

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ
ΗΧΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΡΩΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΔΡ ΕΥΘΥΜΙΟΣ ΜΠΑΚΑΡΕΖΟΣ

ΡΕΘΥΜΝΟ, 2009

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ Ευθύμιο Μπακαρέζο για όλη την βοήθεια που μου προσέφερε, τον Προϊστάμενο του τμήματός μας Δρ Νεκτάριο Παπαδογιάννη για την ευκαιρία που μου δόθηκε να χρησιμοποιήσω το Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας, τον επιβλέποντα μου στην Ε.Α.Β. Ιωάννη Τσιμπερίδη και τέλος την οικογένεια μου για την υποστήριξη και την αγάπη που πάντα μου δείχνουν.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΗΧΩΝ	3
2.1. ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ	3
2.2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΗΧΩΝ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ	5
2.3. ΟΠΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΗΧΩΝ	8
2.3.1. Διατάξεις ανίχνευσης εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ	9
2.3.2. Συμβολομετρικές διατάξεις δέσμης λέιζερ	10
2.3.2.1. Συμβολή του φωτός	11
2.3.2.2. Το συμβολόμετρο Michelson	15
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ	17
3.1. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΗΧΩΝ ΜΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΚΤΡΕΠΟΜΕΝΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΛΕΙΖΕΡ	18
3.1.1. Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων	18
3.1.2. Αποτελέσματα & ανάλυση	20
3.2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΗΧΩΝ ΜΕ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟ MICHELSON – ΔΟΝΟΥΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	23
3.2.1. Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων	23
3.2.2. Αποτελέσματα & ανάλυση	24
3.3. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΗΧΩΝ ΜΕ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟ MICHELSON – ΑΠ' ΕΥΘΕΙΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ	27
3.3.1. Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων	27
3.3.2. Αποτελέσματα & ανάλυση	27
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	31
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	34
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	34

Περίληψη

Μικρόφωνα λέιζερ ονομάζονται οι διατάξεις/συσκευές που χρησιμοποιούν δέσμη λέιζερ για να ανιχνεύσουν ηχητικές δονήσεις και στη συνέχεια να τις μετατρέψουν σε ηλεκτρικό σήμα. Εδώ υλοποιήθηκαν και μελετήθηκαν τα κύρια χαρακτηριστικά πρότυπων τέτοιων διατάξεων. Με τον όρο «πρότυπων» εννοείται ότι σκοπός ήταν η επίδειξη της αρχής λειτουργίας τους και η διερεύνηση των βασικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών των διατάξεων αυτών. Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν ταυτόχρονα, 24 συνολικά, ηχητικά δείγματα ανθρώπινης ομιλίας, από τις υπό μελέτη διατάξεις και από μικρόφωνο αναφοράς για σύγκριση. Τα ηχογραφημένα δείγματα συγκρίθηκαν τόσο ως προς το ακουστικό τους περιεχόμενο όσο και ως προς το συχνοτικό τους περιεχόμενο, έπειτα από σχετική ανάλυση. Η σύγκριση του ακουστικού περιεχομένου είχε να κάνει με το αν και κατά πόσο ένας παρατηρητής μπορεί να αντιληφθεί την καταγεγραμμένη ομιλία. Η συχνοτική σύγκριση, ως πιο αντικειμενική μέθοδος, σύγκρινε τα αποτελέσματα των συχνοτικών αναλύσεων που υπέστησαν συγκεκριμένοι ήχοι, από τα ηχογραφημένα δείγματα, με τα αντίστοιχα που ηχογραφήθηκαν από το μικρόφωνο αναφοράς, δηλαδή γίνεται απευθείας σύγκριση των συχνοτικών περιεχομένων τους. Εν τέλει, γίνεται μία αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εν λόγω μελέτης με την μορφή συμπερασμάτων καθώς και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω εργασία πάνω στο αντικείμενο της μελέτης και βελτίωση των διατάξεων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καταγραφή ήχων γίνεται σήμερα κυρίως με τη χρήση μικροφώνων, τα οποία μπορούν να διαχωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, δυναμικά και πυκνωτικά, ανάλογα με τον τρόπο που ο ήχος μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει μεμβράνη (μηχανικό δονούμενο μέρος), η οποία δονείται λόγω της πρόσπτωσης σε αυτήν των ηχητικών κυμάτων. Στα δυναμικά μικρόφωνα, αυτή η δόνηση της μεμβράνης μεταφέρεται σε πηνίο που είναι συνδεδεμένο με αυτήν. Το πηνίο κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, και παράγεται κατ' αυτόν τον τρόπο ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με το προσπίπτον ηχητικό κύμα. Στα πυκνωτικά μικρόφωνα, η μεμβράνη αυτή αποτελεί ουσιαστικά τον ένα οπλισμό πυκνωτή, οπότε η κίνησή της συνεπάγεται αλλαγή της χωρητικότητάς του, πάλι με αποτέλεσμα δημιουργία ηλεκτρικού σήματος ανάλογου με το προσπίπτον ηχητικό κύμα.

Η ύπαρξη μηχανικού δονούμενου μέρους είναι ένας από τους λόγους που υπάρχει περιορισμός στην λειτουργία και την ευαισθησία των μικρόφωνων. Επίσης, τα μικρόφωνα αυτά δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσουν ήχους από αρκετά μεγάλη απόσταση.

Η χρήση διατάξεων που χρησιμοποιούν δέσμη λέιζερ για την ανίχνευση ήχων (μικρόφωνα λέιζερ) προσφέρει, αφ' ενός την δυνατότητα καλύτερης ευαισθησίας, και αφ' ετέρου την δυνατότητα ανίχνευσης ήχων από μεγάλη απόσταση.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή και ο έλεγχος καλής λειτουργίας πρότυπων τέτοιων διατάξεων. Με τον όρο «πρότυπες» εννοείται ότι στην παρούσα εργασία στόχος είναι ακριβώς η απόδειξη της αρχής λειτουργίας των διατάξεων αυτών και η διερεύνηση των βασικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών τους, και όχι η κατασκευή πλήρως λειτουργικών διατάξεων προς εμπορική χρήση. Για την ανίχνευση ήχων σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν συμβολομετρικές διατάξεις λέιζερ αλλά και διάταξη που βασίζεται στην εκτροπή (deflection) δέσμης λέιζερ από δονούμενη επιφάνεια. Πραγματοποιήθηκε έλεγχος καλής λειτουργίας των διατάξεων, που συνίσταται κυρίως στην ποιοτική σύγκριση του καταγεγραμμένου ηχητικού γεγονότος από τις διατάξεις αυτές με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο. Επιπλέον, έγινε συχνοτική ανάλυση μεμονωμένων ηχητικών δειγμάτων (φθόγγων), ηχογραφημένων ταυτόχρονα από μικρόφωνο αναφοράς και από την εκάστοτε διάταξη ανίχνευσης, και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν ως προς το συχνοτικό τους περιεχόμενο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προαναφερθείσες διατάξεις ανίχνευσης ήχων. Αρχικά γίνεται μια γενική επισκόπηση της κυματικής φύσης του ήχου, ενώ περιγράφονται και οι βασικές κατηγορίες και αρχές λειτουργίας των συμβατικών μικροφώνων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια σημεία της συμβολής του φωτός και η αρχή λειτουργίας των οπτικών διατάξεων που υλοποιήθηκαν. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και η ανάλυσή τους, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα των μελετών και προτείνονται βήματα που μπορούν να ακολουθηθούν σε επόμενα στάδια. Τέλος, επισυνάπτεται σε ηλεκτρονική μορφή το καταγεγραμμένο ηχητικό υλικό και μαζί δίνεται πίνακας συσχέτισης (Παράρτημα I σε CD).

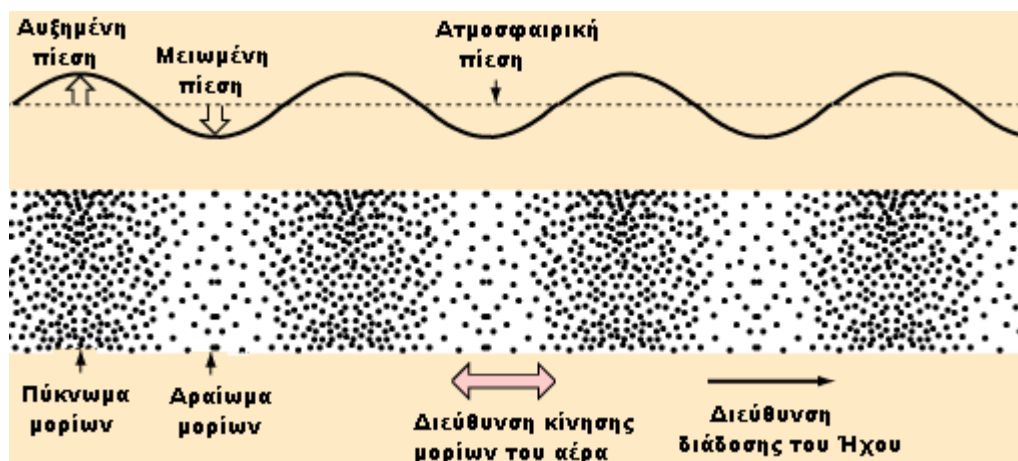
2. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΗΧΩΝ

2.1. ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Ήχος ορίζεται ως η μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μέσο που μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις (π.χ. ελαστικότητας, εσωτερικής τριβής) και έχει τέτοιο χαρακτήρα ώστε μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα.

Όταν μία επιφάνεια δονείται ο αέρας γύρω της επηρεάζεται από την κίνηση αυτή ως εξής: καθώς η επιφάνεια κινείται προς μία κατεύθυνση ωθεί προς αυτή την κατεύθυνση τα μόρια του αέρα που βρίσκονται σε επαφή με αυτή, τα μόρια αυτά με την σειρά τους ωθούν τα γειτονικά τους μόρια προς την ίδια κατεύθυνση κ.ο.κ. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης ηρεμίας. Η διαταραχή αυτή διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα στον αέρα.

Αντίθετα στην άλλη μεριά της επιφάνειας λόγω του ότι η ταχύτητα των μορίων του αέρα είναι πεπερασμένη θα έχουμε μείωση της ατμοσφαιρικής πίεσης ηρεμίας σε ίσο ποσοστό. Καθώς η επιφάνεια επιστρέφει στην αρχική της θέση με τον ίδιο μηχανισμό θα δημιουργηθεί υπερπίεση στην αριστερή πλευρά της επιφάνειας και υποπίεση στην δεξιά. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται περιοδικά και έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή και διάδοση ενός μηχανικού κύματος, όπως φαίνεται (Σχήμα 1), το οποίο όταν φτάσει στο αυτί θα διεγείρει το αισθητήριο δίνοντας το αίσθημα του ήχου.



Σχήμα 1: Μεταβολές πίεσης του αέρα λόγω διάδοσης ηχητικών κυμάτων.

Όπως είναι αντιληπτό από τα παραπάνω, τα ηχητικά κύματα, όταν αυτά διαδίδονται στον αέρα, μεταφράζονται σε περιοδικές αυξομειώσεις της **ατμοσφαιρικής πίεσης, P** , οι οποίες είναι ίσες με την **ακουστική πίεση, p** . Η ακουστική πίεση είναι το μέγεθος που μετρούν τα μικρόφωνα.

Άλλες βασικές φυσικές ποσότητες που χαρακτηρίζουν τα ηχητικά κύματα και χρησιμοποιούνται στη μαθηματική τους περιγραφή είναι οι εξής :

Το **μήκος κύματος, λ** , που είναι η απόσταση μεταξύ δύο μέγιστων ή ελάχιστων πίεσης, ο **κυματάριθμος, k** , που ισούται με $2\pi/\lambda$, η **συχνότητα του ήχου, f** , που είναι η συχνότητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης λόγω της διάδοσης του ηχητικού κύματος, η **ταχύτητα των σωματιδίων, u** , που είναι η ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης, η **ταχύτητα όγκου, U** , που είναι ο ρυθμός ροής του μέσου διάδοσης από μία επιφάνεια εμβαδού, S , κάθετη στην ταχύτητα ροής, και η **ταχύτητα του ήχου, c** , που είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής (φασική ταχύτητα του κύματος) στο μέσου διάδοσης.

Έστω λοιπόν επίπεδο ηχητικό κύμα που διαδίδεται μόνο κατά μία διεύθυνση, π.χ. την διεύθυνση x , άρα το επίπεδο yz είναι κάθετο στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος και συνεπώς η τιμή της πίεσης σε αυτό είναι ίδια για συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Πρακτικά επίπεδο θεωρείται ένα κύμα όταν παράγεται, από πηγή της οποίας η επιφάνεια εκπομπής είναι ένα επίπεδο για μικρές αποστάσεις ή από σημειακή πηγή που βρίσκεται σε πολύ μεγάλη (θεωρητικά άπειρη) απόσταση, όπου οι σφαιρικές επιφάνειες κύματος εκφυλίζονται σε επίπεδες.

Για την περίπτωση επίπεδου κύματος που διαδίδεται σε μέσο χωρίς απώλειες η πίεση του ήχου ικανοποιεί την παρακάτω εξίσωση [1] :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad 2.1$$

Η εξίσωση 2.1 είναι η μονοδιάστατη κυματική εξίσωση των ηχητικών κυμάτων. Η γενική της λύση είναι της μορφής:

$$p(t) = p_{01}e^{i(\omega t - kx)} + p_{02}e^{i(\omega t + kx)} \quad 2.2$$

όπου $p(t)$ είναι η στιγμιαία ηχητική πίεση του κύματος και ω η κυκλική συχνότητα ($\omega = 2\pi f$). Η παραπάνω λύση παριστά δύο κύματα που διαδίδονται σε αντίθετες διευθύνσεις, ένα κύμα πλάτους p_{01} στην διεύθυνση $+x$ και ένα κύμα πλάτους p_{02} στην διεύθυνση $-x$. Αν μας ενδιαφέρει μόνο η διεύθυνση $+x$ τότε η 2.2 παίρνει την μορφή:

$$p(t) = p_0 e^{i(\omega t - kx)} = p_0 e^{ik(ct - x)} \quad 2.3$$

Λόγω του ότι οποιαδήποτε παρατηρήσιμη ποσότητα είναι πάντα πραγματική, το πραγματικό μέρος της 2.3 μπορεί να γραφτεί με την μορφή:

$$p(t) = p_0 \cos(\omega t - kx) \quad 2.4$$

2.2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΗΧΩΝ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ

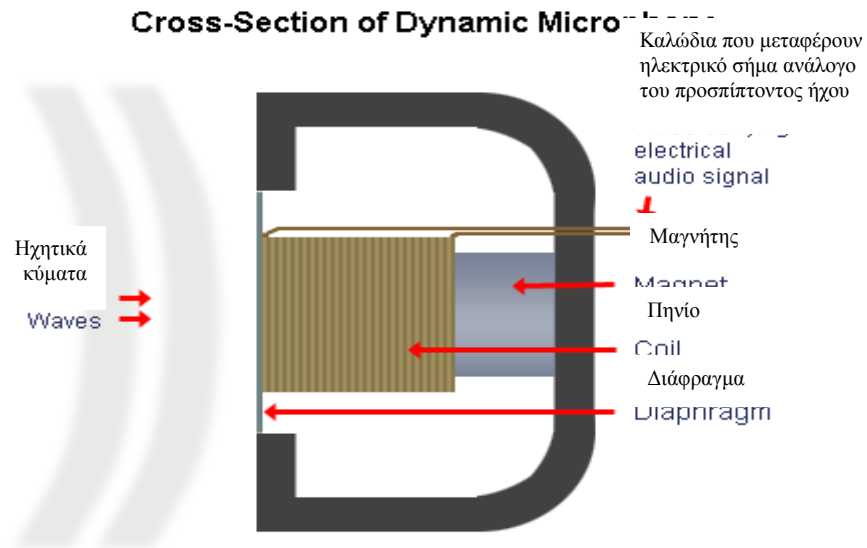
Μικρόφωνα ονομάζονται οι συσκευές που έχουν κατασκευαστεί με σκοπό την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας, που διαδίδεται στον αέρα υπό την μορφή ηχητικών κυμάτων, σε ηλεκτρική. Δηλαδή να μετατρέπουν τον ήχο σε ηλεκτρικό σήμα. Η πλειοψηφία των μικροφώνων που χρησιμοποιούνται σήμερα χωρίζονται κατά κύριο λόγο σε δύο κατηγορίες, τα *δυναμικά μικρόφωνα* και τα *πυκνωτικά μικρόφωνα*. Τα *δυναμικά μικρόφωνα* με την σειρά τους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες (*μικρόφωνα πηνίου* και *μικρόφωνα ταινίας*), με κοινές αρχές λειτουργίας αλλά διαφορετικό τρόπο υλοποίησης και διαφορετικά χαρακτηριστικά επιδόσεων.

Η λειτουργία των *δυναμικών μικροφώνων* βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, στο φαινόμενο δηλαδή εκείνο κατά το οποίο εμφανίζεται ηλεκτρικό ρεύμα εξαιτίας ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα, είναι το φαινόμενο της ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού, η οποία λαμβάνει χώρα όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ο συγκεκριμένος αγωγός ορίζει.

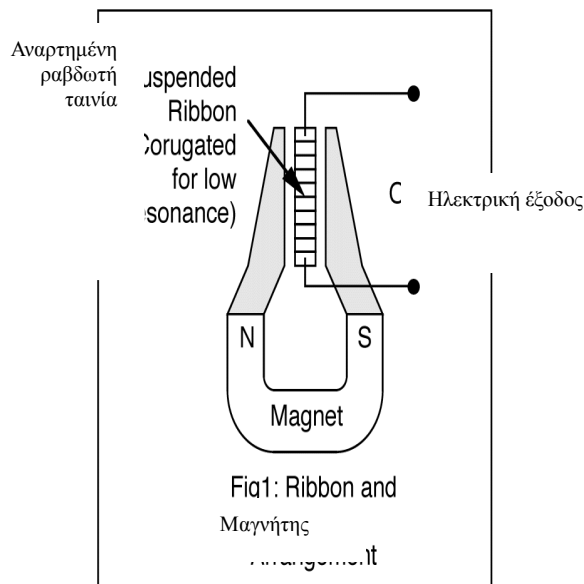
Η πρώτη και πιο διαδεδομένη κατηγορία τέτοιων μικροφώνων είναι αυτή των *μικροφώνων πηνίου* (Σχήμα 2), με την αρχή λειτουργίας τους να έχει ως εξής [2] : ο ήχος, (πυκνώματα και αραιώματα των μορίων του αέρα), προσπίπτει στην μεμβράνη του μικροφώνου, που λειτουργεί ως διάφραγμα. Πάνω σε αυτή την μεμβράνη είναι στερεωμένο ένα κινούμενο επαγωγικό πηνίο, το οποίο βρίσκεται εντός του μαγνητικού πεδίου ενός μόνιμου μαγνήτη. Καθώς το πηνίο κινείται ακολουθώντας την κίνηση της μεμβράνης πάνω στην οποία είναι στερεωμένο, μεταβάλλεται η τάση εξόδου του μικροφώνου ανάλογα με τον ήχο που προσπίπτει στο διάφραγμα του, μετατρέποντας έτσι τον ήχο σε ηλεκτρικό σήμα.

Η δεύτερη κατηγορία *δυναμικών μικροφώνων* είναι αυτή των *μικροφώνων ταινίας* (Σχήμα 3), με την αρχή λειτουργίας τους να έχει ως εξής [2] : ο ήχος, (πυκνώματα και αραιώματα των μορίων του αέρα), προσπίπτει στο διάφραγμα του μικροφώνου, το οποίο είναι μία λεπτή μεταλλική ταινία, η οποία βρίσκεται αναρτημένη εντός του μαγνητικού πεδίου ενός μόνιμου μαγνήτη και είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη στην έξοδο του

μικροφώνου. Ο ήχος δονεί την ταινία και έτσι να μεταβάλλει την τάση εξόδου. Αυτή η μεταβαλλόμενη τάση είναι ο ήχος σε μορφή ηλεκτρικού σήματος.

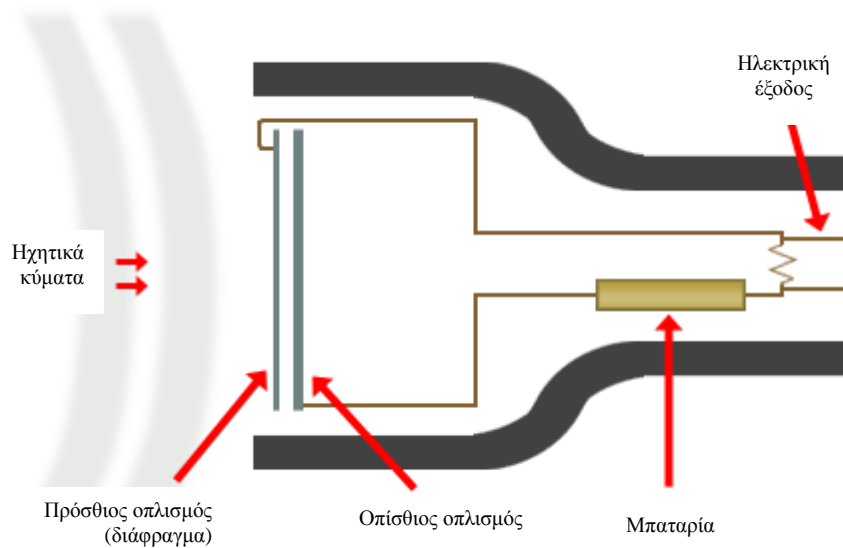


Σχήμα 2: Τομή δυναμικού μικροφώνου πηνίου.



Σχήμα 3: Τομή δυναμικού μικροφώνου ταινίας.

Τα πυκνωτικά μικρόφωνα (Σχήμα 4) βασίζονται στις αρχές λειτουργίας των πυκνωτών και λειτουργούν ως εξής [2] : ο πυκνωτής αποτελείται από δύο γειτονικούς αγωγούς (οπλισμοί) μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται κάποιο μονωτικό υλικό (συνχά μόνο αέρας). Μεταξύ των οπλισμών ενός φορτισμένου πυκνωτή αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού. Η διαφορά δυναμικού μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των δύο οπλισμών του πυκνωτή.



Σχήμα 4: Τομή πυκνωτικού μικροφώνου.

Το διάφραγμα του μικροφώνου παίζει τον ρόλο του ενός εκ των δύο οπλισμών ενός φορτισμένου πυκνωτή. Οι δονήσεις του διαφράγματος, που προκαλούνται από την πρόσπτωση των ηχητικών κυμάτων σε αυτό, μεταφράζονται σε μεταβολές στην απόσταση μεταξύ των δύο οπλισμών του πυκνωτή μεταβάλλοντας την μεταξύ τους διαφορά δυναμικού η οποία είναι ουσιαστικά η τάση εξόδου του μικροφώνου. Με αυτό τον τρόπο ο ήχος μετατρέπεται σε ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό σήμα.

Τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι παραπάνω τύποι μικροφώνων απορρέουν από τους περιορισμούς στους οποίους υπόκεινται τα μηχανικά (κινούμενα) μέρη τους. Στα δυναμικά μικρόφωνα πηνίου το κινούμενο πηνίο προσφέρει αυξημένη αντοχή αλλά μεγάλη αδράνεια και άρα δυσκολία απόδοσης ήχων μικρής έντασης ή υψηλής συχνότητας. Στα πυκνωτικά μικρόφωνα η μειωμένη αδράνεια του διαφράγματος αποδίδει αυξημένη πιστότητα και ευκρίνεια στον ήχο αλλά έχει σαν κόστος την μειωμένη αντοχή τόσο απέναντι σε περιβαλλοντικές συνθήκες όσο και απέναντι σε ήχους υψηλής έντασης. Τα δυναμικά

μικρόφωνα ταινίας αποτελούν έναν συμβιβασμό ανάμεσα στις δύο παραπάνω κατηγορίες συνδυάζοντας μέρος τόσο των πλεονεκτημάτων όσο και τον μειονεκτημάτων τους.

2.3. ΟΠΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΗΧΩΝ

Εκτός από τις δύο μεγάλες κατηγορίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, τις τελευταίες δεκαετίες βρίσκονται υπό εφαρμογή και εξέλιξη μερικοί εναλλακτικοί τρόποι προσέγγισης απέναντι στο πρόβλημα της μετατροπής των ηχητικών κυμάτων σε ηλεκτρικό σήμα, οι οποίοι βασίζονται στη χρήση λέιζερ για την ανίχνευση των ήχων. Ορισμένες ιδιότητες του φωτός λέιζερ (π.χ. κατευθυντικότητα, συμφωνία, μονοχρωματικότητα, λαμπρότητα) [3] το έκαναν θεωρητικά ιδανικό μέσο για την ανίχνευση του ήχου και την μετατροπή του σε ηλεκτρικό σήμα. Οι εφαρμογές δεν άργησαν να επιτευχθούν και τα μικρόφωνα λέιζερ είναι εδώ και χρόνια πραγματικότητα. Τέτοιες συσκευές λειτουργούν ανιχνεύοντας δέσμη λέιζερ εκτρεπόμενη (deflected) από δονούμενη επιφάνεια, συνέπεια πρόσπτωσης σε αυτήν ηχητικών κυμάτων, και βασίζονται είτε στην ανάλυση μετατοπίσεων της δέσμης στο αισθητήριο είτε στη συμβολομετρική ανίχνευση αυτής.

Τα πλεονεκτήματα των εν λόγω συσκευών συνίστανται κυρίως στην μεγάλη απόσταση λειτουργίας και την ικανότητα ανίχνευσης πολύ μικρών μετατοπίσεων, ιδίως όταν μεταξύ της ηχητικής πηγής και του παρατηρητή παρεμβάλλονται σχετικά λεπτές επιφάνειες (π.χ. πόρτες, παράθυρα, ακόμα και λεπτοί τοίχοι). Αυτά τα χαρακτηριστικά έτρεψαν την πλειοψηφία αυτών των τεχνικών να έχουν βρει εφαρμογή στους τομείς της κατασκοπείας και παρακολούθησης. Η εφαρμοσμένη χρήση τους έχει γίνει ουκ ολίγες φορές θέμα επίδειξης της βιομηχανίας του κινηματογράφου σαν αντικείμενο εντυπωσιασμού του κοινού απέναντι στην ανεπτυγμένη στρατιωτική τεχνολογία και το πέπλο μυστηρίου που την καλύπτει.

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν τέτοιες πρότυπες διατάξεις με χρήση δέσμης λέιζερ, και έγινε επίδειξη της καλής λειτουργίας τους. Η πρώτη διάταξη βασίζεται στην ανίχνευση μικρο-αλλαγών στην πορεία της εκτρεπόμενης δέσμης από δονούμενη επιφάνεια. Οι υπόλοιπες διατάξεις είναι συμβολομετρικές διατάξεις όπου έγινε χρήση συμβολομέτρου Michelson, με δύο διαφορετικούς τρόπους υλοποίησης: (α) με την δονούμενη επιφάνεια να αποτελεί μέρος του συμβολομέτρου, και (β) απ' ευθείας ανίχνευση ηχητικών κυμάτων από τη δέσμη λέιζερ, χωρίς ανάγκη δονούμενης επιφάνειας.

Η παρουσίαση των αρχών λειτουργίας των πειραματικών διατάξεων αυτών καθώς και των εννοιών που τις διέπουν είναι το αντικείμενο του υπολοίπου του παρόντος κεφαλαίου.

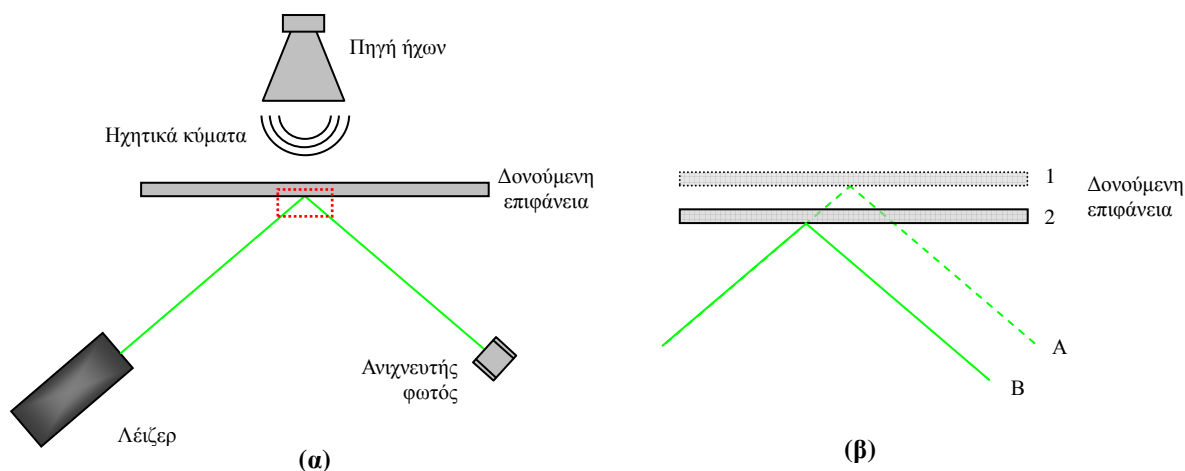
Με τον όρο «πρότυπες» εννοείται ότι στην παρούσα εργασία στόχος είναι ακριβώς η απόδειξη της αρχής λειτουργίας των διατάξεων αυτών και η διερεύνηση των βασικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών τους, και όχι η κατασκευή πλήρως λειτουργικών διατάξεων προς εμπορική χρήση.

2.3.1. Διατάξεις ανίχνευσης εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του φωτός λέιζερ είναι η κατευθυντικότητα του, δηλαδή το γεγονός ότι η δέσμη λέιζερ είναι χωρικά συγκεντρωμένη και δεν παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις καθώς αυτή διαδίδεται σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό το καταφέρνουν σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό οι συσκευές λέιζερ, ανάλογα κατά κύριο λόγο από την κατασκευή της οπτικής κοιλότητας που χρησιμοποιούν [3], και κατά δεύτερο λόγο σε οπτικές διατάξεις που έπονται της εξόδου τους. Την ιδιότητα αυτή εκμεταλλεύονται οι διατάξεις ανίχνευσης ήχου μέσω ανάκλασης δέσμης λέιζερ από δονούμενη επιφάνεια. Για παράδειγμα, το χαρακτηριστικό κινηματογραφικό σκηνικό κατά το οποίο η «ομάδα παρακολούθησης» είναι στημένη εκατοντάδες ή και χιλιάδες μέτρα μακριά από τον υπό παρακολούθηση «στόχο» και ακούει με κάθε λεπτομέρεια τα λεγόμενα του, σημαδεύοντας με ένα λέιζερ το παράθυρο της «κρυψόνας» του, είναι απόλυτα ρεαλιστικό ακόμα και αν ακούγεται υπερβολικό. Κάτι τέτοιο θα ήταν σχεδόν ή και παντελώς αδύνατο με την χρήση συμβατικών μικροφώνων λόγω του ότι ένας ήχος έντασης ανθρώπινης ομιλίας δεν είναι ανιχνεύσιμος από τέτοια απόσταση λόγω της εξασθένησης στην οποία υπόκειται ταξιδεύοντας μέσα στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Εδώ (Σχήμα 5.α) φαίνεται η αρχή λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης, η οποία έχει ως εξής: μια δέσμη λέιζερ προσπίπτει σε μια επιφάνεια και ανακλάται από αυτήν, με την ανακλώμενη δέσμη να ανιχνεύεται από φωτοευαίσθητο στοιχείο. Ηχητικά κύματα προερχόμενα από πηγή προσπίπτουν στην επιφάνεια δονώντας την. Ως συνέπεια, η ανακλώμενη δέσμη εκτρέπεται και ακολουθεί διαφορετική πορεία, ανάλογα με την χρονική στιγμή κατά την οποία θα ανακλαστεί από την δονούμενη επιφάνεια. Αυτό φαίνεται καλύτερα εάν πάρουμε δυο διαφορετικές χρονικές στιγμές (θέσεις 1 & 2) της δόνησης της επιφάνειας (Σχήμα 5.β), όπου και φαίνεται με σαφήνεια ότι η πορεία της ανακλώμενης δέσμης αλλάζει κατά την διάρκεια της ταλάντωσης (πορεία A & B). Κατά συνέπεια, η ανακλώμενη δέσμη, και συγκεκριμένα η εκτροπή αυτής, μεταφέρει πληροφορία για τον ήχο. Εάν αυτές οι αλλαγές στην πορεία της ανακλώμενης δέσμης ανιχνευθούν (π.χ. με μια φωτοδίοδο), και μεταφραστούν σε ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό σήμα, τότε το σήμα

αυτό θα είναι ανάλογο του ήχου που δονεί την επιφάνεια. Αυτό το ηλεκτρικό σήμα μπορεί να καταγραφεί και να αναπαραχθεί με μεγάλη ευκολία, με χρήση αναλογικών ή ψηφιακών μέσων. Λόγω της κατευθυντικότητας του φωτός λέιζερ η παραπάνω διαδικασία είναι εφικτό να εφαρμοστεί από πολύ μεγάλη απόσταση.



Σχήμα 5: (α) Διάταξη ανίχνευσης ανακλώμενης δέσμης λέιζερ από δονούμενη επιφάνεια, (β) λεπτομέρεια διάταξης (κόκκινο πλαίσιο) σε μεγέθυνση.

2.3.2. Συμβολομετρικές διατάξεις δέσμης λέιζερ

Οι συμβολομετρικές διατάξεις δέσμης λέιζερ για την ανίχνευση ήχων βασίζονται στη συμβολή δύο δεσμών οι οποίες έχουν προέλθει από την ίδια αρχική πηγή λέιζερ. Σε γενικές γραμμές η αρχή λειτουργίας έχει ως εξής : η δέσμη εξόδου μιας συσκευής λέιζερ χωρίζεται στα δύο, με τη μια δέσμη να οδηγείται απ' ευθείας στον ανιχνευτή. Η δεύτερη δέσμη οδηγείται σε επιφάνεια που δονείται λόγω της πρόσπτωσης σε αυτήν ηχητικών κυμάτων. Στη συνέχεια, η ανάκλασή της οδηγείται στον ανιχνευτή όπου και συμβάλλει με την πρώτη δέσμη, με το αποτέλεσμα της συμβολής να εξαρτάται από τις αλλαγές που έχει επιφέρει η δονούμενη επιφάνεια στη δεύτερη δέσμη. Κατά συνέπεια, το αποτέλεσμα της συμβολής έχει άμεση σχέση με τις ιδιότητες των ηχητικών κυμάτων.

Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω ακολουθεί λεπτομερέστερη περιγραφή του φαινομένου της συμβολής του φωτός, καθώς και του συμβολόμετρου Michelson, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

2.3.2.1. Συμβολή του φωτός

Η συμβολή κυμάτων φωτός είναι το αποτέλεσμα της γραμμικής υπέρθεσης δύο (ή περισσότερων) τέτοιων κυμάτων σε δεδομένο σημείο [4]. Στο σημείο αυτό, η προκύπτουσα ένταση του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός είναι το διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους εντάσεων. Άρα θα μπορούσε κανείς, συνοπτικά, να πει ότι το φαινόμενο της οπτικής συμβολής αντιστοιχεί στην αλληλεπίδραση δύο (ή περισσότερων) κυμάτων φωτός με την προκύπτουσα ένταση να αποκλίνει από το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους εντάσεων.

Η συμβολή οπτικών κυμάτων είναι δυνατή εάν οι οπτικές πηγές (ή τα συμβάλλοντα κύματα) είναι *σύμφωνες*, είναι *μονοχρωματικές* (ή σχεδόν μονοχρωματικές) και η αρχή της *γραμμικής υπέρθεσης* (ή *επαλληλίας*) ισχύει. Τι όμως σημαίνουν αυτά; Όσο αφορά στην *μονοχρωματικότητα*, αυτό σημαίνει ότι οι πηγές (ή τα συμβάλλοντα κύματα) έχουν την ίδια συχνότητα. Η μονοχρωματικότητα είναι μια βασική ιδιότητα του φωτός λέιζερ, γι αυτό το λόγο πηγές λέιζερ είναι ιδανικές για συμβολομετρικές εφαρμογές. Όσο αφορά στην περιγραφή της αρχής της *γραμμικής υπέρθεσης* (ή *επαλληλίας*), αυτή είναι έξω από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, όμως ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία [4-6].

Όσο αφορά στη *συμφωνία* των οπτικών κυμάτων, μπορεί να περιγραφεί, σε πρώτη προσέγγιση, εισάγοντας για κάθε ηλεκτρομαγνητικό (H/M) κύμα τις έννοιες της χωρικής και χρονικής συμφωνίας. Για τον ορισμό της χωρικής συμφωνίας, ας θεωρήσουμε δύο σημεία Π_1 και Π_2 τα οποία, για χρόνο $t = 0$, βρίσκονται πάνω στο ίδιο κυματομέτωπο, και έστω ότι τα αντίστοιχα ηλεκτρικά πεδία είναι $E_1(t)$ και $E_2(t)$. Εξ ορισμού, η διαφορά μεταξύ των φάσεων των δύο πεδίων στο χρόνο $t = 0$, είναι μηδέν. Τώρα, αν αυτή η διαφορά παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή $t > 0$, θα λέμε ότι υπάρχει τέλεια συμφωνία μεταξύ των δύο σημείων. Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε δύο σημεία του H/M κυματομετώπου, θα λέμε ότι το κύμα έχει *ιδανική χωρική συμφωνία*. Στην πράξη, για κάθε σημείο Π_1 , το σημείο Π_2 πρέπει να βρίσκεται μέσα σε κάποια πεπερασμένη περιοχή γύρω από το Π_1 εάν θέλουμε να έχουμε καλό φασικό συσχετισμό. Σ' αυτή την περίπτωση θα λέμε πως το κύμα έχει *μερική χωρική συμφωνία* και, για κάθε σημείο Π , μπορούμε να εισαγάγουμε μια κατάλληλα ορισμένη περιοχή συμφωνίας $S_c(\Pi)$. Συνεπώς, το μήκος συμφωνίας είναι η απόσταση διάδοσης του κύματος μέσα στην οποία το κύμα διατηρεί έναν ορισμένο βαθμό συμφωνίας.

Για να ορίσουμε τώρα την χρονική συμφωνία θεωρούμε το ηλεκτρικό πεδίο του H/M κύματος σε δεδομένο σημείο Π για χρόνους t και $t + \tau$. Εάν, για δεδομένη χρονική

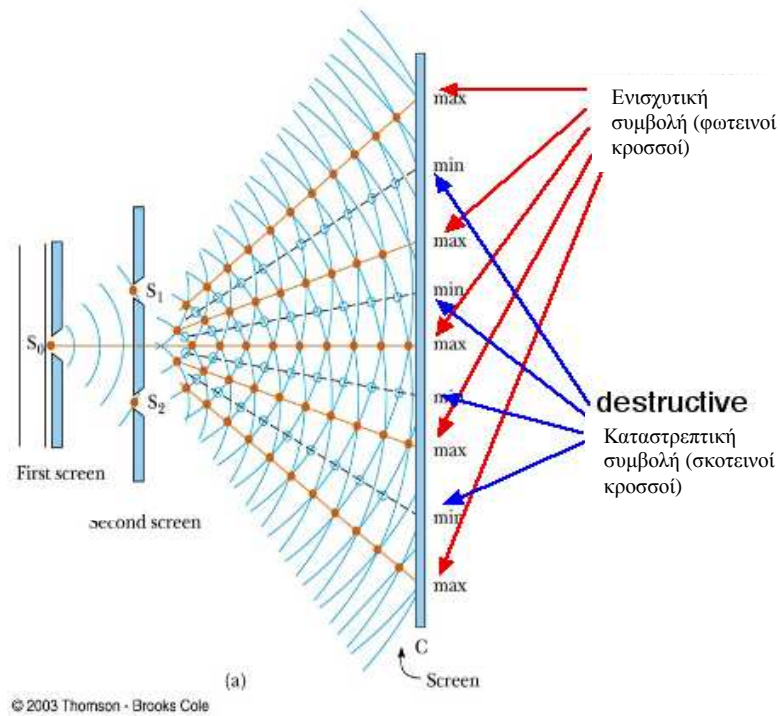
υστέρηση τ , η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τιμών του πεδίου παραμένει η ίδια για κάθε χρονική στιγμή t , θα λέμε πως υπάρχει χρονική συμφωνία για ένα χρονικό διάστημα τ . Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε τιμή του τ , το Η/Μ κύμα θα λέγεται πως έχει *τέλεια χρονική συμφωνία*. Εάν αυτό συμβαίνει για χρονική υστέρηση τ , τέτοια ώστε $0 < \tau < \tau_0$, το κύμα θα λέγεται πως έχει *μερική χρονική συμφωνία*, με χρόνο συμφωνίας ίσο με τ_0 . Η έννοια της χρονικής συμφωνίας συνδέεται άμεσα με την μονοχρωματικότητα της πηγής laser. Συγκεκριμένα, ένα Η/Μ κύμα με χρόνο συμφωνίας τ_0 έχει εύρος ζώνης $\Delta\nu \cong 1/\tau_0$.

Η σημασία του μήκους συμφωνίας για το φαινόμενο της συμβολής, είναι ότι μπορούμε να έχουμε συμβολή μέσα στο μήκος συμφωνίας της πηγής και όχι πέρα απ' αυτό. Συνήθως το μήκος συμφωνίας ορίζεται ως η διαφορά οπτικού δρόμου μιας δέσμης λέιζερ που συμβάλλει με τον εαυτό της (π.χ. σε ένα συμβολόμετρο Michelson), η οποία αντιστοιχεί σε μείωση της ορατότητας των κροσσών συμβολής (fringe visibility) κατά 50%, όπου η ορατότητα των κροσσών, V , ορίζεται ως:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad 2.5$$

όπου I_{\max} και I_{\min} η μέγιστη και η ελάχιστη ένταση των κροσσών αντίστοιχα.

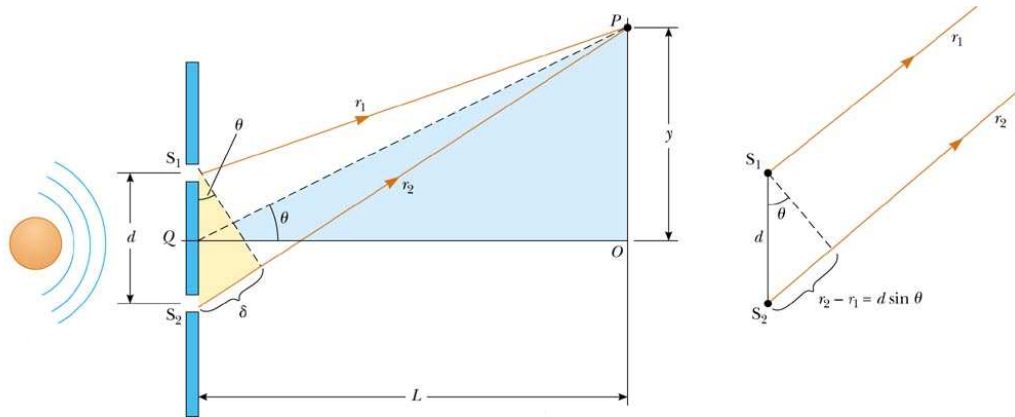
Για την σύντομη, αλλά περιεκτική, περιγραφή του φαινομένου της συμβολής ας θεωρήσουμε το χαρακτηριστικό παράδειγμα του πειράματος διπλής σχισμής του Young [4-6], όπως αποτυπώνεται παρακάτω (Σχήμα 6) :



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση του πειράματος διπλής σχισμής του Young. Οι σχισμές S_1 και S_2 λειτουργούν ως σύμφωνες πηγές μονοχρωματικών κυμάτων που δημιουργούν σχήμα συμβολής στο πέτασμα.

Μονοχρωματικά κύματα φωτός από την πηγή S_0 προσπίπτουν στις στενές και παράλληλες σχισμές S_1 και S_2 , οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση d . Οι σχισμές αυτές λειτουργούν ως σύμφωνες πηγές φωτός. Σε απόσταση L ($\gg d$) από αυτές βρίσκεται πέτασμα, πάνω στο οποίο παρατηρείται σχήμα συμβολής των κυμάτων από τις δύο σχισμές, το οποίο αποτελείται από σειρά φωτεινών και σκοτεινών παράλληλων ζωνών (κροσσοί συμβολής) στα σημεία όπου έχουμε ενισχυτική και καταστρεπτική συμβολή, αντίστοιχα.

Για την ποσοτική περιγραφή του φαινομένου ας θεωρήσουμε τη γεωμετρική του απεικόνιση που δίνεται παρακάτω (Σχήμα 7) :



Σχήμα 7: Γεωμετρική απεικόνιση του πειράματος διπλής σχισμής του Young.

Ας πάρουμε την περίπτωση δύο μονοχρωματικών, σύμφωνων κυμάτων που φτάνουν σε σημείο P του πετάσματος από διαφορετική σχισμή το καθένα. Η φωτεινή ένταση στο σημείο αυτό εξαρτάται από το αποτέλεσμα της συμβολής των δύο κυμάτων. Αυτά έχουν ταξιδέψει διαφορετικό οπτικό δρόμο, με τη διαφορά οπτικού δρόμου, δ , να είναι:

$$\delta = r_2 - r_1 = nd \sin \theta \quad 2.6$$

όπου n ο δείκτης διάθλασης του μέσου διάδοσης. Αν η διαφορά δρόμου είναι μηδέν ή κάποιο ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, λ , του φωτός, τότε τα δύο κύματα είναι σε φάση και έχουμε στο σημείο P ενισχυτική συμβολή. Συνεπώς η συνθήκη για ύπαρξη στο σημείο P φωτεινού κροσσού είναι:

$$\delta = nd \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad 2.7$$

Αντίστοιχα, αν η διαφορά δρόμου είναι περιττό πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος, $\lambda/2$, τότε τα δύο κύματα έχουν διαφορά φάσης 180° και έχουμε στο σημείο P καταστρεπτική συμβολή. Συνεπώς η συνθήκη για ύπαρξη στο σημείο P σκοτεινού κροσσού είναι:

$$\delta = nd \sin \theta = (m + 1/2)\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad 2.8$$

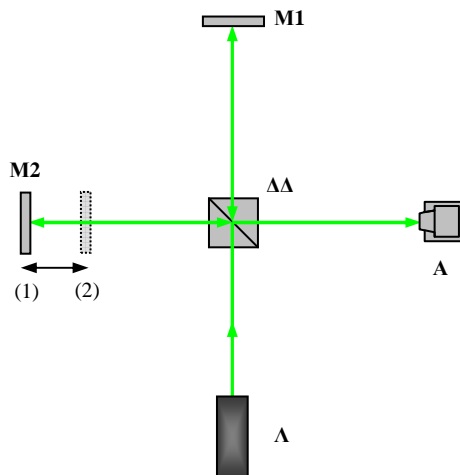
Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η διαφορά φάσης των κυμάτων, φ , στο σημείο P εξαρτάται από τη διαφορά οπτικού δρόμου, δ . Αφού διαφορά οπτικού δρόμου ίση με λ αντιστοιχεί σε διαφορά φάσης 2π (ενισχυτική συμβολή) και διαφορά οπτικού δρόμου ίση με $\lambda/2$ αντιστοιχεί σε διαφορά φάσης π (καταστρεπτική συμβολή), θα ισχύει:

$$\frac{\delta}{\varphi} = \frac{\lambda}{2\pi} \Leftrightarrow \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd \sin \theta \quad 2.9$$

2.3.2.2. Το συμβολόμετρο Michelson

Για την μελέτη φαινομένων συμβολής φωτός χρησιμοποιείται μία διάταξη η οποία είναι γνωστή σαν συμβολόμετρο. Το συμβολόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη οπτικής συμβολομετρίας και ονομάζεται συμβολόμετρο Michelson. Την διάταξη αυτή υλοποίησε πρώτος ο Albert Abraham Michelson και φέρει έκτοτε το όνομά του. Ο Α.Α. Michelson χρησιμοποίησε αυτή την διάταξη μαζί με τον Edward Morley για να αποδείξουν την μη-ύπαρξη του αιθέρα στο διάσημο πείραμα Michelson – Morley (1887).

Εδώ (Σχήμα 8) φαίνεται τυπικό συμβολόμετρο Michelson και η αρχή λειτουργίας του εξηγείται παρακάτω:



Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση τυπικού συμβολόμετρου Michelson: Λ-λείζερ, Α-ανιχνευτής, ΔΔ-διαχωριστής δέσμης, M1-ακίνητος καθρέπτης, M2-κινούμενος καθρέπτης.

Μονοχρωματική δέσμη φωτός από πηγή λέιζερ (Λ) προσπίπτει σε κυβικό διαχωριστή δέσμης (ΔΔ). Μέρος της διαδίδεται προς ακίνητο καθρέπτη (M1), και μέρος της ανακλάται προς κινούμενο καθρέπτη (M2) που βρίσκεται στη θέση (1). Οι δύο δέσμες ανακλώνται από τους καθρέπτες και οδεύουν πίσω προς τον διαχωριστή δέσμης, και με την ίδια διαδικασία προσπίπτουν εν τέλει σε ανιχνευτή (Α) όπου και ανιχνεύεται το αποτέλεσμα της συμβολής τους.

Θεωρώντας ότι οι δύο δέσμες είναι χωρικά απόλυτα επικαλυπτόμενες και ότι διανύουν ίσους οπτικούς δρόμους, το αποτέλεσμα της συμβολής είναι ένας φωτεινός κροσσός (ενισχυτική συμβολή). Αν τώρα ο καθρέπτης M2 κινηθεί κατά $\lambda/4$ στη θέση (2), το οποίο ισοδυναμεί με εισαγωγή διαφοράς οπτικού δρόμου μεταξύ των δεσμών ίση $\lambda/2$, τότε το αποτέλεσμα της συμβολής είναι ένας σκοτεινός κροσσός (καταστρεπτική συμβολή). Με

αυτό τον τρόπο το συμβολόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση διαφορών απόστασης με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στην περίπτωσή μας, όπου το λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε είναι συνεχούς κύματος He:Ne ($\lambda = 633\text{nm}$), μετατόπιση κατά $\lambda/4$ ισοδυναμεί με απόσταση της τάξης των $\sim 158\text{nm}$.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ, ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν και παρουσιάζονται στην συνέχεια είναι κατά βάση δύο διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης στο πρόβλημα της ανίχνευσης και καταγραφής ενός ήχου με οπτικά μέσα. Παρ' όλα αυτά κάποια μέρη των πειραματικών διατάξεων και διαδικασιών παρέμειναν ίδια ανεξάρτητα με το ποια διάταξη χρησιμοποιήθηκε.

Συγκεκριμένα, για την ανίχνευση των αλλαγών της φωτεινής έντασης, και της μετατροπής αυτών σε ηλεκτρικό σήμα, χρησιμοποιήθηκε εμπορικά διαθέσιμη φωτοδιόδος κατασκευασμένη από Κάδμιο και Θείο (CdS). Η χρησιμότητα μίας φωτοδιόδου, έγκειται στην ικανότητα της να δώσει ηλεκτρικό σήμα ανάλογο των αλλαγών στην ένταση του φωτός που προσπίπτει στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια που αποτελεί το κυρίως μέρος της.

Η έξοδος της φωτοδιόδου οδηγείται σε Η/Υ με ειδικό λογισμικό καταγραφής μέσω καλωδίου με κατάληξη σε βύσμα jack 2.5mm. Γυμνώθηκαν τα τρία εσωτερικά καλώδια (2 σήματος και γείωση), και συνδέθηκαν τα καλώδια σήματος σε κάθε άκρο της φωτοδιόδου και η γείωση σε ένα από τα δύο άκρα της, ώστε να μπορεί να εισαχθεί το σήμα της φωτοδιόδου στην είσοδο mic-in της κάρτας ήχου του Η/Υ. Για την καταγραφή έγινε χρήση του λογισμικού Windows Sound Recorder, ενώ τα δείγματα ηχογραφήθηκαν σε δειγματοληψία 22,05kHz / 16Bit.

Η καταγραφή με μικρόφωνο του ήχου, που χρησιμεύει στη σύγκριση των αποτελεσμάτων, έγινε με χρήση ενός μικροφώνου Sennheiser e825s, το οποίο είναι ένα δυναμικό μικρόφωνο. Σε όλες τις περιπτώσεις επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μία φράση ανθρώπινης ομιλίας («τεστ, ένα, δύο») ως πρότυπο ηχητικό δείγμα, το οποίο και καταγραφόταν ταυτόχρονα από το δυναμικό μικρόφωνο και από την εκάστοτε υπό μελέτη διάταξη. *Η πιο σημαντική απόδειξη της καλής λειτουργίας της εκάστοτε οπτικής διάταξης είναι ο ακουστικός έλεγχος του ηχογραφημένου υλικού, και κατά πόσο είναι καταληπτή η ομιλία μέσα απ' αυτό.* Το καταγεγραμμένο ηχητικό υλικό επισυνάπτεται σε ηλεκτρονική μορφή και δίνεται μαζί με πίνακα συσχέτισης (Παράρτημα Ι σε CD).

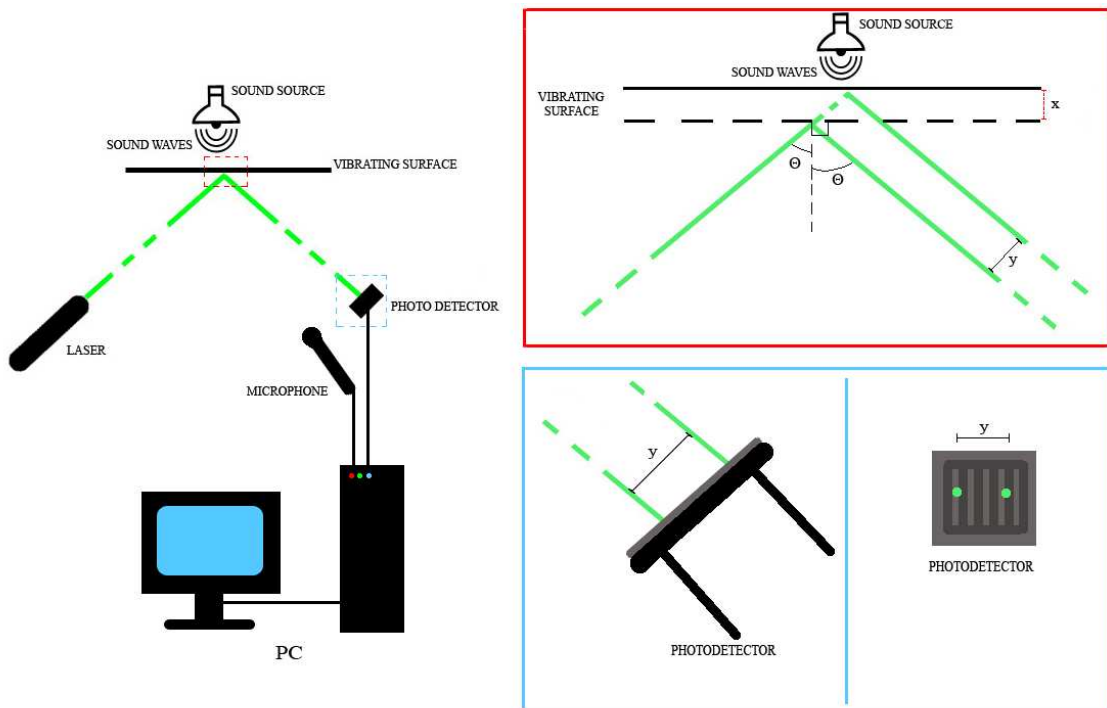
Επιπλέον, τα ηχητικά δείγματα που καταγράφηκαν τόσο από τις οπτικές διατάξεις όσο και από το μικρόφωνο, επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν με την χρήση Η/Υ και του λογισμικού Praat. Η επεξεργασία είχε να κάνει με τον διαχωρισμό των ηχητικών γεγονότων (φθόγγων) της ηχογραφημένης πρότασης, ώστε να συγκριθεί και το επιμέρους συχνοτικό περιεχόμενο. Οι φθόγγοι που επιλέχθηκαν να απομονωθούν και αναλυθούν ήταν οι «Α», «Ε», «Ι», «Ο» καθώς έχουν χαρακτηριστικά και ευδιάκριτα συχνοτικά φάσματα. Η

απομόνωση των φθόγγων αυτών έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε απόσπασμα να περιέχει ήχο μόνο από τον συγκεκριμένο φθόγγο και μεταξύ των αντίστοιχων αποσπασμάτων που προέρχονταν από το μικρόφωνο και αυτών που προέρχονταν από την εκάστοτε υπό μελέτη διάταξη να υπάρχει κατά το δυνατόν πλήρης χρονική αντιστοιχία ώστε να είναι δυνατή η ακριβής σύγκριση των συχνοτικών φασμάτων των ηχητικών δειγμάτων. Η διάρκεια κάθε απομονωμένου φθόγγου (δείγματος) που αναλύθηκε ήταν 0,1sec. Κάθε δείγμα αναλύθηκε με σκοπό την εξαγωγή ενός γραφήματος πλάτους κύματος σε σχέση με τη συχνότητα (dB vs Hz), έπειτα από μετασχηματισμό Fourier (FFT), από τα 0Hz μέχρι τα 11000Hz, με βήμα 10Hz. Τα γραφήματα που εξήχθησαν από την παραπάνω ανάλυση των ηχητικών δειγμάτων παρουσιάζονται ανά αντίστοιχα ζεύγη (μικρόφωνο & οπτική διάταξη), για την αμεσότερη σύγκρισή τους.

3.1. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΗΧΩΝ ΜΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΚΤΡΕΠΟΜΕΝΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΛΕΙΖΕΡ

3.1.1. Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων

Εδώ (Σχήμα 9) φαίνεται η σχηματική απεικόνιση της διάταξης ανίχνευσης εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ από δονούμενη επιφάνεια που υλοποιήθηκε :



Σχήμα 9: Πειραματική διάταξη ανίχνευσης εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ από δονούμενη επιφάνεια (αριστερά) με μεγενθυμένα (δεξιά) τα κομβικά σημεία της πορείας της δέσμης (ανάκλαση από δονούμενη επιφάνεια και πρόσπτωση στην φωτοδίοδο).

Η διάταξη αυτή και οι σχετικές πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Η μεθοδολογία των πειραματικών μετρήσεων είχε ως εξής: Δέσμη από πηγή λέιζερ συνεχούς μήκους κύματος ($\lambda = 532\text{nm}$) ισχύος 100mW , προσπίπτει υπό γωνία Θ , ως προς την κατακόρυφη, σε επιφάνεια ικανή:

1. να ανακλάσει ικανοποιητικό ποσοστό της δέσμης του λέιζερ προς την κατεύθυνση της φωτοδίοδου.
2. να ταλαντωθεί αρκετά από τα ηχητικά κύματα που παράγει η ηχητική πηγή.

Η ηχητική πηγή μπορεί να βρίσκεται σε ποικιλία αποστάσεων και θέσεων, σε σχέση με την δονούμενη επιφάνεια την οποία σημαδεύει το λέιζερ. Η απόσταση, x , μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων της δονούμενης επιφάνειας είναι ανάλογη του πλάτους ταλάντωσης των ηχητικών κυμάτων που την διαταράσσουν. Η γωνία πρόσπτωσης, Θ , είναι ίση με την γωνία ανάκλασης.

Θεωρώντας ότι η δονούμενη επιφάνεια δεν παραμορφώνεται (π.χ. καμπύλωση) κατά την διάρκεια της δόνησής της, η γωνία ανάκλασης Θ παραμένει σταθερή και άρα οι διαδοχικές πορείες της ανακλώμενης δέσμης είναι παράλληλες. Με βάση τα παραπάνω και με χρήση βασικής τριγωνομετρίας γίνεται εμφανές ότι η διαφορά απόστασης μεταξύ των ακραίων σημείων πρόσπτωσης της ανακλώμενης δέσμης επί της επιφανείας της φωτοδίοδου (απόσταση y) είναι ευθέως ανάλογη του πλάτους ταλάντωσης της δονούμενης επιφάνειας (απόσταση x). Ακριβέστερα:

$$y = x / \sin(90 - \Theta) = x / \cos \Theta \quad 3.1$$

Είναι προφανές ότι εάν είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της απόστασης y , που αντιστοιχεί σε ορισμένη απόσταση x , η γωνία Θ θα πρέπει να τείνει στις 90° . Αν η απόσταση x αναλογεί σε απόσταση y αρκετά μεγάλη για να αλλάξει την φωτεινή ένταση που ανιχνεύει η φωτοδίοδος τότε αυτή μας δίνει στην έξοδό της το ηλεκτρικό ανάλογο του ήχου που προκάλεσε την μετατόπιση x .

Οι περιορισμοί που επέβαλε ο εργαστηριακός χώρος ήταν κατά βάση χωροταξικής φύσεως, ενώ ακόμα υπήρχε και το πρόβλημα της έλλειψης μεγάλης ανακλαστικής επιφάνειας (π.χ. παράθυρο). Λόγω των παραπάνω περιορισμών οι δοκιμές έγιναν για διάφορες θέσεις της ηχητικής πηγής ως προς το σύστημα «ανακλαστική επιφάνεια / μικρόφωνο αναφοράς / φωτοδίοδος» και για διαφορετικές εντάσεις εκτέλεσης του ηχητικού δείγματος. Η απόσταση της ηχητικής πηγής από το μικρόφωνο αναφοράς $1,9\text{m}$ και η γωνία Θ ήταν 45° . Τέλος, η απουσία μεγάλης ανακλαστικής επιφάνειας στον χώρο

επέβαλε την χρήση κάποιου υποκατάστατου. Η λύση ήταν καλά στερεωμένο κάτοπτρο σε κλειστή πόρτα του εργαστηρίου.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για διαφορετικές θέσεις της ηχητικής πηγής σε σχέση με την ανακλαστική επιφάνεια, οι οποίες επιλέχθηκαν με γνώμονα την κατευθυντικότητα της πηγής και τα εμπόδια που παρεμβάλλονταν μεταξύ αυτής και του μικροφώνου αναφοράς. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τέσσερις θέσεις:

- «**Θέση 1**»: ηχητική πηγή από την εσωτερική πλευρά της πόρτας – κατεύθυνση προς το μικρόφωνο αναφοράς.
- «**Θέση 2**»: ηχητική πηγή από την εσωτερική πλευρά της πόρτας – κατεύθυνση αντίθετα από το μικρόφωνο αναφοράς.
- «**Θέση 3**»: ηχητική πηγή από την εσωτερική πλευρά της πόρτας – κατεύθυνση κάθετα προς τον άξονα του μικροφώνου αναφοράς.
- «**Θέση 4**»: ηχητική πηγή από την εξωτερική πλευρά της πόρτας (δηλαδή η πόρτα παρεμβάλλεται μεταξύ της ηχητικής πηγής και του μικροφώνου αναφοράς).

Για κάθε μία από αυτές τις θέσεις ηχογραφήθηκαν δύο ηχητικά δείγματα, ένα με χαμηλή και ένα με υψηλή ένταση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χωρίς φωτισμό στο εργαστήριο για να μην επηρεάζεται το σήμα εξόδου της φωτοδιόδου. Επίσης, έγινε χρήση αδιαφανούς πετάσματος με οπή εμπρός από την φωτοδίοδο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα ηχογραφημένα δείγματα (τόσο από την υπό μελέτη διάταξη όσο και από το μικρόφωνο αναφοράς) παρουσιάζουν σχετικά υψηλή στάθμη θορύβου καθώς το σήμα που καταγράφηκε ήταν unbalanced, λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων μέσων (π.χ. Η/Υ με κάρτα ήχου χαμηλών δυνατοτήτων).

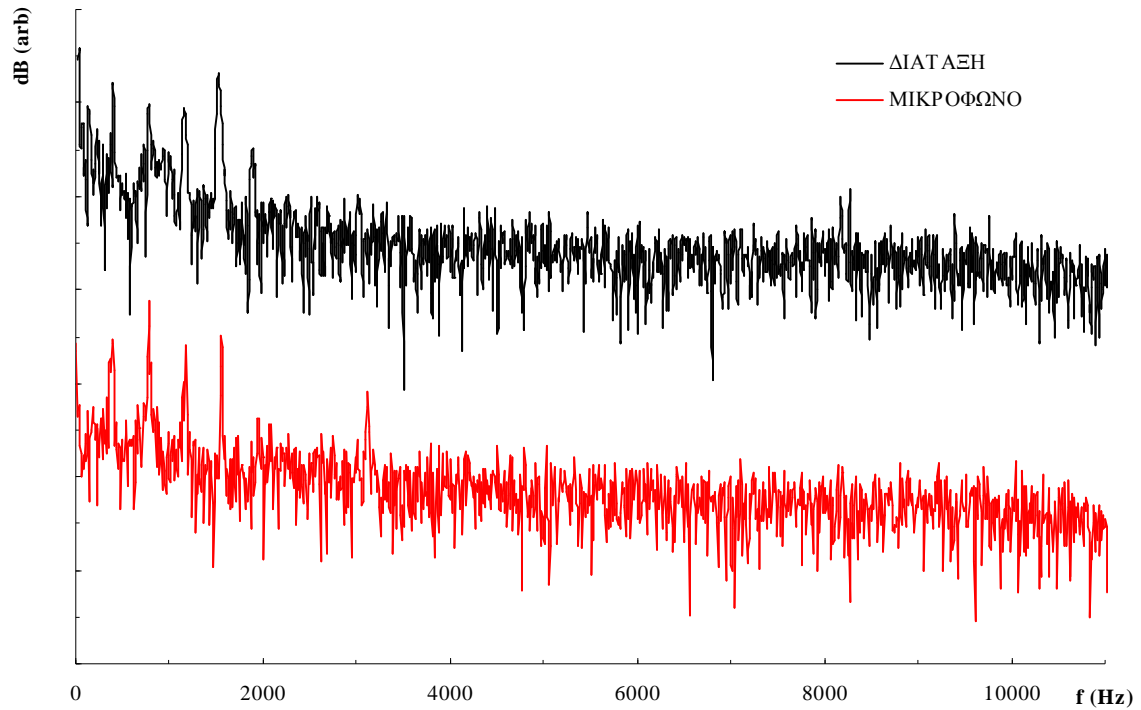
3.1.2 Αποτελέσματα & ανάλυση

Το καταγεγραμμένο ηχητικό υλικό επισυνάπτεται σε ηλεκτρονική μορφή, μαζί με πίνακα συσχέτισης (Παράρτημα I σε CD). Η ακουστική τους σύγκριση κατέδειξε την καλή λειτουργία της διάταξης, καθώς είναι ξεκάθαρα καταληπτή η καταγεγραμμένη ανθρώπινη ομιλία.

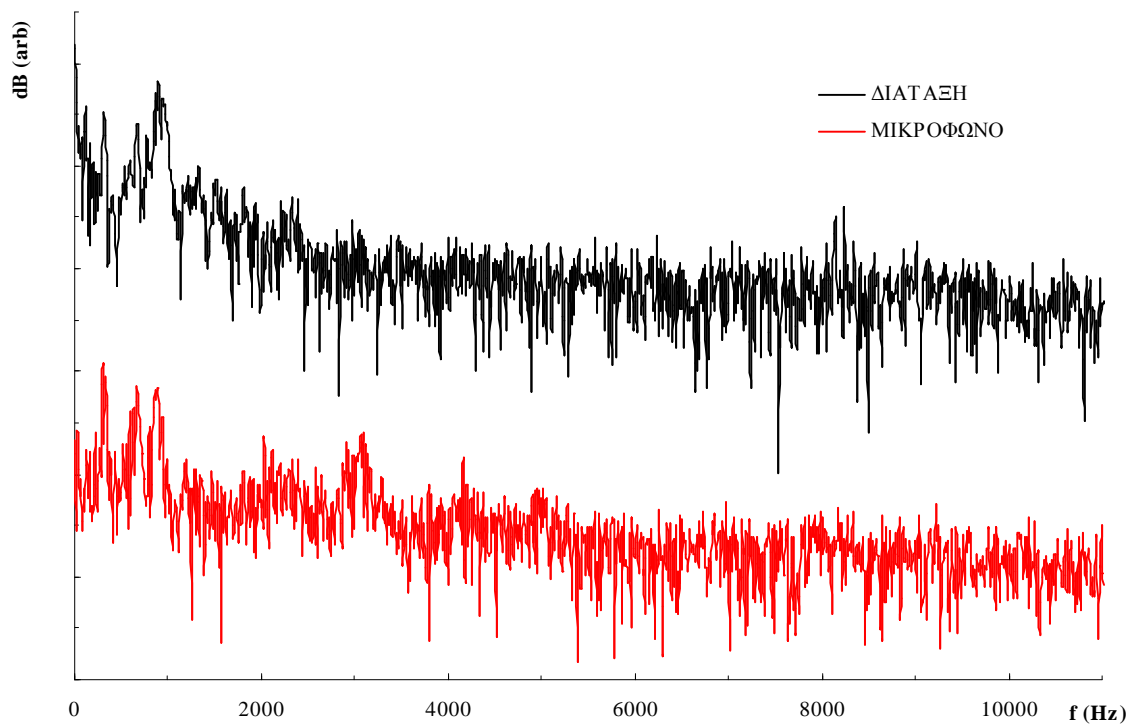
Επιπλέον, στη συνέχεια (Σχήμα 10) παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα, με τη μορφή συγκριτικών γραφημάτων, των συχνοτικών αναλύσεων μεμονωμένων ηχητικών δειγμάτων (φθόγγων), ηχογραφημένων ταυτόχρονα από το μικρόφωνο αναφοράς και από την διάταξη ανίχνευσης εκτρεπόμενης δέσμης λείζερ. Συγκεκριμένα, τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα προέρχονται από επεξεργασία ηχητικών δειγμάτων που καταγράφηκαν με την ηχητική

πηγή στην «Θέση 2». Πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους καλύτερης σύγκρισης του συχνοτικού περιεχομένου υπάρχει εσκεμμένος διαχωρισμός (offset) στον άξονα y.

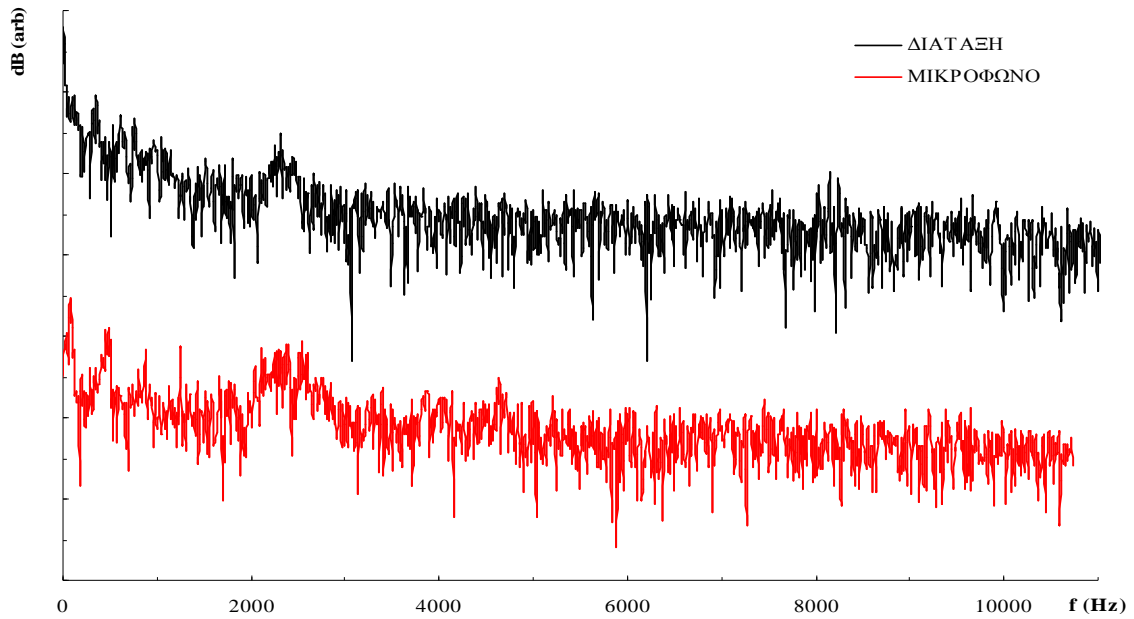
Διάταξη εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ - Φθόγγος "Α"



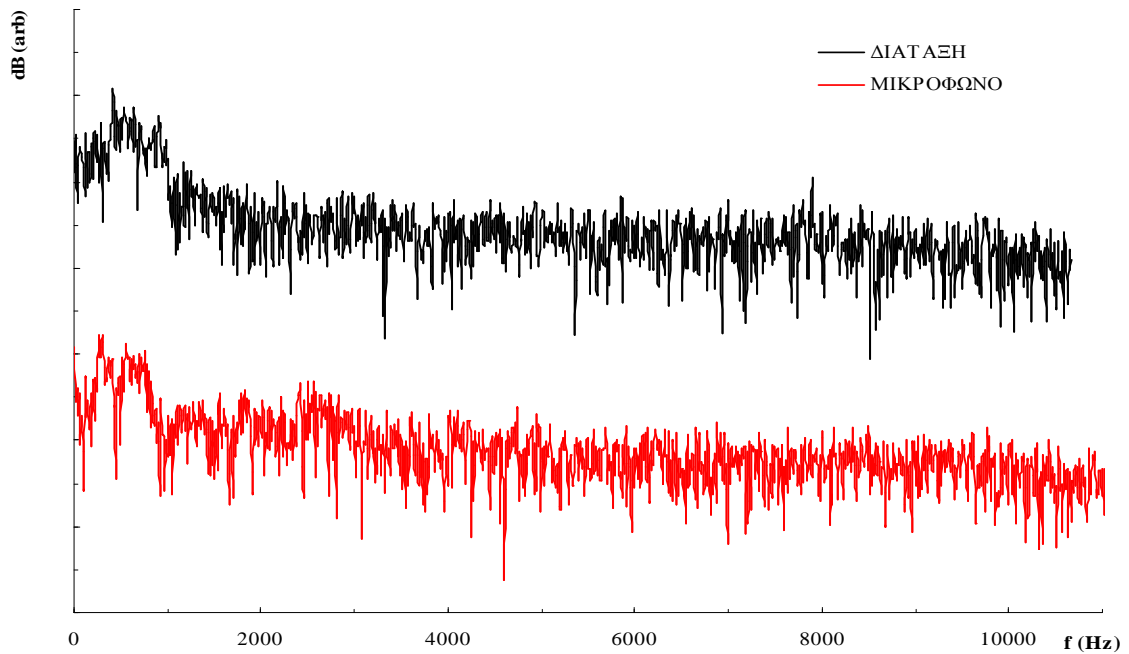
Διάταξη εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ - Φθόγγος "Ε"



Διάταξη εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ - Φθόγγος "Γ"



Διάταξη εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ - Φθόγγος "Ο"



Σχήμα 10: Τυπικά αποτελέσματα συχνοτικών αναλύσεων μεμονωμένων ηχητικών δειγμάτων (φθόγγοι «Α», «Ε», «Ι» και «Ο») για τα σήματα του μικροφώνου αναφοράς και της πειραματικής διάταξης εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ για τη «Θέση 2».

Από τα παραπάνω γραφήματα είναι προφανής η πολύ καλή συμφωνία που υπάρχει μεταξύ του συχνοτικού περιεχομένου που καταγράφηκε με δύο ανεξάρτητους τρόπους. Το γεγονός αυτό ενισχύει την καλή λειτουργία της οπτικής πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε, ιδίως εάν λάβουμε υπ' όψη ότι, σε αντίθεση με εξεζητημένες διατάξεις που χρησιμοποιούνται επαγγελματικά για αυτούς τους σκοπούς, δεν έχει γίνει ειδική μέριμνα για βελτίωση τεχνικών λεπτομερειών (όπως, για παράδειγμα μείωση θορύβου μέσω ειδικών διατάξεων).

3.2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΗΧΩΝ ΜΕ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟ MICHELSON – ΔΟΝΟΥΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

3.2.1. Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων

Για την συμβολομετρική ανίχνευση ήχων, υλοποιήθηκε οπτική διάταξη συμβολόμετρου Michelson με χρήση πηγής λέιζερ He:Ne ($\lambda = 633\text{nm}$), όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η διάταξη αυτή και οι σχετικές πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οπτοηλεκτρονικών Εφαρμογών της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (Ε.Α.Β.). Το Εργαστήριο, αν και κάπως πεπαλαιωμένο, παρείχε τον απαραίτητο εξοπλισμό για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κυριότερο πρόβλημα που προέκυψε ήταν θόρυβος τον οποίο παρήγαγε ο (μόνιμος) κλιματισμός του εργαστηρίου, ο οποίος πιθανόν να επηρέασε σε κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Στην υλοποίηση της διάταξης δόθηκε προσοχή ώστε οι δύο δέσμες που προκύπτουν από τον διαχωρισμό της αρχικής δέσμης να είναι ίσης έντασης. Επίσης, η διάταξη ευθυγραμμίστηκε ώστε να υπάρχει ένας μόνον κροσσός (χωρική σύμπτωση δεσμών). Η όλη διάταξη βρισκόταν πάνω σε ειδική αντικραδασμική τράπεζα. Πίσω από τον ένα καθρέπτη του συμβολόμετρου στερεώθηκε μικρό μεγάφωνο, το οποίο αναπαρήγαγε την πρότυπη φράση ανθρώπινης ομιλίας. Κατά συνέπεια, η ανίχνευση της κίνησης αυτού του καθρέπτη συνεπάγεται και ανίχνευση της ομιλίας.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για διαφορετικές θέσεις του μεγαφώνου πίσω από τον καθρέπτη. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τρεις θέσεις:

«**Θέση 1**»: ηχητική πηγή σε απόσταση $<0,1\text{m}$ από τον καθρέπτη του συμβολόμετρου και το μικρόφωνο αναφοράς.

«**Θέση 2**»: ηχητική πηγή σε απόσταση $0,5\text{m}$ από τον καθρέπτη του συμβολόμετρου και το μικρόφωνο αναφοράς.

«Θέση 3»: ηχητική πηγή σε απόσταση 1,0m από τον καθρέπτη του συμβολόμετρου και το μικρόφωνο αναφοράς.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χωρίς φωτισμό στο εργαστήριο για να μην επηρεάζεται το σήμα εξόδου της φωτοδίοδου. Επίσης, έγινε χρήση αδιαφανούς πετάσματος με οπή εμπρός από την φωτοδίοδο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα ηχογραφημένα, από την υπό μελέτη διάταξη, δείγματα παρουσιάζουν σχετικά υψηλή στάθμη θορύβου καθώς το σήμα που καταγράφηκε ήταν unbalanced, λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων μέσων (π.χ. Η/Υ με κάρτα ήχου χαμηλών δυνατοτήτων).

3.2.2 Αποτελέσματα & ανάλυση

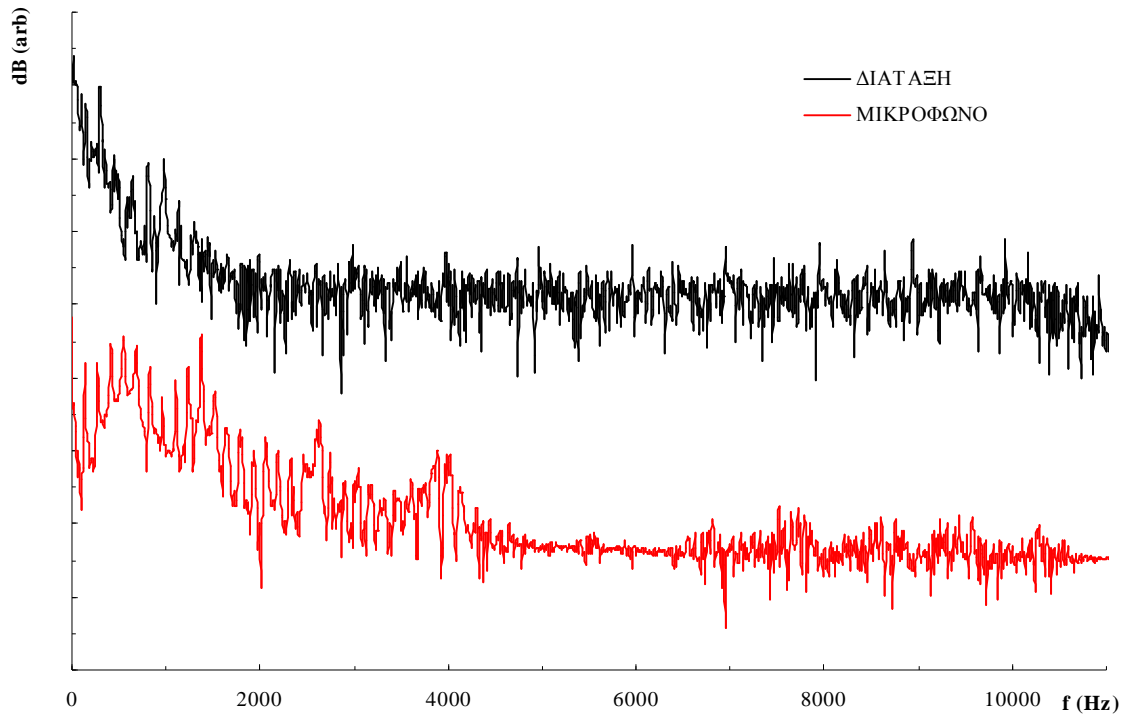
Το καταγεγραμμένο ηχητικό υλικό επισυνάπτεται σε ηλεκτρονική μορφή, μαζί με πίνακα συσχέτισης (Παράρτημα I σε CD). Η ακουστική τους σύγκριση κατέδειξε την καλή λειτουργία της διάταξης, καθώς είναι καθαρά καταληπτή η καταγεγραμμένη ανθρώπινη ομιλία.

Επιπλέον, στη συνέχεια (Σχήμα 11) παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα, με τη μορφή συγκριτικών γραφημάτων, των συχνοτικών αναλύσεων μεμονωμένων ηχητικών δειγμάτων (φθόγγων), ηχογραφημένων ταυτόχρονα από το μικρόφωνο αναφοράς και από την πειραματική διάταξη. Συγκεκριμένα, τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα προέρχονται από επεξεργασία ηχητικών δειγμάτων που καταγράφηκαν με την ηχητική πηγή στην «Θέση 1». Πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους καλύτερης σύγκρισης του συχνοτικού περιεχομένου υπάρχει εσκεμμένος διαχωρισμός (offset) στον άξονα y.

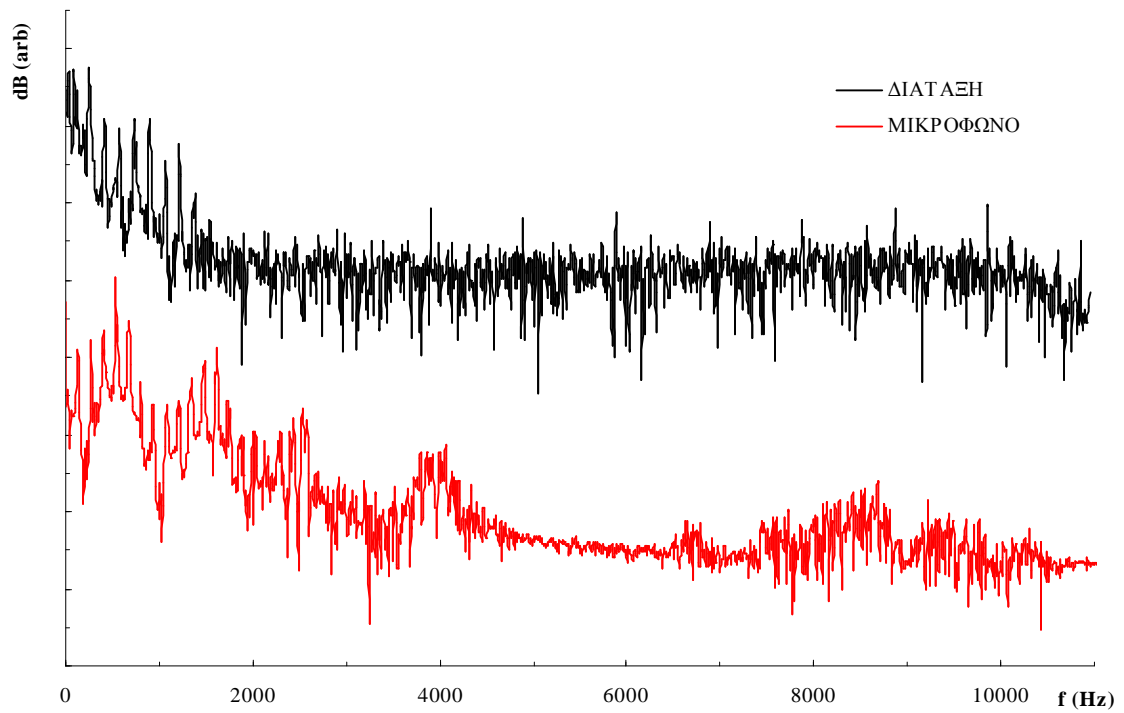
Από τα παρακάτω γραφήματα είναι προφανής η καλή συμφωνία που υπάρχει μεταξύ του συχνοτικού περιεχομένου που καταγράφηκε με δύο ανεξάρτητους τρόπους, ιδιαίτερα για τις χαμηλότερες συχνότητες (τυπικά <2000Hz). Σε υψηλότερες συχνότητες παρατηρείται γενικότερα μια αδυναμία καταγραφής τους από την πειραματική διάταξη, το οποίο αποδίδεται κυρίως στο ότι ο καθρέπτης ήταν στερεωμένος σε οπτική βάση. Το γεγονός αυτό, και σε συνδυασμό με την αδράνεια του συστήματος (καθρέπτης-βάση), επηρεάζει σαφώς την απόκριση στην κίνησή του και ιδιαίτερα στις υψηλότερες συχνότητες.

Τα παραπάνω ενισχύουν την καλή λειτουργία της οπτικής πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε, ιδίως εάν λάβουμε υπ' όψη ότι, σε αντίθεση με εξεζητημένες διατάξεις που χρησιμοποιούνται επαγγελματικά για αυτούς τους σκοπούς, δεν έχει γίνει ειδική μέριμνα για βελτίωση τεχνικών λεπτομερειών (όπως, για παράδειγμα μείωση θορύβου μέσω ειδικών διατάξεων).

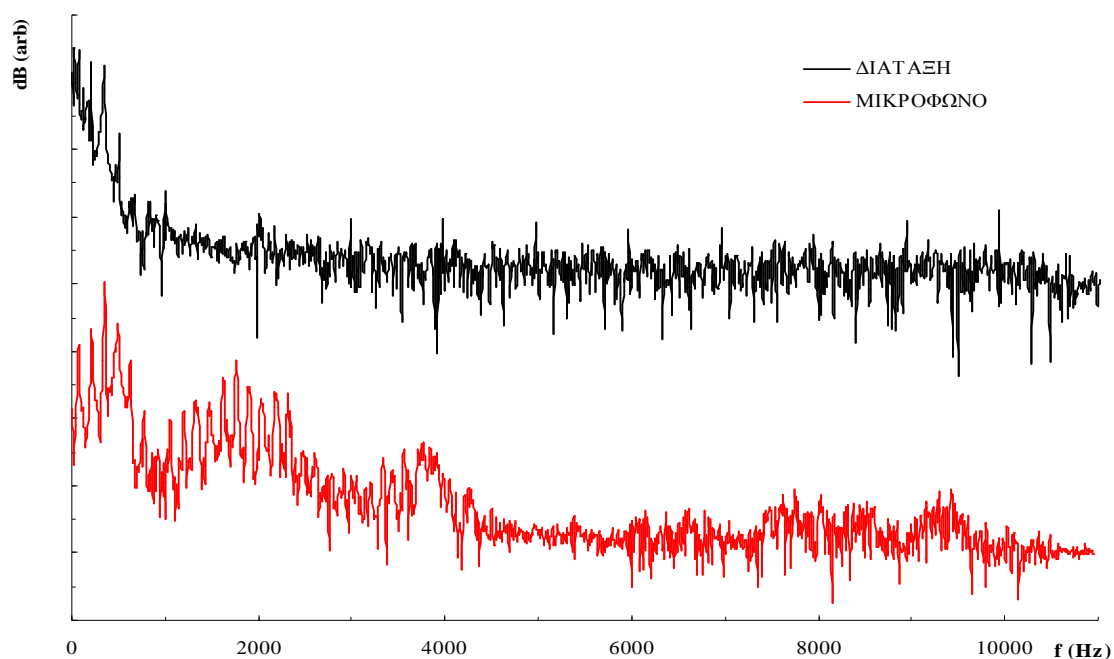
Διάταξη συμβολομέτρου Michelson (δονούμενη επιφάνεια) - Φθόγγος "Α"



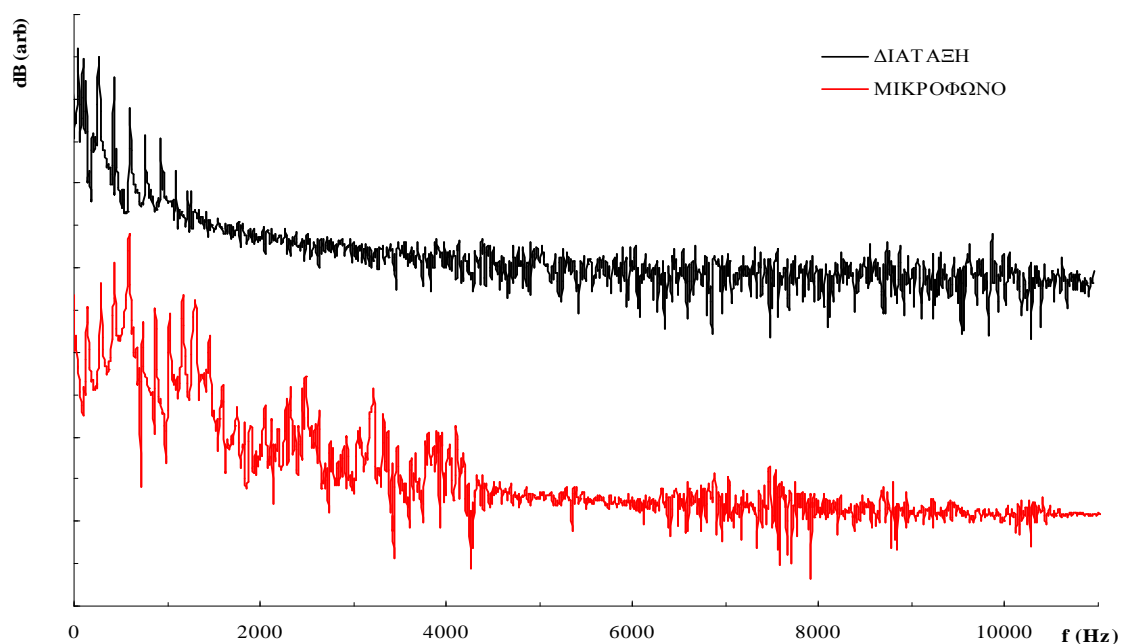
Διάταξη συμβολομέτρου Michelson (δονούμενη επιφάνεια) - Φθόγγος "Ε"



Διάταξη συμβολομέτρου Michelson (δονούμενη επιφάνεια) - Φθόγγος "Γ"



Διάταξη συμβολομέτρου Michelson (δονούμενη επιφάνεια) - Φθόγγος "Ο"



Σχήμα 11: Τυπικά αποτελέσματα συχνοτικών αναλύσεων μεμονωμένων ηχητικών δειγμάτων (φθόγγοι «Α», «Ε», «Ι» και «Ο») για τα σήματα του μικροφώνου αναφοράς και της πειραματικής διάταξης συμβολομέτρου Michelson (δονούμενη επιφάνεια) για τη «Θέση 1».

3.3. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΗΧΩΝ ΜΕ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟ MICHELSON – ΑΠ’ ΕΥΘΕΙΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ

3.3.1. Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων

Οι παραπάνω δύο οπτικές διατάξεις που υλοποιήθηκαν έχουν ως κοινό σημείο την ύπαρξη δονούμενης επιφάνειας, της οποίας η δόνηση ανιχνεύεται για την καταγραφή των ήχων. Μπορεί να προσφέρουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά μικρόφωνα, όπως η δυνατότητα απομακρυσμένης καταγραφής και η μεγάλη ευαισθησία (ιδιαίτερα για την συμβολομετρική διάταξη όπου είναι δυνατή η ανίχνευση κινήσεων της τάξης των nm), όμως, όπως και στα συμβατικά μικρόφωνα, υπάρχει ο περιορισμός της ύπαρξης μηχανικού κινούμενου μέρους με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την ευαισθησία των διατάξεων.

Από αυτή την άποψη, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τρίτη κατά σειρά πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε, όπου και χρησιμοποιείται οπτική διάταξη συμβολόμετρου Michelson, με τη διαφορά όμως ότι *ο στόχος είναι τώρα να ανιχνευθούν απ’ ευθείας οι ήχοι χωρίς την ανάγκη ύπαρξης δονούμενης επιφάνειας*. Συγκεκριμένα, έγινε προσπάθεια να ανιχνευθούν οι αλλαγές που επιφέρουν τα ηχητικά κύματα στο μέσο διάδοσης (αέρας), δηλαδή τα καθ’ εαυτού αραιώματα και πυκνώματα του μέσου.

Αυτό πραγματοποιήθηκε με το μεγάφωνο να λειτουργεί αναπαράγοντας την πρότυπη φράση ανθρώπινης ομιλίας στην περιοχή διάδοσης *της μιας* από τις δύο δέσμες του συμβολόμετρου. Οι προκύπτουσες αλλαγές πυκνότητας του μέσου διάδοσης (αραιώματα και πυκνώματα του μέσου) συνεπάγονται την αλλαγή του οπτικού δρόμου για τη δέσμη αυτή, μέσω αλλαγών στον δείκτη διάθλασης, n . Με την άλλη δέσμη «αδιατάρακτη», οι αλλαγές που καταγράφονται από τη φωτοδίοδο είναι και πάλι ευθέως ανάλογες των ηχητικών γεγονότων.

Εκτός από αυτή τη βασική διαφορά, η πειραματική διάταξη και οι τεχνικές λεπτομέρειες ήταν όμοιες με τα αντίστοιχα της προηγούμενης παραγράφου. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην επηρεάζουν τα ηχητικά κύματα την δεύτερη δέσμη (εισαγωγή πετασμάτων, κατάλληλη τοποθέτηση μεγαφώνου). Το μεγάφωνο ήταν τοποθετημένο σε απόσταση περίπου 0,1m από τη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα ηχογραφημένα, από την υπό μελέτη διάταξη, δείγματα παρουσιάζουν σχετικά υψηλή στάθμη θορύβου καθώς το σήμα που καταγράφηκε ήταν unbalanced, λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων μέσων (π.χ. Η/Υ με κάρτα ήχου χαμηλών δυνατοτήτων).

3.3.2 Αποτελέσματα & ανάλυση

Το καταγεγραμμένο ηχητικό υλικό επισυνάπτεται σε ηλεκτρονική μορφή, μαζί με πίνακα συσχέτισης (Παράρτημα I σε CD). Η ακουστική τους σύγκριση κατέδειξε την καλή λειτουργία της διάταξης, καθώς είναι καταληπτή η καταγεγραμμένη ανθρώπινη ομιλία. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καταγεγραμμένη ομιλία από την πειραματική διάταξη εμφανίζεται με εντονότερες τις χαμηλότερες συχνότητες.

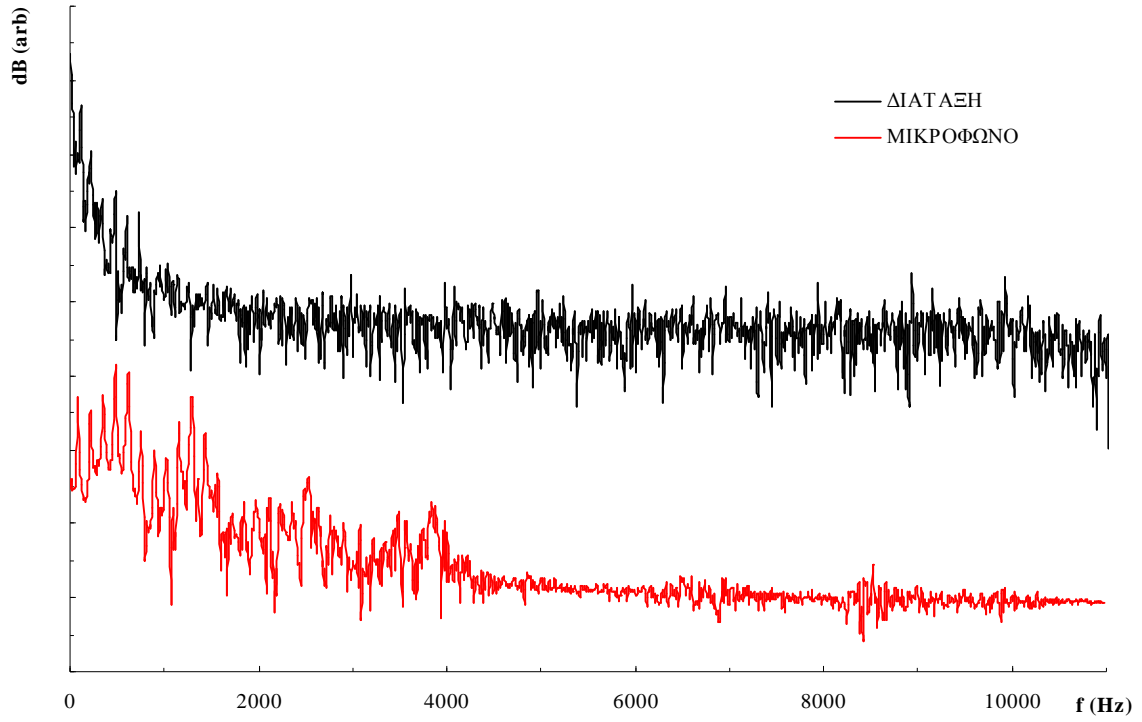
Αυτό είναι εμφανές και στα συγκριτικά γραφήματα των συχνοτικών αναλύσεων μεμονωμένων ηχητικών δειγμάτων (φθόγγων), ηχογραφημένων ταυτόχρονα από το μικρόφωνο αναφοράς και από την πειραματική διάταξη. Τυπικά τέτοια γραφήματα δίνονται παρακάτω (Σχήμα 12). Πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους καλύτερης σύγκρισης του συχνοτικού περιεχομένου υπάρχει εσκεμμένος διαχωρισμός (offset) στον άξονα y .

Από τα παρακάτω γραφήματα είναι προφανής η καλή συμφωνία που υπάρχει μεταξύ του συχνοτικού περιεχομένου που καταγράφηκε με δύο ανεξάρτητους τρόπους για τις χαμηλότερες συχνότητες (τυπικά $<1000\text{Hz}$). Σε υψηλότερες συχνότητες παρατηρείται γενικότερα μια αδυναμία καταγραφής τους από την πειραματική διάταξη, όπως και διαπιστώθηκε από την αξιολόγηση του ηχητικού υλικού.

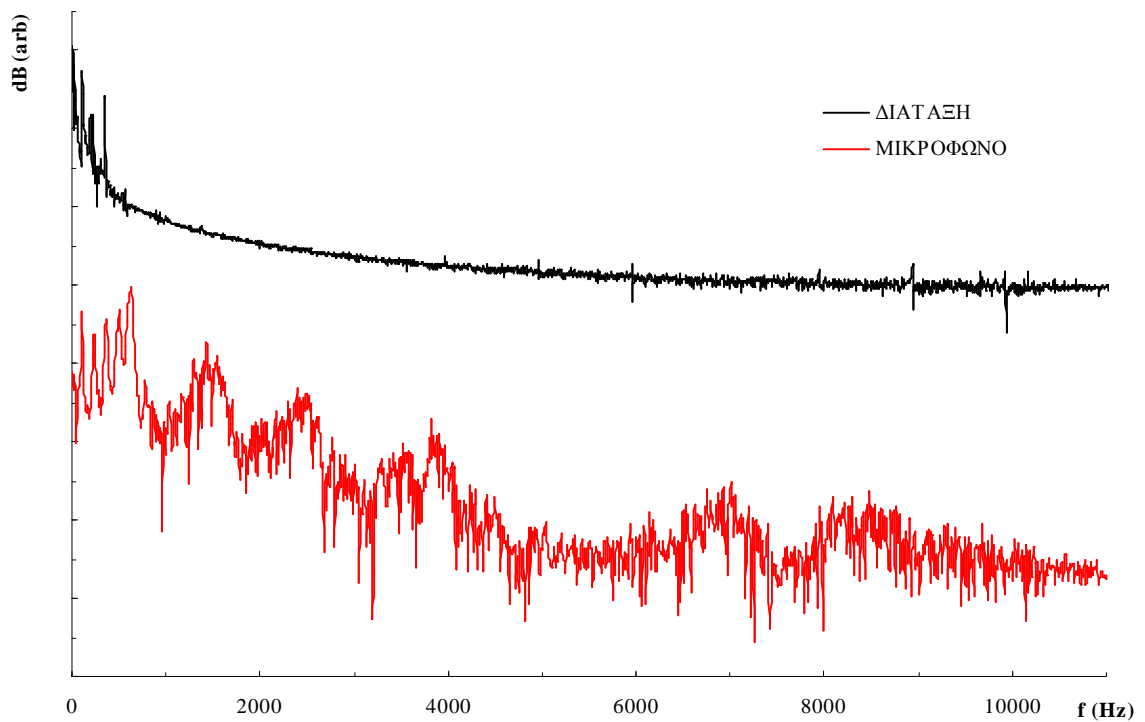
Μια τέτοια συμπεριφορά δεν μπορεί πλέον να αποδοθεί σε κάποιο μηχανικό μέρος της διάταξης. Μια φαινομενολογική εξήγηση που μπορεί να δοθεί έχει ως εξής:

Η εν λόγω διάταξη καταγράφει αλλαγές οπτικού δρόμου, κατ' ουσία δηλαδή αλλαγές πυκνότητας του μέσου διάδοσης. Η παρατηρούμενη ευαισθησία σε χαμηλές συχνότητες μπορεί, λοιπόν, να σημαίνει ότι οι αλλαγές οπτικού δρόμου είναι εντονότερες για αυτές τις συχνότητες. Αυτό θα ήταν απόλυτα αληθές εάν τα πυκνώματα που αντιστοιχούν στις χαμηλές συχνότητες είναι χωρικά περισσότερο εκτεταμένα και/ή η συγκέντρωση των σωματιδίων σε αυτά είναι πολύ μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα των υψηλότερων συχνοτήτων. Επιπλέον, είναι πολύ πιθανό οι τιμές αυτές για τις υψηλότερες συχνότητες να είναι κάτω από το όριο ευαισθησίας (διακριτική ικανότητα) της διάταξης. Επιβεβαίωση αυτής της εξήγησης θα απαιτούσε πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων σε καλύτερες εργαστηριακές συνθήκες από αυτές που ήταν διαθέσιμες.

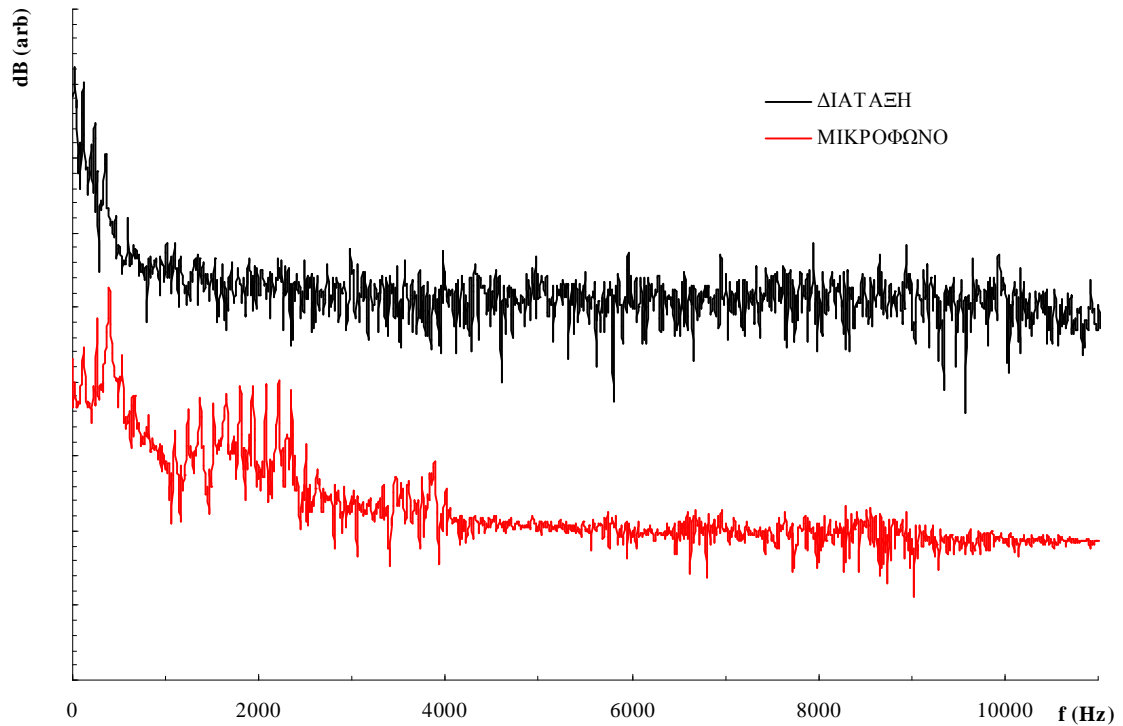
Διάταξη συμβολομέτρου Michelson (απ' ευθείας αντίχρευση) - Φθόγγος "Α"



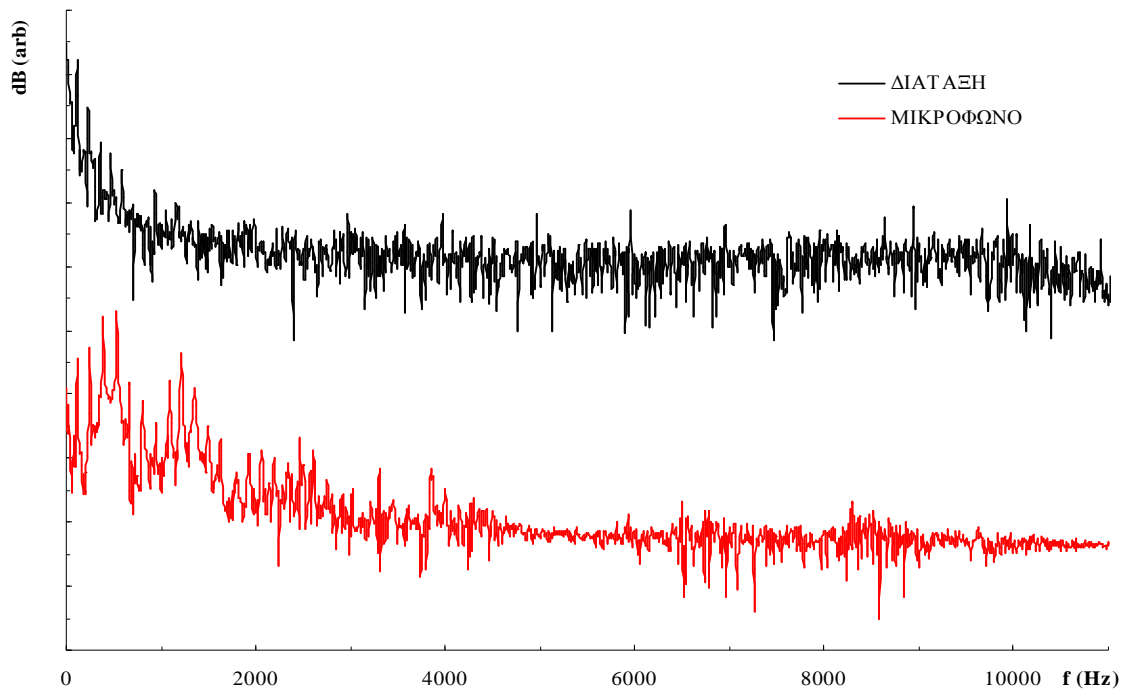
Διάταξη συμβολομέτρου Michelson (απ' ευθείας αντίχρευση) - Φθόγγος "Ε"



Διάταξη συμβολομέτρου Michelson (απ' ευθείας ανάγνωση) - Φθόγγος "Γ"



Διάταξη συμβολομέτρου Michelson (απ' ευθείας ανάγνωση) - Φθόγγος "Ο"



Σχήμα 12: Τυπικά αποτελέσματα συχνοτικών αναλύσεων μεμονωμένων ηχητικών δειγμάτων (φθόγγοι «Α», «Ε», «Ι» και «Ο») για τα σήματα του μικροφώνου αναφοράς και της πειραματικής διάταξης συμβολομέτρου Michelson (απ' ευθείας ανάγνωση).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκαν οπτικές πειραματικές διατάξεις για την ανίχνευση ήχων. Ως πρότυπο ηχητικό υλικό προς καταγραφή με τις διατάξεις αυτές χρησιμοποιήθηκε φράση ανθρώπινης ομιλίας («τεστ, ένα, δύο»). Παράλληλα, το πρότυπο ηχητικό υλικό καταγράφηκε ταυτόχρονα με μικρόφωνο, ως αναφορά. Ο έλεγχος καλής λειτουργίας των διατάξεων αυτών συνίσταται κατά κύριο λόγο στη ακουστική σύγκριση του καταγεγραμμένου με τις οπτικές διατάξεις ηχητικού υλικού με το πρότυπο υλικό, και στην αξιολόγηση του κατά πόσο το πρώτο είναι καταληπτό. Επιπλέον, τα ηχητικά δείγματα που καταγράφηκαν ταυτόχρονα τόσο από τις οπτικές διατάξεις όσο και από το μικρόφωνο επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν με την χρήση Η/Υ και κατάλληλου λογισμικού. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης αυτής ήταν συγκριτικά γραφήματα των συχνοτικών αναλύσεων μεμονωμένων ηχητικών δειγμάτων (φθόγγων «Α», «Ε», Ι» και «Ο»), η ποιοτική συμφωνία των οποίων παρείχε άλλο ένα μέτρο ελέγχου της καλής λειτουργίας των οπτικών διατάξεων. Επισημαίνεται, ότι σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο είναι εφικτό να υλοποιηθούν οπτικές διατάξεις ανίχνευσης ήχων με απλά μέσα και να επιδειχθεί η αρχή λειτουργίας τους και οι δυνατότητές τους, και όχι η κατασκευή εξεζητημένων και πλήρως λειτουργικών διατάξεων προς εμπορική χρήση.

Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε διάταξη εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ από δονούμενη επιφάνεια, συνέπεια πρόσπτωσης σε αυτήν ηχητικών κυμάτων. Η καταγεγραμμένη ανθρώπινη ομιλία ήταν ξεκάθαρα καταληπτή, ενώ υπήρχε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ του συχνοτικού περιεχομένου που καταγράφηκε με την οπτική διάταξη και το μικρόφωνο αναφοράς. Το βασικό πλεονέκτημα μίας τέτοιας οπτικής διάταξης ανίχνευσης είναι η δυνατότητά της να λειτουργεί από πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντικές απώλειες στην πιστότητα της ηχογράφησης.

Η δεύτερη διάταξη που υλοποιήθηκε βασιζόταν στη χρήση συμβολομέτρου Michelson, με τα ηχητικά κύματα να προσπίπτουν στον καθρέπτη ενός από τους βραχίονές του, με συνέπεια αυτός να δονείται. Η καταγεγραμμένη ανθρώπινη ομιλία ήταν ξεκάθαρα καταληπτή, ενώ υπήρχε καλή συμφωνία μεταξύ του συχνοτικού περιεχομένου που καταγράφηκε με την οπτική διάταξη και το μικρόφωνο αναφοράς, ιδιαίτερα για τις χαμηλότερες συχνότητες (τυπικά <2000Hz). Σε υψηλότερες συχνότητες παρατηρήθηκε μια αδυναμία καταγραφής τους από την οπτική διάταξη, το οποίο αποδόθηκε στις μηχανικές ιδιότητες (αδράνεια, ελευθερία κίνησης) του συστήματος καθρέπτη-βάσης.

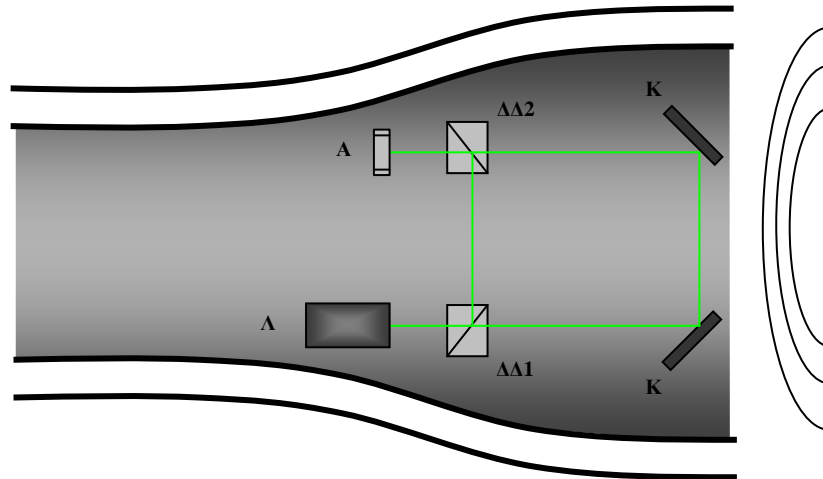
Η χρήση συμβολομετρικών τεχνικών για την ανίχνευση δονήσεων παρέχει πολύ μεγάλη ευαισθησία (της τάξης των nm), όμως υπάρχει ο περιορισμός ότι θα πρέπει η υπό μελέτη επιφάνεια να έχει κατάλληλα χαρακτηριστικά (π.χ. πάχους, ανακλαστικότητας) ώστε να είναι δυνατή, εν τέλει, η ανίχνευση ηχητικών κυμάτων. Τέτοιου είδους περιορισμοί υπάρχουν και για την περίπτωση χρήσης οπτικών διατάξεων εκτρεπόμενης δέσμης λέιζερ. Παρόμοιοι περιορισμοί λόγω ύπαρξης μηχανικού δονούμενου μέρους υπάρχουν και στη λειτουργία των συμβατικών μικροφώνων.

Γι αυτούς τους λόγους ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τρίτη διάταξη που υλοποιήθηκε, όπου έγινε ξανά χρήση συμβολομέτρου Michelson, με τη διαφορά ότι ο στόχος ήταν η απ' ευθείας καταγραφή των ηχητικών γεγονότων με την ανίχνευση των πυκνωμάτων και αραιωμάτων του μέσου διάδοσης. Για το λόγο αυτό τα ηχητικά κύματα της πρότυπης φράσης ανθρώπινης ομιλίας προσέπιπταν στην περιοχή διάδοσης της μιας από τις δύο δέσμες του συμβολομέτρου. Έτσι δεν υπάρχει μηχανικό δονούμενο μέρος που να περιορίζει την λειτουργία της διάταξης, και οι περιορισμοί συνίστανται κυρίως στην ανιχνευτική διακριτική ικανότητα της πυκνότητας του μέσου διάδοσης. Η ακουστική σύγκριση των καταγεγραμμένων ηχητικών δειγμάτων κατέδειξε την καλή λειτουργία της διάταξης, καθώς ήταν καταληπτή η ανθρώπινη ομιλία, παρ' όλο αυτή εμφανίζεται με εντονότερες τις χαμηλότερες συχνότητες. Αυτό ήταν εμφανές και στα συγκριτικά γραφήματα των συχνοτικών αναλύσεων μεμονωμένων ηχητικών δειγμάτων, όπου υπήρχε καλή συμφωνία μεταξύ του συχνοτικού περιεχομένου που καταγράφηκε με τους δύο ανεξάρτητους τρόπους για τις χαμηλότερες συχνότητες (τυπικά <1000Hz). Η αδυναμία καταγραφής έγκειται στις υψηλότερες συχνότητες, για το οποίο δόθηκε φαινομενολογική εξήγηση.

Το επίπεδο στο οποίο λειτούργησαν και μελετήθηκαν οι παραπάνω οπτικές διατάξεις αφήνει αρκετά περιθώρια βελτίωσης. Μία πρώτη διεύρυνση των δυνατοτήτων τους θα μπορούσε να επιτευχθεί με την χρήση καλύτερων μέσων μετατροπής σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (π.χ. καλύτερη κάρτα ήχου και καλύτερο λογισμικό καταγραφής). Ακόμα η καταγραφή balanced σήματος θα μείωνε σημαντικά την στάθμη θορύβου. Τέλος, και προς αυτή την κατεύθυνση, θα μπορούσαν οι οπτικές τεχνικές να συνδυαστούν με τεχνικές διαμόρφωσης σήματος (π.χ. διαμόρφωση πλάτους ή φάσης), πράγμα το οποίο γίνεται σε αντίστοιχες εμπορικά διαθέσιμες συσκευές.

Καθώς η χρήση συμβολομετρικών οπτικών συσκευών που να χρησιμοποιούνται για την απ' ευθείας ανίχνευση ήχων δεν είναι διαδεδομένη, κατά την καλύτερη γνώση του γράφοντα, θα μπορούσε εδώ να προταθεί η υλοποίηση και η εξέλιξη μιας τέτοιας

συσκευής, ως μελλοντική εργασία που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Το ανιχνευτικό μέρος μιας τέτοιας συσκευής θα μπορούσε να έχει τη μορφή που φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 13) :



Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση συσκευής συμβολομετρικής απ' ευθείας ανίχνευσης ηχητικών κυμάτων: Λ- λέιζερ, Α-ανιχνευτής, ΔΔ1 & ΔΔ2-διαχωριστές δέσμης, Κ-καθρέπτες.

Τα ηχητικά κύματα προσπίπτουν στο ανιχνευτικό μέρος της συσκευής, που θα μπορούσε να έχει τη μορφή ενός συμβατικού μικροφώνου. Δέσμη λέιζερ (Λ) διαχωρίζεται από διαχωριστή δέσμης (ΔΔ1) και μέρος της χρησιμοποιείται για την ανίχνευση αλλαγών στο μέσο διάδοσης λόγω της ύπαρξης των ηχητικών κυμάτων. Το άλλο μέρος της δέσμης προσπίπτει απ' ευθείας στον ανιχνευτή (Α) όπου και συμβάλλει με την προηγούμενη δέσμη. Για την καλύτερη λειτουργία και ευαισθησία μιας τέτοιας συσκευής θα μπορούσαν επιπλέον να εφαρμοστούν τεχνικές σταθεροποίησης του συμβολόμετρου [7-8].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Δ. Σκαρλάτος, *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, Εκδόσεις Φιλομάθεια, Πάτρα (2003).
- [2] D. Davis and C. Davis, *Sound system engineering*, Focal Press, Boston (1997).
- [3] O. Svelto, *Αρχές των Lasers*, Μετάφραση & Επιμέλεια Γ.Α. Κουρούκλης – Α.Α. Σεραφετινίδης, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα (1986).
- [4] R.A. Serway, *Physics for scientists and engineers with modern Physics*, Saunders College Publishing, San Francisco (1992).
- [5] E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, San Francisco (2002).
- [6] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Cambridge University Press, Cambridge (1999).
- [7] R.G. White and D.C. Emmony, *Active feedback stabilization of a Michelson interferometer using a flexure element*, J. Phys. E: Sci. Instrum. **18**, 658-663 (1985).
- [8] H. Iwai, C. Fang-Yen, G. Popescu, A. Wax, K. Badizadegan, R.R. Dasari, and M.S. Feld, *Quantitative phase imaging using actively stabilized phase-shifting low coherence interferometry*, Opt. Lett. **29**, 2399-2401 (2004).

Επισυνάπτεται σε ηλεκτρονική μορφή το καταγεγραμμένο ηχητικό υλικό, μαζί με πίνακα συσχέτισης (Παράρτημα I σε CD).