

5^ο ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

ΣΥΧΝΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΩΡΟΥ

Σπύρος Κουζούπης - Σηφάκης Μηνάς
Έκδοση 1.0 – 10/2007

Περίληψη

Σκοπός του εργαστηρίου είναι η διερεύνηση της έννοιας και της μεθοδολογίας μέτρησης της συχνοτικής απόκρισης ενός συστήματος ή χώρου. Θα μετρηθεί η συχνοτική απόκριση του χώρου του εργαστηρίου χρησιμοποιώντας τόσο την παλαιότερη (που βασίζεται στην απευθείας κρουστική διέγερση του χώρου) όσο και την πλέον σύγχρονη μέθοδο (που βασίζεται στη διέγερση του χώρου με μια ακολουθία μεγίστου μήκους (MLS)) και θα καταδειχθούν τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα της τελευταίας. Από την κρουστική απόκριση του χώρου θα εξαχθούν και οι βασικές παράμετροι αξιολόγησης της ακουστικής του χώρου (χρόνος αντήχησης, δείκτες διαύγειας και άρθρωσης).

Θεωρητική Εισαγωγή

1. Ορισμοί – βασικές ιδιότητες:

Η κρουστική απόκριση ενός συστήματος ονομάζεται η απόκριση εξόδου του συστήματος όταν στην είσοδο του εφαρμοστεί ένας παλμός απειροστής διάρκειας και μοναδιαίου ύψους (με μαθηματικούς όρους μια συνάρτηση δέλτα $\delta(t)$). Γνωρίζοντας την κρουστική απόκριση ενός γραμμικού και χρονικά αμετάβλητου συστήματος μπορούμε να υπολογίσουμε την απόκριση του σε οποιοδήποτε σήμα εισόδου.

- Η απαίτηση της γραμμικότητας συνεπάγεται ότι η απόκριση του συστήματος όταν στην είσοδο του εφαρμοστούν ταυτόχρονα δυο σήματα ισούται με το άθροισμα των αποκρίσεων που θα προέκυπταν εάν τα δύο σήματα εφαρμοστούν ξεχωριστά.
- Η απαίτηση της χρονικής μη - μεταβλητότητας του συστήματος συνεπάγεται ότι κάθε φορά που στην είσοδο του συστήματος εφαρμοστεί το ίδιο σήμα η έξοδος του θα είναι ταυτόσημη.

Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις η απόκριση του συστήματος, $y(t)$, σε ένα οποιοδήποτε σήμα εισόδου, $x(t)$, μπορεί να προκύψει με τα παρακάτω βήματα:

1. Διαιρούμε το σήμα εισόδου σε απειροστά τμήματα που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ΔT (εκτελούμε δηλαδή δειγματοληψία με συχνότητα δειγματοληψίας $f_s=1/\Delta T$)
2. Θεωρώντας κάθε μεμονωμένο δείγμα ως ένα απειροστό παλμό, η απόκριση του συστήματος σε κάθε μεμονωμένο τέτοιο παλμό θα ισούται με τη κρουστική του απόκριση πολλαπλασιασμένη με το πλάτος του παλμού
3. Αθροίζοντας σε κάθε χρονική στιγμή της επίδραση από όλους του προηγούμενους παλμούς (δείγματα) προκύπτει η συνολική απόκριση του συστήματος στη σύνθετη κυματομορφή εισόδου του συστήματος.

Με μαθηματικούς όρους η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται συνέλιξη (convolution) της κρουστικής απόκρισης (τη συμβολίζουμε $h(t)$) του συστήματος με το σήμα εισόδου (το συμβολίζουμε με $x(t)$). Δηλαδή:

$$y(t_o) = \int_{t=0}^{\infty} h(t)x(t-t_o)dt \quad 1$$

, ή, σε διακριτό χρόνο,

$$y(k) = \sum_n h(n)x(n-k) \quad 2$$

Ο μετασχηματισμός Fourier της κρουστικής απόκρισης ενός συστήματος ονομάζεται συχνοτική απόκριση, $H(f)$, του συστήματος και χρησιμοποιείται ευρύτατα για το χαρακτηρισμό και τη συγκριτική και ποιοτική αξιολόγηση συστημάτων. Ισχύει δηλαδή:

$$H(f) = F\{h(t)\} \quad 3$$

, όπου με $F\{\}$ συμβολίζουμε το μετασχηματισμό Fourier.

Παρατηρούμε δηλαδή ότι η απόκριση του συστήματος σε ένα μοναδιαίο παλμό δύναται να μας παράσχει πληροφορίες και για την απόκριση του συστήματος σε σήμα εισόδου οποιασδήποτε συχνότητας. Η παραπάνω ιδιότητα προκύπτει άμεσα από την σχέση (2) θεωρώντας ως είσοδο του συστήματος μια συνάρτηση δέλτα και χρησιμοποιώντας τη βασική ιδιότητα ότι ο μετασχηματισμός Fourier της δέλτα συνάρτησης είναι μια ευθεία γραμμή παράλληλη προς τον άξονα των συχνοτήτων (δηλαδή το φάσμα της περιέχει ίση ενέργεια ανά συχνότητα, όπως ακριβώς και το φάσμα του λευκού θορύβου).

2. Τρόποι Μέτρησης:

A). Μέθοδος του απειροστού παλμού: Ο προφανής και ιστορικά πρώτος τρόπος μέτρησης της κρουστικής απόκρισης ενός συστήματος είναι με την εφαρμογή ενός μοναδιαίου παλμού απειροστής διάρκειας στην είσοδο του συστήματος και την καταγραφή της απόκριση στην έξοδο του. Η εν λόγω μέθοδος παρότι θεωρητικά ορθή, στην πράξη όμως εμφανίζει σημαντικά μειονεκτήματα, ειδικότερα κατά την εφαρμογή της σε ακουστικά και ηλεκτρακουστικά συστήματα. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου:

1. Είναι πρακτικά αδύνατον να δημιουργηθεί ένας παλμός απειροστού πλάτους καθότι όλα τα συστήματα (ηλεκτρονικά και μηχανικά) έχουν ένα πεπερασμένο χρόνο αντίδρασης
2. Σε όλα τα φυσικά συστήματα υπάρχει κάποιας μορφής θόρυβος. Καθότι η ενέργεια του παλμού διεγείρει το σύνολο της απόκρισης του συστήματος (το φάσμα του περιέχει ίση ενέργεια σε όλες της συχνότητες) προκειμένου να υπάρξει ικανοποιητικός λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του συστήματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί παλμός εισόδου πολύ μεγάλου πλάτους. Αποτέλεσμα αυτού μπορεί να είναι η οδήγηση του συστήματος στη μη γραμμική περιοχή λειτουργίας ως και η καταστροφή του.
3. Εάν κατά τη διάρκεια της απόκρισης του συστήματος υπάρξει κάποιο εξωτερικό τυχαίο γεγονός (εξωγενής στιγμιαίος θόρυβος λ.χ.) δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αφαιρεθεί η επίδραση του και η μέτρηση θα πρέπει να επαναληφθεί.
4. Ειδικά για ακουστικές μετρήσεις ισχύουν και οι παρακάτω περιορισμοί:

- a. Κατά τη κρουστική διέγερση ενός χώρου σε υψηλές στάθμες, με χρήση μεγαφώνων υπάρχει μεγάλος κίνδυνος καταστροφής των μονάδων χαμηλών συχνοτήτων.
- b. Κατά τη διέγερση με φυσικές κρουστικές πηγές (λ.χ. πυροβολισμούς, κρούση αντικειμένων) υπάρχει πολύ μικρή επαναληψιμότητα και εάν χρησιμοποιηθούν υψηλές στάθμες υπερφόρτωση των βαθμίδων καταγραφής.

Για τους παραπάνω λόγους η μέθοδος του απειροστού παλμού δε βρίσκει σήμερα εφαρμογή στη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης ακουστικών και ηλεκτρακουστικών συστημάτων.

B) Μέθοδος του λευκού θορύβου: Δεδομένου ότι ο λευκός θόρυβος έχει το ίδιο φάσμα εκπομπής με τον απειροστό παλμό το σύστημα διεγείρεται με λευκό θόρυβο και καταγράφεται ταυτόχρονα η είσοδος και η έξοδος του συστήματος. Εν συνεχεία λαμβάνεται ο μετασχηματισμός Fourier των σημάτων εισόδου, $X(f)$ και εξόδου, $Y(f)$ και από την διαίρεση τους προκύπτει η συχνοτική απόκριση, $H(f)$, του συστήματος.

Αν ονομάσουμε: $x[n]$ το λευκό θόρυβο που εισάγεται στο σύστημα, $y[n]$ το σήμα εξόδου του συστήματος, $h[n]$ την κρουστική απόκριση του συστήματος, $F\{ \}$ το μετασχηματισμό Fourier τότε τα παραπάνω δύνανται να γραφούν με μαθηματικούς όρους ως εξής:

$$\Rightarrow y[n] = (h * x)[n] \Leftrightarrow F\{y[n]\} = F\{h[n]\} \cdot F\{x[n]\}$$

$$\Leftrightarrow Y(f) = H(f) \cdot X(f) \Leftrightarrow H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad 4$$

Από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier της συχνοτικής απόκρισης λαμβάνεται η παλμική απόκριση του συστήματος.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τα παρακάτω μειονεκτήματα:

1. Απαιτείται ένα επιπλέον κανάλι καταγραφής για το σήμα εισόδου του συστήματος
2. Εάν κατά τη διάρκεια της μέτρησης της απόκρισης του συστήματος υπάρξει κάποιο εξωτερικό τυχαίο γεγονός (εξωγενής στιγμιαίος θόρυβος λ.χ.) δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αφαιρεθεί η επίδραση του από τη μέτρηση.
3. Σε συστήματα με υψηλό θόρυβο βάρους απαιτείται μεγάλος χρόνος μέτρησης (διπλασιασμός του χρόνου μέτρησης συνεπάγεται βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο κατά 3dB).
4. Προκειμένου να ληφθεί η κρουστική απόκριση εφαρμόζονται δυο διακριτοί μετασχηματισμούς Fourier (ορθός και αντίστροφος). Κατά συνέπεια απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη χρήση των παραμέτρων του μετασχηματισμού (τύπος και μήκος παραθύρου, αλληλοεπικάλυψη, φίλτρα κλπ) και σε κάθε περίπτωση υφίστανται φυσικοί περιορισμοί στην ακρίβεια των υπολογισμών (λ.χ. το γινόμενο $T * \Delta f$ είναι πάντα μεγαλύτερο της μονάδας, όπου T το μήκος του σήματος και Δf το συχνοτικό εύρος).
5. Καθότι οι περισσότεροι ηλεκτρακουστικοί μετατροπείς εμφανίζουν φασικές αποκλίσεις στα όρια του ακουστικού συχνοτικού φάσματος η προσθήκη μιας επιπλέον μονάδας (καταγραφή του σήματος εισόδου) αυξάνει τις πιθανότητες σφάλματος στις αντίστοιχες μονάδες.

Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιούταν σε παλαιότερα μετρητικά συστήματα αλλά η χρήση της έχει περιορισθεί σημαντικά στις μέρες μας.

Γ) Μέθοδος της ακολουθίας μεγίστου μήκους (MLS):

Η μέθοδος της ακολουθίας μεγίστου μήκους (Maximum Length Sequence- MLS) αναπτύχθηκε τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια και έφερε κυριολεκτικά επανάσταση στον τρόπο πραγματοποίησης των ακουστικών μετρήσεων. Εφαρμόζεται σε κάθε γραμμικό και χρονικά αμετάβλητο σύστημα ακουστικό, μηχανικό ή ηλεκτρονικό και βασίζεται στην διέγερση του συστήματος με μια εξειδικευμένη κατηγορία σημάτων εισόδου που ονομάζονται ακολουθίες μεγίστου μήκους και αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της θεωρίας αριθμών. Στην αρχική της μορφή η μέθοδος αναπτύχθηκε για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών των μεγαφώνων.

Μια ακολουθία μεγίστου μήκους αποτελείται από μια σειρά μοναδιαίων παλμών και παύσεων (μηδενικών) που εναλλάσσονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε, σε κάθε χρονική στιγμή, η πιθανότητα να εμφανιστεί ένας θετικός παλμός ή παύση να είναι ίση (δηλαδή 50%) και ανεξάρτητη από το προηγούμενο δείγμα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας ακολουθίας μεγίστου μήκους είναι τα ακόλουθα.

1. Παράγεται με αυστηρά καθορισμένο, ντετερμινιστικό, τρόπο
2. Ο αριθμός των μονάδων είναι ίσος με τον αριθμό των μηδενικών πλέον μίας (της αρχικής μονάδας)
3. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function) είναι μια δέλτα συνάρτηση¹
4. Ο μετασχηματισμός Fourier της ακολουθίας περιέχει σταθερή ενέργεια ανά συχνότητα, όπως δηλαδή και μια δέλτα συνάρτηση ή ο λευκός θόρυβος (για το λόγω αυτό οι ακολουθίες μεγίστου μήκους ονομάζονται και ψευδοτυχαίος λευκός θόρυβος).
5. Είναι περιοδικό σήμα με περίοδο που εξαρτάται από ένα ακέραιο N ο οποίος ονομάζεται τάξη της ακολουθίας. Το μήκος (περίοδος) μιας ακολουθίας τάξης N ισούται προς: $L = 2^N - 1$ τιμές.

Αν ονομάσουμε: $x[n]$ την ακολουθία μεγίστου μήκους που εισάγεται στο σύστημα, $y[n]$ το σήμα εξόδου του συστήματος, $h[n]$ την κρουστική απόκριση του συστήματος, R_{xx} την αυτοσυσχέτιση και με $*$ τη συνέλιξη, τότε από τις ιδιότητες 3,4 προκύπτουν τα παρακάτω:

$$R_{xx}[T = kt_o] = \sum_n x[nt_o - kt_o]x[nt_o] = \delta(t - kt_o), \text{ (ιδιότητα 3)}$$

$$y[n] = (h * x)[n] \Leftrightarrow R_{yx}[n] = (h * R_{xx})[n]$$

$$\xrightarrow{R_{xx} = \delta(n)} R_{yx}[n] = h[n]$$

5

Δηλαδή η κρουστική απόκριση του συστήματος ισούται με τη ετεροσυσχέτιση (cross-correlation) της εισόδου με την έξοδο του συστήματος. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των ακολουθιών μεγίστου μήκους τις κατέστησε το βασικό σήμα εισόδου για τη μέτρηση της απόκρισης οποιουδήποτε γραμμικού και χρονικά αμετάβλητου συστήματος.

Η βασική διαφοροποίηση της μεθόδου MLS με τη διέγερση του συστήματος με λευκό θόρυβο είναι ότι σε αυτή την περίπτωση όλοι οι υπολογισμοί λαμβάνουν χώρα στο πεδίο του χρόνου και δε παρεμβάλλεται κανένας μετασχηματισμός Fourier περιορίζοντας έτσι σημαντικά τα πιθανά σφάλματα. Επίσης, επειδή το σήμα εισόδου

¹ Για την ακρίβεια είναι περίπου μια δέλτα συνάρτηση καθώς το πλάτος των λοιπών όρων της ισούται προς $1/N$.

είναι 100% ντετερμινιστικό (δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή γνωρίζουμε ακριβώς την τιμή που εισάγεται στο σύστημα), με τη διαδικασία της ετεροσυσχέτισης αποκλείονται από την μέτρηση όλα τα συμβάντα που δε συνδέονται γραμμικά² με την είσοδο του συστήματος (λ.χ. τυχαίος θόρυβος). Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια *πολύ σημαντική αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο* και είναι δυνατή η πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων σε περιβάλλον με υψηλή τιμή του θορύβου βάθους.

Ο βασικός περιορισμός που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη σε μετρήσεις με ακολουθία μεγίστου μήκους είναι ότι το μήκος της ακολουθίας που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μήκος της προς μέτρηση απόκρισης.

Όπως ισχύει και για μετρήσεις με λευκό θόρυβο διπλασιασμός του αριθμού των μετρήσεων (επαναλήψεων) συνεπάγεται διπλασιασμό του λόγου σήματος προς θόρυβο (3dB).

3. Αξιοποίηση μετρήσεων:

Ακολουθούν οι κύριες εφαρμογές της μέτρησης της κρουστικής απόκρισης που αφορούν στο μηχανικό ήχο:

Ηλεκτρακουστική

- Μετρήσεις κρουστικής & συχνοτικής απόκρισης, πολικά διαγράμματα ηχείων.
- Ευθυγράμμιση μεγαφώνων, ηχείων
- Ισοστάθμιση συστημάτων και χώρων
- Μετρήσεις κρουστικής & συχνοτικής απόκρισης γραμμικών μετατροπέων (φίλτρων, ενισχυτών, προενισχυτών, κλπ)

Ακουστική

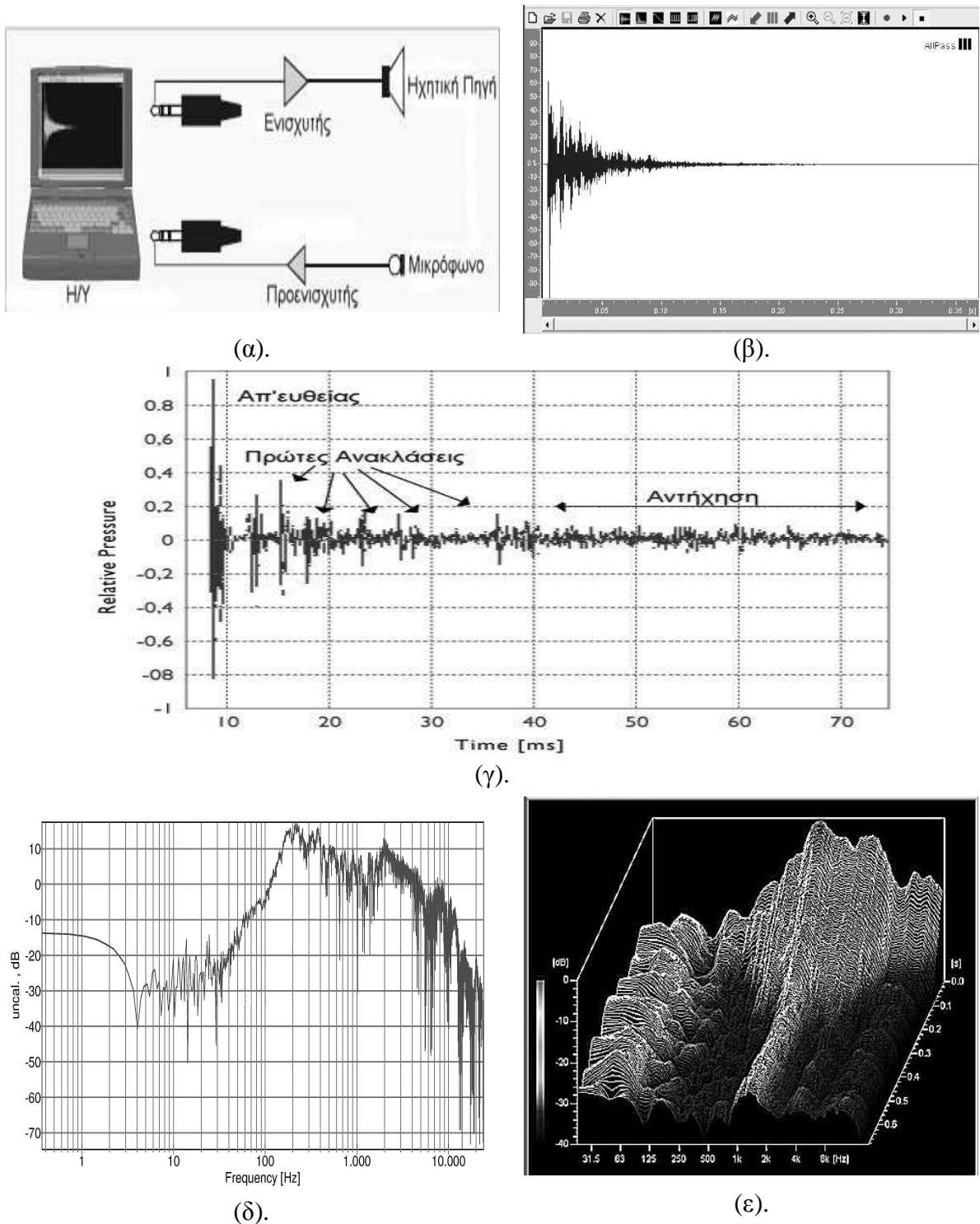
Σε φυσικά ακουστικά συστήματα (αίθουσες) η κρουστική απόκριση μεταβάλλεται μεταξύ των διαφόρων ζευγών σημείων πηγής - καταγραφικού. Συνήθως λαμβάνονται πολλές μετρήσεις και πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση των αποτελεσμάτων σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή.

Η γνώση της κρουστικής απόκρισης ενός χώρου μας επιτρέπει να υπολογίσουμε ένα μεγάλο πλήθος ακουστικών παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα:

1. Το χρόνο αντήχησης της αίθουσας (RT60, RT20, EDT κλπ)
2. Ρυθμό πτώσης στασίμων κυμάτων
3. Τους δείκτες διαύγειας και διακριτότητας (C50, C80)
4. Τον κεντρικό χρόνο (Ts) του χώρου
5. Τους δείκτες καταληπτότητας ομιλίας (STI, RASTI)
6. Εφόσον χρησιμοποιηθεί και δεύτερο μικρόφωνο (αμφικατευθυντικό), τους ακουστικούς δείκτες ανώτερης τάξεως (πλευρικά κλάσματα, LF, δείκτες αμφιωτικής ετεροσυσχέτισης IACC, κλπ)
7. Εφαρμόζοντας διαδοχικούς τμηματικούς μετασχηματισμούς Fourier (short time Fourier transforms) μπορούμε να λάβουμε και να απεικονίσουμε γραφικά τη χρονική εξέλιξη της ενέργειας στο δωμάτιο (ETF plot) και να εντοπίσουμε στάσιμα κύματα ή καθυστερημένες ανακλάσεις στο χώρο.

² Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που η μέθοδος MLS δύναται να εφαρμοστεί μόνο σε γραμμικά συστήματα.

Στην εικόνα 1 που ακολουθεί απεικονίζεται η κρουστική και η συχνотική απόκριση ενός χώρου, η χρονική εξέλιξη της ηχητικής ενέργειας στη θέση μέτρησης (ETF plot) καθώς και η συνδεσμολογία μέτρησης.



Εικόνα 1

Μέτρηση Κρουστικής Απόκρισης Χώρου:

- (α). Συνδεσμολογία για μετρήσεις με σύστημα MLS, (β), (γ). Κρουστική απόκριση χώρου, (δ). Συχνотική απόκριση χώρου, (ε) Αποσβεννύόμενα φάσματα

6^ο ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΓΑΛΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΧΩΡΟΥ

Σπύρος Κουζούπης - Σηφάκης Μηνάς
Έκδοση 1.0 – 11/2007

Περίληψη

Σκοπός του εργαστηρίου είναι η παρουσίαση των βασικών παραμέτρων της ακουστικής μεγάλων κλειστών χώρων (καθαρότητα, διαύγεια, ευκρίνεια, καταληπτότητα ομιλίας) που απαντώνται κατά την εκπόνηση μιας ακουστικής μελέτης. Θα εισαχθούν οι μαθηματικές σχέσεις – ορισμοί των αντίστοιχων μεγεθών, θα περιγραφεί η μεθοδολογία μέτρησης τους και θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις στο αμφιθέατρο του τμήματος.

Στα πλαίσια της επεξεργασίας των μετρήσεων θα πραγματοποιηθεί υπολογισμός του χρόνου αντήχησης του αμφιθέατρου με βάση τα αντίστοιχα υλικά και επιφάνειες, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα με τις τιμές που μετρήθηκαν και τις τιμές που προτείνονται (στη διεθνή βιβλιογραφία) για χώρους αντίστοιχης χρήσης. Εφόσον κριθεί απαραίτητο θα προταθούν μέτρα ακουστικής βελτίωσης του χώρου.

1.1 Γενικά

Η ακουστική των μεγάλων χώρων συναυλιών και ακροάσεων αποτελούσε ανέκαθεν μια μεγάλη πρόκληση για ακουστικούς και αρχιτέκτονες. Για πάρα-πολλά χρόνια επικρατούσε ασάφεια σχετικά με τον ορισμό της «καλής ακουστικής» μιας αίθουσας ενώ η εκτίμηση της επίδρασης των διαφόρων αρχιτεκτονικών παρεμβάσεων στην ακουστική της αίθουσας βασιζόνταν αποκλειστικά σε εικασίες ή εμπειρικούς κανόνες. Χρειάστηκαν αρκετά χρόνια εως ότου προσδιορισθεί με αντικειμενικά μέτρα (έστω και μερικώς) η έννοια της καλής ακουστικής ενός χώρου και να καταρτιστεί μια βασική μεθοδολογία για την επίτευξη της.

1.2 Υποκειμενική Περιγραφή

Ο προσδιορισμός της έννοιας της καλής ακουστικής υπήρξε εξ' αρχής ένα πρόβλημα κεφαλαιώδους σημασίας για την αρχιτεκτονική ακουστική καθότι, όπως και σε κάθε εφαρμοσμένη επιστήμη, προκειμένου να αντιμετωπιστεί ένα πρόβλημα πρέπει πρώτα να αναλυθεί στα επιμέρους στοιχεία του και να καθορισθούν συγκεκριμένοι στόχοι.

Στην προκειμένη περίπτωση η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι η έννοια της καλής ακουστικής είναι εκ των πραγμάτων υποκειμενική και λόγω της πολυπλοκότητας του μηχανισμού ακοής του ανθρώπου καθορίζεται από πολλούς διαφορετικούς παραμέτρους. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι στις αντίστοιχες έρευνες συμμετείχαν, με πολύ σημαντική συνεισφορά και ψυχολόγοι.

Αρχικά λοιπόν η έννοια της καλής ακουστικής προσδιορίστηκε με υποκειμενικούς όρους και σε δεύτερη φάση, κατόπιν πολυετών ερευνών, καθορίστηκαν και τα αντίστοιχα ποσοτικά (αντικειμενικά) μεγέθη με τα οποία σχετίζεται.

Παρότι η σχετική βιβλιογραφία είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη και κατά καιρούς έχουν προταθεί πληθώρα επιμέρους παραμέτρων για την περιγραφή της υποκειμενικής διάστασης του φαινομένου οι βασικές παράμετροι μπορούν να συνοψισθούν ως εξής¹:

1. Η ευκρίνεια (clarity) του ήχου. Πρέπει να είναι τέτοια ώστε οι λεπτομέρειες του ήχου να είναι ικανές να αναγνωριστούν και να εκτιμηθούν από το ακροατήριο
2. Η ακουστότητα (loudness). Η επάρκεια δηλαδή ηχητικής έντασης σε κάθε σημείο του ακροατηρίου ώστε να είναι ακουστά όλα τα όργανα της ορχήστρας τόσο στα δυνατά όσο και στα σιγανά περάσματα.
3. Η αίσθηση της περικύκλωσης από το (ή βύθισης στο) ηχητικό πεδίο (envelopment). Κατά πόσο δηλαδή ο ακροατής έχει την αίσθηση του χώρου που τον περιβάλλει.
4. Η αίσθηση της εγγύτητας/ιδιαιτερότητας (intimacy) αναφορικά στο χώρο και την ορχήστρα
5. Η αίσθηση της ολότητας της ηχητικής πηγής (ensemble), κατά πόσο δηλαδή η ορχήστρα ακούγεται ως ένα ενιαίο σύνολο και όχι ως μεμονωμένες πηγές.

1.3 Αντικειμενική Περιγραφή

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν τα παραπάνω μεγέθη ούτως ώστε να δύνανται αφενός μεν να μετρηθούν με αντικειμενικό τρόπο αλλά και να τεθούν τιμές στόχοι για μια ακουστική μελέτη έχουν προταθεί ένα σύνολο από παραμέτρους, οι κυριότεροι από του οποίους παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Ο Χρόνος Αντήχησης (Reverberation Time): Ο χρόνος δηλαδή που απαιτείται για να μειωθεί το ηχητικό πεδίο που δημιουργείται από ηχητική πηγή σε κλειστό χώρο κατά 60dB μετά τη σιγή της ηχητικής πηγής.
2. Ο Αρχικός Χρόνος Μείωσης του Ηχητικού Πεδίου (Early Decay Time). Είναι συγγενές μέγεθος προς τον χρόνο αντήχησης (χρόνος μείωσης του ηχητικού πεδίου κατά 60dB) μόνο που υπολογίζεται με βάση το ρυθμό μείωσης των πρώτων 10dB. Σε ένα χώρο με διάχυτο πεδίο ταυτίζεται με το χρόνο αντήχησης. Έχει αποδειχθεί με ψυχομετρικά τεστ ότι σχετίζεται περισσότερο με την υποκειμενική αίσθηση της αντήχησης.
Συνήθως τόσο ο χρόνος αντήχησης όσο και ο αρχικός χρόνος μείωσης υπολογίζονται από την αντίστροφη ολοκλήρωση του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης του χώρου (μέθοδος Schroeder).
3. Η αρχική χρονική καθυστέρηση (Initial Time Delay, ITD): Μετράται σε s και είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της άφιξης του απ'ευθείας ήχου της ηχητικής πηγής και των πρώτων ανακλάσεων. Υπολογίζεται από την κρουστική απόκριση μεταξύ των δύο θέσεων.
4. Η Ευκρίνεια (Objective Clarity) ή Δείκτης Πρώιμης προς Όψιμης Ηχητική Ενέργεια (Early-to-Late Sound Index) σχετίζεται με την ισορροπία μεταξύ του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων προς το συνολικό το ηχητικό πεδίο λόγω αντήχησης.
Ορίζονται δύο δείκτες ανάλογα με τη χρήση ενός χώρου: Ο δείκτης C50 προκειμένου για ομιλία και ο δείκτης C80 για μουσική.
Ισούται με δέκα φορές το δεκαδικό λογάριθμο του λόγου της ηχητικής ενέργειας που φθάνει στο σημείο καταγραφής στα πρώτα 50ms (80ms) προς την συνολική ενέργεια μετά τα πρώτα 50ms (80ms), μετρούμενη με σημειακή παντοκατευθυντική πηγή ήχου.
Μετράται σε dB και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} |p(t)|^2 dt}{\int_{80ms}^{\infty} |p(t)|^2 dt}, \text{ dB} \quad (1)$$

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} |p(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |p(t)|^2 dt}, \text{ dB} \quad (2)$$

Εφόσον είναι γνωστή η κρουστική απόκριση μεταξύ δύο σημείων ενός χώρου οι παραπάνω δείκτες υπολογίζονται με απευθείας αριθμητική ολοκλήρωση της κρουστικής απόκρισης για τα αντίστοιχα διαστήματα.

5. Οι Δείκτες Καταληπτότητας Ομιλίας (δείκτης μετάδοσης λόγου - speech transmission index, STI και ταχύς δείκτης μετάδοσης λόγου-rapid speech transmission index, RASTI):

Οι εν λόγω δείκτες προέρχονται από τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, αντιμετωπίζουν την αλυσίδα ηχητική πηγή- χώρος- ακροατής ως ένα κανάλι μετάδοσης (γραμμή μεταφοράς) και μετρούν τη μεταβολή του πλάτους διαμόρφωσης αργά μεταβαλλόμενων σημάτων κατά μήκος της γραμμής. Για την πραγματοποίηση της μέτρησης τα παλαιότερα μετρητικά συστήματα χρησιμοποιούσαν ένα ειδικό σήμα που προσομοίωνε κάποια από τα βασικά φασματικά και στατιστικά χαρακτηριστικά της ανθρώπινης ομιλίας αλλά τα περισσότερα σύγχρονα μετρητικά συστήματα βασίζονται στη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης και στη εξαγωγή της τιμής των δεικτών καταληπτότητας από αυτήν. Αρχικά υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης διαμόρφωσης πλάτους (modulation transfer function) σε επιλεγμένες συχνότητες:

$$M(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2\pi f T}{13.8} \right]^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{(-S/N)}{10}}} \quad (3)$$

και από αυτήν (βλ. παράρτημα Β παρακάτω) οι δείκτες καταληπτότητας. Οι μετρήσεις για το STI γίνονται σε ζώνες εύρους οκτάβας στις συχνότητες από 125 έως 8 kHz ενώ η μέθοδος RASTI που προέκυψε από την απλοποίηση της μεθόδου STI χρησιμοποιεί μόνο τις οκτάβες με κεντρικές συχνότητες στα 500 Hz και τα 2000 Hz.

Η κλίμακα που χρησιμοποιείται έχει εύρος από 0 μέχρι 1.

6. Ο Κεντρικός Χρόνος (Centre Time). Εισήχθη από τον Cremer και είναι το κέντρο βάρους κατά μήκος του άξονα του χρόνου, του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης.

$$\text{Centre time} = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (4)$$

Σχετίζεται άμεσα με το χρόνο άφιξης, στη θέση του ακροατή, της μέγιστης ενέργειας που εκπέμπεται από την ηχητική πηγή.

7. Η Ολική Ηχητική Στάθμη (Total Sound Level, G). Σχετίζεται άμεσα με την ακουστότητα μιας ηχητικής πηγής που τοποθετείται στην αίθουσα καθότι η ίδια ηχητική πηγή (λ.χ. ορχήστρα) παράγει διαφορετικές ηχητικές στάθμες όταν τοποθετείται σε διαφορετικές αίθουσες. Υπολογίζεται παίρνοντας το δεκαπλάσιο του δεκαδικού λογάριθμου του λόγου της ηχητικής ενέργειας που φθάνει σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση προς την συνολική

ενέργεια που ακτινοβολεί η πηγή σε απόσταση 10m σε ελεύθερο πεδίο (δηλαδή χωρίς ανακλάσεις).

Για αίθουσες συναυλιών θεωρείται ότι η τιμή του G θα πρέπει να είναι της τάξης των 10dB.

$$G = 10 \log \left(\frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \right) \quad (5)$$

Όπου: $p(t)$ η ηχητική πίεση στο σημείο μέτρησης $p_A(t)$ είναι η απόκριση στα 10 m από μία ίδια πηγή αν βρισκόμασταν σε ανηχοϊκό θάλαμο.

8. Η Υποστήριξη της Σκηνής (Stage Support). Είναι ένα μέτρο της υποστήριξης που παρέχει η σκηνή στους ομιλητές/μουσικούς. Μετρείται πάνω στη σκηνή με ένα μικρόφωνο σε απόσταση 1m από την ηχητική πηγή και υπολογίζεται από το δεκαπλάσιο δεκαδικό λογάριθμο του λόγου της συνολικής ηχητικής ενέργειας των πρώτων ανακλάσεων (ενέργεια που φθάνει σε χρόνο από 0.02 s ως 0.1s) προς την ηχητική ενέργεια του απευθείας πεδίου της πηγής² (ενέργεια που φθάνει σε χρόνο ως 0.01s).

$$ST1 = 10 \log \left(\frac{\int_{0.02}^{0.1} p^2(t) dt}{\int_0^{0.01} p^2(t) dt} \right) \quad (6)$$

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε τρεις θέσεις της σκηνής από τις οποίες εξάγεται ο μέσος όρος. Τιμές λαμβάνονται στις οκτάβες των: 250Hz, 500Hz, 1000Hz και 2000Hz από τις οποίες ο μέσος όρος η τιμή του οποίου είναι ο ST1.

9. Πλευρικά Κλάσματα – Λόγος Πρώιμης Πλευρικής προς τη Συνολική Ηχητική Ενέργεια (Early Lateral Energy Fraction, LEF). Σχετίζεται άμεσα με την αίσθηση της (περικύκλωσης) «βύθισης» στο ηχητικό πεδίο (Envelopment).

Η ανάγκη για την εισαγωγή του εν λόγω δείκτη προέκυψε από ψυχοακουστικά πειράματα που έλαβαν χώρα σε ανηχοϊκούς θαλάμους με προσομοίωση ηχητικής πηγής και των ανακλάσεων της αίθουσας με μεγάφωνα. Διαπιστώθηκε ότι αποτυπώνει με ικανοποιητικό τρόπο την υποκειμενική αίσθηση του πλάτους και της βύθισης στο ηχητικό πεδίο της αίθουσας.

Υπολογίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που δέχεται ένα αμφικατευθυντικό μικρόφωνο (figure of 8 microphone) με τον άξονα του στραμμένο υπό γωνία 90° από τον άξονα πηγής-θέσης μέτρησης για χρόνους από 5 ms ως 80 ms, προς τη συνολική ενέργεια που λαμβάνει ένα παντοκατευθυντικό μικρόφωνο (omni directional microphone) στην ίδια θέση και για χρονικό διάστημα από 0 ως 80 ms.

² Περιλαμβάνει και την πρώτη ανάκλαση από το δάπεδο της αίθουσας. Δεδομένου όμως ότι η εν λόγω ανάκλαση είναι λίγο-πολύ ταυτόσημη σε όλες τις αίθουσες, δεν αποτελεί χαρακτηριστικό της αίθουσας και έτσι επιλέχθηκε να συμπεριληφθεί στον απευθείας ήχο της ηχητικής πηγής.

$$Lf = \frac{\int_0^{0.08} p^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_0^{0.08} p^2(t) dt} \quad (7)$$

10. Συχνοτική απόκριση: Σχετίζεται με την τονική ισορροπία του ήχου που αναπαράγεται εντός της αίθουσας.

Όλα τα παραπάνω μεγέθη μετρώνται σε πολλές διαφορετικές θέσεις (ανάλογα με το μέγεθος του προς μέτρηση χώρου βλέπε και [3]) και λαμβάνεται η μέση τιμή (συνήθως για κάθε οκτάβα εκτός και αν ορίζεται διαφορετικά).

Όλα τα παραπάνω μεγέθη, με την εξαίρεση των πλευρικών κλασμάτων είναι ανεξάρτητα από την κατεύθυνση και δύνανται να υπολογισθούν απευθείας από την κρουστική απόκριση μεταξύ της θέσης της πηγής και της θέσης καταγραφής.

Σε όλα τα παραπάνω μεγέθη γίνεται χρήση του τετραγώνου της ηχητικής πίεσης το οποίο είναι ανάλογο της ηχητικής ενέργειας³ και για αυτό το λόγο ενίοτε ονομάζονται και ενεργειακή δείκτες του ηχητικού πεδίου.

³ Υπό συνθήκες.

3. Βασικές Αρχές Ακουστικού Σχεδιασμού

3.1 Σχεδιασμός Θεάτρων και Αιθουσών για Ομιλία

Η βασική ακουστική απαίτηση αναφορικά σε μια αίθουσα ομιλιών / διαλέξεων, είναι η υψηλή καταληπτότητα, η δυνατότητα δηλαδή διάκρισης των επιμέρους συλλαβών και φράσεων του ομιλητή σε οποιοδήποτε θέση στην αίθουσα. Η καταληπτότητα της ομιλίας εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες: (α). Το λόγο σήματος προς θόρυβο, και (β). Το λόγο απευθείας ήχου και πρώτων ανακλάσεων προς τη συνολική ενέργεια (ουσιαστικά δηλαδή τον λόγο απευθείας ήχου και πρώτων ανακλάσεων προς την ενέργεια του αντηχητικού πεδίου).

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο σπανίως αποτελεί πρόβλημα σε κλειστούς χώρους καθότι το κέλυφος της αίθουσας, στις περισσότερες περιπτώσεις παρέχει επαρκή ηχομόνωση από εξωτερικούς θορύβους (παραμένει όμως ο θόρυβος που προκαλείται εντός της αίθουσας). Για την βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο χρησιμοποιούνται ανακλαστικές οι οποίες κατευθύνουν την ηχητική ενέργεια του ομιλητή προς τις περιοχές του ακροατηρίου που έχουν πρόβλημα και ηχοαπορροφητικές διατάξεις για την μείωση της αντήχησης του χώρου και κατά συνέπεια τον περιορισμό του αντηχητικού πεδίου που προκαλείται από δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα εντός της αίθουσας. Στα ανοικτά – υπαίθρια θέατρα το βασικό πρόβλημα είναι συνήθως ο θόρυβος από δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε γειτονικούς χώρους (εκτός του θεάτρου). Στην περίπτωση αυτή κάποια βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί με τη τοποθέτηση ηχοπετασμάτων περιμετρικά του θεάτρου. Σε περίπτωση που ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι ανεπαρκής ακόμη και μετά τη λήψη των παραπάνω μέτρων χρησιμοποιούνται συστήματα ηλεκτρονικής ενίσχυσης του ήχου (μικρόφωνα, μονάδες μίξης και επεξεργασίας, ενισχυτές και μεγάφωνα).

Η τιμή του λόγου πρώιμης προς όψιμης ηχητικής ενέργειας σχετίζεται άμεσα με την αντήχηση του χώρου και είναι το συνηθέστερο αίτιο της περιορισμένης καταληπτότητας σε κλειστούς χώρους. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του λόγου αυτού τόσο καλύτερη είναι η καταληπτότητα της ομιλίας σε μια αίθουσα. Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης για μια αίθουσα ομιλιών εξαρτάται από το μέγεθος της αίθουσας. Για μια αίθουσα λ.χ. 200 ατόμων θα πρέπει να είναι περί το 0,7s και σε κάθε περίπτωση μικρότερος από 1s. Σε μια σχολική αίθουσα η βέλτιστη τιμή είναι περί το 0.5s και σε κάθε περίπτωση μικρότερος από 0.7s.

3.2 Αίθουσες Συναυλιών – Όπερες – Αίθουσες Πολλαπλών Χρήσεων

Εν αντιθέσει με τις αίθουσες ομιλιών όπου η απαιτήσεις ακουστικού σχεδιασμού είναι συγκεκριμένες στις αίθουσες συναυλιών η κατάσταση είναι πολύ πιο σύνθετη. Πέραν από την ύπαρξη περισσότερων αντικειμενικών ποσοτήτων που χαρακτηρίζουν την ακουστική ποιότητα της αίθουσας (βλ παραπάνω) υπάρχει έντονη διαφοροποίηση (μεταξύ διαφορετικών ατόμων) ως προς την κατάταξη των εν λόγω ποσοτήτων (κατά σειρά σπουδαιότητας). Για άλλους ακροατές είναι λ.χ. σημαντικότερη η τονική ισορροπία, για άλλους η αίσθηση της περικύκλωσης από το ηχητικό πεδίο, για άλλους η αντήχηση κ.λ.π.

Κατά συνέπεια οποιαδήποτε μελέτη ενέχει κάποιο βαθμό αυθαιρεσίας, τουλάχιστον όσον αφορά στην πρόκριση κάποιων παραμέτρων σχεδιασμού ως σημαντικότερων έναντι κάποιων άλλων.

Σε γενικές γραμμές η μεθοδολογία σχεδιασμού είναι η ακόλουθη: Αρχικά καθορίζονται οι απαιτήσεις χρήσης της αίθουσας. Εν συνεχεία καθορίζονται οι διαστάσεις της αίθουσας ούτως να δύναται να επιτευχθεί ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης και επιλέγονται τα αντίστοιχα υλικά. Κατόπιν ελέγχεται η γεωμετρία της αίθουσας, τροποποιούνται οι κλίσεις των διαφόρων επιφανειών και εισάγονται ανακλαστικές και διαχυτικές επιφάνειες ούτως ώστε να βελτιωθούν τα λοιπά ενεργειακά κλάσματα της αίθουσας (C80, G, ST1, LEF).

Κατασκευάζεται ακουστικό ομοίωμα της αίθουσας υπό κλίμακα (ή, τα τελευταία χρόνια, δημιουργείται ομοίωμα με χρήση ειδικού λογισμικού σε Η/Υ) και πραγματοποιούνται μετρήσεις για τον έλεγχο των προβλέψεων και των υπολογισμών. Ανάλογα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων εκτελείται βελτιστοποίηση.

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται κάποιες βασικές αρχές ορθού ακουστικού σχεδιασμού για αίθουσες ομιλιών, συναυλιών, όπερες και θέατρα.

Τύπος Αίθουσας/ Παράμετρος Σχεδιασμού	Αίθουσα Συναυλιών	Όπερα	Θέατρο	Ομιλία
Χρόνος Αντήληξης (s)	1.8-2.2	1.3-1.8	<1	<0.8
Διάχυση	Μερική.	Ναι, γύρω από τη σκηνή.	Δεν είναι απαραίτητη.	Δεν είναι απαραίτητη.
Επιφάνειες που παρέχουν πρώτες ανακλάσεις	Ναι.	Ναι, ειδικά για τους τραγουδιστές	Ναι, ειδικά από επάνω.	Ναι.
Προτίμηση για πλευρικές πρώτες ανακλάσεις	Ναι.	Μερική προτίμηση για ορχηστρικό ήχο.	Καμία προτίμηση.	Καμία προτίμηση.
Σχεδιασμός θεωρείου	$D \leq H$	$D \leq 2H$	$D < 2.5H$	$D < 2.5H$
STI/RASTI	-	-	>0.6	>0.6
Μέγιστη απόσταση του κοινού από τη σκηνή (m)	40	30	20	30

Πίνακας 1: Βασικές αρχές ορθού ακουστικού σχεδιασμού για αίθουσες ομιλιών, συναυλιών, όπερες και θέατρα.

Επισημαίνεται ότι τα παραπάνω αφορούν στη λειτουργία των χώρων με φυσικές ηχητικές πηγές (χωρίς δηλαδή μέσα ηλεκτρονικής ενίσχυσης).

Πειραματικό Μέρος

Όλες οι μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν με το σύστημα μετρήσεων κατηγορίας υψηλής ακρίβειας (TYPE I) του εργαστηρίου εφαρμοσμένης ακουστικής, (τύπου Symphonie, κατασκευαστή 01dB) το οποίο αποτελείται από Η/Υ, λογισμικό και ειδική ψηφιακή κάρτα δειγματοληψίας. Η έξοδος του συστήματος θα συνδεθεί στο σύστημα δημιουργίας ηχητικών πεδίων του εργαστηρίου που αποτελείται από δωδεκαεδρικό μεγάφωνο (τύπος 12H) και ενισχυτή (τύπος GDB95) του κατασκευαστή 01dB.

- 1) Στην κάτοψη και την τομή του αμφιθεάτρου που επισυνάπτεται να σημειωθούν οι διαστάσεις, οι θέσεις και το είδος των βασικών υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένη η αίθουσα (δάπεδα, οροφές, τοίχοι, πόρτες, παράθυρα, έπιπλα κλπ).
- 2) Να πραγματοποιηθεί μέτρηση του θορύβου βάθους της αίθουσας.

63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dB(A)

- 3) Να πραγματοποιηθεί μέτρηση της κρουστικής απόκρισης της αίθουσας σε τρεις τουλάχιστον διαφορετικές θέσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ακολουθίας μεγίστου μήκους. Να σημειωθούν οι θέσεις μέτρησης στην κάτοψη του χώρου που επισυνάπτεται.
- 4) Να καταγραφούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων:

RT60

A/A	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	

EDT

A/A	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	

C80

A/A	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	

C50

A/A	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	

- 5) Να πραγματοποιηθεί μέτρηση της κρουστικής απόκρισης της αίθουσας σε τρεις διαφορετικές θέσεις στη σκηνή της αίθουσας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ακολουθίας μεγίστου μήκους και απόσταση πηγής δέκτη 1m. Να σημειωθούν οι θέσεις μέτρησης στην κάτοψη του χώρου που επισυνάπτεται.
- 6) Να καταγραφούν τα αποτελέσματα της μέτρησης του παράγοντα ST1:

ST1

A/A	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	
M.O.									

Επεξεργασία Μετρήσεων:

- 1) Να γίνει θεωρητικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης (οι τιμές της ηχοαπορρόφησης των διαφόρων υλικών θα πρέπει να αναζητηθούν από μετρήσεις σε συναφή υλικά στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία).
- 2) Να συγκριθούν οι τιμές που υπολογίστηκαν με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην αίθουσα. Να επισημανθούν και να σχολιασθούν οι όποιες αποκλίσεις.
- 3) Να συγκριθούν οι τιμές των παραμέτρων που μετρήθηκαν με τις τιμές που απαιτούνται για τις διαφορετικές χρήσεις της αίθουσας. Εφόσον διαπιστωθούν αποκλίσεις να προταθούν κατάλληλες διατάξεις (υλικά και κατασκευές) προκειμένου να αντιμετωπισθούν τα όποια προβλήματα (αναφορικά στο χρόνο αντήχησης).

Βιβλιογραφία – Αναφορές:

- [1] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, J. Sanders “Fundamentals of Acoustics”, Willey, 4th Edition
- [2] H.Kuttruff, “Room Acoustics”, Taylor&Francis, 3rd Edition
- [3] ISO 3382 - 1997
- [4] 01dB, “Symphonie – System Manual”

