



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΕΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
Παράρτημα Ρεθύμνου
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής

Πτυχιακή Εργασία

Θέμα: «Ακουστική και σχεδιαστικές αρχές ηχογραφικών κέντρων»



Επιβλέπον καθηγητής: Σηφάκης Μηνάς

Σπουδαστές:

Κισσουράς Αντώνης Α.Μ.: 547

Τσαμπάσης Νίκος Α.Μ.: 648

Ιωαννίδης Στέφανος Α.Μ.: 608

Ρέθυμνο 2009

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την πτυχιακή εργασία θα θέλαμε πρώτα απ' όλα να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Μηνά Σηφάκη, για το ανιδιοτελές, συνεχές ενδιαφέρον που έδειξε κατά την διάρκεια της έρευνας, παρέχοντάς μας απλόχερα και χωρίς φειδώ τις γνώσεις και την καθοδήγησή του. Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσουμε επίσης τους συμφοιτητές και όλους όσοι με κάποιο τρόπο συνέβαλαν με τις συμβουλές αλλά και την πάντα χρήσιμη ενθάρρυνσή τους.

Περιεχόμενα

Σύνοψη.....	iii
Εισαγωγή.....	iv
Κεφάλαιο 1. Control room και βασικές αρχές ακουστικής - ψυχοακουστικής ..	1
1.1 Στούντιο Μουσικής Παραγωγής 1	
1.2 Ψυχοακουστική	3
1.2.1 Ψυχοακουστικά ζητήματα για πολυκάναλα συστήματα ήχου.....	12
1.3 Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους.....	14
1.4 Θεωρία Απορροφητών	25
1.5 Διάχυση	28
Κεφάλαιο 2. Control Room	52
2.1 Ιστορική αναδρομή συστημάτων αναπαραγωγής.....	52
2.1.1 Μονοφωνία	52
2.1.2 Σύστημα Στερεοφωνίας.....	52
2.1.3 Πολυκάναλα ηχητικά συστήματα και η λειτουργία τους.	53
2.2 Ακουστικές προδιαγραφές και προδιαγραφές διαμόρφωσης Control room.....	63
2.2.1 Προδιαγραφές για πολυκάναλο σύστημα αναπαραγωγής	73
Κεφάλαιο 3. Σχεδιαστικές αρχές των Control Rooms.....	76
3.1 Νεκρά δωμάτια	76
3.2 Rettinger και Eastlake.....	76
3.3 Live End Dead End (LEDE).....	77
3.4 All Tube Trap Acoustic Control Kit (ATTACK Wall).....	95
3.5 ESS (Early Sound Scattering) Control Room	117
3.6 Πολυκάναλο 5.1 Control Room (Multichannel) με έλεγχο των πρώτων ανακλάσεων	121
Κεφάλαιο 4. Εργαλεία μοντελοποίησης	132
4.1 Δημιουργία προγράμματος για υπολογισμό χαμηλών ιδιοσυχνοτήτων δωματίου (eigentones).....	132
4.2 Computer Aided Room Acoustics (CARA).....	140

4.3	Απορροφητές Helmholtz	143
4.4	Απορροφητές Panel Absorber	164
4.5	Πρόγραμμα επιλογής βέλτιστων διαστάσεων δωματίου για μέγιστη διάχυση... ..	171
Κεφάλαιο 5. Πειράματα – Μετρήσεις		173
5.1	Κρουστική απόκριση Control Room	173
5.1.1	Control Room 1.....	173
5.1.2	Control Room 2.....	198
5.2	Χαρτογράφηση Control Room 3.....	204
5.3	Μετρήσεις τοποθέτησης ηχείων χαμηλών συχνοτήτων (subwoofer)	208
Κεφάλαιο 6. Εφαρμογή μοντελοποίησης στους χώρους μέτρησης.....		228
6.1	Μοντελοποίηση με το Cara Cad του Control Room 1.....	228
6.2	Πρόγραμμα υπολογισμού ιδιοσυχνοτήτων δωματίου	233
Κεφάλαιο 7. Προτάσεις βελτίωσης		245
7.1	Εικονική βελτίωση του Control room 1.....	245
7.2	Βελτίωση του Control room 3	2459
Κεφάλαιο 8. Ανακεφαλαίωση		251
8.1	Συμπεράσματα - Ανακεφαλαίωση	252
8.2	Προτάσεις για μελλοντική συνέχιση της εργασίας.....	255
Παράρτημα 1. Μέθοδοι μέτρησης ηχοαπορρόφησης υλικών.....		255
Παράρτημα 2. Ηχεία αναφοράς		261
Παράρτημα 3. Μέθοδος της ακολουθίας μεγίστου μήκους		266
Παράρτημα 4. Κώδικες Matlab		269

Σύνοψη

Η παρούσα εργασία αφορά στη μελέτη της ακουστικής των χώρων ελέγχου - ακρόασης (control rooms) ηχογραφικών κέντρων. Εκκινώντας από τις βασικές αρχές της ακουστικής και της ψυχοακουστικής και ερευνώντας τη διεθνή βιβλιογραφία προσδιορίζονται οι ακουστικές απαιτήσεις (προδιαγραφές σχεδίασης) που πρέπει να πληροί ένας αντίστοιχος χώρος. Παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των control room, αναλύονται οι επικρατέστεροι σήμερα τύποι και εκθέτονται οι πλέον σύγχρονες αντιλήψεις και προτάσεις για την εξέλιξη της σχεδίασης των χώρων αυτών. Ακολούθως παρουσιάζονται τα λογισμικά υπολογισμού – μοντελοποίησης που αναπτύχθηκαν για την ανάλυση της ακουστικής συμπεριφοράς μικρών κλειστών χώρων στις χαμηλές συχνότητες καθώς επίσης και ακουστικών διατάξεων απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων. Παρουσιάζεται επίσης εμπορικό λογισμικό μοντελοποίησης το οποίο βασίζεται σε αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού (σε αντιπαράθεση με το λογισμικό που αναπτύχθηκε που βασίζεται σε αναλυτικές λύσεις). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πλήθους μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικούς χώρους (τρία διαφορετικά στούντιο ηχογραφήσεων, σε ερευνητικό εργαστήριο και σε ανοικτό χώρο) χρησιμοποιώντας το λογισμικό MLSAA. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της εφαρμογής των εργαλείων μοντελοποίησης που παρουσιάστηκαν και εξάγονται αρκετά συμπεράσματα αναφορικά στο όριο ισχύος και τους περιορισμούς της κάθε μεθόδου και της χρησιμότητας της για τον ορθό ακουστικό σχεδιασμό ενός χώρου ελέγχου . Τέλος παρατιθενται προτάσεις βελτίωσης για τους χώρους οι οποίοι μελετήθηκαν καθώς επίσης και κάποιες προτάσεις για πιθανή μελλοντική συνέχιση της εργασίας αυτής.

Εισαγωγή

Αναπόσπαστο μέρος ενός σύγχρονου στούντιο ηχογράφησης αποτελεί το ηχογραφικό κέντρο. Στο χώρο αυτό βρίσκεται ο μηχανικός ήχου ή ο ηχολήπτης απ' όπου διευθύνει τη διαδικασία της ηχογράφησης, μίξης και mastering του ηχητικού υλικού.

Η ύπαρξη βέλτιστων συνθηκών ακουστικής στο χώρο αυτό είναι υψίστης σημασίας, καθότι αποτελεί ουσιαστικά το πρώτο στοιχείο στην αλυσίδα αναπαραγωγής και ακρόασης του πρωτογενούς ηχητικού υλικού. Ο ακροατής πρέπει να είναι σε θέση να κρίνει και να συγκρίνει ηχητικό υλικό στο ψηλότερο δυνατό επίπεδο. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας της παραγωγής θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό ανεπηρέαστο από τα ιδιαίτερα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου.

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη των βασικών αρχών ορθού ακουστικού σχεδιασμού ενός ηχογραφικού κέντρου και η συγκριτική αξιολόγηση των επικρατέστερων τύπων.

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην αλυσίδα παραγωγής ήχου (ηχογράφηση – επεξεργασία – αναπαραγωγή). Περιγράφονται οι θεμελιώδεις αρχές της ψυχοακουστικής όπως η αμφιωτική ακοή και οι συναρτήσεις μεταφοράς σε σχέση με το κεφάλι (Binaural hearing – Head-related transfer functions “HRTF”) και το φαινόμενο Haas. Περιγράφεται ο «Ελεγκτής σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου», η συμπεριφορά των στάσιμων κυμάτων και η επίδραση τους στην ακουστική συμπεριφορά του δωματίου καθώς και οι έννοιες της απορρόφησης, ανάκλασης και διάχυσης.

Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή των συστημάτων αναπαραγωγής, από την μονοφωνία μέχρι το πολυκάναλο σύστημα. Παρουσιάζονται οι διεθνείς ακουστικές προδιαγραφές και χωροθετήσεις που διέπουν την λειτουργία των ηχογραφικών κέντρων (control rooms) όπως παρουσιάζονται από φορείς πιστοποίησης προτύπων (AES, ITU, SMPTE, EBU).

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των σχεδιαστικών αρχών των Control Rooms (Νεκρό δωμάτιο, Rettlinger και Eastlake, RFZ) ενώ επικεντρώνεται στην ανάλυση των επικρατέστερων (LEDE, ESS, 5.1). Επίσης γίνεται αναφορά σε υπό εξέλιξη νέων σχεδιαστικών αρχών.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η δημιουργία λογισμικού μοντελοποίησης ιδιοσυχνοτήτων δωματίου. Επίσης, παρουσιάζεται το υπάρχον λογισμικό ακουστικής μοντελοποίησης μικρών χώρων Computer Aided Room Acoustics (CARA). Στη συνέχεια αναλύεται η λειτουργία απορροφητών χαμηλών συχνοτήτων panel absorber και απορροφητής Helmholtz, καθώς επίσης και το λογισμικό επιλογής βέλτιστων διαστάσεων χώρου για τη βέλτιστη απόκριση των στάσιμων κυμάτων μέσα στο χώρο αυτό.

Στο 5^ο Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τρία control room. Μετρήθηκε η κρουστική απόκριση, έγινε χαρτογράφηση στάθμης πίεσης για την εξέταση της ακουστικής ποιότητας των συγκεκριμένων χώρων. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις συχνοτικής απόκρισης αλληλεπίδρασης ηχείων χαμηλών συχνοτήτων σε δωμάτιο.

Στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται η εφαρμογή της μοντελοποίησης των χώρων που εξετάστηκαν με το λογισμικό C.A.R.A. καθώς και με το λογισμικό μοντελοποίησης ιδιοσυχνοτήτων δωματίου που δημιουργήθηκε με σκοπό την αξιολόγηση τους, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά των πειραματικών μετρήσεων.

Στο 7^ο Κεφάλαιο παρατίθενται οι προτάσεις ακουστικής βελτίωσης για το Control Room 1 και 3.. Συνοδεύονται εικονικές μετρήσεις για τη διαπίστωση της ακουστικής βελτίωσης στην περιοχή των στάσιμων κυμάτων.

Τέλος, στο 8^ο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα βασικά συμπεράσματα από της εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις για πιθανή μελλοντική συνέχιση της εργασίας αυτής.

Κεφάλαιο 1. Control room και βασικές αρχές ακουστικής - ψυχοακουστικής

1.1 Στούντιο Μουσικής Παραγωγής

Τα studio μουσικής παραγωγής, χωρίζονται κατά βάση από δύο μέρη, τον χώρο του Control Room και τον χώρο του Recording Room.

Στο Recording Room πραγματοποιείται η ηχογράφηση ηχητικών πυγών και για αυτό το λόγο είναι εξοπλισμένο συνήθως με διάφορους τύπους μικροφώνων, ενισχυτές μουσικών οργάνων και μερικά μουσικά όργανα, κυρίως αυτά που είναι δύσκολο να μεταφερθούν όπως πιάνο, κόντρα μπάσο κ.α. Όσον αφορά την ακουστική των Recording Room διαπιστώνεται ότι ποικίλει. Αυτό συμβαίνει γιατί στα Recording Room προτιμάται η ακουστική προσομοίωση διαφόρων χώρων, όπως 'ζωντανούς' χώρους (εκκλησίες, συναυλιακούς χώρους κ.α.), 'νεκρούς' χώρους (πολύ ηχοαπορροφητικούς χώρους), και όλα τα ενδιάμεσα στάδια από ένα πολύ ζωντανό σε ένα πολύ νεκρό χώρο, συνηθίζεται ωστόσο να είναι νεκρά. Το ιδανικό θα ήταν να βρισκόμαστε στον εκάστοτε χώρο που επιθυμούμε κάθε φορά για την ακουστική του συμπεριφορά, και να πραγματοποιείται εκεί η ηχογράφηση. Ωστόσο αυτό πολλές φορές είναι ανέφικτο. Ένα άλλο ιδανικό μοντέλο θα επέτρεπε τον πλήρη έλεγχο των χρόνων αντήχησης της κάθε συχνότητας που βρίσκεται στο ακουστικό φάσμα (20Hz – 20.000Hz), με τεχνητούς τρόπους, όπως αφαιρούμενους ή πρόσθετους τοίχους μεταβλητής ηχοαπορρόφησης και διάχυσης. Κάτι τέτοιο είναι δύσκολο να συμβεί για όλες τις συχνότητες και επίσης πολύ δαπανηρό, κυρίως για τον έλεγχο των χαμηλών συχνοτήτων, που απαιτούν πολύ μεγάλους χώρους, λόγω των διαστάσεων των μηκών κυμάτων τους (ενδεικτικά: 30Hz = 11.43m μήκος κύματος). Ωστόσο διάφορα Recording Room έχουν καταφέρει να μεταβάλουν την ακουστική τους συμπεριφορά με τοίχους που μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν οι οποίοι έχουν διαφορετικό δείκτη ηχοαπορρόφησης και διάχυσης,

για συχνότητες που είναι ευκολότερος ο έλεγχός τους (π.χ. > 500Hz), δημιουργώντας ποικίλους χρόνους αντήχησης σε ένα και μόνο δωμάτιο. Επίσης ορισμένα Studio μουσικής παραγωγής, παρέχουν περισσότερους από ένα χώροι οι οποίοι βασίζονται στη λογική της μεταβολίτης ακουστικής και έχουν διαφορετικές διαστάσεις για να επιτύχουν πολύ περισσότερους συνδυασμούς χρόνων αντήχησης.

Το Control Room είναι ο χώρος όπου αναπαράγεται το ηχογραφημένο υλικό μέσω των ηχείων (monitor), που ηχογραφήθηκε στο Recording Room. Εκτός από την απλή αναπαραγωγή και ακρόαση του εκάστοτε ηχητικού υλικού, γίνεται και επεξεργασία αυτού καθώς και μίξη για την παραγωγή έργων (projects). Για αυτό το λόγο ένα Control Room είναι εξοπλισμένο ενδεικτικά, με μία ή περισσότερες μονάδες μίξης (κονσόλα), μία ή περισσότερες πολυκάναλες κάρτες ήχου, ή πολυκάναλα μαγνητόφωνα (DAT, DTRS), ένα ή περισσότερα προγράμματα επεξεργασίας ηχητικού υλικού, μονάδες δυναμικών επεξεργαστών (compressors, limiters, gates, κ.α.), επεξεργαστές τύπου modulation (flangers, tremolo, chorus κ.α.), επεξεργαστές χώρου και αντήχησης (reverb, delay). Τα monitor ηχεία, η κονσόλα μίξης, οι επεξεργαστές, η κάρτα ήχου και τα μέσα αποθήκευσης είναι η ηλεκτροακουστική εγκατάσταση του Control Room. Το δεύτερο μέρος και εξίσου σημαντικό με την ηλεκτροακουστική εγκατάσταση του Control Room είναι η ακουστική του. Σε αντίθεση με το Recording Room, εδώ επιβάλετε, η ακουστική επίδραση του χώρου να μη προκαλεί φασματικές αλλοιώσεις του ηχητικού υλικού που αναπαράγουμε από τα monitor ηχεία. Δηλαδή επιθυμούμε μια ακουστική η οποία ενεργεί το ίδιο σε όλες τις συχνότητες του ακουστικού φάσματος και δε αλλοιώνει καμιά από αυτές, ούτε ως προς τα διάρκειά τους αλλά ούτε και ως προς την ενέργειά τους. Επιβάλετε αυτή η ακουστική συμπεριφορά από ένα Control Room, γιατί πολύ λογικά θέλουμε να αντιλαμβανόμαστε ότι αυτό που αναπαράγεται είναι πραγματικά αυτό που έχει ηχογραφηθεί, δεν έχει επηρεαστεί ακουστικά καθόλου από το χώρο καθώς επίσης κατά την αναπαραγωγή του σε ένα δεύτερο ή τρίτο

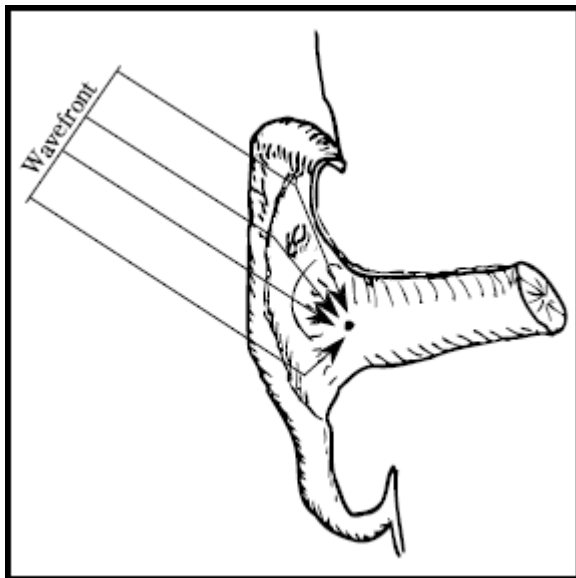
Control Room που έχει άρτια ακουστική συμπεριφορά να προκύπτει πάντα το ίδιο αποτέλεσμα.

1.2 Ψυχοακουστική

Η μελέτη για την κατανόηση της αντίληψης του ήχου από το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα και η ανάλυσή του ονομάζεται ψυχοακουστική. Ψυχοακουστική είναι το σύνολο των μηχανισμών και λειτουργιών που ξεκινούν με την πρόσκρουση του ήχου στο εξωτερικό του αυτιού, την διάβασή του στο εσωτερικό αυτί, από το τύμπανο μέχρι την κωδικοποίηση του ηχητικού κύματος σε νευρικά σήματα και την αποκωδικοποίησή του από τον εγκέφαλο. Η ανθρώπινη αυτή αίσθηση και λειτουργία είναι ιδιαίτερος ανεπτυγμένη. Ενδεικτικά αναφέρεται πως έχει φασματικό εύρος δέκα οκτάβες και είναι σε θέση να αναγνωρίσει χρονική ολίσθηση σήματος, μεταξύ των δυο αυτιών, της τάξης των 10 μs. Ο όρος ψυχοακουστική είναι σχετικά πρόσφατος και απαιτείται ακόμη εκτενέστερη μελέτη για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας που περιγράφει. Αυτό καταδεικνύεται από τις αντιφατικές μελέτες και απόψεις επιστημόνων που μελετούν το εν λόγω θέμα [14]. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές της ψυχοακουστικής που αφορούν την χωρική αντίληψη και την αντίληψη φαινομένων που παρουσιάζονται σε κλειστούς κυρίως χώρους, καθώς και των φαινομένων που παρατηρούνται σε πολυκάναλα συστήματα ήχου ως εργαλείο για την ανάλυση τεχνικών ηχογράφησης, μίξης και αναπαραγωγής ηχητικού υλικού.

Εντοπισμός ηχητικής πηγής στις τρεις διαστάσεις (Localization)

Η αντίληψη της κατεύθυνσης μιας ηχητικής πηγής έχει να κάνει εν μέρει με την φυσιολογία του ιδίου του αυτιού. Το αυτί έχει αναπτύξει μια ικανότητα

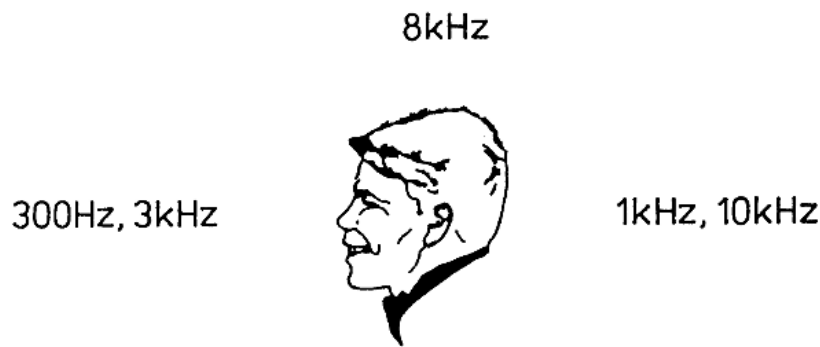


Σχήμα 1. Απεικόνιση ενός ηχητικού κύματος που προσπίπτει στο πτερύγιο του αυτιού

κωδικοποίησης του ήχου που προσπίπτει στο εξωτερικό αυτί. Ήχος που προσπίπτει στο εξωτερικό πτερύγιο του αυτιού ανακλάται στην ανώμαλη επιφάνεια του και οδηγείται στο εσωτερικό του αυτιού μαζί με τον απευθείας ήχο. Αυτό οδηγεί στον σχηματισμό μιας συνάρτησης μεταφοράς του αυτιού. Δηλαδή το ακουστικό φάσμα διαμορφώνεται σε πλάτος και φάση. Κάθε

οριζόντια ή κάθετη πρόσπτωση διαμορφώνει και μια διαφορετική συνάρτηση μεταφοράς. Το αυτί παραβλέπει την σταθερή συνάρτηση μεταφοράς που οφείλεται στην εσωτερική φυσιολογία του αυτιού και μεταφράζει τις διαφορετικές συναρτήσεις μεταφοράς σε κατεύθυνση από την οποία προέρχεται ο ήχος [5].

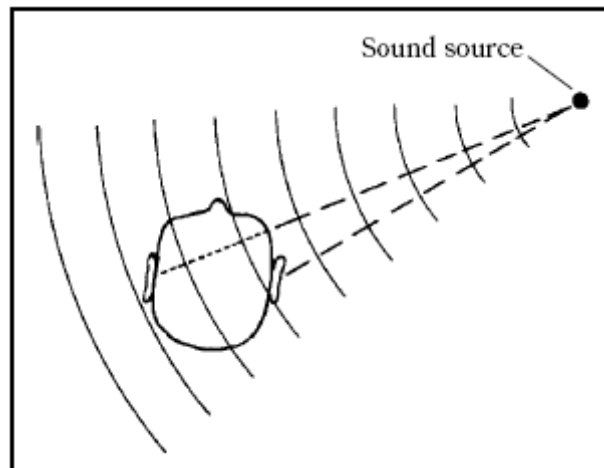
Για ήχους που προέρχονται από το μέσο επίπεδο (σχήμα 3), που ορίζεται ως το επίπεδο από το μέσο του κεφαλιού και της μύτης, χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό σύστημα εντοπισμού ηχητικής πηγής, αυτό της συνάρτησης της συχνότητας με κατευθύνσεις. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2. έρευνες έχουν δείξει πως μικρού εύρους σήματα, ασχέτως από ποια κατεύθυνση προέρχονται, στα 300 Hz και 3 kHz γίνονται αντιληπτά ως σήματα που προέρχονται από μπροστά ενώ σήματα συχνοτικού εύρους 500 Hz και 8 kHz φαίνεται να έρχονται από πάνω και τέλος σήματα μεταξύ 1 και 10 kHz από πίσω. [6]



Σχήμα 2. Σχηματική αναπαράσταση της αντίληψης του εντοπισμού της θέσης σε σχέση με συχνότητα ανεξαρτήτως της θέσης της πηγής (για μικρού εύρους φιλτραρισμένο θόρυβο).

Εντοπισμός θέσης με δυο αυτιά – στο οριζόντιο επίπεδο (Lateralization).

Η ικανότητα αντίληψης και εντοπισμού της θέσης στο οριζόντιο επίπεδο περιλαμβάνει και έναν ακόμη μηχανισμό που βασίζεται στη χρήση και των δυο αυτιών. Υπάρχουν δυο παράγοντες που εκμεταλλεύεται ο μηχανισμός αυτός: την διαφορά χρόνου ITD



Σχήμα 3. Το φαινόμενο της «ηχητικής σκίασης»

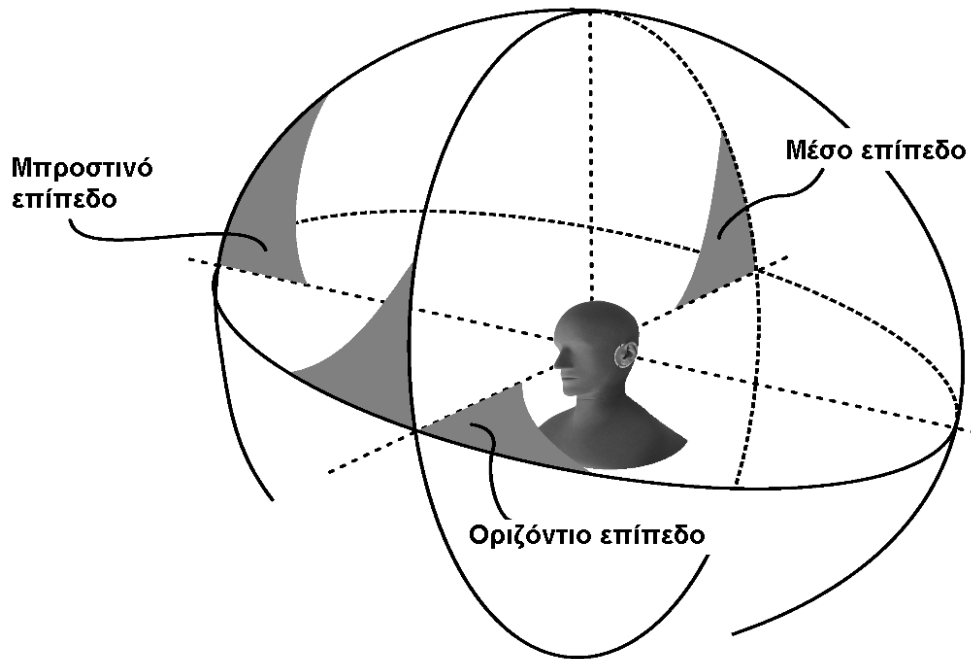
(interaural time difference) που χρειάζεται για να φτάσει ο ήχος στα δυο αυτιά και τη διαφορά της έντασης ILD (interaural level difference) μεταξύ των δύο αυτιών. Αυτό προκαλείται λόγω της φυσιολογίας του σώματος και ιδίως της κεφαλής που αποτελεί εμπόδιο και προκαλεί την «ηχητική σκίαση» (σχήμα 3). Δηλαδή, εάν ένας ήχος προέρχεται από τα δεξιά το δεξί αυτί θα προσλαμβάνει τον ήχο σε μεγαλύτερη ένταση, ενώ το αριστερό αυτί θα τον προσλαμβάνει σε χαμηλότερη αλλά και καθυστερημένο. Στις χαμηλές συχνότητες η ηχητική σκίαση δεν παίζει ρόλο λόγω του μεγάλου μήκους κύματός τους σε σχέση με το ανθρώπινο κεφάλι, αφήνοντας το ηχητικό κύμα να ταξιδεύει απρόσκοπτα γύρω

από το κεφάλι. Στις ψηλές συχνότητες αυτό δεν συμβαίνει και το κεφάλι δημιουργεί φυσικό φράγμα. Έτσι, κάτω από το 1 kHz υπερισχύει το φαινόμενο της διαφοράς χρόνου – φάσης, ενώ πάνω από το 1 kHz αυτό της διαφοράς έντασης.

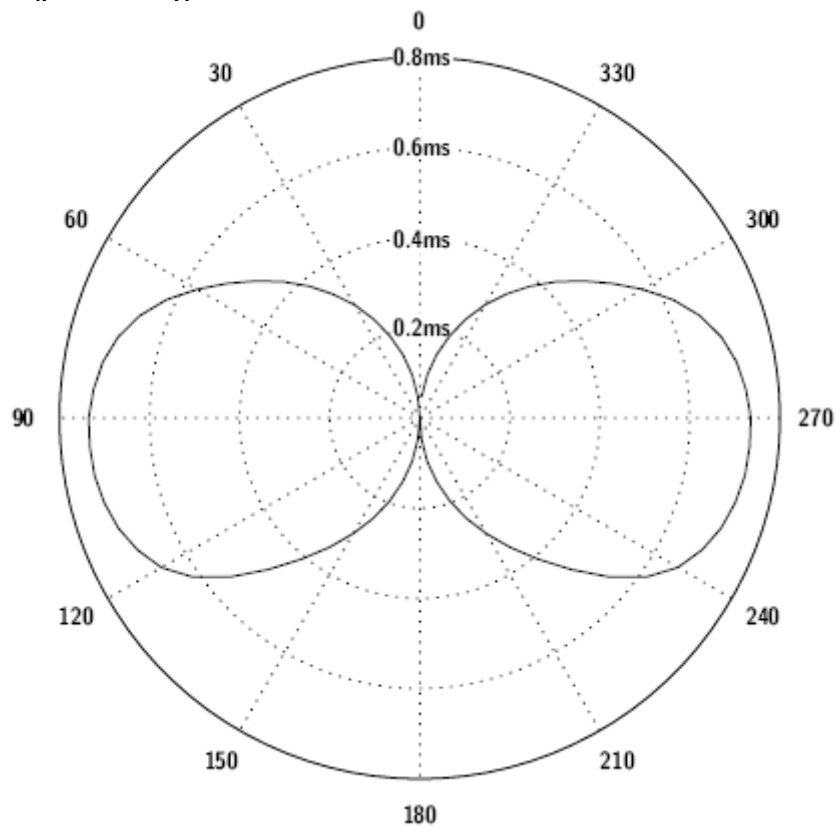
Αμφιωτική ακοή – Συναρτήσεις μεταφοράς σε σχέση με το κεφάλι (Binaural hearing – Head-related transfer functions “HRTF”)

Η ολοκληρωμένη ικανότητα προσδιορισμού της θέσης μιας ηχητικής πηγής περιέχει όλους τους παραπάνω μηχανισμούς της ακοής. Οι συναρτήσεις μεταφοράς των δυο αυτιών ουσιαστικά προσδιορίζουν αυτή τη θέση. Το κεφάλι και οι ώμοι ενός ατόμου προκαλούν τις διαφορές στις συναρτήσεις μεταφοράς λόγω της περίθλασης και της απορρόφησης των ηχητικών κυμάτων. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στη διαφορά χρόνου μεταξύ των δυο αυτιών (ITD – interaural time difference) και στη διαφορά έντασης (ILD – interaural time difference). Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται (HRTF - Head-related transfer functions) και ορίζονται ως η στάθμη της ηχητικής πίεσης στο τύμπανο του αυτιού προς την στάθμη ηχητικής πίεσης στο κέντρο της θέσης κεφαλιού απουσία του κεφαλιού. Η κύρια επίδραση των συναρτήσεων αυτών γίνεται όταν η συχνότητα του ηχητικού κύματος είναι μεγαλύτερη των 200 Hz, όπου η περίθλαση γίνεται εντονότερη. Για τον προσδιορισμό της θέσης της ηχητικής πηγής απαιτείται ένα εξειδικευμένο σύστημα συντεταγμένων (Σχήμα 4.). Έτσι, το οριζόντιο επίπεδο περιγράφεται με αζιμουθιακή γωνία φ και αντίθετη ωρολογιακή φορά μεταξύ 0° , κατεύθυνση από μπροστά και 360° και με πολική γωνία θ , μεταξύ 0° , κατεύθυνση από μπροστά και 90° πάνω στο κάθετο επίπεδο το οποίο μπορεί να επεκταθεί σε -90° (προς να κάτω). Για παράδειγμα $(\varphi, \theta) = (+90^\circ, -10^\circ)$ υποδεικνύει ήχο που προέρχεται από το αριστερό χέρι λίγο κάτω από το οριζόντιο επίπεδο. Εάν ο ήχος προέρχεται από $(\varphi, \theta) = (0^\circ, 0^\circ)$ αυτό είναι το τυφλό σημείο που προαναφέρθηκε (Σχήμα 5).[8] Επειδή όμως το κεφάλι

είναι σπάνια καθλωμένο σε ένα απόλυτα σταθερό σημείο, οι μικρές διαφορές στις συναρτήσεις HRTF με την κίνηση μειώνουν την σύγχυση του εμπρός πίσω εντοπισμού θέσης.



Σχήμα 4. Σύστημα συντεταγμένων HRTF.

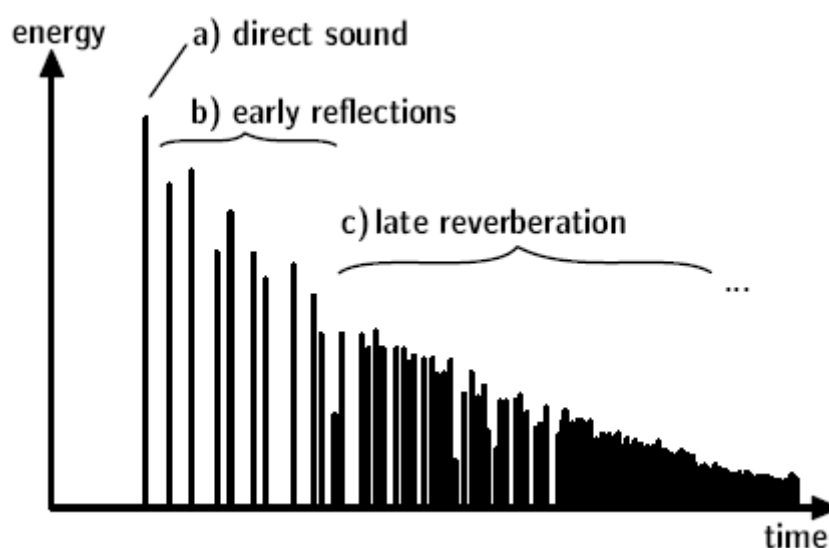


Σχήμα 5. Παράδειγμα για ITD στο οριζόντιο επίπεδο.

Ακοή σε κλειστούς χώρους

Οι ψυχοακουστικές ιδιότητες των δωματίων μπορούν να χαρακτηριστούν ως η γέφυρα μεταξύ της υποκειμενικής αντίληψης της ακοής και των αντικειμενικών μετρήσεων [8].

Η κύρια επίδραση που επιφέρει ένας κλειστός χώρος σε ένα ηχητικό γεγονός είναι η προσθήκη αντήχησης. Το απευθείας πεδίο, οι πρώτες ανακλάσεις και οι ύστερες αποτελούν το πεδίο της αντήχησης όπως φαίνεται στο σχήμα 6.



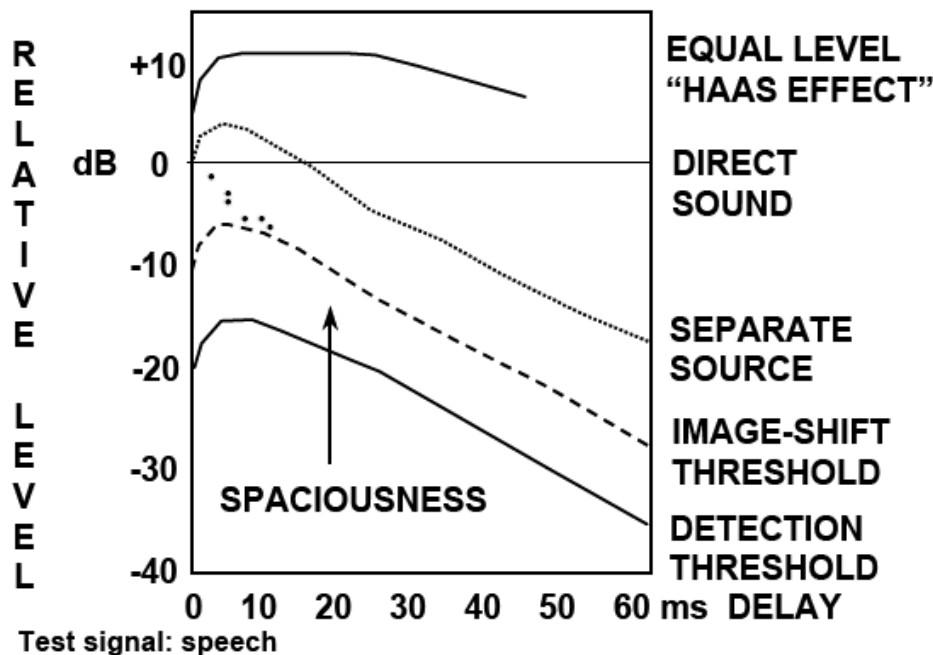
Σχήμα 6. Διάγραμμα πλάτους στο χρόνο για κρουστική απόκριση δωματίου.

Απευθείας πεδίο

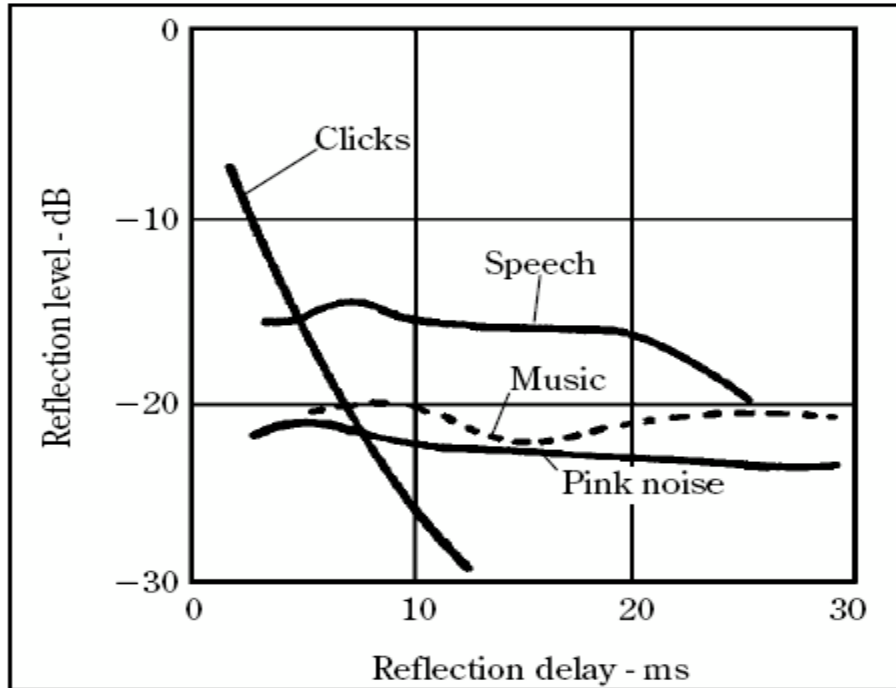
Το απευθείας πεδίο ευθύνεται για την αντίληψη της κατεύθυνσης από όπου προέρχεται ο ήχος. Αυτό ονομάζεται «νόμος του πρώτου κύματος» [6] ή επίδραση προτεραιότητας (precedence/Haas effect) σύμφωνα με τον Haas. Δηλαδή η κατεύθυνση της πηγής εξαρτάται από τον απευθείας ήχο ασχέτως εάν οι πρώτες ανακλάσεις ή το δεύτερο ηχητικό κύμα προέρχεται από διαφορετική κατεύθυνση, ακόμη και σε περίπτωση που είναι κατά 10 dB εντονότερο από το πρώτο κύμα.

Πρώτες ανακλάσεις

Οι πρώτες ανακλάσεις ενώ είναι πειραματικά και αντικειμενικά μετρήσιμες είναι ένα θέμα όπου οι διάφοροι μελετητές ψυχοακουστικής και μηχανικοί ήχου διαφωνούν, ως προς τον προσδιορισμό και τη σημασία τους στην ψυχοακουστική αλλά και στην ερμηνεία των διαφόρων μελετών πρωτοπόρων στην ψυχοακουστική, όπως είναι ο Helmut Haas. Έχουν καταλήξει σε δυο κοινώς αποδεκτά αποτελέσματα και διαχωρίζονται ως προς το σήμα. Το πρώτο αφορά τα λεγόμενα συλλαβικά σήματα, δηλαδή η ομιλία ή σήματα με ενδιάμεσα κενά. Το δεύτερο αφορά τα μεταβατικά σήματα όπως είναι η μουσική. Έτσι συντάχθηκαν τα παρακάτω σχήματα 7, 8 για την ανάλυση και κατανόηση της επίδρασης των πρώτων ανακλάσεων.



Σχήμα 7. Επίδραση των πρώτων ανακλάσεων με σήμα ομιλία και εξομοίωση ανάκλασης από διπλανό τοίχο. Στην πρώτη από κάτω καμπύλη είναι το κατώφλι της ακουστότητας της ανάκλασης. Εκεί περιγράφεται μια αίσθηση χώρου. Ανεβαίνοντας 10 dB αρχίζει η ολίσθηση στη θέση προέλευσης του ήχου. Στην επόμενη καμπύλη η ανάκλαση γίνεται διακριτά αντιληπτή. Οι κουκκίδες που φαίνονται μεταξύ των καμπύλων είναι οι συνήθεις ανακλάσεις από τους έξι τοίχους σε ένα δωμάτιο. Η τελευταία καμπύλη είναι αυτή που έβγαλε ο Haas στα δικά του πειράματα. Το Haas Effect όπως αναφέρεται πιο πάνω (4.1). [14]



Σχήμα 8. Κατώφλι ακουστότητας ανακλάσεων διαφόρων σημάτων. [24]

Αντήχηση

Ο χρόνος αντήχησης είναι μια σημαντική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της ακουστικής ενός δωματίου καθώς και η συναρτησιακή του σχέση ως προς την συχνότητα. Το ποσοστό αντίληψης της αντήχησης εξαρτάται από ηχητικό σήμα. Σε καμία περίπτωση όμως δεν μπορεί να ακουστεί η αντήχηση που είναι κατά 60 dB ασθενέστερη από την αρχική τιμή. Έτσι ο πιο κοινός δείκτης χρόνου αντήχησης είναι αυτός του RT_{60} , όπου είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η στάθμη του χρόνου αντήχησης κατά 60 dB.

Το σημαντικότερο μέρος της αντήχησης είναι το πρώτο μέρος σε αντίθεση με το τελευταίο. Έτσι ένας πολύ σημαντικός δείκτης είναι το EDT (Early Decay Time) που ορίζεται ως έξι φορές ο χρόνος που απαιτείται να μειωθεί η στάθμη της αντήχησης κατά 10 dB από το σταθερό ηχητικό πεδίο [5].

Αντίληψη του χώρου

Η αίσθηση της αντίληψης του χώρου είναι ένα υποκειμενικό χαρακτηριστικό. Όμως διάφορες μελέτες παρουσίασαν διάφορους δείκτες και μετρήσεις με τις οποίες μπορούν να αναλυθούν σε κάποια αντικειμενική βάση.

Η επίδραση των πρώτων ανακλάσεων μέχρι τα 80 ms συντελεί στην διατάραξη του εντοπισμού της θέσης της πηγής. Συγκεκριμένα αυξάνουν το πλάτος της πηγής από την οποία προέρχεται ο ήχος (ASW – Auditory Source Width). Ο μετρήσιμος παράγοντας είναι το πρώιμο πλευρικό κλάσμα LF, το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του ολοκληρώματος του τετραγώνου της ηχητικής πίεσης των ανακλάσεων (χωρίς τον απευθείας ήχο) που φθάνουν στη θέση μέτρησης σε χρόνο μέχρι 80ms προς το αντίστοιχο ολοκλήρωμα που περιλαμβάνει και τον απευθείας ήχο, όπου ο αριθμητής μετριέται με ένα παντοκατευθυντικό μικρόφωνο και ο παρανομαστής με ένα παντοκατευθυντικό.

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} (p \cos \theta)^2(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt} \quad \text{Σχέση 1.}$$

Οι ύστερες ανακλάσεις έχουν να κάνουν με την αντίληψη της ηχητικής «περιέλιξης του ακροατή» LEV (listener envelopment), την αντίληψη δηλαδή πως ο ήχος ενός χώρου περιβάλλει τον ακροατή. Ο μετρήσιμος παράγοντας είναι το ύστερο πλευρικό κλάσμα, LG.

$$LG = 10 \log \frac{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = \frac{\int_{80ms}^{\infty} (p \cos \theta)^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \quad \text{Σχέση 2.}$$

Οι πλευρικές αυτές ανακλάσεις οδηγούν στην απώλεια συσχέτισης της αμφιωτικής ακοής. Λόγω της ιδιότητας της αμφιωτικής ακοής να

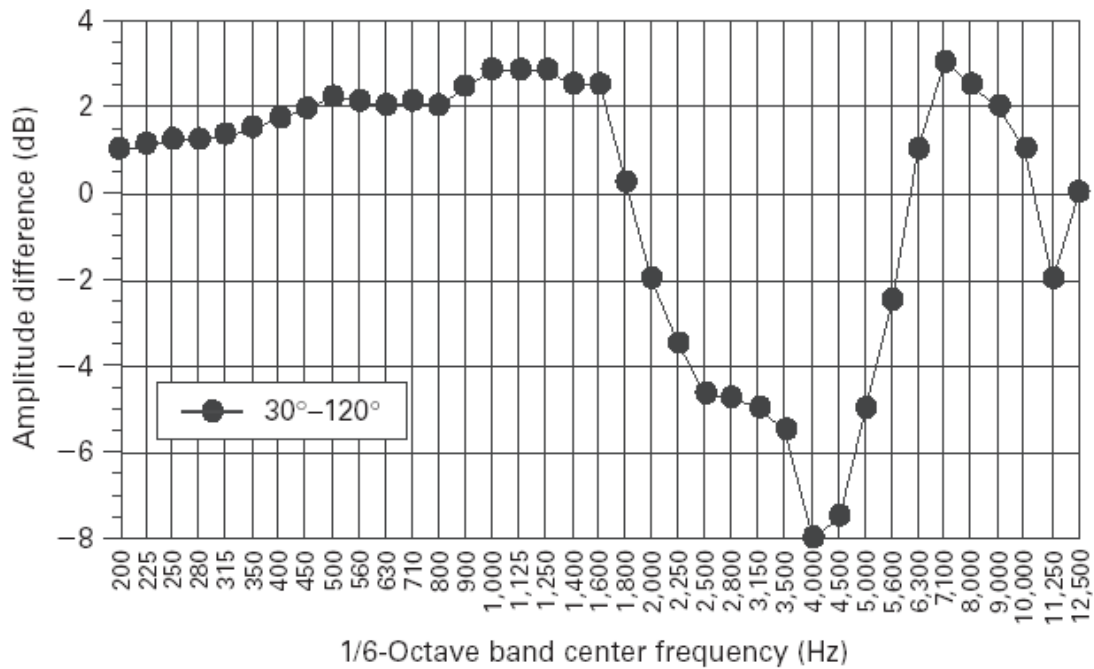
αντιλαμβάνεται τις χωρικές ακουστικές ιδιότητες του χώρου δημιουργήθηκαν άλλες δυο αντικειμενικές παράμετροι. Η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μεταξύ των δυο αυτιών IACF (interaural cross-correlation function) και ο συντελεστής ετεροσυσχέτισης μεταξύ των δυο αυτιών IACC (interaural cross-correlation coefficient). [8]

1.2.1 Ψυχοακουστικά ζητήματα για πολυκάναλα συστήματα ήχου.

LFE και ψυχοακουστική

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των πολυκάναλων συστημάτων είναι η διαχείριση που υφίστανται οι χαμηλές συχνότητες δημιουργώντας ένα ξεχωριστό κανάλι για την αναπαραγωγή τους. Το LFE (Low-frequency extension). Η βασική αρχή στην χρήση ενός τέτοιου καναλιού είναι η ψυχοακουστική. Πειραματικές διαδικασίες εκτελέστηκαν σε εργαστήρια της Dolby Labs για τον ορισμό της συχνότητας από όπου το ανθρώπινο αυτί δεν μπορεί να εντοπίσει την κατεύθυνση της πηγής με τους μηχανισμούς που διαθέτει. Έμπειροι ακροατές υποβλήθηκαν στη διαδικασία ακρόασης για καθορισμό της συχνότητας διαχωρισμού (crossover). Η συχνότητα καθορίστηκε στα 80 Hz. Άλλος λόγος για την δημιουργία του 0.1 καναλιού ήταν οι καμπύλες ακουστότητας της ανθρώπινης ακοής. Η ακοή είναι λιγότερο ευαίσθητη σε χαμηλής συχνότητας σήμα. Χρειάζεται αύξηση στη στάθμη του ήχου για να ακουστεί σε ικανοποιητικό επίπεδο σε σχέση με το υπόλοιπο φάσμα. Έτσι, για να καλυφτεί η ανάγκη σε αυξημένο πλάτος αναπαραγωγής, χωρίς να υπερφορτώνονται οι γραμμικοί ενισχυτές και τα ηχεία, η ηχογράφιση του υλικού γίνεται εσκεμμένα 10 dB χαμηλότερα και αντισταθμίζεται σε αύξηση κατά 10 dB στο ηχητικό σύστημα μετά την αναπαραγωγή από το μέσο αναπαραγωγής. Αυτό προστατεύει τη λειτουργία των μηχανημάτων και δίνει την ευχέρεια για 10 dB αυξημένο περιθώριο ασφαλείας (headroom).

Η αμφιωτική ακοή βασίζεται στις συναρτήσεις μεταφοράς, τα HRTF, και συγκεκριμένα στις μεταβολές των συναρτήσεων αυτών κατά τη μετατόπιση ενός αντικειμένου στο χώρο. Όταν ένα ήχος προέρχεται από μπροστά ή από πίσω τότε η διαφορά της χροιάς που αντιλαμβάνεται ο ακροατής μπορεί να αναλυθεί μετρώντας τη μεταβολή των αντίστοιχων HRTF. Ο εγκέφαλος είναι όμως σε θέση παρόλο που εκμεταλλεύεται τις φασματικές διαφορές να τις αγνοήσει ως προς την ταυτοποίηση του ήχου. Δηλαδή παρόλο που έχει αλλοιωθεί η χροιά ακούγοντας τον ήχο από πίσω σε σχέση με το πως τον ακούει από μπροστά μπορεί να ανιχνεύσει την «πραγματική χροιά του ήχου» [9]. Με τη λογική αυτή δεν είναι απαραίτητη η παρέμβαση με φίλτρα για την ανάκτηση της χροιάς στα πίσω ηχεία με αυτά εμπρός. Αν όμως πραγματοποιήσουμε ένα πείραμα με έναν ήχο αρχικά τοποθετημένο στο μπροστά αριστερά ηχείο και σταδιακά τον μετακινήσουμε πίσω αριστερά θα παρατηρήσουμε πως στο μέσο της μετακίνησης ο ήχος θα χωριστεί φασματικά μεταξύ των δύο ηχείων και μετά θα ακουστεί από πίσω κατά την ολοκλήρωση της μεταφοράς. Αυτό οφείλεται στα ανεπαρκή κανάλια για να προσομοιώσουν ένα φυσικό χώρο. Με τη χρήση περισσότερων καναλιών αυτό μπορεί να αποφευχθεί. Έτσι στην περίπτωση του 5.1 συστήματος ίσως δεν είναι και τόσο άσχημη ιδέα να επιχειρηθεί να εξισορροπηθεί η χροιά με χρήση φίλτρων προς αποφυγή του εν λόγω φαινομένου. Σαν οδηγός στη χρήση φίλτρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση στο σχήμα 9.



Σχήμα 9. Διαφορική συχνωτική απόκριση – διαφορά πλάτους ηχητικής πίεσης για ήχο που εκπέμπεται από ηχείο σε διεύθυνση +30° από τον κεντρικό άξονα του κεφαλιού και σε διεύθυνση +110° όπως μετρήθηκε στην είσοδο αυτιού.

1.3 Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους

Διαχωρισμός του ακουστικού φάσματος:

Οι μελέτες των Bolt – Beranek – Newman [1] κατέληξαν στον «Ελεγκτή της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου». Σε αυτόν γίνεται ένας διαχωρισμός της συμπεριφοράς του χώρου σε τέσσερις καταστάσεις βάση το μήκος κύματος, λ ή αλλιώς τη συχνότητα, f τους.

1) Ζώνη πίεσης:
$$f \leq f_{\min} \text{ όπου } f_{\min} = \frac{c}{2L_{\max}} \quad (2.1)$$

Αντιστοιχεί στην περιοχή που βρίσκεται κάτω από την κατώτατη συχνότητα συντονισμού, όπου οι διαστάσεις του χώρου είναι μικρότερες από $\lambda/2$.

2) Ζώνη στάσιμων κυμάτων: $f_{\min} \leq f \leq f_c$ (2.2) όπου f_c η συχνότητα

$$\text{αποκοπής } f_c = k \cdot \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}, k=2120 \text{ (2.3)}$$

Αντιστοιχεί στην περιοχή όπου $\lambda =$ τάξη μεγέθους του χώρου και εφαρμόζουμε τις αρχές της Κυματικής Ακουστικής και το πεδίο δεν μπορεί να θεωρηθεί διάχυτο.

3) Ζώνη διάχυσης: $f_c \leq f \leq 4 \cdot f_c$ (2.4)

Περιοχή μετάβασης προηγούμενης και επόμενης.

4) Ζώνη ανακλάσεων: $f \leq 4 \cdot f_c$ (2.5)

Ο ήχος διαδίδεται σε ευθείες και επικρατούν οι τυχαίες ανακλάσεις.

Γενικότερα:

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

Δημιουργία στάσιμων κυμάτων

Στάσιμο κύμα δημιουργείται με τη συμβολή ενός οδεύοντος κύματος και της ανάκλασης του όταν αυτό προσπέσει σε ανακλούμενη επιφάνεια. Υπό κάποιες συνθήκες θα δημιουργηθούν σημεία μέγιστης πίεσης (κοιλίες) και ελάχιστης (δεσμοί). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας μηχανισμός που εγκλωβίζει την ενέργεια. Αυτό μπορεί να είναι ένας σωλήνας, μια χορδή ή στην υπό εξέταση περίπτωση ένα κλειστό δωμάτιο. Οι ιδιοσυχνότητες αυτές δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_n = n \cdot \frac{c}{2L} \text{ (για 2 διαστάσεις) (2.6)}$$

Για τις 3 διαστάσεις – Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο δωμάτιο

Για τη δημιουργία διάχυτου πεδίου πρέπει οι ανακλάσεις στους 6 τοίχους να συμβαίνουν με τυχαίο τρόπο. Αυτό όμως δεν συμβαίνει. Μέρος της διαδίδεται σε κλειστές διαδρομές μεταξύ συγκεκριμένων τοίχων με συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης. Έτσι εμφανίζονται τα στάσιμα κύματα τα οποία απορροφώνται με διαφορετικό ρυθμό από ότι οι υψηλότερες συχνότητες. Οι συχνότητες εμφάνισης των συντονισμών καθορίζονται από τη γεωμετρία του χώρου και ικανοποιούν την παρακάτω σχέση:

$$(2.7) \quad f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad \text{(Για 3 διαστάσεις) Όπου } \mathbf{n} \text{ η τάξη}$$

στάσιμου κύματος στον αντίστοιχο άξονα και \mathbf{L} οι διαστάσεις του χώρου στον αντίστοιχο άξονα.

Τα στάσιμα αυτά κύματα ή τρόποι δόνησης παρουσιάζονται σε 3 μορφές στο χώρο και κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με αυτά/ούς.

1) **Αξονικοί τρόποι δόνησης:** Οι ισχυρότεροι από τους 3. Διαδοχικές ανακλάσεις του ήχου μεταξύ 2 παράλληλους τοίχους του δωματίου (n_x, n_y, n_z όταν μια οποιαδήποτε τάξη $\neq 0$).

2) **Εφαπτομενικοί τρόποι δόνησης:** $\frac{1}{2}$ ενέργειας (-3dB). Διαδοχικές ανακλάσεις του ήχου μεταξύ 4 τοίχων του δωματίου (n_x, n_y, n_z όταν δυο οποιοσδήποτε τάξεις $\neq 0$).

3) **Πλάγιοι τρόποι δόνησης:** $\frac{1}{4}$ ενέργειας (-6dB). Διαδοχικές ανακλάσεις του ήχου μεταξύ και των 6 τοίχων του δωματίου (n_x, n_y, n_z όταν όλες οι τάξεις $\neq 0$).

Σε όλους τους τρόπους ταλάντωσης παρουσιάζονται μέγιστα πλάτη πίεσης στις γωνίες του δωματίου (και συγκεκριμένα στις συντεταγμένες, 0,0,0, Lx, Ly, Lz).

Πυκνότητα τρόπων ταλάντωσης

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

Το πλήθος στάσιμων κυμάτων N ανά συχνότητα δίνεται από:

$$N \cong \frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f^2}{4c^2} + \frac{L f}{8c} \quad (2.8)$$

και ανά ζώνη εύρους συχνοτήτων Δf

$$\Delta N \cong \left[4\pi V \left(\frac{f}{c} \right)^3 + \frac{\pi S}{2} \left(\frac{f}{c} \right)^2 + \frac{L}{8} \left(\frac{f}{c} \right) \right] \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (2.9)$$

Επίδραση των συντονισμών στην ακουστική του χώρου

Η επίδραση των στάσιμων κυμάτων είναι συναρτήσεως της θέσης και επηρεάζουν τόσο το σταθερό ηχητικό πεδίο αλλά και το ηχητικό πεδίο στο χρόνο. Υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις της έντασης από σημείο σε σημείο του χώρου. Τονίζοντας συγκεκριμένες συχνότητες καταστρέφεται η ομαλότητα του φάσματος απόκρισης του χώρου άρα και του παραγόμενου σε αυτόν ήχο. Όσο ένα δωμάτιο μεγαλώνει πληθαίνουν οι συντονισμοί, σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις. Έτσι, οι συντονισμοί δεν είναι πλέον μεμονωμένα διακριτοί και η απόκριση του χώρου ομαλοποιείται. Εκεί όμως που μπορεί να εμφανίσει κάποια ανομοιομορφία η απόκριση είναι όταν το μέγιστο ή το ελάχιστο κάποιων γειτονικών συντονισμών συμπίπτει. Τότε εμφανίζει μια έντονη έξαρση ή βύθιση αντίστοιχα. Το αντίθετο συμβαίνει σε μικρούς χώρους όπου διεγείρονται

συγκεκριμένα μεμονωμένα στάσιμα τα οποία προκαλούν έντονες ανομοιομορφίες στην απόκριση του δωματίου.

Συχνοτική απόκριση δωματίου

Το πλήθος των κανονικών τρόπων ταλάντωσης ανά σταθερό εύρος συχνοτήτων αυξάνεται με τη συχνότητα. Έτσι στις χαμηλές συχνότητες 20-300 Hz οι συντονισμοί απέχουν μεταξύ τους και είναι διακριτοί. Η απόκριση ενός δωματίου είναι αποτέλεσμα συνήχησης πολλών τρόπων δόνησης. Κάθε τρόπος έχει κεντρική συχνότητα f_c και εύρος που δίνεται από: $BW_{Mode} \approx \frac{2.2}{RT_{60}}$ (2.10)

Αν διεγείρονται και γειτονικοί συντονισμοί λόγω του εύρους του συντονισμού τότε στο χώρο οι δεσμοί και κοιλίες έχουν χωρική διαφορά και η συμβολή τους χρωματίζει το δωμάτιο ανά σημείο διαφορετικά. Επίσης, χρωματισμός επιτελείται και από τα αξονικά στάσιμα κύματα, λόγω του αυξημένου χρόνου εγκλωβισμού της ενέργειας τους σε σχέση με τις υπόλοιπες συχνότητες.

Τρόποι ελέγχου των συντονισμών

Στόχος κατά το σχεδιασμό ενός χώρου είναι να ισοκατανήσουμε τους ούτως η αλλιώς αναπόφευκτους συντονισμούς. Βασική πρόνοια είναι οι διαστάσεις του χώρου να μην είναι ακέραια πολλαπλάσια μεταξύ τους, προς αποφυγή των αξονικών τρόπων δόνησης που είναι και οι ισχυρότεροι. Οι βέλτιστες διαστάσεις και σχήμα, σε σχέση με τα στάσιμα κύματα, δεν μπορούν να προσδιοριστούν με μαθηματικό τρόπο. Έχει παρατηρηθεί πως χώροι με ακανόνιστα σχήματα διαχέουν καλύτερα τον ήχο από χώρους με συμμετρία. Υπάρχουν πολλές προτάσεις για «βέλτιστες αναλογίες» χώρου. Γενικό

συμπέρασμα είναι πως οι μεγαλύτεροι χώροι τείνουν να έχουν καλύτερη ακουστική από τους μικρούς. Οι συντονισμοί σε μεγάλους χώρους είναι πιο πυκνοί και όχι εύκολα διακριτοί.

Σχήματα δωματίου για περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή στάσιμων κυμάτων [5]

Στόχος κατά το σχεδιασμό ενός χώρου είναι να ισοκατανήσουμε τους ούτως η άλλως αναπόφευκτους συντονισμούς, όπως επίσης, η δημιουργία όσο το δυνατό περισσότερους. Βασική παράμετρος είναι οι διαστάσεις του χώρου να μην είναι ακέραια πολλαπλάσια μεταξύ τους, προς αποφυγή της σύμπτωσης των αξονικών τρόπων δόνησης που είναι και οι ισχυρότεροι. Υπάρχουν πολλές προτάσεις για «βέλτιστες αναλογίες» χώρου. Γενικό συμπέρασμα είναι πως οι μεγαλύτεροι χώροι τείνουν να έχουν καλύτερη ακουστική από τους μικρούς, γιατί οι συντονισμοί σε μεγάλους χώρους είναι πιο πυκνοί και όχι εύκολα διακριτοί

Τα σχήματα που μπορεί να έχει τα δωμάτια ποικίλουν . Οι τοίχοι μπορεί να είναι στρεβλοί, οι οροφές να έχουν κλίση, να χρησιμοποιούνται κυλινδρικά ή πολυγωνικά σχήματα κ.α.. Μερικά σχήματα μπορούν να διαγραφούν επειδή εστιάζουν τον ήχο, και η εστίαση είναι κάτι το ανεπιθύμητο. Για παράδειγμα, τα παραβολικά σχήματα δίνουν ακριβείς εστίες και ο κυλινδρικές κοιλότητες λιγότερο ακριβείς αλλά πάντως εστίες. Ακόμη και οι πολυγωνικοί κοίλοι τοίχοι των 4, 5, 6, ή 8 πλευρών προσεγγίζουν τον κύκλο και έχουν σαν αποτέλεσμα συγκεντρώσεις ήχου σε μερικές περιοχές σε βάρος άλλων.

Η δημοτικότητα των ορθογώνιων δωματίων οφείλεται κατά ένα μέρος στην οικονομική κατασκευή, αλλά ωστόσο έχει ακουστικά πλεονεκτήματα. Οι αξονικοί, εφαπτομενικοί και οι πλάγιοι τρόποι ταλάντωσης μπορούν να υπολογιστούν με μικρή προσπάθεια και να μελετηθεί η κατανομή τους. Για μία

πρώτη προσέγγιση, ένας καλός τρόπος είναι να εξεταστούν μόνο οι επικρατέστεροι αξονικοί τρόποι ταλάντωσης. Δίνεται από τον τύπο :

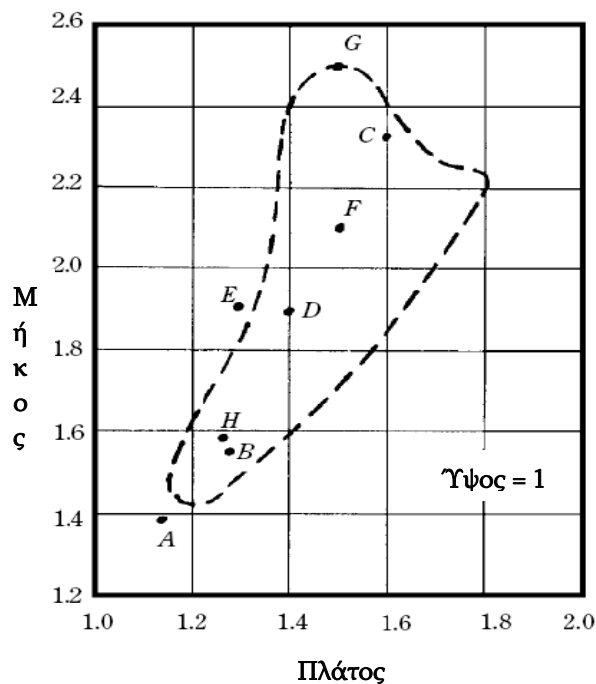
$$f = \frac{c}{2} \cdot \frac{n_i}{L} \quad \text{Σχέση 1}$$

όπου $c = 343\text{m/sec}$ η ταχύτητα του ήχου στον αέρα, $n_i = 1, 2, 3, \dots$ είναι ο αριθμός της ιδιοσυχνότητας και L είναι το μήκος της διάστασης του δωματίου (ύψος, πλάτος, μήκος)

Μπορούν να εντοπιστούν οι εκφυλισμοί (συγκεντρώσεις τρόπων ταλάντωσης) και να αποκαλυφθούν άλλα σφάλματα του δωματίου.

Το πρωταρχικό ρόλο για τη σωστή κατανομή των στάσιμων κυμάτων σε ένα δωμάτιο τον έχουν οι αναλογίες των διαστάσεών του (μήκους - πλάτους - ύψος).

Οι χειρότερες αναλογίες για την ακουστική ενός δωματίου είναι αυτές του κύβου. Αυτό γιατί και οι τρεις διαστάσεις του χώρου συντονίζονται ακριβώς στις ίδιες συχνότητες με αποτέλεσμα τη μέγιστη φασματική αλλοίωση. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν παλαιότερες και νεότερες εικασίες στατιστικής ανάλυσης αναλογιών δωματίων που δίνουν καλή διανομή των τρόπων ταλάντωσης. Ωστόσο καμία από δε είναι η άριστη. Ο Bolt δίνει μια



Σχήμα 1 ευνοϊκών αναλογιών διαστάσεων δωματίου για να πετύχουμε ομογενή κατανομή συχνοτήτων σε δωμάτιο. Η διακεκομμένη γραμμή περικλείει την επονομαζόμενη 'Περιοχή Bolt' τα γράμματα αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα

περιοχή αναλογιών δωματίου που παράγουν τις απαλότερες χαρακτηριστικές καμπύλες δωματίου σε χαμηλές συχνότητες σε μικρά ορθογώνια δωμάτιο όπως βλέπουμε στο δίπλα σχήμα. Οι αναλογίες 2 : 3 :5 του Volkmann ευνοούνταν πριν από πενήντα χρόνια. Ο Boner πρότεινε τις αναλογίες 1 : 1.26 : 1.59 σαν άριστες. Ο Sepmeyer δημοσίευσε το 1965 μία στατιστική μελέτη η οποία δίνει αρκετά καλές αναλογίες. Μία ακόμη μεταγενέστερη εργασία του Louden αναφέρει 125 αναλογίες διαστάσεων σε φθίνουσα σειρά ακουστικής ποιότητας του δωματίου.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι καλύτερες αναλογίες που προτείνονται από όλες αυτές τις εργασίες. Για να συγκριθούν με την ευνοϊκή περιοχή που πρότεινε ο Bolt, έχουν σημειωθεί πάνω στο διπλανό σχήμα. Οι περισσότερες από τις αναλογίες πέφτουν μέσα ή κοντά στην περιοχή του Bolt. Αυτό σημαίνει ότι κάθε αναλογία μέσα στην περιοχή του Bolt θα δίνει λογική ποιότητα δωματίου όσον αφορά την κατανομή των συχνοτήτων των αξονικών τρόπων ταλάντωσης.

Πίνακας 1 Αναλογίες διαστάσεων ορθογώνιου δωματίου για ευνοϊκή κατανομή τρόπων ταλάντωσης

Δημιουργός		Ύψος	Πλάτος	Μήκος	Είναι στη περιοχή του Bolt?
1. Sepmeyer ⁵	A	1.00	1.14	1.39	No
	B	1.00	1.28	1.54	Yes
	C	1.00	1.60	2.33	Yes
2. Louden ⁶ 3 best ratios	D	1.00	1.4	1.9	Yes
	E	1.00	1.3	1.9	No
	F	1.00	1.5	2.5	Yes
3. Volkmann ³ 2 : 3 : 5	G	1.00	1.5	2.5	Yes
4. Boner ⁴ 1: $\sqrt[3]{2}$: $\sqrt[3]{4}$	H	1.00	1.26	1.59	Yes

Βλέποντας τις αναλογίες των διαστάσεων του δωματίου δε μπορούμε να πούμε αν το δωμάτιο είναι επιθυμητό η όχι. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε δωμάτιο με ύψος 3m και έχοντας και τις άλλες δύο διαστάσεις, μπορεί να γίνει για τη κάθε μία ανάλυση αξονικών τρόπων ταλάντωσης όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Επίσης αυτό φαίνεται και στη μορφή γραφήματος πιο κάτω.

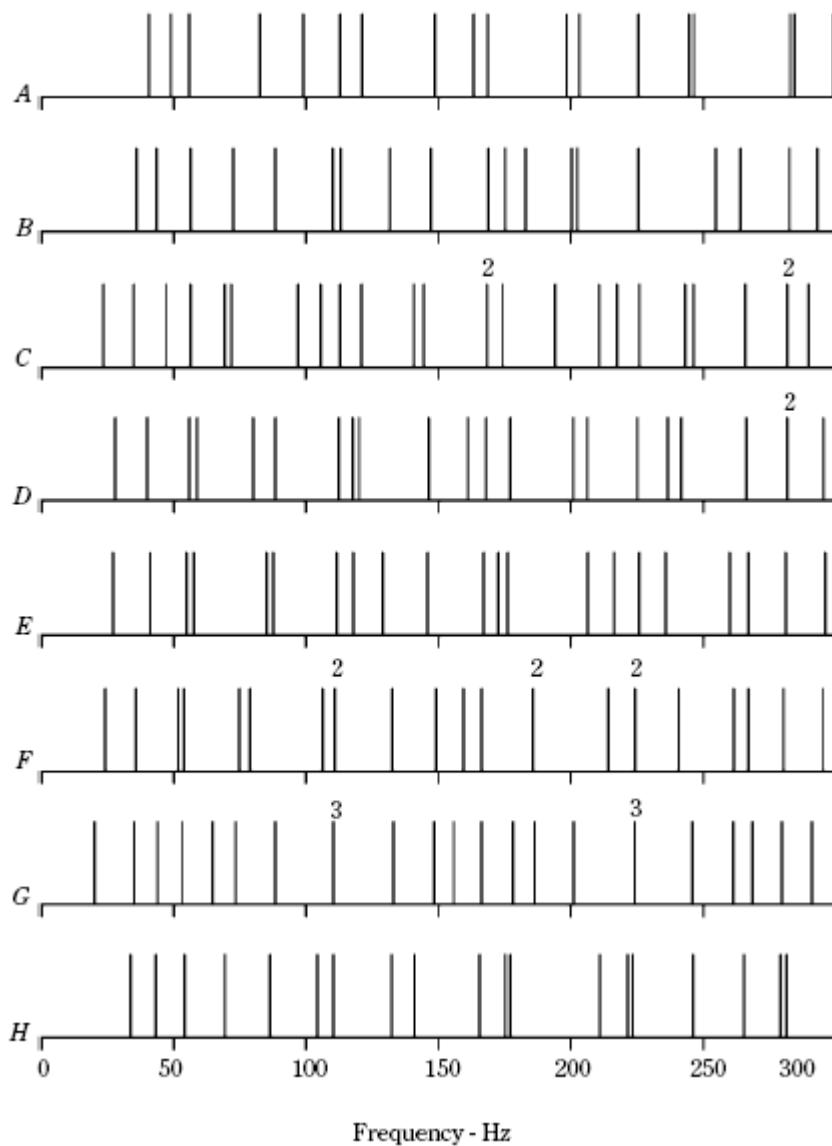
Πίνακας 2 Αξονικά στάσιμα κύματα κατά μήκος, πλάτος και ύψος

Πίνακας 3 Κατανομή αξονικών τρόπων ταλάντωσης κατά αύξοντα αριθμό και διαφορά συχνοτήτων

	Length $L = 19 \text{ ft } 5 \text{ in}$ $L = 19.417 \text{ ft}$ $f_1 = 565/L$	Width $W = 14 \text{ ft } 2 \text{ in}$ $W = 14.17 \text{ ft}$ $f_1 = 565/W$	Height $H = 8 \text{ ft}$ $H = 8.92 \text{ ft}$ $f_1 = 565/H$	Arranged in ascending order	Diff
f_1	29.1	39.9	63.3	29.1	10.8
f_2	58.1	79.7	126.7	39.9	18.3
f_3	87.3	119.6	190.0	58.2	5.1
f_4	116.4	159.5	253.4	63.3	16.4
f_5	145.5	199.4	316.7	79.7	7.6
f_6	174.6	239.2		87.3	29.1
f_7	203.7	279.1		116.4	3.2
f_8	232.8	319.0		119.6	7.1
f_9	261.9			126.7	18.8
f_{10}	291.0			145.5	14.0
f_{11}	320.1			159.5	15.1
f_{12}				174.6	15.4
f_{13}				190.0	9.4
f_{14}				199.4	4.3
f_{15}				203.7	29.1
				232.8	6.4
				239.2	14.2
				253.4	8.5
				261.9	17.2
				279.1	11.9
				291.0	25.7
				316.7	

Όλα είναι σχετικά μικρά δωμάτια και γι' αυτό έχουν την ίδια μοίρα να έχουν αποστάσεις συχνότητας αξονικών τρόπων ταλάντωσης μεγαλύτερες από

αυτές που θέλουμε. Όσο περισσότερο ομογενείς είναι οι αποστάσεις τόσο το καλύτερο. Οι εκφυλισμοί ή συμπτώσεις τρόπων ταλάντωσης, είναι ένα πιθανό πρόβλημα και αναγνωρίζονται με τα 2 ή 3 από πάνω τους για να φανεί το πλήθος των συντονισμών που έχουν συγκεντρωθεί. Τρόποι ταλάντωσης που είναι πολύ κοντά μεταξύ τους αν και δε συμπίπτουν πραγματικά μπορεί και αυτοί να παρουσιάσουν προβλήματα. Έχοντας αυτούς τους κανόνες μπορούν να υπολογιστούν ποιες από τις οκτώ 'καλύτερες' κατανομές του παρακάτω πίνακα είναι πραγματικά οι καλύτερες και ποιες οι χειρότερες. Πρώτων απορρίπτεται η G με δύο τριπλές συμπτώσεις που έχουν μεγάλες αποστάσεις από τις γειτονικές. Ύστερα απαλείφεται η F εξαιτίας τριών διπλών συμπτώσεων που έχουν σχέση με μερικές αρκετά μεγάλες αποστάσεις. Επίσης η επίδραση των διπλών συμπτώσεων κοντά στα 280Hz στην C και D επειδή οι χρωματισμοί σπάνια εμφανίζονται πάνω από τα 200Hz. Πέρα από τις δύο που απορρίφθηκαν, υπάρχει μικρή δυνατότητα μεταξύ των υπολοίπων. Όλες έχουν σφάλματα. Ίσως όλες θα εξυπηρετούσαν αρκετά καλά, αφού έχουμε υπόψη μας τα πιθανά προβλήματα. Αυτή η απλή προσέγγιση μελέτης της κατανομής των αξονικών τρόπων ταλάντωσης έχει βοηθά στο να υπάρξει μία εικόνα της κατανομής στο φάσμα των κύριων αξονικών τρόπων ταλάντωσης, γνωρίζοντας ότι οι ασθενέστεροι εφαπτομενικοί και πλάγιοι τρόποι ταλάντωσης μπορούν να βοηθήσουν μόνο συμπληρώνοντας ενδιάμεσα τους αξονικούς τρόπους που έχουν μεγαλύτερες αποστάσεις συχνοτήτων.



Σχήμα 2 Γραφικές παραστάσεις της κατανομής των αξονικών τρόπων ταλάντωσης για τις οκτώ ‘καλύτερες’ αναλογίες δωματίων. Οι μικροί αριθμοί δείχνουν το πλήθος των τρόπων ταλάντωσης που συμπίπτουν στις συγκεκριμένες συχνότητες. Θεωρούμε ότι το δωμάτιο έχει ύψος 3m.

Ένας κύριος σκοπός είναι να αποφύγουμε σύμπτωση (συγκέντρωση) αξονικών τρόπων ταλάντωσης. Για παράδειγμα αν αναλύονταν ένα δωμάτιο σχήματος κύβου όλοι οι αρμονικοί και οι θεμελιώδεις συχνότητες θα συνέπιπταν. Το γεγονός αυτό παράγει μία τριπλή σύμπτωση σε κάθε συχνότητα τρόπου ταλάντωσης και μεγάλα διάκενα ενδιάμεσα. Χωρίς αντίρρηση, ο ήχος σε ένα τέτοιο χώρο θα είχε πολύ χρώμα και ακουστικά θα ήταν πολύ φτωχός. Ενώ

αυτές οι αναλογίες που προτείνονται έχουν κάποια ελαττώματα, ωστόσο με κατάλληλη μετέπειτα επεξεργασία του δωματίου, μπορούν να βελτιωθούν και αυτές οι μικρό ατέλειες και να προσεγγίζοντας αρκετά στο ιδανικό. Το κατάλληλο σημείο εκκίνησης είναι οι κατάλληλες αναλογίες του δωματίου.

Όταν προσεγγίζεται προϋπάρχουν χώρος, δεν υπάρχει πάντα η ελευθερία μετακίνησης τοίχων τόσο εύκολα. Ωστόσο μία μελέτη των αξονικών τρόπων ταλάντωσης εξακολουθεί να είναι πολύ χρήσιμη. Για παράδειγμα αν μια τέτοια μελέτη αποκαλύψει προβλήματα και ο χώρος επιτρέπει, ένας νέος τοίχος θα βελτίωνε αισθητά την κατάσταση των τρόπων ταλάντωσης.

1.4 Θεωρία Απορροφητών

Η ποικιλία των μηχανισμών και των διατάξεων, μέσω των οποίων η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα είναι ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα της Μηχανικής Ακουστικής. Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της διάρκειας της ηχητικής ενέργειας, σε διαφόρων τύπου χώρους όπως γραφεία, studios, συναυλιακοί χώροι, εργοστάσια και γενικότερα χώρους που επιθυμείται να ελέγχεται ο θόρυβος που δημιουργείται από ένα αντηχητικό πεδίο, ο οποίος λειτουργεί αρνητικά όσον αφορά την καλλιτεχνικά ακουστική διαμόρφωση ενός χώρου, παροξύνει το ρίσκο βλάβης του ακουστικού μας συστήματος, καθώς και τη γρήγορη εξάντληση μας. Η ηχοαπορρόφηση μιας επιφάνειας (και επομένως ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης) εξαρτάται από παράγοντες, όπως τη μορφή του πεδίου (διάχυτο ή κατευθυντικό), τη γωνία πρόσπτωσης κλπ. Σε κάθε περίπτωση είναι συνάρτηση της συχνότητας.

Υπάρχουν διαφόρων τύπου ηχοαπορροφητικές διατάξεις, εκ των οποίων θα περιγράψουμε συνοπτικά τους σύνητες, ενώ θα επικεντρωθούμε περισσότερο στους απορροφητές χαμηλών συχνοτήτων Helmholtz resonator και Panel absorber, μιας και ο έλεγχος των χαμηλών συχνοτήτων είναι ένα σύνητες και σημαντικό πρόβλημα σε ακουστικά μικρούς χώρους όπως τα Control Room.

Πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά.

Η απορρόφηση του ήχου επιτυγχάνεται με την βοήθεια των δυνάμεων τριβής που μετατρέπουν την ηχητική ενέργεια σε θερμότητα. Συνήθως επιλέγονται πορώδη υλικά των οποίων η πυκνότητά τους είναι δύο – τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Επίσης η διάμετρος των πόρων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου, καθώς και το πάχος του υλικού α πρέπει να είναι τουλάχιστο το $1/8$ του μήκους κύματος της συχνότητας που θέλουμε να απορροφήσουμε. Για αυτό το λόγο οι πορώδεις απορροφητικές επιφάνειες έχουν μεγαλύτερη απόδοση σε υψηλές συχνότητες. Παράδειγμα τέτοιων επιφανειών είναι ο υαλοβάμβακας { ο οποίος δε συνιστάται γιατί έχει αποδειχθεί καρκινογόνος } και ο πετροβάμβακας (είναι προτιμότερος). Στα πορώδη απορροφητικά, η απορρόφηση οφείλεται στην απώλεια ενέργειας λόγω τριβών καθώς ο αέρας κινείται στους πόρους. Η προτιμότερη θέση τοποθέτησης θα ήταν σε μία επιφάνεια όπου προκαλεί ανάκλαση του ήχου και σε απόσταση από αυτή $\lambda/4$, $3\lambda/4$ κλπ. (η μέγιστη απορρόφηση επιτυγχάνεται στα $\lambda/4$).

Απορροφητές τύπου μεμβράνης.

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μία λεπτή μεμβράνη (συνήθως από ύφασμα) που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από κάποιο σκληρό υλικό (π.χ. τοίχος). Όταν ο ήχος πέφτει στη μεμβράνη τότε τη διεγείρει σε ταλαντώσεις και απώλεια της ηχητικής ενέργειας, η οποία οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού. Ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών αυτών είναι μεγάλος σε χαμηλές συχνότητες. Στους απορροφητές τύπου μεμβράνης, όσο πιο λεπτό είναι το υλικό τους τόσο πιο μεγάλη είναι η απορρόφηση διότι δονούνται πιο εύκολα. Οι συχνότητες τις οποίες απορροφούν οι απορροφητές αυτοί είναι μεταξύ 50Hz και 500Hz.

Panel absorber.

Είναι ουσιαστικά και αυτοί απορροφητές τύπου μεμβράνης, αλλά είναι περισσότερο σύνθετες διατάξεις που βασίζονται και αυτές στο φαινόμενο του συντονισμού και χρησιμοποιούνται κυρίως για την αντιμετώπιση των χαμηλών συχνοτήτων. Η κατασκευαστική φιλοσοφία τους στηρίζεται στην ύπαρξη ενός απλού διαφράγματος που τοποθετείται σε μικρή απόσταση από μία σταθερή επιφάνεια (π.χ. τοίχο). Η ηχητική ενέργεια προσπίπτει στο διάφραγμα και το θέτει σε ταλάντωση με συχνότητα ανάλογη της ελαστικότητας και του φυσικού κενού που υπάρχει ανάμεσα στο διάφραγμα και τον τοίχο.

Συντονιστές τύπου Helmholtz.

Ο συντονιστής (ή συνηχητής) στη πραγματικότητα είναι μία κοιλότητα στο υλικό. Όταν ο ήχος πέσει στο στόμιο της κοιλότητας διεγείρει τον αέρα που βρίσκεται στον συντονιστή και η απώλεια ενέργειας οφείλεται και πάλι στις αποσβέσεις των ταλαντώσεων λόγω τριβών. Ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών αυτών έχει ένα οξύ μέγιστο γύρω από μία συχνότητα συντονισμού, τη συχνότητα συντονισμού f_0 που βρίσκεται συνήθως στις χαμηλές συχνότητες, ενώ για τις υπόλοιπες συχνότητες είναι σχεδόν μηδέν. Σε περίπτωση που θέλουμε να αυξήσουμε το εύρος της καμπύλης συντονισμού μπορούμε να προσθέσουμε στο εσωτερικό του συντονιστή ένα πορώδες απορροφητικό υλικό, ωστόσο θα μειώσουμε τη μέγιστη απορρόφηση της συχνότητας συντονισμού.

Διάτρητες επιφάνειες.

Οι διάτρητες επιφάνειες είναι μία μορφή συντονιστών τύπου Helmholtz και χρησιμοποιούνται συχνά για την απορρόφηση του ήχου τόσο σε κλειστούς

χώρους όσο και σε ανοικτούς χώρους. Οι διάτρητες επιφάνειες κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως κόντρα πλακέ, hardboard, λαμαρίνα κλπ. Οι διατρήσεις μπορεί να είναι κυκλικές ή να έχουν σχήμα σχισμών. Κάθε τρύπα ή σχισμή λειτουργεί σα το λαιμό ενός συντονιστή Helmholtz. Όταν θέλουμε να έχουμε μέγιστο απορρόφησης σε διαφορετικές συχνότητες, χρησιμοποιούμε δύο ή περισσότερα είδη διατρήσεων στην ίδια ή σε διαφορετικές επιφάνειες. Προσθήκη απορροφητικού υλικού κάτω από την διάτρητη επιφάνεια όπως και στους συντονιστές πλαταίνει την καμπύλη συντονισμού. Η διάτρηση μπορεί να είναι συμμετρική ή τυχαία. Στις διάτρητες επιφάνειες το ποσοστό διάτρησης σε καμία περίπτωση δε πρέπει να ξεπερνάει το 20% γιατί τότε η επιφάνεια είναι διαφανής ως προς τον ήχο.

Ενεργοί απορροφητές.

Στους απορροφητές που γνωρίσαμε παραπάνω ο μηχανισμός απορρόφησης οφείλεται στην απ' ευθείας μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα και για το λόγο αυτό ονομάζονται και παθητικοί απορροφητές. Οι ηλεκτρονικοί απορροφητές που ονομάζονται και ενεργητικοί απορροφητές έχουν σαν αρχή λειτουργίας την ακύρωση του ήχου με εκπομπή άλλου ήχου με αντίθετη φάση προς τον αρχικό

Παρακάτω θα δούμε αναλυτικότερα τους απορροφητές χαμηλών συχνοτήτων που κυρίως είναι οι panel absorbers η αλλιώς απορροφητές μεμβράνης και τον Helmholtz Resonator ή αλλιώς συντονιστή Helmholtz.

1.5 Διάχυση

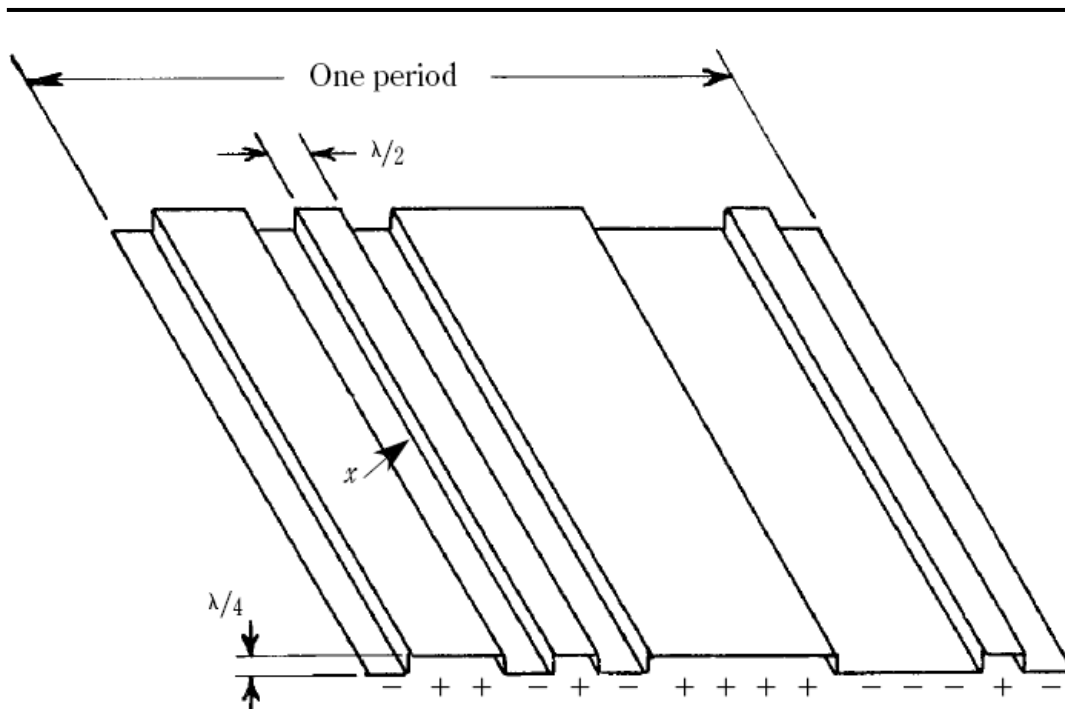
Παρακάτω θα παρουσιαστεί η τεχνοτροπία των διαχυτών και κατά αυτή τη παρουσίαση, θα χρησιμοποιηθεί το όνομα της εταιρίας RPG. Σε καμία

περίπτωση δε αναφερόμαστε στο όνομά της για διαφημιστικούς λόγους, αλλά για το ότι αυτή η εταιρία δημιούργησε τους περισσότερους διαχυτές, όπως θα δούμε παρακάτω, ενώ είχε στενή επαφή με ακαδημαϊκά ιδρύματα, για την επιστημονική παρουσίαση των δοκιμών της.

Ο διαχυτής Schroeder :

Η εφαρμογή της αρχής των φραγμάτων περίθλασης στην ακουστική αποτελεί παραπέρα ένδειξη για την διαρκώς αναπτυσσόμενη πορεία της επιστήμης. Ο Manfred R. Schroeder άνοιξε νέους ορίζοντες στη διάχυση του ήχου. Ο Schroeder πήρε από την θεωρία των υπολογιστών και από την θεωρία των αριθμών την ιδέα ότι ένα τοίχος που έχει αυλακώσεις διατεταγμένες με ορισμένο τρόπο θα διαχέει τον ήχο σε βαθμό που ήταν αδύνατον στο παρελθόν. Χρησιμοποιούνται κώδικες μεγίστου μήκους για την δημιουργία ψευδό-τυχαίου θορύβου με εφαρμογή ορισμένων ακολουθιών των +1 και -1. Το φάσμα ισχύος (από τον μετασχηματισμό Fourier) αυτού του θορύβου είναι ουσιαστικά επίπεδο. Το -1 θύμιζε ανάκλαση από το βάθος μιας εγκοπής σε τοίχο, η οποία είχε βάθος ενός τετάρτου μήκους κύματος. Η ανάκλαση +1 είναι η ανάκλαση από τον τοίχο χωρίς εγκοπή.

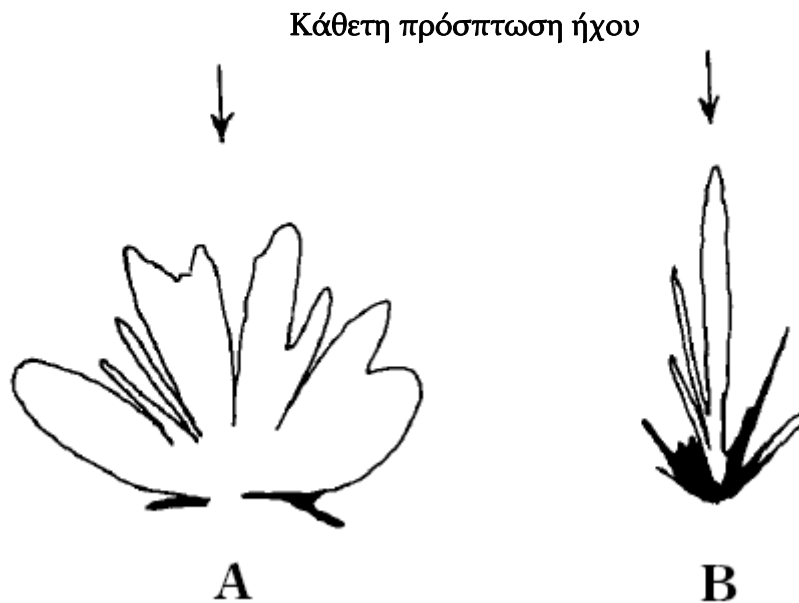
Έτσι ο καθηγητής Schroeder σχεδίασε και υλοποίησε το λύγισμα ενός μεταλλικού φύλου στη μορφή που φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 1 Μεταλλικό φύλλο λυγισμένο έτσι ώστε να υπακούει στην ακολουθία μεγίστου μήκους που χρησιμοποίησε ο Schroeder για να ελέγξει την διάχυση ραδιοφωνικών κυμάτων μήκους κύματος 3cm .Οι αυλακώσεις έχουν βάθος ενός τετάρτου μήκους κύματος.

Σχεδίασε την ιδέα του με μικροκύματα μήκους κύματος 3cm. Το σχήμα αυτό ακολουθούσε την παρακάτω δυαδική ακολουθία μεγίστου μήκους με μήκος περιόδου 15: -+++--++++-----+

Για να λειτουργήσει αυτή η ιδέα πρέπει να εφαρμοστούν κατά γράμμα όλες οι διαστάσεις, αλλιώς τα ηχητικά κύματα θα υποστούν πλήρη ανάκλαση και ο διαχυτής θα λειτουργεί ως ανακλαστική επιφάνεια. Παρακάτω βλέπουμε τον τρόπο που διαχέει ο συγκριμένος διαχυτής τα ηχητικά κύματα του συγκεκριμένου μήκους κύματος στον χώρο (A) ενώ διπλά βλέπουμε την συμπεριφορά του διάχυτη ως ανακλαστική επιφάνεια, όταν δεν έχει σχεδιαστεί σωστά (B).



Σχήμα 2 Με A φαίνεται η διάχυση μίας συχνότητας.
Με B η ανάκλαση της ίδιας συχνότητας, λόγω λάθους διαχυτή.

Ακολουθία μεγίστου μήκους

Εξαιτίας της απαίτησης για εγκοπή βάθους ενός τετάρτου μήκους κύματος του δυαδικού διαχυτή μεγίστου μήκους, οι ιδιότητες διάχυσης του ήχου της επιφάνειας εξαρτώνται από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ήχου. Η πείρα έδειξε ότι έχουμε λογική διάχυση σε μία ζώνη συν ή πλην μίας οκτάβας της συχνότητας γύρω από την οποία έχει σχεδιαστεί ο διαχυτής. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε ένα διαχυτή ακολουθίας μεγίστου μήκους με μήκος ακολουθίας 15. Συχνότητα σχεδιάσεις 1000Hz δίνει μισό μήκος κύματος 19.8cm και βάθος εγκοπής ενός τετάρτου μήκους κύματος 10cm. Μια περίοδος αυτού του διαχυτή θα είχε πλάτος περίπου 2.97μέτρα και θα είχε αποτέλεσμα από περίπου 700 μέχρι περίπου 1400Hz. Θα χρειαζόταν πολλές τέτοιες μονάδες για να δώσουν διάχυση σε ένα μεγάλο τμήμα της ακουστικής ζώνης.

Διαχυτές ανάκλασης φράγματος φάσης

Το φράγμα περίθλασης , που για πολύ καιρό ήταν ιδιοκτησία της Οπτικής, σήμερα εφαρμόζεται και στην ακουστική. Μετά από αυτό το πείραμα έχουν αρχίσει να κατασκευάζονται μονάδες διάχυσης τύπου ακουστικού φράγματος περίθλασης.

Η ακουστική επεξεργασία μεγάλων ακουστικά χώρων, εξυπηρετείται καλά με τέτοιους διαχυτές (π.χ. αίθουσες μουσικής, αίθουσες διαλέξεων, και εκκλησίες). Η ηχητική ποιότητα της αίθουσας μουσικής επηρεάζεται πολύ από ανακλάσεις κυρίως στους πλευρικούς τοίχους. Με τους διαχυτές φράγματος οποιαδήποτε ενοχλητική κανονική ανάκλαση μπορεί να ελέγχεται με στρατηγική τοποθέτηση διαχυτών.

Διαχυτές τετραγωνικού υπολοίπου

Η αρχή του φράγματος φάσης ανάκλασης εφαρμόζεται σήμερα στον ήχο και πάλι χάρη στη διορατική κατανόηση του Schroeder για τους περιορισμούς του διαχυτή μεγίστου μήκους. Ο Schroeder σκέφτηκε ότι ένα ηχητικό κύμα που προσπίπτει σ' αυτό που οι φυσικοί ονομάζουν *φράγμα φάσης ανάκλασης* θα διέχεε τον ήχο σχεδόν ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Μπορούμε να πάρουμε τις μετατοπίσεις φάσης (ή χρονικές μετατοπίσεις) με μία διάταξη φρεάτων με βάθος που καθορίζεται από μία ακολουθία τετραγωνικού υπόλοιπου. Τα βάθη των φρεάτων καθορίζονται από μία ακολουθία τετραγωνικού υπολοίπου. Το μέγιστο βάθος του φρέατος καθορίζεται από το μεγαλύτερο μήκος κύματος που θα διαχυθεί. Το πλάτος του φρέατος είναι το μισό μήκος κύματος της υψηλότερης συχνότητας που πρόκειται να διαχυθεί. Τα βάθη της ακολουθίας φρεάτων καθορίζονται από την σχέση

Παράγων Αναλογίας Βάθους Φρέατος = $n^2 \text{ modulo } p$

Σχέση 1

Όπου p = πρώτος αριθμός, n = ακέραιος αριθμός μεταξύ μηδέν και απείρου.

Ο πρώτος αριθμός ορίζεται σαν αριθμός (εκτός 0 ή ± 1) που δε διαιρείται χωρίς υπόλοιπο από οποιονδήποτε άλλο αριθμό (εκτός του ± 1 και \pm του ίδιου του αριθμού). Παραδείγματα πρώτων αριθμών είναι το 5, το 7, το 11, το 13, κλπ. Το modulo αναφέρεται απλά στο υπόλοιπο. Για παράδειγμα αν στην εξίσωση:

Παράγων Αναλογίας Βάθους Φρέατος = $n^2 \text{ modulo } p$

Αν βάλουμε $p = 11$ και $n = 5$

έχουμε $25 \text{ modulo } 11$.

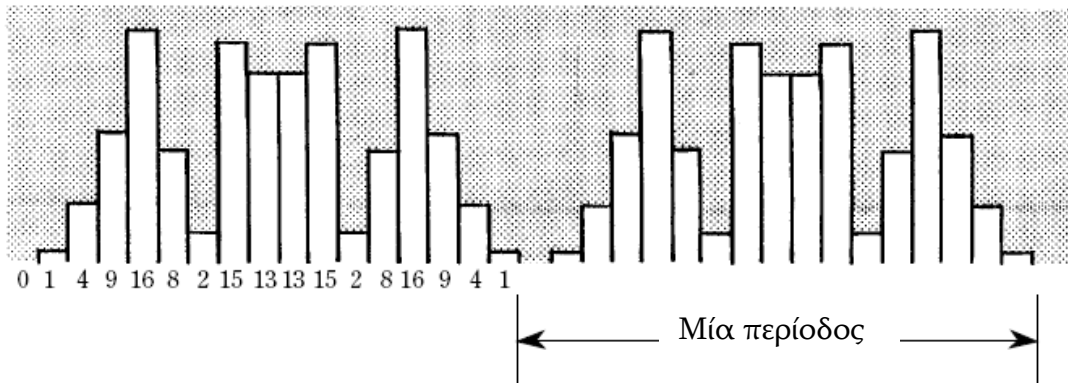
Το modulo 11 σημαίνει ότι το 11 αφαιρείται από το 25 μέχρι να μείνει σημαντικό υπόλοιπο. Δηλαδή το 11 αφαιρείται από το 25 δύο φορές και το υπόλοιπο 3 είναι η απάντησή.

Παρακάτω στον πίνακα 1 αναγράφονται ακολουθίες τετραγωνικού υπολοίπου για τους πρώτους αριθμούς 7,5,11,13,17,19 και 23 σε ξεχωριστή στήλη για τον καθένα. Για να ελέγξουμε το παραπάνω παράδειγμα για $n = 5$ και $p = 11$, πηγαίνουμε στην στήλη με το 11, και κατεβαίνουμε στο $n = 5$ και βρίσκουμε το 3 όπως στον παραπάνω υπολογισμό μας.

Πίνακας 1 Ακολουθίες τετραγωνικού υπολοίπου για τους πρώτους αριθμούς από 5 μέχρι 23. Στο προφίλ του διαχυτή στο κάτω μέρος κάθε στήλης, τα βάθη των φρεάτων είναι ανάλογα με την ακολουθία των αριθμών από επάνω.

n	p						
	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	10	15	11	3
8			9	12	13	7	18
9			4	3	13	5	12
10			1	9	15	5	8
11			0	4	2	7	6
12				1	8	11	6
13				0	16	17	8
14					9	6	12
15					4	16	18
16					1	9	3
17					0	4	13
18						1	2
19						0	16
20							9
21							4
22							1
23							0

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το μοντέλο για διαχυτή ανάκλασης φράγματος φάσης με τετραγωνικό υπόλοιπο για $p = 17$. Οι αριθμοί για κάθε στήλη που είδαμε στον παραπάνω πίνακα είναι ανάλογοι με τα βάθη φρεάτων διαφορετικών διαχυτών τετραγωνικού υπολοίπου.



Σχήμα 3 Συνηθισμένος διαχυτής τετραγωνικού υπολοίπου που βασίζεται στη στήλη του πρώτου αριθμού 17 (παραπάνω πίνακας). Τα βάθη των φρεάτων είναι ανάλογα με την ακολουθία αριθμών στην στήλη του πρώτου αριθμού 17. υπάρχουν δύο περίοδοι που δείχνουν τον τρόπο που ταιριάζουν μεταξύ τους γειτονικές περίοδοι

Η σχεδίαση αυτού του σχήματος βασίζεται στην ακολουθία αριθμών του πρώτου αριθμού 17. Στο τέλος κάθε στήλης υπάρχει ένας αριθμός που περιγράφει το βάθος του κάθε φρέατος. Οι διακεκομμένες γραμμές σημαίνουν λεπτά διαχωριστικά μεταξύ των φρεάτων.

Διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας

Οι διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας χρησιμοποιούν διαφορετική ακολουθία της θεωρίας των αριθμών, ως εξής:

$$\text{Παράγων Αναλογίας Βάθους Φρέατος} = g^n \text{ modulo } p \quad \text{Σχέση 2}$$

Όπου p = πρώτος αριθμός, g = η ελάχιστη πρωτεύουσα ρίζα του p .

Ο παρακάτω πίνακας 2 περιλαμβάνει ακολουθίες πρωτεύουσας ρίζας για έξη διαφορετικούς συνδυασμούς των p και g .

Πίνακας 2 Πίνακας πρωτεύουσας ρίζας

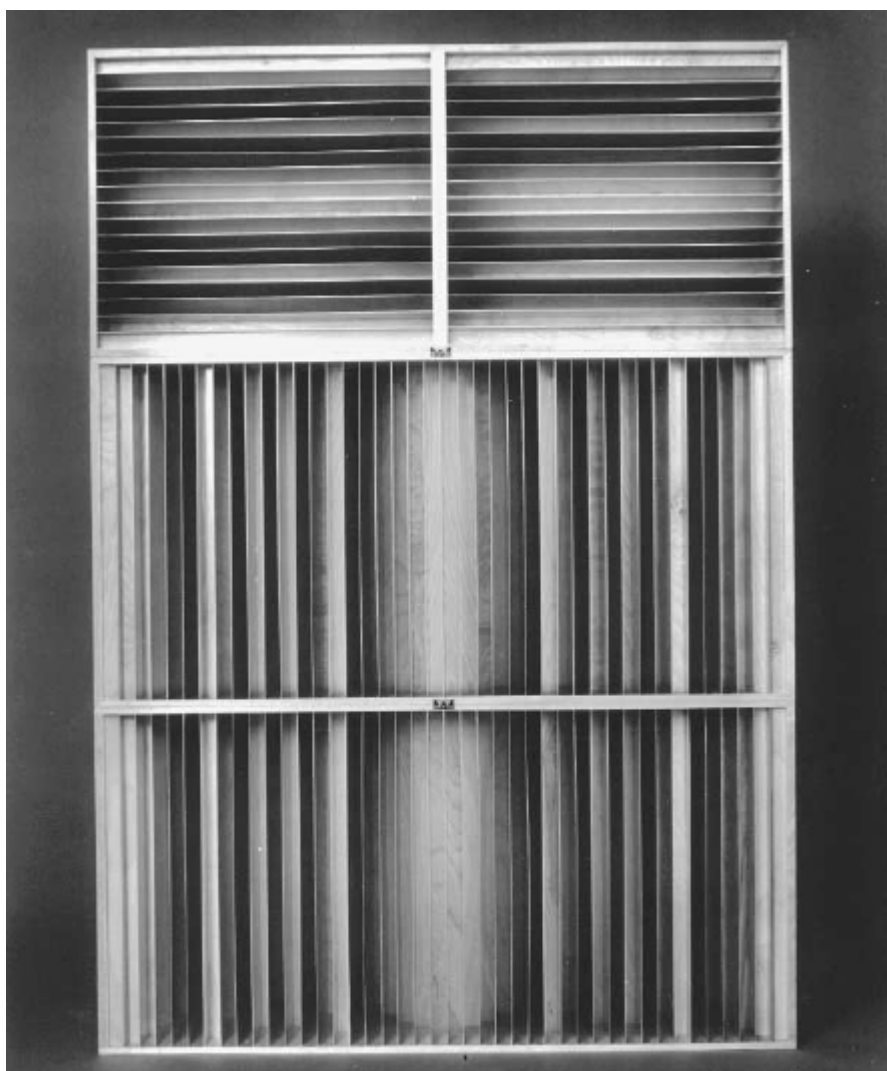
n	$p = 5$ $g = 2$	$p = 7$ $g = 3$	$p = 11$ $g = 2$	$p = 13$ $g = 2$	$p = 17$ $g = 3$	$p = 19$ $g = 2$
1	2	3	2	2	3	2
2	4	2	4	4	9	4
3	3	6	8	3	10	8
4	1	4	5	3	13	16
5		5	10	6	5	13
6		1	9	12	15	7
7			7	10	11	14
8			3	9	16	9
9			6	5	14	18
10			1	10	8	17
11				7	7	15
12				1	4	11
13					12	3
14					2	6
15					6	12
16					1	5
17						10
18						1

Βάθος φρέατος ή αναλογία = $g^n \text{ modulo } p$
 p = πρώτος αριθμός
 g = ελάχιστη πρωτεύουσα ρίζα του p

Τα σχήματα στο κάτω μέρος κάθε στήλης δεν είναι συμμετρικά όπως στους διαχυτές τετραγωνικού υπολοίπου.. Υπάρχει ένα ακουστικό πρόβλημα, με τους διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας, στο ότι ο κατοπτρικός τρόπος ταλάντωσης δεν καταπνίγεται τόσο καλά όσο στους διαχυτές τετραγωνικού υπολοίπου. Μεταξύ των φρεάτων χρησιμοποιούνται διαχωριστικά συνήθως μεταλλικά έτσι ώστε να διατηρείται η ακουστική ακεραιότητα κάθε φρεατίου. Χωρίς διαχωριστικά ελαττώνεται η αποτελεσματικότητα του διαχυτή.

Εφαρμογές τετραγωνικού υπολοίπου

Από την RPG Diffusor Systems έχουν κατασκευαστεί αρκετές εφαρμογές της θεωρίας τετραγωνικού υπολοίπου. Για παράδειγμα στο παρακάτω σχήμα 4 φαίνονται δύο από τα μοντέλα της το QRD-4311 κάτω και το QRD-1911 επάνω.



Σχήμα 4 Ομάδα εμπορικών διαχυτών τετραγωνικού υπολοίπου. Κάτω είναι δύο μονάδες διάχυσης QRD-4311™ με μία μονάδα :QRD-1911™ επάνω. Ο ημίδισκος διάχυσης, για την κάτω μονάδα είναι οριζόντιος, ενώ για την επάνω μονάδα κατακόρυφος. Peter D' Antonio, RPG Diffusor Systems, Inc and Audio Engineering Society, Inc

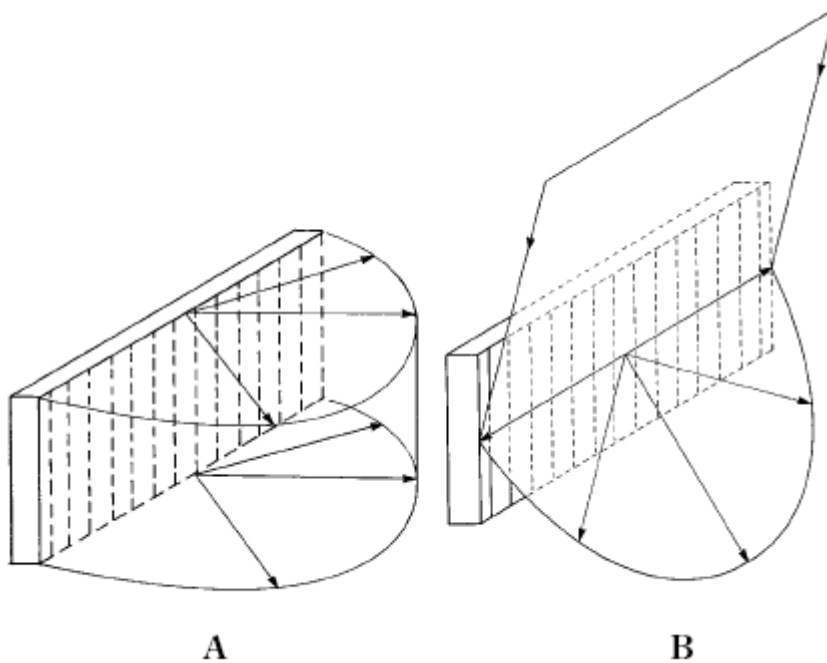
Το 19 δείχνει ότι έχει κατασκευαστεί με τον πρώτο αριθμό 19 και το 11 καθορίζει πλάτος φρέατος 1.1 ίντσας (2.8 εκατοστών). Με λίγα λόγια η υψηλότερη

συχνότητα που μπορεί να διαχύσει είναι τα 6.125kHz, θεωρώντας ότι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι 343m/sec.

$$f = \frac{c}{2 \cdot \lambda} \quad \text{Σχέση 3}$$

Με τον ίδιο τρόπο το QRD-4311 στο κάτω τμήμα της προηγούμενης φωτογραφίας βασίζεται στον πρώτο αριθμό 43 με πλάτος φρέατος 1.1 ίντσας (2.8 εκατοστά). Στον πίνακα φαίνονται οι πρώτοι αριθμοί μέχρι το 23 ωστόσο μέχρι το 43 οι ενδιαμέσοι αριθμοί είναι οι 29, 31, 37 και 41.

Αυτή η συγκεκριμένη ομάδα διαχυτών QRD προσφέρει εξαιρετική διάχυση στον οριζόντιο ημίδισκο όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα (Α). Ωστόσο όσον αφορά τον κατακόρυφο άξονα προκαλεί μία κανονική ανάκλαση από την πρόσοψη του διαχυτή

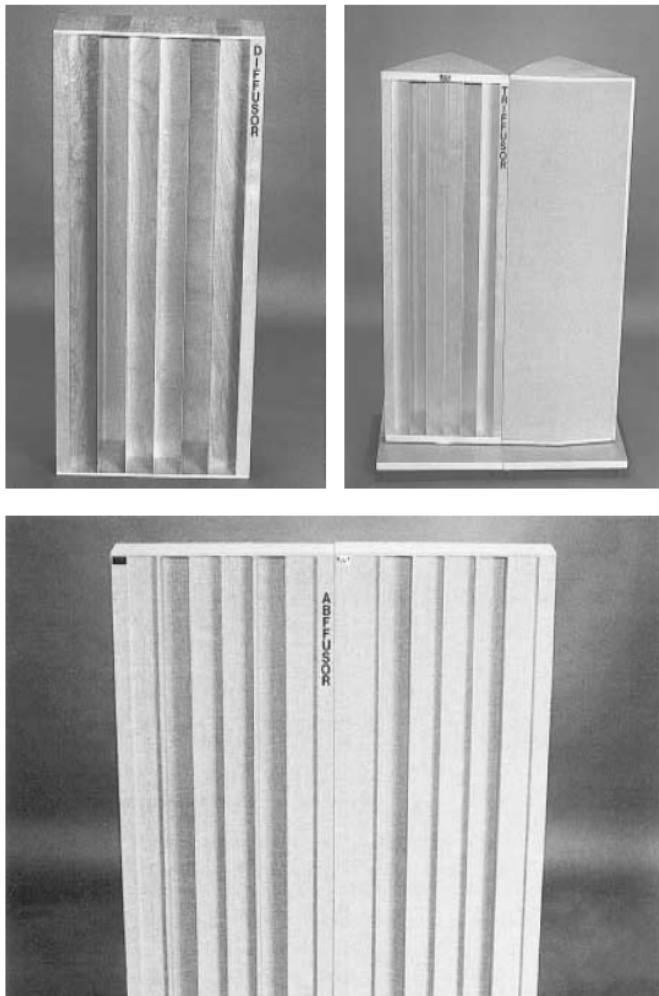


Σχήμα 5 (Α) Ο διαχυτής QRD μίας διάστασης σκεδάζει τον ήχο σε ημίδισκο. (Β) Αυτός ο ημίδισκος μπορεί να έχει κατεύθυνση με προσανατολισμό της πηγής σε σχέση με τον διαχυτή.

Τα κατακόρυφα φρέατα στον QRD-4311 σκεδάζουν οριζόντια και τα οριζόντια φρέατα του QRD-1911 σκεδάζουν κατακόρυφα, μαζί δημιουργούν ένα εικονικό ημισφαίριο διάχυσης.

Επέκταση της σειράς QRD

Η εμφάνιση των διαχυτών ανάκλασης φράγματος φάσης QRD -4311TM και QRD-1711TM ακολουθήθηκε από αρκετά άλλα μοντέλα σχεδιασμένα να εξυπηρετούν ειδικές ανάγκες. Για παράδειγμα, στο παρακάτω σχήμα δείχνει το μοντέλο QRD-734, που έχει διαστάσεις 0.6 X 1.23 μέτρα και είναι κατάλληλο για χρήση σε πλαίσια σχήματος T κρεμασμένα από την οροφή, καθώς και με άλλους τρόπους.



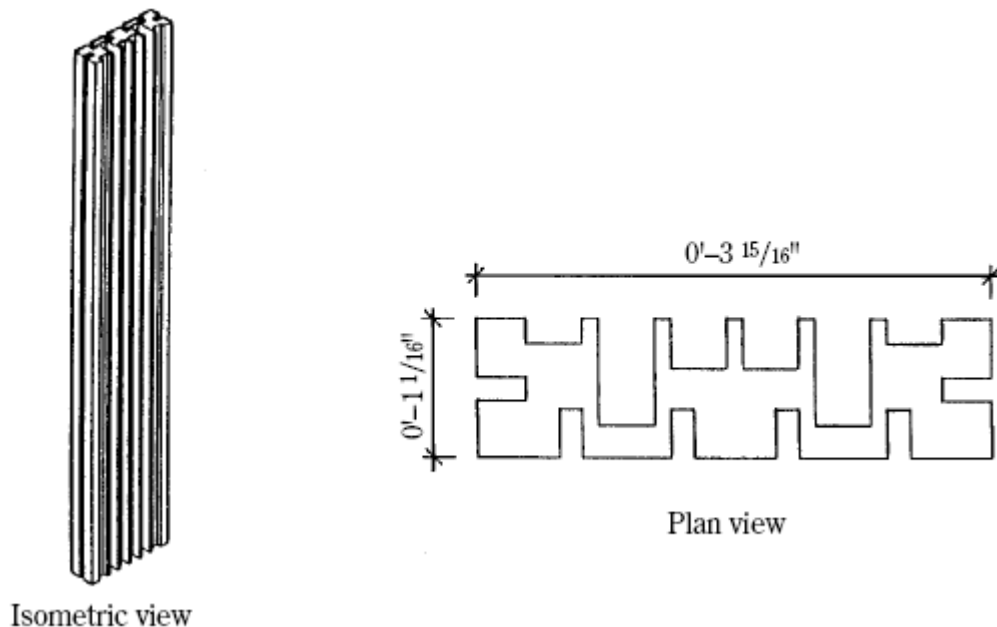
Σχήμα 9 Τρία συστήματα διάχυσης με εμπορικό όνομα: (πάνω αριστερά) Το QRD-734 Diffusor™ μεγάλης ζώνης συχνοτήτων και μεγάλης γωνίας, (Αριστερά) ο διαχυτής/απορροφητής Abfussor™ μεγάλης ζώνης συχνοτήτων, και (Πάνω δεξιά) το Triffusor™ με ανά μία πλευρά απορροφητική, διάχυσης και ανακλαστική, για να υπάρχει ακουστική μεταβλητότητα. Peter D' Antonio, RPG Diffusor Systems, Inc.

Στη φωτογραφία επίσης φαίνεται ακόμη, το μοντέλο Abfussor™ το οποίο συνδυάζει στην ίδια μονάδα απορρόφηση και διάχυση. Το μοντέλο Triffusor™, που και αυτό φαίνεται στη φωτογραφία έχει προσόψεις ανακλαστικές, απορροφητικές και διάχυσης. Μια ομάδα απ' αυτά, αν τοποθετηθούν σε τοίχο, προσφέρει πολλές δυνατότητες στην ακουστική χώρου με περιστροφή κάθε μονάδας.

Λύση προβλημάτων flutter echo και comp filtering με διαχυτές

Αν δύο απέναντι ανακλαστικές επιφάνειες δωματίου είναι παράλληλες, πάντοτε η πιθανότητα ύπαρξης flutter echo και comp filtering. Διαδοχικές, επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις με ίσες χρονικές αποστάσεις, μπορούν να αποδώσουν μια αντίληψη χρωματισμού ύψους ή χροιάς μουσικής και υποβάθμιση της αντιληπτικότητας της ομιλίας.

Το flutter echo μπορεί να μειωθεί με προσεκτική τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών, ή με στρέβλωση τοίχων. Στις περισσότερες περιπτώσεις η στρέβλωση δεν είναι πρακτική και η αύξηση της απορρόφησης συχνά υποβαθμίζει την ακουστική ποιότητα ενός χώρου. Μια άλλη λύση είναι μία επεξεργασία τοίχων που ελαττώνει τις ανακλάσεις με σκέδαση αντί με απορρόφηση. Αυτό ακριβώς είναι το Flutterfree™ της RPG. Πρόκειται για ένα αρχιτεκτονικό καλούπι από σκληρό ξύλο πλάτους (1.2 μέτρων) και μήκους (1.2 ή 1.4 μέτρων), που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, και το οποίο ελαττώνει την κανονική ανάκλαση και συνεισφέρει στη διάχυση του ήχου.



Σχήμα 10 Το Flutterfree™ είναι ένα η απορροφητικό καλούπι ελέγχου του flutter echo. Είναι διαχυτής τετραγωνικού υπολοίπου που βασίζεται στον πρώτο αριθμό 7. Μπορεί να λειτουργεί και σαν λωρίδα σε απορροφητή Helmholtz μικρής συχνότητας τύπου λωρίδας. Peter D' Antonio, RPG Diffusor Systems, Inc

Το καλούπι λειτουργεί σαν μονοδιάστατος διαχυτής ανάκλασης φράγματος φάσης εξαιτίας των φρεάτων που είναι σκαμμένα στην επιφάνειά του. Τα βάθη των φρεάτων ακολουθούν μία ακολουθία τετραγωνικού υπολοίπου για τον αριθμό 7. Τα καλούπια αυτά μπορούν να στερεωθούν σε τοίχο πολλά μαζί ή σε απόσταση, οριζόντια ή κατακόρυφα. Αν είναι κατακόρυφα οι φασματικές ανακλάσεις ελέγχονται στο οριζόντιο επίπεδο καθώς και αντίστροφα.

Τα καλούπια Flutterfree™ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν λωρίδες σε απορροφητή Helmholtz χαμηλής συχνότητας με λωρίδες. Καθώς ο ήχος χαμηλής συχνότητας απορροφάται από τον απορροφητή Helmholtz, η επιφάνεια κάθε λωρίδας λειτουργεί σαν διαχυτής ήχου μεσαίας/υψηλής συχνότητας.

Διαχυτές με την τεχνική των fractal

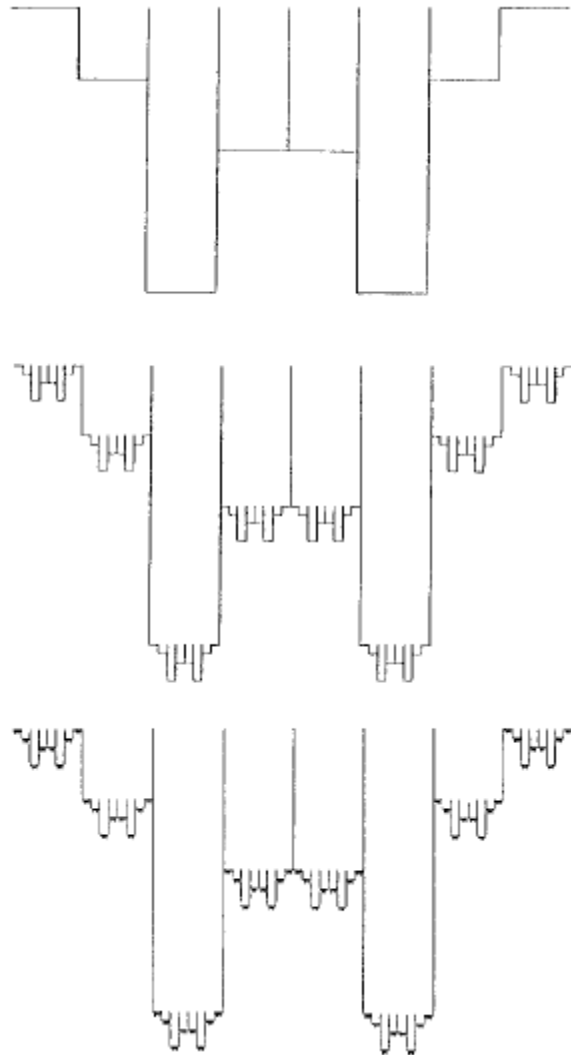
Κατά την ανάπτυξη των διαχυτών ανάκλασης φράγματος φάσης η RPG Diffusor Systems, Inc. συνάντησε ορισμένους περιορισμούς στην παραγωγή. Για παράδειγμα το όριο χαμηλής συχνότητας καθορίζεται κύρια από το πλάτος του φρέατος, ενώ το όριο υψηλής συχνότητας καθορίζεται κύρια από το πλάτος του φρέατος. Κατασκευαστικοί περιορισμοί βάζουν όριο 2.53 εκατοστών στο πλάτος φρέατος και 40.5 εκατοστά στο βάθος φρέατος, πέρα από τα οποία οι μονάδες γίνονται διαφράγματα.

Για να αυξηθεί το ενεργό πλάτος ζώνης συχνοτήτων, έχει εφαρμοστεί η αρχή της αυτόμοιότητας με την μορφή fractals (μαθήματα κλασματικών αντικειμένων) τα οποία δίνουν μονάδες που ονομάζονται Diffractals™²⁶. Στην πραγματικότητα αυτά είναι διαχυτές μέσα σε διαχυτές μέσα σε διαχυτές όπως φαίνεται στα διαδοχικά σχήματα του δίπλα σχεδίου.

Για να γίνει το πλήρες Diffractal™ χρειάζονται τρία μεγέθη διαχυτών τετραγωνικού υπολοίπου. Η λειτουργία μοιάζει πολύ με αυτήν του μεγάφωνου με πολλές μονάδες.

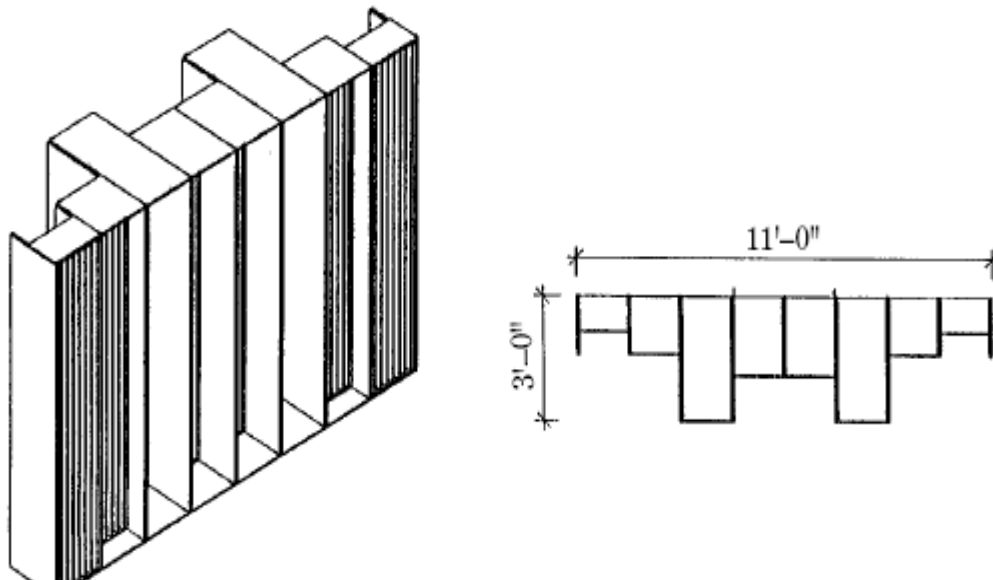
Οι διάφοροι διαχυτές που αποτελούν ένα Diffractal™ λειτουργούν ανεξάρτητα όπως οι μονάδες woofer, tweeter και midrange, λειτουργούν ανεξάρτητα έτσι ώστε να αποτελούν ένα σύστημα ευρείας ζώνης.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το Diffractal™ DFR-82LM, που έχει ύψος 2.40 μέτρα και πλάτος 3.37 μέτρα με βάθος 92 εκατοστά.. Πρόκειται για μία μονάδα δεύτερης γενεάς, χαμηλών/μεσαίων συχνοτήτων που καλύπτει την περιοχή 100Hz μέχρι περίπου 5kHz. Το τμήμα χαμηλών συχνοτήτων βασίζεται σε ακολουθία τετραγωνικού υπολοίπου του πρώτου αριθμού 7. στο βάθος κάθε



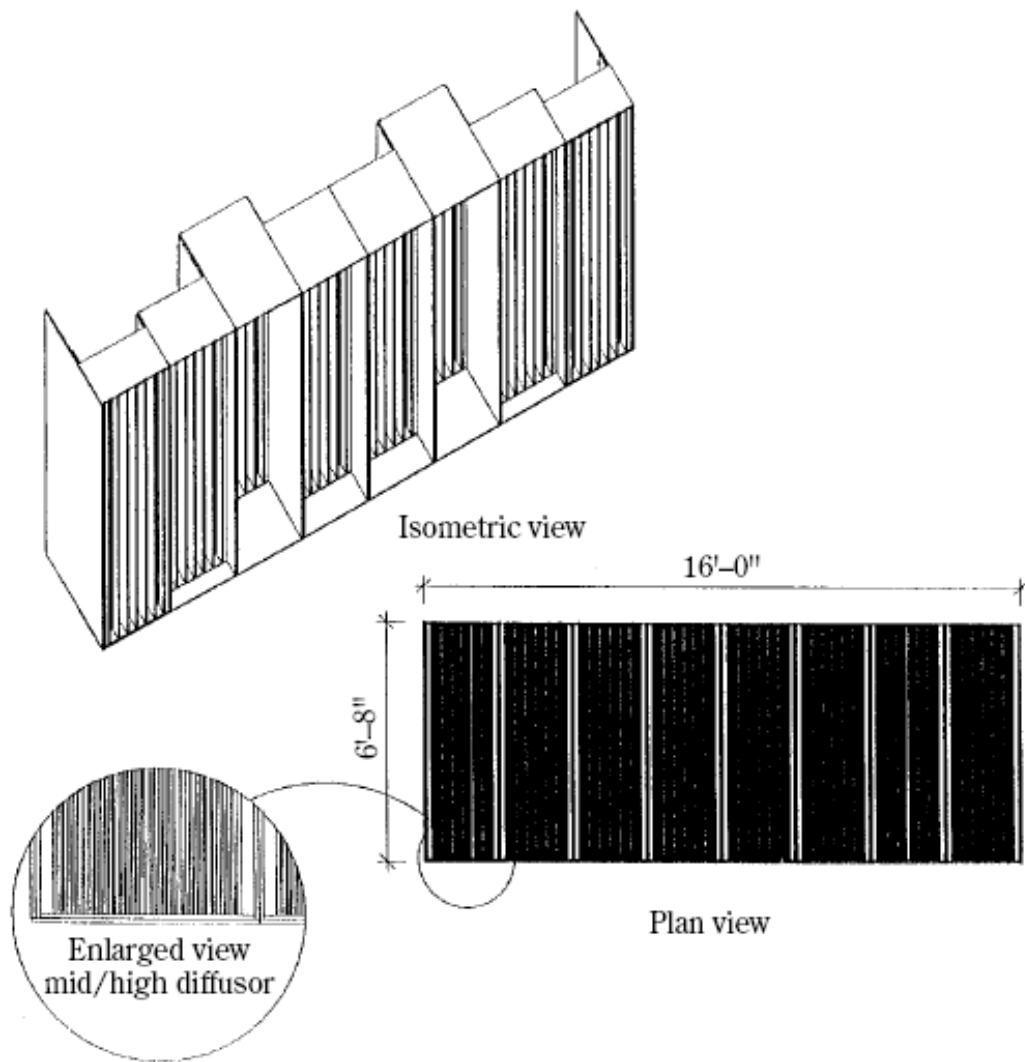
Σχήμα 11 Οι διαχυτές Diffractal™ ευρείας ζώνης είναι ένα διπλό ή τριπλό διασταυρωμένο σύστημα που αποτελείται από κλασματικούς διαχυτές ήχου υψηλής συχνότητας που βρίσκονται φωλιασμένοι μέσα σε διαχυτή χαμηλών συχνοτήτων. Peter D' Antonio, RPG Diffusor Systems,

φρέατος της μεγαλύτερης μονάδας βρίσκεται ένα Diffractal™ μεσαίων συχνοτήτων. Η περιοχή συχνοτήτων κάθε τμήματος καθώς και τα σημεία διασταύρωσης αυτών των σύνθετων μονάδων μπορούν να υπολογιστούν πλήρως.



Σχήμα 12 Το μοντέλο Diffractal™ DFR-82LM, ένα διπλό σύστημα που αποτελείται από μονάδα χαμηλών συχνοτήτων (πρώτου αριθμού 7) με Diffractal μεσαίας ζώνης συχνοτήτων τοποθετημένο στο βάθος κάθε φρέατος. . Peter D' Antonio, RPG Diffusor Systems, Inc

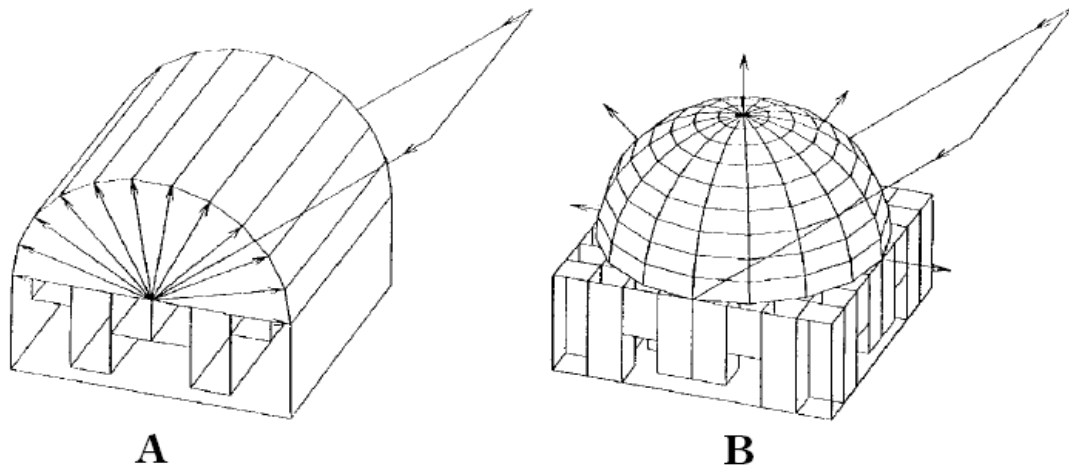
Στο παρακάτω σχήμα (5.13) φαίνεται η μεγαλύτερη μονάδα DFR-83LMH™ που έχει πλάτος 4.9 μέτρα ύψος 2.04 μέτρα και βάθος 92 εκατοστά. Πρόκειται για τριπλή μονάδα που καλύπτει περιοχή συχνοτήτων από 100Hz έως 17kHz. Τα βάθη των φρεάτων της μονάδας χαμηλών συχνοτήτων έχουν ακολουθία τετραγωνικού υπολοίπου του πρώτου αριθμού 7. Τα fractal βρίσκονται στα φρέατα των fractal που βρίσκονται στα φρέατα χαμηλών συχνοτήτων.



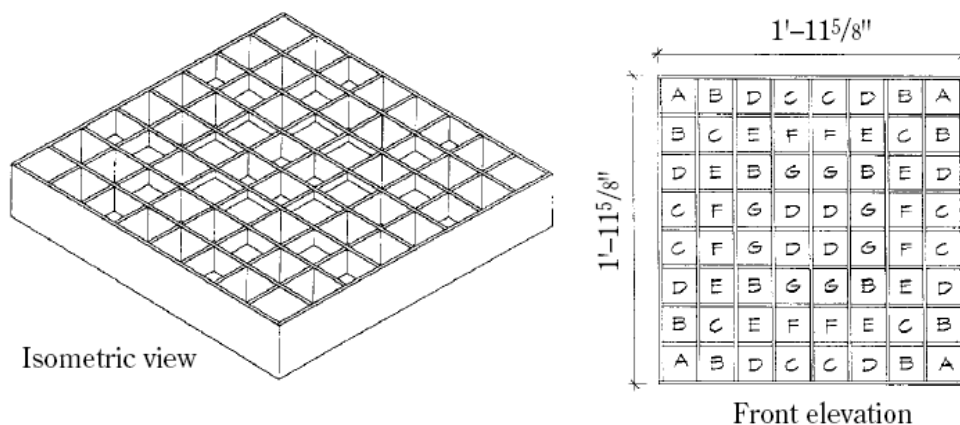
Σχήμα 13 Το μοντέλο Diffractal™ DFR-83LMH, μία τριπλή μονάδα που καλύπτει πλατιά ζώνη συχνότητων. Στο μοντέλο αυτό υπάρχουν fractal μέσα στα φρέατα Diffractal™

Διάχυση σε τρεις διαστάσεις

Όλοι οι διαχυτές φράγματος φάσης ανάκλασης που εξετάστηκαν παραπάνω έχουν σειρές από φρέατα. Μπορούν να ονομαστούν μονοδιάστατες μονάδες επειδή ο ήχος σκεδάζεται σε ένα ημίδισκο, όπως στο παρακάτω σχήμα (A). Υπάρχουν περιπτώσεις όπου θέλουμε ημισφαιρική κάλυψη, όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα (B).



Σχήμα 14 Η RPG Diffusor Systems™ ικανοποίησε αυτή την ανάγκη προσφέροντας το Omnidiffusor™ αποτελείται από συμμετρική διάταξη 64 τετραγωνικών στοιχείων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το βάθος αυτών των στοιχείων βασίζεται στην ακολουθία τετραγωνικού υπολοίπου της θεωρίας των αριθμών για τον πρώτο αριθμό 7 με μετατόπιση φάσης.



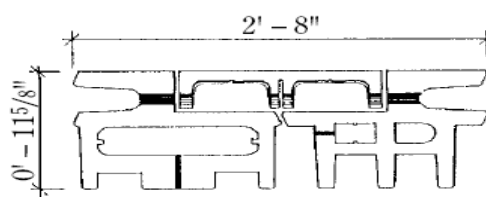
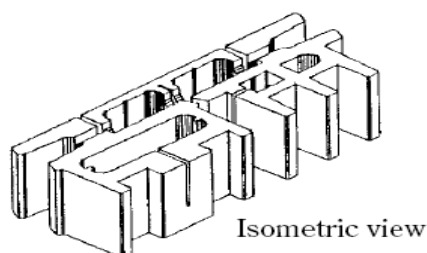
Σχήμα 15 Το Omnidiffusor™, μία δισδιάστατη μονάδα που διαχέει τον ήχο και σε οριζόντιο και σε κατακόρυφο επίπεδο για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης.
Peter D' Antonio, RPG Diffusor Systems, Inc

Ένα παρακλάδι του Omnidiffusor™ (που είναι κατασκευασμένο από ξύλο) είναι το FRG Omnidiffusor™, που αποτελείται από 49 τετραγωνικών στοιχείων και βασίζεται στην δισδιάστατη ακολουθία τετραγωνικού υπολοίπου της θεωρίας των αριθμών με μετατόπιση φάσης. Η μονάδα είναι κατασκευασμένη από γύψο ενισχυμένο με fiberglass. Έχει μικρότερο βάρος και το ένα τρίτο του

Omnidiffusor™, και έτσι είναι καλύτερα προσαρμοσμένο για εφαρμογές σε μεγάλες επιφάνειες.

Ακουστικοί κυβόλιθοι από μπετόν

Το Cinderblox και τα πολλά του παράγωγα χρησιμοποιούνται από το 1917. Το 1965 η εταιρία The Proudfoot Company έβγαλε το Soundblox®, το οποίο δίνει όχι μόνο ικανότητα φορτίου και την μάζα που χρειάζεται για ηχητική μόνωση, αλλά και ενισχυμένη απορρόφηση σε χαμηλές συχνότητες μέσω αντηχείων Helmholtz που σχηματίζονται από εγκοπές και κοιλότητες στον κυβόλιθο. Η RPG Diffusor Systems ανακοίνωσε το Diffusorblox® το 1990 που πηγαίνει ένα βήμα παραπέρα: ικανότητα φορτίου, απώλεια μετάδοσης, απορρόφηση σε χαμηλές συχνότητες και διάχυση ήχου.



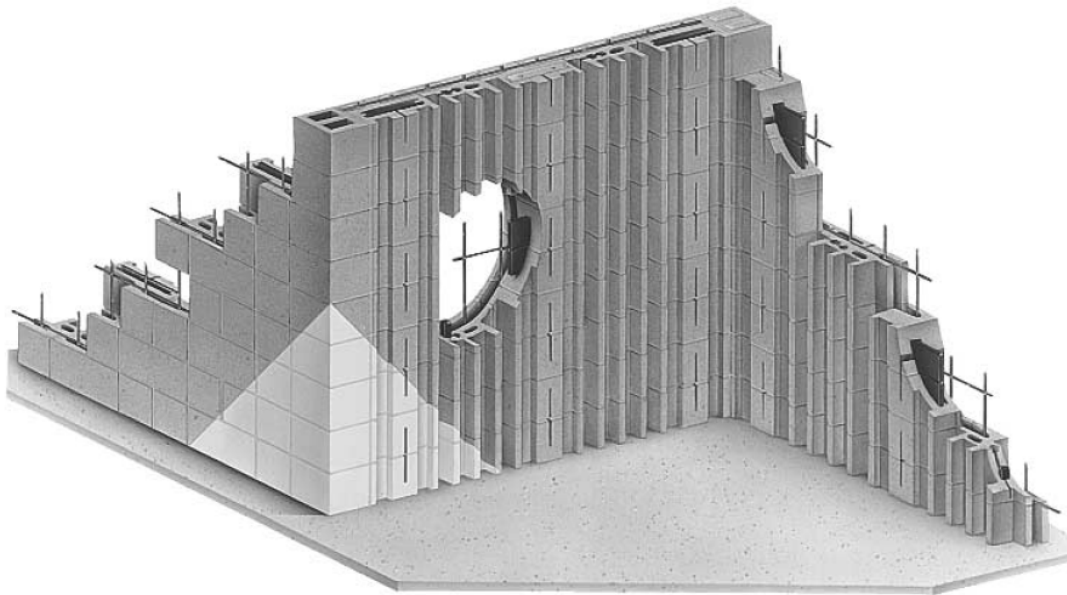
Προοπτική άποψη

Κάτοψη

Σχήμα 16 Ο κυβόλιθος από μπετόν Diffusorblox®, που προσφέρει την απώλεια μετάδοσης ενός βαρέως τοίχου, απορρόφησης με δράση αντηχείου Helmholtz, και διάχυση με δράση τετραγωνικού υπολοίπου. Οι κυβόλιθοι σχηματίζονται σε πρότυπες μηχανές κυβόλιθων με καλούπια που έχουν παραχωρηθεί με άδεια του Peter D' Antonio, RPG Diffusor Systems, Inc.

Το σύστημα Diffusorblox® αποτελείται από τρεις διακριτούς κυβόλιθους, που όλοι έχουν ονομαστικές διαστάσεις 20 X 40 X 30 εκατοστά. Βλέπουμε στο σχήμα της προηγούμενης σελίδας πως φαίνεται ένας τυπικός κυβόλιθος. Αυτοί οι κυβόλιθοι από μπετόν χαρακτηρίζονται από επιφάνια που περιέχει μία μερική ακολουθία φρεάτων με μεταβλητά βάθη, και τα οποία χωρίζονται από

διαχωριστικά, μία εσωτερική πεντάπλευρη κοιλότητα, που μπορεί να δεχτεί ένα βύσμα από fiberglass, μία προαιρετική πίσω μισή φλάντζα για ενισχυμένη κατασκευή και μία προαιρετική σχισμή απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων. Τα Diffusorblox® κατασκευάζονται σε πρότυπες αυτόματες μηχανές με άδεια από την RPG Diffusor Systems Inc. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται συνηθισμένοι τοίχοι που κατασκευάζονται με Diffusorblox®.



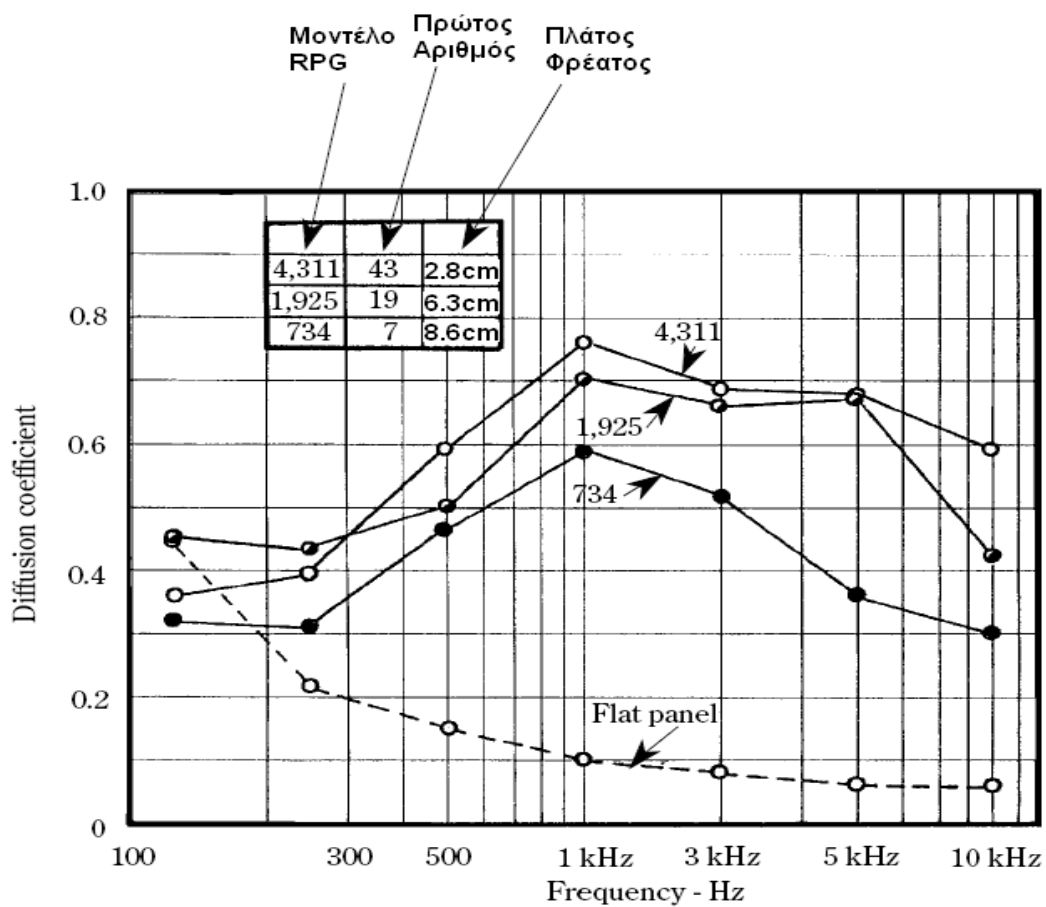
Σχήμα 17. Τοίχοι που κατασκευάζονται με Diffusorblox®.

Μέτρηση απόδοσης διάχυσης

Μπορούμε να πάρουμε ένα μέτρο απόδοσης του διαχυτή αν συγκρίνουμε την ένταση της κάθετης κατεύθυνσης με την ένταση σε $\pm 45^\circ$ της κατεύθυνσης αυτής. Αυτό μπορεί να εκφραστεί με την σχέση:

$$\text{Συντελεστή Διάχυσης} = \frac{I(\pm 45^\circ)}{I(\text{κάθετα})} \quad \text{Σχέση 5}$$

Στον τέλει διαχυτή ο συντελεστής διάχυσης είναι 1.0. Ο συντελεστής αυτός μεταβάλλεται με την συχνότητα και συνήθως εκφράζεται σε γραφική παράσταση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή διάχυσης με την συχνότητα για αρκετές τυπικές μονάδες. Για σύγκριση, περιλαμβάνεται με διακεκομμένη γραμμή η διάχυση από επίπεδο ταμπλό. Όλες αυτές οι μετρήσεις έγιναν σε συνθήκες απουσίας ανάκλασης σε επιφάνειες δειγμάτων 5.9 τετραγωνικών μέτρων με την τεχνική της χρονικής καθυστερημένης φασματομετρίας



Σχήμα 17 μεταβολή του συντελεστή διάχυσης σε σχέση με την συχνότητα για αρκετές τυπικές μονάδες

Το πλήθος των φρεάτων και των πλατών των φρεάτων επηρεάζει την απόδοση των μονάδων. Το μοντέλο QRD-4311® που έχει τα μεγαλύτερα βάθη και τα μικρότερα πλάτη φρεάτων (που είναι δυνατά από κατασκευαστικής

πλευράς) δίνει τον μεγαλύτερο συντελεστή διάχυση στην μεγαλύτερη ζώνη συχνοτήτων. Στο παραπάνω διάγραμμα για σύγκριση φαίνονται και δύο άλλες μονάδες, η 1925 και η 734, κατασκευασμένες από τους πρώτους αριθμούς 19 και 7 και πλάτη φρεάτων 2.5 και 3.4 ίντσες (6.3 και 8.6 εκατοστά). Η απόδοσή τους, αν και είναι καλή, είναι κάπως κατώτερη από το μοντέλο 4311®.

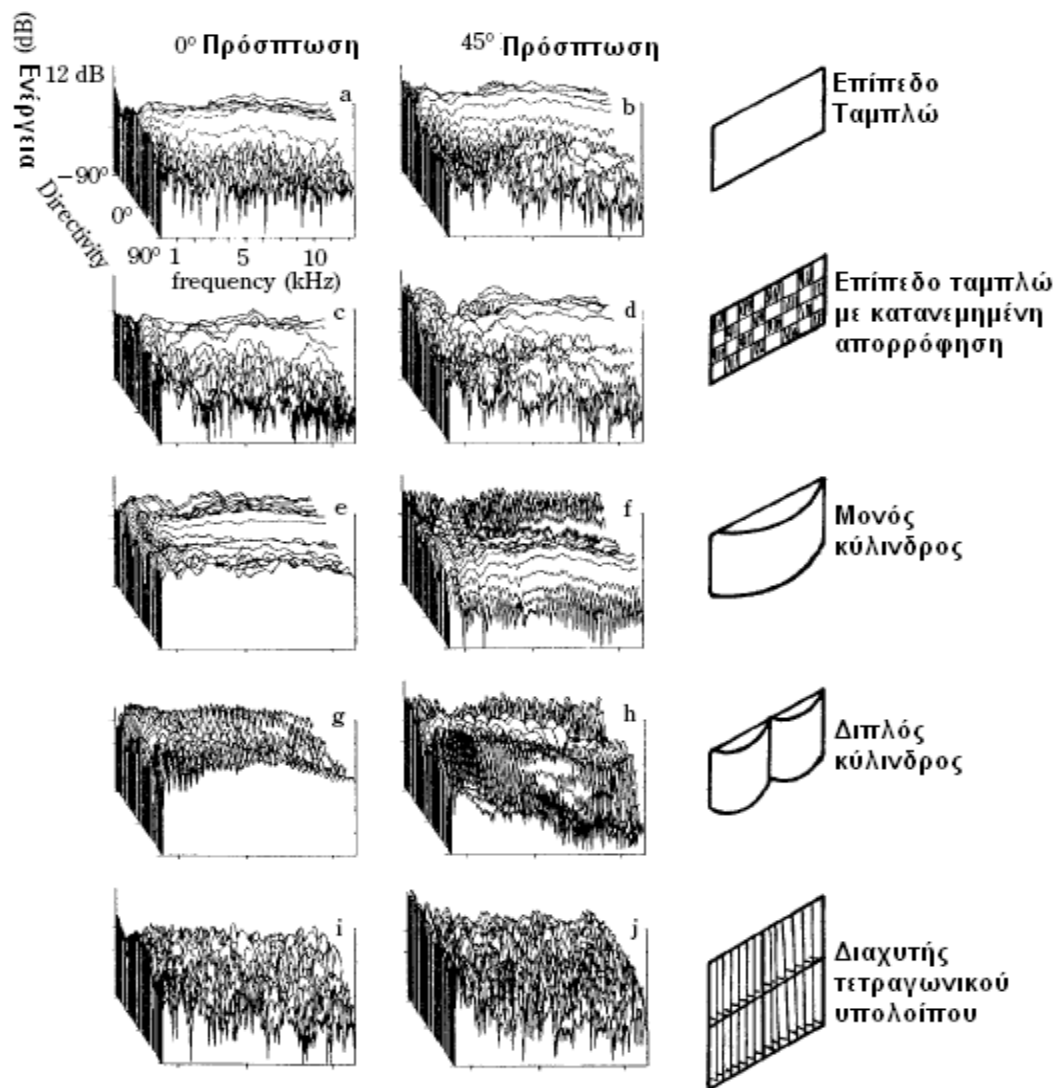
Σύγκριση φραγμάτων με συμβατικές προσεγγίσεις

Το παρακάτω σχήμα κάνει σύγκριση των ιδιοτήτων διάχυσης του επίπεδου ταμπλό (a και b), του διπλού κυλίνδρου (g και h) και των διαχυτών τετραγωνικού υπολοίπου (I και j). Η αριστερή στήλη είναι για πρόσπτωση σε 0° και η δεξιά στήλη είναι για ήχο με πρόσπτωση σε 45°. Η κλίμακα 'εμπρός και πίσω' είναι διάχυση από 90° σε -90° μέσω 0°. Η οριζόντια κλίμακα συχνοτήτων είναι βασικά από 1kHz έως 10kHz. Οι τρισδιάστατες παραστάσεις καλύπτουν όλες τις σχετικές μεταβλητές και δίνουν πλούτο πληροφοριών. Τα ειδικά σχόλια που έχει κάνει ο Peter D' Antonio περιλαμβάνουν τα παρακάτω.

Οι πρώτες έξη καμπύλες ενέργειας – συχνότητας περιέχουν αντικείμενα της διαδικασίας μέτρησης που πρέπει να αγνοηθούν επειδή δεν βρίσκονταν σε ανηχοϊκή συνθήκη.

Για πρόσπτωση 0°, είναι φανερές οι κάθετες ιδιότητες του επίπεδου ταμπλό στην κατανομή της απορρόφησης με την έντονη κορυφή στις 0° της κάθετης πρόσπτωσης.

Η καλή διάχυση μονού κυλίνδρου (e) στον χώρο φαίνεται από την σχετικά σταθερή απόκριση ενέργειας από 90° μέχρι -90°. Ο διπλός κύλινδρος (g) δείχνει στην χρονική απόκριση δύο κοντινές κορυφές. Αν και η διάχυση στον χώρο φαίνεται καλή, υπάρχει αισθητό φιλτράρισμα σε ίσες αποστάσεις και εξασθένηση ευρείας ζώνης σε μεγάλες συχνότητες. Σ' αυτό οφείλεται, εν μέρει, η κακή απόδοση των κυλινδρικών διαχυτών.



Σχήμα 18 Γραφικές παραστάσεις ενέργειας – συχνότητας – κατευθυντικότητας που κάνουν σύγκριση της διάχυσης από (a, b) επίπεδο ταμπλώ, (c, d) επίπεδο ταμπλώ με κατανεμημένη απορρόφηση, (e, f) μονού κυλίνδρου (g, h) διπλού κυλίνδρου και (i, j) διαχυτή τετραγωνικού υπολοίπου. Αυτές οι γραφικές παραστάσεις κάνουν σύγκριση πολλών πρώτων προσπαθειών στην διάχυση με τους σύγχρονους διαχυτές τετραγωνικού υπολοίπου . Peter D' Antonio, RPG

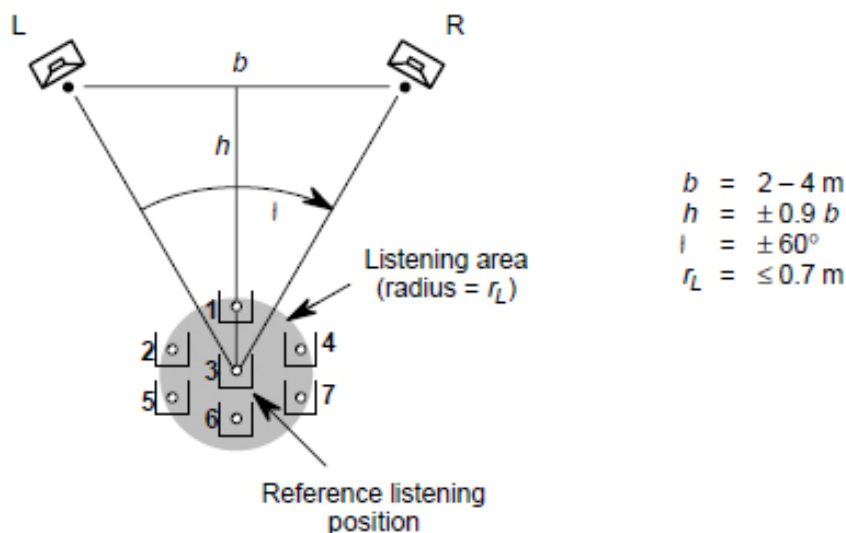
2.1 Ιστορική αναδρομή συστημάτων αναπαραγωγής

2.1.1 Μονοφωνία

Η κύρια συσκευή αναπαραγωγής του ήχου είναι το ηχείο. Το πρώτο ιστορικά σύστημα αναπαραγωγής ήχου ήταν η μονοφωνία. Όπου υπάρχει η ύπαρξη ενός και μόνο καναλιού αναπαραγωγής, μία πορεία του ήχου, η οποία καταλήγει σε ένα ηχείο, ή σε πολλά ηχεία που συνθέτουν ουσιαστικά πάλι ένα ηχείο. Χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι ότι όλες οι ηχητικές πηγές του ηχογραφημένου υλικού φαίνεται ότι έρχονται από ένα σημείο του χώρου, τη θέση του μεγάφωνου αναπαραγωγής, με αποτέλεσμα η χωρική διάταξη των μουσικών να μην αναπαράγεται από ένα τέτοιο σύστημα. Ωστόσο από αυτό το σύστημα μπορεί να αναπαραχθεί η αίσθηση του βάθους.

2.1.2 Σύστημα Στερεοφωνίας

Στο σύστημα αυτό υπάρχουν δύο κανάλια (ηχεία) που το συνθέτουν και αναπαράγουν πολύ ικανοποιητικά τη χωρική (τρισδιάστατη) θέση των μουσικών δεξιά, αριστερά και στο βάθος. Τα δύο αυτά ηχεία είναι τοποθετημένα, ένα αριστερά, ένα δεξιά ενώ ο ηχολήπτης, τοποθετείται σε σημείο όπου ο συνδυασμός των θέσεων των ηχείων σε σχέση με τη θέση του ηχολήπτη δημιουργούν ένα ισοσκελές τρίγωνο και επίσης η θέση του ηχολήπτη είναι στη μεσοκάθετο της νοητής ευθείας που συνδέει τα δύο ηχεία. Παραπάνω βλέπουμε ένα αντιπροσωπευτικό σχέδιο του σχήματος που εννοούμε.



Σχήμα 1. Χωροθέτηση στερεοφωνικού συστήματος αναπαραγωγή

Για να ισχύει η στερεοφωνία πρέπει οπωσδήποτε να διατηρούμε αυτές τις αναλογίες μεταξύ των ηχείων καθώς και της θέσης του ηχολήπτη. Αν για παράδειγμα ο ηχολήπτης 'βλέπει' τα ηχεία υπό μεγαλύτερη γωνία έχει αποδειχτεί ότι δημιουργείται ένα κενό στο κέντρο που αυξάνει καθώς αυξάνει αυτή η γωνία. Όταν συμβαίνει αντίθετο, δηλαδή ο ηχολήπτης βλέπει τα ηχεία υπό μικρότερη γωνία, τότε η στερεοφωνία προκύπτει φτωχότερη.

Με βάση αυτές τις αναλογίες το στερεοφωνικό σύστημα δημιουργεί την αίσθηση της τρισδιάστατης εικόνας μπροστά από εμάς, που ξεκινά από το επίπεδο των ηχείων. Αυτή η αίσθηση ουσιαστικά είναι μία ψευδαίσθηση η οποία δημιουργείται από τη διαφορά στάθμης του κάθε ηχείου και της διαφοράς φάσης αντίστοιχα, που πρέπει να συμβαδίζουν, όπως και στη φύση. Αν κάτι από αυτά διαταραχθεί τότε παύει να υπάρχει η στερεοφωνία και τα ερεθίσματα που παίρνουμε ως αποτέλεσμα, δεν αντιπροσωπεύουν τη σωστή ψευδαίσθηση που θα έπρεπε.

2.1.3 Πολυκάναλα ηχητικά συστήματα και η λειτουργία τους.

Ο όρος «πολυκάναλα συστήματα» αναφέρεται σε συστήματα ήχου που κάνουν χρήση καναλιών ήχου, τα οποία υπερβαίνουν τα δύο της στερεοφωνίας, και τροφοδοτούν αντίστοιχα πάνω από δυο ηχεία. Αν και τα συστήματα αυτά θεωρούνται επίτευγμα της ύστερης περιόδου του 20^{ου} αιώνα εμφανίζονται επισήμως το 1940. Η λειτουργία τους τέθηκε σε εφαρμογή στην ταινία “Fantasia” των Disney Studios. Αυτό το σύστημα ονομάστηκε *fantasound* και έκανε χρήση τριών καναλιών ήχου που τροφοδοτούσαν αντίστοιχα τρία ηχεία. Όπως ήταν αναμενόμενο, με την εμφάνιση μιας τέτοιας καινοτομίας, οι μηχανικοί ήχου, μουσικοί συνθέτες και λάτρεις του ήχου πειραματίστηκαν και υπερέβαλαν δοκιμάζοντας τα όριά του καθώς και τα όρια της ανθρώπινης φυσιολογίας. Συνθέτες όπως ο Γερμανός [Karlheinz Stockhausen](#) συνέθεσαν έργα για τετραφωνία (quadraphonic – τέσσερα κανάλια που αντιστοιχούν σε τέσσερα ηχεία). Το ναδίρ των πειραματισμών πραγματοποιήθηκε στο περίπτερο της Philips στην διεθνή έκθεση Expo 58’, όπου ο Ιάννης Ξενάκης σχεδίασε και εγκατέστησε ένα σύστημα ήχου, το οποίο εκμεταλλευόταν 425 ηχεία για να αποδώσει, με συνοδεία εικόνας, την σύνθεση του [Edgar Varese](#) “[Poeme Electronique](#)”.

Η επανεμφάνιση των πολυκάναλων συστημάτων σε εμπορική μορφή έγινε τη δεκαετία του 70’ στην quadraphonic μορφή, η οποία όμως απέτυχε. Έτσι, η τελευταία εμφάνιση, το 1999, με τη βοήθεια της ψηφιακής τεχνολογίας πια (DVD-audio και SACD – Super Audio Compact Disc) είναι η πλέον δυναμική και εμπορικά πετυχημένη. Αυτή η επιτυχία συνεχίζεται και αναπτύσσεται και «είναι το επόμενο μεγάλο στοίχημα για τη βιομηχανία του ήχου [20]».

Εισαγωγή στην 3/2 ή 5.1 καναλιών στερεοφωνία.

Στην πολυκάναλη στερεοφωνία δεν υπάρχει ουσιαστικός περιορισμός ως προς το πλήθος καναλιών. Μπροστά στον κίνδυνο αδιέξοδου, που

δημιουργήθηκε λόγω του μεγάλου αριθμού εναλλακτικών μορφών των πολυκάναλων συστημάτων, επιτεύχθηκε μεταξύ των μεγαλύτερων οργανισμών που ασχολούνται με τον ήχο (AES, ITU, SMPTE, EBU)¹, ένας συμβιβασμός ως προς τον χαρακτηρισμό της διάταξης ενός πολυκάναλου συστήματος. Ο συμβιβασμός αφορούσε από τη μια την επάρκεια για «χωρική αντίληψη» και από την άλλη την πρακτική εφαρμογή και εγκατάσταση. Κατέληξαν σε αυτό που ευρέως είναι γνωστό και αποδεκτό στον εμπορικό και επαγγελματικό χώρο. Τα 5.1 κανάλια αναπαραγωγής. Αυτά αποτελούνται από 5 ηχεία πλήρους ακουστικού φάσματος (Full Bandwidth) και επιπλέον ενός επιλογής με περιορισμένο φάσμα, αυτό των χαμηλών συχνοτήτων - LFE (Low-Frequency-Extension), το κανάλι «0.1» ή «../1». Ο λόγος που υιοθετήθηκε ο όρος αυτός ήταν για να είναι συμβατός με το ήδη υπάρχον σύστημα της στερεοφωνίας. Έτσι, τα τρία κανάλια προορίζονται για το εμπρός μέρος: ένα στο κέντρο (το οποίο εισήχθη από τους παραγωγούς ταινιών για τους διάλογους) και από ένα αριστερά και δεξιά. Τα άλλα δυο αφορούν το πίσω μέρος, αριστερά και δεξιά. Αυτά ικανοποιούν την ανάγκη για «χωρική αντίληψη», «εφέ», και «ήχους περιβάλλοντος». Αυτή η διάταξη συναντάται και ως 3/2, δίνοντας βάση στην σημασία της τοποθέτησης των ηχείων εμπρός και πίσω.

Πρότυπη χωροθέτηση

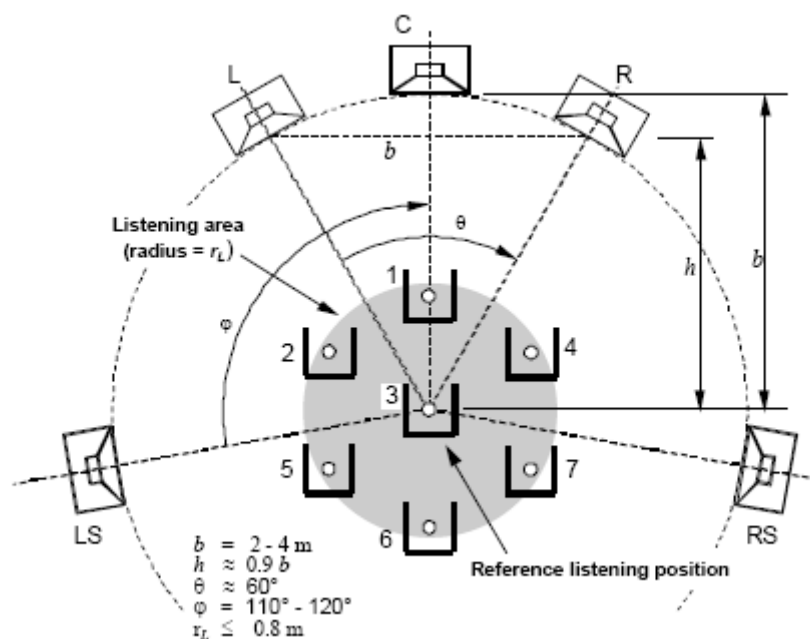
Η πρότυπη σχεδίαση και χωροθέτηση αναπαραγωγής ηχητικού υλικού έχει τη δομή του 3/2. Ο συμβολισμός που ακολουθεί είναι μέρος του πρότυπου. Τρία κανάλια για το εμπρός μέρος, ένα στο κέντρο (C = Center) και από ένα αριστερά και δεξιά (L = Left, R = Right αντίστοιχα). Στο πίσω μέρος επίσης από ένα αριστερά και δεξιά (LS και RS = Left και Right Surround αντίστοιχα).

¹ Audio Engineering Society, International Telecommunication Union, Society of Motion Picture and Television Engineers, European Broadcasting Union

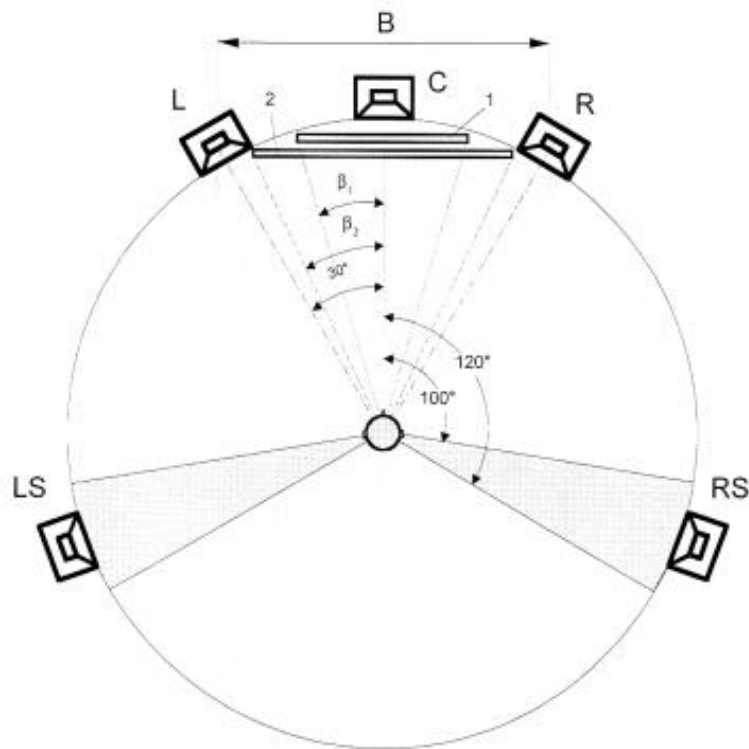
Αξίζει να σημειωθεί πως η πρότυπη αυτή χωροθέτηση είναι εντελώς ανεξάρτητη από το μέσο αναπαραγωγής και τη διαδικασία ηχογράφησης και δεν εννοείται να συγχέεται με τις διάφορες κωδικοποιήσεις για πολυκάναλη αναπαραγωγή (όπως Dolby Digital®, THX® κ.α.)

Για την τοποθέτηση στο χώρο των πέντε ηχείων δίδεται το σχήμα 1., όπου εμφανίζονται οι προτεινόμενες θέσεις όπως αυτές εμφανίζονται στο πρότυπο της ITU και SMPTE [22]. Σε περιπτώσεις όπου οι διαστάσεις του χώρου δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου προτείνεται η εφαρμογή ανάλογης καθυστέρησης (delay) στα αντίστοιχα ηχεία για την συμμόρφωση με το πρότυπο.

Μεγάλο μέρος των πολυκάναλων παραγωγών αφορά τον κινηματογράφο. Η πρότυπη χωροθέτηση για κινηματογράφο εμφανίζεται στο σχήμα 2. Εκτενέστερη αναφορά σε θέματα που αφορούν την πολυκάναλη αναπαραγωγή με συνοδεία εικόνας θα γίνει σε άλλη ενότητα.



Σχήμα 1. Πρότυπη χωροθέτηση στη μορφή 3/2.



Screen 1: Listening distance = $3H$ ($2\beta_1 = 33^\circ$)

Screen 2: Listening distance = $2H$ ($2\beta_2 = 48^\circ$)

H : Screen height

B : Loudspeaker basis width

Σχήμα 2. Πρότυπη χωροθέτηση στη μορφή 3/2 σε συνδυασμό με εγκατάσταση για εικόνα.

Ακουστικό κέντρο	Γωνία	Ύψος	Κλίση
C	0°	1.2 m*	0° *
L, R	$\pm 30^\circ$	1.2 m	0°
LS, RS	$\pm 110 - 120^\circ$	≥ 1.2 m	$\leq 15^\circ$

*Αναλόγως του σχήματος, τύπου, και διαστάσεων της οθόνης.

Κανάλι χαμηλών συχνοτήτων (Low Frequency Extension)

Για την αποφυγή σύγχυσης πρέπει να γίνει σαφής ο διαχωρισμός μεταξύ του ξεχωριστού καναλιού χαμηλών συχνοτήτων (LFE), όπου μπορεί να διοχετευθεί ανεξάρτητο σήμα κατά την ηχογράφιση και την αναπαραγωγή με

τη δρομολόγηση χαμηλών συχνοτήτων του ηχητικού υλικού σε ηχεία χαμηλών συχνοτήτων.

LFE κανάλι και σήμα χαμηλών συχνοτήτων – Ηχεία χαμηλών συχνοτήτων

Οι κινηματογραφικές παραγωγές εισήγαγαν ένα ξεχωριστό κανάλι περιορισμένου εύρους συχνοτήτων προς ικανοποίηση κάποιων αναγκών τους. Αυτό των χαμηλών συχνοτήτων (LFE) που είναι φασματικά περιορισμένο στις συχνότητες 20 μέχρι 80-120 Hz [22] και έτσι ο συμβολισμός επεκτείνεται σε 3/2/1 ή 5.1. Ποια είναι τώρα η διαφορά του LFE καναλιού και του σήματος ηχείου χαμηλών συχνοτήτων (Subwoofer);

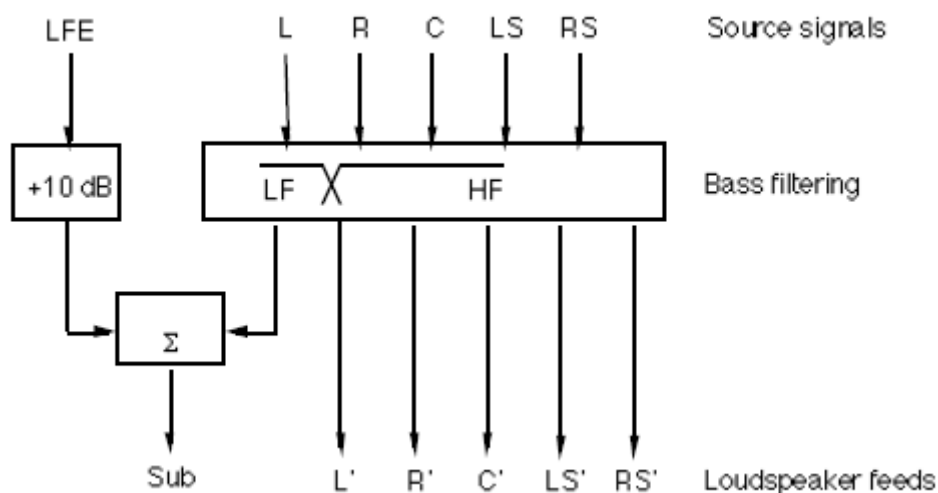
Το κανάλι LFE δημιουργείται από τον μηχανικό ήχου προαιρετικά και το σήμα του μεταφέρεται σε ξεχωριστό κανάλι. Το σήμα ηχείου χαμηλών συχνοτήτων είναι ένας φασματικός διαχωρισμός του σήματος των πέντε κυρίως καναλιών που συντελείται με κατάλληλα φίλτρα (crossover) και διοχετεύεται σε ηχεία χαμηλών συχνοτήτων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διαχείριση χαμηλών συχνοτήτων (bass management). Αυτό γίνεται σε περιπτώσεις όπου τα κύρια ηχεία δεν είναι σε θέση να αποδώσουν χαμηλές συχνότητες κυρίως λόγω μεγέθους αλλά και λόγους κατασκευαστικούς. Ένα ηχείο χαμηλών συχνοτήτων απαιτεί μεγάλη αντοχή σε μεγάλης ενέργειας και μήκους κύματος αναπαραγωγή που ένα κύριο ηχείο θα μπορούσε να υποστεί ζημιά. Κατά την παραγωγή του ηχητικού υλικού πρέπει να ληφθεί πρόνοια ούτως ώστε μην υπονομεύετε η ποιότητά του με την απουσία, στην αναπαραγωγή, του LFE καναλιού.

Στην αναπαραγωγή κινηματογραφικού υλικού η στάθμη αναπαραγωγής του LFE θα πρέπει να είναι 10 dB υψηλότερη σε σχέση με το υπόλοιπο φάσμα. Αυτή η αύξηση επιτελείται από το σύστημα αναπαραγωγής και όχι από την αύξηση της στάθμης του ηχογραφημένου υλικού [25]. Αυτό δεν συνεπάγεται σε φασματική αύξηση της στάθμης ηχητικής πίεσης του LFE κατά 10 dB σε σχέση

με τα υπόλοιπα κανάλια όταν γίνεται ισοστάθμιση του συστήματος. Αντιθέτως θα είναι πολύ χαμηλότερη λόγω του περιορισμένου φασματικού εύρους.

Η διάταξη της μορφής 5.1 χρησιμοποιείται ως αναπαραγωγικό σύστημα σε studio ηχογράφησης (Control Room) και σε διάφορες μορφές κωδικοποίησης για εμπορικές οικιακές συσκευές αναπαραγωγής. Στην περίπτωση αυτή το 0.1 κανάλι χρησιμοποιείται ως συμπλήρωμα και είναι προαιρετική η χρήση του. Σε ένα studio ηχογράφησης μουσικών παραγωγών, η χρήση του 0.1 καναλιού δεν εξυπηρετεί κάποιο δημιουργικό ή λειτουργικό σκοπό. Έτσι η χρήση του αποτελεί επιλογή προαιρετική. Έτσι επιβάλλεται μια λειτουργική λύση δρομολόγησης και για τις δυο περιπτώσεις, χρήσης ή μη του LFE. Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η προτεινόμενη δρομολόγηση σε διάταξη 5.1. Στα κύρια κανάλια (L/C/R/SL/SR) γίνεται ο φασματικός διαχωρισμός. Οι χαμηλές συχνότητες δρομολογούνται ξεχωριστά και αθροίζονται με το κανάλι LFE και διαμορφώνουν το σήμα για το ηχείο χαμηλών συχνοτήτων. Έτσι, διασφαλίζεται η λειτουργία των δυο συστημάτων, ανεξάρτητα ή παράλληλα, ανάλογα με την επιλογή που θα γίνει.

[15]



Σχήμα 3. Δρομολόγηση σήματος για διάταξη 5.1.

Όσον αφορά στην τοποθέτηση του ηχείου χαμηλών συχνοτήτων δεν προσδιορίζεται σε κανένα σχετικό πρότυπο και κανονισμό κάποιου είδους

οδηγία κυρίως λόγω της ιδιαιτερότητας της συμπεριφοράς των χαμηλών συχνοτήτων (στάσιμα κύματα) σε κλειστούς χώρους αλλά και λόγω της ανεπαρκούς γενικής έρευνας στο εν λόγω αντικείμενο. Απλά αναφέρεται πως η τοποθέτηση μονού ηχείου χαμηλών συχνοτήτων σε κάποια από τις γωνίες του χώρου προσφέρει την ομαλότερη συχνοτική απόκριση λόγω της διέγερσης όλων των στάσιμων κυμάτων του χώρου, αφού εκεί αναπτύσσονται οι κοιλίες πίεσής τους. Σε αντίθετη περίπτωση (τοποθέτηση σε δεσμό) το ηχείο δεν αποδίδει ικανοποιητικά σε συνάρτηση με τον χώρο. Ο όρος coupling (σύζευξη ηχείου-χώρου) χρησιμοποιείται για την ένδειξη συναρτησιακής εξάρτησης της λειτουργίας του ηχείου χαμηλών συχνοτήτων με τα στάσιμα κύματα στον χώρο. Περαιτέρω ανάλυση της λειτουργίας των ηχείων χαμηλών συχνοτήτων σε σχέση και με την τοποθέτηση τους στο χώρο θα γίνει σε άλλη ενότητα.

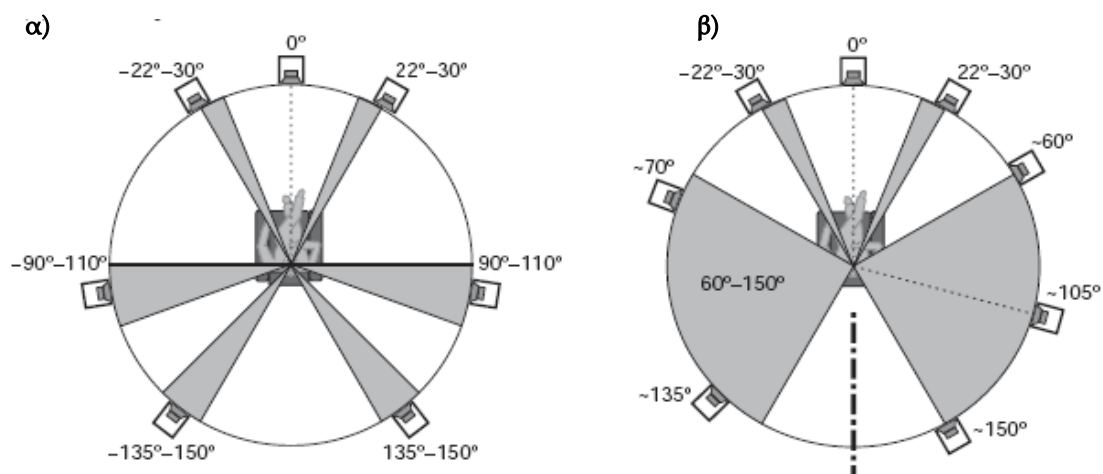
Επέκταση της πρότυπης χωροθέτησης 5.1 – Ανάγκη χρήσης περισσότερων ηχείων

Η εξέλιξη της απλής στερεοφωνικής χωροθέτησης σε αυτήν της στερεοφωνικής πολυκάναλης βασίστηκε σε δυο παράγοντες. Στην αύξηση του χώρου ακρόασης, όπου το 2/0 σύστημα ικανοποιούσε μόνο ένα περιορισμένο χώρο, το sweet spot. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζεται «αντικοινωνικό» [7] μέσο αναπαραγωγής μιας και το μέγιστο της ποιότητας αναπαραγωγής ικανοποιεί έναν πολύ περιορισμένο αριθμό ακροατών. Ο δεύτερος παράγοντας είναι αυτός της ανάγκης για πιστότερη αναπαραγωγή των χωρικών στοιχείων: Να εκμεταλλεύεται στο μέγιστο τις ψυχοακουστικές ιδιότητες της ανθρώπινης ακοής «τοποθετώντας» τον ακροατή σε οποιοδήποτε ηχητικό περιβάλλον είτε αυτό είναι ένας χώρος συναυλιών, η περιδιάβαση ενός τοπίου απ' όπου τα ηχητικά ερεθίσματα έρχονται αποκλειστικά από το εμπρός οριζόντιο πεδίο, μέχρι και τη μέση ενός πεδίου μάχης σε κινηματογραφικές ταινίες.

Στο κεφάλαιο «Ψυχοακουστικά ζητήματα για πολυκάναλα συστήματα ήχου» αναφέρθηκαν τα ζητήματα όπου η πρότυπη χωροθέτηση 3/2 και 3/2/1 υστερεί σε σχέση με την ικανοποίηση των ψυχοακουστικών ιδιοτήτων. Έτσι τίθεται το θέμα χρήσης περισσότερων ηχείων ή ακόμη και ριζική αλλαγή στη χωροθέτηση με την εισαγωγή ψηφιακής επεξεργασίας. Απ' αυτές τις προτάσεις δεν έχουν όλες τύχει εμπορικής εκμετάλλευσης για διάφορους λόγους. Οι κυριότεροι λόγοι είναι ίσως η περιπλοκότητα της παραγωγής ενός τέτοιου ηχητικού προϊόντος και η δυσκολία του αγοραστικού κοινού να αντιληφθεί τη λειτουργία μιας διάταξης «ξένης» σε αυτά που έχει μνηθεί τόσα χρόνια, αυτής της βάσης του συστήματος σε στερεοφωνικές αρχές λειτουργίας.

Χωροθέτηση 3/4 και 3/6

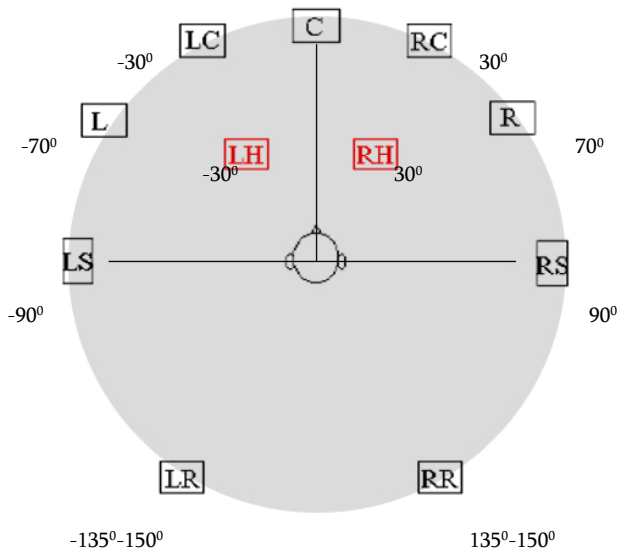
Η μορφή που έτυχε εμπορικής εκμετάλλευσης είναι αυτή με 3 ηχεία στο εμπρός μέρος, 4 ή 6 στο πίσω και επιπλέον η χρήση 1 αλλά και 2 ηχείων χαμηλών συχνοτήτων (τα 2 σε στερεοφωνική δρομολόγηση – ετεροσυσχετισμένα). Υπάρχουν διάφορες απόψεις για τη χωροθέτηση που πρέπει να έχουν οι μορφές όπως φαίνεται και το σχήμα 7.



Σχήμα 7. α) Η πρότυπη χωροθέτηση της Dolby Labs για 3/4 και β) Η πρότυπη χωροθέτηση κατά ITU-R BS.775-2. Η αριστερή πλευρά αφορά τη διάταξη.

Άλλες χωροθετήσεις – Πόσα ηχεία τελικά είναι αναγκαία

Υπάρχουν προτάσεις για χρήση ακόμη περισσότερων ηχείων όπως αυτή ερευνητή της Lexicon, David Griesinger, που προτείνει τη χρήση 11.2 ηχείων με την χωροθέτηση που φαίνεται στο σχήμα 8. Στην κλασική διάταξη του 5.1 προσθέτει άλλα 6. Δυο (LC, RC) μεταξύ του κεντρικού (C) και των εμπρός (L, R) τα οποία δίνουν τη δυνατότητα να μετακινήσει στις 70°. Άλλα δύο (LS, RS) στις 90° αριστερά και δεξιά του ακροατή. Αυτή η εμπλουτισμένη εμπρός διάταξη δίνει τη δυνατότητα για καλύτερη δυναμική μετακίνηση (dynamic panning) της φαινόμενης εικόνας (phantom image) καθώς αποφεύγεται ο φασματικός διαχωρισμός που αντιλαμβάνεται ο ανθρώπινος μηχανισμός ακοής (κεφάλαιο ψυχοακουστικής, ενότητα Ψυχοακουστικά ζητήματα για πολυκάναλα συστήματα ήχου). Επιπρόσθετα τοποθετούνται δυο ηχεία σε ύψος (LH, RH) με κλίση προς τα κάτω ενισχύοντας την αίσθηση της περιέλιξης (envelopment) [20] στις ψηλές συχνότητες. Για τις χαμηλές συχνότητες τοποθετεί δυο ηχεία χαμηλών συχνοτήτων ακριβώς δεξιά και αριστερά με διαφορά φάσης 90° ή στερεοφωνικά οδηγούμενα, για την αίσθηση της περιέλιξης στις χαμηλές συχνότητες. [18]



Σχήμα 8. Διάταξη πολυκάναλου ηχητικού συστήματος 11.2

2.2 Ακουστικές προδιαγραφές και προδιαγραφές διαμόρφωσης Control room

Περιβάλλον ακρόασης.

Ένα πρότυπο περιβάλλον ακρόασης, όπως είναι αυτό ενός studio ηχογραφήσεων, έχει ως κύριο μέλημα του την σωστή και ακριβή ακρόαση και σύγκριση ηχητικού υλικού, ανεξάρτητα από το χώρο όπου θα γίνει μετέπειτα η αναπαραγωγή του. [15]

Παράμετροι και τιμές για το σχεδιασμό πρότυπου χώρου ακρόασης

Η ποιότητα των συνθηκών ακρόασης σε ένα περιβάλλον ακρόασης καθορίζεται από τις ιδιότητες του ηχητικού πεδίου που παράγεται από τα ηχεία στη θέση του ακροατή στο ύψος των αυτιών του ακροατή. Το ηχητικό πεδίο συνίσταται από: 1) το απευθείας πεδίο, 2) τις πρώιμες και ύστερες ανακλάσεις και 3) από το αντηχητικό πεδίο [17], 4) τους τρόπους ταλάντωσης (room modes) του δωματίου, στις χαμηλές συχνότητες. Στους πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται τα οι ελάχιστες προϋποθέσεις που απαιτούνται για να προσφέρουν ένα περιβάλλον ακρόασης υψηλής ποιότητας από τεχνικής και αισθητικής άποψης. Ο πίνακας 1 συγκεντρώνει τα διεθνή πρότυπα όσον αφορά τη διαμόρφωση του χώρου, τα οποία αποτελούν τις παραμέτρους που διαμορφώνουν το ηχητικό πεδίο. Στον πίνακα 2 συγκεντρώνονται οι ελάχιστες απαιτήσεις στις ακουστικές παραμέτρους που πρέπει να πληροί ένας χώρος ακρόασης, σύμφωνα πάντα με τα διεθνή πρότυπα.

Πίνακας 1. Διεθνή πρότυπα για τη διαμόρφωση του χώρου ακρόασης

Παράμετρος	Μονάδα / Συμβολισμός	Τιμή
Μέγεθος δωματίου (Επιφάνεια δαπέδου)	S m ²	>40
Λόγος διαστάσεων	l = Μήκος w = Πλάτος h = Ύψος	$1.1 w/h \leq l/h \leq 4.5 w/h - 4$ με $l < 3h$ και $w < 3h$ (Λόγοι μεταξύ $\pm 5\%$ ακέραιων μονάδων πρέπει να αποφεύγονται.)
Πλάτος Βάσης	B m ²	2.0 – 4.0
Γωνίες τοποθέτησης ηχείων	Μοίρες C* L/R C/LS-RS*	0 60 110 - 120
Απόσταση ακρόασης	D m	0.9B
Ζώνη ακρόασης	R m (ακτίνα)	≤ 0.8
Ύψος ηχείων	h m	≈ 1.2
Απόσταση από ανακλαστικές επιφάνειες	d m	≥ 1

* Για τη χωροθέτηση 5.1

Η βιβλιογραφία συστήνει ο όγκος του χώρου ακρόασης να μη ξεπερνά τα 300 m³. Οι λόγοι διαστάσεων (room ratios) πρέπει να τηρούνται έτσι ώστε η κατανομή των στάσιμων κυμάτων να είναι ομοιόμορφη. Δεν νοείται λόγου χάριν, ένα δωμάτιο να έχει τις τρεις διαστάσεις ίδιες γιατί θα παρουσιάζονταν στάσιμα κύματα, (οι φυσικοί τρόποι ταλάντωσης του δωματίου), που αντιστοιχούν σε ταλάντωση των τριών ζευγών παραλλήλων επιφανειών του δωματίου στην ίδια συχνότητα. Αυτό θα είχε καταστρεπτικές συνέπειες στην ομοιομορφία του φάσματος στις χαμηλές κυρίως συχνότητες.

Προτείνεται ακουστική συμμετρία γύρω από τη θέση ακρόασης καθώς και στην τοποθέτηση των διαφόρων διατάξεων διαμόρφωσης και διαχείρισης του ήχου (διαχυτές, ηχοαπορροφητές). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην διαχείριση του ηχοαπορροφητικού υλικού γύρω από ηχεία, πόρτες, παράθυρα

και μηχανήματα καθώς αυτά είναι εστίες που προκαλούν ακουστικές ανομοιομορφίες και διακοπές (μέσω ανάκλασης, περίθλασης).

Η κατάλληλη απόσταση των ηχείων από διάφορες ανακλαστικές επιφάνειες είναι επιβεβλημένη λόγω του φαινομένου φίλτρου χτένας (comb filter) που παρουσιάζεται όταν σε ένα δεδομένο κύμα προστεθεί το ίδιο με καθυστέρηση (στην προκειμένη περίπτωση λόγω της ανάκλασης). Αυτό δημιουργεί περιοδικά μέγιστα και ελάχιστα σε μια συχνότητα (ανάλογα με την καθυστέρηση) και στις πολλαπλάσιες της. Είναι μια μη αποδεκτή κατάσταση για ένα χώρο ακρόασης. Στα ηχεία χαμηλών συχνοτήτων όμως πρέπει να δοθεί προσοχή την ακύρωση λόγω απόστασης από ανακλαστική επιφάνεια που συνήθως μόνο ο τοίχος μπορεί να θεωρηθεί ως τέτοια λόγω του μεγάλου μήκους κύματος.

Πίνακας 2. Διεθνή πρότυπα για το ηχητικό πεδίο στην θέση ακρόασης

Παράμετρος	Μονάδα / Συμβολισμός	Τιμή
Απευθείας ηχητικό πεδίο (Πλάτος/Συχνοτική απόκριση)	Μετρήσεις διάδοσης σε ελεύθερο πεδίο	Για όρια ανοχής βλέπε πίνακα 3. (Ηχείο αναφοράς)
Ανακλώμενο ηχητικό πεδίο Πρώτες ανακλάσεις	0-15 ms (μεταξύ 1-8kHz)	<-10 dB σε σχέση με το απευθείας πεδίο
Διάχυση του αντηχητικού πεδίου	Αποφυγή σημαντικών ανωμαλιών στο ηχητικό πεδίο	Χωρίς “flutter echo”, φασματικούς χρωματισμούς κ.τ.λ.
Χρόνος Αντήχησης	$T_m[s]$ = ονομαστική αξία στην περιοχή 200 Hz - 4kHz V = Όγκος χώρου ακρόασης V_0 = Όγκος αναφοράς χώρου ακρόασης (100 m ³)	$\approx 0.25 (V/V_0)^{1/3}$ Εξασθένηση χρόνου αντήχησης και όρια ανοχής στο σχήμα 4.
Σταθερό ηχητικό πεδίο Αποδεκτά όρια λειτουργίας ηχητικής στάθμης	50 Hz – 2 kHz 2 kHz – 16 kHz	± 3 dB ± 3 dB από -3 μέχρι -6 (Σύμφωνα με το σχήμα 5.)
Θόρυβος βάθους		Ιδανικά <NR10, όχι >NR15
Στάθμη ακρόασης αναφοράς (Σε σχέση με το ορισμένο σήμα μέτρησης)	Σήμα εισόδου: Ροζ θόρυβος, -18 dBFS(rms)	78 dBA (rms slow) (ανά κανάλι)

Ακουστικές παράμετροι

Απευθείας πεδίο

Απευθείας πεδίο ορίζεται το ηχητικό πεδίο που θα μετριοταν στη θέση ακρόασης χρησιμοποιώντας τα ίδια ηχεία, υπό ανηχοϊκίες συνθήκες, δηλαδή χωρίς τις ανακλάσεις και το αντηχητικό πεδίο. Η φασματική του κατανομή καθορίζεται από τις σχετικές παραμέτρους των ηχείων. Τα διεθνή πρότυπα για ένα ηχείο αναφοράς παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1.

Πρώτες ανακλάσεις

Ως πρώτες ανακλάσεις ορίζονται οι ανακλάσεις από ανακλαστικές επιφάνειες στο χώρο ακρόασης, οι οποίες καταφτάνουν στο πεδίο ακρόασης σε χρόνο μικρότερο από 15 ms μετά την άφιξη του απευθείας πεδίου. Θα πρέπει να έχουν στάθμη μικρότερη από το απευθείας πεδίο κατά 10 dB στην συχνοτική περιοχή μεταξύ 1 και 8 kHz. Αυτό συμβαίνει για αποφυγή του «φαινομένου Haas» όπως αυτό αναλύεται στην ενότητα της ψυχοακουστικής .

Τονίζεται επίσης πως κατά την μέτρηση των πρώτων ανακλάσεων πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο χρονικό παράθυρο όπως και στο συχνοτικό εύρος όπου θα πραγματοποιηθεί η μέτρηση. Αυτό γιατί σε περίπτωση που ο χρόνος μέτρησης υπερβαίνει το χρόνο που εκδηλώνονται οι πρώτες ανακλάσεις κατά την διαδικασία του υπολογισμού του μέσου όρου θα εμφανιστεί χαμηλότερη στάθμη. [17]

Αντηχητικό πεδίο

Ως αντηχητικό πεδίο ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο πολλαπλές ανακλάσεις από τα όρια του δωματίου και διάφορα αντικείμενα του χώρου καταφτάνουν στο πεδίο ακρόασης μετά τα 15 ms.

Το αντηχητικό πεδίο θα πρέπει να τύχει αρκετής διάχυσης ούτως ώστε να αποφευχθούν αντιληπτά ακουστικά φαινόμενα όπως αυτό της πολλαπλής ηχούς (flutter echo).

Ο χρόνος αντήχησης είναι μια σημαντική παράμετρος που ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται μετά τον μηδενισμό μιας ηχητικής πηγής ώστε η στάθμη ηχητικής να μειωθεί κατά 60 dB από την αρχική στάθμη. Η μέτρηση του γίνεται συνήθως στο εύρος από 5 μέχρι 25 dB κάτω από την αρχική στάθμη. Ο χρόνος που θα χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση θα πρέπει να είναι μικρότερος από το χρόνο του αντηχητικού πεδίου. Ο χρόνος αντήχησης πρέπει να μετρηθεί χρησιμοποιώντας ανάλυση 1/3 οκτάβας (1/3 octave filtering) και τα ηχεία του χώρου.

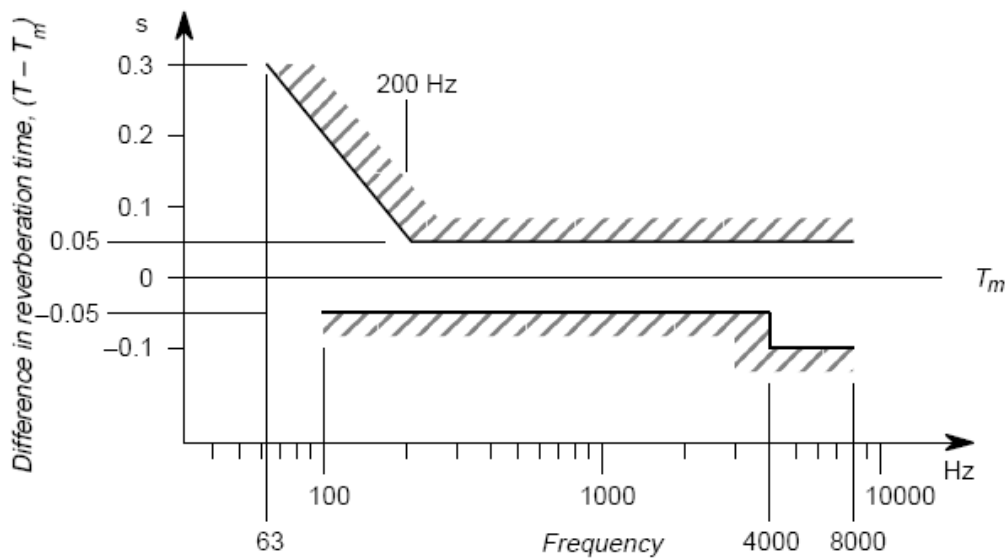
Ο χρόνος αντήχησης είναι συνάρτηση της συχνότητας (frequency-dependent). Η ονομαστική τιμή T_m , είναι ο μέσος όρος του χρόνου που μετρήθηκε στις 1/3 οκτάβας εύρους μπάντες μεταξύ των συχνοτήτων 200 Hz και 4 kHz. Ο χρόνος αυτός πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω συνθήκες.

$$0.2 < T_m < 0.4$$

Για να διατηρηθούν οι φυσικές ακουστικές ιδιότητες του «χώρου», ο χρόνος T_m πρέπει να αυξάνεται όσο μεγαλώνει ο χώρος σύμφωνα με τη σχέση του πίνακα 2.

Ο χρόνος αντήχησης T που μετριέται σε μπάντες 1/3 οκτάβας σε εύρος 63 – 8 kHz, πρέπει να τηρεί τα όρια του σχήματος 4. Η μορφή της φασματικής κατανομής του χρόνου αντήχησης πρέπει να είναι σταθερή και συνεχόμενη. Σε αντίθετη περίπτωση (δηλαδή συχνοτικές εξάρσεις και βυθίσματα) θα επηρεαστεί αντίστοιχα η αναπαραγωγή ηχητικού υλικού στο δωμάτιο, Για να αποφευχθεί πρέπει οι διαφορές στο χρόνο ΔT του αντηχητικού πεδίου να τηρούν στις παρακάτω συνθήκες. Αναλυτικά στο σχήμα 4.

$$\begin{array}{ll} \Delta T < 0.05 \text{ s} & \text{για } 200\text{Hz} \leq f \leq 8 \text{ kHz} \\ < 25\% \text{ του μεγαλύτερου χρόνου} & f \leq 200 \text{ Hz} \end{array}$$



Σχήμα 4. Όρια διαφοράς χρόνου αντήχησης. [22]

Σταθερό ηχητικό πεδίο – Λειτουργική Απόκριση Δωματίου

Η λειτουργική απόκριση δωματίου ορίζεται ως η συχνотική απόκριση της στάθμης ηχητικής πίεσης (dB_{SPL}) της που παράγουν τα ηχεία σε κάθε σημείο ακρόασης. Το σήμα μέτρησης είναι φιλτραρισμένος ροζ θόρυβος 1/3 της οκτάβας.

Η λειτουργική απόκριση δωματίου είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την αποτίμηση της επιρροής του ηχείου και του χώρου ακρόασης, επομένως και για τις συνθήκες ακρόασης. Επίσης ανταποκρίνεται πολύ καλά όσον αφορά την υποκειμενική αποτίμηση σε χώρους όπου αναπαράγετε ήχος.

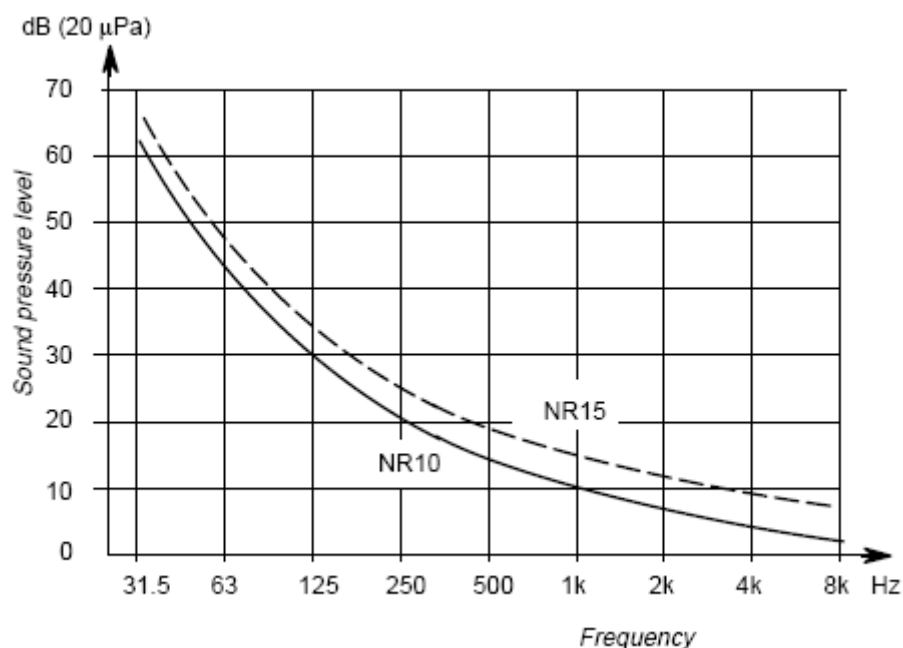
Τα όρια απόκρισης της λειτουργικής απόκρισης δωματίου δίνονται στο σχήμα. Το L_m είναι η μέση τιμή της στάθμης των τριτοκταβικών μπαντών με κεντρικές συχνότητες από 200Hz έως 4kHz. Τα όρια του σχήματος πρέπει να τηρούνται ξεχωριστά για κάθε κανάλι και οι αποκρίσεις τους να είναι όμοιες.

Θόρυβος βάθους

Η στάθμη ηχητικής πίεσης (RMS, slow – μετρημένη στο πεδίο ακρόασης 1.2 m από την επιφάνεια του πατώματος) που προέρχεται από το συνεχή θόρυβο συστημάτων κλιματισμού, ή άλλων συσκευών εντός και εκτός του χώρου ακρόασης προτιμότερο να μην ξεπερνά το NR10 και υπό καμία περίπτωση το NR15. Ο δείκτης αυτός περιγράφει ανά οκτάβα την στάθμη ηχητικής πίεσης με συχνότητα αναφοράς το 1 kHz.

Πίνακας 3. Καμπύλες θορύβου βάθους – Στάθμη ηχητικής πίεσης ανά οκτάβα σε dB re. 20mPa

Καμπύλη NR	Συχνότητα (Hz)								
	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
10	62.2	43.4	30.7	21.3	14.5	10	6.6	4.2	2.3
15	65.6	47.3	35	25.9	19.4	15	11.7	9.3	7.4



Σχήμα 6. Καμπύλες θορύβου βάθους

Στάθμη ακρόασης αναφοράς, $L_{LISTref}$ και ρύθμιση (ισοστάθμιση – ευθυγράμμιση) συστήματος αναπαραγωγής (Alignment)

Η στάθμη ακρόασης αναφοράς, $L_{LISTref}$ ανά κανάλι ορίζεται στα 96 , 85 ή 78 dB_{SPL} [17] αναλόγως του προτύπου και ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία ισοστάθμισης.

Στη διαδικασία της ισοστάθμισης στόχος είναι η σωστή ρύθμιση των επιμέρους μηχανημάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ ακροατή και μέσου αναπαραγωγής ούτως ώστε να επιτευχθεί βέλτιστος λόγος θορύβου προς σήματος, σωστή στερεοφωνική εικόνα και για να προληφθούν προβλήματα υπεροδήγησης και ψαλιδισμού του σήματος διατηρώντας δηλαδή το απαραίτητο δυναμικό εύρος ασφαλείας (headroom).

Υπάρχουν πολλά πρότυπα που ορίζουν τη διαδικασία αυτή. Καμία όμως διαδικασία ισοστάθμισης δεν γίνεται καθολικά αποδεκτή. Οι κύριες διαφορές παρουσιάζονται στο σήμα ισοστάθμισης και τη χρήση των σταθμισμένων δεικτών.

Είναι συνήθης πρακτική η ισοστάθμιση να ξεκινά από μηχανήματα όπως ενισχυτές, γραφικοί ισοσταθμιστές, κονσόλα μίξης – ηχογράφησης. Ως σήμα χρησιμοποιείται ημίτονο 1 kHz με χαρακτηριστικό τη σταθερή στάθμη. Το σήμα ηχογραφείται σε στάθμη ισοστάθμισης L_{AL} , -18 και -20 dBFS_{RMS}, για να υπάρχει ένα δυναμικό εύρος ασφαλείας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται «gain staging». Σε κάθε μονάδα ρυθμίζεται η στάθμη (το gain) στο μέγιστο δυνατό.

Για την ισοστάθμιση της στάθμης ηχητικής πίεσης που αναπαράγει το σύστημα χρησιμοποιείται ροζ θόρυβος. Μερικά πρότυπα συστήνουν τη χρήση φιλτραρισμένου ροζ θορύβου 500 Hz – 2 kHz με μέτρηση σε dB_{SPL}(C)slow [17] για την αποφυγή σφάλματος στην μέτρηση λόγω του φαινομένου των στάσιμων κυμάτων. Άλλα χρησιμοποιούν ροζ θόρυβο 200 – 20 kHz [15], ακόμα και όλο το φάσμα 20 Hz - 20k Hz.

Έχοντας ρυθμίσει την αναπαραγωγή στον εξοπλισμό γίνεται το τελευταίο στάδιο της ισοστάθμισης: ο ενισχυτής του ηχείου (είτε αυτό είναι

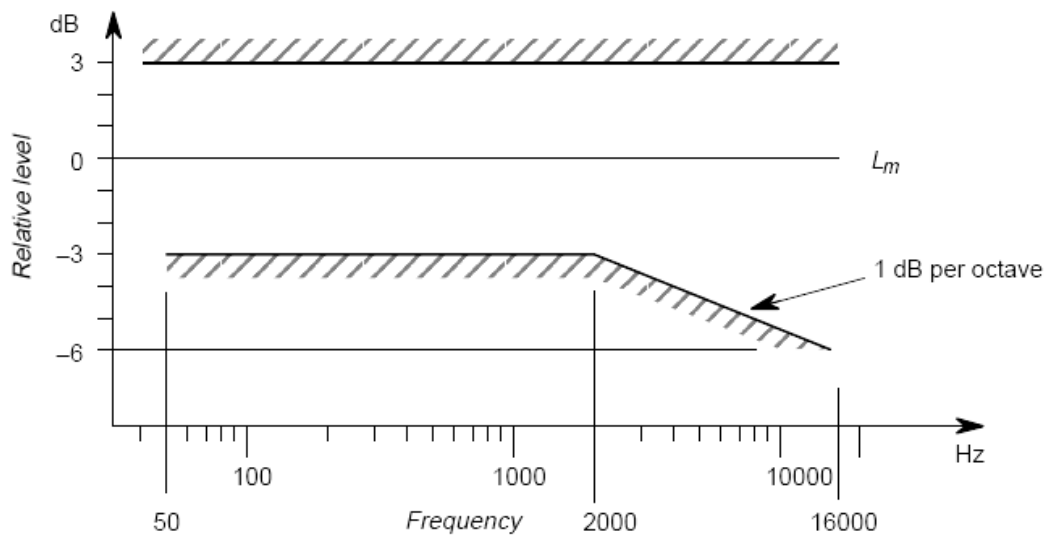
αυτοενισχυόμενο ή όχι) να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε επιτευχθεί στη θέση ακρόασης η στάθμη ακρόασης αναφοράς $L_{LISTref}$.

2.2.1 Προδιαγραφές για πολυκάναλο σύστημα αναπαραγωγής

Οι ακουστικές παράμετροι σε χώρους ακρόασης είναι κατά βάση οι ίδιες. Εξαίρεση αποτελεί η λειτουργική απόκριση δωματίου που προσαρμόζεται στο επιπλέον κανάλι LFE.

Σταθερό ηχητικό πεδίο – Λειτουργική απόκριση δωματίου (stationary sound field – operational room response curve)

Το σταθερό ηχητικό πεδίο καθορίζεται από την συχνοτική απόκριση της στάθμης ηχητικής πίεσης παραγόμενης από τα ηχεία μετρημένη στο σημείο ακρόασης. Το σήμα μέτρησης είναι ο ροζ θόρυβος σε ανάλυση 1/3 οκτάβας και συχνοτικού εύρους 50 Hz – 16 kHz. Αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο για την αλληλεπίδραση της συμπεριφοράς του χώρου με τα ηχεία. Κάθε ηχείο πρέπει να δοκιμαστεί ξεχωριστά και να λειτουργεί μέσα στα όρια του σχήματος 5. Επειδή είναι δύσκολο να επιτευχθεί ίδια ισοστάθμιση (equalization curve) και στα πέντε ηχεία, πρέπει τα δυο δεξιά και αριστερά και το κεντρικό να έχουν όσο το δυνατόν ίδια ρύθμιση. Τα δύο ηχεία στο πίσω μέρος πρέπει επίσης να έχουν μεταξύ τους παρόμοια ρύθμιση. Στην περίπτωση δρομολόγησης των χαμηλών συχνοτήτων σε ηχεία χαμηλών συχνοτήτων, θα πρέπει να είναι ίση από όλα τα ηχεία της διάταξης. Συστήνεται διόρθωση μόνο στις χαμηλές συχνότητες (<300 Hz).



Πίνακας 5. Όρια λειτουργίας συχνοτικής απόκρισης χώρου ακρόασης σε σχετική ένταση.

- Σε μερικές περιπτώσεις είναι δύσκολη η συμμόρφωση με τα όρια λειτουργίας της συχνοτικής απόκρισης, ιδίως σε μικρούς χώρους. Η διόρθωση πρέπει να προκύψει από την τοποθέτηση ακουστικών διατάξεων (ηχοαπορρόφησης) ή / και τη μετακίνηση των ηχείων και τη θέση του ακροατή.
- Η χρήση φίλτρων ισοστάθμισης (του ίδιου του ηχείου ή εξωτερικών μονάδων) για τη βελτίωση και συμμόρφωση με τα παραπάνω όρια μπορεί να γίνει όταν οι παραπάνω μέθοδοι δεν αποφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.
- Για την αποφυγή υποβάθμισης της ποιότητας του ήχου πρέπει τα φίλτρα να χρησιμοποιηθούν με ιδιαίτερη προσοχή.

Πρέπει να παρουσιάζει 10 dB αυξημένης στάθμης σε σχέση με τη στάθμη ενός από τα κύρια ηχεία. Κατά την ισοστάθμιση του LFE καναλιού χρησιμοποιείται ροζ φιλτραρισμένος θόρυβος εύρους 20-100 Hz. Η στάθμη του ροζ θορύβου σε ένα φασματικό αναλυτή (RTA – Real time analyzer) πρέπει να είναι 10 dB μεγαλύτερη σε σχέση με την ανάλυση ενός κύριου ηχείου. Σε περίπτωση που μετρηθεί με ηχόμετρο τότε πρέπει να εμφανίζει στάθμη 106 dB-(A)_{SPL-slow} για σήμα ροζ φιλτραρισμένου θορύβου εύρους 50-100 Hz.

3.1 Νεκρά δωμάτια

Τη δεκαετία του 60' επικρατεί η άποψη πως ένα control room όφειλε να απορροφάει το αντηχητικό πεδίο, για να γίνεται ακρόαση του απευθείας ήχου αποκλειστικά. Αυτό επέβαλε κατά τη σχεδίαση να τοποθετούνται μεγάλες ποσότητες απορροφητικών διατάξεων. Το ανηχοϊκό περιβάλλον ακρόασης όμως έχει αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση των μηχανικών ήχου καθώς ο ανθρώπινος μηχανισμός ακοής είναι συνηθισμένος σε ηχητικό πεδίο με αντήχηση. Έτσι, αυτή η τάση σχεδίασης εγκαταλείφτηκε νωρίς.

3.2 Rettinger και Eastlake

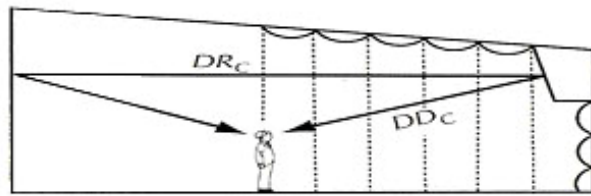
Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της δισκογραφίας και την έλευση των στερεοφωνικών ηχητικών συστημάτων δόθηκε περισσότερη έμφαση στην ακουστική των control room. Στην προσπάθεια να αποκτηθεί αντήχηση, τοποθετούσαν τα ηχεία σε συμπαγής τοίχους, ακτινοβολώντας ανακλάσεις. Στο πίσω μέρος διατηρήθηκε η μεγάλη απορρόφηση. Οι χρόνοι αντήχησης κυμαίνονταν από 380 ms για 100 m³ μέχρι 420 ms για 200 m³. Μια άλλη εξέλιξη στην διαχείριση των ακουστικών ιδιοτήτων του χώρου, ήταν η τροποποίηση των τοίχων με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται οι αλληπάλληλες ηχούς (flutter echoes). Δημιουργούσαν στους παράλληλους τοίχους κεκλιμένες ανομοιόμορφες διατάξεις.

3.3 Live End Dead End (LEDE)

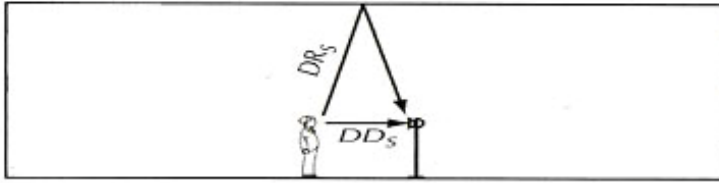
Initial Signal Delay Gap (ISD)

Το ISD είναι μια βασική παράμετρος η οποία περιγράφηκε από τον Beranek. Αυτό το “κενό” προσδιορίζεται ως όπως ο χρόνος ανάμεσα στην άφιξη του απευθείας-άμεσου ήχου (LD) στα αυτιά του ακροατή και στην άφιξη της πρώτης σημαντικής ανάκλασης. Με το «σημαντικής» εννοείται η πρώτη ανάκλαση της οποίας η ένταση προσεγγίζει την κορυφή του εκθετικά αυξανόμενου και μειωμένου αντηχητικού πεδίου. Επειδή σε ένα μικρό δωμάτιο δεν έχουμε ένα κλασικό αντηχητικό πεδίο όπως προσδιορίζεται από την κλασική έννοια, ψάχνουμε την πρώτη ανάκλαση μέσα στα πρώτα 6db από την μεγαλύτερη σε ένταση ανάκλαση. Σε μικρά δωμάτια το ISD είναι συνήθως πολύ μικρό, της τάξεως του 1 έως 5ms. Σε ένα ειδικό σχεδιασμό των control rooms για monitoring, recording studios, μια αρχή που αποκαλείται «Ζωντανό τέλος-Νεκρό τέλος» (Live end Dead end) χρησιμοποιείται η οποία επιτρέπει ISDs από 10 έως 20 ms να αναπτυχθούν σε δωμάτια με διαστάσεις τόσο μικρές όσο 56 m³.

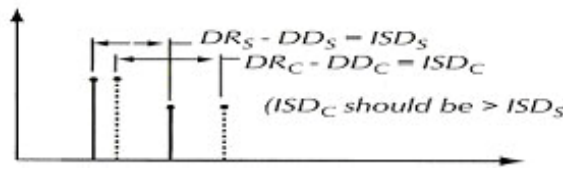
Κατά τη διάρκεια κατασκευής δωματίων LEDE , το μπροστινό μισό του δωματίου φτιάχτηκε όσο απορροφητικό είναι δυνατόν και το άλλο μισό (στο πίσω μέρος του ακροατή) όσο ανακλαστικό και διαχυτικό είναι δυνατόν. Για να επιλέξουμε ένα διάστημα ISD χρειάζεται να γνωρίζουμε το ISD του studio ή άλλο περιβάλλον που περιβάλλει τους μουσικούς. Επιπρόσθετα, το ISD του control room πρέπει να φτιαχτεί μεγαλύτερο από το ISD του studio αν είναι να επιτρέπει αναπαραγωγή του διαστήματος του δωματίου πάνω από τα monitor ηχεία.



A. LEDE control room



B. Studio



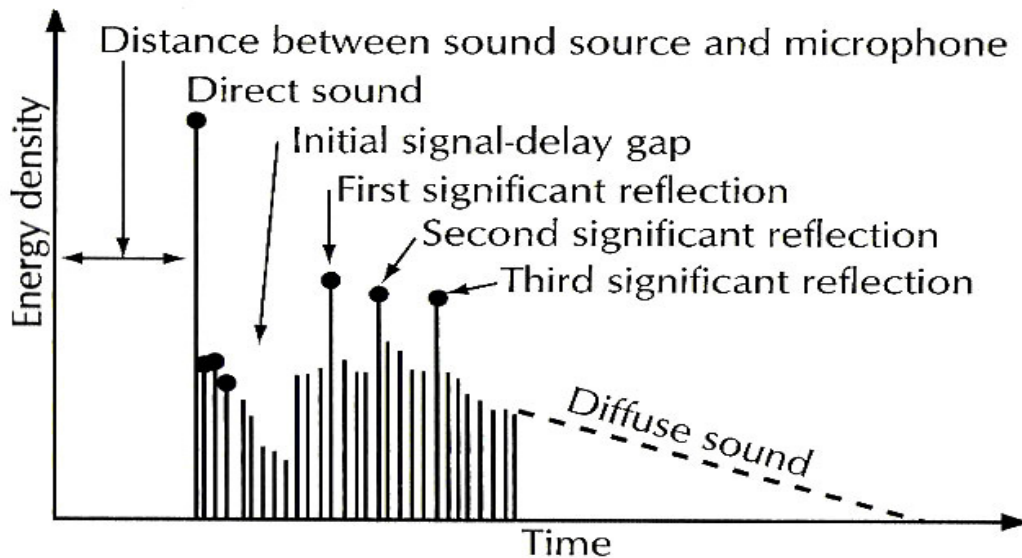
Σχήμα 1

DRs = Απόσταση ή χρόνος της πρώτης ανάκλασης στο studio.

DRc = Απόσταση ή χρόνος της πρώτης ανάκλασης στο control room.

DDs = Απόσταση ή χρόνος του απευθείας σήματος στο studio.

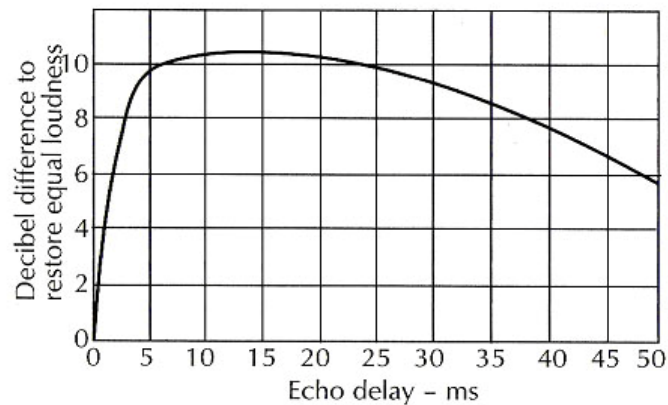
DDc = Απόσταση ή χρόνος του απευθείας σήματος στο control



Σχήμα 2. Από αριστερά: Απόσταση ή χρόνος μεταξύ της ηχητικής πηγής και του μικροφώνου. ISD. Απόσταση ή χρόνος μεταξύ του απευθείας σήματος και της πρώτης σημαντικής ανάκλασης. Επίσης διαφαίνονται οι πρώτες ανακλάσεις όπως επίσης και η διαχυτική ουρά (diffuse sound).

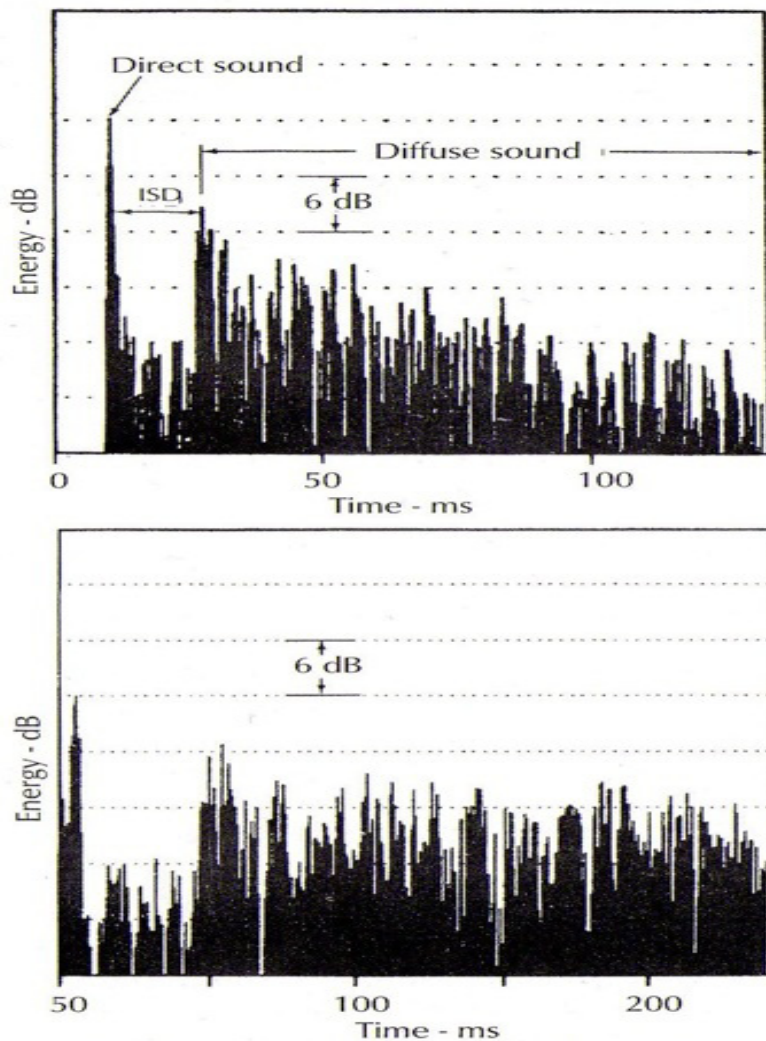
Η πρώτη ανάκλαση του control room πρέπει να πέφτει ανάμεσα στη ζώνη Haas. Η εμπειρία δείχνει ότι όλη η περαιτέρω ενέργεια πρέπει να εμφανίζεται σαν μια κεκλιμένη ευθεία γραμμή στην αναπαράσταση του Envelope Time Curve (ETC) δηλαδή ένας εκθετικός φθίνων ρυθμός. Το E.T.C. είναι η ένταση του σήματος της κρουστικής απόκρισης. Είναι επίσης γνωστό ότι

η ενέργεια που υπερβαίνει αυτήν κλίση είναι επιβλαβής και αντληπτή δηλαδή ακούγεται, ειδικά όταν το «κενό» (ISD) “πέφτει” μέσα στην ζώνη Haas. (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Ζώνη Haas

Επίσης στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4) φαίνεται η διαφορά στο ETC – Ενέργεια (dB) προς χρόνο (ms) ενός μικρού δωματίου (control room) και ενός «ζωντανού» χώρου «concert hall» όπως και οι διαφορές τους όσον αφορά τη σχέση των πρώτων ανακλάσεων με το απευθείας σήμα, όπως και τις καθυστερημένες ανακλάσεις.



Σχήμα 4. ETC του Master Sound Astoria recording studio (πάνω μέρος).
ETC ενός concert hall (στο κάτω μέρος).

Ανακλάσεις

Χρήσιμοι ορισμοί:

Οι έννοιες LEDE είναι φυσικά απλές αλλά ψυχοακουστικά πολύπλοκες. Ο σκοπός ενός LEDE δωματίου είναι να επιτρέψει στους mixing engineers, οι οποίοι κάθονται στην κονσόλα να ακούσουν τις πρώτες ανακλάσεις από το recording studio στα ηχεία του control room πριν ακούσουν ανακλάσεις από το control room όπου κάθονται.

Dead End (Νεκρό μέρος):

Στο μπροστινό μέρος του δωματίου δεν επιτρέπεται να υπάρχουν πρώτες-πρώιμες ανακλάσεις. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας απορρόφηση, ζώνες ελεύθερες από ανακλάσεις (RFZ), ή οποιαδήποτε άλλη μέθοδο που συγκεντρώνει τα κριτήρια του να μην έχουμε ανακλάσεις στο μπροστινό μέρος του control room.

Live End (Ζωντανό μέρος):

Το Live end βασίζεται σε τρεις λειτουργίες:

α. Φαινόμενο Haas – Μια πρώτη ανάκλαση αρκετά δυνατή από το studio, όπως ακούγεται από τα ηχεία του control room, για να αποδώσει το φαινόμενο Haas.

β. Διάχυση – Ο κ. Davis, δημιουργός της ιδέας LEDE, προτείνει τους δευτεροβάθμιους διαχυτές τετραγωνικού υπολοίπου (QRD) του Schroeder. Η βέλτιστη (καλύτερη) τοποθέτηση αυτών των διαχυτών είναι πίσω από τη θέση του ηχολήπτη, δηλαδή πίσω από τη θέση της κονσόλας στον πίσω τοίχο, μια καλή τοποθέτηση πίσω από τον τοίχο είναι από 2 έως 5 μέτρα. Οι διαχυτές δεν πρέπει να είναι στην επί του άξονα πορεία (διαδρομή) των monitors επειδή μη-επιθυμητές θεωρητικές ανακλάσεις σε συχνότητα μεγαλύτερη υψηλότερη από τις συχνότερες διάχυσης μπορεί να υπάρξουν.

γ. Specular ανακλαστήρες:

Χρειάζεται προσοχή για να προμηθεύσουμε τις επακόλουθες πρώτες ανακλάσεις. Κάθε ανάκλαση πρέπει να ακολουθήσει μια γραμμική αλλαγή σε επίπεδο με τον αυξανόμενο χρόνο. Πρέπει να σιγουρευτούμε ότι δεν τους έχουμε τοποθετήσει

σε ίσα διαστήματα καθυστέρησης. Αυτοί οι specular ανακλαστήρες θα πρέπει πάλι να οδηγήσουν τα σήματα πίσω μέσα στους διαχυτές έτσι ώστε όλη η ακουστική (ευδιάκριτη) περίοδος φθοράς (μείωσης) να είναι διάχυτη.

Ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις (RFZ)

Όταν οι κατασκευαστές ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν αναλυτές στα control rooms κατά το κτίσιμο ή την ανακαίνιση, βρέθηκε ότι λιγότερη απορρόφηση χρειαζόταν στο μπροστινό τμήμα του control room για να ελέγχουμε τις πρώτες ανακλάσεις.

Είναι αναγκαίο να δημιουργήσουμε ζώνες ελεύθερες από ανακλάσεις όπως ο Peter D'Antonio την αποκαλεί.

Φίλτρα κτένας (comp filters) που προκαλούνται από τις πρώτες ανακλάσεις προκαλούν κορυφές και βυθίσματα τα οποία είναι πολύ ενοχλητικά στη στερεοφωνική εικόνα. Αν το δωμάτιο μπορεί να κατασκευαστεί για να κρατάει τον ήχο μακριά από τους τοίχους και το ταβάνι, δεν είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούμε βαριά απορρόφηση στο μπροστινό μέρος του δωματίου. Αν τα ηχεία όντως προκαλούν πρώτες ανακλάσεις η απορρόφηση μπορεί να τοποθετηθεί στρατηγικά για να μειώσει τις πρώτες ανακλάσεις. Ανακλάσεις μικρότερες από 1 ms προέρχονται από την κονσόλα ή από την πρόσοψη των κουτιών των ηχείων και από τα near-field monitors. Η απορρόφηση είναι η καλύτερη απάντηση! Παρακάτω προτείνεται μια φόρμουλα για τον υπολογισμό των φίλτρων κτένας (comp filters), για δύο σήματα που έχουν την ίδια συχνότητα αλλά διαφορετική φάση και ένταση. Όπου: L_{comp} το άθροισμα της έντασης των δύο σημάτων σε dB.

$$L_{comp} = 20 \log \sqrt{\left(10^{\frac{L_1}{20}}\right)^2 + \left(10^{\frac{L_2}{20}}\right)^2 + 2 \left[\left(10^{\frac{L_1}{20}}\right) \cdot \left(10^{\frac{L_2}{20}}\right) \cdot (\cos(a_1 - a_2)) \right]} \quad \text{Σχέση 5.}$$

L_1 = Η ένταση της πρώτης πηγής σε dB.

L_2 = Η ένταση της δεύτερης πηγής σε dB.

a_1 = Η γωνιακή φάση του L_1 .

a_2 = Η γωνιακή φάση του L_2 .

Στον πίνακα 1 βλέπουμε την διαφορά φάσης για σήματα ίδιας έντασης και ίδιας συχνότητας. Είναι πασιφανές πως καθώς η διαφορά φάσης αυξάνεται το άθροισμα της έντασης των δύο κυμάτων ελαττώνεται σταδιακά, μέχρι η διαφορά φάσης να φτάσει στις 180 μοίρες όπου τα δύο σήματα αλληλοεξουδετερώνονται με αποτέλεσμα το άθροισμα τους να είναι μηδέν, $L_{comp} = 0$ db.

Πίνακας 1. Αποτέλεσμα της άθροισης δύο σημάτων. Όταν έχουν διαφορά φάσης.

L_1	a_1 (deg)	L_2	a_2 (deg)	L_{comb} (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	$-\infty$

Εξέλιξη της θεωρίας: «Ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις RFZ»

Carolyn “Paddie” Rodgers από το Northwestern University εργάστηκε με τον Gary Kendall σχετικά με τα προβλήματα που προκαλούν τα φίλτρα κτένας (comp filters). Όταν είδε τα φίλτρα κτένας που δημιουργούνται από κακώς ευθυγραμμισμένα ηχεία (διαφορετικές αποστάσεις από τον ακροατή), παρατήρησε ότι της έδινε μια μελλοντική έρευνα. Απόσπασμα από την AES journal (Απρίλιος 1981).

«Πολλές μελέτες έχουν καταδείξει ότι οι ανακλάσεις δρουν επί του αρχικού σήματος σαν ένα φίλτρο κτένας το οποίο αλλοιώνει τις διαφορές χρόνου, φάσης και έντασης οι οποίες βοηθούν τον ανθρώπινο εγκέφαλο να καταλάβει – εντοπίσει τη θέση της πηγής στο χώρο (στερεοφωνική εικόνα).

Πρόσφατες αξιολογήσεις από κακώς ευθυγραμμισμένα ηχεία χρησιμοποιώντας φασματοσκόπηση χρόνου καθυστέρησης αποκαλύπτουν φασματικά μεγέθη που είναι χαρακτηριστικά παρόμοια με φίλτρα κτένας. Η επίπτωση είναι ότι κακώς ευθυγραμμισμένα ηχεία, πρόχειρα τοποθετημένα μικρόφωνα ή άλλες πρώτες ανακλάσεις εισάγουν φασματικές ανωμαλίες οι οποίες μπορεί να αποκωδικοποιηθούν από το ακουστικό σύστημα σαν υπόδειξη για τη θέση πηγής. Οι πιθανές συνέπειες των φίλτρων κτένας ως προς την ερμηνεία ψυχοακουστικών φαινομένων όπως η ακουστική εικόνα, το φαινόμενο cocktail party και το φαινόμενο προτεραιότητας, συζητούνται». [2]

Ο Doug Jones από το Chicago, εργαζόμενος με ένα αναλυτή TEF σε ανακαίνιση control rooms συνάντησε τον Gary Kendall στο Northwestern.

Αυτοί έκαναν την ακόλουθη εργασία:

«Ο σχεδιασμός ελεγχόμενων ακουστικών περιβαλλόντων είναι συχνά ένα αμελημένο κομμάτι του συνολικού περιβάλλοντος όπου computer μουσικοί εργάζονται. Οι recording engineers γνωρίζουν την εργασία μείξης σε ένα περιβάλλον που υποστηρίζει καθαρότητα εικόνας και το οποίο ακούγεται το

ίδιο κάθε φορά που το χρησιμοποιούν. Στο Northwestern University Computer Music Studio έχει πρόσφατα τελειοποιηθεί η κατασκευή ενός ακουστικού δωματίου όπου υπάρχει η πρόθεση να χρησιμοποιηθεί και σαν γενικό audio ακουστικό περιβάλλον και σαν ελεγχόμενο περιβάλλον ήχου για ψυχοακουστική έρευνα στον εντοπισμό.

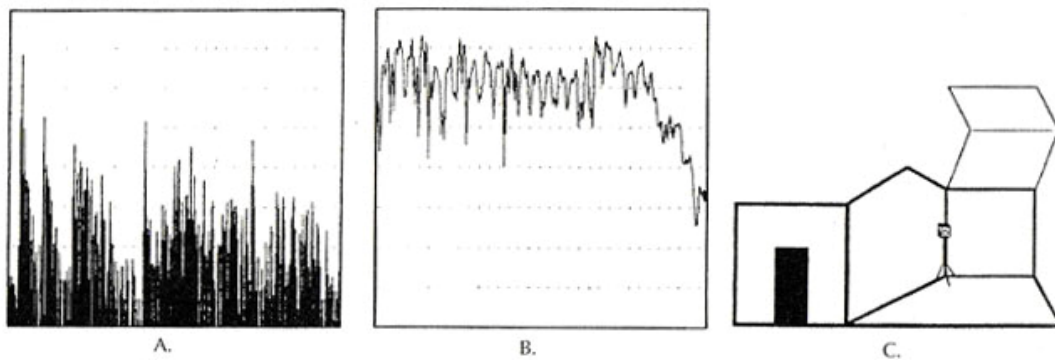
Η εμπειρία σε πολλά studio monitoring rooms έχει πιστοποιήσει ότι η καλή audio εικόνα απαιτεί των έλεγχο ανακλάσεων. Αυτή η γνώση έχει χρησιμοποιηθεί στο μοντέρνο στυλ σχεδιασμού των control rooms που αποκαλείται LEDE (Live End Dead End).

Ο μη επιθυμητός ανακλώμενος ήχος μπορεί να παραμορφώσει την στερεοφωνική εικόνα και υποβαθμίζει την αίσθηση του συνολικού ηχητικού χώρου. Μέχρι πρόσφατα, η περισσότερη έρευνα εντοπισμού πραγματοποιήθηκε με ακουστικά ή σε ανηχοϊκούς θαλάμους και τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε φυσιολογικές καταστάσεις με ηχεία. Η έρευνα απαιτούσε την ικανότητα των αντηχητικών χαρακτηριστικών του δωματίου με πολύ επιλεκτικούς τρόπους. Με τη βοήθεια του TEF αναλυτή υπήρχε η ικανότητα για αλλαγές στην τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών panels στους τοίχους και έτσι αμέσως μπορούσε να αξιολογηθεί το αποτέλεσμα των αλλαγών. Ο αναλυτής TEF εφοδιάζει με ένα υψηλότερο βαθμό ακρίβειας και ανάλυσης στις λεπτομέρειες της ακουστικής των δωματίων από ότι ήταν δυνατό πριν.

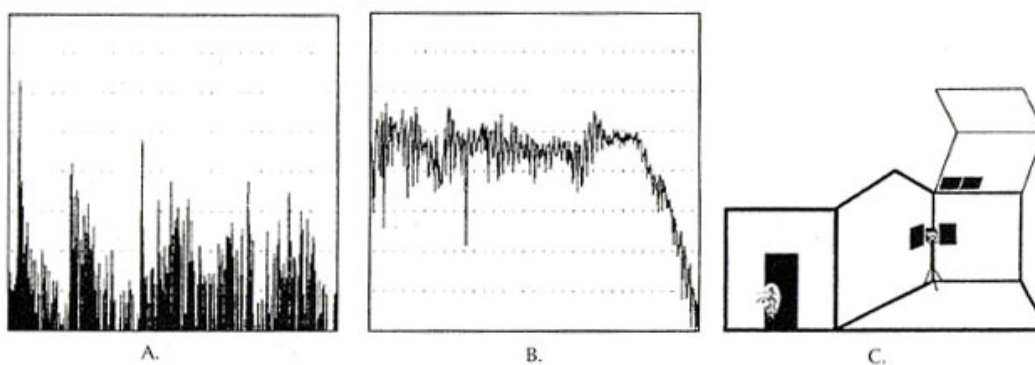
Χρησιμοποιώντας το TEF επιτεύχθηκε το χτίσιμο ενός δωματίου που είναι επιλεκτικά ανηχοϊκό. Είναι ανηχοϊκό ανάμεσα στη θέση του ακροατή και των ηχείων ενώ εμφανίζεται κατά τα άλλα αντηχητικό στον ακροατή. Αυτό επιτρέπει την πραγμάτωση πειραμάτων εντοπισμού σε ένα περιβάλλον που μπορεί να αποδειχτεί ότι είναι ελεύθερο από πρώτες ανακλάσεις, ενώ επιτρέπει στον ακροατή να το βιώνει σαν ένα κανονικό δωμάτιο, όχι έναν ανηχοϊκό θάλαμο. Ενώ αυτό το περιβάλλον μοιράζεται μερικούς σχεδιαστικούς στόχους από κοινού με τα “Live End Dead End” studio monitoring control rooms, έχει πρόθεση

να είναι ένα ευέλικτο περιβάλλον το οποίο μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί για να ταιριάζει σε πολλές διαφορετικές χρήσεις.

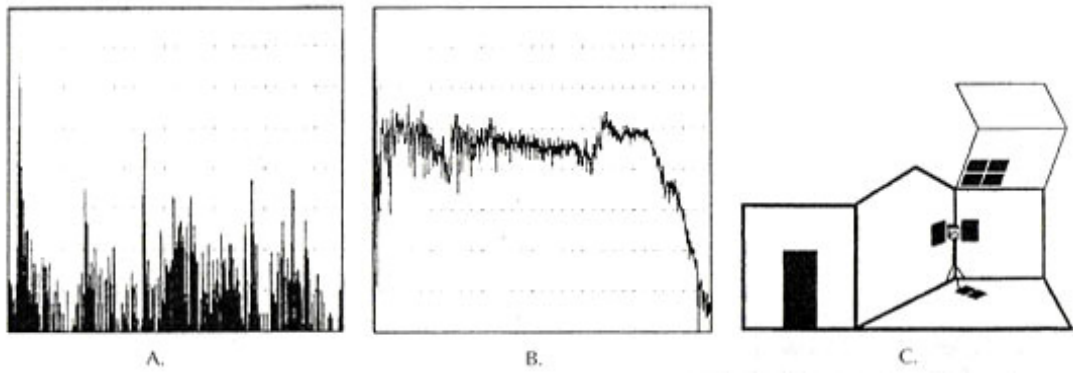
Το Σχήμα 6 δείχνει ένα μικρό δωμάτιο με ένα ηχείο σε μια γωνία του δωματίου. Τα σχήματα 7 έως 12 δείχνουν την προσθήκη ενός απορροφητικού υλικού (panel) καθώς και το πώς επηρέασε το χώρο το συγκεκριμένο υλικό. Παρατηρούμε πως όλες οι πρώτες ανακλάσεις έχουν αφαιρεθεί χωρίς να καλύψουμε όλη την επιφάνεια του μπροστινού τοίχου με απορροφητικό υλικό. Βεβαίως τα πράγματα σε ένα control room είναι σαφώς πιο περίπλοκα αλλά η γενική ιδέα περί απορρόφησης των πρώτων ανακλάσεων έχει κατανοηθεί.



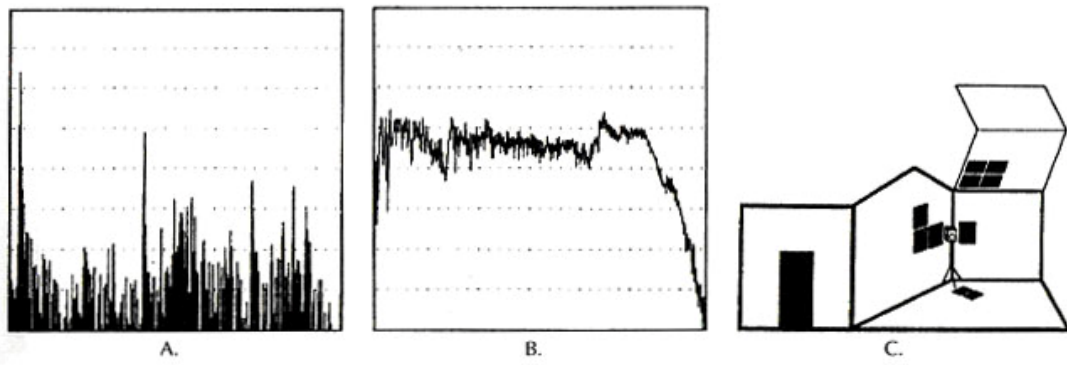
Σχήμα 6. Δωμάτιο χωρίς την προσθήκη απορροφητικού panel



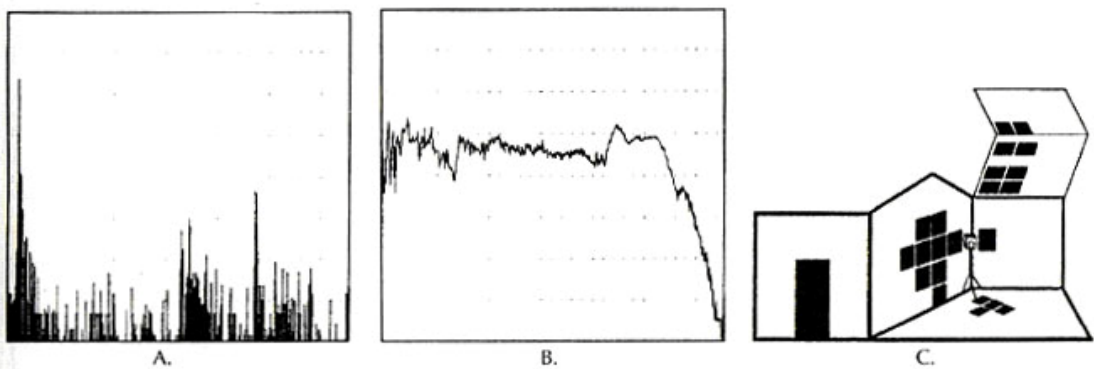
Σχήμα 7. Δωμάτιο με την προσθήκη απορροφητικού panel



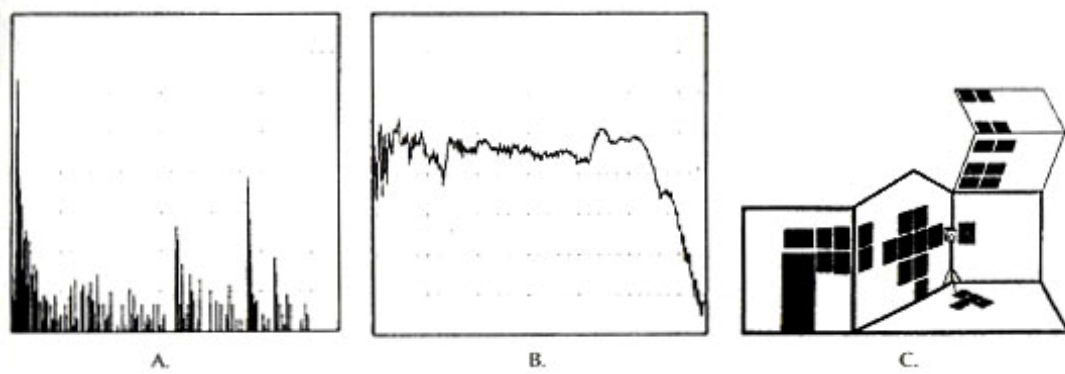
Σχήμα 8. Δωμάτιο με περισσότερη προσθήκη απορροφητικού panel



Σχήμα 9. Δωμάτιο με περισσότερη προσθήκη απορροφητικού panel



Σχήμα 10. Δωμάτιο με περισσότερη προσθήκη απορροφητικού panel



Σχήμα 11 Δωμάτιο με περισσότερη προσθήκη απορροφητικού panel



Σχήμα 12 Δωμάτιο με περισσότερη προσθήκη απορροφητικού panel

Διάχυση

Ο T.F.W. Embleton δηλώνει:

“Σε ένα μεγάλο ακανόνιστο χώρο είναι πιθανό, θεωρητικά, να υπάρχει ένα ηχητικό πεδίο διάχυσης το οποίο αποτελείται από μια superposition των ηχητικών σημάτων που ταξιδεύουν προς όλες τις κατευθύνσεις, με ίσες πιθανότητες. Αυτό το χαρακτηριστικό διασφαλίζει ότι η μέση πυκνότητα ενέργειας είναι ίδια σε όλα τα σημεία. Αν αυτό ήταν όντως έτσι δεν θα υπήρχε καθαρή ροή διανομής προς κάθε κατεύθυνση.

Επομένως, ένα ηχητικό πεδίο διάχυσης στην πραγματικότητα ποτέ δεν υπάρχει επειδή υπάρχει μια καθαρή ροή ενέργειας μακριά από την πηγή προς τα μέρη όπου η ενέργεια απορροφάται. Παρόλα αυτά, η έννοια ενός ηχητικού πεδίου διάχυσης είναι χρήσιμη σε δωμάτια που δεν είναι πολύ απορροφητικά και όπου επιπρόσθετα η θέση μέτρησης ούτε είναι πολύ κοντά στην πηγή ούτε κοντά σε οποιαδήποτε μικρή περιοχή που είναι πολύ απορροφητική”. [4]

Ο James Moir σημείωσε:

“Σε ένα ακουστικά μεγάλο δωμάτιο κάποια προσέγγιση για την ολοκλήρωση τη διάχυση μπορεί να υπάρξει κατά την περίοδο της μείωσης (φθοράς) εξαιτίας της κοντινής τοποθέτησης στο χώρο των συχνοτήτων του τρόπου ταλάντωσης του δωματίου ακόμα και σε χαμηλές ακουστές συχνότητες”. [4]

Ο Morse και ο Ingrand επίσης σημείωσαν:

“Ένα κύμα ήχου διασκορπίζεται όχι μόνο από ένα στέρεο αντικείμενο, άλλα επίσης από μια περιοχή στην οποία τα ακουστικά χαρακτηριστικά του μέσου. Ο περιστρεφόμενος αέρας διασκορπίζεται, και επίσης διαχωρίζει τον ήχο Ένα τραχύ κομμάτι πάνω σε μια απλή επιφάνεια διασκορπίζει, όπως και αντανακλά τον ήχο”. [4]

Ενώ ο ο Don Davis σημειώνει:

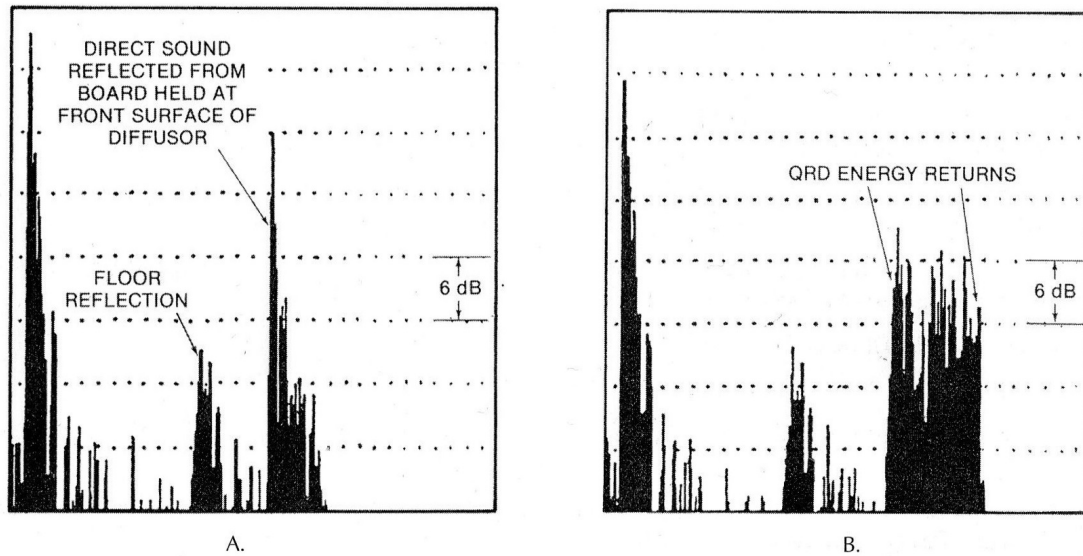
“Σε οποιοδήποτε βιβλίο με αξιώσεις για γνώση σχετικά με recording studios και σχεδόν χωρίς εξαιρέσεις το υλικό για εσωτερική ακουστική δείχνει ένα τεράστιο κενό από χρήσιμες και ακριβείς πληροφορίες.

Εννοείται ότι το μόνο που πρέπει να επιτευχθεί είναι η προσθήκη της απορρόφησης εφόσον έχει μελετηθεί ο χώρος. Το TEF μας έχει δείξει ότι η ζώνη χωρίς ανακλάσεις είναι εύκολη. Το δυσκολότερο μέρος είναι να λάβεις τη βέλτιστη διάχυση από το “Live End” του δωματίου”.

Στην πραγματικότητα, η διαφορά στην ποιότητα των control rooms είναι η διαφορά στην διάχυση που είναι παρούσα στα αυτιά του ηχολήπτη που είναι στην κονσόλα. Όσο πιο ανάμικτο και μιξαρισμένο είναι το ολικό πεδίο ήχου στα αυτιά του ηχολήπτη, δηλαδή στην θέση της κονσόλας τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του ήχου. [4]

Διαχυτές δευτεροβάθμιου τετραγωνικού υπολοίπου (quadratic residue diffusers)

Το πρώτο έγγραφο της AES για τη σχεδίαση LEDE (D. Davis και C. Davis 1978) δήλωσε ότι οι δευτεροβάθμιοι διαχυτές τετραγωνικού υπόλοιπου του Schroeder θα ήταν ιδανικοί για το διάχυτο πίσω τοίχο. Ο Dr. Peter D’Antonio εφάρμοσε τις εξισώσεις Schroeder. Έχτισε ένα LEDE control room στο υπόγειο του και χρησιμοποίησε διαχυτές δευτεροβάθμιου τετραγωνικού υπόλοιπου. Έδωσε το έγγραφο στην AES το φθινόπωρο του 1983 στην Νέα Υόρκη. Ο Robert Todrank που έχτιζε ένα Lede control room για τον Jimmy Tarbutton στα Acorn Studios στο Nashville και αγωνιζόταν για το διάχυτο πίσω τοίχο, παρακολούθησε τη συνεδρία. Ο Todrank κατασκεύασε και εγκατέστησε τους πρώτους διαχυτές σε “εμπορικό” control room. Ο Russ Berger, κλειδί στην χρήση των διαχυτών ήταν παρών όπως και οι Davis. Ο Berger σύντομα οργάνωσε ένα Syn – Aud – Con σποναρισμένο εργαστήριο Lede στα Dallas Sound Labs. Οι διαχυτές φαίνονται στο διάγραμμα 13. Οι διαχυτές πήραν τη σχεδίαση του διάχυτου πίσω τοίχου. Έπειτα ο Peter D’Antonio έγινε κατασκευαστής διαχυτών και ο Russ Berger ο απόλυτος σχεδιαστής studio control rooms στον κόσμο.[4]



Σχήμα 13. Διαχυτές δευτεροβάθμιου τετραγωνικού υπολοίπου.

Συμπέρασμα

Οι ακουστικές ιδιότητες των δωματίων είναι βασικές για την επιτυχή σχεδίαση συστημάτων ήχου. Σε όλα τα παραπάνω έχουμε λάβει υπόψη μας για την ακουστική μικρών χώρων τα εξής:

- α. το διάχυτο επίπεδο θορύβου σε ένα χώρο, (L_n)
- β. τη σχέση του απευθείας ηχητικού πεδίου (LD) ως προς το χρόνο αντήχησης RT60.

Γενικότερα το LEDE control room είναι το δωμάτιο στο οποίο αναπαράγεται, επεξεργάζεται και μιξάρεται μουσικό υλικό. Το υλικό αυτό προορίζεται για ραδιοφωνικούς σταθμούς, club και σε όλους τους ανθρώπους οι οποίοι ακούν μουσική στο σπίτι τους, στο αυτοκίνητό τους, στο «i pod» τους!

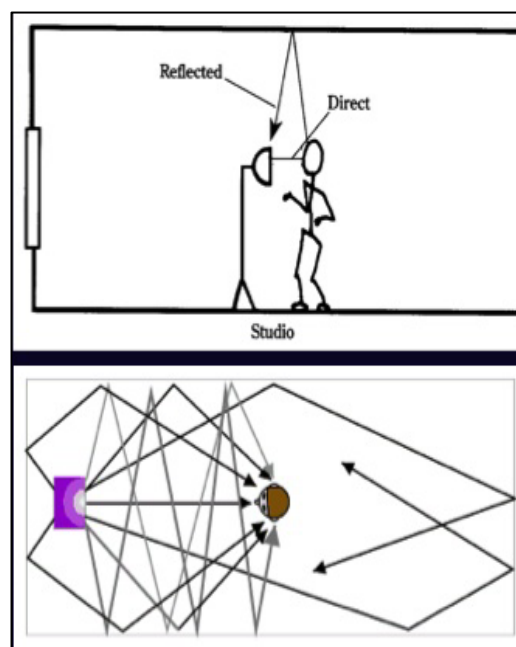
Όπως γνωρίζουμε και από τα παραπάνω όλοι αυτοί οι μικροί χώροι δεν είναι flat, δηλαδή λόγω της γεωμετρίας του χώρου όταν αναπαράγεται μουσικό υλικό κάποιες συχνότητες ενισχύονται, κάποιες παραμένουν όπως είναι και

κάποιες άλλες εξασθενούνε. Το θέμα είναι ότι ένας μηχανικός ήχου, ένας παραγωγός, ένας ηχολήπτης χρειάζονται ένα δωμάτιο (control room) το οποίο είναι flat, δηλαδή ένα δωμάτιο το οποίο δεν αλλάζει, δεν «χωματίζει», δεν επεμβαίνει στο υλικό το οποίο επεξεργάζεται και μιξάρεται. Ένα τέτοιο δωμάτιο είναι το LEDE control room.

Σε ένα δωμάτιο τύπου LEDE τα πράγματα έχουν ως εξής:

Το μπροστινό μέρος του δωματίου το αποκαλούμενο «νεκρό μέρος» πρέπει να απορροφά τον ήχο όσο το δυνατόν περισσότερο και το πίσω μέρος του δωματίου το λεγόμενο «ζωντανό μέρος» πρέπει να ανακλά και να διαχέει τον ήχο όσο το δυνατό περισσότερο.

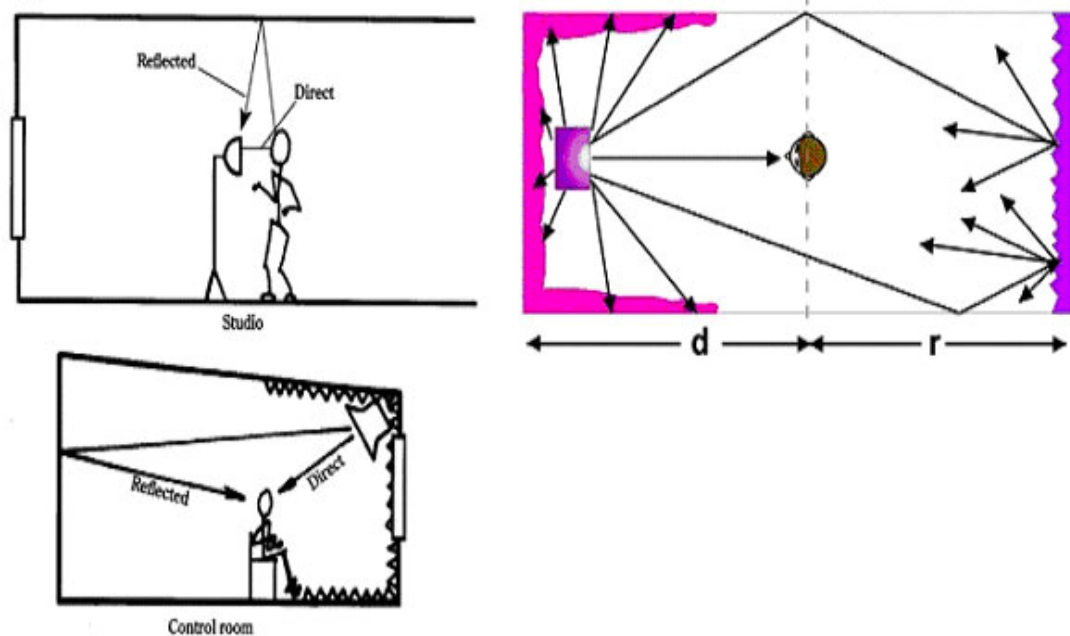
Ο σκοπός είναι να δημιουργηθεί μια ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις γύρω από τη θέση του ηχολήπτη έτσι ώστε στα αυτιά του ηχολήπτη να μην φτάνουν οι πρώιμες ανακλάσεις οι οποίες αλλοιώνουν την χροιά, την στερεοφωνική εικόνα συν του ότι δημιουργούν ανεπιθύμητα φαινόμενα όπως comp-filtering, flutter echo cocktail party. Όσο αναφορά τα στάσιμα κύματα δεν υπάρχει πρόβλημα γιατί το μπροστινό μέρος είναι τελείως απορροφητικό. Τέλος οι ανακλάσεις φτάνουν στα αυτιά μας μετά από 11-20ms και συγκεκριμένα έρχονται από το πίσω μέρος του δωματίου, το ζωντανό μέρος, με τη βοήθεια των διάχυτων.



Σχήμα 14. Ένα απλό δωμάτιο.

Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου είναι εύλογο να συγκρίνουμε ένα απλό δωμάτιο με ένα δωμάτιο

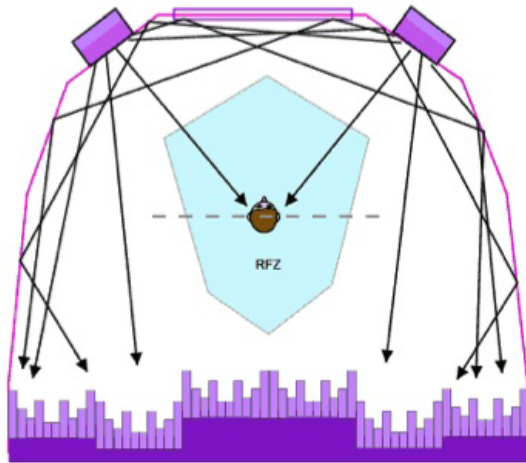
τύπου LEDE. Στο σχήμα 14 φαίνεται η αναπαράγωγή του ήχου σε ένα απλό δωμάτιο. Είναι εμφανείς πως οι πρώιμες ανακλάσεις σε συνδυασμό με τον απευθείας ήχο, καταστρέφουν την στερεοφωνική εικόνα και δημιουργούν comp-filtering.



Σχήμα 15. Δωμάτιο LEDE.

Είναι εμφανές πως οι πρώτες ανακλάσεις πλέον απορροφούνται! Σε ένα τέτοιο δωμάτιο οι μίξεις είναι πολύ πιο έμπιστες και ποιοτικές όσο αναφορά την στερεοφωνική εικόνα, την χροιά κάθε ήχου ή τη μίξη τους. Πλέον είμαστε σίγουροι ότι οι μίξεις που έγιναν σε αυτό το δωμάτιο κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό θα ακούγονται έτσι παντού.

Στο παρακάτω σχήμα αναπαρίσταται η «Ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις» η οποία είναι ζώνη που δημιουργείται γύρω από τη θέση του ηχολήπτη μέσα στο control room.



Σχήμα 16. Ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις (RFZ).

Μειονεκτήματα του LEDE

Σήμερα η τεχνική Lede είναι μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές για την ορθή ακουστικά κατασκευή ενός control room, όπως έχουμε εξηγήσει και παραπάνω μπορούμε να μιξάρουμε με ασφάλεια δίχως να καταστρέφεται η στερεοφωνική εικόνα, χωρίς να δημιουργούνται φίλτρα κτένας, εφόσον το μπροστινό μέρος του δωματίου είναι όσο το δυνατόν πιο απορροφητικό ενώ το πίσω μέρος του δωματίου είναι όσο το δυνατόν πιο ανακλαστικό και διαχυτικό, έτσι έχουμε δημιουργήσει μια ζώνη ελεύθερη από πρώτες ανακλάσεις γύρω από τη θέση του ηχολήπτη!

Τελικά ο ηχολήπτης ακούει ένα πολύ καθαρό σήμα κατά τα πρώτα 25ms χωρίς πρώιμες ανακλάσεις και εφόσον το μπροστινό μέρος είναι το «νεκρό μέρος» η αίσθηση του χώρου δίνεται από τον πίσω τοίχο όπου είναι το ζωντανό μέρος του δωματίου. Εδώ υπάρχει και το μόνο βασικό μειονέκτημα της τεχνικής Lede, οι ανακλάσεις που δίνουν την αίσθηση του χώρου έρχονται από το πίσω μέρος του δωματίου, το αποτέλεσμα είναι ότι δεν είναι ψυχοακουστικά ορθό ο ηχολήπτης να αισθάνεται τις ανακλάσεις πίσω του! Σύμφωνα με ψυχοακουστικές μελέτες όταν συμβαίνει αυτό το φαινόμενο αισθανόμαστε το αποτέλεσμα direct σήμα-αναλάσεις σαν εξωπραγματικό, επίσης είναι αρκετά

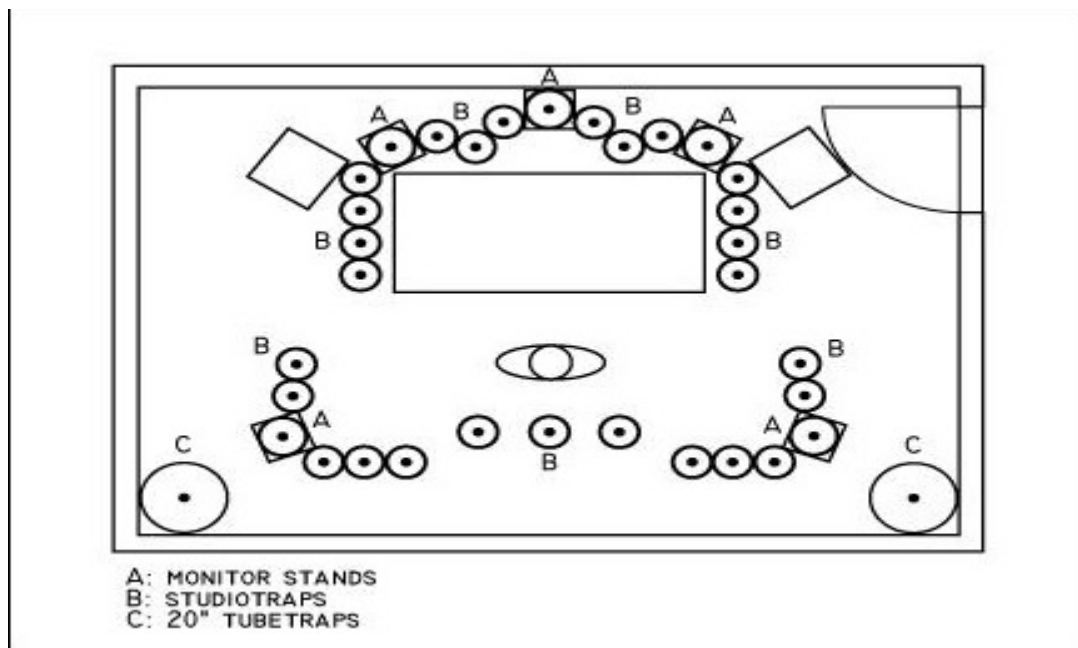
κουραστικό με αποτέλεσμα ο ηχολήπτης να μην μπορεί να αποδώσει! Επίσης είναι σχεδόν απίθανο σε ένα Lede control room να γίνει μίξη 5.1 surround Στο 5.1 surround σύστημα υπάρχουν και δύο ηχεία στο πίσω μέρος του δωματίου Lede δηλαδή στο ανακλαστικό-διαχυτικό μέρος του δωματίου, με αποτέλεσμα να αλλάζουν όλα τα δεδομένα. Η θεωρία Lede δεν λειτουργεί πλέον σε αυτήν την περίπτωση.

Παρατηρήσεις:

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω κάποιες προσωπικότητες είναι απόλυτα συνδεδεμένες με την έννοια των LEDE δωματίων και την κατασκευή τους. Η αίσθηση που δίνεται σε κάποια άρθρα της A.E.S , καθώς και σε επιστημονικά βιβλία που έχουν εκδοθεί είναι πως υπάρχει κάποιου είδους αλληλοϋποστήριξη μεταξύ των κυρίων D.Davis, Peter D'Antonio, Russ Berger σε εμπορικό κυρίως επίπεδο, εφόσον οι παραπάνω κύριοι έχουν εταιρίες οι οποίες κατασκευάζουν studios, διαχυτές, απορροφητές και γενικότερα υλικά και μελέτες που είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την ακουστική μελέτη και την τεχνική LEDE. Έτσι γίνεται κατανοητό πως οι παραπάνω επιστήμονες μπορούν να επηρεάσουν το κοινό – αγοραστές στο οποίο απευθύνονται όσον αφορά το τι είδους υλικά πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ενός LEDE δωματίου.

3.4 All Tube Trap Acoustic Control Kit (ATTACK Wall)

Το Attack Wall™ είναι μια καινούργια θεωρία και είναι της εταιρίας Acoustic Sciences Corporation, παρακάτω παρατίθενται οι απόψεις του κατασκευαστή.



Σχήμα 17. Ένα δωμάτιο όπου έχει χρησιμοποιηθεί η τεχνική Attack Wall.

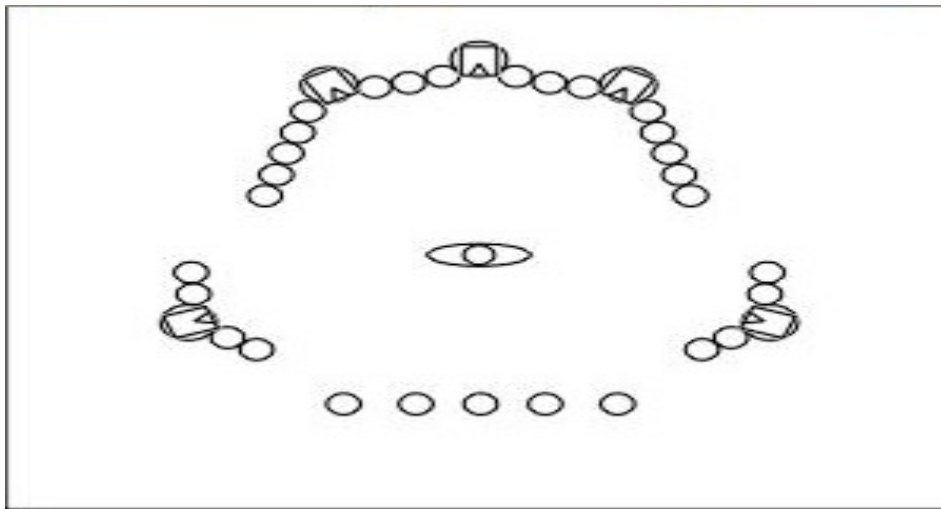
- A: Βάσεις των ηχείων.
- B: Ηχοαπορροφητές σωλήνα.
- C: Ηχοαπορροφητική διάταξη σωλήνα με διάμετρο 20".

Τα αρκετά γνωστά Tube trap τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί κατά πολύ σε Lede κατασκευές είναι κυλινδρικοί απορροφητές χαμηλών συχνοτήτων οι οποίοι βρίσκονται στις γωνίες του δωματίου σε συνδυασμό με άλλους στρογγυλούς απορροφητές οι οποίοι είναι αναρτημένοι στις επιφάνειες του δωματίου. Το 1986 η εταιρία ASC άρχισε να πειραματίζεται με κάτι εντελώς διαφορετικό. Τα αποτελέσματα ήταν θετικά και ελκυστικά. Το σύστημα εξελίχθηκε με τη βοήθεια και το ενδιαφέρον πολλών ανθρώπων, σήμερα βρίσκεται σε πολλά studio ηχογράφησης.



Σχήμα 18. Διάταξη του Attack Wall.

Το “attack wall” είναι το αντίθετο από την παραδοσιακή ακουστική δωματίων. Δημιουργεί ένα ακουστικό χώρο που υπάρχει εξολοκλήρου μέσα στο δωμάτιο μακριά από τις επιφάνειες. Αντί για εντοιχισμένες επιφάνειες ή αναρτημένες ακουστικές λύσεις το “attack wall” είναι ένα ακουστικό πακέτο που στήνεται μέσα στο δωμάτιο, μακριά από τις επιφάνειες, τους τοίχους και τις γωνίες. Το όνομα του “Attack” είναι ένα ακρωνύμιο που στην πραγματικότητα προέρχεται από την ιδέα ενός All Tube Trap Acoustic Control Kit (Ολικό κιτ σωλήνων απορροφητών ακουστικού ελέγχου) αν και η πιο επιθετική σημασιολογία δεν είναι εντελώς τυχαία!

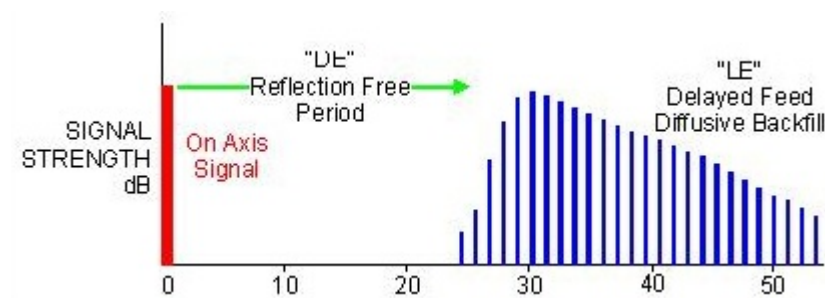


Σχήμα 19. Κάτοψη του Attack Wall.

Όλες οι σχεδιάσεις studio ακολουθούν βασικές ακουστικές αρχές και το ίδιο ισχύει και για το “attack wall”. Θα εξετάσουμε πώς ικανοποιεί την απαίτηση για την προώθηση ενός δυνατού και καθαρού απευθείας σήματος, πώς διασφαλίζει μια ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις και πώς δημιουργεί διάχυτο υπόστρωμα με καθυστέρηση χρόνου. Το “attack wall” ικανοποιεί την αρχή Lede και για Stereo και Surround περιβάλλοντα μίξης.

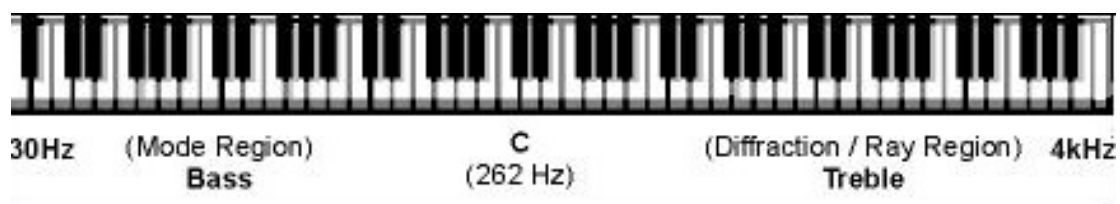
Τα studio ηχογράφησης βασίζονται στην γνωστή αρχή τύπου “Lede”. Εδώ βλέπουμε την ένταση του ήχου σε db και το χρόνο σε ms του ETC (Καμπύλη Ενέργειας Χρόνου) που προσδιορίζει την ακουστική υπογραφή τύπου “LEDE”. Ξεκινάει με τον μηχανικό ήχο να λαμβάνει ένα δυνατό και καθαρό «απευθείας» σήμα. Μετά είναι η περίοδος ελεύθερη από ανακλάσεις που διαρκεί περίπου 25ms, κατά τη διάρκεια της οποίας ο μηχανικός δεν πρέπει να λαμβάνει καμία ανακλώμενη εκδοχή του απευθείας σήματος. Ακολούθως, πρέπει να υπάρχει ένα διαχυτικό υπόστρωμα με καθυστέρηση χρόνου να κατακλύζει την θέση του μηχανικού. Αυτό το υπόστρωμα διατηρεί τον χώρο της ηχογράφησης ζωντανό και για να δουλέψουμε. Χωρίς αυτό κάποιος θα εργαζόταν σε ένα ανηχοϊκό χώρο και αυτό είναι πολύ εξαντλητικό. Όλα τα ακουστικά πακέτα των studio ηχογράφησης θα πρέπει να ικανοποιούν τα κριτήρια τύπου “LEDE”, ανεξάρτητα αν οι ακουστικές επενδύσεις είναι εντοιχισμένες, αναρτημένα στους τοίχους ή

εγκατεστημένες μέσα στο δωμάτιο και ανεξάρτητα αν το δωμάτιο ελέγχου (control room) χρησιμοποιείται για stereo ή surround μίξεις.



Σχήμα 20. Ακουστικά χαρακτηριστικά δωματίου LEDE.

Τα πλήκτρα του πιάνου (Σχήμα 21) απεικονίζουν το εύρος μουσικής συχνότητας. Έχουμε το μεσαίο «NTO» (“C”) το οποίο ξεχωρίζει το μουσικό μπάσο από το πρίμο. Το μεγαλύτερο ποσοστό ήχου στο εύρος των υψηλών συχνοτήτων ταξιδεύει σε ευθείες γραμμές και απεικονίζεται εύκολα από το ray tracing («εντοπισμός ακτίνας»). Ο ήχος στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων όμως, αναπτύσσεται σε όλες τις κατευθύνσεις όμοια (omni directional). Και οι δύο αυτοί τύποι συμπεριφοράς του μετώπου κύματος πρέπει να περιληφθούν στην ανάλυση και εξέλιξη ενός studio ηχογράφησης. Το TubeTrap είναι μια ακουστική συσκευή, ένας κύλινδρος, του οποίου όλη η επιφάνεια απορροφά τις χαμηλές συχνότητες αλλά του οποίου το εμπρός μισό ανακλά τις υψηλές συχνότητες, αλλά του οποίου το πίσω μισό απορροφά τις υψηλές συχνότητες. Εξαιτίας αυτής της μοναδικής ιδιότητας, το Tube Trap έχει γίνει μια ειδικά χρήσιμη συσκευή στο σχηματισμό της ακουστικής στα δωμάτια.



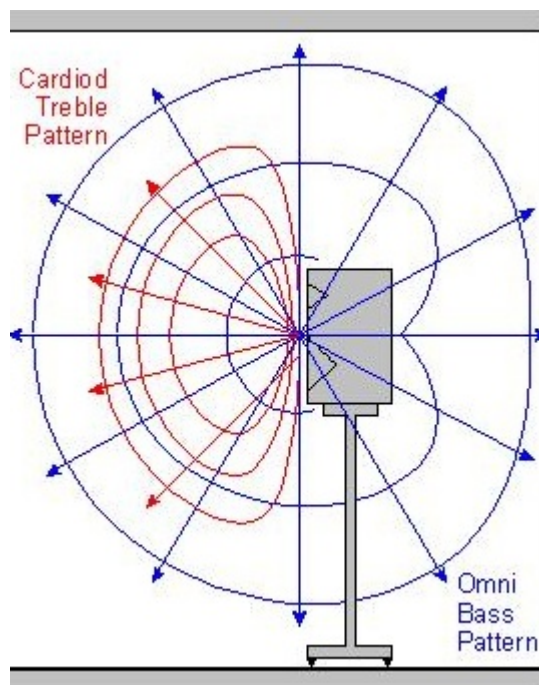
Σχήμα 21. Εύρος μουσικής συχνότητας – διαχωρισμός χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων.

Πολλά studio ηχογράφησης έχουν monitors τοποθετημένα σε βάσεις για να ένα midfield monitoring χώρο. Τα studio designer τύπου συνήθως έχουν τα monitors εντοιχισμένα άλλα πολλά studios το οποία δεν είναι τύπου designer έχουν τα monitors τους ανοιχτά στο χώρο πάνω σε βάσεις.



Σχήμα 22. Ηχεία – monitors πάνω σε βάσεις.

Τα midfield monitors λειτουργούν σαν τα περισσότερα δυναμικά ηχεία. Οι υψηλές συχνότητες διαδίδονται ως επί το πλείστον προς τα εμπρός (λόγο κατευθυντικότητας) από το monitor ενώ οι χαμηλές συχνότητες διαδίδονται με ίση δύναμη προς όλες τις κατευθύνσεις. Η κατευθυντικότητα των υψηλών συχνοτήτων έχει ένα καρδιοειδές πολικό διάγραμμα ενώ το πολικό διάγραμμα των χαμηλών συχνοτήτων είναι παντοκατευθυντικό (omni). (Σχήμα 23.).



Σχήμα 23. Πολικό διάγραμμα ηχείου- monitor.

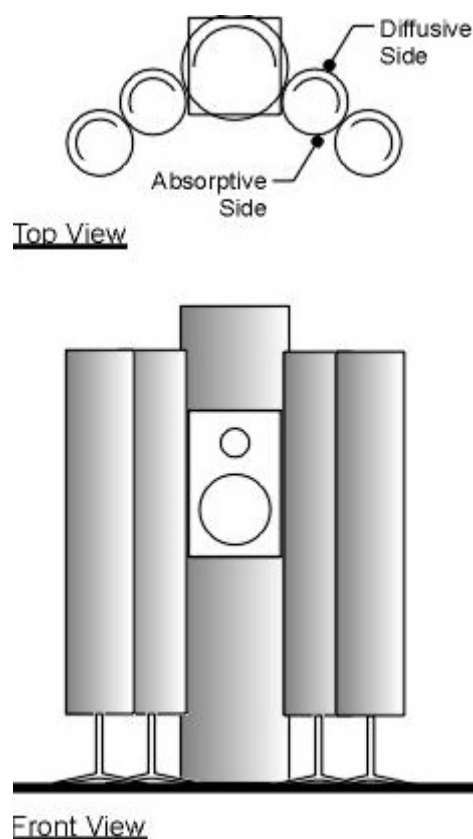
«Τα αυτιά του μηχανικού που κάνει τη μίξη είναι περίπου 1.2 m από το έδαφος και το ίδιο και τα monitors.

Δυστυχώς, τα περισσότερα monitoring rooms έχουν οροφή περίπου στα 2.5m.

Τα απευθείας κύμα από το woofer του monitor επηρεάζεται πολύ από τις ανακλάσεις από το ταβάνι και από το πάτωμα. Αυτές οι δύο ανακλάσεις ταξιδεύουν σε κυκλικά «μονοπάτια» 2.5m και συναντιούνται ακριβώς μπροστά από το woofer του monitor. Ως συνέπεια η πυκνότητα αέρα μπροστά από το woofer αλλά έχει «προετοιμαστεί» με μια έκδοση 2.5m ή 7ms καθυστέρησης του αρχικού σήματος (ουσιαστικά έχει τροποποιηθεί η ακουστική εμπέδηση του αέρα που «βλέπει» το μεγάφωνο).

Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό η πλέον συνήθης σχεδίαση προβλέπει τα βασικά ηχεία εντοιχισμένα, όμως μια βάση monitor μπορεί να μετατραπεί ώστε να παίζει καλύτερα, προσθέτοντας ένα baffle [32] (ακουστική μονάδα ανάκλασης – διαχωρισμού του κύμματος που οδεύει εμπρός και πίσω από το ηχείο. Τα baffles πρέπει να είναι προσεκτικά κατασκευασμένα ώστε να μην χρωματίζουν το ηχείο. Ένας καλός σχεδιασμός baffle πρέπει να υποστηρίζει το μπάσο και να απορροφά το μεσαίο φάσμα. Η βάση που υποστηρίζει το midfield speaker μπορεί να μετατραπεί για να γίνει μέρος του τοίχου του baffle βοηθώντας επιπλέον στη διαχείριση του διογκούμενου μετώπου κύματος.

Στο σχήμα 25 βλέπουμε ένα στήσιμο των StudioTraps και TubeTraps που χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν ένα ελεύθερο στημένο βάθρο/baffle. Αυτό είναι το βασικό κομμάτι για το χτίσιμο του Attack Wall. Αυτό διορθώνει και καθαρίζει τις παραμορφώσεις που



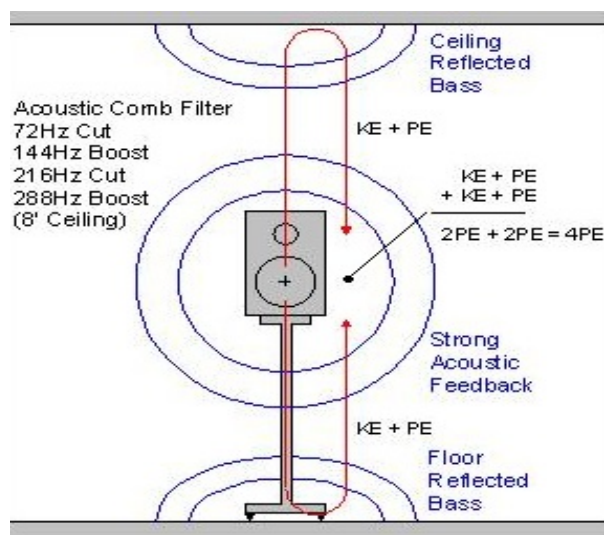
Σχήμα 25. Στήσιμο Ηχοαπορροφητικών σωλήνων, σε συνδυασμό με το baffle.

εισάγονται από το απευθείας σήμα και προκαλούνται από ηχείο που υποστηρίζεται στη μέση του χώρου (midfield) από βάση ηχείου.

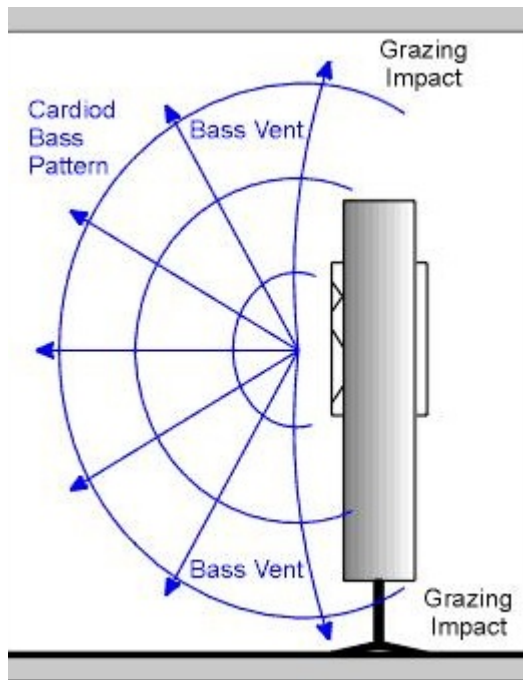
Η άκρη του baffle αυξάνει την αποτελεσματικότητα του woofer, όμοια με μια μικρή κόρνα που χρησιμοποιείται για να φορτώσει αέρα πάνω στο διάφραγμα ενός woofer. Το

διογκούμενο μέτωπο κύματος επίσης κατευθύνεται περισσότερο στο εμπρός παρά στο πίσω μέρος του ηχείου. Υπάρχει πάντα πολύ λιγότερο μπάσο στο χώρο πίσω από ένα woofer «γεμισμένο» με baffle, δηλαδή χωνεμένο στο baffle. Περισσότερο από «γέμισμα» αυτό το σύστημα baffle περιορίζεται και από τον τοίχο και από το πάτωμα, προκαλώντας το μέτωπο του μπάσου να χτυπήσει και το πάτωμα και το ταβάνι υπό γωνία.

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού φίλτρου κτένας (comb filter-wavetrains) από δυνατές και ταυτόχρονες ανακλάσεις σε πάτωμα και ταβάνι με το απευθείας σήμα στο πρόσωπο του ηχείου, μειώνεται προσθέτοντας πτερύγια στην άκρη της σανίδας του baffle (Σχήμα 26). Επιπρόσθετα με το ανακουφιστικό αποτέλεσμα του baffle, η ανάκλαση του μπάσου στο πάτωμα μπορεί να μειωθεί ακόμα προσθέτοντας έναν απορροφητή χαμηλών συχνοτήτων στη ζώνη ανακλαστικής πίεσης της ανάκλασης από τα πάτωμα.

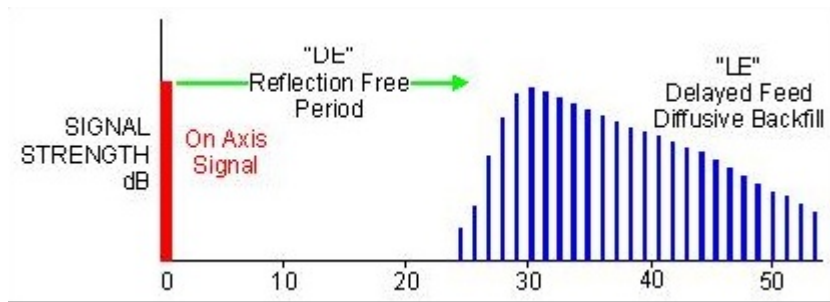


Σχήμα 24. Φίλτρο κτένας στη θέση του ηχείου.



Σχήμα 26. Πολικό διάγραμμα χαμηλών συχνοτήτων, εφόσον το ηχείο έχει «χωνευτεί» μέσα στο baffle.

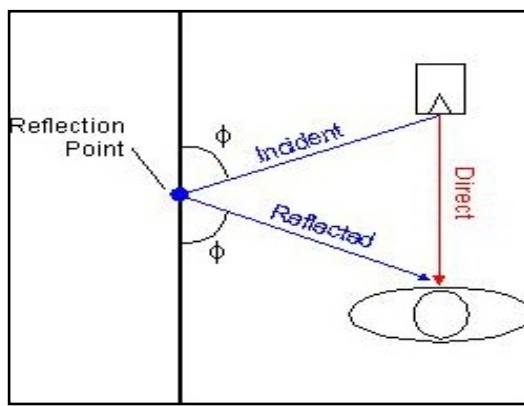
Το εύρος των υψηλών συχνοτήτων που εκπέμπεται από ένα ηχείο σε γενικές γραμμές κατευθύνεται κατευθείαν προς το αυτί του μηχανικού και στην άμεση τριγύρω περιοχή, σαν να είναι ένας φακός που δείχνει προς την σωστή περιοχή. Οι μπάσες συχνότητες δεν συμπεριφέρονται τόσο κατευθυντικά. Το μπάσο του απευθείας σήματος γρήγορα μεταβάλλεται από την επίδραση των ανακλάσεων του πατώματος και του ταβανιού με τον αέρα μπροστά από το woofer. Ένα βελτιωμένο και ακριβέστερο απευθείας σήμα μεταφέρεται στον μηχανικό όταν το ηχείο παίζει. Ο επόμενος τομέας σχεδιασμού studio είναι να εξελίξει μια ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις για να εργαστεί ο μηχανικός μέσα σε αυτή (σχήμα 27).



Σχήμα 27. Ζώνη (ή χρονική περίοδος) ελεύθερη από ανακλάσεις.

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τα διαφορετικά στοιχεία που επιδρούν σε ένα ηχείο που παίζει

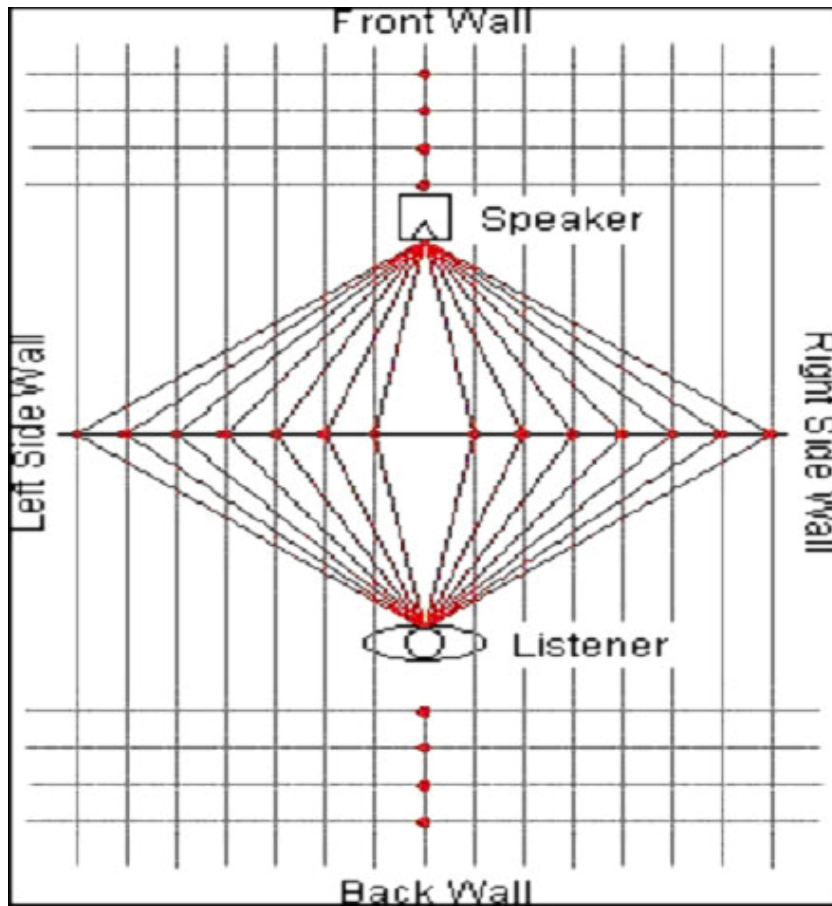
προς τον μηχανικό ενώ και οι δύο είναι δίπλα σε ένα τοίχο. Το απευθείας σήμα ταξιδεύει από το ηχείο στον μηχανικό, το ανακλώμενο σήμα ταξιδεύει προς τα έξω, χτυπάει τον τοίχο και ανακλάται προς τον ακροατή. Τα κύματα ήχου είναι ένα



Σχήμα 28. Ανάκλαση από τον πλαϊνό τοίχο.

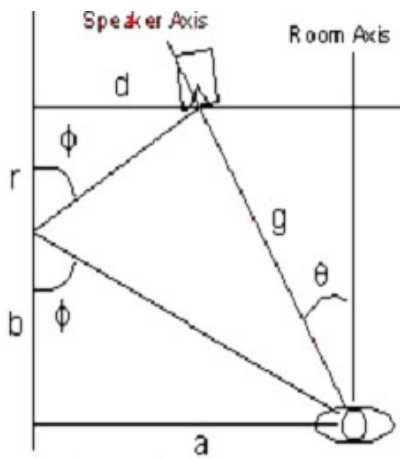
τρισδιάστατο φαινόμενο αλλά εδώ, μόνο αυτό το μέρος του μετώπου κύματος που στην πραγματικότητα αλληλεπιδρά με τον ακροατή παρακολουθείται. Παρατηρούμε ότι η γωνία πρόσπτωσης (incident) ισούται με την γωνία ανάκλασης. Σχήμα 28.

Ένα ηχείο και ο μηχανικός τοποθετούνται παράλληλα με τους πλαϊνούς τοίχους και κάθετα με τους μπροστινό και πίσω τοίχους. Ο εντοπισμός του σημείου ανάκλασης εξαρτάται από την θέση του τοίχου. Αυτό το γράφημα καταγράφει τα σημεία ανάκλασης για οποιοδήποτε αριθμό συνδυασμών πλαϊνών και «τελικών» τοίχων ξεκινούν πίσω από το ηχείο και πίσω από τον ακροατή και κινούνται προς τα πίσω με την θέση των τοίχων. Τα σημεία ανάκλασης των πλαϊνών τοίχων είναι πάντα στα μισά της απόστασης ανάμεσα στο ηχείο και τον ακροατή στην επιφάνεια του πλαϊνού τοίχου.



Σχήμα 29. Ανακλάσεις από τους πλαϊνούς (παράλληλους) τοίχους.

Αν το ηχείο μετακινηθεί προς τα πλάγια, μετά το απευθείας σήμα δεν ακολουθεί παράλληλη πορεία προς τους πλαϊνούς τοίχους. Το σημείο ανάκλασης δεν είναι πλέον στα μέσα του τοίχου. Γι' αυτήν την πιο γενική περίπτωση, η φόρμουλα μπορεί να γραφτεί έτσι ώστε η τοποθεσία του σημείου ανάκλασης είναι γνωστή βασισμένη στη γωνία ανάμεσα στον άξονα του ηχείου και τον άξονα του δωματίου και την απόσταση που ο τοίχος είναι από το ηχείο και την απόσταση που ο ακροατής είναι από το ηχείο σχήμα 30.



Σχήμα 30. Εύρεση ανάκλασης στη θέση του ηχολήπτη όταν το απευθείας σήμα δεν ακολουθεί παράλληλη πορεία προς τους πλαϊνούς τοίχους

$$r = f(d, \theta, g)$$

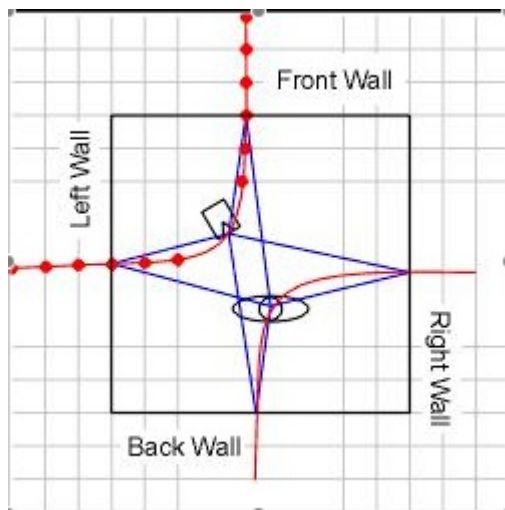
$$\text{Γωνία εξόδου} = \text{Γωνία πρόσπτωσης}: \frac{a}{b} = \frac{d}{r}$$

$$b = g \cos\theta - r$$

$$a = g \sin\theta + d \longrightarrow \frac{g \sin\theta + d}{g \cos\theta - r} = \frac{d}{r} \longrightarrow r(g \sin\theta + 2d) = dg \cos\theta$$

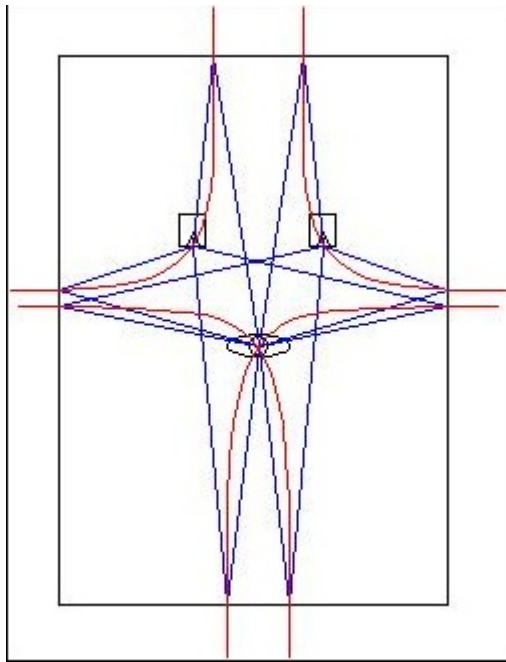
$$r = \frac{dg \cos\theta}{g \sin\theta + 2d} \text{ και αντίστοιχες σχέσεις για τους υπόλοιπους τοίχους}$$

Από τη στιγμή που η γωνία ανάμεσα στο ηχείο και τον άξονα του δωματίου είναι γνωστή τα σημεία ανάκλασης για κάθε τοποθεσία στους πλαϊνούς ή τελικούς τοίχους μπορούν να υπολογιστούν. Όταν τα αποτελέσματα τοποθετηθούν σε γράφημα ο τύπος των σημείων στο διάγραμμα έχει αυτό το αποτέλεσμα. Ένα δείγμα από σετ τοίχων δωματίου επιλέγεται για να παρουσιάσει που θα είναι τα σημεία ανάκλασης, σχήμα 31.



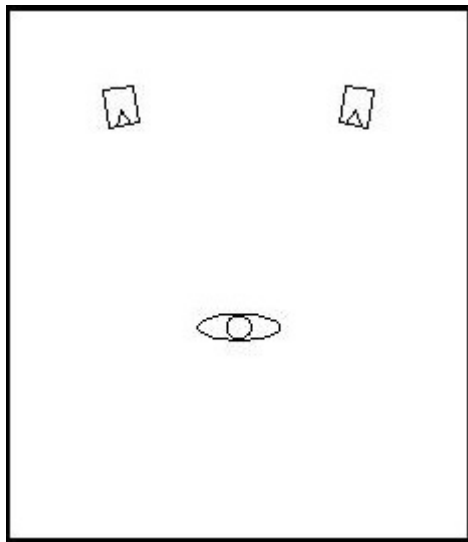
Σχήμα 31. Σημεία ανάκλασης.

Αν πάρουμε το απλό διάγραμμα ανάκλασης και αναποδογυρίζοντας το έχουμε ένα στερεοφωνικό διάγραμμα ανάκλασης. Το παρακάτω σχήμα είναι μια γενική παρουσίαση όλων των πιθανών σημείων ανάκλασης στον τοίχο για την τοποθέτηση σε ισοσκελές (iso) τρίγωνο των ηχείων και του ακροατή που τυπικά βρίσκουμε σε ένα control room ενός 2.0 studio ηχογράφησης. Ένα παράδειγμα δωματίου περιγράφεται και τα 8 σημεία ανάκλασης προσδιορίζονται. Μετά η πορεία κάθε ανάκλασης ακολουθείται, ξεκινώντας σε ένα ηχείο, συνδεδεμένη στη διατομή του τοίχου και του τόπου των σημείων και μετά ευθεία στον ακροατή. Υπάρχουν δύο σημεία ανάκλασης σε κάθε τοίχο.

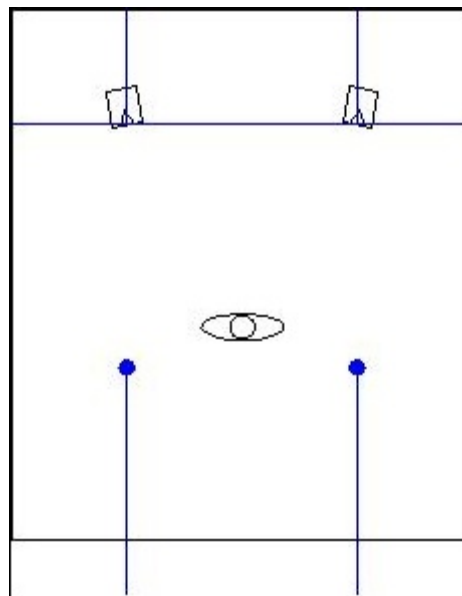


Σχήμα 32. Στερεοφωνικό διάγραμμα ανακλάσεων.

Ο μηχανικός ήχου χρειάζεται να εργαστεί σε μια ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις έτσι ώστε να ακούει τα ηχεία χωρίς να έχει παραμόρφωση σε μουσικό τόνο ή σε θέση ειδώλου εξαιτίας των πρώιμων ανακλάσεων. Γνωρίζοντας την πορεία που κάθε πρώιμη ανάκλαση παίρνει και μπλοκάροντάς την, μπορούμε να δημιουργήσουμε ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις. Εδώ, λαμβάνουμε υπόψη το «σετ» των ανακλάσεων που προκαλούν παραμόρφωση στη στέρεο μίξη σε οποιοδήποτε μεγέθους δωμάτιο και κανονίζουμε να μπλοκάρουμε όλες αυτές με ένα στήσιμο απλού τύπου gobo (αργκό στην γλώσσα των μηχανικών ήχου, προέρχεται από τις αγγλικές λέξεις “go – between” και χρησιμοποιείται για απορροφητές που έχουμε την δυνατότητα να αλλάξουμε την θέση τους στο χώρο, δηλαδή να τους μετακινήσουμε [37]).



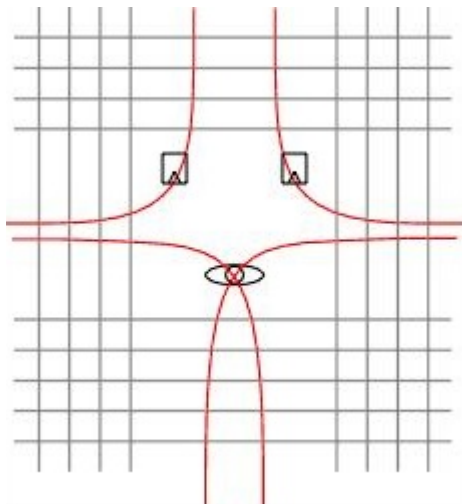
Σχήμα 33.



Σχήμα 34. Αντηχήσεις flutter echoes.

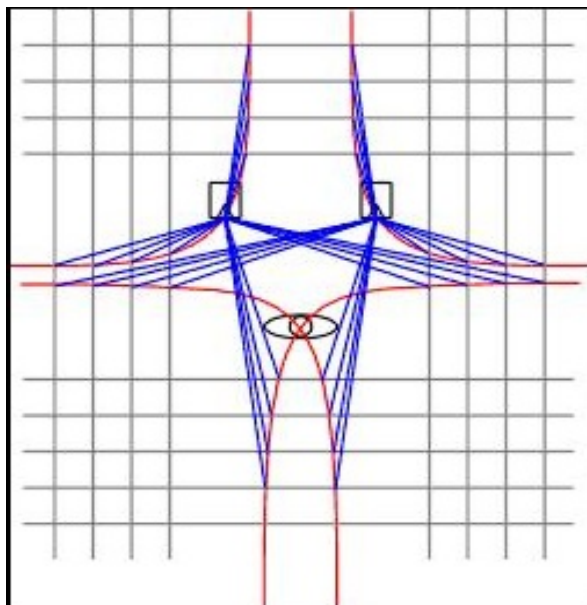
Το πρώτο «σετ» των σημείων ανάκλασης που χρειάζονται έλεγχο είναι εκείνα που προκαλούν αντηχήσεις flutter (flutter echoes).

Τα Flutter echo [33] περιγράφονται ως πολλαπλές ανακλάσεις σε μικρούς αντηχητικούς χώρους – μεταξύ παράλληλων τοίχων σαν ψευδοτόνος («καμπανιστός», «σφυριχτός», «κλίξ»), αφού το απευθείας σήμα έχει σταματήσει. Ο μηχανικός ακούει τον ήχο που εκπέμπεται από αυτές τις ανακλάσεις ακόμα και αν η θέση ακρόασης δεν είναι ευθυγραμμισμένη με τη διαδρομή του flutter. Η ικανότητα ο ήχος να ταξιδεύει κατά μήκος μιας επαναλαμβανόμενης διαδρομής πρέπει να εξαιρεθεί από το control room. Όπως πριν, ο τόπος όλων των πιθανών σημείων πρώιμων ανακλάσεων μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά για οποιοδήποτε συνδυασμό ηχείου-ακροατή, σχήμα 35.



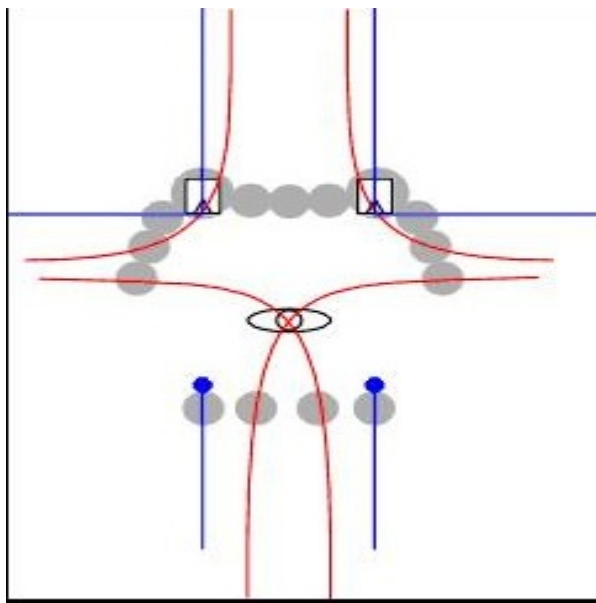
Σχήμα 35.

Τοποθετώντας γραφήματα το ένα πάνω στο άλλο με θέσεις των τοίχων, η ακριβής τοποθεσία της ανάκλασης του τοίχου μπορεί να υπολογιστεί (προσδιοριστεί). Το σχήμα 36 απεικονίζει τη διαδρομή που ακολουθείται από εκείνο το μέρος του ηχητικού κύματος που χτυπά στον τοίχο και μετά ανακλάται προς τον ακροατή. Μόνο το πρώτο μισό της συνολικής διαδρομής ανάμεσα σε ηχείο-τοίχο- ακροατή απεικονίζεται.



Σχήμα 36. Διαδρομή ηχητικού κύματος, από το ηχείο στους τοίχους.

Για να εξαφανίσουμε μια ανάκλαση τοίχου είναι αναγκαίο να μπλοκάρουμε την ακτίνα του ήχου που ταξιδεύει στη διαδρομή ανάκλασης ανάμεσα στο ηχείο και τον ακροατή. Ένας τρόπος να μπλοκάρουμε την πορεία του είναι να προσθέσουμε απορροφητικό υλικό στο σημείο ανάκλασης, μια κοινή πρακτική στα studio ηχογράφησης και άλλα ακουστικά δωμάτια υψηλής απόδοσης. Όμως, αυτό μπορεί επίσης να γίνει μπλοκάροντας την πορεία σε οποιαδήποτε άλλη τοποθεσία κατά μήκος της διαδρομής. (σχήμα 37).

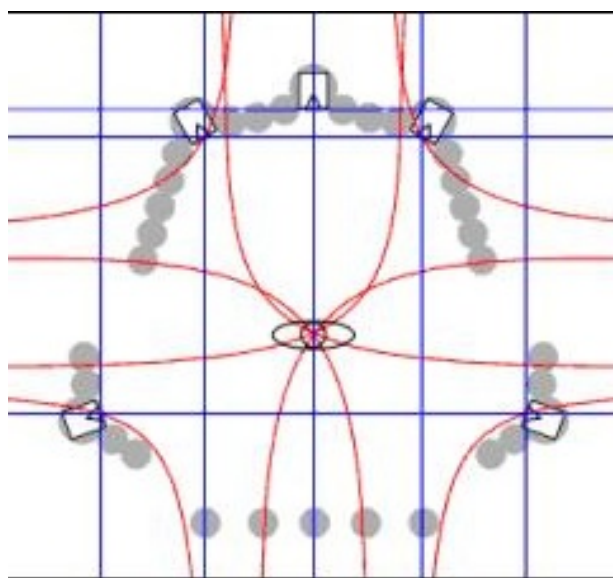


Σχήμα 37.

Αυτός ο σχηματισμός από ακουστικά baffle λέγεται Attack Wall. Μπλοκάρει αποτελεσματικά όλες τις πρώιμες διαδρομές ανάκλασης ανεξάρτητα από το πόσο κοντά ή μακριά είναι από τους τοίχους ως προς το στήσιμο της μίξης (mixing setup). Αυτό το ίδιο σύστημα μπορεί να στηθεί σε οποιαδήποτε από τις δύο άκρες ή απευθείας στη μέση οποιουδήποτε δωματίου και να μην αντιληφθούμε πρώιμες ανακλάσεις. Μπορεί να στηθεί εκτός άξονα σε ένα δωμάτιο με την απόσταση σε κάθε τοίχο να είναι διαφορετική χωρίς την δημιουργία πρώιμων ανακλάσεων. Ο σχηματισμός των baffle τοAttack Wall

μπλοκάρει αποτελεσματικά όλες τις πιθανές διαδρομές που δημιουργούν flutter echoes ή πρώιμες ανακλάσεις.

Στο σχήμα 38 φαίνεται τι συμβαίνει όταν 5 ηχεία στηθούν σε σχηματισμό surround, ηχεία στις 0.30 και 110 μοίρες. Ένας σχηματισμός από baffle μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπλοκάρει αποτελεσματικά όλες τις πιθανές διαδρομές του flutter και των πρώιμων ανακλάσεων. Στη θέση μίξης μια ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεων για οποιουδήποτε μεγέθους ορθογώνιο δωμάτιο. Ομοίως για κάθε τοποθεσία μέσα σε οποιοδήποτε δωμάτιο με την προϋπόθεση ότι ο ακουστικός άξονας θα κρατηθεί παράλληλος με τον άξονα του δωματίου. Η θεωρία πίσω από αυτό είναι απολύτως γενική και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιονδήποτε συνδυασμό playback με οποιονδήποτε προσανατολισμό μέσα σε δωμάτιο οποιουδήποτε σχήματος.



Σχήμα 38. Attack Wall για surround σχηματισμό.

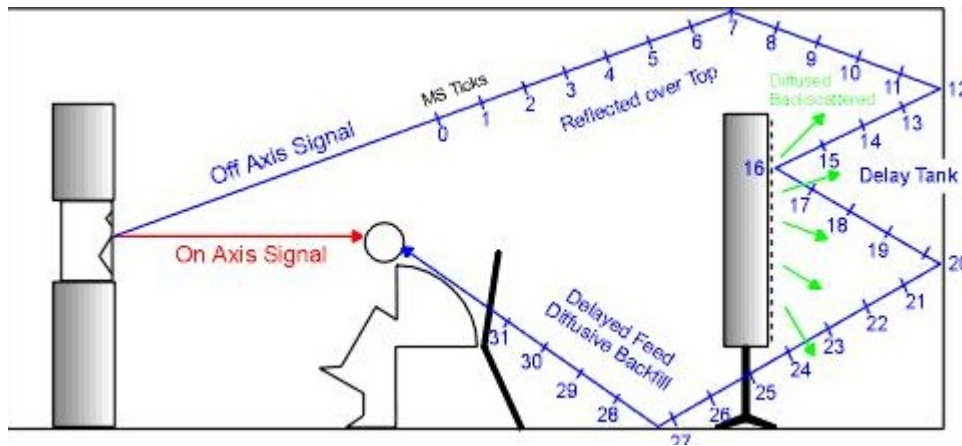
Η ακουστική υπογραφή ενός studio ηχογράφησης απαιτεί ένα καθαρό απευθείας σήμα ακολουθούμενο από περίπου 25ms χρόνου που θα είναι ελεύθερος από πρώιμες ανακλάσεις. Το σύστημα baffle/βάσης που παρουσιάζεται έχει αποδειχτεί ότι καθαρίζει και παρουσιάζει ένα καθαρό απευθείας σήμα σε ένα περιβάλλον ελεύθερο από πρώιμες ανακλάσεις. Αυτό

επίσης μπορεί να επιτευχθεί απλώς καλύπτοντας όλους τους τοίχους, το πάτωμα και το ταβάνι με απορροφητικό υλικό, σαν ένας ανηχοϊκός θάλαμος δηλαδή. Αν και οι μηχανικοί μπορούν να εργαστούν καλά σε τέτοιο χώρο, σύντομα εξαντλούνται.

Στους ανθρώπους δεν αρέσει η στέρηση των αισθήσεων, προσθέτοντας μια διαχυτική ουρά και ένα σήμα χρονικά καθυστερημένο, από ασυνάρτητο χάος δεν ολοκληρώνεται η αποστολή της σχεδίασης ενός studio.

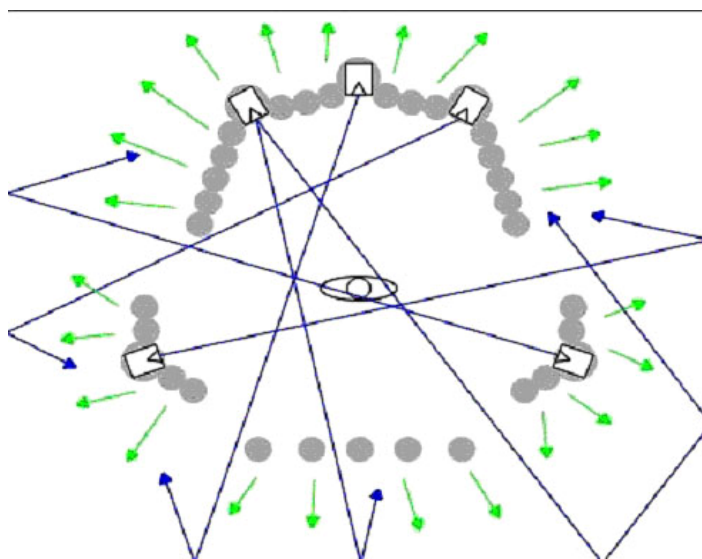
Αν και αρχικός τύπος LEDE studio ήταν μια μελέτησε καθαρή γεωμετρία. Το μπροστινό μέρος του δωματίου έγινε ακουστικά νεκρό και το πίσω μέρος έγινε ακουστικά διαχυτικό-ζωντανό. Με την προϋπόθεση ότι η απόσταση από τον πίσω τοίχο ήταν περίπου 4 m, οι απαιτήσεις για LEDE δωμάτιο ικανοποιήθηκαν. Όμως αυτά τα δωμάτια είχαν την καθαρή διαφοροποίηση το ένα άκρο να είναι νεκρό και το άλλο ζωντανό εξού και το ακρωνύμιο LEDE. Αλλά όταν εισερχόμαστε σε surround ακουστική δεν υπάρχει «άκρο». Ότι είναι το Νεκρό άκρο για το ένα ηχείο είναι το Ζωντανό άκρο για το άλλο. Τα 5.1 studio φαίνεται να μην είναι ικανά να τηρήσουν τις απαιτήσεις LEDE, τουλάχιστον χρησιμοποιώντας συμβατικές πρακτικές σχεδίασης.

Τα baffle που χρησιμοποιούνται στο Attack Wall είναι διπλής όψης. Η εμπρός όψη βλέπει την θέση μίξης και είναι απορροφητική σε όλο το φάσμα. Η πίσω πλευρά βλέπει τους γυμνούς τοίχους και είναι πολύ διαχυτική. Κάθε «σετ» από baffle είναι ανοιχτό στην κορυφή και στον πάτο. Ήχος που ανακλάται στο ταβάνι ανακλάται πάνω από τα baffle και ήχος που χτυπάει στο πάτωμα ανακλάται κάτω από τα baffle. Αυτές οι ακτίνες ανακλούνται στον τοίχο από πίσω και ανακλώνται πάνω στο διαχυτικό πίσω μέρος του baffle. Σε αυτό το σημείο ο ήχος έχει γίνει ικανοποιητικά καθυστερημένος και διάχυτος. Διαχέεται πίσω πάλι προς τον γυμνό τοίχο όπου τελικά ανακλάται πάλι πάνω και από κάτω από το baffle και μέσα στην θέση του μηχανικού, σχήμα 39.



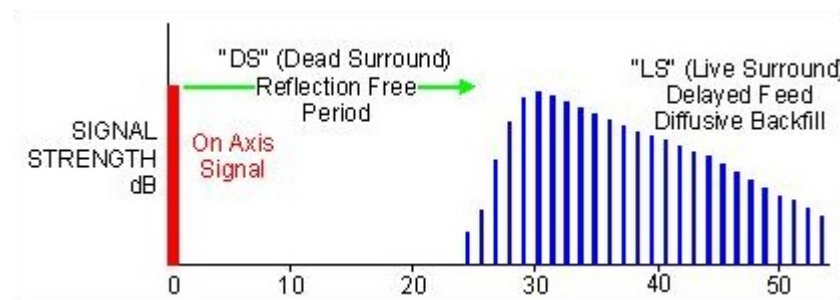
Σχήμα 39. Διαδρομή του σήματος σε μια διάταξη Attack Wall.

Επιπρόσθετα με τη δράση από πάνω και από κάτω με τις οπές πάνω και κάτω από τα baffle υπάρχουν και πλευρικές οπές στο συνολικό 5.1 Attack Wall στήσιμο. Ιχνηλατώντας τον ήχο από κάθε ηχείο που εξέρχεται από κάθε οπή και διαμέσου μιας διαδοχής από ανακλάσεις τοίχου, μια πλευρική κατάσταση από διαχυτικό backfill δημιουργείται. Ο χώρος ανάμεσα στην ανακλαστική πλευρά του συστήματος baffle και των γυμνών τοίχων λειτουργεί καλά όταν κρατηθεί σε απόσταση 1 έως 3 μέτρα. Μεγαλύτερα δωμάτια διατηρούν την ελεύθερη από ανακλάσεις κατάσταση αλλά η εξόρμηση του διάχυτου backfill γίνεται περισσότερο χρονικά καθυστερημένη και πιο αδύναμη σε επίπεδο έντασης.



Σχήμα 40. Λειτουργία του Attack Wall σε διάταξη surround.

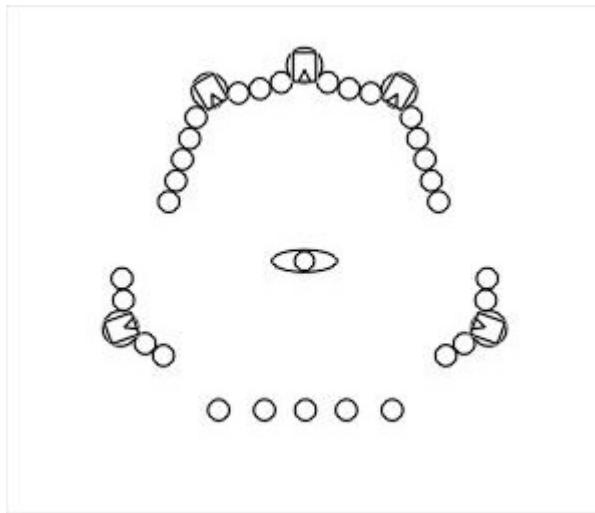
Χρησιμοποιώντας κατάλληλα σχεδιασμένα και τοποθετημένα baffle, ουσιαστικά gobos, τα τρία στάδια του κατάλληλου σχεδιασμού ενός studio μπορούν να ικανοποιηθούν. Το δυνατό και χωρίς παραμόρφωση απευθείας (direct) σήμα εκτοξεύεται από τη σειρά των ηχείων. Η αλληλουχία-διαδοχή των πρώιμων ανακλάσεων που παραμορφώνουν την μουσικότητα και το είδωλο εξαλείφονται και ένα backfill (καθυστερημένες ανακλάσεις) από καθυστερημένη ενέργεια διάχυσης επιστρέφει στο περιβάλλον της μίξης. Το πιο ενδιαφέρον σημείο εδώ είναι ότι όχι μόνο τα ηχεία είναι σε surround σχηματισμό αλλά το διαχυτικό backfill επίσης μεταφέρεται στον μηχανικό σε surround format (surround διάταξη). Το παλιομοδίτικο Live End Dead End studio δεν μπορεί να παράγει περιβάλλον μίξης surround. Σε αυτό το καινούργιο μέσο ο προσδιορισμός για ETC σχεδιασμό studio παραμένει ο ίδιος αλλά η γεωμετρική και η παρουσίαση στο χώρο έχει αλλάξει για πάντα. Τα νέα κριτήρια σχεδίασης προσδιορίζονται από το ακρωνύμιο LSDS (Live Surround Dead Surround).



Σχήμα 41. Ακουστική υπογραφή control room τύπου LSDS.

Η πρωταρχική ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις που πρώτα επινοήθηκε από τον Chip Davis ήταν ένας γεωμετρικός χώρος που ήταν ανακλαστικός αλλά διαμορφωμένος σε διαστάσεις και σχήμα ώστε να αποφεύγονται οι ανακλάσεις κατά τα πρώτα 25ms που ακολουθούν το απευθείας σήμα. Κανένας στην πραγματικότητα δεν έχτισε αυτά τα δωμάτια αλλά η ιδέα γέννησε δύο δεκαετίες μονοδιάστατου Live End Dead End σχεδιασμού. Τώρα ο σχεδιασμός studio έχει κλείσει ολόκληρο κύκλο εξαιτίας των δήθεν αξεπέραστων αποκλειστικών

απαιτήσεων για την surround τοποθέτηση των ηχείων στο studio. Ότι ξεκίνησε σαν μια γεωμετρική surround σχεδίαση studio σαν ιδέα, έχει γίνει μια ακουστική surround πραγματικότητα. Αν και χρειάστηκαν TubeTraps για να προχωρήσει η ιδέα, θα είναι θέμα των επαγγελματιών σχεδιαστών studio να υιοθετήσουν αυτό το επόμενο στη σχεδίαση studio, τον LSDS τύπο studio.[31].



Σχήμα 42. Κάτοψη control room τύπου LSDS με την τεχνική Attack Wall.

Παρατηρήσεις.

Το Attack Wall είναι μία πολύ ενδιαφέρον θεωρία, επίσης φαίνεται αρκετά βολικό σύστημα εφόσον μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιοδήποτε χώρο και γενικότερα βασίζεται σε ορθές αρχές. Από την άλλη πλευρά είναι κάτι καινούργιο με αποτέλεσμα να χρειάζεται χρόνος και εμπειρία όσον αφορά την αποτελεσματικότητά του. Επίσης δεν αναφέρονται συντελεστές ανάκλασης, διάχυσης και απορρόφησης πράγμα το οποίο δεν αποδεικνύει πλήρως τους ισχυρισμούς των δημιουργών του.

3.5 ESS (Early Sound Scattering) Control Room

Όπως έχουμε δει τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε κατά τη σχεδίαση ή βελτίωση της ακουστικής ενός control room, είναι οι φασματικές και φασικές αλλοιώσεις που έχουν ως αποτέλεσμα τη διαστρέβλωση της στερεοφωνικής εικόνας.

Αν έχουμε τη τύχη να σχεδιάσουμε από την αρχή ένα control room τότε θα μπορούμε να επιλέξουμε της καταλληλότερες διαστάσεις για το χώρο που θέλουμε. Έτσι θα επιτύχουμε βέλτιστη απόδοση όσον αφορά την φασματική ομοιογένεια στη περιοχή των στάσιμων κυμάτων. Δηλαδή θα έχουμε 'κουρδίσει' το χώρο έτσι ώστε αν μην έχει πολλαπλές συμπτώσεις ιδιοσυχνοτήτων καθώς και μεγάλα κενά μεταξύ αυτών. Εφόσον έχουμε καταφέρει κάτι τέτοιο, η τεχνοτροπία ενός ESS Control Room όπως αναφέρει ο Andrew Parry ο εμπνευστής της, αναλαμβάνει της άλλες δύο περιοχές, δηλαδή τη περιοχή διάχυσης και την περιοχή ανάκλασης καθώς και τη συμπεριφορά της φάσης για αυτές τις συχνοτικές περιοχές,. Κατά το ESS control room 'ντύνουμε' τον μπροστά τοίχο με διαχυτές μεγάλου εύρους, ενώ χρησιμοποιούμε ηχεία πλήρης ημισφαιρικής διασποράς τα οποία είναι κατασκευασμένα με σκοπό να εντοιχιστούν. Εντοιχίζουμε τα ηχεία στο μπροστά μέρος του τοίχου που έχουμε και τους διαχυτές ενώ η μπροστά επιφάνεια των ηχείων παραμένει ελεύθερη, δηλαδή δε τα καλύπτουμε με κάποιο υλικό. Τέλος όλο το υπόλοιπο σώμα του δωματίου πρέπει να είναι αρκετά απορροφητικό.



Σχήμα 1. Control Room με προδιαγραφές ESS

Ως γνωστό η στερεοφωνική εικόνα βασίζεται σε μία ψευδαίσθηση που δημιουργείται στον άνθρωπο λόγω του συνδυασμού της διαφοράς έντασης και φάση των δύο ηχείων που την αναπαράγουν, Για να διατηρηθεί λοιπόν η στερεοφωνική εικόνα στην αντίληψη του ανθρώπου πρέπει η διαφορά έντασης μεταξύ των ηχείων να συμβαδίζει με τη διαφορά φάσης που τελικά φτάνει στον ακροατή, όπως γίνεται και στη φύση. Αν κάτι από αυτά τα στοιχεία διαστρεβλωθεί τότε σαν αποτέλεσμα έχουμε την καταστροφή της στερεοφωνικής εικόνας, που συνεπάγεται ότι η θέση στο χώρο της ηχητικής πληροφορίας που αναπαράγουν τα ηχεία δεν είναι στην πραγματικότητα αυτή που ακούμε. Ένα βασικό μερίδιο της φασματική και φασικής αλλοίωσης στην περιοχή διάχυσης και ανάκλασης το έχουν οι πρώτες ανακλάσεις, που μπορούν να καταφθάσουν στη θέση του ηχολήπτη μετά από κάποια χιλιοστά του δευτερόλεπτου, λόγω της ύπαρξης λείων, σκληρών, επίπεδων επιφανειών, όπως είναι το τζάμι ενός παραθύρου, ή πόρτας αλλά κυριότερα η ύπαρξη της λείας επιφάνειας της κονσόλας. Έχουν σχεδιαστεί διάφορες τεχνοτροπίες κατασκευής control room με σκοπό να αποφύγουν της πρώτες ανακλάσεις όπως αναφέρονται παραπάνω. Ωστόσο η τεχνοτροπία των ESS control room βασίζεται στην υψηλά διαχυτική μπροστά περιοχή που είναι τόσο τυχαία που φτάνει τα χαρακτηριστικά του

λευκού θορύβου. Αυτό έχει ως σκοπό να δημιουργήσει ένα τόσο διάχυτο πεδίο μπροστά, ώστε αν δημιουργείται μία ανάκλαση λόγω της ύπαρξης μίας λείας επιφάνειας, απλά να είναι μία ανάκλαση μέσα στις υπόλοιπες και τίποτα παραπάνω. Όπως καταλαβαίνουμε όσο πιο πολύ διάχυτο είναι το πεδίο μπροστά, τόσο πιο ανεπαίσθητες θα είναι οι πρώτες ανακλάσεις καθώς και όλες οι ανακλάσεις που μπορούν να δημιουργηθούν από τις λείες επιφάνειες του δωματίου. Τη γίνεται όμως με τη στερεοφωνική εικόνα, πως διατηρείται μετά από όλα αυτά? Δημιουργώντας ένα διάχυτο πεδίο μπροστά μας αυτό που καταφέρνουμε να κάνουμε όσον αφορά τα στερεοφωνική εικόνα, είναι να την αντιλαμβανόμαστε πλέον μόνο από την ύπαρξη της διαφοράς έντασης των ηχείων και μόνο. Τα ηχεία που είναι εντοιχισμένα τροφοδοτούν τους διαχυτές που βρίσκονται κοντά τους και αυτοί με τη σειρά τους δημιουργούν διάχυση στο χώρο. Οι υπόλοιποι διαχυτές αναλαμβάνουν να διαχύσουν οποιαδήποτε ηχητική ενέργεια πέσει πάνω τους. Έχοντας ως παράγοντα δημιουργίας της στερεοφωνικής εικόνας, μόνο τη διαφορά έντασης μεταξύ των ηχείων, η hot spot θέση του ηχολήπτη, δηλαδή η θέση για την οποία έχει σχεδιαστή όλο το δωμάτιο για να έχει τη όσο δυνατόν καλύτερη ακουστική, πλέον δεν είναι μία. Αυτό βέβαια προϋποθέτει ότι έχουμε ένα αρκετά μεγάλο χώρο όπου έχει τις κατάλληλες αναλογίες έτσι ώστε να έχει μία ομαλή περιοχή στάσιμων κυμάτων σε διάφορα σημεία. Ωστόσο αυτό το μοντέλο που παρουσιάζουμε είναι κάτι το ιδανικό, μιας και δε μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα τέλεια διάχυτο πεδίο στη πραγματικότητα. Έτσι αρχίζοντας να κάνουμε εκπτώσεις από το ιδανικό μοντέλο, για τους όποιους λόγους (οικονομικούς, λειτουργικότητας, εμφάνισης, αδυνατότητας δημιουργίας κ.α.). τότε μειώνεται και η αποτελεσματικότητα της τεχνοτροπίας. Η αλήθεια είναι ότι τα ESS control room είναι σχετικά νέα ακουστική τεχνοτροπία για μικρούς χώρους, με αποτέλεσμα να μην έχουμε προσωπική εμπειρία με ένα τέτοιο χώρο έτσι ώστε να δούμε και να μετρήσουμε κατά πόσο ισχύουν όλα αυτά, και κατά πόσο μειώνεται η αποτελεσματικότητα ενός τέτοιου δωματίου κάνοντας κατασκευαστικές εκπτώσεις. Ωστόσο στο εξωτερικό έχουν αρχίσει εδώ και μία εικοσαετία περίπου να κατασκευάζονται

τέτοιο χώροι, σε μεγάλα studio, ενώ συνηθίζεται να συναντάμε τέτοιους χώρους σε home studio γνωστών καλλιτεχνών. Παρακάτω θα δούμε και μερικές άλλες φωτογραφίες χώρων που έχουν σχεδιαστεί με την τεχνοτροπία των ESS. [35, 36]



Σχήμα 2. Control Room με προδιαγραφές ESS



Σχήμα 3 Control Room με προδιαγραφές ESS



Σχήμα 4 Control Room με προδιαγραφές ESS

3.6 Πολυκάναλο 5.1 Control Room (Multichannel) με έλεγχο των πρώτων ανακλάσεων

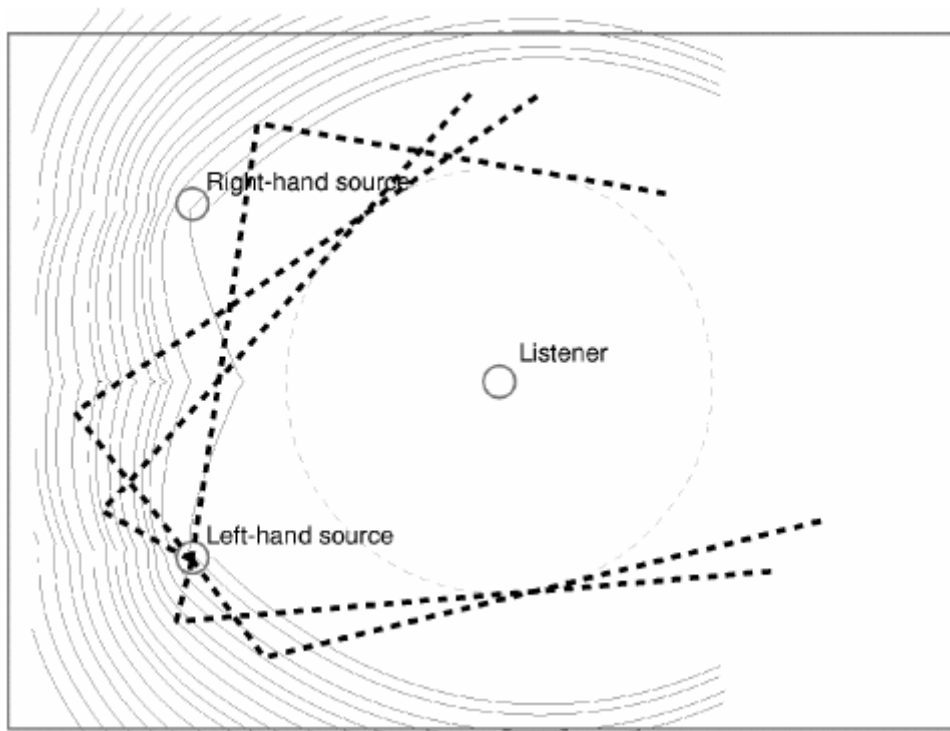
Η ανάγκη για έλεγχο των ανακλάσεων είναι εντονότερη στα πολυκάναλα ηχητικά συστήματα. Οι αυξημένες ηχητικές πηγές διεγείρουν περισσότερο τα φυσικά όρια του χώρου και προκαλούνται πολλαπλάσιες ανακλάσεις σε σχέση με τα στερεοφωνικά συστήματα ήχου.

Δεδομένα, προϋποθέσεις και υλοποίηση διαχείρισης πρώτων ανακλάσεων – Αρχικοί στόχοι σχεδίασης για στερεοφωνικό σύστημα.

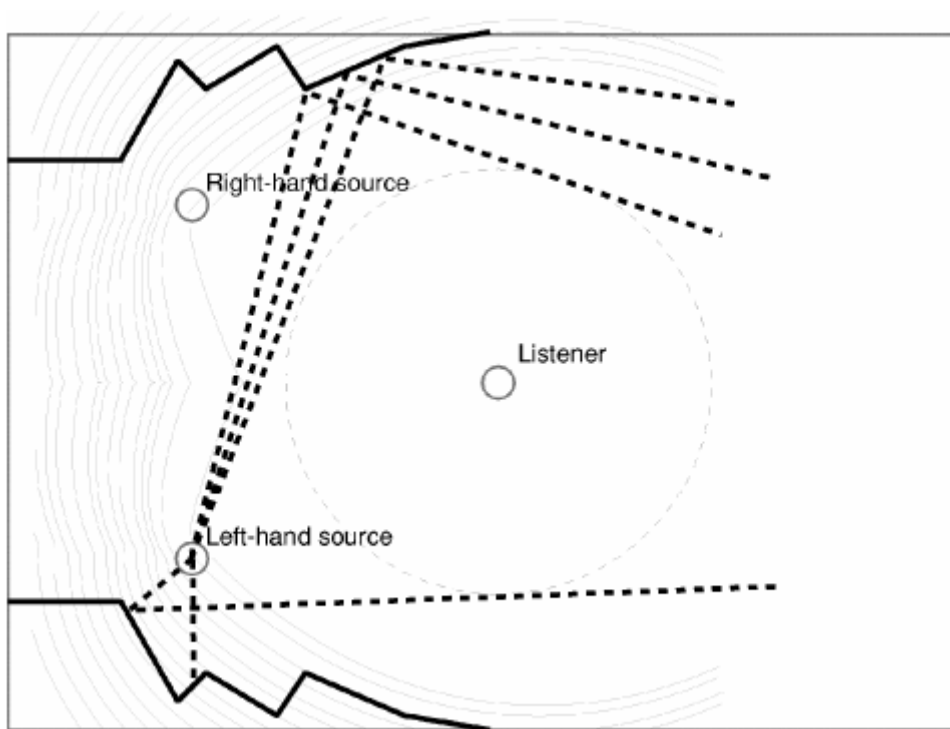
Για να τεθούν οι βάσεις στην παρακάτω επιχειρηματολογία πρέπει να αναζητηθεί το τι είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί όσον αφορά την πρακτικότητα υλοποίησης του εγχειρήματος αλλά και τις ψυχοακουστικές

ιδιότητες των πρώτων ανακλάσεων. Αρχικός στόχος του μελετητή είναι να επιτευχθεί η στάθμη των πρώτων ανακλάσεων, μέχρι 20ms, να είναι κατά 20 dB μειωμένη σε σχέση με το απευθείας πεδίο [26]. Αυτό εξασφαλίζει την μη διατάραξη της εικονικής χωροτοποθέτησης κατά τη διαδικασία της μίξης, όπου τα κανάλια δρομολογούνται στα ηχεία με διαφορά ηχητικής στάθμης για να δημιουργηθεί η ψευδαίσθηση της εικονικής χωροτοποθέτησης (panning).

Όπως είναι φυσικό δεν μπορεί να γίνει έλεγχος των πρώτων ανακλάσεων με ηχοαπορροφητικές διατάξεις στο σύνολο του χώρου ακρόασης, διατηρώντας παράλληλα την διοχετευμένη ενέργεια μέσα στο χώρο, αποφεύγοντας ένα ακουστικά «νεκρό» χώρο. Είναι επιβεβλημένο να οριστεί ένα συγκεκριμένο πεδίο ακρόασης, το οποίο να έχει μειωμένες πρώτες ανακλάσεις (reflection-free zone). Πρέπει το πεδίο αυτό να μην είναι περιορισμένο για ακρόαση αποκλειστικά ενός και μόνο ατόμου ή ενός ατόμου που να είναι κινητικά περιορισμένο. Έτσι με αυτά τα δεδομένα αναπτύχθηκε μια νέα τάση σχεδίασης όπου οι πρώτες ανακλάσεις διοχετεύονται με κατάλληλες διατάξεις εκτός πεδίου ακρόασης προσφέροντας στον ηχολήπτη μια στερεοφωνική εικόνα ανεξαρτήτως των ακουστικών ιδιοτήτων του εκάστοτε χώρου ακρόασης. Για να δημιουργηθεί αυτή η ζώνη ελεύθερη από πρώτες ανακλάσεις θα έπρεπε να διαμορφωθεί μια κυρτή διάταξη απ' όπου θα ανακλούνται τα ηχητικά κύματα όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Όμως είναι κατανοητό πως αυτή η διάταξη είναι ογκώδης καθώς και πολύ δαπανηρή για να υλοποιηθεί. Πρακτική λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η εφαρμογή επίπεδων κεκλιμένων επιφανειών όπως φαίνονται στο σχήμα 2. (για στερεοφωνικό σύστημα).



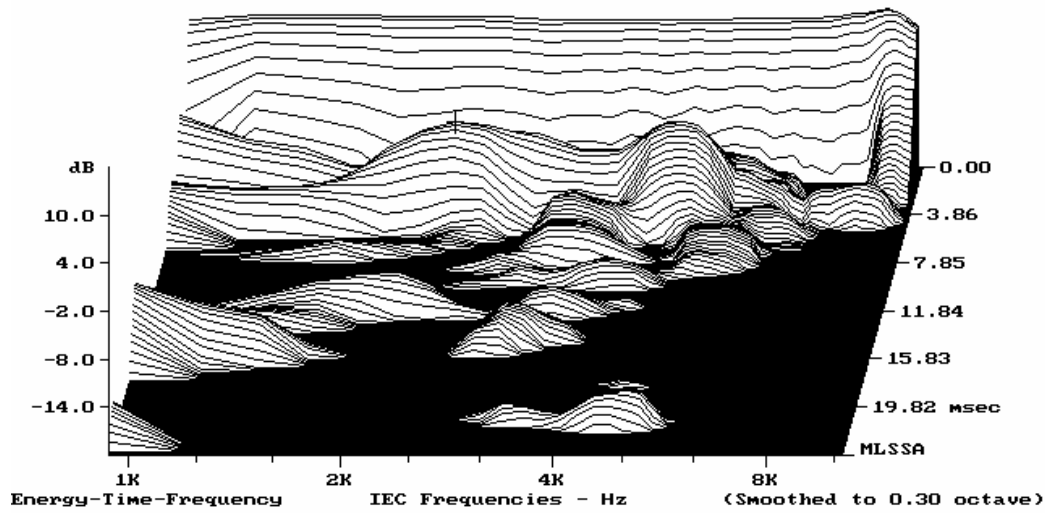
Σχήμα 1. Νοητή κυρτή διάταξη διαχείρισης ανακλάσεων.



Σχήμα 2. Επίπεδες κεκλιμένες επιφάνειες διαχείρισης ανακλάσεων

Στο σχήμα φαίνεται το πεδίο ακρόασης από όπου οι ανακλάσεις δεν διέρχονται, σε πρώτο τουλάχιστον στάδιο. Όπως φαίνεται και στα σχήματα 3, 4,

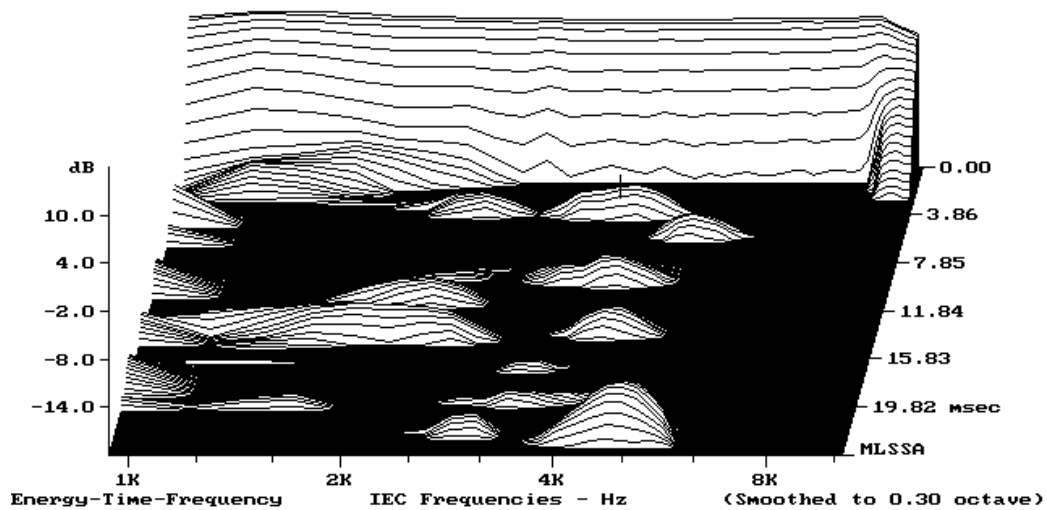
τα αποτελέσματα είναι εμφανή και σε μετρήσεις των πρώτων ανακλάσεων στο ύψος ακρόασης για το συγκεκριμένο χώρο.



-7.78 dB, 2350 Hz (10), 4.389 msec (33)

ESC to exit, F1 to print, F2 and cursor keys move cursor MLSSA: Waterfall

Σχήμα 3. Μέτρηση πρώτων ανακλάσεων πριν την εφαρμογή των κεκλιμένων επιφανειών.



-16.53 dB, 3994 Hz (17), 3.857 msec (29)

ESC to exit, F1 to print, F2 and cursor keys move cursor MLSSA: Waterfall

Σχήμα 4. Μέτρηση πρώτων ανακλάσεων πριν την εφαρμογή των κεκλιμένων επιφανειών

Τα διαγράμματα αφορούν τις συχνότητες 1 – 8 kHz, σε χρονικό παράθυρο μέχρι τα 20 ms.

Παραμένει μια επιφάνεια όπου δεν ελέγχονται οι ανακλάσεις κοντά στα 20 ms που προέρχεται από τον πίσω τοίχο. Με την απόσταση που πρέπει να διανύσει το ηχητικό κύμα η στάθμη μειώνεται κατά 10 dB. Η κατάλληλη διάχυση και απορρόφηση στο σημείο αυτό θα το περιορίσουν ακόμη περισσότερο.

Υποθέσεις και απλοποιήσεις στη σχεδίαση

Για την μελέτη τέτοιου είδους σχεδίασης θεωρείται πως τα ηχητικά κύματα διαδίδονται με τον τρόπο διάδοσης των κυμάτων του φωτός, δηλαδή σε ευθείες γραμμές και υφίστανται κατοπτρικές ανακλάσεις. Σε ακουστικά σήματα όμως ενός σύνηθες ηχογραφημένου ηχητικού υλικού, το μήκος κύματος των συχνοτήτων αφορά ένα εύρος μεγέθους του μήκους κύματος περίπου μεταξύ 20 mm και 10 m. Για να επιτευχθεί κατοπτρικού τύπου ανάκλαση σε όλο το συχνοτικό εύρος θα έπρεπε οι διαστάσεις των κεκλιμένων επιφανειών να είναι ανάλογου μεγέθους. Αυτό δεν είναι δυνατό για την περίπτωση των χαμηλών συχνοτήτων. Για συχνότητες όμως πάνω από 1 kHz είναι απολύτως εφικτό. Είναι γεγονός όμως ότι οι πληροφορίες που αφορούν την εικονική χωροτοποθέτηση εμπεριέχονται σε συχνότητες των 500 Hz και πάνω. Άρα, η αδυναμία εκτροπής των ανακλάσεων από το σημείο ακρόασης των χαμηλών συχνοτήτων δεν επηρεάζει τη σχεδίαση. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην συχνοτική περιοχή 500 – 700 Hz, καθώς η περίθλαση σε αυτές τις συχνότητες είναι έντονη εάν παρεμβληθεί αντικείμενο ανάλογο του μήκους κύματος των συχνοτήτων αυτών. Η περίθλαση θα διαχύσει την ενέργεια με αποτέλεσμα να μην διέπονται οι ανακλάσεις από την απλή αρχή διάδοσης βάσει της γεωμετρίας του χώρου.

Το πεδίο ακρόασης περιορίζεται λόγω της περίθλασης αυτής. Για συνηθισμένα μεγέθη χώρων ακρόασης φτάνει στο μέγιστο τα 3 m στο οριζόντιο

επίπεδο και λόγω της περιορισμένης δυνατότητας μεταβολής του ύψους του δωματίου, που είναι κοντά στα 3 – 4 m, το πεδίο στο κάθετο επίπεδο δεν υπερβαίνει τα 2,5 m.

Στη σχεδίαση θεωρείται δεδομένη η ύπαρξη μια κονσόλας και μιας επίπεδης επιφάνειας εργασίας, οι οποίες δίνουν την δυνατότητα ελέγχου των ανακλάσεων που προέρχονται από το έδαφος. Τα ηχητικά κύματα βυθίζονται πίσω από την κονσόλα και με την κατάλληλη τοποθέτηση ηχοαπορροφητικού υλικού πίσω από την κονσόλα περιορίζεται η επίδραση τους και η ανάκλαση τους εκ νέου. Επίσης τα ηχεία θεωρούνται παντοκατευθυντικές πηγές.

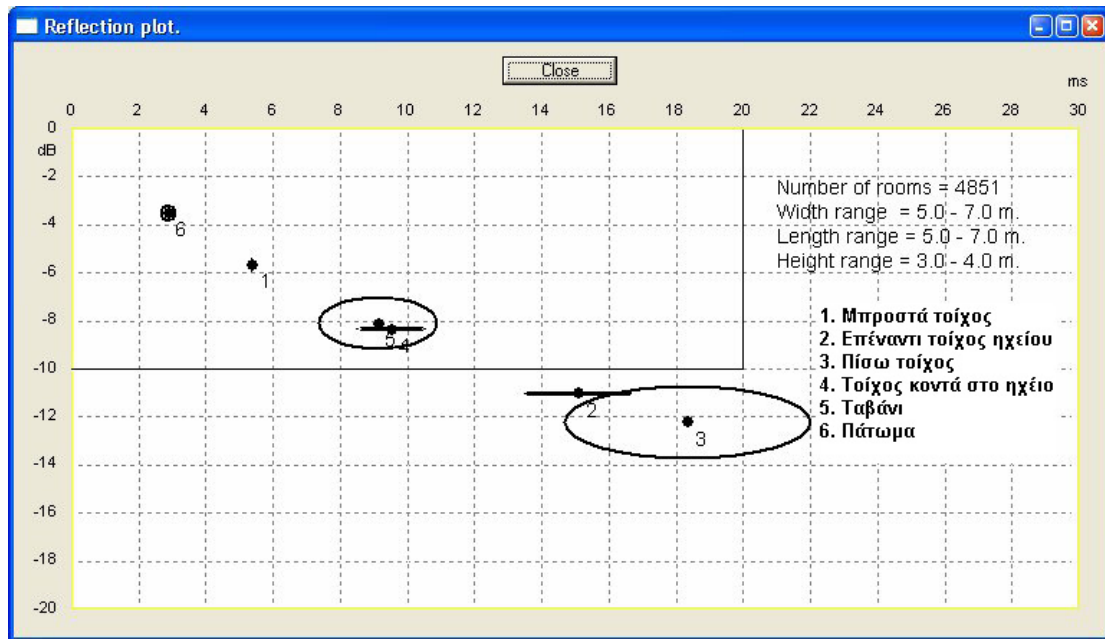
Επέκταση σχεδίασης για πολυκάναλα ηχητικά συστήματα

Οι αρχικοί στόχοι σχεδίασης, ήτοι οι ανακλάσεις μέχρι τα 20 ms να είναι -20 dB σε σχέση με το απευθείας πεδίο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4 δεν καλύφθηκαν επαρκώς. Έτσι για τη σχεδίαση του control room για πολυκάναλα ηχητικά συστήματα οι στόχοι είναι κάπως λιγότερο απαιτητικοί. Συνήθως επιδιώκεται μέχρι τα 15 ms μείωση της ανακλώμενης ηχητικής στάθμης κατά 10 dB.

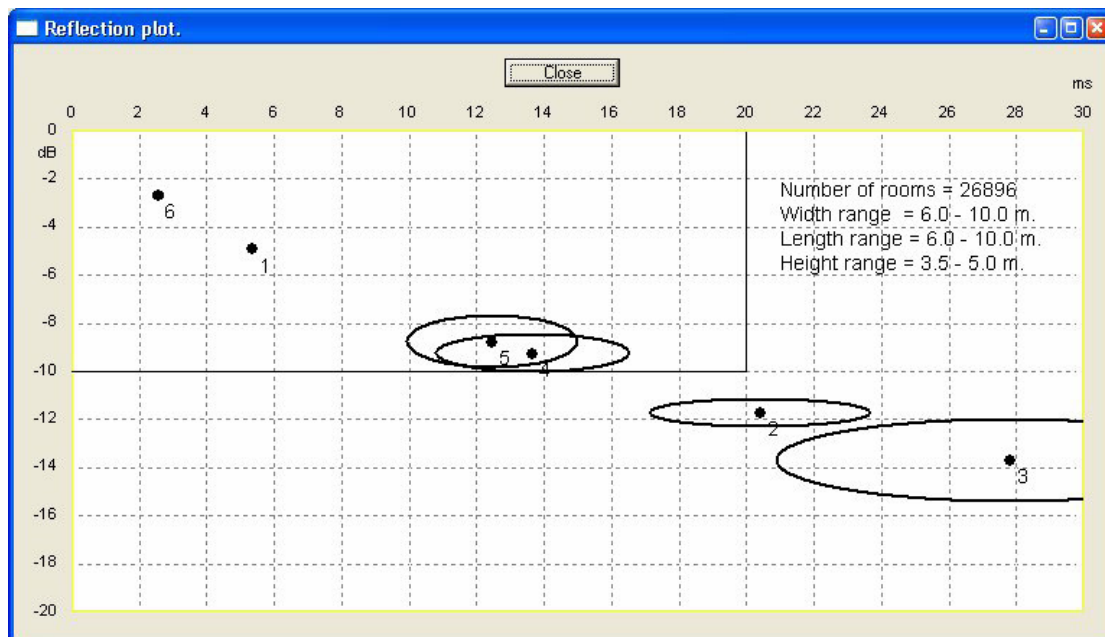
Σε αντίθεση με την αρχική σχεδίαση λαμβάνεται υπόψη η εξασθένηση των ηχητικών κυμάτων σε σχέση με την απόσταση. Εάν δηλαδή η απόσταση του ακροατή από τα ηχεία είναι 2 μέτρα οποιαδήποτε ανάκλαση με διαδρομή πάνω από 6,34 m είναι ικανή να εξασθενίσει τον ήχο κατά 10 dB.

Μελετώντας εκτενέστερα τις πρώτες ανακλάσεις που παρουσιάζονται από ένα ηχείο, τοποθετημένο σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, στη θέση του ακροατή σε τυπικά δωμάτια παρατηρείται πως οι ανακλάσεις για μεγάλο εύρος διαφορετικών διαστάσεων εμφανίζονται σε όμοιες αναλογίες χρόνου και πλάτους (σχήμα 5). Οι ανακλάσεις από το πάτωμα και το ταβάνι παρουσιάζονται στο ίδιο χρονικό διάστημα με ίδιο πλάτος. Αυτό είναι εύκολα κατανοητό λόγω της χωροθέτησης ηχείου και ακροατή που είναι βασισμένη σε

διεθνή πρότυπα και του ύψους του δωματίου που κυμαίνεται στα 3 – 4 m σε όλα τα τυπικά δωμάτια ακρόασης.



Σχήμα 5. Ανακλάσεις υπολογισμένες από λογισμικό για τυπικά μικρά δωμάτια.



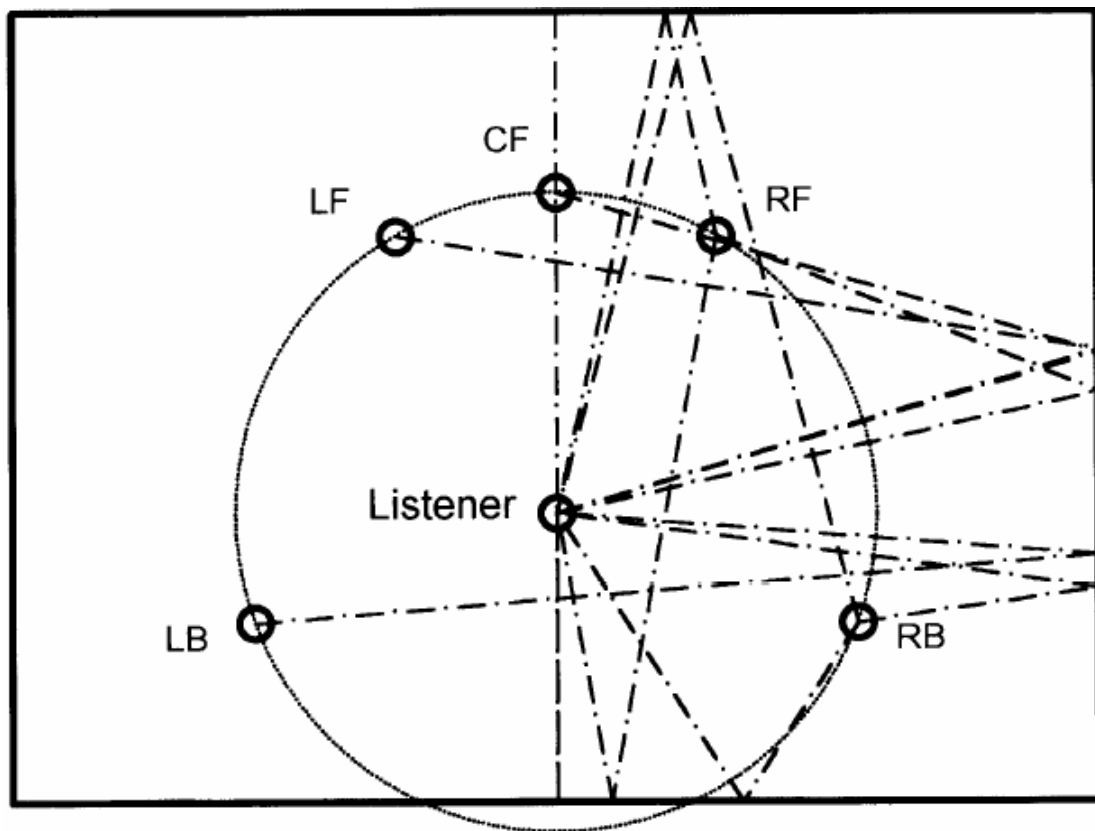
Σχήμα 6. Ανακλάσεις υπολογισμένες από λογισμικό για τυπικά μεγάλα δωμάτια.

Το ίδιο συμβαίνει με τον τοίχο που είναι κοντά στο ηχείο λόγω της τυποποιημένης γεωμετρίας στην τοποθέτηση των ηχείων. Η απόσταση που έχει

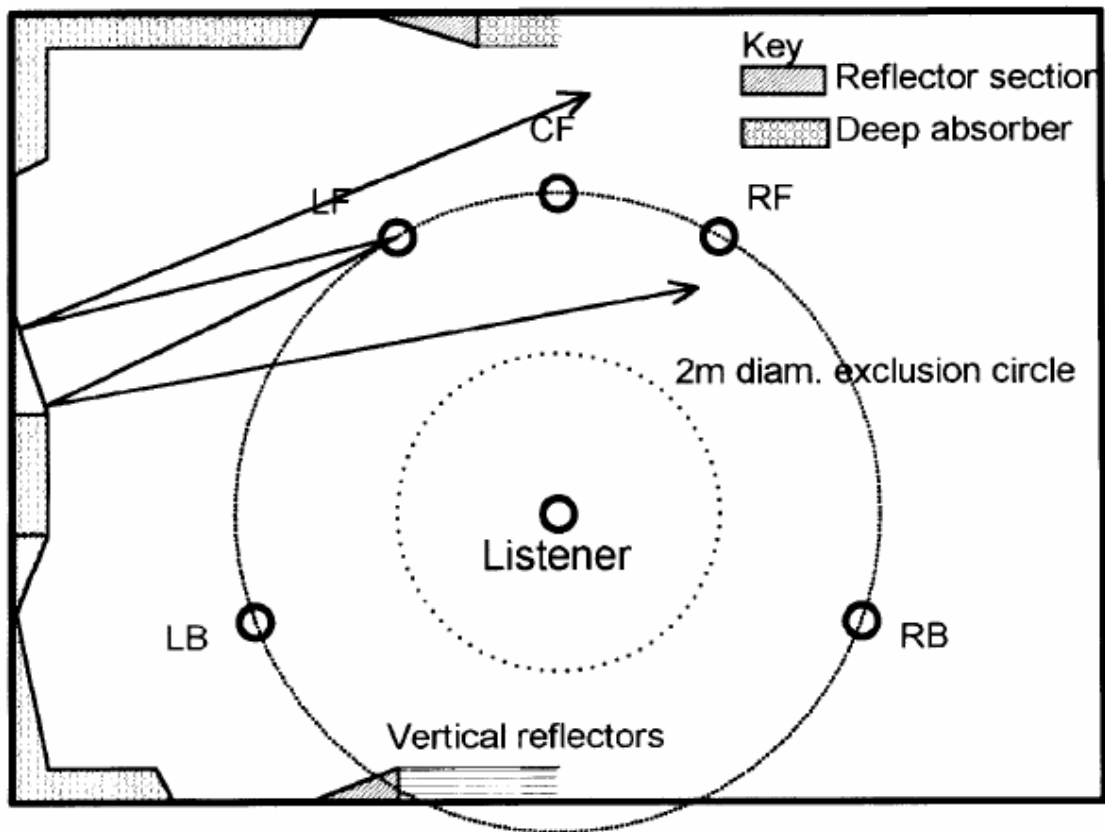
δηλαδή το ηχείο από τον τοίχο διαφέρει ελάχιστα από δωμάτιο σε δωμάτιο. Οι ανακλάσεις που προέρχονται από τον απέναντι και πίσω τοίχο έχουν πολύ μεγαλύτερη απόκλιση όμως αυτές μπορούν να παραβλεφθούν σε μεγάλο βαθμό αφού καλύπτονται από τους στόχους σχεδίασης.

Το γενικό συμπέρασμα από τους παραπάνω υπολογισμούς είναι πως χρειάζονται διαχείριση οι ανακλάσεις πρώτης τάξεως που είναι αυτές που προκύπτουν από τις κοντινές, στο ηχείο, επιφάνειες.

Στο σχήμα 7 φαίνονται οι ανακλάσεις πρώτης τάξεως και στο σχήμα 8 η τελική σχεδίαση για χώρο με πολυκάναλο ηχητικό σύστημα.



Σχήμα 7. Ανακλάσεις πρώτης τάξεως για πολυκάναλο ηχητικό σύστημα σε δωμάτιο

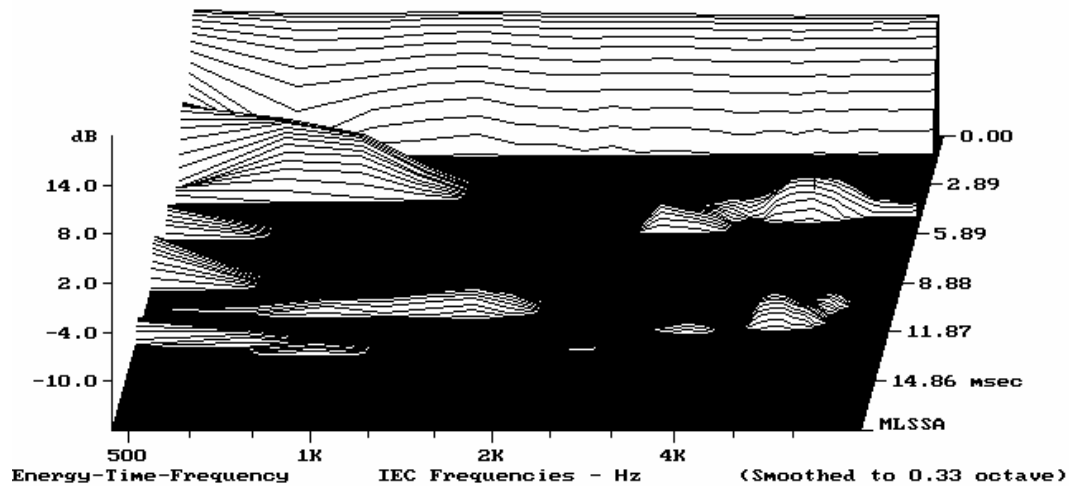


Σχήμα 8. Τελικός σχεδιασμός δωματίου με πολυκάνναλο σύστημα ήχου.

Ο τελικός σχεδιασμός εφαρμόζει τις κεκλιμένες επιφάνειες για τη διαχείριση των πρώτων ανακλάσεων και απορροφητικές όπου η μέθοδος των κεκλιμένων επιφανειών δεν απέφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στο πρόβλημα που παρουσιάστηκε από τον πίσω τοίχο οι κεκλιμένες επιφάνειες παρεκτρέπουν το ηχητικό κύμα στον κάθετο άξονα αντί στον οριζόντιο που λειτουργούν οι υπόλοιπες λόγω του ότι δεν υπάρχει οριζόντια γωνία που να αφήνει τις ανακλάσεις εκτός πεδίου ακρόασης. Έτσι κατευθύνονται προς τα πάνω είτε προς τα κάτω. Οι ανακλάσεις από το ταβάνι αντιμετωπίστηκαν με απορροφητικές διατάξεις και διαχυτές.

Ακουστικά αποτελέσματα μετρήσεων [28]

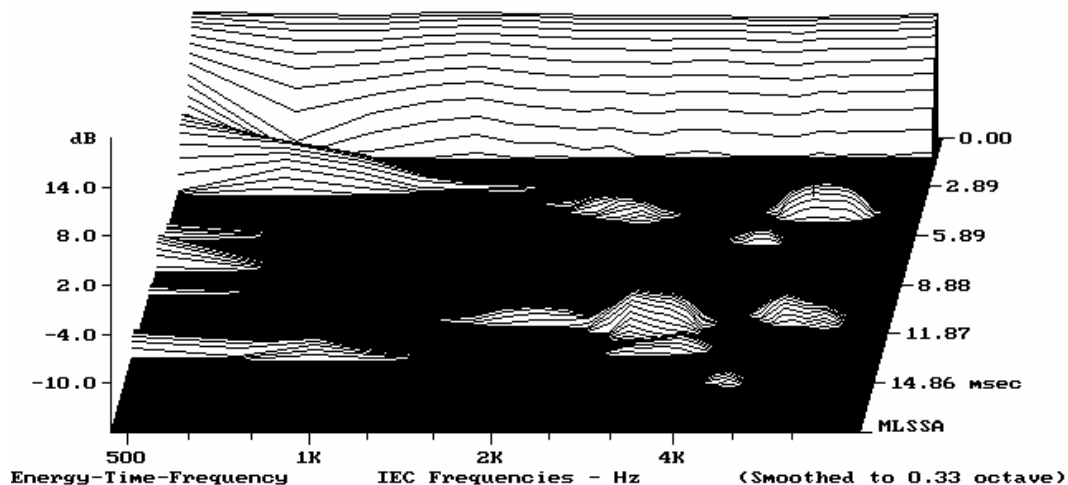
Στα σχήματα 9, 10 φαίνονται τα αποτελέσματα της τελικής σχεδίασης μετρημένα με το αριστερό και το κεντρικό ηχείο και το μικρόφωνο στη θέση του ακροατή.



-11.74 dB, 5404 Hz (23), 4.588 msec (46)

ESC to exit, F1 to print, F2 and cursor keys move cursor MLSSA: Waterfall

Σχήμα 9. Μέτρηση τελικής σχεδίασης με το αριστερό ηχείο.



-12.60 dB, 5404 Hz (23), 4.489 msec (45)

ESC to exit, F1 to print, F2 and cursor keys move cursor MLSSA: Waterfall

Σχήμα 10. Μέτρηση τελικής σχεδίασης με το κεντρικό ηχείο.

Το εύρος της μέτρησης που κατεβαίνει μέχρι τα 500 Hz δείχνει πως η μέθοδος αυτή αφορά τις συχνότητες πάνω από το 1 kHz. Η κορυφή στα 5 kHz είναι η εντονότερη και δεν υπερβαίνει τους στόχους σχεδίασης.

Συμπεράσματα και σχολιασμός

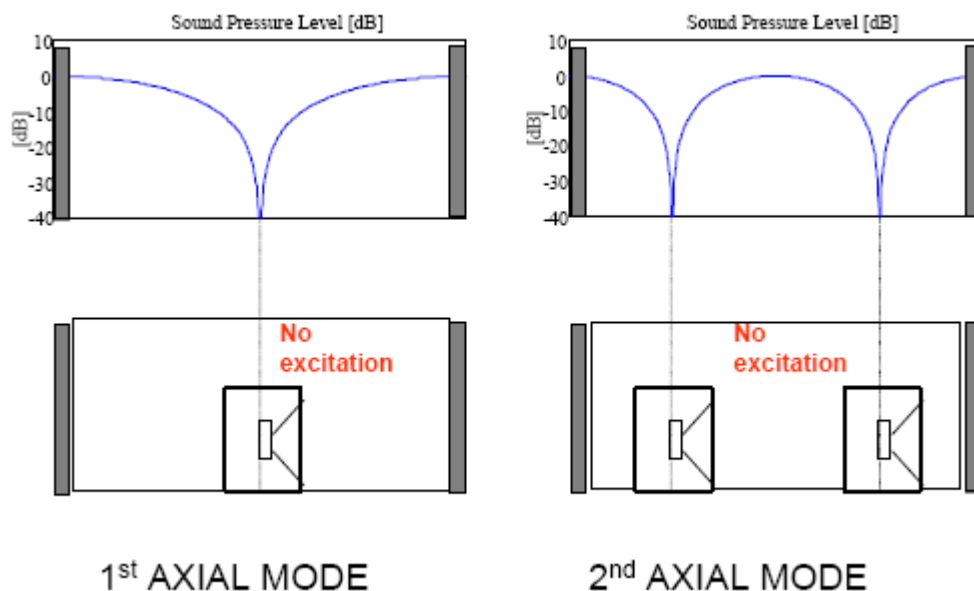
Στην αξιολόγηση του δωματίου αυτού κατά την ακρόαση θεωρήθηκε «ζωντανό», δηλαδή οι χρόνοι αντήχησης είναι μέσα στα όρια των διεθνών προτύπων (όπως αυτά παρατίθενται στο 1^ο κεφάλαιο), ακριβές και αρκετά αναλυτικό. Αναγνωρίστηκε η ευαισθησία όσον αφορά την θέση του ακροατή. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην παρουσία χαμηλής στάθμης πρώτων ανακλάσεων που σε συμβατική σχεδίαση καλύπτονται από την μεγάλη ένταση και πλήθος των πρώτων ανακλάσεων. Το αναμενόμενο μειονέκτημα είναι η μειωμένη ποιότητα ήχου εκτός του ορισμένου πεδίου ακρόασης. Αυτό όμως δεν υποβαθμίζει την χρησιμότητά του αφού προορίζεται για χώρους επαγγελματικής ακρόασης (control room) και όχι αναψυχής, όπως κινηματογράφος, όπου παρευρίσκονται λίγα άτομα τα οποία μπορούν να εξυπηρετηθούν επαρκώς από τη πεδίο ακρόασης. [22]

4.1 Δημιουργία προγράμματος για υπολογισμό χαμηλών ιδιοσυχνοτήτων δωματίου (eigentones)

Στα πλαίσια της εργασίας και σε συνέχεια σεμιναριακής άσκησης, για τη ακουστική μελέτη και βελτίωση του Control Room του Studio του Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης (Παρ/τημα Ρεθύμνου), κρίθηκε σκόπιμη η δημιουργία ενός προγράμματος για τον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων που δημιουργούνται στο χώρο του control room γενικότερα, αλλά και ειδικότερα στη θέση ακρόασης. Στόχος μας ήταν να προκύψει ένα «εργαλείο» που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη οποιουδήποτε συμβατικού δωματίου με παράλληλους τοίχους. Στα πλαίσια αυτά πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα και αναζητήθηκε η κατάλληλη θεωρητική μέθοδος που να υπολογίζει και να αναπαριστά σε διάγραμμα την επίδραση των τρόπων ταλάντωσης δωματίου, καθώς επίσης να παρουσιάζει σε τρισδιάστατο γράφημα τη συμπεριφορά των στάσιμων κυμάτων σε όλο το χώρο. Το πρόγραμμα δημιουργήθηκε μέσω του λογισμικού Microsoft Excel και της συνοδευτικής γλώσσας προγραμματισμού VBA (Visual Basic Application).

Η πλειοψηφία των χώρων ακρόασης, είτε αφορά ακρόαση αναψυχής ή επαγγελματική είναι, όσον αφορά την ακουστική συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες, δωμάτια οι διαστάσεις των οποίων το καθιστούν ακουστικά μικρό χώρο. Ένας χώρος χαρακτηρίζεται ακουστικά μικρός όταν το μήκος κύματος μιας συχνότητας είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις διαστάσεις του χώρου [12]. Αναπτύσσονται δηλαδή σε αυτό στάσιμα κύματα. Αυτό δημιουργεί ένα φάσμα με έντονες εξάρσεις και βυθίσματα μειώνοντας την ποιότητα ακρόασης και μέχρι σήμερα δεν έχει προσδιορισθεί μέθοδος για την πλήρη ομαλοποίηση του φάσματος.

Τα πιθανά προβλήματα που μπορούν να παρουσιαστούν είναι κρίσιμα στην ποιότητα του ήχου. Στην περίπτωση που ένα ηχείο είναι τοποθετημένο σε δεσμό ενός φυσικού τρόπου ταλάντωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1, δεν είναι σε θέση να αναπαράγει ικανοποιητική στάθμη στη συχνότητα που παρουσιάζεται ο συντονισμός. Αυτό μπορεί να οδηγήσει έναν μηχανικό ήχου σε σειρά λαθών. Κατά τη διαδικασία της μίξης, όντας μη ικανοποιημένος από τη στάθμη που ακούει, θα αυξήσει την παρεχόμενη ενέργεια στην «προβληματική» περιοχή. Έτσι, ακούγοντας την παραγωγή σε ένα διαφορετικό χώρο η ενισχυμένη συχνότητα θα ακούγεται τονισμένη. Αυτή η πρόσθεση ενέργειας μπορεί επίσης να υπερτροφοδοτήσει το ηχείο το οποίο παρόλο που φαινομενικά δεν αναπαράγει την συχνότητα στο χώρο το διάφραγμα του ηχείου εντούτοις πάλλεται προκαλώντας, από υπερθέρμανση των ηλεκτρικών του στοιχείων, παραμόρφωση και καταστροφή των μηχανικών του μερών.



Σχήμα 1. Ηχεία τοποθετημένα σε δεσμούς κανονικού τρόπου ταλάντωσης δωματίου.

Στους μικρούς κλειστούς χώρους, λόγω της ιδιαιτερότητας τους στην αναπαραγωγή των χαμηλών συχνοτήτων, απαιτείται η χρήση ενός εργαλείου μέσω του οποίου να υπολογίζεται η επίδραση των τρόπων ταλάντωσης του δωματίου στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων που αναπαράγονται σε αυτό. Επίσης πρέπει να υπολογίζεται η κατανομή της ηχητικής ενέργειας στο δωμάτιο του κάθε τρόπου ταλάντωσης. Δηλαδή τις μεταβολές της ηχητικής στάθμης συναρτήσει της θέσης ακρόασης και αναπαραγωγής.

Μέθοδος Εργασίας - «Μέθοδος άθροισης τρόπων ταλάντωσης δωματίου» (room mode summation method)

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα ονομάζεται «μέθοδος άθροισης τρόπων ταλάντωσης δωματίου» (room mode summation method). [27]

Βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι πως σε δωμάτια με παράλληλους τοίχους υπάρχει μια συναρτησιακή σχέση μεταξύ θέσης ακρόασης και ηχείου σε σχέση με τη σταθερή κατανομή ακουστικής πίεσης των τρόπων ταλάντωσης του δωματίου. Η σχέση που δίνει τους τρόπους ταλάντωσης σε τέτοιου τύπου δωμάτια είναι ημιτονοειδής συνάρτηση. Στη συνολική συχνοτική απόκριση υπολογίζεται η συνεισφορά του κάθε τρόπου ταλάντωσης σε όλες τις συχνότητες λαμβάνοντας υπόψη την οξύτητα του (Q). Λειτουργεί αποδοτικά μέχρι τα ≈ 200 Hz, καθότι πάνω από αυτή την συχνότητα το πλήθος τους αυξάνεται σε σημείο να μην γίνονται μεμονωμένα διακριτοί και αποτελούν πλέον το διάχυτο ηχητικό πεδίο.

Υλοποίηση

Το πρόγραμμα αποτελείται τρία βασικά φύλλα (sheets), για τις τρεις βασικές λειτουργίες του.

Φύλλο «Mode Calc» (Σχήμα 8)

Ο χρήστης εισάγει τις διαστάσεις του χώρου. Απ' αυτές τις διαστάσεις υπολογίζεται, με τη σχέση 1, η συχνότητα συντονισμού κάθε κανονικού τρόπου ταλάντωσης του δωματίου μέχρι τη 10^η τάξη κύματος και των τριών ειδών (αξονικός, πλάγιος, εφαπτομενικός). Οι συχνότητες συντονισμού ταξινομούνται κατά αύξων αριθμό και επιλέγονται οι πρώτοι 140 τρόποι ταλάντωσης-συχνότητες με σκοπό να επιλεγούν οι χαμηλές συχνότητες.

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

Σχέση 1. Ιδιοσυχνότητες παραλληλεπίπεδου δωματίου. Όπου n η τάξη στάσιμου κύματος στον αντίστοιχο άξονα και L οι διαστάσεις του χώρου στον αντίστοιχο άξονα.

Room Dimintions				
Lx	Ly	Lz	Hz	
8,63	7	2,90		
1	0	0	19,9	
0	1	0	24,5	
1	1	0	31,5	
2	0	0	39,7	
2	1	0	46,7	
0	2	0	49,0	
1	2	0	52,9	
0	0	1	59,1	
3	0	0	59,6	
1	0	1	62,4	
2	2	0	63,1	
0	1	1	64,0	
3	1	0	64,5	
1	1	1	67,0	
2	0	1	71,3	
0	3	0	73,5	
2	1	1	75,3	
1	3	0	76,1	
0	2	1	76,8	
3	2	0	77,2	
1	2	1	79,3	
4	0	0	79,5	
4	1	0	83,2	
2	3	0	83,6	
3	0	1	84,0	
2	2	1	86,5	
3	1	1	87,5	
4	2	0	93,4	
0	3	1	94,3	

Instructions

1. Insert Room Dimintions
2.
3. Click on any cell and:
 - Press Ctrl-R for Room Response
 - Press Ctrl-D for SPL Distribution

Σχήμα 8. Φύλλο «Mode Calc».

Εξάγεται η συνολική εικόνα της άθροισης των τρόπων ταλάντωσης. στις συγκεκριμένες θέσεις, Εισάγονται συντεταγμένες πηγής - αποδέκτη στο χώρο ορίζοντας έτσι τη θέση τους στο δωμάτιο. Η κυματοσυνάρτηση κατανομής Ψ χρησιμοποιεί τις συντεταγμένες αυτές, για να βρει την κατανομή ενέργειας σε κάθε σημείο στο χώρο σε σχέση με τους φυσικούς τρόπους ταλάντωσης του δωματίου.

$$\Psi = \cos \frac{n_x \cdot \pi \cdot x}{l_x} \cdot \cos \frac{n_y \cdot \pi \cdot y}{l_y} \cdot \cos \frac{n_z \cdot \pi \cdot z}{l_z}$$

Σχέση 2α.

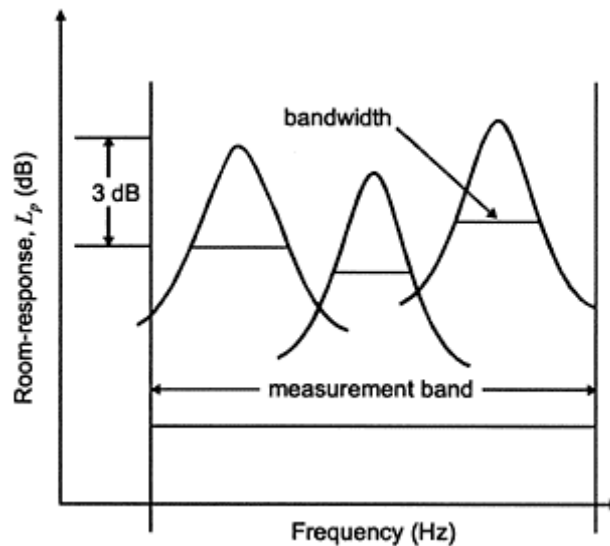
$n_{x,y,z}$ = Οι τάξεις του κύματος

$l_{x,y,z}$ = Διαστάσεις του δωματίου

x,y,z = Οι συντεταγμένες

Για την άθροιση ανά συχνότητα στην θέση του ακροατή της ηχητικής πίεσης p του ηχητικού πεδίου στο ορισμένο σημείο ακρόασης, συνδυάζονται οι δυο κυματοσυναρτήσεις Ψ , πηγής και αποδέκτη όπως φαίνεται στη σχέση 3.

Ο κάθε συντονισμός έχει ένα συχνοτικό εύρος ζώνης. Διεγείρει δηλαδή εκτός την κεντρική συχνότητα του τρόπου και πλευρικές συχνότητες. Στο σχήμα 2 εμφανίζονται οι γειτνιάζουσες ιδιοσυχνότητες που επικαλύπτονται και μερικές συχνότητες ενισχύονται ακόμη περισσότερο αφού διεγείρονται από δυο συντονισμούς. Όλες αυτές οι παράμετροι προσμετρούνται και αθροίζονται για την απόκριση συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης.



Σχήμα 2. Επικάλυψη γειτονικών ιδιοσυχνοτήτων.

Η απόσβεση (dumping factor, k_n σχέση 2β) του κάθε τρόπου ταλάντωσης, που εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών, μπορεί να προσεγγιστεί με τη χρήση του χρόνου αντήχησης. Ο πολλαπλασιαστής $E_{x,y,z}$ που παίρνει τις τιμές 2, 4, 8 ανάλογα με τη μορφή του στάσιμου κύματος αντισταθμίζει την ενέργεια που έχει η εκάστοτε μορφή. Οι αξονικοί είναι η ισχυρότερη μορφή και οι υπόλοιπες δυο, πλάγιοι και εφαπτομενικοί έχουν υποπολλαπλάσια τους. Κάθε μορφή δηλαδή είναι κατά 3 dB ασθενέστερη.

$$k_n = \frac{c}{8V} \left(\frac{E_{nx} a_x + E_{ny} a_y + E_{nz} a_z}{2} \right)$$

Σχέση 2β.

a_n = η απορρόφηση στον n άξονα

V = ο όγκος του δωματίου

E_n = ο πολλαπλασιαστής ανάλογα με την τάξη του κύματος

$E_0 = 1, E_1 = E_2 = E_3 \dots = 2$

$E_{x,y,z}$ = πολλαπλασιαστής ανάλογα με τη

μορφή του στάσιμου κύματος

8 για πλάγιους τρόπους

4 για εφαπτομενικούς τρόπους

2 για αξονικούς τρόπους

Ψ = Κυματοσυνάρτηση κατανομής

k_n = Παράγοντας απόσβεσης

ω_N = Ιδιοσυχνότητα του τρόπου ταλάντωσης

ω = Η υπό μελέτη συχνότητα στην οποία η συνεισφέρει ο συντονισμός

$$|p| = \frac{E_{x,y,z} \cdot \Psi_S \cdot \Psi_R}{2\omega_N \cdot k_N + i(\omega_N^2 / \omega - \omega)}$$

Τα αποτελέσματα της άθροισης εισάγονται σε μια γραφική παράσταση της ηχητικής στάθμης συναρτήσει της συχνότητας. Μπορεί να γίνει επιλογή άθροιση των συχνοτήτων ανά 1/10 οκτάβας λόγω της αντίστοιχης ανάλυσης που εφαρμόζει το MLSSA, το λογισμικό μετρήσεων και ανάλυσης με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις για επαλήθευση της μεθόδου άθροισης των κανονικών τρόπων ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα αυτά εφαρμόζονται σε ξεχωριστή γραφική παράσταση.

Room Response Calculator											Instructions	
Room Dimentions			Coordinates			Absorbtion						
Lx	8,63	m	Source Xs	7,13	Ys	2,34	Zs	0,3	Aol	56,4109	1. Insert Coordinates of Source and Reciever in m kns = Dumping Factor Ex,y,n = Scaling factor depending on mode order Ψ = Mode summation function ωN = Mode natural fn,n,n = frequency	
Ly	7	m	Reciever Xr	6,3	Yr	3,46	Zr	1,29	Ax	10,8301		
Lz	2,9	m	cAir	343	m/sec	radial Dist	1,394	m	Ay	13,3519		
			ρ	1,2				Az	32,2288			
								α	0,26675			
								RT60	0,5			
Modes	nx	ny	nz	f (Hz)	kns	Ψπ	Ψη	ωN	Ex,y,z			
1	1	0	0	19,9	1,32525	-0,855	-0,66134	124,86	2			
2	2	0	1	24,5	1,63385	0,4974	0,017951	153,94	2			
3	1	1	0	31,5	2,9591	-0,425	-0,01187	198,21	4			
4	2	0	0	39,7	2,65051	0,4606	-0,12526	249,73	2			
5	2	1	0	46,7	4,28436	0,2291	-0,00225	293,36	4			
6	0	2	0	49,0	3,2677	-0,505	-0,99936	307,88	2			
7	1	2	0	52,9	4,59295	0,4317	0,660913	332,23	4			
8	0	0	1	59,1	3,94377	0,9477	0,172463	371,57	4			
9	3	0	0	59,6	3,97576	0,0673	0,827019	374,59	2			
10	1	0	1	62,4	5,26903	-0,81	-0,11406	391,99	4			
11	2	2	0	63,1	5,9182	-0,233	0,12518	396,42	4			
12	0	1	1	64,0	5,57762	0,4714	0,003096	402,2	4			
13	3	1	0	64,5	5,60961	0,0335	0,014846	404,99	4			
14	1	1	1	67,0	6,90288	-0,403	-0,00205	421,14	8			
15	2	0	1	71,3	6,59428	0,4365	-0,0216	447,69	4			
16	0	3	0	73,5	4,90155	-1	-0,05383	461,81	2			
17	2	1	1	75,3	8,22813	0,2171	-0,00039	473,42	8			
18	1	3	0	76,1	6,2268	0,8545	0,0356	478,4	4			
19	0	2	1	76,8	7,21147	-0,479	-0,17235	482,55	4			
20	3	2	0	77,2	7,24346	-0,034	-0,82649	484,88	4			
21	1	2	1	79,3	8,53672	0,4091	0,113983	498,44	8			
22	4	0	0	79,5	5,30102	-0,576	-0,96862	499,45	2			
23	4	1	0	83,2	6,93486	-0,286	-0,01739	522,64	4			
24	2	3	0	83,6	7,55205	-0,461	0,006743	525,01	4			
25	3	0	1	84,0	7,91953	0,0638	0,14263	527,62	4			

Σχήμα 9. Φύλλο «Room Response».

Φύλλο «SPL Distribution» (Σχήμα 10)

Το τρίτο βασικό αφορά την τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση της κατανομής της στάθμης ηχητικής πίεσης σε όλα τα σημεία του χώρου. Μια μακροεντολή πραγματοποιεί την παραπάνω διαδικασία ανά ορισμένη απόσταση (resolution) στο πλάτος και στο μήκος του χώρου διαδοχικά για το σύνολο του χώρου, επαναλαμβάνοντας ουσιαστικά την ίδια διαδικασία

αλλάζοντας τις συντεταγμένες. Τοποθετεί το αποτέλεσμα σε ένα κελί το σύνολο των οποίων μετά μετατρέπεται σε τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση. Υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής της απόστασης που πραγματοποιείται ο κάθε υπολογισμός (resolution). Αυξάνει δηλαδή το πλήθος των υπολογισμών, των «δειγμάτων» των συνταγμένων, για μεγαλύτερη ακρίβεια στην γραφική απεικόνιση.

SPL Distribution Calculator														
Room Dimentions														
Lx	8,63	m												
Ly	7	m												
Lz	2,9	m												
Coordinates				Absorbion										
Source Xs	7,13	Ys	2,34	Zs	0,5	Aol	28,2054							
Reciever Xr	8,41	Yr	6,96	Zr	1,3	Ax	5,41504							
cAir	343	m/sec	Radius	4,79404	m	Ay	6,67597							
ρ	1,2						Az	16,1144						
							α	0,13338						
							RT60	1						
Resolution				Instructions										
ω	83	Resolution	10	1. Insert Source coordinates, RT60, and Plot Resolution 2. proceed to next Worksheet, "Chart Filler" and press button to fill the chart										
direct	-2,30491321929789E-005-3,39850858491695E-005i													
total p	0,33966	ratio												
		Lxz	2,9759											
dB	84,6002	Lyz	2,4138											

Σχήμα 10. Φύλλο «SPL Distribution».

Αξιολόγηση και σχολιασμός

Λόγω της ανακρίβειας στα στοιχεία εισαγωγής, όπως διαστάσεις του χώρου και η έλλειψη γνώσης της ακουστικής συμπεριφοράς των υλικών του χώρου, θα υπάρχει μόνιμα το ενδεχόμενο κάποιες ιδιοσυχνότητες να υπολογιστούν λάθος (μικρές μετακινήσεις στον άξονα των συχνοτήτων). Πολλά δωμάτια διαθέτουν εξοπλισμό (εκτός από τις ακουστικές διατάξεις όπως συντονιστές και απορροφητές) που μπορεί να λειτουργούν σαν συντονιστές Helmholtz ή panel.. Έτσι, κάποιοι τρόποι παρουσιάζουν κάποια απόκλιση α) στη συχνότητα λόγω εμπέδησης β) στην οξύτητα τους (Q) που επηρεάζει και το

συχνοτικό εύρος διέγερσης του τρόπου γ) στην στάθμη ηχητικής πίεσης που επηρεάζεται από τους δυο παραπάνω παράγοντες.

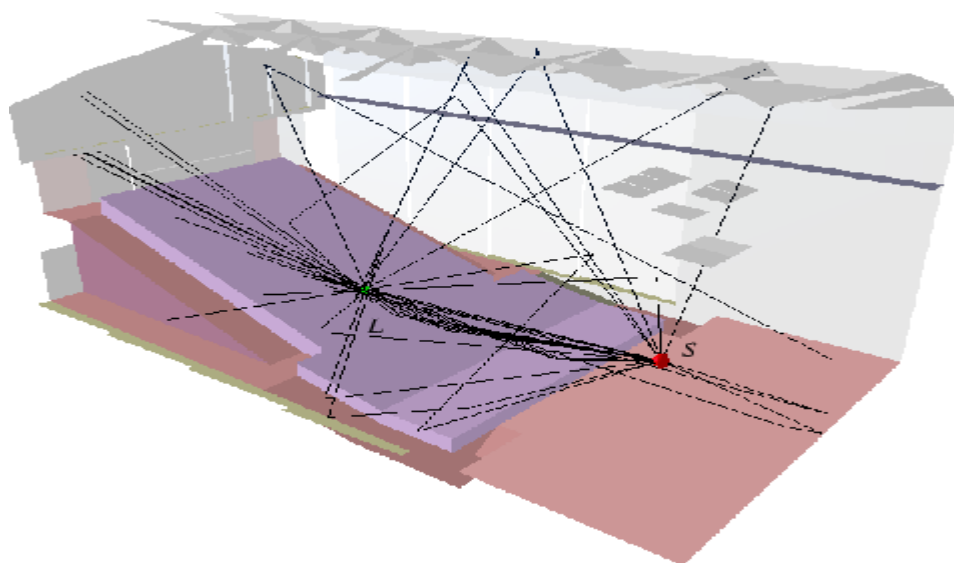
Το πρόγραμμα είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για μελετητές ακουστικής και ηχολήπτες καθώς εύκολα και γρήγορα υπολογίζεται η απόκριση σε ένα ορισμένο σημείο καθώς και η κατανομή της στάθμης ηχητικής πίεσης στο χώρο.

4.2 Computer Aided Room Acoustics (CARA)

Μοντελοποίηση :

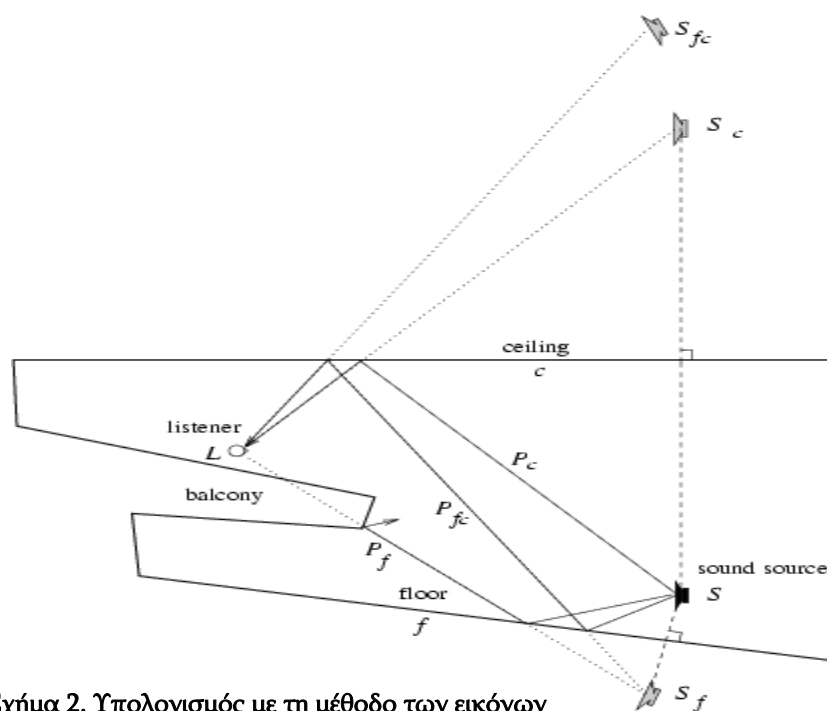
Ο σχεδιασμός του σχήματος του χώρου μπορεί να γίνει υπολογιστικά με σχεδιασμό της πορείας των ηχητικών ακτινών. Υπάρχουν δύο τρόποι ψηφιακής εξομοίωσης, η μέθοδος του σχεδιασμού της πορείας των ακτινών (Ray Tracing Method) και η μέθοδος των εικόνων (Image Method).

Κατά την πρώτη μέθοδο από την υποτιθέμενη σημειακή πηγή δημιουργούνται πολλές ηχητικές ακτίνες που κατευθύνονται ισότροπα στο χώρο. Η μέθοδος υπολογίζει τη πορεία των ηχητικών ακτινών μετά από τις διαδοχικές ανακλάσεις στις ανακλαστικές επιφάνειες του χώρου.



Σχήμα 1 Υπολογισμός με τη μέθοδο Ray tracing

Κατά τη δεύτερη μέθοδο υπολογίζονται οι θέσεις των φανταστικών πηγών δεύτερης, τρίτης κλπ, τάξης και συνδέει κάθε φανταστική πηγή με τον δέκτη με μία ηχητική ακτίνα. Από το μικρό μήκος της ακτίνας υπολογίζεται η κρουστική απόκριση στο δέκτη. Η μέθοδος αυτή όταν η τάξη των ανακλάσεων είναι μεγάλη απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς διότι ο αριθμός των πηγών είναι εξαιρετικά μεγάλος.



Σχήμα 2. Υπολογισμός με τη μέθοδο των εικόνων

C.A.R.A. Computer Aided Room Acoustics

Σε αυτή τη πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα μοντελοποίησης Cara το οποίο είναι ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα μοντελοποίησης χώρων και ακουστικής επεξεργασίας, που χρησιμοποιεί την πρώτη μέθοδο που περιγράφηκε, Ray Tracing. Το πρόγραμμα Cara αποτελείται από δύο μέρη, το Cara Cad (Room Design) και το Cara Calc (Calculation).

Στο πρώτο μέρος, Cara Cad (Room Design), σχεδιάζεται ο χώρος, δημιουργώντας τις διαστάσεις του, την επένδυση των τοίχων με διάφορα υλικά, όπως πετροβάμβακας, παράθυρα, ξύλο κλπ, που έχουν ως βασικό γνώρισμα το συντελεστή απορρόφησης ανά συχνότητα, καθώς επίσης μπορεί ο χρήστης να προσθέσει νέα υλικά με διαφορετικούς συντελεστές απορρόφησης.



Σχήμα 3 Δείγμα μοντελοποίησης με το Cara

Επίσης σε αυτό το στάδιο γίνεται η επιλογή της θέσης του ακροατή (ο οποίος μπορεί να είναι ένας ή περισσότεροι), τις θέσεις των ηχείων καθώς και τον τύπο των ηχείων είτε στερεοφωνικού ζεύγους, είτε surround συστήματος, όπου και σε αυτή τη περίπτωση ο χρήστης μπορεί να προσθέσει ηχεία με νέα χαρακτηριστικά. Επιπροσθέτως ο χρήστης σε αυτό το στάδιο μπορεί να προσθέσει διάφορα αντικείμενα που μπορεί να υπάρχουν μέσα στο χώρο, όπως καναπές, κονσόλα, καρέκλες, σκάλα, πατάρι κλπ. Στο πρώτο μέρος επίσης δίνονται αποτελέσματα της αντήχησης του χώρου ανά συχνότητα σε σχέση με τα υλικά που υπάρχουν στο δωμάτιο κάθε στιγμή.

Στο δεύτερο μέρος Cara Calc (Calculation), γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων του δωματίου ως προς την ακουστική του.

Λαμβάνονται εικονικές μετρήσεις του ακουστικού φάσματος στην εκάστοτε θέση του ακροατή, που έχει επιλέξει ο χρήστης, με συνδυασμό ενεργοποίησης είτε όλων των ηχείων, είτε μεμονωμένα του κάθε ηχείου που έχουμε τοποθετήσει στο δωμάτιο. Επίσης ο χρήστης παίρνει αποτελέσματα χαρτογράφησης των συχνοτήτων του ακουστικού φάσματος, για το εμβαδό του δωματίου και στο ύψος του ακροατή που έχει δηλώσει. Το δεύτερο μέρος έχει μία λειτουργία η οποία λέγεται 'optimization' η οποία κατά την ενεργοποίηση της, αρχίζει να βρίσκει το καλύτερο πιθανό συνδυασμό θέσεως των ηχείων και του ακροατή μέσα σε μία περιοχή που δηλώνει ο χρήστης κατά τη σχεδίαση του δωματίου. Έπειτα από την επιλογή των διαφόρων θέσεων των ηχείων, του ακροατή, των υλικών του δωματίου και των διαστάσεών του, μπορεί ο χρήστης να εξάγει την κρουστική απόκριση του δωματίου, γίνεται συνέλιξη με ένα ηχητικό υλικό που επιθυμεί και μπορεί να ακούσει το αποτέλεσμα. Μπορεί ο χρήστης επίσης να πάρει διάφορες κρουστικές αποκρίσεις του χώρου σε διάφορα στάδια επεξεργασίας του, και να συγκρίνει το ακουστικό αποτέλεσμα μετά τη συνέλιξη, ακούγοντας τον ακουστικό χαρακτήρα του δωματίου σε διάφορα στάδια.

Ένα μειονέκτημα του προγράμματος, είναι ότι δε συμπεριλαμβάνει διαχυτές, ωστόσο, είναι αρκετά αξιόλογο για το κόστος του.

4.3 Απορροφητές Helmholtz

Αναλυτική περιγραφή του περιοδικά διάτρητου συνηχητή Helmholtz

Θα περιγράψει αναλυτικότερα τον περιοδικά διάτρητο απορροφητή Helmholtz, μιας και είναι κάτι που προτιμάται περισσότερο απ' ότι ο μονός συνηχητής (μία οπή – μία κοιλότητα) [3]

Σχεδιασμός συναρτήσεων : συχνότητα αντήχησης.

Θεωρούμε έναν απλό απορροφητή που αποτελείται από μία κοιλότητα με μία επιφάνεια που τη καλύπτει. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να είναι διάτρητη για τη σχεδίαση ενός Helmholtz απορροφητή, ή ενιαία αλλά ελαστική, για τη σχεδίαση απορροφητή μεμβράνης. Η ακουστική μάζα και εμπέδηση εξαρτάται άμεσα από τη διάτρητη ή ενιαία επιφάνεια. Η εμπέδηση του αντηχητικού συστήματος δίνεται από :

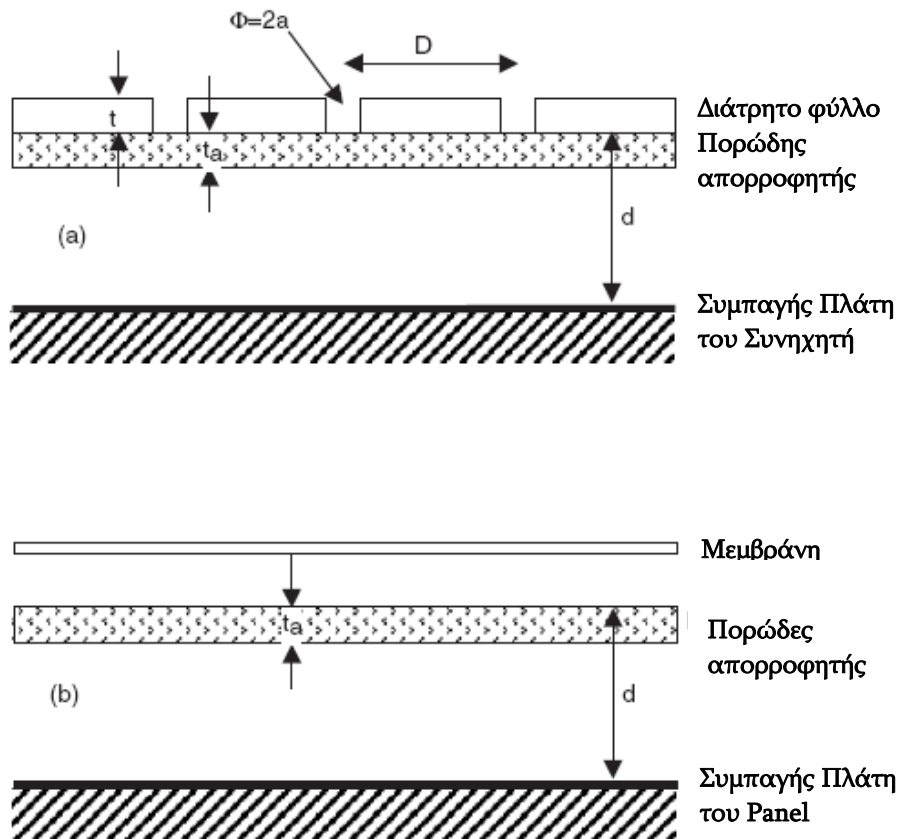
$$z_1 = r_m + j[\omega m - \rho c \cot(kd)] \quad \text{Σχέση 1}$$

όπου $k = 2\pi/\lambda$ είναι ο κυματάρημος στον αέρα, d είναι το βάθος της κοιλότητας, m η ακουστική μάζα, ω η κυκλική συχνότητα, ρ η πυκνότητα του αέρα και c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα.

Helmholtz resonator

Η διάτρητη επιφάνεια διαιρείται σε ξεχωριστά κελιά τα οποία συμπεριφέροντε ανεξάρτητα το καθένα με επαναλαμβανόμενη απόσταση D . Το D ορίζεται στο παρακάτω σχήμα, το οποίο δείχνει μία σταυροειδές διαίρεση του απορροφητή . Ο απορροφητής είναι σχεδιασμένος, για να είναι διάτρητος σε δύο κατεύθυνσης, με το επαναλαμβανόμενο μήκος να είναι το ίδιο και από τις δύο πλευρές. Επειδή στις χαμηλές συχνότητες τα κελιά δε λειτουργούν απόλυτα ανεξάρτητα, μία υποδιαίρεση του όγκου ίσως θα απαιτηθεί, καθώς το μήκος κύματος γίνεται μεγάλο.

Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν απαιτείται μεγάλη απορρόφηση για πλάγια πρόσπτωση ηχητικών κυμάτων, καθώς και τυχαίας πρόσπτωσης. Επίσης η πλάγια μετάδοση του ήχου μέσα στη κοιλότητα πρέπει να είναι ελάχιστη για να έχουμε μεγάλη απορρόφηση. Όταν τοποθετούμε στην κοιλότητα πορώδη απορροφητή, η μετάδοση του ήχου γίνεται κάθετη στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα η απαίτηση της υποδιαίρεσης δεν είναι πλέον τόσο σημαντική, εκτός όταν αναφερόμαστε στις πολύ χαμηλές συχνότητες.



Σχήμα 1 Τυπικές διατάξεις για (α) Helmholtz απορρόφηση και (β) απορροφητής μεμβράνης

Το μέγεθος της επιφάνειας που περικλείει την οπή θα πρέπει να είναι μεγάλο συγκρινόμενη με την διάμετρο της οπής. Η ακουστική μάζα κάθε μονάδας του διαχυτή είναι τότε $m = \rho D^2 t / \pi a^2$ όπου t είναι το πάχος του διάτρητου φύλλου με τον end correction παράγοντα και άλλες μεταβλητές ορίζονται στο σχήμα 1. Το πάχος του φύλλου t και η ακτίνα της οπής a εννοείται ότι θα είναι πολύ μικρότερα απ' ότι το μήκος κύματος του ήχου (στον αέρα).

Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις, η συχνότητα συντονισμού του συνηχητή είναι :

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{t'V}} \quad \text{Σχέση 2}$$

όπου $S = \pi a^2$ είναι η περιοχή με τις οπές και $V = D^2 d$ ο όγκος του κάθε μοναδικού κελιού.

Αυτή είναι η ίδια διατύπωση όπως βρέθηκε από άλλες μεθόδους, όπως το ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο. Η προσέγγιση της συνάρτησης μεταφοράς χρησιμοποιείται εδώ επειδή μπορεί ακόμα πιο εύκολα να γενικεύσει την περίπτωση του non – lump parameter (απλοποιημένο μοντέλο όπως το black box στα ηλεκτρονικά, που μας ενδιαφέρει μόνο η είσοδος και η έξοδος ενός συστήματος, χωρίς να μας ενδιαφέρει η επεξεργασία στο εσωτερικό του), για παράδειγμα όταν το μέγεθος της κοιλότητας δεν είναι πλέον συγκρίσιμο με το μήκος κύματος.

Μια διαφορετική αλλά ισότιμη διατύπωση για τον απορροφητή Helmholtz, χρησιμοποιεί το πορώδες ή το κλάσμα της ανοικτής περιοχής ε . Αυτό είναι συνήθως πιο χρήσιμο όταν χρησιμοποιούμε διάτρητες επιφάνειες και μπορεί να αποδοθεί θεωρώντας τη γεωμετρία του σχήματος 1 για να αναθεωρήσει την σχέση 2

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{t'd}} \quad \text{Σχέση 3}$$

$$\varepsilon = \frac{\pi a^2}{D^2} \quad \text{Σχέση 4}$$

Η δόνηση του αέρα μέσα στις διατρήσεις επηρεάζει τη ακουστική μάζα της κατασκευής. Το μήκος του δονούμενου αέρα δεν είναι ακριβώς το ίδιο με το διάτρητο πάχος του πιάτου. Η επίδραση της κυκλικής εμπέδησης πρέπει να

προσθεθεί, περιλαμβάνοντας την αμοιβαία αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών περιοχών αέρα. Συνεπώς, ο δονούμενος αέρας έχει ένα μήκος το οποίο δίνεται από το πάχος του πάνελ συν τις error corrections που δίνουν την εμπέδηση της οπής. Μια πλήρη έκφραση της μάζας στην σχέση 2 είναι αλλιώς :

$$m = \frac{\rho}{\varepsilon} \left[t + 2\delta a + \sqrt{\frac{8\nu}{\omega} \left(1 + \frac{t}{2a} \right)} \right] \quad \text{Σχέση 5}$$

Ο τελευταίος όρος στην συνάρτηση οφείλεται στην επίδραση του συνόρου του στρώματος και $\nu = 15 \times 10^{-6} \text{m}^2\text{s}^{-1}$ είναι η κινηματική εσωτερική τριβή του αέρα. Αυτός ο τελευταίος όρος συνήθως δεν είναι τόσο σημαντικός εκτός αν το μέγεθος της διαμέτρου της οπής είναι μικρό, της τάξης του χιλιοστού και μικρότερο. δ είναι ο παράγον end correction, όπου μία πρώτη προσέγγιση είναι συνήθως $\delta = 0.85$ και αποδίδεται εξετάζοντας την κυκλική εμπέδηση ενός εμβόλου που βρίσκεται μέσα σε διάφραγμα. Μια τιμή του 0.85 ωστόσο δεν περιλαμβάνει την αμοιβαία αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών οπών επειδή βασίζεται σε μία μέτρηση ενός μόνου εμβόλου. Συνεπώς, μία άλλη πιο ακριβής διατύπωση υπάρχει. Για διάτρηση με $\varepsilon < 0.16$, ο Ingard δίνει το παράγοντα correction ως :

$$\delta = 0.8(1 - 1.4\varepsilon^{1/2}) \quad \text{Σχέση 6}$$

Στην περίπτωση της μίας μόνο οπής η οποία βρίσκεται σε μία άπειρη διαστάσεων επιφάνεια, αυτό είναι κατά προσέγγιση 0.85 όπως δόθηκε νωρίτερα. Μία εναλλακτική διατύπωση, η οποία λειτουργεί για περισσότερες ανοικτές οπές, αναπτύχθηκε από τον Rschewkin και εκδόθηκε από τους Cremer και Müller. Αυτό σύμφωνα με τις αναφορές ισχύει μόνο για την περίπτωση του $\varepsilon = 1$:

$$\delta = 0.8(1 - 1.47\varepsilon^{1/2} + 0.47\varepsilon^{3/2}) \quad \text{Σχέση 7}$$

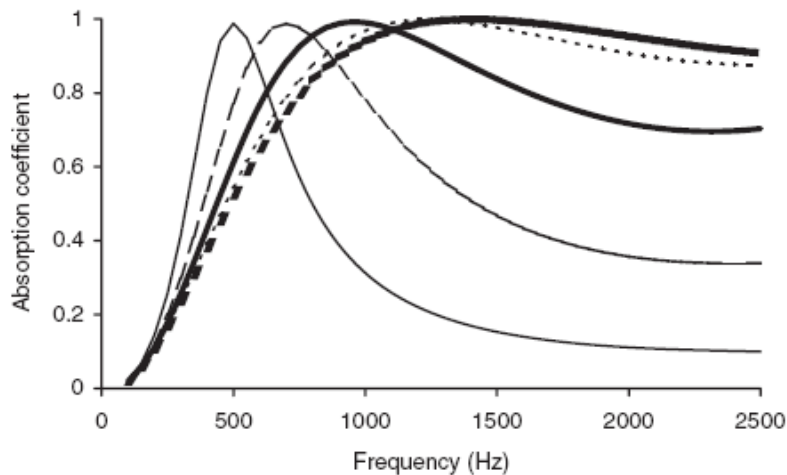
Για τετράγωνο άνοιγμα, η διατύπωση για $\varepsilon < 16$, αλλάζει ελαφρώς την εξίσωση:

$$\delta = 0.85 (1 - 1.25\varepsilon^{-1/2}) \quad \text{Σχέση 8}$$

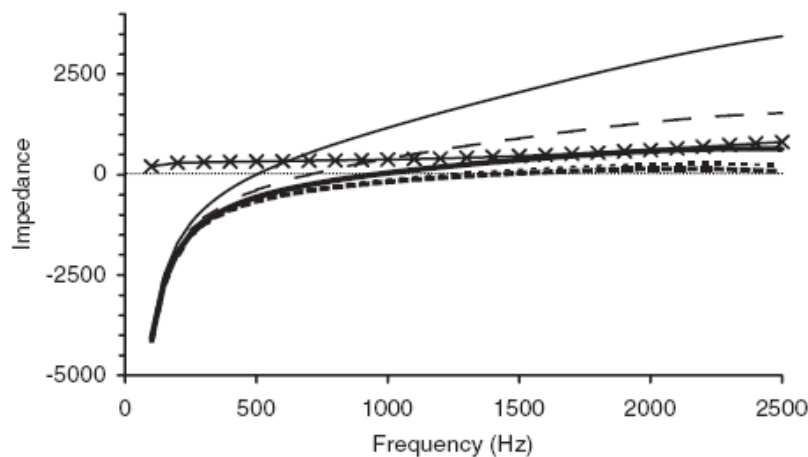
Για ασυνήθιστα σχήματα οπής, η κυκλική εμπέδηση του αέρα μπορεί να εκτιμηθεί αριθμητικά χρησιμοποιώντας μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων των στοιχείων, αλλά οι αλλαγές οι οποίες δημιουργούνται μέχρι την τελική συχνότητας συντονισμού, είναι συνήθως μικρές. Επίσης η κυκλική συχνότητα όταν μετρείται με αυτόν τον τρόπο πιθανόν να μην περιλαμβάνει την αμοιβαία αλληλεπίδραση.

Ένα ακόμη θέμα που πρέπει να περιλαμβάνουν τα end corrections είναι ότι ατέλειες στο εσωτερικό κυρίως της κατασκευής, όπως κοιλότητες και εξογκώματα, μπορούν να προκαλέσουν επιδράσεις που δε μπορούν να προβλεφθούν. Για πολύ ενισχυμένο ήχο, η υπερβολική δόνηση του συνηχητή θα μειώσει την ακουστική μάζα και η συχνότητα συντονισμού του διαχυτή θα αυξηθεί.

Το σχήμα 2 και 3 διευκρινίζει την επίδραση που προκαλεί η αλλαγή της ανοικτής περιοχής στην συχνότητα συντονισμού. Το σχήμα 2 δείχνει τον συντελεστή απορρόφησης, με το μέγιστο απορρόφησης να μειώνεται καθώς το μέγεθος της οπής μειώνεται. Το σχήμα 3 δείχνει την αλλαγή της συχνότητας συντονισμού, σε όρους της εμπέδησης όπου η συχνότητα του zero crossing του φανταστικού μέρους μειώνει καθώς η ανοικτή περιοχή μειώνεται. Καθώς η ανοικτή περιοχή μειώνετε, πρόσθετη απορρόφηση χαμηλής συχνότητας παράγεται κυρίως λόγω της αυξημένης ακαμψίας του ελατηρίου στο μοναδιαίο κελί καθώς ο όγκος μειώνεται. Η απορρόφηση υψηλής συχνότητας μειώνεται επειδή η αναλογία τα στερεά μέρη του διάτρητου φίλου μεγαλώνουν, και αυτά τα μέρη ανακλούν ήχο υψηλών συχνοτήτων. Παρόμοια αποτελέσματα μπορούμε να δούμε στις μετρήσεις.



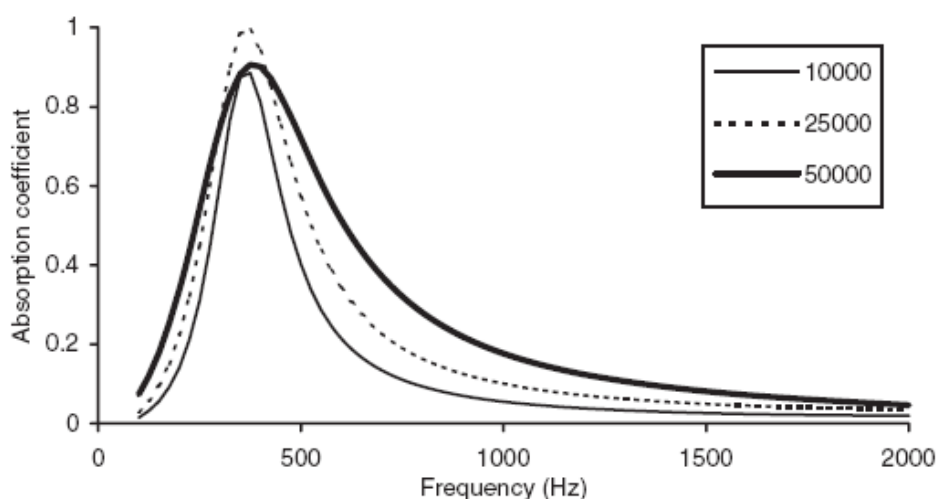
Σχήμα 2 Συντελεστής απορρόφησης ενός Helmholtz απορροφητή σε σχέση με το ποσοστό διάτρησης. Ακτίνα οπής 2.5mm, αντίσταση ροής του πορώδες απορροφητή 20.000 rayl m⁻¹ με πάχος 2.5cm, κενή περιοχή με αέρα πάχους 2.5cm, πάχος διάτρητου φύλλου 6.3mm. Ανοικτές περιοχές: — 6%, 12.5%, ——— 25%, - - - - - 50% - - - - - 100%.



Σχήμα 3 Εμπέδηση μερικών απορροφητών Helmholtz σε σχέση με το ποσοστό διάτρησης. Ίδια γεωμετρία με το σχήμα 2. Παρουσιάζεται μόνο μία πραγματική εμπέδηση, επειδή η αλλαγή του ποσοστού διάτρησης είναι αμελητέα. Με ποσοστό διάτρησης —x— Re, 6%; ——— Im, 6%; Im, 12.5%; ——— Im, 25%; - - - - - Im, 50%; ■■■■■ Im, 100%.

Η μέγιστη απορρόφηση μειώνεται καθώς η συχνότητα συντονισμού μειώνεται. Αν αυτοί οι απορροφητές ήταν συντονισμένοι σε μία χαμηλότερη συχνότητα, αυτή η μείωση θα ήταν ακόμη πιο έντονη. Ο λόγος για αυτό είναι γιατί η εμπέδηση του πορώδες υλικού διαφέρει περισσότερο από την χαρακτηριστική

εμπέδηση του αέρα, κάνοντας την απορρόφηση μικρότερη. Η μέγιστη απορρόφηση μπορεί να μετατραπεί αλλάζοντας την ειδική αντίσταση ροής του αέρα στο πορώδες υλικό όπως φαίνεται στο σχήμα 4 . Στην περίπτωση που βλέπουμε στο σχήμα 2, η ειδική αντίσταση της ροής των 25000Nm^{-4} είναι τέτοια ώστε η αντίσταση να είναι κοντά στην εμπέδηση του αέρα, με αποτέλεσμα να έχουμε υψηλή απορρόφηση. Ένας επιπρόσθετος παράγοντας που αλλάζει την ειδική αντίσταση της ροής είναι η αλλαγή του εύρους γύρω από το οποίο η απορρόφηση είναι αποτελεσματική αλλάζοντας το Q του συνηχητή. Στην περίπτωση, υψηλής ειδικής αντίστασης ροής θα πετυχαίναμε μεγαλύτερο εύρος, αλλά θα μειώναμε την μέγιστη απορρόφηση, καθώς η εμπέδηση υπερβαίνει το όριο της χαρακτηριστικής τιμής.



Σχήμα 4 Επιρροή της αντίστασης ροής (μετριέται σε rayl m^{-1}) στην απορρόφηση του συνηχητή

Μία χαμηλότερη ειδική αντίσταση οδηγεί σε μία εμπέδηση μικρότερη από την χαρακτηριστική με αποτέλεσμα στη μείωση του εύρους και της απορρόφησης.

Το σχήμα 5 δείχνει την εναλλαγή μεταξύ του βάθους της κοιλότητας και του πάχους του διάτρητου φίλου. Το πάχος του διάτρητου φίλου ποικίλει καθώς θεωρούμε ενιαίο το πάχος του βάθους της κοιλότητας της κατασκευής συν το

πάχος του διάτρητου φίλου. Φτιάχνοντας την υπόλοιπη κατασκευή περισσότερο παχιά μπορούμε να παράγουμε μεγαλύτερη απορρόφηση. Αλλά θα έχουμε ως αποτέλεσμα της μείωσης του εύρους που περικλείει μειωμένη απορρόφηση στις υψηλές συχνότητες.

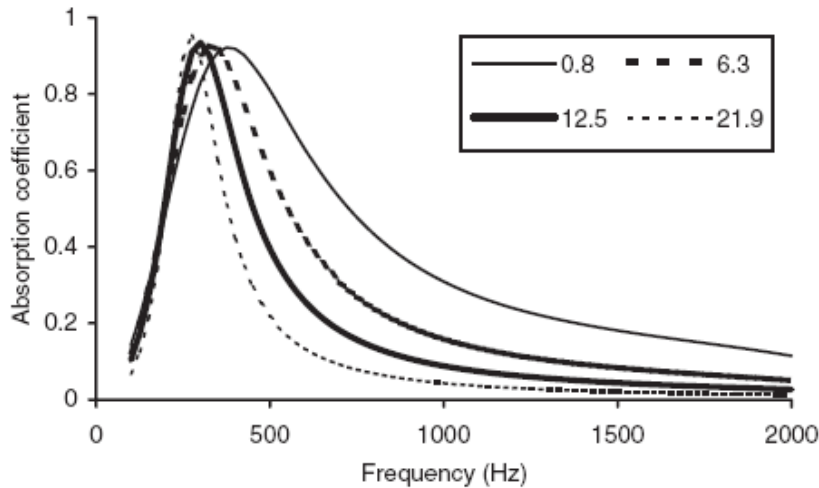
Μία άλλη τεχνική είναι ένας απορροφητής Helmholtz όπου έχει σχισμές αντί για οπές. Αυτό μπορεί να έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε μερικές περιπτώσεις, καθώς οι σχισμές πιο εύκολο να φτιαχτούν απ' ό,τι οι τρύπες. Οι οπές τύπου σχισμής μπορούν να δημιουργηθούν είτε με πριόνι είτε αφήνοντας κενά μεταξύ παράλληλων σανίδων περιβεβλημένα από ξύλο. Για την επένδυση με λωρίδες ξύλου οι κατασκευαστές μπορούν να προσφέρουν διαφορετικές συνθήκες κατασκευής, με ή χωρίς κενά μεταξύ των σανίδων, που επιτρέπει στους σχεδιαστές να επιλέξουν τα επιθυμητά αποτελέσματα απορρόφησης.

$$\delta = -\frac{1}{\pi} \ln \left[\sin \frac{1}{2} \pi \varepsilon \right] \quad \text{Σχέση 9}$$

Αυτό μετατρέπει την μάζα σε:

$$m = \frac{\rho}{\varepsilon} (t + 2\delta w) \quad \text{Σχέση 10}$$

όπου w είναι το πλάτος της σχισμής. Όπως θα αποδειχτεί αργότερα αυτό δίνει ακριβή αποτελέσματα.



Σχήμα 5 Επιρροή του πάχους του διάτρητου φιλου (τα νούμερα στο υπόμνημα είναι σε mm), στην απορρόφηση του συνηχητή. Το μέγιστο πάχος του συστήματος (κοιλότητα συν το πάχος της διάτρητης επιφάνειας) παραμένει σταθερό.

Απώλειες

Μέχρι τώρα οι παραπάνω διατυπώσεις αφορούσαν μόνο τα χαρακτηριστικά της συχνότητας συντονισμού. Ωστόσο τώρα θέλουμε να μάθουμε τον συντελεστή απορρόφησης και την εμπέδηση της επιφάνειας για όλες τις συχνότητες και όχι μόνο για τη συχνότητα συντονισμού. Για να επιτύχουμε κάτι τέτοιο πρέπει να μοντελοποιήσουμε τις απώλειες μέσα στην συσκευή, χρησιμοποιώντας τον όρο της αντίστασης, r_m στην σχέση 1. Για μία Helmholtz συσκευή με επιπρόσθετη πορώδη επιφάνεια αυτό μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας :

$$r_m = \frac{\rho}{\varepsilon} \sqrt{8\nu\omega} \left(1 + \frac{t}{2a} \right) \quad \text{Σχέση 11}$$

Σε αυτή τη διατύπωση θεωρούμε ότι η ακτίνα της οπής δεν είναι μικρότερη του χιλιοστού, για να έχουμε εξασφαλίσει ότι είναι μεγαλύτερη από ότι το οριακό πάχος της επιφάνειας. Μια εναλλακτική διατύπωση για αυτόν τον όρο αντίστασης δίνεται από τον Ingard και χρησιμοποιείται συχνά :

$$r_m = \frac{\sqrt{2\rho\eta\omega}}{2\varepsilon}$$

Σχέση 12

όπου η είναι η εσωτερική τριβή του αέρα, με τιμή $1.84 \cdot 10^{-5}$ poiseuille. Αυτές οι θεωρητικές συναρτήσεις δε είναι κατάλληλες για την αυξανόμενη αντίσταση που συμβαίνει λόγω της ύπαρξης διαφόρων ανωμαλιών στο εσωτερικό της επιφάνειας του συνηχητή. Ο Ingard χρησιμοποίησε εμπειρικούς τρόπους για να αποδείξει την σχέση 12 η οποία ήταν κατά προσέγγιση σωστή. Η σχέση 12 είναι περισσότερο κοινά αποδεκτή απ' ότι η σχέση 11, αλλά για του περισσότερους πρακτικούς απορροφητές έχουν αμελητέα διαφορά μεταξύ τους. Η διαφορά είναι εμφανής σε κατασκευές όπως μικρό – διάτρητοι απορροφητές όπου το μέγεθός τους της εμπέδησης είναι σημαντικό. Για τους περισσότερους σχεδιαστές, οι απώλειες οι οποίες υπολογίζονται από την σχέση 11, είναι πολύ μικρές για αυτό το λόγω συνήθως προσθέτουν πορώδες υλικό για να επιτύχουν μεγαλύτερη απορρόφηση.

Οι μικρό – διάτρητες κατασκευές είναι πιο σπάνιες, έτσι η προσοχή μας θα επικεντρωθεί σε κατασκευές με επιπρόσθετη πορώδη επιφάνια και με πιο κοινή διάμετρο οπής. Η επίδραση του πορώδους υλικού στην απορρόφηση της κατασκευής, εξαρτάται σχετικά με το πού είναι τοποθετημένο. Το ιδανικό θα ήταν να το τοποθετούσαμε εκεί όπου η κίνηση του αέρα είναι μέγιστη (μέγιστο μετατόπισης Για να έχουμε ικανοποιητική απορρόφηση, πρέπει να υπάρχει εύκολη ροή του αέρα μέσω του υλικού κι επίσης αυτό να τοποθετηθεί σε σημείο που έχουμε μέγιστη σωματιδιακή κίνηση. Για έναν Helmholtz απορροφητή αυτό σημαίνει ότι η απορρόφηση συμβαίνει όσο πιο κοντά στα ανοίγματα η αλλιώς μέσα στις οπές. Μια ισορροπία πρέπει επιτευχθεί μεταξύ αυτών των εννοιών, ωστόσο το σίγουρο είναι ότι για να έχουμε πιο πολύ απορρόφηση στο λαιμό απαιτείται λιγότερη αντίσταση στη ροή του αέρα. Η επίδραση του να δημιουργούμε ένα κενό με αέρα μεταξύ της διάτρητης επιφάνειας και του

διάτρητου υλικού είναι για να μειώσει την αντίσταση της ροής του αέρα και στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό έχει ως συνέπεια της μείωσης της απορρόφησης.

Για έναν απορροφητή μεμβράνης, το πορώδες υλικό θα πρέπει να τοποθετηθεί πίσω από την μεμβράνη αλλά δε πρέπει να την αγγίζει. Χωρίς το πορώδες υλικό, οι πρώτες απώλειες προέρχονται κυρίως από το εσωτερικό της μεμβράνης και την υπόλοιπη κατασκευή υποστήριξης(τα τοιχώματα). Αν το πορώδες υλικό πίσω από τη μεμβράνη παρέχει επαρκή απορρόφηση, διατρυπώντας τη μεμβράνη επιτρέπουμε ευκολότερη πρόσβαση στο πορώδες υλικό που βρίσκεται από πίσω. Έτσι μετά δημιουργούμε ένα υβρίδιο Helmholtz και απορροφητή μεμβράνης. Έπειτα η εξίσωση σχεδίασης θα πρέπει να αλλάξει κάπως. Η εμπέδηση της μεμβράνης μόνη της, z_{mem} , θα είναι συνδυασμός της αντίστασης και της μάζας :

$$Z_{mem} = r_{mem} + j\omega m_{mem} \quad \text{Σχέση 13}$$

Όπου r_{mem} και m_{mem} είναι η ακουστική αντίσταση και μάζας της μεμβράνης. Όμοια, η εμπέδηση του διάτρητου φύλλου που σχηματίζει τη κατασκευή Helmholtz z_{helm} , θα πάρει τη μορφή της αντίστασης και μάζας:

$$Z_{helm} = r_{helm} + j\omega m_{helm} \quad \text{Σχέση 14}$$

Όπου r_{helm} και m_{helm} είναι η ακουστική αντίσταση και μάζα του διάτρητου φύλλου. Είναι ανάγκη να κάνουμε μία εικασία σχετικά με το πώς η εμπέδηση αλληλεπιδρά. Το πιο προφανές μοντέλο είναι ότι η εμπέδηση ενεργεί ανεξάρτητα και παράλληλα, κι έπειτα από εκεί μία πιο συνδυασμένη εμπέδηση μπορούμε να εξάγουμε. Η εμπέδηση της κατασκευής με μία κοιλότητα αέρα δίνεται από :

$$z = -j\rho c c o \cot(kd) + \frac{z_{mem} + z_{helm}}{z_{mem} z_{helm}} \quad \text{Σχέση 15}$$

όπου d είναι το βάθος της κοιλότητας. Για να βρούμε τη συχνότητα συντονισμού της σχέσης 15, η πιο εύκολη τεχνική είναι να κάνουμε plot στη z εν συναρτήσει της συχνότητας χρησιμοποιώντας το αριθμητικό εργαλείο του λογιστικού φύλλου και του ελεγκτή για το μηδέν που διασταυρώνεται με το φανταστικό μέρος. Το πρόβλημα για τις παραπάνω διατυπώσεις είναι να ορίσουμε τη σωστή εμπέδηση της μεμβράνης.

Για μία κατασκευή Helmholtz, η εξίσωση κατασκευής για την περίπτωση που περιέχει πορώδες υλικό, εξαρτάται, από το που θα τοποθετηθεί το πορώδες. Η ακρίβεια των εικασιών θα αποδειχτεί αργότερα στο κεφάλαιο.

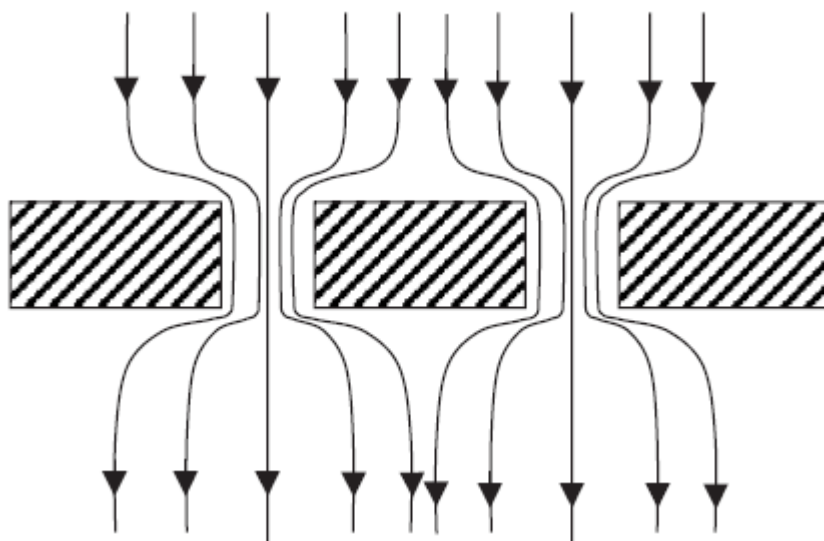
Πορώδες υλικό ακριβώς πίσω από τις διατρήσεις :

Όταν έχουμε τοποθετήσει το πορώδες υλικό ακριβώς πίσω ή μπροστά από τις διατρήσεις, η αντίσταση λειτουργεί σαν να βρίσκεται μέσα στις οπές. Αυτό προέρχεται από μία εξέταση της ροής του αέρα στη συσκευή. Καθώς ο ήχος συμπιέζεται μέσω των οπών, η κίνηση του αέρα αυξάνει. Από την άλλη πλευρά του διάτρητου φύλλου, η γραμμές ροής επιστρέφουν σε ένα ελεύθερο πεδίο κάπως βαθμιαία, αυτό φαίνεται στο σχήμα 6. Αν το πορώδες υλικό βρίσκεται μέσα στις οπές, θεωρείται ότι η ροή δεν έχει ακόμη χρόνο για να επιστρέψει στο ελεύθερο πεδίο. Συμπερασματικά, η αντίσταση η οποία προστίθεται από το πορώδες υλικό, r_m αλλάζει σε σχέση με την κλασματική ανοικτή περιοχή της διάτρητης επιφάνειας (porosity) ε . Η αντίσταση δίνεται από:

$$r_m = \frac{\sigma t_a}{\varepsilon} \quad \text{Σχέση 16}$$

όπου t_a είναι το πάχος του πορώδους υλικού και σ η αντίσταση ροής του. Αυτή η μορφή θεωρείται ακριβής γιατί η τάση της ευαισθησίας μειώνεται από την ανοικτή περιοχή (porosity) ε , και δεν έχει το χρόνο για να επαναφέρει τη τιμή της

ανοικτής περιοχής. Το κλειδί για να επιτύχουμε μέγιστη απορρόφηση, είναι να σχεδιάσουμε την αντίσταση στην σχέση 16 να πλησιάζει όσο το δυνατόν πιο κοντά στη χαρακτηριστική εμπέδηση του αέρα.



Σχήμα 6 Η ροή διαμέσου του διάτρητου φύλλου

Συμπερασματικά μία ισορροπία μεταξύ της ανοικτής περιοχής, την αντίσταση ροής και το απορροφητικό πάχος πρέπει να επιτευχθεί, για να έχουμε μέγιστη απορρόφηση. Ενώ θυμόμαστε ότι η συχνότητα συντονισμού της κατασκευής, επίσης εξαρτάτε από την ανοικτή περιοχή του διάτρητου φύλλου.

Απορροφητικό υλικό τοποθετημένο στη μέση της κοιλότητας με διάτρητο κάλυμμα.

Ας θεωρήσουμε ότι το πορώδες υλικό έχει τουλάχιστο μια απόσταση από τη διάτρητη επιφάνεια ίση με τη διάμετρο μίας οπής. Τα υλικά δεν έχουν μεγάλο πάχος και επίσης είναι αρκετά μακριά από την πλάτη του συνηχητή. Αυτή η περίπτωση δεν είναι αρκετά κοινή, γιατί δύσκολο να το πετύχουμε. Καθώς οι διαστάσεις του πορώδες υλικού είναι μακριά από τις διατρήσεις θεωρείται ότι η

ευαισθησία διαμέσου της επιφάνειας, είναι ίδια όπως σε ένα ανοικτό μέρος. Συμπερασματικά η αντίσταση δίνεται από:

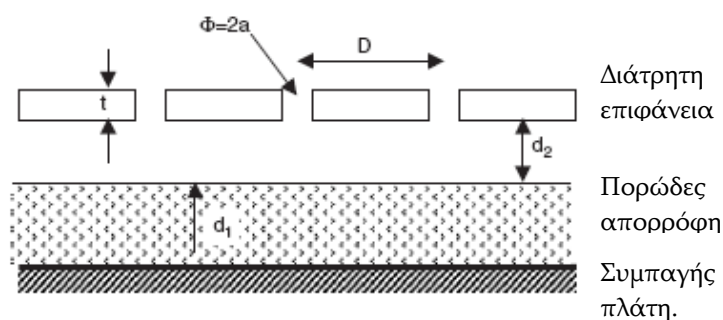
$$r_m = \sigma t_a \quad \text{Σχέση 17}$$

Μία πιο ακριβή σχεδίαση θα χρησιμοποιούσε μία πλήρη transfer matrix προσέγγιση, όπως θα αναλυθεί πιο κάτω.

Μία περισσότερο πλήρης λύση χρησιμοποιώντας τις transfer matrix

Κατά τη μέτρηση της ολικής εμπέδησης που παράγουν πολλές επιφάνειες, πρέπει πρώτα να βρούμε την εμπέδηση ακριβώς κάτω από την διάτρητη επιφάνεια ή μεμβράνη, κι έπειτα την επιρροή της επιφάνειας που προσθέτει εμπέδηση (όπως ένα πορώδες υλικό). Αυτή είναι μία πολύ εύχρηστη μέθοδος της λύσης καθώς μπορεί να επιτρέψει διάφορους συνδυασμούς στο σχεδιασμό. Η λύση στην οποία αναφερόμαστε διαχωρίζεται σε δύο μέρη: πρώτον όταν μία περιοχή αέρα βρίσκεται ακριβώς πίσω από την διάτρητη επιφάνεια και δεύτερον όταν πορώδες υλικό τοποθετείται ακριβώς πίσω από την διάτρητη επιφάνεια.

Η πρώτη περίπτωση φαίνεται στο Σχήμα. 7.



Σχήμα 7 Κατασκευή για την απόδειξη της σχέσης 18

Η εμπέδηση ακριβώς πίσω από την διάτρητη επιφάνεια μπορεί να μετρηθεί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί από μία πρώτη προσέγγιση. Εξετάζοντας μία απλή

περίπτωση ενός απορροφητικού υλικού με το πάχος d_1 και μία επιφάνεια αέρα με πάχος d_2 . Η εμπέδηση στην επιφάνεια του απορροφητή είναι z_1 :

$$z_1 = -jz_0 \cot(k_1 d_1) \quad \text{Σχέση 18}$$

όπου z_1 είναι η χαρακτηριστική εμπέδηση και k_1 ο κυματάριθμος του πορώδους απορροφητή. Η εμπέδηση ακριβώς πάνω και κάτω από την διάτρητη επιφάνεια z_2 , μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας μία transfer matrix.

$$z_2 = \frac{-z_1 j \rho c \cot(k d_2) + \rho^2 c^2}{z_1 - j \rho c \cot(k d_2)} \quad \text{Σχέση 19}$$

Η εμπέδηση του Helmholtz απορροφητή, z_3 , δίνεται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 5 και 11

$$Z_3 = \frac{\rho}{\varepsilon} \left(\frac{t}{2a} + 1 \right) \sqrt{8\nu\omega} + (2\delta a + t) \frac{j\omega\rho}{\varepsilon} + z_2 \quad \text{Σχέση 20}$$

Όπου η επιπρόσθετος όρος $\sqrt{8\nu\omega}$ (εσωτερικής τριβής του ρευστού) στην εξίσωση 6.6 αγνοείται καθώς είναι γενικώς μικρή.

Η δεύτερη περίπτωση, με το πορώδη υλικό δίπλα από την διάτρητη επιφάνεια φαίνεται στο σχήμα 1a.

Για ευκολία, θεωρείται ότι όλος ο όγκος είναι γεμάτος με πορώδη υλικό και το βάθος του είναι d . Είναι μία συνήθη κατασκευή επειδή είναι απλό να κατασκευαστεί. Δύο μέθοδοι για την λύση μπορούμε να προσπαθήσουμε. Η πιο απλή είναι να θεωρήσουμε ότι μόνο επίπεδα κύματα που διαδίδονται κανονικά στην διάτρητη επιφάνεια, παρουσιάζονται στην πορώδη επιφάνεια. Έτσι η εμπέδηση ακριβώς κάτω από την διάτρητη επιφάνεια δίνεται από :

$$z_1 = -jz_1 \cot(k_1 d)$$

Σχέση 21

Όπου z_1 είναι η χαρακτηριστική εμπέδηση και k_1 ο κυματάριθμος του πορώδους υλικού. Μετά η επίδραση της μάζας της διάτρησης μπορεί να προστεθεί, και η επίδραση της ανοιχτής περιοχής μπορεί να μετρηθεί για να δώσουν την εμπέδηση της επιφάνειας του απορροφητή, z_2 :

$$z_2 = \frac{1}{\varepsilon} (2\delta a + t) j \omega \rho + z_1 \quad \text{Σχέση 22}$$

Οι όροι της μάζας και της αντίστασης σε σχέση με τις δυνάμεις που δημιουργούνται μέσα και τριγύρω από την διάτρητη επιφάνεια, αγνοούνται επειδή συνήθως είναι αμελητέοι συγκρινόμενοι με τον όρο z_1 .

Μία πιο περίπλοκη λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι, να λάβουμε υπ' όψη τη τυχαία διάδοση των κυμάτων στο πορώδες μέσο. Η επιφάνεια θεωρείται ως μία σειρά από στοιχειώδης κελιά διαστάσεως D σε D , όπου σε κάθε ένα από αυτά αντιστοιχεί μία οπή. Η κίνηση (των επιφανιών) στα όρια κάθε κελιού που βρίσκεται παράλληλα στο διάτρητο φύλλο θεωρείται μηδενική. Αν η κοιλότητα του διάχυτη δεν είναι διαχωρισμένη σε μέρη τότε αυτό το θεωρούμε ως προσέγγιση, δηλαδή ότι όντως είναι διαχωρισμένη η κοιλότητα. Αυτό επιτρέπει την πίεση στο εσωτερικό των κελιών να αποσυντεθεί σε μία πρόσθεση από συντονισμούς (modes) στο εσωτερικό των κελιών ακριβώς όπως με τους συντονισμούς σε δωμάτιο. Η εμπέδηση κάτω από την διάτρητη επιφάνεια, z_1 , δίνεται ως πρόσθεση των όρων αυτών των συντονισμών.

$$z_1 = \frac{z_{0,0} \varepsilon}{\phi} + \frac{4}{\pi} \sum_m \sum_{n, (n \neq 0 \text{ και } m \neq 0)} \frac{v_{m,n} z_{m,n} j_1^2 \left(\frac{2\pi a}{D} \sqrt{m^2 + n^2} \right)}{\phi(m^2 + n^2)} \quad \text{Σχέση 23}$$

$$z_{m,n} = -jz_i \frac{k_i}{k_{m,n}} \cot(k_{m,n} d) \quad \text{Σχέση 24}$$

$$k_{m,n} = \sqrt{k_i^2 - \frac{4m^2 \pi^2}{D} - \frac{4n^2 \pi^2}{D}} \quad \text{Σχέση 25}$$

$$v_{m,n} = 0.5 \quad m = 0 \text{ ή } n = 0 \text{ αλλιώς } 1 \quad \text{Σχέση 26}$$

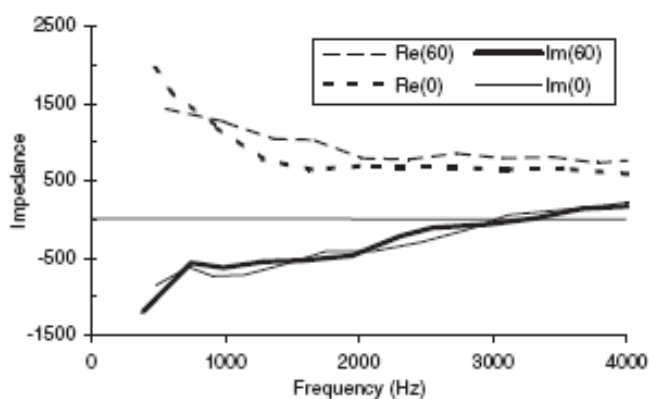
όπου k_i και z_i είναι ο κυματάρθμος και η χαρακτηριστική εμπέδηση του πορώδες απορροφητή. Φ είναι το πόσο πορώδες είναι το υλικό π.χ. 0.98 για το mineral wool. J_1 είναι η συνάρτηση Bessel του πρώτου είδους και πρώτης εντολής. Η πρόσθεση εφαρμόζεται πάνω από όλους τους συνδυασμούς του n και m όταν και οι δύο δεν είναι ίσοι με το μηδέν.

Η πρόσθεση συγκλείνει καθώς η επίδραση των υψηλότερων ιδιοσυχνοτήτων (modes) μειώνεται. Ουσιαστικά, σε πολλές περιπτώσεις μόνο ο όρος των επίπεδων κυμάτων ($n=0$ και $m=1$) μπορεί να θεωρηθεί ως ο επικρατέστερος τρόπος διάδοσης του ήχου μέσα στο πορώδες μέσω, και είναι ο αναμενόμενος λόγω της σχέσης της διάτρησης που υπάρχει στο υλικό η οποία προκαλεί διάθλαση του ήχου. Αυτό ισχύει ακόμη περισσότερο όταν υψηλής ειδικής αντίστασης πορώδη υλικά χρησιμοποιούνται. Από τις σχέσεις 23 – 26 αν λάβουμε υπ' όψη μόνο το πρώτο μέρος, τότε παίρνουμε παρόμοια αποτελέσματα με την σχέση 21 η οποία είναι και πιο απλή. Μιας και η εμπέδηση z_i ακριβώς κάτω από το διάτρητο φύλλο δίνεται από την σχέση 22 μπορεί πλέον να θεωρηθεί ως η ολική αντίσταση όλης της επιφάνειας του συνηχητή περιλαμβανομένου και του διάτρητου φύλλου.

Πλάγια πρόπτωση

Για την πλάγια πρόπτωση, μπορούμε να θεωρήσουμε σε μία πρώτη προσέγγιση ότι η εμπέδηση του απορροφητή Helmholtz θα είναι παρόμοια με την τιμή της κάθετης πρόπτωσης, και θεωρώντας ότι στην κοιλότητα υπάρχει

αξιοσημείωτη παρουσία πορώδη απορροφητικού υλικού και/ή η κοιλότητα είναι διαχωρισμένη (partitioned). Έχοντας τοποθετήσει πορώδη υλικό στην κοιλότητα, ο επικρατέστερος τρόπος διάδοσης θα είναι κάθετος στο μπροστινό πρόσωπο λόγω της διάθλασης, και η πλευρική διάδοση επομένως δε μπορεί να συμβεί. Η πλευρική διάδοση είναι αυτή που θα μπορούσε να αλλάξει την εμπέδηση της κατασκευής κατά την επίδραση των πλάγιων προσπτώσεων, αλλά συνήθως είναι αμελητέα.



Σχήμα 8. Μέτρηση της εμπέδησης για δύο γωνίες πρόσπτωσης ενός Helmholtz απορροφητή. Οι γωνίες στο υπόμνημα είναι σε μονάδες μοίρες. (δεδομένα από Guignouard et al)

Το σχήμα 8 δείχνει την εμπέδηση που έχει μετρηθεί για ένα δείγμα στην κάθετη πρόσπτωση (0°) και στις 60° επιβεβαιώνοντας αυτόν τον ισχυρισμό. Στις χαμηλές συχνότητες χωρίς να υπάρχει καταμερισμός της κοιλότητας (partitions) αυτός ο ισχυρισμός αρχίζει να αποκλίνει καθώς οι πλευρικοί τρόποι διάδοσης αρχίζουν να γίνονται περισσότερο υπαρκτοί. Κάθε πλευρική διάδοση θα ήταν αναμενόμενο να επιτύχει μεγαλύτερη απορρόφηση για τις περισσότερες γωνίες πρόσπτωσης.

Υπάρχει μία πιο περίπλοκη και ολοκληρωμένη πρόβλεψη χρησιμοποιώντας την ανάλυση Fourier.

Αυτή η μέθοδος μπορεί μόνο να παρουσιάσει μία λύση όταν το μήκος κύματος από τον αέρα εφαρμόζεται πάνω στην επιφάνεια ως ένας πολλαπλός ακέραιος μεταξύ των διατρήσεων.

$$ND = \frac{\lambda}{\sin(\psi)} \quad \text{Σχέση 27}$$

Όπου N είναι ένας θετικός ακέραιος και ψ η γωνία πρόσπτωσης. Με αυτή την εξήγηση, είναι πιθανόν να διεξάγουμε μία Fourier ανάλυση σε σειρές από τρόπους (modes) στο εσωτερικό του πορώδες υλικού. Τώρα θα θεωρήσουμε την υπόθεση ότι ο απορροφητής Helmholtz του οποίου η κοιλότητα περιέχει πορώδες υλικό. Η εμπέδηση ακριβώς κάτω από το διάτρητο φύλο δίνεται από :

$$z_1 = \frac{2}{\pi\phi} + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1, -1 \pm N, -1 \pm 2N \dots} v_{m,n} z_{m,n} \frac{j_1^2 \left(2\pi a \sqrt{\frac{m^2}{D^2} + \frac{n^2}{N^2 D^2}} \right)}{m^2 + \frac{n^2}{N^2}} \quad \text{Σχέση 28}$$

$$z_{mn} = -j\rho c \frac{k_i}{k_{mni}} \cot(k_{mni}d) \quad \text{Σχέση 29}$$

$$k_{mni} = \sqrt{k_i^2 - x} \quad \text{Σχέση 30}$$

$$x^2 = \left(\frac{2\pi m}{D} \right)^2 + \left(\frac{2\pi n}{ND} \right)^2 \quad \text{Σχέση 31}$$

όπου ο δείκτης i περιγράφει ότι ο κυματάριθος και η εμπέδηση αφορούν την πορώδη επιφάνεια. Το πορώδες υλικό έχει πάχος d . ϕ είναι το πόσο πορώδες είναι το υλικό και $v_{m,n}$ είναι το ίδιο με την σχέση 26. Μίας και η z_1 ;έχει εκτιμηθεί η σχέση 22 μπορεί αν χρησιμοποιηθεί για να εξάγουμε την εμπέδηση της

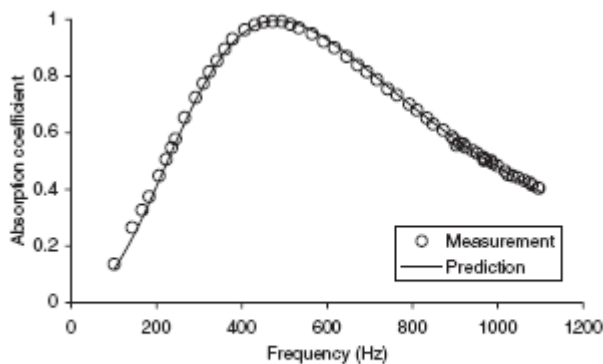
επιφάνειας κάτω από την διάτρητη επιφάνεια στο μπροστά πρόσωπο του απορροφητή.

Παράδειγμα μετρήσεων

Απορροφητής Helmholtz με σχισμές.

Ο Kristiansen και ο Viglen πραγματοποίησαν μετρήσεις της εμπέδησης απορροφητή με σχισμές, με τη μέθοδο του σωλήνα, και έτσι μπορούμε τώρα να ελέγξουμε κατά πόσο αληθή είναι οι παραπάνω διατυπώσεις που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα. Ο απορροφητής έχει διάτρηση περίπου 24%, οι σχισμές είχαν βάθος 15mm και πλάτος 10mm, το βάθος της κοιλότητας ήταν 150mm με πρόσθετο πορώδη υλικό με αντίσταση ροής αέρα 86 Pa s m^{-1} το οποίο τοποθετήθηκε στον πάτο του διάτρητου πιάτου. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο transfer matrix με τις σχέσεις 9, 10, 16 και 1 δίνει ακριβή αποτελέσματα όπως φαίνεται. Προσθέτοντας τον όρο της εμπέδησης, οι σχέσεις 11 ή 12 προκαλούν αμελητέα επίπτωση στις προβλέψεις, αλλάζοντας τον συντελεστή απορρόφησης λιγότερο από ένα εκατοστό.

Μία απλή μέτρηση της μέγιστης απορρόφησης χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3 και 9 αποδίδει μία πρόβλεψη για την απορρόφηση με συχνότητα συντονισμού στα 100Hz μεγαλύτερη απ' ό τι μετρήθηκε. Αυτό δείχνει τη δύναμη και την χρησιμότητα των transfer function matrix, για τη διαδικασία μίας Helmholtz κατασκευής. Παρόμοια ακριβή αποτελέσματα βρέθηκαν επίσης από τον Ingard όταν εξέταζε την απορρόφηση με κυκλική διάτρηση με μία λεπτή επιφάνεια αντίστασης πίσω από την διάτρητη επιφάνεια.



Σχήμα 9 Πρόβλεψη και μέτρηση κάθετης πρόσπτωσης, του συντελεστή απορρόφησης για απορροφητή Helmholtz με σχισμές (μετρήσεις από Kristiansen και Vignel).

Στο παράρτημα 4 παρατίθενται τρεις κώδικες για το Matlab υπολογισμού του συντελεστή απορρόφησης των συνηχητών που περιγράφηκαν παραπάνω. Οι κώδικες αυτοί έχουν γραφτεί από τους Trevor J. Cox και Peter D' Antonio.

4.4 Απορροφητές Panel Absorber

Όταν απαιτείται απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες τότε οι Panel Absorbers χρησιμοποιούνται γενικότερα. Οι Panel Absorbers αποτελούνται από ελαστικά πλαίσια, τοποθετημένα σε σανίδες, προσαρτημένες σε ένα σταθερό τοίχο. Εναλλακτικά τέτοια πλαίσια μπορεί να είναι τοποθετημένα στο ταβάνι. Σε κάθε περίπτωση, για να είναι αποτελεσματικά τα πλαίσια θα πρέπει να τοποθετούνται σε θέσεις όπου το ηχητικό πεδίο είναι ισχυρό, (σε μέγιστα του στάσιμου κύματος).

Η ακουστική ενέργεια κατασπαταλάται από την κάμψη, ταλάντωση του πλαισίου. Επιπλέον εάν το πίσω μέρος τού πλαισίου είναι συμπληρωμένο με ένα πορώδες υλικό, η ενέργεια επίσης κατασπαταλάται στο πορώδες υλικό. Η μέγιστη απορρόφηση λαμβάνει χώρα στον πρώτο συντονισμό τού πλαισίου και της κοιλότητας του συστήματος. Είναι σύνηθες να χρησιμοποιούμε το νόμο του Sabine ως συντελεστή σε ένα πλαίσιο, παρότι η βάση για μια τέτοια χρήση

αθτεείται από τη λειτουργία της απόκρισης του πλαισίου. Αυτό συμβαίνει γιατί η απορρόφηση δεν εξαρτάται από τις επιμέρους ιδιότητες του πλαισίου, αλλά εξαρτάται από την απόκριση του πλαισίου σαν σύνολο.

Ακόμη πιο πέρα το πλαίσιο εξαρτάται από το σωστό ταίριασμα με το ηχητικό πεδίο για να είναι αποτελεσματικό. Η ενέργεια που κατασπαταλάται είναι εξαρτώμενη σημαντικά από το ηχητικό πεδίο και για αυτό το λόγω και από το υπόλοιπο δωμάτιο στο οποίο χρησιμοποιείται το πλαίσιο.

Αυτό το τελευταίο γεγονός κάνει την πρόβλεψη των ιδιοτήτων απορρόφησης των πλαισίων δύσκολο. Ένα τυπικό παράδειγμα των συντελεστών απορρόφησης για ένα πλαίσιο βρίσκεται στο διάγραμμα 7.7.

Δύο μέθοδοι πρόκειται να περιγράψουν για τον προσδιορισμό της απορρόφησης Sabine των πλαισίων. Ο ένας είναι ο εμπειρικός και βασίζεται σε δεδομένα τα οποία έχουν προέλθει από μετρήσεις που έγιναν σε αίθουσες διαλέξεων, συναυλιών, κ.τ.λ., και θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή. Ενώ ο άλλος είναι βασισμένος στην ανάλυση αλλά απαιτείται αξιoσημείωτη πειραματική έρευνα για να προσδιορίσουμε όλες τις απαιτούμενες παραμέτρους.

Εμπειρική μέθοδος

Ένα εμπειρικό γραφικό περίγραμμα πρόβλεψης-πλάνο ενεργειών (Hardwood Plywood Manufacturers Association, 1962) για ελαστικά πλαίσια (Panel absorbers) το οποίο έχει κριθεί χρήσιμο σε αίθουσες, χώρους συναυλιών, κ.τ.λ. θα περιγραφεί. Η ουσία του γραφικού περιγράμματος πρόβλεψης περικλείεται στα διαγράμματα 7.8 και 7.9. Καταρχήν ο τύπος της καμπύλης του Sabine που είναι επιθυμητή επιλέγεται από τις καμπύλες A-J στο διάγραμμα 7.8. Οι σταθερές καμπύλες είναι για τη διαμόρφωση της περιοχής του διάκενου πίσω από το πλαίσιο, ενώ οι διακεκομμένες για πλαίσιο το οποίο δεν είναι καλυμμένο με πορώδες υλικό.

Μετά τη συχνότητα f_0 που είναι η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού του πλαισίου και η συχνότητα στην οποία απαιτείται η μέγιστη απορρόφηση, προσδιορίζεται και από το σχήμα 7.9 από την επιλεγμένη καμπύλη A-J και από την επιθυμητή συχνότητα f_0 . Το απαιτούμενο κενό αέρα(διάκενο) σε mm πίσω από το πλαίσιο και η πυκνότητα της επιφάνειας του απαιτούμενου πλαισίου (kg/m^2) διαβάζεται απ' ευθείας από το διάγραμμα. Η συχνότητα συντονισμού που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη διαδικασία υπολογίζεται από τον τύπο :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{m L}}$$

ο οποίος δεν λαμβάνει υπ' όψη του την ακαμψία ή αλλιώς την γεωμετρία του πλαισίου.

Μια ορθή σχέση για ένα κόντρα πλακέ πλαίσιο είναι:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{mL + 0,6L \sqrt{ab}}}$$

όπου m η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας του πλαισίου,

L = το βάθος της κοιλότητας στο πίσω μέρος του πλαισίου,

a, b = οι διαστάσεις του πλαισίου,

για αυτό το λόγο προτείνεται, πριν τη χρήση του διαγράμματος 7.9, η συχνότητα της μέγιστης επιθυμητής απορρόφησης να πολλαπλασιάζεται με το λόγο:

$$\sqrt{\frac{m}{m + 0,6\sqrt{ab}}}$$

Αναλυτική μέθοδος

Ο συντελεστής απορρόφησης του Sabine των n συντονισμένων πλαισίων της συνολικής επιφάνειας S και της ξεχωριστής επιφάνειας A_p μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξής φόρμουλα. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής απορρόφησης είναι ρητά μια συνάρτηση των ιδιοτήτων του δωματίου όπως επίσης και των ιδιοτήτων του πλαισίου και συνεπώς δίκαια μπορούμε να αναμένουμε καλά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την συγκεκριμένη φόρμουλα.

Από την άλλη πλευρά το τίμημα για τα καλά αποτελέσματα θα είναι αρκετές μετρήσεις για να προσδιορίσουμε τις ιδιότητες του δωματίου αλλά και των πλαισίων. Ο όρος πλαίσιο περιλαμβάνει κάθε πίσω κοιλότητα είτε αυτή είναι καλυμμένη με πορώδες υλικό είτε όχι, ανάλογα την περίπτωση. Ο συντελεστής απορρόφησης του Sabine δίνεται από (Pan & Bies, 1990c)

$$\bar{\alpha} = \frac{4V\pi f}{Sc} \left[\left[\left(n_A + n_{pa} \left(1 + \frac{n_p}{n_A} + n_{pt} \right) \right) - \left[\left(n_A + n_{pa} \left(\frac{n_p}{n_A} - 1 \right) - n_{pt} \right)^2 + 4 \frac{n_p}{n_A} n_{pa}^2 \right]^{1/2} \right] - 2n_A \right]$$

Στην εξίσωση 7.82 το f είναι η κεντρική συχνότητα της μπάντας, c είναι η ταχύτητα του ήχου, V είναι ο όγκος του δωματίου, $n_A = 2.20/f T_{60A}$ είναι η απώλεια ενέργειας του ήχου στο δωμάτιο χωρίς το πλαίσιο (Panel) $n_{pT} = 2.20/f T_{60P}$ είναι η απορρόφηση του πλαισίου (Panel) σε ελεύθερο πεδίο, $n_{pA} = \rho c / 2\pi f m$ είναι η απορρόφηση των πλαισίων μέσα στο δωμάτιο, $n_p = (\text{sqrt } 3) A_p / (c_L h)$ είναι η πυκνότητα του πλαισίου η οποία πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό των πλαισίων αν παραπάνω από ένα πλαίσια χρησιμοποιούνται, $n_A = dN/df$ είναι η πυκνότητα του δωματίου και S είναι η ολική επιφάνεια όλων των πλαισίων και A_p είναι η επιφάνεια μόνο ενός πλαισίου, οι ποσότητες T_{60P} και T_{60A} είναι αντίστοιχα ο χρόνος που χρειάζεται για την εξασθένηση του ήχου κατά 60dB (χωρίς πλαίσιο) και με πλαίσιο σε ένα ημι-ανηχοϊκό θάλαμο. Η ποσότητα c_L είναι η ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων στο πλαίσιο, h είναι το πάχος του

πλαίσιου, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, m είναι μάζα ανά μονάδα επιφάνειας του πλαισίου. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την απορροφητικότητα ενέργειας του πλαισίου σ , στη δεύτερη έκδοση αυτού του κειμένου βασίστηκαν στα δεδομένα τα οποία υπολογίστηκαν από την Lyon(1975).

Για συχνότητες πάνω από τη διπλάσια συχνότητα συντονισμού της χαμηλότερης τάξης λειτουργίας η αποδοτικότητα (απορροφητικότητα) - ενέργειας του πλαισίου σ μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις. (Maidanic, 1962, διορθωμένα όπως Price & Crocker,1970). Παραπάνω από την διπλάσια θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού του πλαισίου και κάτω από την κρίσιμη συχνότητα.

$$\sigma = \left(\frac{2c^2}{f_c^2 A_p} g_1(\xi_c) + \frac{p_c}{f_c A_p} g_2(\xi_c) \right) \gamma \quad 2f_{1,1} < f < 0.99f_c$$

όπου

$$g_1(\xi_c) = \begin{cases} \frac{4}{\pi^4} \frac{(1-2\xi_c^2)}{\xi_c(1-\xi_c^2)^{1/2}}; & f < f_{c/2} \\ 0; & f > f_{c/2} \end{cases}$$

$$g_2(\xi_c) = \frac{1}{4\pi^2} = \left[\frac{(1-\xi_c^2) \log_e \left(\frac{1+\xi_c}{1-\xi_c} \right) + 2\xi_c}{(1-\xi_c^2)^{3/2}} \right]$$

$$\xi_c = \frac{f}{f_c}$$

Για απλά στηριζόμενα πλαίσια το γ παίρνει την τιμή του 1, ενώ για πλαίσια με συμπαγείς άκρες-γωνίες παίρνει την τιμή του 2. Όλες οι άλλες περιπτώσεις βρίσκονται μεταξύ αυτών των δύο τιμών.

Για πλαίσια στηριζόμενα σε ακριανά και ενδιάμεσα καρφιά η περίμετρος P στην εξίσωση 7.83 είναι το συνολικό μήκος της περιμέτρου του πλαισίου συν δύο φορές το μήκος όλων των καρφιών. Η περιοχή A_p είναι η περιοχή ολοκλήρου του πλαισίου. Κοντά στην κρίσιμη συχνότητα f_c η απορροφητικότητα ενέργειας για ένα πλαίσιο συνολικών διαστάσεων $L_x \cdot L_y$ είναι:

$$\sigma = \sqrt{\frac{L_x f_c}{c}} + \sqrt{\frac{L_y f_c}{c}}; \quad 0.99f_c < f < 1.01f_c$$

Παραπάνω από την κρίσιμη συχνότητα η απορρόφηση ενέργειας είναι:

$$\sigma = \left(1 - \frac{f_c}{f}\right)^{-1/2}; \quad f > 1.01f_c$$

Χαμηλότερα από την πρώτη συχνότητα συντονισμού του πλαισίου $f_{1,1}$, η απορρόφηση ενέργειας είναι (Beranek 1988):

$$\sigma = \frac{4A_p}{c^2} f^2$$

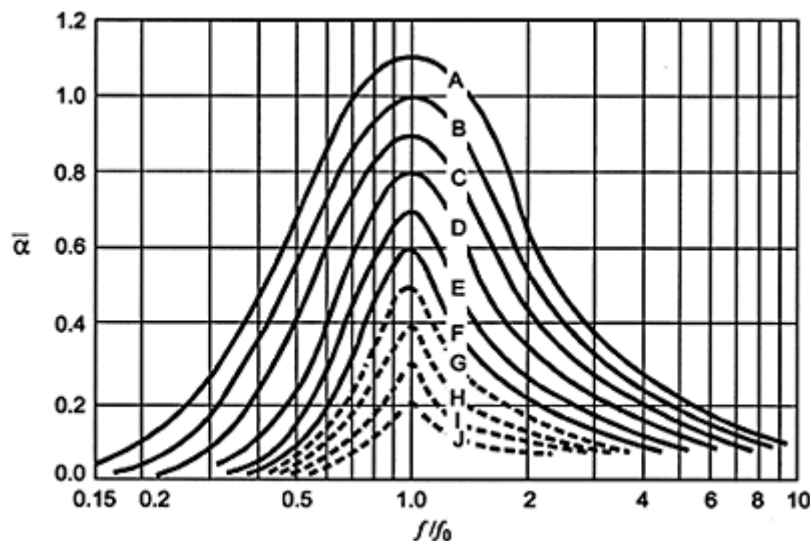
Ανάμεσα στον χαμηλότερο τρόπο συντονισμού του πλαισίου και στη διπλάσια από αυτή συχνότητα η απορρόφηση ενέργειας βρίσκεται, παρεμβάλλοντας γραμμικά (σε ένα λογάριθμο σ σε αντίθεση με τον λογάριθμο f στο διάγραμμα).

Η κρίσιμη συχνότητα του πλαισίου f_c προσδιορίζεται ως εξής:

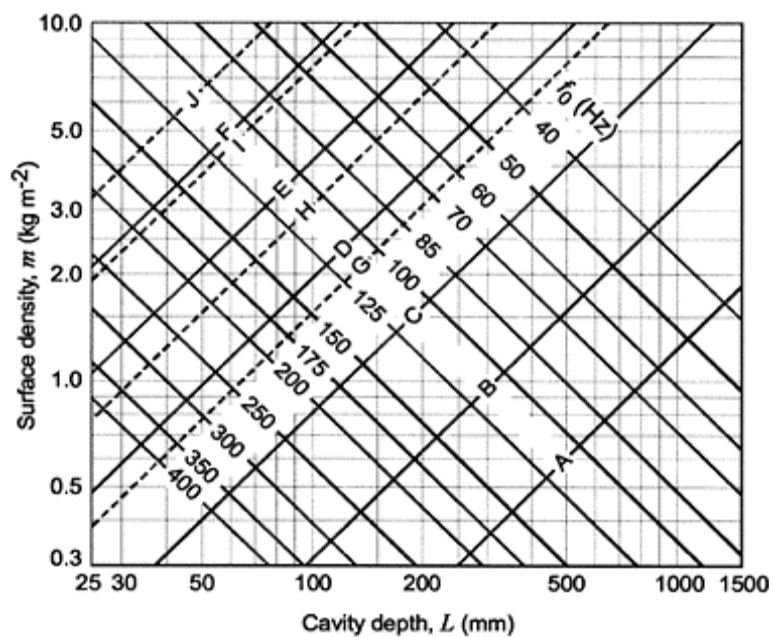
$$f_c = 0.551 \frac{c^2}{c_L^h}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις οι ποσότητες P και A_p είναι η περίμετρος του πλαισίου και η περιοχή του αντίστοιχα. Το πλαίσιο υποτίθεται ότι είναι

ισοτροπικό του ομοιόμορφου πάχους h και χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα του διαμήκου κύματος C_L . Για το ατσάλι και το αλουμίνιο το C_L παίρνει την τιμή περίπου 5150 m/sec ενώ για το ξύλο η τιμή βρίσκεται ανάμεσα στα 3800-4500 m/sec, τιμές του C_L για άλλα υλικά υπάρχουν στην βιβλιογραφία, αρκετά αξιόπιστες είναι: Beranek (Noise & Vibrations Control Engineering), Bias & Hansen (Engineering Noise Control).



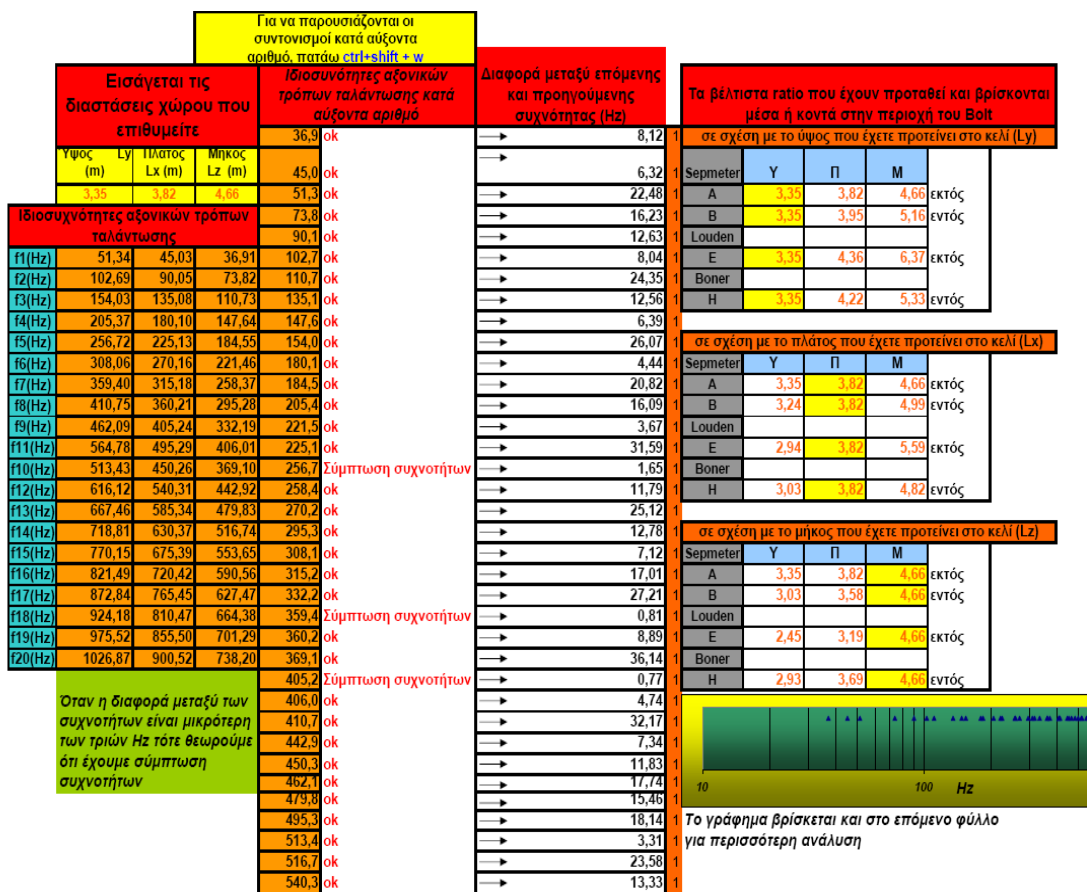
Σχήμα 1. Συντελεστής απορρόφησης κατά Sabine, για panel απορρόφησης από κόντρα πλακέ. Τα στοιχεία σχεδίασης των απορροφητών A-J βρίσκονται στο επόμενο σχήμα. Οι διακεκομμένες γραμμές (G-J) αφορούν panel χωρίς απορροφητικό υλικό στο κενό μεταξύ τους και του τοίχου τοποθέτησης. Στα panel A-F απαιτείται απορρόφηση. Το απορροφητικό υλικό δεν πρέπει να έρχεται σε επαφή με το panel διατηρώντας απόσταση 10 – 50 mm.



Σχήμα 2. Γραμμές σχεδίασης απορροφητή panel από κόντρα πλακέ. Χρησιμοποιούνται με το σχήμα 1. Η τιμή f_0 είναι η συχνότητα στην οποία απαιτείται μέγιστη απορρόφηση.

4.5 Πρόγραμμα επιλογής βέλτιστων διαστάσεων δωματίου για μέγιστη διάχυση.

Πραγματοποιήθηκε λογισμικό με τη βοήθεια του Microsoft Excel επιλογής βέλτιστων διαστάσεων δωματίου για την βέλτιστη κατανομή των στάσιμων κυμάτων όπου παρουσιάστηκαν στο 1^ο κεφάλαιο. Η επιλογή αυτών των αναλογιών έγινε με βάση τη συμπεριφορά των αξονικών τρόπων ταλάντωσης. Η αναλογίες (ratios) δωματίων που επιλέχθηκαν για τη μέγιστη διάχυση, βασίζονται σε στατιστικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο 1^ο κεφάλαιο συγκρίνοντας όλα τα ratios που έχουν προταθεί κατά καιρούς σε σχέση με την περιοχή του Bolt. Παρακάτω βλέπουμε το λογιστικό φύλλο του λογισμικού που πραγματοποιήθηκε.



Σχήμα 1 Λογισμικό επιλογής βέλτιστων αναλογιών δωματίου (modes axonika)

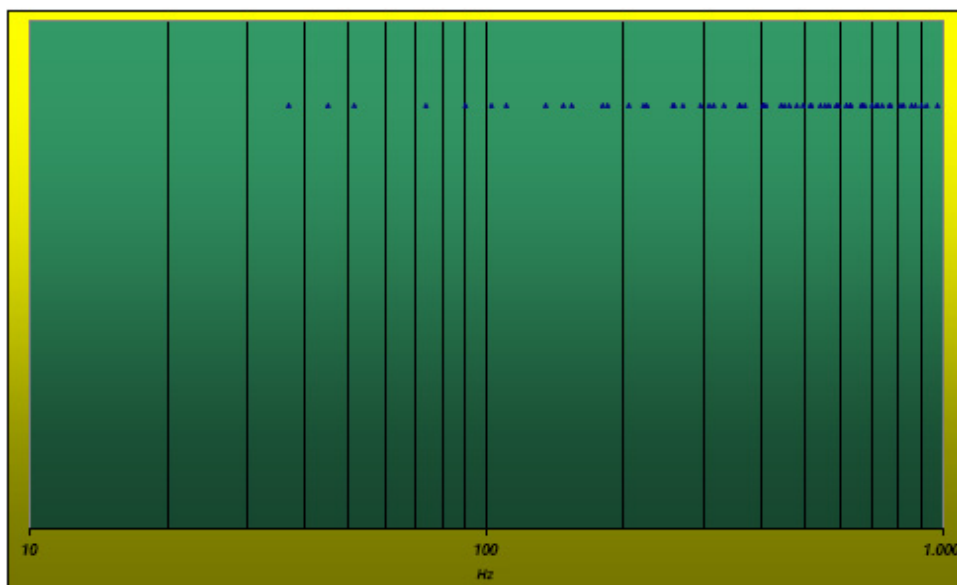
Στο σχήμα 1 ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά φαίνονται :

Η περιοχή όπου εισάγονται τις διαστάσεις του χώρου (Ύψος – Πλάτος – Μήκος) που επιθυμούμε. Ακριβώς από κάτω, παρουσιάζονται οι αξονικοί τρόποι ταλάντωσης της κάθε διάστασης (για n μέχρι 20) όπως παρουσιάστηκαν στο 1^ο κεφάλαιο.

Πληκτρολογώντας **ctrl + shift + w** γίνεται κατανομή όλων των αξονικών τρόπων ταλάντωσης που προκύπτουν από τις τρεις διαστάσεις, κατά αύξοντα αριθμό, ενώ ακριβώς δίπλα φαίνονται αν υπάρχουν συμπτώσεις τρόπων ταλάντωσης μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων. Θεωρούμε ότι έχουμε σύμπτωση συχνοτήτων όταν η διαφορά τους είναι μικρότερη των 3Hz.

Δεξιότερα φαίνεται η διαφορά των ιδιοσυχνοτήτων (επόμενη – προηγούμενη) έτσι ώστε να είναι περισσότερο αντιληπτή η απόσταση μεταξύ τους.

Δεξιότερα υπολογίζονται τα βέλτιστα ratio που έχουν επιλεχθεί στατιστικά και έχουν προταθεί από τους Sermeter, Louden και Boner, σε σχέση με το ύψος, το πλάτος και το μήκος που είχαν εισαχθεί στην αρχή . Ακριβώς από κάτω φαίνεται το γράφημα το οποίο δείχνει πως έχουν κατανεμηθεί τα αξονικά στάσιμα κύματα στο φάσμα. Το γράφημα αυτό φαίνεται επίσης σε ένα δεύτερο φύλλο για περισσότερη οπτική ανάλυση.



Σχήμα 2 κατανομή στάσιμων κυμάτων στο φάσμα

Κεφάλαιο 5. Πειράματα – Μετρήσεις

5.1 Κρουστική απόκριση Control Room

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κρουστικής απόκρισης και χαρτογράφηση της κατανομής της στάθμης ηχητικής πίεσης σε control room καθώς επίσης .

5.1.1 Control Room 1

Στόχος πειραματικής διαδικασίας:

- μέτρηση της ποιότητας της στερεοφωνίας στη θέση του ηχολήπτη
- αποσαφήνιση τυχών προβλημάτων
- σύγκριση των πραγματικών μετρήσεων με τα θεωρητικά μοντέλα
- η τρισδιάστατη μοντελοποίηση του χώρου
- σύγκριση των εικονικών μετρήσεων με τις πραγματικές και
- πιθανές προτάσεις για βελτίωση των πιθανών προβλημάτων.

Πειραματική διαδικασία

Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

- Μικρόφωνο μετρήσεων Earthworks M30.
- Πρόγραμμα ακουστικών μετρήσεων MLSSA.
- Η/Υ
- Ηχόμετρο SIP 95 (01dB) Type I
- Μέτρο με ακρίβεια εκατοστού

-
- Φωτογραφική μηχανή

Παρακάτω βλέπουμε φωτογραφίες του control room 1 :



Σχήμα 1 και 2. Μπροστά και δεξιός τοίχος αντίστοιχα

Ο μπροστά τοίχος είναι, καλυμμένος με απλή, ελαφριά μοκέτα και ξύλο ραμποτέ.

Ο δεξιός τοίχος έχει διπλή συρόμενη πόρτα με διπλό τζάμι, και η υπόλοιπη επιφάνεια είναι καλυμμένη με φελλό.



Σχήμα 3. Ο αριστερός τοίχος, ο οποίος έχει μία διπλή συρόμενη πόρτα, με απλό μονό τζάμι, το οποίο όπως βλέπουμε, είναι καλυμμένο πάνω και κάτω μερικώς, με απλή μοκέτα, ενώ ο υπόλοιπος τοίχος είναι καλυμμένος με φελλό.

Ο αριστερός τοίχος, ο οποίος έχει μία διπλή συρόμενη πόρτα, με απλό μονό τζάμι, το οποίο όπως βλέπουμε, είναι καλυμμένο πάνω και κάτω μερικώς, με απλή μοκέτα, ενώ ο υπόλοιπος τοίχος είναι καλυμμένος με φελλό.



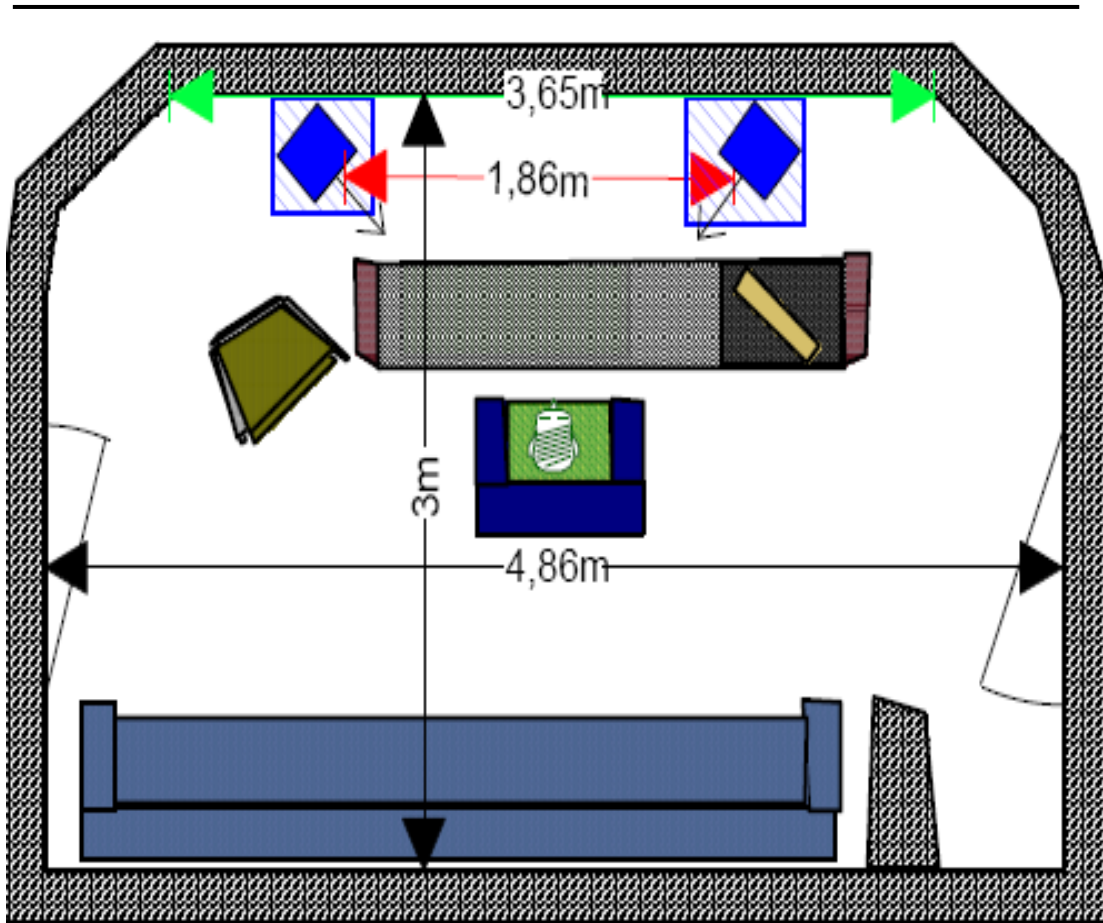
Σχήμα 4 Ο πίσω τοίχος, ταβάνι και πάτωμα:

Ο πίσω τοίχος είναι καλυμμένος με απλή ελαφριά μοκέτα, επίσης υπάρχει μία κολόνα, η οποία δε φαίνεται, αλλά θα σχεδιασθεί στη μοντελοποίηση του χώρου.

Το ταβάνι επίσης είναι καλυμμένο με απλή μοκέτα, με μία σχετική κλίση, η οποία έχει μετρηθεί, και μία μικρή επιφάνεια από ξύλο ραμποτέ.

Το πάτωμα επίσης έχει απλή μοκέτα, έναν καναπέ και το γραφείο με την κονσόλα και τον Η/Υ.

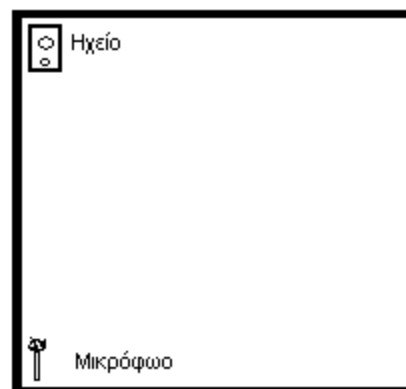
Για να έχουμε μία καλύτερη άποψη του χώρου έχουμε σχεδιάσει τη **κάτοψη** του με το πρόγραμμα CaraCad Room design που θα παρουσιάσουμε παρακάτω.



Σχήμα 5 Κάτοψη χώρου

Περιγραφή μεθοδολογίας μετρήσεων

Η πρώτη μέτρηση είναι με το ένα ηχείο σε μία από της γωνίες του δωματίου, ενώ το μικρόφωνο σε μία άλλη γωνία του δωματίου. Με αυτόν τον τρόπο διεγείρουμε όλα τα στάσιμα του δωματίου στη μέγιστη ένταση που μπορούν να πάρουν. Στις γωνίες του δωματίου έχουμε πάντα μέγιστο πίεσης, για αυτό τον λόγο τοποθετώντας το ηχείο σε μία γωνία του δωματίου και το μικρόφωνο σε μία άλλη, όλες οι συχνότητες σε αυτή την μέτρηση παίρνουν τη μέγιστη ένταση που μπορούν να πάρουν στον εκάστοτε χώρο Τα



Σχήμα 1 Μέτρηση 1

αποτελέσματα αυτής της μέτρησης, μας δίνουν τη μέγιστη ενέργεια που μπορούν να παίρνουν οι συχνότητες κυρίως στην περιοχή των στάσιμων κυμάτων και λίγο από την περιοχή διάχυσης, από οποιαδήποτε, άλλη μέτρηση στο δωμάτιο. Ωστόσο θα δούμε παρακάτω ότι σε κάποιες μετρήσεις η ένταση των συχνοτήτων ακόμη και αυτών που βρίσκονται στην περιοχή στάσιμων κυμάτων, είναι μεγαλύτερη από αυτή της μέτρησης 1, αυτό συμβαίνει γιατί το μικρόφωνο βρίσκεται κοντά στο απ' ευθείας πεδίο των ηχείων, με αποτέλεσμα να ενισχύονται περισσότερο. Έτσι έχουμε μία σημαντική πληροφορία του δωματίου σχετικά με την συμπεριφορά της ενέργειας των συχνοτήτων, από τη μέτρηση 1.

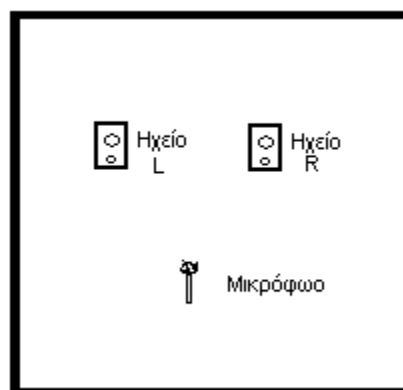
Στη δεύτερη μέτρηση τοποθετούμε τα δύο ηχεία στην προεπιλεγμένη θέση τους ενώ το μικρόφωνο στη προεπιλεγμένη θέση του ηχολήπτη.

Με αυτή την μέτρηση βλέπουμε την συνολική φασματική εικόνα του δωματίου σε σχέση με τη θέση των δύο ηχείων στη θέση του ηχολήπτη.

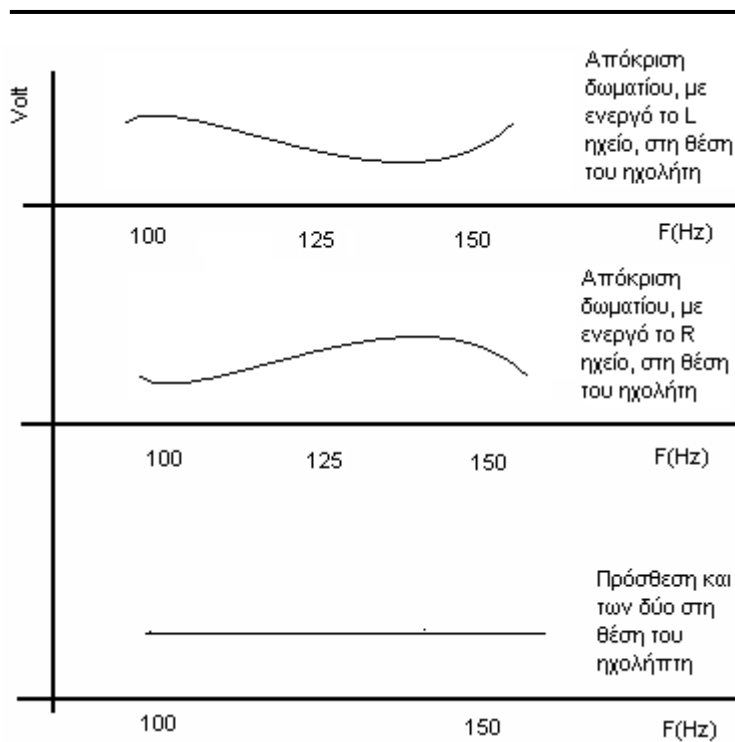
Επειδή από την δεύτερη μέτρηση βλέπουμε το φασματικό αποτέλεσμα και των δύο ηχείων, πρέπει τώρα να δούμε το αποτέλεσμα του φάσματος που διεγείρετε με το κάθε ηχείο ξεχωριστά.

Αυτό το κάνουμε γιατί υπάρχει η πιθανότητα με την συνύπαρξη και των δύο

ηχείων να έχουμε ως αποτέλεσμα μία φαινομενικά ομαλή φασματική περιοχή, ωστόσο αυτή να προκύπτει από την πρόσθεση των δύο σημάτων των ηχείων στη θέση του ηχολήπτη, τα οποία έχουν μία τέτοια διαφορά που το αποτέλεσμά τους σαν σύνολο να φαίνεται ισορροπημένο, όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα.



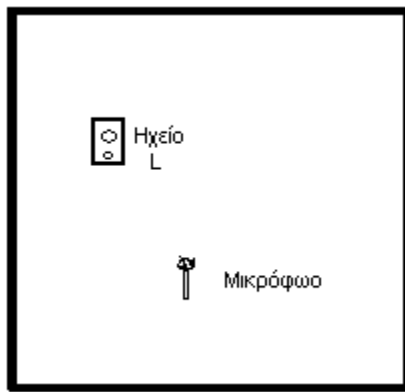
Σχήμα 2 Μέτρηση 2



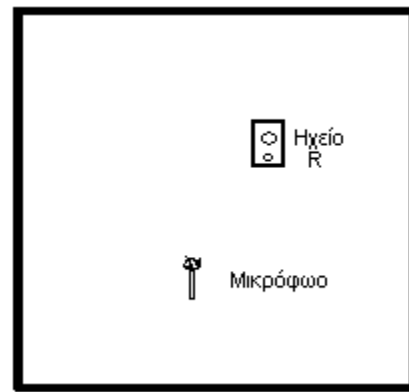
Σχήμα 3 Ακύρωση λόγω συμβολής

Όταν συμβαίνει κάτι τέτοιο, ως αποτέλεσμα έχουμε, την διαστρέβλωση της στερεοφωνικής εικόνας. Στο παράδειγμά μας αντιλαμβανόμαστε ότι αν αναπαράγουμε από τα ηχεία, μία ηχητική πληροφορία η οποία αποτελείται κατά βάση από τις συχνότητες 100Hz έως 110 Hz περίπου και την έχουμε χωροτοποθετήσει (κάνοντας panning) στο κέντρο, θα έχουμε ως αποτέλεσμα να την ακούμε προς τα αριστερά, ενώ αν κάνουμε το ίδιο με μία ηχητική πληροφορία που αποτελείται κατά βάσει από τις συχνότητες 125Hz έως 150Hz, θα την ακούμε προς τα δεξιά. Αυτό συμβαίνει παρόλο που το φασματικό αποτέλεσμα της δεύτερης μέτρησης φαίνεται να είναι ομαλό και παρόλο που η ηχητική πληροφορία έχει χωροτοποθετηθεί στο κέντρο. Σχετικά με το πόσο αριστερά η δεξιά θα ακούμε την πηγή σχετικά με τη διαφορά έντασης και την καθυστέρηση του ανακλώμενου ήχου το περιγράψαμε στο κεφάλαιο 1 με το φαινόμενο Haas

Για αυτό τον λόγο στη συνέχεια πραγματοποιούμε τις **μετρήσεις τρία και τέσσερα**, όπου έχουμε ενεργό κάθε φορά το ένα ηχείο ενώ το μικρόφωνο το τοποθετούμε στη θέση του ηχολήτη.



Σχήμα 4 Μέτρηση 3



Σχήμα 5 Μέτρηση 4

Τώρα είμαστε στο σημείο όπου έχουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων τρία και τέσσερα. Το ιδανικό που θέλουμε από αυτές τις δύο μετρήσεις είναι να έχουμε και στις δύο περιπτώσεις ένα όσο το δυνατόν ομαλότερο φάσμα στη θέση του ηχολήπτη και δεύτερον και οι δύο μετρήσεις να έχουν όσο το δυνατόν παρόμοια αποτελέσματα στη θέση του ηχολήπτη, για τους λόγους που αναλύσαμε στο κεφάλαιο περιγραφής των αλλοιώσεων. Αν δε συμβαίνει κάτι τέτοιο, πρέπει τώρα να εξετάσουμε, τα παρακάτω

1^{ον} Πώς να έχουμε όσο το δυνατόν παρόμοια αποτελέσματα και από τα δύο ηχεία.

2^{ον} Για ποιο λόγο συμβαίνουν οι όποιες φασματικές αλλοιώσεις και

3^{ον} Πώς να τις εξαλείψουμε

Οι αλλοιώσεις που παρουσιάζονται στην περιοχή στάσιμων κυμάτων συνήθως αντιμετωπίζονται με απορροφητές, χαμηλών συχνοτήτων, όπως είναι οι panel absorbers, και οι συνηχητές Helmholtz, αλλά το προτιμότερο, είναι η αλλαγή των διαστάσεων του δωματίου σε πολύ έντονα προβλήματα, αν αυτό είναι εφικτό .

Οι αλλοιώσεις που παρουσιάζονται στην περιοχή διάχυσης αντιμετωπίζονται με συνδυασμό απορροφητών χαμηλών συχνοτήτων (για τις συχνότητες που βρίσκονται κοντά στη περιοχή στάσιμων κυμάτων) και διαχυτών. Ο λόγος που

χρησιμοποιούμε απορροφητές χαμηλών συχνοτήτων για τις συχνότητες που βρίσκονται κοντά στην περιοχή στάσιμων κυμάτων, είναι γιατί οι συχνότητες αυτές είναι αρκετά χαμηλές με αποτέλεσμα, να χρειαζόμαστε διάχυτες μεγάλων διαστάσεων για να καταφέρουμε να διαχύσουμε τέτοιες συχνότητες, με τέτοιου μεγέθους μήκους κύματος, όπως θα δούμε στο κεφάλαιο των διαχυτών.

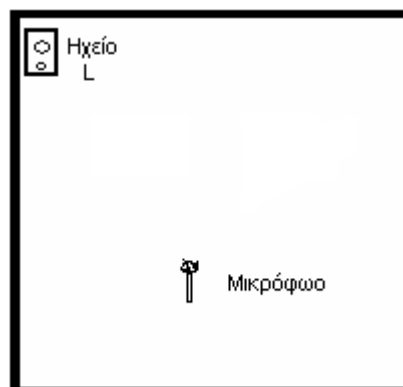
Οι αλλοιώσεις που παρουσιάζονται στην περιοχή ανάκλασης συνήθως αντιμετωπίζονται με απορροφητές, υψηλών συχνοτήτων, όπως ο πετροβάμβακας και επίσης με διαχυτές. Σε αυτή την περιοχή επειδή από συχνότητα σε συχνότητα, τα φαινόμενα είναι πολύ έντονα, δεν ασχολούμαστε, με κάθε συχνότητα ξεχωριστά, αλλά με ομάδες συχνοτήτων, ενώ χρησιμοποιούμε τη λογική της γεωμετρικής ακουστικής, γιατί το δωμάτιο θεωρείται, ακουστικά μεγάλο, για αυτές τις συχνότητες.

Για να επιτύχουμε όσο το δυνατόν παρόμοια αποτελέσματα του φάσματος που προκαλούνται από το κάθε ηχείο ξεχωριστά, στη θέση του ηχολήπτη, είναι πολύ βοηθητικό τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε στις επιφάνειες το δωματίου, να τηρούν όσο το δυνατόν την έννοια της συμμετρίας στον αντικριστούς τοίχους. Δηλαδή τα υλικά που επιλέγουμε για να 'ντύσουμε' ένα τοίχο, τα ίδια υλικά ακριβώς με τον ίδιο τρόπο να τα τοποθετήσουμε και στον αντικριστό του. Επίσης μερικές φορές χρησιμοποιείται και η έννοια της αντισυμμετρίας, δηλαδή, ότι υλικά επιλέξαμε για να 'ντύσουμε' ένα τοίχο θα χρησιμοποιήσουμε ακριβώς τα ίδια υλικά και στον άλλο τοίχο αλλά με την κατοπτρική έννοια.

Επίσης για να έχουμε παρόμοια αποτελέσματα του φάσματος που προκαλούνται από το κάθε ηχείο ξεχωριστά, στη θέση του ηχολήπτη, θα πρέπει να τοποθετήσουμε τα ηχεία σε σημεία στο χώρο που μεταξύ τους αυτά τα σημεία να έχουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά το φάσμα. Το ιδανικό θα ήταν τα ηχεία να είναι τοποθετημένα στο χώρο, έτσι ώστε να μην βρίσκονται κοντά σε δεσμούς ή κοιλίες πίεσης, και αυτό να αφορά όλες τις συχνότητες, ενώ το ίδιο να ισχύει και για τη θέση του ηχολήπτη. Όπως καταλαβαίνουμε η επιλογή αυτών των θέσεων είναι κάτι εξαιρετικά δύσκολο έως απίθανο να συμβεί. Επειδή

είναι εξαιρετικά σπάνιο να βρεθούν αυτές οι θέσεις και να πληρούν αυτά τα κριτήρια ενώ ταυτόχρονα διατηρούν την έννοια της στερεοφωνίας, επιλέγουμε θέσεις τέτοιες που να τείνουν όσο το δυνατόν προς το ιδανικό. Μία πρώτη παραδοχή είναι να τοποθετήσουμε τα ηχεία σε τέτοια σημεία που να πέφτουν σε παρόμοιες κοιλίες και εξάρσεις για όσο το δυνατόν περισσότερες συχνότητες γίνεται, έτσι ώστε να έχουν όσο το δυνατόν παρόμοια επίδραση στο φάσμα, στη θέση του ηχολήπτη. .

Για αυτό το λόγω πραγματοποιούμε τη **μέτρηση 5**, όπου έχουμε ενεργό ένα από τα δύο ηχεία και το τοποθετούμε σε μία γωνία, ενώ το μικρόφωνο στη θέση του ηχολήπτη. Με αυτή τη μέτρηση παίρνουμε τέσσερις πληροφορίες :



Σχήμα 6 Μέτρηση 5

1. Αν επιθυμούμε να βρούμε ένα βέλτιστο σημείο για να τοποθετήσουμε το ηχείο μας, για τους λόγους που αναφέραμε παραπάνω, παίρνουμε αρκετά στοιχεία από αυτή τη μέτρηση. Η θέση που έχει το ηχείο σε αυτή τη μέτρηση, είναι σε κοιλία πίεσης για όλες τις συχνότητες,. Αυτό μας δείχνει τη μέγιστη τιμή ενέργειας που μπορούν να πάρουν οι συχνότητες, έχοντας σταθερό το μικρόφωνο στο σημείο του ηχολήπτη. Έτσι μπορούμε να δούμε από αυτή τη μέτρηση κατά ποιο είναι το μέγιστο όριο αύξησης της ενέργειας κάποιων συχνοτήτων, απλά μετακινώντας το ηχείο, ενώ το μικρόφωνο μένει σταθερό στη θέση του ηχολήπτη.
2. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μέτρησης 5 με αυτά της μέτρησης 1, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα, σχετικά με το αν η θέση του ηχολήπτη βρίσκεται πάνω σε δεσμό ή κοιλία πίεσης, για κάποιες συχνότητες. Εφόσον στη μέτρηση 1 παίρνουμε τις μέγιστες τιμές ενέργειας των συχνοτήτων, αν μετακινήσουμε το μικρόφωνο, στη θέση του ηχολήπτη, όπως

στη μέτρηση 5 και η ενέργεια κάποιων συχνοτήτων μειωθεί, σημαίνει ότι τοποθετήσαμε το μικρόφωνο σε δεσμό πίεσης για αυτές τις συχνότητες. Αν ωστόσο σε μερικές συχνότητες η ενέργειά τους δεν αλλάξει από τη μία μέτρηση στην άλλη, τότε σημαίνει ότι τοποθετήσουμε το μικρόφωνο σε σημείο που είναι κοιλία πίεσης για αυτές τις συχνότητες.

3. Συγκρίνοντας τη μέτρηση 3 με τη μέτρηση 5, κι έπειτα τη μέτρηση 4 με τη μέτρηση 5 μπορούμε να αντιληφθούμε, αν το ηχείο L ή R αντίστοιχα βρίσκεται σε δεσμό, ή κοιλία πίεσης για κάποιες συχνότητες στις προεπιλεγμένες θέσεις τους αντίστοιχα Αυτό πολύ εύκολα το καταλαβαίνουμε, γιατί στη περίπτωση όπου το ηχείο βρίσκεται σε δεσμό πίεσης κατά τη μέτρηση 3 για το R ηχείο ή αντίστοιχα στη μέτρηση 4 για το L ηχείο, στη μέτρηση 5 θα δούμε μία αύξηση της ενέργειας, γιατί πολύ απλά τοποθετήσαμε το ηχείο σε σημείο που είναι κοιλία πίεσης για αυτές τις συχνότητες, ενώ στην προηγούμενη περίπτωση ήταν σε δεσμό. Αν ωστόσο είχαμε τοποθετήσει το ηχείο σε κοιλία πίεσης για κάποιες συχνότητες, στη μέτρηση 3 για το L ηχείο ή αντίστοιχα στη μέτρηση 4 για το R ηχείο, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μέτρησης 5 δε θα βλέπαμε καμία διαφορά. Γιατί τοποθετήσαμε το ηχείο από ένα σημείο που ήταν κοιλία πίεσης σε ένα άλλο σημείο που ήταν πάλι κοιλία πίεσης.
4. Μπορούμε να δούμε αν τοποθετώντας στη μέτρηση 3 το R ηχείο ή αντίστοιχα στη μέτρηση 4 το L ηχείο, σε τέτοιο σημείο που να προκαλεί κάποια ανάκλαση η οποία συμβάλει προσθετικά. Αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε μόνο σε μία ιδιαίτερη περίπτωση, όπου παίρνουμε μεγαλύτερη ενέργεια σε μία συχνότητα σε αυτή τη μέτρηση συγκρινόμενη με τη μέτρηση 5. Καταλήγουμε σε αυτό το συμπέρασμα σε αυτή τη περίπτωση, γιατί έχοντας σταθερό το μικρόφωνο, στη θέση του ηχολήπτη, η μέτρηση 5 μας δίνει το μέγιστη ενέργεια, για οποιαδήποτε άλλη θέση του ηχείου στο

χώρο. Άρα ο μόνος λόγος για να έχουμε μεγαλύτερη ενέργεια στη μέτρηση 3 ή 4, είναι λόγω κάποιας προσθετικής συμβολής.

Το ίδιο κάνουμε και στη **μέτρηση 6** όπου αυτή τη φορά βάζουμε το αριστερό ηχείο στη γωνία, με το μικρόφωνο στη θέση του ηχολήπτη.

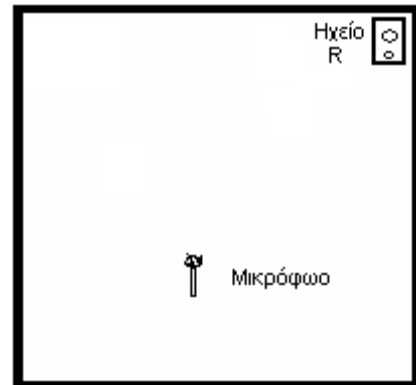
Τα συμπεράσματα 1,3,4 ισχύουν μόνο όταν στη μέτρηση 3 και 4 το μικρόφωνο που βρίσκεται στη θέση του ηχολήπτη, δε βρίσκεται στο απ' ευθείας πεδίο με τα ηχεία.

Αν συμβαίνει κάτι τέτοιο τότε τα συμπεράσματά θα αλλοιωθούν, γιατί οι ενέργεια των συχνοτήτων ενισχύεται περισσότερο, λόγω τις απόστασης.

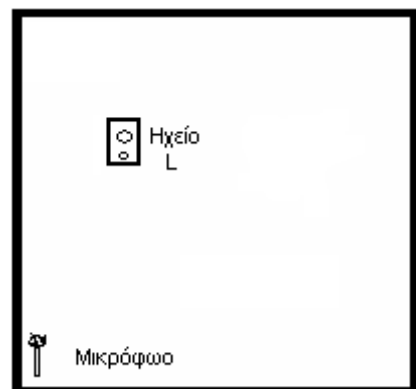
Για αυτό το λόγω πραγματοποιούμε τη μέτρηση 7

Στη **μέτρηση 7**, έχουμε ενεργό ένα από τα δύο ηχεία, το οποίο είναι τοποθετημένο στην προεπιλεγμένη θέση του, ενώ το μικρόφωνο, το τοποθετούμε σε μία από τις γωνίες.

Με αυτή τη μέτρηση παίρνουμε τέσσερις πληροφορίες.



Σχήμα 7 Μέτρηση 6



Σχήμα 8 Μέτρηση 7

1. Αν επιθυμούμε να μετακινήσουμε τη θέση του ηχολήπτη από την προεπιλεγμένη θέση του για να βρούμε μία βέλτιστη, τότε με τα αποτελέσματα της μέτρησης επτά θα αποκτήσουμε μια άποψη. Στη μέτρηση επτά ουσιαστικά βλέπουμε τη μέγιστη τιμή ενέργειας που μπορούν να πάρουν οι συχνότητες, έχοντας σταθερό το ηχείο στην προεπιλεγμένη θέση του. Αυτό ισχύει γιατί το μικρόφωνο σε αυτή τη περίπτωση βρίσκεται σε

σημείο που είναι κοιλία πίεσης για όλες τις συχνότητες. Οπότε έτσι γνωρίζουμε ότι όσο και να μετακινήσουμε το μικρόφωνο στο χώρο ενώ έχουμε σταθερή τη θέση του ηχείου, δε πρόκειται να συναντήσουμε μεγαλύτερες τιμές ενέργειας για τις συχνότητες από αυτή τη μέτρηση.

2. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μέτρησης επτά με αυτά της μέτρησης 1, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα, σχετικά με το αν το ηχείο είναι τοποθετημένο σε δεσμό ή κοιλία πίεσης. Όπως έχουμε δει, στη μέτρηση 1 η ενέργεια των συχνοτήτων είναι η μέγιστη σε σύγκριση με οποιαδήποτε άλλη μέτρηση στο χώρο, με αποτέλεσμα αν μετακινήσουμε το ηχείο από τη γωνία, στην προεπιλεγμένη θέση του όπως στη μέτρηση επτά και σε κάποιες συχνότητες μειωθεί η ενέργειά τους, τότε αυτό σημαίνει ότι το ηχείο στη μέτρηση επτά είναι τοποθετημένο σε δεσμό πίεσης για αυτές τις συχνότητες. Αν ωστόσο η ενέργεια κάποιων συχνοτήτων παραμένει ίδια κατά τη σύγκριση των μετρήσεων 1 και 7, τότε σημαίνει ότι έχουμε τοποθετήσει το ηχείο σε κοιλία πίεσης για αυτές τις συχνότητες

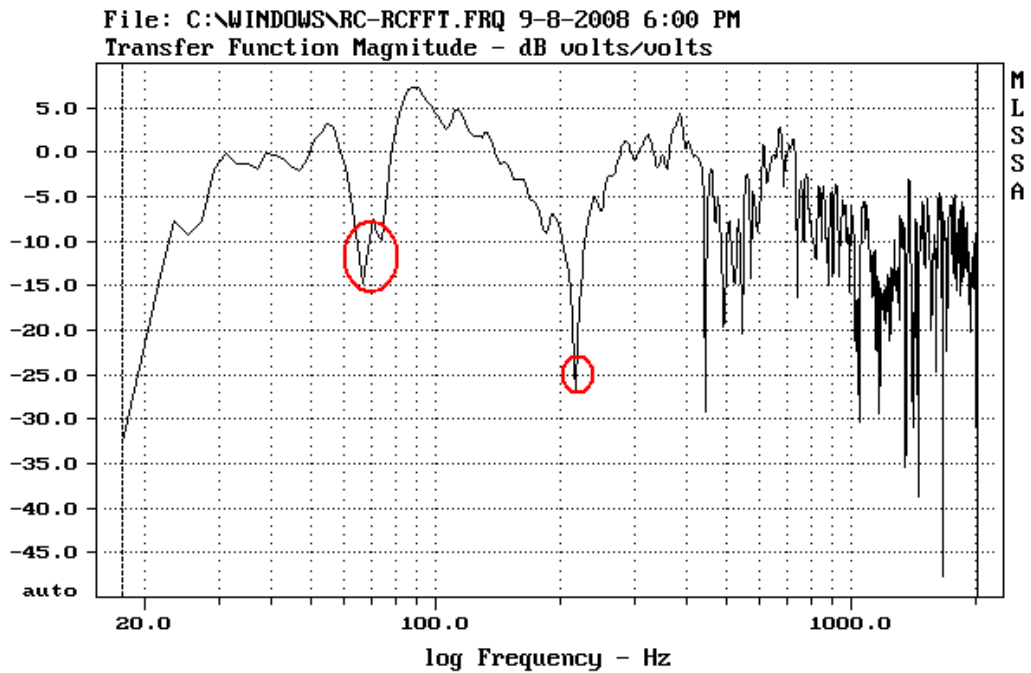
3. Συγκρίνοντας τη μέτρηση 3 με τη μέτρηση 7, ή τη μέτρηση 4 με τη μέτρηση 7, μπορούμε να αντιληφθούμε, αν το μικρόφωνο βρίσκεται σε δεσμό ή κοιλία πίεσης, στη προεπιλεγμένη θέση του ηχολήπτη Αυτό το καταλαβαίνουμε, γιατί στη περίπτωση όπου το μικρόφωνο βρίσκεται σε δεσμό πίεσης για κάποιες συχνότητες, στη μέτρηση 3 ή στην 4, αυτές οι συχνότητες θα έχουν λιγότερη ενέργεια συγκρινόμενη με τη μέτρηση 7. Αυτό συμβαίνει γιατί τοποθετήσαμε το μικρόφωνο σε σημείο που είναι κοιλία πίεσης για αυτές τις συχνότητες στη μέτρηση 7 ενώ στην μέτρηση 3 ή 4 ήταν σε δεσμό. Αν ωστόσο είχαμε τοποθετήσει το μικρόφωνο σε κοιλία πίεσης για κάποιες συχνότητες, στη μέτρηση 3 ή 4, σε σύγκριση με τη μέτρηση 7 δε θα βλέπαμε καμία διαφορά σε αυτές τις συχνότητες. Γιατί τοποθετήσαμε το ηχείο από ένα σημείο που ήταν κοιλία πίεσης σε ένα άλλο σημείο που ήταν πάλι κοιλία πίεσης για αυτές τις συχνότητες.

4. Μπορούμε να δούμε αν τοποθετώντας στη μέτρηση 3 ή 4 το μικρόφωνο, σε τέτοιο σημείο που προκαλείται προσθετική συμβολή. Αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε μόνο σε μία ιδιαίτερη περίπτωση, όπου παίρνουμε μεγαλύτερη ενέργεια σε μία συχνότητα σε αυτή τη μέτρηση, συγκρινόμενη με τη μέτρηση επτά. Καταλήγουμε σε αυτό το συμπέρασμα σε αυτή τη περίπτωση, γιατί έχοντας σταθερό το ηχείο R ή L για τις μετρήσεις 3 και 4 αντίστοιχα, στη προεπιλεγμένη θέση τους, η μέτρηση επτά μας δίνει το μέγιστο φάσμα, για οποιαδήποτε άλλη θέση του μικροφώνου στο χώρο. Άρα ο μόνος λόγος για να έχουμε μεγαλύτερη ενέργεια στη μέτρηση 3 ή 4 σε σχέση με τη μέτρηση επτά, είναι λόγω κάποιας προσθετικής συμβολής.

Και εδώ τα συμπεράσματα 1,3,4 ισχύουν μόνο όταν στη μέτρηση 3 και 4 το μικρόφωνο που βρίσκεται στη θέση του ηχολήπτη, δε βρίσκεται στο απ' ευθείας πεδίο με τα ηχεία. Αν συμβαίνει κάτι τέτοιο τότε τα συμπεράσματά θα αλλοιωθούν, γιατί οι ενέργεια των συχνοτήτων ενισχύεται περισσότερο, λόγω της μικρής απόστασης.

Επεξεργασία και σχολιασμός μετρήσεων

Ξεκινώντας από τη **μέτρηση 1** μπορούμε κατευθείαν να προσδιορίσουμε τα βασικά προβλήματα του χώρου, που στο προκείμενο χώρο βρίσκονται κυρίως στις περιοχές 65Hz – 75Hz, 80Hz -100Hz, και 150Hz – 250Hz

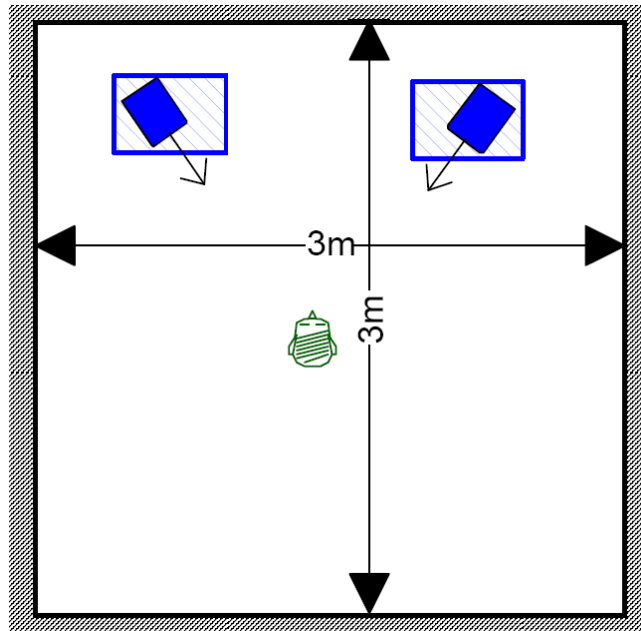


CURSOR: y = -14.6276 x = 2009.7656 (1029)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

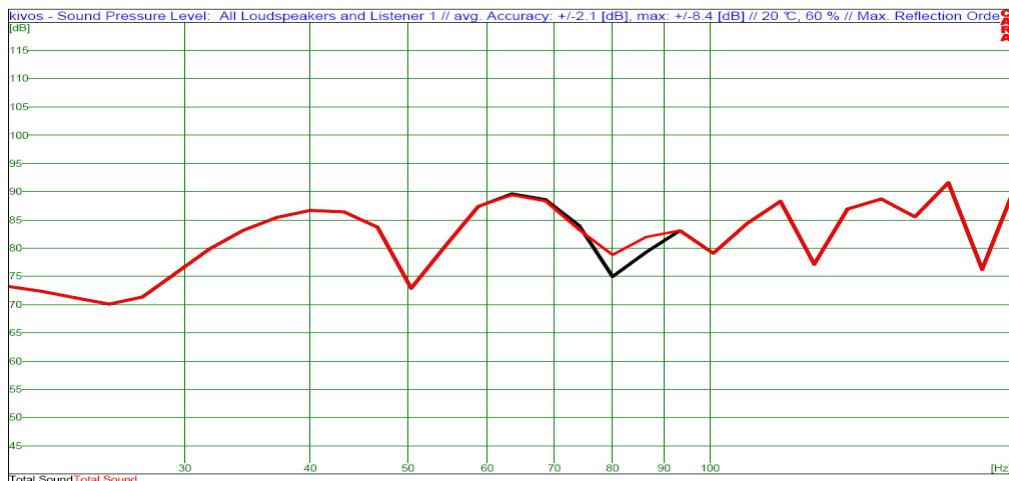
Σχήμα 1 Μέτρηση 1

Η λύση για την περιοχή 65Hz -75Hz η οποία βρίσκεται στη περιοχή των στάσιμων κυμάτων, θα μας τη δόση ένας απορροφητής χαμηλών συχνοτήτων, όπως είναι ένας panel absorber ή συνηχητής Helmholtz. Φαίνεται παράδοξο, το ότι επιθυμούμε να απορροφήσουμε μία συχνοτική περιοχή που ουσιαστικά πρέπει να την ενισχύσουμε. Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα αυτού του φαινομένου. Στο παράδειγμά έχει δημιουργηθεί έναν δωμάτιο σε σχήμα κύβου (3m * 3m *3m), γιατί όπως είναι γνωστό σε τέτοια δωμάτια είναι πολύ έντονος ο εκφυλισμός του φάσματος, λόγω πολλαπλών συμπτώσεων των ιδιοσυχνοτήτων.



Σχήμα 2 Δωμάτιο σε σχήμα κύβου

Παρακάτω φαίνεται η μέτρηση έχοντας ενεργά και τα δύο ηχεία ενώ το μικρόφωνο βρίσκεται στη θέση του ηχολήπτη. Η μαύρη γραμμή δείχνει την απόκριση του δωματίου σε αυτή τη μέτρηση χωρίς κάποια ακουστική παρέμβαση, ενώ κόκκινη γραμμή δείχνει την απόκριση του δωματίου έχοντας πρόσθεση στο δωμάτιο απορρόφηση στα 80Hz σε σημεία του δωματίου που είχαμε κοιλία πίεσης.



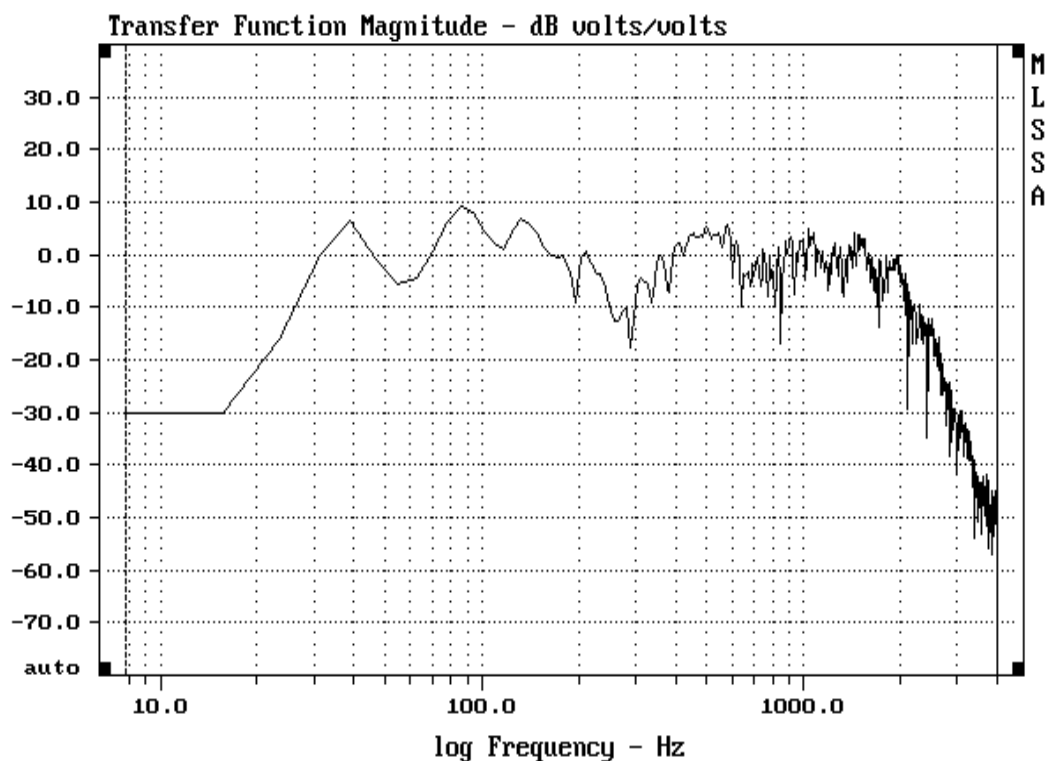
Σχήμα 3. Με μαύρο απεικονίζεται η απόκριση του δωματίου χωρίς ακουστική βελτίωση. Με κόκκινο απεικονίζεται η απόκριση του δωματίου με απορρόφηση στα 80Hz

Όπως φαίνεται στο παράδειγμα παρόλο που χρησιμοποιήθηκε απορρόφηση σε αυτή τη συχνотική περιοχή παρατηρείται ενίσχυση αυτής της περιοχής. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως γνωστό τα στάσιμα κύματα δημιουργούνται από πολλαπλές ανακλάσεις του χώρου, λόγω των διαστάσεων και των επιφανειών του. Αν από αυτές τις ανακλάσεις καταφέρουμε να απορροφήσουμε μία συχνотική περιοχή η οποία βρίσκεται, στη περιοχή των στάσιμων κυμάτων, τότε ουσιαστικά από την ανάκλαση που δημιουργείται, απορροφούμε το μέρος που περιέχει τη συχνотική περιοχή που επιθυμούμε με αποτέλεσμα να μη μπορεί να ανακλαστεί. Το απώτερο αποτέλεσμα αυτής της απορρόφησης, είναι η αποσύνθεση τελικά του στάσιμου κύματος, που επιφέρει μια εξομάλυνση της ενέργειας του στο χώρο, μίας και δε μπορεί πλέον να δημιουργηθεί. Για να έχουμε επιθυμητά αποτελέσματα πρέπει να έχουμε έναν απορροφητή χαμηλών συχνотήτων, ο οποίος να είναι συντονισμένος στην περιοχή που επιθυμούμε να απορροφήσουμε καθώς και να παρέχει την επιθυμητή απορρόφηση, ενώ στη συνέχεια πρέπει να τον τοποθετήσουμε σε σημείο όπου το στάσιμο κύμα έχει μέγιστο, όπως είναι οι γωνίες του δωματίου. Το καλύτερο ωστόσο για τον εντοπισμό του κατάλληλου σημείου τοποθέτησης του απορροφητή, είναι η χαρτογράφηση του χώρου καθώς ηχοβολείται σε αυτή τη συχνотική περιοχή, όπως θα δούμε παρακάτω.

Επιστρέφοντας στις πειραματικές μετρήσεις και στη μέτρηση 1 μπορούμε να πούμε ότι το ίδιο ισχύει και για την περιοχή 80Hz – 100Hz και μάλιστα είναι περισσότερο εφικτό, επειδή οι διαστάσεις ενός τέτοιου απορροφητή είναι πιο μικρές. Ωστόσο σε αυτή τη περιοχή θα μπορούσαμε πολύ απλά να την επεξεργαστούμε, επιλέγοντας τον κατάλληλο συνδυασμό θέσης ηχολήπτη και θέσης ηχείων, σε τέτοια σημεία έτσι ώστε η συγκεκριμένη συχνотική περιοχή να μη βρίσκεται σε έξαρση. Αυτό όπως μπορούμε να καταλάβουμε δεν γίνεται να το εφαρμόσουμε σε συχνотικές περιοχές που παρουσιάζουν ύφεση σε σχέση με το ιδανικό, στη μέτρηση 1. Αυτό γιατί η μέτρηση 1 μας δίνει τη μέγιστη τιμή ενέργειας για όλες τις συχνότητες.

Στην περιοχή γύρω από τα 220Hz, που είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα της περιοχής 150Hz – 250Hz, έχουμε δύο λύσεις. Στη πρώτη μπορούμε πάλι να χρησιμοποιήσουμε απορροφητή χαμηλών συχνοτήτων όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Η δεύτερη λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε διαχυτές των οποίων η χαμηλότερη συχνότητα διάχυσης να ξεκινά τουλάχιστο από τα 220Hz. Το μέγιστο βάθος αυτού του διαχυτή, είναι 39cm, η οποία διάσταση δεν είναι πάρα πολύ μεγάλη, έτσι ώστε να μην είναι εφικτή για έναν τέτοιο χώρο.

Μέτρηση 2, Έχουμε ενεργά και τα δύο ηχεία, τα οποία είναι τοποθετημένα στην προεπιλεγμένη θέση τους, ενώ το μικρόφωνο βρίσκεται στη θέση του ηχολήπτη.



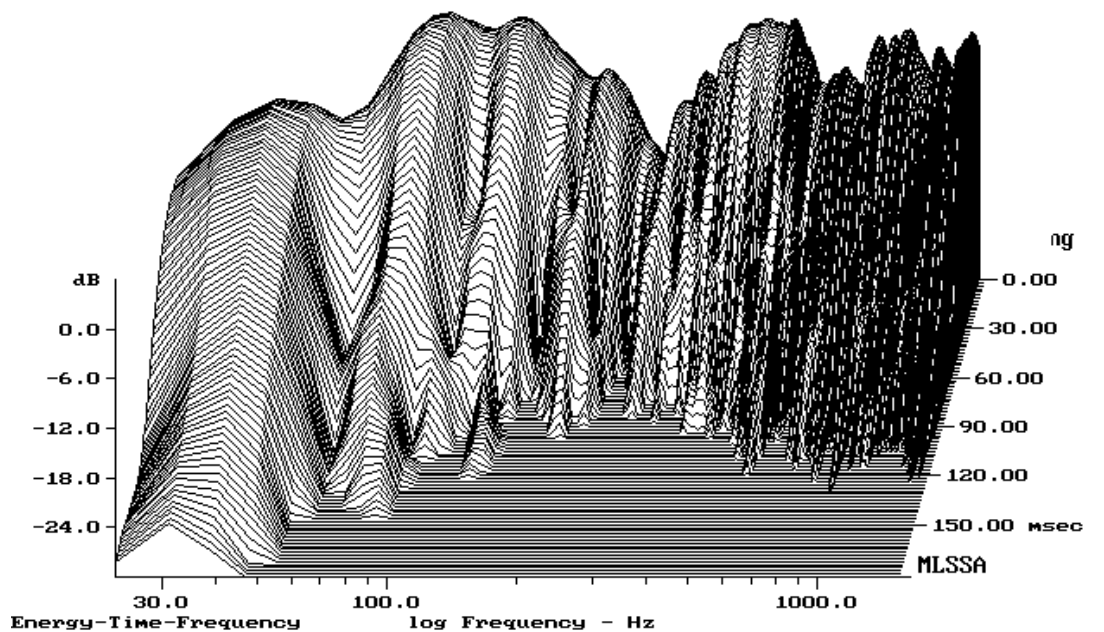
CURSOR: y = -47.4255 x = 4000.0000 (512)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

Σχήμα 4. Μέτρηση 2

Με αυτή τη μέτρηση όπως έχουμε πει βλέπουμε το συνολικό φασματικό αποτέλεσμα που δημιουργείται στη θέση του ηχολήπτη, από την συνύπαρξη των δύο ηχείων στη προεπιλεγμένη θέση τους, καθώς και της επίδρασης των στοιχείων του δωματίου.

Παρακάτω βλέπουμε το γράφημα τύπου waterfall αυτής της μέτρησης 2:



-4.91 dB, 391 Hz (50), 0.000 msec (1)

ESC exits, F1 prints, Shift-F1 dumps, F2 places cursor

MLSSA: Waterfall

Σχήμα 5. Waterfall της μέτρησης 2

Με το γράφημα τύπου waterfall εκτός από της πληροφορίες της έντασης της κάθε συχνότητας, παίρνουμε και την πληροφορία του decay της κάθε συχνότητας. Δηλαδή το πόσο γρήγορα ή αργά σβήνει μία συχνότητα, μετά την διακοπή της ηχητικής πυγής σε έναν χώρο, όπως έχουμε πει παραπάνω.

Με μία πρώτη ματιά βλέπουμε, ότι ο ηχολήπτης, σε ορισμένες συχνοτικές περιοχές έχει κάποιες αλλοιώσεις (χρωματισμούς), είτε από τα modes του

δωματίου, είτε από τυχών ακυρώσεις λόγω συμβολής των ανακλάσεων με το απευθείας σήμα, όπως είπαμε παραπάνω.

1^{ον} Βλέπουμε στην περιοχή από 30 – 40Hz ένα σχετικά ομαλό φάσμα, που ωστόσο, αργεί να εξασθενήσει σε σχέση με τις υπόλοιπες συχνότητες. Αυτό είναι ένα πρόβλημα όπως μπορούμε να αντιληφθούμε, μίας και αυτές οι συχνότητες θα έχουν μία παρατεταμένη διάρκεια (sustain), που θα τους προσθεθεί ο χώρος, και είναι κάτι που δεν επιθυμούμε.

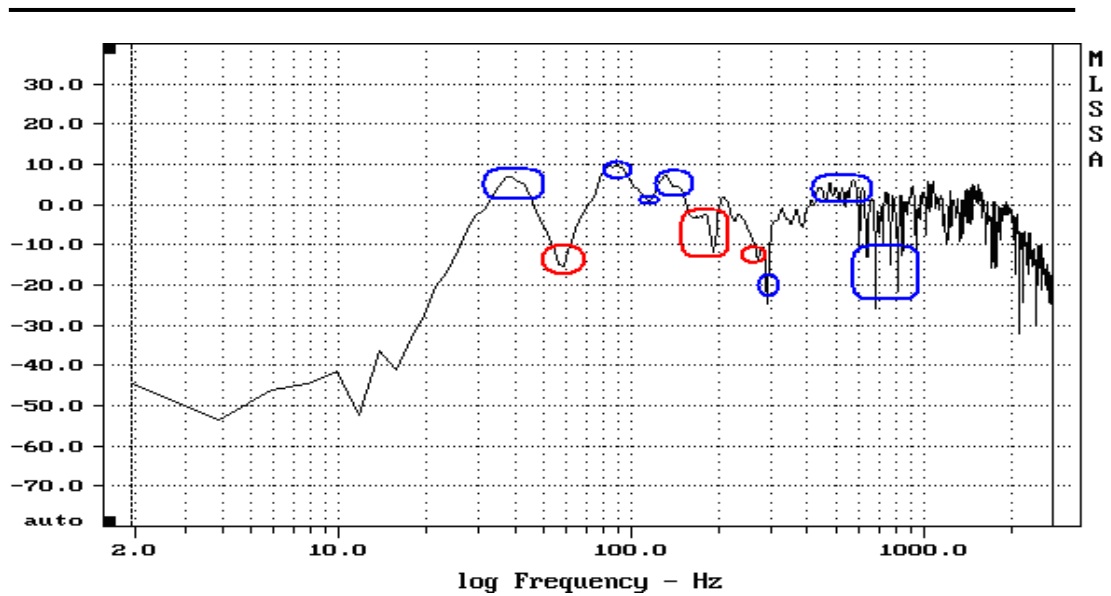
2^{ον} Στην περιοχή 50 – 60Hz βλέπουμε μία μικρή εξασθένιση που βρίσκεται μέσα στα όρια των -5 dB.

3^{ον} Στη περιοχή 70 – 100Hz έχουμε μία έξαρση της τάξης των 10dB

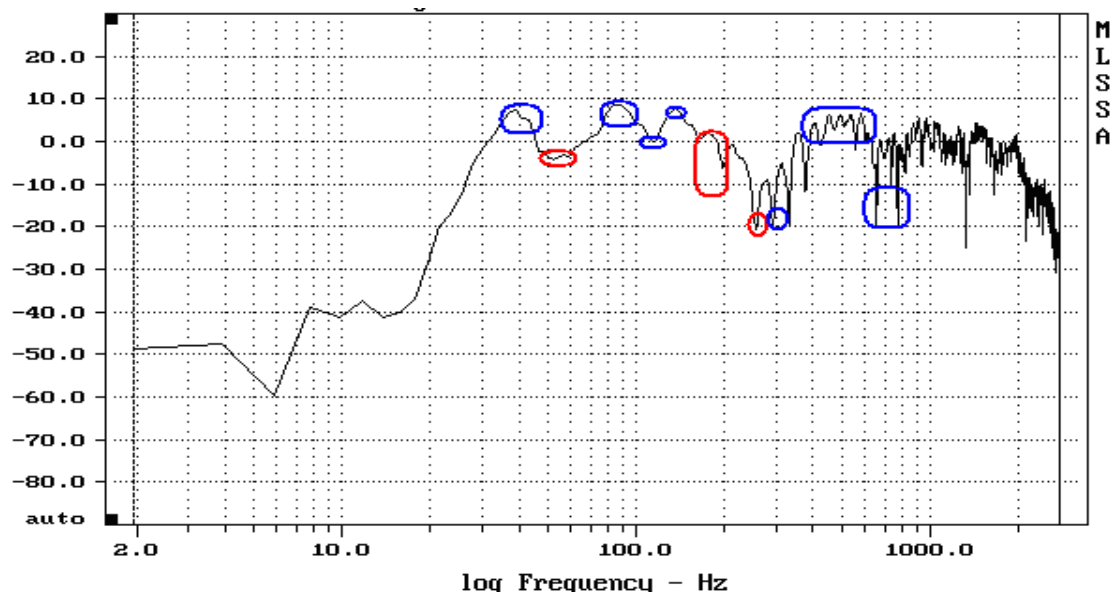
4^{ον} Επίσης στα 250 – 350Hz βλέπουμε μια εξασθένιση αυτής της περιοχής, της τάξης των -10dB, με μεγαλύτερη έξαρση στα 298Hz που φτάνει στα -18dB.

5^{ον} Στην περιοχή των 450 – 600Hz βλέπουμε μία έξαρση της τάξης των 5dB.

Αφού εξετάσαμε τη **μέτρηση 2** και είδαμε χονδρικά πιο είναι το φασματικό αποτέλεσμα που δημιουργείται στη θέση του ηχολήπτη, από την συνύπαρξη των δύο ηχείων στη προεπιλεγμένη θέση τους, καθώς και της επίδρασης των στοιχείων του δωματίου, προχωρούμε στη **μέτρηση 3** και **4** για να δούμε πως διεγείρει το κάθε ηχείο, το χώρο στη θέση του ηχολήπτη. Παρακάτω θα δούμε τη σύγκριση των δύο μετρήσεων για να δούμε τις διαφορές μεταξύ τους.



Σχήμα 6 Μέτρηση 3

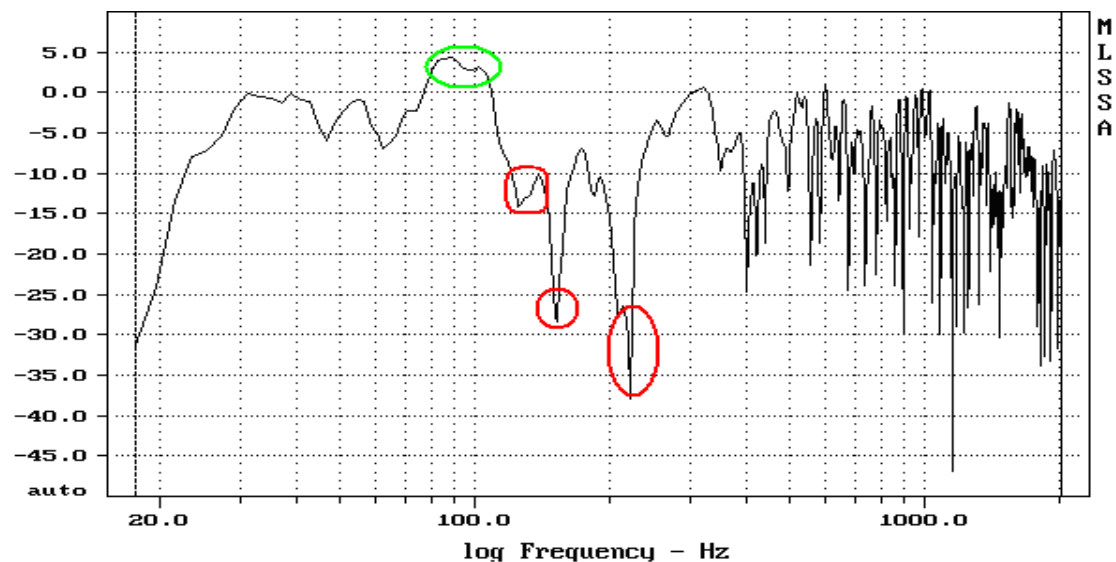


Σχήμα 7 Μέτρηση 4

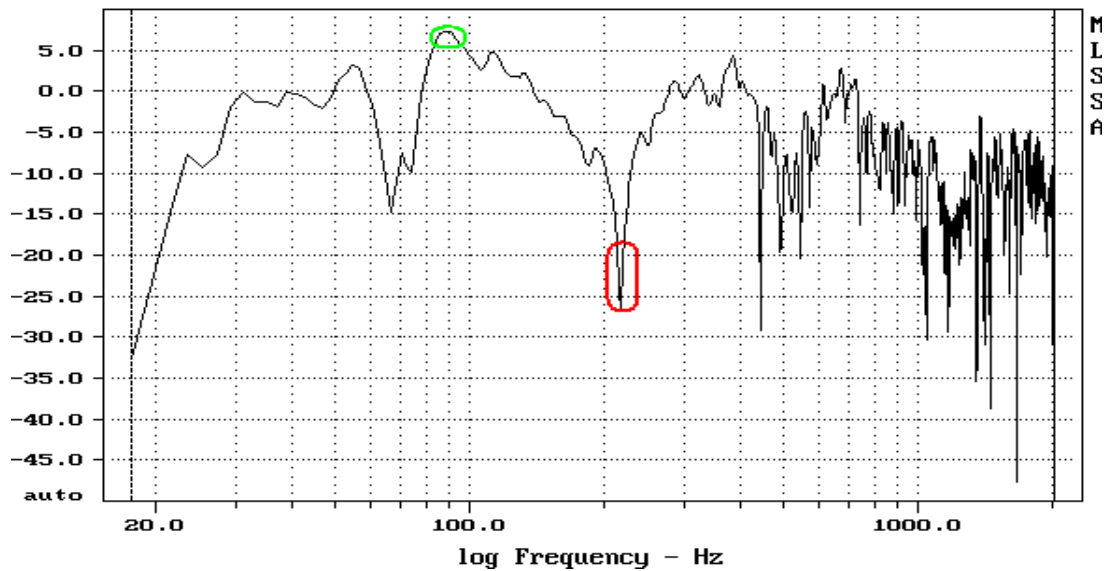
Τα αποτελέσματα στην σύγκριση, σχετικά με τη θέση των ηχείων είναι αρκετά ενθαρρυντική μιας και οι διαφορές τους είναι πολύ μικρές και λίγες. Αυτό σημαίνει ότι η θέσεις των ηχείων βρίσκονται σε σημεία που έχουν παρόμοια φασματικά απόκριση. Οι διαφορές τους είναι σημειωμένες με κόκκινο ενώ οι ομοιότητες με μπλε. Τώρα αυτό που μένει είναι :

-
- i. να μειώσουμε τις αλλοιώσεις που βρίσκονται στην περιοχή στάσιμων κυμάτων με απορροφητές,
 - ii. να ελέγξουμε ποιες από τις αλλοιώσεις στη περιοχή διάχυσης οφείλονται σε στάσιμο κύμα και ποιες σε συμβολή ανάκλασης με το απ' ευθείας σήμα και
 - iii. αφού αντιληφθούμε από πού προέρχεται η αλλοίωση στη περιοχή διάχυσης, να βρούμε τρόπο να την εξαλείψουμε.

Το επόμενο βήμα είναι να πραγματοποιήσουμε τις **μετρήσεις 5 και 6** και να τις συγκρίνουμε με τη μέτρηση 1, έτσι ώστε να διαπιστώσουμε αν οι αλλοιώσεις στην περιοχή διάχυσης προέρχονται από την επίδραση στάσιμων κυμάτων, είτε από συμβολή του απ' ευθείας σήματος με κάποια ανάκλαση.



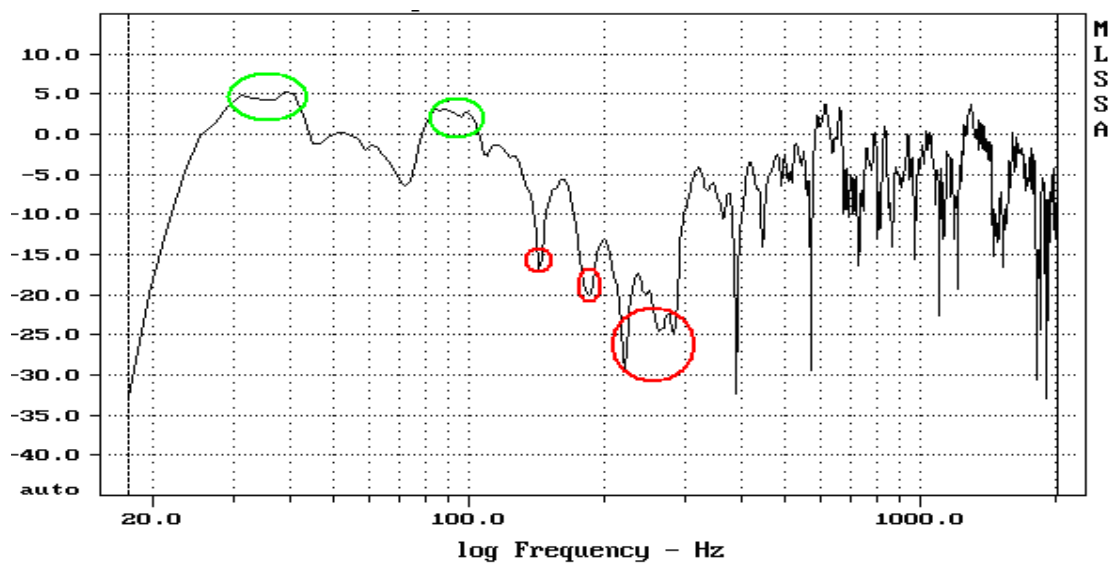
Σχήμα 8. Μέτρηση 5



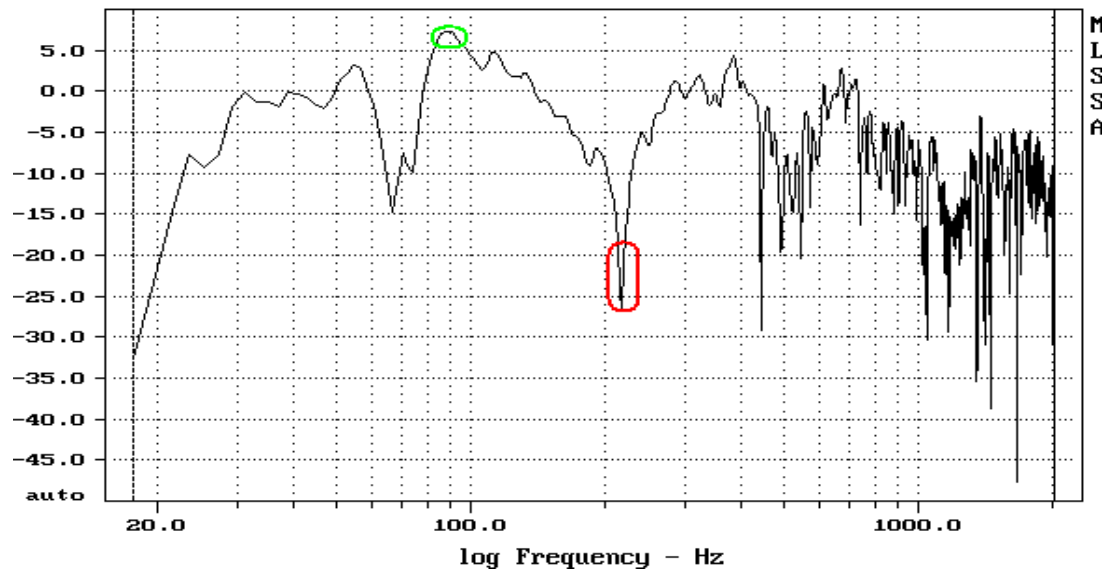
Σχήμα 9. Μέτρηση 1

Όπως βλέπουμε από αυτή τη σύγκριση, η θέση του αριστερού ηχείου είναι κοντά σε δεσμό πίεσης, για την περιοχή διάχυσης, στις συχνοτικές περιοχές 120Hz – 125Hz, 150Hz έως 160Hz και 210 έως 250Hz. Αυτές οι συχνοτικές περιοχές έχουν σημειωθεί με κόκκινο. Με πράσινο έχει σημειωθεί η περιοχή 80Hz – 100Hz η οποία βρίσκεται στη περιοχή στάσιμων κυμάτων, και έχει μειωθεί κατά -3dB σε σχέση με τη μέτρηση 1 και είναι κάτι που επιθυμούμε.

Έπειτα κάνουμε την ίδια σύγκριση για τη μέτρηση 5



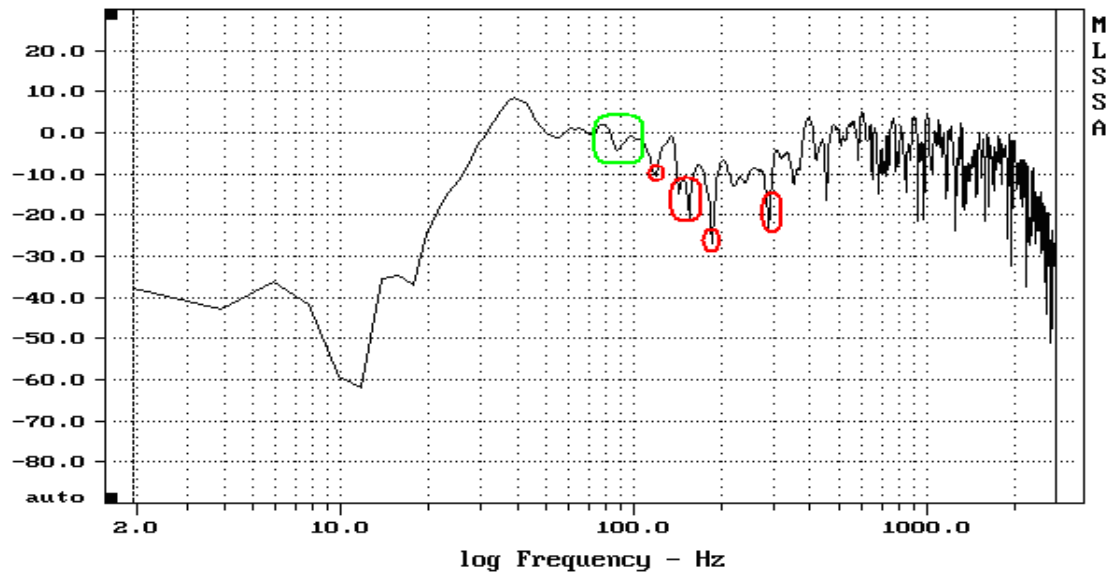
Σχήμα 10. Μέτρηση 6



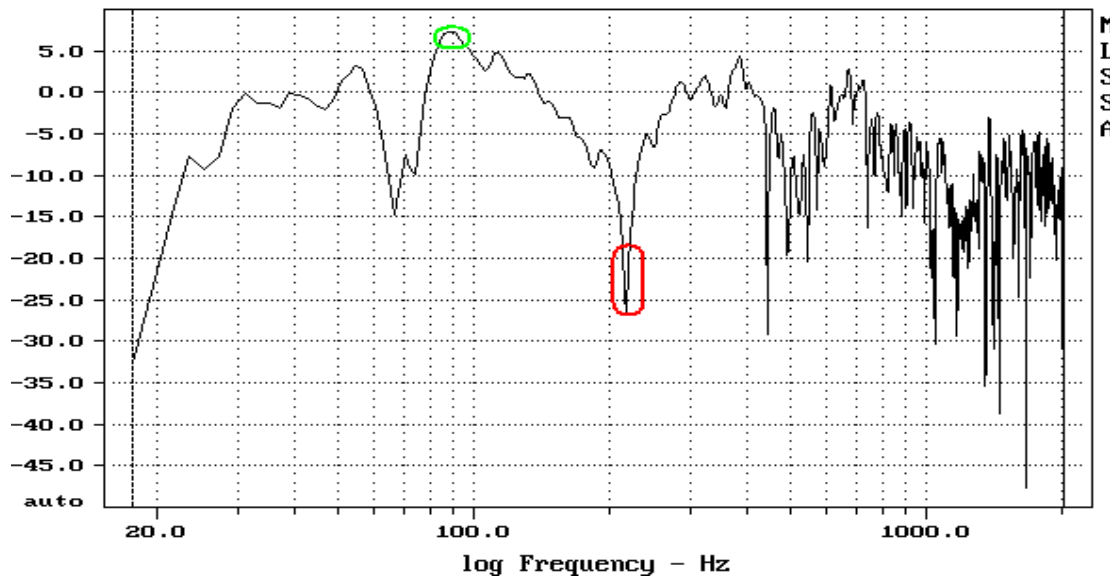
Σχήμα 11. Μέτρηση 1

Όπως βλέπουμε και εδώ στ περιοχή διάχυσης το δεξί ηχείο στην προεπιλεγμένη θέση του βρίσκεται κοντά σε περισσότερους δεσμούς πίεσης απ' ότι το αριστερό. Βλέπουμε να παραμένει ο δεσμός πίεσης στα 150Hz – 160Hz όπως και στο αριστερό ηχείο, αλλά με μία μικρή ελάττωση. Άλλος ένας δεσμός πίεσης στη συγκεκριμένη θέση του ηχείου παρατηρείται στα 185Hz – 195Hz. Επίσης η περιοχή γύρω από τα 220Hz βρίσκεται ακόμη πιο κοντά σε δεσμό σε σχέση με το αριστερό ηχείο μίας και βλέπουμε μεγαλύτερη εξασθένηση της τάξης των -30dB καθώς το ίδιο συμβαίνει και στην περιοχή 260Hz – 290Hz. Όλα αυτά όπως βλέπουμε είναι σημειωμένα με κόκκινο. Με πράσινο έχουμε σημειώσει στη περιοχή των στάσιμων κυμάτων τις συχνοτικές περιοχές 80Hz – 100Hz όπου παρατηρείται μία εξασθένηση όπως και με τη θέση του αριστερού ηχείου, η οποία είναι επιθυμητή, καθώς και μία αύξηση της τάξης των +4dB σε σχέση με τη πρώτη μέτρηση η οποία δεν είναι επιθυμητή.

Στη συνέχεια προχωρούμε στη σύγκριση της **μέτρησης 7** και **1** για να διαπιστώσουμε, σε ποια στάσιμα, στις περιοχή διάχυσης βρίσκεται η θέση του ηχολήπτη.



Σχήμα 12. Μέτρηση 7



Σχήμα 13. Μέτρηση 1

Συγκρίνοντας αυτές τις δύο μετρήσεις συμπεραίνουμε ότι η θέση του ηχολήπτη βρίσκεται κοντά σε δεσμό πίεσης για τις συχνότητες 120Hz -130Hz, 150Hz – 165Hz 185Hz - 190Hz και 285Hz – 290Hz όπου σημειώνονται με κόκκινο. Στη περιοχή στάσιμων κυμάτων βλέπουμε ότι έχουμε εξομάλιση της περιοχής 80Hz – 100Hz που σημειώνεται με πράσινο.

Η περιοχή από τα 100Hz -175Hz βελτιώνεται με την τοποθέτηση των ηχείων στη προεπιλεγμένη θέση τους, όπως βλέπουμε στις μετρήσεις 3 και 4, λόγω του ότι φέρνουν τη θέση του ηχολήπτη κοντά στα απ' ευθείας πεδίο, κάτι που στη προκειμένη περίπτωση είναι επιθυμητό, Ωστόσο η περιοχή 180Hz – 300Hz, δε βελτιώνεται από την ύπαρξη του απευθείας πεδίου. Σε αυτή τη περίπτωση θα χρειαστούμε τη βοήθεια διαχυτών για την περιοχή 200Hz – 300Hz και απορροφητές χαμηλής συχνότητας για τη περιοχή 180Hz – 200Hz σε σημεία που έχουμε μέγιστα για αυτές τις συχνότητες. Θα μπορούσαμε να βάζαμε διαχυτές και στην περιοχή 180Hz – 200Hz, ωστόσο το βάθος του διαχυτή φτάνει τα 50cm περίπου, με αποτέλεσμα να μην είναι πολύ λειτουργικό για αυτό το χώρο, μιας και είναι σχετικά μικρός και θα του κοστίσουμε άλλο μισό μέτρο.

5.1.2 Control Room 2

Το Control Room 2 ήταν υπο κατασκευή τον καιρό που πραγματοποιηθήκαν οι μετρήσεις. Ήταν στο στάδιο όπου είχαν επενδυθεί οι τοίχοι με γυψοσανίδα ενώ το ταβάνι με διάτρητη επιφάνεια.

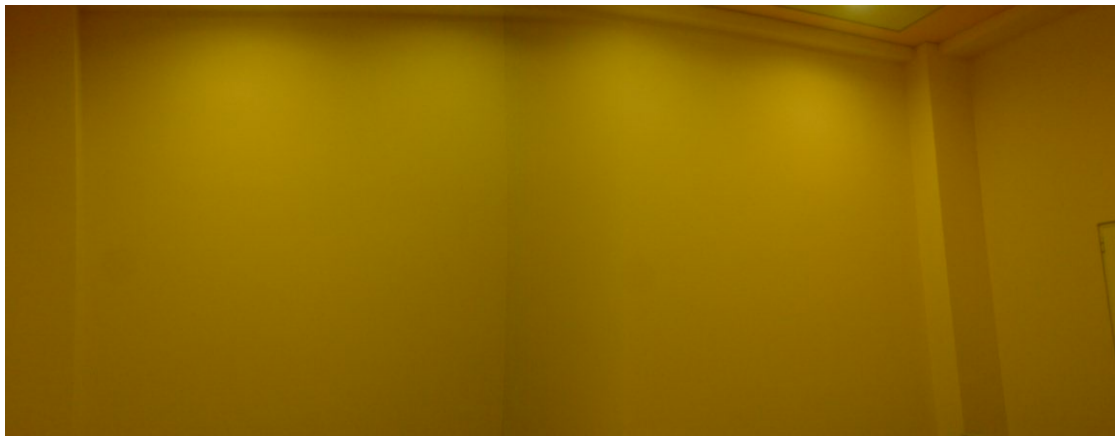
- Σκοπός μας για αυτό το Control Room ήταν:
- η μέτρηση του φάσματός του
- του χρόνου αντήχησης
- μοντελοποίηση του χώρου
- σύγκριση των πραγματικών μετρήσεων κατανομής των στάσιμων κυμάτων, με τις θεωρητικές προσεγγίσεις.

Παρακάτω βλέπουμε φωτογραφίες του control room 2

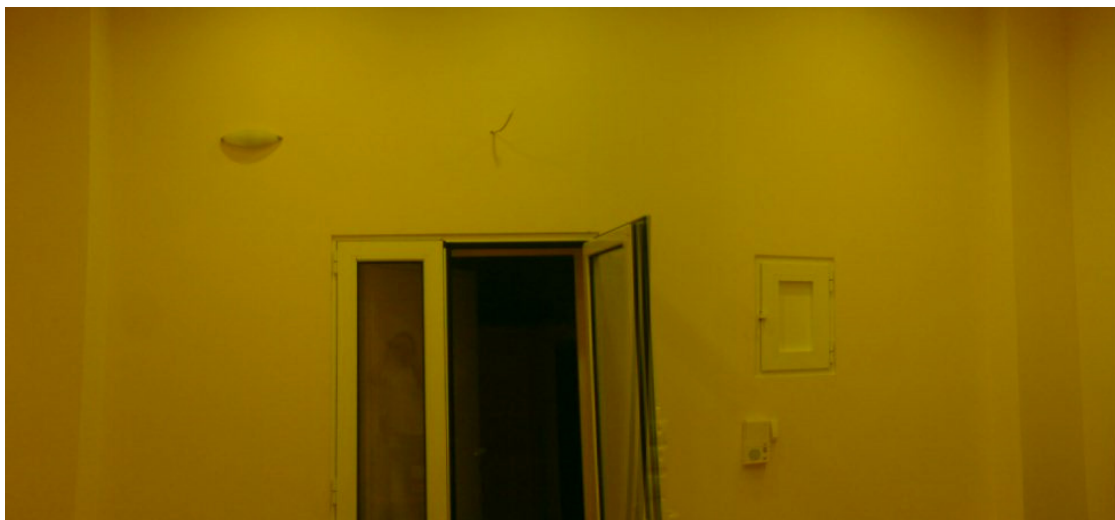


Σχήμα 1 Control Room 2 μπροστά τοίχος

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, ο χώρος ήταν ακόμη υπό κατασκευή και ήταν σχετικά άδειος. Ωστόσο παρατηρείται πως έχει προηγηθεί μια ακουστική μελέτη. Η επένδυση των τοίχων είχε γίνει με γυψοσανίδα, ενώ στο ταβάνι είχε τοποθετηθεί διάτρητη γυψοσανίδα 20%. Εδώ βλέπουμε το μπροστά μέρος του control room, που επικοινωνεί με το recording room, μέσω μίας συρόμενης πόρτας.

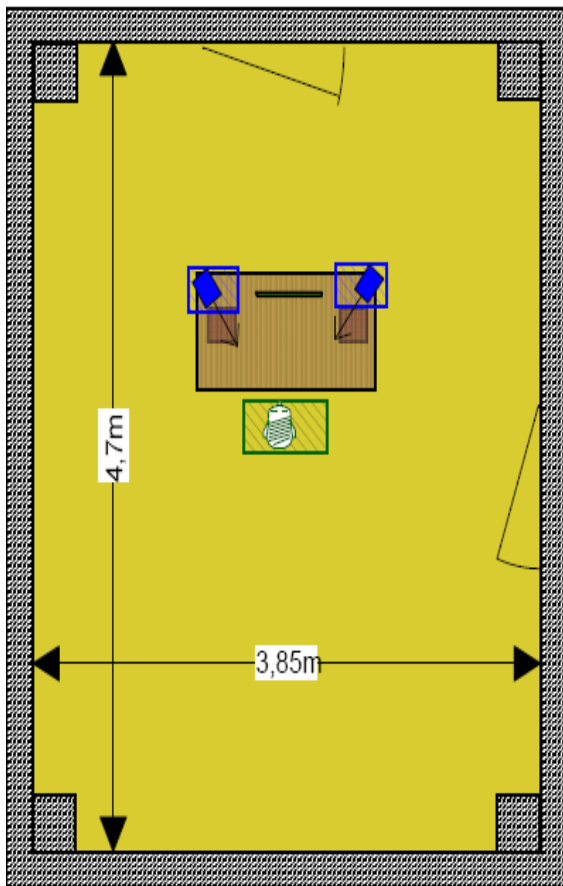


Σχήμα 2 Αριστερός τοίχος του Control Room 2

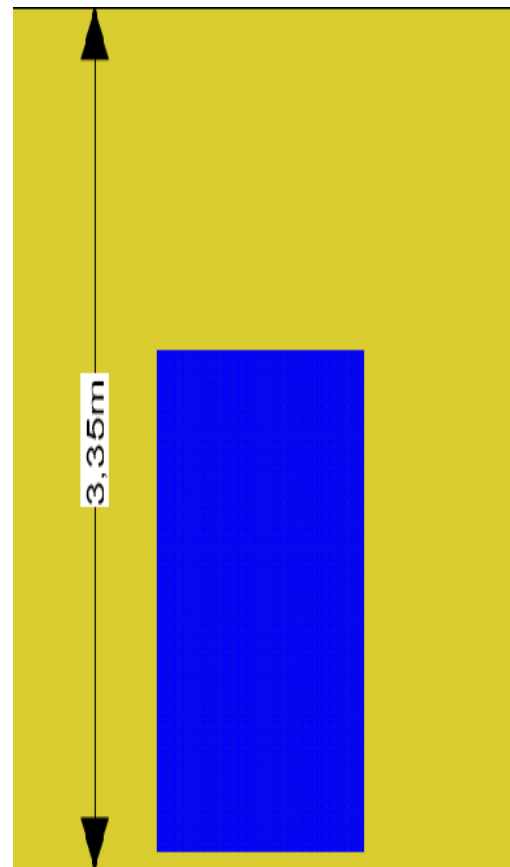


Σχήμα 3 Δεξιός τοίχος του Control Room 2 που περιέχει τη πόρτα εξόδου

Αν παρατηρήσουμε τα ratio των διαστάσεων του δωματίου (ύψος, μήκος, πλάτος) είναι ίδια με αυτά που έχει προτείνει ο Serpmeyer (A). Μπορεί πολύ εύκολα να διαπιστωθεί αυτό από το excel αρχείο “modes axonika” που αναφέρεται στο κεφάλαιο που περιγράφει τις κατάλληλες διαστάσεις δωματίου για μέγιστη διάχυση . Αν συμπληρωθούν οι διαστάσεις, στο πρόγραμμα, διαπιστώνεται ότι συμφωνούν απόλυτα στο ratio που προτείνει ο Serpmeyer(A)



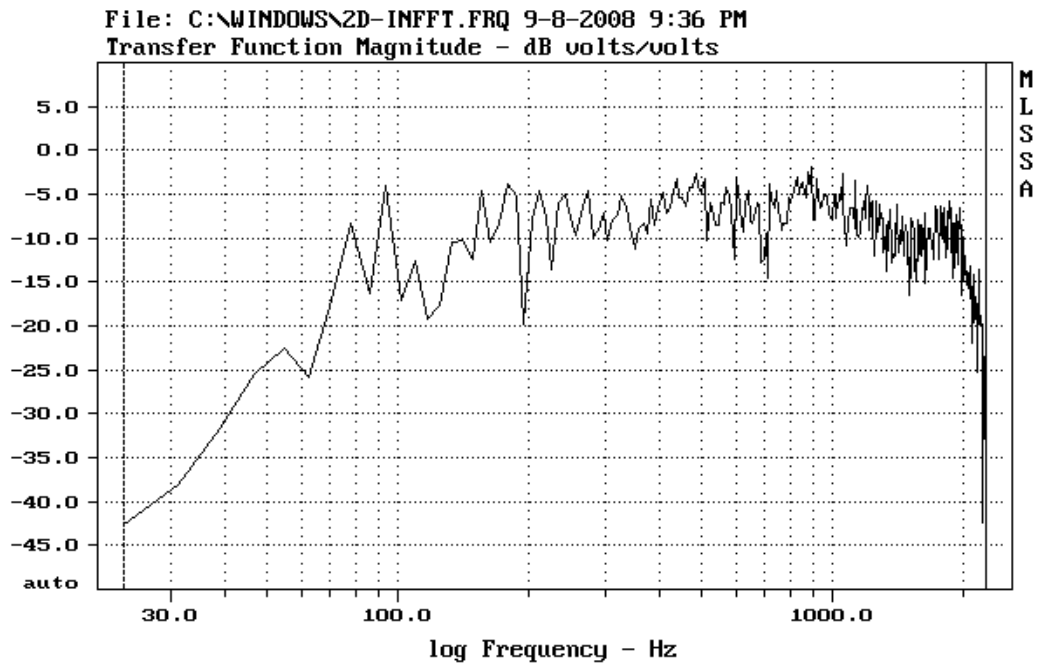
Σχήμα 4



Σχήμα 5 Ύψος δωματίου

Πραγματοποιώντας τις μετρήσεις παρακάτω, θα δούμε ότι όντως έχουμε πολύ καλή διάχυση, ακόμη κι από τώρα που ο χώρος είναι σχετικά άδειος. Και για τον ίδιο λόγο έχει και μεγαλύτερες τιμές αντήχησης.

Παρακάτω βλέπουμε τη μέτρηση 2 με τα δύο ηχεία τοποθετημένα και το μικρόφωνο στη θέση του ηχολήπτη. (Τη μέτρηση 1 δεν είχαμε προλάβει να τη πάρουμε.)



CURSOR: y = -25.5991 x = 2257.8125 (289)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

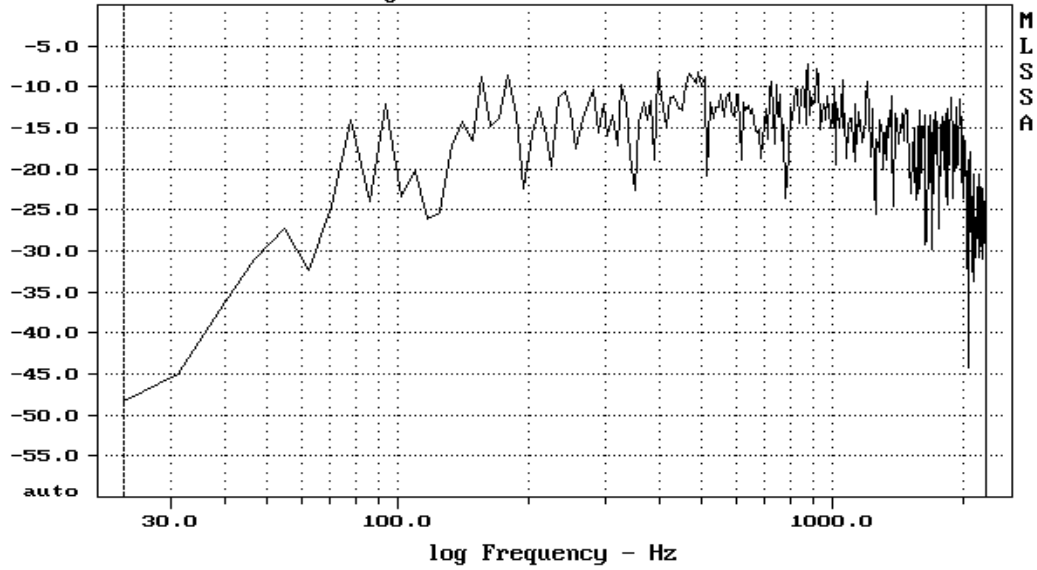
Σχήμα 6. Μέτρηση 2

Ουσιαστικά βλέπουμε εδώ ότι είναι αρκετά ομαλό το φάσμα από τα 200 – 2000Hz. Ενώ τα βασικότερα προβλήματα που μπορούμε να παρατηρήσουμε βρίσκονται στην περιοχή 70 – 150 Hz.

Βλέπουμε ωστόσο την περιοχή 20 – 70 Hz, ουσιαστικά να είναι ανύπαρκτη, σε αυτό δε ευθύνεται το δωμάτιο παρά τα ηχεία που δε μπορούν να υποστηρίξουν αυτή τη περιοχή.

Παρακάτω θα δούμε τις μετρήσεις 3 και 4 που πήραμε προαιρετικά, μιας και η θέσεις των ηχείων και του ηχολήπτη ήταν πρόχειρα επιλεγμένες.

File: C:\WINDOWS\ZL-INFFT.FRQ 9-8-2008 9:45 PM
Transfer Function Magnitude - dB volts/volts

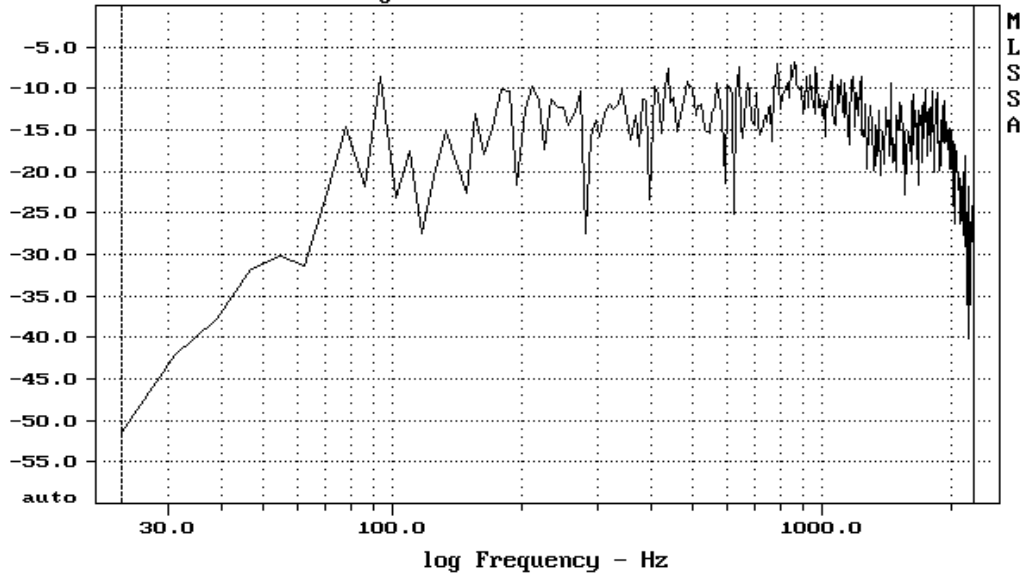


Comment: FFT

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

Σχήμα 7. Μέτρηση 3. Έχοντας ενεργό μόνο το αριστερό ηχείο ενώ το μικρόφωνο στη θέση του ηχολήπτη.

File: C:\WINDOWS\ZR-INFFT.FRQ 9-8-2008 9:48 PM
Transfer Function Magnitude - dB volts/volts

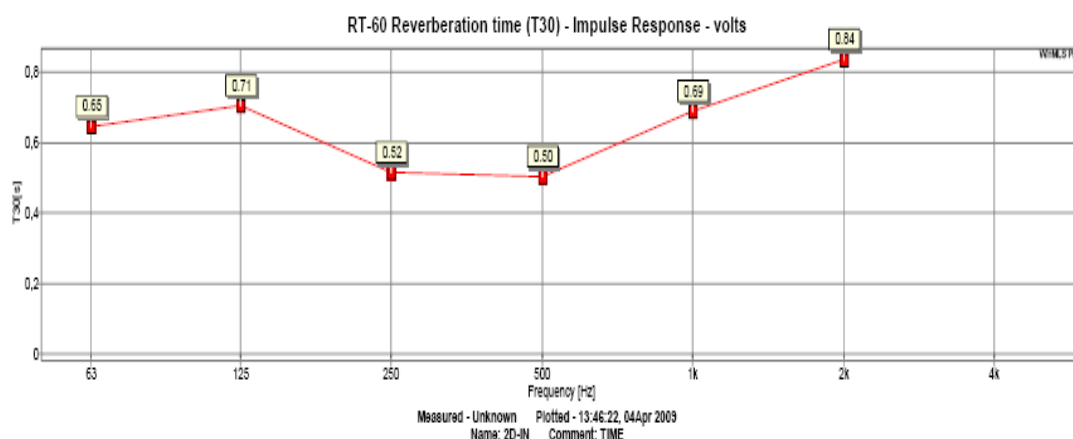


Comment: FFT

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

Σχήμα 8. Μέτρηση 4. Έχοντας ενεργό μόνο το δεξί ηχείο και το μικρόφωνο στη θέση του ηχολήπτη.

Παρακάτω βλέπουμε το reverberation time του χώρου ανά οκτάβα κατά Sabine με τη βοήθεια του προγράμματος Winmls που δέχεται μετρήσεις του MLSSA. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο χρόνος αντήχησης για τις διάφορες συχνότητες είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τα προτεινόμενα όρια και αυτό συμβαίνει γιατί ο χώρος ήταν άδειος ακόμη.



Σχήμα 9. Reverberation Time (Χρόνος Αντήχησης) του χώρου ανά οκτάβα

5.2 Χαρτογράφηση Control Room 3

Το Control Room 3 ήταν τελειοποιημένο ως προς την ακουστική του μελέτη, ωστόσο γνωρίζαμε, από παλιότερες μετρήσεις ότι υπήρχε πρόβλημα στην συχνοτική περιοχή 70Hz – 74Hz μιας έξαρσης, η οποία οφείλεται σε συντονισμούς. Καθώς και μίας ακύρωσης της συχνοτικής περιοχής γύρω από τα 110Hz. Αυτές οι αλλοιώσεις προέκυπταν, κατά την ενεργοποίηση του αριστερού ηχείου. Για του λόγου το αληθές ξαναπήραμε τις μετρήσεις, οι οποίες απεικονίζονται παρακάτω.

Ο σκοπός των μετρήσεων στο Control room 3:

- επιβεβαίωση παλαιότερων μετρήσεων

-
- χαρτογράφηση του χώρου στις συχνοτικές περιοχές 70Hz, 74Hz και 110Hz
 - προτάσεις λύσης (ενότητα 7.2).

Πειραματική διαδικασία

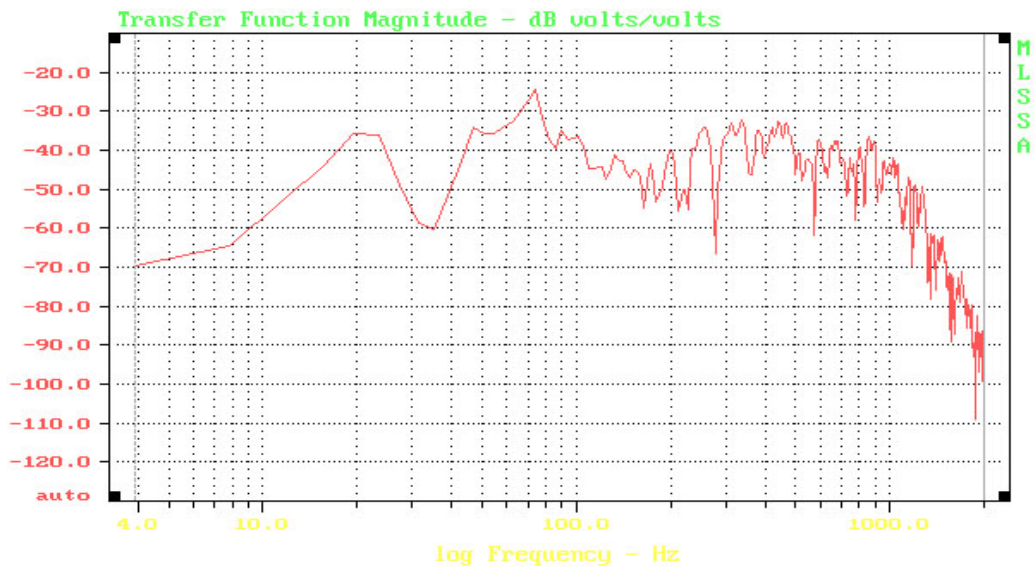
Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

- Ηχόμετρο SIP 95 (01dB) Type I
- Ηχεία studio monitor, B&W Nautilus
- Μέτρο με ακρίβεια χιλιοστού του μέτρου
- Η/Υ

Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του ηχόμετρου στα 94 dB στο 1kHz. Διαμοιράστηκε η επιφάνεια του δαπέδου ($4,26 * 7,10 = 30,25 \text{ m}^2$) σε τετράγωνα των 15 cm. Μετακινήθηκε το αριστερό ηχείο στη αριστερή γωνία, όπου τα στάσιμα κύματα παρουσιάζουν μέγιστο πλάτος πίεσης. Ηχοβολήθηκε αρχικά η συχνότητα των 70 Hz και πάρθηκαν διαδοχικές μετρήσεις ανά τετράγωνο (στο σύνολο του εμβαδού του χώρου. (Αναφορικά οι μετρήσεις για κάθε συχνότητα ανέρχονται σε 1440). Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τις συχνότητες των 74 και 110 Hz. Οι μετρήσεις εισαχθήκαν στο Microsoft Excel, δίνοντας τα παρακάτω 3D διαγράμματα. Υπόψη πως στα διαγράμματα, η γωνία όπου τοποθετήθηκε το ηχείο φαίνεται πάνω δεξιά, όπου και η ηχητική πίεση είναι μέγιστη.

Η θέση του ηχολήπτη είναι στα 2,5 m του μήκους και 2,15 m του πλάτους. Στα σχήματα 2 και 4 φαίνεται πως αυτή η θέση υστερεί ομοιόμορφης κατανομής στάθμης, ενώ στο σχήμα 5 παρουσιάζει αυξημένη στάθμη καθώς βρίσκεται σε κοιλιά πίεσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως η μέτρηση συχνοτικής απόκρισης (σχήμα 1) δεν ήταν σε θέση να αποκαλύψει τα ακουστικά

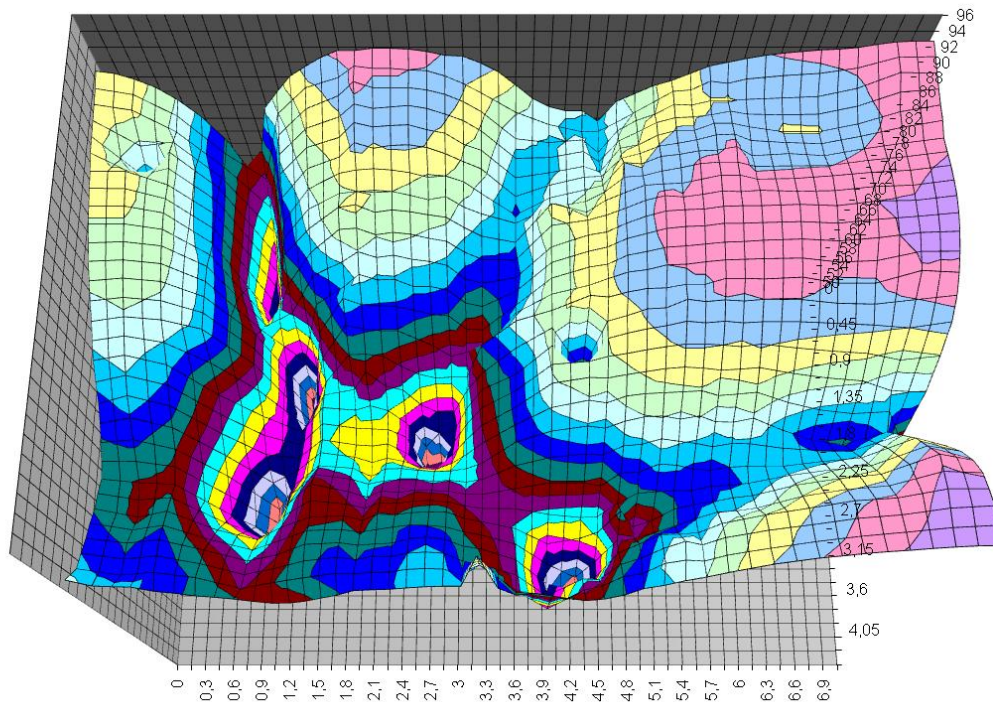
προβλήματα στη συχνοτική περιοχή των 110 Hz. Κατά την χαρτογράφηση αποτυπώθηκαν οι ανομοιομορφίες στη στάθμη σε συνάρτησι της θέσης.



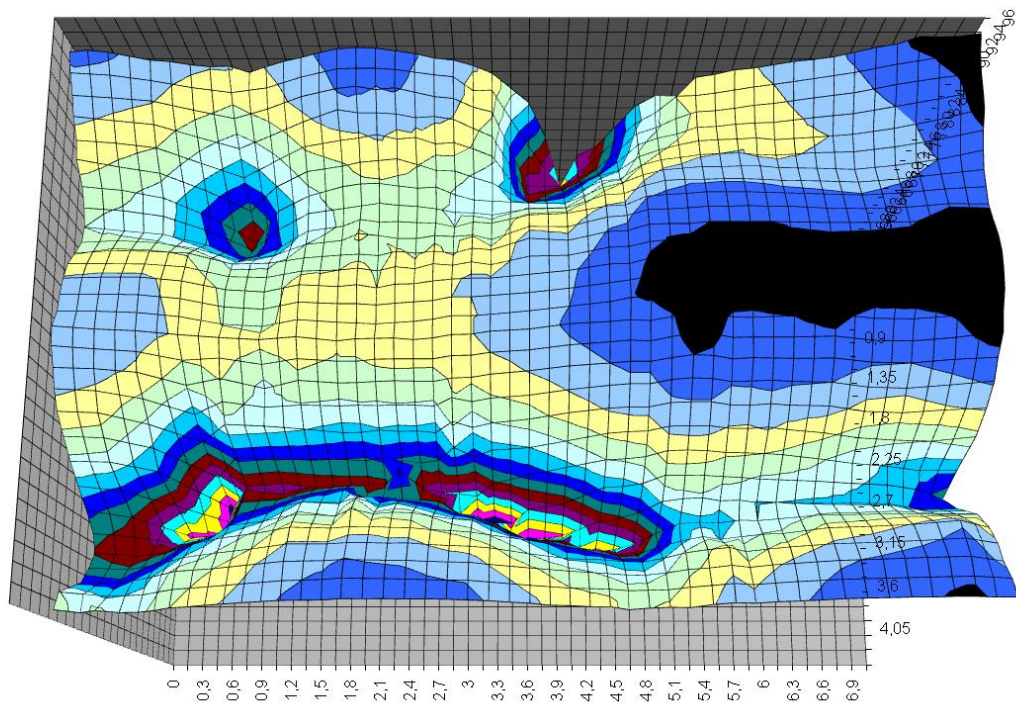
CURSOR: y = -105.569 x = 2000.0000 (512)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

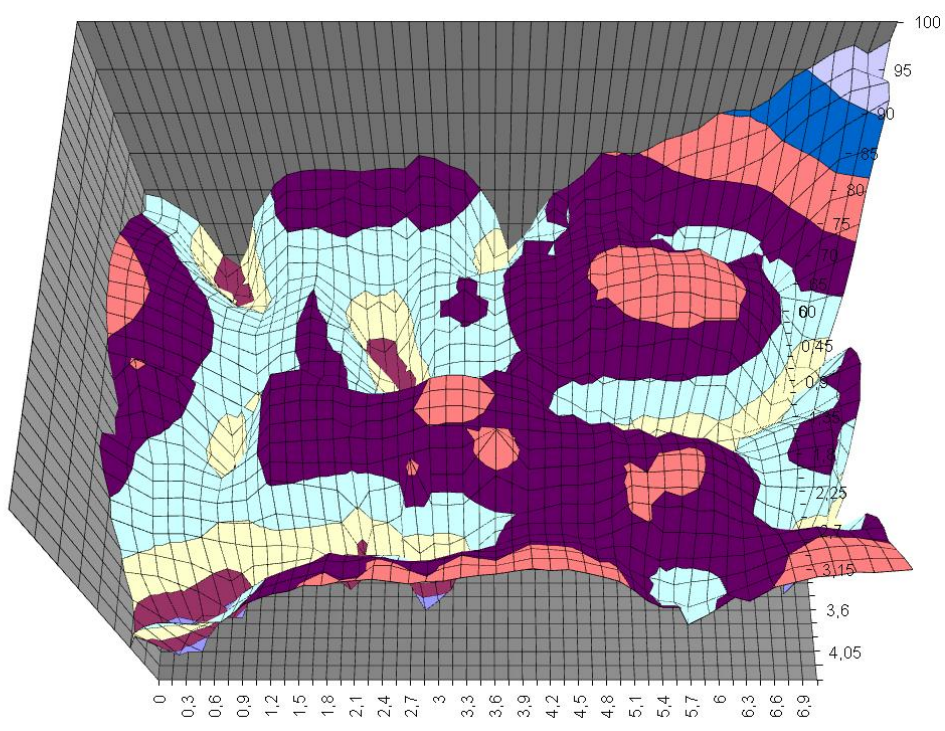
Σχήμα 1. Μέτρηση με ενεργό μόνο το αριστερό ηχείο και το μικρόφωνο τοποθετημένο στη θέση του ηχολήπτη.



Σχήμα 2. Διάγραμμα των 70 Hz



Σχήμα 3. Διάγραμμα των 74 Hz



Σχήμα 4. Διάγραμμα των 110 Hz.

5.3 Μετρήσεις τοποθέτησης ηχείων χαμηλών συχνοτήτων (subwoofer)

Στα πλαίσια αυτή της πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις όπου χρησιμοποιήθηκε η νέα αίθουσα Πολυμεσικών Εφαρμογών του τμήματος Μουσικής τεχνολογίας και ακουστικής όπου υπάρχουν εγκατεστημένα δυο ηχεία χαμηλών συχνοτήτων. Σε αυτή πραγματοποιήθηκαν πειραματικές διατάξεις για την τοποθέτηση ηχείων χαμηλών συχνοτήτων (subwoofer). Χρησιμοποιήθηκαν τοποθετήσεις που προτείνονται από τη βιβλιογραφία. [7, 15, 28, 29, 30] Σε άλλο, ανοιχτό, χώρο του τμήματος , πραγματοποιήθηκαν πειράματα για το φίλτρο κτένας και τα αποτελέσματα του στο συχνοτικό φάσμα .

- 1) Στόχος της 1^{ης} πειραματικής διαδικασίας είναι αφενός να δοκιμαστούν διάφορες προτεινόμενες θέσης τοποθέτησης από την βιβλιογραφία και αφετέρου να συγκριθούν τα αποτελέσματα (ενότητα 6.2) με αυτά που υπολογίζει το πρόγραμμα υπολογισμού ιδιοσυχνοτήτων δωματίου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας.
- 2) Στόχος της 2^{ης} είναι να καταδείξει το πρόβλημα που δημιουργείται από την τοποθέτηση ηχείου χαμηλών συχνοτήτων κοντά σε ανακλαστική επιφάνεια και τα προβλήματα τύπου φίλτρου κτένας (comp filtering) που παρουσιάζονται στο συχνοτικό φάσμα.

Πειραματική διαδικασία

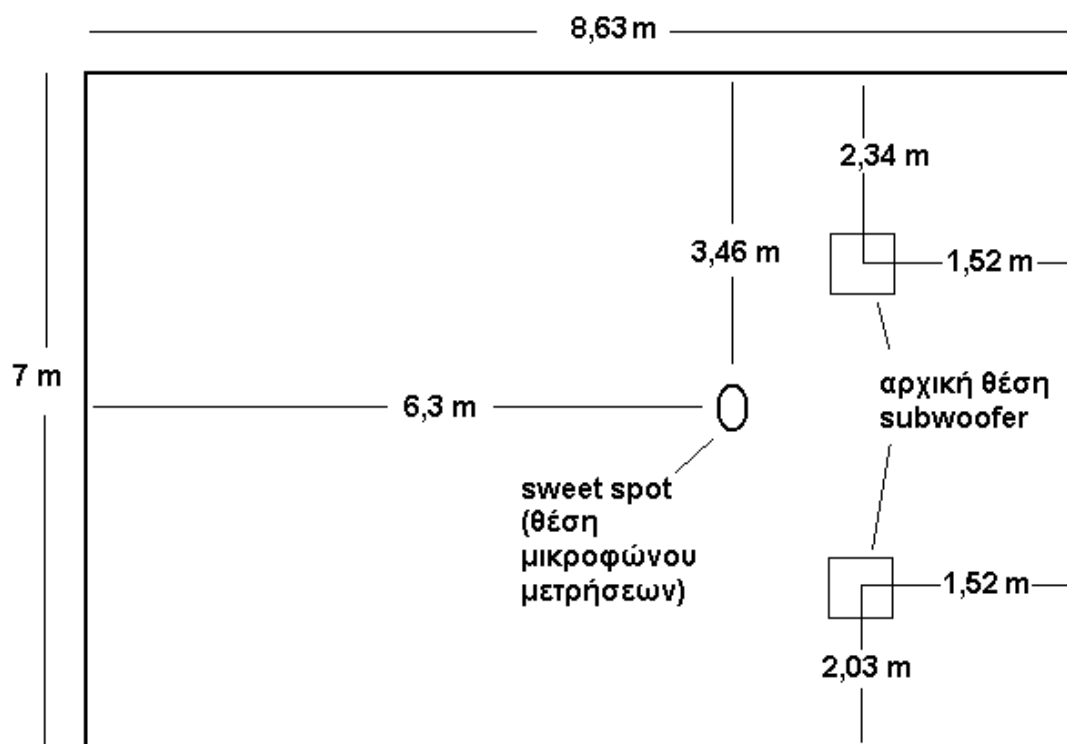
Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

- Ζεύγος ηχείων χαμηλών συχνοτήτων – Genelec 7050B.
- Ηχείο Studio monitor Genelec 8050A.

- Πρόγραμμα ακουστικών μετρήσεων MLSSA.
- Μικρόφωνο μετρήσεων Earthworks M30.

1^η Πειραματική διάταξη (τοποθέτηση ηχείων χαμηλών συχνοτήτων)

Τα ηχεία τροφοδοτούνται με ροζ-φιλτραρισμένο MLS σήμα εύρους 1 kHz. Το παράθυρο FFT για την ανάλυση των κρουστικών αποκρίσεων είναι 365 ms. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 15 διαφορετικές μετρήσεις, από προτεινόμενες λύσεις από τη βιβλιογραφία. Το φίλτρο διαχωρισμού του φάσματος (crossover filter) ρυθμίστηκε στα 120 Hz.



Σχήμα 1. Διαστάσεις και διάταξη αίθουσας μετρήσεων. Το μικρόφωνο σε ύψος 1,29 m.

Πίνακας 1. Δυναμικό εύρος συχνοτικής απόκρισης των μετρήσεων.

Μέτρηση	Εύρος απόκρισης (dB _{p-p})	Μέτρηση	Εύρος απόκρισης (dB _{p-p})
1.	15	9.	20
2.	18	10.	22
3.	17	11.	20
5.	37	12.	20
6.	29	13.	20
7.	20	14.	25
8.	20	15.	25

Πίνακας 2. Υπολογισμός των τρόπων ταλάντωσης της αίθουσας μετρήσεων με τη βοήθεια του προγράμματος υπολογισμού τρόπων ταλάντωσης δωματίων (Low-frequency mode calculator)

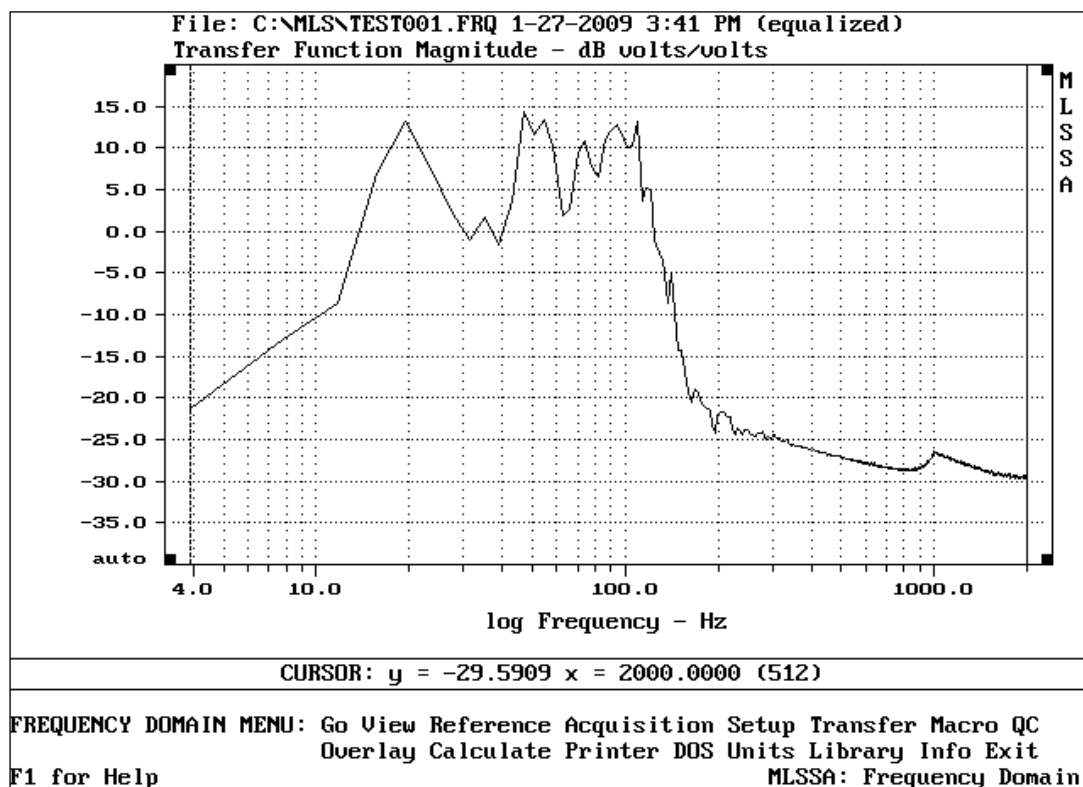
Room Dimensions			
Lx	Ly	Lz	Hz
8,63	7	2,90	
Nx	Ny	Nz	
1	0	0	19,9
0	1	0	24,5
1	1	0	31,5
2	0	0	39,7
2	1	0	46,7
0	2	0	49,0
1	2	0	52,9
0	0	1	59,1
3	0	0	59,6
1	0	1	62,4
2	2	0	63,1
0	1	1	64,0
3	1	0	64,5
1	1	1	67,0
2	0	1	71,3
0	3	0	73,5
2	1	1	75,3
1	3	0	76,1
0	2	1	76,8
3	2	0	77,2
1	2	1	79,3
4	0	0	79,5
4	1	0	83,2
2	3	0	83,6
3	0	1	84,0
2	2	1	86,5
3	1	1	87,5

4	2	0	93,4
0	3	1	94,3
3	3	0	94,6
1	3	1	96,4
3	2	1	97,2
0	4	0	98,0
4	0	1	99,1
5	0	0	99,4
1	4	0	100,0
4	1	1	102,1
5	1	0	102,3
2	3	1	102,4
2	4	0	105,8
4	3	0	108,3
4	2	1	110,5
5	2	0	110,8
3	3	1	111,6
0	4	1	114,5
3	4	0	114,7
5	0	1	115,6
1	4	1	116,2
5	1	1	118,2
0	0	2	118,3
6	0	0	119,2
1	0	2	119,9
0	1	2	120,8
2	4	1	121,2

Επεξεργασία και σχολιασμός μετρήσεων

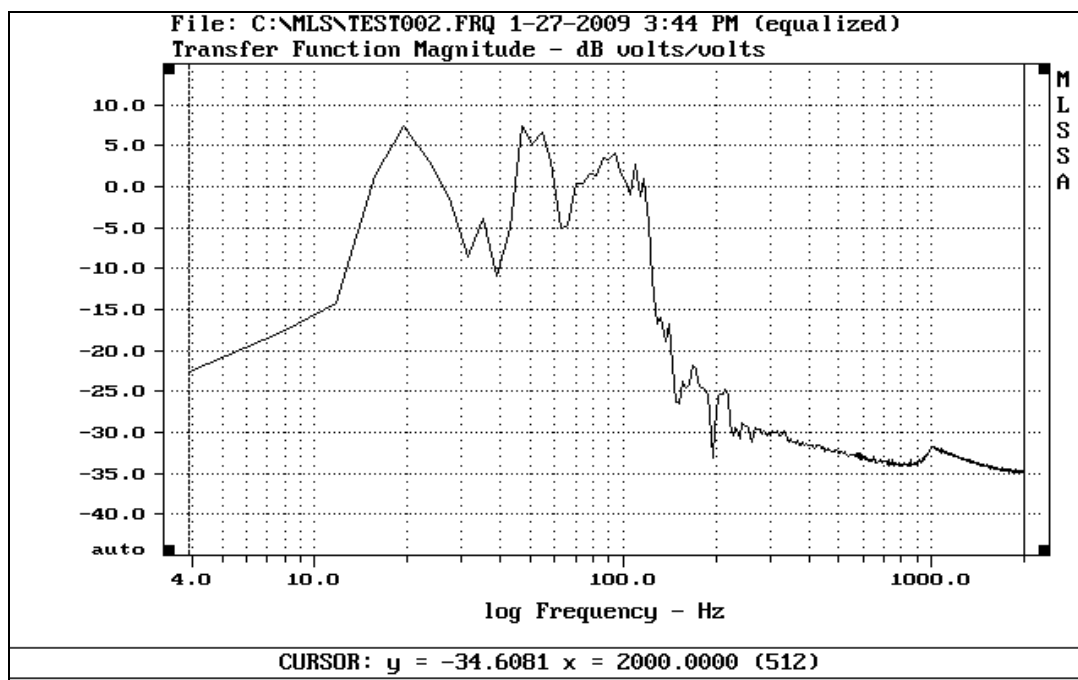
Στον πίνακα 1 καταγράφεται το δυναμικό εύρος απόκρισης των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τα ηχεία χαμηλών συχνοτήτων. Το σημαντικότερο εύρημα της πειραματικής διαδικασίας αφορά την 1^η μέτρηση. Η πρώτη μέτρηση αφορά την αρχική τοποθέτηση των ηχείων. Συγκρίνοντας το δυναμικό της εύρος σε σχέση με τις υπόλοιπες, παρατηρείται πως έχει τη μικρότερη τιμή. Αυτό μαρτυρεί πως από τις 15 επιλογές τοποθέτησης των ηχείων που δοκιμάστηκαν προσδίδει την καλύτερη απόκριση.

Στη σχήμα 2 (μέτρηση 1) και τα δυο ηχεία είναι ενεργά (τροφοδοτούμενα συμφασικά) τοποθετημένα στην αρχική θέση (σχήμα 1). Το δυναμικό εύρος είναι μικρότερο απ' όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις. Αυτό πρακτικά δηλώνει πως έχει τις λιγότερες ανομοιομορφίες στο φάσμα για τη συγκεκριμένη θέση ακρόασης.

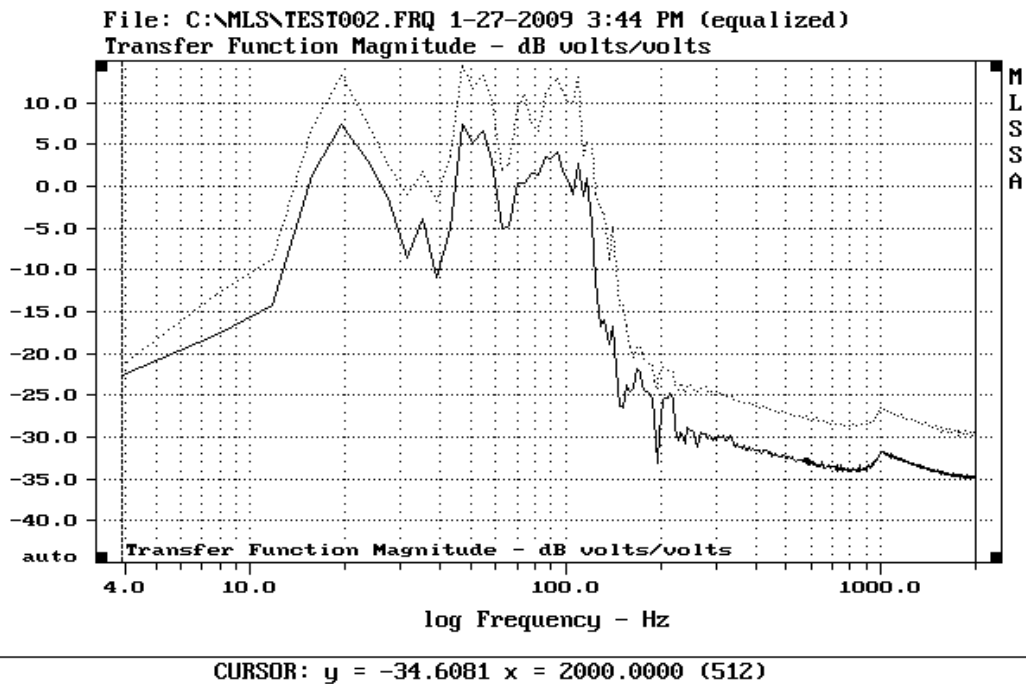


Σχήμα 2. (Μέτρηση 1) Τα ηχεία στην θέση που είναι μόνιμα τοποθετημένα στο εργαστήριο.

Παρατηρείτε επίσης πως όταν απενεργοποιηθεί το ένα από τα δύο (σχήμα 3, μέτρηση 2) μειώνεται η στάθμη κατά 6 dBn, χωρίς να αλλοιώνεται δραστικά τη μορφή του φάσματος (όπως παρουσιάζονται συγκριτικά στο σχήμα 4α). Ο ακροατής εκλαμβάνει αυτή τη διαφορά ως διπλασιασμό της στάθμης (όταν λειτουργούν και τα δύο ηχεία).



Σχήμα 3. (Μέτρηση 2) Τα subwoofer στην θέση που είναι τοποθετημένα στο εργαστήριο. Με ενεργό μόνο το αριστερό.



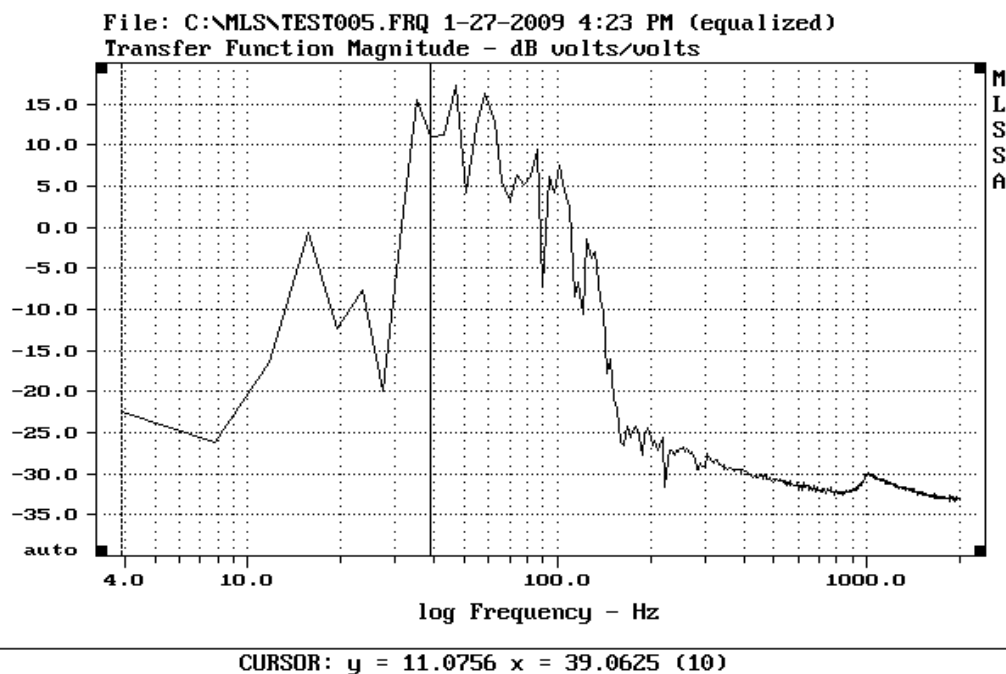
Σχήμα 4. Σύγκριση μετρήσεων 1-2 (overplot).

Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δυο καμπυλών απόκρισης του σχήματος 4 παρουσιάζεται στον 0,3,0 τρόπο ταλάντωσης (73,2 Hz – Πίνακας 2), όπου τα δύο ηχεία είναι τοποθετημένα σε διαδοχικές κοιλίες πίεσης κατά πλάτος. Όταν τεθούν και τα δυο σε λειτουργία τότε ο τρόπος ακυρώνεται μειώνοντας την επίδραση του, και στο $\frac{1}{2}$ του πλάτους όπου βρίσκεται το σημείο ακρόασης ο δεσμός εξασθενεί και η στάθμη αυξάνει. Η χρήση δηλαδή δύο ηχείων σε αυτή τη διάταξη αυξάνει ομοιόμορφα την στάθμη κατά 6 dB, εξομαλύνει τις εξάρσεις και ταυτόχρονα μειώνει το δυναμικό εύρος άρα και τις ανομοιομορφίες του φάσματος.

Στη μέτρηση 5 (σχήμα 5) παρατηρείται το μεγαλύτερο δυναμικό εύρος και ένα χαρακτηριστικό απότομο βύθισμα στα 27 Hz. Ανατρέχοντας στον πίνακα 2 με τους τρόπους ταλάντωσης της αίθουσας θα παρατηρήσουμε πως αυτή η συχνότητα αντιστοιχεί στον 1^ο κατά πλάτος αξονικό τρόπο ταλάντωσης (0,1,0, 24,5 Hz²). Λόγω της θέσης του ακροατή σε δεσμό πίεσης, η στάθμη της ηχητικής

² Η απόκλιση των 2,5 Hz που παρατηρείται οφείλεται στην ύπαρξη δυο εισόδων της αίθουσας στην μέση του πλάτους της αίθουσας (μία σε κάθε πλευρά) που αλλάζουν τα ακουστικά τα όρια της αίθουσας λόγω διαφορετικής εμπέδησης.

πίεσης είναι εξασθενημένη, παρόλο που τα δυο ηχεία βρίσκονται σε κοιλιές πίεσης και διεγείρεται ο τρόπος. Η συνθήκη αυτή προκαλεί αυτό το έντονο βύθισμα.

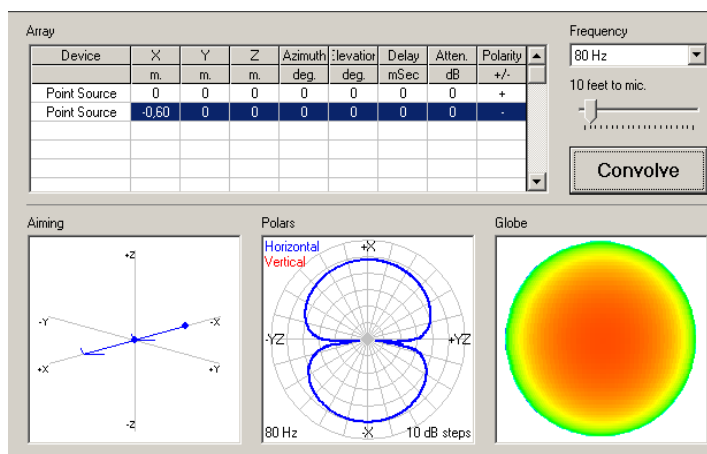


Σχήμα 5. (Μέτρηση 5) 2 subwoofer δεξιά-αριστερά στο ½ του μήκους της αίθουσας

Στη μέτρηση 13 (σχήμα 7) τα δυο ηχεία χαμηλών συχνοτήτων τοποθετήθηκαν μπροστά στη μέση κατά πλάτος της αίθουσας.

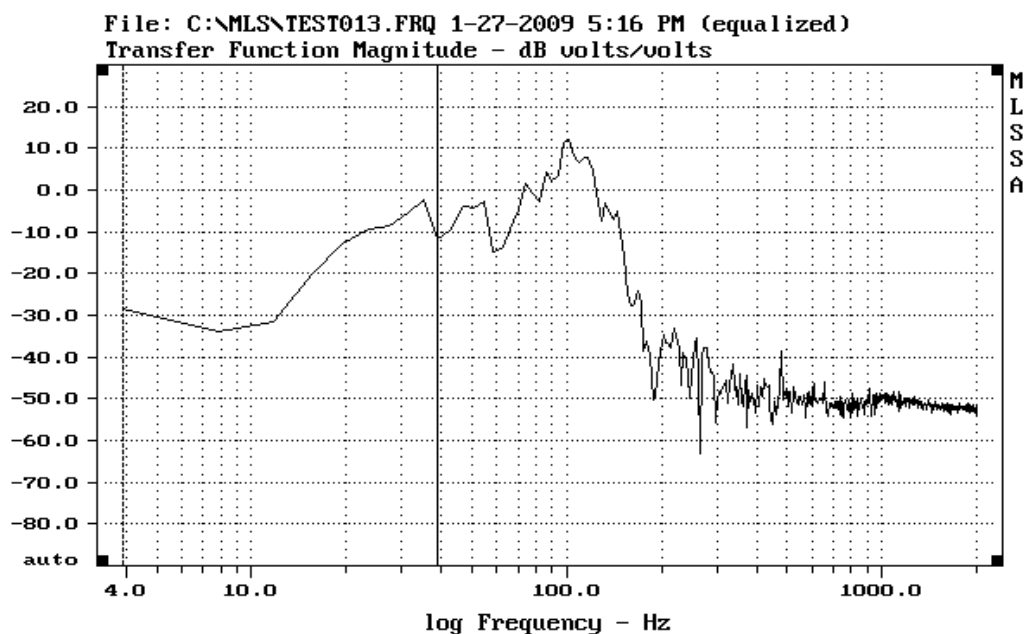
Τροφοδοτήθηκαν με αντίστροφη φάση σε

απόσταση 60 cm. Η διάταξη αυτή μεταβάλλει την παντοκατευθυντική ιδιότητα

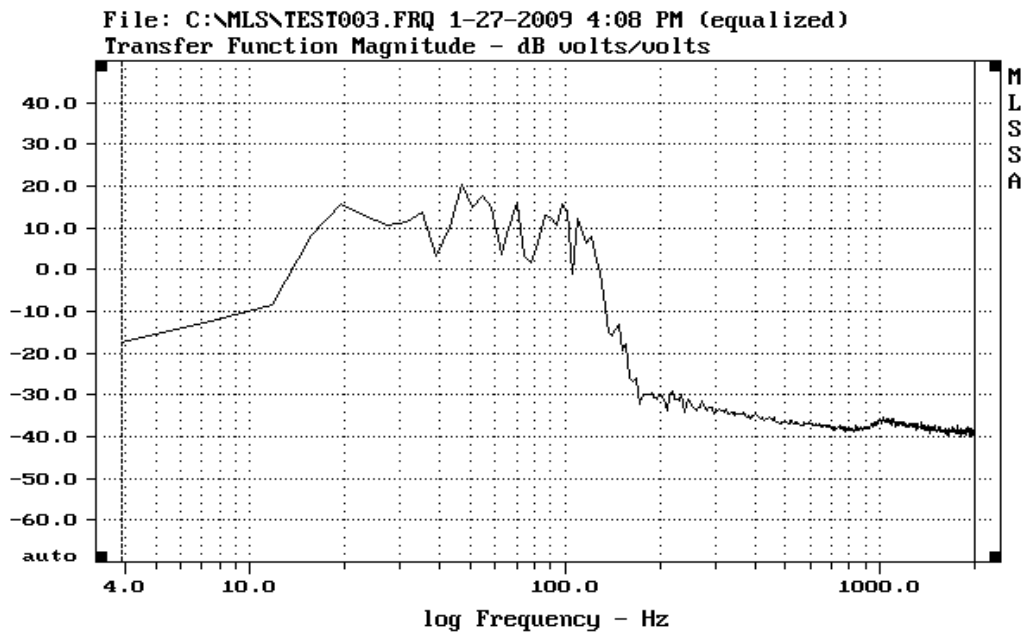


Σχήμα 6. Προσομοίωση πολικού διαγράμματος δυο σημειακών πηγών τοποθετημένες σε απόσταση 60 cm με αναστροφή φάσης. @ 80 Hz.

των ηχείων (θεωρία της διπολικής πηγής-dipole source [2]) δημιουργώντας ένα πολικό διάγραμμα σε σχήμα του αριθμού οκτώ (figure of eight), με μέγιστη εκπομπή πάνω στον άξονα (on axis) και ελάχιστη σε θέση 90° μοιρών (σχήμα 6 - Υπολογισμός με τη βοήθεια λογισμικού (ArrayShow)). Αυτό έγινε για να αποκτήσει κατευθυντικότητα η πηγή και να διεγείρει λιγότερο τις ανακλαστικές επιφάνειες. Η συχνοτική απόκριση στην μέτρηση 13 δείχνει πως για τη συγκεκριμένη διάταξη δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί ο στόχος για ομαλότερη απόκριση καθώς το εύρος ξεπέρασε τα 25 dB.



Σχήμα 7. (Μέτρηση 13) Δύο subwoofer μπροστά στη μέση, το ένα πίσω από το άλλο σε απόσταση 60 cm σε αναστροφή φάσης.



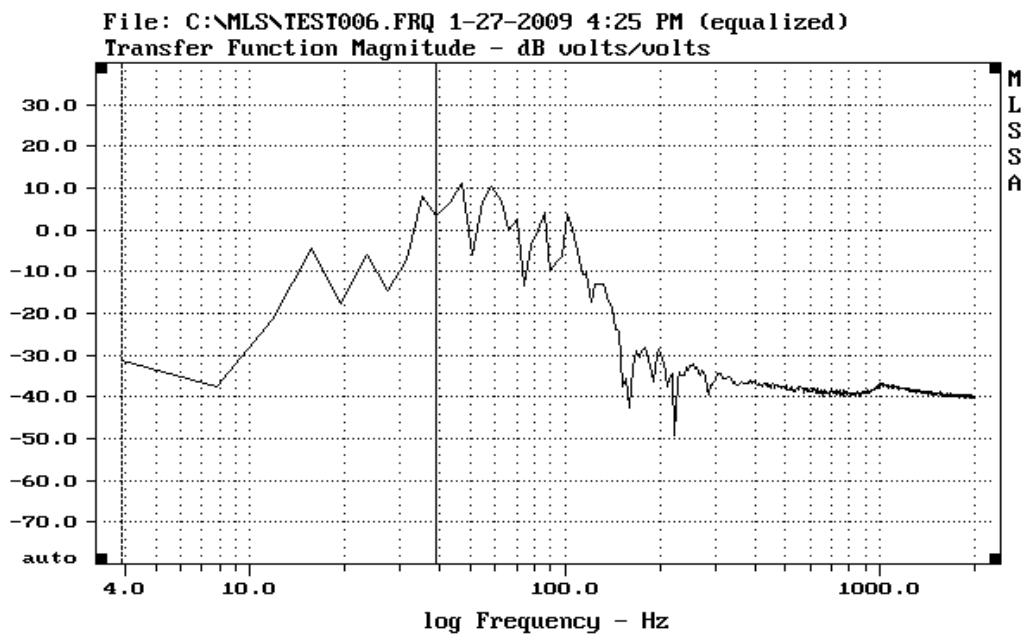
Storing FFT data

TRANSFER LOAD filename:

Enter filename or → for directory

MLSSA: Frequency Domain

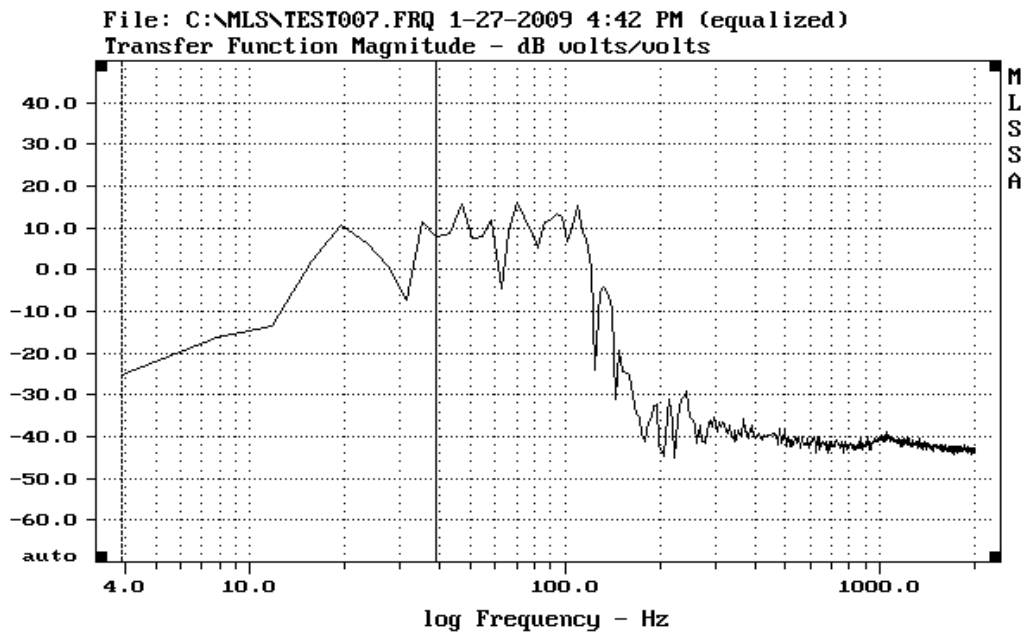
Σχήμα 8. 2 subwoofer στις γωνίες μπροστά.



CURSOR: y = 3.18741 x = 39.0625 (10)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

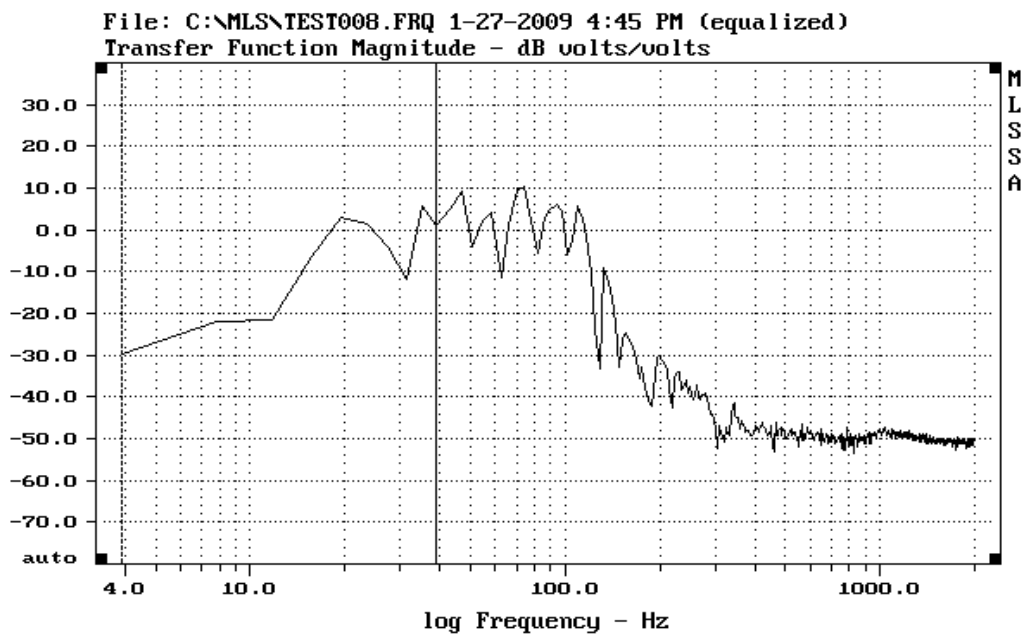
Σχήμα 9. 1 subwoofer αριστερά στο ½ μήκος της αίθουσας.



CURSOR: y = 8.11036 x = 39.0625 (10)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

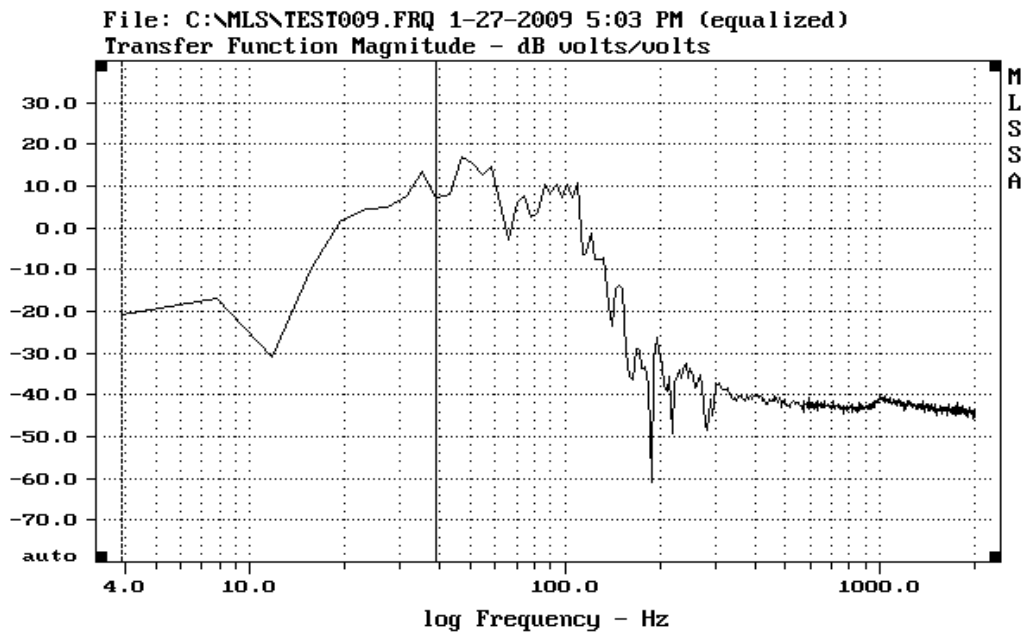
Σχήμα 10. 2 subwoofer ακριβώς στο πλάι του ακροατή (περίπου στη μέση της αίθουσας).



CURSOR: y = 1.07472 x = 39.0625 (10)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

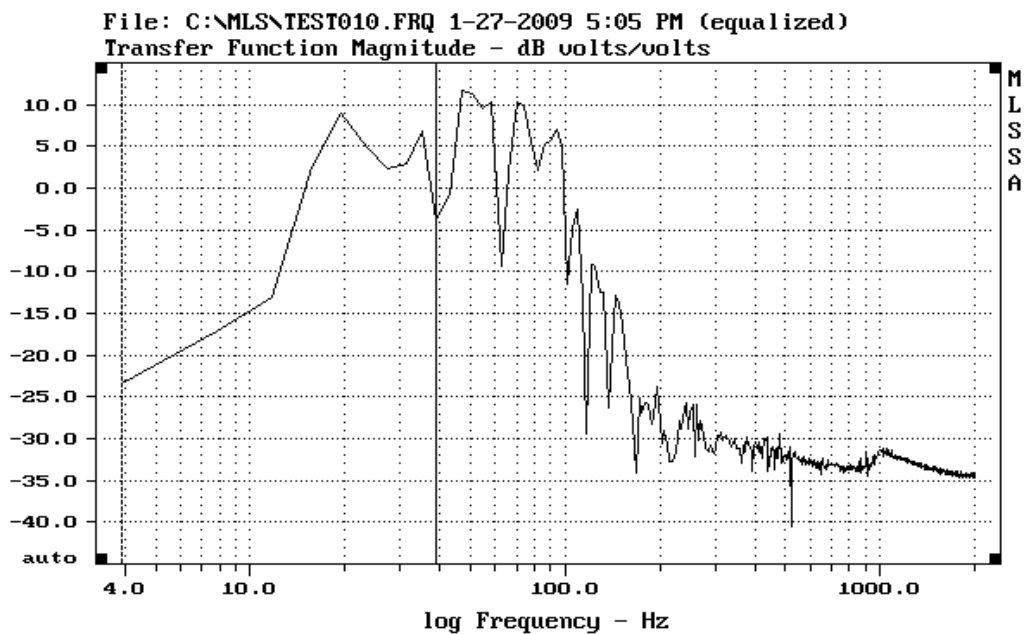
Σχήμα 11. 1 subwoofer αριστερά του ακροατή.



CURSOR: y = 7.12334 x = 39.0625 (10)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

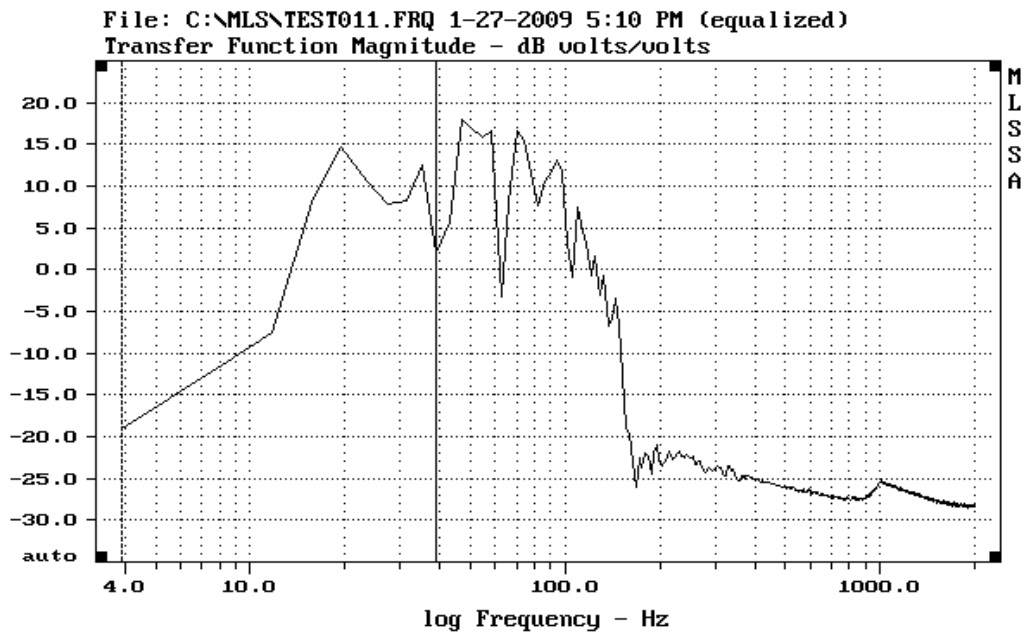
Σχήμα 12. 2 subwoofer μπροστά-πίσω στη μέση του πλάτους της αίθουσας.



CURSOR: y = -3.86218 x = 39.0625 (10)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

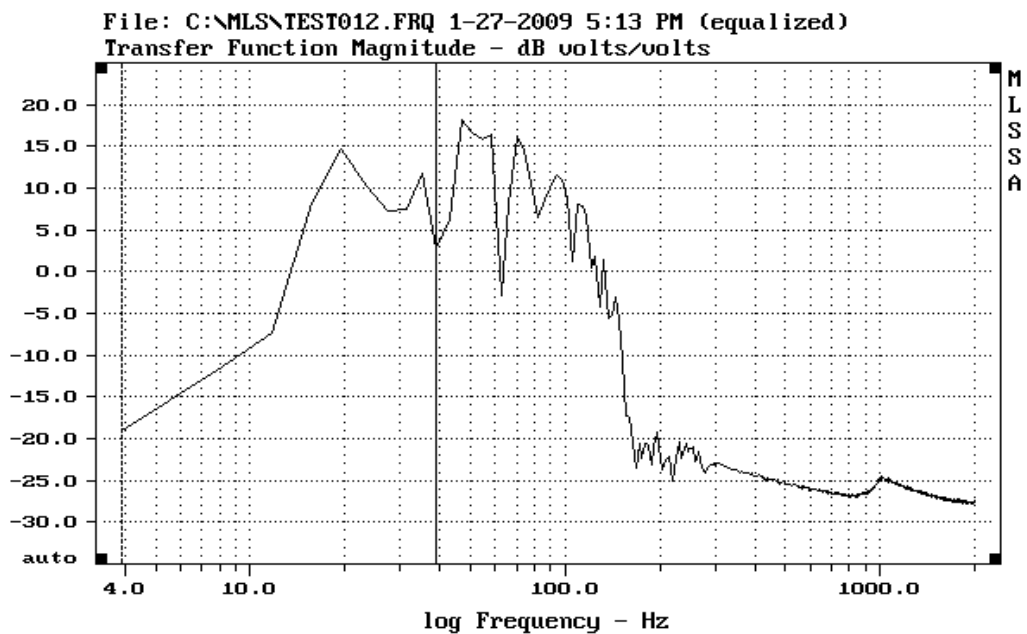
Σχήμα 13. 1 subwoofer μπροστά στη μέση.



CURSOR: y = 1.95559 x = 39.0625 (10)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

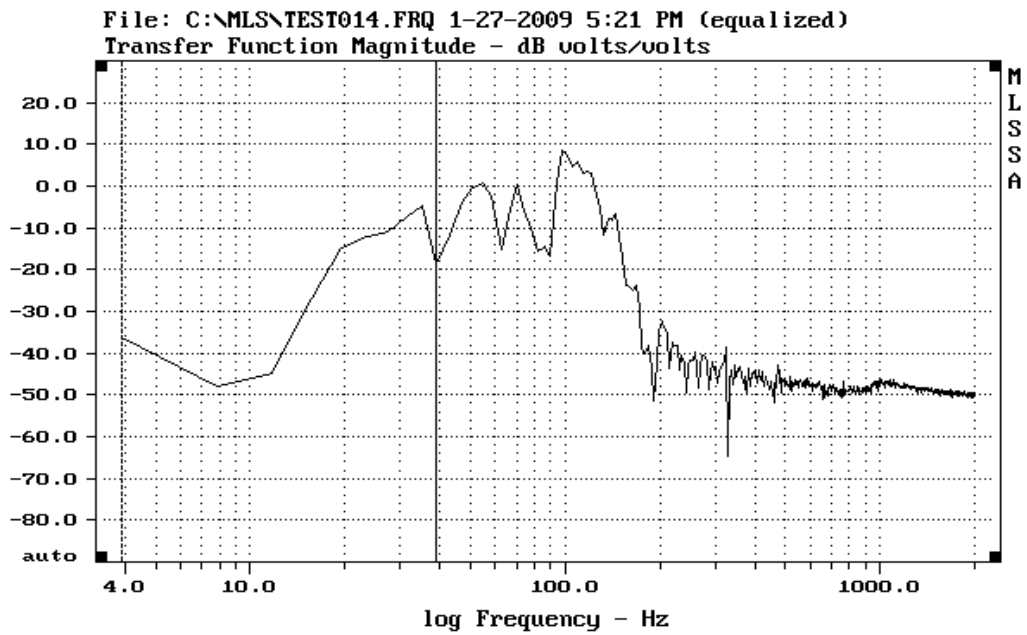
Σχήμα 14. 2 subwoofer μπροστά στη μέση, το ένα πίσω από το άλλο σε απόσταση 30 cm.



CURSOR: y = 2.73029 x = 39.0625 (10)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

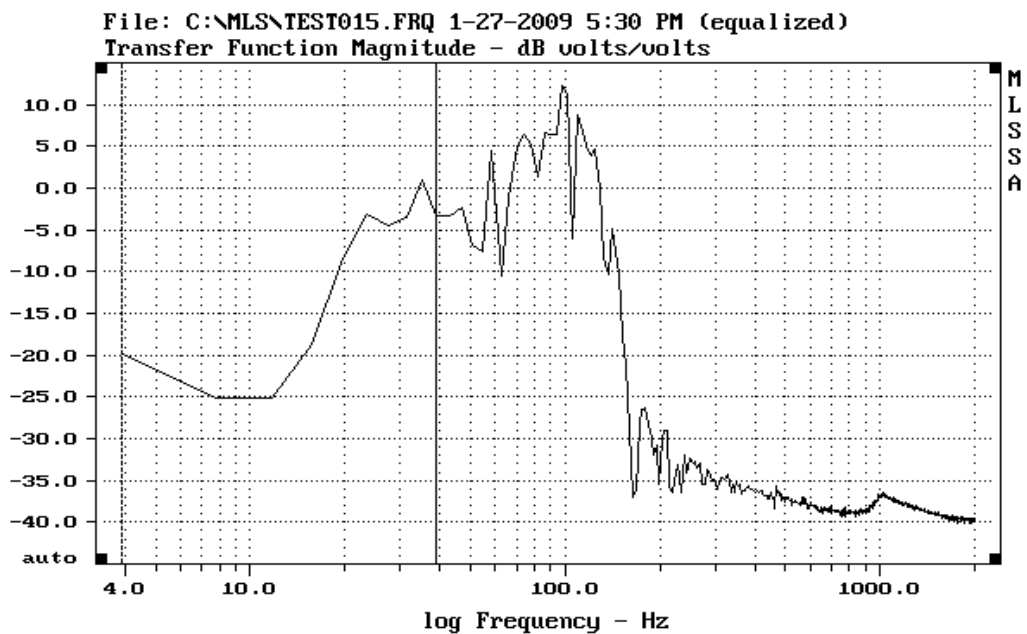
Σχήμα 15. 2 subwoofer μπροστά στη μέση, το ένα πίσω από το άλλο σε απόσταση 60 cm.



CURSOR: y = -18.625 x = 39.0625 (10)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

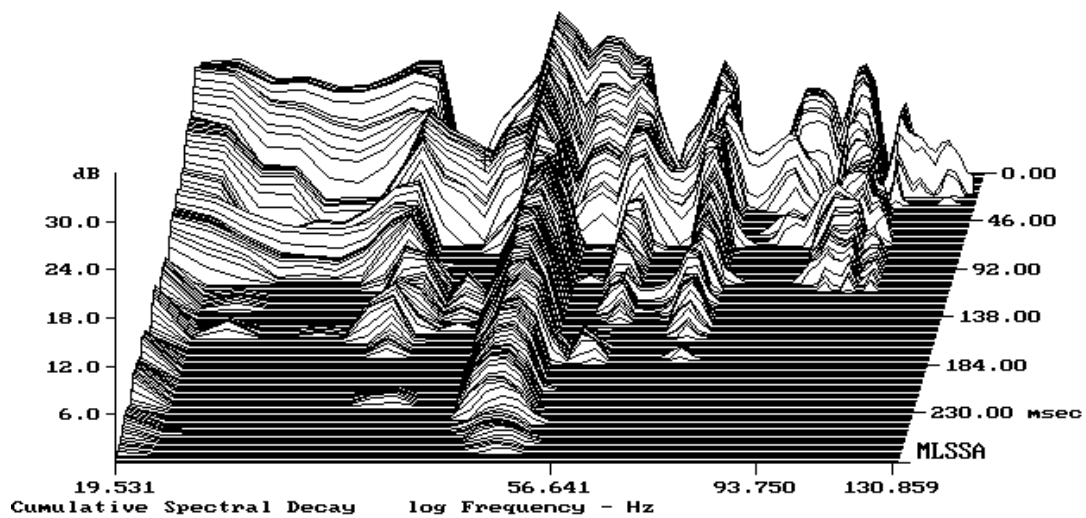
Σχήμα 16. 2 subwoofer μπροστά στη μέση, το ένα πίσω από το άλλο σε απόσταση 30 cm σε αναστροφή φάσης.



CURSOR: y = -3.30712 x = 39.0625 (10)

FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
 Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
 F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

Σχήμα 17. 2 subwoofer σε διαγώνια απέναντι γωνίες με αναστροφή φάσης.

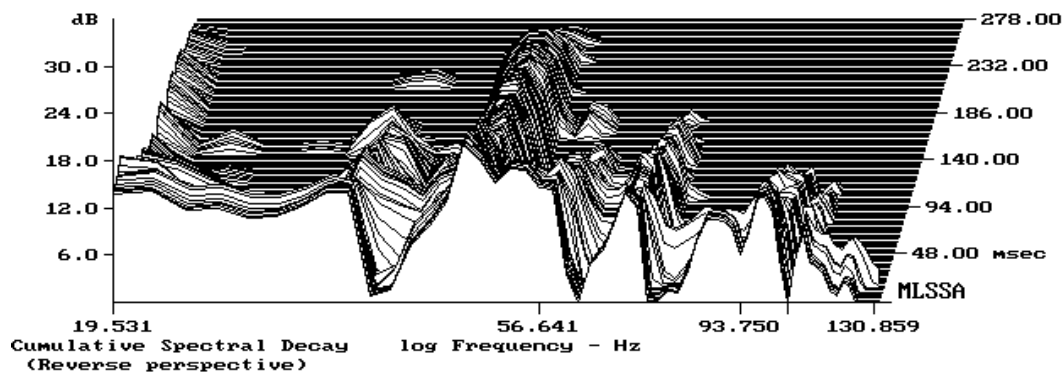


1.55 dB, 39 Hz (20), 0.000 msec (1)

ESC exits, F1 prints, Shift-F1 dumps, F2 places cursor

MLSSA: Waterfall

Σχήμα 18. Waterfall μέτρησης με τα ηχεία στην παρούσα θέση στο εργαστήριο (μέτρηση 2).



0.00 dB, 105 Hz (54), 0.000 msec (1)

ESC exits, F1 prints, Shift-F1 dumps, F2 places cursor

MLSSA: Waterfall

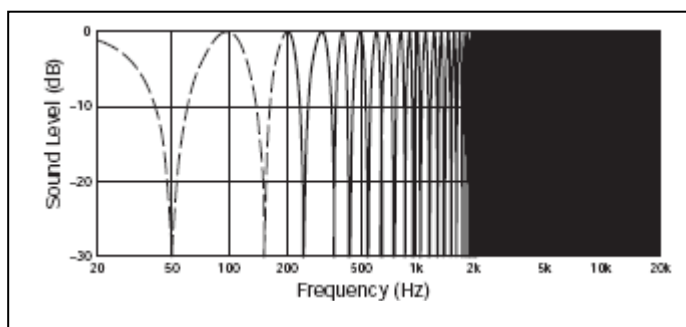
Σχήμα 19. Reverse Waterfall της μέτρησης 2.

2^η Πειραματική διάταξη (comp filter)

Ο όρος φίλτρο κτένας (comp filtering) περιγράφει ένα οπτικό φαινόμενο που παρατηρείται σε διαγράμματα συχνοτικής απόκρισης (σχήμα 20). Είναι μια περιοδική αλληλουχία εξάρσεων και βυθίσεων στην απόκριση που προκαλούνται όταν «το ακουστικό σύνολο (άθροιση) ενός ήχου και της καθυστέρησης του, με ίδια συχνότητα, αποφέρει ένα αποτέλεσμα που εξαρτάται από την περίοδο του ήχου, τη χρονική καθυστέρηση και την στάθμη του ανακλώμενου ήχου» [7]. Η σχέση 1 δίνει τη συχνότητα των βυθισμάτων στο διάγραμμα συχνοτικής απόκρισης.

$$\text{Σχέση 1. } f_{dip} = \frac{N}{2\Delta t}$$

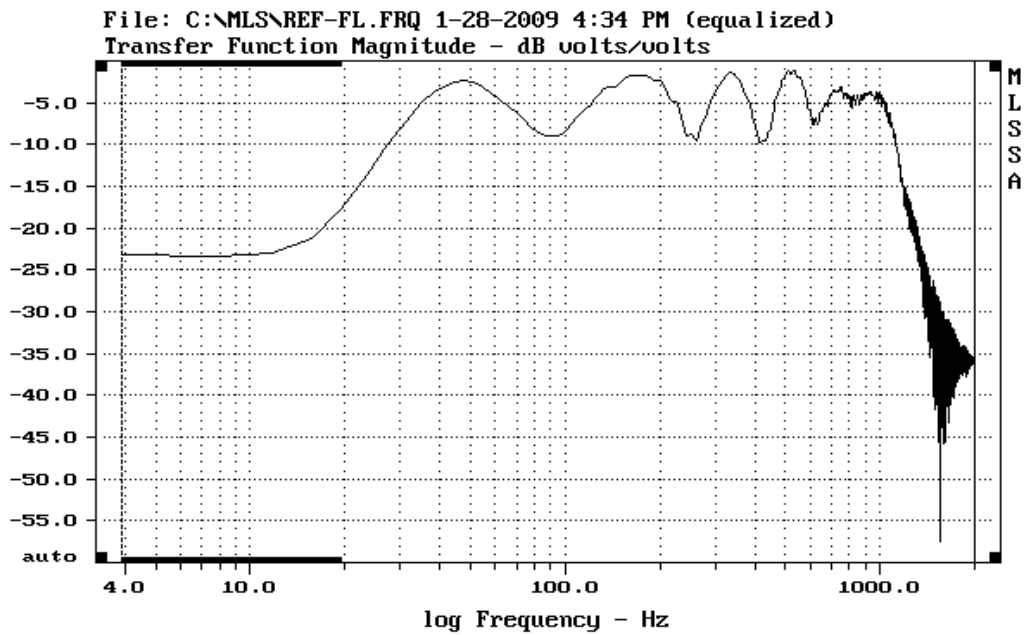
N = Περιττοί αριθμοί 1,3,5...
Δt = Η χρονική καθυστέρηση
(Για τις συχνότητες εξάρσης, όπου
N = όλοι ο ακέραιοι αριθμοί)



Σχήμα 20. Φίλτρο κτένας σε καθυστέρηση 10 ms.

Για τη διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα ηχείο πλήρους φάσματος (full-range) για καθαρά πρακτικούς λόγους. Το σήμα με το οποίο τροφοδοτήθηκε είναι το ίδιο με της πρώτης διάταξης (ροζ φιλτραρισμένος MLS ψευδοτυχαίος θόρυβος). Για την πρώτη μέτρηση (σχήμα 21) το ηχείο τοποθετήθηκε σε ανοιχτό χώρο μακριά από κάθετες ανακλαστικές επιφάνειες, σε ύψος 1,70 m.

1^η μέτρηση. Το μικρόφωνο τοποθετήθηκε στο ίδιο ύψος σε απόσταση 2,10 m από το ηχείο. Η μόνη ανακλαστική επιφάνεια είναι το έδαφος μεταξύ ηχείου και μικροφώνου. Παρατηρώντας την συχνοτική απόκριση της μέτρησης κρουστικής απόκρισης του ηχείου διακρίνεται το φαινόμενο φίλτρου κτένας (comp filtering).



Σχήμα 21. Comp filtering από ανάκλαση στο πάτωμα.

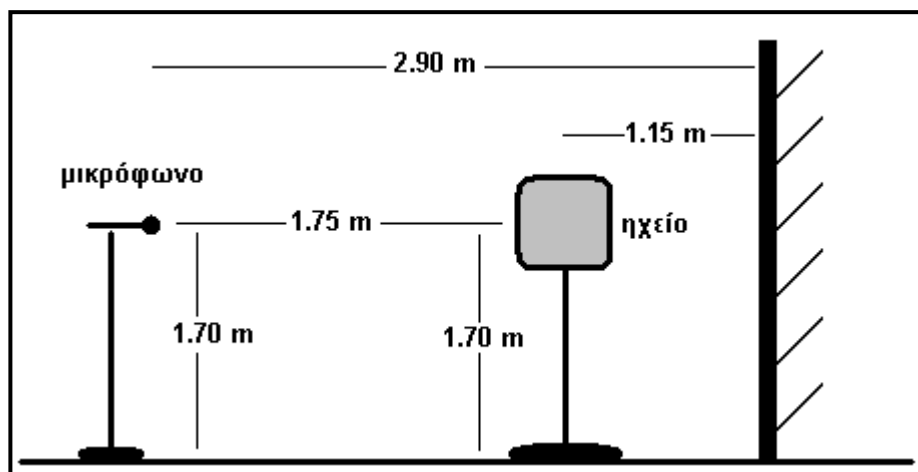
Στον πίνακα 3 με τα αποτελέσματα των πειραματικών και θεωρητικών υπολογισμών, επαληθεύεται το φαινόμενο αφού οι δυο σειρές μετρήσεων συμφωνούν, με μέγιστο σφάλμα (στον ακριβή προσδιορισμό των συχνοτήτων) μικρότερο του 7%.

Εάν αυτό το ηχείο είναι ένα ηχείο σε έναν χώρο ακρόασης και η ανάκλαση αυτή προέλθει από το δάπεδο του, τότε το φάσμα από την ανάκλαση θα επηρεαστεί εκτεταμένα.

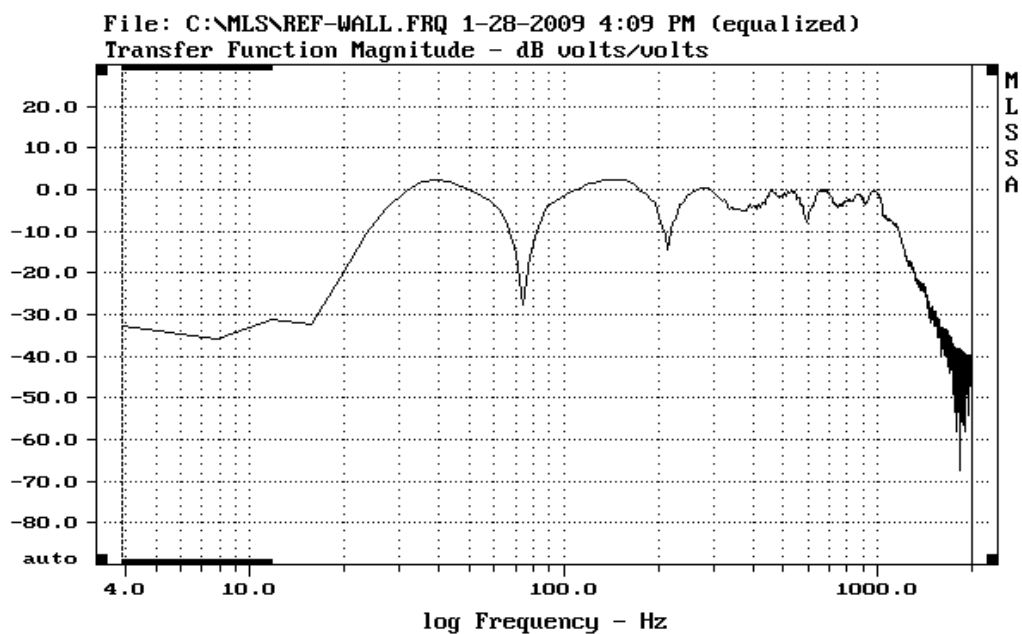
Πίνακας 3. Πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα συχνοτήτων βύθισης 1^{ης} μέτρησης.

Απόσταση m	f_{dip} (Hz)	f_{dip} (Hz)
	πειραματικές	θεωρητικές
Mic-source 2.10	90	90
Mic-floor 1.70	265	271
	420	452
	620	633

2^η μέτρηση. Το ηχείο τοποθετήθηκε κοντά σε κάθετη ανακλαστική επιφάνεια (τοίχος από μπετόν) και για αποφυγή της ανάκλασης από το πάτωμα, τοποθετήθηκαν απορροφητικές διατάξεις (σχήμα 24) μεταξύ ηχείου και μικροφώνου μετρήσεων για να απομονωθεί στη μέτρηση η ανάκλαση από τον τοίχο.



Σχήμα 22. Διάταξη της 2^{ης} μέτρησης.



FREQUENCY DOMAIN MENU: Go View Reference Acquisition Setup Transfer Macro QC
Overlay Calculate Printer DOS Units Library Info Exit
F1 for Help MLSSA: Frequency Domain

Σχήμα 23. Comp filtering από ανάκλαση στον τοίχο πίσω από το ηχείο.

Στον πίνακα 4 με τα αποτελέσματα των πειραματικών και θεωρητικών υπολογισμών, επαληθεύεται το φαινόμενο αφού οι δυο σειρές μετρήσεων συμφωνούν, με μέγιστο σφάλμα (στον ακριβή προσδιορισμό των συχνοτήτων) 13%.

Όπως και στην 1^η περίπτωση ανάκλασης, το συχνοτικό φάσμα, άρα και η ποιότητα ακρόασης σε ένα χώρο ακρόασης επηρεάζεται δραματικά.

Πίνακας 4. Πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα συχνοτήτων βύθισης 2^{ης} μέτρησης.

Απόσταση m	f_{dip} (Hz) πειραματικές	f_{dip} (Hz) θεωρητικές
Mic-source 1.75	72	75
Mic-floor 1.70	215	224
Mic-wall 2.90	380	373
Source-wall 1.15	600	522



Σχήμα 24. Φωτογραφία από το χώρο των μετρήσεων όπου φαίνεται η 2^η πειραματική διάταξη και τα απορροφητικά υλικά για την απορρόφηση της ανάκλασης από το πάτωμα .

Σχολιασμός

Στην περίπτωση της **1^{ης} μέτρησης** όπου η ανάκλαση προέρχεται από το έδαφος σε ένα control room αυτό αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση απορρόφησης στην οροφή – ίδια περίπτωση με την ανάκλαση στο πάτωμα. Η ανάκλαση από το πάτωμα δεν είναι δυνατή σε ένα control room καθώς στη διαδρομή παρεμβάλλεται η κονσόλα ήχου.

Στην περίπτωση της **2^{ης} μέτρησης** μπορεί να μετακινηθεί το ηχείο σε απόσταση όπου η καθυστέρηση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μετακυλήσει σε μη ακουστές συχνότητες (κάτω των 20 Hz) το φαινόμενο. Επίσης η εφαρμογή του ηχείου χαμηλών συχνοτήτων στον τοίχο χωρίς χώρο για να πραγματοποιηθεί η διαδρομή είναι μια ακόμη λύση.

Διευκρίνιση

Τονίζεται ότι, σε καμία περίπτωση, δε θέλουμε να θίξουμε κανένα από τα control rooms με τα οποία ασχοληθήκαμε στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας για τυχόν μικροπροβλήματα που μπορεί να έχουν, μιας και ένας από τους πιο σημαντικούς κρίκους της αλυσίδας που ονομάζεται μουσική παραγωγή είναι η σχέση δωματίου (control room) και ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης, με την εμπειρία του ηχολήπτη (μηχανικό ήχου), που εργάζεται και δημιουργεί μέσα σε αυτό. Λίγο - πολύ όλοι μας γνωρίζουμε μουσικές παραγωγές που έχουν δημιουργηθεί σε control rooms που ενώ δεν είχαν τέλεια ακουστική, είχαν μηχανικούς ήχου (ηχολήπτες) οι οποίοι γνώριζαν, λόγω της εμπειρίας τους, τη συχνοτική συμπεριφορά των control rooms στα οποία εργάζονταν και έπρατταν και πράττουν αναλόγως. Βέβαια ένα control room το οποίο έχει άρτια ακουστική συμπεριφορά, άνετα ακουστικά monitor, με τα υπόλοιπα σχετικά της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης και γενικά ένα σχετικά όμορφο οπτικά χώρο

που εκφράζει τον εκάστοτε μηχανικό ήχο που εργάζεται εκεί, συντελεί στην δημιουργικότητα του τεχνικού και αναδεικνύει τις πραγματικές του ικανότητες και προσόντα.»

Κεφάλαιο 6. Εφαρμογή μοντελοποίησης στους χώρους μέτρησης

6.1 Μοντελοποίηση με το Cara Cad του Control Room 1

Παρακάτω βλέπουμε μία εσωτερική ;άποψη του control room 1 που είναι σχεδιασμένη με το Cara Cad Room Design:

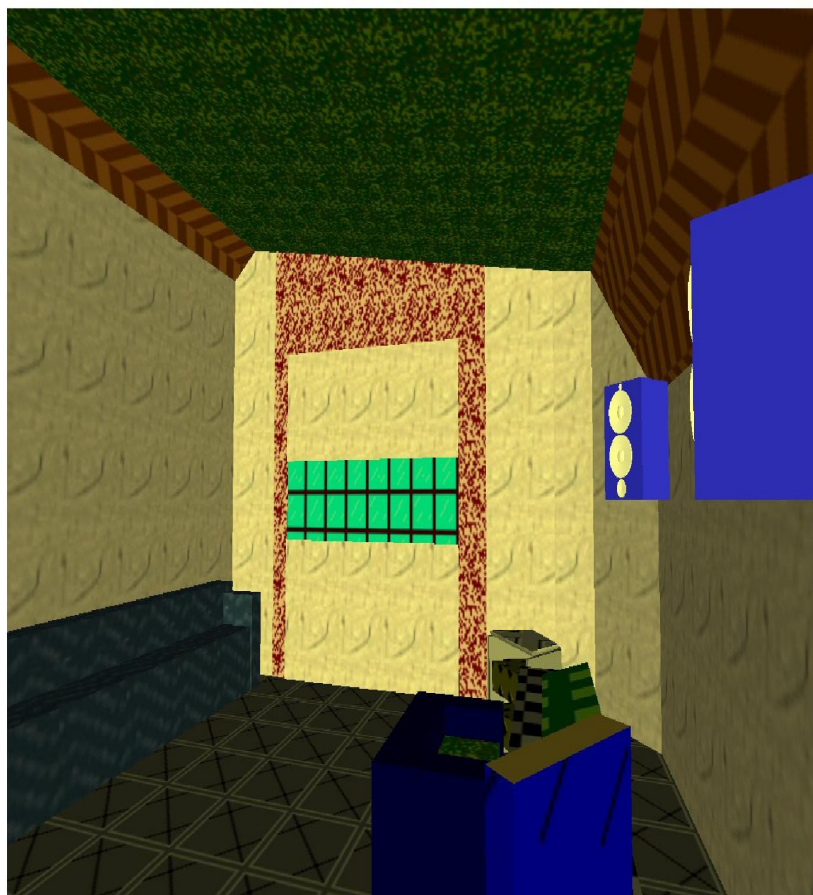


Σχήμα 1 Μοντελοποίηση Control Room 1

Δυο εσωτερικές απόψεις του δωματίου (σχήματα 2, και 3) :

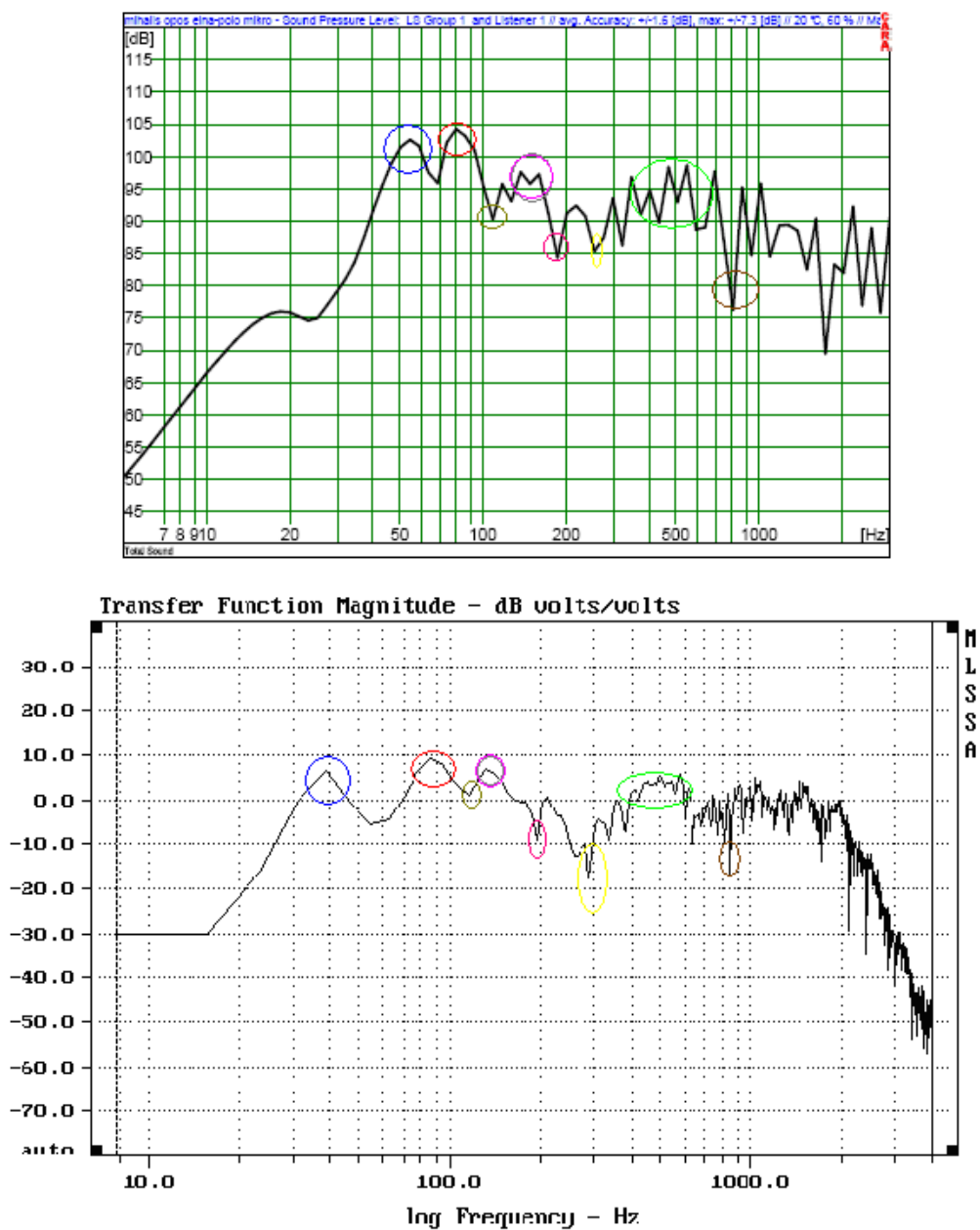


Σχήμα 2 Μοντελοποίηση Control Room 1



Σχήμα 3 Μοντελοποίηση Control Room 1

Εξαγωγή εικονικών μετρήσεων και σύγκριση με τις πραγματικές μετρήσεις



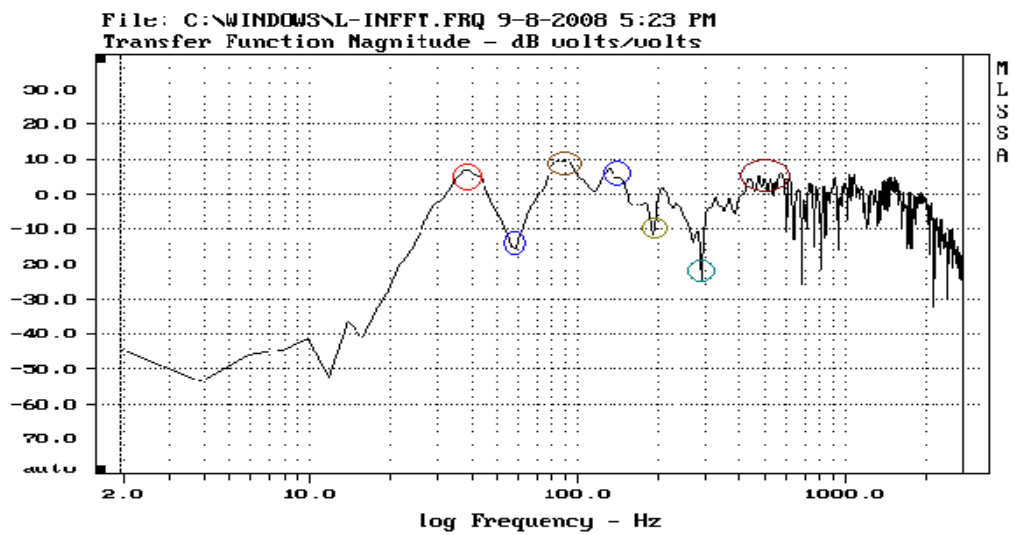
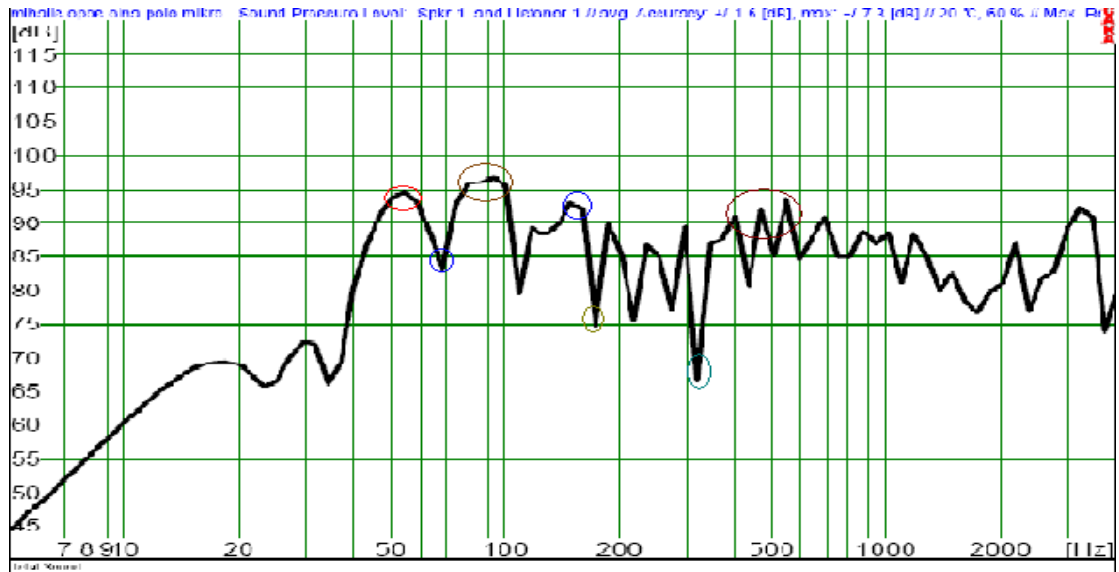
Σχήμα 1 Εικονική μέτρηση συγκρινόμενη με την πειραματική

Αφού μοντελοποιήσαμε εικονικά τον χώρο, πραγματοποιήσαμε εικονικές μετρήσεις και τις συγκρίναμε με τις πειραματικές μετρήσεις, για να δούμε αν συμφωνούν.

Παρακάτω, βλέπουμε την εικονική μέτρηση, όπου έχουμε ενεργά τα δύο ηχεία, και το μικρόφωνο στη θέση του ηχολήπτη και τη συγκρίνουμε με την πραγματική μέτρηση 1, που περιγράφει ακριβώς τον ίδιο τρόπο μέτρησης, για να εξακριβώσουμε την πιστότητα της εικονικής μέτρησης :

Με όμοια χρώματα, έχουμε σημειώσει τις ομοιότητες, της εικονικής με την πραγματική μέτρηση, διαπιστώνοντας, ότι υπάρχει αρκετά μεγάλη ομοιότητα στις μετρήσεις, άρα, αρκετή ακρίβεια, από το πρόγραμμα σχεδίασης. Αυτό είναι ενθαρρυντικό για μας, γιατί θα μπορούμε πλέον να πειραματιστούμε εικονικά, κάνοντας ότι επεμβάσεις επιθυμούμε, για να προτείνουμε τελικά μια όσο το δυνατόν βέλτιστη και ταυτόχρονα εφικτή, εκδοχή του χώρου. Ωστόσο θα χρησιμοποιήσουμε και άλλο παραδείγματα σύγκρισης, γιατί να δούμε αν και αυτή τη φορά συγκλίνουν οι μετρήσεις και δεν είναι θέμα τύχης.

Παρακάτω βλέπουμε τη σύγκριση, της εικονικής με την πραγματική μέτρηση, όπου έχουμε ενεργό μόνο το αριστερό ηχείο και το μικρόφωνο βρίσκεται στη θέση του ηχολήπτη.



CURSOR: y = -22.275 x = 2759.7656 (1413)

Σχήμα 2. Εικονική μέτρηση συγκρινόμενη με την πειραματική

Όπως βλέπουμε και εδώ, έχουμε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

6.2 Πρόγραμμα υπολογισμού ιδιοσυχνοτήτων δωματίου

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των μετρήσεων που έγιναν στην νέα αίθουσα Πολυμεσικών Εφαρμογών και στο Control Room 3 και παρατίθενται αναλυτικά στις ενότητες 5.3 και 5.2 αντίστοιχα, γίνεται η σύγκριση με τα υπολογισμένα δεδομένα του προγράμματος.

Από τις 15 μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την τοποθέτηση ηχείων χαμηλών συχνοτήτων, έχουν επιλεγεί τρεις. Η μέτρηση 1, όπου τα ηχεία είναι στην αρχική θέση με ενεργοποιημένο μόνο το ένα (το αριστερό από τη θέση ακρόασης) και η μέτρηση 5 όπου το ηχείο είναι στο $\frac{1}{2}$ του πλάτους της αίθουσας. (οι συντεταγμένες στο σχήμα 1 και 2) και η μέτρηση 3 που η συνέχεια της 5 και με τα δυο ηχεία ενεργοποιημένα

Room Response Calculator											
Room Dimentions				Coordinates						Absorbtion	
Lx	8,63	m	Source Xs	7,11	Ys	2,34	Zs	0,3	Aol	56,4109	
Ly	7	m	Reciever Xr	6,3	Yr	4,57	Zr	1,29	Ax	10,8301	
Lz	2,9	m	cAir	343	m/sec	radial Dist.	2,3726	m	Ay	13,3519	
			ρ	1,2				Az	32,2288	α	0,26675
Modes	nx	ny	nz	f (Hz)	kns	Ψπ	Ψη	ωN	Ex,y,z	RT60	
1	1	0	0	19,9	1,32525	-0,851	-0,66134	124,86	2		0,5
2	0	1	0	24,5	1,63385	0,4974	-0,46197	153,94	2		
3	1	1	0	31,5	2,9591	-0,423	0,305519	198,21	4		

Σχήμα 1. Το φύλλο «Room Response Calculator» με τις συντεταγμένες ηχείου και αποδέκτη αυτές της μέτρησης 2 (στην αρχική θέση) από την πειραματική μέτρηση με τα subwoofer.

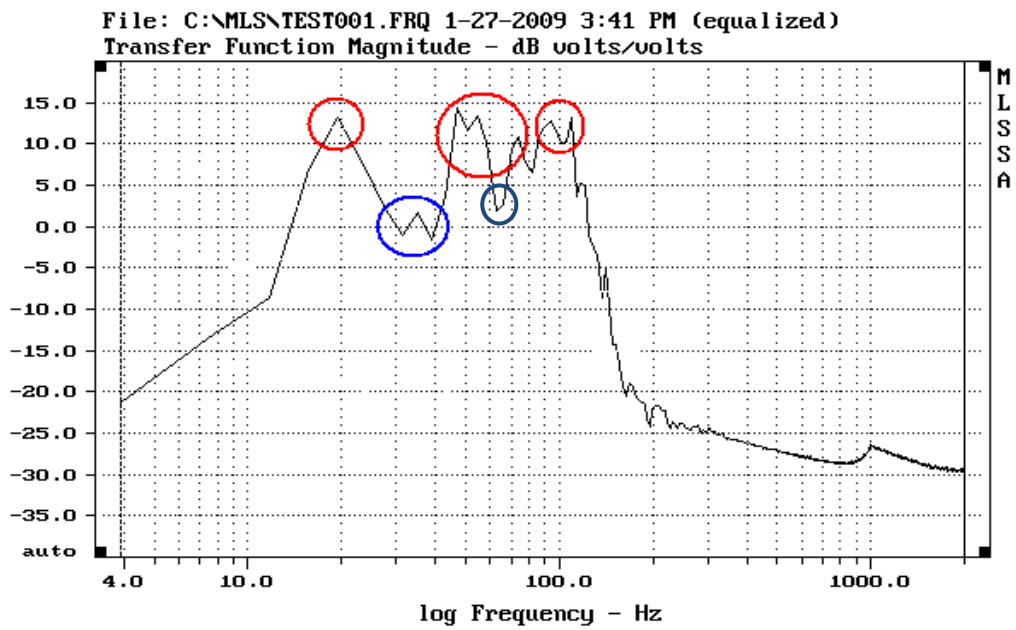
Room Response Calculator											
Room Dimentions				Coordinates						Absorbtion	
Lx	8,63	m	Source Xs	4,32	Ys	0	Zs	0,3	Aol	94,0181	
Ly	7	m	Reciever Xr	6,3	Yr	3,46	Zr	1,29	Ax	18,0501	
Lz	2,9	m	cAir	343	m/sec	radial Dist.	3,9865	m	Ay	22,2532	
			ρ	1,2				Az	53,7147	α	0,44458
Modes	nx	ny	nz	f (Hz)	kns	Ψπ	Ψη	ωN	Ex,y,z	RT60	
1	1	0	0	19,9	2,20876	-0,002	-0,66134	124,86	2		0,3

Σχήμα 2. Το φύλλο «Room Response Calculator» με τις συντεταγμένες ηχείου αυτές της μέτρησης 5 με το ηχείο αριστερά στο $\frac{1}{2}$ του μήκους της αίθουσας.

Στο σχήμα 3, 4 και 5, 6 γίνεται σύγκριση των δεδομένων από τις μετρήσεις και από το πρόγραμμα υπολογισμού χαμηλών ιδιοσυχνοτήτων αντίστοιχα. Η υπολογισμένη απόκριση, σχεδόν σε όλο το φάσμα, είναι σύμφωνη με την απόκριση που μετρήθηκε. Παρατηρείται μια διαφορά δυναμικού εύρους μεταξύ υπολογισμένης και μετρημένης συχνοτικής απόκρισης. Μεγάλο ρόλο σε αυτό παίζει η απορρόφηση του χώρου καθώς επηρεάζει το δυναμικό εύρος και ταυτόχρονα το εύρος του συντονισμού.

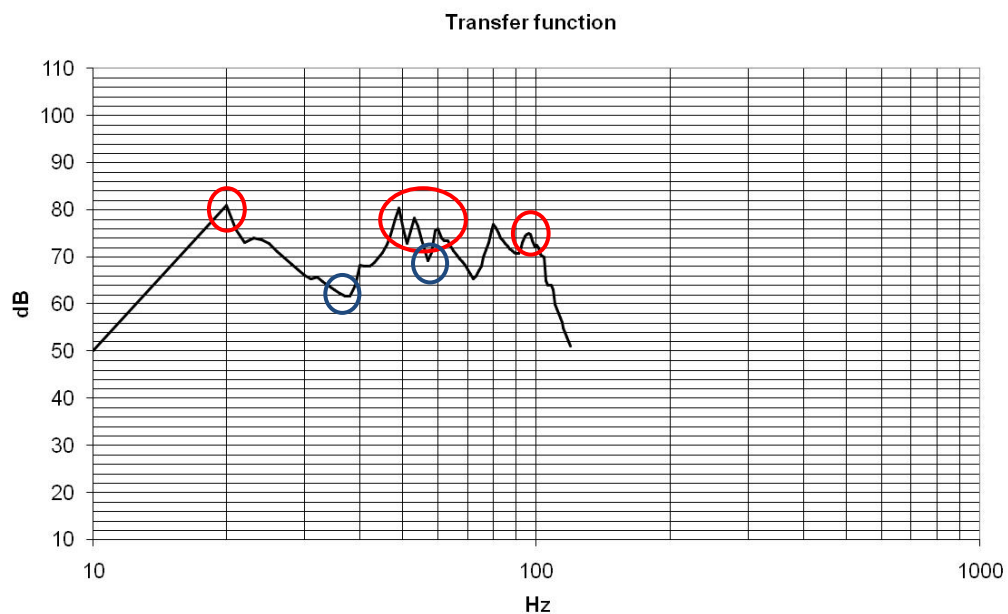
Αναλυτικά όσον αφορά τις συχνότητες στα σχήματα 3 και 4. Στα 20, 31, 39 και 100, το πρόγραμμα τις έχει υπολογίσει με μεγάλη ακρίβεια ενώ οι υπόλοιπες σφάλουν κατά ± 5 Hz.

Στα σχήματα 5 και 6 οι συχνότητες 24, 49, 59, και 84, υπολογίστηκαν με μεγάλη ακρίβεια, και οι υπόλοιπες σφάλουν κατά ± 5 Hz.

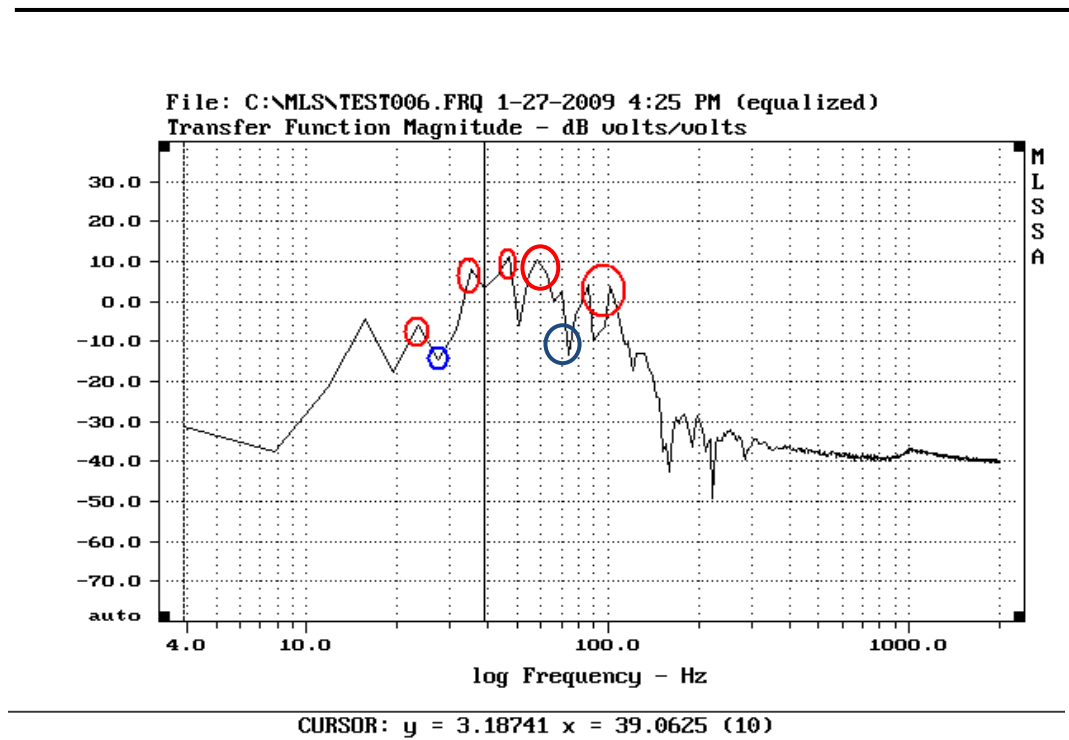


CURSOR: $y = -29.5909$ $x = 2000.0000$ (512)

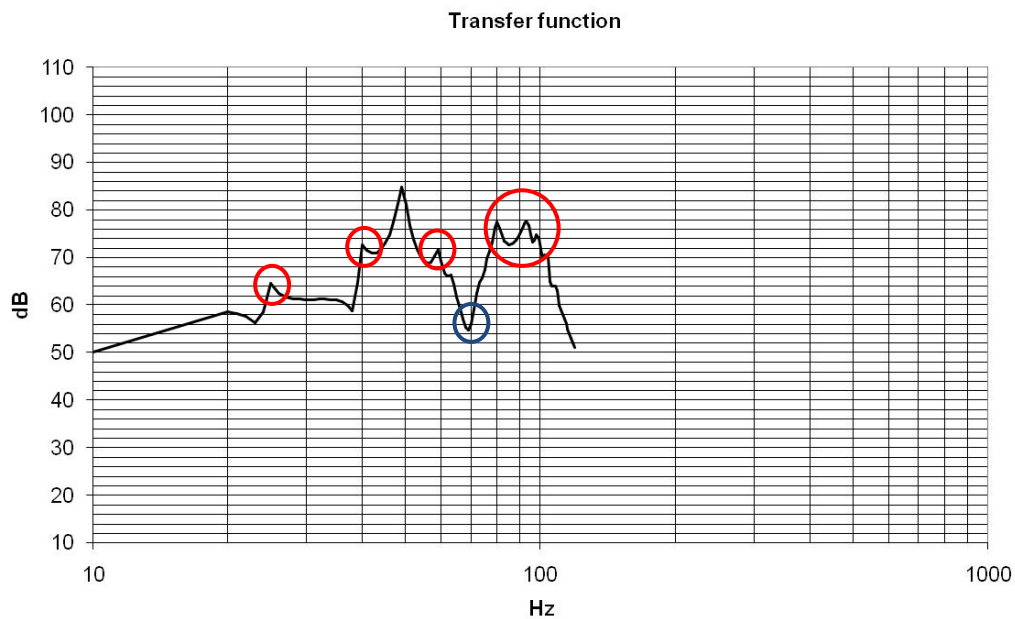
Σχήμα 3. Μέτρηση 2 με MLSSA με το ηχείο στην αρχική θέση.



Σχήμα 4. Συχνοτική απόκριση υπολογισμένη από το πρόγραμμα μέτρησης 2 . Με κόκκινο οι εξάρσεις και μπλε τα βυθίσματα που είναι σύμφωνα με τη μέτρηση.



Σχήμα 5. Μέτρηση 6 με MLSSA με το ηχείο αριστερά στο $\frac{1}{2}$ του μήκους της αίθουσας.

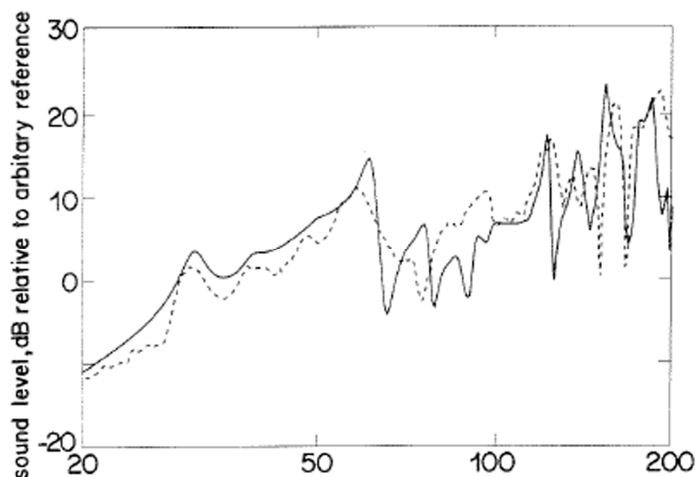


Σχήμα 6. Συχνοτική απόκριση υπολογισμένη από το πρόγραμμα μέτρησης 6 . Με κόκκινο οι εξάρσεις και μπλε τα βυθίσματα που είναι σύμφωνα με τη μέτρηση.

Οι αποκλίσεις πιθανόν να οφείλονται σε κακή εκτίμηση της θέσης του ηχείου, καθώς τα σημεία αναφοράς (οι δυο τοίχοι είναι και τα δύο σε κάποια απόσταση. Επίσης, για την καλύτερη λειτουργία του μοντέλου απαιτείται: ομοιόμορφη απορρόφηση στο χώρο ανά άξονα, και η γνώση του χρόνου

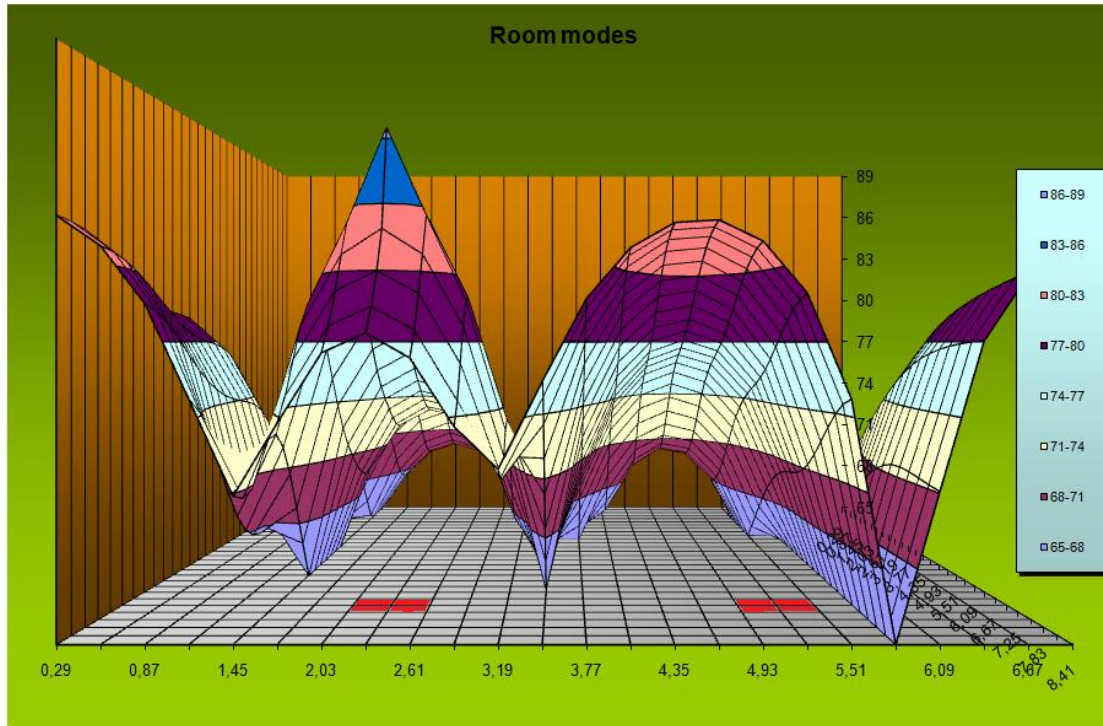
αντήχησης, καθώς είναι ένας παράγοντας που συνυπολογίζει το μοντέλο υπολογισμού.

Ενδεικτικά παραθέτεται και διάγραμμα του μελετητή Walker R. (σχήμα 7) όπου διαφαίνονται οι αποκλίσεις που προαναφέρθηκαν.



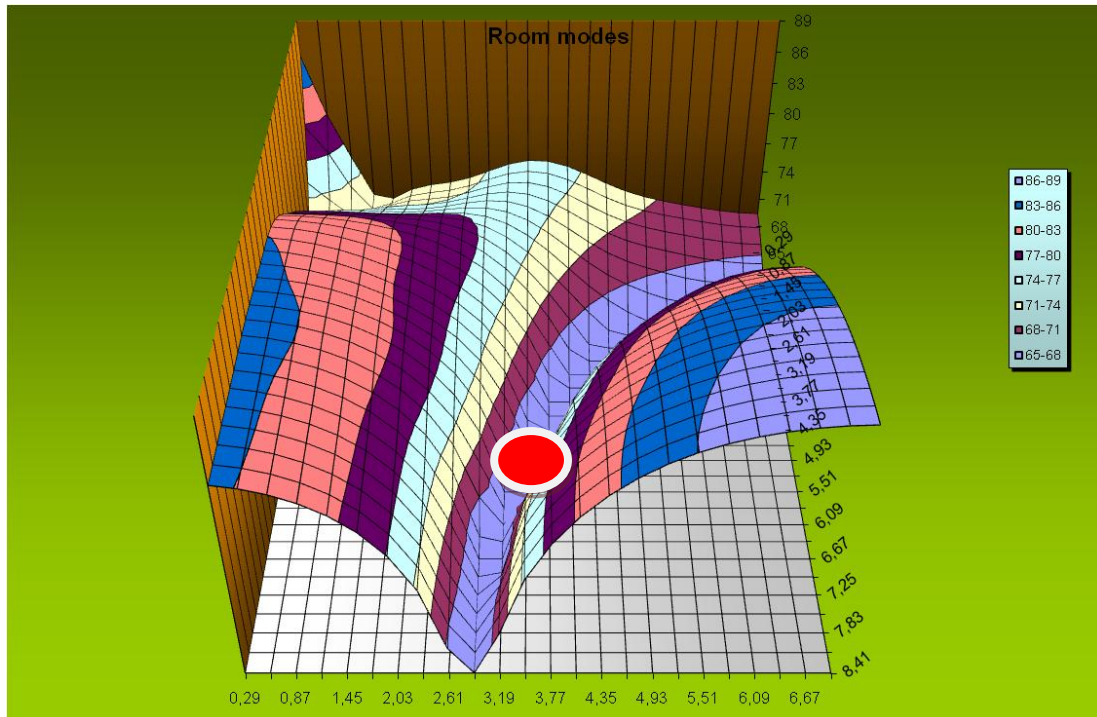
Σχήμα 7. Με διακεκομμένη γραμμή είναι η πειραματική μέτρηση και με τη συνεχόμενη η υπολογισμένη.

Όπως έχει αναλυθεί εκτενέστερα στην ενότητα 5.3 ,η μεγαλύτερη διαφορά στην απόκριση μεταξύ της μέτρησης 1 και 2 παρουσιάζεται στον 0,3,0 τρόπο ταλάντωσης (73,2 Hz), όπου τα δύο ηχεία είναι τοποθετημένα σε διαδοχικές κοιλίες πίεσης κατά πλάτος. Στο σχήμα 8 γίνεται μοντελοποίηση της κατανομή της στάθμης με το ένα ενεργοποιημένο για να φανούν οι κοιλίες πίεσης. Όταν τεθούν και τα δυο σε λειτουργία τότε ο τρόπος ακυρώνεται μειώνοντας την επίδραση του, και στο $\frac{1}{2}$ του πλάτους όπου βρίσκεται το σημείο ακρόασης ο δεσμός εξασθενεί και η στάθμη αυξάνει.



Σχήμα 8. Τα δύο ηχεία είναι τοποθετημένα (κόκκινα τετράγωνα) σε διαδοχικές κοιλίες (εδώ η αναπαράσταση με το ένα ενεργοποιημένο δείχνει τις κοιλίες σε σχέση με τη θέση των ηχείων) του τρόπου 0,3,0 στα 73,2 Hz – Πρόγραμμα Low-frequency Room Modes Calculator.

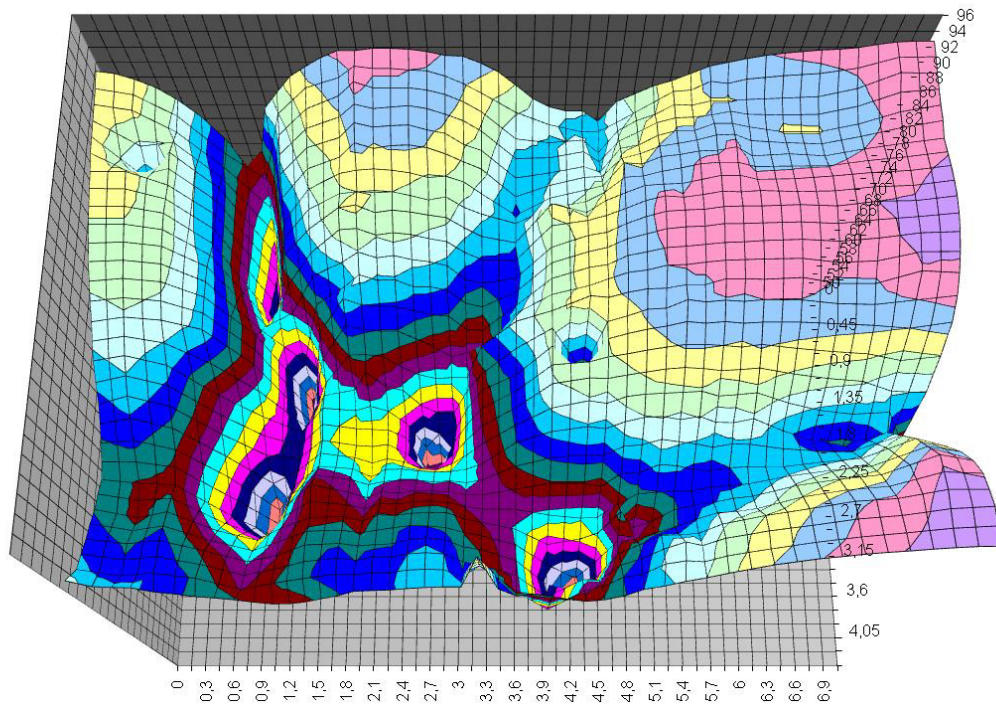
Στη μέτρηση 5 παρατηρείται ένα χαρακτηριστικό απότομο βύθισμα στα 29 Hz. (εκτενής αναφορά στην ενότητα 5.3). Στο σχήμα 9 υπολογίζεται το ακουστικό ομοίωμα της κατανομής της στάθμης στη συγκεκριμένη συχνότητα. Επιβεβαιώνεται το γεγονός πως η θέση ακρόασης βρίσκεται σε δεσμό πίεσης.



Σχήμα 9. Η θέση ακρόασης (κόκκινη βούλα) βρίσκεται σε δεσμό πίεσης των 27 Hz.

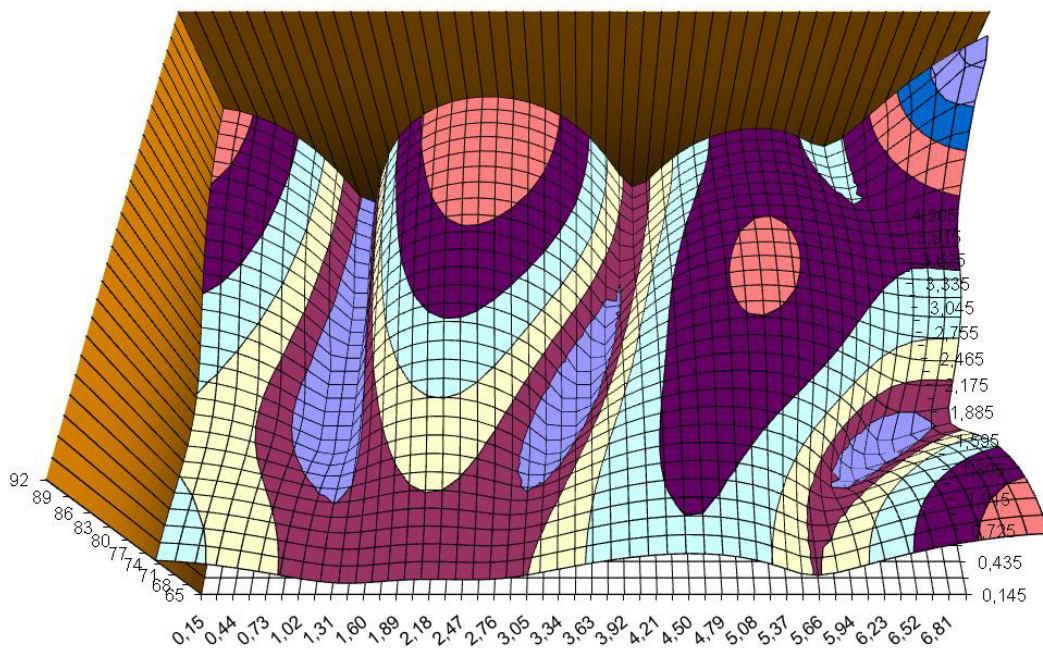
Στο control room 3 (ενότητα 5.2) έγινε χαρτογράφηση της κατανομής της στάθμης ηχητικής πίεσης σε ορισμένες προβληματικές συχνότητες. Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα επιχειρείται μια αξιολόγηση του φύλλου «Spl Distribution».

Στο σχήμα 9 απεικονίζεται η χαρτογράφηση για τη συχνότητα των 70 Hz. Στο σχήμα 10 είναι ένα ακουστικό ομοίωμα (μοντελοποίηση) του ίδιου χώρου για την ίδια συχνότητα, υπολογισμένο με το πρόγραμμα υπολογισμού ιδιοσυχνοτήτων. Και στα δυο εμφανίζονται χαρακτηριστικά σε όλες τις γωνίες πλην της κάτω αριστερά μεγάλη στάθμη, ενώ μειωμένη εμφανίζει στην ευρύτερη περιοχή της αριστερής γωνίας.



Σχήμα 9. Διάγραμμα των 70 Hz

Room modes

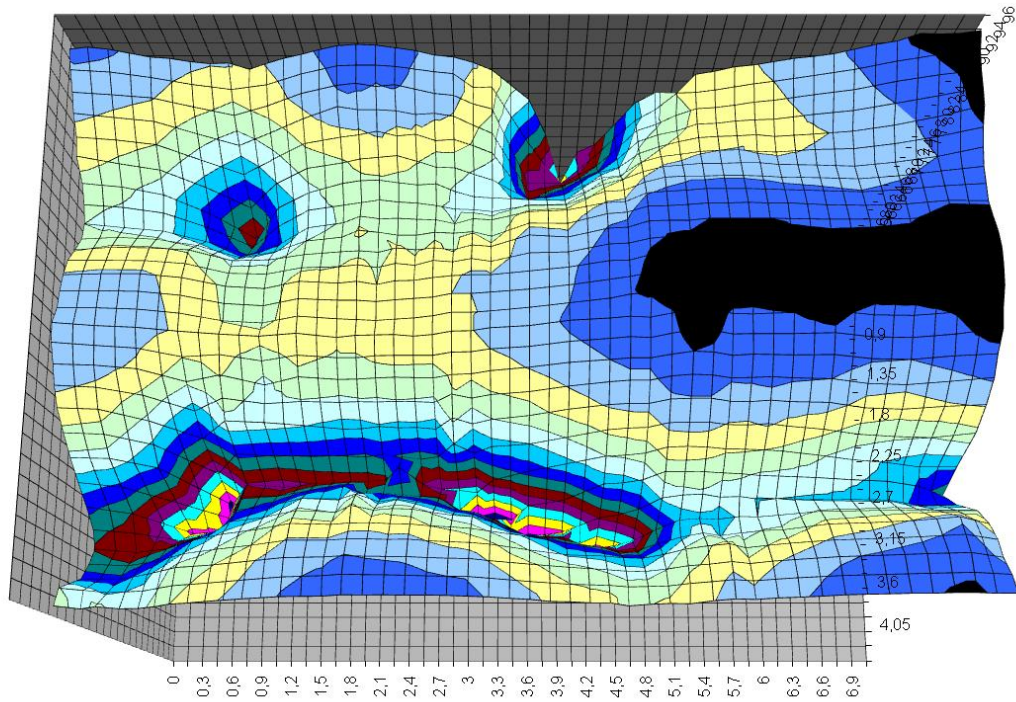


Σχήμα 10. Μοντελοποίηση του Control room στα 70 Hz.

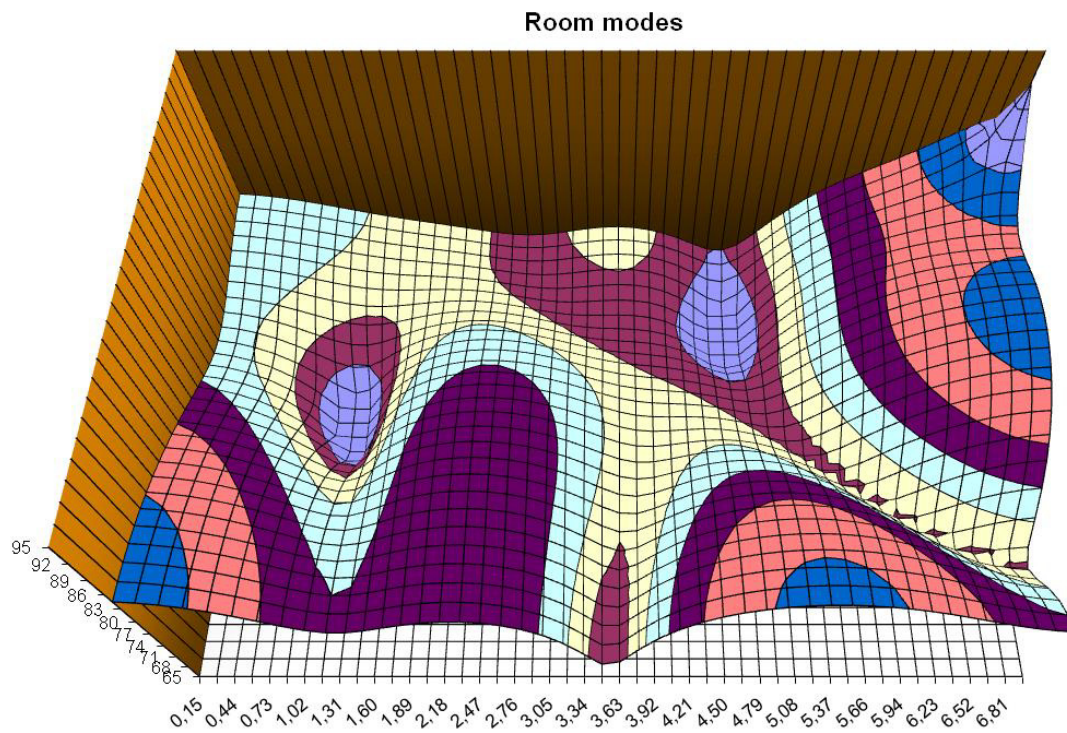
Στο σχήμα 11 και 12 απεικονίζονται οι αντίστοιχες χαρτογραφήσεις (πραγματική – ομοίωμα), για τη συχνότητα των 74 Hz. Είναι χαρακτηριστική η απουσία της εμφάνισης του 3^{ου} κατά μήκος τρόπου ταλάντωσης. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός πως κατά τη μέτρηση επιδρούσε στο πεδίο και ένας εφαπτομενικός τρόπος όπως φαίνεται στον πίνακα 1 στον οποίο η στάθμη αλλάζει σε μετακίνηση του σημείου μέτρησης καθ' ύψος. Κατά την πειραματική χαρτογράφιση, παρόλο που η γεννήτρια ήχου ρυθμίστηκε σε ημίτονο των 74 Hz, είναι πολύ πιθανό να διεγέρθηκε εφαπτομενικός τρόπος στα 75,5 Hz.,

Πίνακας 1. Υπολογισμός των Τρόπων ταλάντωσης του Control Room 3

Room Dimentions			
Lx	Ly	Lz	Hz
7,1	4,26	2,90	
1	0	0	24,2
0	1	0	40,3
1	1	0	46,9
2	0	0	48,3
0	0	1	59,1
2	1	0	62,9
1	0	1	63,9
0	1	1	71,5
3	0	0	72,5
1	1	1	75,5
2	0	1	76,4
0	2	0	80,5
3	1	0	82,9

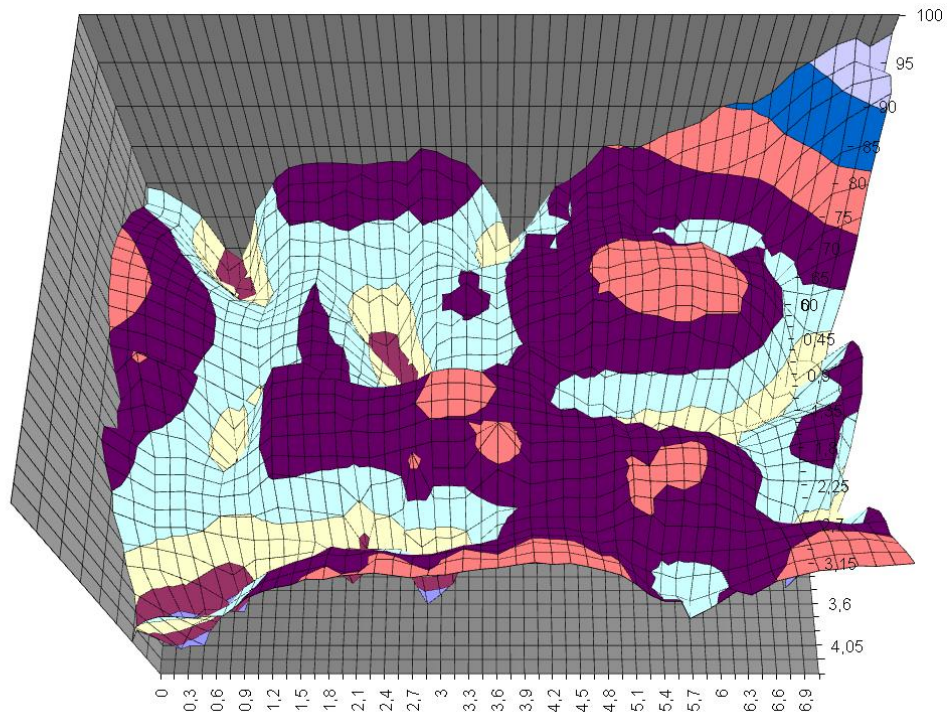


Σχήμα 11. Διάγραμμα των 74 Hz



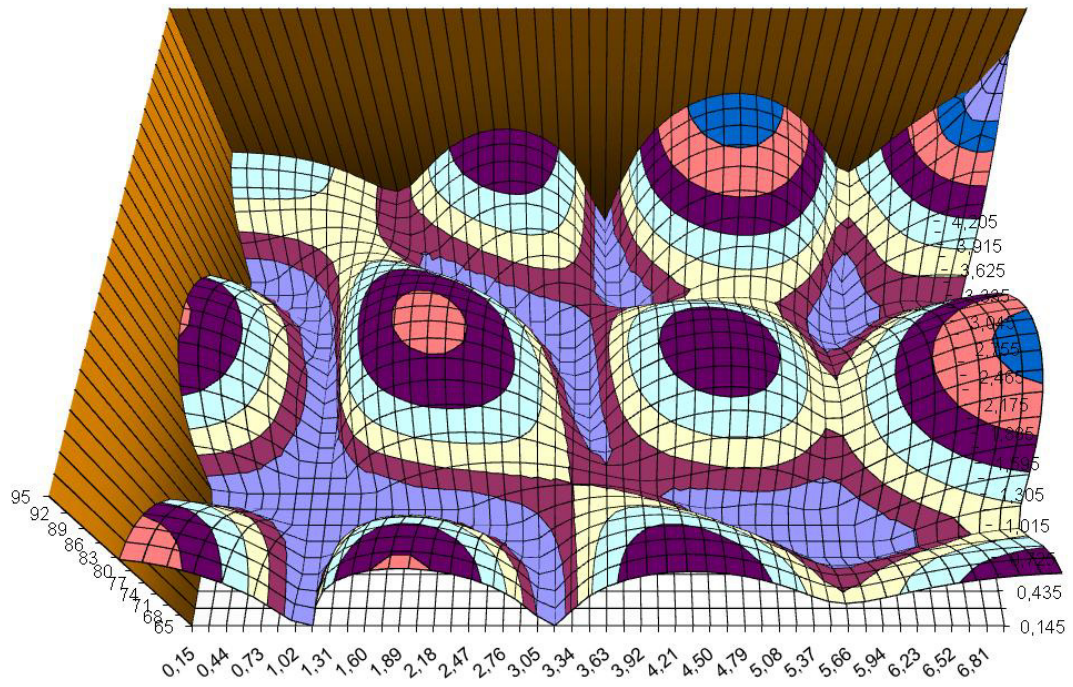
Σχήμα 12. Μοντελοποίηση control room στα 74 Hz.

Στα σχήματα 13 και 14 παρουσιάζεται η σύγκριση στα 110 Hz. Διακρίνεται ο 2^{ος} κατά πλάτος τρόπος ταλάντωσης στο δεξιό μέρος των σχημάτων καθώς επίσης και ο δεσμός στο πάνω (του σχήματος) μέσο του μήκους του χώρου.



Σχήμα 13. Διάγραμμα των 110 Hz.

Room modes



Σχήμα 14. Μοντελοποίηση control room στα 110 Hz.

Κεφάλαιο 7. Προτάσεις βελτίωσης

7.1 Εικονική βελτίωση του Control room 1

Από την σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, προέκυψε ικανοποιητική συμφωνία έτσι μπορούμε να πειραματιστούμε, τροποποιώντας το εικονικό μας μοντέλο προσθέτοντας και αφαιρώντας υλικά με διαφορετικούς συντελεστές απορρόφησης ανά συχνότητα, με σκοπό την ακουστική του βελτίωση. Υπενθυμίζουμε ωστόσο, όπως διευκρινιστικέ σε προηγούμενο κεφάλαιο όπου παρουσιάσθηκε, το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε, δε είναι σε θέση να λάβει υπόψη του, τα φαινόμενα διάχυσης, οπότε τα αποτελέσματα που θα παρουσιασθούν στη συνεχεία είναι αξιόπιστα στη συχνοτική περιοχή των στάσιμων κυμάτων καθώς και τον έλεγχο του χρόνου αντήχησης (περιοχή εφαρμογής της γεωμετρικής ακουστικής) του δωματίου. Παρακάτω θα δούμε από το ακουστικό ομοίωμα του χώρου όπου απεικονίζονται τα νέα υλικά. Τα υλικά που χρησιμοποιηθήκαν, επιλέχθηκαν με βάση το συντελεστή απορρόφησης που έχουν, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και με τα στοιχεία που μας δίνει το Cara.



Σχήμα 1 Ακουστική βελτίωση του μπροστινού μέρους και του ταβανιού του Control Room 1

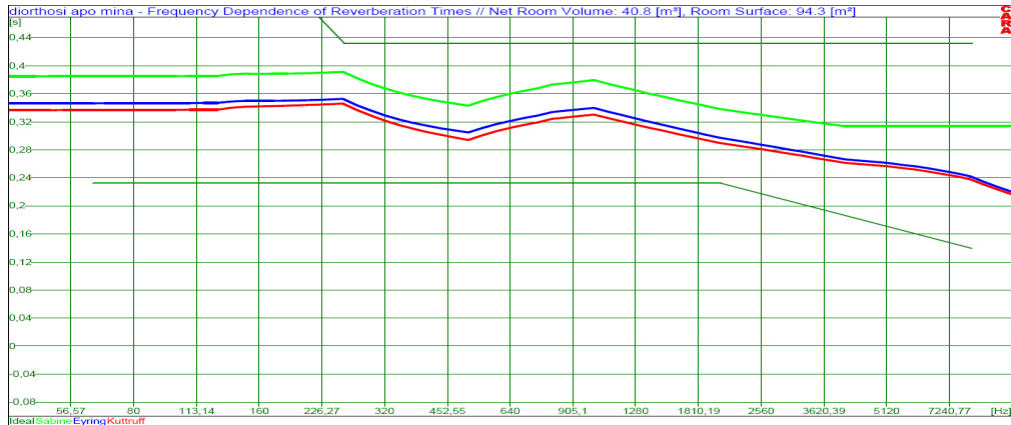
Στο ταβάνι έχουμε τοποθετήσει νοβοπάν πάχους 8mm, σε απόσταση από το ταβάνι 20mm. Αυτή η απορροφητική διάταξη λειτουργεί ως panel absorber και από τη βιβλιογραφία, έχει μεγάλη απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες. Το ίδιο υλικό τοποθετήσαμε και στις γωνίες του μπροστά τοίχου, όπως φαίνεται από τη φωτογραφία. Επειδή θέλαμε να ελέγξουμε το χρόνο αντήχησης των υψηλών συχνοτήτων, τοποθετήσαμε μοκέτα στο πάτωμα και αφαιρέσαμε.. Στο τοίχο που περιέχει τη πόρτα τοποθετήσαμε ξύλο τύπου ραμποτέ πάχους 20mm και σε απόσταση 50mm από αυτόν. Με αυτή τη διάταξη έχουμε απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων καθώς και χαμηλομεσαίων. Ο μπροστά τοίχος είναι καλυμμένος με ελαφριά κουρτίνα για έλεγχο των μεσοϋψηλών συχνοτήτων.



Σχήμα 2 Ακουστική βελτίωση του πίσω μέρους του Control Room 1

Εδώ βλέπουμε το πίσω μέρος του δωματίου, η πόρτα έχει καλυφθεί με ελαφριά κουρτίνα για τον έλεγχο των υψηλών συχνοτήτων, ενώ ο τοίχος που περιέχει την πόρτα με ξύλο τύπου ραμποτέ πάχους 20mm και σε απόσταση 50mm από αυτόν, για έλεγχο των χαμηλών συχνοτήτων καθώς και χαμηλομεσαίων. Στον πίσω τοίχο τοποθετήσαμε ελαφριά κουρτίνα με για έλεγχο των μεσούψηλων συχνοτήτων.

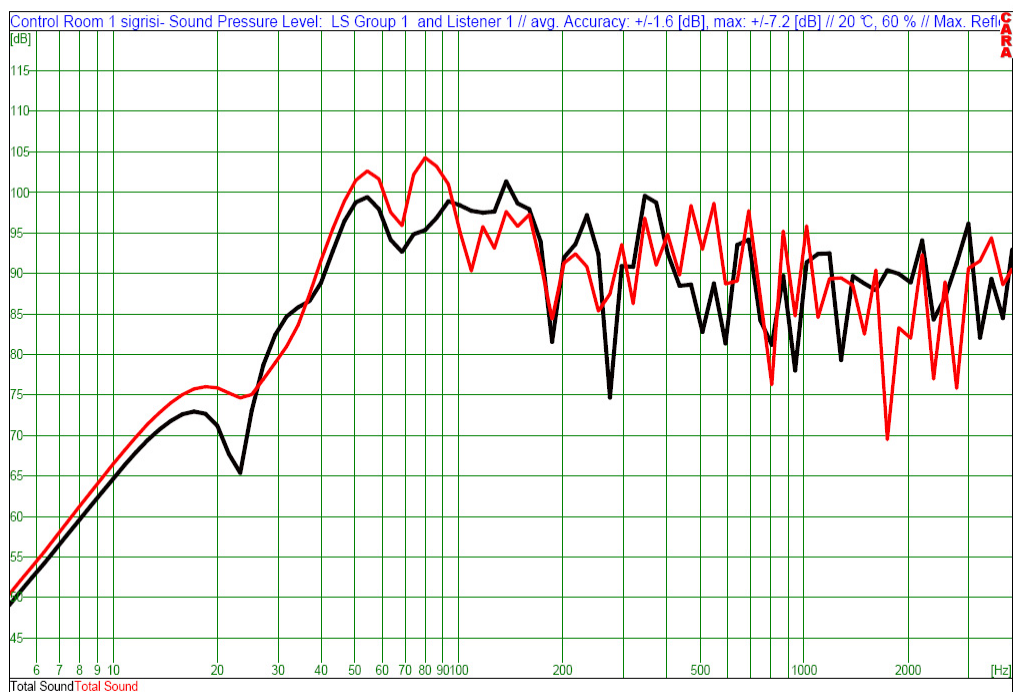
Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα του χρόνου αντήχησης που προκύπτει με αυτά τα υλικά καθώς και τη σύγκριση, της προηγούμενης εικονικής μέτρησης σε σχέση με την νέα που προκύπτει από τα νέα υλικά.



Σχήμα 3 Χρόνος αντήχησης ανά συχνότητα μετά από τη ακουστική παρέμβαση

Η πράσινη γραμμή περιγράφει την απορρόφηση κατά Sabine, η μπλε κατά Eyring και η κόκκινη κατά Kuttruff. Όπως βλέπουμε ο χρόνος αντήχησης είναι μέσα στα όρια, ενώ προκύπτει λίγο πιο ζωντανός στις υψηλές συχνότητες.

Σύγκριση φάσματος



Σχήμα 4 Σύγκριση της συχνωτικής απόκρισης του Control Room 1 πριν την ακουστική βελτίωση και μετά την ακουστική βελτίωση

Η κόκκινη καμπύλη περιγράφει το φάσμα του αρχικού Control Room ενώ με μαύρο, περιγράφεται το φάσμα μετά την επεξεργασία. Όπως βλέπουμε η περιοχή των στάσιμων κυμάτων, έχει εξομαλυνθεί αρκετά. Ωστόσο η περιοχή διάχυσης έχει διαστρεβλωθεί. Για τη περιοχή διάχυσης θα χρησιμοποιήσουμε διαχυτές, στον μπροστά τοίχο πίσω από τα ηχεία έτσι όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο παρουσίασης του ESS Control Room, για να μετατρέψουμε το Control Room 1 σε ESS control room. Μια άλλη περίπτωση τοποθέτησης των διαχυτών, είναι να εντοπίσουμε τη μέγιστη απόκριση των συχνοτήτων της περιοχής διάχυσης, στο χώρο και να τους τοποθετήσουμε ακριβώς σε εκείνα τα σημεία. Ωστόσο το Cara δε περιλαμβάνει διαχυτές για να δούμε τα αποτελέσματα σε εικονικές μετρήσεις.

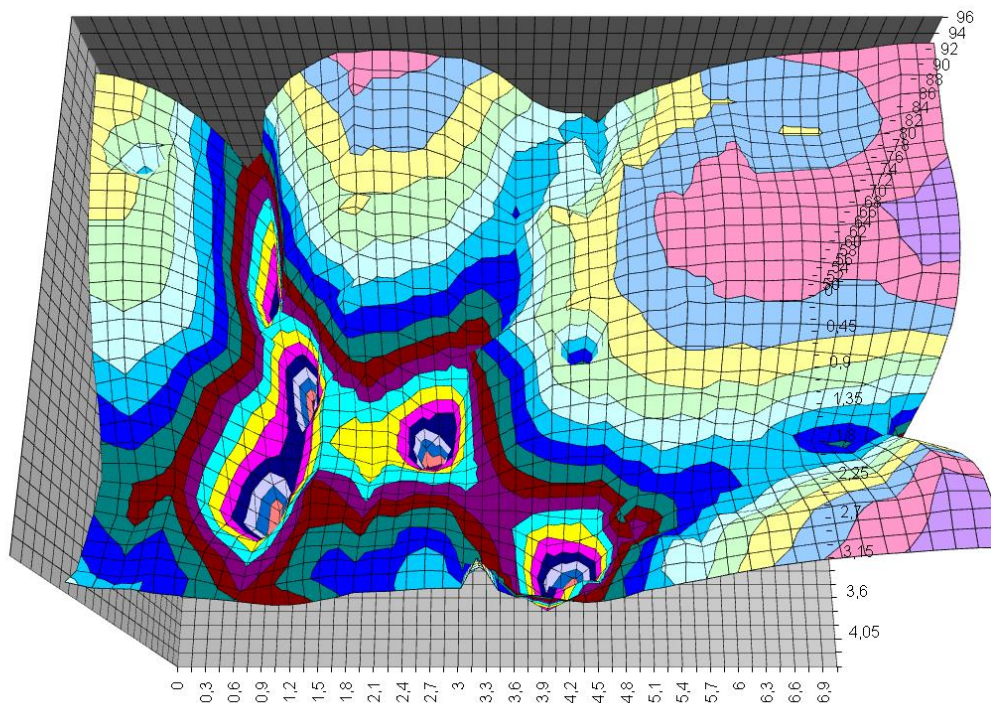
7.2 Βελτίωση του Control room 3

Στο control room έχει γίνει χαρτογράφηση της κατανομής της στάθμης ηχητικής πίεσης για τα 70, 74 και 110 Hz, όπου μαρτυρίες ηχοληπτών και κατόπιν σχετικές μετρήσεις κατέδειξαν πως υπάρχει πρόβλημα, αυξημένης στάθμης στις δύο πρώτες και μειωμένης στάθμης στην τελευταία.

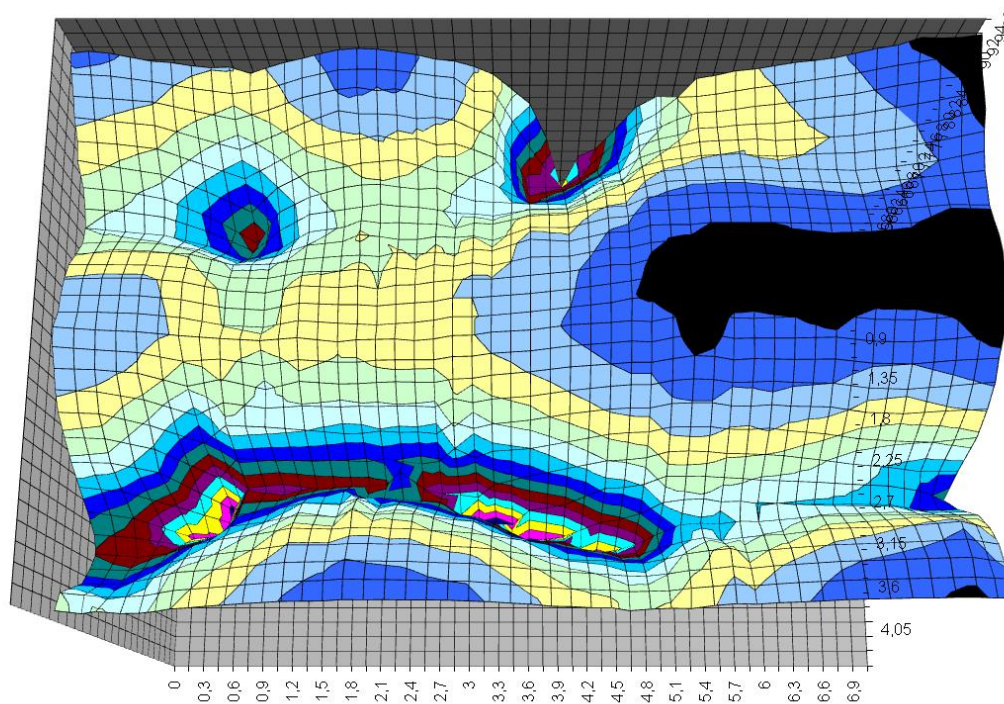
Σε περιπτώσεις όπου το control room είναι ήδη χτισμένο, δεν μπορούν να επιλεγούν διαστάσεις για ομοιόμορφη κατανομή των συντονισμών. Αυτό που μπορεί να γίνει είναι: η μετακίνηση της θέσης του σημείου ακρόασης ή των ηχείων και η τοπική χρήση απορρόφησης σε θέσεις έξαρσης του συντονισμού για την εξομάλυνση του φάσματος.

Στην περίπτωση των 70 Hz, όπου παρουσιάζεται διακύμανση στη στάθμη που εκλαμβάνει το αριστερό αυτί σε σχέση με το δεξί, συστήνεται η χρήση, συντονισμένου στα 70 Hz, απορροφητή και τοποθέτηση του στη γωνία που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη στάθμη (πάνω δεξιά του σχήματος 1). Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εξάρσεων στάθμης πίεσης και ομοιογένεια στη κατανομή της στο πεδίο ακρόασης. Ο ίδιος τρόπος αντιμετώπισης μπορεί να

χρησιμοποιηθεί και στη περίπτωση των 74 Hz. Η στοχευμένη απορρόφηση στα 74 Hz με τοποθέτηση στο μέσο του πλάτους (δεξιά πλευρά του σχήματος 2).

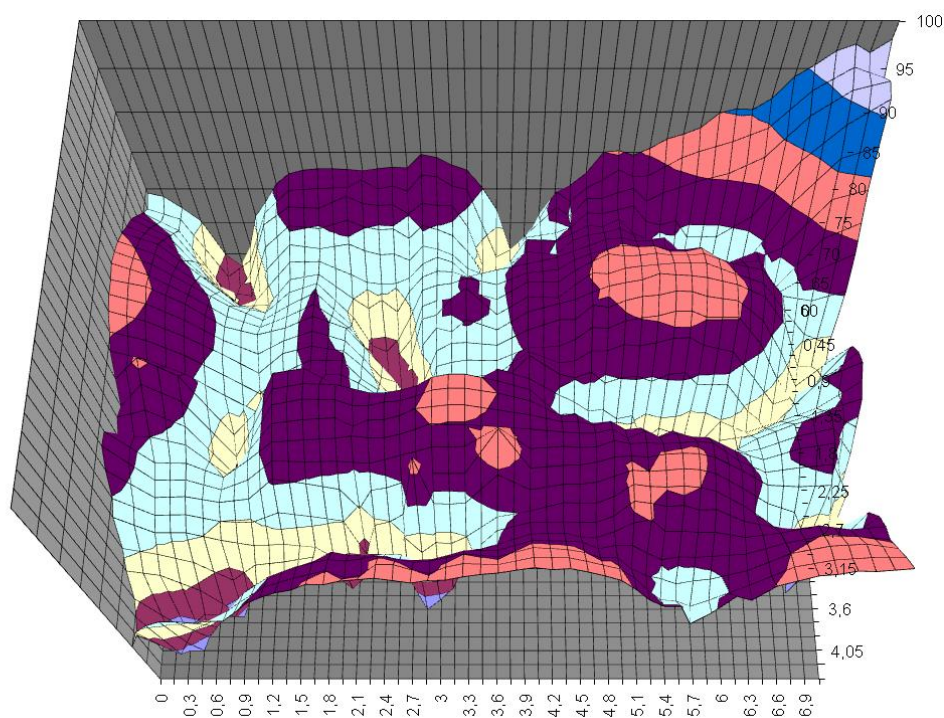


Σχήμα 1. Διάγραμμα χαρτογράφησης του Control Room 3 στα 70 Hz.



Σχήμα 2. Διάγραμμα χαρτογράφησης του Control Room 3 στα 74 Hz.

Η περίπτωση των 110 Hz είναι περισσότερο πολύπλοκη λόγω της σύνθετης ανομοιομορφίας στο σύνολο του χώρου που οφείλεται στο γεγονός πως οι συντονισμοί σε υψηλότερες συχνότητες αφορούν μεγαλύτερης τάξης συντονισμούς που προσδίδουν στο πεδίο μεγαλύτερες αυξομειώσεις της ηχητικής στάθμης πίεσης. Η παρούσα θέση ακρόασης βρίσκεται στα $\approx 2,5$ m. Μια μετακίνηση 0,5 m θα τοποθετούσε τον ακροατή σε μια περισσότερο ομοιόμορφη περιοχή ακρόασης ενώ παράλληλα δεν τοποθετείται στο μέσο του Control Room, όπου είναι πολύ πιθανή η σύμπτωση με δεσμούς πίεσης πολλών τρόπων ταλάντωσης. Επίσης αυτή η μετακίνηση δεν επηρεάζει τον τρόπο αντιμετώπισης των δύο παραπάνω συχνοτήτων.



Σχήμα 3. Διάγραμμα χαρτογράφησης του Control Room 3 στα 110 Hz.

Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα

8.1 Συμπεράσματα - Ανακεφαλαίωση

Από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας και την πραγματοποίηση των μετρήσεων σε πραγματικούς χώρους διαπιστώθηκε ότι η ύπαρξη συνθηκών **υψηλής ακουστικής ποιότητας** σε ένα χώρο ελέγχου δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να θεωρείται δεδομένη παρά την αδιαμφισβήτητη σπουδαιότητα της. Ενίοτε αυτό οφείλεται σε άγνοια των αρχών του ορθού ακουστικού σχεδιασμού ή και σύγχυση ως προς τις συνέπειες συγκεκριμένων κατασκευαστικών λύσεων ενώ σε άλλες περιπτώσεις, οφείλεται σε παράγοντες πέραν από τον έλεγχο του μελετητή (διαστάσεις χώρων, τοίχοι, δοκοί κλπ) ή απαγορευτικούς λόγω υψηλού κόστους υλοποίησης. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητη καταρχήν η θέσπιση καθορισμένων προδιαγραφών και στόχων της ακουστικής μελέτης και στη συνέχεια η χρήση αξιόπιστων εργαλείων μοντελοποίησης προ της έναρξης της κατασκευής έτσι ώστε να εντοπισθούν και να προβλεφθούν οι πιθανές αδυναμίες και να ληφθούν εξ' αρχής τα αντίστοιχα μέτρα.

Γενικό συμπέρασμα ήταν πως είναι επιθυμητό και σωστή πρακτική, οι χρόνοι αντήχησης να ελέγχονται με απορρόφηση τόσο όσο να επαρκούν για χαρακτηριστεί ένα **Control room** «ζωντανό». Η απορρόφηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στοχευμένα στην αντιμετώπιση ακουστικών προβλημάτων όπως η διαχείριση ιδιοσυχνοτήτων και ανακλάσεων. Επίσης η διάχυση είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη ηχητικού πεδίου ελεύθερο από ακουστικές διαταραχές.

Διαπιστώθηκε επίσης ότι τα **πρότυπα** για την πολυκάναλη αναπαραγωγή χρήζουν επαναπροσδιορισμού καθώς νέες έρευνες στον τομέα της ψυχοακουστικής απέδειξαν ότι δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών που έχουν κληθεί να ικανοποιήσουν.

Το πρόγραμμα υπολογισμού και απεικόνισης τρόπων ταλάντωσης χαμηλών συχνοτήτων κλειστών χώρων που αναπτύξαμε αξιολογήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που λάβαμε με πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικούς χώρους. Διαπιστώθηκε ότι είναι ένα αρκετά αξιόπιστο εργαλείο για τον υπολογισμό και την απεικόνιση των τρόπων ταλάντωσης και τον προσδιορισμό της συχνοτικής απόκρισης ενός χώρου στις χαμηλές συχνότητες.. Ο χρήστης του προγράμματος είναι σε θέση, γνωρίζοντας μόνο τις διαστάσεις και τις συντεταγμένες ηχείου και ακροατή, να εξάγει γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα για τις συγκεκριμένες θέσεις αλλά και να κάνει διορθωτικές κινήσεις αλλάζοντας την χωροθέτηση του συστήματος. Αντίθετα ο πειραματικός προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης και η χαρτογράφηση του δωματίου (επιχειρήθηκε επίσης στα πλαίσια της εργασίας) είναι διαδικασία επίπονη και πολύ χρονοβόρα

Το εμπορικό λογισμικό μοντελοποίησης **C.A.R.A (Computer Aided Room Acoustics)** που επίσης αξιολογήθηκε, απεδείχθη επίσης αρκετά αξιόπιστο και δύναται να χρησιμοποιηθεί κατά την ακουστική βελτιστοποίηση υπαρχόντων χώρων καθότι η μέθοδος υπολογισμού, που χρησιμοποιεί (παρακολούθηση ακτινών - ray tracing), του δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης χώρων σύνθετης γεωμετρίας με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο. Διαθέτει λεπτομερέστατα γραφικά, τα οποία βοηθούν στη καλύτερη κατανόηση των κυματικών φαινομένων σε δωμάτια οποιουδήποτε σχήματος και παραμέτρων, κάτι που είναι εξαιρετικά διδακτικό, ιδιαίτερα κατά τη διαδικασία του πειραματισμού. Τα μειονεκτήματά του, βρίσκονται στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων, όπου διαπιστώθηκαν κάποιες (ευτυχώς μικρές) αποκλίσεις από τις πραγματικές μετρήσεις, όπως φαίνεται στο κεφάλαιο αξιολόγησης υπολογιστικών μοντέλων. Ένα περαιτέρω μειονέκτημα είναι ότι δεν είναι δυνατός ο υπολογισμών διαχυτικών μονάδων και κατά συνέπεια η αξιοποίηση του σε μελέτες ακουστικής βελτίωσης περιορίζεται στις τεχνικές ανάκλασης και απορρόφησης.

Έχοντας τεκμηριώσει το βαθμό αξιοπιστίας των υπολογιστικών μοντέλων και προς εφαρμογή και έλεγχο των βασικών αρχών ορθού ακουστικού σχεδιασμού προχωρήσαμε σε μοντελοποίηση των χώρων στους οποίους πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των υπολογισμών με τις μετρήσεις, προτάθηκαν ακουστικές επεμβάσεις βελτίωσης (οι οποίες ελέγχθηκαν στο ακουστικό ομοίωμα του κάθε χώρου). Μεταξύ άλλων επιβεβαιώθηκαν πειραματικά και θεωρητικά οι ακουστικές διαταραχές στις συχνότητες 70, 74, 110 Hz του Control Room 3 του τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής και προτάθηκαν προτάσεις βελτίωσης με στοχευμένη απορρόφηση και επαναπροσδιορισμό των θέσεων ηχείου – ηχολήπτη.

Οι μετρήσεις της συχνοτικής απόκρισης ηχείου χαμηλών συχνοτήτων κοντά σε ανακλαστική επιφάνεια επιβεβαίωσαν την θεωρία για τη δημιουργία **φίλτρου κτένας** από ανάκλαση και προτάθηκαν τρόποι αντιμετώπισης ή περιορισμού του προβλήματος.

Τέλος επιβεβαιώθηκε πειραματικά (με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην νέα αίθουσα Πολυμεσικών Εφαρμογών του τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής) η θεωρία που αφορά στην **τοποθέτηση ηχείων χαμηλών συχνοτήτων** που μελετήθηκε στη βιβλιογραφία. Τα πειραματικά δεδομένα καθώς και η εφαρμογή των υπολογιστικών μοντέλων κατέδειξαν πως από τις 15 διαφορετικές μετρήσεις η βέλτιστη θέση των ηχείων είναι η παρούσα.

8.2 Προτάσεις για μελλοντική συνέχιση της εργασίας

Ως συνέχεια της παρούσας εργασίας παρατίθενται οι παρακάτω προτάσεις.

- Συνέχιση του προγράμματος υπολογισμού και απεικόνισης, χαμηλής συχνότητας τρόπους ταλάντωσης δωματίου, παρέχοντας επιπλέον στο χρήστη προσθήκη 2^{ης} πηγής, με δυνατότητα διαφοροποίησης της φάσης.
- Επέκταση της μεθόδου υπολογισμού ray tracing ώστε να δύναται να λάβει υπόψη και το συντελεστή διάχυσης των υλικών.
- Η δημιουργία ολοκληρωμένου προγράμματος μοντελοποίησης, με την ενοποίηση των υπολογιστικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια διπλωματικών εργασιών του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Α.Τ.Ε.Ι Κρήτης Παρ/τημα Ρεθύμνου, για σκοπούς έρευνας και διδασκαλίας. Μελέτη της ακουστικής σε συνδυασμό με την ηχομόνωση, την πυραντοχή – πυραντίσταση, την αισθητική (design) και τις συνθήκες σωστής υγιεινής ενός Control Room.
- Πραγματοποίηση εκτεταμένων ακουστικών μετρήσεων σε Control Room ESS και LEDE, και αξιολόγησή τους από ανεξάρτητη ομάδα ερευνητών (καθότι διαπιστώθηκε ότι όλα τα σχετικά άρθρα που εντοπίστηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία εκπορεύονται από μια συγκεκριμένη ομάδα ερευνητών κάποιοι εκ των οποίων είναι παράλληλα και εμπορικοί αντιπρόσωποι προϊόντων ακουστικής βελτίωσης)

Παράρτημα 1

Μέθοδοι μέτρησης ηχοαπορρόφησης ενός υλικού

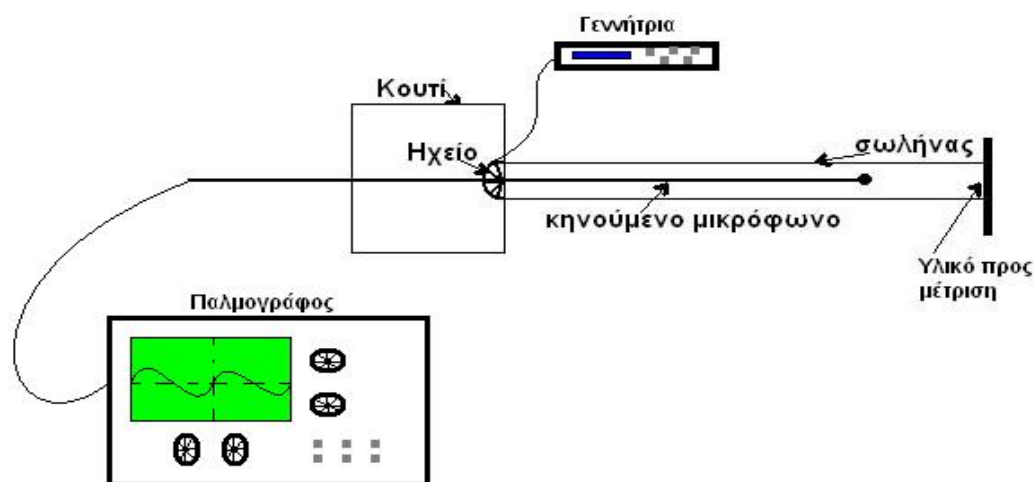
Οι σύνηθες τρόποι μέτρησης της ηχοαπορρόφησης ενός υλικού είναι δύο, ο πρώτος ονομάζεται *Μέτρηση Του Κάθετου Συντελεστή Ηχοαπορρόφησης Υλικών με τη μέθοδο του Σωλήνα Στάσιμων Ηχητικών Κυμάτων* και ο δεύτερος *Μέτρηση Του Συντελεστή Ηχοαπορρόφησης Ακουστικών και της Ισοδύναμης Επιφάνειας Αντικειμένων σε Αίθουσα*.

Τα πλεονεκτήματα του πρώτου τρόπου, είναι ότι τα δοκίμια προς εξέταση που απαιτούνται (δηλαδή τα δείγματα της απορροφητικής διάταξης), είναι μικρών διαστάσεων (μερικών cm), έτσι σε περίπτωση λάθος υπολογισμού να μην υπάρχει οικονομικό ρίσκο. Επίσης η διάταξη που απαιτείται για ένα τέτοιο πείραμα, είναι αρκετά φτηνή και με τη βοήθεια της σημερινής τεχνολογίας γίνεται ακόμη πιο φτηνή. Ωστόσο το μειονέκτημα αυτού του τρόπου μέτρησης , είναι ότι έτσι μπορούμε να μετρήσουμε μόνο το κάθετο συντελεστή ηχοαπορρόφησης του υλικού και όχι τυχαίας πρόσπτωσης του ήχου.

Τα πλεονεκτήματα του δεύτερου τρόπου, είναι ότι τα αποτελέσματα που παίρνουμε από μία τέτοια διάταξη, είναι περισσότερο έγκυρα, μιας και παίρνουμε αποτελέσματα, για τυχαία πρόσπτωση του ήχου, που είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Ωστόσο τα μειονεκτήματα αυτού του τρόπου είναι ότι, μία τέτοια κατασκευή που μπορεί να στηρίξει αυτό τον τρόπο μελέτης κοστίζει υπέρογκα ποσά (σε όλο τον κόσμο πάρουν μόνο τρεις τέτοιες αίθουσες), επίσης τα δοκίμια θα πρέπει τουλάχιστο (ανάλογα με το εμβαδό του χώρου), να είναι μεταξύ 10m² και 12m², κάτι που κοστίζει σε περίπτωση λάθους.

Παρακάτω παρουσιάζονται και οι δύο τρόποι αναλυτικά.

Μέτρηση του Κάθετου συντελεστή Ηχοαπορρόφησης Υλικών με τη μέθοδο του Σωλήνα Στάσιμων Ηχητικών Κυμάτων.



Όπως αναφέρει και ο τίτλος, το βασικό στοιχείο αυτής της τεχνικής, είναι μία σωλήνα, στις οποίας το ένα άκρο προσαρμόζεται το δοκίμιο του ακουστικού υλικού, ενώ στο άλλο άκρο υπάρχει η πηγή του ήχου η οποία εκπέμπει απλούς τόνους (γεννήτρια συχνοτήτων). Δημιουργείται επίπεδο ηχητικό κύμα το οποίο διαδιδόμενο μέσα στον σωλήνα ανακλάται πάνω στο δοκίμιο και συμβάλει με το προσπίπτον. Σχηματίζεται έτσι μέσα στο σωλήνα ένα στάσιμο κύμα, το οποίο μπορεί να ανιχνευθεί με ένα απλό μικρόφωνο. Ο κάθετος συντελεστής ηχοαπορρόφησης και η σχετική ειδική ακουστική σύνθετη αντίσταση, είναι συναρτήσεις της συχνότητας, όπως θα δούμε παρακάτω.

Ο σωλήνας των μετρήσεων είναι συνήθως κυλινδρικός και η διάμετρός του καθορίζει την ανώτατη και την κατώτατη συχνότητα για την οποία, μπορούν να γίνουν οι μετρήσεις.

Για την ανώτατη συχνότητα θα πρέπει να ισχύει $d \leq 0.586\lambda$, όπου προκύπτει :

$$f_{\max} = 586 \frac{c}{d}$$

Όπου f_{\max} είναι η ανώτατη οριακή συχνότητα σε Hz,

c είναι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα,

d είναι η διάμετρος του σωλήνα

λ είναι το μήκος κύματος της υπό εξέταση συχνότητα.

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης συχνότητας θα πρέπει να ισχύει :

$$f > \frac{0.75c}{L - d} \quad (15.2)$$

Όπου L το μήκος του σωλήνα.

Αυτός ο τύπος μας εξασφαλίζει ότι μέσα στο σωλήνα θα υπάρχουν

τουλάχιστο δύο ελάχιστα της πίεσης, έτσι ώστε να μπορούν να γίνουν οι μετρήσεις.

τρόπος ταλάντωσης του σωλήνα με δύο ελάχιστα



Κατά τη διαδικασία της μέτρησης εκείνο που μετράται συνήθως είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης, αλλά μπορεί να μετράται επίσης και η τάση από το μικρόφωνο. Διότι για τις μετρήσεις έχει μόνο σημασία ο λόγος ελαχίστων και μεγίστων, όπως θα δούμε παρακάτω. Ο λόγος στάσιμου ηχητικού κύματος, $SWR(x)$ (Standing wave ratio) είναι μία συνάρτηση του x (μετατόπιση) και είναι ένας θετικός διαστατός αριθμός, μεγαλύτερος ή ίσος με τη μονάδα.

$$SWR(x) = \frac{V_{\max}(x)}{V_{\min}(x)} \quad (15.3)$$

Όπου V_{\max} και V_{\min} η τιμή του μέγιστου και ελάχιστου αντίστοιχα, σε Volt (οποιασδήποτε μορφής π.χ. RMS ή peak - peak) που λαμβάνει το μικρόφωνο σε συγκεκριμένες θέσεις (x) του σωλήνα.

Ο λόγος της ανακλώμενης προς τη προσπίπτουσα πίεση, στην επιφάνεια το δοκιμίου, ονομάζεται συντελεστής ανάκλασης ηχητικής πίεσης και συμβολίζεται με το γράμμα Γ . Ο λόγος αυτός είναι μιγαδικός αριθμός ο οποίος έχει μέτρο :

$$|\Gamma| = \frac{S_{wr} - 1}{S_{wr} + 1} \text{ και φάση } \theta = 720 \frac{x_1}{\lambda} - 180 \quad (15.4)$$

Όπου x_1 είναι η απόσταση του πρώτου ελάχιστου της πίεσης από το πρόσωπο του δοκιμίου.

Ο κάθετος συντελεστής ηχοαπορρόφησης α_n , είναι ένας πραγματικός αριθμός και δίδεται από τη σχέση :

$$\alpha_n = 1 - |\Gamma|^2 \quad (15.5)$$

Μέτρηση Του Συντελεστή Ηχοαπορρόφησης Ακουστικών Υλικών και της Ισοδύναμης Επιφάνειας Αντικειμένων σε Αίθουσα

Για την μέτρηση Του Συντελεστή Ηχοαπορρόφησης Ακουστικών Υλικών και της Ισοδύναμης Επιφάνειας Αντικειμένων σε Αίθουσα, απαιτείται ένας κλειστός χώρος με διάχυτο ηχητικό πεδίο. Δηλαδή η ηχητική ένταση πρέπει να είναι ανεξάρτητη της θέσης μέσα στο δωμάτιο και η γωνία πρόσπτωσης ενός κύματος πάνω σε μία επιφάνεια του δωματίου πρέπει να είναι τυχαία. Ουσιαστικά η προδιαγραφές για μία τέτοια μέτρηση απαιτούν μία αίθουσα με όγκο τουλάχιστο 200m³. Επίσης εάν L_{max} είναι το μήκος του μεγαλύτερου ευθύγραμμου τμήματος που χωράει μέσα στα όρια της αίθουσας και V είναι ο όγκος της, τότε το σχήμα της αίθουσας, πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να ικανοποιεί τη συνθήκη :

$$L_{max} < 1.9V^{1/3}$$

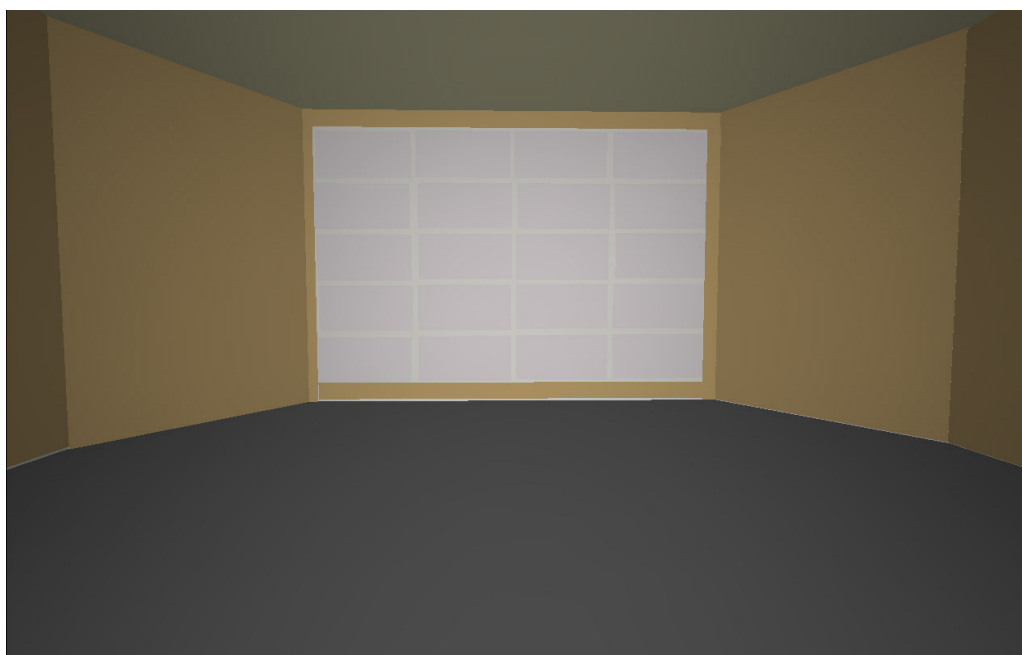
Επίσης θα πρέπει οι διαστάσεις της αίθουσας αν ληφθούν ανά δύο, να μην έχουν λόγους ίσους με τους λόγους μικρών ακεραίων αριθμών. Αυτό απαιτείται για να

κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο των συχνοτήτων οι ιδιοσυχνότητες του δωματίου.

Όσον αφορά το δοκίμιο, αν είναι επίπεδο, θα πρέπει να έχει εμβαδό μεταξύ 10m² και 12m³ . Αν ο όγκος V της αίθουσας είναι μεγαλύτερος από 250m³ τότε το εμβαδόν του δοκιμίου θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται με τον παράγοντα :

$$\left(\frac{V}{250} \right)^{2 / 3} \quad (15.6)$$

Επίσης πρέπει να είναι ορθογώνιο με λόγος πλάτους προς μήκος μεταξύ 0.7 και 1 . Η τοποθέτησή του πρέπει να είναι τέτοια ώστε κανένα μέρος του να μην είναι πλησιέστερα από m από οποιαδήποτε ακμή της περατωτικής επιφάνειας της αίθουσας. Το δοκίμιο πρέπει επίσης να εγκαθίσταται σύμφωνα με τις σχετικές προδιαγραφές που παρέχει ο κατασκευαστής. Αν το δοκίμιο είναι τέτοιο ώστε να πρέπει να στηρίζεται άμεσα σε μία από τις επιφάνειες, οι πλευρές του θα πρέπει να είναι σφικτά κλεισμένες σε ένα ηχοανακλαστικό πλαίσιο ειδικά κατασκευασμένο, το οποίο δε θα πρέπει να προεξέχει πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και το πάχος δε θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 2cm.



Σχήμα 15.1

Στη συνέχεια, με τα δοκίμια τοποθετημένα στον τοίχο, μετρήσαμε τον θόρυβο βάθους, στη συνέχεια ηχοβολίσαμε το δωμάτιο με ροζ θόρυβο και παίρνουμε μετρήσεις διάφορα σημεία στην αίθουσα. Έπειτα βγάζουμε τα δοκίμια επαναλαμβάνοντας ακριβώς την ίδια διαδικασία..

- Η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης A_1 σε m^2 της αίθουσας αντήχησης όταν είναι κενή, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A_1 = \frac{55.3V}{cT_1} \quad (15.7)$$

Όπου V είναι ο όγκος σε m^3 της αίθουσας, c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε m/sec , T_1 ο χρόνος αντήχησης σε sec όταν η αίθουσα είναι κενή.

- Η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης A_2 σε m^2 της αίθουσας αντήχησης όταν είναι κενή, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A_2 = \frac{55.3V}{cT_2} \quad (15.8)$$

Όπου T_2 ο χρόνος αντήχησης όταν έχει τοποθετηθεί το δοκίμιο.

- Η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης A του δοκιμίου σε m^2 υπολογίζεται από τον τύπο :

$$A = A_2 - A_1 = 55.3 \frac{V}{c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (15.9)$$

- Τώρα από την ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης A θα υπολογίσουμε τον συντελεστή ηχοαπορρόφησης a_s για κάθε συχνότητα, ο οποίος είναι ένας αδιάστατος αριθμός και δίνεται από τον τύπο :

$$a_s = \frac{A}{S} \quad (15.10)$$

Όπου S το εμβαδόν του δοκιμίου σε m^2

Παράρτημα 2

Ηχεία αναφοράς (Reference Monitor Loudspeaker)

1. Όροι και ορισμοί

Ηχείο αναφοράς: Είναι μια συσκευή αναπαραγωγής ήχου υψηλής ποιότητας που χρησιμοποιείται για τεχνικό ή καλλιτεχνικό έλεγχο ποιότητας και αντικειμενική αξιολόγηση του ήχου. Αποτελείται από ηλεκτροακουστικούς μετατροπείς, καμπίνα και/ή κυματοδηγό, ενεργά φίλτρα, φίλτρα διασταύρωσης (crossover), και ενισχυτές. Μπορεί να αποτελεί μέρος συστήματος που διαθέτει ξεχωριστά ηχεία χαμηλών συχνοτήτων. Οι τεχνικές προϋποθέσεις για το χαρακτηρισμό ενός ηχείου ως αναφοράς παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

Ακουστικό κέντρο: Ένα σημείο αναφοράς που προσδιορίζει το κέντρο ενός ηχείου. Αυτό πρέπει να υποδεικνύεται από τον κατασκευαστή.

Κύριος άξονας: Ο κύριος άξονας του ηχείου όπως αυτός υποδεικνύεται από τον κατασκευαστή.

Απόσταση μέτρησης: Η απόσταση μέτρησης μεταξύ από το ακουστικό κέντρο ενός ηχείου μέχρι το σημείο μέτρησης.

Κατευθυντική γωνία: Η γωνία μεταξύ του κυρίως άξονα και της ευθείας που συνδέει το ακουστικό κέντρο με το σημείο μέτρησης.

2. Τεχνικά στοιχεία – προϋποθέσεις

Ηχεία που πληρούν τις προϋποθέσεις των διεθνή προτύπων (πίνακας 4.) δεν σημαίνει πως απαραίτητα είναι κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν ως τέτοια. Απαιτείται μια υποκειμενική αξιολόγηση ακρόασης για να επιλεγεί ένα τέτοιο ηχείο.

Οι μετρήσεις για τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηχείου γίνονται υπό συνθήκες ανοικτού πεδίου. Στην απόσταση μέτρησης λαμβάνονται υπόψη το μέγεθος του ηχείου καθώς και οι ακουστικές συνθήκες του χώρου μέτρησης. Τα 2 μέτρα είναι μια ικανοποιητική απόσταση όπου θα μπορεί να μετρηθεί το απευθείας πεδίο του ηχείου.

Στις παρακάτω προδιαγραφές όλες οι τιμές πίεσης και τάσης δίδονται σε RMS. Σε απόλυτη τιμή στάθμης ηχητικής πίεσης αυτή δίδεται για απόσταση αναφοράς 1 m.

Κατά την μέτρηση των ηλεκτρικών στοιχείων το αποδεκτό σφάλμα κυμαίνεται στα ± 0.2 dB. Για ακουστικές μετρήσεις το σφάλμα μέτρησης δεν πρέπει να ξεπερνά τα ± 1 dB σε όλο το ακουστικό φάσμα.

Πίνακας 4. Τεχνικά στοιχεία – προϋποθέσεις ηχείου αναφοράς

Παράμετροι	Μονάδες / Συνθήκες	Τιμή
Πλάτος / Συχνοτική απόκριση	40 – 16 kHz	
	0°	Όρια ±2 dB
	10°	Απόκλιση από 0°, 3 dB
	30° (οριζόντια)	Απόκλιση από 0°, 4 dB
Διαφορά μεταξύ εμπρός ηχείων	Στο εύρος 250 – 2 kHz	0.5 dB
Δείκτης κατευθυντικότητας	D / 250 – 16 kHz	4 ≤ D ≤ 12 dB
Αρμονική παραμόρφωση	40 Hz – 250 Hz	-30 dB (3%)
	250 Hz – 16 kHz	-40 dB (1%)
Χρόνος απόσβεσης	t_s / s	≤ 2.5/f
Χρονική καθυστέρηση		
Διαφορά μεταξύ των εμπρός ηχείων	δt	≤ 10 μs
Δυναμικό εύρος	$L_{eff-max}$	≥ 108 dB
Αυτοπαραγόμενος θόρυβος	L_{noise}	≤ 10 dB(A)

2.1 Συχνοτική απόκριση

Η μέτρηση της γίνεται με 1/3 οκτάβας ανάλυση με σήμα ροζ θόρυβο και αφορά τον κύριο άξονα. Η αναφορά για τις ±30° αφορά το οριζόντιο επίπεδο μόνο. Στον πίνακα 4. τονίζεται πως τα δυο εμπρός ηχεία πρέπει να έχουν πολύ μικρή απόκλιση ως προς τις μεταξύ τους συχνοτικές αποκρίσεις.

2.2 Πολικό διάγραμμα

Συστήνεται το πολικό διάγραμμα στον οριζόντιο άξονα να γίνεται με 1/3 οκτάβας ανάλυση, χρησιμοποιώντας ροζ θόρυβο.

Η μέγιστη ακτινοβολία του πρέπει να είναι στον κύριο άξονα για όλες τις συχνότητες. Η κατευθυντικότητα του πρέπει να είναι συμμετρική ως προς τον άξονα αναφοράς. Σε περίπτωση χρήσης μη γεωμετρικά συμμετρικών ηχείων, επιβάλλεται συμμετρία καθρέπτη (mirror symmetry) σε σχέση με την κάθετη γραμμή που περνά από τη μέση της στερεοφωνικής βάσης.

2.2.1 Ο Δείκτης κατευθυντικότητας – D ορίζεται ως ο λόγος της έντασης του κύριου άξονα προς την ένταση μιας ισότροπης πηγής και εκφράζεται σε dB. Πρέπει να μετριέται με θόρυβο εύρους 1/3 οκτάβας στις πρότυπες συχνότητες 63 Hz οκταβικά μέχρι 8 kHz³. Πρέπει να αποφεύγονται οι μεγάλες διαφορές όσον αφορά στις διαφορετικές συχνότητες.

2.3 Αρμονική παραμόρφωση

Η αρμονική παραμόρφωση μετριέται με ημιτονοειδή σήματα. Εισάγεται στο ηχείο με σταθερή τάση. Η στάθμη ηχητικής πίεσης που πρέπει να παράγεται από αυτό το σήμα πρέπει να είναι της τάξης των 90 dB στο συχνοτικό εύρος 250 Hz – 2 kHz.

2.4 Χρόνος απόσβεσης

Ο χρόνος απόσβεσης t_s ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί η στάθμη ηχητικής πίεσης 1/e φορές (περίπου 0.37) της αρχικής τιμής. Ως σήμα εισόδου χρησιμοποιούνται ημιτονοειδής τονική ριπή (sinusoidal tone burst).

³ IEC Publication 268, “Sound system equipment. Part 5: Loudspeakers” 1989

2.5 Δυναμικό εύρος

Τη μέγιστη στάθμη ηχητικής πίεσης λειτουργίας $L_{eff-max}$ ορίζεται ως η μέγιστη ηχητική στάθμη πίεσης που μπορεί να αποδώσει ένα ηχείο με σήμα προγράμματος σε διάρκεια 10 λεπτών, χωρίς να υποστεί κάποια βλάβη ή υπερθέρμανση τα μηχανικά και ηλεκτρικά στοιχεία του ηχείου. Η στάθμη αυτή επαληθεύεται από ένα σήμα προγράμματος εξομοίωσης σύμφωνα με το IEC Publication 268-1.

2.6 Αυτοπαραγόμενος θόρυβος (self-noise).

Η μέγιστη στάθμη ηχητικής πίεσης για τον θόρυβο που παράγει το ίδιο το ηχείο μετράται με φίλτρο A (RMS, slow) σε απόσταση 1 m.

Παράρτημα 3

Μέθοδος της ακολουθίας μεγίστου μήκους (MLS):

Η μέθοδος της ακολουθίας μεγίστου μήκους (Maximum Length Sequence-MLS) αναπτύχθηκε τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια και έφερε 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 συνάρτηση
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 μέγιστου 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 μέγιστου 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:

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 μέγιστου 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 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 γραμμικά 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 βάρους.

Ο βασικός περιορισμός που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη σε μετρήσεις με ακολουθία μέγιστου 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).

Παράρτημα 4

Κώδικες για Matlab

Κώδικες για Matlab υπολογισμού του συντελεστή απορρόφησης α

Κώδικας για κάθετη πρόσπτωση

```
%absorbtion of a perforated absorber
%Normal incident

close all
clear all

c = 340; %speed of sound
rho = 1.21; %density of air
z0 = c*rho;
viscosity = 15e-6; %kinematic viscosity of air

sigma = 20000; %flow resistivity of mineral wool
L1 = 0.025; %backing thikness air
L2 = 0.025; %backing thickness porous absorber

f = [100:50:2500]; %frequency
nf = Length(f);

kair = 2*pi*f/c;
w = 2*pi*f;

%impedance at top of air layer
z1 = -j*z0.*cot(kair*L1);

%calculate impedance of porous material (Delany and Bazley)
%dimensionLess quantity for Delany and Bazley
X = rho*f/sigma;

%characteristic impedance
zc = rho*c*(1+0.0571*(X.^-0.754)-j*0.087*(X.^-0.732));

%Wavenumber
```

```

k = (2*pi/c).*f.*(1+0.0978*(X.^-0.700)-j*0.189*(X.^-0.595));

%impedance at top of porous absorbent
z2 = (-j*z1.*zc.*cot(k*L2)+zc.^2)./(z1-j*zc.*cot(k*L2));

%Loop over different open areas
eta = [0.0625,0.125,0.25,0.50,1.00]
ne = Length(eta);
for m = 1:ne;

a = 2.5e-3; %hole radius
D = sqrt(pi/eta(m))*a; %Hole spacing
delta = 1.6*(1-1.47*eta(m)^0.5+0.47*eta(m)^3/2); %end correction
t = 6.3e-3; %plate thickness
rm = (rho/eta(m))*sqrt(8*viscosity*w)*(1+t/(2*a)); %surface resistance

%impedance of resonant absorber
z3 = (j/eta(m))*(2*delta*a+t)*w*rho+z2+rm;

R = (z3-rho*c)./(z3+rho*c); %reflection factor
alpha = 1-abs(R).^2 %absorption coefficient

figure(1)
hold on
str = dec2bin(m,3)
plot(f,real(z3),'color',...
[str2num(str(1)) str2num(str(2)) str2num(str(3))],...,'LineStyle','-');
plot(f,imag(z3),'color',...
[str2num(str(1)) str2num(str(2)) str2num(str(3))],...,'LineStyle',':');

figure(2)
hold on
plot(f,alpha,'color',...
[str2num(str(1)) str2num(str(2)) str2num(str(3))]);
end

```

Κώδικας για συνηχητή με σχισμές

```

%absorption of a slotted absorber
%Normal incidence

```

```

close all
clear all

c = 340; %speed of sound
rho = 1.21; %density of air

r0 = 32; %air flow resistance of porous material =
    %flow resistivity*thickness

L = 0.1; %backing thickness

f = [100:10:1100];
nf = Lenth(f); %number of frequency terms
k = 2*pi*f/c; %wavenumber
w = 2*pi*f; %angular frequency

z1 = rho*c*coth(j*k*L); %impedance at of top air cavity

t = 15e-3; %plate thikness
d = 0.01; %slot width
eta = (0.0465*4*d)/(pi*0.05^2); %open area
delta = -(d/pi)*log(sin(pi*eta/2)); %end correction

%impedance of resonnt absorber
z2 = (j/eta)*(2*delta+t)*w*rho+z1+r0/eta;

figure
plot(f,real(z2),'b',f,imag(z2),'g');
title('impedance')
xlabel('frequency(Hz)')
ylabel('impedance')
Legend('real','imaginary')

R = (z2-rho*c)/(z2+rho*c); %reflaction factor
anormal = 1 - abs(R).^2; %absorption coefficient

figure
plot(f,anormal);
title('Normal incidence absorption coefficient')
xlabel('frequency(Hz)')
ylabel('aplha')

```

Κώδικας για συνηχητή μικροδιάτρησης

```
%Microperforated
%Helmholtz absorber

close all
clear all

D = 2.5e-3; %Hole separation
d = 0.2e-3; %Hole diameter
a = d/2; %Hole radius
t = 0.2e-3; %Sheet thickness
L = 0.06; %Cavity depth

f = Linspace(50,8000,100);
nf = Length(f);
w = 2*pi*f;
c = 340;
k = w/c;
rho = 1.21;
viscosity = 1.85e-5;
eta = pi*a^2/(D^2); %open area

z1 = -j*rho*c*cot(k*L); %impedance, top of cavity;

% impedance of covering sheet
kd = a*sqrt(rho*w/viscosity);
s = kd*sqrt(-j);
z2 = j*w*rho*t./(1-2*besseLj(1,s)./(s.*besseLj(0,s)));
z2 = z2/eta+j*w*0.85^2*rho*a/eta+sqrt(2)*kd*viscosity/(2*a*eta);
z = z1+z2;

R = (z-rho*c)./(z+rho*c); %reflection factor
anormal = 1 - abs(R).^2; %absorption coefficient

hold on
plot(f,anormal,'g')
xlabel('f(Hz)')
ylabel('abs.coeff')
```

Αναφορές

Βιβλιογραφία

- [1] Beranek L., «Acoustics » Acoustic Society of America, 1996.
- [2] Bies A. David and Hansen H. Colin, “Engineering Noise Control – Theory and Practice”, Third Edition Spon Press. [2]
- [3] D’ Antonio Peter, Cox Trevor, «Acoustic Absorber and Diffuser» (second edition) εκδόσεις Taylor and Francis.
- [4] Don Davis – Eugene Patronis, Jr. “Sound system engineering” Third Edition, Focal Press[1]
- [5] Everest F. Alton, «The master Handbook of acoustics» (fourth edition), The McGraw-Hill Companies, Inc., USA, 2001.
- [6] Fastl Hugo, Zwicker Eberhard, Psychacoustics – Facts and Models, Springer Series, Munich, 2006.
- [7] Floyd Toole, “Sound Reproduction-Loudspeakers and Rooms”, Focal Press, 2008
- [8] Michael Vorländer, Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality, Aachen 2007.
- [9] Tomlinson Holman, “Surround sound Up and Running”, Focal Press, 2008.
- [10] Μηνάς Σηφάκης, Κουζούπης Σπύρος, Σημειώσεις Εργαστηρίου «Εφαρμοσμένη Ακουστική 2», Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης Παρ/τημα Ρεθύμνου.
- [11] Ξενικάκης Δημήτρης. Σημειώσεις Θεωρίας «Ηχοληψία Ι» Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης Παρ/τημα Ρεθύμνου Ρέθυμνο 2006.
- [12] Σηφάκης Μηνάς, Πασχαλίδου Στέλλα,. «Σημειώσεις Εργαστηριακών ασκήσεων Εφαρμοσμένης Ακουστικής Ι», Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης – Παρ/τημα Ρεθύμνου 2007, σελ. 103.
- [13] Σκαρλάτος Δ., «Εφαρμοσμένη Ακουστική» εκδόσεις Φιλομάθεια.

Άρθρα

- [14] AES 109th Convention, Toole E. Floyd, “The acoustics and psychoacoustics of loudspeakers and Rooms – The Stereo past and the Multichannel future”, Los Angeles, 2000.

-
- [15] AES Technical Document AESTD1001.0.01-05, “Multichannel surround sound systems and operations”, 2001.
- [16] Begault D., McClain B., Anderson M., “Early Reflection Thresholds for Anechoic and Reverberant Stimuli within a 3-D Sound Display” Spatial Auditory Display Laboratory MS 262-2, NASA Ames Research Center, Moffett Field, USA
- [17] EBU Tech 3276-E, “Listening conditions for the assessment of sound programme material”, 2004.
- [18] Griesinger David, “How Many Loudspeaker Channels are Enough” www.davidgriesinger.com, 2000
- [19] Griesinger David, “How many loudspeakers are enough” από www.davidgriesinger.com, 2000
- [20] Griesinger David, “Surround – The current technological situation” από www.davidgriesinger.com, 2000
- [21] Griesinger David, “The Science of Surround”, www.davidgriesinger.com, 1999.
- [22] ITU-R BS.775-2, “Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture”, ITU Geneva, Switzerland, 2006.
- [23] J. Audio Eng. Soc., 37, 7/8, July/Aug 1989 σελ. 539-553.
- [24] Olive, Sean E. and Floyd E. Toole, The Detection of Reflections in Typical Rooms,
- [25] SMPTE RP-173, “Loudspeaker placements for audio monitoring in high definition electronic production” Rec., SMPTE N 15.04/152-300B, Society of Motion Picture and Television Engineers, 1991.
- [26] Walker Robert, “Room acoustics for multichannel listening: early reflection control”, BBC Research Department UK, 2007.
- [27] Walker Robert, Low frequency room responses, Part 1 & 2, BBC, 1992.
- [28] Welti Todd “The science of audio, Subwoofers: optimum number and locations” ,Harman Industries.
- [29] Welti, T., Devantier, A. “Low-Frequency Optimization Using Multiple Subwoofers,” J. Audio Eng. Soc., 2006.
- [30] Zacharov N., Bech S., Meares D : “The use of subwoofers in the context of surround sound programme reproduction”, JAES, 1998.

Διαδίκτυο

- [31] Acoustic Sciences Corporation ATTACK Wall for control room and mixing engineers.
- [32] Glossary of Acoustical Terms “baffle”.
- [33] Glossary of Acoustical Terms “flutter echo”.
- [34] <http://www.acoustics.org/smallrooms.pdf>
- [35] http://www.deeprecordingstudios.com/page_1167925110328.html
- [36] <http://www.electroacoustics.co.uk/article/essroom.htm>
- [37] Wikipedia “gobo” –recording studios.