



Α.Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ
CONTROL ROOM ΤΟΥ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ
ΣΤΟ Α.Τ.Ε.Ι ΡΕΘΥΜΝΟΥ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΜΑΡΙΟΣ ΜΗΤΡΑΚΗΣ, Α.Μ: 873

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΟΔΥΣΣΕΑΣ ΡΩΜΑΝΟΣ

Ρέθυμνο, 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του ήχου απασχολούν εδώ και χιλιάδες χρόνια τον άνθρωπο. Οι επιστήμη οι οποία μελετά τον ήχο διευρύνεται και αναπτύσσει τις αντιλήψεις της συνεχώς ακόμα και σήμερα. Ακουστική είναι η επιστήμη της συμπεριφοράς των ηχητικών κυμάτων. Μελετά την παραγωγή, διάδοση, και λήψη των εν λόγω κυμάτων από το ανθρώπινο αυτί. Είναι επίσης η επιστήμη που ασχολείται με όλα γενικά τα μηχανικά κύματα, τα οποία εκτείνονται πέρα από το ακουστικό φάσμα του ανθρώπινου αυτιού και ως εκ τούτου δεν γίνονται αντιληπτά. Τέτοια κύματα είναι τα χαμηλής συχνότητας κύματα που παράγονται από τους σεισμούς (υποηχητικά κύματα) και τα υψηλής συχνότητας ή υπερηχητικά κύματα καθώς και οι υψίσυχνες ταλαντώσεις των ατόμων στα στερεά σώματα.

Η Ακουστική είναι εξαιρετικά σημαντική στο λόγο και στην ακρόαση (ραδιοφωνικά studios, θεατρικές αίθουσες, συνεδριακοί χώροι) και στη μουσική (παραγωγή και ακρόαση) σε studios ηχογράφησης και αίθουσες συναυλιών.

Χώροι σαν τους προαναφερθέντες, κατασκευασμένοι χωρίς να έχουν προηγηθεί μελέτες που αφορούν την ακουστική κλειστών χώρων, είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα δημιουργήσουν απαράδεκτες συνθήκες ακρόασης με αποτέλεσμα ένα δυσάρεστο ακουστικό συναίσθημα στο ακροατήριο. Μερικά από τα προβλήματα που δημιουργούνται είναι ηχώ, στάσιμα κύματα, τυχαίες ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων, χρωματισμός του ήχου που οφείλεται σε ανεπιθύμητους συντονισμούς στην αίθουσα κ.ά.

Η παρούσα πτυχιακή έρευνα διεξάχθηκε στις εγκαταστάσεις του ΤΕΙ Ρεθύμνου και συγκεκριμένα στο control room του studio ηχογραφήσεων με σκοπό την ανάπτυξη της αντίληψης σχετικά με τις ιδιότητες του ήχου αλλά και τη βελτίωση της ακουστικής του χώρου ο οποίος χρησιμοποιείται καθημερινά στα πλαίσια της εκπαιδευτικής διαδικασίας από καθηγητές και σπουδαστές.

Ολοκληρώνοντας της πτυχιακή εργασία θα ήθελα πρώτα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Οδυσσέα Ρωμανό για το συνεχές ενδιαφέρον που έδειξε κατά τη διάρκεια της έρευνας, παρέχοντας τις γνώσεις του και την καθοδήγησή του. Επίσης ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Σπύρο Μπρέζα για την πολύτιμη βοήθειά του και τέλος τους συμφοιτητές Αχιλλέα Κάππη και Τριαντάφυλλο Αναγνώστου για την συμπαράσταση και για τη βοήθειά τους στα πιο καίρια ζητήματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ (Α)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
Α.1. ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ	9
Α.2. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΙΚΡΩΝ ΧΩΡΩΝ	9
Α.3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΗΧΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ)	11
Α.4. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ RT_{60} ΚΑΤΑ SABINE	12
Α.5. ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΚΑΤΑ NORRIS-EYRING	13
Α.6. ΣΧΕΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΚΑΤΑ FITZROY	13
Α.7. ΣΧΕΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΤΩΝ SETTE-MILLINGTON	13
Α.8. EDT (EARLY DECAY TIME)	14
Α.9. RT_{10} , RT_{20} , RT_{30}	14
Α.10. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ	15
Α.11. ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ	15
Α.12. ΑΞΟΝΙΚΟΙ/ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟΙ/ΠΛΑΓΙΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΔΟΝΗΣΗΣ	16
Α.13. ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΙ ΕΝΟΣ ΧΩΡΟΥ	17
Α.14. ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ	17
Α.15. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ	19
Α.16. ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	19
Α.17. ΠΟΡΩΔΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	19
Α.18. ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	21
Α.19. ΔΙΑΤΡΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	22
Α.20. ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΕΣ	23
Α.21. ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΟΠΕΣ	24
Α.22. ΣΧΙΣΜΕΣ	24
Α.23. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	24
Α.24. ΜΠΑΣΟΠΑΓΙΔΕΣ	24
Α.25. ΔΙΑΧΥΤΕΣ	26
Α.26. ΔΙΑΧΥΤΕΣ SCHROEDER	26
Α.27. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΜΟΝΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ	29
Α.28. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΦΑΣΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ	29
Α.29. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ	30
Α.30. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ ΡΙΖΑΣ	31
Α.31. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΑΧΥΤΩΝ	33
Α.32. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ	36
Α.33. ΑΛΛΟΥ ΤΥΠΟΥ ΔΙΑΧΥΤΕΣ	37
Α.34. Η ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ	37
Α.35. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΧΥΤΩΝ	38
Α.36. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΛΟΒΩΝ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΙΑΧΥΤΩΝ	39
Α.37. ΑΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΑ ΕΙΔΩΛΑ	42
Α.38. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΧΥΤΩΝ	42
Α.39. ΣΥΜΒΙΒΑΣΜΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΧΥΤΩΝ SCHROEDER	43
Α.40. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ – AUDIO CONTROL ROOMS	45
Α.41. Η ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΝΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	46
Α.42. ΚΡΙΤΗΡΙΟ BONELLO	48
Α.43. ΕΙΔΗ ΔΩΜΑΤΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	49
Α.44. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ JENCEN	49
Α.45. ΤΟ NON-ENVIRONMENT ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ	50
Α.46. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ LIVE-END, DEAD-END	51
Α.47. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ REFLECTION FREE ZONE	52
Α.48. EARLY SOUND SCATTERING ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	54
Α.49. ΣΥΣΤΗΜΑ MONITORING ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	54
Α.50. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΜΙΞΗΣ ΔΥΟ ΚΑΝΑΛΙΩΝ	55
Α.51. ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ	56
Α.52. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ	59
Α.53. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΤΡΟΠΩΝ ΔΟΝΗΣΗΣ ΣΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	59
Α.54. ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ	60
Α.55. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	61
Α.56. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA	61
Α.57. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ MLSSA ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ	63

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ (B)

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	64
B.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ CONTROL ROOM	65
B.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	66
B.3. ΜΕΤΡΗΣΗ 1 (ΤΥΧΑΙΑ ΘΕΣΗ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΛΗΠΤΗ)	68
B.4. ΜΕΤΡΗΣΗ 2 (ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΛΗΠΤΗ)	70
B.5. ΜΕΤΡΗΣΗ 3 (ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΛΗΠΤΗ ΟΤΑΝ ΣΤΕΚΕΤΑΙ ΟΡΘΙΟΣ)	72
B.6. ΜΕΤΡΗΣΗ 4 (ΘΕΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΛΗΠΤΗ ΜΠΡΟΣΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΚΟΝΣΟΛΑ)	74
B.7. ΜΕΤΡΗΣΗ 5 (ΘΕΣΗ ΣΤΟΝ ΠΙΣΩ ΤΟΙΧΟ)	76
B.8. ΜΕΤΡΗΣΗ 6 (ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΗΧΕΙΩΝ MEYER)	79
B.9. ΜΕΤΡΗΣΗ 7 (ΔΙΠΛΑ ΑΚΡΙΒΩΣ ΣΤΟ ΑΡΙΣΤΕΡΟ NAUTILUS)	81
B.10. ΜΕΤΡΗΣΗ 8 (ΔΙΠΛΑ ΑΚΡΙΒΩΣ ΣΤΟ ΔΕΞΙ NAUTILUS)	83
B.11. ΜΕΤΡΗΣΗ 9 (ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ NAUTILUS)	85
B.12. ΜΕΤΡΗΣΗ 10 (ΔΙΠΛΑ ΑΚΡΙΒΩΣ ΣΤΟ ΑΡΙΣΤΕΡΟ MEYER)	87
B.13. ΜΕΤΡΗΣΗ 11 (ΔΙΠΛΑ ΑΚΡΙΒΩΣ ΣΤΟ ΔΕΞΙ MEYER)	89
B.14. ΜΕΤΡΗΣΗ 12 (ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ MEYER)	91
B.15. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	93
B.16. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΤΟΥ CONTROL ROOM	93
B.17. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ CONTROL ROOM	94
B.18. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	96
ΕΠΙΛΟΓΟΣ	96
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	111

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1: Γραφική αναπαράσταση του RT_{60} .	9
ΣΧΗΜΑ 2: Ελεγκτής ακουστικής απόκρισης σταθερής κατάστασης δωματίου.	10
ΣΧΗΜΑ 3: Συντελεστής ηχοαπορρόφησης του αέρα.	12
ΣΧΗΜΑ 4: Απεικονίσεις τρόπων ταλάντωσης.	14
ΣΧΗΜΑ 5: Τυπικός συντελεστής απορρόφησης ενός πορώδους υλικού.	20
ΣΧΗΜΑ 6: Πως λειτουργούν τα πορώδη απορροφητικά υλικά.	21
ΣΧΗΜΑ 7: Πορώδη απορροφητικά υλικά.	21
ΣΧΗΜΑ 8: Απορροφητικά υλικά τύπου μεμβράνης.	22
ΣΧΗΜΑ 9: Διάφοροι τύποι διάτρητων επιφανειών.	23
Σχήμα 10: Χάρτης συντελεστών απορρόφησης (εξασθένισης) για διάφορα υλικά κι επιφάνειες.	109
ΣΧΗΜΑ 11: Συντονιστής Helmholtz.	25
ΣΧΗΜΑ 12: Μπασοπαγίδα.	26
ΣΧΗΜΑ 13: Παραλλαγή μεταλλικής πλάκας που σχεδίασε ο Schroeder.	27
ΣΧΗΜΑ 14: Ακουστική συμπεριφορά απορρόφησης/απλής ανάκλασης/διάχυσης για συγκεκριμένη συχνότητα.	28
ΣΧΗΜΑ 15: Πολικό διάγραμμα διασποράς του διαχυτή Schroeder (αριστερό σκέλος) έναντι της ανάκλασης από επιφάνεια ιδίου μεγέθους(δεξί σκέλος).	28
ΣΧΗΜΑ 16: Απεικόνιση Διάχυσης.	29
ΣΧΗΜΑ 17: Διαχυτής φράγματος φάσης ανάκλασης.	30
ΣΧΗΜΑ 18: Διαχυτής πρωτεύουσας ρίζας διπλής διάστασης.	33
ΣΧΗΜΑ 19: Πορεία των κυμάτων ABCD και EFGH σε διαχυτική επιφάνεια.	34
ΣΧΗΜΑ 20: Πορεία προσπίπτοντος κύματος πάνω σε έναν διαχυτή του τύπου one-dimensional QR. Αποτελούμενο από 2 περιόδους με 17 φρεάτια ανά περίοδο.	34
ΣΧΗΜΑ 21: Κατευθυντικότητα διάχυσης για QR διαχυτές.	36
ΣΧΗΜΑ 22: Τοποθέτηση διαχυτών σε σειρά.	39
ΣΧΗΜΑ 23: Διάγραμμα διασποράς.	40
ΣΧΗΜΑ 24: Τοποθέτηση διαχυτών στο ταβάνι.	41
ΣΧΗΜΑ 25: Πολικά διαγράμματα λοβών διάχυσης.	41
ΣΧΗΜΑ 26: Πολικό διάγραμμα ανεστραμμένων ειδώλων.	42
ΣΧΗΜΑ 27: Αρχικό Χάσμα Χρονοκαθυστέρησης (ITG).	46
ΣΧΗΜΑ 28: Το διάγραμμα Bolt.	48
ΣΧΗΜΑ 29: Παράμετροι του κριτηρίου Bonello.	49
ΣΧΗΜΑ 30: Δωμάτιο ελέγχου LEDE.	51
ΣΧΗΜΑ 31: Κάτοψη RFZ δωματίου ελέγχου.	53
ΣΧΗΜΑ 32: Γραφική αναπαράσταση ενός μοναδιαίου παλμού.	59

ΣΧΗΜΑ 33: Βασική συνδεσμολογία για την μέτρηση της κρουστικής και συχνοτικής απόκρισης που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις μετρήσεις.	66
ΣΧΗΜΑ 34: Συνδεσμολογία Μέτρησης 1.	68
ΣΧΗΜΑ 35: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 1.	68
ΣΧΗΜΑ 36: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 1.	69
ΣΧΗΜΑ 37: Συνδεσμολογία Μέτρησης 2.	70
ΣΧΗΜΑ 38: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 2.	70
ΣΧΗΜΑ 39: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 2.	71
ΣΧΗΜΑ 40: Συνδεσμολογία Μέτρησης 3.	72
ΣΧΗΜΑ 41: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 3.	72
ΣΧΗΜΑ 42: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 3.	73
ΣΧΗΜΑ 43: Συνδεσμολογία Μέτρησης 4.	74
ΣΧΗΜΑ 44: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 4.	74
ΣΧΗΜΑ 45: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 4.	75
ΣΧΗΜΑ 46: Συνδεσμολογία Μέτρησης 5.	76
ΣΧΗΜΑ 47: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 5.	77
ΣΧΗΜΑ 48: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 5.	78
ΣΧΗΜΑ 49: Συνδεσμολογία Μέτρησης 6.	79
ΣΧΗΜΑ 50: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 6.	79
ΣΧΗΜΑ 51: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 6.	80
ΣΧΗΜΑ 52: Συνδεσμολογία Μέτρησης 7.	81
ΣΧΗΜΑ 53: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 7.	81
ΣΧΗΜΑ 54: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 7.	82
ΣΧΗΜΑ 55: Συνδεσμολογία Μέτρησης 8.	83
ΣΧΗΜΑ 56: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 8.	83
ΣΧΗΜΑ 57: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 8.	84
ΣΧΗΜΑ 58: Συνδεσμολογία Μέτρησης 9.	85
ΣΧΗΜΑ 59: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 9.	85
ΣΧΗΜΑ 60: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 9.	86
ΣΧΗΜΑ 61: Συνδεσμολογία Μέτρησης 10.	87
ΣΧΗΜΑ 62: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 10.	87
ΣΧΗΜΑ 63: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 10.	88
ΣΧΗΜΑ 64: Συνδεσμολογία Μέτρησης 11.	89
ΣΧΗΜΑ 65: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 11.	89
ΣΧΗΜΑ 66: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 11.	90
ΣΧΗΜΑ 67: Συνδεσμολογία Μέτρησης 12.	91
ΣΧΗΜΑ 68: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 12.	91
ΣΧΗΜΑ 69: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 12.	92

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Τιμές ακολουθιών ενός διαχυτή μονής διάστασης και ενός διαχυτή τετραγωνικού παλμού.	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Αναλογίες ορθογώνιων δωματίων ελέγχου.	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΜΕΤΡΗΣΗ 1.	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΜΕΤΡΗΣΗ 2.	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΜΕΤΡΗΣΗ 3.	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΜΕΤΡΗΣΗ 4.	75
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΜΕΤΡΗΣΗ 5.	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΜΕΤΡΗΣΗ 6.	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΜΕΤΡΗΣΗ 7	82
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΜΕΤΡΗΣΗ 8.	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΜΕΤΡΗΣΗ 9.	86
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΜΕΤΡΗΣΗ 10.	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΜΕΤΡΗΣΗ 11.	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΜΕΤΡΗΣΗ 12.	92

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη και βελτίωση του control room το οποίο βρίσκεται στο studio του TEI Ρεθύμνου. Στη πρώτη ενότητα η οποία είναι η θεωρητική εισαγωγή αναπτύσσεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο είναι απαραίτητο ώστε να κατανοηθεί πλήρως αφενός το αντικείμενο μελέτης, δηλαδή ο ήχος και η συμπεριφορά του μέσα σε κλειστούς χώρους και αφετέρου η μεθοδολογία της πειραματικής διαδικασίας η οποία βρίσκεται στη δεύτερη ενότητα.

Αρχικά λοιπόν, ταυτόχρονα με την φιλοσοφία της ακουστικής των μικρών χώρων δίνεται και ο ορισμός του χρόνου αντήχησης και οι διάφοροι τρόποι υπολογισμού του. Η επόμενη σημαντική παράγραφος είναι τα στάσιμα κύματα, τι είναι, γιατί εμφανίζονται και πως μπορούν να αντιμετωπιστούν. Επομένως γίνεται αναφορά στους τρόπους δόνησης και στους συντονισμούς ενός χώρου.

Εν συνεχεία η πτυχιακή εργασία ασχολείται με τις δύο σημαντικότερες ιδιότητες του ήχου όταν βέβαια πρόκειται να εξεταστεί η συμπεριφορά του μέσα σε κλειστούς χώρους. Οι δύο αυτές ιδιότητες είναι η απορρόφηση και η διάχυση του ήχου, οι οποίες αναλύονται και ερμηνεύονται εκτενώς. Παρακάτω γίνεται λόγος για τους απορροφητές, τους διαχυτές και τα διάφορα είδη που έχουν εφευρεθεί ώστε να τοποθετούνται μέσα σε χώρους με κακή ακουστική με σκοπό να ελέγξουν τις δύο αυτές βασικές ιδιότητες του ήχου. Αναλυτικότερα γίνεται λόγος για τα πορώδη απορροφητικά υλικά, για τα απορροφητικά υλικά τύπου μεμβράνης, για τις διάτρητες επιφάνειες, για τους συντονιστές, τις κυκλικές οπές, τις σχισμές και τέλος τους ηλεκτρονικούς απορροφητές και τις μπασοπαγίδες. Όσον αφορά τα είδη διαχυτών, παρουσιάζεται η μεγάλη κατηγορία διαχυτών Schroeder, οι διαχυτές μονής και διπλής διάστασης, οι φράγματος φάσης και ανάκλασης, οι διαχυτές τετραγωνικού παλμού και πρωτεύουσας ρίζας. Επίσης περιέχονται και κάποιες παράγραφοι που τονίζουν τη σημαντικότητα της διάχυσης και πόσο μάλλον της ελεγχόμενης διάχυσης, την κατασκευή και εφαρμογή των διαχυτών, αλλά και τους συμβιβασμούς που παρουσιάζονται κατά την εφαρμογή τους σε κλειστούς χώρους.

Η επόμενη παράγραφος έχει να κάνει με την παρουσίαση των control room, τι είναι ουσιαστικά ένα δωμάτιο ελέγχου και ποια είναι τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ώστε να θεωρείται επαγγελματικών προδιαγραφών. Γίνεται λόγος για τους διάφορους τύπους δωματίων ελέγχου που υπάρχουν όπως τα δωμάτια ελέγχου τύπου Jencen, τα Non-environmental δωμάτια ελέγχου, τα τύπου LEDE, RFZ, ESS και Stereo. Για κάθε έναν τύπο παρουσιάζονται εκτός των άλλων τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του.

Οι τελευταίες παράγραφοι της θεωρητικής εισαγωγής επισημαίνουν τη μεθοδολογία της πειραματικής διαδικασίας, και επιχειρηματολογούν σε ζητήματα όπως η καλύτερη δυνατή μέτρηση του χρόνου αντήχησης και γιατί χρησιμοποιήθηκε το σύστημα MLSSA κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων.

Η δεύτερη ενότητα είναι η ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας, στην οποία αρχικά περιγράφεται εκτενώς ο χώρος στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Για την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιούνται σχήματα που βοηθούν στη παρουσίαση του μετρητικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε και της συνδεσμολογίας του. Αναλύονται μία προς μία οι μετρήσεις που έγιναν στο χώρο και δίδονται τα αποτελέσματα σε μορφή πινάκων και γραφικών παραστάσεων όπως εξάχθηκαν από το σύστημα MLSSA. Στη συνέχεια διαπιστώνονται κάποια πρώιμα συμπεράσματα κατά την παρατήρηση των αποτελεσμάτων και εν τέλει καταγράφονται τα προβλήματα της ακουστικής του προς μελέτη control room. Αμέσως μετά, χρησιμοποιώντας βήμα προς βήμα την θεωρητική εισαγωγή και τις πληροφορίες που αντλήθηκαν κατά την μελέτη της, παρουσιάζονται οι προτάσεις

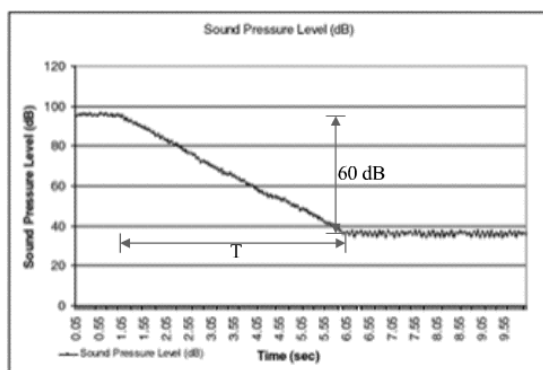
βελτίωσης της ακουστικής του δωματίου ελέγχου, επιχειρηματολογώντας για κάθε πρόταση με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας αλλά και τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε όσον αφορά το γνωστικό αντικείμενο της ακουστικής του ήχου σε κλειστούς χώρους. Τα γενικά συμπεράσματα συνοψίζουν τη συνολική διαδικασία της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Τέλος υπάρχουν στο παράρτημα κάποιες λεπτομέρειες για τη εξαγωγή των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας και φυσικά πολλές φωτογραφίες που σκοπεύουν να δώσουν την ολική εικόνα του δωματίου ελέγχου το οποίο μελετήθηκε σε κάποιον που δεν μπορεί να επισκεφθεί το χώρο όποτε να κατανοήσει καλύτερα τις περιγραφές και τις προτάσεις βελτίωσης. Στη τελευταία ενότητα παραθέτονται οι βιβλιογραφικές αναφορές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την δημιουργία αυτής της έρευνας.

Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

A.1. ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες της Ακουστικής χώρων που χρησιμοποιείται από τους σχεδιαστές και τους μηχανικούς της Αρχιτεκτονικής Ακουστικής όταν μελετούν τη συμπεριφορά αντήχησης ενός χώρου, είναι ο **Χρόνος Αντήχησης (RT_{60} ή T_{60})** που συμβολίζει τον απαιτούμενο χρόνο ώστε το επίπεδο έντασης του αντηχούντος πεδίου να έχει εξασθενήσει κατά 60dB (δηλαδή να είναι ένα εκατομμύριο φορές ασθενέστερο) σε σύγκριση με τον άμεσο ήχο, μετά την διακοπή της μετάδοσης του ήχου από την ηχητική πηγή. Η ακουστική ποιότητα των χώρων σχετίζεται άμεσα με την έννοια του χρόνου αντήχησης, ο οποίος παίζει σπουδαίο ρόλο στην ακουστική των κλειστών χώρων. Μετριέται σε sec. Η απορρόφηση του χώρου και ο όγκος του είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του χρόνου αντήχησης. Παράδειγμα χώρου με υψηλό χρόνο αντήχησης αποτελεί ο κλασικός οικιακός χώρος του μπάνιου που χαρακτηρίζεται από έντονα ανακλαστικές επιφάνειες. Στον αντίποδα υπάρχει το πρότυπο του ανηχοϊκού θαλάμου του οποίου όλες οι επιφάνειες καλύπτονται από υλικά και διατάξεις υψηλότατης απορροφητικότητας με αποτέλεσμα ο χρόνος αντήχησης του να τείνει προς το μηδέν.



ΣΧΗΜΑ 1: Γραφική αναπαράσταση του RT_{60} .

A.2. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΙΚΡΩΝ ΧΩΡΩΝ

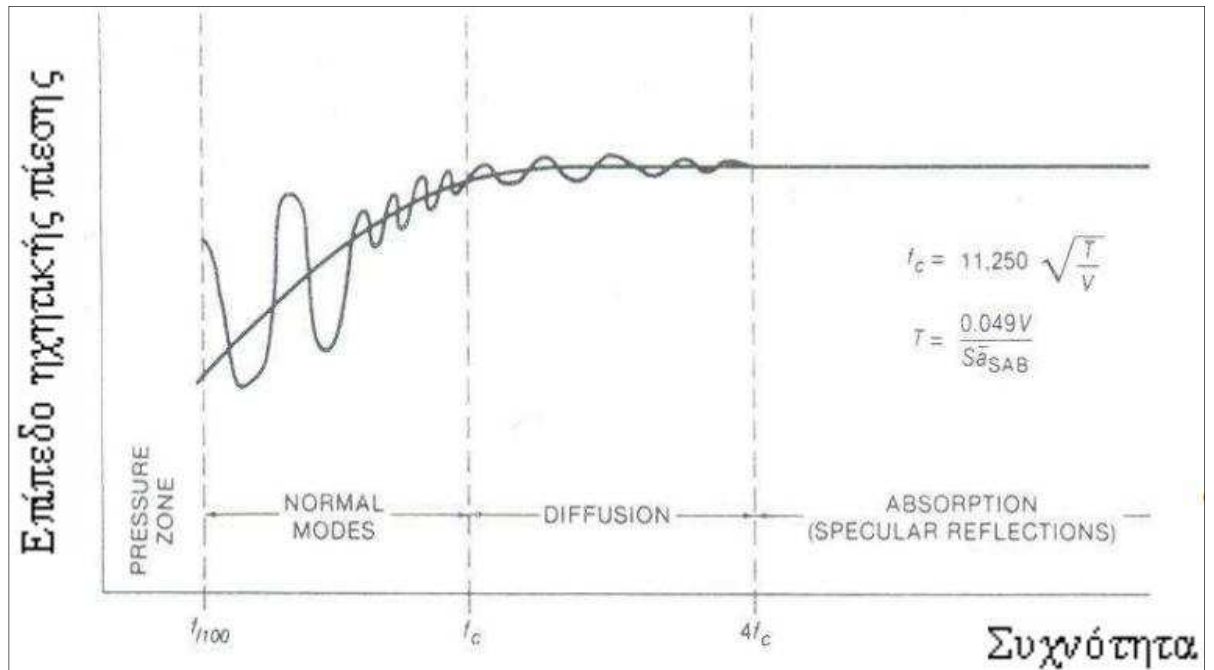
Για τους ακουστικά μικρούς χώρους ισχύει ότι $\lambda \approx$ διαστάσεις του χώρου. Επίσης η εξίσωση:

$$\text{---} (1)$$

(όπου RT_{60} : χρόνος αντήχησης, k σταθερά δωματίου, V : όγκος δωματίου και f_c συχνότητα αποκοπής δωματίου)

περιγράφει τη συχνότητα ενός μεγάλου κλειστού χώρου. Για τιμές μικρότερες της f_c το δωμάτιο θεωρείται ακουστικά μικρό με την έννοια ότι εξετάζονται οι τρόποι δόνησης του και όχι ένα στατιστικά αντηχητικό πεδίο. Το διάγραμμα των Bolt, Beranek & Newman που ονομάζεται «ελεγκτής ακουστικής απόκρισης σταθερής κατάστασης δωματίου», παρουσιάζει τον διαχωρισμό της συμπεριφοράς ενός χώρου σύμφωνα με τη συχνότητα ή αλλιώς το μήκος κύματος του ήχου ως προς τις διαστάσεις του χώρου. Ο διαχωρισμός γίνεται σε τέσσερις ζώνες: ζώνη πίεσης (pressure zone), ζώνη στάσιμων κυμάτων (normal modes), ζώνη διάχυσης (diffusion) και ζώνη ανακλάσεων (absorption/specular reflections). Η συχνότητα f_c ονομάζεται

συχνότητα αποκοπής και στην ουσία είναι το όριο διαχωρισμού ανάμεσα σε ένα ακουστικά μεγάλο και ένα ακουστικά μικρό δωμάτιο.



ΣΧΗΜΑ 2: Ελεγκτής ακουστικής απόκρισης σταθερής κατάστασης δωματίου.

A.3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΗΧΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ)

Αντήχηση είναι η μη ακαριαία απόσβεση του ήχου με το σταμάτημα μιας πηγής και είναι αποτέλεσμα των πολλαπλών ανακλάσεων στα τοιχώματα (και άλλα αντικείμενα) ενός χώρου. Όταν το ηχητικό κύμα πέσει πάνω σε μια επιφάνεια, τότε ένα μέρος του απορροφάται από το υλικό (μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια) και ένα μέρος του ανακλάται (με γωνία ίση με τη γωνία πρόσπτωσης), ενώ υπάρχει και ένα ποσό που υφίσταται περίθλαση¹. Ο **συντελεστής ανάκλασης r** , αντιπροσωπεύει το ποσοστό εκείνο της προσπίπτουσας ενέργειας (για όλες τις δυνατές γωνίες πρόσπτωσης) που ανακλάται κατά την πρόσπτωσή του στο υλικό και επιστρέφει στο χώρο, δηλαδή:

$$r = \frac{Er}{Ei}, r \in [0,1] \quad (2)$$

όπου Er η ανακλώμενη ενέργεια από το υλικό και Ei η προσπίπτουσα σε αυτό ενέργεια.

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

$$\alpha = 1 - r, \text{ εφόσον } r + \alpha = 1 \quad (3).$$

Άρα για τον συντελεστή απορρόφησης α , θα ισχύουν τα εξής:

$0 \leq \alpha \leq 1$ και α : αδιάστατη ποσότητα, που εξαρτάται από το μήκος κύματος.

¹ Τα ηχητικά κύματα που ανακλώνται αλλάζουν γωνία κατεύθυνσης. Τα κύματα που περνούν γύρω από ένα εμπόδιο ή που το διαπερνούν (εξαιτίας, πχ. κάποιου ανοίγματος στο σώμα) έχουν τη δυνατότητα να κυρτώνονται και γεμίζουν τον χώρο πέρα του εμποδίου. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται περίθλαση. Περιγράφοντας το φαινόμενο της περίθλασης στον ακουστικό τομέα, αποτελεί είτε την κάμψη των ηχητικών κυμάτων γύρω από εμπόδια που διαταράσσουν την πορεία τους, ή τη διασπορά τους μέσα από ανοίγματα επιφανειών στις οποίες προσπίπτουν. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εμφάνιση περίθλασης, οι διαστάσεις των εμποδίων ή των ανοιγμάτων να είναι μικρές σε σύγκριση με τα μήκη κύματος της ηχητικής ακτινοβολίας. Όσο λοιπόν μικραίνει το μήκος κύματος, περιορίζεται η περίθλαση. Σε παραλληλισμό πάντα με τα οπτικά φαινόμενα, τα φαινόμενα περίθλασης ταξινομούνται σε δύο βασικές υποκατηγορίες ως προς το πεδίο επί του οποίου εξετάζονται:

- **Περίθλαση Fresnel (εγγύς πεδίου):** Το προσπίπτον κύμα και οι παραγόμενες συνιστώσες παρουσιάζουν σημαντική καμπυλότητα στο μέτωπό τους, οφειλόμενη στη μικρή απόσταση τόσο της πηγής όσο και της ζώνης παρατήρησης σε σχέση με το εμπόδιο. Αν μια σημειακή πηγή εκπέμπει κοντά σε σχισμή στερεού παραπετάσματος, το μοτίβο περίθλασης που θα παρατηρηθεί σε κοντινή επίπεδη ζώνη πίσω από τη σχισμή θα έχει την ίδια γενική κατατομή με τη σχισμή, ενώ θα διακρίνεται από εναλλακτική παράθεση ενεργειακών μέγιστων κι ελάχιστων στάθμων.
- **Περίθλαση Fraunhofer (μακρινού πεδίου):** Το μέτωπο του προσπίπτοντος κύματος όπως και των παραγομένων θεωρείται επίπεδο, εφόσον η πηγή και η ζώνη παρατήρησης (ανίχνευση της έντασης μέσω μικροφώνου) τίθενται σε μεγάλη απόσταση από το θεωρούμενο εμπόδιο. Το μοτίβο της παρατηρούμενης περίθλασης μακρινού πεδίου είναι ισοδύναμο με το μετασχηματισμό Fourier της ίδιας της σχισμής. Η αρχή λειτουργίας των διαχυτών Schroeder (βλ. σελ. 26) στηρίζεται σε αυτήν ακριβώς τη σημαντικότερη κατηγορία περίθλασης.

A.4. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ RT_{60} ΚΑΤΑ SABINE

Στη πρώτη σχέση για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης κατέληξε εμπειρικά ο Wallace Sabine το 1898. Ο Sabine κατάληξε στο συμπέρασμα ότι η αντήχηση ενός χώρου εξαρτάται από τον όγκο, τη γεωμετρία του και την ανακλαστικότητα των επιφανειών του. Η σχέση για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης στην οποία κατέληξε είναι:

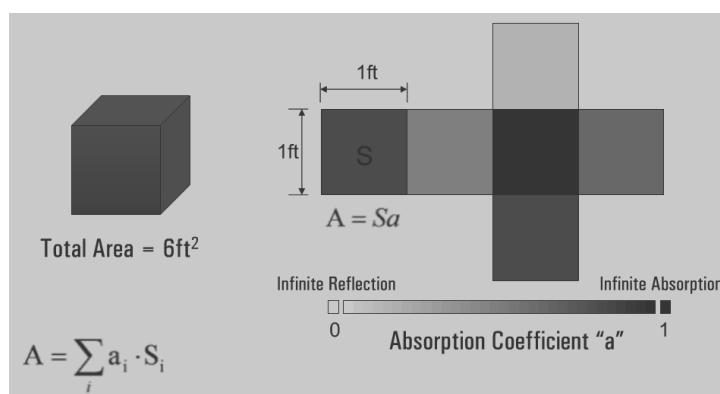
$$—, \text{ ή αλλιώς} \quad — \quad (4)$$

με απορρόφηση $A_s = Sa$ (σε Sabins ή m^2), a : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης του χώρου που παρουσιάζει απορρόφηση σε m^2 και V ο όγκος του χώρου σε m^3 . Στη σχέση του Sabine παρουσιάζεται μια μέση τιμή συντελεστή απορρόφησης γιατί μέσα σε έναν χώρο υπάρχει πληθώρα διαφορετικών υλικών, με διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης ο οποίος μάλιστα είναι διαφορετικός για κάθε συχνότητα και κάθε γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας του ήχου. Η μέση τιμή υπολογίζεται από το γινόμενο των επιμέρους συντελεστών απορρόφησης με την αντίστοιχη επιφάνεια τους διαιρεμένη με την συνολική επιφάνεια, δηλαδή:

$$————— (5)$$

με $S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n$, a_n είναι ο συντελεστής απορρόφησης των επιμέρους επιφανειών και S_n τα αντίστοιχα εμβαδά τους, με $n=1,2,3,\dots,n$. Δηλαδή κατά τον Sabine η απορρόφηση του χώρου (η οποία ονομάζεται και απορρόφηση δωματίου) δίνεται από τον αριθμητή της σχέσης (5) $A_s = S_1 a_1 + S_2 a_2 + S_3 a_3 + \dots + S_n a_n$.

Η σχέση του Sabine ισχύει ικανοποιητικά για $a \ll 1$, πχ. $a < 0,1$. Και αυτό γιατί τα πειράματα του Sabine με τα οποία οδηγήθηκε στην σχέση (4) έγιναν σε χώρο με μικρή απορρόφηση. Όσο μεγαλύτερος ο χώρος και χαμηλότερη η απορρόφηση τόσο περισσότερο διαρκεί η εξασθένηση. Αυτό είναι και ένα από τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται από την ανθρώπινη ακοή, σε συνδυασμό με το Initial Time Delay gap (ITD)² για τον προσδιορισμό του μεγέθους ενός χώρου.



ΣΧΗΜΑ 3: Συντελεστής ηχοαπορρόφησης του αέρα.

² Ο χρόνος ITDG (initial time delay gap) του control room είναι ο χρόνος μεταξύ του απευθείας σήματος (direct sound) και του χρόνου άφιξης της πρώτης έντονης ανάκλασης.

A.5. ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΚΑΤΑ NORRIS-EYRING

Οι Norris & Eyring παρουσίασαν μια πιο λεπτομερή μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς των μεγάλων χώρων, όπου ο χρόνος αντήχησης, με αρκετά καλή προσέγγιση δίνεται από τη σχέση:

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{[-S \ln(1-\alpha)]} \quad (6)$$

Δηλαδή ισχύει ότι:

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{A_{NE}} \quad (7)$$

με $A_{NE} = -S \ln(1-\alpha)$. Η σχέση των Norris & Eyring ισχύει και για $\alpha > 0,1$. Για πολύ μικρά α η σχέση του Sabine (4) δίνει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με τη σχέση (7), ενώ για μεγάλα α η απόκλιση στις τιμές είναι μεγάλη.

Γενικά για τεράστιους χώρους η σχέση του χρόνου αντήχησης κατά Sabine πρέπει να συμπληρωθεί με την απορρόφηση που οφείλεται στην απορρόφηση από τον αέρα και γίνεται:

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{A_{NE} + 4mV} \quad (8)$$

με m ο συντελεστής εξασθένησης στον αέρα (αδιάστατο μέγεθος).

Η παρουσία του παράγοντα $4mV$ που προστέθηκε στη σχέση γίνεται απαραίτητη στις συχνότητες από 2Khz και άνω.

A.6. ΣΧΕΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΚΑΤΑ FITZROY

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

- Για $\alpha \ll 0,1$ $RT_{60} = \left(\frac{S_x}{\alpha_x} + \frac{S_y}{\alpha_y} + \frac{S_z}{\alpha_z} \right) 0,161 \frac{V}{S^2} \quad (9)$

- Για $\alpha \gg 0,1$ $RT_{60} = \left(\frac{S_x}{\ln(1-\alpha_x)^{-1}} + \frac{S_y}{\ln(1-\alpha_y)^{-1}} + \frac{S_z}{\ln(1-\alpha_z)^{-1}} \right) 0,161 \frac{V}{S^2} \quad (10)$

Για ορθογώνιο ισχύει $S_x = 2X\Psi$, $S_y = 2XZ$, $S_z = 2\Psi Z$.

A.7. ΣΧΕΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΤΩΝ SETTE-MILLINGTON

Όταν σε ένα κλειστό χώρο υπάρχουν επιφάνειες με ιδιαίτερα μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ($\alpha > 0,63$), η σχέση (7) μπορεί να δώσει ως αποτέλεσμα συντελεστές απορρόφησης μεγαλύτερους της μονάδας. Στις περιπτώσεις αυτές, όπου δηλαδή υπάρχουν μεγάλες διαφορές στους συντελεστές απορρόφησης των διάφορων επιφανειών του χώρου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος των Sette & Millington που δίνει πάντα συντελεστή απορρόφησης μικρότερο της μονάδας:

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{A_M} \quad (11)$$

με $A_M = -[S_1 \ln(1-\alpha_1)^{-1} + S_2 \ln(1-\alpha_2)^{-1} + \dots]$ άρα κατά τους Sette-Millington η σχέση για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης ενός χώρου είναι:

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{\sum_i (S_i \ln(1-\alpha_i)^{-1})} \quad (12)$$

A.8. EDT (EARLY DECAY TIME)

Για τη διαμόρφωση της ακουστικής των κλειστών χώρων, η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια που αντιστοιχεί στις πρώτες ανακλάσεις του ήχου, είναι αυτή που παίζει ουσιαστικό ρόλο, διότι οι καθυστερημένες ανακλάσεις έχουν χάσει αρκετή από την ενέργεια που μεταφέρουν και δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην ακουστική του χώρου. Στις περισσότερες περιπτώσεις συμβαίνει η κλίση του ρυθμού πτώσης της ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας να μην είναι ομαλή. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο **πρώιμος ρυθμός μείωσης EDT (early decay time)**. Ο χρόνος αυτός λαμβάνει υπόψη του τις πρώτες ανακλάσεις (early decay) και ορίζεται ως έξι φορές η χρονική περίοδος που χρειάζεται ώστε ο ήχος να μειωθεί κατά 10dB μετά το μηδενισμό της πηγής. Ο EDT είναι φυσικά μικρότερος από τον RT_{60} και σχετίζεται με την υποκειμενική αίσθηση «ζωντάνιας» του χώρου.

A.9. RT_{10} , RT_{20} , RT_{30}

Υπάρχουν και κάποιο άλλοι χρόνοι που μελετώνται ανάλογα με την περίπτωση. Ο χρόνος RT_{30} ορίζεται ως δύο φορές ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο ήχος να ελαττωθεί από -5 έως -35dB μετά το μηδενισμό της πηγής από την αρχική τιμή. Με ανάλογο τρόπο ορίζονται και οι χρόνοι RT_{10} και RT_{20} . Ο RT_{20} είναι τρεις φορές ο χρόνος που απαιτείται για τη πτώση του ήχου από -5 έως -25dB και ο RT_{10} είναι έξι φορές ο χρόνος που απαιτείται για τη πτώση του ήχου από -5 έως -15dB. Όλοι οι παραπάνω χρόνοι ορίζονται όπως και ο RT_{60} για κάθε συχνότητα. Ο χρόνος RT_{30} λέγεται και **ERT (extended reverberation time)**. Αν το αντηχητικό πεδίο είναι διάχυτο (βλ. σελ. 15), τότε όλοι οι παραπάνω χρόνοι είναι ίσοι (ιδανική περίπτωση, μη πραγματική).

A.10. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Παρακάτω δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές που πρέπει να ισχύουν για το χρόνο αντήχησης, ανάλογα με το είδος του δωματίου:

Είδος Χώρου	Χρόνος Αντήχησης
Καθιστικός χώρος (living room)	0.5sec
Μικρά δωμάτια για σολιστική μουσική και μουσική δωματίου	1.0sec
Ορατόρια, καθεδρική ναοί, για οργανική μουσική	2.5sec
Χώροι όπου εκτελείται κλασική μουσική (baroque)	1.0-1.4sec
Χώροι όπου εκτελείται ορχηστρική μουσική του 19 ^{ου} αιώνα	2.0sec
Χώροι ηχογράφησης κυρίως μη-κλασικής μουσικής (rock, pop, country, western), τηλεοπτικά στούντιο.	Όσο μικρότερος γίνεται
Control rooms	0.2-0.4sec
Εκπαιδευτικοί χώροι	0.75sec

A.11. ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ

Όταν δύο σφαιρικά κύματα φτάνουν ταυτόχρονα σε κάποιο σημείο του χώρου, τότε αυτά συμβάλλουν και κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις σχηματίζονται στάσιμα κύματα (κύματα που ουσιαστικά μένουν στην ίδια θέση παρουσιάζοντας κορυφώσεις και βυθίσεις του πλάτους τους). Μια ηχητική πηγή βρίσκεται σε έναν κλειστό χώρο, τότε σε κάθε σημείο, η ηχητική πίεση είναι το άθροισμα της ηχητικής πίεσης που προέρχεται από τη πηγή και αυτών που προέρχονται από διάφορες ανακλάσεις. Όπως ακριβώς στα τελείως ανακλαστικά κλειστά άκρα ενός σωλήνα θα δημιουργηθούν στάσιμα κύματα, έτσι και όσων αφορά την ακουστική κλειστών χώρων, θα εμφανιστούν στάσιμα κύματα (στον τρισδιάστατο χώρο), όπου αντί για τα κλειστά άκρα είναι οι έξι τοίχοι. Όταν ο ήχος ανακλάται με την ίδια πιθανότητα από όλες τις επιφάνειες των τοίχων του χώρου (πρόκειται για ιδανική περίπτωση) τότε το πεδίο που σχηματίζεται ονομάζεται **διάχυτο πεδίο**. Τα στάσιμα κύματα λαμβάνουν την ονομασία τους ακριβώς από τη στατικότητα στην κατανομή των πιέσεων του αέρα και των ταχυτήτων που συνεπάγονται εντός του χώρου.

Από την πλευρά της Γεωμετρικής Ακουστικής τα στάσιμα κύματα δεν ανακλώνται σε κάθε επιφάνεια με την ίδια πιθανότητα. Αντιθέτως, κινούνται μεταξύ κάποιων συγκεκριμένων επιφανειών (δρόμων). Δεν προσπίπτουν στους τοίχους σε τυχαίες γωνίες. Αντιθέτως, συγκεκριμένες γωνίες εμπλέκονται στο σχηματισμό των στάσιμων κυμάτων. Όταν το σχήμα του χώρου είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο οι συχνότητες εμφάνισης στάσιμων κυμάτων δίνονται από τη σχέση:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{(n_x/L_x)^2 + (n_y/L_y)^2 + (n_z/L_z)^2} \quad (13)$$

(c:ταχύτητα του ήχου (m/s), L_x , L_y , L_z :διαστάσεις του χώρου στους αντίστοιχους άξονες και n_x , n_y , n_z : τάξη του στάσιμου κύματος στον αντίστοιχο άξονα). Επίσης στις παραπάνω συχνότητες θεωρείται ότι συμβαίνει ένας συντονισμός ή ότι υπάρχει ένας τρόπος δόνησης ή ένας τρόπος ταλάντωσης (resonance mode). Η ύπαρξη στάσιμων κυμάτων γενικά «χρωματίζει» το χώρο και επηρεάζει τη συμπεριφορά του, γεγονός που ειδικά για ένα control room θεωρείται ανεπιθύμητο.

A.12. ΑΞΟΝΙΚΟΙ/ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΟΙ/ΠΛΑΓΙΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΔΟΝΗΣΗΣ

Οι κύριοι τρόποι δόνησης – **ιδιορυθμοί (modes)** για κλειστό χώρο σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου είναι τρεις:

Οι **αξονικοί (axial)** τρόποι δόνησης, οι οποίοι είναι παράλληλοι σε κάποια διάσταση και σχηματίζονται από διαδοχικές ανακλάσεις σε ζεύγη παράλληλων επιφανειών. Τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις $(n_x, 0, 0)$ ή $(0, n_y, 0)$ ή $(0, 0, n_z)$, όπου $n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$

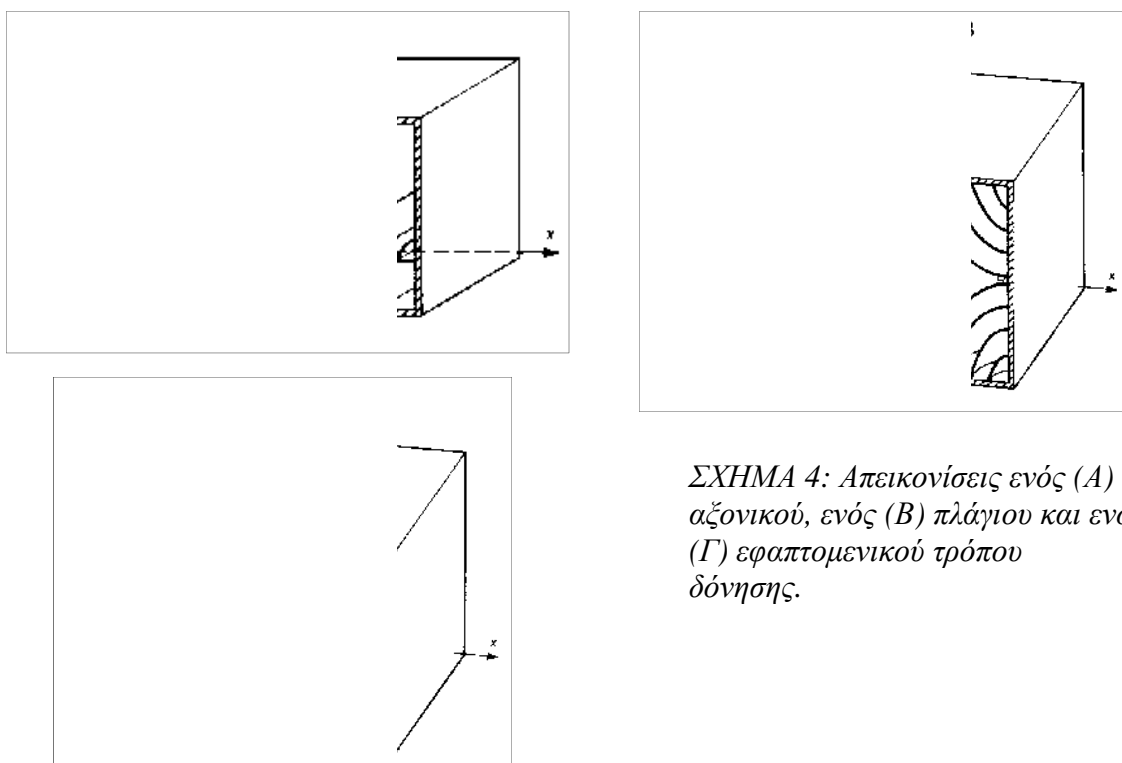
Οι **εφαπτομενικοί (tangential)** τρόποι δόνησης οι οποίο εμφανίζονται όταν υπάρχει ανάκλαση του ήχου και δημιουργία στάσιμων κυμάτων σε δύο ζεύγη παράλληλων επιφανειών (ανάμεσα σε τέσσερις τοίχους του δωματίου). Με τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις: $(n_x, n_y, 0)$ ή $(n_x, 0, n_z)$ ή $(0, n_y, n_z)$, όπου $n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$

Οι **πλάγιοι (oblique)** τρόποι δόνησης όπου σχηματίζονται μετά από διαδοχικές ανακλάσεις σε τρία ζεύγη παράλληλων επιφανειών (ανάμεσα και στους έξι (6) τοίχους του δωματίου). Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε κάποιον από τους παρακάτω τρόπους: (n_x, n_y, n_z) με $n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$

Γενικά ισχύει:

ΤΡΟΠΟΣ ΔΟΝΗΣΗΣ	ΠΛΗΘΟΣ ΑΝΑΚΛΑΣΕΩΝ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΣΤΑΘΜΗ
AXIAL	2 επιφάνειες	1	0 dB
TANGENTIAL	4 επιφάνειες	$\frac{1}{2}$	-3 dB
OBLIQUE	6 επιφάνειες	$\frac{1}{4}$	-6 dB

Φυσικά ο παραπάνω πίνακας δεν ισχύει για όλες τις περιπτώσεις, εφόσον σε περίπτωση ανώμαλης κατανομής των απορροφητικών υλικών στις διάφορες επιφάνειες ανάλογα με τα απορροφητικά υλικά του κάθε τοίχου, μπορεί να τύχει ένας εφαπτομενικός τρόπος ταλάντωσης να είναι εντονότερος από έναν αξονικό.



ΣΧΗΜΑ 4: Απεικονίσεις ενός (Α) αξονικού, ενός (Β) πλάγιου και ενός (Γ) εφαπτομενικού τρόπου δόνησης.

A.13. ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΙ ΕΝΟΣ ΧΩΡΟΥ

Το πλήθος των συντονισμών ενός χώρου αυξάνεται με τη συχνότητα και τις διαστάσεις του χώρου. Η παρακάτω εξίσωση υπολογίζει το πλήθος των στάσιμων κυμάτων N ανά συχνότητα f :

$$N \approx \frac{4\pi Vf^3}{3c^3} + \frac{\pi(Sf^2)}{4c^2} + \frac{Lf}{8c} \quad (14)$$

N : πλήθος συντονισμών, f : συχνότητα (Hz), c : ταχύτητα του ήχου στον αέρα³, V : όγκος (m^3), S : συνολική επιφάνεια, L : συνολική περιμετρική απόσταση δωματίου. Άρα το πλήθος των τρόπων δόνησης ενός χώρου αυξάνεται με τη συχνότητα και τις διαστάσεις του χώρου.

Έστω λοιπόν ότι σε ένα μικρό χώρο υπάρχει πηγή που εκπέμπει ήχο σε μια μόνο συχνότητα. Αμέσως σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Έστω ότι η συχνότητα της πηγής είναι κοντά στη συχνότητα ενός τρόπου δόνησης. Η στάθμη του ήχου αυξάνεται μέχρι η μέση τιμή της πίεσης να φτάσει την τιμή:

$$|p_n| = \frac{2K\omega}{\sqrt{4\omega_n^2 K_n^2 (\omega^2 - \omega_n^2)^2}} \quad (15)$$

K : σταθερά που εξαρτάται από την ακουστική ισχύ της πηγής, K_n : σταθερά που εξαρτάται από την απορρόφηση του χώρου και ισχύει ότι $K_n = 6,91/RT_{60}$, ω : η συχνότητα της πηγής και ω_n : η συχνότητα του τρόπου δόνησης. Η στάθμη πίεσης παίρνει τη μέγιστη τιμή όταν η συχνότητα της πηγής είναι ίδια με τη συχνότητα συντονισμού.

A.14. ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Ο λόγος για τον οποίο οι πρώτες ανακλάσεις εκτιμώνται ως οι πιο καταστροφικές στους χώρους ακρόασης (control rooms), βασίζεται στο **φαινόμενο προτεραιότητας**. Τα ηχητικά κύματα που καταφτάνουν από ανάκλαση στο ανθρώπινο ακουστικό σύστημα εντός των πρώτων 50χιλιοστών δευτερολέπτου από την εκπομπή του άμεσου ήχου, γίνονται αντιληπτά ως προερχόμενα από την ίδια αρχική πηγή με αποτέλεσμα να υπάρχει υπέρθεση των δύο ξεχωριστών κυματομορφών. Η επιφάνεια του τοίχου που αντιστοιχεί στην πρώτη ανάκλαση, διαμορφώνει ακουστικό είδωλο πρώτης τάξης για την πηγή. Εκτός του γεγονότος ότι το ανακλώμενο σήμα βρίσκεται σε διαφορά φάσης ως προς το άμεσο, έχει επιπλέον και διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο. Κατά τη διαδικασία της ανάκλασης, μειώνεται η ενέργεια συγκεκριμένων συχνοτικών ζωνών σε μεγαλύτερο βαθμό από τις υπόλοιπες, εξαρτώμενο από τη γωνία πρόσπτωσης και τη δομή/μορφολογία του υλικού της επιφάνειας. Αυτός ο συνδυασμός των δύο κυμάτων στα ακουστικά κέντρα του εγκεφάλου οδηγεί σε φαινόμενα κτενωτού φίλτρου με επερχόμενη αλλοίωση της αντίληψης για το σήμα που εκπέμπουν πρωτογενώς τα ηχεία. Χρησιμοποιώντας ισχυρές απορροφητικές επιφάνειες ή/και διατάξεις που διασπείρουν τα ηχητικά κύματα προς διάφορες κατευθύνσεις (**διαχυτές**) στη θέση πρώτης ανάκλασης καθεμίας επιφάνειας του δωματίου ως προς κάθε ηχείο, μειώνεται η καταστροφική αλληλεπίδραση μεταξύ των ζευγών κυμάτων (άμεσου-ανακλώμενου). Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιδιώκεται η προσομοίωση της ακουστικής αντίληψης ενός μικρομεσαίου

³ Με βάση ότι η ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων στον αέρα είναι περίπου 340m/s σε συνθήκες δωματίου (θερμοκρασία 20° C και πίεση 1Atm).

δωματίου με την αντίστοιχη που δημιουργεί το πεδίο διάχυσης ενός μεγάλου κλειστού χώρου. Ένα πεδίο διάχυσης θεωρείται πως αναπτύσσεται από την υπέρθεση άπειρου αριθμού επιπέδων κυμάτων που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Ανάλογο αυτής της θεώρησης είναι ένας ήχος που έχει ανακλαστεί πολλαπλές φορές από επίπεδα τοιχώματα.

Όταν ένα κλειστό δωμάτιο διεγείρεται από ηχητικό σήμα, η ηχητική ενέργεια ανακλάται από τις επιφάνειές του. Μέρος αυτής απορροφάται σε καθεμία ανάκλαση, με αποτέλεσμα να εξασθενεί με εκθετικό ρυθμό. Στην ιδανική κατάσταση, το κύμα θα έπρεπε να έχει την ίδια πιθανότητα ανάκλασης από κάθε διαθέσιμη επιφάνεια σχηματίζοντας έτσι ένα πεδίο διάχυσης. Το γεγονός αυτό θα οδηγούσε σε μοναδική εκθετική εξασθένηση με χρονική σταθερά ανάλογη του μέσου όρου απορρόφησης των επιφανειών του. Στην πράξη όμως μέρος της ηχητικής ενέργειας δεν ανακλάται σε τυχαίο μοτίβο, αλλά σε κυκλικές διαδρομές. Προκύπτουν έτσι στάσιμα κύματα όπως περιγράφονται παραπάνω. Δεν συναντούν όλες τις επιφάνειες του χώρου, μονάχα υποσύνολα των επιφανειών. Επίσης ούτε η γωνία πρόσπτωσης σε αυτές ποικίλλει. Συνεπάγεται συμπαγή επιστροφή ενέργειας πίσω στην αρχική επιφάνεια αντί τα κύματα να διασπείρονται, ανταποκρινόμενα σε συγκεκριμένες συχνοτικές συνιστώσες που καθορίζονται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου. Όλες οι προαναφερθείσες ιδιότητες είναι ανεπιθύμητες καθώς συνεπάγονται έντονη μεταβολή στο επίπεδο ηχητικής πίεσης (αντί για ομοιογένεια) καθώς ο ακροατής μεταβαίνει σε διαφορετικές θέσεις στο χώρο.

Όταν ένα ηχητικό κύμα πέσει πάνω σε ένα τοίχο ή γενικά σε κάποια επιφάνεια διαχωρισμού δύο μέσων, ένα μέρος από την ενέργεια που μεταφέρει ανακλάται, ενώ ένα άλλο μέρος απορροφάται ή διαδίδεται μέσω του τοίχου από την άλλη πλευρά. Επομένως η απορρόφηση του ήχου από τα τοιχώματα παίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στην ακουστική των χώρων. Η απορρόφηση από μια επιφάνεια ενός συγκεκριμένου υλικού οφείλεται σε δύο φαινόμενα:

- Καθώς το ηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό που είναι συνήθως πορώδες, το μέσο διάδοσης (συνήθως ο αέρας) κατά την εκτέλεση των ταλαντώσεων λόγω τριβών με το υλικό χάνει ενέργεια με αποτέλεσμα τη μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμική.
- Το ηχητικό κύμα διεγείρει προς ταλάντωση (και συνεπώς προσφέρει ενέργεια) τα μόρια του απορροφητικού υλικού, οπότε η ενέργεια του ηχητικού κύματος μειώνεται.

A.15. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ

Υπάρχει επίσης και ο **συντελεστής μείωσης θορύβου** (NRC, Noise Reduction Coefficient), ο οποίος ορίζεται ως ο μέσος συντελεστής απορρόφησης σε τέσσερις οκτάβες, από 125 έως 1000 Hz.

$$NRC = \frac{\alpha_{125} + \alpha_{205} + \alpha_{500} + \alpha_{1000}}{4} \quad (16)$$

Όπου α οι συντελεστές απορρόφησης με δείκτη τους τις συγκεκριμένες συχνότητες. Το NRC χρησιμοποιείται κυρίως για τη σύγκριση των ακουστικών ιδιοτήτων των διάφορων υλικών.

A.16. ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ

Κατά την πρόσκρουση ηχητικού κύματος σε τοίχωμα καλυμμένο από απορροφητικό υλικό, ένα ποσοστό αυτού ανακλάται από την επιφάνεια του υλικού (χωρίς να αντιστρέφεται η φάση του) ενώ ένα μικρό κομμάτι (σημαντικότερο για τις υψηλότερες συχνοτικές συνιστώσες) απορροφάται από τον αέρα μετατρέπόμενο σε θερμική ενέργεια. Τα ηχοαπορροφητικά υλικά χρησιμοποιούνται όταν πρέπει να μειωθεί η στάθμη της ηχητικής έντασης του ήχου, ο οποίος παράγεται μέσα στον ίδιο το χώρο, ή όταν πρέπει να ρυθμιστεί η συνολική ηχοαπορρόφηση του χώρου για τη δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών ακρόασης. Σε χώρους, όπου απαιτούνται πολύ υψηλά ποσοστά ηχοαπορρόφησης, όλες σχεδόν οι επιφάνειες καλύπτονται με ισχυρά ηχοαπορροφητικά υλικά για όλη την περιοχή των συχνοτήτων έτσι ώστε να είναι δυνατόν ο ανακλώμενος ήχος σχεδόν να εξαλειφθεί. Τα απορροφητικά υλικά μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα πορώδη απορροφητικά υλικά, τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης και τους συντονιστές. Οι παραπάνω απορροφητές λειτουργούν μέσω της απευθείας μετατροπής της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα και για αυτόν το λόγο ονομάζονται και παθητικοί απορροφητές.

A.17. ΠΟΡΩΔΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Σε αυτή την κατηγορία η απορρόφηση επιτυγχάνεται μέσω των δυνάμεων τριβής που μετατρέπουν την ηχητική ενέργεια (ανεπιθύμητη) σε θερμότητα. Απορρόφηση υπάρχει και λόγω της απώλειας ενέργειας στους πόρους του υλικού, λόγω της τριβής του αέρα. Η τριβή είναι ανάλογη της δυναμικής πίεσης του κινούμενου αέρα, επομένως τα πορώδη υλικά προκαλούν μεγαλύτερη απορρόφηση όταν βρίσκονται σε θέσεις όπου η ταχύτητα των σωματιδίων του ηχητικού κύματος είναι μέγιστη. Όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε ανένδοτη επιφάνεια (πχ. μπετόν) δημιουργούνται στάσιμα κύματα. Σε αποστάσεις από την επιφάνεια $\lambda/4$, $3\lambda/4$ κτλ. Όπου λ το μήκος του προσπίπτοντος κύματος, εκεί η ταχύτητα της ταλάντωσης παίρνει τη μέγιστή τιμή της. Άρα, όταν το πορώδες υλικό τοποθετείται σε επαφή με μια ανακλαστική επιφάνεια, όπου η ταχύτητα των σωματιδίων είναι μικρή, η απορρόφηση είναι αμελητέα. Αντιθέτως, μεγάλη απορρόφηση επιτυγχάνεται όταν το ίδιο υλικό τοποθετείται σε απόσταση $\lambda/4$ από την επιφάνεια. Για παράδειγμα, ένα χαλί που τοποθετείται αναγκαστικά σε επαφή με το πάτωμα θα απορροφά καλύτερα τις υψηλές συχνότητες των οποίων τα τέταρτα μήκους κύματος θα είναι συγκρίσιμα με το πάχος του πέλους του χαλιού (πορώδης επιφάνεια). Άλλες επιφάνειες στο μέσο δωμάτιο ακρόασης θα εμφανίζουν φυσικά διαφοροποιημένη απορρόφηση ως προς τη συχνοτική ζώνη και το ποσοστό.

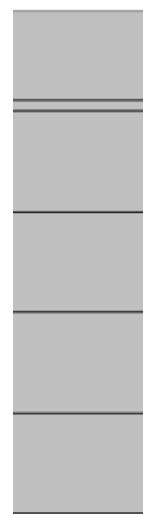
Η τιμή του συντελεστή απορρόφησης για ένα απορροφητικό υλικό τοποθετημένο μπροστά από μια ανένδοτη επιφάνεια σε απόσταση d από αυτήν, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R_f}{d} = \frac{\Delta p}{u} \quad (17)$$

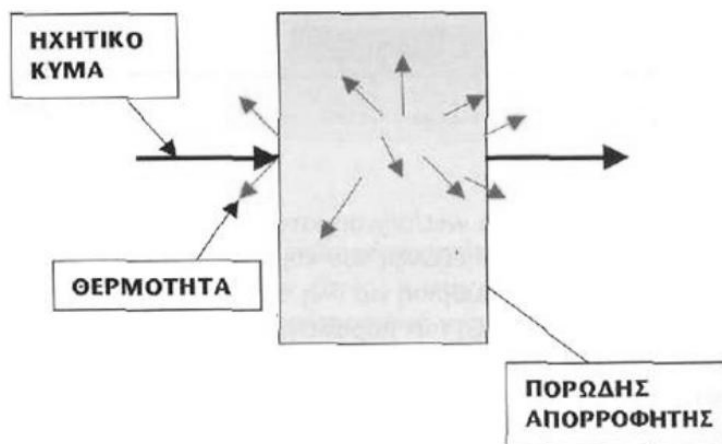
όπου R_f η αντίσταση ροής που δίνεται από τον τύπο $R_f = \Delta p / u$ και Δp η διαφορά πίεσης στις δύο επιφάνειες του υλικού και u η ταχύτητα των σωματιδίων, f η συχνότητα, c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και ρ η πυκνότητα του αέρα.

Για την αποτελεσματική απορρόφηση του ήχου θα πρέπει ο συντελεστής ανάκλασης των υλικών να είναι μικρός. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο μικρή διαφορά έχουν οι εμπεδήσεις του αέρα του υλικού, τόσο μικρότερη η ανάκλαση και συνεπώς μεγαλύτερη η διάδοση. Η πυκνότητα αυτών των υλικών θα πρέπει να είναι μικρή, πρακτικά δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα και η διάμετρος των πόρων να είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου γεγονός που καθιστά τους πορώδη απορροφητές αποδοτικότερους στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες (πχ. υαλοβάμβακας).

Τα πορώδη απορροφητικά υλικά που βρίσκουν χρήση ως απορροφητές του ήχου, είναι συνήθως ινώδη υλικά με τη μορφή ταμπλό, αφρού, υφασμάτων και χαλιών. Στην περίπτωση που οι ίνες είναι πολύ αραιές δεν υπάρχει μεγάλη απορρόφηση μιας και η ενέργεια που χάνεται ως θερμότητα είναι λίγη. Από την άλλη πλευρά, αν οι ίνες του υλικού είναι πολύ πυκνές, δεν υπάρχει εισχώρηση του ήχου και η κίνηση του αέρα δεν μπορεί να προκαλέσει τόσο μεγάλη τριβή ώστε να είναι αποτελεσματική. Η επίστρωση μοκέτας στο δάπεδο αυξάνει την ηχοαπορροφητικότητα κατά 0,85% σε σύγκριση με αυτή που παρουσιάζει ένα δάπεδο από γυμνό ξύλο. Οι μοκέτες είναι μια αρκετά οικονομική λύση που έχει εύκολη εφαρμογή καθώς αρκεί το μέτρημα και το κόλλημα με τη χρήση ασταριού και ειδικής κόλλας. Συνεπώς, η αποτελεσματικότητα ενός απορροφητικού υλικού εξαρτάται από το πάχος του υλικού, το μέγεθος των πόρων και από την πυκνότητα των ινών του υλικού. Τέλος, η απορροφητική ικανότητα στα πορώδη υλικά εξαρτάται από τη συχνότητα και αυξάνει με αυτήν.



ΣΧΗΜΑ 5: Τυπικός συντελεστής απορρόφησης ενός πορώδους υλικού.



ΣΧΗΜΑ 6: Πως λειτουργούν τα πορώδη απορροφητικά υλικά.



ΣΧΗΜΑ 7: Πορώδη απορροφητικά υλικά.

Α.18. ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Αυτά τα απορροφητικά υλικά συνήθως αποτελούνται από μια λεπτή μεμβράνη (πχ. ύφασμα), που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από κάποιο σκληρό υλικό (πχ. τοίχος). Όταν ο ήχος προσπίπτει στη μεμβράνη τότε τη διεγείρει σε ταλάντωση και η απώλεια της ηχητικής ενέργειας οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού. Για χαμηλότερες συχνότητες, ο συντελεστής απορρόφησης αυτών των υλικών είναι μεγάλος, με μέγιστο στην περιοχή που συμπίπτει με τη φυσική συχνότητα ταλάντωσης της μεμβράνης. Καθώς αυτά τα υλικά ταλαντώνονται, η συχνότητα συντονισμού τους και άρα η συχνότητα κατά την οποία η απορρόφηση μεγιστοποιείται δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f = \frac{c}{4L} \quad (18)$$

όπου m η μάζα του υλικού ανά μονάδα επιφάνειας (kg/m^2), L η απόσταση από τον τοίχο (m), ρ η πυκνότητα του αέρα και c η ταχύτητα του αέρα.

Τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης έχουν τις εξής ιδιότητες:

- Όσο πιο λεπτό το απορροφητικό υλικό, τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση διότι δονείται πιο εύκολα ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο απορροφητής, τόσο μεγαλύτερη είναι και η

ακαμψία του, κατ' επέκταση περιορίζεται η δυνατότητα ταλάντωσης της μεμβράνης, συνεπώς μικραίνει η απορροφητική του ικανότητα.

- Οι συχνότητες τις οποίες απορροφούν αυτού του είδους οι απορροφητές είναι μεταξύ 50 και 500Hz. Τα μέγιστα της απορρόφησης βρίσκονται κάτω από τα 300Hz και μετακινούνται σε χαμηλότερες συχνότητες καθώς το βάρος του υλικού αυξάνει.
- Αν τοποθετηθεί πορώδες υλικό πίσω από το απορροφητικό τύπου μεμβράνης, η αποτελεσματικότητά τους αυξάνει.
- Το βάρος των απορροφητών τύπου μεμβράνης είναι συνήθως 3 έως 5 Kg/m². Οι μεμβράνες χαμηλού βάρους χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ακουστικής ενώ αυτές μεγαλύτερου βάρους είναι πολύ αποτελεσματικές για ηχομόνωση.



ΣΧΗΜΑ 8: Απορροφητικά υλικά τύπου μεμβράνης.

A.19. ΔΙΑΤΡΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Οι διάτρητες επιφάνειες είναι μια μορφή συντονιστών και χρησιμοποιούνται συχνά για την απορρόφηση του ήχου τόσο σε κλειστούς χώρους όσο και σε ανοιχτούς. Οι διάτρητες επιφάνειες είναι φύλλα υλικού διάτρητα με οπές ή σχισμές, τα οποία τοποθετούνται σε απόσταση από την επιφάνεια στήριξης. Κάθε οπή ή σχισμή λειτουργεί σαν αντηχείο Helmholtz. Η συχνότητα συντονισμού των διάτρητων επιφανειών δίνεται από την παρακάτω σχέση, τη σχέση του Helmholtz:

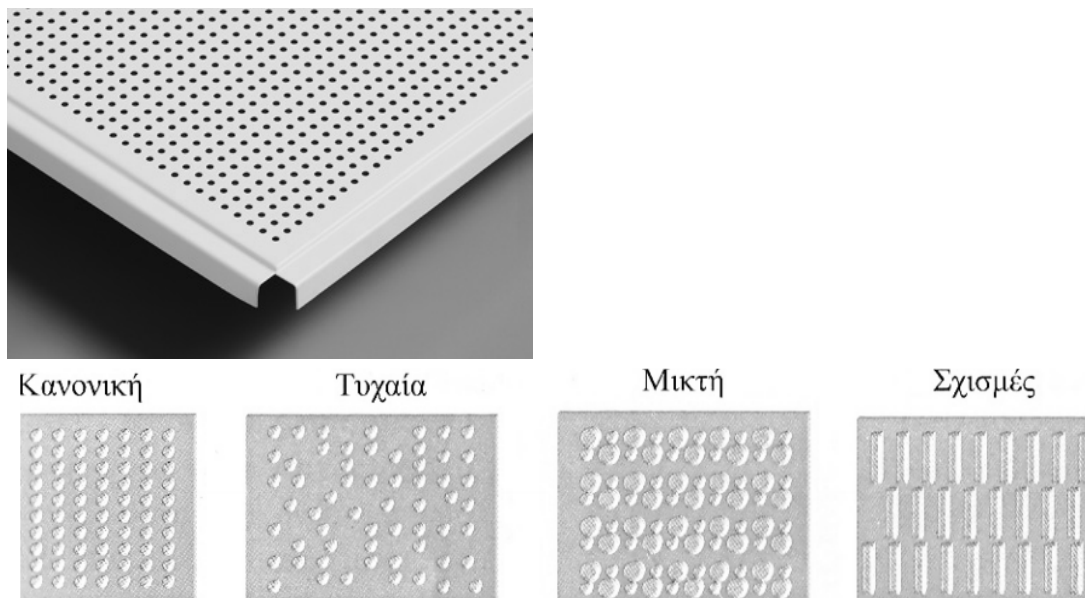
$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{V}}$$

όπου s το εμβαδόν του λαιμού της οπής, l το μήκος του λαιμού και V ο όγκος της κοιλότητας.

Όταν είναι επιθυμητό να υπάρξει μέγιστη απορρόφηση σε διαφορετικές συχνότητες, χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερα είδη διατρήσεων στην ίδια επιφάνεια ή σε διαφορετικές επιφάνειες. Με τη προσθήκη του απορροφητικού υλικού κάτω από τη διάτρητη επιφάνεια, πλαταίνει η καμπύλη συντονισμού. Η διάτρηση μπορεί να είναι συμμετρική ή τυχαία. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το ποσοστό της διάτρησης να μην υπερβαίνει το 20%, γιατί τότε η επιφάνεια είναι διαφανής ως προς τον τοίχο.

Αυτοί οι τύποι απορροφητών κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως κόντρα πλακέ, τα hardboard, λαμαρίνα κα. Η ηχοαπορρόφηση οφείλεται, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, στη λειτουργία του συστήματος μάζας-ελατηρίου. Πάλι το

στρώμα του αέρα, που βρίσκεται μεταξύ του διάτρητου φύλλου και της επιφάνειας στήριξης, λειτουργεί ως ελατήριο, αλλά ως μάζα λειτουργεί βασικά η μάζα του αέρα, ο οποίος βρίσκεται μέσα στις οπές ή στις σχισμές. Οι διάτρητες επιφάνειες παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ηχοαπορρόφηση στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, μέτρια στις υψηλές και μικρή στις χαμηλές συχνοτήτες.



ΣΧΗΜΑ 9: Διάφοροι τύποι διάτρητων επιφανειών.

A.20. ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΕΣ

Ένας συντονιστής (ή συνηχητής) είναι ουσιαστικά μια κοιλότητα μέσα σε κάποιο υλικό. Όταν ο ήχος πέσει στο στόμιο της κοιλότητας διεγείρει τον αέρα που βρίσκεται μέσα στο συντονιστή και η απώλεια ενέργειας οφείλεται και πάλι στις αποσβέσεις των ταλαντώσεων λόγω των τριβών. Ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών αυτών έχει ένα οξύ μέγιστο γύρω από μια συχνότητα, την συχνότητα συντονισμού f_0 , που βρίσκεται συνήθως στις χαμηλές συχνοτήτες, ενώ για τις υπόλοιπες συχνοτήτες είναι σχεδόν μηδέν. Με την προσθήκη απορροφητικού υλικού στο εσωτερικό των κοιλότητων πλαταίνει η καμπύλη συντονισμού και το μέγιστο μειώνεται. Η συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας δίνεται από την σχέση (19). Ο συντονιστής συμπεριφέρεται όπως το σύστημα ελατήριο – μάζα και ενδείκνυται για χώρους όπου υπάρχουν τόνοι χαμηλής συχνότητας. Το φύλλο του υλικού ενεργεί ως μάζα και το στρώμα του αέρα μεταξύ του φύλλου και της επιφάνειας στήριξης ως ελατήριο. Ο συντονιστής εκπέμπει ξανά τον ήχο στο χώρο, ο οποίος ήχος όμως δεν είναι ακουστός διότι ο ρυθμός μείωσης του είναι μεγαλύτερος από αυτόν του δωματίου. Οι επανεκπεμπόμενοι ήχοι είναι ακουστοί μόνο σε ανοικτό χώρο. Οι συντονιστές εμφανίζουν πολύ καλή απορρόφηση στη ζώνη συχνότητας συντονισμού τους (κατά κανόνα χαμηλές) αλλά φτωχή στις υπόλοιπες.

A.21. ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΟΠΕΣ

Η συχνότητα συντονισμού για τις κυκλικές οπές δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(1-\delta)}} \quad (20)$$

όπου P το ποσοστό διάτρησης, L η απόσταση της επιφάνειας από τον τοίχο, l το μήκος του λαιμού κάθε οπής και $\delta=0.8d$ όπου d η διάμετρος του λαιμού.

A.22. ΣΧΙΣΜΕΣ

Η συχνότητα συντονισμού για τις σχισμές δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(1+Kb)}} \quad (21)$$

όπου $K = \frac{1}{\pi} + \frac{2}{\pi} \ln \frac{2a}{b}$ για την περίπτωση σχισμών πεπερασμένου μήκους και $K = \frac{2}{\pi} \ln \operatorname{cosec} \frac{P\pi}{2}$ για τη περίπτωση σχισμών άπειρου μήκους.

Οι διάτρητες επιφάνειες είναι στην ουσία ένας συνδυασμός των δύο τύπων απορροφητών που αναφέρθηκαν παραπάνω και των συντονιστών (και συνήθως στο εσωτερικό ενός συντονιστή υπάρχει απορροφητικό υλικό). Η διάτρητη επιφάνεια λειτουργεί ως απορροφητής τύπου μεμβράνης, οι οπές σαν συντονιστές και το ενδιάμεσο υλικό σαν πορώδης απορροφητής. Οι οπές μειώνουν την απόδοση της μεμβράνης στις χαμηλές συχνότητες και την ενισχύουν στις μεσαίες. Επίσης μειώνουν την απόδοση των πορώδων υλικών στις υψηλές συχνότητες. Η απόδοση στις υψηλές συχνότητες βελτιώνεται με την επιλογή οπών μικρής διαμέτρου.

A.23. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ

Οι ηλεκτρονικοί απορροφητές που ονομάζονται και ενεργητικοί απορροφητές, έχουν σαν αρχή λειτουργίας τους την ακύρωση του ήχου με εκπομπή άλλου ήχου με αντίθεση φάσης προς το αρχικό.

Τέλος, υπάρχουν χρήσιμοι χάρτες οι οποίοι δείχνουν τους συντελεστές απορρόφησης για διάφορα υλικά (απορροφητικά) και επιφάνειες που συνήθως χρησιμοποιούνται για σχετικούς λόγους. Στο παράρτημα (σελ. 109) στο σχήμα 10 υπάρχουν σχετικοί πίνακες.

A.24. ΜΠΑΣΟΠΑΓΙΔΕΣ

Οι γωνίες των δωματίων αποτελούν σημεία συσσώρευσης στάσιμων κυμάτων. Οι μπασοπαγίδες αποτελούν ικανοποιητική παθητική λύση στην προσπάθεια διευθέτησης προβλημάτων στην απόδοση των χαμηλών συχνοτήτων εντός μικρών χώρων ακρόασης. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην απορρόφηση χαμηλών συχνοτικών συνιστωσών και διακρίνονται σε διαφορετικούς τύπους. Τοποθετούμενες σε σημεία κορυφώσεων, μειώνουν την ενέργεια αυτών απορροφώντας χαμηλές συχνοτικές συνιστώσες που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες επίμαχες ζώνες. Παράλληλα οι κατάλληλες τοποθετήσεις τους μειώνουν έμμεσα την ενέργεια των παλινδρομικών ανακλάσεων για τις χαμηλές συχνοτικές συνιστώσες και κατά

συνέπεια το βαθμό των ακυρώσεων από τις εκτός φάσης αλληλεπιδράσεις των κυμάτων. Αν και λέγονται μασοπαγίδες, ουσιαστικά αυξάνουν την ποσότητα και ποιότητα των αντιλαμβανόμενων μπάσων του συστήματος εξομαλύνοντας σε συγκεκριμένες συχνοτικές ζώνες (εξαρτώμενες από την κατασκευή τους) τις καμπύλες απόκρισης στο χώρο. Οι συνήθεις τύποι μασοπαγίδων είναι οι εξής:

Συντονιστές Helmholtz:

Μοιάζει με μεγάλο κενό περιέκτη που διαθέτει μικρό άνοιγμα. Απορροφούν ενέργεια από τις συνιστώσες του ηχητικού κύματος που αντιστοιχούν στη συχνότητα συντονισμού του περιεχομένου αποσπώντας την από τον υπόλοιπο χώρο. Ανταποκρίνονται ικανοποιητικά σε στενή συχνοτική ζώνη, αλλά μπορούν να ρυθμιστούν και για ευρύτερη. Αποτελούν εξ ορισμού ογκώδεις και άκαμπτες βαριές διατάξεις. Σχέση (19).



ΣΧΗΜΑ 11: Συντονιστής Helmholtz.

Απορροφητές μεμβράνης (πάνελ):

Απορροφούν ενέργεια από εκείνες τις συνιστώσες που αντιστοιχούν στην ιδιοσυχνότητα της μεμβράνης. Καλύπτουν συχνοτική ζώνη πλάτους οκτάβας (ευρύτερη από τους προηγούμενους). Στα πλαίσια της ακουστικής φροντίδας δωματίου, κατασκευάζονται δύο τύποι. Ο ένας είναι εστιασμένος σε κεντρική συχνότητα 100Hz και ο άλλος στα 200Hz. Επιτυγχάνεται έτσι ικανοποιητικός βαθμός απορρόφησης στην κομβική, για την αντίληψη των χαμηλών, ζώνη 80-300Hz. Αποτελούν κι αυτοί ογκώδεις και σχετικά δαπανηρές κατασκευές.

Απορροφητές άκαμπτου υαλονήματος:

Παρασκευάζονται με συμπίεση του γνωστού, από τις εσωτερικές μονώσεις τοίχων, αφράτου συνθετικού υλικού στο ένα τέταρτο του αρχικού πάχους και μορφοποίηση σε άκαμπτα πάνελ πάχους 2,5-10cm. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ένα πάνελ πάχους λ.χ. 7,5cm απορροφά κατά προσέγγιση παραπλήσια ενέργεια με αυτή που θα απορροφούσε το υλικό αρχικού πάχους 30cm. Υπερτερούν των άλλων επειδή δεν βασίζονται στην απορρόφηση ενέργειας μέσω συντονισμού, οπότε είναι αποτελεσματικά και σε ευρύτερη ζώνη συχνοτήτων (μεσαίες-υψηλές). Η απόδοσή τους αυξάνεται όταν συνδυάζονται με μεμβράνη σε υβριδικές διατάξεις που απορροφούν ενέργεια συχνοτικών συνιστωσών ακόμα και κάτω των 80Hz.

Εναλλακτική φροντίδα περιλαμβάνει προσθήκη ευμεγεθών επίπλων περιμετρικά του χώρου, κατασκευή ανοιγμάτων (πόρτες και παράθυρα) ιδιαίτερα κοντά σε γωνίες, ακόμα και δόμηση των τοιχωμάτων του δωματίου ακρόασης, εάν είναι δυνατόν, με

σχετικά εύκαμπτα ξύλινα πάνελ τα οποία θα επιτρέπουν μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και ποσοστό μετάδοσης των ηχητικών κυμάτων εκτός δωματίου. Μια υψηλή κεκλιμένη οροφή τείνει να διαχέει τους ρυθμούς στη δημιουργία των οποίων συμμετέχει. Η λύση της κατασκευής δωματίου ακρόασης του οποίου οι τοίχοι να μην είναι παράλληλοι, αποτελεί ένα ελκυστικό δίκικο μαχαίρι. Από τη μία πλευρά, απόκλιση της τάξεως των 5 μοιρών από την παραλληλία, μεταβάλλει δραματικά τη συσσώρευση στάσιμων κυμάτων. Από την άλλη πλευρά, προκύπτουν λιγότερο προβλέψιμοι ρυθμοί συντονισμού και αναίρεση της συμμετρίας επί των διαστάσεων του δωματίου, γεγονός που διαφοροποιεί, ιδιαίτερα σε πολυκαναλικά συστήματα, την απόκριση του εκάστοτε ηχείου από τα υπόλοιπα.



ΣΧΗΜΑ 12: Μπασοπαγίδα.

A.25. ΔΙΑΧΥΤΕΣ

Οι ακουστικοί διαχυτές είναι εξειδικευμένες κατασκευές που διαθέτουν ακανόνιστες επιφάνειες, ώστε να διασπείρουν την ανακλώμενη ηχητική ενέργεια σε ευρύ φάσμα διαφορετικών γωνιών. Με αυτό το τρόπο αναστέλλεται η επίδραση των πρώτων ανακλάσεων, οι οποίες ανακατευθύνονται για να συντηχθούν με τις μεταγενέστερες ανακλάσεις συμβάλλοντας κι αυτές στο πεδίο αντήχησης. Αυτοσχέδιοι τύποι διαχυτών αποτελούν φυτά, διακοσμητικά, βιβλία και δίσκοι στοιχημένα ασύμμετρα σε ράφια βιβλιοθήκης, όμως οι εξειδικευμένες διατάξεις επιτυγχάνουν μεγαλύτερη κι ευκολότερα ρυθμιζόμενη διάχυση. Αναστέλλοντας και καθυστερώντας λοιπόν την εκδήλωση των πρώτων ανακλάσεων, η απορρόφηση και η διάχυση συντελούν στην εικονική αύξηση των αντιλαμβανόμενων διαστάσεων του χώρου ακρόασης.

A.26. ΔΙΑΧΥΤΕΣ SCHROEDER

Ο Manfred Schroeder, στέλεχος του Πανεπιστημίου Göttingen και των εργαστηρίων AT&T Bell, παρακινούμενος από τους δυαδικούς κώδικες των υπολογιστών και τη θεωρία των αριθμών, οραματίστηκε την κατασκευή μιας επιφάνειας αυλακωμένης με κατάλληλο τρόπο ώστε να προκαλεί ευρεία διάχυση των ηχητικών κυμάτων. Καθώς δυαδικοί κώδικες μέγιστου μήκους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία «ψευδοτυχαίου θορύβου» (του οποίου το φάσμα πλάτους από το μετασχηματισμό Fourier είναι ουσιαστικά επίπεδο) μέσω της εφαρμογής καταλλήλων ακολουθιών από τιμές +1 και -1. Ο Schroeder σκέφτηκε να επεξεργαστεί μια ανάλογη ακολουθία μέγιστου μήκους πάνω σε στερεή επιφάνεια με σκοπό να δει ποια θα ήταν η ακουστική συμπεριφορά αυτής. Η τιμή -1 θα εξέφραζε το συντελεστή ανάκλασης από τον πυθμένα ενός ευθύγραμμου αυλακιού χαραγμένου επί του υλικού της επιφάνειας και του οποίου το βάθος θα ήταν ίσο με το ένα τέταρτο του στοχευόμενου μήκους

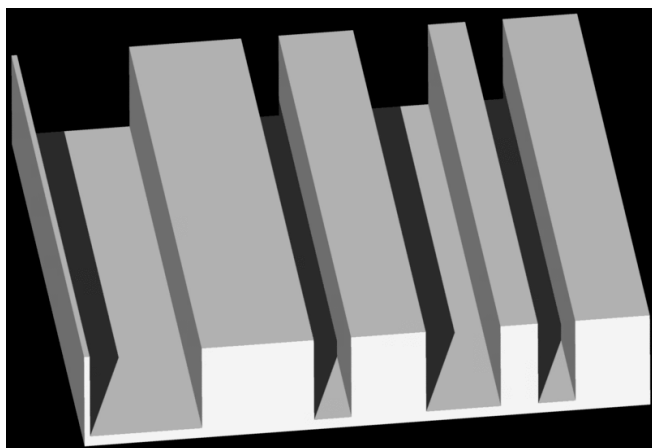
κύματος. Η τιμή +1 θα αντιστοιχούσε στο συντελεστή ανάκλασης από την αγάρακτη επιφάνεια.

Θεωρώντας ηχητικό κύμα που εισέρχεται, διασχίζοντας το άνοιγμα του αυλακιού (φρεατίου) και υποθέτοντας ότι η επιφάνεια του πυθμένα θα έχει συντελεστή ανάκλασης 1, το ανακλώμενο κύμα θα διέλθει εξερχόμενο από το άνοιγμα έχοντας διανύσει απόσταση ίση με το διπλάσιο του βάρους κι βρισκόμενο σε διαφορά φάσης (ως προς το προσπίπτον)

$$\text{—————} (22)$$

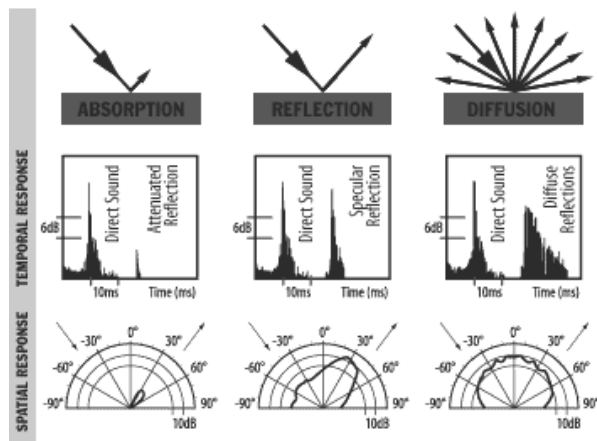
όπου $\Delta\phi$ συμβολίζει τη διαφορά φάσης σε μοίρες. Είναι προφανές ότι για τιμή βάρους ίση με το $1/4$ του προς εξέταση μήκους κύματος, το εξερχόμενο κύμα θα έχει διαφορά φάσης π (180°). Με αυτόν τον τρόπο, το αυλάκι υπολογίζεται με συντελεστή ανάκλασης -1 για τη συγκεκριμένη συχνότητα

Για την πειραματική υλοποίηση της σύλληψης, ο Schroeder κατασκεύασε μεταλλική πλάκα λυγισμένη ώστε να πάρει μορφή δυαδικής επιφάνειας μέγιστου μήκους. Παραλλαγή αυτής απεικονίζεται παρακάτω:

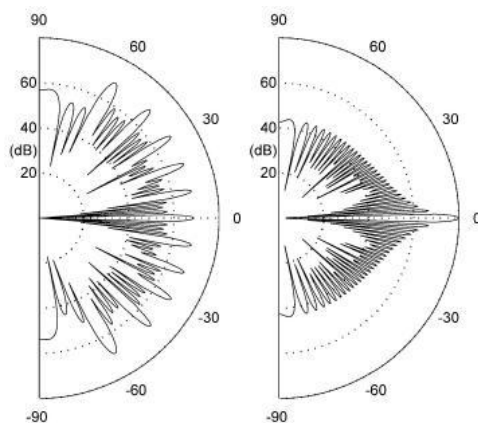


ΣΧΗΜΑ 13: Παραλλαγή μεταλλικής πλάκας που σχεδίασε ο Schroeder.

Η διάταξη αυτή με τις ορθές αυλακώσεις του $1/4$ μήκους κύματος εμφάνισε πρωτοφανή διαχυτική συμπεριφορά. Το παρακάτω τριπλό διάγραμμα αντιπαραθέτει σχηματικά την ακουστική συμπεριφορά (στο χώρο και το χρόνο) κατά την εκτεταμένη διάχυση (δεξί σκέλος) έναντι της απλής ανάκλασης (μεσαίο σκέλος) και της απορρόφησης (αριστερό σκέλος) για δεδομένη συχνότητα.

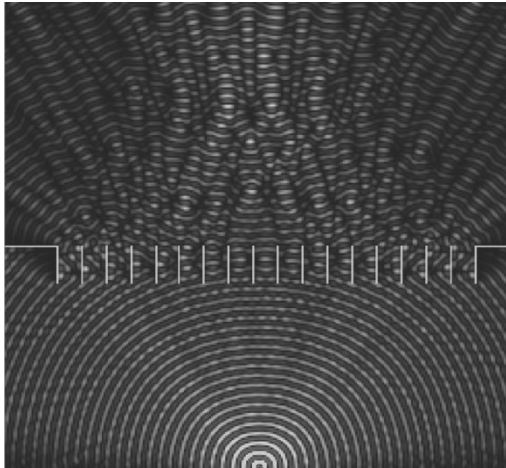


ΣΧΗΜΑ 14: Ακουστική συμπεριφορά απορρόφησης/απλής ανάκλασης/διάχυσης για συγκεκριμένη συχνότητα.



ΣΧΗΜΑ 15: Πολικό διάγραμμα διασποράς του διαχυτή Schroeder (αριστερό σκέλος) έναντι της ανάκλασης από επιφάνεια ίδιου μεγέθους(δεξί σκέλος).

Η ανάγκη τήρησης του κανόνα $1/4$ μήκους κύματος όσον αφορά το δυαδικό διαχυτή μέγιστου μήκους υπαγορεύει την εξάρτηση των διαχυτικών ιδιοτήτων αυτού από το μήκος κύματος του ήχου που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Βασικό μειονέκτημα αυτού του μοτίβου διάχυσης είναι ο περιορισμός της ωφέλιμης λειτουργίας σε σχετικά στενή συχνοτική ζώνη, γεγονός που στερεί την πρακτικότητα από τις εφαρμογές διάχυσης σε μεγάλο εύρος ζώνης. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, το εύρος ζώνης των συχνοτήτων που διαχέει η κατασκευή εκτείνεται από μισή οκτάβα κάτωθεν έως μισή οκτάβα άνωθεν του συχνοτικού ύψους στο οποίο είναι «συντονισμένος» (με κριτήριο το βάθος των εγκοπών) ο εκάστοτε διαχυτής. Το μέγιστο πλάτος καθεμιάς από τις μονές εγκοπές έχει οριστεί να μην υπερβαίνει το μισό του μήκους κύματος που αντιστοιχεί στην ανώτατη διαχεόμενη συχνότητα. Το άνω όριο αποκοπής εξαρτάται και από τη γωνία πρόσπτωσης, αφού όταν το κύμα δεν φτάνει κατά μέτωπο αναλύεται σε δύο κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες. Η συνιστώσα που βρίσκεται υπό γωνία 90° υφίσταται μηδενική διάχυση, ενώ το μήκος κύματος της κατά μέτωπον συνιστώσας η οποία διαχέεται, οφείλει να μένει μεγαλύτερο/ίσο του ανοίγματος. Αλλαγή της γωνίας πρόσπτωσης συνεπάγεται μεταβολή της ανώτερης συχνότητας (κατώτατο μήκος κύματος) που δύναται να διαχυθεί από συγκεκριμένη διάταξη φρεατίων.



ΣΧΗΜΑ 16: Απεικόνιση Διάχυσης.

A.27. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΜΟΝΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ

Ένας διαχυτής μονής διάστασης (one-dimensional diffractor) αποτελείται από συστοιχίες φρεατίων (σαν χαραμάδες) με το κάθε φρεάτιο να έχει διαφορετικό βάθος και να διαχωρίζονται μεταξύ τους από άκαμπτες επιφάνειες, σχηματίζοντας έτσι ένα πλέγμα. Φυσικά, το βάθος που θα έχει κάθε φρεάτιο δεν είναι τυχαίο αλλά καθορίζεται από μαθηματικές εξισώσεις. Υπάρχουν δύο βασικά είδη διαχυτών, οι διαχυτές τετραγωνικής μορφής QR (quadratic-residue) και οι διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας PR (primitive-root). Μια σειρά QR διαχυτών λειτουργεί αποτελεσματικά ακριβώς για τη συχνότητα που έχει σχεδιαστεί ή τη χαμηλότερη συχνότητα στην οποία υπάρχει αποδοτική διάχυση και στα πολλαπλάσια της συχνότητας αυτής. Ένας PR διαχυτής παρέχει, αρκετά ικανοποιητικά, σταθερή διάχυση σε όλο το φασματικό εύρος για το οποίο έχει σχεδιαστεί.

A.28. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΦΑΣΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ (Reflection phase grating diffractors - RPG)

Οι διαχυτές φράγματος φάσης ανάκλασης εξελίχθηκαν από το Schroeder με σκοπό να αυξήσουν το βαθμό διασποράς και τη συνέπεια της απόδοσης προς τις προδιαγραφές από τη σχεδίαση. Το παρακάτω σχήμα (17) απεικονίζει την επίδραση μιας απλής επίπεδης επιφάνειας.

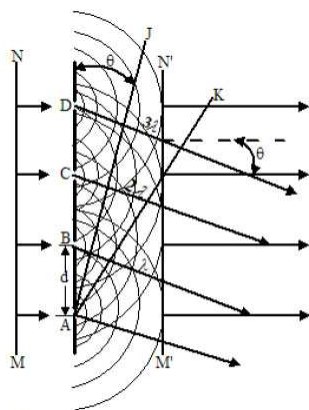


Fig. 2. Theory of the diffraction grating.

ΣΧΗΜΑ 17: Διαχυτής φράγματος φάσης ανάκλασης.

Προκύπτει επίπεδο ανακλώμενο κύμα στην κατοπτρική διεύθυνση όπου η γωνία πρόσπτωσης αποδεικνύεται εφαρμόζοντας γεωμετρικούς κανόνες ότι ισούται με αυτή της ανάκλασης. Τα ανακλώμενα υπό άλλες γωνίες κύματα αλληλοεξουδετερώνονται υπερτιθέμενα εξαιτίας διαφορών φάσης μεταξύ τους, οπότε κυριαρχεί η κατοπτρική συνιστώσα που σχηματίζει γωνία διαφυγής ίση με τη γωνία πρόσπτωσης ως προς την επίπεδη επιφάνεια.

A.29. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ (Quadratic residue diffusors - QR)

Κατανοώντας ο ίδιος ο Schroeder τους περιορισμούς στην ωφέλιμη συχνοτική ζώνη λειτουργίας των διαχυτών ακολουθίας μέγιστου μήκους, τους εξέλιξε περαιτέρω, εκμεταλλευόμενος τις ιδιότητες των φραγμάτων περίθλασης, καταλήγοντας στη μορφολογία αυλακιών υποδιαιρούμενων σε φρεάτια διαφορετικού βάθους. Τα διαδοχικά φρεάτια θα διαχωρίζονται με την παρεμβολή λεπτών πλακών ανάμεσά τους. Η κατασκευή γίνεται με άκαμπτα υλικά. Το πλάτος εκάστοτε φρεατίου ορίστηκε να μην υπερβαίνει το μισό του μήκους κύματος που αντιστοιχεί στο άνω συχνοτικό όριο του διαχυτή. Το μέγιστο βάθος εξαρτάται από την ελάχιστη συχνότητα ωφέλιμης λειτουργίας. Για τον καθορισμό των διαδοχικών λόγων βάθους που θα παρείχαν τη βέλτιστη (ως προς τη διαχυτική λειτουργία) σειρά ολισθήσεων φάσης, εμπνεύστηκε από τα δεδομένα της Μορφωματικής Αριθμητικής⁴.

Ξεχωριστό υποσύνολο των διαχυτών φράγματος φάσης ανάκλασης αποτελούν οι διαχυτές τετραγωνικού υπολοίπου (quadratic residue) για τους οποίους οι αναλογίες των φρεατίων αντιστοιχούν σε μια ψευδοστοχαστική ακολουθία βασιζόμενη σε πρώτους αριθμούς⁵. Τα σχετικά βάθη της ακολουθίας των φρεατίων προκύπτουν από ακολουθία τετραγωνικού υπολοίπου. Τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν (ύστερα από σύγκριση με διαφορετικές ακολουθίες) ότι με το συγκεκριμένο τύπο το ποσό της ηχητικής ενέργειας που ανακλάται στις διευθύνσεις των λοβών ανάκλασης είναι

⁴ Για τον υπολογισμό του x modulo y αφαιρείται η τιμή y από την τιμή x όσες φορές είναι απαραίτητο μέχρι να προκύψει ακέραιο υπόλοιπο μικρότερο του y (ώστε να μη γίνεται να αφαιρεθεί ξανά). π.χ. $27 \text{ modulo } 6 = 3$.

⁵ Ως πρώτοι ορίζονται εκείνοι οι αριθμοί (εκτός του 0 και του +1,-1) οι οποίοι δεν διαθέτουν άλλον ακέραιο διαιρέτη εκτός του 1 και του εαυτού τους. Πρώτοι αριθμοί μέχρι την εκατοντάδα είναι οι εξής: 1,2,3,5,7,11,13,17,19,23,29,31,37,41,43,47,53,59,61,67,71,73,79,83,89,97...

σταθερό, δηλαδή το φάσμα ισχύος είναι ουσιαστικά επίπεδο. Η ακολουθία προκύπτει από την εξής σχέση:

Παράγοντας αναλογίας βάθους φρεατίων = v^2 μόρφωμα p (23)

όπου n συμβολίζει ακέραιο αριθμό με τιμή ανάμεσα στο 0 και το άπειρο και το p αντιπροσωπεύει πρώτο αριθμό⁶. Δεν χρησιμοποιείται το σύνολο των δυνατών τιμών σε καθεμία ακολουθία, επειδή το τετραγωνισμένο τμήμα της μορφωματικής σχέσης καταργεί τη γραμμικότητα της διανομής.

Η λειτουργία των διαχυτών Schroeder επιτελείται σε ακέραια πολλαπλάσια μιας ονομαστικής (πρώτης) συχνότητας σχεδίασης, η οποία τίθεται συνήθως ως το κάτω όριο αποκοπής του διαχυτή. Η συχνότητα σχεδίασης δεν εκφράζει την ελάχιστη συχνότητα για την οποία ο διαχυτής θα παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά σε σύγκριση με αντίστοιχη επίπεδη επιφάνεια, αλλά το πρώτο τονικό ύψος επί του φάσματος για το οποίο επιτυγχάνονται ισοδύναμοι λοβοί ηχητικής ενέργειας από περίθλαση σε ποικίλες διευθύνσεις. Έχει μάλιστα διαπιστωθεί πως οι διαχυτές Schroeder διασπείρουν ευρύτερα την προσπίπτουσα ηχητική ενέργεια σε σύγκριση με απλή επίπεδη επιφάνεια για συχνότητες που βρίσκονται σε ύψος κατώτερο κατά 1 οκτάβα από την ονομαστική συχνότητα σχεδίασης.

Το ακριβές βάθος του n -ιστού φρεατίου δίνεται από τη σχέση:

$$d_n = \frac{S_n \lambda_0}{2N} \quad (24)$$

όπου $\lambda_0 (=c/f_0)$ είναι το μήκος κύματος της συχνότητας που μελετάται και c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα. Τα βάθη λοιπόν των φρεατίων κυμαίνονται από 0 έως περίπου $\lambda_0/2$ με μέσο όρο περίπου $\lambda_0/4$. Τέλος η τιμή S_n αναπαριστά τις τιμές είτε μιας QR σειράς, είτε μιας PR σειράς. Εφόσον οι τιμές αυτές είναι περιοδικές τότε τα διάφορα μήκη κύματος που προκύπτουν έχουν συγκεκριμένη φασική σχέση μεταξύ τους.

A.30. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ ΡΙΖΑΣ (primitive-root diffusors - PR)

Οι διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας βασίζονται σε διαφορετική ακολουθία προερχόμενη πάλι από τη θεωρία των αριθμών. Τα επιμέρους βάθη των φρεατίων προκύπτουν από την εξής σχέση:

Παράγοντας αναλογίας βάθους = r^v μόρφωμα p (25)

όπου p είναι πρώτος αριθμός, $v=1,2,\dots,p-1$ και το r συμβολίζει την ελάχιστη πρωτεύουσα ρίζα του p . Παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με τους διαχυτές τετραγωνικού υπολοίπου, η διάταξη των φρεατίων σε κάθε περίοδο διαχυτή πρωτεύουσας ρίζας δεν έχει άξονα συμμετρίας στο μέσον αυτής. Κάθε ακολουθία πρωτεύουσας ρίζας περιλαμβάνει $p-1$ μέλη (έναντι p μελών της τετραγωνικής από τον πρώτο αριθμό στον οποίο βασίζεται), όπου η κάθε δυνατή τιμή (εκτός του μηδέν που δεν περιέχεται) αντιπροσωπεύεται μονάχα μία φορά. Για παράδειγμα, η ακολουθία πρωτεύουσας ρίζας για το μόρφωμα 17 είναι μια ψευδοτυχαία διάταξη όλων των ακεραίων αριθμών μεταξύ 1-16: 3,9,10,13,5,15,11,16,14,8,7,4,12,2,6,1.

⁶ Ο όρος μόρφωμα (modulo) αναφέρεται στο υπόλοιπο από τη δεύτερη δύναμη του ακέραιου v . Θέτοντας για παράδειγμα $v=5$ και $p=11$ λαμβεται: 5^2 μόρφωμα 11 = 25 μόρφωμα 11.

Το μόρφωμα 11 σημαίνει ότι ο αριθμός 11 αφαιρείται από το 25 όσες φορές επιτρέπεται μέχρι να απομείνει σημαντικό υπόλοιπο μικρότερο του 11. Στο δεδομένο παράδειγμα, το 11 μπορεί να αφαιρεθεί δύο φορές από το 25 και η λύση έχει την τιμή $25-22=3$.

Οι διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας διασπείρουν την προσπίπτουσα σε αυτές ηχητική ενέργεια σε διάφορες διακριτές διευθύνσεις, εφαρμόζοντας την αναγκαία συνθήκη ισοδυναμίας των διακριτών λοβών ώστε το φάσμα ισχύος από το μετασχηματισμό Fourier της ακολουθίας να είναι ουσιαστικά σταθερό (να προσεγγίζει την ευθεία γραμμή) εντός της ζώνης ωφέλιμης λειτουργίας. Για την ισοδυναμία των παραγόμενων λοβών σε προβλέψιμες διευθύνσεις, απαιτείται εγκατάσταση συστοιχίας τεσσάρων τουλάχιστον περιόδων (αυτόνομων τεμαχίων). Η απόδοση της συστοιχίας είναι επιβεβαιωμένα καλύτερη από εγκατάσταση μοναδικής περιόδου η οποία θα ήταν βασισμένη σε ανώτερο πρώτο αριθμό ώστε να διέθετε παραπλήσιες διαστάσεις.

Ο σχηματισμός των διακριτών λοβών ανακλώμενης ενέργειας οφείλεται στις διαδοχικές φασικές μετατοπίσεις που επιφέρει η αλληλουχία φρεατίων διαφορετικού βάθους στο προσπίπτον ηχητικό σήμα. Η φασική μετατόπιση από τη διάταξη πρωτεύουσας ρίζας λειτουργεί βέλτιστα σε ακέραια πολλαπλάσια του κάτω ορίου αποκοπής. Σε ενδιάμεσες αυτών συχνότητες το πλήθος και οι γωνίες διεύθυνσης των λοβών μεταβάλλονται. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η διασπορά των διατάξεων για τονικά ύψη μέχρι και μία οκτάβα κατώτερα της ονομαστικής συχνότητας σχεδίασης είναι μεγαλύτερη της προβλεπόμενης από απλή επίπεδη επιφάνεια, όμως δεν ακολουθεί την απόδοση ισοδύναμων λοβών της τυπικής διαχυτικής λειτουργίας.

Εάν το πάχος των διαχωριστικών ανέλθει σε μέγεθος ενός τετάρτου του πλάτους των επιμέρους φρεατίων, τότε στην ανώτερη ζώνη λειτουργίας αρχίζουν να υπεισέρχονται, για πρώτο αριθμό μορφώματος 17 και άνω, επιπλέον λοβοί γειτονικοί προς την κατοπτρική διεύθυνση εξαιτίας του μεγαλύτερου συνολικού πλάτους της περιόδου.

Για κατά μέτωπον πρόσπτωση κύματος στη συχνότητα σχεδίασης παρέχεται το ελάχιστο πλήθος λοβών, ενώ το μέγιστο πλήθος στο άνω όριο αποκοπής. Απόκλιση από την κατά μέτωπον πρόσπτωση του σήματος συνεπάγεται μείωση του άνω ορίου αποκοπής και μεταβολή των διευθύνσεων όπως και της πυκνότητας των παρερχομένων λοβών ενέργειας. Η διάσπαση της ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας δεν επιτελείται μονάχα στο χώρο (διακριτές διευθύνσεις) αλλά και στο πεδίο του χρόνου. Το πλάτος της ανακλώμενης επιστροφής στην κατοπτρική διεύθυνση για τη διάταξη τετραγωνικού υπολοίπου είναι εξασθενημένο κατά περίπου 8-10dB. Η ιδιαιτερότητα των διατάξεων πρωτεύουσας ρίζας έγκειται στην απουσία των 0 και π , τιμές οι οποίες αντιστοιχούν στην κατοπτρική συνιστώσα ανάκλασης (δηλαδή την προβλεπόμενη από την πρόσπτωση υπό ίδια γωνία σε επίπεδη επιφάνεια καθρέπτη). Αυτά τα χαρακτηριστικά οδηγούν σε διαφοροποίηση της κατανομής των λοβών ενέργειας στα πεδία του χώρου και του χρόνου παρέχοντας ουσιαστικά διάχυση αποκοπής ως προς την κατοπτρική συνιστώσα. Η ταπείνωση της διασποράς προς την κατοπτρική διεύθυνση ισχύει φυσικά στη συχνότητα σχεδίασης και τα ακέραια πολλαπλάσια αυτής. Δεχόμενοι για λόγους απλούστευσης ότι οι απώλειες ηχητικής ενέργειας από απορρόφηση είναι αμελητέες, έχει υπολογιστεί ότι η ενέργεια στη διεύθυνση της κατοπτρικής συνιστώσας έχει μέγεθος περίπου το 1/100 (μείωση κατά 20dB) της προερχόμενης από απλή επίπεδη επιφάνεια και το 1/10 των υπολοίπων (ισοδύναμων μεταξύ τους) διασπειρομένων συνιστωσών από τη διάταξη πρωτεύουσας ρίζας. Στην πράξη δεν ισχύει πλήρης αποκοπή της κατοπτρικής ανάκλασης, γεγονός που στην πλειονότητα των εφαρμογών συμβάλλει θετικά στη γενικότερη διάχυση της ηχητικής ενέργειας εντός του χώρου.

Η ιδιότητα πρόσθετης υποβάθμισης της ενέργειας στην κατοπτρική διεύθυνση ανάκλασης αυξάνει την καταλληλότητα των διατάξεων πρωτεύουσας ρίζας για μικρούς χώρους ακρόασης όπως και για εφαρμογή στα ζωντανά άκρα των control rooms μικρού μεγέθους.



ΣΧΗΜΑ 18: Διαχυτής πρωτεύουσας ρίζας διπλής διάστασης.

A.31. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΑΧΥΤΩΝ

Παρακάτω εξηγείται με παράδειγμα πως προκύπτουν οι βασικές εξισώσεις με την χρήση των οποίων μπορεί να φτιαχτεί ένας διαχυτής ο οποίος θα λειτουργεί για γνωστό φασματικό εύρος.

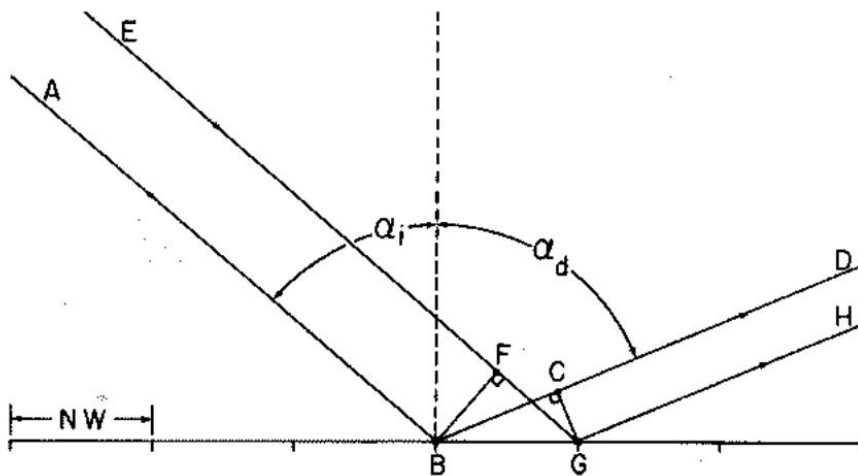
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. One-dimensional QR and PR sequence values for $N = 17$.

n	$n^2_{\text{mod } 17}$	$3^n_{\text{mod } 17}$
0	0	—
1	1	3
2	4	9
3	9	10
4	16	13
5	8	5
6	2	15
7	15	11
8	13	16
9	13	14
10	15	8
11	2	7
12	8	4
13	16	12
14	9	2
15	4	6
16	1	1

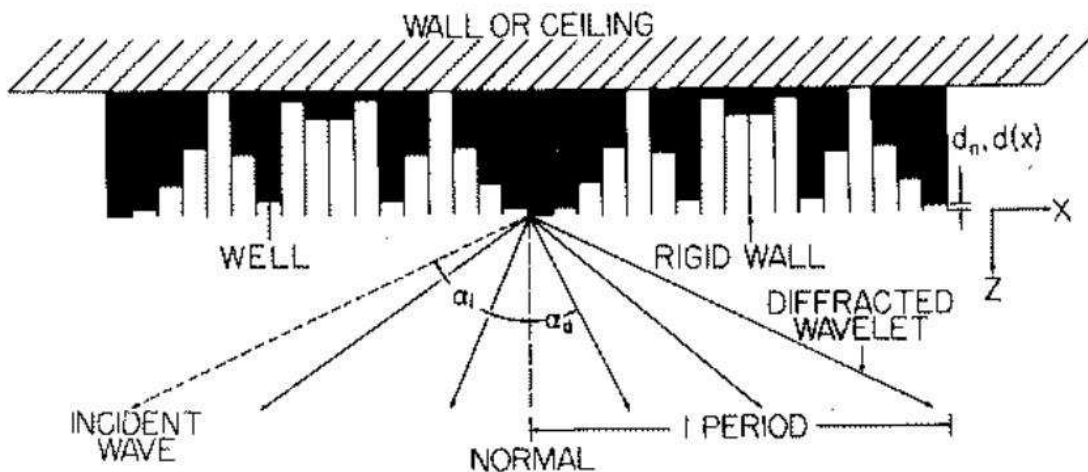
ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Τιμές ακολουθιών ενός διαχυτή μονής διάστασης και ενός διαχυτή τετραγωνικού παλμού.

Το σχήμα 19 δείχνει τη πορεία δύο κυμάτων πριν και μετά την πρόσπτωσή τους πάνω σε μια διαχυτική επιφάνεια. Το προσπίπτον κύμα EG, ταξιδεύει μια απόσταση FG μεγαλύτερη από την απόσταση που διανύει το κύμα AB, πριν φτάσουν στην επιφάνεια. Το ανακλώμενο κύμα BD, κατά τον ίδιο τρόπο, διανύει μια απόσταση BC παραπάνω από το ανακλώμενο κύμα GH, αφού προσπέσουν στην επιφάνεια. Η διαφορά λοιπόν στις διαδρομές των κυμάτων ABCD και EFGH, είναι η διαφορά $BC - FG$. Επομένως, η διαφορά αυτή πρέπει να ισούται με $m\lambda$, όπου λ το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ήχου και m είναι ένας ακέραιος αριθμός (θετικός ή

αρνητικός). Άρα, από το σχήμα φαίνεται ότι $BC=NW\sin\alpha_d$ και $FG=-NW\sin\alpha_i$. Και $m\lambda=NW(\sin\alpha_d+\sin\alpha_i)$, δηλαδή, $\sin\alpha_d=(m\lambda/NW)-\sin\alpha_i$.



ΣΧΗΜΑ 19: Πορεία των κυμάτων ABCD και EFGH σε διαχυτική επιφάνεια.



ΣΧΗΜΑ 20: Πορεία προσπίπτοντος κύματος πάνω σε έναν διαχυτή του τύπου one-dimensional QR. Αποτελούμενο από 2 περιόδους με 17 φρεάτια ανά περίοδο.

Παράδειγμα: Για ένα κύμα που προσπίπτει σε επίπεδη επιφάνεια με γωνία πρόσπτωσης -65° , οι γωνίες των κυμάτων που διαχέονται θα δοθούν από τη σχέση: $\sin\alpha_d=(m\lambda/NW)-\sin\alpha_i$. Για $N=17$ και $W=0,13\lambda_0$ και $\alpha_d=-54.2^\circ, -22.4^\circ, 2,7^\circ, 28.5^\circ$ και 65° . Η αλλαγή φάσης ενός κύματος το οποίο προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του n-ιστού φρεατίου, είναι $-2\pi(2d_n)/\lambda$. Ο παράγοντας ανάκλασης $r(x)$, δίνεται από τη σχέση:

$$r(x)=\exp\left[-2\pi i\frac{2d(x)}{\lambda}\right] \quad (26)$$

όπου $i=\sqrt{-1}$ και $d(x)$ είναι το βάθος (depth) στη θέση x . Επίσης ισχύει: $d_n=d(x)$, για όλες τις τιμές του x μέσα στο n-ιστό φρεάτιο και αλλάζει απότομα όταν το κύμα συναντήσει το επόμενο φρεάτιο.

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία του Fraunhofer για τα μακρινά πεδία (far-field), το πλάτος του διασκορπισματος των κυμάτων (scattering amplitude) $\mathbf{a}(\mathbf{s})$, σε όλες τις κατευθύνσεις, καθορίζονται από το διάνυσμα (scattering vector) \mathbf{s} , που εξάγεται από

έναν μετασχηματισμό Fourier (Fourier transform) του $r(x)$ με σημείο αναφοράς το $z=0$, σε όλο το μήκος L του διαχυτή. Με:

$$\mathbf{a}(s) = \frac{1}{L} \int_0^L \exp\left[-4\pi i \frac{d(x)}{\lambda}\right] \exp[isx] dx = \frac{1}{L} \int_0^L \exp[isx - 4\pi i \frac{d(x)}{\lambda}] dx \quad (27),$$

όπου το s συνδέεται με τις γωνίες a_d (διάχυσης) και a_i (πρόσπτωσης) ως εξής:

$$S = 2\pi \frac{\sin a_d}{\lambda} - 2\pi \frac{\sin a_i}{\lambda}.$$

Στρογγυλοποιώντας την εξίσωση (27), με αντικατάσταση του $d(x)$ ως Δx και κάνοντας χρήση της σχέσης $\exp(i\varphi) = \cos\varphi - i\sin\varphi$, όπου $\varphi = sx - 4\pi d(x)/\lambda$, προκύπτει η σχέση:

$$|\mathbf{a}(s)| = \frac{1}{NX} \left\{ \left[\sum_{k=1}^{NX} \cos\left(sx - 4\pi \frac{d_k(x)}{\lambda}\right) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{NX} \sin\left(sx - 4\pi \frac{d_k(x)}{\lambda}\right) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (28)$$

$\Delta x = W/NS$ και $L = NP/NW$, όπου NS είναι ο αριθμός των δειγμάτων του βάθους κάθε φρεατίου και NP είναι ο αριθμός των περιόδων. $\Delta x/L = 1/NX$, με NX τον συνολικό αριθμό βαθών.

Σε πραγματικές συνθήκες, στους διαχυτές αυτού του είδους, οι περίοδοι δεν είναι άπειροι, η κατευθυντικότητα λαμβάνει χώρα και μετά τα όρια της ήδη γνωστής κατεύθυνσης των κυμάτων, παράγοντας κάποιους λοβούς, όπως φαίνεται στο σχήμα 21. Το (b) δείχνει την κατευθυντικότητα για τον διαχυτή του σχήματος 19 με 25 περιόδους αντί για 2. Αυξάνοντας τον αριθμό των περιόδων, συγκεντρώνεται όλη η ενέργεια στις κατάλληλες κατευθύνσεις διάχυσης και οι λοβοί γίνονται πιο απότομοι (μειώνεται το εμβαδόν τους). Το (c) δείχνει την κατευθυντικότητα της διάχυσης για διαχυτή 89 φρεατίων αντί για 17. Ο αριθμός των λοβών και η διάχυση αυξάνεται με τον παράγοντα ανάκλασης 5.

Ο λεπτομερής καθορισμός του φασματικού εύρους (bandwidth) και του μέγιστου βαθμού m_{\max} (maximum order) στην προς μελέτη συχνότητα είναι αρκετά στοιχεία ώστε να καθοριστούν οι υπόλοιπες σχεδιαστικές προδιαγραφές, W , N και η ακολουθία των βαθών (depth sequence) d_n . Το φασματικό εύρος ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της συχνότητας σχεδίασης (design frequency) f_0 και της μέγιστης συχνότητας (maximum frequency) f_{\max} η οποία ορίζεται από το πλάτος του φρεατίου: $f_{\max} = C/2W$.

Η συμπεριφορά άνω της f_{\max} και κάτω της f_0 είναι κατοπτρική και μπορεί να βελτιστοποιηθεί με τη χρήση του προγράμματος RPG⁷. Οι διαχωριστές (well-wall separators) οι οποίοι είναι απαραίτητοι για μια καλή διάχυση, χρειάζεται να είναι λεπτοί και άκαμπτοι. Στα πραγματικά μοντέλα διαχυτών οι διαχωριστές δεν έχουν άπειρο εύρος (T) και συμμετέχουν στην εξίσωση ως:

$$f_{\max} = \frac{c}{2(W+T)}. \text{ Το } T \text{ θα πρέπει να είναι όσο πιο μικρό γίνεται ώστε να μειώνονται και}$$

οι κατοπτρικές απώλειες (specular losses). Έτσι λοιπόν, συμπεριλαμβάνοντας και το πάχος του τοίχου T στη συχνότητα f_0 με $a_i = 0^\circ$ και $|\sin a_d| = 1$, εξάγεται η εξίσωση που καθορίζει τον αριθμό των φρεατίων ανά περίοδο N :

$$N = \frac{m_{\max} c}{f_0(W+T)} \quad (29)$$

Έτσι όταν $a_i = 0^\circ$, υπάρχουν $(2m_{\max} + 1)$ λοβοί μεταξύ $a_d = \pm 90^\circ$. Για να επιτευχθεί μια καλή διάχυση στην συχνότητα f_0 ορίζεται το $m_{\max} = 2$, παραχωρώντας 5 λοβούς

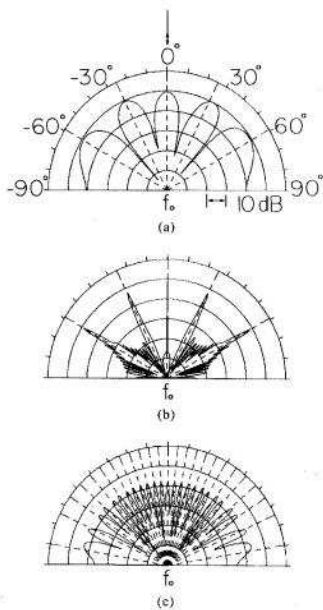
⁷ Υπάρχει το πρόγραμμα RPG (Report Program Generator) της IBM, το οποίο είναι μια σύγχρονη γλώσσα προγραμματισμού που μπορεί να εξάγει συγκεκριμένες τιμές για διαχυτές (αριθμό φρεατίων, βάθος κτλ.) και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό διαχυτών που θα τοποθετηθούν σε ένα control room, με την βοήθεια ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

διάχυσης (diffraction lobes). Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του m_{\max} , τόσο μεγαλύτερη είναι και η διάχυση. Για $a_i \neq 0^\circ$ δεν υπάρχει ίσος αριθμός λοβών σε κάθε μεριά της a_i , εφόσον ισχύει ότι $|\sin a_d| > 1$. Άλλη μια χρήσιμη εξίσωση είναι η παρακάτω:

$$N = \frac{2m_{\max} f_{\max}}{f_0} \quad (30)$$

Με το N πάντα να είναι ένας περιττός πρώτος αριθμός. Η τιμή του N εξάγεται από την παραπάνω εξίσωση και την εξίσωση (29) και πρέπει να αντιστοιχεί στο κοντινότερο και μεγαλύτερο πρώτο αριθμό έτσι ώστε ένας από τους λοβούς ($2m_{\max} + 1$) στην f_0 να παρουσιάζει περιοδικότητα ($|\sin a_d| > 1$). Έχοντας καθορίσει την f_0 και το N , εύκολα μπορεί να υπολογιστεί η ακολουθία βαθών (depth sequence):

$$d_n = \frac{S_n c}{2Nf_0} \quad (31) \text{ ισάξια της σχέσης (24).}$$



ΣΧΗΜΑ 21: Κατευθυντικότητα διάχυσης για QR διαχυτές. (a): διαχυτής σχήματος 2, (b): ο αριθμός των περιόδων αυξήθηκε από 2 σε 25, (c): ο αριθμός των φρεατίων ανά περίοδο αυξήθηκε από 17 σε 89, αυξάνοντας τον αριθμό των λοβών με τον παράγοντα διάχυσης 5.

A.32. ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ

Η κατασκευή των διαχυτών διπλής διάστασης συνεπάγεται διασπορά σε πολλαπλά επίπεδα, με αποτέλεσμα τη μείωση της στάθμης κατοπτρικής ενέργειας που καταλήγει σε δεδομένη θέση ακρόασης, εφόσον καθένα από τα νοητά ημικυλινδρικά πεδία διασποράς περιέχει ήδη πολλαπλούς ενεργειακούς λοβούς φράγματος. Ο αριθμός των λοβών θα υψωθεί στη δεύτερη δύναμη όταν η διάταξη έχει ίδιο αριθμό οριζοντίων και καθέτων φρεατίων. Για την υλοποίηση διαχυτών διπλής διάστασης, μπορούν να εφαρμοστούν οι ήδη δοσμένοι αλγεβρικοί τύποι για την αναλογία φρεατίων ξεχωριστά στην οριζόντια και την κάθετη αλληλουχία και κατόπιν να διαμορφωθεί κατά πλάτος η μία με την άλλη. Για παράδειγμα θα μπορούσε να υπάρξει συνδυασμός οριζόντιας αλληλουχίας τετραγωνικού υπολοίπου με κάθετη πρωτεύουσας ρίζας.

A.33. ΑΛΛΟΥ ΤΥΠΟΥ ΔΙΑΧΥΤΕΣ

Υπάρχουν και κάποια υβριδικά είδη διαχυτών Schroeder, τα οποία χρησιμοποιούνται σπάνια και για πολύ συγκεκριμένους λόγους. Αυτό συνεπάγεται και το ακριβό κόστος τέτοιων διαχυτών. Κάποια τέτοια είδη είναι:

Ο διαχυτής Flutterfree: Διαχυτής του οποίου ορισμένα φρεάτια φέρουν διάτρητο πυθμένα που επιτρέπει τη διάδοση του προσπίπτοντος κύματος στο οπίσθιο τμήμα, όπου σχηματίζονται κοιλότητες. Η ράχη της κοιλότητας μπορεί να είναι επιστρωμένη με αποσβεστικό υλικό.

Ο διαχυτής DiffusorBlox: Ενσωμάτωση εσοχών με συμπεριφορά ισοδύναμη συντονιστή Helmholtz σε διάταξη φράγματος φάσης ανάκλασης. Προσφέρουν εκτεταμένη διασπορά εντός του κτιριακού χώρου στη ζώνη διάχυσης, απορρόφηση της ενέργειας των χαμηλών στη ζώνη συντονισμού κι επαρκής μόνωση ως προς τον εξωτερικό χώρο.

Ο διαχυτής Abffusor: Διαχυτής φράγματος φάσης απορρόφησης. Οι τιμές βάθους τόσο των ανακλαστικών όσο και των απορροφητικών φρεατίων οι οποίες επιφέρουν μετατοπίσεις στη φάση και το πλάτος των ανακλώμενων κυμάτων προκύπτουν με βάση τις γνωστές ακολουθίες από τη θεωρία αριθμών. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται σε δύο διακριτούς μηχανισμούς απορρόφησης. Ο μηχανισμός βαθμωτής ηχητικής πίεσης οδηγεί τον διαχυτή σε μεγαλύτερη απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων συγκρινόμενη με συμβατικό πορώδη απορροφητή. Εκτός όμως από την ευρύτερη ζώνη λειτουργίας ο διαχυτής παρέχει επιπλέον εκτεταμένη διασπορά στο κοντινό πεδίο και για γωνίες που αποκλίνουν από τη μετωπική πρόσπτωση. Αυτές οι ιδιότητες προσδίδουν μεγαλύτερο περιβάλλοντα χώρο στο αναπαραγόμενο μουσικό γεγονός ιδιαίτερα σε μικρά δωμάτια.

Ο διαχυτής Binary Amplitude Diffisorber (BAD) /Flatffusor-Arc: Κάθε διαχυτής έχει δομή «σάντουιτς» τριών στρωμάτων: η κατώτερη φέτα είναι ημιάκαμπτο υαλόνημα. Η ανώτερη αποτελείται από υφασμάτινη επένδυση. Η «γέμιση» έχει σύσταση βελτιστοποιημένης δυαδικής ακολουθίας ανακλαστικών επιφανειών και απορροφητικών οπών. Με τη μεταβολή του πλήθους ανακλαστικών και απορροφητικών λωρίδων στην επιφάνεια ελέγχεται ο συντελεστής απορρόφησης. Με τη διαμόρφωση της αλληλουχίας τους ελέγχεται το μοτίβο κατανομής του ανακλώμενου ηχητικού κύματος.

Τέλος, μπορούν να σχηματιστούν πολυδιάστατοι διαχυτές με τη βοήθεια του θεωρήματος κινέζικου υπολοίπου. Οι διατάξεις διπλής διάστασης που προκύπτουν μέσω αυτής διατηρούν τις ιδιότητες φάσματος ισχύος κατά Fourier των μητρικών μονοδιάστατων.

A.34. Η ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Πέραν της πυκνότητας των ρυθμών συντονισμού (που καθορίζει τη συμπεριφορά κάτω από το νοητό όριο των 300Hz), η ακουστική αίσθηση ενός μικρού χώρου σχηματίζεται στα αντίστοιχα νευρωνικά κέντρα του εγκεφάλου χάρη στην επεξεργασία των διαφορών χρονικής άφιξης μεταξύ άμεσων και ανακλώμενων κυμάτων. Το φαινόμενο προτεραιότητας διασφαλίζει τον εντοπισμό της πηγής στο χώρο, συντελώντας παράλληλα στη διαμόρφωση της εκλαμβανόμενης ποιότητας του εκπεμπόμενου από αυτή ήχου ανάλογα με τις χρονικές διαφορές ανάμεσα στις αφίξεις του άμεσου και των προερχόμενων από πρώτη ανάκλαση κυμάτων. Αυτή η διαφοροποίηση στην εκλαμβανόμενη τονική ισορροπία πληροφορεί τον ακροατή για την ύπαρξη των πραγματικών επιφανειών (ορίων) που περικλείουν τον τυπικό χώρο ακρόασης. Στις περιπτώσεις όπου δεν έχει ληφθεί ιδιαίτερη ακουστική φροντίδα,

οποιαδήποτε χωρική πληροφορία (είτε περιέχεται στην ηχογράφιση είτε έχει ενσωματωθεί στο στάδιο της μίξης) περιέχεται στο εκπεμπόμενο σήμα, νοθεύεται από τις πρώιμες κατοπτρικές ανακλάσεις που θα φτάσουν στο ακουστικό μας σύστημα με χρονική υστέρηση μεταξύ 15 μέχρι περίπου 50χιλιοστών δευτερολέπτου από τη στιγμή της πρωτογενούς εκπομπής, δηλαδή πριν την ένταξή τους στο σχηματισμό του πεδίου αντήχησης. Όταν οι πρώιμες ανακλάσεις φτάνουν σε μεταγενέστερες χρονικές στιγμές τείνουν να αποδώσουν αίσθηση μεγαλύτερου χώρου που ανταποκρίνεται πιστότερα στα δεδομένα των αιθουσών ζωντανής ακρόασης και τις πληροφορίες που περιέχονται στο αναπαραγόμενο σήμα.

Αν αντί της διάχυσης εφαρμοζόταν αποκλειστικά εκτεταμένη απορροφητική φροντίδα ως φίλτρο «ουδετεροποίησης» του χώρου, πέρα από το γεγονός ότι θα απαιτούσε ογκωδέστερες διατάξεις επενεργώντας σε συχνοτικές ζώνες μικρότερου εύρους, η πλήρης επιτυχία αυτής θα προσομοίωνε το χώρο με ανηχοϊκό θάλαμο. Σε εκείνη την περίπτωση θα απαιτούνταν ακόμα μεγαλύτερη ισχύς για την επίτευξη δεδομένης ηχητικής πίεσης, η συνάφεια της ακουστικής αντίληψης με το ίδιο το μουσικό γεγονός θα μειωνόταν, ενώ η παραγόμενη αίσθηση ακουστικής «αποξήρανσης» θα προξενούσε υποσυνείδητα δυσφορία κατά την ακρόαση σε βάθος χρόνου.

Αντίθετα, η κατάλληλα ρυθμισμένη διάχυση πραγματοποιεί πλησιέστερη ψευδαίσθηση του χώρου ακρόασης προς εκείνους που διατηρεί το αντί ως αντιληπτική αναφορά. Ειδικά για μικρούς χώρους, με την περαιτέρω υποβάθμιση της ανακλώμενης ενέργειας στην κατοπτρική διεύθυνση μειώνεται ακόμα περισσότερο ο βαθμός (και η καταστροφική αλληλεπίδραση) της πρώτης ενεργειακής ανόδου που ακολουθεί την αρχική έφοδο της άμεσης ηχητικής ενέργειας. Περιορίζονται έτσι οι χρωματισμοί και μετατοπίσεις των ακουστικών ειδώλων. Επιπρόσθετα καταπνίγονται τα φαινόμενα τρεμοπαίγματος ηχούς μεταξύ παραλλήλων επιφανειών όπως και θολώματα εξαιτίας πολλαπλών φαινόμενων κτενωτού φίλτρου που εντείνονται στους μικρούς χώρους. Το πλέον σημαντικό επίτευγμα συνίσταται στην ενίσχυση της αίσθησης περιέλιξης από το αναπαραγόμενο μουσικό γεγονός.

A.35. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΧΥΤΩΝ

Τα υλικά κατασκευής ενός διαχυτή Schroeder μπορούν να είναι ξύλο, μοριοσανίδα, γυαλί, πολυμερή, μέταλλα. Για το βασικό πλαίσιο η μοριοσανίδα είναι πρακτική επιλογή.

Η αρχή λειτουργίας των διαχυτών που ανήκουν στην κατηγορία Schroeder βασίζεται στις αμοιβαίες παρεμβολές που ασκούν μεταξύ τους τα διασπειρόμενα κυματίδια από το σύνολο των φρεατίων. Βελτιστοποίηση της αλληλεπίδρασης επιτυγχάνεται όταν τα γειτονικά φρεάτια είναι σε όσο το δυνατόν στενότερη επαφή το ένα με το άλλο. Επιπλέον η εκτεθειμένη πρόσοψη των διαχωριστικών τοιχωμάτων δρα ως επίπεδη ανακλαστική επιφάνεια όταν το πλάτος αυτής υπερβαίνει τα 2mm, με αποτέλεσμα να διασπάται η ομοιόμορφη διάταξη των λοβών ηχητικής ενέργειας στη σύσταση του πεδίου διάχυσης της ακολουθίας.

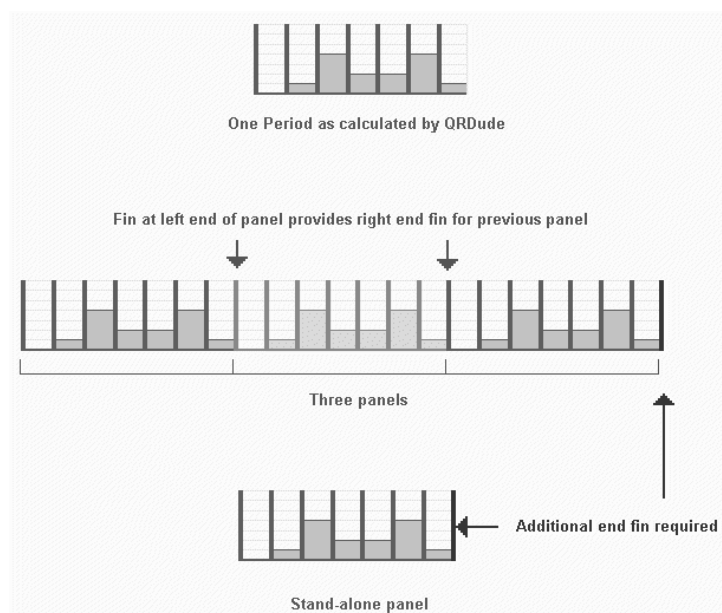
Όλες οι ανακλαστικές επιφάνειες των εσοχών οφείλουν να είναι όσο πιο άκαμπτες γίνεται. Αποκλείονται από την κατασκευή τα πορώδη υλικά, εφόσον φυσικά η σχεδίαση δεν περιλαμβάνει υβριδικές διατάξεις (συνδυασμούς ανακλαστικών και απορροφητικών ζωνών). Καταβάλλεται επίσης ιδιαίτερη φροντίδα για το ερμητικό σφράγισμα και την ενίσχυση όλων των ραφών (π.χ. τσόχα εμποτισμένη με κόλλα που στερεοποιείται). Οι κλειστές κοιλότητες της κατασκευής γεμίζονται με ρητίνες ώστε να αποφευχθούν, ιδιαίτερα στην περίπτωση πολύ λεπτών διαχωριστικών, πιθανοί συντονισμοί και στάσιμα κύματα. Πρέπει να αποφεύγεται η κάλυψη (για αισθητικούς

συνήθως λόγους) της διαχυτικής μονάδας με ύφασμα. Σκοπός όλων αυτών είναι να διατηρηθούν στο έπακρο οι ανακλαστικές ιδιότητες ώστε να μην αυξηθούν οι εγγενείς ενεργειακές απώλειες των διαχυτικών διατάξεων Schroeder.

Η χρήσιμη απορροφητικότητα που παρέχουν οι διαχυτές φράγματος φάσης ανάκλασης για συχνότητες χαμηλότερες του κάτω ορίου αποκοπής τους οφείλεται σε ευνοϊκή συγκυρία των αρχών σχεδίασης. Έχει αποδειχθεί ότι κατά την εφαρμογή φρεατίων διαφορετικού βάθους με σκοπό τη διάχυση, επέρχεται και απορρόφηση εξαιτίας αυξημένης ροής σωματιδιακής ταχύτητας από το ένα φρεάτιο στο άλλο, ώστε να εξισωθεί η ηχητική πίεση στην πρόσοψη του διαχυτή.

A.36. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΛΟΒΩΝ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΙΑΧΥΤΩΝ

Όταν οι διαχυτές τοποθετούνται σε συστοιχίες, το αρχικό διαχωριστικό του επομένου ταυτίζεται με το τελικό του προηγούμενου όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:

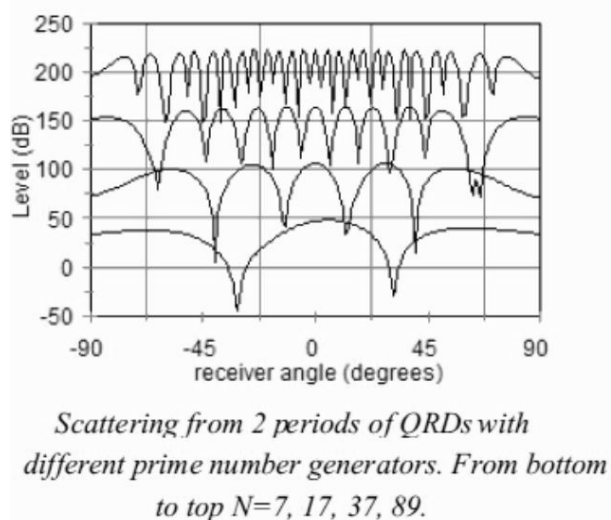


ΣΧΗΜΑ 22: Τοποθέτηση διαχυτών σε σειρά.

Η απόκριση των διαχυτών Schroeder μονής διάστασης κατανέμεται επί ενός ημικυλινδρικού πεδίου του οποίου ο άξονας είναι παράλληλος προς τον επιμήκη άξονα των φρεατίων. Στις περιπτώσεις περιστροφής της διάταξης κατά 90°, οι επιμέρους φασικές μετατοπίσεις εξαρτώνται από τη γωνία του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος ως προς τον επιμήκη άξονα των φρεατίων. Όταν το σήμα της πηγής προσεγγίζει κατά μέτωπον ή εγκάρσια ως προς τα διαχωριστικά τότε παρέχεται η προβλεπόμενη διάχυση, με τους λοβούς ανακλώμενης ενέργειας να κατανέμονται σε νέες διευθύνσεις εφόσον θα έχει περιστραφεί και το αντίστοιχο ημικυλινδρικό πεδίο απόκρισης. Όποτε όμως το σήμα προσεγγίζει παράλληλα ως προς τα διαχωριστικά, τότε η συμπεριφορά είναι ισοδύναμη απλής επίπεδης επιφάνειας δίχως εκτεταμένη διάχυση. Για αυτό το λόγο, η περιστροφή εφαρμόζεται περισσότερο στις επιφάνειες των «ζωντανών» άκρων αντί για τα πρώτα σημεία ανάκλασης στους πλαϊνούς τοίχους και την οροφή.

Εναλλακτικά τα φρεάτια με το μεγαλύτερο βάθος δύνανται να αναδιπλωθούν κατά 90°. Οι διαχυτικές ιδιότητες της περιόδου διατηρούνται με αξιόλογη μείωση του

βάθους και του βάρους της κατασκευής. Οι διαχυτές διπλής διάστασης χαρακτηρίζονται από ενσωμάτωση στο ίδιο πάνελ διασταυρούμενων ακολουθιών φρεατίων που εκτείνονται τόσο οριζοντίως όσο και καθέτως. Η εκτεταμένη διασπορά κατανέμεται επί ημισφαιρικού πεδίου του οποίου το νοητό κέντρο ταυτίζεται με το σημείο τομής μεταξύ των διαγώνιων της επιφάνειας που ορίζει το πάνελ. Επιλέγεται σε κάθε εφαρμογή ο μεγαλύτερος πρώτος αριθμός αυτόνομων φρεατίων που είναι εφικτός με βάση την πρακτικότητα και τις κατασκευαστικές δυνατότητες. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποικιλία βάθους των φρεατίων, τόσο περισσότερες διαφορετικές τάξεις λοβών ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας κι έκταση διάχυσης προκύπτουν. Στο σχήμα 23 φαίνεται ένα διάγραμμα διασποράς (πλάτος ανακλώμενου κύματος συναρτήσει γωνίας προσπίπτοντος) από διάταξη δύο περιόδων. Η πλησιέστερη στον οριζόντιο άξονα καμπύλη αντιπροσωπεύει ακολουθία 7 φρεατίων. Οι διαδοχικές ανώτερες αυτής αναπαριστούν ακολουθία 17,37 και 89 φρεατίων αντίστοιχα:



ΣΧΗΜΑ 23: Διάγραμμα διασποράς.

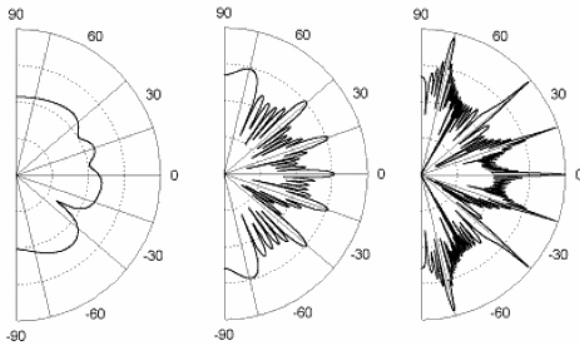
Αν το πλάτος κάθε περιόδου είναι υπερβολικά μικρό, τότε στην πρώτη συχνότητα σχεδίασης υπάρχει ένας κυρίαρχος λοβός ανακλώμενης ενέργειας σε μία μονάχα διεύθυνση, οπότε δεν τηρείται η συνθήκη των ισοδύναμων λοβών. Στην περίπτωση διατάξεων που περιλαμβάνουν στενές περιόδους, το πλάτος καθεμίας περιόδου γίνεται καθοριστικός παράγοντας έναντι του μέγιστου βάθους των φρεατίων ως προς το κάτω συχνοτικό όριο ωφέλιμης λειτουργίας. Έστω δύο διαφορετικές διατάξεις που περιλαμβάνουν περιόδους 7 φρεατίων (διαφορετικού αριθμού η καθεμία ώστε να είναι παραπλήσια η συνολική διάσταση αυτών) πλάτους 3cm στη μια περίπτωση κι 9cm στην άλλη και συχνότητα σχεδίασης οριζόμενη θεωρητικά από το μέγιστο βάθος στα 500Hz. Στην πράξη έχει αναφερθεί ότι για την πρώτη περίπτωση με τη στενότερη περίοδο το ελάχιστο τονικό ύψος όπου παρουσιάζει εκτεταμένη διάχυση είναι τα 1500Hz, δηλαδή τριπλάσιο της ονομαστικής συχνότητας σχεδίασης.

Ουσιαστικά δηλαδή υπάρχει τεράστια διαφορά ως προς την αποτελεσματικότητα αν οι διαχυτές για παράδειγμα τοποθετηθούν στο ταβάνι κάθετα και όχι επιμήκως και δεν θα πρέπει να τοποθετούνται κάποιοι κάθετα και κάποιοι επιμήκως, αλλά όλοι με την ίδια φορά, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



ΣΧΗΜΑ 24: Τοποθέτηση διαχυτών στο ταβάνι.

Για να επιτευχθούν ισοδύναμοι λοβοί ανακλώμενης ενέργειας είναι απαραίτητη η χρήση συστοιχίας περιόδων (τουλάχιστον τέσσερις). Τα παρακάτω πολικά διαγράμματα αναπαριστούν τους λοβούς διάχυσης στο άνω συχνοτικό όριο αποκοπής για διατάξεις περιλαμβάνουσες περιόδους 7 φρεατίων. Το αριστερό εκπροσωπεί διάταξη μίας μονάχα περιόδου, το μεσαίο συστοιχία 6 περιόδων και το δεξί συστοιχία 50 περιόδων. Οι τοποθεσίες των λοβών καθώς και των διευθύνσεων ίσου πλάτους επισημαίνονται με ακτινικές γραμμές κλίσης ± 76 , ± 40 , ± 19 και 0 μοιρών.



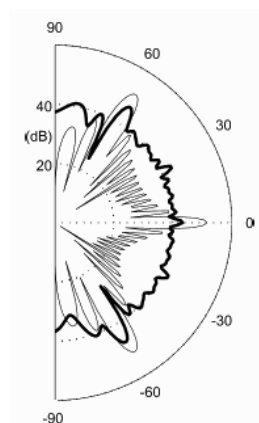
ΣΧΗΜΑ 25: Πολικά διαγράμματα λοβών διάχυσης.

Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της μοναδικής περιόδου τα σημεία ίσου πλάτους στο πολικό διάγραμμα δεν ευθυγραμμίζονται με τους λοβούς, σε αντίθεση με τη συστοιχία των 6 τεμαχίων όπου η συνθήκη ικανοποιείται. Με την προοδευτική αύξηση όμως του αριθμού των τεμαχίων παρουσιάζονται (λόγω πολλαπλής ενίσχυσης στις συγκεκριμένες διευθύνσεις) όλο και στενότεροι λοβοί διαρκώς αυξανόμενου πλάτους σε σύγκριση με τις υπόλοιπες δυνατές διευθύνσεις. Η ενέργεια των λοβών παραμένει σταθερή, πλην όμως στις μεσολαβούσες διευθύνσεις εμφανίζονται ενεργειακά ελάχιστα. Το εύρος των τελευταίων γίνεται μικρότερο με την άνοδο σε διαδοχικά πολλαπλάσια της συχνότητας σχεδίασης, αφού στις υψηλές συχνότητες το πλήθος (η πυκνότητα στο πεδίο) των διακριτών λοβών γίνεται όλο και μεγαλύτερο. Ως αναπόφευκτη επίπτωση, η διασπειρόμενη ενέργεια δεν είναι πραγματικά ίση προς όλες τις δυνατές διευθύνσεις στο πεδίο διάχυσης που ορίζει ο τύπος του διαχυτή. Προκύπτει έτσι το εξής οξύμωρο: Για την ακουστική φροντίδα μιας μεγάλης επιφάνειας εφαρμόζεται συστοιχία περιοδικά επαναλαμβανόμενων μοτιβών. Η περιοδική επανάληψη ευνοεί την ενίσχυση της διασποράς προς επιθυμητές διευθύνσεις που καθορίζονται από το μέγεθος του επαναλαμβανόμενου μοτιβου και τη διαμόρφωση των φρεατίων σε κάθε αυτόνομη μονάδα της συστοιχίας. Η προτιμητέα όμως κατανομή λοβών μειώνει την ικανότητα της συστοιχίας για ομοιόμορφη διασπορά προς όλες τις δυνατές διευθύνσεις. Κατά συνέπεια, η πιστή

τήρηση της προδιαγραφής της περιοδικότητας που απαιτείται για τη βέλτιστη διαχυτική απόδοση ισοδύναμων λοβών οδηγεί στη μείωση της αποτελεσματικότητάς της.

A.37. ANEΣΤΡΑΜΜΕΝΑ ΕΙΔΩΛΑ

Πρόκειται για τεμάχια στα οποία οι τιμές βάθους των φρεατίων έχουν αντικατασταθεί από τις συμπληρωματικές τους ως προς τη βάση της ακολουθίας (το βάθος n μονάδων μετατρέπεται σε $p-n$ μονάδες). Στο παράδειγμα του μορφώματος 17, η ανεστραμμένη περίοδος θα αποτελείται από την ακολουθία: 16,13,8,1,9,15,2,4,4,2,15,9,1,8,13,16,17. Αποτελεί τη βέλτιστη λύση, ιδιαίτερα για την ακουστική φροντίδα μεγάλων χώρων. Το ανεστραμμένο πάνελ εξ ορισμού καταλαμβάνει το πλήρες βάθος σχεδίασης, οπότε το κανονικό πάνελ είναι ρηχότερο. Το επόμενο πολικό διάγραμμα αντιπαραβάλλει την απόκριση συστοιχίας ομοειδών τεμαχίων (λεπτή γραμμή) με εκείνη συστοιχίας διαμορφωμένης μέσω παρεμβολής τεμαχίων των οποίων οι εσοχές αποτελούν ανεστραμμένα είδωλα των κανονικών.



ΣΧΗΜΑ 26: Πολικό διάγραμμα ανεστραμμένων ειδώλων.

A.38. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΧΥΤΩΝ

Ο Schroeder αρχικά ανέπτυξε τους RPG (reflection phase grating) διαχυτές ώστε να τους χρησιμοποιήσει σε μεγάλους χώρους, ώστε να εμπλουτίσει την ακουστική τους. Αλλά τελικά, αυτού του τύπου οι διαχυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου απαιτείται διάχυση μεγάλου συχνοτικού φάσματος. Αυτού του τύπου οι διαχυτές μπορούν, για καλύτερα αποτελέσματα, να τοποθετηθούν στους τοίχους και στο ταβάνι ενός recording studio, ώστε να εφοδιαστεί ο χώρος με πλουσιότερα χαρακτηριστικά διάχυσης και αντήχησης, ή μπορούν να τοποθετηθούν στο εγγύς πεδίο για πιο συγκεκριμένες περιοχές του χώρου όπου εκεί γίνεται ηχογράφηση κάποιων μουσικών οργάνων όπως πνευστά, έγχορδα, πιάνο κτλ. Αυτοί οι διαχυτές μπορούν επίσης να βελτιώσουν την ακουστική ενός μικρού απομονωμένου δωματίου όπως ένα drum booth, αυξάνοντας την πυκνότητα των ανακλώμενων κυμάτων με αποτέλεσμα να ενισχύεται η ακουστική του χώρου δίνοντας πιο πλούσιο ήχο.

Οι Heyser, Davis και Davis πρότειναν ένα σχέδιο για τα control rooms, το λεγόμενο LEDE (live-end-dead-end). Στο συγκεκριμένο σχέδιο ο χώρος μπροστά από τον ηχολήπτη πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο απορροφητικός γίνεται (ο χώρος αυτός συμπεριλαμβάνει και τα ηχεία) και το πίσω μέρος (πίσω από τον ηχολήπτη) του δωματίου πρέπει να είναι εντελώς διαχυτικό. Οι διαχυτές RPG είναι κατάλληλοι για αυτό το πίσω μέρος του control room (live end). Πιο συγκεκριμένα, τα βαθιά και στενά φρεάτια στους διαχυτές είναι κατάλληλα να παρέχουν συμμασική

κατευθυντικότητα στο γενικό φασματικό εύρος απαραίτητη για τα recording studios. Τα βαθιά φρεάτια δίνουν διάχυση στις χαμηλές συχνότητες και τα στενά φρεάτια δίνουν διάχυση σε συχνότητες των οποίων τα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερα από το διπλάσιο πλάτος των φρεατίων. Ο σχεδιασμός για ένα μεγάλο συχνοτικού εύρους πεδίο πρέπει να μπορεί να ελαχιστοποιήσει την αντήχηση και τη μετάδοση απωλειών, ειδικά στις χαμηλές συχνότητες. Επίσης ένας RPG διαχυτής μπορεί να προσφέρει την απαραίτητη διάχυση σε ένα τυπικό live-front control room, όπου ο χώρος μπροστά από τον ηχολήπτη πρέπει να είναι αρκετά διαχυτικός.

Συμπερασματικά λοιπόν οι διαχυτές Schroeder προσδίδουν στο χώρο την απαλή και γλυκιά ακουστική ενός μεγάλου χώρου συναυλιών. Με την κατάλληλη χρήση και τοποθέτηση αυτού του τύπου διαχυτών και ειδικά με τους διαχυτές RPG μονής διάστασης, βοηθούν ένα control room όσων αφορά την στερεοφωνική εικόνα του και τη φασματική ισορροπία ειδικότερα στο σημείο γύρω από τη κεντρική κονσόλα μίξης. Καταλήγοντας λοιπόν, η παρουσία διαχυτών Schroeder πλέον κρίνεται απαραίτητη για ένα control room και recording studio επαγγελματικών προδιαγραφών.

A.39. ΣΥΜΒΙΒΑΣΜΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΧΥΤΩΝ SCHROEDER

Η υλοποίηση των διαχυτών Schroeder υπόκειται σε σαφείς συμβιβασμούς:

- Η μεθοδολογία σχεδίασης βασίζεται σε προσεγγιστικά μοντέλα.
- Οι απώλειες ηχητικής ενέργειας κατά τη λειτουργία θεωρούνται αμελητέες (στους διαχυτές φραγμάτων φάσης ανάκλασης - RPG).
- Η λειτουργία εκάστοτε φρεατίου υποτίθεται ότι παραμένει ανεπηρέαστη από τη λειτουργία των γειτονικών φρεατίων. Αυτός ο συμβιβασμός έχει αποδειχθεί από μελέτες οριακών στοιχείων ότι ισχύει σε ικανοποιητικό βαθμό. Οι απώλειες, σε σχέση με τα μοντέλα, που έχουν παρατηρηθεί κατά την πειραματική εξέταση πραγματικών τεμαχίων αφορούν είτε μαθηματικές αποκλίσεις, είτε συνιστώσες των οποίων η ενέργεια υφίσταται μετατροπή εξαιτίας της μικρής ενδογενούς απορροφητικότητας των καθαρών διατάξεων φράγματος φάσης ανάκλασης.
- Η σχεδίαση εκτελείται με πρότυπο τα χαρακτηριστικά διασποράς επί του μακρινού πεδίου τη στιγμή που η θέση των ακροατών θα βρίσκεται πιθανότατα στο εγγύς πεδίο. Η εύρεση σε θέση εντός του μακρινού πεδίου ικανοποιεί δύο βασικά κριτήρια. Πρώτον, η απόσταση του ακροατή από την επιφάνεια της διάταξης να είναι μεγάλη συγκρινόμενη με το μήκος κύματος και δεύτερον, οι διαφορές στα μήκη των διαδρομών από διάφορα σημεία της επιφάνειας προς τον ακροατή να είναι μικρές συγκρινόμενες με το μήκος κύματος. Στη ζώνη του εγγύς πεδίου τα μήκη διαδρομών από διαφορετικά σημεία της διαχυτικής επιφάνειας προς τον ακροατή έχουν αξιοσημείωτες διαφορές με αποτέλεσμα το μοτίβο διασποράς να εμφανίζει έντονες κορυφώσεις και βυθίσεις αντί να είναι ενιαίο. Προτείνεται η τοποθέτηση του ακροατή σε απόσταση τουλάχιστον τριπλάσια του μήκους κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα σχεδίασης.
- Σειρά μελετών σύγκρισης για ρεαλιστικές θέσεις ακρόασης ανάμεσα σε συστοιχίες που είχαν περιοδική κι εναλλακτικά μη περιοδική διευθέτηση τεμαχίων απέδειξαν την καλύτερη απόδοση των δεύτερων ως προς τη διασπορά στο εγγύς πεδίο. Θεωρείται γενικά ότι μια σειρά Schroeder που παρουσιάζει καλή απόδοση στο μακρινό πεδίο θα τη διατηρεί σε μεγάλο βαθμό και στο εγγύς πεδίο. Αν και η φάση του κυματικού μετώπου θεωρείται

ότι παρέχει τις πληροφορίες εκείνες που συμβάλλουν στην αντιληπτική διάκριση μεταξύ των περιοδικών και μη διατάξεων, τα συνήθη πολικά διαγράμματα εγγύς πεδίου δεν περιέχουν φασικά στοιχεία. Ο ίδιος ο Schroeder είχε προτείνει το λύγισμα της διαχυτικής συστοιχίας κατά τα πρότυπα κοίλου παραβολικού κατόπτρου έτσι ώστε να επιτευχθεί εστίαση του μοτίβου διασποράς από τη ζώνη του μακρινού πεδίου στην εγγύς ζώνη. Παρεμφερές φαινόμενο, με σημαντικά μικρότερο κόστος από την προηγούμενη τεχνική, θα μπορούσε να προκύψει μέσω διαμόρφωσης του πυθμένα στα επιμέρους φρεάτια κατά τρόπον ώστε οι διαδοχικοί πυθμένες να ακολουθούν το γεωμετρικό τόπο ενός παραβολικού κατόπτρου. Η αρχή λειτουργίας στη συγκεκριμένη περίπτωση βασίζεται στο ότι η διακύμανση των φάσεων από τα διαδοχικά φρεάτια θα επιφέρει μετατόπιση της εστίασης για την ανακλώμενη ενέργεια από τη μακρινή στην εγγύς ζώνη. Η προτεινόμενη διάταξη στο σύνολό της θα προσομοιάζει με εκείνη των επιμέρους μονάδων ηχείων στις συστοιχίες PA (Line Arrays).

- Στους παραπάνω περιορισμούς έρχεται να προστεθεί και η αμφιλεγόμενη αισθητική των διατάξεων, η οποία δεν ταιριάζει πάντοτε με τις σύγχρονες τάσεις στην αρχιτεκτονική σχεδίαση, καθώς και η αναπόφευκτη συμπεριφορά «σκονοπαγίδα».

A.40. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ – AUDIO CONTROL ROOMS

Μια τυπική μορφή ενός στούντιο ηχογραφήσεων είναι, να αποτελείται από ένα δωμάτιο ηχογραφήσεων (recording room) όπου εκεί πραγματοποιούνται οι ηχογραφήσεις των μουσικών οργάνων, φωνής κτλ., και από ένα δωμάτιο ελέγχου (control room) όπου εκεί στεγάζεται ο εξοπλισμός για την καταγραφή-ηχογράφιση, την δρομολόγηση και τον χειρισμό του ήχου. Συχνά πλέον, στα περισσότερα στούντιο υπάρχουν και άλλοι χώροι όπως οι λεγόμενοι θάλαμοι απομόνωσης (isolation booths), όπου εκεί ηχογραφούνται συνήθως τα κρουστά, οι κιθάρες και οι φωνές ξεχωριστά.

Ένα control room αποτελεί ένα ιδανικό περιβάλλον αναπαραγωγής και ακρόασης του ήχου. Έχοντας ως στόχο την αναπαραγωγή του ηχητικού υλικού με τη μεγαλύτερη δυνατή πιστότητα, ο χώρος ελέγχου θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σωστά σε ό, τι αφορά το σχήμα, τις διαστάσεις, την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών και την τοποθέτηση των ηχείων. Το σχήμα του δωματίου και οι διαστάσεις παίζουν σπουδαίο ρόλο στην κατανομή των κανονικών ιδιορυθμών του δωματίου και η σωστή κατανομή τους στο χώρο αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες στον σχεδιασμό ενός δωματίου ελέγχου. Οι συχνότητες συντονισμού του χώρου οι οποίες αναπτύσσονται λόγω των διαστάσεων και του σχήματος του χώρου θα πρέπει να καλύπτουν ομοιόμορφα τη συχνοτική ζώνη μεταξύ 20-110Hz, χωρίς να παρουσιάζονται μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, ή να συμπίπτουν πολλοί τρόποι δόνησης σε μια συγκεκριμένη συχνότητα.

Ένα μικρό δωμάτιο ελέγχου (small control room) θεωρείται ένας χώρος με διαστάσεις μεταξύ 24 και 40m³. Άρα αν ένας τέτοιος χώρος χρησιμοποιηθεί ως control room, πρέπει πρώτα να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράγοντες.

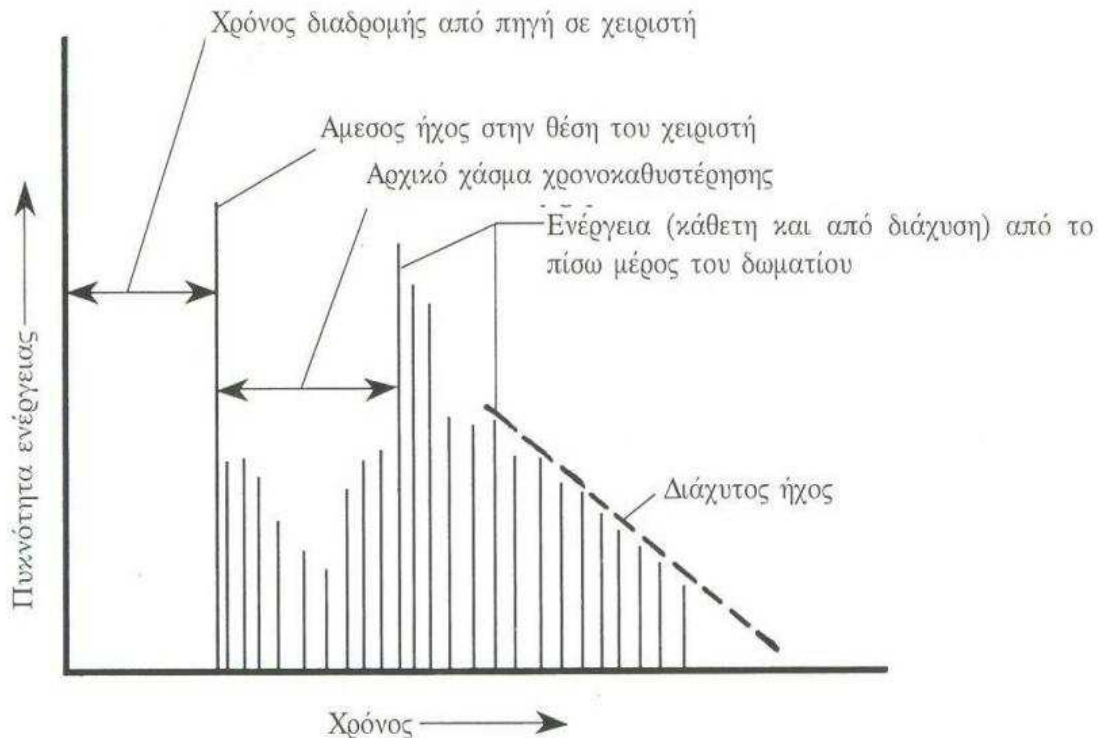
Οι ανακλάσεις που επιστρέφουν από τους τοίχους και τις επιφάνειες του εξοπλισμού διανύουν μικρότερη απόσταση από ό, τι σε ένα μεγαλύτερο δωμάτιο, άρα φτάνουν πιο γρήγορα στο αυτί του ηχολήπτη. Συνεπώς οι ανακλάσεις αυτές έχοντας μεγάλη ενέργεια, τείνουν να αναμειγνύονται με τον απευθείας ήχο (direct sound), να «χρωματίζουν» τον ήχο των ηχείων και να καταστρέφουν την στερεοφωνική εικόνα.

Οι διαχυτές και οι απορροφητές είναι τα βασικά υλικά με τα οποία θα διορθωθούν αυτά τα προβλήματα. Σε μικρούς χώρους είναι δύσκολη η τοποθέτηση τέτοιων υλικών μιας και οι επιφάνειες είναι περιορισμένες και τα προβλήματα, από ακουστικής πλευράς, είναι δυσκολότερο να αντιμετωπιστούν. Σε μικρά δωμάτια ενδείκνυται η χρήση απορροφητών μιας και οι διαχυτές διατηρούν την στερεοφωνική εικόνα σε μεγαλύτερη περιοχή και επιστρέφουν μεγάλο ποσοστό ενέργειας στην θέση του ηχολήπτη (θέση ακρόασης) γεγονός το οποίο «χρωματίζει» τον ήχο των ηχείων. Η επαρκής απορρόφηση με την βοήθεια απορροφητικών υλικών, συμβάλλει στην εξασθένιση των κανονικών ιδιορυθμών του δωματίου και στην διεύρυνση της συχνοτικής τους εξάπλωσης. Αυτά τα φαινόμενα οδηγούν σε μικρότερο χρωματισμό του ήχου. Τα δωμάτια με περιορισμένο χώρο δίνουν μικρά περιθώρια τοποθέτησης απορροφητικών υλικών ή διαχυτών μιας και το βάθος των οπών ενός απορροφητή ή διαχυτή είναι δεδομένο, ανάλογα με τη συχνότητα που καλείται να επέμβει.

A.41. Η ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΝΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Αρχικό Χάσμα Χρονοκαθυστέρησης (Initial Time Gap)

Το αρχικό χάσμα χρονοκαθυστέρησης αναφέρεται στη διαφορά χρόνου άφιξης του απευθείας ήχου της πηγής και στο χρόνο άφιξης των πρώτων ανακλάσεων. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι αίθουσες που χαρακτηρίζονται ως καλές από άποψη ακουστικής συμπεριφοράς διαθέτουν ένα συγκεκριμένο χάσμα χρονοκαθυστέρησης ίσο με 20ms περίπου. Το σχήμα που ακολουθεί βοηθά στην κατανόηση του αρχικού χάσματος χρονοκαθυστέρησης.



ΣΧΗΜΑ 27: Αρχικό Χάσμα Χρονοκαθυστέρησης (ITG).

Σε ένα συμβατικό control room, ο μηχανικός ήχου δεν μπορεί να ακούσει το ITG επειδή αυτό καλύπτεται από τις πρώτες ανακλάσεις στο δωμάτιο. Ο τρόπος για να επιτραπεί στον μηχανικό ήχου να ακούσει το χάσμα χρονοκαθυστέρησης είναι με την εξάλειψη ή την ελάττωση των πρώτων ανακλάσεων στον χώρο. Αυτή η διευκρίνιση του προβλήματος οδήγησε στη λύση της τοποθέτησης απορροφητικού υλικού στις επιφάνειες γύρω από τα μεγάφωνα στο εμπρός μέρος του δωματίου ελέγχου.

Συχνотική Περιοχή Ενός Control Room

Το συχνотικό εύρος σε ένα δωμάτιο ελέγχου είναι πολύ μεγάλο και κάθε εξάρτημα το οποίο εξαρτάται από τη συχνότητα θα πρέπει να εκτελεί τη λειτουργία του στην περιοχή αυτή. Η συνήθως αποδεκτή συχνотική περιοχή υψηλής πιστότητας είναι από 20Hz έως 20KHz σε έκταση δέκα οκτάβων ή τριών δεκάδων. Η περιοχή αυτή αντιπροσωπεύει μια περιοχή μηκών κύματος από περίπου 17,5m έως 1,5cm. Το κάθε δωμάτιο ελέγχου θα πρέπει να κατασκευάζεται με βάση αυτό το γεγονός. Η χαμηλότερη συχνότητα τρόπων ταλάντωσης έχει σχέση με τη μεγαλύτερη διάσταση

του δωματίου (διαγώνιος). Κάτω από τη συχνότητα αυτή δεν υπάρχει υποστήριξη του ήχου με συντονισμό από τους κανονικούς ιδιορυθμούς του δωματίου. Επιπλέον, κάτω από τη συχνότητα αυτή η απόκριση του δωματίου πέφτει απότομα και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$f = \frac{c}{2L} L \quad (32)$$

όπου c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και L η διαγώνιος του δωματίου.

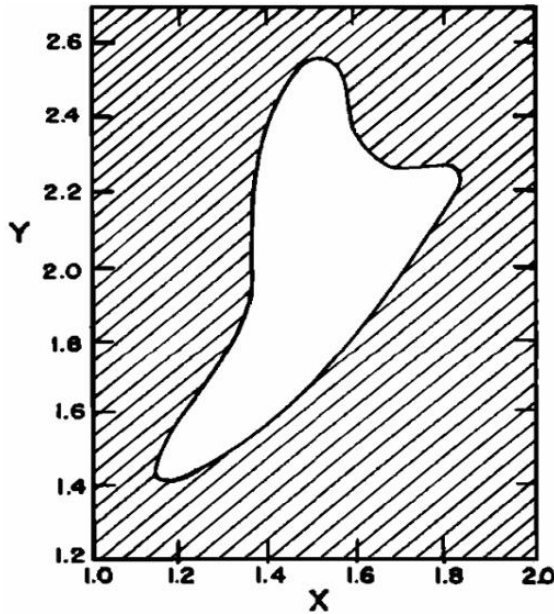
Αναλογίες Ορθογώνιων Δωματίων Ελέγχου

Για να επιτευχθεί επαρκής κατανομή των ιδιορυθμών θα πρέπει να δοθεί μεγάλη έμφαση στις αναλογίες του control room. Είναι δεδομένο ότι τα δωμάτια σε σχήμα κύβου είναι η χειρότερη επιλογή, μιας και οι τρεις τύποι ιδιορυθμών συμπίπτουν αλλά και έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Κατά καιρούς έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές, αναλογίες τέτοιες ώστε να είναι ιδανικές για control room. Παρακάτω δίνονται μερικές ενδεικτικές τιμές σε περιπτώσεις που οι αναλογίες του δωματίου θα έχουν πολύ μεγάλη σημασία:

	ΥΨΟΣ (m)	ΠΛΑΤΟΣ (m)	ΜΗΚΟΣ (m)
SEPMeyer	1.00	1.14	1.39
	1.00	1.28	1.54
	1.00	1.60	2.33
LOUDEN	1.00	1.40	1.90
	1.00	1.30	1.90
	1.00	1.50	2.50
VOLKMAN	1.00	1.50	2.50
BONER	1.00	1.26	1.59

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Αναλογίες ορθογώνιων δωματίων ελέγχου.

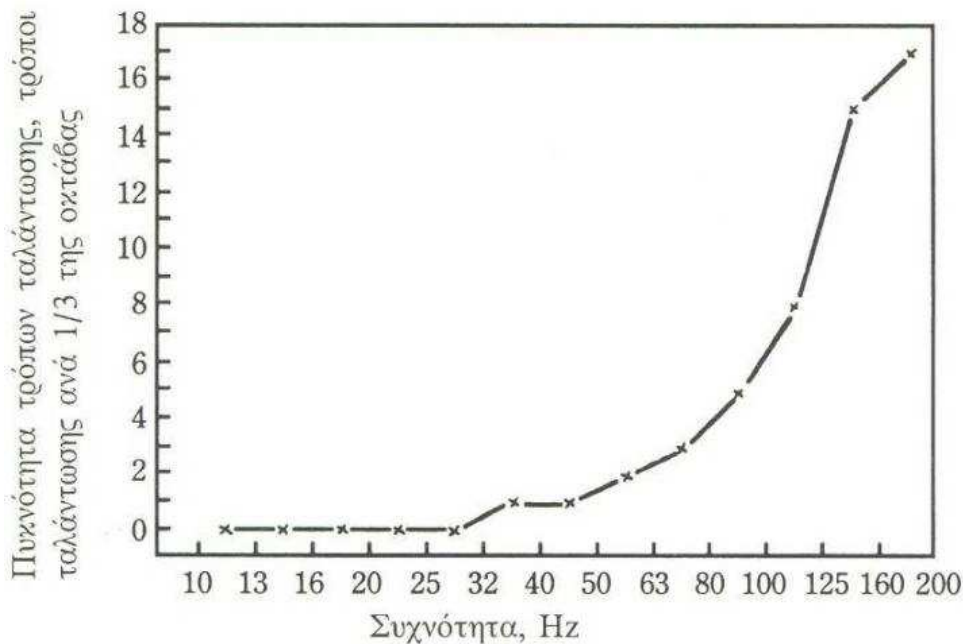
Το σχήμα που ακολουθεί ορίζει με έναν διαφορετικό τρόπο από ό, τι ο πίνακας 2, τις ιδανικές αναλογίες ενός ορθογώνιου δωματίου. Για να χρησιμοποιηθεί το σχήμα 28 θα πρέπει να βρεθεί η μία διάσταση (μήκος ή πλάτος) στο άξονα των y και έπειτα η διάσταση που υπολείπεται στον άξονα των x . Αν το σημείο ένωσης των δύο αριθμών βρίσκεται μέσα στη λευκή περιοχή τότε οι διαστάσεις του δωματίου θεωρούνται ιδανικές. Είναι βέβαια πιθανό οι διαστάσεις του δωματίου να είναι ιδανικές σύμφωνα με το σχήμα 28 αλλά να μην συμφωνούν με τον κριτήριο Bonello που αναφέρεται παρακάτω.



ΣΧΗΜΑ 28: Το διάγραμμα Bolt.

A.42. ΚΡΙΤΗΡΙΟ BONELLO

Το κριτήριο Bonello βρίσκει χρήση σε κάθε περίπτωση όπου απαιτείται η ακριβής κατασκευή ενός δωματίου με στόχο την ποιοτική ακρόαση και βασίζεται στο υπολογισμό της κατανομής των κανονικών ιδιορυθμών ενός δωματίου με τη χρήση H/Y . Η μέθοδος αυτή λειτουργεί ως εξής: αρχικά χωρίζεται το κάτω άκρο του ακουστού φάσματος σε ζώνες με πλάτος μιας οκτάβας και θεωρείται το πλήθος των τρόπων ταλάντωσης σε κάθε ζώνη κάτω από 200Hz. Οι ζώνες οκτάβας επιλέγονται γιατί, κατά προσέγγιση, είναι οι κρίσιμες ζώνες του ανθρώπινου αυτιού. Στη συνέχεια εισάγονται όλοι οι τρόποι δόνησης του δωματίου (αξονικοί, πλάγιοι, εφαπτομενικοί) σε σχέση με τη συχνότητα και εξετάζεται αν η συγκεκριμένη καμπύλη που σχηματίζεται αυξάνει μονοτονικά. Κάθε 1/3 της οκτάβας θα πρέπει να έχει περισσότερους τρόπους δόνησης από την προηγούμενη ή τουλάχιστον το ίδιο πλήθος, για να ικανοποιείται το κριτήριο Bonello. Δεν θα πρέπει να υπάρχει σύμπτωση κανονικών ιδιορυθμών εκτός κι αν στην ίδια ζώνη υπάρχουν τουλάχιστον πέντε τρόποι ταλάντωσης. Εφαρμόζοντας τις παραμέτρους που αναφέρονται παραπάνω σε ορθογώνιο δωμάτιο συγκεκριμένων διαστάσεων θα πρέπει η καμπύλη που θα σχηματιστεί να έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



ΣΧΗΜΑ 29: Παράμετροι του κριτηρίου Bonello.

A.43. ΕΙΔΗ ΔΩΜΑΤΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL ROOM)

Δωμάτια Ελέγχου Βασισμένα Στη Γεωμετρία

Παρακάτω παρατίθενται τα πιο διαδεδομένα είδη δωματίων ελέγχου και κάποιες γενικές πληροφορίες για την προέλευσή τους και την εξέλιξή τους. Η προσπάθεια για τη δημιουργία δωματίων ελέγχου συγκεκριμένου σχεδίου ξεκίνησε περίπου το 1970. Ο στόχος ήταν η δημιουργία control rooms όπου τα χαρακτηριστικά της κάθε ηχογράφησης δεν θα άλλαζαν ανάλογα με το χώρο όπου γινόταν η ακρόαση. Μια από τις πρώτες προσπάθειες να δημιουργηθεί ένα συγκεκριμένου τύπου control room έγινε από τον Tom Hidley στο Westlake Audio της Καλιφόρνια, Η.Π.Α. Ο σχεδιασμός ήταν βασισμένος στην παντελή έλλειψη παράλληλων επιφανειών, για την τέλεια εξάλειψη των αξονικών στάσιμων κυμάτων τα οποία και περιέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας. Αυτού του τύπου τα δωμάτια ελέγχου ήταν σχεδιασμένα ώστε να έχουν χρόνο αντήχησης μικρότερο από 0.3 sec. Χαρακτηριστικό τους η τοποθέτηση μεγάλων ηχοπαγίδων σε μια προσπάθεια να συνδυαστούν οι χρόνοι αντήχησης χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων έτσι ώστε να αποφευχθούν στάσιμα κύματα χαμηλής συχνότητας.

A.44. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ JENCEN

Παράλληλα, στα μέσα του 1970 στην Ευρώπη, κατασκευάστηκαν από τον W.W Jencen, δωμάτια ελέγχου με τα εξής χαρακτηριστικά: Χρήση «πριονωτών» απορροφητών, οι οποίοι απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος του ήχου που εκπέμπεται από τα ηχεία. Στα δωμάτια αυτά υπήρχαν ανακλαστικές επιφάνειες τοποθετημένες σε τέτοιες γωνίες ώστε να ανακλούν ήχους που δημιουργούνται μέσα στο δωμάτιο, όπως ομιλίες. Αυτές οι ανακλαστικές επιφάνειες όμως δεν ανακλούσαν τον ήχο που προέρχονταν από τα ηχεία. Ο πίσω τοίχος ήταν συνήθως ανακλαστικός, παρόλο που στα περισσότερα από τα control room που κατασκευάστηκαν με αυτή τη μέθοδο, ο πίσω τοίχος ήταν περισσότερο απορροφητικός. Το ενδιαφέρον που παρατηρείται σε αυτού του τύπου τα δωμάτια είναι το ότι έκαναν ξεκάθαρη τη διαφορά μεταξύ των

ακουστικών συνθηκών που απαιτούνται για την ακρόαση (ουδέτερος χαρακτήρας του δωματίου) και των ακουστικών συνθηκών που απαιτούνται έτσι ώστε να δίνεται η αίσθηση της άνεσης μέσα στο δωμάτιο (σχετικά «ζωντανός» χαρακτήρας του δωματίου). Σε αυτού του είδους τα δωμάτια χρησιμοποιούνταν συνήθως ηχεία εντοιχισμένα στον εμπρόσθιο τοίχο (build-in monitor), κατασκευασμένα ειδικά για τις ανάγκες του χώρου.

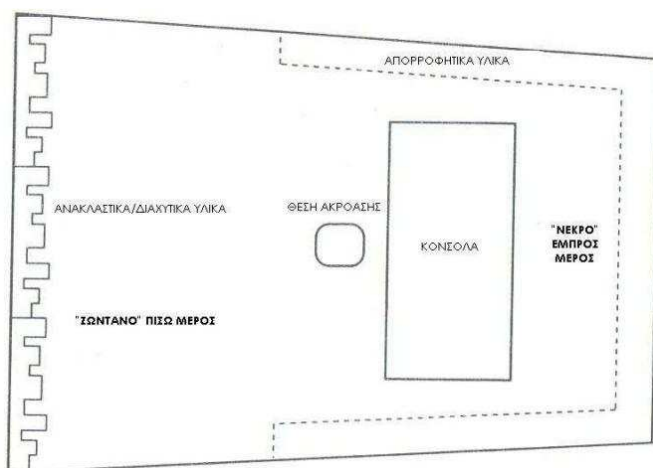
A.45. TO NON-ENVIRONMENT ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ

Τη δεκαετία του 1970 και μετά την εμφάνιση της στερεοφωνίας, εισήχθη ένας νέος τρόπος κατασκευής δωματίων ελέγχου. Σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο κατασκευής ο μπροστά τοίχος (συνήθως από πέτρα) και το πάτωμα ήταν υψηλά ανακλαστικές επιφάνειες ενώ το πίσω μέρος του δωματίου, οι πλαϊνοί τοίχοι και το ταβάνι ήταν υψηλά απορροφητικές επιφάνειες. Επίσης, ο μπροστά τοίχος, οι πλαϊνοί τοίχοι καθώς και το ταβάνι κατασκευάζονταν με μια ελαφριά κλίση για την αποφυγή φαινομένων τρεμοπαιξίματος ηχούς (flutter echoes). Τυπικοί χρόνοι αντήχησης (T_{60}) για ένα τέτοιου τύπου control room είναι 380ms για ένα δωμάτιο με όγκο 100m^3 και 430ms για ένα δωμάτιο συνολικού όγκου 200m^3 . Οι δυο ανακλαστικές επιφάνειες, εμπρός τοίχος και πάτωμα, μαζί με τις σκληρές επιφάνειες των συσκευών του εξοπλισμού παρέχουν ως ένα βαθμό, ένα «ζωντανό» περιβάλλον για τους ήχους που παράγονται μέσα στο δωμάτιο, μειώνοντας την αίσθηση του ανηχοϊκού θαλάμου. Ο εμπρός τοίχος λειτουργεί ως ένα διαχωριστικό έναντι του οποίου μπορούν τα ηχεία να πιέζουν βοηθώντας στην αποδοτικότερη και ομαλότερη διασπορά των χαμηλών συχνοτήτων. Τα ηχεία βρίσκονταν ενσωματωμένα στον εμπρός τοίχο (build-in monitor) με στόχο την μείωση των ανακλάσεων από τα άκρα και θεωρούνταν ως στοιχείο της περιμέτρου του χώρου. Επιπροσθέτως, με την τοποθέτηση των ηχείων σε αυτό το σημείο μειώνονται τα φαινόμενα φίλτρου κτένας (comp filtering)⁸ μεταξύ των ηχείων και των πρώτων ανακλάσεων από τον μπροστά τοίχο. Κατά συνέπεια, η ενσωμάτωση των ηχείων στον τοίχο εξαλείφει κάθε ανομοιομορφία στην απόκριση των που μπορεί να προκαλείται από την καμπύνα ή από τη διαφορά διαδρομής μεταξύ του απευθείας ήχου από τα ηχεία και των χαμηλής συχνότητας ηχητικών κυμάτων που ανακλώνται από τον τοίχο που βρίσκεται πίσω από τα ηχεία όταν αυτά δεν είναι ενσωματωμένα. Εκτός από το πάτωμα και τις συσκευές του εξοπλισμού, τα ηχεία «βλέπουν» σε ένα ημι-ανηχοϊκό θάλαμο. Τα ακουστικά λοιπόν χαρακτηριστικά του δωματίου εξαρτώνται από το αν ο ήχος παράγεται μέσα στο δωμάτιο ή από κάποιο σημείο της περιμέτρου του. Προβλήματα ανακλάσεων από τα ηχητικά κύματα που προσπίπτουν στις συσκευές, μπορούν να αντιμετωπιστούν με την τοποθέτηση αυτών με κατάλληλη κλίση. Ο στόχος σε αυτού του είδους τα δωμάτια είναι η ακρόαση του ηχητικού υλικού από τα ηχεία και τίποτα περισσότερο. Με την αύξηση της απορρόφησης μέσα στο δωμάτιο και την μείωση των ανακλάσεων, το ποσοστό του απευθείας ήχου σε σχέση με τον ανακλώμενο ήχο αυξάνεται. Κατά συνέπεια ο «χρωματισμός» του ήχου μειώνεται. Η ακρόαση όμως μέσα σε ένα τέτοιο δωμάτιο έρχεται σε αντίθεση και δεν συμβαδίζει με την ακρόαση του ηχητικού υλικού στον οικιακό χώρο. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπήρχε καμία συμβατότητα μεταξύ δυο ίδιας κατασκευής δωματίων και η χρήση EQ δεν βοήθησε στην ακουστική βελτίωση του χώρου.

⁸ Δυο ηχητικά σήματα που φθάνουν στο ίδιο σημείο με διαφορά χρόνου το ένα από το άλλο.

A.46. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ LIVE-END, DEAD-END (LEDE)

Προς το τέλος της δεκαετίας του 1970 άρχισε να ερευνάται η δημιουργία ενός δωματίου ελέγχου του οποίου ο σχεδιασμός βασίζεται, σε μεγάλο βαθμό, σε ψυχοακουστικά φαινόμενα και στην αίσθηση της κατευθυντικότητας του ήχου όπως προσλαμβάνεται από το ανθρώπινο σύστημα ακοής (από τους ερευνητές Heyser, Davis και Davis). Η αρχή λειτουργίας αυτών των δωματίων βασίζεται στη διαφορά χρόνου μεταξύ του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων. Αυξάνοντας το διάστημα αυτό, ο ανθρώπινος εγκέφαλος μπορεί να ξεχωρίσει τον ακουστικό χαρακτήρα του δωματίου και να τον αγνοήσει. Ο τρόπος κατασκευής αυτών των δωματίων έχει ως εξής: το μπροστά μισό του δωματίου είναι υψηλά απορροφητικό, σχεδόν ανηχοϊκό με στόχο την μείωση των πρώτων ανακλάσεων. Ο πίσω τοίχος, καθώς και οι πλαϊνοί τοίχοι, όπως και το ταβάνι είναι καλυμμένα με διαχυτές στοχεύοντας στη διάχυση των πρώτων ανακλάσεων και στη μείωση του «χρωματισμού» του ηχητικού υλικού. Όπως επίσης και στην εξάλειψη των φαινομένων τρεμοπαιξίματος ήχους (flutter echo)⁹ μεταξύ των πλαϊνών τοίχων και γενικά στη δημιουργία ενός διάχυτου ηχητικά πεδίου.



ΣΧΗΜΑ 30: Δωμάτιο ελέγχου LEDE.

Το δωμάτιο είναι γεωμετρικά κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται μια ζώνη ελεύθερη από τις πρώτες ανακλάσεις στη θέση ακρόασης. Η ιδέα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βασίζεται στην ξεκάθαρη ακρόαση του απευθείας ήχου από τα ηχεία και τη μεσολάβηση κάποιου καθορισμένου χρονικού διαστήματος πριν οι πρώτες ανακλάσεις φθάσουν στον ακροατή. Σαν αποτέλεσμα έχουμε ένα πραγματικά ουδέτερο δωμάτιο όπου η ακρόαση του ηχητικού υλικού δεν αλλάζει όταν αυτό αναπαραχθεί σε κάποιο άλλο ίδιου τύπου δωμάτιο. Ένα δωμάτιο ελέγχου για να λάβει την πιστοποίηση LEDE από το Synergetic Audio Concepts (Syn-Aud Con) θα πρέπει να πληρεί τις εξής προϋποθέσεις:

- Το δωμάτιο να είναι φτιαγμένο εξωτερικά από ένα ασύμμετρο κέλυφος το οποίο θα είναι ελεύθερο από συντονισμούς στις χαμηλές συχνότητες. Το κέλυφος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να επιτρέπει την ανάπτυξη των μπάσων συχνοτήτων.

⁹ Πρόκειται για ένα πολλαπλό echo εφέ όπου οι ανακλάσεις ακολουθούν πολύ γρήγορα η μία την άλλη.

- Ύπαρξη συμμετρικού εσωτερικού κελύφους. Η συχνότητα διασταύρωσης μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού κελύφους θα πρέπει να είναι ίση με:

$$f_x = \frac{3c}{\text{μικρότερη διάσταση δωματίου}} \quad (33).$$

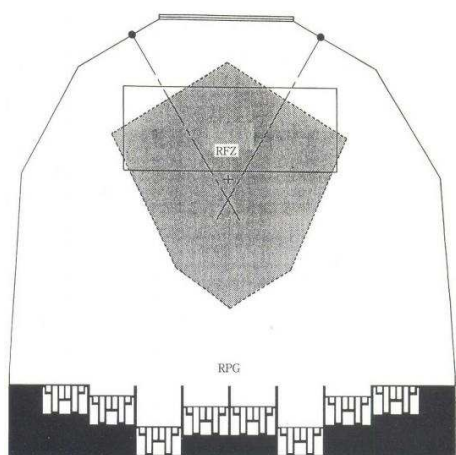
- Θα πρέπει να υπάρχει μια ανηχοϊκή διαδρομή μεταξύ των monitor ηχείων και του ηχολήπτη, η οποία θα πρέπει να είναι κατά 2-5 ms μεγαλύτερη από το αρχικό χάσμα χρονοκαθυστερήσης μέσα στο χώρο ηχογράφησης.
- Θα πρέπει να υπάρχει ένα έντονα διαχυτικό ηχητικό πεδίο κατά την διάρκεια έναρξης του φαινομένου Haas¹⁰.
- Κανένα ίχνος «προγενέστερου» ήχου (early-early sound) δεν θα πρέπει να υπάρχει. Αυτοί είναι τυχόν ήχοι που φτάνουν στα αυτιά του ηχολήπτη πριν από τον απευθείας ήχο. Οι ήχοι αυτοί εμφανίζονται όταν τα ηχεία δεν είναι με ακρίβεια εντοιχισμένα και ακτινοβολούν τον ήχο μέσω της οικοδομικής κατασκευής.
- Ο σκληρός πίσω τοίχος, οι σκληροί πλαϊνοί τοίχοι καθώς και το πίσω μέρος της οροφής θα πρέπει να είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να παρέχουν ανάμιξη των φαινομένων φίλτρου κτένας που δημιουργούνται και να τα μετατρέπουν σε υψηλής πυκνότητας ηχητικό πεδίο χωρίς μετρήσιμες ανωμαλίες.

A.47. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ REFLECTION FREE ZONE (RFZ)

Τα δωμάτια του τύπου RFZ (ζώνης ελεύθερης από ανακλάσεις) ακολουθούν την ίδια κατασκευαστική λογική με αυτήν των δωματίων τύπου LEDE. Και σε αυτήν την κατασκευαστική προσέγγιση ο στόχος είναι η δημιουργία ενός χώρου ακρόασης όπου ο ακουστικός χαρακτήρας του δωματίου θα επιδρά όσο το δυνατόν λιγότερο στην αναπαραγωγή του ηχητικού υλικού. Ο σχεδιασμός στοχεύει στη δημιουργία μιας χωρικά και χρονικά ζώνης ελεύθερης από ανακλάσεις, η οποία περιβάλλει τη θέση ακρόασης-μίξης. Η ζώνη είναι χωρική γιατί υπάρχει μόνο σε ένα συγκεκριμένο σημείο του δωματίου και χρονική γιατί ο έλεγχος των ανακλάσεων πραγματοποιείται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό σημείο, μεταξύ του χρόνου άφιξης των πρώτων ανακλάσεων και πριν από το χρόνο άφιξης των ανακλάσεων που προέρχονται από το σώμα του δωματίου. Θέλοντας κανείς να σχεδιάσει ένα τέτοιο δωμάτιο θα πρέπει να

¹⁰ (Από την επίσημη δημοσίευση του Helmut Haas, 12/1949): Περιγράφει το ψυχοακουστικό φαινόμενο του να προσδιορίζεται ορθά η κατεύθυνση μιας πηγής ήχου που ακούγεται και από τα δύο αυτιά αλλά φτάνει σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στο καθένα από αυτά. Εξαιτίας της γεωμετρίας του κεφαλιού (δύο αυτιά σε απόσταση μεταξύ τους διαχωρισμένα από το φράγμα του κρανίου), ο άμεσος ήχος από κάθε πηγή πρώτα εισέρχεται στο κοντινότερο προς την πηγή αυτί και ύστερα το μακρύτερο. Το φαινόμενο λέει πως οι άνθρωποι προσδιορίζουν μια ηχητική πηγή στο χώρο βασιζόμενοι στον πρώτο ήχο που έγινε αντιληπτός, ε φ ό σ ο ν οι αντίστοιχες αφίξεις στα αυτιά δεν έχουν μεταξύ τους μεγαλύτερη χρονική διαφορά από 25-35msec. Εάν η άφιξη στο πιο απομακρυσμένο αυτί υπερβαίνει σε καθυστέρηση το προαναφερθέν όριο, τότε ακούγονται δύο ξεχωριστοί ήχοι. Το φαινόμενο ισχύει ακόμα κι αν η δεύτερη άφιξη είναι ισχυρότερη από την πρώτη (υπό τον όρο να μην υπερβαίνει τα 10dB). Ο εγκέφαλος ξεγελιέται και δεν «ακούει» τον καθυστερημένο ήχο. Αποτελεί το ακουστικό παράδειγμα της ανθρώπινης αισθητηριακής «αναχαίτισης» που ισχύει σε όλες τις αισθήσεις. Η τελενταία, ορίζει το φαινόμενο όπου η ανταπόκριση στο πρώτο ερέθισμα προκαλεί παρακώλυση ανταπόκρισης σε δεύτερο ερέθισμα που απέχει ελάχιστα χρονικά από το πρώτο (λχ εντός του διαστήματος των 35msec όσον αφορά το αυτί). Το φαινόμενο Haas περιγράφει τελικά το πώς είναι δυνατή η πλήρης αναπαραγωγή στερεοφωνικού ήχου από δύο μόνο ηχεία.

ασχοληθεί με τα μαθηματικά των πηγών ειδώλων. Η συνεισφορά ανάκλασης από επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από μια εικονική πηγή που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του ανακλώντος επιπέδου σε ευθεία κάθετη στο επίπεδο αυτό, η οποία διέρχεται από το σημείο παρατήρησης. Έχοντας λοξές επιφάνειες σε τρεις διαστάσεις, είναι αρκετά δύσκολο να υπολογίσουμε όλες τις εικονικές πηγές, πράγμα που είναι απαραίτητο για να οριστούν τα όρια της ζώνης ελεύθερης από ανακλάσεις. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η κάτοψη ενός δωματίου ελέγχου με ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις.



ΣΧΗΜΑ 31: Κάτοψη RFZ δωματίου ελέγχου.

Τα monitor ηχεία βρίσκονται τοποθετημένα όσο το δυνατόν κοντύτερα στην τριεδρη γωνία που σχηματίζεται με την τομή της οροφής. Στρεβλώνοντας με ακρίβεια τους εμπρός πλάγιους τοίχους καθώς και το εμπρός μέρος της οροφής, οι ανακλάσεις οδηγούνται εκτός του όγκου που περιέχει τον ηχολήπτη. Συνήθως στο πίσω μέρος του δωματίου τοποθετείται μια πλήρης εγκατάσταση διαχυτών, έτσι η ηχητική ενέργεια ευρείας ζώνης συχνοτήτων που προσπίπτει στο πίσω μέρος του δωματίου διαχέεται και κατευθύνεται πίσω στον ηχολήπτη έχοντας το κατάλληλο χάσμα χρονοκαθυστέρησης. Ο έλεγχος των ανακλάσεων, όπου ήταν και ο στόχος, αναπτύχθηκε εν μέσω διαμάχης που ήθελε το εμπρός μέρος του δωματίου να είναι απορροφητικό αλλά και την ύπαρξη παράθυρου επικοινωνίας στο εμπρός μέρος του δωματίου ελέγχου. Παράλληλα με τη χρήση απορροφητών και διαχυτών για τον έλεγχο των ανακλάσεων υιοθετήθηκε και η πρόταση της κατασκευής των τοίχων αλλά και του ταβανιού με κλίση. Έτσι η λύση δόθηκε χάρη στη γεωμετρία όπου με προσεκτικό σχεδιασμό οι ανακλάσεις από το τζάμι του παραθύρου επικοινωνίας οδηγούνται εκτός της θέσης ακρόασης. Ένα από τα μειονεκτήματα αυτής της κατασκευαστικής προσέγγισης είναι ότι η καθορισμένη περιοχή είναι αρκετά περιορισμένη επιτρέποντας μόνο στον ηχολήπτη ποιοτική ακρόαση. Σε μοντέρνες κατασκευές προτείνεται η χρήση απορροφητών και διαχυτών συνδυαστικά, με στόχο τη διεύρυνση της θέσης ακρόασης. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν από δωμάτιο σε δωμάτιο αυτού του τύπου και που επιδρούν στην ακρόαση και μίξη του ηχητικού υλικού.

A.48. EARLY SOUND SCATTERING ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (ESS)

Μια εναλλακτική προσέγγιση των δωματίων ελέγχου LEDE/RFZ είναι η κατασκευή ενός δωματίου του οποίου οι ανακλάσεις θα είναι ομοιόμορφα τυχαίες έτσι ώστε να μην μπορούν να προσδώσουν χαρακτήρα στον ήχο. Στα δωμάτια τύπου ESS, το εμπρός μέρος κατασκευάζεται έτσι ώστε να είναι υψηλά διαχυτικό, συμπεριλαμβανόμενων και των τοίχων στους οποίους βρίσκονται τοποθετημένα τα ηχεία, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη διάχυση των πρώτων ανακλάσεων. Το σώμα του δωματίου είναι απορροφητικό, με συχνή χρήση απορροφητών τύπου μεμβράνης για την απορρόφηση των χαμηλών συχνοτήτων. Ο χώρος μπορεί να γίνει αρκετά ζωντανός έναντι των παλαιότερων δωματίων ελέγχου, με επίπεδη απόκριση συχνότητας και με καλή στερεοφωνική εικόνα, δύο ιδιότητες οι οποίες παραμένουν σταθερές ακόμα και στις πίσω γωνίες του δωματίου. Η στερεοφωνική εικόνα είναι μια ψυχοακουστική παραίσθηση, ένα τέχνασμα του εγκεφάλου και των αυτιών. Τα αυτιά συλλέγουν οτιδήποτε πληροφορίες μπορούν και ο εγκέφαλος μεταφράζει ότι αίσθηση μπορεί βάση αυτών των πληροφοριών. Όταν οι πληροφορίες είναι συγκρουόμενες, ο εγκέφαλος αποτυγχάνει να τις κατανοήσει και η αίσθηση χάνεται. Οι πληροφορίες που περισσότερο ενδιαφέρουν τον εγκέφαλο είναι η διαφορά επιπέδου έντασης μεταξύ του αριστερού και του δεξιού αυτιού, αλλά και ο χρόνος άφιξης του ήχου σε κάθε αυτί είναι επίσης σημαντικός. Εάν οι πληροφορίες άφιξης του ήχου έρχεται σε αντίθεση με τις πληροφορίες επιπέδου έντασης η στερεοφωνική εικόνα εξαφανίζεται. Οι ανακλάσεις βοηθούν τον εγκέφαλο στον εντοπισμό της πηγής, αλλά αυτός δεν είναι ο στόχος κατά την προσπάθεια διαμόρφωσης μια στερεοφωνικής εικόνας. Οι διαφορές στο χρόνο άφιξης της πληροφορίας καθιστά δύσκολο τον εντοπισμό του ηχείου, αφήνοντας μόνο τις πληροφορίες επιπέδων έντασης διαθέσιμες για την παροχή της στερεοφωνικής εικόνας. Η στερεοφωνική που προκύπτει είναι αρκετά αξιόπιστη ανεξάρτητα από τις αλλαγές του εξοπλισμού στο πίσω τμήμα του δωματίου. Σημαντική λεπτομέρεια σε αυτού του τύπου τα δωμάτια ελέγχου είναι η χρήση ηχείων ημισφαιρικής διασποράς έτσι ώστε επαρκής ποσότητα ενέργειας να μεταφέρεται στους διαχυτές που βρίσκονται κοντά τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ακροατές που βρίσκονται εκτός της ακτίνας διασποράς του ηχείου (off-axis) να λαμβάνουν το ίδιο ηχητικό φάσμα με αυτούς που βρίσκονται εντός της ακτίνας διασποράς του ηχείου (on-axis). Πρακτικά, οι διαχυτές που βρίσκονται κοντά στα ηχεία τα μετατρέπουν αποτελεσματικά σε επίπεδες πηγές, οι οποίες δεν δημιουργούν προβλήματα προσθετικής ή καταστρεπτικής συμβολής στο χώρο, επιτυγχάνοντας την ομοιογένεια της συχνοτικής απόκρισης σε όλα τα σημεία του δωματίου.

A.49. ΣΥΣΤΗΜΑ MONITORING ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (CLOSE FIELD MONITORING)

Έγινε προφανές την δεκαετία του 1960 πως ο ήχος όπως μιζάρεται στα δωμάτια ελέγχου (control rooms) των studio ηχογραφήσεων δεν ακούγεται καλά στα νέα ραδιόφωνα με ενισχυτή. Όμως μέσω τέτοιων ραδιόφωνων πολλοί άνθρωποι αποφάσιζαν ποιους δίσκους θα αγόραζαν, ενώ η επιτυχία ή αποτυχία ενός δίσκου προβλέπονταν, σωστά ή λανθασμένα, και εξαρτιόταν από το πώς ακούγονταν στο ραδιόφωνο. Εάν 2 dB επιπλέον στην ένταση του βασικού κιθαρίστα θα έκαναν πράγματι την διαφορά μεταξύ της κατάκτησης του Νο. 1 ή μόνο του Νο. 18 είναι ένα αμφισβητήσιμο θέμα, αλλά ο συναγωνισμός μεταξύ των ραδιοφωνικών παραγωγών, και της κληρονομικής τους ανασφάλειας, οδήγησαν τα studio ηχογραφήσεων στην παροχή ενός τυπικού ραδιοφωνικού μεγάλου, είτε μέσα είτε πάνω στην κονσόλα

της μίξης. Στα μέσα της δεκαετίας του 1970, η Auratone Sound Cube είχε γίνει ένα δεδομένο σημείο αναφοράς, και ήταν γενικά και λογικά αποδεκτό πως ήταν ευκολότερο να κριθούν τα φωνητικά και τα επίπεδα αντήχησης πιο εύκολα σε μικρά μεγάφωνα. Κρίνοντάς τα, στα πλαίσια του πως θα ακούγονταν τυπικά σε οικιακές περιστάσεις. Εκείνον τον καιρό, τα περισσότερα δωμάτια ελέγχου κατασκευάζονταν για συγκεκριμένο σκοπό και σπάνια, σχεδιάζονταν από την αρχή. Το γεγονός αυτό επέφερε μια κατάσταση στην οποία η τεράστια πλειοψηφία των δωματίων ελέγχου είναι για μια ακόμη φορά όχι πολύ καλά σχεδιασμένα, έτσι δεν είναι και τόσο άξιο απορίας πως το monitoring κοντινού πεδίου (close filed monitoring) είναι ακόμη σε ευρεία χρήση. Αναμφίβολα, τα monitors κοντινού πεδίου (close filed monitors), με την περιορισμένη περιοχή συχνοτήτων τους, δίνουν μια καλή αναπαράσταση της τυπικής οικιακής αναπαραγωγής, η οποία λαμβάνει χώρα σε μεγάφωνα ενός γενικά παρόμοιου μεγέθους. Ακούγοντας από κοντινή απόσταση ή μέσα στη κρίσιμη απόσταση βοηθά επίσης στην εξάλειψη κατά έναν βαθμό της αστάθειας από το ένα δωμάτιο στο άλλο. Στις ηχογραφήσεις ενισχύονται τα 70Hz. Μέσω μεγάλων η ρυθμική ροή στα 50Hz μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα καταφανείς επιρροές στα 35Hz. Αυτό μπορεί να κριθεί εντελώς ανεπιθύμητο όταν η μουσική ακούγεται σε μεγάλη έκταση, σε πραγματικά υψηλής πιστότητας οικιακό σύστημα. Για ακόμη μια φορά, σε πολλές περιπτώσεις, οι mastering μηχανικοί αναμένονται να σώσουν την κατάσταση. Θα έμοιαζε υποχρεωτικό για μια επαγγελματική βιομηχανία να επιδείξει ένα καλά ισορροπημένο προϊόν στην αγορά. Αυτό θα επέφερε αποτελέσματα τα οποία θα ανταποκρίνονταν κατάλληλα σε συστήματα στα οποία θα παίζονταν. Δεν μοιάζει επαγγελματικό να επιδεικνύονται προϊόντα τα οποία εκτίθενται ως ελλιπή από τους αγοραστές των υψηλής πιστότητας μουσικών συστημάτων. Με άλλα λόγια, η ποιότητα που χαρακτηρίζει μια ηχογράφιση θα πρέπει να είναι ανάλογη της ποιότητας του συστήματος στο οποίο παίζεται. Αλλά αρκετά συχνά, ωστόσο, εξαιτίας των ανεπαρκών συστημάτων παρακολούθησης (monitoring systems) στα studio ηχογραφήσεων, οι φίλοι της μουσικής υψηλής πιστότητας στις οικείες τους είναι οι πρώτοι που συνειδητοποιούν πόσο κακές είναι κάποιες ηχογραφήσεις. Κανένα studio ηχογραφήσεων δεν μπορεί λογικά να αποκαλείται επαγγελματικό εκτός και εάν έχει τη δυνατότητα να παρέχει σύστημα monitoring, υψηλού βαθμού ανάλυσης. Το monitoring κοντινού πεδίου είναι συνεπώς χρήσιμο, αλλά όχι και υποκατάστατο για ένα σύστημα υψηλής ποιότητας και μεγάλης έκτασης, αν και η ακριβή επιλογή για το αν το σύστημα κοντινού πεδίου θα πρέπει να είναι υψηλής ή μεσαίας ποιότητας εξαρτάται κατά ένα ορισμένο ποσοστό από τον τύπο της μουσικής η οποία ηχογραφείται και την προτεινόμενη αγορά.

A.50. ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΜΙΞΗΣ ΔΥΟ ΚΑΝΑΛΙΩΝ (STEREO)

Τα συστήματα stereo monitoring σε δωμάτια ελέγχου βρίσκονται συνήθως εντοιχισμένα στις συνοριακές επιφάνειες του δωματίου, στο μπροστινό τοίχο, ή δεξιά και αριστερά του παραθύρου παρατήρησης, ή τέλος, τοποθετημένα σε βάσεις πίσω από την κονσόλα. Πολύ συχνά χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα near-field monitors (ηχεία κοντινού πεδίου), τοποθετημένα πάνω στην κονσόλα, με στόχο να δώσουν μια εναλλακτική προσέγγιση στην ακρόαση, η οποία επηρεάζεται λιγότερο από τον ακουστικό χαρακτήρα του δωματίου και προσομοιάζει την ακρόαση στο οικιακό περιβάλλον. Σε δωμάτια ελέγχου τύπου LEDE, για παράδειγμα, η φιλοσοφία ήταν η δημιουργία ενός χρονικού παραθύρου μέσα στο οποίο οι ανακλάσεις θα ήταν ελάχιστες. Ο σχεδιασμός των δωματίων αυτού του τύπου, επέβαλε απορρόφηση στο εμπρόσθιο μέρος του δωματίου, ανάκλαση και διάχυση στο πίσω μέρος. Το χρονικό παράθυρο που αναφέρθηκε θα παρεμβάλλονταν του απευθείας ήχου και των πρώτων

ανακλάσεων. Ο στόχος ήταν η ακρόαση του απευθείας ήχου των ηχείων χωρίς τροποποίηση από τις ανακλάσεις που ακολουθούν. Με τον έλεγχο των ανακλάσεων δόθηκε ένας φυσικός χαρακτήρας στα δωμάτια ελέγχου αυτού του τύπου παρόλο που οι ανακλάσεις που προέρχονταν από την κονσόλα και το παράθυρο παρατήρησης ήταν δύσκολο να εξαλειφθούν. Αντίθετα ο σχεδιασμός των δωματίων τύπου RFZ (ζώνης ελεύθερης από ανακλάσεις - reflection free zone) πρότεινε ανάκλαση στην μπροστά περιοχή, γύρω από τα ηχεία, αλλά κατάλληλη κλίση στις επιφάνειες ώστε να οδηγούνται οι πρώτες ανακλάσεις έξω από την περιοχή ακρόασης, στο πίσω μέρος του δωματίου. Μια άλλη προσέγγιση πρότεινε τον εντοιχισμό των ηχείων στον εμπρός τοίχο και κατασκευή του πίσω τοίχου έτσι ώστε να συμπεριφέρεται ως ηχοπαγίδα για τις χαμηλές συχνότητες. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιήθηκε στα δωμάτια ελέγχου τύπου non-environment. Σε πολλά studio ηχογραφήσεων είναι σύνηθες να εντοιχίζουν τα monitor ηχεία του δωματίου ελέγχου στον μπροστά τοίχο. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αποφεύγονται οι ανακλάσεις από τον τοίχο που βρίσκεται πίσω από τα ηχεία όταν αυτά δεν είναι εντοιχισμένα. Οι ανακλάσεις αυτές προκαλούν ακύρωση στη συχνότητα της οποίας το μήκος κύματος είναι ίσο με το ένα τέταρτο της απόστασης που υπάρχει μεταξύ του ηχείου και του πίσω τοίχου. Λόγω αυτού προτείνεται οι επιφάνειες, γύρω από τα ηχεία, να είναι ανακλαστικές στις χαμηλές συχνότητες ενώ απορροφητικές στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Το πρόβλημα που δημιουργείται από εγκοπές ακύρωσης που παρουσιάζονται στις χαμηλές συχνότητες όταν τα ηχεία δεν είναι εντοιχισμένα μπορεί να μειωθεί αλλά όχι να διορθωθεί τελείως. Το ποσοστό ακύρωσης εξαρτάται από το ποσοστό απορρόφησης του δωματίου αλλά και από την κατευθυντικότητα του ηχείου. Ρυθμίζοντας την απόσταση μεταξύ του ηχείου και του τοίχου η συχνότητα στην οποία εμφανίζεται η ακύρωση μπορεί να αλλάξει (προς τα κάτω με την αύξηση της απόστασης) αλλά η απόσταση που απαιτείται είναι συνήθως μεγάλη οπότε ο τρόπος αυτός δεν είναι πρακτικός για την επίλυση του προβλήματος. Σε περίπτωση που ηχεία μεταφερθούν πιο κοντά στον τοίχο, η ακύρωση εμφανίζεται σε υψηλότερη συχνότητα. Αυτό είναι ικανοποιητικό για μεγάλα ηχεία των οποίων η κατευθυντικότητα είναι αρκετά υψηλή στις μεσαίες συχνότητες αλλά είναι πρόβλημα για μικρότερα ηχεία. Σε μικρά δωμάτια ελέγχου είναι συνηθισμένο φαινόμενο ο εντοιχισμός των ηχείων στον εμπρός τοίχο. Με τον τρόπο αυτό η θέση τους είναι η μέγιστη δυνατή από τη θέση ακρόασης που μπορεί να επιτευχθεί. Στην πραγματικότητα ο εντοιχισμός των ηχείων είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση όπου είναι επιθυμητό να υπάρχει υψηλής πιστότητας ακρόαση. Σε αντίθετη περίπτωση δεν μπορεί να υπάρξει επίπεδη απόκριση συχνότητας. Παρόλα αυτά τα μικρά δωμάτια ελέγχου είναι αυτά στα οποία είναι λιγότερο συνηθισμένος ο εντοιχισμός των ηχείων.

A.51. ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Για να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης χρειάζεται μια πηγή ήχου για τη διέγερση του χώρου και τη δημιουργία του αντηχητικού πεδίου. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι μέτρησης του χρόνου αντήχησης:

1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΑΠΕΙΡΟΣΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ

Ένας χώρος διεγείρεται με έναν παλμό για παράδειγμα πιστόλι (ή πιο πρόχειρα παλαμάκι ή μπαλόνι που σκάει) και καταγράφεται απευθείας η μείωση της ηχοστάθμης του αντηχητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου μέχρι το μηδενισμό του. Για την καταγραφή χρησιμοποιείται ένα καλά βαθμονομημένο ηχόμετρο με φασματικό αναλυτή, έτσι ώστε να γίνεται ξεχωριστή μέτρηση στις διάφορες οκτάβες

(διαφορετικός ρυθμός πτώσης ανά συχνότητα). Από τις κλίσεις των καμπύλων υπολογίζεται και εξάγεται ο χρόνος αντήχησης T_{60} /οκτάβα.

Η εν λόγω μέθοδος παρότι θεωρητικά ορθή, στην πράξη εμφανίζει σημαντικά μειονεκτήματα, ειδικότερα κατά την εφαρμογή της σε ακουστικά και ηλεκτροακουστικά συστήματα. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου:

A. Είναι πρακτικά αδύνατον να δημιουργηθεί ένας παλμός απειροστού πλάτους καθότι όλα τα συστήματα (ηλεκτρονικά και μηχανικά) έχουν ένα πεπερασμένο χρόνο αντίδρασης.

B. Σε όλα τα φυσικά συστήματα υπάρχει κάποιας μορφής θόρυβος. Καθότι η ενέργεια του παλμού διεγείρει το σύνολο της απόκρισης του συστήματος (το φάσμα του περιέχει ίση ενέργεια σε όλες τις συχνότητες) προκειμένου να υπάρξει ικανοποιητικός λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του συστήματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί παλμός εισόδου πολύ μεγάλου πλάτους. Αποτέλεσμα αυτού μπορεί να είναι η οδήγηση του συστήματος στη μη γραμμική περιοχή λειτουργίας ως και η καταστροφή του.

Γ. Αν κατά τη διάρκεια της απόκρισης του συστήματος υπάρξει κάποιο εξωτερικό τυχαίο γεγονός (πχ. εξωγενής στιγμιαίος θόρυβος) δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αφαιρεθεί η επίδρασή του και η μέτρηση θα πρέπει να επαναληφθεί.

Δ. Ειδικά για ακουστικές μετρήσεις ισχύουν και οι παρακάτω περιορισμοί:

- Κατά την κρουστική διέγερση ενός χώρου σε υψηλές στάθμες με χρήση μεγάλων υπάρχει μεγάλος κίνδυνος καταστροφής των μονάδων χαμηλών συχνοτήτων.
- Κατά τη διέγερση με φυσικές κρουστικές πηγές (πχ. πυροβολισμός) υπάρχει πολύ μικρή επαναληψιμότητα και αν χρησιμοποιηθούν υψηλές στάθμες μπορεί να υπερφορτωθούν οι βαθμίδες καταγραφής.

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

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ

Ο χώρος διεγείρεται με λευκό ή ροζ θόρυβο μέχρι τη κατάσταση ισορροπίας (ο χρόνος αυτός διαφέρει ανάλογα με το χώρο) και στη συνέχεια ο θόρυβος διακόπτεται ακαριαία. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τη μέθοδο του παλμού από τη στιγμή της διακοπής της πηγής. Τα πλεονεκτήματα είναι ότι η πηγή θορύβου παράγει μεγαλύτερα ποσά ηχητικής ενέργειας (απαραίτητη προϋπόθεση για μετρήσεις σε χώρους με υψηλή στάθμη θορύβου βάθους) και εκπέμπει ηχητική ενέργεια σε όλες τις συχνότητες. Τα μειονεκτήματα είναι:

- Απαιτείται ένα επιπλέον κανάλι καταγραφής για το σήμα εισόδου του σήματος. Καθότι οι περισσότεροι ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς παρουσιάζουν φασικές αποκλίσεις στα όρια του ακουστικού συχνοτικού φάσματος η προσθήκη μιας επιπλέον μονάδας (καταγραφή του σήματος εισόδου) αυξάνει τις πιθανότητες σφάλματος στις αντίστοιχες μονάδες.
- Αν κατά τη διάρκεια της απόκρισης του συστήματος υπάρξει κάποιο εξωτερικό τυχαίο γεγονός (πχ. εξωγενής στιγμιαίος θόρυβος) δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αφαιρεθεί η επίδρασή του και η μέτρηση θα πρέπει να επαναληφθεί.
- Σε συστήματα με υψηλό θόρυβο βάθους απαιτείται μεγάλος χρόνος μέτρησης (διπλασιασμός του χρόνου μέτρησης συνεπάγεται βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο κατά 3dB.)

Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιούνταν σε παλαιότερα μετρητικά συστήματα αλλά η χρήση της έχει περιοριστεί στις μέρες μας.

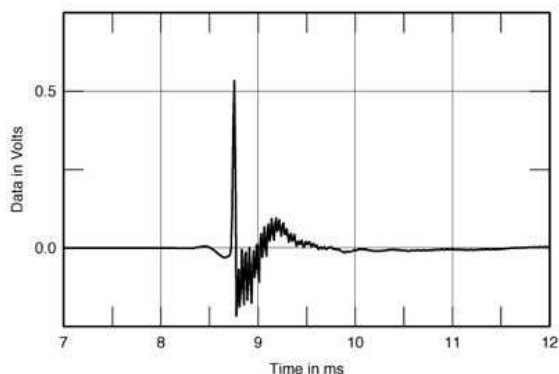
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

Για τον προσδιορισμό της απόκρισης σε κλειστούς χώρους αναπτύχθηκε από τους Schroeder & Alrutz η μέθοδος της εκπομπής μιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας που είχε παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται μέγιστου μήκους MLS-Maximum Length Sequence. Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο MLS έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πολύ λίγο ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή επιτυγχάνεται μεγάλος λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N). Μια ακολουθία μέγιστου 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 μέγιστου μήκους είναι τα ακόλουθα:

- Παράγεται με αυστηρά καθορισμένο, ντετερμινιστικό τρόπο.
- Ο αριθμός των μονάδων είναι ίσος με τον αριθμό των μηδενικών πλέον μίας (της αρχικής μονάδας).
- Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function) είναι μια δέλτα συνάρτηση¹¹.
- 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 ψευδοτυχαίος λευκός θόρυβος).
- Είναι περιοδικό σήμα με περίοδο που εξαρτάται από ένα ακέραιο N ο οποίος ονομάζεται τάξη της ακολουθίας. Το μήκος (περίοδος) μια ακολουθίας τάξης N ισούται προς: $L=2^N-1$ τιμές.

Η βασική διαφοροποίηση της μεθόδου MLS με τη διέγερση του συστήματος με λευκό θόρυβο είναι ότι σε αυτή τη περίπτωση όλοι οι υπολογισμοί λαμβάνουν χώρα στο πεδίο του χρόνου και δεν παρεμβάλλεται κανένας μετασχηματισμός Fourier περιορίζοντας έτσι σημαντικά τα πιθανά σφάλματα. Επίσης, επειδή το σήμα εισόδου είναι 100% ντετερμινιστικό (δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή είναι γνωστή ακριβώς η τιμή που εισάγεται στο σύστημα), με τη διαδικασία της ετεροσυσχέτισης αποκλείονται από τη μέτρηση όλα τα συμβάντα που δεν συνδέονται γραμμικά με την είσοδο του συστήματος (πχ. τυχαίος θόρυβος). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια πολύ σημαντική αύξηση του λόγου προς θόρυβο και είναι δυνατή η πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων σε περιβάλλον με υψηλή τιμή του θορύβου βάθους. Ο βασικός περιορισμός που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη σε μετρήσεις με ακολουθία μέγιστου μήκους είναι ότι το μήκος της ακολουθίας που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μήκος της προς μέτρηση απόκρισης.

¹¹ Είναι μια συνάρτηση δ με την ιδιότητα: $\int_0^1 f(x)\delta(x)dx = f(0)$, για κάθε $f:[0,1]\rightarrow\mathbb{R}$ συνεχή.



ΣΧΗΜΑ 32: Γραφική αναπαράσταση ενός μοναδιαίου παλμού.

A.52. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

- Η πηγή διέγερσης θα πρέπει να είναι megάφωνο όσο το δυνατόν μη κατευθυντικό.
- Οι μετρήσεις θα πρέπει να γίνουν σε τρεις τουλάχιστον θέσεις του ηχομέτρου και από αυτές θα υπολογιστούν οι μέσες τιμές, εφόσον το αντηχητικό πεδίο δεν θα είναι διάχυτο.
- Ο εκπεμπόμενος θόρυβος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερος σε ένταση από το θόρυβο βάθους, ώστε να μπορεί να γίνει ασφαλής μέτρηση του χρόνου αντήχησης.
- Το ηχόμετρο θα πρέπει:
 - Να βρίσκεται καθαρά στο αντηχητικό πεδίο, δηλαδή μακριά από την πηγή, ανάλογα με το χώρο.
 - Να βρίσκεται τουλάχιστον ένα μέτρο (1m) μακριά από τους τοίχους και από οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο (πχ. τον παρατηρητή).

A.53. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΤΡΟΠΩΝ ΔΟΝΗΣΗΣ ΣΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Αρχικά υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες των εφαιπτομενικών στάσιμων κυμάτων ώστε να βρεθούν οι συχνότητες με τις οποίες θα ηχοβοληθεί ο χώρος αργότερα. Ο χώρος διεγείρεται από μια γεννήτρια ήχου που παράγει έναν καθαρό τόνο (αποτελείται από μία μόνο συχνότητα). Το ηχείο τοποθετείται σε μια από τις γωνίες του δωματίου (εφόσον είναι γνωστό ότι εκεί υπάρχει μέγιστο) και το ηχόμετρο καταγράφει τη στάθμη της ηχητικής πίεσης σε ένα πλέγμα αρκετών θέσεων μέσα στο δωμάτιο. Σε συγκεκριμένες συχνότητες που συμπίπτουν με τις συχνότητες συντονισμού του δωματίου διαπιστώνεται ότι σε άλλα σημεία ενισχύεται έντονα ο ήχος ενώ σε άλλα μειώνεται.

Με βάση τις μετρήσεις που γίνονται για τις διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου στον χώρο, σχεδιάζονται οι ισοφασικές καμπύλες για το δωμάτιο και τη συγκεκριμένη συχνότητα με την οποία διεγέρθηκε.

A.54. ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

Η κρουστική απόκριση ενός συστήματος ονομάζεται η απόκριση εξόδου του συστήματος όταν στην είσοδο του εφαρμοστεί ένας παλμός απειροστής διάρκειας και μοναδιαίου ύψους (με μαθηματικούς όρους μια συνάρτηση δέλτα). Γνωρίζοντας τη κρουστική απόκριση ενός γραμμικού και χρονικά αμετάβλητου συστήματος μπορεί να υπολογιστεί η απόκρισή του σε οποιοδήποτε σήμα εισόδου.

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

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

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

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

$$y(t_0) = \int_{t=0}^{\infty} h(t)x(t - t_0)dt \quad \text{ή} \quad y(k) = \sum_n h(n)x(n - k) \quad (34)$$

Ο μετασχηματισμός Fourier της κρουστικής απόκρισης ενός συστήματος ονομάζεται συχνοτική απόκριση $H(f)$ του συστήματος και χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον χαρακτηρισμό και τη συγκριτική και ποιοτική αξιολόγηση συστημάτων. Ισχύει δηλαδή: $H(f)=F\{h(t)\}$, όπου $F\{\dots\}$ ο μετασχηματισμός Fourier.

Η απόκριση δηλαδή του συστήματος σε ένα μοναδιαίο παλμό δύναται να παράσχει πληροφορίες και για την απόκριση του συστήματος σε σήμα εισόδου οποιασδήποτε συχνότητας. Η παραπάνω ιδιότητα προκύπτει άμεσα από τη σχέση (34) θεωρώντας ως είσοδο του συστήματος μια συνάρτηση δέλτα και χρησιμοποιώντας τη βασική ιδιότητα ότι ο μετασχηματισμός Fourier της δέλτα συνάρτησης είναι μια ευθεία γραμμή παράλληλη προς τον άξονα των συχνοτήτων (δηλαδή το φάσμα της περιέχει ίση ενέργεια ανά συχνότητα, όπως ακριβώς και το φάσμα του λευκού θορύβου). Οι τρόποι που υπάρχουν για να μετρηθεί η κρουστική απόκριση ενός χώρου έχουν ήδη προαναφερθεί και είναι η μέθοδος του απειροστού παλμού, η μέθοδος του μηδενισμού της πηγής και η μέθοδος της ακολουθίας μέγιστου μήκους.

A.55. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ακολουθούν οι βασικές εφαρμογές της μέτρησης της κρουστικής απόκρισης που αφορούν έναν μηχανικό ήχο:

Ηλεκτροακουστική:

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

Ακουστική:

Σε φυσικά ακουστικά συστήματα (αίθουσες) η κρουστική απόκριση μεταβάλλεται μεταξύ των διάφορων ζευγών σημείων πηγής-καταγραφικού. Συνήθως λαμβάνονται πολλές μετρήσεις και πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση των αποτελεσμάτων σε συνάρτηση με την απόσταση από τη πηγή. Η γνώση της κρουστικής απόκρισης ενός χώρου μας επιτρέπει να υπολογίσουμε ένα μεγάλο πλήθος ακουστικών παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα:

- ο Τον χρόνο αντήχησης της αίθουσας (RT_{60} , RT_{20} , EDT, κλπ.).
- ο Το ρυθμό πτώσης στάσιμων κυμάτων.
- ο Τους δείκτες διαύγειας και διακριτικότητας (C50, C80).
- ο Τον κεντρικό χρόνο (Ts) του χώρου.
- ο Τους δείκτες καταληπτότητας ομιλίας (STI, RASTI).
- ο Εφόσον χρησιμοποιηθεί και δεύτερο μικρόφωνο αμφικατευθυντικό, τους ακουστικούς δείκτες ανώτερης τάξεως (πλευρικά κλάσματα, LF, δείκτες αμφιωτικής ετεροσυσχέτισης IACC κλπ.).
- ο Εφαρμόζοντας διαδοχικούς τμηματικούς μετασχηματισμούς Fourier μπορεί να εξαχθεί και να απεικονιστεί γραφικά η χρονική εξέλιξη της ενέργειας στο δωμάτιο και να εντοπιστούν τα στάσιμα κύματα ή οι καθυστερημένες ανακλάσεις στο χώρο.

A.56. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA

Το MLSSA είναι ένα σύστημα ακουστικών μετρήσεων βασισμένο στις ακολουθίες μέγιστου μήκους (MLS maximum length sequence). Το MLSSA είναι ικανό να μετρήσει και να αναλύσει πολλούς τύπους γραμμικών συστημάτων, αλλά οι κυριότερες εφαρμογές του είναι στην περιοχή των ακουστικών μετρήσεων. Το MLSSA είναι αναλυτής ενός καναλιού, που μπορεί να φέρει εις πέρας μετρήσεις που γίνονται με αναλυτές δύο καναλιών. Το αποτέλεσμα είναι ο διπλασιασμός του εύρους ζώνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σημαντική μείωση του κόστους εφαρμογής. Οι συμβατικοί αναλυτές φάσματος (FFT analyzers), χρειάζονται δύο κανάλια για να μετρήσουν την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, εφαρμόζοντας λευκό θόρυβο για διέγερση. Το ένα κανάλι δειγματοληπτεί το θόρυβο στην είσοδο ενώ το άλλο δειγματοληπτεί το θόρυβο στην έξοδο του συστήματος. Η συνάρτηση μεταφοράς υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την φασματική ετεροσυσχέτιση (crossspectra) ή παρόμοιες μεθόδους επεξεργασίας σημάτων. Η τεχνική των δύο καναλιών μπορεί μόνο να προσεγγίσει την συνάρτηση μεταφοράς εξαιτίας της τυχαίας φύσης του λευκού θορύβου αλλά και λόγω του παραθύρου (windowing) που απαιτείται για την μείωση της φασματικής διαρροής (spectral leakage). Αντιθέτως, το MLSSA χρησιμοποιεί ένα ειδικό τύπο δοκιμαστικού σήματος που ονομάζεται MLS, αντί της συμβατικής διέγερσης με σήμα λευκού θορύβου. Η ντετερμινιστική φύση του MLS

έχει ως αποτέλεσμα ότι το σήμα μπορεί να προϋπολογιστεί και δεν χρειάζεται να μετρείται ταυτόχρονα με την απόκριση του συστήματος. Η περιοδική φύση του MLS σήματος έχει ως αποτέλεσμα ότι μία κυκλική ετεροσυσχέτιση (circular cross-correlation) στο πεδίο του χρόνου είναι ικανή να αποκαλύψει την πλήρη ωστική απόκριση (impulse response) του συστήματος. Έτσι, δεν απαιτείται η χρήση παραθύρων για τα δεδομένα. Το αποτέλεσμα είναι μηδενικό παραθυρικό σφάλμα (windowing error) με την προϋπόθεση ότι όλη η περίοδος της ακολουθίας χρησιμοποιείται, κάτι το οποίο το MLSSA κάνει αυτόματα. Η τεχνική MLS μετράει την ωστική απόκριση, η οποία είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός γραμμικού συστήματος. Από την αριθμητική επεξεργασία της ωστικής απόκρισης μπορούν να εξαχθούν και άλλες σημαντικές πληροφορίες για το σύστημα.

Μια κοινή παρανόηση είναι ότι οι μέθοδοι MLS και κατ' επέκταση το MLSSA βασίζονται στο FFT¹². Το MLSSA ακολουθεί την αντίθετη προσέγγιση σε σχέση με ένα αναλυτή FFT. Χρησιμοποιεί την ετεροσυσχέτιση για να υπολογίσει την ωστική απόκριση απευθείας στο πεδίο του χρόνου, χωρίς την χρήση FFT ή αντίστροφων FFT. Το ότι το MLSSA εφαρμόζει FFT στη μετρούμενη ωστική απόκριση για υπολογίσει την συνάρτηση μεταφοράς, δεν το κάνει αναλυτή FFT με τα γνωστά μειονεκτήματα¹³.

Χρησιμοποιώντας την τεχνική MLS, οι μετρήσεις με το MLSSA έχουν πολύ μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N). Η ετεροσυσχέτιση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ωστικής απόκρισης ελαττώνει τον θόρυβο του περιβάλλοντος (ασυσχέτιστος στο MLS), έτσι ώστε οι μετρήσεις να μπορούν να γίνονται και σε θορυβώδη περιβάλλοντα. Αν εφαρμοστούν μέθοδοι μέσης τιμής ο λόγος S/N είναι δυνατόν να αυξηθεί και άλλο. Αυτό οφείλεται στην ντετερμινιστική φύση του σήματος και επιτρέπει τον σύγχρονο υπολογισμό της μέσης τιμής (synchronous averaging) σήματος από την μία περίοδο στην επόμενη. Έτσι, με κάθε διπλασιασμό στον αριθμό των περιόδων που λαμβάνονται ο περιβαλλοντολογικός θόρυβος μειώνεται κατά 3dB. Οι επαναλαμβανόμενες περίοδοι του δοκιμαστικού σήματος είναι ίδιες και προστίθενται συμμασικά, ενώ ο θόρυβος του περιβάλλοντος δεν είναι συσχετισμένος μεταξύ των διαφορετικών περιόδων και προστίθεται μόνο η ενέργεια του¹⁴.

¹² Σε ένα αναλυτή FFT η επεξεργασία σήματος, για τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς, γίνεται στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό απαιτεί πολλαπλούς μετασχηματισμούς Fourier να εφαρμοστούν σε χρονικά τμήματα των δεδομένων που έχουν μετρηθεί. Επιπλέον κάθε τμήμα πολλαπλασιάζεται με το κατάλληλο χρονικό παράθυρο για την μείωση σφαλμάτων φασματικής διαρροής. Από τα πολλαπλά χρονικά τμήματα υπολογίζεται το μέσο φάσμα FFT και η συνάρτηση μεταφοράς. Η ωστική απόκριση υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier. Το ίδιο ισχύει και για του αναλυτές TDS (time-delay spectrometry) που μετρούν την συνάρτηση μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας.

¹³ Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ικανότητα του MLSSA να κάνει ευρυζωνικές, μεγάλης διάρκειας μετρήσεις για την ωστική απόκριση. Οι συμβατικοί αναλυτές FFT δύο καναλιών, αλλά και οι αναλυτές TDS, δεν μπορούν να επιτύχουν την διακριτική ικανότητα του MLSSA. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι η διακριτική ικανότητα στη συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του εύρους συχνότητας της μέτρησης με FFT, δηλαδή $f=1/T$ Hz. Όπου, T είναι η διάρκεια της μετρούμενης ωστικής απόκρισης. Αντιθέτως, το MLSSA είναι ικανό να κάνει ευρυζωνικές μετρήσεις συνάρτησης μεταφοράς (20 kHz) με πραγματική φασματική διακριτική ικανότητα 1 Hz, ή και μικρότερου εύρους ζώνης (1 kHz) με διακριτική ικανότητα 0.065 Hz. Το σήμα MLS έχει σχεδόν επίπεδο φάσμα ισχύος και ακολουθεί τετραγωνικό $\text{sinc}(x)/x$ νόμο. Στο 1/3 της συχνότητας δειγματοληψίας η φασματική απόκριση μειώνεται κατά 1.3dB. Το σήμα MLS δεν περιέχει συνεχείς συνιστώσες.

¹⁴ Οι διαδικασίες μέσης τιμής είναι γενικά ένα πλεονέκτημα των ντετερμινιστικών σημάτων. Το κέρδος στο λόγο S/N είναι $\Delta_{\text{av}}=10\text{Log}(N)$, όπου N είναι ο αριθμός των περιόδων του σήματος MLS.

A.57. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ MLSSA ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Μία βασική εφαρμογή είναι η μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης $\alpha(f, \theta)$ ενός υλικού. Ο συντελεστής απορρόφησης είναι ο λόγος της απορροφημένης (και πιθανόν μεταδιδόμενης εντός του υλικού) ενέργειας, προς την προσπίπτουσα ενέργεια στην επιφάνεια του υλικού. Για μετρήσεις in situ, ο καλύτερος τρόπος υπολογισμού του συντελεστή απορρόφησης γίνεται μέσω του συντελεστή ανάκλασης $R(f, \theta)$, δηλαδή υπολογίζοντας τον συντελεστή ανάκλασης $R(f, \theta)$ από μέτρηση των ακουστικών πιέσεων του προσπίπτοντος και ανακλώμενου ακουστικού κύματος. Οπότε, ο συντελεστής απορρόφησης δίνεται από την σχέση

$$\alpha(f, \theta) = 1 - |R(f, \theta)|^2 \quad (35)$$

και εξαρτάται από την συχνότητα f και γωνία πρόσπτωσης θ του κύματος. Το MLSSA τροφοδοτεί το ηχείο με το κατάλληλο σήμα MLS, δημιουργώντας το κατάλληλο ηχητικό κύμα. Στη συνέχεια το κύμα προσπίπτει στην επιφάνεια του ηχοαπορροφητικού υαλοβάμβακα πάχους 50mm, και ένα μέρος της ενεργείας του ανακλάται από αυτόν. Το ανακλώμενο σήμα λαμβάνεται από το μικρόφωνο αναφοράς και οδηγείται στην είσοδο του MLSSA για ψηφιακή επεξεργασία και υπολογισμό της ωστικής απόκρισης του απορροφητικού υλικού. Η πρώτη κορυφή είναι η ωστική απόκριση της συνιστώσας του προσπίπτοντος κύματος και η δεύτερη μικρότερη κορυφή είναι η απόκριση του ανακλώμενου κύματος. Κατόπιν εφαρμόζεται FFT στις ωστικές αποκρίσεις ξεχωριστά, για τον υπολογισμό των συναρτήσεων μεταφοράς.

Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

B.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ CONTROL ROOM

Αρχικά θα δοθεί μια περιγραφή και οι διαστάσεις του χώρου στον οποίο έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις. Πρόκειται για το control room που υπάρχει στο Κτίριο Β των εγκαταστάσεων του παραρτήματος του ΤΕΙ Ηρακλείου στο Ρέθυμνο. Υπάρχουν δύο control rooms, η εργασία αυτή ασχολείται με το control room στο οποίο είναι τοποθετημένη η κονσόλα AUDIENT ASP 8024. Οι διαστάσεις του χώρου είναι: Μήκος=7.09m, Πλάτος=4.55m, Ύψος=2.50m. Ο χώρος έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Ο προσανατολισμός κατά την διάρκεια των περιγραφών που θα ακολουθήσουν θα γίνεται σύμφωνα με τη θέση του ηχολήπτη όταν ο ηχολήπτης κοιτάζει προς τα ηχεία. Οπότε η είσοδος είναι πίσω δεξιά από τον ηχολήπτη, ενώ κατά μήκος του αριστερού τοίχου υπάρχουν τρεις κολώνες, στο τέλος, στην αρχή και στη μέση του τοίχου. Υπάρχει τέλος ένα παράθυρο που βρίσκεται ακριβώς αριστερά από τη θέση του ηχολήπτη και δύο εξογκώματα στο πάνω μέρος του αριστερού τοίχου, στην αρχή και στο τέλος του.

Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στα στοιχεία τα οποία έχουν τοποθετηθεί στο χώρο με σκοπό την ηχητική του βελτίωση. Στο ταβάνι πάνω από τη θέση του ηχολήπτη και καλύπτοντας το μεγαλύτερο μέρος της κονσόλας μπροστά από τον ηχολήπτη έχουν τοποθετηθεί διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας, ενώ το υπόλοιπο μέρος του ταβανιού έχει καλυφθεί με απλό ηχομονωτικό υλικό. Πίσω από τον ηχολήπτη τοποθετημένοι στον πίσω τοίχο βρίσκονται διαχυτές Schroeder κατά μήκος του τοίχου και αριστερά και δεξιά αυτών δύο μπασοπαγίδες. Στον αριστερό τοίχο έχουν τοποθετηθεί διάτρητες γυψοσανίδες με κανονική κυκλική διάτρηση, ενώ στον απέναντι τοίχο έχουν τοποθετηθεί πορώδεις απορροφητές κατά μήκος του δεξιού τοίχου, ενώ στην περιοχή που καλύπτει τη θέση του ηχολήπτη και τη κονσόλα μέχρι το μήκος του δεξιού ηχείου Nautilus έχουν τοποθετηθεί διαχυτές Schroeder, και μετά ο τοίχος είναι καλυμμένος με απορροφητές. Ο μπροστά τοίχος έχει καλυφθεί από διάτρητη γυψοσανίδα με τετράγωνη διάτρηση. Στις άκρες του πίσω τοίχου στο πάνω μέρος έχουν τοποθετηθεί ηχοπαγίδες για τις χαμηλές συχνότητες (μπασοπαγίδες). Τέλος, υπάρχουν μάλλον τυχαία τοποθετημένα κάποια κάδρα πορωδών απορροφητών διάσπαρτα στο χώρο, ενώ υπάρχει και ένας απορροφητής με κυκλική διάτρηση, ο οποίος αφορά τις υψηλές συχνότητες και λειτουργεί με βάση την εξίσωση του Helmholtz, τοποθετημένος τυχαία στο μπροστινό τοίχο. Οι διαχυτές τύπου Schroeder είναι τετραγωνικού υπολοίπου και πρόκειται για το μοντέλο RPG Omnifusor QRD της εταιρίας Omnifusor.

Στο control room υπάρχει ένα ζευγάρι ηχείων Nautilus της σειράς 802 και ένα ζευγάρι ηχείων HM-1 της εταιρίας Meyer Sound. Επίσης υπάρχει η κονσόλα AUDIENT ASP 8024, ένας υπολογιστής και ο περιφερειακός εξοπλισμός που απαρτίζεται από αρκετές περιφερειακές μονάδες και τρία πολυκάναλα. Αναλυτικότερα, μέσα στο χώρο του control room υπάρχουν οι εξής περιφερειακές μονάδες: *Drawmer Quad-Gate DS404, dbx 1066 Compressor/Limiter/Gate, dbx DDP Digital Dynamics Processor, dbx 160SL Compressor- Limiter, Focusrite Red 1 Quad Mic-pre, Focusrite Red 3 Dual Compressor-Limiter (Unit 1), Focusrite Red 3 Dual Compressor-Limiter (Unit 2), Focusrite Producer Pack ff ISA 430 MK II, DigiTech Studio 400 4 in 4 out Multi-Effects Processor, Lexicon 960L Digital Effects System, Lexicon PCM 91 Digital reverberator, Lexicon MPX 550 Dual Channel Processor, Avalon Design AD 2044 Pure Class A Compressor, Weiss ADC 2 Analog to Digital Converter, t.c. electronic Reverb 4000 High definition reverb, t.c. electronic M3000 Studio reverb processor, Eventide DSP7500 Ultra Harmonizer Sampling Special Edition, Tascam DA-40, HHD BurnIT Plus CDR-830 Compact Disc Recorder, 2 μονάδες TASCAM DA-78HR High Resolution DTRS και το TASCAM DA-38 DTRS.*

Β.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Παρακάτω θα γίνει μια περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ο εξής εξοπλισμός:

- Το σύστημα ακουστικών μετρήσεων MLSSA Version 10WI DRA Laboratories.

- Ένα παντοκατευθυντικό (omni-directional) μικρόφωνο TC30K της εταιρίας Earthworks.

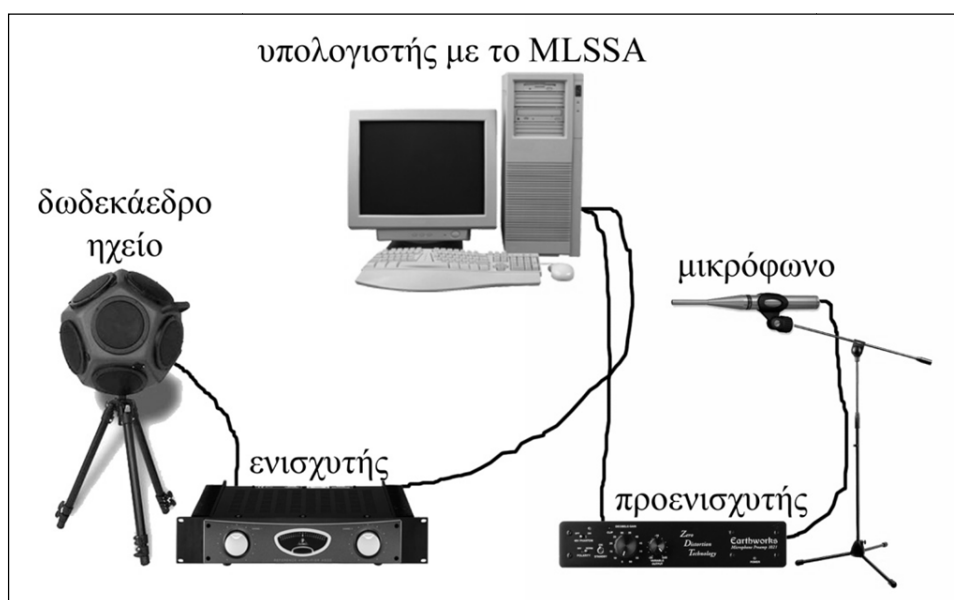
- Ο προενισχυτής μικροφώνου ZDT 1021 της ίδιας εταιρίας.

- Ένας ενισχυτής της εταιρίας Behringer (μοντέλο: Reference Amplifier A500) για τον οποίο πριν από την έναρξη των μετρήσεων έγινε το απαραίτητο calibration (με την δημιουργία λούπας από τον ενισχυτή στον Η/Υ), ώστε να επιβεβαιωθεί η ομαλή του απόκριση κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

- Το δωδεκάεδρο ηχείο D012 της εταιρίας 01dB.

- Ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής.

Η συνδεσμολογία είναι η εξής:



ΣΧΗΜΑ 33: Βασική συνδεσμολογία για την μέτρηση της κρουστικής και συχνοτικής απόκρισης που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις μετρήσεις.

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν. Για κάθε μέτρηση υπάρχει η συνδεσμολογία, η κρουστική απόκριση (impulse response IR) στο πεδίο του χρόνου, οι πίνακες και η συχνοτική ανάλυση, δηλαδή οι γραφικές παραστάσεις οι οποίες εξάχθηκαν μετά από μετασχηματισμό Fourier (FFT transform) στο πεδίο των συχνοτήτων, από το MLSSA. Όλες οι γραφικές παραστάσεις δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB (matrix laboratory) της εταιρίας MathWorks. Στο παράρτημα δίνονται οι κωδικοί που χρησιμοποιήθηκαν στο παραπάνω πρόγραμμα. Οι τιμές που εμπεριέχονται σε αυτούς τους πίνακες μαζί με τη βοήθεια των γραφικών παραστάσεων, δείχνουν τα προβλήματα που υπάρχουν στο χώρο. Με την βοήθεια αυτών των δεδομένων θα

προταθούν οι λύσεις για την ακουστική βελτίωση του control room. Οι τιμές στους πίνακες με γκρι χρώμα δεν λαμβάνονται υπόψη¹⁵.

Η επιλογή αυτών των θέσεων έγινε με βάση τη χρήση του control room από τον ηχολήπτη, από τον καθηγητή και τους φοιτητές που παρακολουθούν τα μαθήματα που διεξάγονται μέσα σε αυτόν το χώρο. Φυσικά υπάρχουν κι άλλες πιθανές θέσεις που θα μπορούσαν να μελετηθούν αλλά οι πέντε πρώτες μετρήσεις θεωρούνται αρκετές, άλλωστε κάποιος που θέλει να επέμβει στην ηχοληψία και στην αισθητική κατά την διάρκεια μιας μίξης ή μιας ηχογράφησης, καλό θα είναι να βρίσκεται σε μια από τις τρεις πρώτες θέσεις (Μέτρηση 1,2,3) αν θέλει να ακούει σωστά.

Στη συνέχεια έγινε μια μέτρηση με το μικρόφωνο τοποθετημένο ακριβώς στην θέση του ηχολήπτη και με το ηχείο τοποθετημένο στην μέση της απόστασης μεταξύ των ηχείων Meyer (Μέτρηση 6). Έπειτα, θέλοντας να μελετηθεί η ηχητική συμπεριφορά του χώρου στα τέσσερα σημεία όπου βρίσκονται τοποθετημένα τα ηχεία, το δωδεκάεδρο τοποθετήθηκε κοντά στη θέση του ηχολήπτη και το μικρόφωνο έλαβε τις εξής θέσεις όπως περιγράφονται στις μετρήσεις 7,8,9,10,11 και 12.

¹⁵ **D50**: είναι η ενέργεια των πρώτων ανακλάσεων προς την ενέργεια των συνολικών ανακλάσεων. Από τις λέξεις Definition ή Deutlichkeit και εκφράζεται σε ποσοστό %.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.050s} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

C50: είναι η ενέργεια των πρώτων ανακλάσεων προς την ενέργεια των καθυστερημένων ανακλάσεων. Από τις λέξεις Clarity ή Klarheitsmass και εκφράζεται σε dB. Μπορεί επίσης η παράμετρος να τεθεί στα πρώτα 80ms οπότε έτσι εξάγεται ο δείκτης **C80**.

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right)$$

TS: Ο κεντρικός χρόνος (central time) ορίζεται ως το τετράγωνο της ενέργειας της κρουστικής απόκρισης ενός συστήματος που σχετίζεται με τις πρώτες ανακλάσεις και εκφράζεται σε ms.

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

EDT: (Early Decay Time) Είναι ο χρόνος αντήχησης που μετριέται κατά την πτώση των πρώτων 10dB από την εκκίνηση της ηχητικής πηγής. Μετριέται σε ms.

S: Είναι η στάθμη του σήματος (signal level) σε dB-SPL.

N: Είναι η στάθμη του θορύβου βάθους (background noise) σε dB-SPL.

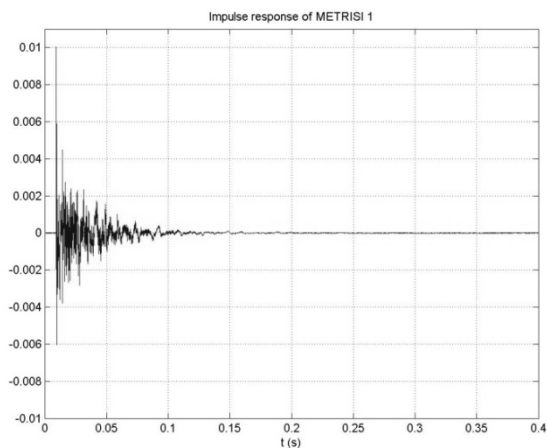
SNR: Είναι ο λόγος της στάθμης του σήματος προς τη στάθμη του θορύβου βάθους (signal-to-noise ratio και μετριέται σε dB.

Β.3. ΜΕΤΡΗΣΗ 1 (ΤΥΧΑΙΑ ΘΕΣΗ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΛΗΠΤΗ)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.40m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.10m από τον δεξί τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.90m από τον μπροστά τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.58m.
 - Σε απόσταση 2.00m από τον πίσω τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.30m από τον δεξί τοίχο.



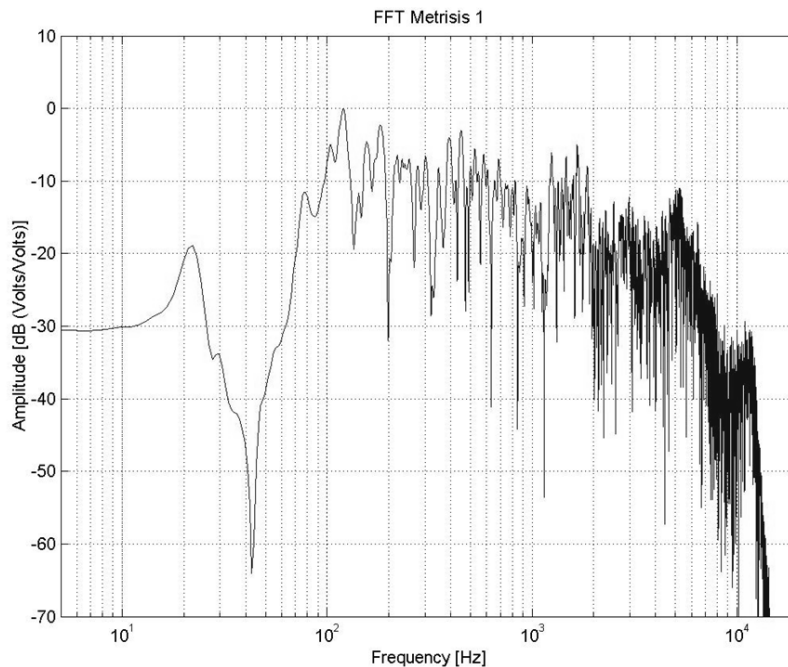
ΣΧΗΜΑ 34: Συνδεσμολογία Μέτρησης 1.



ΣΧΗΜΑ 35: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 1.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	17.6	33.3	44.8	44.7	47.5	46.4	47.6	47.5	SPL- Weighted Averages
N (dBspl)	-	-1.4	7.9	12.4	16.7	16.3	17.8	19.3	
SNR (dB)	-	34.7	36.9	32.3	30.8	30.2	29.8	28.2	
C50 (dB)	-2.58	3.00	7.35	10.87	17.49	22.22	18.38	18.94	19.238
C80 (dB)	-0.66	6.36	13.92	18.20	26.07	34.23	32.25	29.42	30.481
D50 (%)	35.6	66.6	84.5	92.4	98.2	99.4	98.6	98.7	98.585
TS (ms)	137.2	47.5	29.4	21.5	12.3	8.1	9.7	8.9	10.768
EDT-10dB (s)	1.520	0.669	0.385	0.312	0.225	0.127	0.140	0.193	0.189
RT-20dB (s)	7.391	0.439	0.262	0.278	0.167	0.147	0.179	0.168	0.164
r (-5: -25)	-0.955	-0.997	-0.967	-0.990	-0.987	-0.990	-0.991	-0.999	-0.989
RT-30dB (s)	6.251	0.553	0.303	1.443	0.222	0.146	0.156	0.170	0.192
r (-5: -35)	-0.917	-0.990	-0.980	-0.781	-0.984	-0.997	-0.992	-0.999	-0.989
RT-USER (s)	8.360	0.441	0.275	0.308	0.174	0.140	0.166	0.165	0.166
r (-10: -25)	-0.974	-0.994	-0.919	-0.990	-0.966	-0.983	-0.988	-0.999	-0.976

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΜΕΤΡΗΣΗ 1.



ΣΧΗΜΑ 36: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 1.

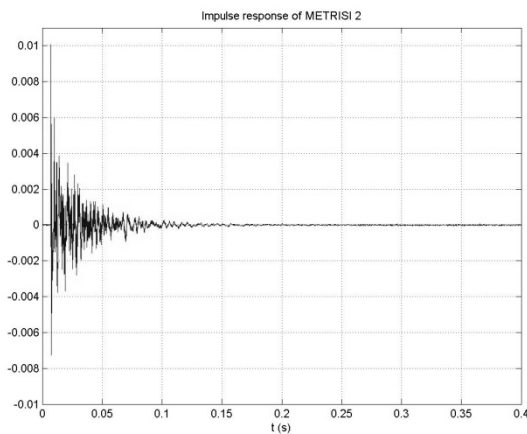
Η πρώτη μέτρηση αφορά μια θέση κοντά στη θέση του ηχολήπτη. Από τη γραφική παράσταση του μετασχηματισμού Fourier της μέτρησης 1 (σχήμα 36) παρατηρείται ότι υπάρχει μια μεγάλη πτώση της έντασης στα 42Hz. Η μεγαλύτερη κορυφή είναι στα 130Hz και στη συνέχεια παρατηρούνται πτώσεις στην ένταση στις συχνότητες 150, 200, 1200, 510, 750, και 4500Hz. Από τις ενδείξεις του πίνακα 3, παρατηρείται αυξημένος ο RT₃₀ στη συχνотική μάντα των 250Hz με τιμή 1.443sec. Οι άλλες τιμές για τους υπόλοιπους δείκτες θεωρούνται λογικές.

Β.4. ΜΕΤΡΗΣΗ 2 (ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΛΗΠΤΗ)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.40m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.10m από τον δεξί τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.90m από τον μπροστά τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.24m.
 - Σε απόσταση 2.75m από τον πίσω τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.30m από τον δεξί τοίχο.



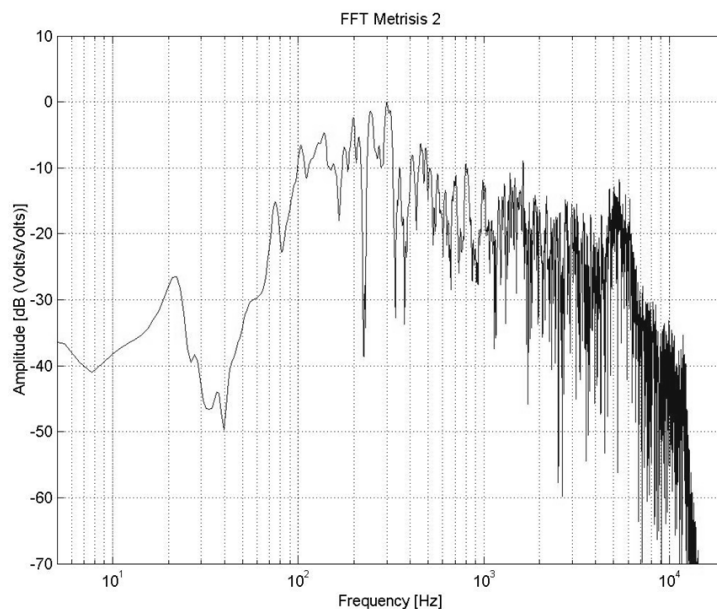
ΣΧΗΜΑ 37: Συνδεσμολογία Μέτρησης 2.



ΣΧΗΜΑ 38: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 2.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	14.6	33.2	45.8	51.4	48.1	46.6	47.4	48.7	SPL- Weighted Averages
N (dBspl)	-	7.4	20.5	28.8	30.4	27.9	25.9	23.7	
SNR (dB)	-	25.8	25.3	22.6	17.7	18.7	21.5	25.0	
C50 (dB)	-0.18	3.60	11.87	12.04	15.37	21.44	18.68	19.93	18.237
C80 (dB)	1.41	6.43	18.22	22.65	21.00	36.70	27.81	31.29	30.930
D50 (%)	49.0	69.6	93.9	94.1	97.2	99.3	98.7	99.0	97.956
TS (ms)	171.3	33.8	13.6	16.3	16.3	7.6	12.4	7.1	13.230
EDT-10dB (s)	3.604	0.818	0.158	0.225	0.177	0.137	0.198	0.180	0.172
RT-20dB (s)	7.282	0.467	0.350	0.225	11.623	0.151	0.154	0.167	9.486
r (-5: -25)	-0.975	-0.996	-0.980	-0.980	-0.609	-0.997	-0.997	-0.999	-0.772
RT-30dB (s)	6.306	0.504	0.299	0.211	T	0.143	3.904	0.165	1.647
r (-5: -35)	-0.908	-0.997	-0.986	-0.977	T	-0.997	-0.603	-0.999	-0.879
RT-USER (s)	7.124	0.440	0.327	0.204	14.854	0.147	0.156	0.163	8.701
r (-10: -25)	-0.950	-0.998	-0.979	-0.975	-0.669	-0.996	-0.994	-0.998	-0.806

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΜΕΤΡΗΣΗ 2.



ΣΧΗΜΑ 39: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 2.

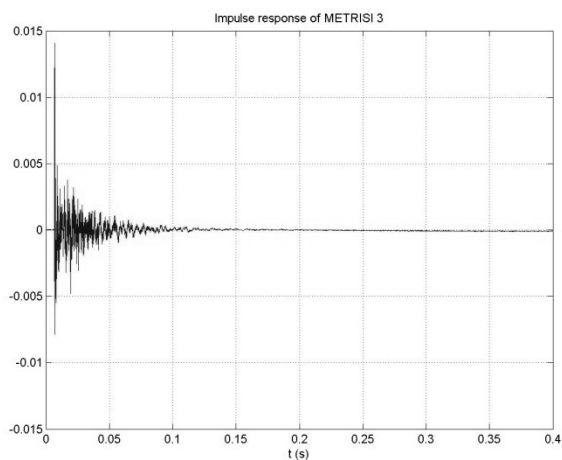
Η μέτρηση 1 πρόκειται για μια θέση κοντά στη κύρια θέση του ηχολήπτη, πάνω από την οποία δεν υπάρχουν οι διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και τις διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη μέτρηση 2 (σχήμα 39) από την οποία εξάγονται οι παρακάτω παρατηρήσεις: Εκτός της μεγάλης πτώσης της έντασης στα 40Hz, παρατηρείται άλλη μια πτώση στα 170Hz και μια απότομη μεγάλη πτώση στα 220Hz. Η μεγαλύτερη κορυφή βρίσκεται στα 300Hz και ακολουθούν κάποια ελάχιστα έντασης στις συχνότητες: 320, 380, 1200, 1800, 2500 και 2600Hz. Αυτή η μέτρηση περιγράφει την ακουστική συμπεριφορά στην βασική θέση του ηχολήπτη (καθιστός μπροστά από την κονσόλα). Η θέση αυτή φαίνεται να μην μπορεί να υποστηρίξει την περιοχή 220 έως 230Hz. Επίσης από τον πίνακα 4 φαίνεται να υπάρχει μεγάλο πρόβλημα στην περιοχή των 500Hz, όπου παρατηρούνται υψηλές τιμές στους χρόνους αντήχησης. Στην συχνοτική περιοχή των 500Hz είναι βέβαιο ότι υπάρχει στάσιμο κύμα που επηρεάζει πολύ την ακρόαση στη θέση αυτή, οι τιμές των χρόνων αντήχησης από τον πίνακα 4 είναι τεράστιες σε εκείνη τη μπάνα συχνοτήτων.

Β.5. ΜΕΤΡΗΣΗ 3 (ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΛΗΠΤΗ ΟΤΑΝ ΣΤΕΚΕΤΑΙ ΟΡΘΙΟΣ)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.40m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.10m από τον δεξί τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.90m από τον μπροστά τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.60m.
 - Σε απόσταση 2.75m από τον πίσω τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.30m από τον δεξί τοίχο.



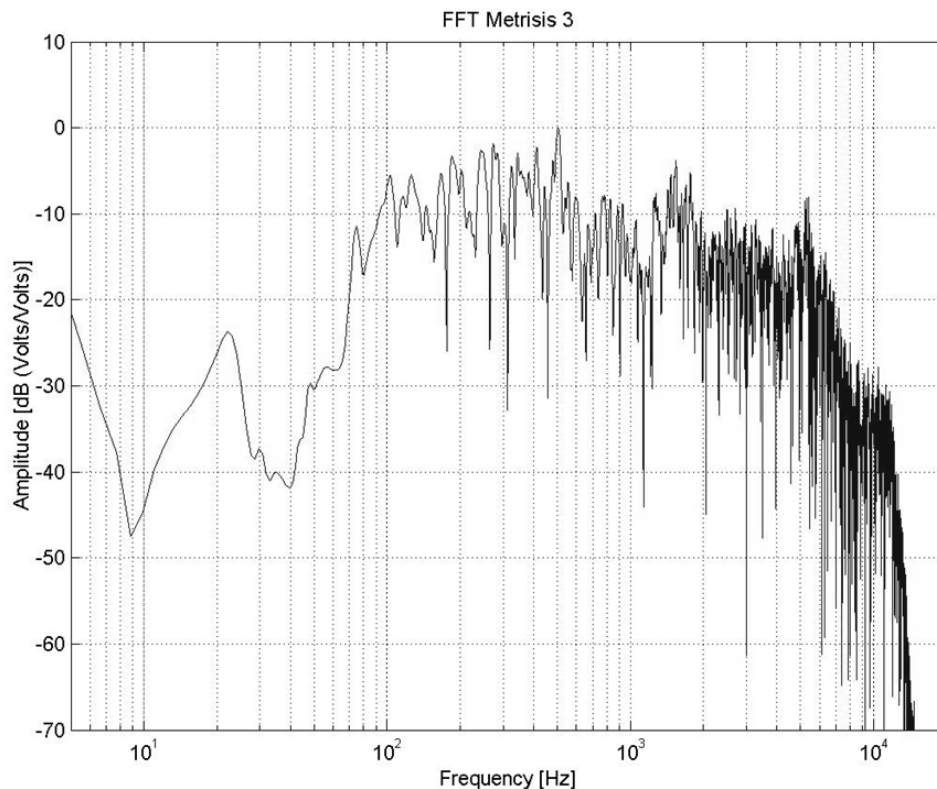
ΣΧΗΜΑ 40: Συνδεσμολογία Μέτρησης 3.



ΣΧΗΜΑ 41: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 3.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	14.9	33.0	42.9	47.9	49.6	48.0	50.7	50.0	SPL-Weighted Averages
N (dBspl)	-	7.7	14.2	22.4	27.1	24.4	24.0	25.6	
SNR (dB)	-	25.3	28.7	25.5	22.6	23.6	26.7	24.4	
C50 (dB)	-0.22	4.73	8.29	9.91	16.68	23.98	22.33	21.48	20.582
C80 (dB)	1.51	7.28	15.07	16.87	26.51	31.62	35.96	51.78	41.055
D50 (%)	48.7	74.8	87.1	90.7	97.9	99.6	99.4	99.3	98.597
TS (ms)	158.4	32.8	19.3	19.9	8.2	6.6	6.9	5.9	7.503
EDT-10dB (s)	2.725	0.734	0.409	0.289	0.172	0.167	0.149	0.187	0.168
RT-20dB (s)	7.956	0.556	0.320	0.251	0.194	0.131	0.147	0.159	0.171
r (-5: -25)	-0.978	-0.990	-0.984	-0.996	-0.995	-0.996	-0.997	-0.998	-0.996
RT-30dB (s)	7.795	2.191	0.301	0.493	0.187	0.186	0.143	0.150	0.177
r (-5: -35)	-0.965	-0.876	-0.993	-0.933	-0.998	-0.979	-0.998	-0.996	-0.994
RT-USER (s)	8.041	0.546	0.325	0.233	0.192	0.139	0.157	0.157	0.173
r (-10: -25)	-0.967	-0.978	-0.969	-0.995	-0.989	-0.996	-0.998	-0.998	-0.993

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΜΕΤΡΗΣΗ 3.



ΣΧΗΜΑ 42: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 3.

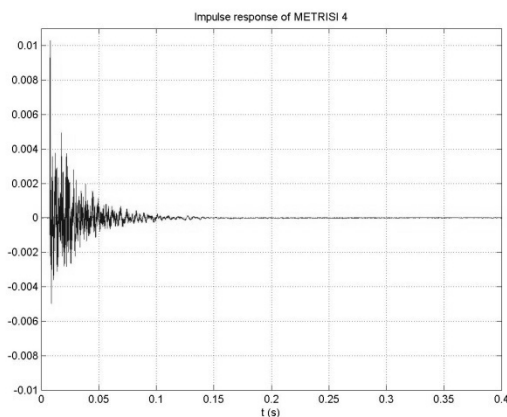
Η επόμενη μέτρηση 3 περιγράφει τι γίνεται όταν στην ίδια θέση ο ηχολήπτης σταθεί όρθιος. Εκεί και σύμφωνα με το σχήμα 42 ο ηχολήπτης θα δυσκολευτεί να ακούσει τις συχνότητες 30-40Hz, 180, 270, 310, 450, 1200 και 2000Hz, ενώ παρατηρείται άνοδος στην ένταση στις συχνότητες 500 και 1500Hz. Οπότε, παρατηρείται μεγάλη αλλαγή στην ίδια θέση με την διαφορά του να είναι κάποιος όρθιος ή καθιστός. Επίσης παρατηρείται αυξημένος ο δείκτης RT₃₀ στη συχνοτική περιοχή των 63Hz με τιμή 2.191sec.

Β.6. ΜΕΤΡΗΣΗ 4 (ΘΕΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΛΗΠΤΗ ΜΠΡΟΣΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΚΟΝΣΟΛΑ)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.40m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.10m από τον δεξί τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.90m από τον μπροστά τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.60m.
 - Σε απόσταση 2.75m από τον πίσω τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.41m από τον αριστερό τοίχο.



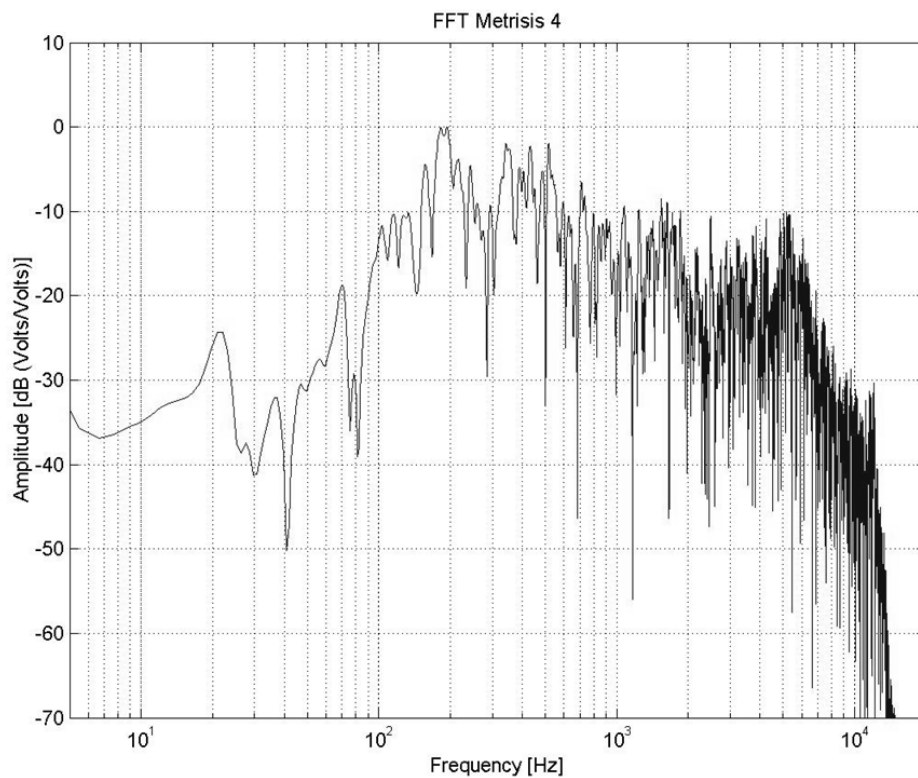
ΣΧΗΜΑ 43: Συνδεσμολογία Μέτρησης 4.



ΣΧΗΜΑ 44: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 4.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	15.2	26.8	43.8	48.9	50.0	46.8	47.2	49.0	SPL- Weighted Averages
N (dBspl)	-	14.9	9.5	16.2	20.4	16.7	18.0	20.1	
SNR (dB)	-	11.9	34.3	32.7	29.6	30.1	29.1	28.9	
C50 (dB)	-1.89	8.95	8.90	13.04	17.39	19.13	17.97	19.37	17.931
C80 (dB)	0.94	11.58	16.03	1.81	26.46	31.94	29.74	30.04	28.502
D50 (%)	39.3	88.7	88.6	95.3	98.2	98.8	98.4	98.9	98.368
TS (ms)	239.3	-13.5	19.3	16.3	11.4	9.6	10.7	10.4	10.963
EDT-10dB (s)	8.150	0.369	0.339	0.213	0.202	0.157	0.183	0.155	0.190
RT-20dB (s)	11.719	0.416	0.325	0.263	0.180	0.169	0.160	0.164	0.175
r (-5: -25)	-0.813	-0.928	-0.996	-0.989	-0.997	-0.995	-0.996	-0.998	-0.997
RT-30dB (s)	10.393	0.391	0.329	0.331	2.177	0.155	0.156	0.165	1.626
r (-5: -35)	-0.760	-0.904	-0.988	-0.982	-0.647	-0.996	-0.998	-0.999	-0.759
RT-USER (s)	4.961	0.272	0.325	0.252	0.189	0.182	0.149	0.166	0.183
r (-10: -25)	-0.814	-0.927	-0.983	-0.984	-0.997	-0.994	-0.998	-0.998	-0.997

ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΜΕΤΡΗΣΗ 4.



ΣΧΗΜΑ 45: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 4.

Οι επόμενες μετρήσεις (μέτρηση 4 και 5) αφορούν δύο άλλες βασικές θέσεις στο control room. Την θέση αριστερά και μπροστά από την κονσόλα, εκεί δηλαδή που υπάρχουν τα δέκα πρώτα κανάλια της κονσόλας, τα οποία χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα για κάθε ηχογράφιση (μέτρηση 4) και τη θέση πίσω από τον ηχολήπτη στον πίσω τοίχο, όπου συνήθως κάθονται οι επισκέπτες και εφόσον πρόκειται για αίθουσα διδασκαλίας κάθονται και οι φοιτητές (μέτρηση 5). Στο σχήμα 45 με τον μετασχηματισμό Fourier που έγινε, παρατηρούνται ελάχιστα έντασης στις συχνότητες 40, 80, 150, 290, 500, 700 και 1200Hz. Επίσης παρατηρούνται μέγιστα έντασης στις συχνότητες 70 και 190-200Hz. Φαίνεται λοιπόν μια αρκετά ανομοιόμορφη κατανομή συχνοτικής ενέργειας σε αυτήν την περιοχή του control room, πάνω από την οποία δεν υπάρχουν διαχυτές και δίπλα στην οποία υπάρχει το παράθυρο του δωματίου,

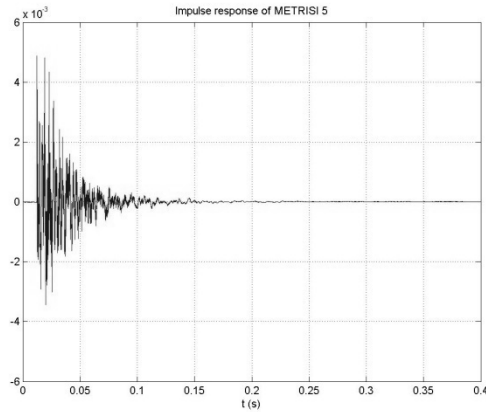
παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν αρκετά την ακουστική του χώρου σε αυτή τη θέση. Η τιμή 2.177sec που παρουσιάζεται στον πίνακα 6 στη συχνοτική ζώνη των 500Hz για τον δείκτη RT_{30} θεωρείται υψηλή.

B.7. ΜΕΤΡΗΣΗ 5 (ΘΕΣΗ ΣΤΟΝ ΠΙΣΩ ΤΟΙΧΟ ΟΠΟΥ ΕΚΕΙ ΚΑΘΟΝΤΑΙ ΟΙ ΕΠΙΣΚΕΠΤΕΣ, ΦΟΙΤΗΤΕΣ ΚΤΛ)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.40m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.10m από τον δεξί τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.90m από τον μπροστά τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.25m.
 - Σε απόσταση 0.85m από τον πίσω τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.20m από τον δεξί τοίχο.



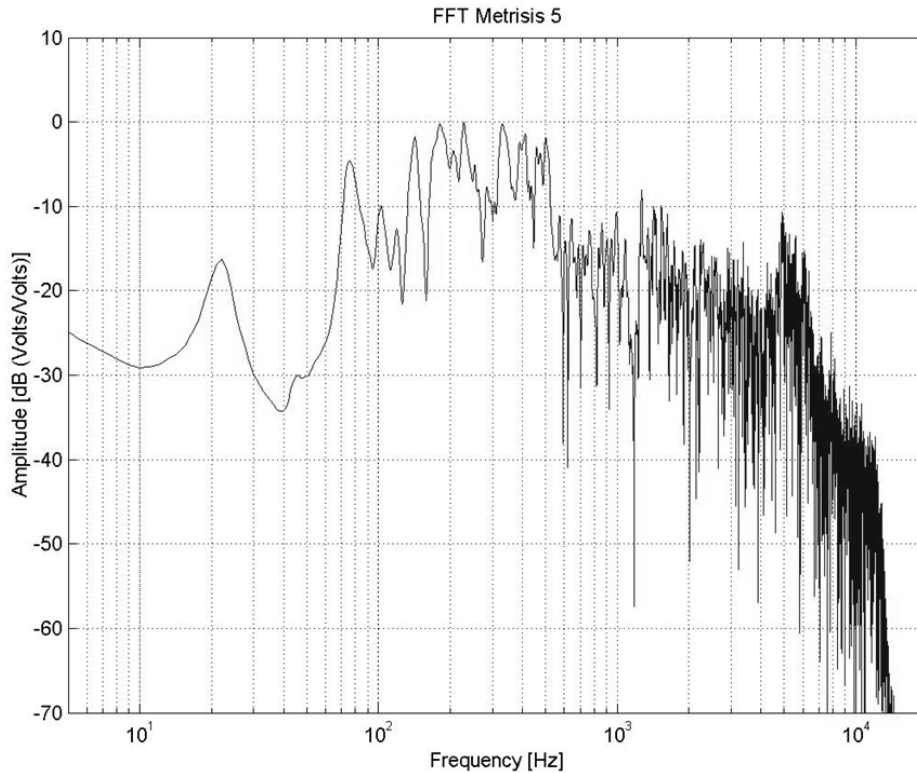
ΣΧΗΜΑ 46: Συνδεσμολογία Μέτρησης 5.



ΣΧΗΜΑ 47: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 5.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	20.6	36.8	43.7	49.1	49.1	43.6	44.2	44.9	SPL-Weighted Averages
N (dBspl)	-	4.2	3.1	11.1	10.9	6.2	9.2	12.8	
SNR (dB)	-	32.6	40.6	37.9	38.2	37.3	35.0	32.1	
C50 (dB)	-0.31	2.83	10.77	15.50	17.93	21.18	17.19	16.63	18.359
C80 (dB)	1.90	9.02	16.58	22.40	25.88	30.29	27.90	27.40	26.839
D50 (%)	48.2	65.7	92.3	97.3	98.4	99.2	98.1	97.9	98.469
TS (ms)	87.2	44.2	20.3	17.2	12.8	11.7	14.2	12.9	12.755
EDT-10dB (s)	1.276	0.556	0.299	0.205	0.160	0.151	0.171	0.187	0.161
RT-20dB (s)	5.736	0.406	0.323	0.240	0.176	0.148	0.179	0.168	0.173
r (-5: -25)	-0.899	-0.991	-0.991	-0.971	-0.997	-0.996	-0.997	-0.999	-0.997
RT-30dB (s)	5.103	0.855	0.357	0.291	0.198	0.154	0.166	0.164	0.190
r (-5: -35)	-0.929	-0.937	-0.988	-0.978	-0.993	-0.997	-0.998	-0.999	-0.994
RT-USER (s)	7.392	0.435	0.331	0.283	0.183	0.144	0.176	0.167	0.178
r (-10: -25)	-0.940	-0.984	-0.989	-0.971	-0.997	-0.993	-0.996	-0.999	-0.996

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΜΕΤΡΗΣΗ 5.



ΣΧΗΜΑ 48: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 5.

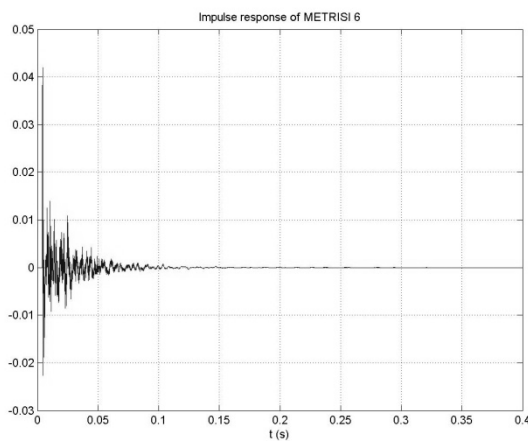
Η κατανομή ενέργειας για τη μέτρηση 5 (σχήμα 48) φαίνεται να είναι από τις πιο ανομοιομορφες μέσα στο χώρο. Υπάρχουν οι πτώσεις στις συχνότητες 40 και 1200Hz, αλλά υπάρχει μια μεγάλη κορυφή στα 75Hz και μια τεράστια ανομοιομορφία στην περιοχή 100 έως 500Hz, με αδυναμία του χώρου να αναπαράγει τις συχνότητες 140, 160, 280 και 450Hz. Παρατηρείται λοιπόν ότι πιθανοί ακροατές που θα κάθονται στα καθίσματα πίσω από τον ηχολήπτη θα αντιλαμβάνονται διαφορετικά τον ήχο από ό, τι ο ηχολήπτης στη θέση του. Τέλος στον πίνακα 7 παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές του δείκτη TS σε σχέση με τους πίνακες των προηγούμενων μετρήσεων.

Β.8. ΜΕΤΡΗΣΗ 6 (ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΗΧΕΙΩΝ MEYER)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.20m από τον δεξί τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.85m από τον μπροστά τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.25m.
 - Σε απόσταση 2.75m από τον πίσω τοίχο.
 - Σε απόσταση 2.26m από τον δεξί τοίχο.
 -



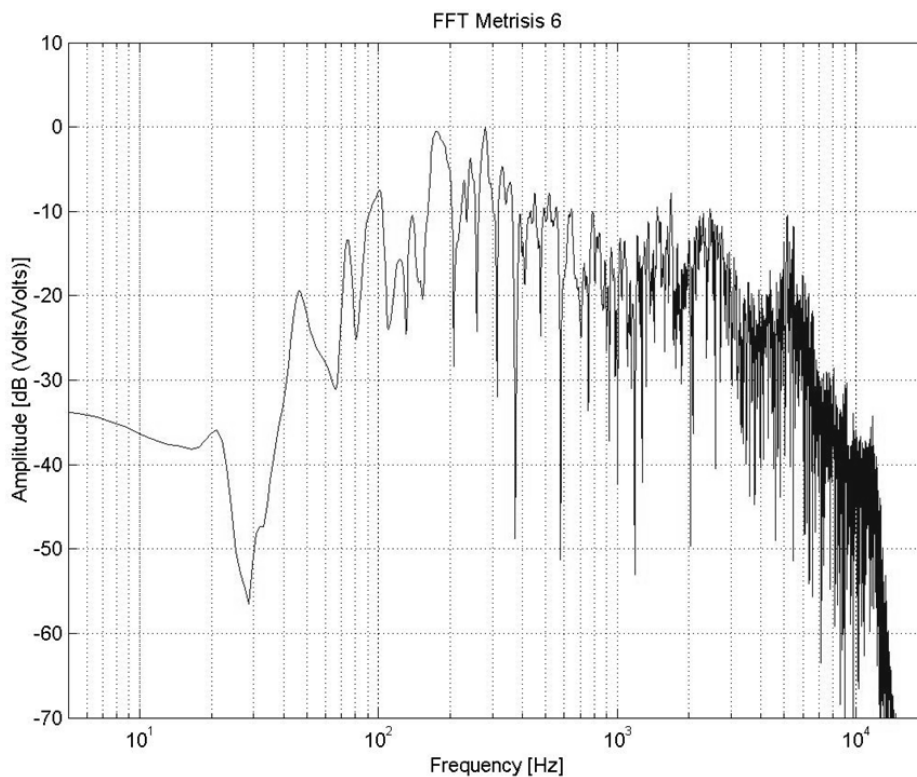
ΣΧΗΜΑ 49: Συνδεσμολογία Μέτρησης 6.



ΣΧΗΜΑ 50: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 6.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	28.2	43.1	54.6	59.9	56.7	55.4	59.8	57.3	SPL-Weighted Averages
N (dBspl)	-	17.1	16.6	18.9	16.5	17.4	23.7	24.1	
SNR (dB)	-	26.0	38.0	40.9	40.2	38.0	36.1	33.2	
C50 (dB)	3.27	4.24	10.10	15.70	18.01	23.04	24.33	21.31	21.639
C80 (dB)	6.66	8.05	17.73	22.52	25.12	33.65	37.70	33.25	33.458
D50 (%)	68.0	72.6	91.1	97.4	98.4	99.5	99.6	99.3	98.996
TS (ms)	71.0	36.1	18.2	13.5	9.1	7.2	4.1	8.1	7.412
EDT-10dB (s)	0.829	0.630	0.258	0.212	0.147	0.187	0.143	0.161	0.154
RT-20dB (s)	7.763	0.533	0.315	0.263	0.206	0.148	0.155	0.151	0.179
r (-5: -25)	-0.951	-0.997	-0.986	-0.984	-0.996	-0.984	-0.997	-0.997	-0.994
RT-30dB (s)	6.418	0.747	0.327	0.253	0.212	0.144	0.155	0.153	0.181
r (-5: -35)	-0.927	-0.980	-0.994	-0.995	-0.996	-0.995	-0.999	-0.998	-0.997
RT-USER (s)	8.648	0.512	0.337	0.293	0.213	0.132	0.157	0.159	0.180
r (-10: -25)	-0.975	-0.995	-0.973	-0.983	-0.995	-0.972	-0.993	-0.997	-0.990

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΜΕΤΡΗΣΗ 6.

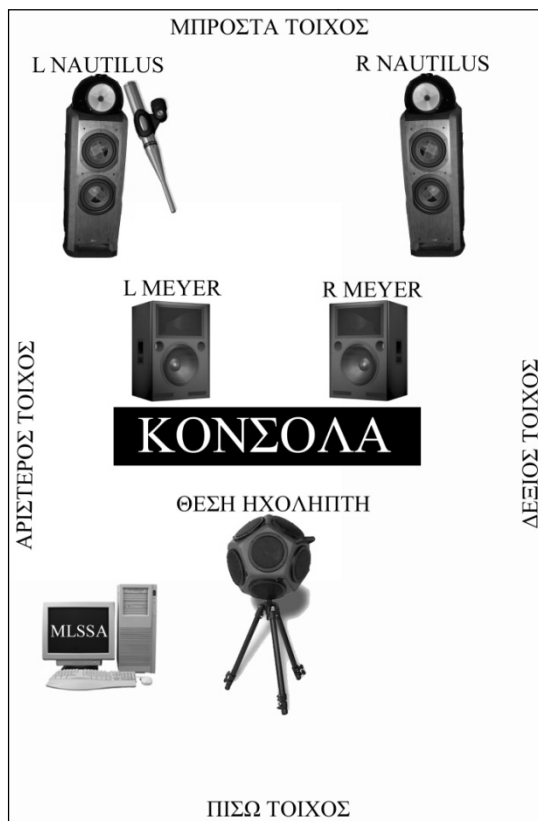


ΣΧΗΜΑ 51: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 6.

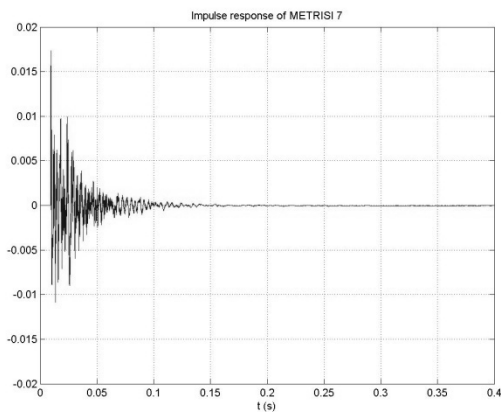
Οι μετρήσεις 6, 7, 8, 9, 10, 11 και 12, αφορούν το τι συμβαίνει με την απόκριση του χώρου στα σημεία που είναι τοποθετημένα τα ηχεία και στις ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ του κάθε ζευγαριού. Σε αυτά τα σημεία παρατηρείται ότι η σταθερή πτώση έντασης που υπήρχε στα 40Hz στις προηγούμενες μετρήσεις, δίνει τη θέση της σε πτώσεις έντασης κοντά στα 30 και στα 50Hz με την περιοχή 40-45Hz να αποτελεί σχεδόν πάντα μέγιστο έντασης. Για τη μέτρηση 6, το ηχείο τοποθετήθηκε στην μέση της απόστασης του ζευγαριού ηχείων Meyer, με αποτέλεσμα (σχήμα 51) ο ηχολήπτης να ακούει έντονα τις συχνότητες 45, 100, 180-190 και 290Hz και να «χάνει» τις συχνότητες 30, 200, 310, 390, 590 και 1200Hz. Από τις ενδείξεις του πίνακα 8 συμπεραίνεται ότι ο χώρος δεν παρουσιάζει κάποιο άλλο πρόβλημα στη θέση όπου έγινε η μέτρηση 6.

Β.9. ΜΕΤΡΗΣΗ 7 (ΔΙΠΛΑ ΑΚΡΙΒΩΣ ΣΤΟ ΑΡΙΣΤΕΡΟ NAUTILUS)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.34m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.60m από τον πίσω τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.30m.
 - Σε απόσταση 2.50m από τον μπροστά τοίχο.
 - Σε απόσταση 0.80m από τον αριστερό τοίχο.



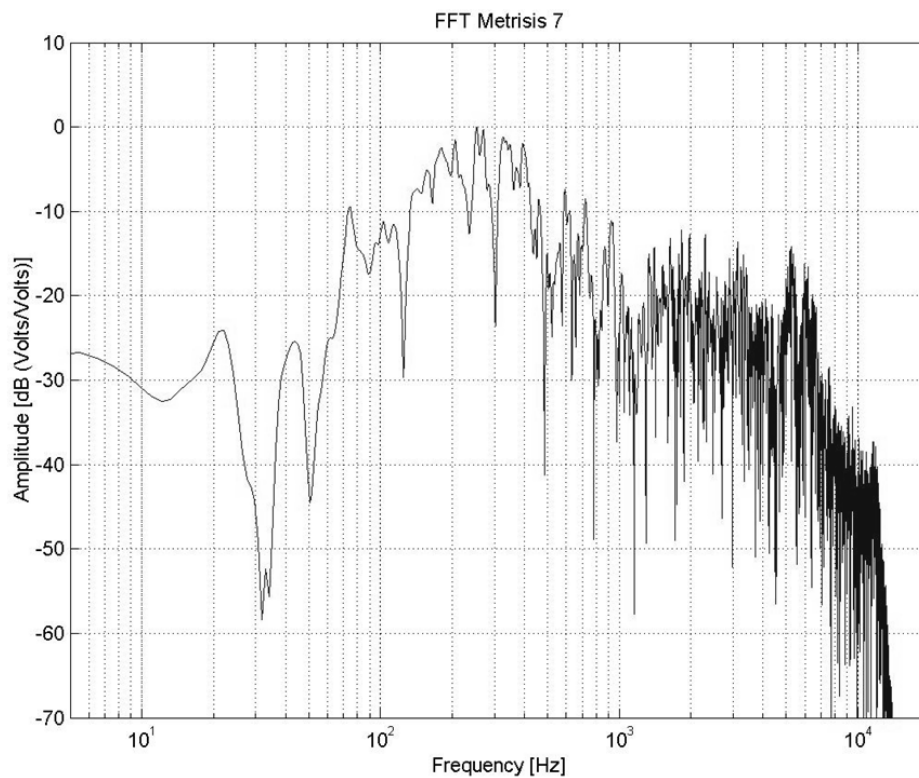
ΣΧΗΜΑ 52: Συνδεσμολογία Μέτρησης 7.



ΣΧΗΜΑ 53: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 7.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	26.8	42.5	53.2	59.9	57.6	51.8	52.9	53.6	SPL-Weighted Averages
N (dBspl)	-	21.6	15.3	20.4	20.9	16.7	22.0	24.5	
SNR (dB)	-	20.9	37.9	39.5	36.7	35.1	30.9	29.2	
C50 (dB)	0.62	7.65	13.84	13.59	19.21	19.68	18.62	19.53	19.236
C80 (dB)	2.39	11.01	20.38	20.36	27.42	31.44	29.29	29.43	28.282
D50 (%)	53.5	85.3	96.0	95.8	98.8	98.9	98.6	98.9	98.819
TS (ms)	165.3	22.6	16.5	16.4	8.9	12.3	11.3	10.7	9.459
EDT-10dB (s)	2.170	0.450	0.207	0.184	0.139	0.168	0.200	0.176	0.148
RT-20dB (s)	9.583	0.589	0.340	0.273	0.207	0.147	0.157	0.151	0.195
r (-5: -25)	-0.894	-0.999	-0.987	-0.969	0.988	-0.995	-0.992	-0.999	-0.990
RT-30dB (s)	8.164	0.531	0.359	0.247	0.188	0.150	0.157	0.157	0.181
r (-5: -35)	-0.833	-0.992	-0.995	-0.987	-0.992	-0.998	-0.997	-0.998	-0.993
RT-USER (s)	9.069	0.586	0.364	0.278	0.218	0.147	0.143	0.152	0.203
r (-10: -25)	-0.858	-0.998	-0.995	-0.961	-0.981	-0.992	-0.989	-0.998	-0.983

ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΜΕΤΡΗΣΗ 7.

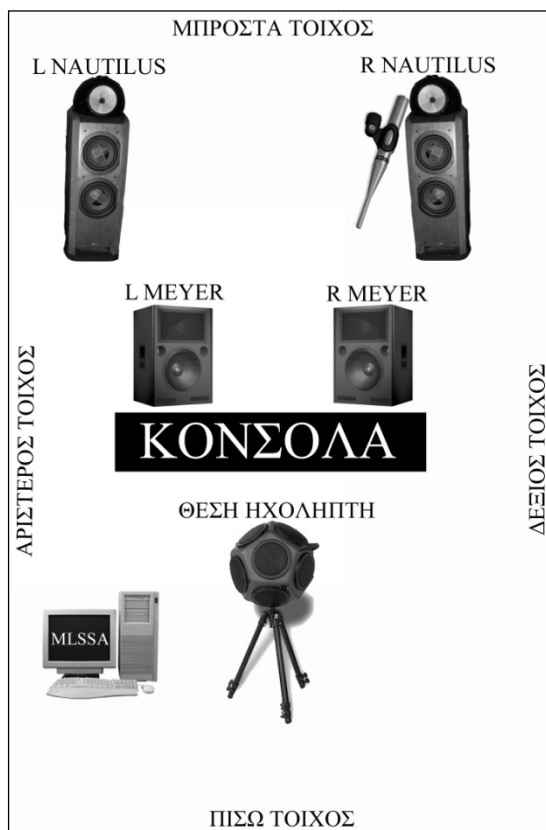


ΣΧΗΜΑ 54: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 7.

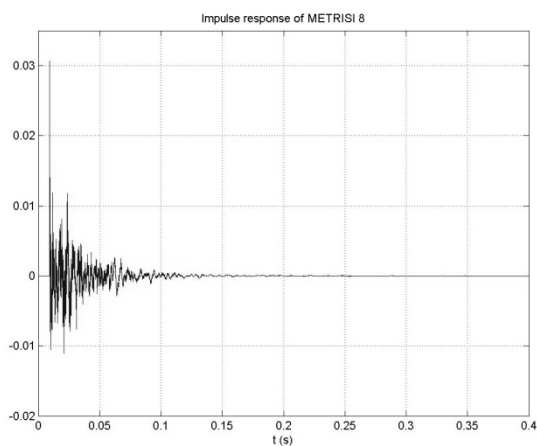
Για τις έξι τελευταίες μετρήσεις, το μικρόφωνο αντιπροσωπεύει το τι μπορεί να αναπαράγει ο χώρος στην περιοχή που βρίσκεται το κάθε ηχείο και στην ενδιάμεση μεταξύ τους απόσταση. Στη θέση που βρίσκεται το αριστερό Nautilus (μέτρηση 7, σχήμα 54) ο χώρος δεν αναπαράγει με ευκολία τις συχνότητες 30, 50, 140, 300, 500, 800 και 1200Hz, ενώ στην γραφική παράσταση του σχήματος φαίνονται έντονες κορυφές έντασης στις συχνότητες 75 και 250-260Hz. Για τις μετρήσεις 7, 8, 9, 10, 11 και 12, από τους πίνακες 9, 10, 11, 12, 13 και 14 εκτός από τις σχετικά υψηλές τιμές των RT_{30} στην περιοχή των 63Hz κυρίως δεν παρουσιάζεται κάποιο άλλο πρόβλημα.

Β.10. ΜΕΤΡΗΣΗ 8 (ΔΙΠΛΑ ΑΚΡΙΒΩΣ ΣΤΟ ΔΕΞΙ NAUTILUS)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.34m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.60m από τον πίσω τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.30m.
 - Σε απόσταση 2.65m από τον μπροστά τοίχο.
 - Σε απόσταση 0.80m από τον δεξί τοίχο.



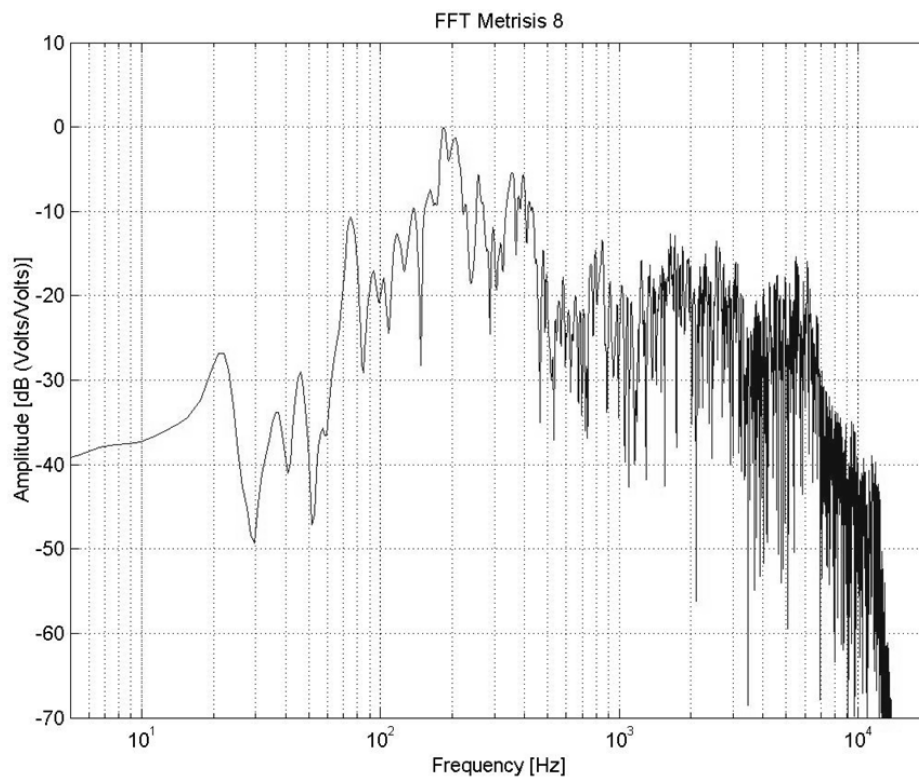
ΣΧΗΜΑ 55: Συνδεσμολογία Μέτρησης 8.



ΣΧΗΜΑ 56: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 8.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	25.4	43.2	54.4	59.6	55.7	52.0	56.7	55.5	SPL-Weighted Averages
N (dBspl)	-	7.0	13.4	19.7	17.6	17.9	24.1	25.7	
SNR (dB)	-	36.2	41.0	39.9	38.2	34.2	32.6	29.8	
C50 (dB)	-0.05	2.43	8.01	11.45	11.74	18.13	20.76	20.12	16.775
C80 (dB)	2.22	8.61	18.03	19.77	26.28	32.56	31.50	30.32	29.240
D50 (%)	49.7	63.7	86.3	93.3	93.7	98.5	99.2	99.0	95.757
TS (ms)	97.9	39.7	18.0	18.4	14.4	10.2	8.0	8.7	12.234
EDT-10dB (s)	1.460	0.620	0.331	0.188	0.252	0.161	0.150	0.147	0.213
RT-20dB (s)	7.100	0.470	0.315	0.256	0.168	0.173	0.160	0.171	0.167
r (-5: -25)	-0.907	-0.986	-0.973	-0.989	-0.978	-0.992	-0.994	-0.998	-0.984
RT-30dB (s)	5.285	0.515	0.330	0.240	0.166	0.144	0.161	0.167	0.162
r (-5: -35)	-0.906	-0.993	-0.988	-0.994	-0.993	-0.993	-0.997	-0.998	-0.994
RT-USER (s)	8.762	0.525	0.392	0.245	0.133	0.168	0.163	0.177	0.146
r (-10: -25)	-0.921	-0.979	0.953	-0.985	-0.982	-0.984	-0.990	-0.998	-0.985

ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΜΕΤΡΗΣΗ 8.



ΣΧΗΜΑ 57: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 8.

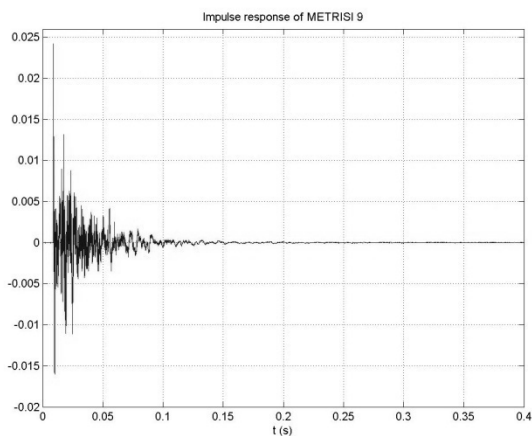
Οι διαφορές με τη θέση που είναι τοποθετημένο το δεξί Nautilus (μέτρηση 8) είναι μεγάλες και αυτό οφείλεται στο ότι δίπλα από το δεξί Nautilus υπάρχουν τοποθετημένες σειρές απορροφητών και στη συνέχεια σειρές διαχυτών. Πιο συγκεκριμένα στη θέση αυτή (σχήμα 57) υπάρχουν πτώσεις έντασης στις συχνότητες 30, 50 και 85Hz και κορυφές στις συχνότητες 75, 190-210Hz με τεράστια ανομοιομορφία στην κατανομή ενέργειας στις περιοχές συχνοτήτων 100-180Hz και 210-350Hz.

Β.11. ΜΕΤΡΗΣΗ 9 (ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ NAUTILUS)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.34m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.60m από τον πίσω τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.44m.
 - Σε απόσταση 2.34m από τον μπροστά τοίχο.
 - Η απόσταση των ηχείων Nautilus μεταξύ τους είναι 2.60m οπότε το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε απόσταση 1.30m από κάθε ηχείο.



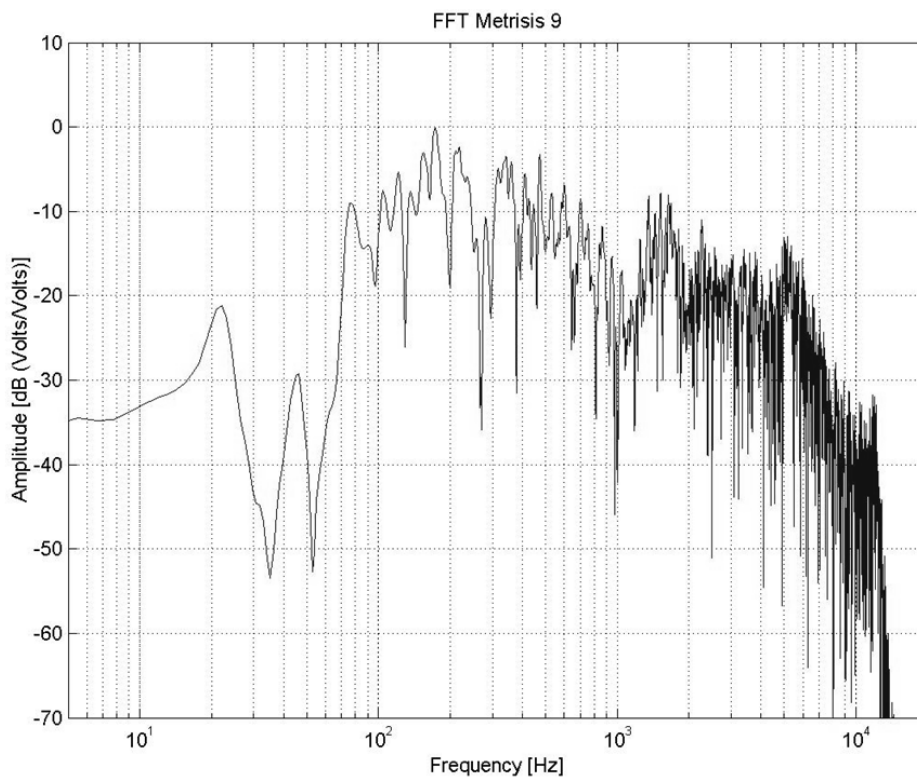
ΣΧΗΜΑ 58: Συνδεσμολογία Μέτρησης 9.



ΣΧΗΜΑ 59: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 9.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	26.2	43.4	54.1	56.8	56.6	53.5	56.6	55.8	SPL-Weighted Averages
N (dBspl)	-	16.2	17.9	22.9	26.0	25.2	28.8	30.0	
SNR (dB)	-	27.3	36.2	33.9	30.6	28.3	27.8	25.8	
C50 (dB)	-2.49	2.13	6.68	12.56	15.45	18.66	19.00	19.33	17.083
C80 (dB)	-0.91	6.04	16.35	18.43	25.19	32.89	31.08	30.09	28.915
D50 (%)	36.0	62.0	82.3	94.7	97.2	98.7	98.8	98.8	97.787
TS (ms)	154.5	50.5	23.5	19.5	11.9	8.9	9.5	11.8	11.081
EDT-10dB (s)	1.788	0.675	0.445	0.286	0.223	0.159	0.166	0.155	0.200
RT-20dB (s)	6.637	0.425	0.258	0.261	0.223	0.163	0.158	0.151	0.199
r (-5: -25)	-0.956	-0.997	-0.968	-0.989	-0.983	-0.995	-0.997	-0.999	-0.988
RT-30dB (s)	6.058	0.465	0.302	0.254	0.225	0.145	0.156	0.152	0.198
r (-5: -35)	-0.933	-0.997	-0.981	-0.995	-0.989	-0.996	-0.999	-0.999	-0.992
RT-USER (s)	7.282	0.451	0.303	0.273	0.195	0.156	0.156	0.151	0.180
r (-10: -25)	-0.949	-0.996	-0.916	-0.981	-0.981	-0.988	-0.997	-0.999	-0.986

ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΜΕΤΡΗΣΗ 9.



ΣΧΗΜΑ 60: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 9.

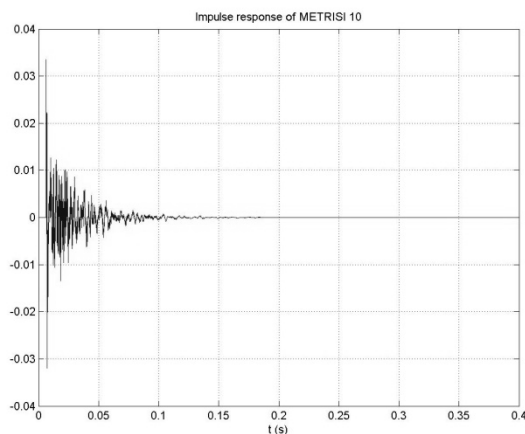
Στη μέση της απόστασης των δύο ηχείων Nautilus (μέτρηση 9, σχήμα 60) υπάρχουν πτώσεις έντασης στις συχνότητες 35, 61, 130, 200, 280, 390 και 1000Hz και μέγιστα έντασης στις συχνότητες 75 και 170Hz.

Β.12. ΜΕΤΡΗΣΗ 10 (ΔΙΠΛΑ ΑΚΡΙΒΩΣ ΣΤΟ ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΜΕΥΕΡ)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.34m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.60m από τον πίσω τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 3.35m από τον μπροστά τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.37m από τον αριστερό τοίχο.



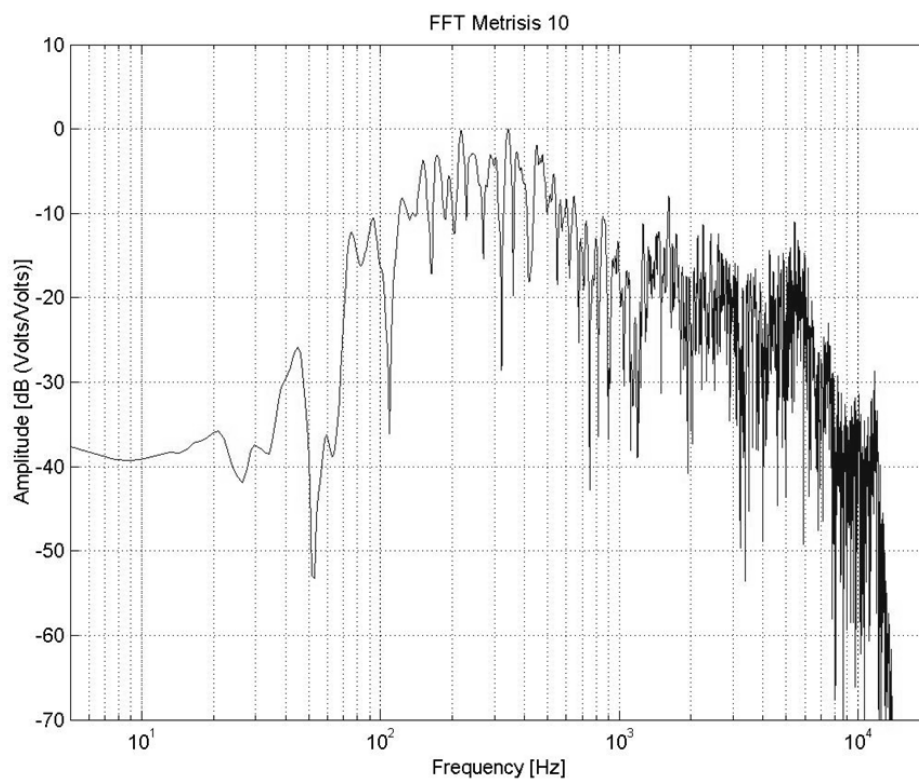
ΣΧΗΜΑ 61: Συνδεσμολογία Μέτρησης 10.



ΣΧΗΜΑ 62: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 10.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	26.5	44.0	55.5	62.1	62.4	56.7	58.5	58.5	SPL-Weighted Averages
N (dBspl)	-	10.7	16.3	22.0	24.9	20.8	24.5	26.3	
SNR (dB)	-	33.3	39.2	40.1	37.5	35.8	34.0	32.2	
C50 (dB)	4.54	6.08	11.02	13.62	21.14	22.03	21.28	21.69	21.275
C80 (dB)	9.15	10.38	17.85	26.68	28.49	37.19	33.32	33.29	31.301
D50 (%)	74.0	80.2	92.7	95.8	99.2	99.4	99.3	99.3	99.257
TS (ms)	53.2	29.2	22.7	12.7	8.8	8.3	8.0	9.0	8.695
EDT-10dB (s)	0.636	0.494	0.374	0.244	0.152	0.143	0.147	0.130	0.150
RT-20dB (s)	8.013	0.460	0.282	0.224	0.158	0.138	0.144	0.146	0.154
r (-5: -25)	-0.942	-0.995	-0.965	-0.990	-0.990	-0.997	-0.993	-0.998	0.991
RT-30dB (s)	6.457	0.485	0.318	0.233	0.171	0.134	0.152	0.151	0.165
r (-5: -35)	-0.917	-0.996	-0.989	-0.995	-0.993	-0.999	-0.997	-0.999	-0.994
RT-USER (s)	8.739	0.451	0.326	0.222	0.155	0.141	0.159	0.149	0.153
r (-10: -25)	-0.967	-0.991	-0.959	-0.981	-0.979	-0.995	-0.995	-0.998	-0.983

ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΜΕΤΡΗΣΗ 10.



ΣΧΗΜΑ 63: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 10.

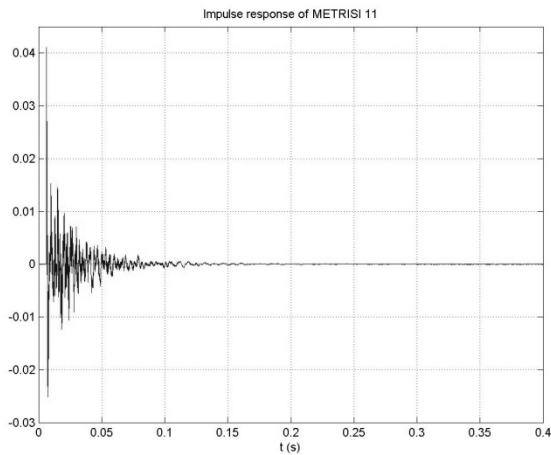
Όσον αφορά το ζευγάρι ηχείων Meyer, για τη μέτρηση 10 (σχήμα 63) που αφορά το αριστερό ηχείο Meyer παρατηρούνται ελάχιστα έντασης στις συχνότητες 50, 120, 310, 750, και 1700Hz και μέγιστα στις συχνότητες 75-90, 210 και 320Hz. Και πάλι οι διαφορές ανάμεσα στο ένα ηχείο και το άλλο είναι μεγάλες, όπου στην περίπτωση του δεξιού Meyer πιθανόν να φταίει και η θέση της οθόνης (μέτρηση 11).

Β.13. ΜΕΤΡΗΣΗ 11 (ΔΙΠΛΑ ΑΚΡΙΒΩΣ ΣΤΟ ΔΕΞΙ ΜΕΥΕΡ)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.34m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.60m από τον πίσω τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 3.35m από τον μπροστά τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.60m από τον δεξί τοίχο.



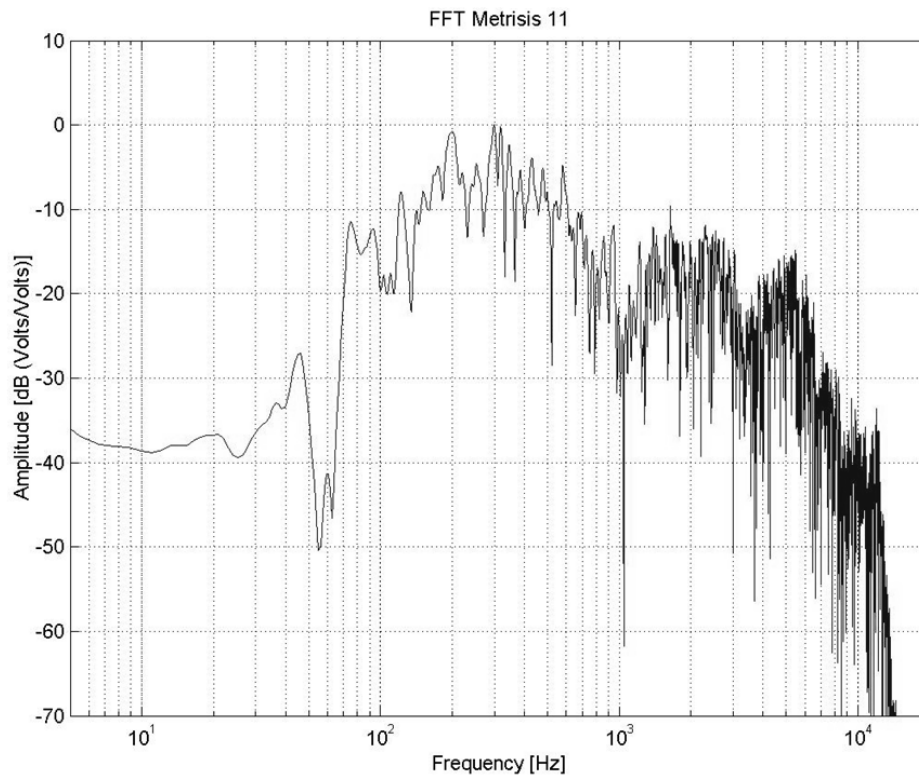
ΣΧΗΜΑ 64: Συνδεσμολογία Μέτρησης 11.



ΣΧΗΜΑ 65: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 11.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	25.7	44.2	54.8	62.4	61.3	55.7	59.2	57.7	SPL-Weighted Averages
N (dBspl)	-	11.6	17.7	24.1	26.7	23.6	31.0	31.1	
SNR (dB)	-	32.7	37.1	38.3	34.7	32.1	28.3	26.5	
C50 (dB)	6.78	5.90	11.51	14.36	19.42	22.57	21.65	21.85	20.266
C80 (dB)	9.42	10.26	14.01	25.37	27.69	34.18	37.78	34.26	31.747
D50 (%)	82.6	79.6	93.4	96.5	98.9	99.4	99.3	99.4	99.000
TS (ms)	41.5	29.4	22.0	11.9	9.0	8.9	5.5	8.2	8.568
EDT-10dB (s)	0.582	0.501	0.370	0.225	0.186	0.155	0.154	0.132	0.177
RT-20dB (s)	8.199	0.522	0.401	0.196	0.182	0.139	0.162	0.157	0.174
r (-5: -25)	-0.945	-0.998	-0.963	-0.993	-0.993	-0.996	-0.995	-0.996	-0.993
RT-30dB (s)	7.565	0.536	0.323	0.207	0.197	0.140	0.157	0.150	0.184
r (-5: -35)	-0.938	-0.999	-0.968	-0.995	-0.993	-0.998	-0.996	-0.998	-0.994
RT-USER (s)	9.182	0.544	0.421	0.173	0.201	0.146	0.179	0.161	0.191
r (-10: -25)	-0.983	-0.996	-0.995	-0.994	-0.989	-0.992	-0.996	-0.996	-0.990

ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΜΕΤΡΗΣΗ 11.



ΣΧΗΜΑ 66: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 11.

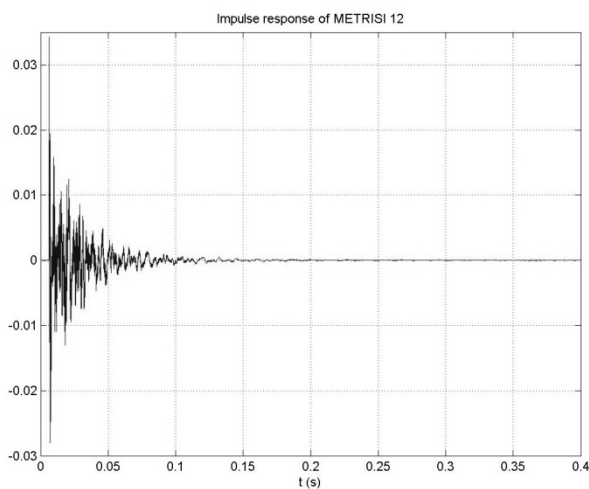
Σε αυτή τη θέση παρατηρείται (σχήμα 66) αδυναμία του χώρου να αναπαράγει τις συχνότητες 55, 100-120, 150, 510 και με μεγάλη πτώση στα 1100Hz. Επίσης από τη γραφική παράσταση φαίνονται κάποια μέγιστα έντασης στις συχνότητες 200, 300 και 1800Hz.

B.14. ΜΕΤΡΗΣΗ 12 (ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΜΕΥΕΡ)

- Τοποθέτηση δωδεκάεδρου ηχείου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 2.34m από τον αριστερό τοίχο.
 - Σε απόσταση 1.60m από τον πίσω τοίχο.
- Τοποθέτηση μικροφώνου:
 - Ύψος: 1.20m.
 - Σε απόσταση 3.35m από τον μπροστά τοίχο.
 - Η απόσταση των ηχείων Meyer μεταξύ τους είναι 1.53m οπότε το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε απόσταση 0.77m από κάθε ηχείο.



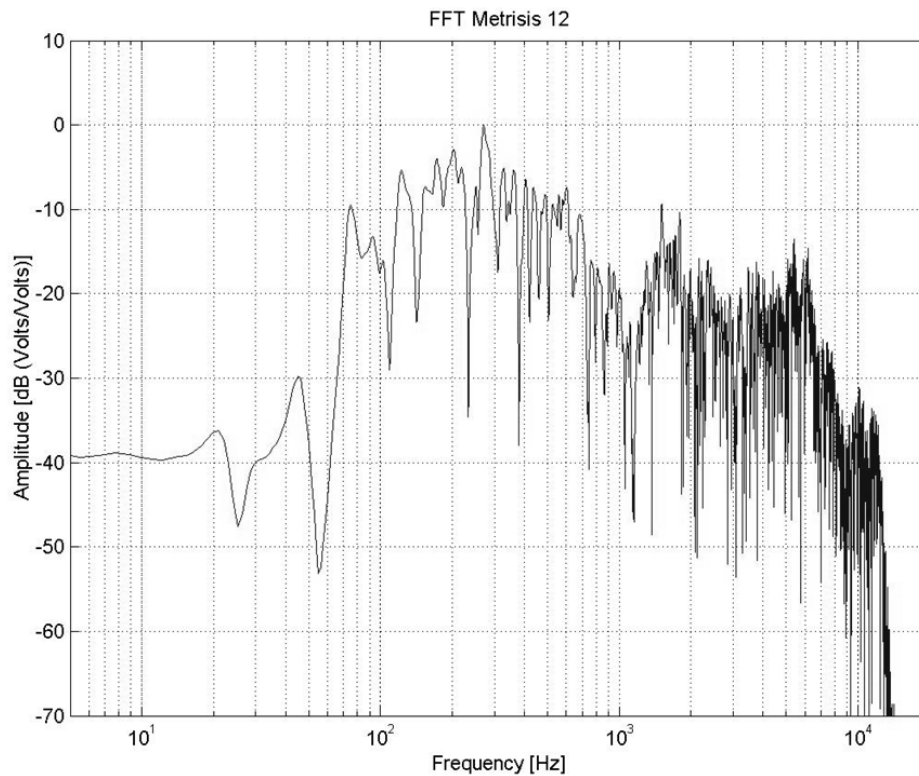
ΣΧΗΜΑ 67: Συνδεσμολογία Μέτρησης 12.



ΣΧΗΜΑ 68: IR ΜΕΤΡΗΣΗΣ 12.

f (Hz)	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	500-4000
S (dBspl)	25.6	47.1	56.9	62.6	61.0	55.7	58.7	58.6	SPL-Weighted Averages
N (dBspl)	-	13.3	17.7	24.7	28.4	26.5	30.7	31.1	
SNR (dB)	-	33.8	39.2	37.9	32.5	29.2	28.0	27.5	
C50 (dB)	5.49	4.16	11.58	15.55	18.49	21.12	21.05	21.87	19.422
C80 (dB)	8.66	8.47	18.31	24.13	26.00	31.97	32.15	32.05	28.601
D50 (%)	78.0	72.3	93.5	97.3	98.6	99.2	99.2	99.4	98.778
TS (ms)	46.1	36.6	21.5	11.7	10.0	7.6	8.1	8.9	9.475
EDT-10dB (s)	0.655	0.588	0.329	0.165	0.251	0.129	0.162	0.140	0.223
RT-20dB (s)	6.778	0.509	0.322	0.232	0.164	0.153	0.149	0.146	0.160
r (-5: -25)	-0.959	-0.998	-0.982	-0.995	-0.990	-0.998	-0.998	-0.990	-0.992
RT-30dB (s)	6.154	0.572	0.306	0.250	0.190	0.163	0.155	0.161	0.182
r (-5: -35)	-0.961	-0.997	-0.993	-0.995	-0.992	-0.998	-0.999	-0.995	-0.993
RT-USER (s)	7.494	0.529	0.368	0.228	0.187	0.150	0.154	0.167	0.178
r (-10: -25)	-0.990	-0.997	-0.985	-0.994	-0.995	-0.998	-0.998	-0.996	-0.995

ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΜΕΤΡΗΣΗ 12.



ΣΧΗΜΑ 69: FFT ΜΕΤΡΗΣΗΣ 12.

Στη μέση της απόστασης των δύο ηχείων Meyer (μέτρηση 12 σχήμα 69) υπάρχουν πτώσεις έντασης στις συχνότητες 55, 110, 220, 390, 710, 1100, και 1200Hz και μέγιστα έντασης στις συχνότητες 75, 130, 280, 1600 και 1800Hz.

B.15. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Συμπερασματικά, παρατηρείται μια αδυναμία του χώρου να αναπαράγει την περιοχή των πολύ χαμηλών συχνοτήτων 30-40Hz και σε μερικά σημεία τα 50Hz, παράγοντας που μπορεί να φανεί σημαντικός αν στο συγκεκριμένο control room γίνουν κάποια στιγμή μίξεις για τον ήχο μιας ταινίας και γενικότερα αν ο ηχολήπτης ασχοληθεί με αυτό το συχνοτικό εύρος το οποίο ο άνθρωπος περισσότερο το νιώθει παρά το ακούει. Επιπλέον υπάρχει μια αδυναμία του χώρου στο σύνολό του να αναπαράγει συχνότητες 1100-1200Hz, παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια των προτιθέμενων αλλαγών που ακολουθούν. Επίσης παρατηρούνται σε όλες σχεδόν τις μετρήσεις κορυφές στην ένταση κοντά στην περιοχή των 75Hz. Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψη η περιοχή των 100-300Hz η οποία σε όλες τις μετρήσεις παρουσιάζει ανομοιομορφία στην ένταση. Όσο για τον χρόνο αντήχησης, δεν πρέπει να ξεπερνάει σε καμία περίπτωση τα 0.4sec. Φαίνεται λοιπόν ξεκάθαρα ότι υπάρχει πρόβλημα στην αντήχηση στη θέση του ηχολήπτη (μέτρηση 3, πίνακας 5) αλλά και αριστερά από αυτήν (μέτρηση 4, πίνακας 6) στην οκτάβα των 500Hz. Οι μετρήσεις που έγιναν για κάθε ηχείο ξεχωριστά (μετρήσεις 7-12) δεν παρουσιάζουν κάποιο πρόβλημα όσον αφορά το χρόνο αντήχησης (reverberation time). Τέλος, υπάρχει γενικό πρόβλημα με το χρόνο αντήχησης σε όλες τις μετρήσεις στην περιοχή των 32Hz και μερικές στα 63Hz με σημαντικότερο πρόβλημα στη θέση του ηχολήπτη (μέτρηση 2) στην οποία παρουσιάζεται ένα ισχυρό στάσιμο κύμα στην περιοχή των 500Hz.

Κάποιοι άλλοι παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν την καλή ακουστική του control room είναι η παρουσία ενός επίπλου με ράφια στη δεξιά γωνία του πίσω τοίχου, όπου εκεί θα μπορούσαν να τοποθετηθούν ηχοπαγίδες. Επίσης, η παρουσία ενός παραλληλεπίπεδου εξογκώματος στην αριστερή γωνία του μπροστινού τοίχου, όπου θα έπρεπε να λείπει. Τέλος, το τζάμι στο παράθυρο το οποίο δεν έχει καλυφθεί με κάποιο απορροφητικό υλικό και βρίσκεται στην ίδια ευθεία με το αριστερό ηχείο Meyer.

B.16. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΤΟΥ CONTROL ROOM

Στην παρούσα ενότητα ερευνήθηκαν τα προβλήματα που έχει το προς μελέτη control room ως προς την ακουστική του συμπεριφορά. Όπως αναφέρθηκε ο χώρος περιέχει τέσσερα κάδρα μασοπαγίδων, από τα οποία τα δύο είναι τοποθετημένα στις δύο άκρες του πίσω τοίχου και τα άλλα δύο είναι τοποθετημένα και αυτά στον πίσω τοίχο δεξιά και αριστερά από τους διαχυτές τετραγωνικού υπολοίπου (Φωτογραφία 1). Αρχικά θα μπορούσαν οι δύο αυτές μασοπαγίδες να τοποθετηθούν στα άκρα του μπροστά τοίχου μιας και στη θέση που είναι τώρα τοποθετημένες δεν φαίνεται να αποσκοπούν σε κάτι. Στον αριστερό τοίχο έχουν τοποθετηθεί σειρές διαχυτών μέχρι το μήκος του δεξιού ηχείου Nautilus, όπου μετά ο τοίχος είναι καλυμμένος με πορώδεις απορροφητές (Φωτογραφία 15). Σε πρώτο στάδιο αυτή η τοποθέτηση διαχυτών και απορροφητών κατά μήκος του ίδιου τοίχου και μάλιστα στο κομβικό σημείο που βρίσκονται τα ηχεία φαίνεται να είναι καταστρεπτική για την ακουστική του χώρου. Τέλος, δίπλα από το δεξί ηχείο Meyer υπάρχει τοποθετημένη η οθόνη του υπολογιστή η οποία φαίνεται να επηρεάζει με ανακλαστικό τρόπο το παραγόμενο σήμα του ηχείου αυτού (Φωτογραφία 13). Οι παραπάνω παρατηρήσεις πρόκειται για κάποια περισσότερο ποιοτικά προβλήματα τα οποία βέβαια μπορούν να επαληθευτούν ποσοτικά από τα αποτελέσματα των μετρήσεων παραπάνω. Στην παρακάτω ενότητα υπάρχουν σε πλήρη ανάλυση οι προτάσεις βελτίωσης της ακουστικής του control room, όπως αυτές προήλθαν μετά την καταγραφή και

ανάλυση των αποτελεσμάτων από την πειραματική διαδικασία και την γενικότερη εξέταση της θεωρίας σχετικά με την ακουστική ενός χώρου ακροάσεων.

B.17. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ CONTROL ROOM

Ο σχεδιασμός του control room και οι προτάσεις που θα δοθούν παρακάτω, γίνονται για την καλύτερευση της ακουστικής του χώρου για την συγκεκριμένη ιδιότητά του, στοχεύουν στη πυκνότητα και την ισομερή κατανομή των ούτως ή άλλως αναπόφευκτων συντονισμών εντός αυτού. Επίσης στοχεύουν στην ισομερή κατανομή της ενέργειας σε όλες τις μπάντες συχνοτήτων. Οι αλλαγές που θα υποστεί ο χώρος θα μεταβάλλουν την ακουστική σε πολλά σημεία του χώρου. Οι θέσεις όμως οι οποίες θα ληφθούν περισσότερο υπόψη είναι η θέση του ηχολήπτη και κυρίως γύρω από το κεφάλι αυτού, η θέση των επισκεπτών, οι θέσεις των τεσσάρων ηχείων και η θέση κοντά στο αριστερό μέρος της κονσόλας.

Σε έναν μικρό χώρο ακρόασης σαν αυτόν που μελετάται, υφίσταται μεμονωμένη διέγερση συγκεκριμένων στάσιμων κυμάτων, των οποίων οι κοιλίες (μέγιστα πίεσης) και οι δεσμοί (ελάχιστα πίεσης) επιφέρουν έντονες ανομοιομορφίες στην απόκριση του δωματίου, διασπώντας το πεδίο διάχυσης, γεγονός που παρατηρείται στις μετρήσεις που έγιναν κατά την πειραματική διαδικασία. Άλλωστε οι συχνότητες συντονισμού του χώρου, οι οποίες αναπτύσσονται λόγω των διαστάσεων και του σχήματος του δωματίου, θα πρέπει να καλύπτουν ομοιόμορφα τη συχνοτική ζώνη τουλάχιστον μεταξύ 20-110Hz.

Ο ήδη υπάρχων σχεδιασμός του χώρου φαίνεται να αντιπροσωπεύει μια λογική της LEDE φιλοσοφίας με διαχυτές στον πίσω τοίχο και στο ταβάνι στοχεύοντας στη διάχυση των πρώτων ανακλάσεων και στη μείωση του «χρωματισμού» του ηχητικού υλικού. Θα γινόταν αναφορά σε ζώνη ελεύθερης από ανακλάσεις (RFZ) αν δεν υπήρχαν παράλληλοι τοίχοι και παράλληλες διαχυτικές επιφάνειες στο χώρο και αν υπήρχαν εντοιχισμένα ηχεία, κάτι που θα μπορούσε να θεωρηθεί μια λύση. Ο εντοιχισμός των ηχείων στον μπροστινό τοίχο προϋποθέτει και την σχεδίαση του πίσω τοίχου ώστε να συμπεριφέρεται ως ηχοπαγίδα για τις χαμηλές συχνότητες. Σε αυτό το control room που θεωρείται μικρό ο εντοιχισμός των ηχείων θα τα έκανε να έχουν την μέγιστη δυνατή απόσταση, που μπορεί να επιτευχθεί, από τη θέση ακρόασης. Μιας και η κλίση στις επιφάνειες του χώρου, με την οποία θα εξαιλιφόταν όσο το δυνατόν περισσότερο η ενέργεια των πρώτων ανακλάσεων, είναι δύσκολο να επιτευχθεί, χρονοβόρα και ακριβή, θα μπορούσε ο πίσω τοίχος να καλυφθεί από τους ήδη υπάρχοντες απορροφητές προσθέτοντας μερικά ακόμα κάδρα μασοπαγίδων. Πρόκειται για μια προσέγγιση που χρησιμοποιείται στα δωμάτια ελέγχου τύπου non-environmental. Τα κάδρα διαχυτών που βρίσκονται στον πίσω τοίχο θα μεταφερθούν στον μπροστινό τοίχο και γύρω από τα εντοιχισμένα ηχεία, ώστε να επιτευχθεί ισχυρή ανακλαστικότητα στις χαμηλές συχνότητες και απορροφητικότητα στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες οι οποίες έτσι κι αλλιώς διαδίδονται με ευκολία στο χώρο. (βλέπε σχήμα 31: κάτοψη RFZ δωματίου ελέγχου).

Βέβαια οι συγκεκριμένοι διαχυτές RPG που παρέχει το control room του TEI είναι κατάλληλοι για το πίσω μέρος του δωματίου (live-end). Συγκεκριμένα, τα βαθιά και στενά φρεάτια στους διαχυτές αυτούς είναι κατάλληλα να παρέχουν συμφασική κατευθυντικότητα στο γενικό φασματικό εύρος απαραίτητη για τα recording studios κυρίως. Επίσης, οι συγκεκριμένοι διαχυτές μπορούν να προσφέρουν απαραίτητη διάχυση σε ένα τυπικό live-front control room, όπου ο χώρος μπροστά από τον ηχολήπτη θα πρέπει να είναι αρκετά διαχυτικός. Για τους λόγους αυτούς, προτείνεται να ενισχυθούν οι διαχυτές στο πίσω μέρος με περισσότερα κάδρα αποκτώντας όμως μια ασυμμετρία κατά την τοποθέτηση τους αντίθετα με τη συμμετρία που υπάρχει

ήδη¹⁶. Στην θέση των δύο διαχυτών θα τοποθετηθούν επίσης διαχυτές RPG. Οι μπασοπαγίδες θα τοποθετηθούν στα άκρα του μπροστά τοίχου, διατηρώντας έτσι την φιλοσοφία ενός LEDE control room.

Επιπροσθέτως, παρατηρείται από τις μετρήσεις ότι ο διαχυτής πρωτεύουσας ρίζας ο οποίος έχει τοποθετηθεί στο ταβάνι ακριβώς πάνω από την θέση του ηχολήπτη, θα έπρεπε να επεκταθεί με την τοποθέτηση κι άλλων τέτοιων διαχυτών γύρω από την κεντρική θέση ακρόασης (δηλαδή γύρω από την κονσόλα) και κυρίως πίσω από τον ηχολήπτη, ώστε να συμπεριληφθεί στο βεληνεκές των διαχυτών και η θέση των επισκεπτών (Φωτογραφία 4). Επίσης, η ιδιότητα πρόσθετης υποβάθμισης της ενέργειας στην κατοπτρική διεύθυνση ανάκλασης αυξάνει την καταλληλότητα των διατάξεων πρωτεύουσας ρίζας για την εφαρμογή τους στα ζωντανά άκρα του control room το οποίο δεδομένου του μικρού του μεγέθους, η παρουσία αυτών των διαχυτών στις άκρες κάθε τοίχου, θα έδινε στο χώρο μια ζωντανία ως προς την ακουστική του συμπεριφορά. Οπότε προτείνεται η ενίσχυση πάνω από την κονσόλα και τη θέση του ηχολήπτη με κάδρα διαχυτών πρωτεύουσας ρίζας (ίδια με τα ήδη υπάρχοντα) και στις άκρες του ταβανιού να τοποθετηθούν μικρά τετραγωνικά κάδρα διαχυτών πρωτεύουσας ρίζας.

Η τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών υλικών σε τυχαίες θέσεις και κυρίως στις γωνίες, στους πλαϊνούς τοίχους καθώς και στο ταβάνι έχει σημαντική συνεισφορά στη διάχυση του ήχου. Σε αυτό το ορθογώνιο δωμάτιο η τοποθέτηση των απορροφητικών υλικών στα σημεία που αναφέρθηκαν παραπάνω έχει επίδραση στους τρόπους ταλάντωσης του δωματίου (αξονικοί, εφαιπτομενικοί, πλάγιοι). Προτείνεται λοιπόν η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών στις γωνίες των τοίχων, κάτω από τις ηχοπαγίδες, αλλά και η τοποθέτηση ενός απορροφητή πάνω στην επιφάνεια του τζαμιού στο παράθυρο που βρίσκεται αριστερά από την κονσόλα. Η οθόνη του υπολογιστή που βρίσκεται δεξιά από το ηχείο Meyer θα χρειαστεί να αλλάξει θέση, να τοποθετηθεί σε μέρος που να μην εμποδίζει τα ηχεία. Οι θέσεις των ηχείων Meyer και Nautilus δεν προτείνεται να αλλάξουν διότι παρατηρώντας τα αποτελέσματα που εξάγονται από τις έξι τελευταίες μετρήσεις (μέτρηση 7 έως 12), οι θέσεις στις οποίες βρίσκονται ήδη τα ηχεία θεωρούνται σωστές.

Οι τελευταίες προτάσεις βελτίωσης της ακουστικής του χώρου είναι να αφαιρεθεί το έπιπλο με τα ράφια το οποίο βρίσκεται δίπλα από την πόρτα εξόδου και σε εκείνη τη θέση να τοποθετηθεί ένα κάδρο ηχοαπορροφητικού υλικού (Φωτογραφία 18). Τέλος, να επισκευαστεί ο αριστερός τοίχος μπροστά από τον οποίο υπάρχουν οι περισσότερες περιφερειακές συσκευές, έτσι ώστε να μην μαζεύει υγρασία κατά το χειμώνα και να μην στάζει το ταβάνι όταν βρέχει, διότι είναι επικίνδυνο λόγω των καλωδίων που υπάρχουν εκτεθειμένα εκεί.

¹⁶ Βλ. παράγραφο: A.37. Ανεστραμμένα Είδωλα.

B.18. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, ο χώρος έχει πρόβλημα από τη θέση του ηχολήπτη και πίσω, όπου εκεί προτάθηκαν και οι περισσότερες αλλαγές, ενίσχυση των διαχυτών πρωτεύουσας ρίζας στο ταβάνι, πάνω από την κονσόλα, ενίσχυση των διαχυτών τετραγωνικού υπολοίπου στον πίσω τοίχο, σωστή τοποθέτηση των μασοπαγίδων στις γωνίες κάθε τοίχου, και σωστή τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών υλικών στα σημεία που περιγράφηκαν νωρίτερα. Τέλος, αφαίρεση του επίπλου και αλλαγή θέσης της οθόνης του υπολογιστή.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολήθηκε με την ακουστική μελέτη και βελτίωση του control room το οποίο βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του ΤΕΙ Ρεθύμνου. Αρχικά, στην θεωρητική εισαγωγή δόθηκαν οι ορισμοί των εννοιών που χρησιμοποιήθηκαν, κάποια βασικά θέματα σχετικά με την ακουστική δωματίων και τη μηχανική του ήχου. Παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιούνται στους κλειστούς μικρούς χώρους ώστε να βελτιώσουν και να κατευθύνουν την ακουστική τους συμπεριφορά ανάλογα με τον τρόπο χρήσης τους και εξηγήθηκαν κάποιες σημαντικές έννοιες σχετικές με τις ιδιότητες του ήχου όπως αυτή της απορρόφησης και της διάχυσης. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα είδη δωματίων ελέγχου που υπάρχουν και εξηγήθηκε η φιλοσοφία της κατασκευής τους. Στο τέλος της θεωρητικής εισαγωγής εξηγήθηκαν οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους υπολογίζονται και εξάγονται τα δεδομένα κατά την πειραματική διαδικασία ώστε αυτά αργότερα να τεθούν υπό επεξεργασία.

Στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας περιγράφηκε το δωμάτιο ελέγχου στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, τα υλικά και ο εξοπλισμός που διαθέτει. Για την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας δόθηκαν τα σχήματα με τις συνδεσμολογίες, οι περιγραφές των μετρήσεων και αναλυτικά όλα τα δεδομένα που εξάχθηκαν από τις μετρήσεις σε μορφή πινάκων και γραφικών παραστάσεων. Κάθε μέτρηση σχολιάστηκε, αναλύθηκαν τα αποτελέσματά της τα οποία αργότερα χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν οι προτάσεις βελτίωσης του control room. Στο τέλος δόθηκαν οι φωτογραφίες από τον χώρο του δωματίου ελέγχου που μελετήθηκε και το παράρτημα με κάποια χρήσιμα εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω δίνονται οι κωδικοί που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα MATLAB ώστε να εξαχθούν οι γραφικές παραστάσεις για το μετασχηματισμό Fourier στο πεδίο των συχνοτήτων:

```
FRQ_File='όνομα αρχείου.FRQ';  
[mlsvec1,mlsfs,stimulus_amp,mlsdf] = readmls(FRQ_File,'SP1');  
mlsfs  
stimulus_amp  
mlsdf  
N = length(mlsvec1);  
df=mlsdf;  
f=0:df:N*df-df;  
Xm=max(abs(mlsvec1));  
figure(1)  
semilogx(f,20*log10(abs(mlsvec1(1:N))/Xm));grid
```

Και για την κρουστική απόκριση στο πεδίο του χρόνου:

```
[mlsvec_1,mlsfs_1,stimulus_amp_1,mlsdf_1] = readmls('όνομα  
αρχείου.TIM','Withir');  
dt_1=1/mlsfs_1;  
t_1=0:dt_1:length(mlsvec_1)*dt_1-dt_1;  
figure(1)  
plot(t_1,mlsvec_1);xlabel('t (s)');title('Impulse response of μέτρηση');grid  
axis([0 t_1(65535) -2*10^(-4) 2.5*10^(-4)])
```

Παρακάτω δίνονται φωτογραφίες από το control room του ΤΕΙ Ρεθύμνου.



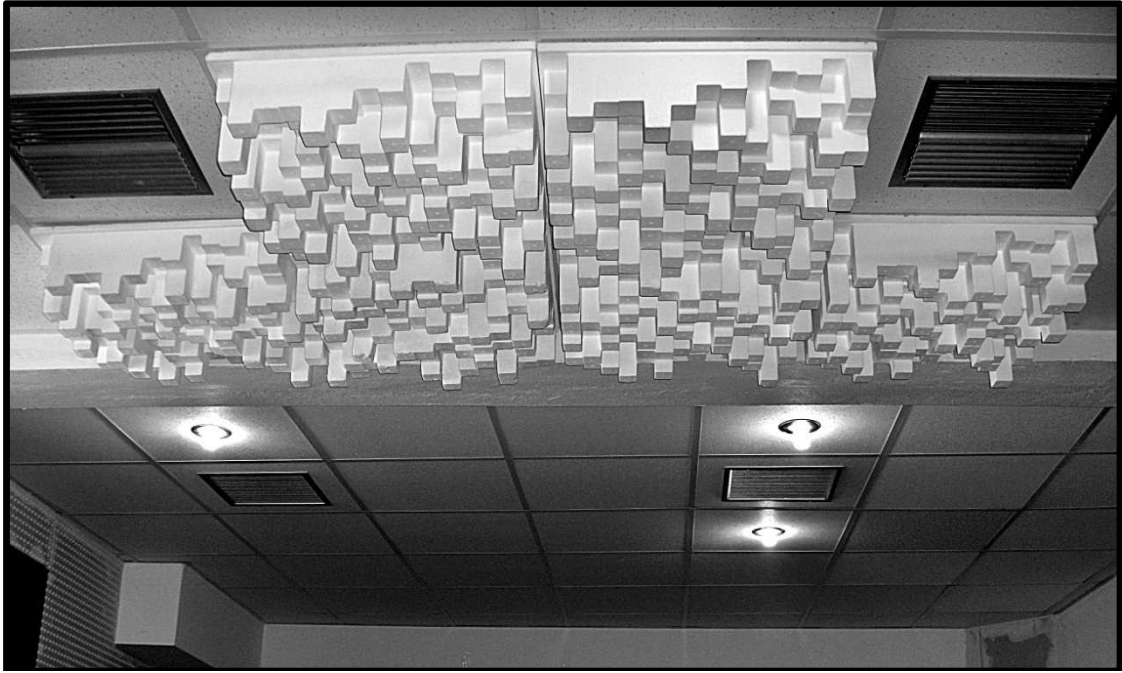
Φωτογραφία 1: Ο χώρος μπροστά από την κονσόλα.



Φωτογραφία 2: Ο χώρος πίσω από την κονσόλα.



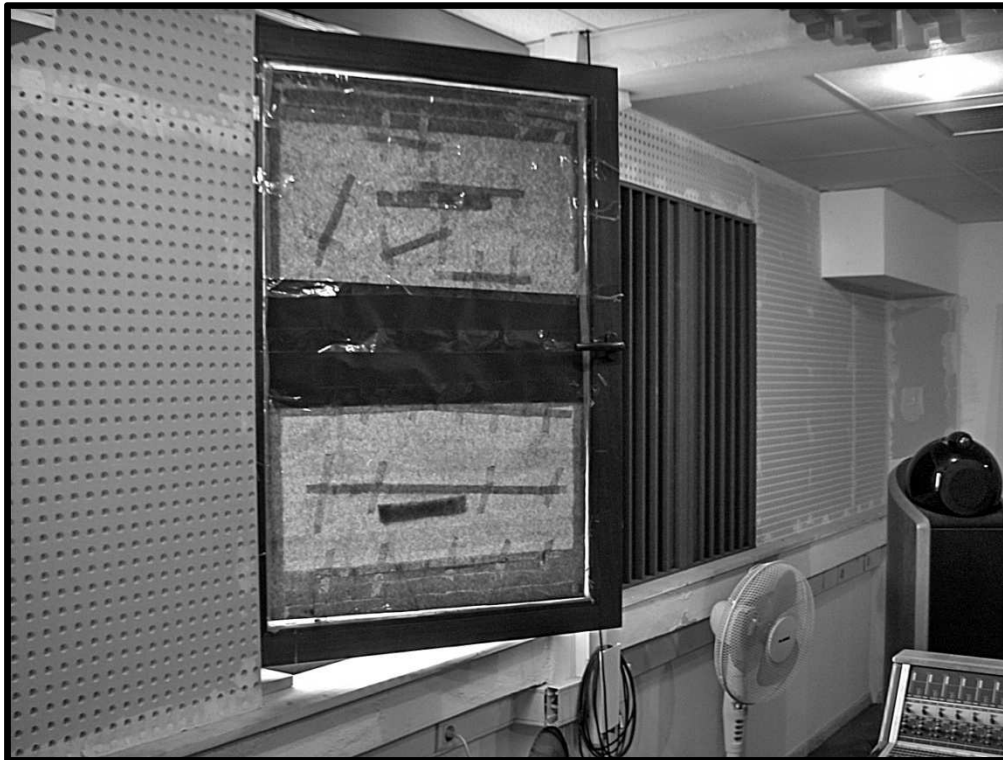
Φωτογραφία 3: Ο τοίχος και οι θέσεις των επισκεπτών πίσω από τη θέση του ηχολήπτη.



Φωτογραφία 4: Οι διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας πάνω από τη θέση του ηχολήπτη.



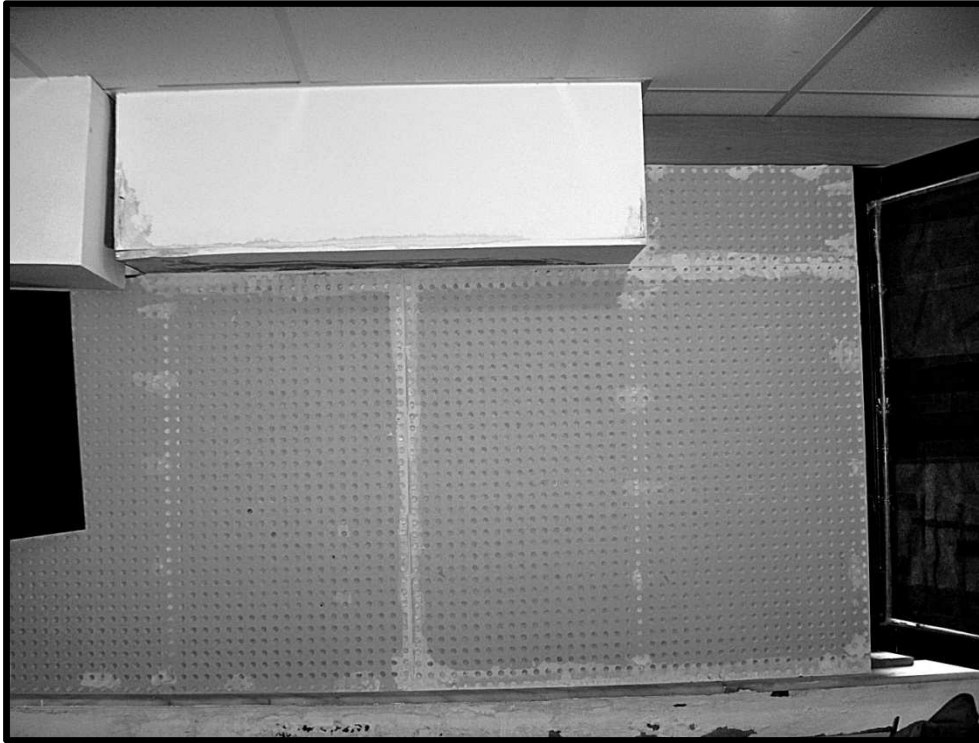
Φωτογραφία 5: Ο τοίχος δεξιά από τη θέση του ηχολήπτη.



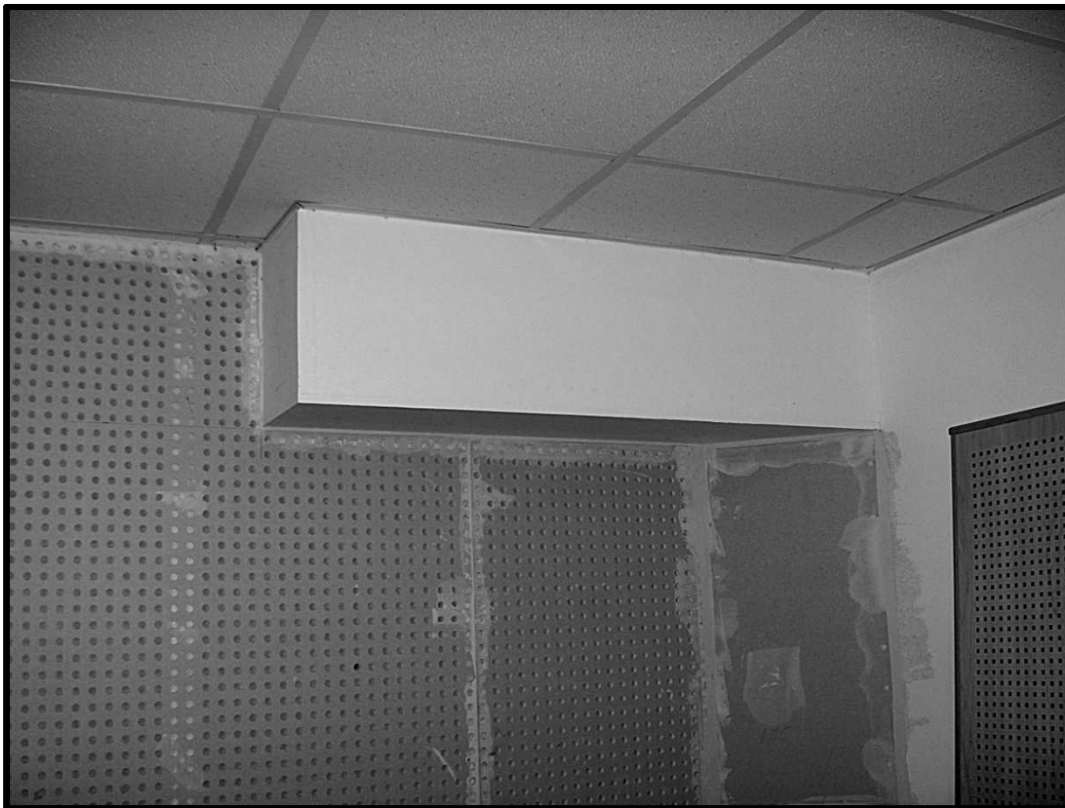
Φωτογραφία 6: Ο τοίχος αριστερά από τη θέση του ηχολήπτη.



Φωτογραφία 7 Ο τοίχος δεξιά από τη θέση του ηχολήπτη.



Φωτογραφία 8: Ο αριστερός τοίχος με το εξόγκωμα πάνω αριστερά.



Φωτογραφία 9: Το εξόγκωμα που βρίσκεται στην μπροστινή αριστερή γωνία.



Φωτογραφία 10: Το παράθυρο στη μέση του αριστερού τοίχου.



Φωτογραφία 11: Οι διαχυτές και οι μασοπαγίδες στο πίσω τοίχο.



Φωτογραφία 12: Ο τοίχος μπροστά από τη θέση του ηχολήπτη.



Φωτογραφία 13: Ο τοίχος και η οθόνη δίπλα από το δεξί ηχείο Meyer.



Φωτογραφία 14: Το παράθυρο δίπλα από το αριστερό ηχείο Meyer.



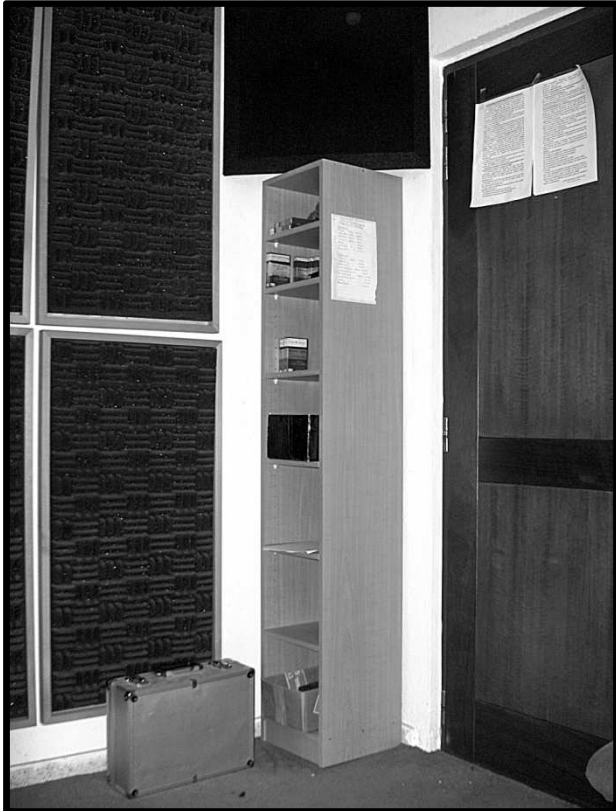
Φωτογραφία 15: Ο τοίχος δίπλα από το δεξί ηχείο Nautilus.



Φωτογραφία 16: Ο τοίχος δίπλα από το αριστερό ηχείο Nautilus.



Φωτογραφία 17: Το ταβάνι πάνω από τα ηχεία.



Φωτογραφία 18: Η γωνία πίσω και δεξιά από τη θέση του ηχολήπτη.



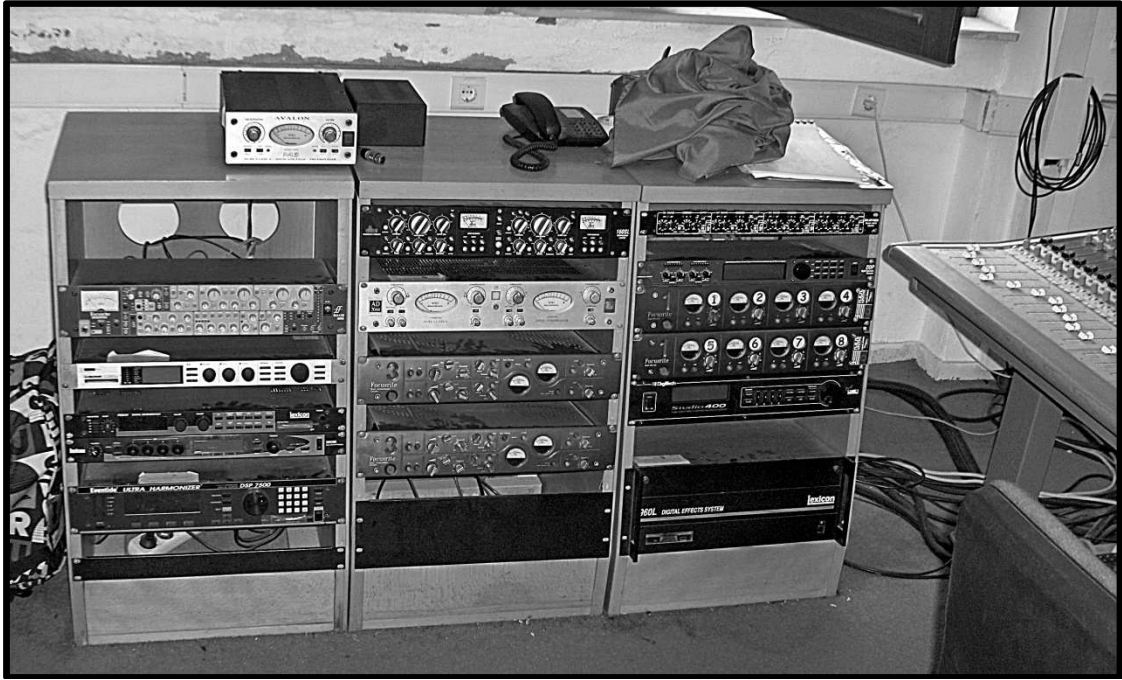
Φωτογραφία 19: Η γωνία πίσω και αριστερά από τη θέση του ηχολήπτη.



Φωτογραφία 20: Η αριστερή γωνία μπροστά από τη θέση του ηχολήπτη.



Φωτογραφία 21: Η δεξιά γωνία μπροστά από τη θέση του ηχολήπτη.



Φωτογραφία 22: Ο περιφερειακός εξοπλισμός αριστερά από την κονσόλα.



Φωτογραφία 23: Τα πολυκάναλα και η οθόνη δεξιά της κονσόλας.

Floor materials	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
carpet	0.01	0.02	0.06	0.15	0.25	0.45
Concrete (unpainted, rough finish)	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
Concrete (sealed or painted)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Marble or glazed tile	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Vinyl tile or linoleum on concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Wood parquet on concrete	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Wood flooring on joists	0.15	0.11	0.1	0.07	0.06	0.07
Seating materials	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Benches (wooden, empty)	0.1	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
Benches (wooden, 2/3 occupied)	0.37	0.4	0.47	0.53	0.56	0.53
Benches (wooden, fully occupied)	0.5	0.56	0.66	0.76	0.8	0.76
Benches (cushioned seats and backs, empty)	0.32	0.4	0.42	0.44	0.43	0.48
Benches (cushioned seats and backs, 2/3 occupied)	0.44	0.56	0.65	0.72	0.72	0.67
Benches (cushioned seats and backs, fully occupied)	0.5	0.64	0.76	0.86	0.86	0.76
Theater seats (wood, empty)	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.08
Theater seats (wood, 2/3 occupied)	0.34	0.21	0.28	0.53	0.56	0.53
Theater seats (wood, fully occupied)	0.5	0.3	0.4	0.76	0.8	0.76
Seats (fabric-upholsterd, empty)	0.49	0.66	0.8	0.88	0.82	0.7
Seats (fabric-upholsterd, fully occupied)	0.6	0.74	0.88	0.96	0.93	0.85
Reflective wall materials	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Brick (natural)	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Brick (painted)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Concrete block (coarse)	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Concrete block (painted)	0.1	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Concrete (poured, rough finish, unpainted)	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
Doors (solid wood panels)	0.1	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04
Glass (1/4" plate, large pane)	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Glass (small pane)	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
Plasterboard (12mm (1/2") paneling on studs)	0.29	0.1	0.06	0.05	0.04	0.04
Plaster (gypsum or lime, on masonry)	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
Plaster (gypsum or lime, on wood lath)	0.14	0.1	0.06	0.05	0.04	0.04
Plywood (3mm(1/8") paneling over 31.7mm(1-1/4") airspace)	0.15	0.25	0.12	0.08	0.08	0.08
Plywood (3mm(1/8") paneling over 57.1mm(2-1/4") airspace)	0.28	0.2	0.1	0.1	0.08	0.08
Plywood (5mm(3/16") paneling over 50mm(2") airspace)	0.38	0.24	0.17	0.1	0.08	0.05
Plywood (5mm(3/16") panel, 25mm(1") fiberglass in 50mm(2") airspace)	0.42	0.36	0.19	0.1	0.08	0.05
Plywood (6mm(1/4") paneling, airspace, light bracing)	0.3	0.25	0.15	0.1	0.1	0.1
Plywood (10mm(3/8") paneling, airspace, light bracing)	0.28	0.22	0.17	0.09	0.1	0.11
Plywood (19mm(3/4") paneling, airspace, light bracing)	0.2	0.18	0.15	0.12	0.1	0.1
Absorptive wall materials	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Drapery (10 oz/yd2, 340 g/m2, flat against wall)	0.04	0.05	0.11	0.18	0.3	0.35
Drapery (14 oz/yd2, 476 g/m2, flat against wall)	0.05	0.07	0.13	0.22	0.32	0.35
Drapery (18 oz/yd2, 612 g/m2, flat against wall)	0.05	0.12	0.35	0.48	0.38	0.36
Drapery (14 oz/yd2, 476 g/m2, pleated 50%)	0.07	0.31	0.49	0.75	0.7	0.6
Drapery (18 oz/yd2, 612 g/m2, pleated 50%)	0.14	0.35	0.53	0.75	0.7	0.6
Fiberglass board (25mm(1") thick)	0.06	0.2	0.65	0.9	0.95	0.98
Fiberglass board (50mm(2") thick)	0.18	0.76	0.99	0.99	0.99	0.99
Fiberglass board (75mm(3") thick)	0.53	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Fiberglass board (100mm(4") thick)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97
Open brick pattern over 75mm(3") fiberglass	0.4	0.65	0.85	0.75	0.65	0.6
Pageboard over 25mm(1") fiberglass board	0.08	0.32	0.99	0.76	0.34	0.12
Pageboard over 50mm(2") fiberglass board	0.26	0.97	0.99	0.66	0.34	0.14
Pageboard over 75mm(3") fiberglass board	0.49	0.99	0.99	0.69	0.37	0.15
Perforated metal (13% open, over 50mm(2") fiberglass)	0.25	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92

Ceiling material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Plasterboard (12mm(1/2") in suspended ceiling grid)	0.15	0.11	0.04	0.04	0.07	0.08
Underlay in perforated metal panels (25mm(1") batts)	0.51	0.78	0.57	0.77	0.9	0.79
Metal deck (perforated channels, 25mm(1") batts)	0.19	0.69	0.99	0.88	0.52	0.27
Metal deck (perforated channels, 75mm(3") batts)	0.73	0.99	0.99	0.89	0.52	0.31
Plaster (gypsum or lime, on masonry)	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
Plaster (gypsum or lime, rough finish or timber lath)	0.14	0.1	0.06	0.05	0.04	0.04
Sprayed cellulose fiber (16mm(5/8") on solid backing)	0.05	0.16	0.44	0.79	0.9	0.91
Sprayed cellulose fiber (25mm(1") on solid backing)	0.08	0.29	0.75	0.98	0.93	0.76
Sprayed cellulose fiber (25mm(1") on timber lath)	0.47	0.9	1.1	1.03	1.05	1.03
Sprayed cellulose fiber (32mm(1-1/4") on solid backing)	0.1	0.3	0.73	0.92	0.98	0.98
Sprayed cellulose fiber (75mm(3") on solid backing)	0.7	0.95	1	0.85	0.85	0.9
Wood tongue-and-groove roof decking	0.24	0.19	0.14	0.08	0.13	0.1
Miscellaneous surface material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
People-adults (per 1/10 person)	0.25	0.35	0.42	0.46	0.5	0.5
People-high school students (per 1/10 person)	0.22	0.3	0.38	0.42	0.45	0.45
People-elementary students (per 1/10 person)	0.18	0.23	0.28	0.32	0.35	0.35
Ventilating grilles	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4
Water or ice surface	0.008	0.008	0.013	0.015	0.02	0.025

Σχήμα 10: Χάρτης συντελεστών απορρόφησης (εξασθένισης) για διάφορα υλικά κι επιφάνειες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία:

1. Σκαρλάτος, Δ., «Εφαρμοσμένη Ακουστική», Φιλομάθεια, Πάτρα, 2003.
2. Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A., Sanders, J., “*Fundamentals Of Acoustics*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2000.
3. Kuttruff, H., “*Room Acoustics*”, Spon Press, New York, 2000.

Πανεπιστημιακές σημειώσεις:

1. Davies, B., “*Room Acoustics Study Guide*”, [πανεπιστημιακές σημειώσεις], University of Salford, MSc Audio Acoustics, Semester 2, 2003-2004, Salford.
2. Κουζούπης, Σ., Σηφάκης, Μ., «*Εφαρμοσμένη Ακουστική ΙΙ Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων*», [πανεπιστημιακές σημειώσεις], ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας Και Ακουστικής, Εφαρμοσμένη Ακουστική ΙΙ εργαστήριο, Ρέθυμνο, 2008.
3. Πασχαλίδου, Σ., «*Εφαρμοσμένη Ακουστική Ι Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων*», [πανεπιστημιακές σημειώσεις], ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας Και Ακουστικής, Εφαρμοσμένη Ακουστική Ι εργαστήριο, Ρέθυμνο, 2006.
4. Σκαρλάτος, Δ., «*Δραστηριότητες Του ΕΛΙΝΑ Στην πρόβλεψη Και Αντιμετώπιση Του Κυκλοφοριακού Θορύβου*», [πανεπιστημιακές σημειώσεις], ΤΕΕ Αθήνας, Οι Επιπτώσεις Της Ηχορύπανσης Στα Αστικά Κέντρα – Αναγκαία Μέτρα Και Παρεμβάσεις, Αθήνα, 2008.

Άρθρα:

1. Bradley, J., “*Speech Intelligibility In Classrooms*”, Journal Of The Acoustical Society Of America, p. 846-854, Canada, 1986.
2. D’Antonio, P., Konnert, J., “*The Reflection Phase Grating Diffusor: Design Theory And Application*”, Presented at the 74th Convention of the Audio Engineering Society, New York, 1983.

Πτυχιακές Εκπονήσεις:

1. Μαρκουλάκης, Σ., «*Studio Ηχογραφήσεων 1^ο ΣΕΚ Ηρακλείου: Κατασκευαστική Και Λειτουργική Μελέτη Με Επίκεντρο Πολυκάναλη Μικτή Ηχογράφηση*», ΑΤΕΙ Κρήτης, σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, τμήμα Ηλεκτρολογίας, (χ.χ.).
2. Μήλλιου, Κ., Μήτσου, Α., «*Το Νέο Studio Ηχογραφήσεων: Μετατροπή, Καταγραφή Και Χαρτογράφηση Συσκευών Και Σημάτων, Μετρήσεις Και Τελικές Ρυθμίσεις*», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας Και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2006.
3. Κισσουράς, Α., Τσαμπάσης, Ν., Ιωαννίδης, Σ., «*Ακουστική Και Σχεδιαστικές Αρχές Ηχογραφικών Κέντρων*», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας Και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2009.
4. Κούρκουλου, Ε., «*Γενική Μελέτη, Με Έμφαση Στην Ακουστική, Για Την Κατασκευή Φωνητικού Θαλάμου (Vocal Booth) Στο Χώρου Του Εργαστηρίου Ηχοληψίας Ι (Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας Και Ακουστικής)*», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας Και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2010.

Βοηθήματα:

1. DRA Laboratories, “*MLSSA Reference Manual Version 10WI Rev. 8*”, Douglas D. Rife, 2005.

Από το διαδίκτυο (με τη χρονική σειρά που ανακτήθηκαν):

1. http://www.avmentor.eu/resources/knowhow/small_room_acoustics.pdf (04.11.2010, 18:37).
2. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%89%CF%87%CE%BF%CF%82#.CE.A0.CE.B5.CF.81.CE.AF.CE.B8.CE.BB.CE.B1.CF.83.CE.B7> (04.11.2010, 18:44).
3. <http://www.diracdelta.co.uk/science/source/i/n/initial%20time-delay%20gap/source.html> (04.11.2010, 18:46).
4. http://www.amfgrafenau.de/index.php?&l=208&mode=listarticles&subcatid=369&ipage=produkt_info_akustik_schall (04.11.2010, 18:53).
5. http://library.tee.gr/digital/m2301/m2301_skarlatos.pdf (07.10.2010, 15:14).
6. [http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Absorption_\(acoustics\)](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Absorption_(acoustics)) (10.11.2010, 17:44).
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Recording_studio (30.12.2010, 13:43).
8. http://www.sae.edu/reference_material/pages/Coefficient%20Chart.htm (07.01.2011, 14:08).
9. <http://www.buildnet.gr/default.asp?pid=205&catid=184&artId=816&pg=2> (18.01.2011, 14:42).
10. <http://kolount.wordpress.com/2008/07/31/%CE%B7-%CF%83%CF%85%CE%BD%CE%AC%CF%81%CF%84%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CE%B4%CE%AD%CE%BB%CF%84%CE%B1/> (18.01.2011, 16:30).
11. <http://www.avsite.gr/vb/showthread.php?p=949906> (19.01.2011, 17:08).
12. <http://www.avclub.gr/forum/showthread.php?p=1493977> (19.01.2011, 17:09).
13. <http://www.answers.com/topic/flutter-echo> (19.01.2011, 17:10).
14. <http://www.mcsquared.com/metricmodes.htm> (24.01.2011, 14:26).
15. http://uqu.edu.sa/files2/tiny_mce/plugins/filemanager/files/4281670/aakpro/algebra/alg1/alg2/alg3/alg4/alg5/alg6/Number%20Theory%20in%20Science%20and%20Communication.pdf (28.01.2011, 15:49).
16. <http://www.avsite.gr/vb/showthread.php?t=79626> (31.01.2011, 14:27).
17. <http://www.rpginc.com> (16.02.2011, 15:56).
18. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc26640/nrcc26640.pdf> (16.02.2011, 16:08).
19. <http://www.zainea.com/clarity.htm> (16.02.2011, 16:16).
20. <http://www.purebits.com/appnote11.html> (22.02.2011, 13:59).