB, με αποτέλεσμα στο χώρο της «συζήτησης» να φτάνουν 50 dB θορύβου φόντου. Ο ομιλητής παράγει 70 dB σε απόσταση 1 μέτρου, ενώ η μέση στάθμη που παράγεται από χαμηλόφωνες συνομιλίες του ακροατηρίου είναι 40 dB (για κάθε άτομο).



Εικόνα 1 - Συνθήκες ακρόασης σε ανοιχτό χώρο

Ερώτημα 1

Να υπολογιστεί η ποιότητα ακρόασης σε θέσεις ακροατηρίου που βρίσκονται σε απόσταση 2, 4 και 10 μέτρων από τον ομιλητή.

Ερώτημα 2

Ομοίως (να υπολογιστεί η ποιότητα ακρόασης σε απόσταση 2, 4 και 10 μέτρων) όταν 10 από τους ακροατές συνομιλούν μεταξύ τους.

Ερώτημα 3

Τι θα συνέβαινε εάν η απόσταση από το δρόμο μειωνόταν στο μισό;

Ερώτημα 4

Τι θα συνέβαινε εάν δεν υπήρχε η δενδροστοιχία σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις;

1η Παρατήρηση – παραδοχή: Νόμος Αντιστρόφου Τετραγώνου

Το γεγονός ότι η συζήτηση διεξάγεται σε χώρο απαλλαγμένο από εμπόδια (εξαιρώντας το «εμπόδιο» κατά τη διάδοση του ήχου που τυχόν προκαλούν οι ίδιοι οι ακροατές στους διπλανούς – επόμενους τους) επιτρέπει να εφαρμόσουμε τους νόμους που αφορούν στο ελεύθερο ηχητικό πεδίο. Έτσι, ισχύει ο Νόμος Αντιστρόφου Τετραγώνου όπου η ηχητική ένταση αποσβένει με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο προς το τετράγωνο της απόστασης.

Υιοθετώντας το απλούστερο μοντέλο των σφαιρικών ή επίπεδων ηχητικών κυμάτων, προκύπτει ότι τόσο η στάθμη ηχητικής έντασης, όσο και η στάθμη ηχητικής πίεσης μειώνονται με ένα ρυθμό -6dB/διπλασιασμό της απόστασης με βάση την εξίσωση*:

$$\frac{I(r_2)}{I(r_1)} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \xrightarrow[L=SPL, SIL]{\text{επίπεδα-σφαιρικά κύματα}} L(r_2) = L(r_1) - 20 \cdot \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (1)$$

όπου στην προκειμένη περίπτωση η στάθμη L μπορεί να είναι είτε στάθμη πίεσης **SPL** (Sound Pressure Level), είτε στάθμη έντασης **SIL** (Sound Intensity Level).

Ο κανόνας “-6dB/διπλασιασμό” προκύπτει αν στην εξίσωση (1) βάλουμε $r_1=r$ και $r_2=2r_1=2r$ οπότε έχουμε. Ανάλογα, αν η απόσταση δεκαπλασιαστεί προκαλείται απώλεια 20 dB:

$$\begin{aligned} L(2r) &= L(r) - 6dB & \text{ή} & L(r) - L(2r) = 6dB \\ L(10r) &= L(r) - 20dB & \text{ή} & L(r) - L(10r) = 20dB \end{aligned} \quad (2)$$

2η Παρατήρηση – παραδοχή: Υπέρθυση ηχητικών πηγών

Συνήθως, ο υπολογισμός της συνολικής στάθμης πολλών πηγών μπορεί να αφορά: i) στη στάθμη έντασης, ii) στη στάθμη πίεσης ασυσχέτιστων* πηγών, iii) στη στάθμη πίεσης συμφασικών* πηγών.

i) Η συνολική στάθμη έντασης N πηγών με επιμέρους στάθμες έντασης SIL_i (ή απλά L_i) είναι*:

$$SIL_{total} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{SIL_1}{10}} + 10^{\frac{SIL_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{SIL_N}{10}} \right) \quad \text{ή} \quad L_{total} = 10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (3)$$

Κατά κανόνα, η ένταση είναι μέγεθος που προσδιορίζεται δύσκολα, γι' αυτό και στην συντριπτική πλειοψηφία χρησιμοποιείται το μέγεθος της ακουστικής πίεσης, που είναι ένα βαθμωτό (δλδ. μονοδιάστατο) μέγεθος και όχι διανυσματικό (όπως η ένταση). Για τον λόγο αυτό γενικά, αλλά και ειδικότερα στο πλαίσιο του μαθήματος, οι περισσότεροι υπολογισμοί ηχητικής στάθμης L αφορούν την ακουστική πίεση και όχι την ένταση (εκτός κι αν ορίζεται διαφορετικά).

ii) Η συνολική στάθμη πίεσης N ασυσχέτιστων πηγών με επιμέρους στάθμες πίεσης SPL_i (ή L_i) είναι*:

$$SPL_{total} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{SPL_1}{10}} + 10^{\frac{SPL_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{SPL_N}{10}} \right) \quad \text{ή} \quad L_{total} = 10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (4)$$

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση (4) είναι πανομοιότυπη με την (3), δηλαδή η υπέρθεση στάθμεων έντασης και πίεσης ασυσχέτιστων πηγών ήχου υπακούουν στον ίδιο κανόνα. Αν στις εξισώσεις αυτές θεωρήσουμε 2 πηγές με ίδια στάθμη L , τότε αποτέλεσμα είναι:

$$L_{total} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L}{10}} + 10^{\frac{L}{10}} \right) = 10 \cdot \log \left(2 \cdot 10^{\frac{L}{10}} \right) = 10 \cdot \log(2) + 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L}{10}} \right) \rightarrow$$

$$\frac{10 \cdot \log(2) \approx 3}{\log \left(10^{\frac{L}{10}} \right) = \frac{L}{10}} \rightarrow L_{total(2xL)} = L + 3 \text{ dB} \quad (5)$$

Δηλαδή, κατά την υπέρθεση 2 ασυσχέτιστων πηγών ίδιας στάθμης L , η συνολική στάθμη (έντασης ή πίεσης) αυξάνει κατά **+3dB**. Ανάλογα, η αύξηση της στάθμης (έντασης ή πίεσης) για N ασυσχέτιστες πηγές στάθμης L είναι **$10 \cdot \log(N)$** , απ' όπου προκύπτει ότι για 10 πηγές έχουμε αύξηση **+10dB**:

$$L_{total} = 10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L}{10}} \right) = 10 \cdot \log \left(N \cdot 10^{\frac{L}{10}} \right) = 10 \cdot \log(N) + 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L}{10}} \right) \rightarrow$$

$$L_{total(NxL)} = 10 \cdot \log(N) + L \xrightarrow{N=10} L_{total(10xL)} = L + 10 \text{ dB} \quad (6)$$

Κατά την υπέρθεση 2 πηγών, αν η μία στάθμη L_1 είναι πολύ μεγαλύτερη από την άλλη L_2 ($L_1 \gg L_2$), το τελικό αποτέλεσμα διαμορφώνεται από την πιο ισχυρή πηγή ($L_{total} \approx L_1$). Ομοίως, κατά την υπέρθεση πολλών πηγών η τελική στάθμη θα είναι μεγαλύτερη ή ίση της μέγιστης στάθμης ($L_{total} \geq L_{i-max}$).

iii) Η συνολική στάθμη πίεσης N συμφασικών (coherent) πηγών με επιμέρους στάθμες πίεσης SPL_i (ή L_i) είναι*:

$$SPL_{coh} = 20 \cdot \log \left(10^{\frac{SPL_1}{20}} + 10^{\frac{SPL_2}{20}} + \dots + 10^{\frac{SPL_N}{20}} \right) \quad \text{ή} \quad L_{coh} = 20 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{20}} \right) \quad (7)$$

Έτσι, αν θεωρήσουμε 2 όμοιες και συμφασικές πηγές με στάθμη L , τότε αποτέλεσμα είναι:

$$L_{coh} = 20 \cdot \log \left(10^{\frac{L}{20}} + 10^{\frac{L}{20}} \right) = 20 \cdot \log \left(2 \cdot 10^{\frac{L}{20}} \right) = 20 \cdot \log(2) + 20 \cdot \log \left(10^{\frac{L}{20}} \right) \rightarrow$$

$$\xrightarrow{\frac{10 \cdot \log(2) \approx 6}{\log \left(10^{\frac{L}{20}} \right) = \frac{L}{20}}} L_{coh(2 \times L)} = L + 6 \text{ dB} \quad (8)$$

Δηλαδή, κατά την υπέρθεση 2 συμφασικών ηχητικών με στάθμη πίεσης L , η συνολική στάθμη πίεσης είναι **$L+6$ dB**.

3^η Παρατήρηση: Προσδιορισμός ποιότητας ακρόασης

Ο συνηθέστερος και πιο απλός τρόπος εκτίμησης της ποιότητας λήψης, ακρόασης ή ηχογράφησης του ήχου είναι η σηματοθορυβική σχέση. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) προσδιορίζει ποσοτικά τη σχέση της ενέργειας του «χρήσιμου πληροφοριακού σήματος» ως προς την ενέργεια όλων των ανεπιθύμητων ηχητικών σημάτων που ονομάζουμε θόρυβο. Αν p_S , p_N είναι οι ακουστικές πιέσεις (ενεργές τιμές) του σήματος και του θορύβου, και L_S , L_N οι αντίστοιχες στάθμες πίεσης, τότε:

$$SNR = 20 \cdot \log \left(\frac{p_S}{p_N} \right) = L_S - L_N \text{ [dB]} \quad (9)$$

Σύμφωνα και με τη σχέση (9) ο λόγος SNR μετριέται σε dB (τα οποία όμως δεν εκφράζουν τη στάθμη ακουστικής πίεσης). Για παράδειγμα, SNR=20 dB σημαίνει ότι η ηχητική στάθμη του σήματος L_S είναι 20 dB μεγαλύτερη από αυτή του θορύβου L_N (πρόκειται για μια πολύ ικανοποιητική τιμή SNR, όπου το σήμα είναι 10 φορές πιο ισχυρό από το θόρυβο). Αντίθετα, όταν το σήμα και ο θόρυβος έχουν την ίδια ενέργεια, το κλάσμα τους ισούται με 1 και άρα SNR=0 (πρόκειται για κακή σηματοθορυβική σχέση, όπου εμφανίζονται προβλήματα ακρόασης ή/και κατανόησης του λόγου). Στην περίπτωση, δε, που ο θόρυβος είναι πιο δυνατός από το χρήσιμο σήμα, το SNR παίρνει αρνητικές τιμές. Σε γενικές γραμμές, τιμές SNR κάτω των 12 dB μπορεί να είναι προβληματικές, ενώ από 15 dB οι συνθήκες ακρόασης είναι καλές.

Απάντηση 1

Η στάθμη του ομιλητή εξασθενεί σύμφωνα με τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου (εξίσωση 1). Δηλαδή, έχουμε 6dB απώλεια για κάθε διπλασιασμό της απόστασης και 20dB απώλεια όταν δεκαπλασιάζεται η απόσταση. Έτσι προκύπτει η στάθμη του ομιλητή (σήμα-S) σε κάθε θέση, ενώ η στάθμη του θορύβου N παραμένει σταθερή (50dB). Επομένως:

$$L(2m) = L(1m) - 6 = 70 - 6 = 64 \text{ dB} \quad \rightarrow \text{SNR}(2m) = 64 - 50 = 14 \text{ dB}$$

$$L(4m) = L(2m) - 6 = 64 - 6 = 58 \text{ dB} \quad \rightarrow \text{SNR}(4m) = 58 - 50 = 8 \text{ dB}$$

$$L(10m) = L(1m) - 20 = 70 - 20 = 50 \text{ dB} \quad \rightarrow \text{SNR}(10m) = 70 - 50 = 0 \text{ dB}$$

Απάντηση 2

Ο θόρυβος των ακροατών θα πρέπει να «προστεθεί» με το θόρυβο φόντου (όχι αλγεβρικά, αλλά με βάση την εξίσωση 4), για να προκύψει η συνολική στάθμη του θορύβου. Προφανώς οι ήχοι των ακροατών είναι ασυσχέτιστοι και άρα η συνολική στάθμη προκύπτει από την εξίσωση (4). Σύμφωνα με την εξίσωση (6), 10 πηγές (ακροατές εν προκειμένω) ίδιας στάθμης θα αυξήσουν τη συνολική στάθμη κατά **10dB**. Έτσι, με δεδομένες τις στάθμες σήματος (από το προηγούμενο ερώτημα) μπορούν να υπολογιστούν η νέα στάθμη θορύβου N' και οι νέοι λόγοι SNR':

$$\left. \begin{aligned} (6) \rightarrow N_{\text{ακρ}} = 40 + 10 = 50 \text{ dB} \\ N_{\text{φόντου}} = 50 \text{ dB} \end{aligned} \right\} \xrightarrow{(19)} N' = 50 + 3 = 53 \text{ dB} \rightarrow \begin{aligned} \text{SNR}'(2m) &= 64 - 53 = 11 \text{ dB} \\ \text{SNR}'(4m) &= 58 - 53 = 5 \text{ dB} \\ \text{SNR}'(10m) &= 70 - 53 = -3 \text{ dB} \end{aligned}$$

Δηλαδή η συνολική στάθμη θορύβου αυξήθηκε σύμφωνα με την εξίσωση (5) κατά **3dB** (αφού τόσο ο θόρυβος των ακροατών όσο και ο θόρυβος φόντου είναι 50dB) και διαμορφώθηκε στα **53dB**. Επειδή οι στάθμες του ομιλητή (σήμα) παρέμειναν σταθερές, προκύπτει μεταβολή κατά **-3dB** στους νέους λόγους SNR'. Όπως βλέπουμε, στην απόσταση των 10 μέτρων έχουμε **SNR'(10m)=-3dB<0**, πράγμα που σημαίνει ότι στη θέση αυτή ο θόρυβος είναι πιο δυνατός από το σήμα.

Απάντηση 3

Με βάση τα δεδομένα της άσκησης, είναι προφανές ότι ο θόρυβος φόντου διαμορφώνεται κατά κύριο λόγο από το θόρυβο του δρόμου ταχείας κυκλοφορίας (ακόμη κι αν υπάρχουν άλλοι θόρυβοι όπως π.χ. κελαιδίσματα πουλιών κλπ, η στάθμη τους θεωρείται πολύ μικρότερη, και άρα η συνεισφορά τους στη συνισταμένη του θορύβου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα). Έτσι, για λόγους απλότητας μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο θόρυβος φόντου προέρχεται αποκλειστικά και μόνο από τον θόρυβο στο δρόμο (ακόμη κι αν αυτό δεν είναι 100% ακριβές, σίγουρα είναι μια πολύ καλή προσέγγιση). Η στάθμη των 50 dB προκύπτει από την αρχική στάθμη θορύβου στο δρόμο $N_{\delta\rho}$, αφαιρώντας τις απώλειες ηχομείωσης από τη συστάδα των δένδρων αλλά και την απόσταση που διανύει ο ήχος μέχρι να φτάσει στο χώρο διεξαγωγής της συζήτησης. Ως γνωστόν,

οι απώλειες λόγω απόστασης καθορίζονται από τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου. Έτσι, αν η απόσταση μειωνόταν στο μισό, με βάση της εξίσωση (1) θα είχαμε αύξηση του θορύβου κατά **6dB**, και άρα **οι λόγοι σήματος προς θόρυβο SNR'' θα επιδεινώνονταν (σε όλες τις περιπτώσεις) κατά -6dB**.

Απάντηση 4

Με βάση την εκφώνηση της άσκησης αλλά και την απάντηση στο προηγούμενο ερώτημα, η δένδροστοιχία προσφέρει μια ηχομείωση της τάξης των 15 dB. Αυτό σημαίνει ότι εάν δεν υπήρχε αυτό το φυσικό ηχοπέτασμα (natural sound barrier) η στάθμη φόντου στο χώρο της συζήτησης θα ήταν αυξημένη κατά 15 dB. Άρα, **οι νέοι λόγοι σήματος προς θόρυβο SNR''' θα επιδεινώνονταν επιπλέον (σε όλες τις περιπτώσεις) κατά -15dB**. Είναι προφανές ότι οι συνθήκες ακρόασης στις 2 τελευταίες περιπτώσεις καθίστανται σχεδόν απαγορευτικές.

Συμπεράσματα – τελικές παρατηρήσεις

Τα παραπάνω ερωτήματα αποτελούν αρκετά ρεαλιστικά θέματα τα οποία προκύπτουν κατά την περιβαλλοντική μελέτη ενός πάρκου (θέματα ηχοπροστασίας - περιβαλλοντικού θορύβου), καθώς επίσης για την επιλογή κατάλληλου χώρου διεξαγωγής ενημερωτικών-δημοσιογραφικών και συνεδριακών εκδηλώσεων περιβαλλοντικού, τουριστικού, ή ακόμη καλλιτεχνικού και γενικότερου ενδιαφέροντος. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, οι βασικές αρχές υπολογισμού των ακουστικών μεγεθών και αντιμετώπισης των επιμέρους θεμάτων είναι ίδιες (ή παρόμοιες) μ' αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην άσκηση.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε γίνεται σαφές ότι η παρουσία θορύβου επιδρά αρνητικά στην ποιότητα ακρόασης, καθώς δυσχεραίνει το λόγο SNR. Προφανώς, οι κλειστοί χώροι παρέχουν μεγαλύτερη ηχομόνωση από εξωτερικούς ανεπιθύμητους θορύβους. Ωστόσο, κατά τη μελέτη και κατασκευή χώρων ακουστικού ενδιαφέροντος, όπως είναι οι αίθουσες διδασκαλίας και ακροάσεων γενικότερα, τα συνεδριακά κέντρα, οι χώροι συνέντευξης τύπου και κυρίως τα ραδιοφωνικά και ραδιοτηλεοπτικά στούντιο, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να ικανοποιούνται τα απαιτούμενα κριτήρια ηχομόνωσης για κάθε χώρο.

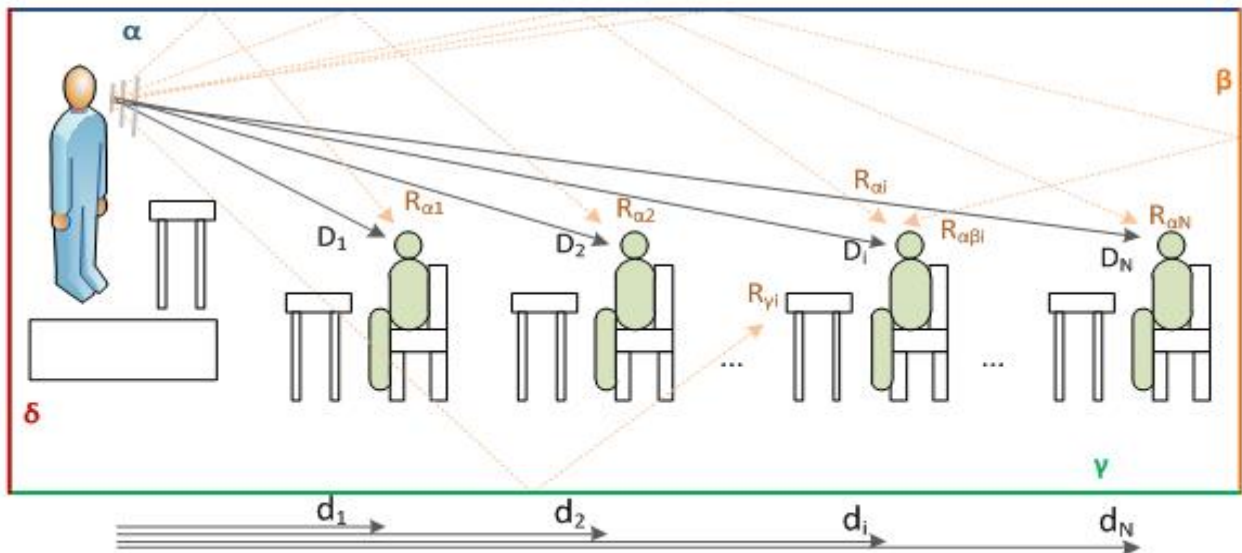
Άσκηση 2^η: Ηχητικό Πεδίο & Συνθήκες Ακρόασης σε Κλειστούς Χώρους

Σε μια αίθουσα διδασκαλίας ο ομιλητής - εισηγητής παράγει 75dB/1m, ενώ ο συνολικός θόρυβος παρασκήνιου (background noise) της αίθουσας είναι σταθερός και ίσος με $L_{BN}=40$ dB.

Τυπική αίθουσα διδασκαλίας



Σχηματικό διάγραμμα του χώρου (πλάγια όψη) - απεικόνιση όδευσης ηχητικών κυμάτων



Εικόνα 2: Ακουστική κλειστών χώρων

Ερώτημα 1

Να υπολογιστεί η ηχητική στάθμη και η ποιότητα ακρόασης (SNR) σε αποστάσεις 2, 8 και 20 μέτρων από τον ομιλητή (~ θέσεις D_1 , D_i και D_N) όταν η αίθουσα έχει μικρό χρόνο αντήχησης $RT_{60}=0,4\text{sec}$ και σχετικά μεγάλη κρίσιμη απόσταση $D_c=8\text{m}$.

Ερώτημα 2

Ομοίως (να υπολογιστούν ηχητικές στάθμες και SNR στα 2, 8 και 20 μέτρα) όταν η αίθουσα έχει αρκετά μεγάλο χρόνο αντήχησης $RT_{60}=2\text{sec}$ και μικρότερη κρίσιμη απόσταση $D_c=4\text{m}$.

1^η Παρατήρηση – παραδοχή: Υπέρθωση απευθείας & αντηχητικού πεδίου

Σε αντίθεση με το ελεύθερο ηχητικό πεδίο, στους κλειστούς χώρους ο ήχος διαμορφώνεται τόσο από το απευθείας ηχητικό πεδίο όσο και από τις συνιστώσες των ανακλάσεων (βλ. εικόνα 2, όπου απεικονίζονται ενδεικτικές διαδρομές ανακλάσεων R πάνω στις πλευρές α , β , γ , δ). Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι σε κάθε σημείο r του χώρου η συνολική στάθμη L_{room} προκύπτει από την υπέρθεση 2 μη συμφασικών επιμέρους συνιστωσών: της στάθμης του απευθείας κύματος (L_{direct}) και της στάθμης του αντηχητικού πεδίου (L_{reverb}) που προκύπτει από το σύνολο των ανακλάσεων στο χώρο. Έτσι, η συνολική στάθμη θα μπορούσε να προσδιοριστεί από την εξίσωση (5) ως εξής:

$$L_{room}(r) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{direct}(r)}{10}} + 10^{\frac{L_{reverb}(r)}{10}} \right) \quad (10)$$

Ο προσδιορισμός της στάθμης L_{direct} μπορεί να γίνει εύκολα με τη βοήθεια του νόμου του αντιστρόφου τετραγώνου (εξίσωση 1). Ο υπολογισμός της στάθμης L_{reverb} δεν είναι τόσο εύκολη υπόθεση, αφού θεωρητικά θα έπρεπε να υπολογιστούν όλες οι διαδρομές των ανακλάσεων και των απωλειών του ήχου (λόγω απόστασης και λόγω απορρόφησης κατά την πρόσκρουση στις διάφορες επιφάνειες) και στη συνέχεια να εκτιμηθεί η συνισταμένη στάθμη. Ωστόσο, μπορούμε να εκτιμήσουμε τη στάθμη L_{reverb} από τη στάθμη του απευθείας πεδίου στην κρίσιμη απόσταση (critical distance – D_c), δηλαδή της θέσης όπου οι στάθμες L_{direct} και L_{reverb} είναι ίσες. Αν θεωρήσουμε ότι ο χώρος εμφανίζει γραμμική συμπεριφορά και η διάχυση του ήχου είναι ομοιόμορφη, τότε η στάθμη L_{reverb} παραμένει σταθερή σε όλες τις θέσεις r και ίση με:

$$L_{reverb}(r) = L_{reverb}(D_c) = L_{direct}(D_c) = L_{direct}(1\text{m}) - 20 \cdot \log(D_c) \quad (11)$$

2^η Παρατήρηση-παραδοχή: Ποιότητα ακρόασης σε αντηχητικό πεδίο

Από τις εξισώσεις (10) και (11) προκύπτει ότι η στάθμη σε κλειστούς χώρους είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε ελεύθερο ηχητικό πεδίο, καθώς προστίθεται η συνιστώσα των ανακλάσεων. Έτσι προκύπτει και ένα “κέρδος του χώρου” (room gain), δηλαδή μια φυσική ενίσχυση που προσφέρει ο χώρος στο ηχητικό πεδίο. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι η συνεισφορά των ανακλάσεων είναι πάντα θετική. Έτσι, υπάρχουν οι “πρώιμες ανακλάσεις” που έχουν μικρή χρονική καθυστέρηση από το απευθείας ηχητικό πεδίο και άρα είναι ωφέλιμες καθώς οδηγούν σε άθροιση των συνιστωσών αυτών και άρα ενίσχυση του τελικού σήματος. Υπάρχουν όμως και οι

“καθυστερημένες ανακλάσεις” που λόγω της μεγάλης χρονικής τους διαφοράς με το απευθείας κύμα φέρουν διαφορετικό ηχητικό περιεχόμενο σε κάθε θέση και χρονική στιγμή. Έτσι προκαλούν χασμωδία και σύγχυση στους ακροατές, καθώς επικάθονται ως θόρυβος πάνω στο χρήσιμο σήμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διεξαγωγή ομιλιών - διαλέξεων σε χώρους με έντονη αντήχηση (καθολικοί ναοί, κλειστά γυμναστήρια μεγάλου ύψους και όγκου, κλπ) όπου η ακρόαση είναι προβληματική (ειδικά όταν δεν υπάρχει υποβοήθηση από κατάλληλο σύστημα ηχοτροφοδοσίας). Δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές η αντήχηση αποτελεί ουσιαστικά συνιστώσα θορύβου, κατά αντιστοιχία με το λόγο SNR έχει προβλεφθεί και ο λόγος σήματος προς αντήχηση (Signal to Reverberation Ratio -SRR), ο οποίος χρησιμοποιείται ως κριτήριο ακουστικής καταλληλότητας των χώρων.

Γενικά, δεν είναι υπάρχει εύκολος τρόπος προσδιορισμού του «καλού» L_{reverb} που παράγεται από τις πρώιμες-ωφέλιμες ανακλάσεις ώστε να χρησιμοποιηθεί στον τύπο (11), εξαιρώντας το «κακό» L_{reverb} που αντίστοιχα παράγεται από τις καθυστερημένες-ανεπιθύμητες ανακλάσεις. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα ακουστικά μεγέθη για την προσεγγιστική εκτίμηση της κατάστασης. Έτσι, όταν ο χρόνος αντήχησης RT_{60} είναι μικρός (π.χ. σύμφωνα με την τυποποίηση ANSI θα πρέπει να μην ξεπερνά τα 0,6 sec σε μικρές αίθουσες διδασκαλίας και τα 0,7 sec σε μεγάλες αίθουσες) τότε μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τις ανακλάσεις χρήσιμες και αντίστοιχα τη στάθμη του αντηχητικού πεδίου ωφέλιμη συνιστώσα σήματος, παρά συνιστώσα θορύβου. Μάλιστα στις περιπτώσεις αυτές αυξάνει και η κρίσιμη απόσταση (D_c) του χώρου, γεγονός που φανερώνει ότι το απευθείας κύμα κυριαρχεί στη διαμόρφωση του σύνθετου ηχητικού πεδίου. Αντίθετα, σε μεγάλους χρόνους αντήχησης (πάνω από 1-2 sec στην περίπτωση των αιθουσών διδασκαλίας) και ειδικά σε θέσεις μετά την κρίσιμη απόσταση (D_c), το αντηχητικό πεδίο μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα ακρόασης και η στάθμη του μάλλον θα πρέπει να προσμετρηθεί ως συνιστώσα θορύβου.

Απάντηση 1

Στην 1^η περίπτωση ο χρόνος αντήχησης είναι πολύ μικρός και η κρίσιμη απόσταση αρκετά μεγάλη. Έτσι, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η στάθμη L_{reverb} είναι χρήσιμη και αθροίζεται στην L_{direct} , ενώ ο θόρυβος φόντου αποτελεί πρακτικά το μοναδικό ανεπιθύμητο σήμα. Δηλαδή σε κάθε θέση φτάνουν η στάθμη L_{direct} και L_{reverb} που αποτελούν συνιστώσες σήματος, με μοναδική ανεπιθύμητη συνιστώσα το θόρυβο φόντου ($L_{BN}=40dB$) που είναι σταθερός.

Με βάση την εξίσωση (11) και την παραδοχή που κάναμε, η στάθμη $L_{reverb}(r)$ παραμένει σταθερή για κάθε απόσταση r (άρα και για $r=2, 8, 20 m$) και ισούται με την $L_{direct}(Dc)$:

$$L_{reverb}(r) = L_{reverb}(8m) = L_{direct}(8m) = \cancel{L_{direct}(1m)^{75}} - \cancel{20 \cdot \log(8)^{18}} = 57dB$$

Επειδή η Dc είναι 8m, έχουμε 3 διπλασιασμούς της απόστασης (1→2, 2→4, 4→8) σε καθένα από τους οποίους η στάθμη μειώνεται κατά **6dB** (εξίσωση 1), κι έτσι η συνολική απώλεια είναι **18dB** (όπως προκύπτει και από τον τύπο $20 \cdot \log(8) \approx 18$). Με βάση τις εξισώσεις (1) και (10) έχουμε:

$$r=2m$$

$$L_{direct}(2) = \cancel{L(1)^{75}} - \cancel{20 \cdot \log(2)^6} = 69dB, \quad L_{room}(2) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{\cancel{L_{direct}(2)^{69}}}{10}} + 10^{\frac{\cancel{L_{reverb}^{57}}}{10}} \right) \approx 69dB$$

$$SNR(2) \approx 69 - 40 \approx 29dB$$

$$r=8m$$

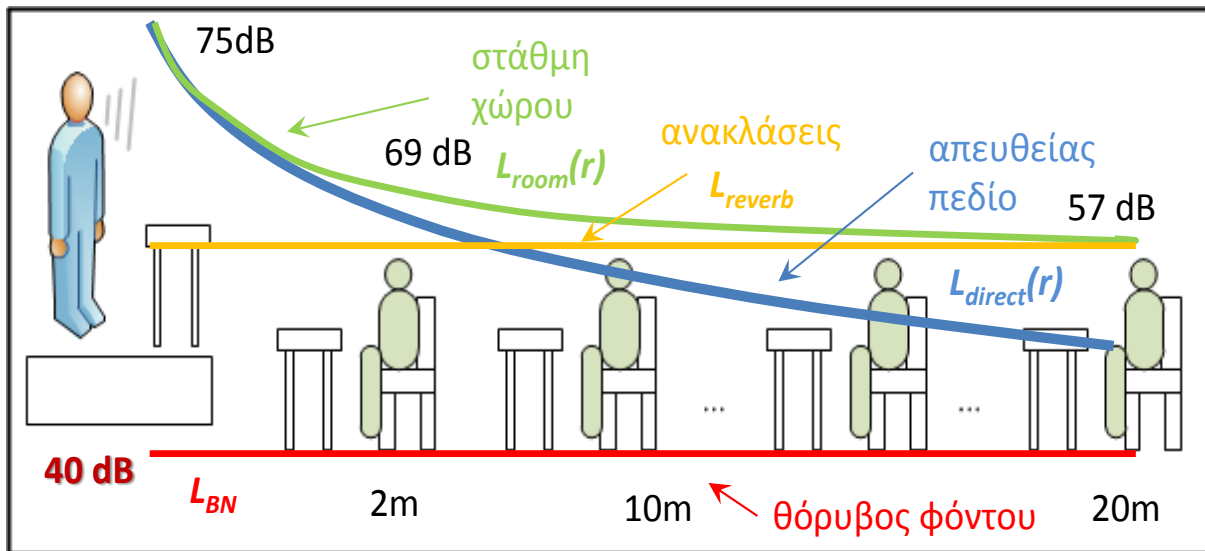
$$L_{direct}(8) = \cancel{L(1)^{75}} - \cancel{20 \cdot \log(8)^{18}} = 57dB, \quad L_{room}(8) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{\cancel{L_{direct}(8)^{57}}}{10}} + 10^{\frac{\cancel{L_{reverb}^{57}}}{10}} \right) \approx 60dB$$

$$SNR(8) \approx 60 - 40 \approx 20dB$$

$$r=20m$$

$$L_{direct}(20) = \cancel{L(1)^{75}} - \cancel{20 \cdot \log(20)^{26}} = 49dB, \quad L_{room}(20) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{\cancel{L_{direct}(20)^{49}}}{10}} + 10^{\frac{\cancel{L_{reverb}^{57}}}{10}} \right) \approx 57,5dB$$

$$SNR(20) \approx 57,5 - 40 \approx 17,5dB$$



Εικόνα 3 - Διαμόρφωση ηχητικού πεδίου σε αίθουσα με μικρή αντήχηση

Παρατηρούμε τα εξής:

1. **Σε θέσεις πριν από την κρίσιμη απόσταση** η συνολική στάθμη καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από το απευθείας πεδίο, δηλαδή $L_{room}(r) \approx L_{direct}(r)$, για $r < D_c$. Γι' αυτό στις θέσεις αυτές η ακρόαση είναι πιο καλή (υψηλό SNR και με πολύ μικρή αντήχηση) και δεν χρειάζεται καν να γίνει χρήση του τύπου (10), αφού το αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται (όπως προκύπτει για τη θέση $r=2m$).
2. **Στη θέση της κρίσιμης απόστασης** έχουμε 2 ίδιες στάθμες και άρα η συνολική στάθμη αυξάνεται πάντα κατά 3dB, δηλαδή $L_{room}(D_c) = L_{direct}(D_c) + 3dB$ (όπως προκύπτει και από το αποτέλεσμα για τη θέση $r=8m$). Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιείται απευθείας, χωρίς και πάλι την ανάγκη χρήσης του τύπου (10).
3. **Σε απομακρυσμένες θέσεις από την κρίσιμη απόσταση** το απευθείας πεδίο εξασθενεί σημαντικά και κυριαρχεί το πεδίο των ανακλάσεων, οπότε μπορούμε κατά προσέγγιση να θεωρήσουμε $L_{room}(r) \approx L_{reverb}(r)$, για $r \gg D_c$ (αυτό επαληθεύεται και από το αποτέλεσμα για τη θέση $r=20m$, όπου η συνολική στάθμη L_{room} αυξάνει μόνο κατά 0,5 dB σε σχέση με την L_{reverb}).
4. Ένας εύκολος τρόπος για να υπολογίσουμε τις απώλειες σε dB (λόγω αντιστρόφου τετραγώνου) σε απόσταση 20m είναι ο εξής: έχουμε ένα δεκαπλασιασμό της απόστασης (1→10m) που οδηγεί σε απώλεια 20 dB (εξίσωση 2) και στη συνέχεια άλλον ένα διπλασιασμό της απόστασης (10→20m) που οδηγεί σε πρόσθετη απώλεια 6 dB (εξίσωση 2). Άρα η συνολική απώλεια είναι 26 dB (επαληθεύεται από το αποτέλεσμα για $r=20m$).
5. Τέλος, η στάθμη φόντου είναι αρκετά χαμηλή (40 dB) σε σχέση με το απευθείας (75 έως ~50 dB) και το ανακλώμενο πεδίο (57 dB), γι' αυτό και αν επιχειρούσαμε να την συνυπολογίσουμε

στην τελική στάθμη της αίθουσας δεν θα έκανε σημαντική διαφορά. Στον θόρυβο αυτό συνήθως περιλαμβάνονται ανεπιθύμητοι εξωτερικοί και εσωτερικοί ήχοι μαζί με τις ανακλάσεις τους στον χώρο (δηλαδή ότι θα μετρούσε ένα ηχόμετρο κατά την απουσία χρήσιμων ηχητικών σημάτων). Από την άσκηση προκύπτει ότι ήδη στη θέση των 20m το SNR έχει μειωθεί αρκετά λόγω του L_{BN} . Αν ληφθεί υπόψη ότι στην απόσταση αυτή δεν είναι όλες οι ανακλάσεις πρώιμες και «καλές» (συνήθως υπεισέρχονται και συνιστώσες με μεγάλη καθυστέρηση), οι πραγματικές συνθήκες ακρόασης είναι μάλλον χειρότερες. Γι' αυτό, με βάση το πρότυπο ANSI ο θόρυβος φόντου σε αίθουσες διδασκαλίας δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 30-35 dBA.

Απάντηση 2

Στην περίπτωση αυτή ο χρόνος αντήχησης είναι πολύ μεγάλος και άρα μπορεί να θεωρηθεί ότι το αντηχητικό πεδίο λειτουργεί ως θόρυβος και όχι ως σήμα. Μάλιστα, επειδή η D_c είναι μικρότερη, η στάθμη του αντηχητικού πεδίου L_{reverb} αυξάνεται σημαντικά:

$$L_{reverb}(r) = L_{reverb}(8m) = L_{direct}(4m) = \cancel{L_{direct}(1m)}^{75} - \cancel{20 \cdot \log(4)}^{12} \approx 63dB$$

Συγκεκριμένα, καθώς η D_c μειώνεται στο μισό, η στάθμη $L_{direct}(D_c)$ αυξάνεται κατά 6dB [σύμφωνα με τις εξισώσεις (1)-(2), νόμος αντιστρόφου τετραγώνου] σε σχέση με την προηγούμενη απόσταση των 8m. Δηλαδή αυτή τη φορά έχουμε μόνο 2 διπλασιασμούς της απόστασης (1→2, 2→4) και η συνολική απώλεια από το 1m στη θέση D_c είναι $2 \times 6 = 12dB$ ($20 \cdot \log(4) \approx 12$). Έτσι, η νέα συνολική στάθμη θορύβου L_N προκύπτει από το θόρυβο φόντου L_{BN} και ΚΥΡΙΩΣ τις ανεπιθύμητες ανακλάσεις του σήματος ομιλίας. Επειδή η συνολική στάθμη L_{reverb} (=63dB) των ανακλάσεων είναι πολύ πιο μεγάλη από την L_{BN} (=40dB), η τελική στάθμη θορύβου διαμορφώνεται σε $L_N \approx 63dB$:

$$L_N = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{\cancel{L_{BN}}^{40}}{10}} + 10^{\frac{\cancel{L_{reverb}}^{63}}{10}} \right) \approx 63dB$$

Όπως προκύπτει και από την εικόνα 4 το απευθείας πεδίο μόνο του πια καλείται να «ανταγωνιστεί» το συνολικό θόρυβο L_N διαμορφώνοντας τις συνθήκες ακρόασης σε κάθε θέση:

$$r=2m$$

$$L_{direct}(2) = \cancel{L(1)}^{75} - \cancel{20 \cdot \log(2)}^6 = 69dB, \quad L_{room}(2) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{\cancel{L_{direct}(2)}^{69}}{10}} + 10^{\frac{\cancel{L_{reverb}}^{63}}{10}} \right) \approx 70dB$$

$$SNR(2) \approx L_{direct}(2) - L_N \approx 69 - 63 \approx 6dB$$

$r=8m$

$$L_{direct}(8) = L(1) - 20 \cdot \log(8) = 57dB, \quad L_{room}(8) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{direct}(8)}{10}} + 10^{\frac{L_{reverb}}{10}} \right) \approx 64dB$$

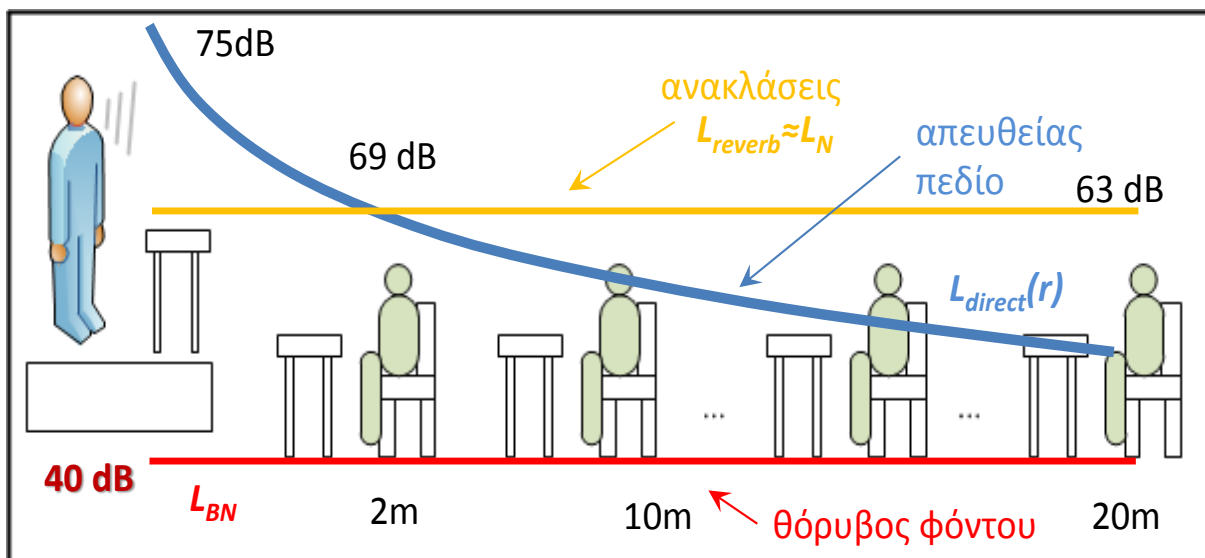
$SNR(8) \approx L_{direct}(8) - L_N \approx 57 - 63 \approx -6dB$

$r=20m$

$$L_{direct}(20) = L(1) - 20 \cdot \log(20) = 49dB, \quad L_{room}(20) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{direct}(20)}{10}} + 10^{\frac{L_{reverb}}{10}} \right) \approx 63dB$$

$SNR(20) \approx L_{direct}(20) - L_N \approx 49 - 63 \approx -14dB$

Επιπλέον, μάλλον δεν έχει και τόσο νόημα ο υπολογισμός της συνισταμένης στάθμης L_{room} , αφού οι δύο συνιστώσες της είναι πλέον ανόμοιες (η μία εκφράζει σήμα και η άλλη θόρυβο), γι' αυτό και δεν απεικονίζεται στην εικόνα 4. Εκτός κι αν θέλουμε να προσδιορίσουμε τη συνολική στάθμη που παράγεται στο χώρο ώστε να εκτιμήσουμε και τα τυχόν προβλήματα ακρόασης που προκαλούνται σε γειτονικούς χώρους. Όπως προκύπτει και από τα παραπάνω αποτελέσματα, η συνολική στάθμη καθορίζεται πλέον από το πεδίο αντήχησης, ειδικά σε θέσεις μετά την κρίσιμη απόσταση.

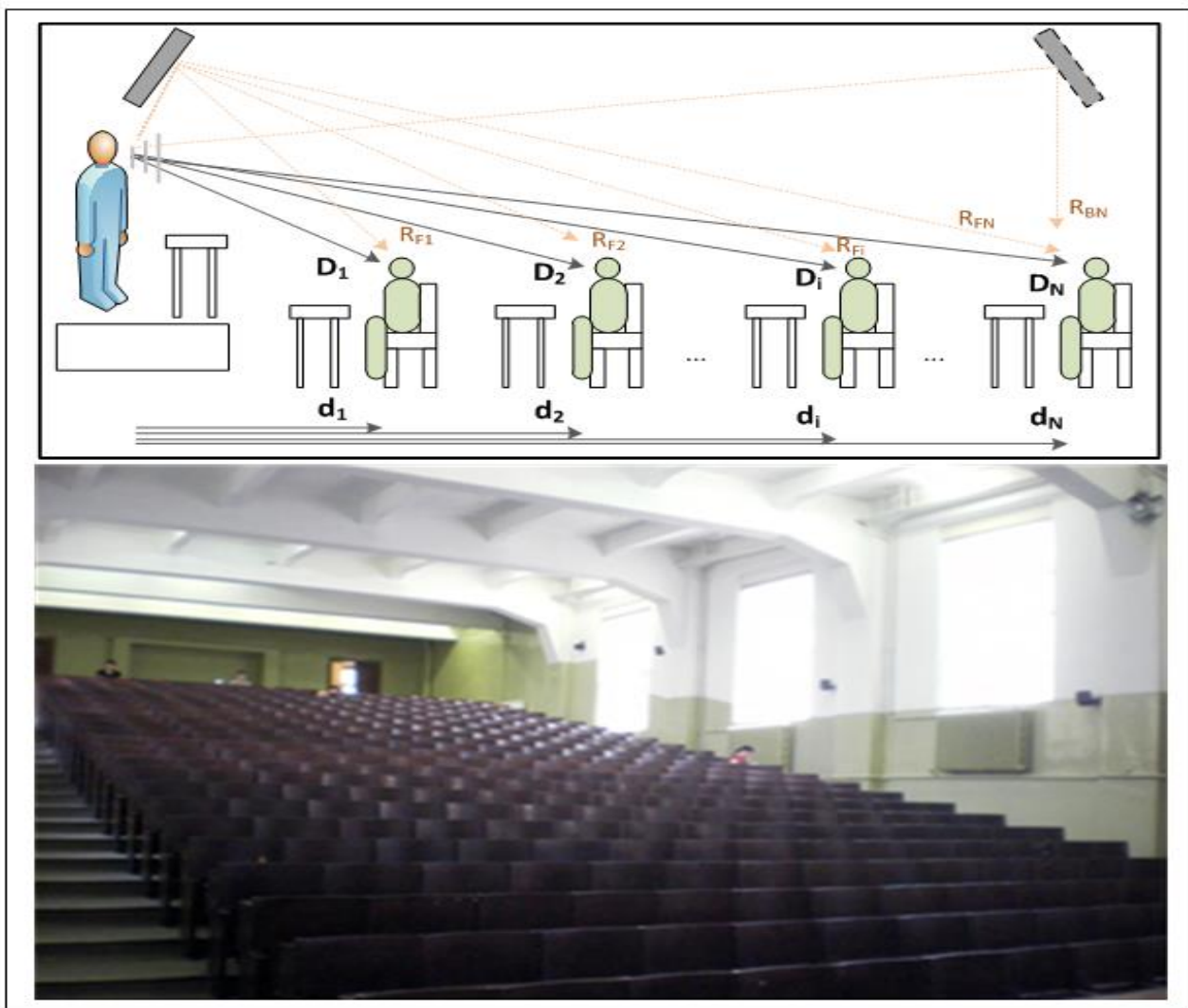


Εικόνα 4- Διαμόρφωση ηχητικού πεδίου σε αίθουσα με μεγάλη αντήχηση

Συμπεράσματα – τελικές παρατηρήσεις

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, τα αποτελέσματα ακρόασης σε ένα χώρο βελτιώνονται όταν μειώνεται ο χρόνος αντήχησης RT_{60} (οπότε οι ανακλάσεις θεωρούνται ωφέλιμες) ή όταν αυξάνεται η κρίσιμη απόσταση D_c (καθώς το απευθείας ηχητικό πεδίο κυριαρχεί σε μεγαλύτερο μέρος του χώρου). Μάλιστα, από τη θεωρία προκύπτει ότι τα δύο μεγέθη συνδέονται: όταν μειώνεται ο RT_{60} αυξάνεται η D_c και αντίστροφα (σχετική ανάλυση γίνεται και στην επόμενη άσκηση). Έτσι,

βελτίωση των συνθηκών ακρόασης μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της απορρόφησης του χώρου (μείωση RT_{60}) ή με αύξηση της κατευθυντικότητας της ηχητικής πηγής (αύξηση D_c , κυρίως όταν η ακρόαση υποβοηθείται από σύστημα ηχοτροφοδοσίας). Ένας άλλος τρόπος δημιουργίας πρώιμων - κοντινών ανακλάσεων είναι η τοποθέτηση ανακλαστήρων επάνω από τον ομιλητή (εικόνα 5). Ανάλογα, ανακλαστήρες μπορούν να τοποθετηθούν και στο πίσω μέρος μιας αίθουσας, υποβοηθώντας έτσι με «κοντινές» ανακλάσεις τις «τελευταίες» θέσεις, οι οποίες είναι και οι πλέον αδικημένες. Προφανώς, δεν υπάρχουν σαφή κριτήρια διάκρισης των ανακλάσεων σε καλές και κακές και του L_{reverb} σε χρήσιμη ή ανεπιθύμητη συνιστώσα με βάση το RT_{60} . Ωστόσο, η παραπάνω προσέγγιση που υιοθετήθηκε (ως ένα βαθμό αυθαίρετα) στην άσκηση, μας επιτρέπει να εξετάσουμε τις δύο ακραίες περιπτώσεις κι έτσι να έχουμε μια αρκετά ρεαλιστική προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης.



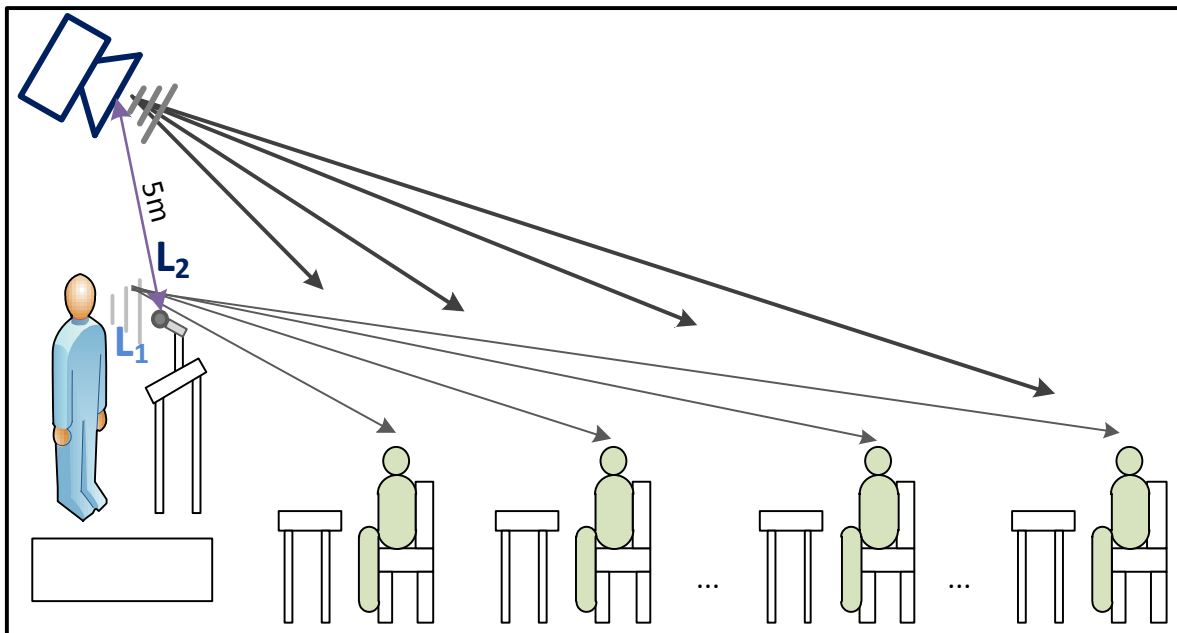
Εικόνα 5 - Βελτίωση συνθηκών ακρόασης σε κλειστούς χώρους (υπερυψωμένοι ομιλητές - αμφιθέατρα)

Ένα άλλο θέμα έχει να κάνει με το γεγονός ότι ο ομιλητής βρίσκεται σε υπερυψωμένη θέση ως προς το ακροατήριο, όπως παρουσιάζεται στις εικόνες 2-5. Το στοιχείο αυτό δεν είναι τυχαίο και δεν διευκολύνει μόνο την «ορατότητα» του ακροατηρίου, αλλά βελτιώνει ουσιαστικά και την

ποιότητα ακρόασης του χώρου, ειδικά στις πιο απομακρυσμένες θέσεις. Έτσι, εάν ο ομιλητής βρισκόταν στο ίδιο ύψος με τους ακροατές, όπου οι διαφορές ανάμεσα στις αποστάσεις $d_1, d_2, \dots, d_i, d_N$ (εικόνα 2, 5) είναι πιο έντονες από τις αντίστοιχες $D_1, D_2, \dots, D_i, D_N$, οι στάθμες στους απομακρυσμένους ακροατές θα ήταν πολύ πιο μικρές απ' ό,τι στους κοντινούς (αφού σύμφωνα με το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου θα μεγάλωναν οι σχετικές αποστάσεις και άρα και οι απώλειες των dB). Επιπλέον, οι ίδιοι οι μπροστινοί ακροατές θα αποτελούσαν ηχητικό εμπόδιο για τους επόμενους, καθώς θα απορροφούσαν μεσαίες και υψηλές κυρίως συχνότητες, δυσχεραίνοντας περαιτέρω τη σαφήνεια-κατανόηση του λόγου (speech intelligibility). Έτσι, η «ανύψωση» της ηχητικής πηγής επιτρέπει την καλύτερη διάδοση του ήχου, εξασφαλίζοντας πιο ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής στάθμης. Το πλεονέκτημα αυτό εξασφαλίζεται και σε αμφιθεατρικές αίθουσες (εικόνα 5) με παραπλήσιο μηχανισμό, καθώς εδώ έχουμε «ανύψωση» ή καλύτερα κλιμάκωση του ύψους στις θέσεις του ακροατηρίου και όχι των πηγών.

Άσκηση 3^η: Εγκατάσταση συστήματος ηχοτροφοδοσίας

Σε ένα συνέδριο χρησιμοποιείται σύστημα ηχοτροφοδοσίας που αποτελείται από 1 ηχείο, το μικρόφωνο του ομιλητή και έναν ενισχυτή (εικόνα 6). Η απόσταση του ηχείου από το μικρόφωνο είναι σταθερή και ίση με $d=5\text{m}$. Ο ομιλητής παράγει μπροστά στο μικρόφωνο στάθμη $L_1=82\text{dB}$. Να θεωρηθεί ότι τόσο το ηχείο όσο και το μικρόφωνο ότι είναι πανκατευθυντικά (omnidirectional).



Εικόνα 6-Σύστημα ηχοτροφοδοσίας & συνθήκες ευστάθειας

Ερώτημα 1

Να εξεταστούν οι συνθήκες ευστάθειας (δηλαδή πόσο πιθανό είναι να υπάρξει μικροφωνισμός) όταν η κρίσιμη απόσταση του χώρου είναι $D_c=10\text{ m}$ και το ηχείο παράγει στάθμη: α) $90\text{ dB}/1\text{m}$ και β) $100\text{ dB}/1\text{m}$.

Ερώτημα 2

Ομοίως (να εξεταστούν οι συνθήκες ευστάθειας για α) $90\text{ dB}/1\text{m}$ και β) $100\text{ dB}/1\text{m}$) όταν η κρίσιμη απόσταση είναι $D_c=5\text{m}$.

Παρατήρηση: Συνθήκες ευστάθειας & μικροφωνισμός

Το φαινόμενο του μικροφωνισμού οφείλεται στο γεγονός ότι μέρος της εξόδου του συστήματος (δηλαδή του ήχου που παράγει το ηχείο) επανέρχεται στην είσοδο (μικρόφωνο). Έτσι, ξανα-ενισχύεται, οδηγείται στην έξοδο (ηχείο), η ενισχυμένη έξοδος ξανα-οδηγείται στην είσοδο και ενισχύεται για 2^η φορά, κοκ. Πρόκειται για τυπική διαδικασία θετικής ανάδρασης, όπου μέρος της εξόδου αθροίζεται στην είσοδο και ενισχύεται εκ νέου, δημιουργώντας έτσι ένα «φαινόμενο χιονοστιβάδας» με αποτέλεσμα η στάθμη εξόδου να αυξάνεται κατακόρυφα (σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα) και το μεγάφωνο «σφυρίζει». Για να αποφευχθεί αυτό το δυσάρεστο φαινόμενο θα πρέπει να αποτραπεί ή να περιοριστεί οδήγηση της εξόδου στην είσοδο.

Όταν η στάθμη εισόδου L_1 του χρήσιμου σήματος (ομιλητής) είναι μεγαλύτερη κατά **6dB** (ή περισσότερο) από τη στάθμη L_2 που φτάνει στην είσοδο του συστήματος (μικρόφωνο) από την έξοδο (ηχείο) τότε δεν υπάρχει κίνδυνος μικροφωνισμού. Αν αυτή η διαφορά μειωθεί στα **3dB** έχουμε οριακή ευστάθεια (το σύστημα είναι έτοιμο να μικροφωνήσει), ενώ για ακόμη μικρότερη διαφορά (**<3dB**) υπάρχει έντονο πρόβλημα μικροφωνισμού:

$$L_1 - L_2 > 6dB \rightarrow \text{ευστάθεια συστήματος}$$

$$L_1 - L_2 > 3dB \rightarrow \text{οριακή ευστάθεια (κίνδυνος μικροφωνισμού)}$$

$$L_1 - L_2 < 3dB \rightarrow \text{αστάθεια συστήματος (μικροφωνισμός)}$$

Απάντηση 1

Θα πρέπει να υπολογιστεί η στάθμη L_2 . Επειδή είμαστε πριν από την κρίσιμη απόσταση, η συνεισφορά του πεδίου αντήρησης είναι αμελητέα. Άρα η L_2 διαμορφώνεται αποκλειστικά από τη στάθμη που φτάνει από το ηχείο μπροστά στο μικρόφωνο. Σύμφωνα με το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου (σχέσεις 1-2) κατά το δεκαπλασιασμό της απόστασης έχουμε απώλεια 6dB, ενώ για κάθε διπλασιασμό της απόστασης έχουμε διαφορά -6dB. Δεδομένου ότι τα 5m αποτελούν υποδιπλασιασμό των 10m, η συνολική μείωση της στάθμης θα είναι **20-6=14dB**, όπως προκύπτει και με εφαρμογή του τύπου (2):

α) στάθμη ηχείου $L_{SP}(1m)=90dB$:

$$L_2 = L_{SP}(1m) - 20 \cdot \log(5)^2 = 90 - 20 \cdot 0.6990 = 76dB$$

Δηλαδή $L_1 - L_2 = 82 - 76 = 6 \text{ dB} \rightarrow$ ευστάθεια

β) στάθμη ηχείου $L_{SP}(1m)=100dB$:

$$L_2 = L_{SP}(1m) - 20 \cdot \log(5)^2 = 100 - 20 \cdot 0.6990 = 86dB$$

Δηλαδή $L_1 - L_2 = 82 - 86 = -4 \text{ dB} \rightarrow$ αστάθεια

Παρατηρούμε ότι στη (β) περίπτωση το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια. Αυτό θέτει περιορισμούς στην επιπρόσθετη αύξηση της στάθμης στην έξοδο του ηχείου που θα μπορούσε να οδηγήσει σε καλύτερη ενεργειακά ηχοτροφοδοσία του χώρου.

Απάντηση 2

Και πάλι θα πρέπει να υπολογιστεί η στάθμη L_2 . Επειδή, αυτή τη φορά η απόσταση d της θέσης του μικροφώνου ισούται με την κρίσιμη απόσταση D_c , θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά του πεδίου αντήρησης και μάλιστα, αναμένεται ότι η στάθμη L_2 θα αυξηθεί κατά 3 dB. Δηλαδή:

α) στάθμη ηχείου $L_{SP}(1m)=90dB$:

$$L_2 = L_{SP}(1m) - 20 \cdot \log(5)^2 + 3 = 90 - 20 \cdot 0.6990 + 3 = 79dB$$

Δηλαδή $L_1 - L_2 = 82 - 79 = 3 \text{ dB} \rightarrow$ οριακή ευστάθεια

β) στάθμη ηχείου $L_{SP}(1m)=100dB$:

$$L_2 = L_{SP}(1m) - 20 \cdot \log(5)^2 + 3 = 100 - 20 \cdot 0.6990 + 3 = 89dB$$

Δηλαδή $L_1 - L_2 = 82 - 89 = -7 \text{ dB} \rightarrow$ αστάθεια

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της κρίσιμης απόστασης και κατά συνέπεια και του αντηχητικού πεδίου οδήγησε σε απώλεια της ευστάθειας και στην (α) περίπτωση, καθώς το σύστημα οδηγείται πλέον σε οριακή ευστάθεια.

Συμπεράσματα – τελικές παρατηρήσεις

Στην πράξη βέβαια, δεν χρησιμοποιούνται πανκατευθυντικά ηχεία και μικρόφωνα. Έτσι, η αύξηση της κατευθυντικότητας των μεγαφώνων οδηγεί σε αύξηση της D_c^* , καλύτερη και στοχευμένη ηχοτροφοδοσία του χώρου, περιορίζοντας ανεπιθύμητες ανακλάσεις που θα αύξαναν τη στάθμη του αντηχητικού πεδίου στις θέσεις του ακροατηρίου. Εναλλακτικά, αύξηση της D_c θα μπορούσε

να επιτευχτεί με αύξηση της απορρόφησης του χώρου. Επιπλέον, η επιλογή μικροφώνων κατάλληλης κατευθυντικότητας μειώνει το ποσοστό της ηχητικής στάθμης εξόδου που οδηγείται εκ νέου στην είσοδο, περιορίζοντας έτσι την θετική ανάδραση που είναι η αιτία του μικροφωνισμού.

Άσκηση 4^η: Συστήματα ηχητικής εγγραφής

Ο δημοσιογραφικός οργανισμός που εργάζεστε διαθέτει δύο μικρόφωνα εξωτερικών ηχογραφήσεων (το ένα με φασματικό εύρος 100Hz-12kHz και το άλλο 60Hz-20kHz), και ψηφιακούς εγγραφείς (digital voice recorders) που καταγράφουν ψηφιακά (συμπιεσμένο) τον ήχο σε μνήμες στερεάς κατάστασης (solid state) τυχαίας προσπέλασης. Οι συσκευές αυτές διαθέτουν ενσωματωμένο στερεοφωνικό μικρόφωνο με 2 διαφορετικές ρυθμίσεις ευαισθησίας (λειτουργία συνεδριακής καταγραφής –“conference” και υπαγόρευσης –“dictation”) καθώς και μια στερεοφωνική είσοδο γραμμής (line).

Ερώτημα 1

Έχει προγραμματιστεί να πραγματοποιηθεί μια προσωπική συνέντευξη και να καλυφθεί μια καλλιτεχνική εκδήλωση που διεξάγονται παράλληλα. Πιο μικρόφωνο θα δίνετε σε κάθε δημοσιογράφο ως υπεύθυνος παραγωγής και γιατί;

Ερώτημα 2

Θέλετε να καταγράψετε τα πρακτικά μιας συνεδρίασης σε μια μικρή αίθουσα που δεν διαθέτει κάποιο ηχοσύστημα. Ποιες επιλογές – ρυθμίσεις θα κάνατε αν είχατε στη διάθεσή σας 1 ψηφιακό εγγραφέα φωνής και αν μπορούσατε να επιλέξετε το πολικό διάγραμμα κατευθυντικότητας του μικροφώνου ανάμεσα σε 360°, 120° ή 90°;

Ερώτημα 3

Ομοίως, τι επιλογές – ρυθμίσεις θα κάνατε με χρήση του παραπάνω εξοπλισμού για την ηχογράφηση συνέντευξης σε χώρο με έντονη αντήχηση; (π.χ. ένα μεγάλο άδειο αμφιθέατρο).

Ερώτημα 4

Θέλετε να καταγράψετε μια συνέντευξη τύπου που πραγματοποιείται σε ένα σύγχρονο συνεδριακό κέντρο που διαθέτει ηχοσύστημα πολλαπλών εισόδων εξόδων. Ποιες είναι οι επιλογές που θα εξετάζατε για την καταγραφή της συνέντευξης; (να παρουσιαστούν και να αναλυθούν κλιμακωτά από τη βέλτιστη στη λιγότερη επιθυμητή επιλογή).

Ερώτημα 5

Τι προβλήματα δημιουργούνται (αν δημιουργούνται) όταν ένας εκφωνητής ραδιοφωνικού προγράμματος κινείται μπρος – πίσω ή αριστερά – δεξιά γύρω από τον άξονα του μικροφώνου;

Γενικές Παρατηρήσεις Ηχοληψίας - Ηχογράφησης

Όπως έχει ήδη επισημανθεί (και αποδειχθεί από τις προηγούμενες ασκήσεις), σκοπός είναι η λήψη και καταγραφή του ήχου όσο γίνεται πιο κοντά στην πηγή και μακριά από ανεπιθύμητους θορύβους, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί ο μεγαλύτερος δυνατός λόγος SNR. Επιπλέον, θα πρέπει να αξιοποιείται όλο το εύρος των σταθμών ηχογράφησης (δηλαδή όλη η δυναμική περιοχή) και να ηχογραφούμε όσο το δυνατόν κοντά στη μέγιστη στάθμη εγγραφής (πρακτικά γύρω στα -3dB κάτω

από τη μέγιστη στάθμη), χωρίς όμως να την ξεπερνούμε (γιατί στην περίπτωση αυτή έχουμε παραμόρφωση του σήματος). Όσον αφορά τις συχνότητες, τόσο τα μικρόφωνα, όσο και οι υπόλοιπες συσκευές επεξεργασίας και εγγραφής θα πρέπει να έχουν φασματικό εύρος (ή εύρος συχνοτήτων) αντίστοιχο με αυτό των υπό ηχογράφηση σημάτων.

Απάντηση 1

Οι συχνότητες της ανθρώπινης ομιλίας κυμαίνονται από 100Hz-4kHz, περίπου. Αντίθετα, σε μια εκδήλωση ενδέχεται να υπάρχει ανάγκη ηχογράφησης μουσικής ή άλλων ηχητικών εφέ, δηλαδή ήχοι που μπορεί να έχουν πιο χαμηλές (μπάσα) ή υψηλές συχνότητες (πρίμα), δηλαδή να εκτείνονται σε όλο το φάσμα των ακουστών συχνοτήτων (20Hz-20kHz). Έτσι, το πιο σωστό είναι να χρησιμοποιηθεί το 1^ο μικρόφωνο (με εύρος συχνοτήτων 100Hz-12kHz) στη συνέντευξη και το 2^ο (με εύρος 60Hz-20kHz) στην εκδήλωση.

Απάντηση 2

Επιλογή μεγάλης ευαισθησίας (ρύθμιση “conference”) και τοποθέτηση του εγγραφέα σε όσο το δυνατόν συμμετρική θέση με ίσες αποστάσεις από όλους τους ομιλητές. Η «στόχευση» του ενσωματωμένου μικροφώνου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατή η λήψη ήχου από όλες τις θέσεις των ομιλητών. Γι’ αυτό, θα επιλεγόταν το πανκατευθυντικό πολικό διάγραμμα (360°), ώστε να εξασφαλιζόταν ότι θα λαμβάνεται ήχος από όλες τις πλευρές.

Βέβαια, εάν εξασφαλιζόταν ότι θα μιλούσε ένας κάθε φορά ομιλητής (π.χ. βάσει πρωτοκόλλου της διαδικασίας) και υπήρχε η δυνατότητα μετακίνησης του εγγραφέα, τότε το προτιμότερο θα ήταν να επιλεγεί η ρύθμιση χαμηλότερης ευαισθησίας (“dictation”) και ο εγγραφέας να τοποθετείται κοντά στο στόμα του εκάστοτε ομιλητή (εξασφαλίζοντας έτσι την καλύτερη δυνατή λήψη σήματος και άρα υψηλό SNR). Στην περίπτωση αυτή το πιο βολικό πολικό διάγραμμα θα ήταν αυτό των 90° (δηλαδή το πιο μικρό) καθώς θα αποκλειόταν όλες οι άλλες κατευθύνσεις λήψης του ήχου, εκτός από αυτή του ομιλητή.

Απάντηση 3

Όπως και πιο πάνω, χρειάζεται τοποθέτηση του εγγραφέα όσο πιο κοντά στον ομιλητή (ρύθμιση “dictation”) και μικρή γωνία λήψης (90°) ώστε να λαμβάνονται κατά το δυνατόν λιγότερο οι ανεπιθύμητοι θόρυβοι αντήχησης.

Ίδια ρύθμιση θα επιλεγόταν και κατά την ηχογράφηση σύντομων απαντήσεων σε ερωτήσεις τύπου γκάλοπ σε ένα θορυβώδες περιβάλλον (π.χ. δρόμο με έντονο θόρυβο)

Απάντηση 4

Η πιο ενδεδειγμένη λύση είναι να ζητηθεί μια έξοδος από την κονσόλα ήχου η οποία θα μπορούσε να οδηγηθεί στην είσοδο γραμμής (line) του εγγραφέα. Τα σήματα θα ήταν «καθαρά» γιατί θα καταγραφόταν από κοντινά μικρόφωνα (αυτά του ηχοσυστήματος) και θα υπήρχε μικρή επίδραση της αντήχησης και των θορύβων του χώρου (δηλαδή τουλάχιστον η ίδια ποιότητα ακρόασης με το σύστημα καταγραφής του συνεδριακού κέντρου, που θεωρητικά πρέπει να είναι καλή). Εάν δεν υπήρχε δυνατότητα λήψης εξόδου από την κονσόλα, η επόμενη λύση θα ήταν να τοποθετηθεί ο εγγραφέας πολύ κοντά στην πηγή (στους ομιλητές) και με σχετικά χαμηλή ευαισθησία (dictation). Η γωνία λήψης θα πρέπει να είναι σχετικά μικρή (120° ή 90°), έτσι ώστε να καταγράφονται όλοι οι ομιλητές. Η ύστατη λύση (εφόσον δεν υπάρχει άλλη δυνατότητα) είναι η απομακρυσμένη

ηχογράφηση, με μεγάλη ρύθμιση ευαισθησίας (conference) και όσο το δυνατό μικρότερη γωνία λήψης (90°).

Απάντηση 5

Η κίνηση αριστερά – δεξιά έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει η θέση του ομιλητή ως προς τον κύριο άξονα ευαισθησίας του μικροφώνου, άρα ενοχλητικές αυξομειώσεις της στάθμης. Η κίνηση μπρος-πίσω προκαλεί μεταβολή της απόστασης μικροφώνου-ομιλητή, άρα και πάλι αυξομειώσεις της στάθμης (π.χ. αν η απόσταση γίνει από 20cm 10cm, μπορεί να υπάρξει αύξηση σχεδόν 6dB).

Άσκηση 5^η: Ψηφιακός Ήχος

Κατά την καταγραφή ενός ήχου σε περιβάλλον Η/Υ χρησιμοποιείται το πρότυπο CD-AUDIO, δηλαδή ψηφιακός στερεοφωνικός ήχος (2 κανάλια) με 44100 δείγματα ανά δευτερόλεπτο και 16 bit κβάντιση (44,1kHz, 16bit, stereo).

Ερώτημα 1

Να υπολογιστεί ο ρυθμός ροής (bitrate) και το συνολικό μέγεθος ενός αρχείου ήχου διάρκειας 100 sec.

Ερώτημα 2

Να εκτιμηθεί ο νέος ρυθμός ροής (bitrate) και το νέο μέγεθος του αρχείου εάν ο ήχος συμπιεστεί μη απωλεστικά σε πρότυπο flac (free lossless audio codec) με μέσο λόγο συμπίεσης 2:1.

Ερώτημα 3

Να προσδιορισθεί το νέο μέγεθος και ο αντίστοιχος λόγος συμπίεσης εάν ο ήχος συμπιεστεί απωλεστικά σε πρότυπο mp3 με σταθερή ροή 128 kbps (constant bitrate –CBR).

Ερώτημα 4

Τα 2 αρχεία (flac και mp3) αποστέλλονται δικτυακά και στη συνέχεια μετατρέπονται σε ασυμπίεστο ψηφιακό ήχο PCM τύπου wav, με τα ίδια χαρακτηριστικά του CD-AUDIO (44,1kHz, 16bit, stereo). Διαφέρουν τα 2 αρχεία wav ως προς το μέγεθος και το ηχητικό τους περιεχόμενο?

Γενικές Παρατηρήσεις για τον Ψηφιακό Ήχο

Ο ψηφιακός ήχος αποτελείται από δείγματα που προέκυψαν στη διαδικασία της δειγματοληψίας, όπου κάθε δείγμα αποτελείται από δυαδικά ψηφία (bits) που δημιουργήθηκαν κατά τη διαδικασία της κβάντισης. Το σύνολο των ψηφίων που συνθέτουν την ακολουθία 1 ή περισσοτέρων ηχητικών καναλιών (2 στον στερεοφωνικό ήχο) διάρκειας 1 sec αποτελεί το ρυθμό ροής δεδομένων (bitrate: bits/sec ή bits per second –bps). Το άθροισμα όλων των bits δίνει το συνολικό μέγεθος του αρχείου ψηφιακού ήχου.

Κατά την εφαρμογή μη απωλεστικής συμπίεσης δεν έχουμε απώλεια πληροφορίας. Απλά γίνεται μια καλύτερη κωδικοποίηση και ομαδοποίηση των ψηφίων, ώστε να καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο. Έτσι, κατά την αποσυμπίεση μη απωλεστικά συμπιεσμένου ήχου γίνεται πλήρης ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας, χωρίς καθόλου απώλειες. Ωστόσο, ο λόγος συμπίεσης που επιτυγχάνεται με αυτό τον τρόπο είναι σχετικά μικρός (δηλαδή έχουμε μικρή μείωση του μεγέθους του αρχείου και του αντίστοιχου ρυθμού ροής).

Στην απωλεστική συμπίεση ήχου επιτυγχάνονται μεγαλύτεροι λόγοι συμπίεσης, με αντίτιμο την απώλεια ενός μέρους της πληροφορίας. Έτσι, κατά την αποσυμπίεση απωλεστικά συμπιεσμένου ήχου ένα μέρος της αρχικής πληροφορίας χάνεται. Στόχος είναι η απώλεια αυτή να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο αντιληπτή από την ανθρώπινη ακοή.

Απάντηση 1

Με βάση τις παρατηρήσεις που προηγήθηκαν, ο ρυθμός ροής δεδομένων υπολογίζεται για το 1 και τα 2 κανάλια ήχου (που είναι και το ζητούμενο) σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$1 \text{ ch}: 44.100 \left(\frac{\text{samples}}{\text{sec}} \right) \cdot 16 \left(\frac{\text{bits}}{\text{sample}} \right) = 705.600 \left(\frac{\text{bits}}{\text{sec}} \right)_{1 \text{ ch}}$$

$$2 \text{ ch}: 2(\text{ch}) \cdot 705.600 \frac{(\text{bits}/\text{sec})}{\text{ch}} = 1.411.200 \text{ bps} \xrightarrow{\div 1.000.000} 1,4 \text{ Mbps}$$

Το συνολικό μέγεθος προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του ρυθμού ροής bps επί τη διάρκεια (σε sec) του αρχείου:

$$1.411.200 \text{ bps} \rightarrow 1.411.200 \frac{\text{bits}}{\text{sec}} \cdot 100 \text{ sec} = 141.120.000 \text{ bits} \rightarrow$$

$$\xrightarrow{\div 8} 17.640.000 \text{ bytes} \xrightarrow{\div 1024} 17.226,56 \text{ kilobytes (KB)} \xrightarrow{\div 1024} 16,8 \text{ megabytes (MB)}$$

Απάντηση 2

Εφόσον ο λόγος συμπίεσης είναι 2:1, τόσο το συνολικό μέγεθος όσο και ο ρυθμός μετάδοσης θα μειωθούν στο μισό. Δηλαδή ρυθμός μετάδοσης θα γίνει **0,7Mbps** και το μέγεθος **8,4MB**.

Απάντηση 3

Ο λόγος συμπίεσης (Compression Ratio -CR) προκύπτει από τη διαίρεση του ρυθμού μετάδοσης του ασυμπίεστου ήχου προς τον αντίστοιχο ρυθμό του τελικού (συμπιεσμένου) ήχου, ενώ το συνολικό μέγεθος από τον πολλαπλασιασμό του ρυθμού ροής (bps) με τη διάρκεια του αρχείου (σε sec):

$$1.411.200 \text{ bps} \xrightarrow{\div 1000} 1.411,2 \text{ kbps} \rightarrow CR = \frac{1.411,2 \text{ kbps}}{128 \text{ kbps}} = 11,025 \approx 11 \rightarrow 11:1$$

$$128 \text{ kbps} \rightarrow 128.000 \frac{\text{bits}}{\text{sec}} \cdot 100 \text{ sec} = 12.800.000 \text{ bits} \rightarrow$$

$$\xrightarrow{\div 8} 1.600.000 \text{ bytes} \xrightarrow{\div 1024} 1.562,5 \text{ kilobytes (KB)} \xrightarrow{\div 1024} 1,5 \text{ megabytes (MB)}$$

Απάντηση 4

Τα 2 αρχεία wav θα έχουν ακριβώς το ίδιο μέγεθος ηχητικών δεδομένων, όσο ήταν και στο αρχικό CD-AUDIO αρχείο (16,8 MB). Ωστόσο, το ηχητικό περιεχόμενο θα είναι κάπως διαφορετικό, αφού κατά τη συμπίεση σε mp3 έχει χαθεί ένα κομμάτι πληροφορίας (δηλαδή κάποιες συχνότητες που θα απομακρυνθούν κατά τη φάση της συμπίεσης, δεν θα ανακτηθούν ξανά). Αντίθετα, το αρχείο wav που θα προκύψει από το μη απωλεστικά συμπιεσμένο αρχείο flac θα έχει ίδιο ακριβώς περιεχόμενο με το αρχικό CD-AUDIO αρχείο.

Παράρτημα – Νόμος Αντιστρόφου Τετραγώνου

Απόδειξη εξίσωσης (1): -6dB/διπλασιασμό απόστασης

Από την εξίσωση (1-α), αν διαιρέσουμε και τα 2 μέλη με τον ίδιο αριθμό I_0 , μετά λογαριθμίσουμε και τα 2 μέρη της εξίσωσης, και μετά πολλαπλασιάσουμε με τον ίδιο αριθμό 10 (έτσι ώστε να σχηματίσουμε τον τύπο ορισμού της στάθμης ηχητικής έντασης), προκύπτει:

$$\frac{I(r_2)}{I(r_1)} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \Leftrightarrow \frac{\frac{I(r_2)}{I_0}}{\frac{I(r_1)}{I_0}} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \Leftrightarrow \log\left(\frac{\frac{I(r_2)}{I_0}}{\frac{I(r_1)}{I_0}}\right) = \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \Leftrightarrow$$

$$10 \cdot \log\left(\frac{\frac{I(r_2)}{I_0}}{\frac{I(r_1)}{I_0}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2, \text{ όπου } SIL(r) = 10 \cdot \log\left(\frac{I(r)}{I_0}\right)$$
(A1)

Ιδιότητες λογαρίθμων

$$\log_{10} A^B = B \cdot \log_{10} A \quad \log_{10} (A \cdot B) = \log_{10} A + \log_{10} B \quad \log_{10} \frac{A}{B} = \log_{10} A - \log_{10} B$$
(A2)

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (A1) και (A2) προκύπτει:

$$10 \cdot \log\left(\frac{I(r_2)}{I_0}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{I(r_1)}{I_0}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \Leftrightarrow$$

$$SIL(r_2) - SIL(r_1) = 20 \cdot \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \text{ ή } SIL(r_2) = SIL(r_1) - 20 \cdot \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$
(A3)

Στην περίπτωση επίπεδων – σφαιρικών κυμάτων (μοντέλο που έχουμε ήδη υιοθετήσει στην άσκησή μας) η σχέση έντασης και πίεσης δίνεται από την εξίσωση (σελ. 4 σημειώσεων):

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c}$$
(A4)

Ξεκινώντας και πάλι από την εξίσωση (1), αν διαιρέσουμε αυτή τη φορά με p_0^2 (αντί I_0), αντικαταστήσουμε την ένταση με την πίεση βάσει της εξίσωσης (Π4) και πολλαπλασιάσουμε με 20 (αντί 10) μετά τη λογαρίθμηση, προκύπτει ο αντίστοιχος τύπος για την πίεση (αξιοποιώντας και πάλι τις ιδιότητες λογαρίθμων της εξίσωσης Π2):

$$\frac{\frac{p^2(r_2)}{\rho_0 c}}{\frac{p^2(r_1)}{\rho_0 c}} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \Leftrightarrow \frac{\frac{p^2(r_2)}{p_0^2}}{\frac{p^2(r_1)}{p_0^2}} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \Leftrightarrow \left(\frac{\frac{p(r_2)}{p_0}}{\frac{p(r_1)}{p_0}}\right)^2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \Leftrightarrow \log\left(\frac{\frac{p(r_2)}{p_0}}{\frac{p(r_1)}{p_0}}\right)^2 = \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \Leftrightarrow$$

$$10 \cdot \log\left(\frac{\frac{p(r_2)}{p_0}}{\frac{p(r_1)}{p_0}}\right)^2 = 10 \cdot \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \Leftrightarrow 20 \cdot \log\left(\frac{\frac{p(r_2)}{p_0}}{\frac{p(r_1)}{p_0}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right), \text{ με } SPL(r) = 20 \cdot \log\left(\frac{p(r)}{p_0}\right)$$
(A5)

$$20 \cdot \log\left(\frac{\frac{p(r_2)}{p_0}}{\frac{p(r_1)}{p_0}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \Leftrightarrow 20 \cdot \log\left(\frac{p(r_2)}{p_0}\right) - 20 \cdot \log\left(\frac{p(r_1)}{p_0}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$$

$$SPL(r_2) - SPL(r_1) = 20 \cdot \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \text{ ή } SPL(r_2) = SPL(r_1) - 20 \cdot \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$
(A6)

Οπότε σε κάθε περίπτωση ισχύει η εξίσωση (1).

Υπέρθωση Ηχητικών Πηγών

Υπολογισμός συνολικής στάθμης έντασης N πηγών

Όταν έχουμε πολλές ηχητικές πηγές (έστω N), τότε το συνολικό **μέτρο** της ηχητικής έντασης προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους εντάσεων όλων των πηγών.

$$I_{total}(r) = I_1(r) + I_2(r) + \dots + I_N(r) = \sum_{i=1}^N I_i(r) \text{ ή } I_{total} = \sum_{i=1}^N I_i$$
(B1)

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι όλες οι εντάσεις να αναφέρονται στο ίδιο σημείο r (όπως προκύπτει και από την παραπάνω εξίσωση) και να έχουν ίδια διεύθυνση και φορά, δηλαδή η κατεύθυνση διάδοσης του ήχου να είναι η ίδια. Η παραδοχή αυτή ισχύει κατά τη σφαιρική διάδοση στις σχετικά απομακρυσμένες θέσεις από την πηγή όπου στην ουσία έχουμε επίπεδα κύματα (αυτές είναι και οι θέσεις που συνήθως μας ενδιαφέρουν). Ωστόσο, συνήθως δεν είναι διαθέσιμη η ένταση αλλά η στάθμη έντασης μιας πηγής SIL ή L . Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να γίνει «απολογαριθμοποίηση» (δηλαδή αντιστροφή της πράξης λογαρίθμησης που γίνεται κατά τον υπολογισμό της στάθμης έντασης):

$$SIL_i = 10 \cdot \log \frac{I_i}{I_0} \Leftrightarrow I_i = I_0 \cdot 10^{\frac{SIL_i}{10}} \text{ ή } I_i = I_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$$
(B2)

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (B1) -(B2) προκύπτει η συνολική ένταση όλων των πηγών:

$$I_{total} = I_0 \cdot \left(10^{\frac{SIL_1}{10}} + 10^{\frac{SIL_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{SIL_N}{10}} \right) = I_0 \cdot \sum_{i=1}^N 10^{\frac{SIL_i}{10}} \quad \text{ή} \quad I_{total} = I_0 \cdot \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (B3)$$

$$SIL_{total} = 10 \cdot \log \left(\frac{I_{total}}{I_0} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{\cancel{I_0} \cdot \left(10^{\frac{SIL_1}{10}} + 10^{\frac{SIL_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{SIL_N}{10}} \right)}{\cancel{I_0}} \right) \quad (B4)$$

Υπολογισμός συνολικής στάθμης πίεσης N ασυσχέτιστων πηγών

Έχει προσδιορισθεί ότι αν έχουμε N ασυσχέτιστες πηγές ήχου (δηλαδή τυχαίες πηγές που δεν επηρεάζει η μία την άλλη και έχουν διαφορετικές κυματομορφές πίεσης), τότε η συνολική ακουστική πίεση p_{total} (ενεργός τιμή) προκύπτει από όλες τις επιμέρους πηγές με βάση τον κάτωθι στατιστικό τύπο:

$$p_{total}^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_N^2 = \sum_{i=1}^N p_i^2 \quad (B5)$$

Και πάλι, δεν έχουμε τις ακουστικές πιέσεις των πηγών (και τις στιγμιαίες τους τιμές), αλλά τις αντίστοιχες στάθμες ηχητικής πίεσης, για τις οποίες κατά αντιστοιχία με την (B2) ισχύει:

$$SPL_i = L_i = 20 \cdot \log \frac{p_i}{p_0} \Leftrightarrow L_i = 10 \cdot \log \frac{p_i^2}{p_0^2} \Leftrightarrow p_i^2 = p_0^2 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (B6)$$

όπου χρησιμοποιώντας και πάλι τις ιδιότητες λογαρίθμων προκύπτει:

$$L_{total} = 20 \cdot \log \left(\frac{p_{total}}{p_0} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{p_{total}}{p_0} \right)^2 = 10 \cdot \log \left(\frac{p_{total}^2}{p_0^2} \right) \Leftrightarrow$$

$$L_{total} = 10 \cdot \log \left(\frac{\cancel{p_0^2} \cdot \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_N}{10}} \right)}{\cancel{p_0^2}} \right) \rightarrow (4) \quad (B7)$$

Υπολογισμός συνολικής στάθμης πίεσης N συμφασικών (coherent) πηγών

Στην πιο σπάνια περίπτωση που οι πηγές είναι συσχετισμένες και μάλιστα συμφασικές (coherent), τότε υπάρχει συγχρονισμός στην εμφάνιση θετικών και αρνητικών ακρότατων ακουστικής πίεσης από όλες τις πηγές, δηλαδή οι αντίστοιχες κυματομορφές ηχητικής πίεσης δεν παρουσιάζουν χρονική υστέρηση ή όπως λέγεται στην επιστημονική ορολογία δεν έχουν «διαφορά φάσης». Στην περίπτωση αυτή η συνολική (ενεργός) ακουστική πίεση προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους πιέσεων, οπότε:

$$p_{coh} = p_1 + p_2 + \dots + p_N = \sum_{i=1}^N p_i, \quad \text{όπου} \quad (B8)$$

$$SPL_i = L_i = 20 \cdot \log\left(\frac{p_i}{p_0}\right) \Leftrightarrow p_i = p_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{20}}$$

Οπότε η συνολική στάθμη των συμφασικών πηγών γίνεται:

$$L_{coh} = 20 \cdot \log\left(\frac{p_{coh}}{p_0}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{\sum_{i=1}^N p_i}{p_0}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{\sum_{i=1}^N p_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{20}}}{p_0}\right) \Rightarrow$$

$$L_{coh} = 20 \cdot \log\left(\frac{\cancel{p_0} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{20}}}{\cancel{p_0}}\right) = 20 \cdot \log\left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{20}}\right) \quad (B9)$$

* Περαιτέρω αναλύσεις και αποδείξεις των εξισώσεων παρατίθενται σε Παράρτημα στο τέλος του παρόντος. Τα στοιχεία αυτά είναι προαιρετικά και απευθύνονται στον αναγνώστη που επιδιώκει μεγαλύτερη εμβάθυνση και καλύτερη κατανόηση των φαινομένων, αλλά προϋποθέτουν και κάποιο βασικό μαθηματικό υπόβαθρο