



Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο  
Σχολή Μουσικής και Οπτοακουστικών Τεχνολογιών  
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής

Πτυχιακή Εργασία

“Ισοστάθμιση Συστήματος Ηχείου - Δέκτη  
με χρήση Παραμετρικού Equalizer”  
Σουλτάνα Λ. Ηλιοπούλου | ΤΑ 1980

επιβλέποντες καθηγητές

Νικόλας Στεφανάκης

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Οδυσσέας Τσακίριδης

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Ρέθυμνο 2023

# Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Σχολή Μουσικής και Οπτοακουστικών Τεχνολογιών  
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής



## Πτυχιακή Εργασία

“Ισοστάθμιση Συστήματος Ηχείου - Δέκτη  
με χρήση Παραμετρικού Equalizer”

Σουλτάνα Λ. Ηλιοπούλου | ΤΑ 1980

επιβλέποντες καθηγητές:

Νικόλας Στεφανάκης Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο  
Οδυσσέας Τσακίριδης Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24η Νοεμβρίου 2023

.....

.....

.....

Ρέθυμνο 2023

## πνευματικά δικαιώματα

---

copyright © Σουλτάνα Λ. Ηλιοπούλου, 2023

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

## ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση του κύκλου σπουδών μου στο Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής που επιστεγάζεται με την εκπόνηση αυτής της εργασίας, θα ήθελα να τιμήσω τους ανθρώπους, που ο καθένας με τον τρόπο του, συνέβαλλαν σε αυτό το ταξίδι.

Αρχικά τους αγαπητούς επιβλέποντες καθηγητές μου, Νικόλα Στεφανάκη και Οδυσσέα Τσακιρίδη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας.

Τους φίλους και την οικογένειά μου.

Τον Γιάννη, για την αμέριστη υποστήριξή του σε όλη αυτή την πορεία.

Αισθάνομαι ευγνώμων για το αποτέλεσμα και αναγνωρίζω ότι χωρίς εσάς, αυτό δεν θα ήταν δυνατό. Σας ευχαριστώ θερμά για όλα.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στη μνήμη του πατέρα μου.

## περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στο πρόβλημα της ισοστάθμισης της συχνοτικής απόκρισης του ακουστικού συστήματος ηχείου - δέκτη μέσα σε έναν κλειστό χώρο, με τη χρήση παραμετρικού equalizer. Καταρχάς, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου γύρω από τα Γραμμικά και Χρονικά Αναλλοίωτα συστήματα καθώς και των διαφορετικών τεχνικών που έχουν καθιερωθεί για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης ακουστικών συστημάτων. Κατόπιν, παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαφορετικές τεχνικές ισοστάθμισης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Η διόρθωση της συχνοτικής απόκρισης με χρήση παραμετρικού equalizer απαιτεί τον προσδιορισμό των συντελεστών μίας συστοιχίας από **Infinite Impulse Response (IIR)** φίλτρα που επικαλύπτονται συχνοτικά, το οποίο είναι ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με τη χρήση της συνάρτησης βελτιστοποίησης `lsqnonlin` της Matlab. Για την αξιολόγηση της προσέγγισης, η διαδικασία της ισοστάθμισης της συχνοτικής απόκρισης πραγματοποιήθηκε με πραγματικές μετρήσεις, με τη χρήση δύο διαφορετικών ηχείων σε δύο ξεχωριστούς χώρους, με διαφορετικά ακουστικά χαρακτηριστικά.

## abstract

This Thesis focuses on the problem of sound equalization with the use of a parametric equalizer, considering an acoustic system with imperfect frequency response. We begin by presenting the basic theory associated to Linear Time Invariant systems and we highlight the methodologies associated to the measurement of the acoustic impulse response. We then continue by presenting the basic approaches that have been proposed for system response equalization. Frequency response equalization with the use of parametric equalizer requires the optimization of the filter coefficients, which is a non linear optimization problem. In this Thesis, this problem is solved by an iterative approach, using a built - in Matlab function named `lsqnonlin`. Evaluation of the whole methodology is based on real acoustic measurements with two different loudspeakers inside two rooms with different acoustic characteristics.

# Περιεχόμενα

## A Μέρος

### 1\_ Βασικές Έννοιες στα Σήματα και Συστήματα

1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Αναλογικά και Ψηφιακά Σήματα.....	2
1.3 Συστήματα Συνεχούς και Διακριτού Χρόνου.....	3
1.4 Γραμμικά και Χρονικά Αμετάβλητα Συστήματα.....	4
1.5 Κρουστική Απόκριση.....	5

### 2\_ Τεχνικές Μέτρησης Κρουστικής Απόκρισης Συστήματος

2.1 Εισαγωγή στις Υπάρχουσες Τεχνικές Μέτρησης.....	9
2.2 Ακολουθία Μέγιστου Μήκους (Maximum Length Sequence).....	11
2.3 Φασματομετρία Χρονικής Καθυστέρησης (Time Delay Spectrometry) .....	12
2.4 Ανάλυση FFT και Ανάλυση FFT Διπλού Καναλιού (Dual Channel FFT Analysis).....	14
2.5 Κρουστικοί Παλμοί (Impulses).....	15
2.6 Ημίτονο Σάρωσης   Βηματικό Ημίτονο (Logarithmic Sine Sweep   Stepped Sine).....	17

### 3\_ Ισοστάθμιση (Equalization)

3.1 Εισαγωγή.....	20
3.2 Equalizers και Φίλτρα.....	21
3.3 Ταξινόμηση Φίλτρων.....	22
3.4 Κατηγορίες Ισοσταθμιστών   Γραφικός Ισοσταθμιστής.....	25
3.5 Παραμετρικός Ισοσταθμιστής.....	27
3.6 Ψηφιακή Ισοστάθμιση.....	28
3.7 FIR και IIR Φίλτρα.....	30

## B Μέρος

### 1\_ Υλοποίηση Φίλτρου στη Matlab | Περιγραφή Διαδικασίας

1.1 Εισαγωγή της Μέτρησης στη Matlab.....	33
1.2 Υπολογισμός της Εξομαλυμένης Απόκρισης.....	33
1.3 Υπολογισμός της Ιδεατής Απόκρισης.....	34
1.4 Βελτιστοποίηση   Συνάρτηση lsqnonlin.....	35
1.5 Σχεδιασμός Βελτιστοποιημένου Παραμετρικού Equalizer.....	36

## Γ\_Μέρος

### 1\_ Πειραματική Διαδικασία | Συμπεράσματα

1.1 Πειραματική αξιολόγηση στο Εργαστήριο Ακουστικής του ΙΤΕ.....	39
1.2 Πειραματική αξιολόγηση στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Ακουστικής του Τμήματος ΜΤΑ.....	43
1.3 Συμπεράσματα.....	47



## εισαγωγή

Τα ηχητικά σήματα αναπαράγονται μέσω του συστήματος που αποτελεί η επιλεχθείσα κατά τις ανάγκες ηλεκτροακουστική διάταξη, με το χώρο αναπαραγωγής. Ένα ηχητικό σήμα που αλληλεπιδρά με ένα τέτοιο σύστημα θεωρείται ιδανικό όταν φθάνει στο δέκτη απαλλαγμένο από αλλοιώσεις, πληρεί συνεπώς τα κριτήρια πιστότητας και ποιότητας της αναπαραγωγής. Στην πραγματικότητα ωστόσο, το ακουστικό σήμα εκτίθεται σε διαφόρων ειδών παραμορφώσεις καθώς ταξιδεύει στην ηλεκτροακουστική αλυσίδα μέχρι να φτάσει στο δέκτη. Η διαδικασία της ισοστάθμισης συνιστά στην ενέργεια απομάκρυνσης των ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών που εισάγονται στο σήμα και παραποιούν το συχνοτικό του περιεχόμενο. Κατά συνέπεια επιχειρείται η προσέγγιση επίπεδης απόκρισης συχνότητας στο φάσμα που εξετάζεται. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι ένα κύκλωμα παρεμβάλλεται στην πορεία κάποιου σήματος που στην ουσία αντικαθιστά το αρχικό σήμα με ένα νέο. Κάθε κύκλωμα ισοστάθμισης, από τη απλούστερή του μορφή έως το πιο σύνθετο παραμετρικό equalizer, βασίζεται στο ίδιο σύνολο τύπων φίλτρων. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσέγγισης της ιδανικής απόκρισης ενός συστήματος είναι ο σχεδιασμός του αντίστροφου φίλτρου το οποίο, όταν εφαρμοσθεί στην αρχική απόκριση θα ισοσταθμίσει το σύστημα που εξετάζεται. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι η χρήση του equalizer εξ' ορισμού κινείται εντός ενός αντιφατικού πλαισίου. Από τη μία πλευρά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διάθεση ενός επιπλέον κυκλώματος συμπεριλαμβανομένων των παρενεργειών από τις οποίες αυτό συνοδεύεται, αλλοιώνει την ποιότητα του σήματος. Εντούτοις, όταν η χρήση του equalizer είναι απαραίτητη, ακολουθείται από την προσδοκία ότι η βελτίωση θα είναι μεγαλύτερη από την ενδογενή αλλοίωση. Από την πλευρά της καλλιτεχνικής και αισθητικής προσέγγισης, μέσω της ισοστάθμισης μπορεί να ανασυνθεθεί νέο ηχητικό υλικό.

## A Μέρος

### 1. Βασικές Έννοιες στα Σήματα και Συστήματα I

#### 1.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογική πρόοδος στους τομείς της μικροηλεκτρονικής και των υπολογιστών, κατέστησε αναγκαία την ανάπτυξη της επιστημονικής περιοχής που αφορά στην επεξεργασία σημάτων (Signal Processing). Οι τεχνικές επεξεργασίας σημάτων σήμερα, απαντώνται σε πληθώρα εφαρμογών σε όλο και περισσότερα και ετερόκλητα μεταξύ τους επιστημονικά πεδία από τις τηλεπικοινωνίες και τα δίκτυα έως τη σεισμολογία και την αστρονομία και από τη βιοιατρική έως την επεξεργασία εικόνας και ήχου.

Μια γενική περιγραφή ενός σήματος δίνεται ως το σύνολο των τιμών που λαμβάνει μία φυσική ποσότητα και μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως συνάρτηση ή ακολουθία μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Ανάλογα με τον τύπο και το πλήθος των μεταβλητών διακρίνονται τα μονοδιάστατα, δύο διαστάσεων και πολυδιάστατα σήματα. Από τα σήματα παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά ή τη φύση ενός φαινομένου (Skodras et al, 2003). Άλλου είδους ταξινόμηση των σημάτων αφορά στη φύση των μεταβλητών (συνεχείς ή διακριτές), στην προβλεψιμότητα της συμπεριφοράς τους (στοχαστικά ή ντετερμινιστικά), στο ενεργειακό τους περιεχόμενο (άπειρης ή πεπερασμένης ενέργειας), στη διάρκειά τους κ.α.

Οι τεχνικές επεξεργασίας στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας των σημάτων μέσω της ανάπτυξης των κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν και αναλύουν τα διάφορα είδη σημάτων, εξαγάγουν χρήσιμη πληροφορία για αυτά, εξαλείφουν κατά το δυνατόν τον εμπεριεχόμενο θόρυβο και υλοποιούν πλήθος άλλων εργασιών.

## 1.2 Αναλογικά και Ψηφιακά Σήματα

Καθώς συνήθως τα σήματα λογίζονται ως χρονικές συναρτήσεις, διακρίνονται σε δύο κύριες ομάδες σύμφωνα με τη διακύμανση της μεταβολής του χρόνου. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τα σήματα συνεχούς χρόνου (continuous time) ή αλλιώς αναλογικά, όπου τόσο η ανεξάρτητη μεταβλητή (χρόνος)<sup>1</sup> όσο και η εξαρτημένη μεταβλητή (πλάτος), είναι συνεχής. Μαθηματικά ένα αναλογικό σήμα περιγράφεται με μία συνάρτηση  $x(t)$  πραγματικών ή μιγαδικών αριθμών όπου η ανεξάρτητη μεταβλητή  $t$  έχει σαν πεδίο ορισμού πραγματικές τιμές σε ένα διάστημα του άξονα των πραγματικών αριθμών (Asimakis et al, 2015).

Η δεύτερη ομάδα αφορά στα σήματα διακριτού χρόνου (discrete time) τα οποία ορίζονται μόνο για συγκεκριμένες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής, δηλαδή η ανεξάρτητη μεταβλητή παίρνει τιμές από ένα διακριτό σύνολο τιμών (Skodras et al, 2003). Στην περίπτωση όπου και η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχής, το σήμα είναι διακριτού χρόνου συνεχούς πλάτους, ενώ αν παίρνει τιμές από ένα πεπερασμένο σύνολο τιμών πρόκειται για σήμα διακριτού χρόνου διακριτού πλάτους ή αλλιώς ψηφιακό (Skodras et al, 2003). Ένα ψηφιακό σήμα εμφανίζεται με τη μορφή ακολουθίας  $x[n]$  πραγματικών ή μιγαδικών αριθμών, της οποίας η ανεξάρτητη μεταβλητή έχει πεδίο ορισμού διακριτές ακέραιες τιμές (Asimakis et al, 2015).

Τα σήματα που παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον (ηχητικά, σεισμικά, βιοακουστικά κ.α.) είναι ως επί το πλείστον αναλογικά και η επεξεργασία τους γίνεται μέσω της διαδικασίας “μετατροπής αναλογικού σε ψηφιακό” (Analog to Digital Conversion)<sup>2</sup>, όπου μετασχηματίζονται σε ακολουθίες αριθμών πεπερασμένης ακρίβειας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στα στάδια της Δειγματοληψίας (Sampling), της Κβάντισης (Quantisation) και τέλος της Κωδικοποίησης (Coding).

---

1\_ Η ανεξάρτητη μεταβλητή μπορεί να είναι και κάποιο άλλο φυσικό μέγεθος (απόσταση, συχνότητα, πίεση κ.α.) (Skodras et al, 2003).

2\_ Η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται μέσω των “μετατροπέων ψηφιακού σε αναλογικό” (Digital to Analog Converters).

### 1.3 Συστήματα Συνεχούς και Διακριτού Χρόνου

Η ύπαρξη και η μελέτη των σημάτων σχετίζεται άμεσα με τη μελέτη των συστημάτων (Paraskevas 2018). Η έννοια του συστήματος αναφέρεται στη “διάταξη” η οποία επεξεργάζεται, μεταβάλλει, καταγράφει, είτε μεταδίδει σήματα. Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνει ο Μ. Παρασκευάς στο βιβλίο του “Σήματα και Συστήματα με Matlab, Συνεχούς και Διακριτού Χρόνου” (2018), “σύστημα είναι κάθε οντότητα που επενεργεί σε ένα σήμα  $x(t)$  το οποίο λαμβάνει στην είσοδο και ως αποτέλεσμα παράγει στην έξοδο του ένα νέο σήμα  $y(t)$ .”

Μαθηματικά εκφραζόμενο, ένα σύστημα συνεχούς χρόνου (continuous time system) μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας τελεστής  $S\{\cdot\}$  που μετασχηματίζει το σήμα εισόδου  $x(t)$ , στο σήμα εξόδου  $y(t)$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$y(t) = S\{x(t)\} \quad (1.1)$$

Ομοίως, ένα σύστημα διακριτού χρόνου (discrete time system) θεωρείται κάθε οντότητα που επιδρά σε μία ακολουθία αριθμών  $x[n]$  και τη μετασχηματίζει στην έξοδο διακριτού χρόνου  $y[n]$  σύμφωνα με τη σχέση

$$y[n] = T\{x[n]\} \quad (1.2)$$

Κατά κανόνα, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της επίδρασης του συστήματος στην είσοδο, ώστε να εξαχθούν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του. Ωστόσο, προκύπτει το ερώτημα σχετικά με τον τρόπο διέγερσης ενός συγκεκριμένου συστήματος έτσι ώστε η παραγόμενη έξοδος να είναι αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς. Και ειδικότερα, όσον αφορά στους ηλεκτροακουστικούς μετατροπείς, είναι βασικό ζητούμενο η πιστή μετατροπή του σήματος στην έξοδο του μετατροπέα (Floros, 2011).

## 1.4 Γραμμικά και Χρονικά Αμετάβλητα Συστήματα

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας γίνεται η παραδοχή ότι τα εν λόγω συστήματα είναι γραμμικά και χρονικά αμετάβλητα (Linear Time - Invariant Systems). Ένα γραμμικό σύστημα υπακούει στην αρχή της υπέρθεσης (superposition): Εάν η είσοδος του συστήματος το οποίο αρχικά βρισκόταν σε ηρεμία<sup>3</sup>, αποτελείται από έναν γραμμικό συνδυασμό σημάτων, τότε η έξοδος του συστήματος ισοδυναμεί με τον γραμμικό συνδυασμό των επιμέρους αποκρίσεων των σημάτων:

Δηλαδή αν:

$$\left. \begin{array}{l} y_1[n]=T\{x_1[n]\} \\ y_2[n]=T\{x_2[n]\} \end{array} \right\} \Rightarrow y[n]=T\{ax_1[n]+ax_2[n]\}=ay_1[n]+by_2[n] \quad (1.3)$$

όπου  $a, b$ , είναι σταθεροί όροι (Skodras, 2003).

Σε ένα χρονικά αμετάβλητο σύστημα, η συμπεριφορά και οι ιδιότητές του δεν αλλάζουν με το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι μία χρονική ολίσθηση (time-shifting)<sup>4</sup> της εισόδου αντιστοιχεί σε χρονική ολίσθηση της εξόδου:

$$y[n]=T\{x[n]\} \Leftrightarrow T\{x[n-n_0]\}=y[n-n_0] \quad (1.4)$$

---

3\_ Δηλαδή από τη χρονική στιγμή  $n = n$  κατά την οποία εφαρμόστηκε η είσοδος  $x[n]$ , δεν είχε εφαρμοσθεί καμία είσοδος στο σύστημα (Skodras 2003).

4\_ Η μετατόπιση του σήματος δεξιά ή αριστερά στον άξονα του διακριτού χρόνου, δηλαδή η θέση της μεταβλητής  $n$  αντικαθίσταται από τη μεταβλητή  $n - n_0$ .

## 1.5 Κρουστική Απόκριση

Κάθε σύστημα περιγράφεται από τη συνάρτηση μεταφοράς του. Αυτή η περιγραφή είναι μοναδική για κάθε σύστημα και παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές καθώς για κάθε επέμβαση που γίνεται σε αυτό, η συνάρτηση μεταφοράς αλλάζει. Αν για παράδειγμα, ως σύστημα θεωρηθεί κάποιος κλειστός χώρος, η όποια αλλαγή στο εσωτερικό του (αλλαγή στη διαρρύθμισή του, στη διάταξη επίπλων, υλικών κ.α) θα επηρεάσει τη συνάρτηση μεταφοράς του χώρου. Συνεπώς, η μέτρηση της συνάρτησης μεταφοράς ενός συστήματος και της σχετικής της κρουστικής απόκρισης, είναι από τις βασικότερες εργασίες σε όλα τα πεδία ακουστικής καθώς αποκαλύπτει σημαντικές πληροφορίες για το υπό εξέταση σύστημα.

Από τη μέτρηση της απόκρισης συχνότητας ενός συστήματος εξάγονται οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά αυτού, όπως η κατανομή ενέργειας ανά συχνότητα, η απόκριση φάσης ή οι χρόνοι αντήχησης αν πρόκειται για χώρο. Κατ' επέκταση, η μέτρηση της συνάρτησης μεταφοράς χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του συστήματος όπως και αν αυτό έχει οριστεί.

Η γνώση της συμπεριφοράς ενός συστήματος είναι αναγκαία τόσο στο πεδίο του χρόνου (κρουστική απόκριση), όσο και στο πεδίο της συχνότητας (συχνοτική απόκριση). Αμφότερες αποτελούν τις όψεις του ίδιου συστήματος. Αυτή η πληροφορία αποκαλύπτει το πως μπορεί ένα δεδομένο σήμα εισόδου να επηρεάσει το σύστημα (Floros, 2011).

Εάν για παράδειγμα, το σύστημα είναι ένα ηχείο το οποίο λαμβάνει σαν είσοδο ηλεκτρικό ρεύμα και παράγει έξοδο ηχητική πίεση, η αναλυτική γνώση του τρόπου μετασχηματισμού του σήματος εισόδου, χαρακτηρίζει τόσο την ποιότητα του ηχείου όσο και τον προσδιορισμό της καταλληλότερης χρήσης του, με κριτήριο τις απαιτήσεις της εφαρμογής για την οποία προορίζεται να χρησιμοποιηθεί (Floros, 2011).

Σε ένα Γραμμικό και Χρονικά Αμετάβλητο σύστημα, ως κρουστική απόκριση (impulse response) ορίζεται η μεταβαλλόμενη με το χρόνο έξοδος  $h(t)$  όταν η διέγερση είναι η μοναδιαία κρουστική συνάρτηση  $\delta(t)$ <sup>5</sup> και μαθηματικά δίνεται από τη σχέση:

$$h(t) = S[\delta(t)] \quad (1.5)^6$$

Σε οποιοδήποτε γραμμικό και χρονικά αμετάβλητο σύστημα για το οποίο είναι διαθέσιμη η κρουστική του απόκριση  $h(t)$ , η είσοδος  $x(t)$  και η έξοδος  $y(t)$  συνδέονται με τη σχέση της συνέλιξης:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \cdot x(t-\tau) d\tau$$

ή ισοδύναμα 
$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (1.6)$$

Η παραπάνω σχέση περιγράφει το συνελκτικό ολοκλήρωμα των δύο σημάτων  $x(t)$  και  $h(t)$  όπου ουσιαστικά αντιστοιχεί στον υπολογισμό του εμβαδού της κοινής επιφάνειας του γινομένου των εν λόγω σημάτων σε συγκεκριμένα χρονικά στιγμιότυπα (Mourjoroulos, 2022).

Η ανάγνωση της κρουστικής απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας (frequency response) παρέχει μία σαφή εικόνα ως προς το συχνοτικό

<sup>5</sup> Η  $\delta(t)$  ορίζεται στο όριο  $\Delta \rightarrow 0$  από τη σχέση:  $\delta(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta_{\Delta}(t)$ .

Δε λογίζεται ως συνάρτηση υπό την αυστηρή μαθηματική έννοια καθώς για  $t = 0$  έχει απροσδιόριστη τιμή και κατά συνέπεια θεωρείται ως ένας τελεστής που επενεργεί σε άλλες τυπικές συναρτήσεις ομαλές στο σημείο 0 (Paraskevas, 2018).

<sup>6</sup> Για ένα σύστημα διακριτού χρόνου, η κρουστική απόκριση  $h[n]$  δίνεται αντίστοιχα από τη σχέση  $h[n] = T\{\delta[n]\}$ .

περιεχόμενο ενός σήματος, ή την περιοχή συχνοτήτων όπου ένα σύστημα λειτουργεί. Η μετάβαση από το ένα πεδίο στο άλλο γίνεται με τον μετασχηματισμό Fourier:

$$x(t) \xleftrightarrow{F} X(\omega) \text{ ή ισοδύναμα } x(t) \xleftrightarrow{F} X(f), \text{ καθώς } \omega = 2\pi f.$$

Ο μετασχηματισμός Fourier  $X(\omega)$  ενός σήματος  $x(t)$ , είναι ο μαθηματικός μηχανισμός μέσω του οποίου το σήμα αναλύεται στις δύο συνιστώσες του: το μέτρο  $|X(\omega)|$  και τη φάση  $\phi(\omega)$ . Ουσιαστικά, ο μετασχηματισμός αποτελεί τη μιγαδική αναπαράσταση των δύο αυτών συνιστωσών σύμφωνα με τη σχέση:

$$X(\omega) = |X(\omega)| \cdot e^{j\phi(\omega)} \quad (1.7)$$

Η παραπάνω σχέση αναφέρεται συνήθως ως φάσμα (spectrum). Οι συνιστώσες  $|X(\omega)|$  και  $\phi(\omega)$  αντιστοιχούν στο φάσμα πλάτους (magnitude spectrum) και φάσμα φάσης (phase spectrum) (Mourjopoulos, 2022). Από το φάσμα πλάτους φανερώνεται η κατανομή του ενεργειακού περιεχομένου του σήματος ανά συχνότητα και καθώς αναπαριστά το πλάτος του σήματος, διακρίνονται οι περιοχές όπου η απόκριση παρουσιάζει προβληματική συμπεριφορά.

Η παραπάνω προσέγγιση επεκτείνεται και για τις περιπτώσεις εξέτασης των συστημάτων. Έτσι, για ένα γραμμικό και χρονικά αναλλοίωτο σύστημα όπου η έκφραση (1.6) περιγράφει τη σχέση εισόδου - εξόδου αυτού στο πεδίο του χρόνου, για το πεδίο της συχνότητας αντίστοιχα ισχύει:

$$Y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega) \quad (1.8)$$

όπου  $Y(\omega)$ ,  $X(\omega)$  και  $H(\omega)$ , οι μετασχηματισμοί Fourier των σημάτων  $y(t)$ ,  $x(t)$ ,  $h(t)$ .

Η σχέση (1.8) είναι ισοδύναμη με την πράξη της συνέλιξης καθώς ο μετασχηματισμός Fourier των σημάτων στο πεδίο του χρόνου αντιστοιχεί στο γινόμενο των επιμέρους μετασχηματισμών των δύο σημάτων



στο πεδίο της συχνότητας.

$$\text{Λύνοντας την (1.8) ως προς } H(\omega) \text{ προκύπτει ότι } H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (1.9)$$

όπου η  $H(\omega)$  εκφράζει την απόκριση συχνότητας του ΓΧΑ συστήματος και μπορεί να αναλυθεί κατά πλήρη αντιστοιχία της ανάλυσης που προηγήθηκε, στην απόκριση πλάτους  $|H(\omega)|$  και απόκριση φάσης  $\phi_h(\omega)$ :

$$H(\omega) = |H(\omega)| * e^{j\phi_h} \quad (1.10)$$

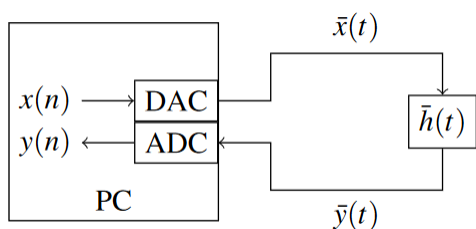
Για ένα ΓΧΑ σύστημα, η απόκριση συχνότητάς του αντικατοπτρίζει τον τρόπο όπου το εν λόγω σύστημα, μεταβάλλει το πλάτος και τη φάση των συχνοτήτων του σήματος εισόδου (Μουτζουρούλος, 2022). Κάθε ηλεκτροακουστική διάταξη που αποτελείται από σειριακές συνδέσεις ηχητικών μονάδων συμπεριλαμβανομένου του χώρου ακρόασης, λογίζεται ως ακουστικό σύστημα και σε αυτού του είδους τα συστήματα επικεντρώνεται η παρούσα μελέτη.

## 2. Τεχνικές Μέτρησης Κρουστικής Απόκρισης Συστήματος I

### 2.1 Εισαγωγή στις Υπάρχουσες Τεχνικές Μέτρησης

Οι ακουστικές μετρήσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη, αφορά στον χαρακτηρισμό της συνάρτησης μεταφοράς ενός συστήματος μετρώντας την κρουστική του απόκριση. Η δεύτερη, αναφέρεται στην ανάλυση των μη γραμμικοτήτων του συστήματος μέσω της μέτρησης της αρμονικής παραμόρφωσης στις διάφορες τάξεις της (Farina, 2000). Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται απλώς ενδεικτικά και δεν θα απασχολήσει την παρούσα μελέτη.

Συνήθως η μέτρηση της κρουστικής απόκρισης γίνεται με χρήση Η/Υ, καθώς με την αλματώδη ανάπτυξη των τεχνολογιών στο πεδίο της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος είναι πλέον διαθέσιμοι ισχυρότεροι υπολογιστικά επεξεργαστές, όπως και υψηλής ποιότητας ηχητικές συσκευές. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται μία διάταξη αντιστοιχούσα στη λειτουργία του υπολογιστή καθώς πραγματοποιεί μία μέτρηση κρουστικής απόκρισης. Ένα σήμα  $x[n]$  που παράγεται στο εσωτερικό του Η/Υ, μετατρέπεται σε σήμα συνεχούς χρόνου  $x(t)$  και τροφοδοτείται στο υπό δοκιμή σύστημα με την άγνωστη κρουστική απόκριση  $h(t)$ . Στη συνέχεια, η έξοδος  $y(t)$  δειγματοληπτείται και λαμβάνεται το  $y[n]$  όπου μαζί με το  $x[n]$ , χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της δειγματοληπτούμενης κρουστικής απόκρισης  $h[n]$  (Holters et al, 2009).



**Σχήμα 2.1\_** Απεικόνιση λειτουργίας υπολογιστή κατά τη μέτρηση κρουστικής απόκρισης

Για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης, θεωρητικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε σήμα  $x[n]$  υπό την προϋπόθεση ότι περιέχει αρκετή ενέργεια σε κάθε συχνότητα που ενδιαφέρει, ώστε να ξεπερνά το κατώτατο όριο θορύβου (Havelock et al, 2008). Τότε, η παραγόμενη έξοδος  $y[n]$ , είναι το αποτέλεσμα της συνέλιξης (convolution) μεταξύ των δύο σημάτων:

$$y(n) = \sum_{k=0}^N x(n-k)h(k) \quad (2.1)$$

όπου  $N$ , η τάξη της κρουστικής απόκρισης,

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί σε μορφή πίνακα:

$$\begin{pmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N+L-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(0) & 0 & \cdots & 0 \\ x(1) & x(0) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & x(L-1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h(0) \\ h(1) \\ \vdots \\ h(N) \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

όπου  $L$ , το μήκος της ακολουθίας  $x[n]$ .

Από την (2.2) υπολογίζεται η έξοδος  $y(n)$  με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, μέσω της οποίας γίνεται εκτίμηση του ελάχιστου τετραγωνικού σφάλματος. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα ευσταθές<sup>7</sup> και αιτιατό<sup>8</sup> αντίστροφο φίλτρο, που όταν εφαρμοσθεί ισοσταθμίζει το φάσμα της απόκρισης.

Στα ηλεκτρονικά κυκλώματα είτε αυτά είναι αναλογικά είτε ψηφιακά, εμπεριέχεται ενδογενής θόρυβος που προκαλείται από τα ενεργά ή παθητικά στοιχεία του κυκλώματος. Ποσοστό αυτού του θορύβου περνάει στην έξοδο κατά τη διαδικασία μέτρησης ενός συστήματος. Για την επίτευξη υψηλής καταστολής του εν λόγω θορύβου χρειάζονται μεγάλου μήκους σήματα διέγερσης, κάτι που καθιστά τον υπολογισμό

<sup>7</sup> Ένα σύστημα είναι ευσταθές (stable), όταν για κάθε αριθμό  $M_1 < \infty$  για τον οποίο ισχύει  $|x(n)| \leq M_1$ , υπάρχει θετικός αριθμός  $M_2 < \infty$  για τον οποίο ισχύει  $|x(n)| \leq M_2$  (σύστημα Φραγμένης Εισόδου Φραγμένης Εξόδου) (Paraskeuas, 2018).

<sup>8</sup> Ένα αιτιατό (causal) σήμα είναι μηδενικό για αρνητικές τιμές του χρόνου, δηλαδή ικανοποιεί τη σχέση  $x(t) = 0$  για  $t < 0$  (όταν πρόκειται για σήμα διακριτού χρόνου η σχέση γίνεται αντίστοιχα  $x[n] = 0$  για  $n < 0$ ) (Paraskeuas, 2018).

της κρουστικής απόκρισης εξαιρετικά δυσεπίλυτο. Έτσι προέκυψε η ανάγκη για χρήση σημάτων που επιτρέπουν απλούστερους υπολογισμούς (Holters et al, 2009).

## 2.2 Ακολουθία Μέγιστου Μήκους (Maximum Length Sequence)

Η MLS τεχνική ανήκει στην οικογένεια ψευδοτυχαίων σημάτων που έγινε αρχικά δημοφιλής στο πεδίο των audio και των ακουστικών μετρήσεων από τη σχετική εργασία του Schröder (Novak et al, 2016). Η τεχνική επικρατεί στις μετρήσεις απόκρισης συχνότητας ηλεκτροακουστικών μετατροπέων με την εφαρμογή ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας με τη μέγιστη δυνατή περίοδο, ως σήμα διέγερσης.

Μία MLS  $n$  τάξης, έχει μήκος  $L = 2^n - 1$  και περιέχει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των τιμών 0 και 1 στους  $n$  καταχωρητές της (τάξη MLS). Η ανάκτηση της κρουστικής απόκρισης προκύπτει με κυκλική ετεροσυσχέτιση (cross correlation)<sup>9</sup> μεταξύ της εξόδου του συστήματος και του σήματος διέγερσης στην είσοδό του (Stan et al, 2002).

Ειδικότερα, σε πρώτη φάση καταγράφεται η έξοδος της υπό μέτρηση συσκευής με χρήση ενός μικροφώνου. Στη συνέχεια, η έξοδος του μικροφώνου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης μεταξύ αυτής και της ακολουθίας MLS με εφαρμογή του γρήγορου μετασχηματισμού Hadamard (Fast Hadamard Transform)<sup>10</sup>. Μέσω της διαδικασίας αυτής εξάγεται η κρουστική απόκριση του συστήματος (Floros, 2011).

Καθώς οι ηλεκτροακουστικές μετρήσεις πραγματοποιούνται συνήθως σε κλειστούς χώρους, αυτό συνεπάγεται ότι το μικρόφωνο καταγράφει και ηχητικό σήμα που φθάνει στο διάφραγμα του μέσω των χωρικών

9\_ Μέτρο ομοιότητας μεταξύ δύο διαφορετικών σημάτων ως συνάρτηση του χρόνου υστέρησης που εφαρμόζεται σε ένα από αυτά (Paraskeuas, 2018).

10\_ Τετραγωνικός  $n \times n$  πίνακας με τις παρακάτω ιδιότητες: α) τα στοιχεία του πίνακα είναι  $\pm 1$ , β)  $\forall i, j, i \neq j$ , ισχύει  $\sum_k h_{ik} h_{jk} = 0$  (Yarlagadda et al, 1997).

ανακλάσεων. Για αυτόν το λόγο η πρώτη ενέργεια που γίνεται, είναι ο εντοπισμός της πρώτης ανάκλασης στη μετρηθείσα κυματομορφή και η εφαρμογή παραθύρου<sup>11</sup> για την αφαίρεσή της. Το αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας μειώνει το χρονικό εύρος της μέτρησης και κατ' επέκταση περιορίζει προς τα πάνω, το κάτω όριο των συχνοτήτων κατά τη φάση του υπολογισμού της κρουστικής απόκρισης. Για την αποφυγή παρουσίας του φαινομένου, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε χώρους μεγάλου όγκου και υψηλής απορρόφησης, έτσι ώστε να καθυστερεί η άφιξη της πρώτης ανάκλασης (Floros, 2011).

Από τη φύση τους οι MLS ακολουθίες έχουν λευκό φάσμα με ισοδύναμα κατανομημένη ενέργεια στις συχνότητες. Συχνά ωστόσο, το σήμα φιλτράρεται για να αποκτήσει ροζ φάσμα όπου εκεί η rms<sup>12</sup> στάθμη μειώνεται γραμμικά συναρτήσει της συχνότητας, χαρακτηριστικό που προτιμάται στις ακουστικές μετρήσεις. Επιπρόσθετα, ο υψηλός λόγος σήματος προς θόρυβο<sup>13</sup> καθώς και οι ανθεκτικότητα που παρουσιάζει η τεχνική στις παλμικές διαταραχές, την κάνουν δημοφιλή σε αυτό το πεδίο (Novak et al, 2016). Από την άλλη πλευρά, δείχνει υψηλή ευπάθεια στην εμφάνιση προϊόντων παραμόρφωσης σε όλο το μήκος της κρουστικής απόκρισης, γνωστά και ως “distortion peaks” (Stan et al, 2020).

### 2.3 Φασματομετρία Χρονικής Καθυστερήσης (Time Delay Spectrometry)

Η μέθοδος ανακαλύφθηκε από τον Richard C. Heyser ειδικά για τη μέτρηση μεγαφώνων, αλλά χρησιμοποιείται και για μετρήσεις στο πεδίο

---

11\_ Τύπος συνάρτησης που πολλαπλασιάζεται με το σήμα εισόδου με σκοπό την απομάκρυνση ποσότητας θορύβου ή άλλων ανεπιθύμητων στοιχείων από αυτό.

12\_ **Root Mean Square**: μαθηματική περιγραφή για τη στάθμη ενός ηλεκτρικού σήματος ή ακουστικής διαταραχής (Stefanakis et al, 2021). Λαμβάνεται από το τετράγωνο όλων των στιγμιαίων τάσεων της κυματομορφής, υπολογίζεται ο μέσος όρος τους και από τον αριθμό που προκύπτει υπολογίζεται η τετραγωνική του ρίζα.

13\_ **Signal to Noise Ratio**: προδιαγραφή που περιγράφει το ποσό του θορύβου που εμπεριέχεται στο ηχητικό σήμα. Συνήθως εκφράζεται σε dB κάτω από μία δεδομένη στάθμη εξόδου.

της ακουστικής χώρων. Η ιδέα αυτής της τεχνικής βασίζεται στην απομόνωση από τη μέτρηση, των ηχητικών κυμάτων που προέρχονται από τις ανακλάσεις των επιφανειών του χώρου.

Ένα ημιτονοειδές σήμα τροφοδοτεί την υπό μέτρηση συσκευή, σαρώνοντας αργά τις υπό εξέταση συχνότητες και τις επαναποδίδει με χρήση μίας σειράς ζωνοπερατών φίλτρων μέσω του TDS αναλυτή (Ballou, 2008). Η απόκριση του συστήματος λαμβάνεται από τη σύγκριση μεταξύ της φάσης και του πλάτους της εξόδου του αναλυτή και του ημιτονοειδούς σήματος. Κατά συνέπεια, η συχνοτική απόκριση του συστήματος σε όλο το εύρος των συχνοτήτων ενδιαφέροντος, θα είναι η γραμμική υπέρθεση της απόκρισης του σε κάθε συχνότητα ξεχωριστά.

Ουσιαστικά, η TDS τεχνική αναγνωρίζει ότι μία συνάρτηση που εισάγεται στο σύστημα και σχετίζει γραμμικά τη συχνότητα με το χρόνο, παρέχει χωρική διάκριση σημάτων μεταβλητού μήκους διαδρομής όταν γίνεται αντιληπτή από έναν αναλυτή φάσματος παρακολούθησης συχνότητας (Heyser, 1967). Με άλλα λόγια, η τεχνική επιτρέπει το διαχωρισμό και τη μέτρηση οποιασδήποτε συχνοτικής απόκρισης, ενός συστήματος που αποτελείται από ένα σύνολο φασματικών αποκρίσεων, που εξαρτώνται από το χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η “επί τόπου” μέτρηση πολλών ακουστικών ιδιοτήτων που κανονικά απαιτούν τη χρήση ανηχωϊκών εγκαταστάσεων.

Το ηχείο διεγείρεται με έναν ομαλό τόνο ολίσθησης. Ένα φίλτρο συνεχούς παρακολούθησης παρεμβάλλεται στο μικρόφωνο. Εάν αυτό το φίλτρο συντονίζεται στη συχνότητα του εκπεμπόμενου τόνου ολίσθησης τη στιγμή που γίνεται αντιληπτός από το μικρόφωνο και εάν ο τόνος ολίσθησης έχει μετακινηθεί σε συχνότητα τουλάχιστον κατά το εύρος ζώνης του φίλτρου ανίχνευσης πριν καταφθάσει στο μικρόφωνο το πρώτο ανακλώμενο σήμα, η μέτρηση θα είναι ανηχωϊκή ακόμη και αν πραγματοποιείται σε αντηχητικό περιβάλλον.

Η έξοδος του φίλτρου παρακολούθησης αποδίδει τη φασματική υπογραφή του αντιλαμβανομένου σήματος με συχνότητα ανάλογη του χρόνου, ενώ η επιλεκτική χωρική απομόνωση του επιθυμητού σήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση της σταθερής χρονικής καθυστέρησης

μεταξύ πηγής και μικροφώνου (Heyser, 1967).

Με την TDS εξασφαλίζεται εξαιρετικό SNR και είναι δυνατή η συλλογή αυτών των δεδομένων που είναι κοντά στις δυνατές συνθήκες μέτρησης. Ωστόσο, για να πραγματοποιηθεί η βέλτιστη ανάλυση στη χαμηλή περιοχή, χρειάζεται παρατεταμένος χρόνος μετρήσεων, ενώ η ρύθμιση των παραμέτρων προϋποθέτει έμπειρο χρήστη (Ballou, 2008).

## 2.4 Ανάλυση FFT και Ανάλυση FFT Διπλού Καναλιού (Dual Channel FFT Analysis )

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι η μαθηματική διαδικασία φιλτραρίσματος που αποδίδει το φασματικό περιεχόμενο ενός σήματος στο πεδίο της συχνότητας. Ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (**Fast Fourier Transform**) είναι μία υπολογιστικά ταχύτερη εκδοχή του ίδιου μετασχηματισμού στα δειγματοληπτικά δεδομένα. Οι αναλυτές που χρησιμοποιούν αυτόν τον τρόπο για τον προσδιορισμό του φασματικού περιεχομένου ενός χρονικά μεταβαλλόμενου σήματος, ονομάζονται FFTs. Η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται με τον IFFT (**Inverse Fast Fourier Transform**), ο οποίος λαμβάνει ως είσοδο ένα σήμα στο πεδίο της συχνότητας και παράγει ένα σήμα στο πεδίο του χρόνου. Αμφότεροι αποτελούν τη βάση των σύγχρονων συστημάτων μέτρησης.

Η ιδέα της τεχνικής ανάλυσης διπλού καναλιού, βασίζεται στη διαίρεση του φάσματος εξόδου της υπό μέτρηση συσκευής, με το φάσμα του σήματος εισόδου. Με άλλα λόγια, ένας FFT αναλυτής διπλού καναλιού λαμβάνει την είσοδο και την έξοδο του σήματος της συσκευής παράλληλα και στη συνέχεια τα σήματα συγκρίνονται με διαίρεση, δίνοντας τη συνάρτηση μεταφοράς. Το σήμα “τεμαχίζεται” σε συνεχόμενα ή και επικαλυπτόμενα κομμάτια, τα οποία στη συνέχεια περνάνε μέσω FFT στο φασματικό πεδίο. Κατόπιν υπολογίζονται οι μέσοι όροι των φασμάτων για κάθε κανάλι, όπως και για το διασταυρούμενο φάσμα.

Το σήμα διέγερσης που εισάγεται στη συσκευή είναι κατά κανόνα μη ντετερμινιστικός θόρυβος, συνεπώς το φάσμα του δεν είναι εξαρχής γνωστό. Έτσι, η διέγερση, ηχογράφηση και επεξεργασία της εισόδου και

της εξόδου του συστήματος συνιστά ταυτόχρονη διαδικασία. Ωστόσο, το σήμα διέγερσης που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη μέθοδος, αποτελεί και το βασικό της μειονέκτημα καθώς σε μεμονομένα στιγμιότυπα στο λευκό ή ροζ φάσμα που παρουσιάζει, εμφανίζονται απότομες βυθίσεις κατά τον υπολογισμό του μέσου όρου για μεγάλο χρονικό διάστημα. Συνεπώς, για την εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων ένας τέτοιος αναλυτής απαιτεί τον μέσο όρο πλήθους ξεχωριστών μετρήσεων. Οι περιπτώσεις μετρήσεων που παρουσιάζουν χαμηλή τιμή SNR στη χαμηλή περιοχή, εξαιρούνται από τον υπολογισμό του μέσου όρου, για την αποφυγή σφαλμάτων στην υπολογισμένη απόκριση. Επίσης, πρέπει να είναι γνωστή η καθυστέρηση που μεσολαβεί στη διαδρομή μετάδοσης του σήματος, ώστε να υπάρχει ακρίβεια στη χρονική μετατόπιση του απευθείας σήματος, προκειμένου να γίνει ανάλυση μεταξύ ίδιων δεδομένων. Για την αποφυγή διαρροής πριν από τη χρήση του FFT, συνιστάται η εφαρμογή παραθύρου στο φάκελο του σήματος (signal envelope)<sup>14</sup> ώστε να μην ενισχύονται οι καθυστερημένες συνιστώσες (Müller et al, 2001).

## 2.5 Κρουστικοί Παλμοί (Impulses)

Η ανάκτηση της κρουστικής απόκρισης ενός συστήματος με χρήση κρουστικού παλμού ως σήμα διέγερσης, είναι η άμεση προσέγγιση για μετρήσεις της συνάρτησης μεταφοράς που βασίζεται σε FFT ανάλυση. Η διέγερση μπορεί να παραχθεί με αναλογικά μέσα, ή ιδανικά να σταλεί μέσω D/A μετατροπέα. Ένας στενός παλμός (~ 10  $\mu$ sec) τροφοδοτεί ένα μεγάφωνο, του οποίου η απόκριση λαμβάνεται από το μικρόφωνο ενισχυμένη και ψηφιοποιημένη από D/A μετατροπέα. Αυτή η ληφθείσα απόκριση είναι και η αναμενόμενη κρουστική απόκριση υπό την προϋπόθεση ότι έχει χρησιμοποιηθεί ένας παλμός τύπου Dirac<sup>15</sup>, που θεωρητικά έχει άπειρο πλάτος και απείρως μικρή χρονική διάρκεια.

---

14\_ Η καμπύλη που περιγράφει τις συνολικές μεταβολές του πλάτους ή της ενέργειας ενός σήματος στο χρόνο.

15\_ βλέπε υποσημείωση 5.



Η ενέργεια που περιέχεται στον παλμό, διαχέεται ταυτόχρονα σε ένα μεγάλο συχνοτικό εύρος και ανακτάται μαζί με το θόρυβο περιβάλλοντος. Αυτό δίνει χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο, ιδιαίτερα στη χαμηλή περιοχή. Πρακτικά είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθεί η τέλεια ώση, συνεπώς δεν είναι ξεκάθαρο το αν τελικά η απόκριση είναι αυτή του συστήματος, του παλμού ή κάποιας μη γραμμικότητας που προέρχεται από τη συμπεριφορά του ηχείου.

Για την εξασφάλιση καλύτερου SNR, ο παλμός επαναλαμβάνεται περιοδικά και προστίθενται οι αποκρίσεις κάθε περιόδου. Με αυτόν τον τρόπο εξάγεται η περιοδική κρουστική απόκριση η οποία ισούται με τη μη περιοδική, εάν αυτή είναι μικρότερης χρονικής διάρκειας από τη διάρκεια της μέτρησης. Πρακτικά αυτό δεικνύει το αν και κατά πόσο η κρουστική απόκριση έχει εισχωρήσει στο επίπεδο θορύβου, πριν ολοκληρωθεί η περίοδος. Ένας τέτοιος σύγχρονος μέσος όρος, μειώνει τον ασυσχέτιστο θόρυβο κατά 3 dB σε σχέση με την κρουστική απόκριση για κάθε διπλασιασμό του αριθμού επαναλήψεων.

Η χρονική καθυστέρηση της διαδρομής του σήματος μεταξύ μεγαφώνου και μικροφώνου εξαλείφεται, μετατοπίζοντας την κρουστική προς τα αριστερά. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας παράθυρο, αφαιρούνται οι ανεπιθύμητες χωρικές ανακλάσεις και αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Εναλλακτικά, η μέτρηση μπορεί να λάβει χώρα σε έναν επαρκώς μεγάλο χώρο ώστε ο απευθείας ήχος από το μεγάφωνο να έχει μεγάλη εξασθένηση μέχρι την άφιξη της πρώτης ανάκλασης στο μικρόφωνο. Το επόμενο βήμα είναι η μετατροπή της κρουστικής απόκρισης στη συνάρτηση μεταφοράς με μετασχηματισμό Fourier. Σε αυτή τη φάση, το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού πολλαπλασιάζεται με ένα φάσμα αναφοράς προκειμένου να εξασφαλισθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σύνδεση της εξόδου και της εισόδου του συστήματος μέσω ενός καλωδίου και αντιστρέφοντας τη μετρούμενη συνάρτηση μεταφοράς. Η εισαγωγή του φάσματος μεταφοράς προσφέρει τη δυνατότητα της προέμφασης του σήματος ώστε αυτό να προσαρμοσθεί στη φασματική συνεισφορά του θορύβου περιβάλλοντος. Ωστόσο, η προέμφαση αυτή θα αφαιρεθεί αυτόματα από την προκύπτουσα

συνάρτηση μεταφοράς με την εφαρμογή του φάσματος αναφοράς σε όλες τις επόμενες μετρήσεις.

## 2.6 Ημίτονο Σάρωσης | Βηματικό Ημίτονο (Logarithmic Sine Sweep | Stepped Sine)

Η τεχνική MLS όπως και αυτή των κρουστικών παλμών, βασίζονται στην παραδοχή ότι το υπό εξέταση σύστημα είναι γραμμικό και χρονικά αμετάβλητο. Αν η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται, τότε κατά τη διαδικασία ανάκτησης της κρουστικής απόκρισης παρουσιάζονται προϊόντα παραμόρφωσης. Η τεχνική του ημίτονου σάρωσης αναπτύχθηκε λόγω της ανάγκης υπέρβασης των περιορισμών των προαναφερθέντων μεθόδων (Stan et al, 2002).

Η ιδέα αυτής της τεχνικής βασίζεται στη χρήση ενός ημιτονικού σήματος σάρωσης συχνότητας, το οποίο μεταβάλλεται εκθετικά με το χρόνο. Με τον τρόπο αυτό, εξάγεται ταυτόχρονα η κρουστική απόκριση του συστήματος και οι ξεχωριστές κρουστικές αποκρίσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στις εξεταζόμενες τάξεις της αρμονικής παραμόρφωσης. Καθώς η αρμονική παραμόρφωση εμφανίζεται πριν από τη γραμμική κρουστική απόκριση, εξασφαλίζεται ότι η δεύτερη εξαιρείται από οποιαδήποτε μη γραμμικότητα, ενώ παράλληλα είναι δυνατή η μέτρηση της αρμονικής παραμόρφωσης στις διάφορες τάξεις της. Πρακτικά ωστόσο, είναι δύσκολη η διαδικασία διαχωρισμού μεταξύ του γραμμικού μέρους (κομμάτι της αντήχησης) από το μη γραμμικό που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση (Stan et al, 2002).

Η λογαριθμική συσχέτιση της συχνότητας με το χρόνο σάρωσης γίνεται ώστε το παραγόμενο σήμα ημιτονοειδούς ολίσθησης, να αναλογεί στη λογαριθμική συμπεριφορά της ανθρώπινης ακοής. Η αποσυνέλιξη (deconvolution) της κρουστικής απόκρισης, πραγματοποιείται με γραμμική συνέλιξη της μετρούμενης εξόδου με το αντίστροφο φίλτρο του σήματος διέγερσης. Επιπλέον, η χρήση της γραμμικής συνέλιξης εξασφαλίζει την

αποφυγή φαινομένων χρονικής αναδίπλωσης (aliasing). Στην πράξη, ακόμα και στην περίπτωση όπου το παράθυρο ανάλυσης χρόνου και το εκπεμπόμενο ημιτονοειδές σήμα σάρωσης έχουν το ίδιο μήκος, το οποίο είναι μικρότερο από την κρουστική απόκριση που πρόκειται να μετρηθεί, η ουρά της απόκρισης του σήματος μπορεί να χαθεί, χωρίς όμως να εισαχθεί χρονική αλλοίωση. Αυτό το πρόβλημα παρακάμπτεται με την πρόσθεση στο τελείωμα του σήματος σάρωσης, μίας παύσης επαρκούς διάρκειας. Το αντίστροφο φίλτρο μπορεί να δημιουργηθεί σε δύο στάδια. Αρχικά η λογαριθμική σάρωση αντιστρέφεται χρονικά, μετατοπίζεται δηλαδή προς τα πίσω, στη θετική περιοχή του άξονα του χρόνου. Αυτό συνεπάγεται αντιστροφή στο πρόσημο του φάσματος της φάσης. Στη συνέχεια καθυστερεί, προκειμένου να ληφθεί ένα αιτιατό σήμα. Έτσι η συνέλιξη μεταξύ του αντεστραμμένου σήματος διέγερσης και της αρχικής ημιτονοειδούς σάρωσης, θα δώσει ένα σήμα χαρακτηριζόμενο από απόλυτα γραμμική φάση, αλλά με τετραγωνισμό του φάσματος πλάτους. Στη συνέχεια, το φάσμα πλάτους του προκύπτοντος σήματος διαιρείται με το τετράγωνο του φάσματος πλάτους του αρχικού σήματος σάρωσης (Stan et al, 2002).

Παρά το γεγονός ότι η αξιολόγηση της συνάρτησης μεταφοράς αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία, η τεχνική του βηματικού ημίτονου είναι δημοφιλής για μετρήσεις ακριβείας όπως και για βαθμονόμηση ακουστικών μετατροπέων. Το υπό μέτρηση σύστημα διεγείρεται με σταθερό βήμα από καθαρούς τόνους αυξανόμενης συχνότητας και η φασματική του απόκριση προκύπτει με εφαρμογή FFT. Το ημίτονο που χρησιμοποιείται στη διέγερση είναι ακριβώς περιοδικό εντός των ορίων του FFT block για την αποφυγή φασματικής διαρροής<sup>16</sup>. Αυτό πρακτικά πραγματοποιείται ψηφιακά από τον συγχρονισμό του D/A μετατροπέα εκπομπής του ημίτονου, με τον A/D μετατροπέα σύλληψής του. Αναλόγως της επιθυμητής φασματικής ανάλυσης, η συχνότητα σάρωσης αυξάνεται

---

<sup>16</sup> Η εφαρμογή παραθύρου σε σήμα διακριτού χρόνου απείρου μήκους προκειμένου αυτό να καταστεί πεπερασμένο, προκαλεί τη διεύρυνση του φάσματος του αρχικού σήματος κατά το ενεργό εύρος ζώνης του φάσματος της συνάρτησης παραθύρου (Pargaskevas, 2018).

κατά μία τιμή ύστερα από κάθε γύρο μέτρησης. Για τη διατήρηση της λογαριθμικής απόστασης μεταξύ των συχνοτήτων, η συχνότητα σάρωσης αυξάνεται, με πολλαπλασιασμό κάθε φορά της προηγούμενης τιμής, με έναν σταθερό παράγοντα. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου, είναι η τεράστια αναλογία σήματος προς θόρυβο που μπορεί να αποκτηθεί σε μία μόνο μέτρηση. Επιπλέον, η τεχνική ενδείκνυται όταν πρόκειται για μετρήσεις αρμονικής παραμόρφωσης.

Όταν ζητούμενο είναι μόνο η συνάρτηση μεταφοράς, αυτή η μέθοδος δεν αποδίδει ιδιαίτερα, καθώς για την ανάλυση, μόνο ένα μέρος της ενέργειας που εκπέμπεται από την υπό μέτρηση συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτό συμβαίνει επειδή μετά από κάθε μετάβαση σε νέα συχνότητα χρειάζεται χρόνος έως ότου η συσκευή να επανέλθει σε σταθερή κατάσταση. Ειδικότερα όταν υπάρχουν υψηλού Q συντονισμοί, αυτός ο χρόνος ηρεμίας θα πρέπει να είναι μεγάλης διάρκειας προκειμένου να μειωθούν τα σφάλματα. Σε ένα θορυβώδες σύστημα ωστόσο, που πρέπει να εκτελεστούν πολλοί σύγχρονοι μέσοι όροι για να επιτευχθεί μία αποδεκτή μέτρηση, αυτός ο χρόνος “καθίζησης” είναι δευτερευούσης σημασίας. Η μέθοδος μειονεκτεί όταν πρόκειται για την απομάκρυνση των ανακλάσεων από την απόκριση. Αυτό είναι δυνατό, όταν η διαφορά στο χρόνο άφιξης μεταξύ απευθείας και ανακλώμενου ήχου είναι μεγαλύτερη από το διάστημα ανάλυσης (Müller et al, 2001).

## 3. Ισοστάθμιση (Equalization) I

### 3.1 Εισαγωγή

Κατά μία γενική προσέγγιση, η ισοστάθμιση (Equalization) είναι η διαδικασία ρύθμισης της ισορροπίας ανάμεσα στις διάφορες συχνότητες κατά την αναπαραγωγή ενός ηχητικού σήματος. Μέσω της ισοστάθμισης επιδιώκεται η διαμόρφωση της συχνοτικής απόκρισης των ακουστικών σημάτων, επιτρέποντας την ενίσχυση ή την εξασθένηση συγκεκριμένων συχνοτήτων ή περιοχών, για την επίτευξη της επιθυμητής ηχητικής ισορροπίας, αντισταθμίζοντας έτσι τον μη ιδανικό εξοπλισμό ή την ακουστική του χώρου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μία ηλεκτροακουστική διάταξη στο σύνολό της, αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα και μέσω των ισοσταθμιστών επιδιώκεται κατά το δυνατόν, η απομάκρυνση / ελαχιστοποίηση των παραμορφώσεων που εισάγονται στο σήμα από τα στοιχεία αυτά. Ωστόσο, η διαδικασία της ισοστάθμισης ακολουθεί διαφορετικές προσεγγίσεις σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος.

Ειδικότερα, στα πλαίσια εξέτασης συστημάτων εγγραφής /αναπαραγωγής ηχητικής πληροφορίας, η διαδικασία της ισοστάθμισης στοχεύει στην εντελώς ουδέτερη συμπεριφορά των συσκευών απέναντι στο ηχητικό σήμα ή τη διόρθωση απόκρισης συχνότητάς τους (π.χ η απομάκρυνση από την απόκριση μη επιθυμητών χρωματισμών) (Xenikakis, 2017). Η προσέγγιση αυτή γίνεται από τη σκοπιά της συχνοτικής απόκρισης του υπό εξέταση συστήματος.

Μία δεύτερη προσέγγιση αφορά στο πεδίο του χρόνου όπου εκεί, εκτός από την διόρθωση των φασματικών χρωματισμών, επιδιώκεται και η

εξάλειψη της αντήχησης που εισάγει στο σήμα ο χώρος μέσα στον οποίο το σήμα ηχογραφείται ή αναπαράγεται<sup>17</sup>.

Ο όρος equalization ωστόσο, σχετίζεται με μία ακόμα σημαντική και παράλληλα εντελώς διαφορετική διαδικασία. Η εργασία αυτή αφορά στο σήμα καθαυτό, όπου με την κατάλληλη επεξεργασία επιδιώκεται η αλλαγή του συχνοτικού περιεχομένου του σε επίπεδο σχετικών εντάσεων (Xenikakis, 2017).

Πέρα από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις διορθωτικής ισοστάθμισης, εφαρμόζεται επίσης και το δημιουργικό equalization όπου εκεί οι παρεμβάσεις στο συχνοτικό περιεχόμενο καθορίζονται κατά κύριο λόγο από αισθητικά κριτήρια.

### 3.2 Equalizers και Φίλτρα

Ο όρος equalizer αναφέρεται στη συσκευή/κύκλωμα το οποίο μπορεί να αυξομειώνει τη στάθμη (level) μίας περιοχής συχνοτήτων. Φίλτρο (filter), είναι το κύκλωμα το οποίο ελαττώνει ή “κόβει” ένα μέρος του φάσματος, μπορεί ωστόσο να περιλαμβάνει και το equalization κατά μία ευρεία έννοια (Xenikakis, 2017).

Καθώς υπάρχουν διαφόρων ειδών equalizers και φίλτρα, σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμος ο σαφής διαχωρισμός μεταξύ παθητικών (passive) και ενεργών (active) συσκευών. Οι παθητικές συσκευές αποτελούνται από παθητικά στοιχεία, δηλαδή από αντιστάσεις, πηνία και πυκνωτές. Παραδείγματος χάριν, σε ένα παθητικό equalizer είναι δυνατή η ελάττωση της στάθμης αλλά όχι η ενίσχυση, ωστόσο μπορεί να λειτουργήσει ενισχυτικά για μία περιοχή, εάν ελαττωθεί η στάθμη στο υπόλοιπο φάσμα. Οι ενεργές συσκευές περιέχουν transistors ή λυχνίες που σημαίνει ότι μπορούν να αυξομειώνουν το level σε μία συχνοτική ζώνη (Xenikakis, 2017).

Η διαδικασία της ισοστάθμισης καλύπτει ένα ευρύ φάσμα ενεργειών που πραγματοποιείται από απλούς ελέγχους τονικότητας έως ελέγχους ακριβείας μέσω γραφικών ή παραμετρικών ισοσταθμιστών πολλαπλών ζωνών. Εν τούτοις σε ένα θεμελιώδες επίπεδο, ο σχεδιασμός ενός

<sup>17</sup> ενδεικτικές εργασίες:

α) Heyser, R., Acoustical Measurements by Time Delay Spectrometry, *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 15, no. 4, pp. 370-382, 1967.

β) Mourjopoulos, J., Digital Equalization of Room Acoustics, *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 42, no. 11, 1994.

equalizer βασίζεται στην ίδια συλλογή δομών από φίλτρα, καθένα από τα οποία επηρεάζει μόνο μία ζώνη συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, δίνεται μία επιπλέον ή λιγότερη έμφαση σε κάποια κεντρική συχνότητα, επηρεάζοντας προφανώς και τις συχνότητες που βρίσκονται γύρω της. Ο σχεδιασμός του ισοσταθμιστή εξαρτάται επομένως σε μεγάλο βαθμό, από την επιλογή των σωστών παραμέτρων για κάθε φίλτρο, ώστε κάποιες από αυτές να παραμένουν σταθερές κατά το σχεδιασμό, ενώ κάποιες άλλες να είναι ρυθμιζόμενες από το χρήστη. Ο ποιοτικός παράγοντας  $Q$ , ο τύπος του φίλτρου και η ποσότητα ενίσχυσης ή εξασθένησης της κεντρικής συχνότητας, είναι οι παράμετροι που καθορίζουν πόσες γειτονικές συχνότητες θα επηρεαστούν μετά την εφαρμογή του equalizer. Στη συνέχεια αυτής της ενότητας παρουσιάζονται οι τέσσερις βασικοί τύποι φίλτρων.

### 3.3 Ταξινόμηση Φίλτρων

Τα φίλτρα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την επίδραση που έχουν στις διάφορες συχνοτικές περιοχές σε χαμηλής διέλευσης (Low Pass), υψηλής διέλευσης (High Pass), διέλευσης ζώνης (Band Pass) και επικλινή φίλτρα (Shelving) (Proakis et al, 2010). Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται η προδιαγραφή απόκρισης πλάτους για τα τρία πρώτα προαναφερθέντα ιδανικά φίλτρα<sup>18</sup>.

Με τη χρήση ενός Low Pass φίλτρου επιτρέπεται η διέλευση των συχνοτήτων έως τη συχνότητα αποκοπής  $f_c$ , ενώ οι συχνότητες πέρα από αυτή εξασθενούν. Στη θέση όπου ορίζεται η  $f_c$ , η έξοδος του φίλτρου είναι κατά 3,01 dB περίπου χαμηλότερη από τη μέγιστη έξοδο για οποιαδήποτε συχνότητα. Ο συγκεκριμένος αριθμός προκύπτει λόγω του ότι τα -3 dB είναι η στάθμη όπου το σήμα έχει τη μισή από την ισχύς ενός σήματος στη στάθμη των 0 dB. Έτσι, εάν το φίλτρο δεν έχει ενσωματωμένο σε αυτό πρόσθετο κέρδος, τότε η συχνότητα αποκοπής είναι εκείνη στην

<sup>18</sup> Τα ιδανικά φίλτρα δεν είναι πρακτικά υλοποιήσιμα καθώς η κρουστική τους απόκριση είναι μη αιτιατή συνάρτηση με άπειρο μήκος (Paraskeuas, 2018).

οποία η έξοδος είναι ακριβώς το μισό της ισχύος (Martin et al, 2004). Οι συχνότητες που βρίσκονται αριστερά της συχνότητας αποκοπής μπορούν και περνούν ανεπηρέαστες, βρίσκονται δηλαδή στην περιοχή διέλευσης (pass-band) του φίλτρου. Αυτές οι συχνότητες που βρίσκονται δεξιά της συχνότητας αποκοπής εξασθενούν, δηλαδή βρίσκονται στην περιοχή αποκοπής (stop-band). Την εξασθένησή τους φανερώνει η αρνητική κλίση (slope) του φίλτρου που περιγράφει το ρυθμό μεταβολής της στάθμης ως προς τη συχνότητα [συνήθως είναι της τάξης 6 dB, 12 dB, 18 dB ανά οκτάβα (π.χ. 12 dB/oct)]. Η κλίση αυτή καθορίζεται από την τάξη του φίλτρου<sup>19</sup> (Martin et al, 2004).

Ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης έχει συμπληρωματική λειτουργία σε σχέση με το Low Pass. Είναι σχεδιασμένο για να επιτρέπει διέλευση στις συχνότητες πέρα από την συχνότητα αποκοπής αποκόπτοντας τις συχνότητες πριν από αυτή. Η  $f_c$  καθορίζει το σημείο όπου η έξοδος στο σήμα έχει στάθμη -3.01 dB αλλά τώρα η κλίση της καμπύλης κάτω από αυτή τη συχνότητα είναι θετική. Η κλίση του φίλτρου και εδώ, εξαρτάται από την τάξη του.

Με τη χρήση ενός Band Pass επιτρέπεται η διέλευση μίας συγκεκριμένης περιοχής συχνοτήτων. Σχηματίζεται από το συνδυασμό σε σειρά ενός High Pass με ένα Low Pass φίλτρο, ώστε η έξοδος του ενός να τροφοδοτεί την είσοδο του άλλου. Κατά συνέπεια, το υπεραυτό φίλτρο θα εξασθενήσει τις χαμηλές συχνότητες επιτρέποντας τη διέλευση των υψηλότερων συχνοτήτων και παράλληλα το χαμηλοπερατό θα εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μίας μεσαίας ζώνης (ζώνης διέλευσης) που αφήνεται να περάσει σχετικά ανεπηρέαστη. Το σύστημα που προκύπτει, είναι ένα ζωνοπερατό φίλτρο και έχει κάποιες προδιαγραφές που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του. Το πρώτο αφορά στο εύρος της ζώνης διέλευσης (bandwidth). Αυτό

---

19\_ Όταν το φίλτρο είναι αναλογικό, η τάξη του ορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων (π.χ. πηνιά, πυκνωτές) που εμπεριέχονται στο κύκλωμα. Η τάξη ενός ψηφιακού φίλτρου καθορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων καθυστέρησης που χρησιμοποιούνται κατά την υλοποίησή του.



μαθηματικά προκύπτει από τη διαφορά των δύο συχνοτήτων αποκοπής  $f_1$  και  $f_2$  (του Low-Pass και του High-Pass αντίστοιχα):

$$BW = f_{c_2} - f_{c_1} \quad (3.1)$$

Το δεύτερο στοιχείο σχετίζεται με την κεντρική συχνότητα της ζώνης. Για την ανάλυση του φάσματος με φίλτρα, συνηθέστερα χρησιμοποιούνται οι ζώνες μεταβλητού εύρους, δηλαδή ο άξονας των συχνοτήτων είναι λογαριθμικός και το εύρος ζώνης αυξάνεται εκθετικά (Σκαρλάτος, 2018). Κατά συνέπεια, για τον υπολογισμό της κεντρικής συχνότητας χρησιμοποιείται ο γεωμετρικός μέσος των δύο συχνοτήτων αποκοπής:

$$f_{centre} = \sqrt{f_{c_1} f_{c_2}} \quad (3.2)$$

Τέλος, ο παράγοντας ποιότητας  $Q$  συνδέει το εύρος ζώνης με την κεντρική συχνότητα έτσι ώστε τα μεγέθη αυτά να περιγράφονται με όρους ενός σταθερού μουσικού διαστήματος. Αυτό υπολογίζεται από τη φόρμα:

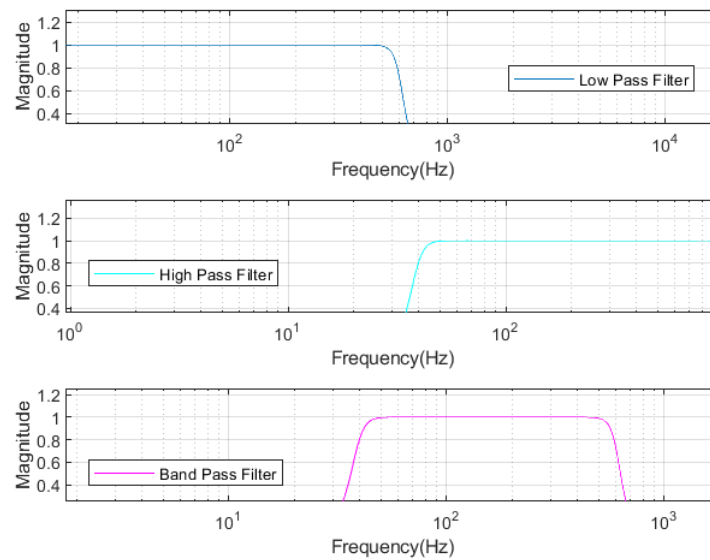
$$Q = \frac{f_{centre}}{f_{c_2} - f_{c_1}} = \frac{f_{centre}}{BW} \quad (3.3)$$

Το φίλτρο Shelving είναι παραλλαγή του υπερηρατού/χαμηλοπερατού. Είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί στα άκρα του φάσματος, από κάποια συχνότητα και πέρα. Παρουσιάζει μία καμπυλωτή ενίσχυση (ή εξασθένιση), η οποία τελικά ευθυγραμμίζεται με μία συγκεκριμένη συχνότητα (stop frequency). Επιπλέον, υπάρχει μία δεύτερη καθοριστική συχνότητα (turnover frequency), η οποία βρίσκεται 3 dB πάνω ή κάτω από τη μέγιστη ενίσχυση (ή εξασθένιση). Από τη συχνότητα αυτή αρχίζει και η επίδραση του φίλτρου, που κατά συνέπεια η περιοχή δράσης του έχει αρχή αλλά δεν έχει τέλος. Η μορφή της καμπύλης φανερώνει ότι η δράση του Shelving ξεκινάει πολύ πριν από την τιμή της συχνότητας επιλογής. Ο λόγος μετάβασης είναι περίπου ανάλογος με την τάξη του φίλτρου και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες συχνότητες:

$$RT = \frac{f_{stop}}{f_{turnover}} \quad (3.4)$$

όπου  $RT$ , είναι ο λόγος μετάβασης.

Όσο πίο κοντά στο 1 είναι ο λόγος μετάβασης, τόσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της καμπύλης στο κέρδος, από τις ανεπηρέαστες στις μη επηρεαζόμενες περιοχές συχνοτήτων (Martin et al, 2004).



Σχήμα 3.1\_ Απόκριση πλάτους για το Low Pass, High Pass και Band Pass φίλτρο

### 3.4 Κατηγορίες Ισοσταθμιστών | Γραφικός Ισοσταθμιστής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένας ισοσταθμιστής είναι μία συσκευή που μπορεί να εξασθενεί ή να ενισχύει τις συχνότητες, σύμφωνα με το σκοπό της χρήσης του. Επιπλέον ότι αποτελείται από μία ομάδα φίλτρων, καθένα από τα οποία επιτρέπει τον έλεγχο ενός ή περισσότερων από τις

τρεις παραμέτρους λειτουργίας. Τα φίλτρα συνδέονται είτε σειριακά, είτε παράλληλα, ανάλογα με τον τύπο του ισοσταθμιστή και τον κατασκευαστή. Τα φίλτρα που εμπεριέχονται σε ένα equalizer, ρυθμίζονται από το χρήστη.

Τα equalizers διακρίνονται σε Γραφικά, Ημιπαραμετρικά και Παραμετρικά. Ένας γραφικός ισοσταθμιστής, αποτελείται από έναν αριθμό φίλτρων με κεντρικές συχνότητες που απέχουν κατά συμμετρικά διαστήματα μεταξύ τους, η κάθε μία εκ των οποίων έχει το δικό της ρυθμιστικό (slider) για τον έλεγχο του κέρδους. Η διάταξη του συνόλου των ρυθμιστικών δίνει τη γραφική αναπαράσταση της απόκρισης συχνότητας του equalizer. Είναι συνεπώς προφανές πως όσο περισσότερες περιοχές είναι διαθέσιμες, τόσο καλύτερος είναι ο έλεγχος των συχνοτήτων του σήματος. Οι διαθέσιμες αναλύσεις στο συχνοτικό φάσμα, κυμαίνονται από το εύρος μίας οκτάβας,  $2/3$  -oct,  $1/3$  -oct,  $1/12$  -oct ή  $1/24$  -oct.

Τα sliders των περισσότερων γραφικών ισοσταθμιστών, χρησιμοποιούν τυποποιημένες κεντρικές συχνότητες ζώνης, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO (International Standards Organization). Συνήθως δημιουργούνται από reciprocal peak/dip<sup>20</sup> φίλτρα με παράλληλη συνδεσμολογία. Με αυτόν τον τρόπο ωστόσο, κατά την ενίσχυση δύο γειτονικών ζωνών ανάμεσα στις κορυφές των κεντρικών συχνοτήτων η βύθιση παραμένει, γεγονός που σημειώνεται ως μειονέκτημα όταν επιχειρείται ενίσχυση κάποιας ενδιάμεσης συχνότητας. Έτσι προκειμένου να γίνει σωστά η ρύθμιση της συχνότητας που ενδιαφέρει, απαιτούνται υπερβολικές ποσότητες ενίσχυσης στα κέντρα της κάθε ζώνης. Τα equalizers που κάνουν χρήση λιγότερο συνηθισμένων φίλτρων, περιορίζουν το παραπάνω πρόβλημα. Αυτή η συνδεσμολογία περιλαμβάνει φίλτρα σε σειρά, ώστε οι γειτονικές ζώνες να έχουν αθροιστικό αποτέλεσμα. Με αυτό τον τρόπο, η ενίσχυση σε μία ενδιάμεση των κεντρικών συχνοτήτων, υλοποιείται με ελάχιστη ενίσχυση των φίλτρων, με αποτέλεσμα να προκύψει μία υψηλότερα ενισχυμένη μεσαία συχνότητα (Martin et al, 2004).

---

20\_ Συμμετρικό φίλτρο με ταυτόχρονη ενίσχυση και περικοπή στην ίδια κεντρική συχνότητα (Martin et al, 2004).

Οι γραφικοί ισοσταθμιστές συνήθως έχουν σταθερές συχνότητες και σταθερό  $Q$ . Αυτό τους καθιστά απλούς στη χρήση. Είναι κατάλληλοι για τη συνολική διαμόρφωση του ήχου (π.χ. master σε συναυλίες) αλλά υστερούν στις περιπτώσεις όπου απαιτούνται ειδικότερες ρυθμίσεις συχνότητας ή εύρους ζώνης.

Η εκδοχή του paragraphic equalizer, σχεδιάστηκε προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί του γραφικού equalizer. Πρόκειται για έναν γραφικό ισοσταθμιστή με τη δυνατότητα μίας περισσότερο λεπτεπίλεπτης ρύθμισης στην κεντρική συχνότητα κάθε φίλτρου, ώστε να εξασφαλίζεται μεγαλύτερος έλεγχος στην απόκριση του συστήματος.

### 3.5 Παραμετρικός Ισοσταθμιστής

Ο παραμετρικός ισοσταθμιστής εξυπηρετεί τον έλεγχο στο κέρδος, την κεντρική συχνότητα και το εύρος ζώνης ( $Q$ ) κάθε φίλτρου, κυρίως στη μεσαία περιοχή.

Σε αυτόν τον τύπο equalizer, οι τρεις αυτές παράμετροι είναι ανεξάρτητες, συνεπώς οι ρυθμίσεις που εφαρμόζονται σε κάθε μία ξεχωριστά δεν έχουν καμία επίδραση στις άλλες δύο. Ο σχεδιασμός του βασίζεται σε συνδέσεις φίλτρων είτε τύπου reciprocal peak/dip είτε σταθερού  $Q$ . Για περαιτέρω έλεγχο στο σήμα, οι περιοχές συχνοτήτων συνήθως επικαλύπτονται. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η εφαρμογή ενίσχυσης ή εξασθένησης στην ίδια κεντρική συχνότητα με χρήση τουλάχιστον δύο φίλτρων.

Το προφανές πλεονέκτημα της χρήσης ενός παραμετρικού equalizer, συνίσταται στη λεπτομέρεια και την ελεγχόμενη ακρίβεια κατά την επέμβαση στο συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος. Εν τούτοις, αυτό είναι ταυτόχρονα μία διαδικασία που προϋποθέτει χρόνο και εμπειρία για την κατάκτησή της.

Μια παραλλαγή του παραμετρικού equalizer αποτελεί ο ημιπαραμετρικός ισοσταθμιστής. Όπως φανερώνει το όνομά του, σε αυτόν τον τύπο οι τρεις παράμετροι δεν είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες. Η αλλαγή στην τιμή μίας παραμέτρου θα προκαλέσει απροσδόκητη αλλαγή τουλάχιστον σε μία από τις άλλες δύο.

### 3.6 Ψηφιακή Ισοστάθμιση

Οι αναλογικοί ισοσταθμιστές που περιγράφηκαν προηγουμένως παρεμβαίνουν στο συχνοτικό περιεχόμενο του ηχητικού σήματος με σκοπό τη διόρθωση των περιοχών όπου το σήμα παρουσιάζει προβληματική συμπεριφορά. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συνδυασμοί αναλογικών φίλτρων διέλευσης/αποκοπής συχνοτήτων, η ρύθμιση των οποίων γίνεται εμπειρικά. Εν τούτοις οι αναλογικές μέθοδοι είναι περισσότερο ευάλωτες στις ενδογενείς παραμορφώσεις των κυκλωμάτων, αλλά και τις φασικές καθυστερήσεις του σήματος ανά τις συχνοτικές ζώνες. Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του '80, οι έρευνες προσανατολίζονται στο ψηφιακό πεδίο όπου ο σχεδιασμός συστημάτων ισοστάθμισης παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε τέτοιους παράγοντες.

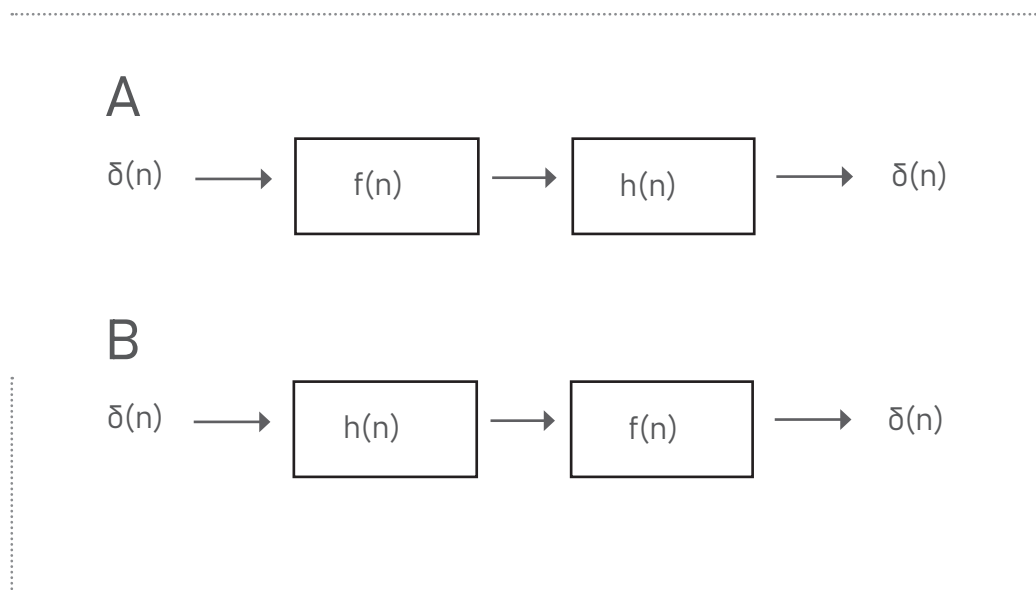
Όπως έχει αναφερθεί, οι ηλεκτροακουστικές διατάξεις από την απλή τους μορφή, έως και μεγαλύτερες αλυσίδες (συμπεριλαμβανομένου του χώρου), λογίζονται ως γραμμικά και χρονικά αμετάβλητα συστήματα και περιγράφονται από τη συνεχούς χρόνου συνάρτηση μεταφοράς τους. Κατά την ψηφιακή επεξεργασία, η συνάρτηση μεταφοράς αντιστοιχεί ισοδύναμα σε ακολουθία διακριτού χρόνου. Η πράξη της συνέλιξης μπορεί να θεωρηθεί κατά μία έννοια ως μία διαδικασία φιλτραρίσματος· δηλαδή το σήμα εισόδου  $X(f)$  μετασχηματίζεται στο νέο σήμα εξόδου  $Y(f)$  από τη συνάρτηση  $H(f)$ . Τα χαρακτηριστικά της τελευταίας περιγράφουν την όποια ηλεκτροακουστική ή ακουστική διάταξη που συμπεριφέρεται ως ΓΧΑ σύστημα. Υπό αυτή την προσέγγιση, η έννοια του φίλτρου μπορεί να θεωρηθεί ως ταυτόσημη του συστήματος (Mourjopoulos, 2022). Το πρόβλημα της ισοστάθμισης σε ένα τέτοιο σύστημα είναι στην πραγματικότητα πρόβλημα αποσυνέλιξης (deconvolution)· δηλαδή αναζητείται το αντίστροφο φίλτρο με απόκριση  $f(n)$  που όταν εφαρμοσθεί στο σύστημα, η συνολική απόκριση του να δίνει την κρουστική συνάρτηση  $\delta(n)$ :

$$h(n)*f(n)=\delta(n) \quad (3.5)$$

όπου  $\delta(n)$ , η ακολουθία που ορίζεται για τις τιμές:

$$\delta(n) = \begin{cases} 0, & n \neq 0 \\ 1, & n = 0 \end{cases}$$

Η εισαγωγή του αντίστροφου φίλτρου  $f(n)$  στην ηλεκτροακουστική διάταξη μπορεί να εφαρμοσθεί είτε με προφιλτράρισμα του σήματος εισόδου με το αντίστροφο φίλτρο, είτε με φιλτράρισμα της παραμορφωμένης εξόδου του συστήματος όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.2 (Χατζιαντωνίου, 2005). Το  $h(n)$  αναφέρεται στο σύστημα και το  $f(n)$  στο αντίστροφο φίλτρο.



**Σχήμα 3.2\_** Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για ισοστάθμιση συστήματος με εφαρμογή αντίστροφου φίλτρου.

### 3.7 FIR και IIR φίλτρα

Η υπολογιστική διαδικασία μέσω της οποίας μία αριθμητική ακολουθία  $x(n)$  που συμπεριφέρεται ως είσοδος σε ένα σύστημα, μετασχηματίζεται σε μία νέα αριθμητική ακολουθία  $y(n)$  και αντιστοιχεί στην έξοδό του, είναι ένας εναλλακτικός ορισμός του ψηφιακού φίλτρου. Η διαδικασία αυτή συνδέει τη σχέση εισόδου - εξόδου του συστήματος μέσω μίας εξίσωσης διαφορών με σταθερούς συντελεστές της μορφής:

$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a_k \cdot y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k \cdot x(n-k) \quad (3.6)$$

όπου  $x(n)$ , είναι η ακολουθία εισόδου,  $y(n)$ , η ακολουθία εξόδου και  $a_k$ ,  $b_k$ , οι συντελεστές του φίλτρου.

Ανάλογα με τη διάρκεια της κρουστικής τους απόκρισης, τα Γραμμικά και Χρονικά Αμετάβλητα συστήματα διακρίνονται σε πεπερασμένης διάρκειας (**Finite-duration Impulse Response**) και άπειρης διάρκειας (**Infinite-duration Impulse Response**).

Ένα FIR φίλτρο περιγράφεται από την εξίσωση διαφορών:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} b_k \cdot x(n-k) \quad (3.7)$$

όπου  $\{b_k\}$  είναι οι συντελεστές του φίλτρου.

Η ακολουθία εξόδου εκφράζεται εναλλακτικά ως η συνέλιξη της μοναδιαίας δειγματικής απόκρισης  $h(n)$  του συστήματος με το σήμα εισόδου:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k) \cdot x(n-k) \quad (3.8)$$

Σε ένα τέτοιο σύστημα, η έξοδος για οποιαδήποτε χρονική στιγμή  $n$  είναι ένας γραμμικός συνδυασμός βαρών των δειγμάτων του σήματος εισόδου  $x(n)$ ,  $x(n-1)$ , ...,  $x(n-M+1)$ . Έτσι το σύστημα λειτουργεί σαν παράθυρο που

κατά τη δημιουργία της εξόδου, βλέπει τα πιό πρόσφατα δείγματα του σήματος εισόδου, αγνοώντας όλα τα προηγούμενα (δηλαδή τα  $x(n-M)$ ,  $x(n-M-1)$ , ...). Ένα FIR σύστημα έχει συνεπώς πεπερασμένη μνήμη μήκους  $M$  δειγμάτων (Proakis et al, 2010).

Η σχέση 3.6 περιγράφει ένα IIR σύστημα. Εδώ, η έξοδος σε κάθε χρονική στιγμή εξαρτάται από την παρούσα τιμή της εισόδου, από τις παρελθοντικές τιμές της εισόδου καθώς και από τις παρελθοντικές τιμές της εξόδου του συστήματος (Papadakis et al, 2012).

Επίσης, από τη σχέση 3.6 γίνεται φανερό ότι τα IIR φίλτρα είναι αναδρομικά (recursive), υπό την έννοια ότι τα δείγματα της εξόδου χρησιμοποιούνται από το σύστημα για τον υπολογισμό των νέων τιμών της εξόδου σε επόμενες χρονικές στιγμές. Έτσι, IIR φίλτρα μπορούν να υλοποιήσουν σχέσεις εισόδου - εξόδου με λιγότερους συντελεστές από αυτούς που θα απαιτούσε η χρήση ενός FIR φίλτρου, γεγονός που σχετίζεται με τη μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα (Skodras et al, 2003). Επιπλέον, έχουν σχεδιαστική ευελιξία αφού επιτρέπουν τη δημιουργία σύνθετων αποκρίσεων συχνότητας, όπως είναι το παραμετρικό equalizer που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία. Αξίζει ωστόσο να επισημανθεί, ότι ο σχεδιασμός ενός IIR φίλτρου απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή απ' ότι αυτός ενός FIR, προκειμένου να εξασφαλισθεί η ευστάθειά του. Η ευστάθεια (stability) είναι μία σημαντική ιδιότητα των συστημάτων και απαραίτητη προϋπόθεση για την πρακτική πραγματοποίησή τους. Η έννοια αυτή είναι συνώνυμη του τρόπου με τον οποίο η απόκριση του συστήματος ανταποκρίνεται σε μία διαταραχή πεπερασμένου πλάτους.



## B Μέρος

### Υλοποίηση Φίλτρου στη Matlab | Περιγραφή Διαδικασίας

Ο αλγόριθμος που αναλύεται στη συνέχεια, αφορά στην αυτόματη ρύθμιση των παραμέτρων ενός παραμετρικού equalizer το οποίο στοχεύει στην εξομάλυνση της απόκρισης συχνότητας του συστήματος ηχείου - δέκτη και τη δημιουργία μίας “επίπεδης” συχνοτικής απόκρισης. Συνοπτικά, η διαδικασία πραγματοποιείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Η μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του ηχείου πραγματοποιείται με χρήση του λογισμικού Room EQ Wizard.
2. Υπολογίζεται η εξομαλυμένη απόκριση οκτάβας.
3. Λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα βαθμονόμησης του μικροφώνου που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μέτρηση.
4. Υπολογίζονται οι βελτιστοποιημένες παράμετροι των επιμέρους φίλτρων που τροποποιούν τη συχνοτική απόκριση, ώστε να προσεγγίζεται η ιδεατή.

## 1.1 Εισαγωγή της Μέτρησης στη Matlab

Εισάγεται στο πρόγραμμα η κρουστική απόκριση, ορίζεται το διάνυσμά της και ο αριθμός των φίλτρων ανά οκτάβα. Η ενέργεια αυτή αποσκοπεί στη διαίρεση του φάσματος σε διαστήματα  $1/24$  οκτάβας προκειμένου να είναι δυνατή η λεπτομερέστερη ανάλυση της κυματομορφής. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Fourier της κρουστικής μέσω της συνάρτησης `calculate_FFT`, για την ανάγνωσή της στο πεδίο της συχνότητας. Εδώ, είναι δυνατή η παρατήρηση της ενεργειακής κατανομής και της φάσης του σήματος ανά συχνότητα.

## 1.2 Υπολογισμός της Εξομαλυμένης Απόκρισης

Η συχνотική απόκριση εξομαλύνεται κατά τμήματα  $1/24$  -oct ώστε η καμπύλη της να παρουσιάζει όσο το δυνατόν λιγότερο απότομες μεταβάσεις μεταξύ των συχνοτήτων (Σχήμα 1.1). Αυτό γίνεται μέσω της βοηθητικής συνάρτησης `octaveAverage`.



Σχήμα 1.1\_ Καμπύλες μετρούμενης κρουστικής απόκρισης και εξομαλυμένης κατά τμήματα  $1/24$  -oct.

### 1.3 Υπολογισμός της Ιδεατής Απόκρισης

Η ιδανική απόκριση του υπό εξέταση ηχείου είναι μία θεωρητική καμπύλη, η οποία ουσιαστικά προσδιορίζει τη συχνотική απόκριση που θα θέλαμε ιδανικά να έχει το σύστημά μας. Έτσι, στόχος είναι μία απόκριση που να είναι τελείως απαλλαγμένη από φασματικούς χρωματισμούς. Ο προσδιορισμός της βέλτιστης επιθυμητής απόκρισης γίνεται στην περιοχή ενδιαφέροντος ROI (**R**egion **o**f **I**nterest), για βελτιστοποίηση της απόκρισης του ηχείου με βάση τη μέτρηση και τις προδιαγραφές λειτουργίας που δίνει ο κατασκευαστής.

Για τον υπολογισμό της επιθυμητής απόκρισης προσαρμόζεται ένα ευθύγραμμο τμήμα επάνω στην καμπύλη της εξομαλυμένης απόκρισης στο εύρος μελέτης που ενδιαφέρει και προστίθεται ένα roll off στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων. Το roll off αφορά στη δράση ενός συγκεκριμένου τύπου φίλτρου προκειμένου να εξασθενεί τις συχνότητες πάνω ή κάτω από μία συγκεκριμένη συχνότητα. Η διαδικασία αυτή γίνεται σταδιακά. Οι συχνότητες που βρίσκονται πέρα ή πριν από τη συχνότητα αποκοπής παρουσιάζουν κλιμακούμενη εξασθένιση. Στη φάση αυτή, η βοηθητική συνάρτηση octaveAverage θα λειτουργήσει μόνο στην περιοχή ενδιαφέροντος ROI. Στη συνέχεια, ορίζονται τα συχνотικά όρια της γραμμικής παρεμβολής lfCutOff και hfMaxFit, που θα προσδιορίσουν την επιθυμητή απόκριση. Η προσαρμογή του ευθύγραμμου τμήματος γίνεται στο πεδίο της λογαριθμικής συχνότητας. Η λογαριθμική αναγωγή προσαρμόζει κατά κάποιο τρόπο τη συχνотική απόκριση στην ευαισθησία του μηχανισμού λειτουργίας της ανθρώπινης ακοής, καθώς αυτή αντιλαμβάνεται τα λογαριθμικά διαστήματα ως ίσα μεταξύ τους.

Το διάνυσμα rfit περιέχει την εκτίμηση των συντελεστών γραμμικής παλινδρόμησης που προκύπτουν από τη σύγκριση της στάθμης του μέσου πλάτους οκτάβας για τις κεντρικές συχνότητες (διάνυσμα rfit) με την καμπύλη της επιθυμητής απόκρισης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συνάρτησης robustfit. Η λειτουργία της robustfit εξυπηρετεί την προσαρμογή μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης παρουσία ακραίων τιμών.

## 1.4 Βελτιστοποίηση | συνάρτηση lsqnonlin

### α. Επισκόπηση στη Θεωρία Βελτιστοποίησης

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης αποσκοπούν στην εύρεση του βέλτιστου συνόλου παραμέτρων σχεδιασμού  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  το οποίο ελαχιστοποιεί (ή μεγιστοποιεί), μία αντικειμενική<sup>21</sup> συνάρτηση  $f(x)$ . Η συνάρτηση ενδεχομένως να υπόκειται σε περιορισμούς ισότητας, ανισότητας ή όρια παραμέτρων.

$$\text{Ισχύει δηλαδή } \min_x f(x) \quad (1.1)$$

υπό τις προϋποθέσεις:

$$\begin{aligned} G_i(x) &= 0, \quad i = 1, \dots, m_e \\ G_i(x) &\leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m \\ x_l &\leq x \leq x_u, \end{aligned}$$

όπου  $x$ , είναι το διάνυσμα των παραμέτρων σχεδιασμού μήκους  $n$ ,  $f(x)$ , είναι η αντικειμενική συνάρτηση (επιστρέφει κλιμακωτή τιμή), και  $G(x)$ , είναι η διανυσματική συνάρτηση, η οποία επιστρέφει ένα διάνυσμα μήκους  $m$ , με τις τιμές των περιορισμών ισότητας και ανισότητας που αξιολογούνται στο  $x$  (Matlab, Optimization Toolbox User's Guide, Mathworks 1990 - 2023). Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι οι συναρτήσεις  $f(x)$  και  $G(x)$  ενδέχεται να είναι μη γραμμικές συναρτήσεις ως προς τις παραμέτρους σχεδιασμού  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

### β. Η συνάρτηση lsqnonlin

Για τις τεχνικές βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται επιλυτές. Η συνάρτηση lsqnonlin είναι μια προσαρμοστική μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κόστους. Τα προβλήματα αυτά συνήθως αφορούν εκτίμηση παραμέτρων, προσαρμογή καμπυλών σε δεδομένα αλλά και άλλες εφαρμογές. Επιπρόσθετα, η συνάρτηση μπορεί να εφαρμοσθεί σε

<sup>21</sup> (objective function), αλλιώς συνάρτηση κόστους (cost function).

μη γραμμικά προβλήματα όπως είναι και η περίπτωση του equalizer που σχεδιάζεται στην παρούσα εργασία.

Ειδικότερα, η συνάρτηση χρησιμοποιείται για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων προσαρμογής καμπυλών ελαχίστων τετραγώνων της μορφής:

$$\min_x \|f(x)\|_2^2 = \min_x (f_1(x)^2 + f_2(x)^2 + \dots + f_n(x)^2) = \min_x \sum_i F_i^2(x) \quad (1.2)$$

υπολογίζει δηλαδή, τις διαφορές μεταξύ των προβλεπόμενων και πραγματικών τιμών λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς:

$$A \cdot x \leq b$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq}$$

$$lb \leq x \leq ub$$

$$c(x) \leq 0$$

$$ceq(x) = 0$$

όπου  $x$ ,  $lb$ ,  $ub$  είναι πίνακες ή διανύσματα (Matlab, Optimization Toolbox User's Guide, Mathworks 1990 - 2023). Η `lsqnonlin` είναι συνάρτηση της γλώσσας προγραμματισμού Matlab και σε αυτήν αντιστοιχεί η παραπάνω περιγραφή. Ωστόσο, συναρτήσεις βελτιστοποίησης διαθέτουν και άλλες γλώσσες προγραμματισμού (π.χ. η `minimize` και η `curve_fit` της βιβλιοθήκης SciPy της Python).

## 1.5 Σχεδιασμός Βελτιστοποιημένου Παραμετρικού Equalizer

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίζεται με το υπό σχεδίαση παραμετρικό equalizer, είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης καθώς η συνάρτηση κόστους δεν σχετίζεται γραμμικά με τους συντελεστές του ισοσταθμιστή. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης συντονίζει τις βασικές παραμέτρους που προϋποθέτει ο σχεδιασμός ενός παραμετρικού equalizer: την κεντρική συχνότητα, το εύρος ζώνης του φίλτρου και το μέγιστο κέρδος (συντελεστής ποιότητας  $Q$ ). Το

equalizer σχεδιάζεται με τη βοήθεια της συνάρτησης `designParam-EQ` και αποτελείται από 10 peak και 12 shelving φίλτρα. Η συνάρτηση `lsqnonlin` εκτελεί την προσαρμογή του equalizer συντονίζοντας τις τρεις παραμέτρους σε κάθε ζώνη έως ότου η απόκριση του ηχείου να γίνει όσο το δυνατόν επίπεδη. Για την εκτέλεση της βελτιστοποίησης η `lsqnonlin` κάνει χρήση του αλγορίθμου "Trust Region Reflective", καθώς ο συγκεκριμένος χρησιμοποιείται για προβλήματα παρουσία περιορισμών με όρια. Η ιδέα βασίζεται στην αναζήτηση ενός βέλτιστου σημείου εντός μίας γειτονικής περιοχής γύρω από ένα τρέχον σημείο. Στο βέλτιστο σημείο τότε, η συνάρτηση  $f(x)$  θα έχει χαμηλότερη τιμή.

Για τη δημιουργία των βελτιστοποιημένων παραμετρικών φίλτρων χρησιμοποιείται η συνάρτηση `eqOptimizer`. Σε αυτή τη συνάρτηση θέτονται οι αρχικές τιμές και τα όρια για κάθε παράμετρο των φίλτρων. Κατόπιν, ο `optimizer` κάνει χρήση της βοηθητικής αντικειμενικής συνάρτησης `eqObjectFct`. Η τελευταία αποτελεί ένα μέτρο ποιότητας και καταλληλότητας για το υπό σχεδίαση equalizer.

Για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του υπό σχεδίαση equalizer ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

1\_ Ορίστηκαν οι αρχικές τιμές των συντελεστών του φίλτρου που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Αυτό έγινε μέσω ενός πίνακα διαστάσεων 12x3 ο οποίος αναπαριστά τις αρχικές συνθήκες για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στην απολαβή κέρδους για το κάθε φίλτρο, η δεύτερη στον παράγοντα ποιότητας Q και η τρίτη στις κεντρικές συχνότητες. Για τα peak φίλτρα η τιμή του Q αρχικοποιείται με την τιμή 1.5 ενώ στα shelving η τιμή αρχικοποίησης είναι 1.0. Με βάση αυτές τις υποθέσεις ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης θα ξεκινήσει τη λειτουργία του.

2\_ Ορίστηκε η συνάρτηση κόστους η οποία δίνει την τετραγωνική απόκλιση μεταξύ της επιθυμητής απόκρισης του equalizer και αυτής που έχει προκύψει από τη μέτρηση. Η συνάρτηση επιστρέφει έναν αριθμό που αντιστοιχεί στο κόστος μέσω του οποίου αξιολογείται η απόδοση

του equalizer για μία δεδομένη τιμή των παραμέτρων.

3\_ Ορίστηκαν οι περιορισμοί των παραμέτρων, δηλαδή τα όρια των παραμέτρων για κάθε φίλτρο ξεχωριστά, ώστε οι τιμές τους να βρίσκονται εντός αποδεκτών πλαισίων. Πιο συγκεκριμένα, η απολαβή κέρδους όλων των φίλτρων κυμαίνεται από -12 dB έως 20 dB. Η χαμηλότερη τιμή για τον παράγοντα ποιότητας Q των ζωνοπερατών ορίστηκε στο 0.2 και η υψηλότερη στο 17.3. Η τιμή της κλίσης για τα shelving φίλτρα κυμαίνεται από 0.1 έως 5.0. Τα πάνω και κάτω όρια για τις κεντρικές συχνότητες είναι 40 Hz και 16 kHz αντίστοιχα.

Συνοψίζοντας, με τη χρήση της Isqnonlin επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους. Το αποτέλεσμα είναι η διαφορά πλάτους της δεδομένης κρουστικής απόκρισης από την επιθυμητή. Κατά συνέπεια, η Isqnonlin προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα της απόκλισης των δύο καμπυλών σε κάθε επαναλήψη. Από την eqOptimizer επιστρέφονται οι EQ παράμετροι και η στάθμη απόκρισης εξόδου του φίλτρου σε dB<sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> Ο κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων του equalizer, έχει βασιστεί σε σχετικό παράδειγμα της MathWorks και έχει προσαρμοστεί για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας: <https://www.mathworks.com/help/audio/ug/automated-design-of-audio-filters-for-room-equalization.html>

## Γ Μέρος

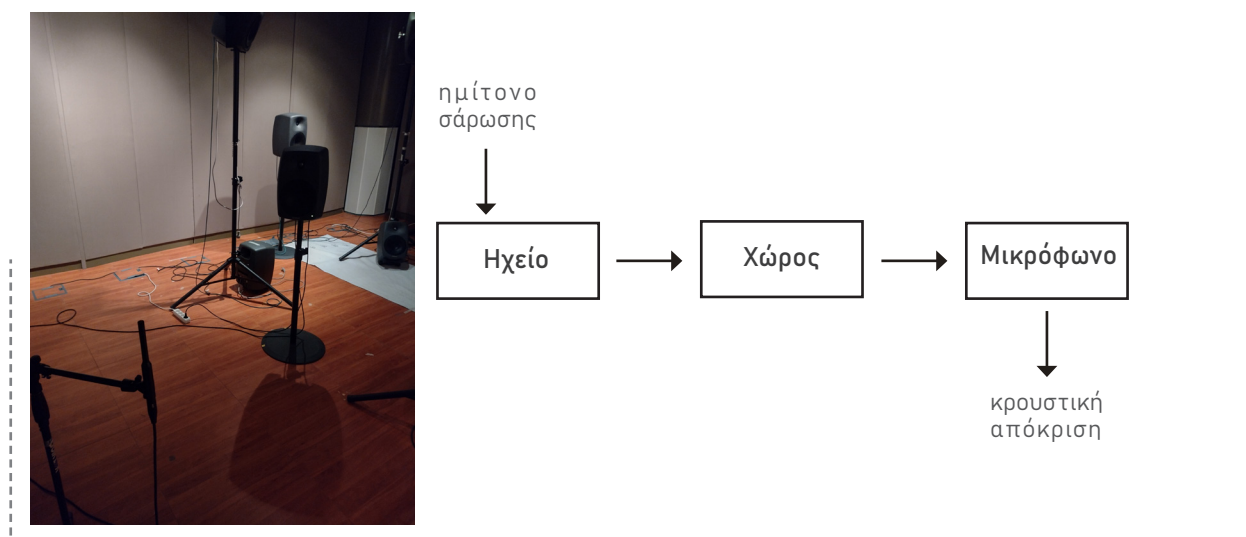
### Πειραματική Διαδικασία I

#### I Συμπεράσματα

#### 1.1 Πειραματική αξιολόγηση στο Εργαστήριο Ακουστικής του ΙΤΕ

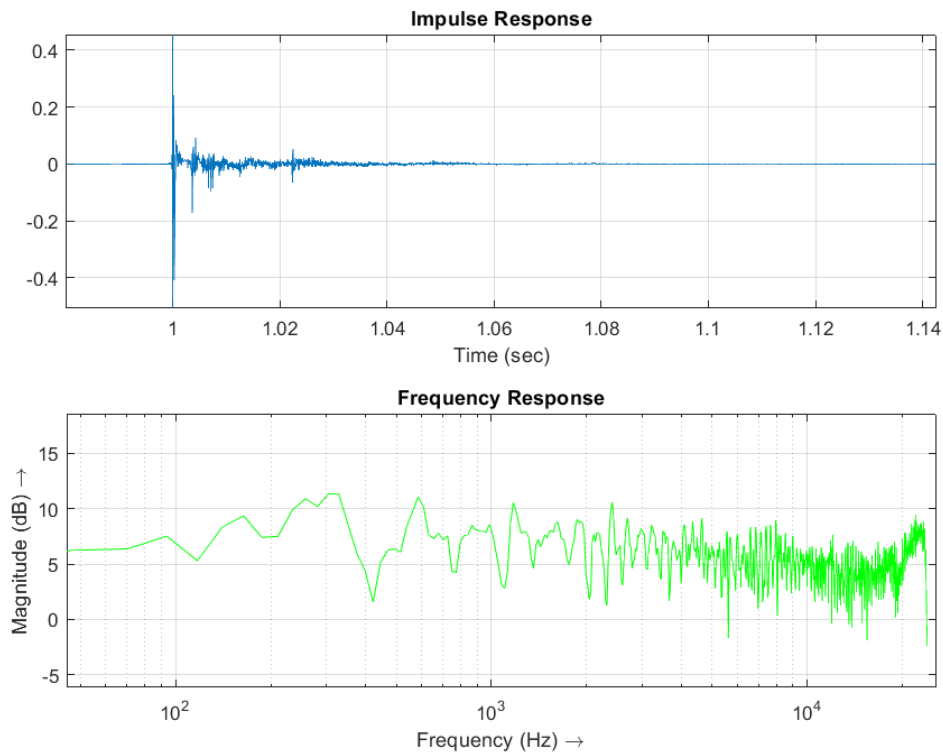
Κατά τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε το ηχείο Genelec - 8050 BPM. Το ηχείο είναι αυτοενισχυόμενο, συνεπώς δεν απαιτείται να συνδεθεί με επιπλέον μονάδα ενισχυτή για να λειτουργήσει. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το συχνοτικό εύρος του ηχείου είναι στα 32 Hz - 25 kHz (-6 dB). Ως μικρόφωνο επιλέχθηκε το πανκατευθυντικό Beyerdynamic MM1 το οποίο είναι κατάλληλο για ακουστικές μετρήσεις. Ως κάρτα ήχου χρησιμοποιήθηκε η MAUDIO.

Η διαδικασία μέτρησης του ηχείου υλοποιήθηκε μέσω μίας τυπικής ηλεκτροακουστικής αλυσίδας όπως περιγράφεται από το Σχήμα 1.1 και πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ακουστικής του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) που εδρεύει στο Ηράκλειο Κρήτης. Το ηχείο τροφοδοτείται με ένα σήμα λευκού θορύβου και ηχογραφείται η έξοδος. Η ηχογραφημένη έξοδος αποθηκεύεται σε αρχείο .wav μέσω της



Σχήμα 1.1\_ Ηλεκτροακουστική διάταξη για την οποία μετρήθηκε η κρουστική απόκριση. (Εργαστήριο Ακουστικής, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας).

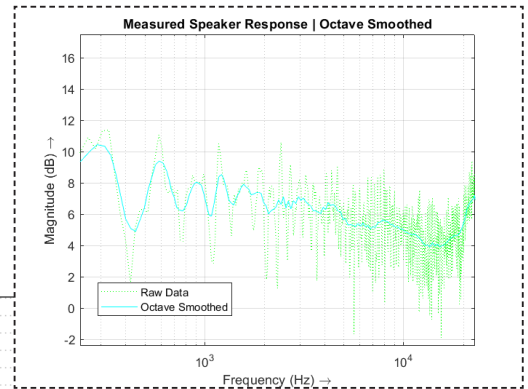
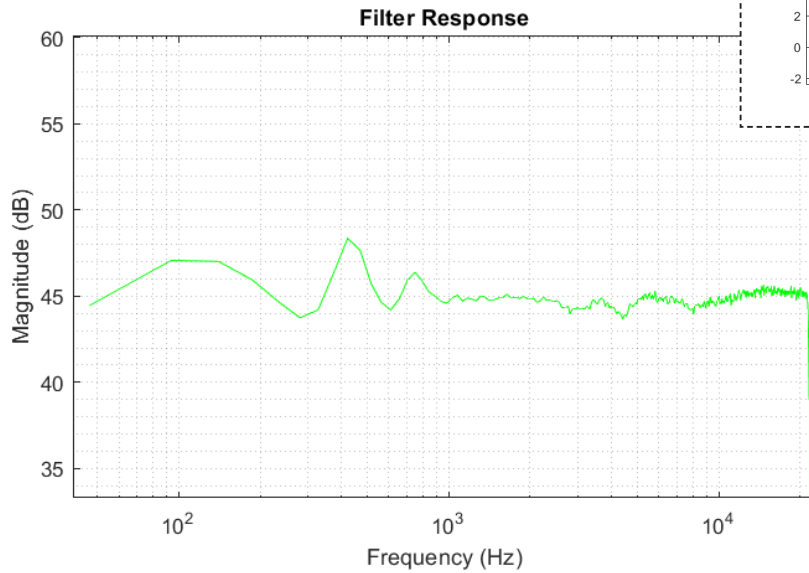




Σχήμα 1.2\_ Κρουστική και Συχνотική απόκριση συστήματος, ITE.

κάρτας ήχου. Κατόπιν, το ηχείο διεγείρεται με ένα ημίτονο σάρωσης μέσω του λογισμικού Room EQ Wizard και καταγράφεται η κρουστική του απόκριση. Το ημίτονο σάρωσης επιλέχθηκε ώστε η καταγραφή της κρουστικής απόκρισης, να γίνει σε κάθε συχνότητα του ακουστού φάσματος. Στη συνέχεια καταγράφεται η έξοδος και αποθηκεύεται επίσης σε αρχείο .wav.

Το equalizer που προκύπτει από το σχεδιασμό στη Matlab φιλτράρεται με το σήμα λευκού θορύβου που διέγειρε αρχικά το σύστημα, δίνοντας τη συχνотική απόκριση του φίλτρου. Το ηχείο τροφοδοτείται με αυτό το φίλτρο και ηχογραφείται εκ νέου η έξοδός του.



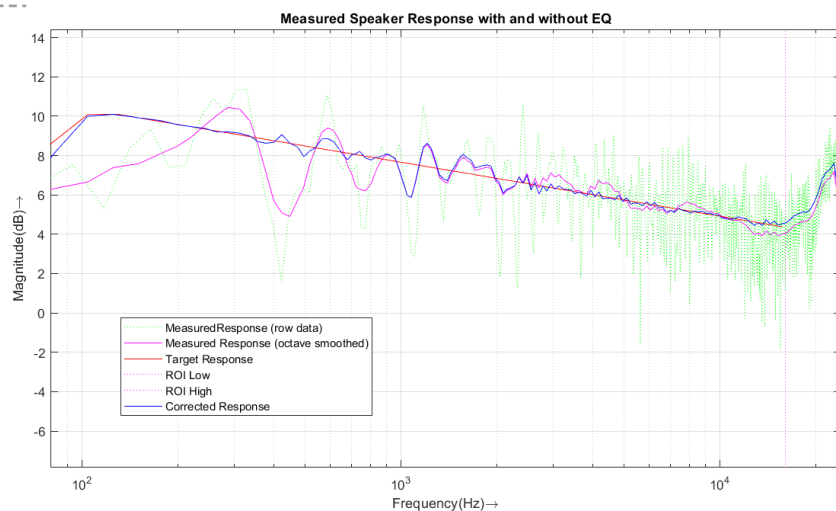
Σχήμα 1.3\_ Συχνотική απόκριση αντίστροφου φίλτρου

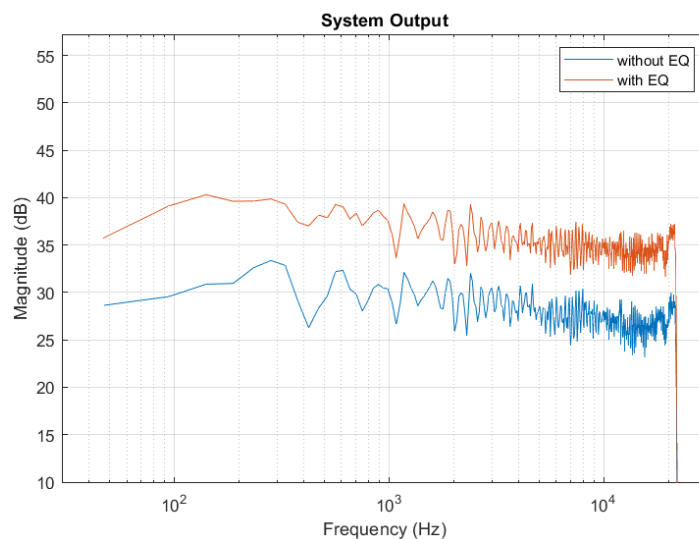
Σύμφωνα με το Σχήμα 1.1 του κεφαλαίου Β (εδώ απεικονίζεται πάνω δεξιά με zoom in και σε σμίκρυνση), το σύστημα παρουσιάζει ελαττωματική συμπεριφορά στη χαμηλή περιοχή έως και περίπου τα 2000 Hz. Πέρα από εκείνο το σημείο παρατηρείται ομαλότερη κατανομή στην ενέργεια του σήματος. Συμπερασματικά, δεν προσεγγίζεται η επίπεδη απόκριση συχνότητας που θα αναμενόταν να έχει ο χώρος ώστε να μην

Σχήμα 1.4\_

Καμπύλες

- α) μετρούμενης απόκρισης
- β) εξομαλυμένης απόκρισης
- γ) επιθυμητής απόκρισης και
- δ) ισοσταθμισμένης απόκρισης





Σχήμα 1.5\_ Αποκρίσεις του ηχείου πριν και μετά την ισοστάθμιση

έχει επίδραση στο σήμα. Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζεται το αντίστροφο φίλτρο που θα αντισταθμίσει τη συχνотική απόκριση του συστήματος στην προβληματική περιοχή. Σε μία πρώτη ανάγνωση παρατηρούνται αντίστροφες βυθίσεις / κορυφές στην κυματομορφή του φίλτρου σε σχέση με την καμπύλη απόκρισης που μετρήθηκε αρχικά.

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες συχνотικής απόκρισης του συστήματος ηχείου - δέκτη με και χωρίς την εφαρμογή του equalizer, σύμφωνα με την εκτίμηση του αλγορίθμου που σχεδιάστηκε στη Matlab. Κατά αυτή την προσέγγιση η ισοσταθμισμένη απόκριση πλησιάζει αρκετά την καμπύλη της επιθυμητής απόκρισης στο συχνотικό εύρος 300 Hz - 1000 Hz, ενώ στο κομμάτι 1 kHz - 2,7 kHz υπάρχει τάυτιση με την καμπύλη της αρχικής μέτρησης.

Ως ένα επιπλέον πείραμα, για να επαληθεύσουμε την ορθότητα της όλης προσέγγισης, το παραμετρικό equalizer που προέκυψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης, χρησιμοποιήθηκε για να φιλτράρει ένα σήμα λευκού θορύβου χωρίς να αλλάξει η θέση του ηχείου ή του μικροφώνου. Το ηχείο τροφοδοτήθηκε με τον φιλτραρισμένο λευκό θόρυβο και ηχογραφήθηκε το αποτέλεσμα. Η κατανομή της ενέργειας στο πεδίο της συχνότητας για τον φιλτραρισμένο θόρυβο αντιστοιχεί στην πορτοκαλί

καμπύλη του Σχήματος 1.5, ενώ η ενεργειακή κατανομή του καθαρού λευκού θορύβου απεικονίζεται στη μπλε.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ολόκληρο το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικούς χρόνους, συνεπώς είχε μεσολαβήσει ένα μεγάλο χρονικό διάστημα από την ημέρα που μετρήθηκε η κρουστική απόκριση του συστήματός μας. Επιπρόσθετα, μολονότι φροντίστηκε να μη μετακινηθούν το ηχείο και το μικρόφωνο από τις θέσεις τους, τα αποτελέσματα της διόρθωσης που επιχειρήθηκε είναι εμφανή, ανεξάρτητα με τις όποιες μικροαλλαγές στο χώρο και κατά συνέπεια στη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος.

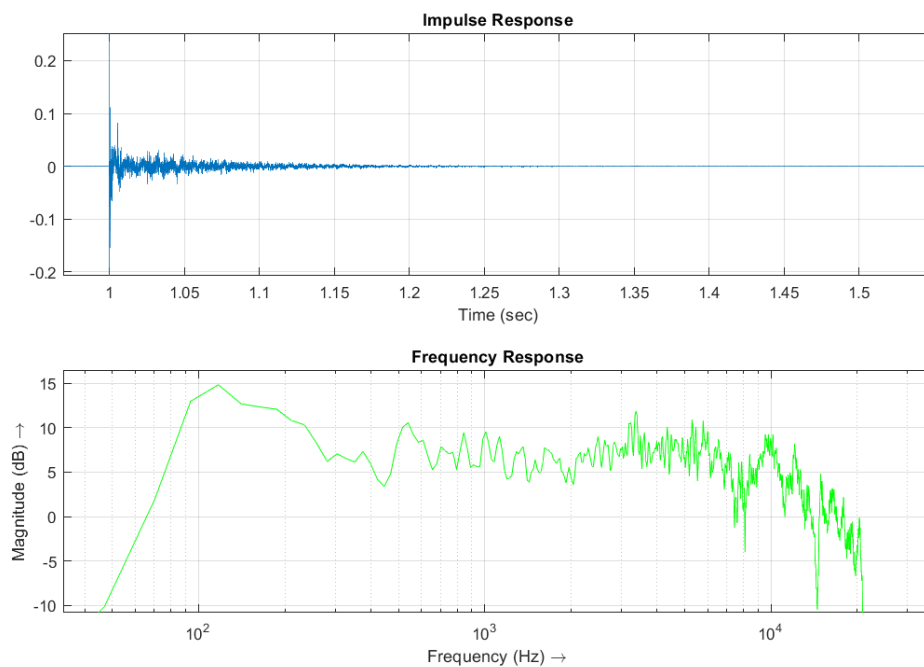
## 1.2 Πειραματική αξιολόγηση στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Ακουστικής του Τμήματος ΜΤΑ

Σε αυτή τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε το αυτοενισχυόμενο ηχείο Syngins D115SP. Το συχνοτικό εύρος για αυτό το ηχείο, είναι στα 45 Hz - 20 kHz. Το μικρόφωνο και εδώ, είναι το Beyerdynamic MM1. Ως κάρτα ήχου χρησιμοποιήθηκε η Scarlet 2i2. Το πείραμα επαναλήφθηκε διατηρώντας την ίδια τοπολογία (Σχήμα 1.6), στο χώρο του Εργαστη-



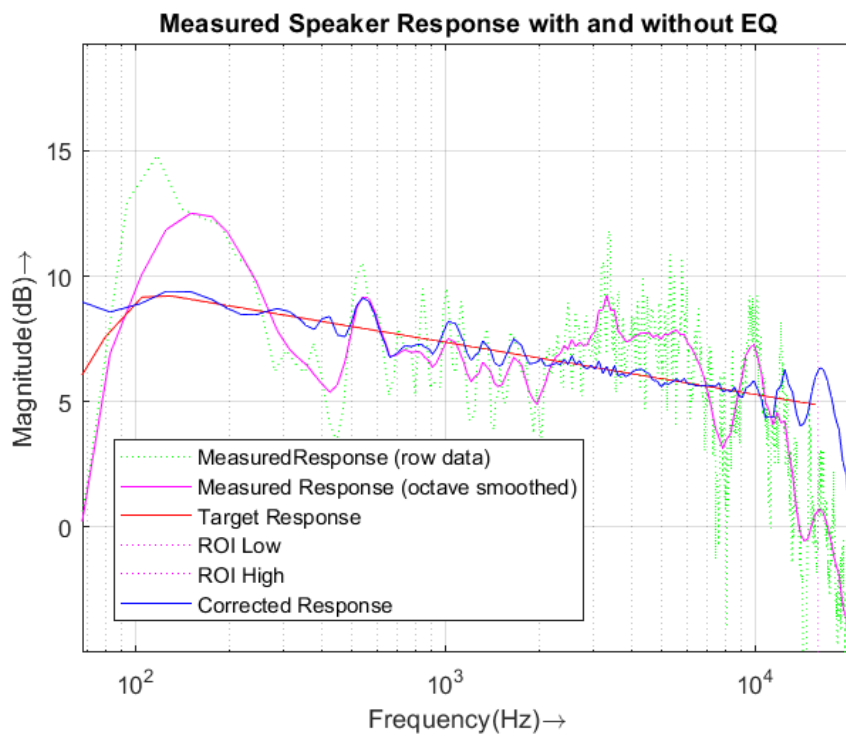
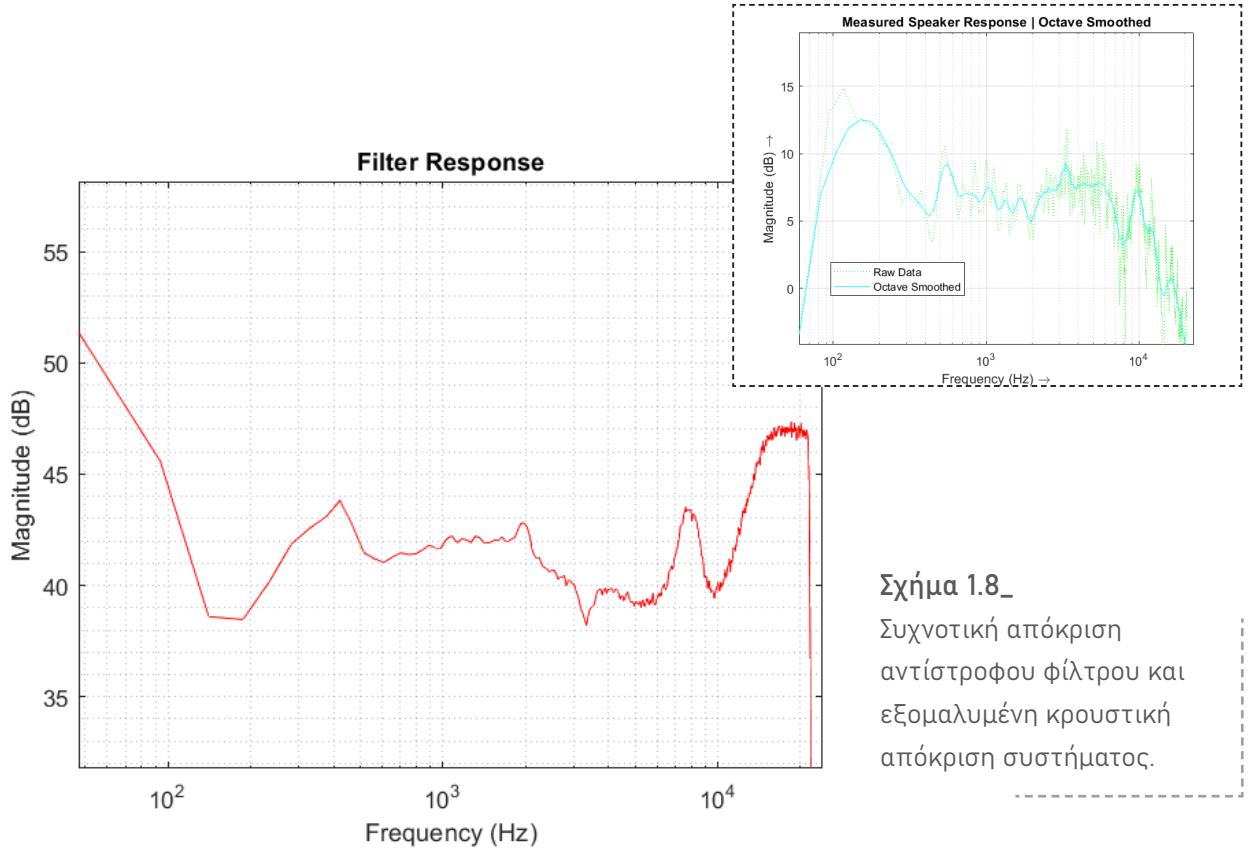
ρίου Εφαρμοσμένης Ακουστικής του τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής που εδρεύει στο Ρέθυμνο. Οι καμπύλες της κρουστικής και συχνοτικής απόκρισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.7. Στα διαγράμματα του Σχήματος 1.8, απεικονίζονται το αντίστροφο φίλτρο, που προέκυψε από το φιλτραρισμένο λευκό θόρυβο και η εξομαλυμένη κρουστική απόκριση του ηχείου. Από τη γραφική παράσταση της απόκρισης, παρατηρείται ανώμαλη

**Σχήμα 1.6\_** Ηλεκτροακουστική διάταξη για την οποία μετρήθηκε η κρουστική απόκριση. (Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Ακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής.)

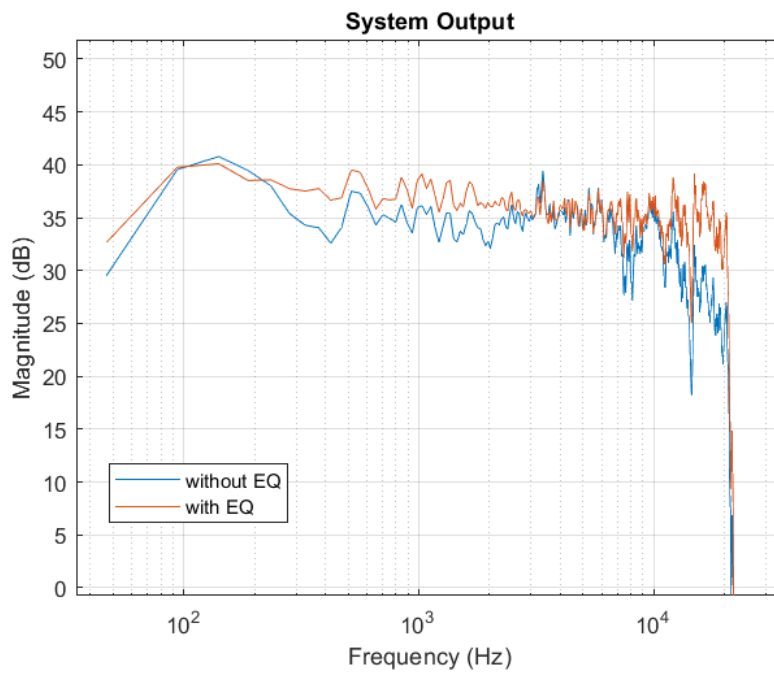


Σχήμα 1.7\_ Κρουστική και Συχνотική απόκριση συστήματος, MTA.

συμπεριφορά στη χαμηλή περιοχή μέχρι τα 600 Hz και πέρα από τα 6 kHz. Στο ενδιάμεσο κομμάτι το σύστημα παρουσιάζει ομαλότερη κατανομή ενέργειας. Και σε αυτή την περίπτωση, το αντίστροφο φίλτρο παρουσιάζει αντίστροφες βυθίσεις / κορυφές σε σχέση με την κυματομορφή της μετρηθείσας κρουστικής απόκρισης. Το Σχήμα 1.9, απεικονίζει τις καμπύλες της συχνотικής απόκρισης του συστήματος πριν και μετά την ισοστάθμιση όπως προέκυψαν από τον κώδικα της Matlab. Το Σχήμα 1.10, απεικονίζει τη συμπεριφορά του συστήματος πριν και μετά την εφαρμογή του equalizer, ύστερα από την ολοκλήρωση των μετρήσεων στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Ακουστικής. Η πορτοκαλί καμπύλη αντιστοιχεί στο ισοσταθμισμένο σύστημα. Η επίδραση του φίλτρου είναι εμφανής στην υψηλότερη περιοχή του φάσματος καθώς παρατηρείται μία ενίσχυση της τάξεως περίπου των 8 dB πέρα από τα 10 kHz.



**Σχήμα 1.9\_** Αποκρίσεις ηχείου πριν και μετά την ισοστάθμιση σύμφωνα με την προσέγγιση της Matlab.



Σχήμα 1.10\_ Αποκρίσεις του ηχείου πριν και μετά την ισοστάθμιση σύμφωνα με τις μετρήσεις στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Ακουστικής.

### 1.3 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών σε δύο διαφορετικούς χώρους, προκύπτει ότι η διεργασία της ισοστάθμισης βελτίωσε τη συμπεριφορά απόκρισης συστήματος ηχείου - δέκτη και στις δύο περιπτώσεις, στη χαμηλή συχνотική περιοχή. Η συμβολή του χώρου είναι αισθητή καθώς φαίνεται η επίδρασή του στα δύο συστήματα, ειδικά κατά την αναπαραγωγή ενός ηχητικού σήματος στο low-end του φάσματος. Κατά μία αρχική ανάγνωση, ο χώρος του ΙΤΕ έχει πιό ουδέτερη επίδραση περίπου από τα 2 kHz και έπειτα. Αυτό δικαιολογείται, καθώς ο συγκεκριμένος χώρος έχει επενδυθεί με ηχοαπορροφητικό υλικό και είναι αρκετά “Ξερός” ακουστικά. Ο χώρος του ΜΤΑ από την άλλη πλευρά, παρουσιάζει τα τυπικά χαρακτηριστικά ενός γραφείου χωρίς κάποια ιδιαίτερη ακουστική διαμόρφωση. Από τις προκύπτουσες συχνотικές αποκρίσεις, παρατηρούνται ικανοποιητικά επίπεδες αποκρίσεις μετά την ισοστάθμιση, στο φάσμα των συχνотήτων που εξετάστηκε. Ιδιαίτερα στη χαμηλή περιοχή, η επίδρασή της ισοστάθμισης είναι εμφανής, καθώς η εικόνα των κυματομορφών δείχνει εξομάλυνση των απότομων κορυφών και βυθίσεων και για τις δύο περιπτώσεις μετρήσεων.



## Βιβλιογραφία

---

- Asimakis, N., Adam, M. (2015), *Σήματα και Συστήματα*, Κάλλιπος, Αθήνα.
- Ballou, G., (2008), *Handbook for Sound Engineers*, Focal Press / Elsevier, Burlington, USA.
- Farina, A., *Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique*, presented at the 108th Audio Engineering Society Convention, 2000.
- Floros, A., (2011), *Ηλεκτροακουστική & Ακουστική Χώρων*, Κέρκυρα.
- Hatziantoniou, P., (2005), *Ανάπτυξη μεθόδων ψηφιακής ισοστάθμισης για ηλεκτροακουστικές εφαρμογές · διδακτορική διατριβή*, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Havelock, D., Kuwano, S., Vorländer, M., (2008), *Handbook of Signal Processing in Acoustics · Volume 1*, Springer Science + Business Media, New York.
- Heyser, R., (1967), *Acoustical Measurements by Time Delay Spectrometry*, Journal of the Audio Engineering Society, vol. 15, no. 4, pp. 370-382, 1967.
- Heyser, R., (1967), *Loudspeaker Phase Characteristics and Time Delay Distortion: Part 1*, Reprinted from Journal of the Audio Engineering Society, vol. 17, no. 1, pp. 30-41, 1969.
- Holters, M., Corbach, T., Zölzer, U., *Impulse response measurement techniques and their applicability in the real world*, Proc. of the 12th Int. Conference on Digital Audio Effects, 2009.
- Kalozakis, S., (2021), *Ηχοληψία III*, Ρέθυμνο.
- Martin, G., Mus, B., Mus, M., (2004), *Introduction to Sound Recording*.
- Matlab, Optimization Toolbox User's Guide*, Mathworks 1990 - 2023.
- Mourjopoulos, I., *Digital equalization methods for audio systems*, presented at the 84th Audio Engineering Society Convention, 1988.
- Mourjopoulos, J., *Digital Equalization of Room Acoustics*, Journal of the Audio Engineering Society, vol. 42, no. 11, 1994.

Mourjopoulos, I., (2022), *Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτροακουστικής*, Πάτρα.

Müller, S., Massarani, P., *Transfer Function Measurement with Sweeps · Director's cut including previously unreleased material and some corrections*, the original has been published in *Journal of the Audio Engineering Society*, 2001, p. 443-471.

Novak, A., Rund, F., Honzik, P., (2016), *Impulse response measurements using MLS technique on nonsynchronous devices*, Laboratoire d' Acoustique, Le Mans Université, CNRS - UMR 6613.

Papadakis, N., Potamitis, I., (2012), *Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος · Εργαστήρια*, Ρέθυμνο.

Paraskeuas, M., (2018), *Σήματα και Συστήματα με Matlab, Συνεχούς και Διακριτού Χρόνου*, Tziola Publications, Θεσσαλονίκη.

Proakis, J., Manolakis, D., (2010), *Ψηφιακή Ανάλυση Σήματος, Αρχές · Αλγόριθμοι · Εφαρμογές*, εκδόσεις ΙΩΝ.

Skarlatos, D., (2018), *Εφαρμοσμένη Ακουστική, Ηχοπροστασία*, Gotsis, Πάτρα.

Skodras, A., Anastasopoulos, B., (2003), *Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων και Σημάτων, Τόμος Β'*, Πάτρα.

Stan, G., Embrechts, J., Archambeau, D., *Comparison of different impulse response measurement technique*, *Journal of the Audio Engineering Society*, 2002.

Stefanakis, N., Kehrakos, K., (2021), *Ηλεκτροακουστική*, Ρέθυμνο.

Xenikakis, D., (2017), *Ηχοληψία II*, Ρέθυμνο.

Yarlagadda, R., Hershey, J., (1997), *Hadamard Matrix Analysis and Synthesis, with applications to communications and signal/image processing*, Springer Science + Business Media, New York.