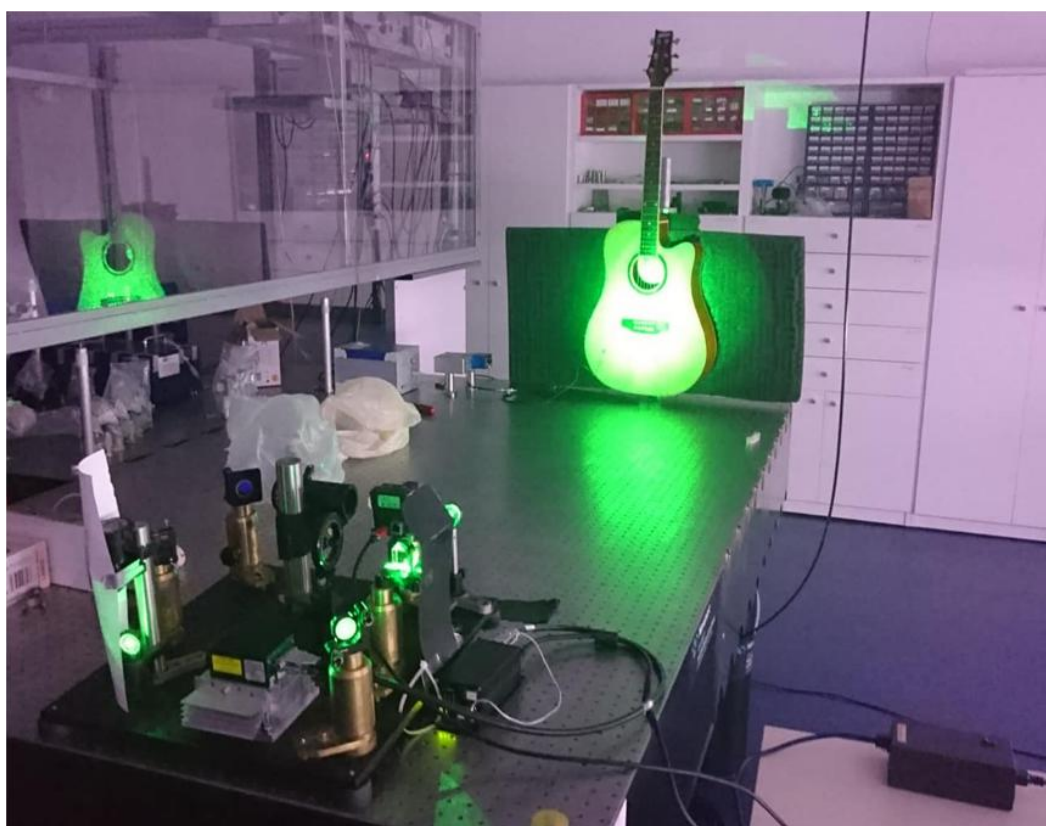




ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ Τ.Ε.

## Ακουστικός χαρακτηρισμός ακουστικής κιθάρας με μοντέρνες τεχνικές



Στυλιανός – Βασίλειος Αράγκουλες

Επιβλέποντες: Δρ. Ιωάννης Ορφανός  
Δρ. Ευθύμιος Μπακαρέζος  
Δρ. Νεκτάριος Παπαδογιάννης

Ρέθυμνο, 2018

## *Ευχαριστίες*

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Δρ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη και Δρ. Ευθύμιο Μπακαρέζο, οι οποίοι από την πρώτη στιγμή «αγκάλιασαν» την ιδέα της παρούσας πτυχιακής εργασίας, παρέχοντάς μου αμέριστα πολύτιμη γνώση, συμβουλές, βοήθεια αλλά και συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης και συγγραφής. Επίσης, η βοήθεια του Δρ. Ιωάννη Ορφανού στη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων αλλά και στη συγκρότηση των πειραματικών διατάξεων, έπαιξε καταλυτικό ρόλο, καθώς χωρίς την πολύτιμη αρωγή και επιμονή του, δε θα ήταν εφικτή η διεκπεραίωσή τους. Τέλος, η καθοδήγηση του Δρ. Ευθύμιου Μπακαρέζου αλλά και το συνεχές ενδιαφέρον του για την πλήρη κατανόηση του θέματος και ολοκλήρωσης της εργασίας, συντέλεσε στα μέγιστα ώστε να εκπληρωθεί η όλη εργασία. Τους παραπάνω κυρίους, τους ευχαριστώ ευγνωμονώντας από καρδιάς, για την εμπιστοσύνη, αφοσίωση και άριστη συνεργασία μας.

## *Περιεχόμενα*

Περίληψη .....	iv
Abstract .....	iv
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Παρουσίαση της κιθάρας.....</b>	<b>2</b>
2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή – εξέλιξη του οργάνου .....	2
2.2 Η ανατομία της σύγχρονης ακουστικής κιθάρας.....	5
2.3 Παραγωγή ήχου στην κιθάρα .....	7
2.3.1 Δόνηση χορδής κιθάρας .....	8
2.3.2 Δόνηση επιμέρους μερών κιθάρας.....	10
2.3.3 Δόνηση αέρα αντηχείου κιθάρας .....	11
2.3.4 Συντονισμοί σώματος κιθάρας – Συζευγμένες ταλαντώσεις.....	13
2.4 Βασικά χαρακτηριστικά εκπεμπόμενου ήχου.....	15
<b>3. Στοιχεία θεωρίας .....</b>	<b>18</b>
3.1 Καταγραφή ακουστικής εκπομπής .....	19
3.2 Καταγραφή απόκρισης σε διέγερση .....	20
3.3 Ολογραφία και ολογραφική συμβολομετρία.....	22
3.4 Χρονικά ολοκληρωμένη ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων.....	24
<b>4. Πειραματικές τεχνικές και διατάξεις.....</b>	<b>29</b>
4.1 Καταγραφή ήχου.....	29
4.2 Συχνοτική απόκριση .....	30
4.3 ESPI.....	31
<b>5. Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυση.....</b>	<b>34</b>
5.1 Αποτελέσματα ηχητικής εκπομπής .....	34
5.2 Αποτελέσματα συχνοτικής απόκρισης .....	35
5.3 Αποτελέσματα ESPI .....	36
5.4 Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων.....	39
<b>6. Σύνοψη - Συμπεράσματα .....</b>	<b>47</b>
<b>Βιβλιογραφικές αναφορές.....</b>	<b>49</b>

## *Περίληψη*

Στην εργασία αυτή έγινε ακουστικός χαρακτηρισμός μιας εμπορικά διαθέσιμης κιθάρας. Το όργανο μελετήθηκε ως προς τον εκπεμπόμενο από αυτό ήχο, ως προς τη συχνοτική του απόκριση συνέπεια κρουστικής διέγερσης, ενώ τροποποιήθηκε κατάλληλα σύστημα χρονικά ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI) του Εργαστηρίου Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης για τη μελέτη των δονητικών χαρακτηριστικών του. Η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων, έδειξε ότι αυτά είναι σε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους. Από τη συνολική πειραματική μελέτη συμπεραίνεται ότι το μουσικό όργανο έχει χαμηλο-μεσαίου συχνοτικού εύρους χαρακτήρα, καθώς εκεί παρουσιάζει και τους εντονότερους συντονισμούς. Επίσης συμπεραίνεται ότι η χρονικά ολοκληρωμένη ESPI είναι μια υψηλής ακρίβειας μη-καταστρεπτική και μη-επεμβατική μέθοδος που μπορεί να δώσει αξιόπιστη πληροφορία για τη συμπεριφορά και τα ακουστικά-δονητικά χαρακτηριστικά μουσικών οργάνων.

## *Abstract*

Here the acoustical and vibrational behavior of a commercially available guitar is studied. The emitted sound from the instrument was recorded, while its frequency response to impact excitation was also measured. A time-integrated electronic speckle-pattern interferometry (ESPI) system was appropriately modified and used to study its vibrational characteristics. The experiments were performed in the Laboratory of Acoustical and Optical Technology of the Department of Music Technology and Acoustics Engineering of the T.E.I. of Crete. The experimental results of the three methods were qualitatively and quantitatively analyzed and were found in very good agreement. From the overall experimental study, it is concluded that the instrument responds in the low to middle audible frequency spectrum. It is also concluded that time-integrated ESPI is a highly accurate non-destructive and non-contact method that can yield reliable and valuable information for the acoustical and vibrational characteristics of a musical instrument.

# ***1. Εισαγωγή***

Η ακουστική κιθάρα κατέχει ιδιαίτερη θέση μεταξύ των εγχόρδων οργάνων και η χρήση της είναι ευρύτατα διαδεδομένη σε πολλά και διαφορετικά είδη μουσικής. Πρόκειται για ένα όργανο του οποίου οι ρίζες τοποθετούνται στην αρχαιότητα, και έχει λάβει διάφορες μορφές ανά τους αιώνες.

Πλέον, η χρήση συμβολομετρικών και ολογραφικών απεικονιστικών τεχνικών για τη μελέτη της δονητικής συμπεριφοράς μουσικών οργάνων είναι ευρέως διαδεδομένη, και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων, παλαιότερων μηχανικών τεχνικών: είναι μη-καταστρεπτικές και δεν απαιτούν επαφή αισθητηρίου με το υπό εξέταση αντικείμενο, προσφέρουν υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα, ενώ υπάρχει η δυνατότητα της παρακολούθησης της δόνησης του αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο (on-line).

Στην εργασία αυτή ακολουθήθηκε μια ολοκληρωμένη μέθοδος ακουστικού / δονητικού χαρακτηρισμού μιας εμπορικά διαθέσιμης κιθάρας. Η μέθοδος περιλάμβανε καταγραφή του εκπεμπόμενου ηχητικού φάσματος για νότες στη συχνοτική περιοχή της κύριας ηχητικής εκπομπής του οργάνου, καθώς επίσης και η καταγραφή της συχνοτικής απόκρισης του οργάνου συνέπεια κρουστικής διέγερσης. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε σύστημα χρονικά ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI) με χρήση λέιζερ συνεχούς μήκους κύματος (Continuous Wave – CW), που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται το μουσικό όργανο, με σύντομη ιστορική αναδρομή της εξέλιξής του, και αναλύεται ο τρόπος εκπομπής ήχου από αυτό. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύονται οι έννοιες που άπτονται της πειραματικής μελέτης του οργάνου, ενώ στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρεις πειραματικές μέθοδοι, οι αντίστοιχες διατάξεις και η διαδικασία μετρήσεων / συλλογής δεδομένων. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η ανάλυση των μετρήσεων και η ποιοτική και ποσοτική σύγκριση μεταξύ τους. Στη συνέχεια γίνεται σύντομη επισκόπηση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων, και στο τέλος δίνεται η σχετική βιβλιογραφία.

## **2. Παρουσίαση της κιθάρας**

Αδιαμφισβήτητα, η κιθάρα αποτελεί το δημοφιλέστερο έγχορδο μουσικό όργανο όπου παρά τις διαφοροποιήσεις, παραλλαγές και τροποποιήσεις του από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα, λαμβάνει χώρα και «ρόλο» σε πλήθος μουσικών ειδών και όχι μόνο, παρευρισκόμενη και προσαρμοσμένη στην μουσική-πολιτισμική κουλτούρα πολλών λαών ανά τους αιώνες. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η σύντομη ιστορική πορεία και μορφολογική εξέλιξη του οργάνου μέσα στο χρόνο, η μορφή που έχει καταλήξει να έχει σήμερα καθώς και ο τρόπος παραγωγής του ήχου σε αυτήν μαζί με επιμέρους παραμέτρους και φαινόμενά της.

### **2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή – εξέλιξη του οργάνου**

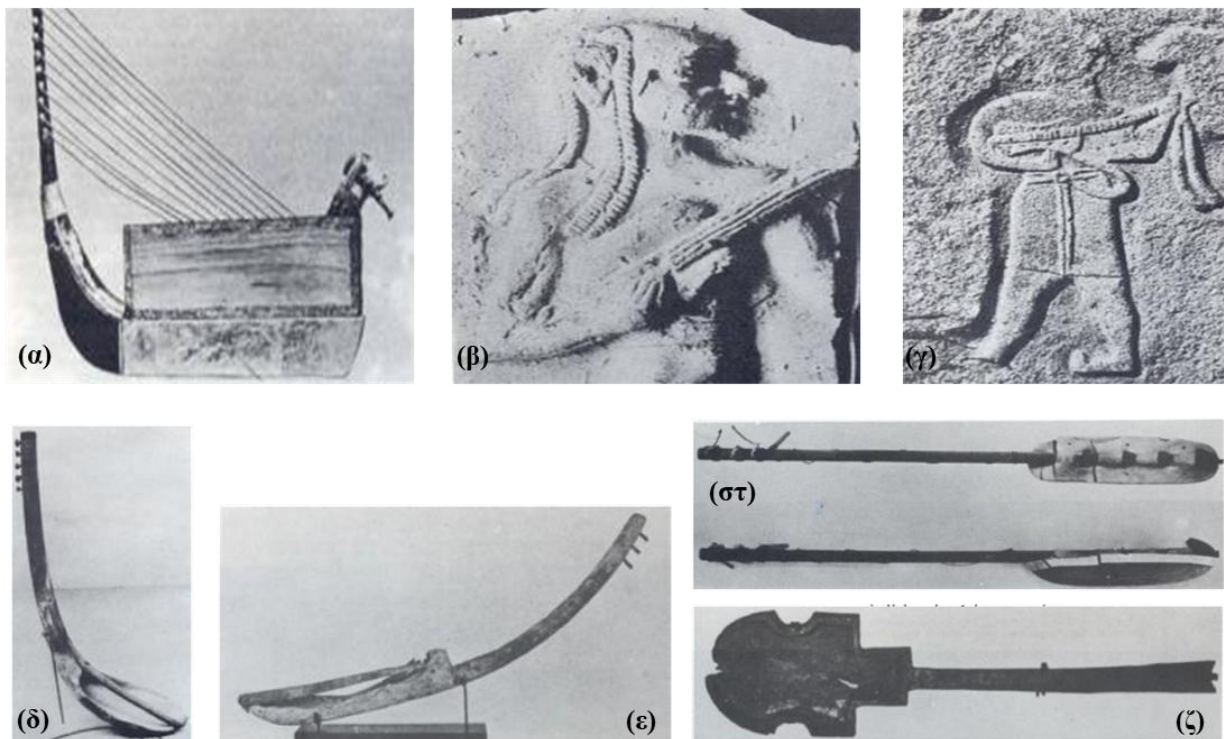
Η δημοφιλέστερη εκδοχή για την προέλευση της λέξης *κιθάρα*, είναι ότι προέρχεται από τις αρχαίες Περσικές λέξεις *KI – TAPA* που σημαίνει *τρεις χορδές* [1]. Πρόκειται για νυκτό έγχορδο μουσικό όργανο, του οποίου ο ήχος παράγεται με τη νύξη (τράβηγμα) της χορδής, είτε με δάχτυλα είτε με πένα.

Αναζητώντας τα ίχνη του σπουδαίου και διαχρονικού αυτού μουσικού οργάνου, τα μουσικά όργανα-ευρήματα που έχουν βρεθεί ως συγγενείς του, αρχικά μπορούν να διαιρεθούν σε δύο τύπους: σ' αυτά που ονομάζονται *άρπες* και σ' εκείνα που ονομάζονται *λύρες* [1]. Το αρχαιότερο μουσικό όργανο το οποίο πιθανολογείται να είναι ο πρόγονος της σημερινής κιθάρας, είναι αυτό της άρπας της βασίλισσας Σουμπ-Αντ των Σουμέριων (βλ. σχήμα 1.α), το οποίο βρέθηκε στην αρχαία πόλη των Σουμέριων Ούρ και χρονολογείται περί το 2500 π.Χ. [1]. Το όργανο αυτό είχε ξύλινο αντηχείο και χωριστό βραχίονα. Η ουσιώδης διαφορά με τα όργανα τύπου κιθάρας που ήρθαν στην πορεία, είναι ότι στην άρπα αυτή, ο βραχίονας ήταν κατακόρυφος σε αντίθεση με την οριζόντια φορά που πήρε στην πορεία.

Οι Βαβυλώνιοι, κατακτώντας τους Σουμέριους, πήραν το μεγαλύτερο μέρος του πολιτισμού τους και πολύ πιθανόν και την κιθάρα, καθώς αργότερα περί το 1900 π.Χ. φαίνεται να παρίσταται σε πλήθος Βαβυλωνιακών γλυπτών (π.χ. βλ. σχήμα 1.β), μουσικό όργανο όμοιο της σημερινής κιθάρας, το οποίο πολύ πιθανόν να είναι η εξέλιξη της άρπας της βασίλισσας Σουμπ-Αντ των Σουμέριων. Μουσικό όργανο παρόμοιο με την κιθάρα, συναντάται και στους Χιτιτίτες (π.χ. βλ. σχήμα 1.γ), λαού ο οποίος ζούσε στην Ανατολία (σημερινή Τουρκία) και αναπτύχθηκε παράλληλα με τον πολιτισμό των Βαβυλωνίων. Εξαιτίας των πολέμων μεταξύ των λαών της εγγύς Ανατολής, η ανταλλαγή και απορρόφηση πολιτιστικών στοιχείων μεταξύ των λαών ήταν αναπόφευκτη. Τα όργανα με βραχίονα διαδόθηκαν κατ' αυτό τον τρόπο σε όλη

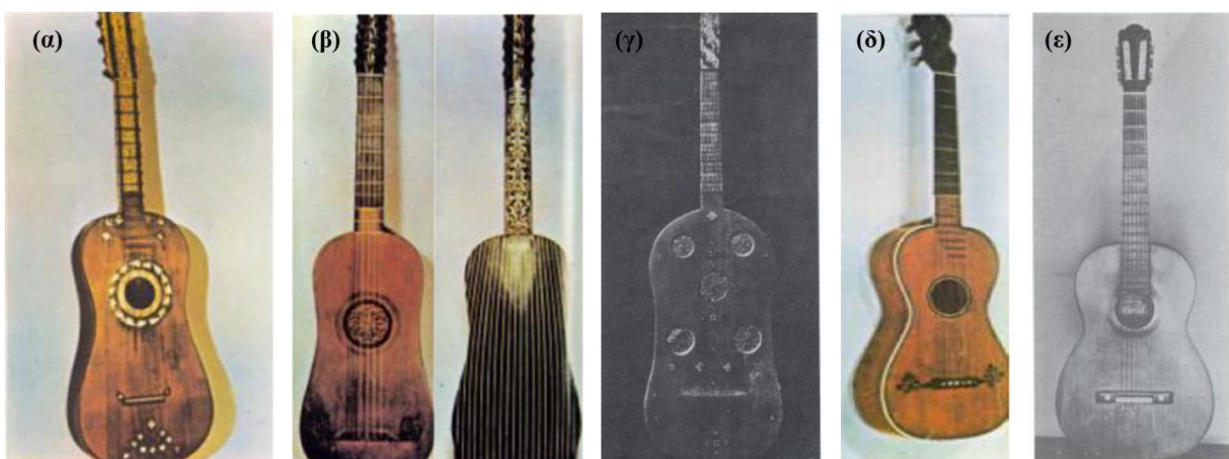
την εγγύς Ανατολή και στη συνέχεια έφτασαν ως την Αίγυπτο όπου εκεί σε συνδυασμό με τα εθνικά μουσικά όργανα της Αιγύπτου, παρατηρείται η εξέλιξή τους στους πιο άμεσους προγόνους της κιθάρας. Έτσι λοιπόν, συναντώνται στην Αίγυπτο μουσικά όργανα με έως και τέσσερις χορδές (π.χ. βλ. σχήμα 1.δ-ε), αλλά με έξι χορδές όπως η κιθάρα του τραγουδιστή Χαρ-Μοζέ (π.χ. βλ. σχήμα 1.στ), η οποία έπαιξε καταλυτικό ρόλο όχι μόνο στην εξέλιξη της κιθάρας, αλλά και όλων των εγχόρδων μουσικών οργάνων γενικότερα.

Έπειτα, τα έγχορδα όργανα μεταφέρεται στην Ευρώπη, όπου η πρώτη αναφορά έγχορδου μουσικού οργάνου όμοιου της κιθάρας, συναντάται πάνω σε Ρωμαϊκή Σαρκοφάγο κατά τον 3<sup>ο</sup> μ.Χ. αιώνα. Ωστόσο, ξεκάθαρη εμφάνιση της κιθάρας στην Ευρώπη συναντάται κατά τον 12<sup>ο</sup> μ.Χ. αιώνα στην περιοχή της Προβηγκίας (νότια Γαλλία), και εικάζεται πως οι κιθάρες που χρησιμοποιούσαν οι τροβαδούροι της Προβηγκίας προέρχονται από την Αιγυπτιακή κιθάρα. Στη συνέχεια, μέσω της Καταλονίας, η οποία τότε ήταν αυτόνομη επαρχία (της Γαλλίας), η κιθάρα φτάνει στη Γαλλία όπου γνωρίζει μεγάλη αποδοχή από τους εκεί τροβαδούρους και συνθέτες.



**Σχήμα 1:** (α) Η άρπα της βασίλισσας Σουμπ-Αντ, 2500 π.Χ [1], (β) βαβυλωνιακό κεραμικό Εσχνούνα, 1900 π.Χ. το οποίο παριστάνει Ιερέα να παίζει μουσικό όργανο όμοιο με κιθάρα [1], (γ) Χιτιτικό ανάγλυφο 1300 π.Χ από την πύλη της Σφίγγας του Αλακαχουγιούκ, το οποίο παριστάνει μουσικό να παίζει μουσικό όργανο όμοιο με κιθάρα [1]., (δ) Αιγυπτιακή άρπα που βρέθηκε στο κοιμητήριο του Έλ-Ασρρί στις Θήβες της Αιγύπτου – 1900 π.Χ. [1], (ε) Αιγυπτιακό έγχορδο μουσικό όργανο με τρεις χορδές, όμοιο της κιθάρας [1], (στ) Αιγυπτιακό μουσικό όργανο το οποίο πήρε το όνομά του από τον Αιγύπτιο τραγουδιστή Χαρ-Μοζέ στον τάφο του οποίου και βρέθηκε 1500 π.Χ. [1], και (ζ) Αιγυπτιακή κιθάρα η οποία βρέθηκε σε Κοπτικό τάφο στην Καράρα της Αιγύπτου τον 5<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. [1].

Κατά τον 16<sup>ο</sup> μ.Χ. αιώνα, η εξέλιξη του οργάνου στην Ισπανία έφερε την δημιουργίας κιθάρας με τέσσερις διπλές χορδές κι αυτό ως αντικατάσταση του λαούτου καθώς σε αντίθεση με την υπόλοιπη Ευρώπη, στην Ισπανία δεν έγινε ιδιαίτερα αποδεκτό όργανο. Περί τα 1564, κατασκευάστηκε στην Ιταλία η πρώτη κιθάρα με πέντε διπλές χορδές ως εξέλιξη της τετράχορδης, προσθέτοντας μια διπλή χορδή χαμηλότερα (π.χ. βλ. σχήμα 2.α-β). Σχεδόν ταυτόχρονα, στην Ισπανία αρχίζει να εμφανίζεται ένα όργανο παρεμφερή της κιθάρας έχοντας έξι διπλές εντερικές χορδές και κούρδισμα όπως της σημερινής, με τη διαφορά ότι η τρίτη χορδή κουρδιζόταν ένα ημιτόνιο χαμηλότερα, η Βιχουέλα (βλ. σχήμα 2.γ), το οποίο δεν έμεινε αρκετά στο χρόνο και ενώθηκε με το κύριο εξελικτικό ρεύμα της κιθάρας (η πρώτη Βιχουέλα συναντάται κατά τον 16<sup>ο</sup> αιώνα, και η τελευταία κοντά στο 1700). Τον 17<sup>ο</sup> αιώνα, παρατηρείται ιδιαίτερη άνθιση, ειδικότερα στην Ιταλία σημειώνεται η μεγαλύτερη αποδοχή του οργάνου καθώς εκεί αρχίζει να κατασκευάζεται μεγάλος αριθμός οργάνων και ταυτόχρονα να γράφεται μεγάλος αριθμός μουσικών έργων για αυτές. Ο 18<sup>ος</sup> αιώνας, φέρνει την Ιταλική καινοτομία της κιθάρας με έξι μονές χορδές (σχήμα 2.δ), η οποία θεμελίωσε το όργανο ως προς τον αριθμό των χορδών. Κατά το 19<sup>ο</sup> αιώνα, καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της κιθάρας έπαιξε ο Ισπανός κατασκευαστής Αντόνιο Τόρρες Χουράδο (1817-1892), του οποίου κατασκευαστικό έργο οδήγησε στη βασική μορφή της κιθάρας όπως τη γνωρίζουμε σήμερα (σχήμα 2.ε), καθώς επίσης έδωσε ιδιαίτερη βαρύτητα στην ακουστική της βελτίωση, ιδιαίτερα στην πάνω ηχητική πλάκα (καπάκι) και στις ακτινικές νευρώσεις κάτω από αυτό, τις οποίες πιθανόν να είναι και αυτός ο οποίος τις εφηύρε. Επίσης τυποποίησε το μήκος της χορδής στα 65 cm.



**Σχήμα 2:** (α) Ιταλική πεντάχορδη κιθάρα του 1564 μ.Χ. [1], (β) Ιταλική κιθάρα μπατέντε, 16<sup>ος</sup> αιώνας μ.Χ., με χαρακτηριστικό του οργάνου την κύρτωση στο πίσω μέρος του αντηχείου [1], (γ) η πρώτη και παλαιότερη διατηρημένη Βιχουέλα (16<sup>ος</sup> αιώνας), η οποία βρίσκεται στο μουσείο Ζακεμάρτ Αντρέ στο Παρίσι [1], (δ) η πρώτη απεικόνιση εξάχορδης κιθάρας, κατασκευής Φραγκίσκου Λουπώ 1773 [1], και (ε) κιθάρα κατασκευής Αντόνιο Τόρρες 1859 μ.Χ. [1].

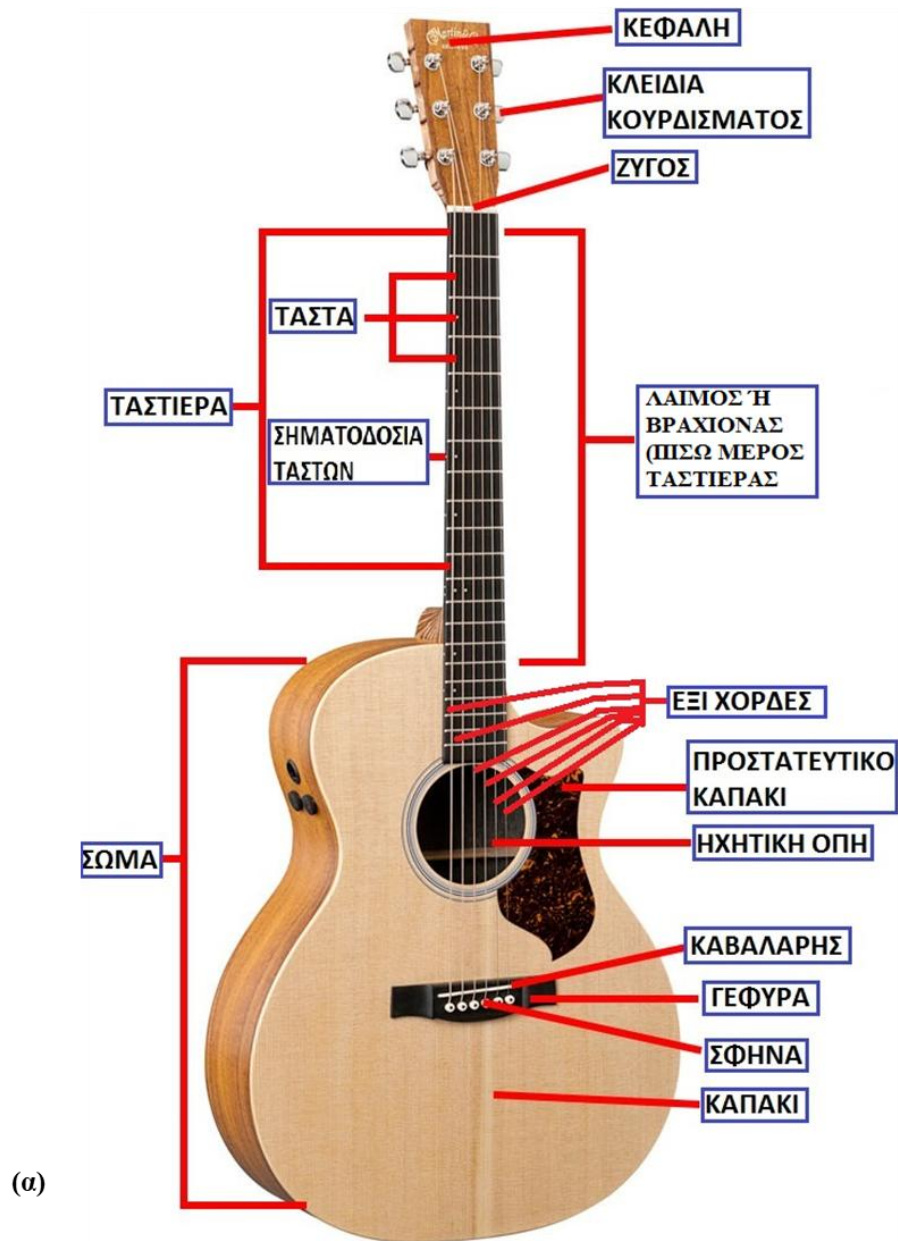


Έτσι λοιπόν η κιθάρα απέκτησε την τελική της μορφή με την οποία τη γνωρίζουμε μέχρι και σήμερα, κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα η ανάγκη ενίσχυσης του ήχου αλλά και η αναζήτηση νέου ηχοχρώματος καθώς προχωρούσε η εξελικτική πορεία μουσικών ρευμάτων (popular music), έκανε την εμφάνισή της η ακουστική κιθάρα (folk guitar), η οποία φέρει μεταλλικές χορδές και χοντρικά διατηρεί την μορφή της κλασσικής κιθάρας έχει διαφορετικό όμως τρόπο εκτέλεσης και σπουδών (μεταλλικές χορδές είχαν αρχίσει να μπαίνουν πειραματικά στις κιθάρες από το 19<sup>ο</sup> αιώνα), ενώ την ίδια εποχή, περί το 1930, εμφανίζεται και η πρώτη ηλεκτρική κιθάρα καθώς και πολλοί διαφορετικοί τύποι κιθάρας (jumbo guitar, ovation, κ.α.).

Ένα σημαντικό σχόλιο το οποίο μπορούμε να κάνουμε βλέποντας τα παραπάνω προγενέστερα όργανα της κιθάρας εξελισσόμενα στο χρόνο, είναι πως σε όλα διακρίνεται η παρουσία αντηχείου, πράγμα που μας οδηγεί στη σκέψη πως ο άνθρωπος από τα πρώτα κιόλας στάδια κατασκευής μουσικών οργάνων, ήξερε έστω και σε πρακτικό-εμπειρικό στάδιο, τη σημασία του συντονισμού και των τρόπων δόνησης ενός οργάνου, φαινόμενα τα οποία σήμερα εξετάζουμε με υψηλή ακρίβεια.

## ***2.2 Η ανατομία της σύγχρονης ακουστικής κιθάρας***

Η σύγχρονη ακουστική κιθάρα, η οποία και μελετήθηκε στην παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και τα επιμέρους κύρια μέρη της, παρουσιάζονται αναλυτικά στο σχήμα 3.α. Αποτελείται από έξι μεταλλικές χορδές οι οποίες αριθμούνται πάντοτε από κάτω προς τα πάνω (όπως την κρατά ο οργανοπαίκτης), και είναι οι: 1<sup>η</sup> E4 (329 Hz), 2<sup>η</sup> B3 (246 Hz), 3<sup>η</sup> G3 (196 Hz), 4<sup>η</sup> D3 (146 Hz), 5<sup>η</sup> A2 (110 Hz), και 6<sup>η</sup> E2 (82 Hz). Οι χορδές προσαρμόζονται στη γέφυρα μέσω του καβαλάρη. Η γέφυρα είναι κολλημένη στο καπάκι και περνώντας από την ταστιέρα καταλήγουν στα κλειδιά. Το μήκος της χορδής όμως, έχει ως άκρο το ζυγό. Το σώμα της κιθάρας είναι ένα ξύλινο κουτί που αποτελείται από την μπροστινή πλάκα (καπάκι) και την πίσω πλάκα (πλάτη) όπου όλο αυτό το σύστημα μαζί, συντελεί το αντηχείο. Η ταστιέρα προσαρμόζεται στο καπάκι και στα πλαϊνά/πλευρές (ribs). Είναι σημαντικό να σημειωθεί η ύπαρξη ξύλινων ράβδων (νεύρων ή καμάρια) στην εσωτερική πλευρά των πλάτης και καπακιού, καθώς και αυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στο «κούρδισμα» αυτών αλλά και του αντηχείου γενικότερα. Μάλιστα, η σχεδίαση ταξινόμησης και τοποθέτησης των νεύρων, ποικίλουν από κιθάρα σε κιθάρα (ενδεικτικά βλ. σχήμα 3.β).

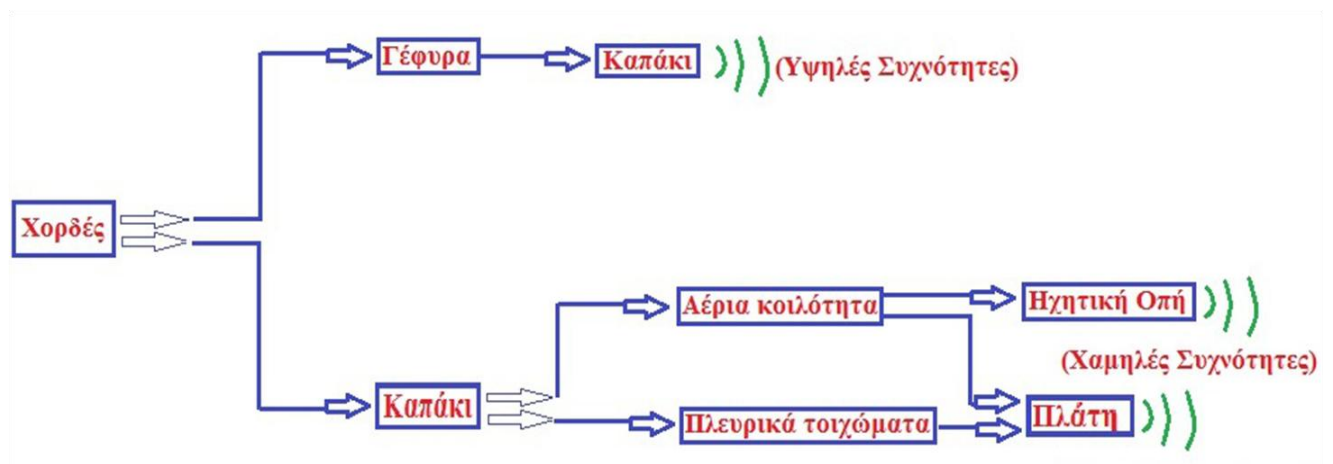


**Σχήμα 3:** (α) επιμέρους κύρια μέρη σύγχρονης ηλεκτροακουστικής κιθάρας, και (β) μεμονωμένο καπάκι ακουστικής κιθάρας με ευδιάκριτη την των ύπαρξη νευρών (αριστερά) και μεμονωμένη πλάτη ακουστικής κιθάρας με ευδιάκριτη την ύπαρξη νευρών (δεξιά).

### 2.3 Παραγωγή ήχου στην κιθάρα

Εδώ παρατίθεται με σχετική ανάλυση ο τρόπος παραγωγής του ήχου στην κιθάρα καθώς και η όλη αρχή λειτουργίας της.

Η αρχική διέγερση έρχεται από τη χορδή με τη νύξη αυτής, της οποίας όμως η ταλάντωση αποσβένει πολύ γρήγορα. Η διέγερση αυτή, η οποία έχει ευρύ συχνοτικό περιεχόμενο, φτάνει στη γέφυρα, η οποία στη συνέχεια με τη σειρά της θα τη μεταφέρει στο καπάκι το οποίο, ως μεγάλη ελαστική επιφάνεια, έχει τη δυνατότητα να εκπέμπει ηχητικά κύματα και να μεταφέρει την ενέργεια δόνησης στην αέρια κοιλότητα και την πλάτη. Ο ήχος ακτινοβολείται αποτελεσματικά από τις ταλαντευόμενες επιφάνειες και την οπή. Οι χορδές από μόνες τους δεν είναι ικανές να ηχοβολίσουν επαρκή ποσά ηχητικής ενέργειας και για αυτό τα έγχορδα ακουστικά μουσικά όργανα χρειάζονται πάντα αντηχείο καθώς ο απευθείας ήχος μόνο από τη χορδή ακτινοβολεί ένα πολύ μικρό ποσοστό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, η ένταση από τον ήχο ταλαντευόμενων χορδών ηλεκτρικής κιθάρας χωρίς ενισχυτή. Ο παραγόμενος ήχος της κιθάρας οφείλεται σε σύζευξη ταλαντώσεων (coupling) και ακτινοβολείται από τις ταλαντευόμενες επιφάνειες της κιθάρας και την οπή.



Σχήμα 4: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας παραγωγής του ήχου στην κιθάρα.

Ειδικότερα, η διέγερση που παράγεται από τη χορδή μεταφέρεται στη γέφυρα και στο καπάκι, όπου:

- **Για τις χαμηλές συχνότητες:** Η διέγερση του καπακιού από τις χορδές μεταφέρεται μέσω της εσωτερικής κοιλότητας αέρα στην οπή, καθώς και μέσω των πλευρικών τοιχωμάτων στην πλάτη. Η γέφυρα σε αυτή την περίπτωση ενεργεί σαν αναπόσπαστο μέρος του καπακιού καθώς

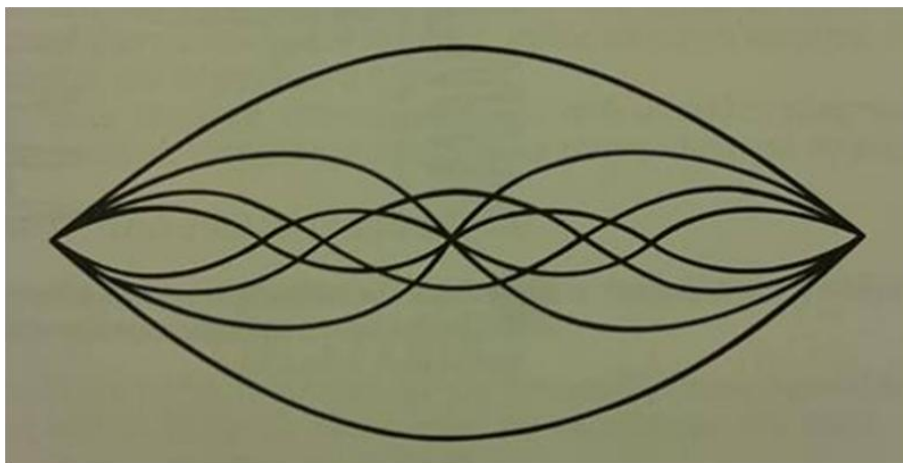
σαν μεγάλα μήκη κύματος θα λέγαμε ότι την προσπερνούν δίχως αυτή να επιφέρει κάποια συνεισφορά για τη συνέχεια.

• **Για τις υψηλές συχνότητες:** Μέσω της χορδής μεταφέρονται δονήσεις στο καπάκι και οι μηχανικές ιδιότητες της γέφυρας συνεισφέρουν σημαντικά καθώς ως μικρά μήκη κύματος, ενισχύονται μέσω της γέφυρας και μεταφέρονται στο καπάκι με ικανοποιητική ενέργεια ώστε στη συνέχεια αυτό να δονηθεί επαρκώς.

Έτσι λοιπόν, οι υψηλές συχνότητες της κιθάρας οφείλουν την παραγωγή τους στις δονήσεις που δημιουργούνται στο καπάκι, ενώ οι χαμηλές στην αέρια κοιλότητα και στην πλάτη. Όπως μάλιστα θα δούμε και στη συνέχεια, η αέρινη συχνότητα της κιθάρας για τους παραπάνω λόγους, βρίσκεται παρούσα σε κάθε συχνότητα της χαμηλής περιοχής της κιθάρας, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτή και πηγαίνουμε προς τις υψηλές, αυτή χάνεται καθώς παύει να έχει συνεισφορά η αέρια κοιλότητα.

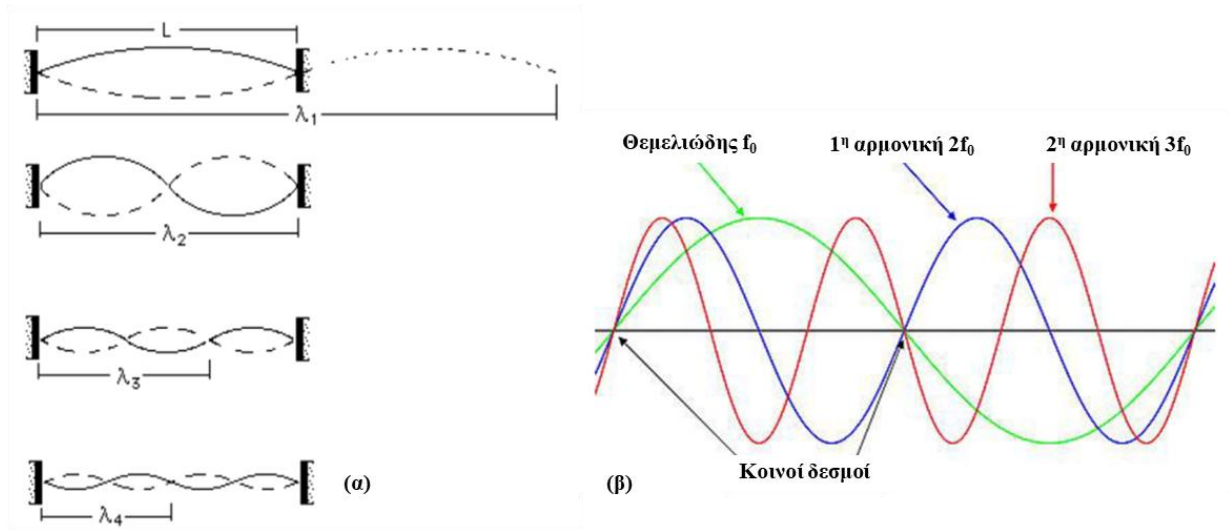
### 2.3.1 Δόνηση χορδής κιθάρας

Η χορδή της κιθάρας, είναι πάντοτε στερεωμένη σε δύο άκρα όπου όταν με οποιονδήποτε τρόπο τεθεί σε διέγερση (πένα, δάχτυλο), θα επιφέρει έναν σύνθετο ήχο του οποίου το αποτέλεσμα θα οφείλεται στο συνδυασμό των κανονικών τρόπων ταλάντωσης της χορδής. Έτσι λοιπόν, ο ήχος που θα παραχθεί (τόνος-φθόγγος), θα είναι η συχνότητα του πρώτου στάσιμου κύματος της χορδής, αλλά και οι συχνότητες οι οποίες προκύπτουν από τα στάσιμα κύματα τα οποία προέρχονται από το πρώτο στάσιμο κύμα. Με άλλα λόγια, η χορδή ταλαντώνεται ταυτόχρονα: ολόκληρη, στο  $1/2$  της,  $1/3$  της,  $1/4$  της,  $1/5$  της κοκ όπου κάθε από τα παλλόμενα μέρη της, παράγει κι από μια διαφορετική συχνότητα (σχήμα 5).



**Σχήμα 5:** Απεικόνιση παλλόμενης χορδής με τις επιμέρους ταυτόχρονες ταλαντώσεις της [2].

Για καλύτερη κατανόηση παρατίθεται το σχήμα 6:



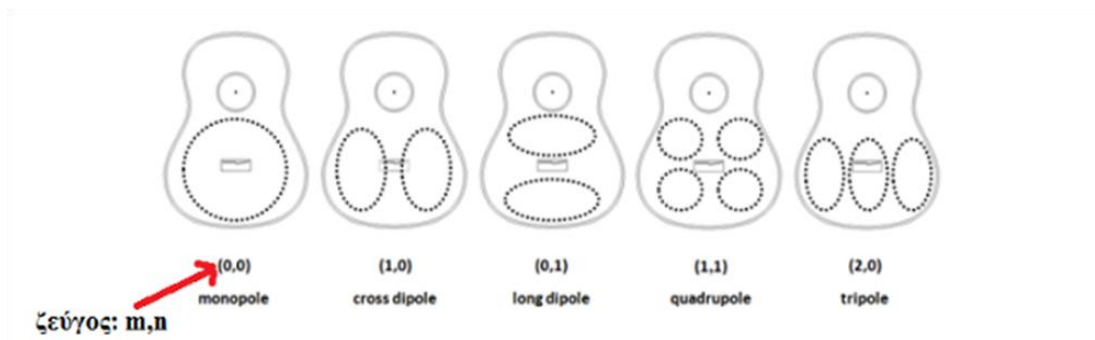
**Σχήμα 6:** (α) απεικόνιση εξιδανικευμένης χορδής στερεωμένης σε δύο άκρα και οι τέσσερις πρώτοι τρόποι δόνησής της, και (β) θεμελιώδης συχνότητα μαζί με τους δύο πρώτους αρμονικούς της.

Στο σχήμα 6.α,  $L$  είναι το μήκος της χορδής και  $\lambda$  το μήκος κύματος. Το πρώτο στάσιμο κύμα, είναι πάντα  $2L$ . Δηλαδή το μήκος ηχητικού κύματος που θα προκύψει, θα είναι το διπλάσιο του μήκους της χορδής και είναι εκείνο του οποίου η συχνότητα αντιστοιχεί στην όποια νότα εκτελούμε. Η συχνότητα αυτή, ονομάζεται *θεμελιώδης συχνότητα* (ή *βασικός φθόγγος*) και συμβολίζεται ως  $f_0$ . Βλέπουμε λοιπόν ότι κατά τη διέγερση της χορδής, δεν προκύπτει μόνο το μήκος κύματος της συχνότητας του φθόγγου που παράγει η χορδή, αλλά θα προκύψει και μια σειρά άλλων ηχητικών κυμάτων (σχήμα 6.β), τα οποία με τη σειρά τους αντιπροσωπεύουν τις αρμονικές συχνότητες της χορδής-φθόγγου και ονομάζονται *αρμονικές του φθόγγου* ή *αρμονικές σειρές* (*harmonics – overtones*). Οι συχνότητες των αρμονικών ενός φθόγγου ο οποίος παράγεται από τη διέγερση μιας χορδής, είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους  $f_0$ , δηλαδή  $nf_0$  όπου  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Για παράδειγμα, για το μεσαίο Λα του πενταγράμμου (ή Λα κουρδίσματος) με  $f_0 = 440 \text{ Hz}$ , για την 1<sup>η</sup> αρμονική θα είναι  $2f_0 = 880 \text{ Hz}$ , για τη 2<sup>η</sup> αρμονική  $2f_0 = 1320 \text{ Hz}$  κ.ο.κ.

Σημαντικό ρόλο, έχει το σημείο στο οποίο η πένα ή το δάχτυλο θα διεγείρουν τη χορδή, καθώς αν, για παράδειγμα, η διέγερση γίνει στο σημείο του  $1/5$  της χορδής, τότε η 5<sup>η</sup> αρμονική της χορδής θα λείπει. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι οι αρμονικές ακολουθούν (συνήθως) φθίνουσα ακολουθία έντασης, δηλαδή την μεγαλύτερη ένταση έχει η θεμελιώδης συχνότητα, την αμέσως μικρότερη ο δεύτερος αρμονικός, κ.ο.κ.

### 2.3.2 Δόνηση επιμέρους μερών κιθάρας

Συνέπεια της μεταφοράς της δόνησης των χορδών στο καπάκι της κιθάρας (διαμέσου της γέφυρας), είναι η δόνηση του καπακιού της κιθάρας. Το καπάκι (top plate ή soundboard), ως επιφάνεια δύο διαστάσεων, έχει διάφορους τρόπους ταλάντωσης κατά μήκος αλλά και κατά πλάτος της επιφάνειάς του. Κάθε κανονικός τρόπος ταλάντωσης, ανάλογα με τη συχνότητα η οποία θα συντονίσει την εκάστοτε επιφάνεια, συμβολίζεται μονοσήμαντα, με ένα ζεύγος ακεραίων ( $m, n$ ) όπως βλέπουμε στο σχήμα 7:



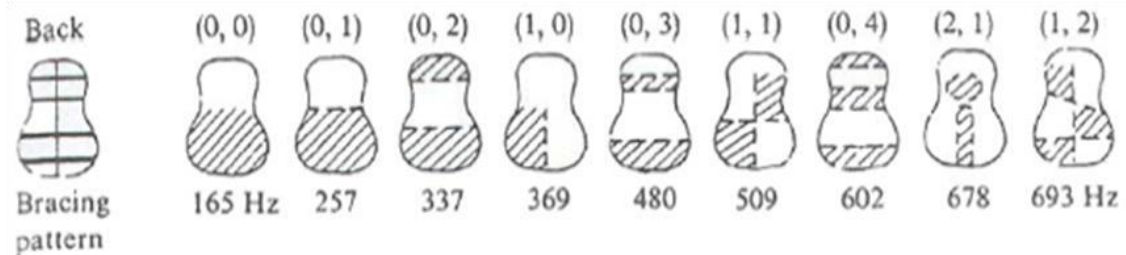
Σχήμα 7: Κανονικοί τρόποι δόνησης καπακιού κιθάρας [7].

Χαρακτηριστικό γνώρισμα στην κατασκευή των καπακιών κιθάρας, είναι ο ήχος που αυτά παράγουν όταν χτυπηθούν ελαφρά (tap tone). Ο ήχος αυτός αποτελεί σημαντική πληροφορία για τους κατασκευαστές μουσικών οργάνων, καθώς με τον τρόπο αυτό, «κουρδίζουν» ανάλογα το καπάκι αποδίδοντάς του έτσι τις συχνότητες στις οποίες θα συντονίζεται. Αναφέρεται ότι γενικά η διαδικασία κουρδίσματος του καπακιού, γίνεται με την ανάλογη λείανση της επιφάνειάς του, αλλά και τον ανάλογο σχηματισμό στα νεύρα του καπακιού.

Καθώς η δόνηση του καπακιού μεταφέρεται στα πλαϊνά μέρη (ribs) κι από εκεί στην πλάτη της κιθάρας (back plate), παρουσιάζονται τρόποι δόνησης αντίστοιχοι με αυτών του καπακιού (π.χ. βλ. σχήμα 8), χωρίς ωστόσο σε πρώτη φάση να συνεισφέρουν όσο το καπάκι, καθώς αποσβένουν σύντομα εξ' αιτίας της επαφής με το σώμα του κιθαριστή και δεν βρίσκονται στην κατεύθυνση ηχητικής εκπομπής. Στη συνέχεια όμως, θα αναλυθεί η συνεισφορά τους στις συζευγμένες κινήσεις όλων των επιφανειών της κιθάρας, που είναι και η ολοκληρωμένη αιτία παραγωγής του ήχου της κιθάρας, και θα δούμε πως στο γενικό σύνολο η παρουσία τους είναι εξαιρετικά σημαντική.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα πλαϊνά μέρη δεν ταλαντώνονται κάθετα στην επιφάνειά τους και έτσι δεν επιφέρουν κάποια συνεισφορά στον παραγόμενο ήχο. Ο ρόλος τους όμως,

είναι εξαιρετικά χρήσιμος καθώς μεταφέρουν την ταλάντωση του καπακιού στην πλάτη. Επίσης, με τις ανάλογες διαστάσεις τους, δεδομένου ότι αποτελούν τη σύνδεση μεταξύ καπακιού και πλάτης, επιφέρουν το τελικό αποτέλεσμα στον όγκο του αντηχείου που όπως θα δούμε στη συνέχεια, αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα.



**Σχήμα 8:** Απεικόνιση τρόπων δόνησης για την πλάτη της ακουστικής κιθάρας Martin D-28 [5].

### 2.3.3 Δόνηση αέρα αντηχείου κιθάρας

Ο περικυκλωμένος αέρας εντός του αντηχείου της κιθάρας παρουσιάζει με τη σειρά του ανάλογους συντονισμούς, καθώς διεγείρεται από τη δόνηση του σώματος της κιθάρας. Ουσιαστικά το σύστημα αντηχείο-αέρας της κιθάρας πρόκειται για ένα συντονιστή Helmholtz. Γενικότερα, ο συντονιστής Helmholtz είναι ένα είδος δονούμενου συστήματος, του οποίου όταν η αέρια μάζα που βρίσκεται στο εσωτερικό του τεθεί σε ταλάντωση, παράγει μία συχνότητα βάση των διαστάσεων του δοχείου/αντηχείου. Η συχνότητα αυτή, ονομάζεται συχνότητα συντονισμού δοχείου ή συχνότητα Helmholtz, φόρο τιμής στον Γερμανό φυσικό Hermann von Helmholtz, ο οποίος μελέτησε εκτενώς το φαινόμενο αυτό και εξήγαγε τον θεωρητικό τύπο υπολογισμού της συχνότητας αυτής.

Έχοντας ως τυπικό παράδειγμα ενός τέτοιου συντονιστή ένα μπουκάλι όγκου  $V$ , με μήκος «λαιμού»  $l$ , και επιφάνεια ανοίγματος «λαιμού»  $a$ , η συχνότητα Helmholtz δίνεται από την έκφραση:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{Vl}} \quad (1)$$

όπου  $c$  η ταχύτητα του ήχου στον αέρα. Δηλαδή, η αέρια μάζα μέσα στο συντονιστή ταλαντώνεται δίνοντας τη χαρακτηριστική συχνότητα Helmholtz ανάλογα με τις διαστάσεις του συστήματος. Η μάζα του αέρα στο λαιμό παίζει το ρόλο του εμβόλου και η μάζα μέσα στο κυρίως σώμα του συντονιστή το ρόλο του ελατηρίου.

Για την περίπτωση της κιθάρας, η συχνότητα Helmholtz αναφέρεται ως *αέρινη συχνότητα* και εντοπίζεται πάντα ως ο πρώτος διακριτός συντονισμός του αντηχείου. Η πληροφορία για την τιμή της αέρινης συχνότητας σε ένα τέτοιο όργανο, αποτελεί υψίστης σημασίας πληροφορία για τον ακουστικό χαρακτηρισμό του, καθώς αυτή προσδιορίζει αρχικά το αν ένα όργανο συντονίζει εντονότερα στις χαμηλές συχνότητες ή σε πιο ψηλές. Επιφέρει επίσης και ηχόχρωμα στον παραγόμενο ήχο.

Στην παρούσα φάση, θα συμπεριφερθούμε και θα λάβουμε υπόψη μας το αντηχείο της κιθάρας σαν δοχείο απορρίπτοντας για την ώρα ιδιαιτερότητες του καπακιού που αφορούν το κούρδισμά του, το οποίο προκύπτει από τον ιδιαίτερο χειρισμό του οργανοποιού στη διαδικασία της λείανσής του, απόδοσης σε αυτό καταλλήλου πάχους κ.λπ. Ο θεωρητικός υπολογισμός της αέρινης συχνότητας για αέρια κοιλότητα όπως είναι το αντηχείο της κιθάρας και όχι για δοχείο που αναφέραμε πιο πάνω, προκύπτει από τη σχέση:

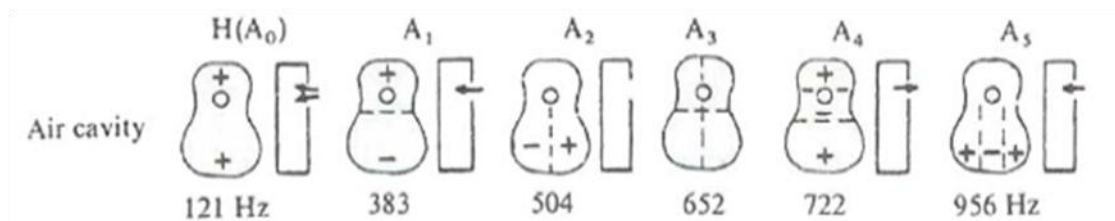
$$f_{air} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1.8r}{V}} \quad (2)$$

όπου  $r$  η ακτίνα οπής της κιθάρας, ενώ πλέον  $V$  είναι ο όγκος του αντηχείου της κιθάρας. Η αέρινη συχνότητα για τις κιθάρες μεγέθους 4/4, εντοπίζεται συνήθως περίπου στα 100 Hz.

Πέραν της αέρινης συχνότητας συντονισμού, η αέρια κοιλότητα της κιθάρας παρουσιάζει και μια σειρά άλλων συντονισμών στο εσωτερικό του αντηχείου, υψηλότερα από την αέρινη συχνότητα όπου μοιάζουν με τα στάσιμα κύματα τα οποία δημιουργούνται στο εσωτερικό ενός παραλληλεπίπεδου κουτιού.

Για την ανίχνευση των συχνοτήτων δόνησης της αέρινης κοιλότητας αέρα μιας κιθάρας, η πλάτη και το καπάκι θα πρέπει να βυθιστούν σε άμμο, προκειμένου να “ακυρωθούν” οι δικό τους τρόποι δόνησης και έτσι να πάρουμε μόνο τις συχνότητες συντονισμού του αέρα που δημιουργούνται εντός του αντηχείου, δίχως τη συνεισφορά αυτών των καπακιού και πλάτης, καθώς όπως θα δούμε στη συνέχεια, οι συζευγμένες κινήσεις και των τριών συμβάλουν στο να δημιουργηθούν οι τελικοί τρόποι δόνησης στο ολικό σώμα μιας δεμένης κιθάρας. Στο σχήμα 9 βλέπουμε αρχικά την αέρινη συχνότητα συντονισμού κιθάρας ( $A_0$  121 Hz) και έπειτα τους υπόλοιπους τρόπους δόνησης της αέριας κοιλότητας. Αξίζει να σημειώσουμε ότι με εξαίρεση την αέρινη συχνότητα της οποίας ο ήχος βγαίνει από την οπή της κιθάρας, οι υπόλοιποι συντονισμοί της αέριας κοιλότητας, δεν μεταδίδονται μέσω της οπής και επομένως δεν εκπέμπουν ήχο. Η σπουδαιότητά τους όμως, έγκειται στη σύζευξή τους με τους συντονισμούς του καπακιού και της πλάτης όπου με τον τρόπο αυτό συνεισφέρουν στην ενίσχυσή τους.





Σχήμα 9: Τρόποι δόνησης της αέριας κοιλότητας για την ακουστική κιθάρα Martin D-28 [5].

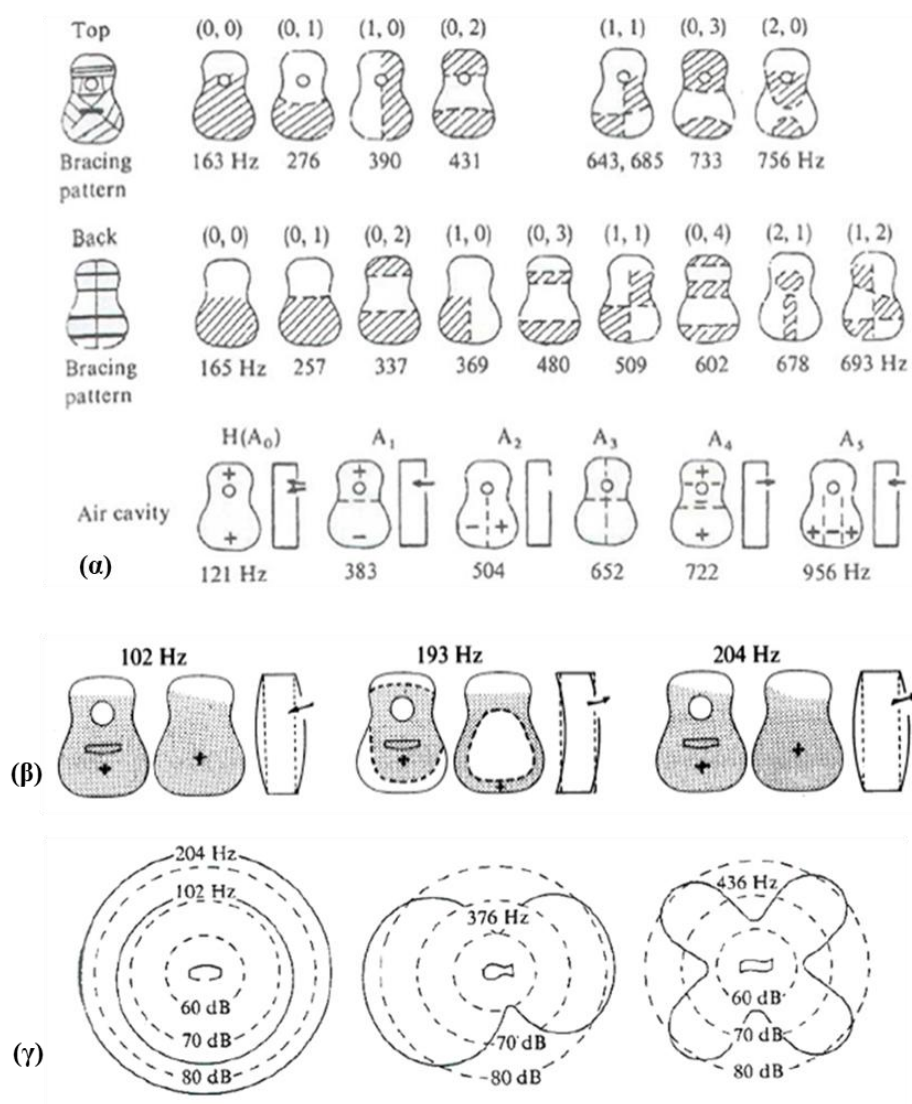
### 2.3.4 Συντονισμοί σώματος κιθάρας – Συζευγμένες ταλαντώσεις

Εξετάσαμε πιο πάνω τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί το κάθε κομμάτι της κιθάρας και τη συνεισφορά του καθενός ξεχωριστά. Συνοψίζοντας τα μέχρι τώρα δεδομένα, έχουμε δει ότι το καπάκι και η πλάτη του οργάνου, όταν μετρηθούν το καθένα ξεχωριστά, θα μας δώσει τους δικούς του τρόπους δόνησης στις αντίστοιχες συχνότητες.

Όσο αφορά τώρα στο συνολικό «δεμένο» όργανο, οι τρόποι δόνησεως οι οποίοι θα διακριθούν στο σώμα μιας πλήρους κιθάρας οφείλονται σε συζευγμένες κινήσεις (coupling) των τρόπων δόνησης μεταξύ καπακιού, πλάτης και αέριας κοιλότητας. Για παράδειγμα, με αναφορά στο σχήμα 10.α, μπορούμε να δούμε ότι ο πρώτος τρόπος δόνησης της αέρινης κοιλότητας θα έχει συνεισφορά στον τρίτο του καπακιού, ο δεύτερος στον έκτο της πλάτης, κ.ο.κ. όπου οι τρόποι δόνησης και των τριών αυτών μερών, θα οδηγήσουν στη συνέχεια μέσω των συζευγμένων τους κινήσεων στο σχηματισμό των τελικών τρόπων δόνησης στο σώμα της κιθάρας και οι οποίοι θα σχηματίζονται δηλαδή στο πλήρες όργανο. Η σύζευξη ανάμεσα στον καθένα από τους χαμηλούς τρόπους ταλάντωσης που φαίνονται στο σχήμα 10.α, οδηγεί το σώμα της δεμένης κιθάρας σε συντονισμούς που φαίνονται στο σχήμα 10.β, για το παράδειγμά μας στα 102, 193 και 240Hz. Στον πρώτο από τους τρεις χαμηλότερους συντονισμούς (102 Hz), το καπάκι και η πλάτη κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις κάνοντας την κιθάρα να αναπνέει μέσα και έξω από την οπή. Στο δεύτερο συντονισμό (193 Hz), το καπάκι και η πλάτη κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση. Στον τρίτο συντονισμό (204 Hz), το καπάκι και η πλάτη κινούνται σε διαφορετική κατεύθυνση το καθένα, αλλά ο αέρας μέσα στην οπή κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση από ότι στον πρώτο τρόπο δόνησης των 102 Hz. Επίσης, το καπάκι της δεμένης κιθάρας για τους συντονισμούς των 193 και 204 Hz φαινομενικά περιγράφει τον ίδιο τρόπο δόνησης, η διαφορά του 204 Hz, είναι ότι το καπάκι κινείται με διαφορά φάσης απ' ότι κινούταν στον τρόπο 193 Hz. Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται *διπλός εκφυλισμός* και συναντάται πολύ συχνά στη μελέτη των τρόπων δόνησης ενός μουσικού οργάνου που φέρει

αντηχείο. Ουσιαστικά λοιπόν, ο τρίτος τρόπος δόνησης του σχήματος 10.β, είναι ο δεύτερος αλλά διπλά εκφυλισμένος.

Το σώμα της κιθάρας, ως δονούμενη επιφάνεια παρουσιάζει κατευθυντικότητα εκπομπής του ήχου της ανάλογα με τη συχνότητα ταλάντωσής της. Οι χαμηλής συχνότητας τρόποι δόνησης, εκπέμπονται πανοραμικά, ενώ όσο ανεβαίνει η συχνότητα αρχίζει να παρουσιάζει κατευθυντικότητα. Στο σχήμα 10.γ (αφορά στην κιθάρα του σχήματος 10.β) βλέπουμε ότι στους συντονισμούς για τους τρόπους δόνησης των 102 και 204 Hz, η κιθάρα εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, στα 376 Hz υπάρχει κατευθυντικότητα της μορφής διπόλου, και στα 436 Hz με τη μορφή τετραπόλου.

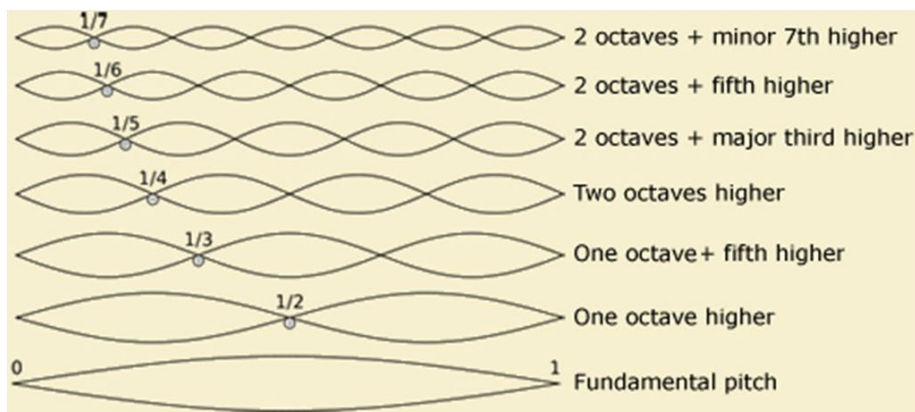


**Σχήμα 10:** (α) παράθεση τρόπων δόνησης μεμονωμένα για τα μέρη καπάκι, πλάτη και αέρια κοιλότητα, της ακουστικής κιθάρας Martin D-28 [5], (β) τρόποι δόνησης του σώματος δεμένης ακουστικής κιθάρας Martin D-28 [10], και (γ) κατευθυντικότητα εκπομπής ήχου για τους τέσσερις πρώτους τρόπους δόνησης της δεμένης ακουστικής κιθάρας Martin D-28 [4].

## 2.4 Βασικά χαρακτηριστικά εκπεμπόμενου ήχου

Από την πλευρά του Τονικού Μουσικού Συστήματος τώρα και μιλώντας με την αντίστοιχη ορολογία, οι αρμονικές ενός φθόγγου ο οποίος παράγεται από έγχορδο μουσικό όργανο, έχουν τις εξής αποστάσεις διαστημάτων (βλ. σχήμα 11):

- Τονικό ύψος της θεμελιώδους νότας
- 1<sup>η</sup> αρμονική: μία οκτάβα υψηλότερα από την θεμελιώδη
- 2<sup>η</sup> αρμονική: μία οκτάβα και ένα διάστημα 5<sup>ης</sup> υψηλότερα από την θεμελιώδη
- 3<sup>η</sup> αρμονική: δύο οκτάβες υψηλότερα από την θεμελιώδη
- 4<sup>η</sup> αρμονική: δύο οκτάβες και ένα διάστημα 3<sup>ης</sup> μεγάλης υψηλότερα από την θεμελιώδη
- 5<sup>η</sup> αρμονική: δύο οκτάβες και ένα διάστημα 5<sup>ης</sup> καθαρής υψηλότερα από τη θεμελιώδη
- 6<sup>η</sup> αρμονική: δύο οκτάβες και ένα διάστημα 7<sup>ης</sup> μικρής υψηλότερα από τη θεμελιώδη.



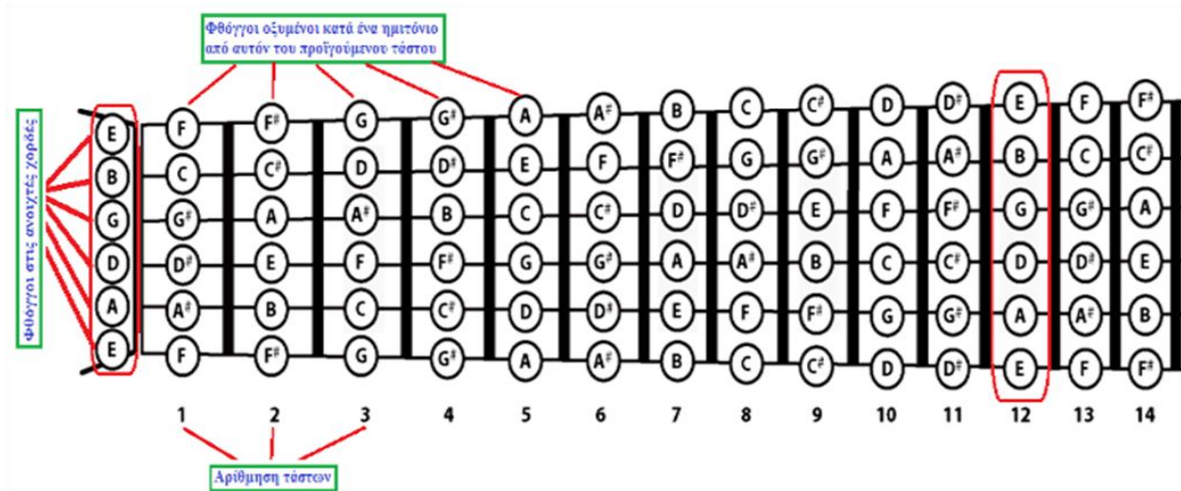
**Σχήμα 11:** απεικόνιση των αρμονικών συχνοτήτων πάνω σε χορδή και η μουσική απόσταση αυτών με βάση την θεμελιώδη νότα [9].

Γενικά οι αρμονικές σειρές και ο τρόπος με τον οποίο τις εμφανίζει κάθε μουσικό όργανο (συχνοτικό πεδίο συναρτήσεως έντασης για τον κάθε ένα), συντελούν στο λεγόμενο *ηχόχρωμα*.

Το μουσικό εύρος μιας τυπικής ακουστικής κιθάρας 20 τάστων, είναι για την μουσική έκταση E2 – C6 όπου μεταφραζόμενο σε συχνοτικό εύρος, αντιστοιχεί στις θεμελιώδεις συχνότητες των: 82.4 – 1046.5 Hz. Τονίζεται ότι αυτό το εύρος, αντιστοιχεί στις παραγόμενες  $f_0$  συχνότητες, δίχως τον συν-υπολογισμό των αρμονικών συχνοτήτων για κάθε  $f_0$ . Αυτή αποτελεί την ηχητική περιοχή εκπομπής μουσικού οργάνου και μόνο με αυτήν θα ασχοληθούμε.

Η ελάχιστη απόσταση μουσικών φθόγγων της δυτικής Ευρωπαϊκής μουσικής, απαντάται επ' ακριβώς στην ταστιέρα της κιθάρας. Η μικρότερη τονική απόσταση που μπορεί να υπάρξει στο μουσικό μας σύστημα, είναι το ημιτόνιο. Κάθε τάστο της κιθάρας (βλ. σχήμα

12), έχει και την απόσταση ενός ημιτονίου από το φθόγγο που έχει το ακριβώς προηγούμενο (συγκερασμένο σύστημα). Μπορούμε να πούμε δηλαδή πως το ανέβασμα της ταστιέρας, απεικονίζει πλήρως το χρωματικό ανέβασμα του μουσικού συστήματος.



**Σχήμα 12:** αναπαράσταση της ταστιέρας της κιθάρας με ονοματοδότηση φθόγγων σε τάστα αντίστοιχων συχνοτήτων.

Όπως είναι γνωστό, η μουσική οκτάβα αποτελείται από την απόσταση 8 φθόγγων ή 12 ημιτονίων. Έτσι λοιπόν και στην ταστιέρα της κιθάρας, αν από οποιονδήποτε φθόγγο μετρήσουμε μια απόσταση 12 τάστων, θα συναντήσουμε ξανά τον ίδιο φθόγγο, σε απόσταση οκτάβας όμως, όπου μιλώντας με μεγέθη συχνοτήτων, σε διπλάσια συχνότητα από αυτή του αρχικού φθόγγου. Για παράδειγμα, στο σχήμα 12 στο 12<sup>ο</sup> τάστο συναντούμε πάλι τις ίδιες νότες που έχουμε και στις ανοιχτές χορδές της κιθάρας, όλες σε απόσταση οκτάβας.

Η συνήθης μουσική οκτάβα ορίζεται σαν η ζώνη συχνοτήτων μεταβλητού εύρους, όπου η αρχική συχνότητα,  $f_1$ , και η τελική συχνότητα,  $f_2$ , ικανοποιούν τη σχέση:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (3)$$

Για παράδειγμα η συχνότητα του επόμενου ΛΑ από αυτό που χρησιμοποιούμε για κούρδισμα (που είναι το ΛΑ των 440 Hz), θα είναι 880 Hz και η συχνότητα του επόμενου 1760 Hz, ενώ του αμέσως προηγούμενου από το πρώτο θα είναι 220 Hz. Προκειμένου να υπολογίσουμε τη συχνότητα που θα έχει ένας φθόγγος όταν ανεβεί ένα ημιτόνιο (ή όταν πάμε από ένα τάστο μιας χορδής στο αμέσως επόμενο της ίδιας), θα πολλαπλασιάσουμε την συχνότητα του φθόγγου με βάση την εξής σχέση:

$$\sqrt[12]{2} = 1.0595 \quad (4)$$

Έτσι λοιπόν αν από το ΛΑ 440Hz, ανεβούμε χρωματικά κατά ένα ημιτόνιο, θα πάμε στο ΛΑ# του οποίου η συχνότητα αντιστοιχεί σε  $440 \text{ Hz} \times 1.0595 = 466.18 \text{ Hz}$ .

Η κατασκευή της Κιθάρας τώρα αλλά και πολλών ακόμη έγχορδων μουσικών οργάνων, είναι τέτοια όπου μια συγκεκριμένη νότα του Τονικού Μουσικού Συστήματος, μπορεί να βρεθεί σε πολλές θέσεις σε διαφορετικές χορδές και τάστα, σε αντίθεση με άλλα όργανα, όπως το πιάνο, όπου μια συγκεκριμένη νότα μίας οκτάβας, συναντάται σε ένα και μοναδικό πλήκτρο. Για παράδειγμα, στην κιθάρα, ο φθόγγος Λα/Α των 220 Hz, συναντάται στο 2<sup>ο</sup> τάστο της 3<sup>ης</sup> χορδής, στο 7<sup>ο</sup> τάστο της 4<sup>ης</sup> χορδής, στο 12<sup>ο</sup> τάστο της 5<sup>ης</sup> χορδής, και στο 17<sup>ο</sup> τάστο της 6<sup>ης</sup> χορδής.

Τέλος, από πλευράς κατασκευής, να πούμε ότι οι αποστάσεις τοποθέτησης των τάστων επάνω στην ταστιέρα της κιθάρας δεν είναι καθόλου τυχαίες, προκειμένου να μπορούν να επαληθεύονται όλα τα παραπάνω. Τις αποστάσεις αυτές, τις υποδεικνύει η εξής μαθηματική σχέση:

$$l_k = \left[ 1 - 2^{-\left(\frac{k}{x}\right)} \right] L \quad (5)$$

όπου  $L$  είναι το μήκος της χορδής, η οποία δονείται σε ολόκληρο το μήκος της,  $l_k$  η απόσταση από το τάστο μηδέν, και  $x = 12$  είναι το πλήθος των ελάχιστων μουσικών διαστημάτων μιας οκτάβας, για το συγκεκριμένο μουσικό σύστημα της Δυτικής Ευρωπαϊκής μουσικής.

Όταν ο κιθαριστής εκτελεί νότες στην ταστιέρα της κιθάρας, αυτό που ουσιαστικά κάνει εκείνη την ώρα στη χορδή και έχουμε διαφορετικές νότες σε κάθε τάστο της, είναι πως αλλάζει το μήκος κύματός της. Συνεπώς αλλάζει και το μήκος ακουστικού κύματος επομένως και η συχνότητα που θα παραχθεί. Γι αυτό και για μία χορδή, η χαμηλότερης συχνότητας νότα είναι πάντα αυτή που έχει η χορδή όταν ταλαντωθεί ελεύθερη, ενώ όσο αρχίζουμε να εκτελούμε στα τάστα της χορδής πηγαίνοντας προς τα δεξιά της ταστιέρας, έχουμε συνεχώς υψηλότερες νότες καθώς μικραίνει το μήκος κύματος της. Τα τάστα από την άλλη προκειμένου να αλλάζουν τη συχνότητα σύμφωνα με συχνότητες που αντιστοιχούν σε φθόγγους του Τονικού Μουσικού συστήματος, έχουν πάντα την κατάλληλη τοποθέτησή τους επάνω στην ταστιέρα.

### 3. Στοιχεία θεωρίας

Το κεφάλαιο αυτό αποσκοπεί στην παρουσίαση και επεξήγηση των βασικών εκείνων εννοιών που άπτονται της ακουστικής μελέτης της κιθάρας στην παρούσα εργασία, δηλαδή της καταγραφής του εκπεμπόμενου από αυτήν ήχο, την εξαγωγή καμπύλης απόκρισης συνέπεια κρουστικής διέγερσης, και την καταγραφή κανονικών τρόπων δόνησης με οπτική τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας.

Κυρίαρχο ρόλο στην συμπεριφορά του οργάνου έχει η έννοια του *συντονισμού*. Συντονισμός καλείται το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο όταν σε μια εξαναγκασμένη ταλάντωση η συχνότητα του διεγέρτη είναι η ίδια με την *ιδιοσυχνότητα* του ταλαντωτή, φέρει ως αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση του πλάτους του. Οι ιδιοσυχνότητες του ταλαντωτή, ονομάζονται συχνότητες συντονισμού ή φυσικές συχνότητες, ενώ κάθε ταλαντωτής (αντικείμενο, σύστημα, επιφάνεια, κ.λπ.), ανάλογα με τις διαστάσεις και τα φυσικά και δομικά του χαρακτηριστικά, μπορεί να έχει περισσότερες από μια ιδιοσυχνότητες, όπως και ένα σύνολο κανονικών τρόπων δόνησης αντίστοιχα.

Ένας κανονικός τρόπος δόνησης (*normal mode*), ενός ταλαντωτή, είναι ουσιαστικά ένα μοτίβο κίνησης, κατά το οποίο κινούνται αρμονικά όλα τα μέρη του ταλαντωτή, έχοντας την ίδια συχνότητα και σταθερή σχέση φάσης μεταξύ τους. Η ελεύθερη κίνηση η οποία περιγράφεται από τους κανονικούς τρόπους δόνησης, λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένες συχνότητες, αυτές των ιδιοσυχνοτήτων του ταλαντωτή. Έτσι λοιπόν, ένας κανονικός τρόπος δόνησης, χαρακτηρίζεται από μία συγκεκριμένη συχνότητα (*modal frequency*) η οποία είναι η συχνότητα συντονισμού του όποιου ταλαντωτή, και ένα δεδομένο σχήμα (*modal shape*), που αντιστοιχεί στο μοτίβο κίνησης το οποίο προκύπτει εξαιτίας της *modal frequency*. Το σχήμα κάθε κανονικού τρόπου δόνησης, για ταλαντωτές όπως αυτοί που μελετούμε στην παρούσα εργασία (κιθάρα), αντιστοιχεί σε μια δισδιάστατη κατανομή πλάτους ταλάντωσης. Η γενικότερη κίνηση ενός ταλαντωτή-συστήματος, είναι μια υπέρθεση των κανονικών του τρόπων δόνησης. Οι τρόποι δόνησης, ονομάζονται *κανονικοί* από την άποψη ότι μπορούν να κινούνται ανεξάρτητα, ότι δηλαδή η διέγερση ενός τρόπου δεν θα προκαλέσει ποτέ κίνηση διαφορετικού. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να παρατηρηθούν εκφυλισμένοι κανονικοί τρόποι δόνησης σε παραπλήσιες συχνότητες, που είναι οπτικά όμοιοι μεταξύ τους αλλά διαφέρουν σε φάση.

Γενικότερα, μπορεί να γίνει ένας ευρύς διαχωρισμός των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την ακουστική μελέτη ενός μουσικού οργάνου. Από τη μια μεριά

υπάρχουν οι λεγόμενες «μηχανικές» τεχνικές, όπως η ελεγχόμενη καταγραφή του εκπεμπόμενου ήχου και η εξαγωγή φασμάτων συχνοτικής εκπομπής του οργάνου, και η εξαγωγή καμπύλης απόκρισης του οργάνου συνέπεια διέγερσης αυτού. Οι δύο αυτές τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Από την άλλη υπάρχουν «οπτικές» τεχνικές, οι οποίες ενέχουν τη χρήση φωτός, συνήθως από ένα laser, όπως η δονησιμετρία Doppler, και η ολογραφία ή η ολογραφική συμβολομετρία. Οι οπτικές τεχνικές είναι πιο μοντέρνες και προσφέρουν πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι των «μηχανικών» τεχνικών, αλλά δεν είναι το ίδιο ευρέως διαδεδομένες. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε μια οπτική τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας με laser, συγκεκριμένα η χρονικά ολοκληρωμένη ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφιδών (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI). Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα εξηγηθούν οι τρεις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν.

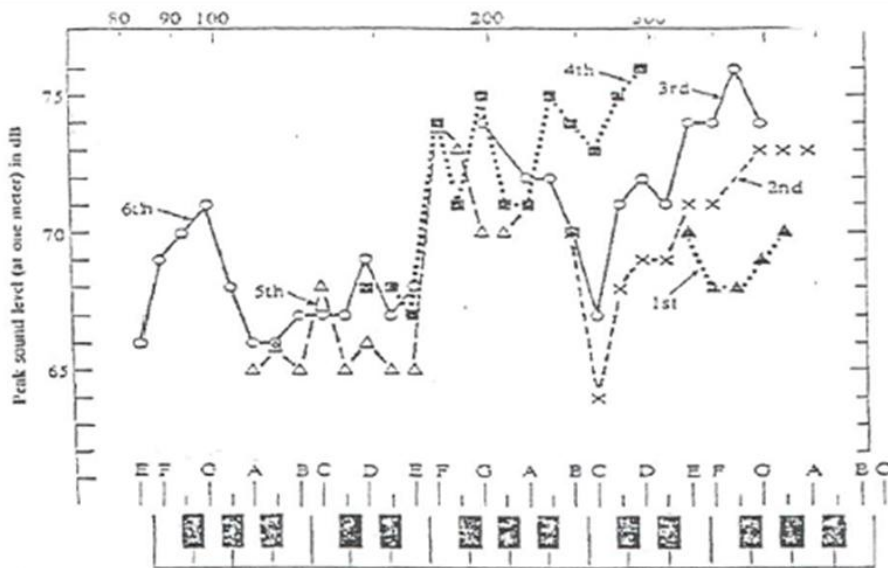
### **3.1 Καταγραφή ακουστικής εκπομπής**

Η καταγραφή του εκπεμπόμενου ήχου του μουσικού οργάνου, αποσκοπεί στην εξαγωγή της καμπύλης ακουστικής εκπομπής, η οποία παρουσιάζει το παραγόμενο από το μουσικό όργανο, συχνοτικό εύρος, συναρτήσεως πλάτους έντασης. Οι καμπύλες ακουστικής εκπομπής, προκύπτουν όταν εκτελέσουμε μία – μία χρωματικά όλες τις νότες της έκτασης του μουσικού οργάνου με κατά το δυνατόν τη μέγιστη άσκηση δύναμης στη χορδή και καταγράφοντας στη συνέχεια με ένα ηχόμετρο ή μικρόφωνο σε απόσταση 20-25 cm (αναλόγως το σημείο της κρίσιμης απόστασης) από το αντηχείο του οργάνου, τη στάθμη πίεσης για την κάθε νότα που εκτελέσαμε ξεχωριστά. Έτσι στο τέλος θα μπορούμε να δούμε σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα πλάτη εντάσεων των φθόγγων, σε ποιες συχνοτικές περιοχές ανταποκρίνεται καλύτερα το όργανο.

Κατά την καταγραφή ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην απόσταση του μικροφώνου από το αντηχείο του οργάνου ώστε να λάβουμε όσο γίνεται τον απευθείας παραγόμενο ήχο δίχως την παρουσία ανακλάσεων από το χώρο. Επίσης, προσοχή θα πρέπει να δίνεται στη νύξη ώστε να εφαρμόζεται η ίδια δύναμη διέγερσης των χορδών κάθε φορά. Συχνά αυτό γίνεται με ειδικές διατάξεις, αλλά ένας έμπειρος οργανοπαίκτης έχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το μικρόφωνο με το οποίο θα καταγράφεται η ακουστική πίεση των εκτελούμενων φθόγγων, θα πρέπει να έχει «επίπεδη» (flat) συχνοτική απόκριση για μεγάλο συχνοτικό εύρος, ώστε να μην επιφέρει αλλοιώσεις στην καταγραφή.

Η εξαγωγή της καμπύλης ακουστότητας ενός οργάνου (π.χ. βλ. σχήμα 13), μπορεί να μας παρέχει πολύ σημαντικά δεδομένα ανά περίπτωση, όπως να δούμε το πλήθος των

αρμονικών μιας συγκεκριμένης νότας με το αντίστοιχο πλάτος έντασής τους. Πέρα των παραπάνω προϋποθέσεων, η μετρητική διαδικασία καταγραφής θα πρέπει να γίνεται σε κατά το δυνατόν κατάλληλο χώρο προκειμένου να αποφευχθούν εξωγενείς παράγοντες, όπως ένα κατάλληλα διαμορφωμένο στούντιο ηχογραφήσεων.



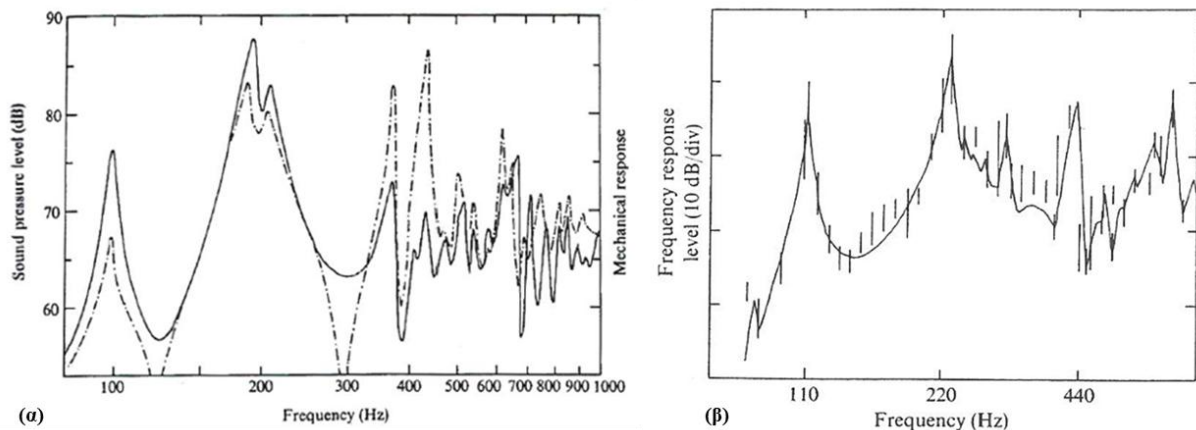
Σχήμα 13: καμπύλη ακουστικής εκπομπής ακουστικής κιθάρας Martin D-28 [8].

### 3.2 Καταγραφή απόκρισης σε διέγερση

Μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη «μηχανική» τεχνική είναι η καταγραφή της απόκρισης του οργάνου συνέπεια διέγερσής του. Οι βασικοί τρόποι διέγερσης του οργάνου περιλαμβάνουν ημιτονοειδή διέγερση, συχνά μέσω ηχοβόλισης σε συγκεκριμένες συχνότητες, και κρουστική διέγερση, συχνά με ειδικό τρόπο όπου ο διεγέρτης διαθέτει σύστημα ανάδρασης ώστε να είναι γνωστή η διέγερση, η οποία εν τέλει συσχετίζεται με την απόκριση για την εξαγωγή καμπύλων συχνοτικής απόκρισης. Τυπικά, στη διέγερση μέσω ηχοβόλισης, το όργανο στηρίζεται σε βάση που προσομοιάζει την στήριξη κατά την εκτέλεσή του, ενώ ένα ηχείο τοποθετημένο σε κοντινή απόσταση ηχοβολεί ημιτονοειδή σήματα στο υπό εξέταση συχνοτικό εύρος σε σταθερά ελεγχόμενη ένταση.

Σε κάθε περίπτωση, η καταγραφή της απόκρισης του οργάνου γίνεται με ειδικούς πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες τοποθετημένους στην επιφάνεια του οργάνου, οι οποίοι έχουν πολύ μικρή μάζα ώστε να επηρεάσουν τη δονητική του συμπεριφορά. Συχνά το σύνολο απόκρισης διαφορετικών σημείων λαμβάνεται υπόψη με τη μορφή «μέσης τιμής» (average), ενώ περισσότερες από μια μετρήσεις πραγματοποιούνται σε κάθε θέση.





**Σχήμα 14:** (α) καμπύλη συχνοτικής απόκρισης ακουστικής κιθάρας Martin D-28, διεγερμένη με ημιτονοειδή δύναμη η οποία εφαρμόστηκε στη μεριά της γέφυρας κοντά στις μπάσες χορδές. Η συνεχής γραμμή είναι το ηχητικό φάσμα της κιθάρας (στάθμη ηχητικής πίεσης συναρτήσεως της συχνότητας), όπως αυτό καταγράφηκε σε απόσταση 1m από αυτή. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο πλάτος της επιτάχυνσης στο σημείο οδήγησης της κιθάρας [10.], και (β) καμπύλη απόκρισης ακουστικής κιθάρας Martin D-28 με υπόδειξη πάνω στο φάσμα τις συχνότητες φθόγγων του συγκεκριμένου μουσικού συστήματος που εκτελεί η κιθάρα [6].

Η εξαγωγή καμπυλών συχνοτικής απόκρισης ενέχει επεξεργασία των μετρήσεων και εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier (FFT – Fast Fourier Transform). Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι συχνότητες που παράγει μια κιθάρα, είναι αυτές οι οποίες αντιστοιχούν σε νότες του συγκεκριμένου μουσικού συστήματος και το ερώτημα που τίθεται, είναι το πως ακούγονται τελικά οι νότες αυτές στην κιθάρα, πως ηχεί τελικά το όργανο; Η απάντηση βρίσκεται στο γεγονός ότι κάθε συντονισμός έχει την κεντρική του συχνότητα συντονισμού, αλλά περιβάλλεται από τις πλευρικές του συχνότητες οι οποίες εμφανίζουν μεγάλα πλάτη έντασης. Έτσι δεν είναι απαραίτητο πως οι νότες του συγκεκριμένου συστήματος που εκτελεί η κιθάρα, θα συμπίπτουν με τις κεντρικές συχνότητες των τρόπων δόνησης του οργάνου, αλλά θα βρίσκονται κάπου στις πλευρικές του. Στο σχήμα 14.β φαίνεται η καμπύλη συχνοτικής απόκρισης κιθάρας και με κάθετες γραμμές υποδεικνύονται οι συχνότητες μουσικών φθόγγων, που είναι και οι συχνότητες τις οποίες παράγει το όργανο. Έτσι γίνεται εμφανής ο συσχετισμός μεταξύ του εκπεμπόμενου από το όργανο ήχου και της καμπύλης συχνοτικής απόκρισης.

Από τις καμπύλες συχνοτικής απόκρισης μπορεί με εύκολο τρόπο να εξαχθεί μια πολύ χρήσιμη ποσότητα, συγκεκριμένα ο παράγοντας ποιότητας  $Q$  ενός συντονισμού. Αυτός αρχικά για την περιγραφή της ποιότητας ηλεκτρικών κυκλωμάτων, ως ένδειξη της ικανότητας του συστήματος να παράγει μεγάλη έξοδο στη συχνότητα συντονισμού. Στη Μουσική Ακουστική [10], και ειδικότερα στις περιπτώσεις διαγραμμάτων συχνοτικής απόκρισης, ο παράγοντας  $Q$  είναι άμεσα συνδεδεμένος με την ποιότητα και το εύρος του συντονισμού, καθώς υπολογίζεται ως ο λόγος της συχνότητας συντονισμού,  $f_0$ , προς το συχνοτικό εύρος,  $\Delta f$ , στο σημείο  $-3\text{dB}$ ,

δηλαδή:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (6)$$

όπου  $f_1$  και  $f_2$  οι άκρες συχνότητες του συχνοτικού εύρους. Έτσι λοιπόν, μεγάλη τιμή του παράγοντα  $Q$  σημαίνει συχνοτικά στενό συντονισμό, ενώ μικρή τιμή του παράγοντα  $Q$  σημαίνει συχνοτικά ευρύ συντονισμό.

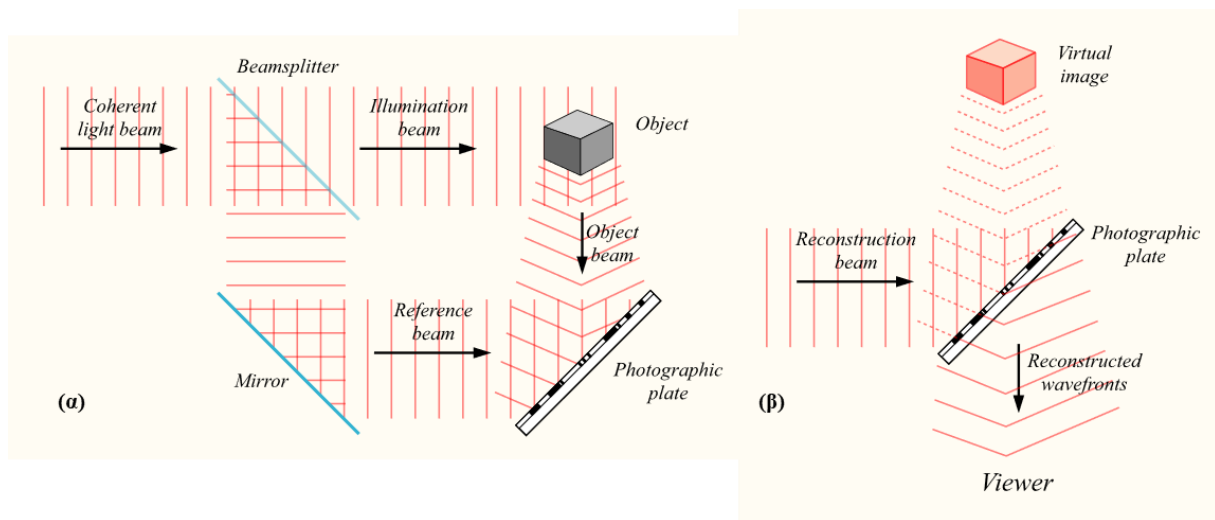
### 3.3 Ολογραφία και ολογραφική συμβολομετρία

Μια μεγάλη κατηγορία οπτικών τεχνικών βασίζονται στην *ολογραφική συμβολομετρία*, η οποία με τη σειρά της βασίζεται στην *ολογραφία* (*holography*).

Για την κατανόηση της ολογραφίας, θα ξεκινήσουμε φέρνοντας ως παράδειγμα από την καθημερινότητά μας αυτό της φωτογραφίας. Κοιτώντας μια απλή φωτογραφία, εκείνο ουσιαστικά που βλέπουμε, είναι η αποτύπωση μιας τρισδιάστατης εικόνας σε δύο όμως διαστάσεις, κι αυτό γιατί στην περίπτωση της, η κατανομή φωτεινής έντασης ενός τρισδιάστατου αντικειμένου που φωτογραφείται, δύναται να καταγραφεί σε δύο μόνο διαστάσεις, θέτοντας έτσι έναν πολύ σημαντικό περιορισμό όσον αφορά την πλήρη αναπαράσταση του αρχικού προτύπου. Έτσι λοιπόν κοιτώντας μια φωτογραφία, δεν βλέπουμε την πιστή αναπαράσταση του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός που είχε φωτίσει το αντικείμενο που φωτογραφήθηκε, αλλά διακρίνουμε σημείο προς σημείο το τετραγώνου του χρονικά ολοκληρωμένου πλάτους του ηλεκτρικού του πεδίου, δηλαδή την έντασή του.

Φανταστείτε τώρα, να υπήρχε η δυνατότητα να μπορούσε να καταγραφεί και στη συνέχεια να αναπαραχθεί η πληροφορία σχετικά όχι μόνο με το πλάτος αλλά και τη φάση του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός. Τότε θα είχαμε ως αποτέλεσμα την καταγραφή ενός *ολογράμματος*, όπου οι διαφορές φάσης αντικατοπτρίζουν το «βάθος», την τρίτη δηλαδή διάσταση του χώρου που «λείπει» σε μια απλή φωτογραφία. Πάνω σε ακριβώς αυτή την αρχή λειτουργίας βασίζεται η τεχνική της ολογραφίας, η οποία επιτρέπει τη λήψη φωτογραφιών τριών διαστάσεων καταγράφοντας ταυτόχρονα το πλάτος αλλά και τη φάση του ηλεκτρικού πεδίου ενός αντικειμένου. Η σύνθετη ονομασία της προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις *όλος* και *γραφή* και οφείλει την ύπαρξή της από το 1948 στον Ουγγρικής καταγωγής Dennis Gabor, για την οποία τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1971. Αν και αρχικά η ολογραφία εισήχθη ως τρόπος για τη βελτίωση της διακριτικής ικανότητας ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, η πρακτική της αξία και οι πλήρεις δυνατότητές της φάνηκαν μετά την εφεύρεση του laser.

Στην τεχνική της ολογραφίας απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη μίας δέσμης σύμφωνης ακτινοβολίας (laser), η οποία διαχωρίζεται με έναν διαχωριστή δέσμης σε δύο μέρη για την ταυτόχρονη καταγραφή της φωτεινής έντασης και της φάσης. Το ένα μέρος, το οποίο αποτελεί τη *δέσμη αναφοράς*, κατευθύνεται απ' ευθείας στο καταγραφικό υλικό (π.χ. μια φωτογραφική πλάκα), ενώ το άλλο μέρος, το οποίο αποτελεί τη *δέσμη αντικειμένου*, φωτίζει το αντικείμενο που είναι προς ολογράφηση (βλ. σχήμα 15.α).



**Σχήμα 15:** Η μέθοδος της ολογραφίας. (α) καταγραφή, και (β) ανακατασκευή ολογράμματος [11].

Το σκεδαζόμενο φως του αντικειμένου μαζί με την δέσμη αναφοράς συμβάλλουν πάνω στην φωτογραφική πλάκα και δημιουργούν χαρακτηριστικό διάγραμμα συμβολής το οποίο αποτελείται από κροσσούς συμβολής, που περιέχουν μία πλήρη καταγραφή του αρχικού αντικειμένου και οι τυχόν παρεκκλίσεις του (π.χ. λόγω κίνησης ή ανομοιομορφιών) να αποδίδονται σε διαφορές φάσης στην δέσμη του αντικειμένου.

Η ανακατασκευή (βλ. σχήμα 15.β) ενέχει τον φωτισμό της φωτογραφικής πλάκας με δέσμη ανακατασκευής πανομοιότυπη με τη δέσμη αναφοράς. Τότε το αρχικό αντικείμενο ανακατασκευάζεται πλήρως (σε ένταση και φάση) λόγω περίθλασης της δέσμης ανακατασκευής από το καταγεγραμμένο στην φωτογραφική πλάκα διάγραμμα συμβολής. Λόγω του ότι ανακατασκευάζεται τόσο η φάση όσο και η ένταση, το είδωλο εμφανίζεται τρισδιάστατο. Ένας παρατηρητής μετακινώντας το σημείο παρατήρησής του, θα δει το αντικείμενο να περιστρέφεται, ακριβώς όπως εάν ήταν ακόμα εκεί. Η γεωμετρία αυτή εισήχθη πρώτη φορά από τους Emmett Leith και Juris Upatnieks [12] στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και αποτέλεσε σταθμό στην εξέλιξη της ολογραφίας.

Η ολογραφική συμβολομετρία, αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνικές ανίχνευσης αλλαγών στην επιφάνεια ενός υπό μελέτη αντικειμένου – συστήματος καθώς μας

δίνει τη δυνατότητα να προβούμε σε συμβολομετρική ανάλυση τόσο στατικών όσο και δυναμικών αλλαγών μιας οπτικά ανώμαλης επιφάνειας. Αυτό είναι και το σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της κλασικής συμβολομετρίας στην οποία η προς μελέτη επιφάνεια θα πρέπει να είναι οπτικά ομαλή. Μάλιστα η σημαντικότερη χρήση της ολογραφίας, βρίσκει εφαρμογή στην τεχνική της ολογραφικής συμβολομετρίας.

Οι τρεις τρόποι όπου η ολογραφική καταγραφή μιας σκεδάζουσας επιφάνειας μπορεί να ανιχνεύσει την κίνησή της, είναι η ολογραφική συμβολομετρία απλής έκθεσης (ή πραγματικού χρόνου / real time interferometry), η ολογραφική συμβολομετρία διπλής έκθεσης, και η χρονικά ολοκληρωμένη ολογραφική συμβολομετρία.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, το επεξεργασμένο ολόγραμμα δίνει τη δυνατότητα ανακατασκευής ενός φανταστικού ειδώλου του αρχικού αντικειμένου. Αν το αντικείμενο υποστεί μία μικρή στατική μετατόπιση, ικανή να δημιουργήσει μια μικρή διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυματομετώπων, τότε έχουμε την παρουσία κροσσών συμβολής. Έτσι λοιπόν, κατά την τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας απλής έκθεσης το αντικείμενο κατέχει την αρχική του θέση σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και γίνεται η καταγραφή του ολογράμματος. Έπειτα γίνεται επεξεργασία του ολογράμματος και επανατοποθετείται στην αρχική του θέση, ώστε το φανταστικό είδωλο, να επικαλύπτεται ακριβώς με το αντικείμενο. Στην παραλλαγή της τεχνικής, αυτή της διπλής έκθεσης (ή κατά περίπτωση πολλαπλής έκθεσης), αρχικά καταγράφεται το ολόγραμμα του αρχικού αντικειμένου, και στη συνέχεια και πριν την επεξεργασία του ολογράμματος, το ολόγραμμα εκτίθεται στο φως από το μετατοπισμένο αντικείμενο. Το αποτέλεσμα είναι δύο επικαλυπτόμενα ανακατασκευασμένα κύματα, τα οποία δίνουν κροσσούς συμβολής, χαρακτηριστικούς της μετατόπισης του αντικειμένου (δηλαδή της διαφοράς στον οπτικό δρόμο). Στην τρίτη παραλλαγή, αυτή της χρονικά ολοκληρωμένης μεθόδου, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη γρήγορα ταλαντευόμενων αντικειμένων με μικρό πλάτος ταλάντωσης, η φωτογραφική πλάκα εκτίθεται στο φως για σχετικά μεγάλο χρόνο, κατά τον οποίο το δονούμενο αντικείμενο έχει εκτελέσει έναν αριθμό ταλαντώσεων. Το ολόγραμμα που προκύπτει μπορεί να θεωρηθεί ως η υπέρθεση πολλαπλών εικόνων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός σχήματος στάσιμου κύματος.

### ***3.4 Χρονικά ολοκληρωμένη ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων***

Στην κατηγορία τεχνικών χρονικά ολοκληρωμένης ολογραφικής συμβολομετρίας εντάσσεται και η τεχνική της χρονικά ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων – ESPI, η οποία χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος της παρούσης πτυχιακής εργασίας.

Είναι μια μη-καταστρεπτική μέθοδος, της οποίας η εξέλιξη ιστορικά αρχίζει ένα χρόνο μετά από την εισαγωγή της ιδέας της συμβολής δύο σύμφωνων πεδίων τυχαίας φάσης πριν και μετά την παραμόρφωση ενός αντικειμένου, κατά την χρονική περίοδο του 1971. Η συγκεκριμένη τεχνική σημείωσε ιδιαίτερη σημαντικότητα και ανάπτυξη μετά την εισαγωγή της πειραματικής τεχνικής της ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης και της ψηφιακής ανάλυσης κροσσών με ηλεκτρονικό υπολογιστή, σημειώνοντας αξιόλογη ερευνητική δραστηριότητα σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Σήμερα αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές συμβολομετρικές τεχνικές στη μελέτη δονήσεων ή παραμορφώσεων αντικειμένων.

Η κατηγορία της συμβολομετρίας ψηφίδων χρησιμοποιείται σαν όρος όταν ένα από τα συμβάλλοντα πεδία είναι ένα πεδίο ψηφίδων, το οποίο προκύπτει από την ανάκλαση φωτός από μια οπτικά ανώμαλη επιφάνεια. Η λέξη «ψηφίδα» περιγράφει την διάστικτη, κοκκιδωτή και τυχαία φύση της κατανομής έντασης του ανακλώμενου φωτός, όπως αυτή παρατηρείται σε κάποια απόσταση από το αντικείμενο.

Η τεχνική ESPI συνδέεται σημαντικά με την ολογραφική συμβολομετρία, αφού και οι δύο τεχνικές παρέχουν την ίδια ευαισθησία, ωστόσο η τεχνική ESPI απλουστεύει την πειραματική διαδικασία δίχως να απαιτεί την καταγραφή ολογράμματος και με την χρήση της κάμερας ως ψηφιακό καταγραφικό δίνει τη δυνατότητα και το πλεονέκτημα καταγραφής και ταυτόχρονης απεικόνισης των κροσσών σε πραγματικό χρόνο. όπως θα δούμε αναλυτικά στη συνέχεια, η τεχνική είναι μία διαδικασία αφαίρεσης διαδοχικών εικόνων που καταγράφονται καθώς το αντικείμενο μετακινείται. Η χρονικά ολοκληρωμένη ESPI χρησιμοποιείται για την μελέτη περιοδικών αρμονικών παραμορφώσεων, όπου τα δεδομένα λαμβάνονται με την μορφή τηλεοπτικών καρτέ με μεγάλους χρόνους έκθεσης σε σχέση με την περίοδο κίνησης.

Η τεχνική ESPI και οι διάφορες παραλλαγές της, η μαθηματική τους περιγραφή, και οι εφαρμογές τους έχουν παρουσιαστεί σε πολλά βιβλία και άρθρα [π.χ. βλ. 17-21, 28-31, 64-71]. Με βάση αυτά, εδώ θα παρουσιαστεί με απλό και περιεκτικό τρόπο η μαθηματική θεώρηση της τεχνικής ESPI που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή, που βασίζεται στην αφαίρεση διαδοχικών εικόνων.

Θεωρούμε την επιφάνεια ενός δονούμενου αντικειμένου και ότι η εγκάρσια (κάθετα στην επιφάνεια) μετατόπιση  $S$  για κάθε σημείο της επιφάνειας (επίπεδο  $xy$ ) και για κάθε χρονική στιγμή,  $t$ , είναι της μορφής:

$$S(x, y, t) = A(x, y) \cos[\omega t + \varphi_0(x, y)] \quad (7)$$

όπου  $A(x,y)$  είναι η κατανομή του πλάτους ταλάντωσης πάνω στην επιφάνεια,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης και  $\varphi_0(x,y)$  η κατανομή της φάσης δόνησης πάνω στην επιφάνεια. Η κατανομή φωτεινής έντασης που ανιχνεύει η κάμερα μέσα στο χρόνο έκθεσης,  $\tau$ , είναι:

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cdot \cos \left[ \varphi + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) A \cos(\omega t + \varphi_0) \right] \right\} dt \quad (8)$$

όπου  $I_A$  και  $I_B$  είναι οι κατανομές έντασης των δεσμών αντικειμένου και αναφοράς αντίστοιχα,  $\varphi$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο παραπάνω δεσμών,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της πηγής laser, και  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης φωτισμού του αντικειμένου και της διεύθυνσης παρατήρησης. Στην περίπτωσή μας  $\theta \approx 0^\circ$ .

Θέτοντας  $\Gamma = 4\pi / \lambda$  και  $\tau = 2m\pi / \omega$ , όπου  $m$  είναι ακέραιος, και ολοκληρώνοντας από την εξίσωση (8) προκύπτει ότι

$$I_1 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} |(\cos \varphi) J_0(\Gamma A)| \quad (9)$$

όπου  $J_0$  είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης πρώτου είδους. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της χρονικής ολοκλήρωσης, στην εξίσωση (9) έχει εξαλειφθεί η φάση της δόνησης,  $\varphi_0$ .

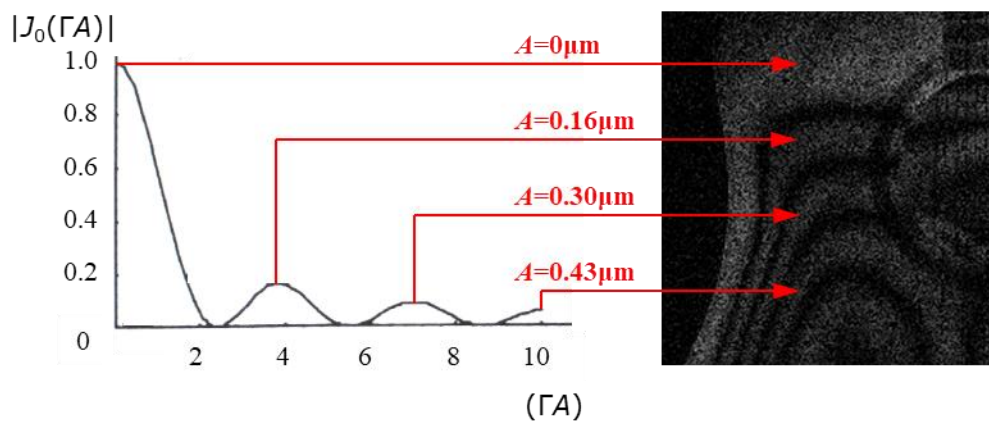
Καθώς η ταλάντωση του αντικειμένου εξακολουθεί, θεωρούμε ότι το πλάτος ταλάντωσης αλλάζει από  $A$  σε  $A + \Delta A$ , λόγω αστάθμητων παραγόντων. Τότε μια δεύτερη εικόνα καταγράφεται, της οποίας η κατανομή φωτεινής έντασης μπορεί παρομοίως να εκφραστεί, μετά από ανάπτυγμα Taylor (υποθέτοντας  $\Delta A$  πολύ μικρό και κρατώντας μόνο τους δύο πρώτους όρους του αναπτύγματος), ως:

$$I_2 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} |(\cos \varphi) \left[ 1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A)| \quad (10)$$

Οι δύο αυτές χρονικά διαδοχικές εικόνες,  $I_1$  και  $I_2$ , αφαιρούνται μέσω κατάλληλου λογισμικού, και το τελικό αποτέλεσμα εκφράζεται ως:

$$I = I_1 - I_2 = \frac{\sqrt{I_A I_B}}{2} |(\cos \varphi) \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A)| \quad (11)$$

Από την εξίσωση (11), είναι προφανές ότι το χρονικά ολοκληρωμένο συμβολόγραμμα,  $I$ , είναι διαμορφωμένο από τη συνάρτηση Bessel. Οι εναλλασσόμενοι φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί είναι ουσιαστικά ισοϋψείς καμπύλες ίδιου πλάτους ταλάντωσης. Οι φωτεινοί κροσσοί αντιστοιχούν στα μέγιστα της, με τον φωτεινότερο κροσσό να αντιστοιχεί σε δεσμό ( $A = 0$ ). Οι υπόλοιποι φωτεινοί κροσσοί, διαδοχικά μειούμενης φωτεινότητας, αντιστοιχούν σε τιμές πλάτους ταλάντωσης  $0.3\lambda$ ,  $0.56\lambda$ ,  $0.81\lambda$ ,  $1.07\lambda$ ... Στο σχήμα 16 απεικονίζεται η αντιστοιχία αυτή για την περίπτωση συμβολογράμματος ESPI όπου φαίνονται οι υπολογισμένες τιμές πλάτους ταλάντωσης ( $\lambda = 532\text{nm}$ ), αλλά και το ελάχιστο ανιχνεύσιμο πλάτος δόνησης της ESPI, το οποίο βρίσκεται στα  $0.16\ \mu\text{m}$ .



**Σχήμα 16:** Αντιστοιχία μεγίστων συνάρτησης Bessel  $|J_0(\Gamma A)|$  και κατανομής πλάτους ταλάντωσης μετρούμενης με την τεχνική ESPI.

Από τα παραπάνω διαφαίνεται το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής ESPI, που είναι ο περιορισμός στη διακριτική ικανότητα που επιβάλλει το γεγονός ότι δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια μετατόπιση που αντιστοιχεί σε λιγότερο από ένα κροσσό. Επιπλέον, λόγω της διαμόρφωσης του συμβολογράμματος με τη συνάρτηση Bessel, δεν μπορούν να μετρηθούν πολύ μεγάλες μετατοπίσεις, αφού σε τέτοια περίπτωση η χωρική πυκνότητα των κροσσών θα είναι τόσο μεγάλη ώστε να καθίστανται πλέον μη ορατοί. Όμως μπορεί να εφαρμοστεί τεχνική στροβοσκοπικού φωτισμού ώστε να καταγραφεί συμβολόγραμμα με φωτεινούς κροσσούς ίδιας φωτεινότητας. Συνήθως για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται συσκευή διαμόρφωσης οπτικής δέσμης (optical chopper), η οποία πρόκειται ουσιαστικά για μοτέρ που περιστρέφει κυκλικό δίσκο με ίσο-κατανεμημένες οπές. Καθώς αυτός περιστρέφεται, μια δέσμη laser που περνάει διαμέσου των οπών διαμορφώνεται με περιοδικό τρόπο. Αυτοί οι παλμοί συγχρονίζονται με τη δόνηση του αντικειμένου με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνονται πολλαπλές καταγραφές σε δύο παρεμφερή τμήματα του κύκλου της δόνησης. Λόγω της χρονικά βραχείας έκθεσης του

αντικειμένου στον φωτεινό παλμό το αντικείμενο «παγώνει» σε αυτές τις δύο θέσεις της δόνησής του. Ως αποτέλεσμα θα εμφανίζεται συμβολόγραμμα με φωτεινούς κροσσούς ίδιας φωτεινότητας.

Ο άλλος βασικός περιορισμός της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI είναι ότι χάνεται η πληροφορία για τη φάση της δόνησης. Σε περιπτώσεις χαρακτηριστικών περιπτώσεων δονήσεων, όπως για παράδειγμα για τους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης μιας τετράγωνης πλάκας, μπορεί κανείς να συνάγει τις περιοχές  $\pm$  φάσης. Όταν όμως, η κατανομή πλάτους είναι περίπλοκη, όπως για παράδειγμα σε κώνους ηχείων, τότε είναι σχεδόν αδύνατη η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τη φάση. Με το συνδυασμό της ESPI με τη λεγόμενη αρχή της διαμόρφωσης φάσης αυτός ο περιορισμός μπορεί να αρθεί και να ανακτηθεί η πληροφορία της φάσης. Στη γενικευμένη της μορφή η διαμόρφωση φάσης μπορεί να είναι ένα ιδιαίτερα περίπλοκο αντικείμενο. Μπορεί όμως, κανείς να πάρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα εφαρμόζοντας την απλούστερη μορφή της, την ημιτονοειδή διαμόρφωση φάσης. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί στην ESPI με την ανάκλαση είτε της δέσμης αναφοράς είτε της δέσμης αντικειμένου από έναν δονούμενο καθρέπτη.

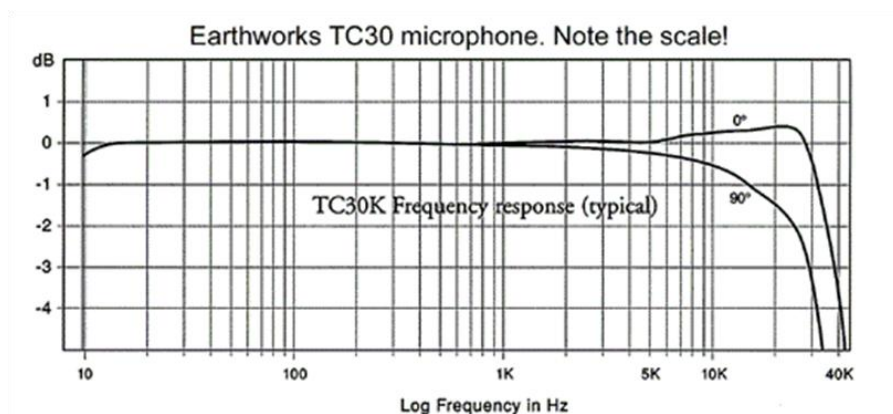


## 4. Πειραματικές τεχνικές και διατάξεις

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρατεθούν και θα αναλυθούν οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν αλλά η διαδικασία των μετρήσεων. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η κιθάρα που μελετήθηκε είναι μια ηλεκτροακουστική κιθάρα της εταιρίας Ashton, μοντέλο D4OSCEQ NT.

### 4.1 Καταγραφή ήχου

Οι μετρήσεις για την εξαγωγή της καμπύλης ακουστικής εκπομπής υπό ελεγχόμενη διέγερση πραγματοποιήθηκαν στο Στούντιο Ηχογραφήσεων του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Για την καταγραφή των ήχων επιλέχθηκε ως μικρόφωνο ηχογράφησης το μετρητικού τύπου μικρόφωνο Earthworks TC30K το οποίο έχει μια τυπικά “flat” συχνотική απόκριση, ειδικά στο υπό μελέτη συχνотικό εύρος, όπως φαίνεται στο σχήμα 17.



**Σχήμα 17:** Συχνотική απόκριση μετρητικού μικροφώνου Earthworks TC30 (πηγή: datasheet κατασκευάστριας εταιρείας).

Το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε απόσταση 22 cm από το αντηχείο του οργάνου, ώστε να καταγράφει κατά το δυνατόν την σφαιρική εκπομπή του ήχου και ταυτόχρονα να βρίσκεται εντός της κρίσιμης απόστασης. Στη συνέχεια εκτελέστηκαν με ελεγχόμενο και σταθερό τρόπο από πεπειραμένο κιθαριστή, και όσο γίνεται πιο δυνατά, όλες οι νότες τις κιθάρας χρωματικά και κατεγράφησαν σε ψηφιακό πολυκάναλο εγγραφέα με συχνότητα δειγματοληψίας 44100 Hz και bit rate 16 bit.

Από τις ηχογραφήσεις αυτές το ηχητικό υλικό επεξεργάστηκε κατάλληλα, ώστε η ηχογράφηση κάθε νότας να έχει διάρκεια 10 sec, για να καταγράφεται μέχρι την πλήρη απόσβεσή της. Έπειτα, επιλέχθηκε για κάθε ηχογράφηση χρονικό «παράθυρο» 4 sec, σταθερό

σε κάθε περίπτωση ως προς την χρονική στιγμή έναρξης, και ακολούθησε FFT ανάλυση στα ηχογραφημένα αυτά σήματα, και εξήχθη η τελική καμπύλη ακουστότητας για όλες τις νότες της έκτασης του οργάνου η οποία παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

## **4.2 Συχνотική απόκριση**

Για την εξαγωγή την καμπύλης συχνотικής απόκρισης συνέπεια κρουστικής διέγερσης, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Η κιθάρα τοποθετήθηκε σε σταθερή βάση στήριξης, πακτωμένη στα δύο άκρα της και οι χορδές της «φιμώθηκαν» τοποθετώντας φελιζόλ στην περιοχή της ταστιέρας. Αυτό έγινε προκειμένου να μην τεθούν σε ταλάντωση κατά την κρούση και παραχθεί συχνотικό περιεχόμενο από αυτές, το οποίο θα έφερνε αλλοίωση στο καταγραφών σήμα.

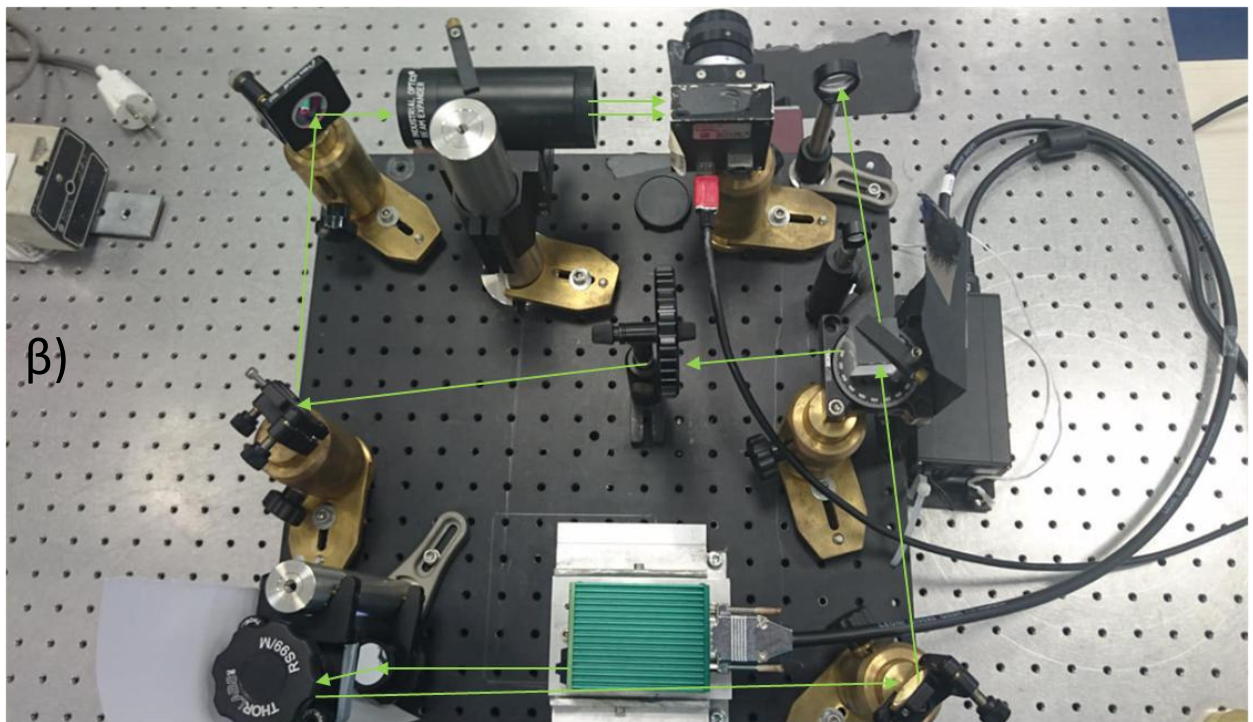
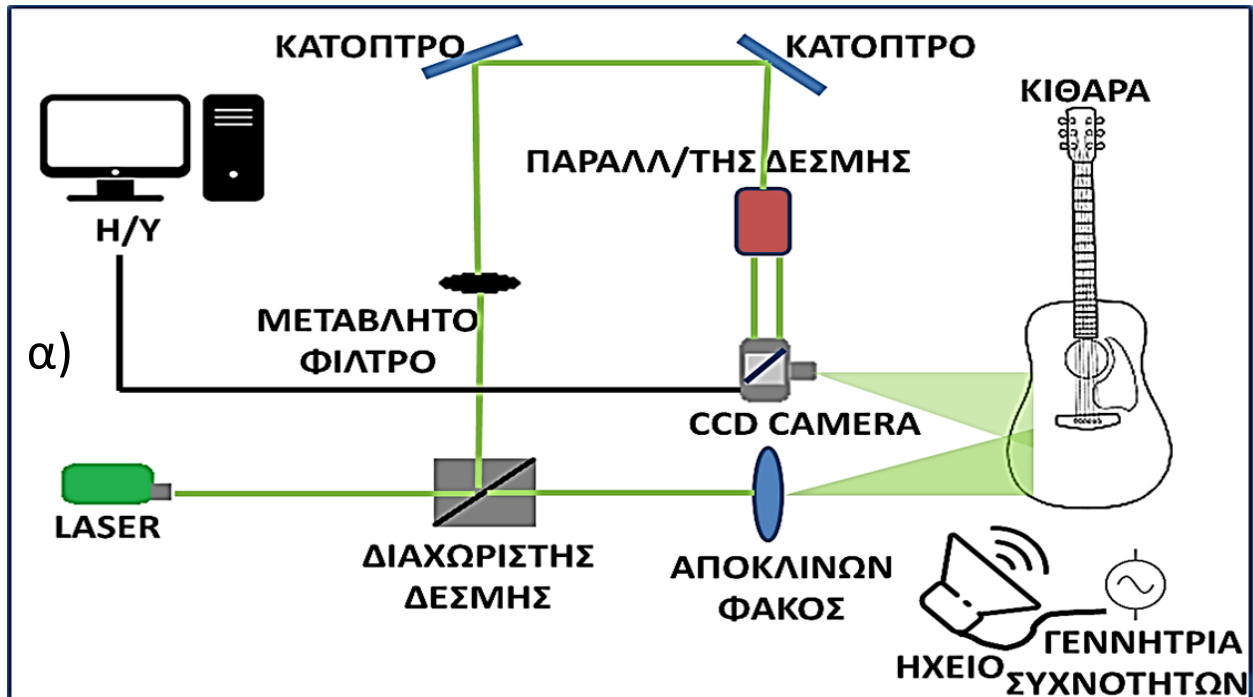
Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας Schaller 723 Oyster στο καπάκι της κιθάρας στο σημείο κάτω από τη γέφυρα, ο οποίος συνδέθηκε στην εξωτερική κάρτα ήχου Focusrite Scarlett 2i2 η οποία με τη σειρά της ήταν συνδεδεμένη με H/Y όπου, μέσω του ελεύθερης χρήσης λογισμικού καταγραφής ήχου Audacity, καταγράφηκε το ηχητικό σήμα.

Ακολούθησε επιλογή των σημείων του σώματος της κιθάρας τα οποία διεγέρθηκαν κρουστικά, με κατά το δυνατόν ελεγχόμενο και σταθερό τρόπο, χρησιμοποιώντας αιχμηρό αντικείμενο. Τα σημεία αυτά ήταν στη γέφυρα, στο πάνω αριστερά σημείο του σώματος, στο πάνω δεξιά σημείο του σώματος, και στο κάτω ενδιάμεσο σημείο μεταξύ γέφυρας και κάτω άκρου του σώματος. Για κάθε από αυτά σημεία, πραγματοποιήθηκαν τριών τύπων κρούσεις, συγκεκριμένα με χαμηλής, μεσαίας, και μεγάλης δύναμης κρούση. Για κάθε σημείο, πραγματοποιήθηκαν τρεις ξεχωριστές μετρήσεις για κάθε τύπο κρούσης, δηλαδή συνολικά έγιναν 12 διαφορετικές μετρήσεις. Πριν την έναρξη των μετρήσεων έγιναν κάποιες πρόχειρες μετρήσεις ώστε να ρυθμιστεί κατάλληλα η προενίσχυση από την κάρτα ήχου, ώστε να μην καταγραφούν υπέρ-οδηγημένα (ψαλιδισμένα) σήματα λόγω της μεγάλης έντασης της κρούσης. Για κάθε μέτρηση υπήρχε χρονικό περιθώριο 20 sec μέχρι το τέλος της καταγραφής του σήματος, κι αυτό για να καταγραφεί το αποτέλεσμα της κρουστικής διέγερσης μέχρι την πλήρη απόσβεση του κρουστικού ήχου.

Ακολούθησε FFT ανάλυση στα ηχητικά σήματα που καταγράψαμε μέσω του ελεύθερης χρήσης λογισμικού Room EQ, και με τις ίδιες χρονικές παραμέτρους όπως στην προηγούμενη παράγραφο, και εξήχθη η συχνотική απόκριση του οργάνου για κάθε μέτρηση.

### 4.3 ESPI

Για την καταγραφή των κανονικών τρόπων δόνησης με την τεχνική ESPI και τον προσδιορισμό των αντίστοιχων συχνοτήτων συντονισμού, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ESPI που έχει αναπτυχθεί από στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης (σχήμα 18).



Σχήμα 18: (α) σχεδιάγραμμα, και (β) φωτογραφία της πειραματικής διάταξης ESPI (με πράσινα βέλη η πορεία που ακολουθεί η δέσμη laser).

Η διάταξη είναι υλοποιημένη πάνω σε ειδική μεταλλική πλάκα που εδράζεται με τη χρήση ειδικών αντικραδασμικών στηριγμάτων (sorbothane) σε ειδική αντικραδασμική οπτική τράπεζα, για την ελαχιστοποίηση ανεπιθύμητων κραδασμών και εξωγενών δονήσεων.

Χρησιμοποιήθηκε μια πηγή laser στερεάς κατάστασης διοδικής άντλησης ενεργού υλικού Nd:YAG, συνεχούς μήκους κύματος (CW), η οποία παρείχε σύμφωνη δέσμη φωτός με μήκος κύματος  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , μέγιστης μέσης ισχύος 150 mW.

Η δέσμη που εξέρχεται από το laser διαχωρίζεται σε δύο δέσμες από έναν κυβικό διαχωριστή δέσμης (λόγος διαχωρισμού 80:20): η ισχυρότερη από αυτές (δέσμη αντικειμένου) με ποσοστό 80% δρομολογείται σε έναν αποκλίνοντα φακό ώστε να φωτίσει όλη την επιφάνεια της υπό εξέταση κιθάρας με ομοιόμορφο τρόπο. Το σκεδαζόμενο φως από την κιθάρα, καταγράφεται από μια CCD κάμερα, με μέγεθος αισθητήρα  $1392 \times 1040 \text{ pixels}$ , μέγεθος pixel  $6,45 \times 6,45 \mu\text{m}$ , και μέγιστο ρυθμό καταγραφής 15 frames/sec. Επίσης, η κάμερα διαθέτει κατάλληλο φακό συλλογής φωτός, ενώ η σύνδεσή της με H/Y γίνεται μέσω καλωδίου firewire.

Παράλληλα, η ασθενέστερη δέσμη με ποσοστό 20% χρησιμοποιείται ως δέσμη αναφοράς και οδηγείται μέσω κατόπτρων στον αισθητήρα της CCD κάμερας, αφού πρώτα έχει μεγεθυνθεί ( $\times 20$ ), και παραλληλοποιηθεί μέσω ειδικού οπτικού, ώστε να φωτίσει ομοιόμορφα όλη την επιφάνεια του αισθητήρα της CCD κάμερας. Καθώς η δέσμη αναφοράς έρχεται κάθετη στην κάμερα, είχε τοποθετηθεί στο εσωτερικό της (μεταξύ φακού και αισθητήρα) ειδικός διαχωριστής δέσμης 50:50, ώστε οι δύο δέσμες (αντικειμένου και αναφοράς) να προσπίπτουν συγγραμμικά πάνω στον αισθητήρα. Στη διαδρομή της δέσμης αναφοράς παρεμβάλλεται ένα φίλτρο μεταβλητής διαπερατότητας, ώστε να δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης του λόγου των εντάσεων των δύο δεσμών για τη βελτιστοποίηση της ευκρίνειας απεικόνισης. Τέλος, μέσω ειδικού λογισμικού γινόταν η επεξεργασία των εικόνων (αφαίρεση διαδοχικών εικόνων) σε πραγματικό χρόνο για την εξαγωγή και ταυτόχρονη αποθήκευση συμβολογραμμάτων σε μορφή αρχείων εικόνας.

Η κιθάρα ήταν σταθερά στηριγμένη, πακτωμένη στα δύο άκρα του σώματος, σε κατάλληλα διαμορφωμένη για το σκοπό αυτό μεταλλική βάση στήριξης επενδυμένη με αντικραδασμικό υλικό. Η διέγερση της κιθάρας έγινε με ηχοβόλιση ημιτονοειδών σημάτων (απλών ηχητικών τόνων) με ηχείο Genelec 8030 arm το οποίο είναι γρήγορο σε μεταβολές έντασης αλλά και συχνότητας και με κατά το δυνατόν “flat” συχνοτική απόκριση. Τα ημιτονοειδή σήματα προερχόταν από γεννήτρια συχνοτήτων συνδεδεμένη με το ηχείο αλλά ταυτόχρονα και με έναν παλμογράφο ώστε μέσω του παλμογράφου να ελέγχεται τυχόν παραμόρφωση. Το ηχείο βρισκόταν σε απόσταση 1 m από την κιθάρα ώστε να ηχοβολείται πλήρως το όργανο υπό γωνία κλίσης  $45^\circ$ . Επίσης είχε τοποθετηθεί ηχώμετρο σε απόσταση 22

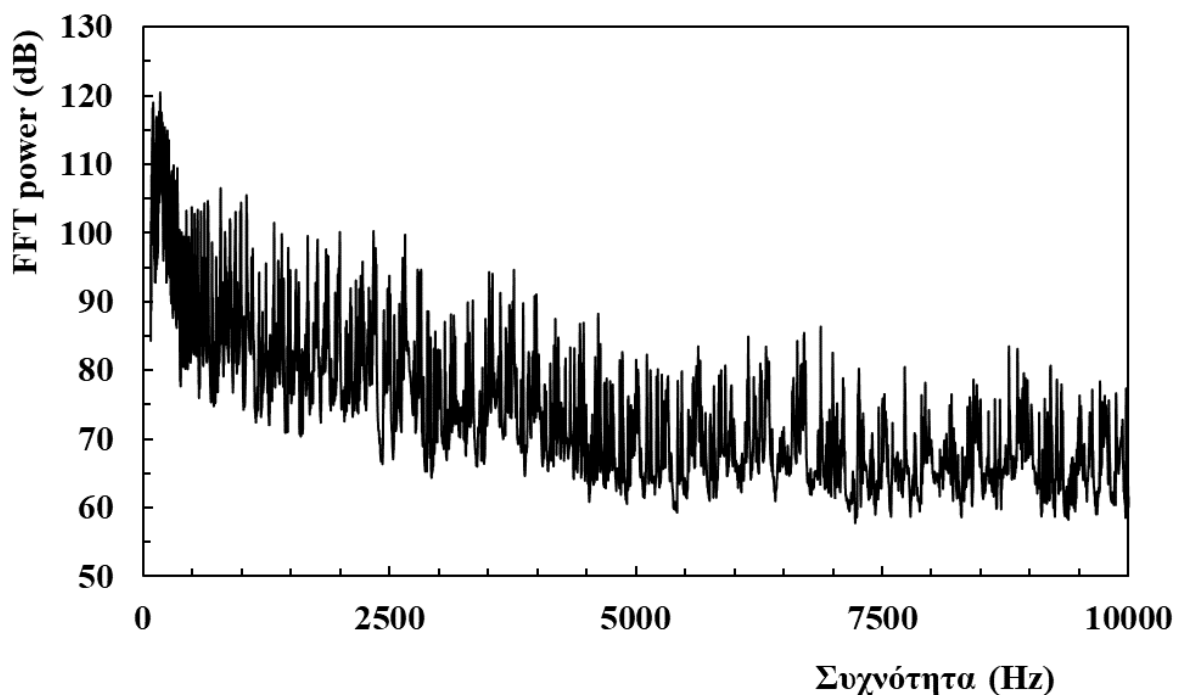
cm από το ηχείο, για έλεγχο της εκπεμπόμενης ηχητικής έντασης ώστε να είναι πάντα σταθερή σε όλες τις συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν για να είναι δυνατή η συγκριτική μελέτη. Ο ήχος είχε σταθερή στάθμη 90 dB-SPL, και μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη συχνοτική περιοχή 50-1100 Hz και με τυπικό βήμα 2 Hz.

## 5. Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων όλων των μεθόδων, με σύντομο ποιοτικό και ποσοτικό σχολιασμό, και στη συνέχεια γίνεται συγκριτική ανάλυσή τους, ποιοτικά και ποσοτικά, για τον ακουστικό χαρακτηρισμό της κιθάρας που χρησιμοποιήθηκε.

### 5.1 Αποτελέσματα ηχητικής εκπομπής

Τυπικό φάσμα ηχητικής εκπομπής μέχρι τα 10000 Hz, που εξήχθηκε από το καταγεγραμμένο ηχητικό υλικό εκπομπής δίνεται στο σχήμα 19. Το πολύ σημαντικό συμπέρασμα από αυτό το γράφημα είναι ότι η κύρια ηχητική εκπομπή του οργάνου είναι έως τα περίπου 1000 Hz, με τον μεγαλύτερο «όγκο» του εκπεμπόμενου ήχου να είναι σε συχνότητες έως περίπου τα 750 Hz. Μετά από τα περίπου 1000 Hz ο ήχος εξασθενεί σημαντικά. Αυτό συνάδει με το γεγονός ότι το συχνοτικό εύρος του κύριου εκπεμπόμενου ήχου από μια τυπική ακουστική κιθάρα είναι μεταξύ 80 – 1100 Hz περίπου. Με βάση τα αποτελέσματα του γραφήματος του σχήματος 19 η μετέπειτα μελέτη του οργάνου, τόσο μέσω της απόκρισής του συνέπεια κρουστικής διέγερσης όσο και με την τεχνική ESPI, επικεντρώθηκε σε συχνότητες έως περίπου 1000 Hz.



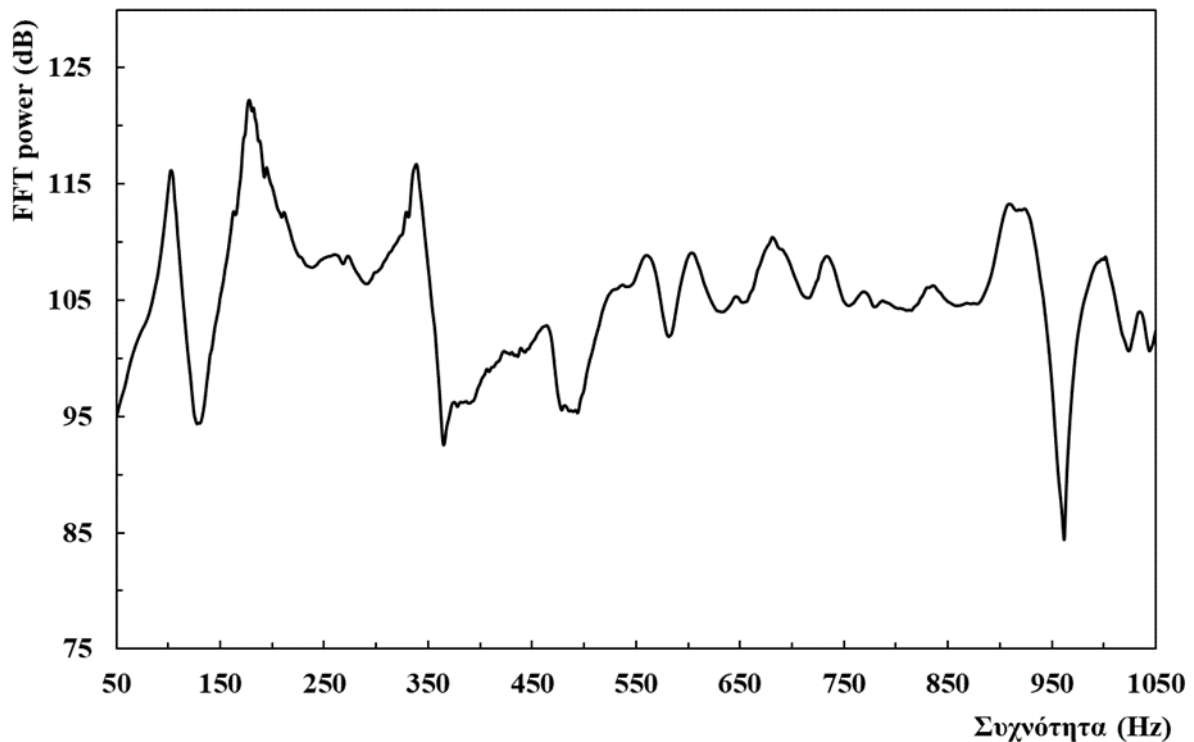
Σχήμα 19: Τυπικό φάσμα ηχητικής εκπομπής της κιθάρας που μελετήθηκε.

## 5.2 Αποτελέσματα συχνοτικής απόκρισης

Στο σχήμα 20 δίνεται τυπικό αποτέλεσμα της συχνοτικής απόκρισης της κιθάρας που μελετήθηκε, συνέπεια κρουστικής διέγερσης, και στο συχνοτικό εύρος της κύριας ηχητικής εκπομπής της, όπως αυτό καθορίστηκε από τις μετρήσεις καταγραφής του εκπεμπόμενου ήχου.

Η αξιολόγηση και ποσοτική ανάλυση των διάφορων ευκρινών κορυφών του γραφήματος, που αντιστοιχούν στους κύριους τρόπους δόνησης του οργάνου, θα γίνει στη συνέχεια και σε συνάρτηση με τα αποτελέσματα της τεχνικής ESPI. Όμως μια πρώτη αξιολόγηση και ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων έχει να κάνει με την ευκρινή κορυφή με κεντρική συχνότητα  $\sim 103$  Hz, η οποία και είναι ξεκάθαρα χωρισμένη από την επόμενη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, ο συχνοτικά χαμηλότερος διακριτός συντονισμός του αντηχείου εντοπίζεται πάντα ως η συχνότητα Helmholtz ή αέρινη συχνότητα, η οποία και είναι υψίστης σημασίας για τον ακουστικό χαρακτηρισμό του, καθώς αυτή προσδιορίζει τη συχνοτική συμπεριφορά του οργάνου αλλά επιφέρει και ηχόχρωμα στον παραγόμενο ήχο.

Για την επιβεβαίωση της ταυτοποίησης την εν λόγω συχνότητας ως την αέρινη συχνότητα του οργάνου, έγινε υπολογισμός αυτής με βάση την εξίσωση (2). Η ακτίνα,  $r$ , της οπής της κιθάρας μετρήθηκε να είναι 0,05 m. Ο προσδιορισμός του όγκου του αντηχείου έγινε με εμπειρικό τρόπο, λόγω της εσωτερικής μορφολογίας του (ύπαρξη «νεύρων», εσοχών κτλ).



**Σχήμα 20:** Τυπική συχνοτική απόκριση της κιθάρας που μελετήθηκε στο εύρος συχνοτήτων της κύριας ηχητικής εκπομπής της.

Έτσι λοιπόν επιλέχθηκε να γεμιστεί πλήρως το εσωτερικό του αντηχείου με ψιλή άμμο, προσέχοντας να καλυφθούν όλα τα σημεία του. Η άμμος κάλυψε τον όγκο του αντηχείου μέχρι την ηχητική οπή. Στη συνέχεια αφαιρέθηκε με προσοχή όλη η άμμος και τοποθετήθηκε σε ογκομετρικό δοχείο. Με τη μέτρηση αυτή βρέθηκε ότι ο όγκος του αντηχείου ήταν 13,5 l. Με τις παραπάνω τιμές, η αέρινη συχνότητα της κιθάρας υπολογίστηκε στα ~104 Hz, που συμφωνεί με τα αποτελέσματα του σχήματος 20.

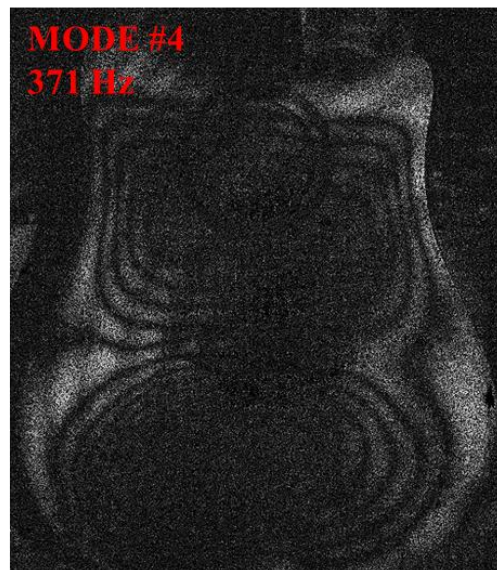
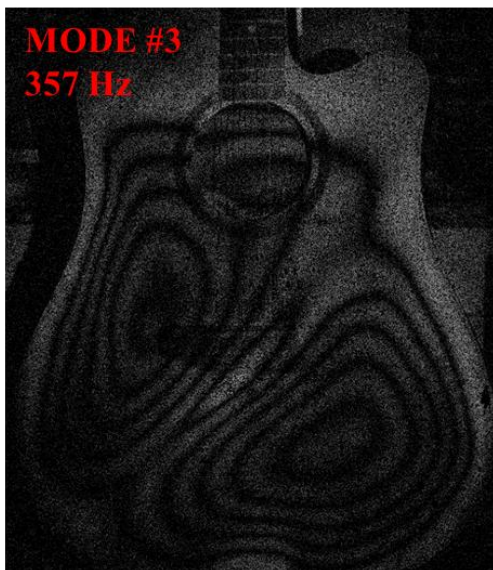
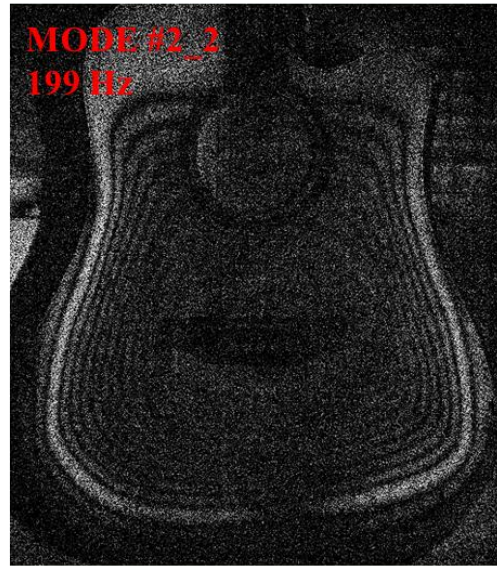
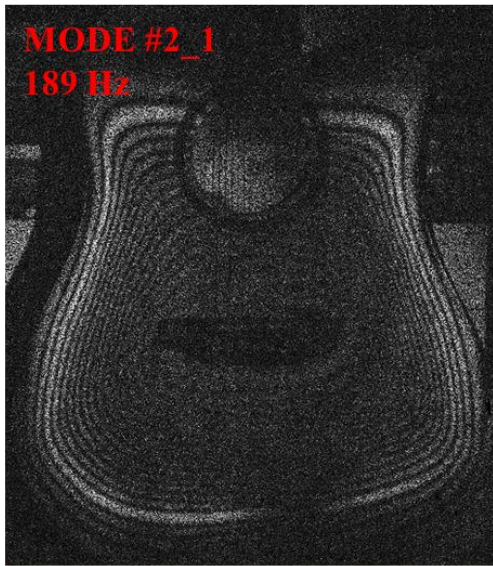
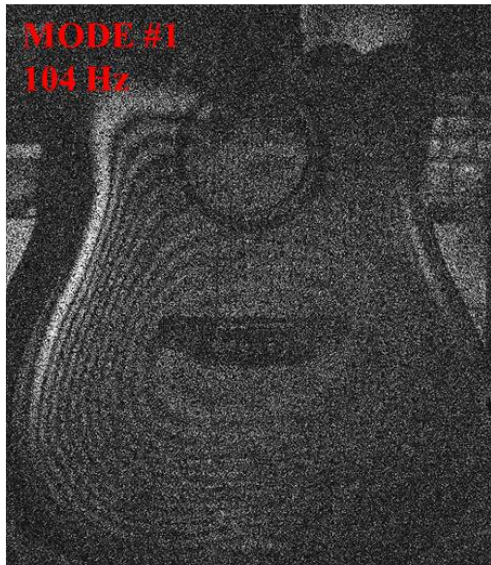
### 5.3 Αποτελέσματα ESPI

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της τεχνικής ESPI ήταν δυνατή η ταυτοποίηση συνολικά 11 κανονικών τρόπων δόνησης (modes) της κιθάρας στο συχνοτικό εύρος της κύριας ηχητικής εκπομπής της κιθάρας. Στα σχήματα 21 και 22 παρουσιάζονται ενδεικτικά συμβολογράμματα αυτών, μαζί με τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες. Το μικρό βήμα συχνότητας που χρησιμοποιήθηκε επέτρεψε στο να καθοριστεί και το συχνοτικό τους εύρος, από τα συμβολογράμματα στην αρχή (αμυδρή εμφάνιση) και στο τέλος (εξαφάνιση) κάθε κανονικού τρόπου δόνησης. Σε τρεις περιπτώσεις παρατηρήθηκε η ύπαρξη διπλά εκφυλισμένων κανονικών τρόπων δόνησης: στις περιπτώσεις αυτές η κατανομή πλάτους δόνησης (μορφή συμβολογράμματος) ήταν ίδια, αλλά οι ιδιοσυχνότητες ήταν παραπλήσιες, και η δόνηση διαφέρει ως προς τη φάση της (κάτι που δεν ήταν δυνατόν να απεικονιστεί με την συγκεκριμένη τεχνική). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνοψίζονται στον πίνακα 1.

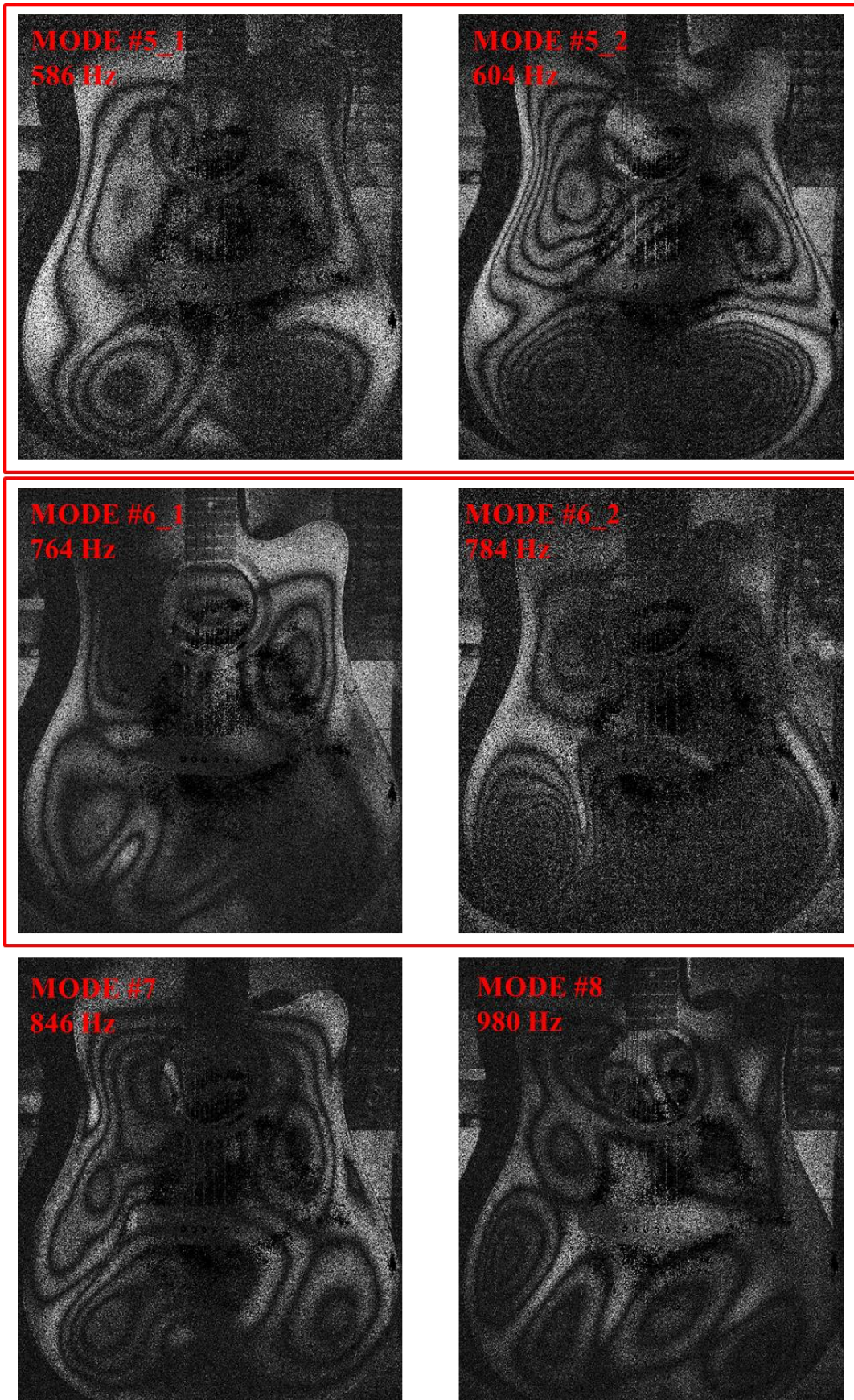
Mode #	Κεντρική συχνότητα ESPI (Hz)	Συχνότητα αρχής (Hz)	Συχνότητα τέλους (Hz)	Συχνοτικό εύρος (Hz)
1	104	80	126	46
2_1	189	135	197	62
2_2	199	198	280	82
3	357	333	359	26
4	371	366	390	24
5_1	586	550	590	40
5_2	604	595	630	35
6_1	764	750	769	19
6_2	784	771	806	35
7	846	813	870	57
8	980	955	1030	75

**Πίνακας 1:** Σύνοψη αποτελεσμάτων με την τεχνική ESPI. Με σκίαση οι τρεις περιπτώσεις διπλά εκφυλισμένων κανονικών τρόπων δόνησης.





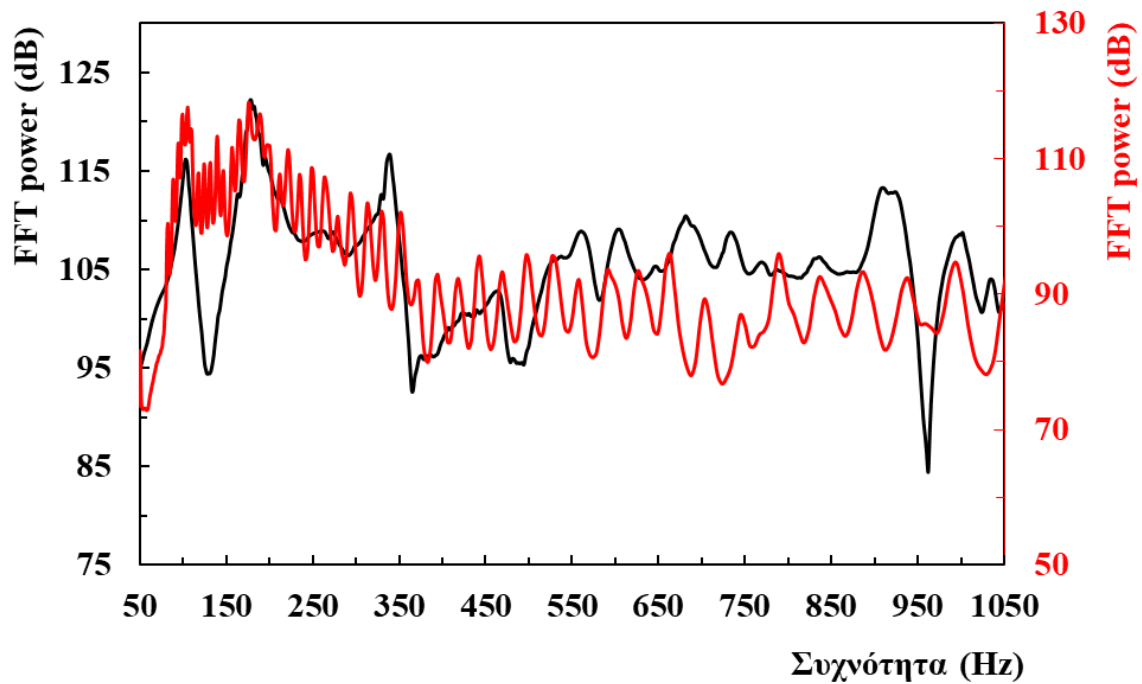
**Σχήμα 21:** Τυπικά συμβολογράμματα των 5 πρώτων κανονικών τρόπων δόνησης και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες της κιθάρας που μελετήθηκε, εντός του εύρος συχνοτήτων της κύριας ηχητικής εκπομπής της. Σε κόκκινο πλαίσιο ο πρώτος από τους τρεις διπλά εκφυλισμένους κανονικούς τρόπους δόνησης.



**Σχήμα 21:** Τυπικά συμβολογράμματα των 4 επόμενων κανονικών τρόπων δόνησης και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες της κιθάρας που μελετήθηκε, εντός του εύρους συχνοτήτων της κύριας ηχητικής εκπομπής της. Σε κόκκινο πλαίσιο οι επόμενοι δύο από τους τρεις διπλά εκφυλισμένους κανονικούς τρόπους δόνησης.

#### 5.4 Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων

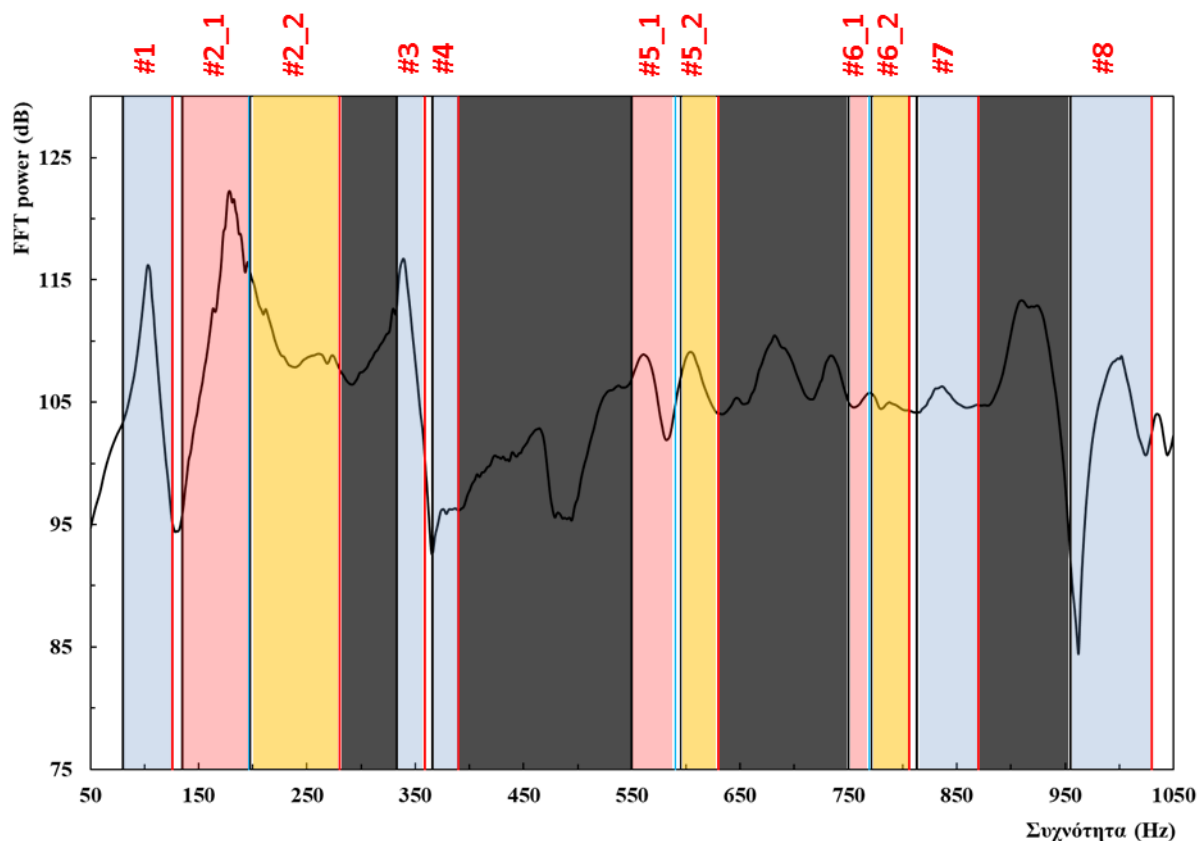
Η πρώτη σύγκριση που μπορεί να γίνει μεταξύ αποτελεσμάτων των διαφορετικών τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν, είναι μεταξύ αυτών της ηχητικής εκπομπής και της συχνοτικής απόκρισης του οργάνου, η οποία δίνεται στο σχήμα 22. Η ποιοτική αντιστοιχία των αποτελεσμάτων είναι πολύ καλή, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες (έως ~300 Hz).



**Σχήμα 22:** Σύγκριση αποτελεσμάτων συχνοτικής απόκρισης (μαύρη συνεχής γραμμή) και ηχητικής εκπομπής (κόκκινη συνεχής γραμμή) της κιθάρας που μελετήθηκε. Ο οριζόντιος άξονας (συχνότητα) είναι κοινός, ενώ οι κατακόρυφοι άξονες είναι χρωματισμένοι ανάλογα με τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε αυτούς.

Μεγαλύτερο, όμως, ενδιαφέρον παρουσιάζει η συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων της συχνοτικής απόκρισης με αυτά της τεχνικής ESPI, καθώς και τα δύο αφορούν σε προσδιορισμό των κανονικών τρόπων δόνησης του οργάνου. Η πρώτη σύγκριση που μπορεί να γίνει είναι συνέπεια της ανάλυσης των αποτελεσμάτων ως προς τις παρατηρούμενες ιδιοσυχνότητες καθώς και ως προς το συχνοτικό εύρος των κανονικών τρόπων δόνησης. Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 23, όπου αποτυπώνεται το συχνοτικό εύρος των modes που ταυτοποιήθηκαν με την τεχνική ESPI μαζί με την καμπύλη συχνοτικής απόκρισης, ενώ οι διαφορές ως προς παρατηρούμενες ιδιοσυχνότητες με τις δύο αυτές τεχνικές συνοψίζονται στον πίνακα 2, με την ποσοστιαία (επί τοις εκατό) διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων να υπολογίζεται ως:

$$\% \text{ διαφορά δύο μετρήσεων} = \frac{\text{Μεγαλύτερη τιμή} - \text{Μικρότερη τιμή}}{\text{Μικρότερη τιμή}} \times 100 (\%)$$



**Σχήμα 23:** Σύγκριση αποτελεσμάτων συχνοτικής απόκρισης (μαύρη συνεχή γραμμή) και συχνοτικών περιοχών που εντοπίστηκαν κανονικοί τρόποι δόνησης με την τεχνική ESPI, οι οποίοι αναγράφονται στο πάνω μέρος. Οι σκιασμένες περιοχές με μπλε χρώμα αντιστοιχούν σε τρόπους δόνησης χωρίς εκφυλισμό, αυτές με ανοικτό κόκκινο και πορτοκαλί σε διπλά εκφυλισμένους, ενώ οι περιοχές στις οποίες δεν παρατηρήθηκε κανονικός τρόπος δόνησης με την τεχνική ESPI είναι σκιασμένες με σκούρο γκρι χρώμα.

Mode #	Κεντρική συχνότητα ESPI (Hz)	Κεντρική συχνότητα συχνοτικής απόκρισης (Hz)	Ποσοστιαία διαφορά (%)
1	104	103	1.0
2_1	189	178	6.2
2_2	199	<b>195</b>	<b>2.1</b>
3	357	339	5.3
4	371	375	1.1
5_1	586	561	4.5
5_2	604	604	0.0
6_1	764	769	0.7
6_2	784	787	0.4
7	846	835	1.3
8	980	996	1.6

**Πίνακας 2:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ιδιοσυχνοτήτων μέσω συχνοτικής απόκρισης και τεχνικής ESPI (με έντονα κόκκινα γράμματα μέτρηση υπό αμφισβήτηση – με σκίαση τα τρία διπλά εκφυλισμένα modes).

Από τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

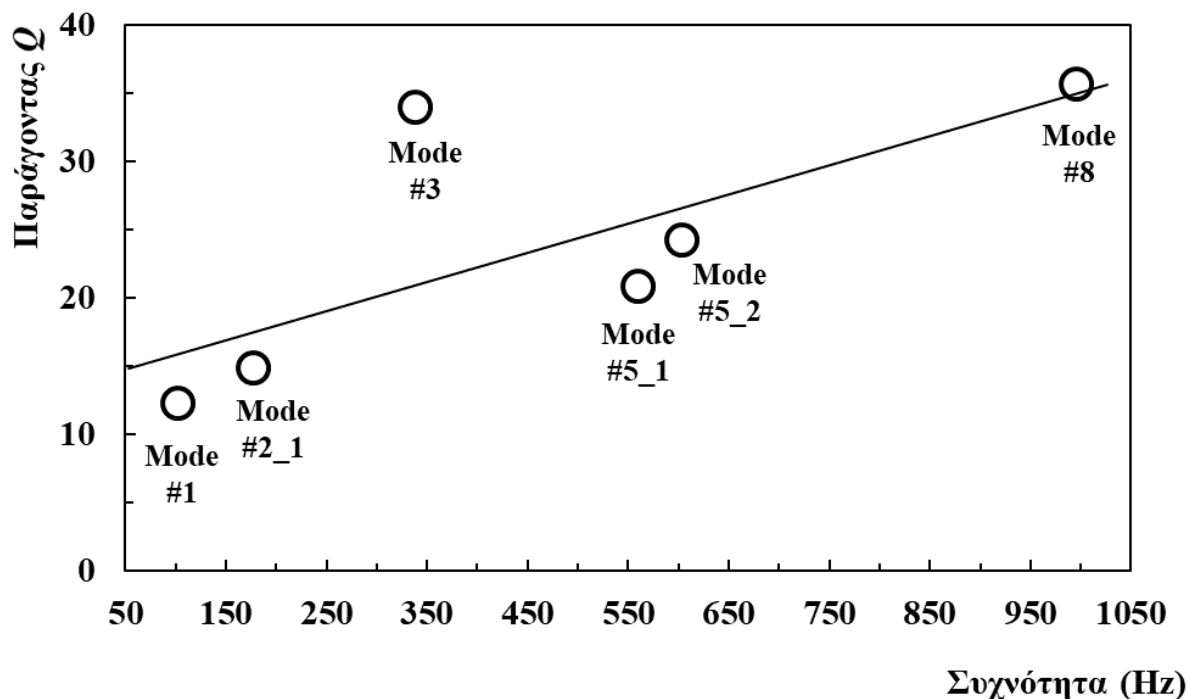
- ✓ Τα αποτελέσματα του σχήματος 23 εν γένει συμφωνούν μεταξύ τους, υπό την έννοια ότι σε αρκετές συχνοτικές περιοχές της ESPI εντοπίζονται αντίστοιχες κορυφές συχνοτικής απόκρισης, έστω κι αν αυτές δεν είναι τόσο ευκρινείς, όπως αυτές που αντιστοιχούν στα modes #2\_2 και #4. Όμως υπάρχει αριθμός συχνοτικών περιοχών (σκιασμένες με σκούρο γκρι χρώμα) στις οποίες δεν εντοπίστηκαν κανονικοί τρόποι δόνησης με την ESPI αλλά διακρίνονται ευκρινείς κορυφές συχνοτικής απόκρισης. Σχολιάζοντας το γεγονός αυτό, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η εξαγωγή της καμπύλης κρουστικής απόκρισης, όσο προσεκτικά και ελεγχόμενα μπορεί να έγινε με τα διαθέσιμα μέσα, παρουσιάζει το σημαντικό μειονέκτημα ότι δεν έγινε με τη χρήση ανάδρασης κρούσης ώστε να υπάρχει συσχετισμός μεταξύ διέγερσης και καταγραφόμενου σήματος απόκρισης (π.χ. βλ. [29]). Έτσι αξιολογούνται ως πιο έγκυρα τα αποτελέσματα της τεχνικής ESPI ως προς τον προσδιορισμό των κανονικών τρόπων δόνησης και των αντίστοιχων ιδιοσυχνοτήτων.
- ✓ Όσο αφορά στα αποτελέσματα του πίνακα 2, παρατηρείται μια πάρα πολύ καλή σύμπτωση των ιδιοσυχνοτήτων που προσδιορίστηκαν με τις δύο αυτές τεχνικές, και που αφορούν στα modes της ESPI. Οι αποκλίσεις είναι μικρές, ενώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι παρόλο που στον πίνακα 2 καταγράφεται κεντρική συχνότητα 195 Hz για το mode #2\_2 από τις μετρήσεις συχνοτικής απόκρισης, αυτό γίνεται με πάσα επιφύλαξη καθώς είναι αμφισβητούμενη.

Η δεύτερη σύγκριση που μπορεί να γίνει είναι συνέπεια της ανάλυσης εκείνων των αποτελεσμάτων στα οποία υπάρχει ταύτιση (όπως εξηγήθηκε παραπάνω), ως προς την οξύτητα / συχνοτικό εύρος των κανονικών τρόπων δόνησης.

Για το λόγο αυτό **αρχικά** υπολογίστηκε ο παράγοντας ποιότητας  $Q$  από την συχνοτική απόκριση σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2 και την εξίσωση (6). Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρουσιάζονται στον πίνακα 3 αλλά απεικονίζονται και γραφικά στο σχήμα 24. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί τιμή για το  $Q$  για το mode #2\_2 (βλ. προηγούμενα) καθώς και για τα modes #4, #6\_1, #6\_2, και #7 αφού γι αυτά δεν ήταν δυνατόν να βρεθούν οι άκρες συχνότητες  $f_1$  και  $f_2$  στο σημείο  $-3\text{dB}$ , καθώς ήταν εντός του «υποβάθρου» του σήματος. Όσο αφορά στις τιμές του  $Q$ , παρατηρείται γενικά μια αύξηση όσο αυξάνεται η συχνότητα.

Mode #	Κεντρική συχνότητα συχνοτικής απόκρισης (Hz)	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$Q$
1	103	99	107	12.9
2_1	178	174	186	14.8
<b>2_2</b>	<b>195</b>			
3	339	333	343	33.9
<b>4</b>	<b>375</b>			
5_1	561	545	572	20.8
5_2	604	592	617	24.2
<b>6_1</b>	<b>769</b>			
<b>6_2</b>	<b>787</b>			
<b>7</b>	<b>835</b>			
8	996	982	1010	35.6

**Πίνακας 3:** Εξαγωγή παράγοντα ποιότητας  $Q$  από τα αποτελέσματα συχνοτικής απόκρισης και με βάση την εξίσωση (6). Επεξήγηση των ποσοτήτων στο κείμενο (με έντονα κόκκινα γράμματα οι περιπτώσεις όπου δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός τιμής για το  $Q$  όπως εξηγείται στο κείμενο – με σκίαση τα τρία διπλά εκφυλισμένα modes).



**Σχήμα 24:** Γράφημα υπολογισμού τιμών του παράγοντα  $Q$  (μαύροι κύκλοι) και τα αντίστοιχα modes. Η μαύρη συνεχής γραμμή είναι βοηθητική στον αναγνώστη.

**Στη συνέχεια,** και με βάση την μαθηματική περιγραφή της παραγράφου 3.4 και τα καταγεγραμμένα συμβολογράμματα, υπολογίστηκαν τα μέγιστα πλάτη δόνησης σε όλες τις συχνότητες μέτρησης. Η συνάρτηση Bessel  $|J_0(x)|$  έχει τοπικά μέγιστα για τιμές του ορίσματος,  $x = 0, \sim 3,830, \sim 7,015, \sim 10,175, \sim 13,325, \sim 16,473, \sim 19,616, \sim 22,760, \sim 25,904, \sim 29,047, \sim 32,190, \sim 35,332, \sim 41,617, \dots$ . Το όρισμα της Bessel είναι  $\Gamma A$ , όπου  $\Gamma = 4\pi / \lambda$  ( $\lambda = 532$  nm το μήκος κύματος του laser) και  $A$  το πλάτος δόνησης. Έτσι για τους φωτεινούς κροσσούς των συμβολογραμμάτων, που αντιστοιχούν στα τοπικά μέγιστα της Bessel, μπορούν να υπολογιστούν τα πλάτη δόνησης ( $A_1, A_2, \dots, A_{13}$ ) ως ακολούθως:

$$1^{\text{ος}} \text{ φωτεινός κροσσός: } \Gamma A_1 = \frac{4\pi}{\lambda} A_1 = 0 \Rightarrow A_1 = 0 \text{ nm}$$

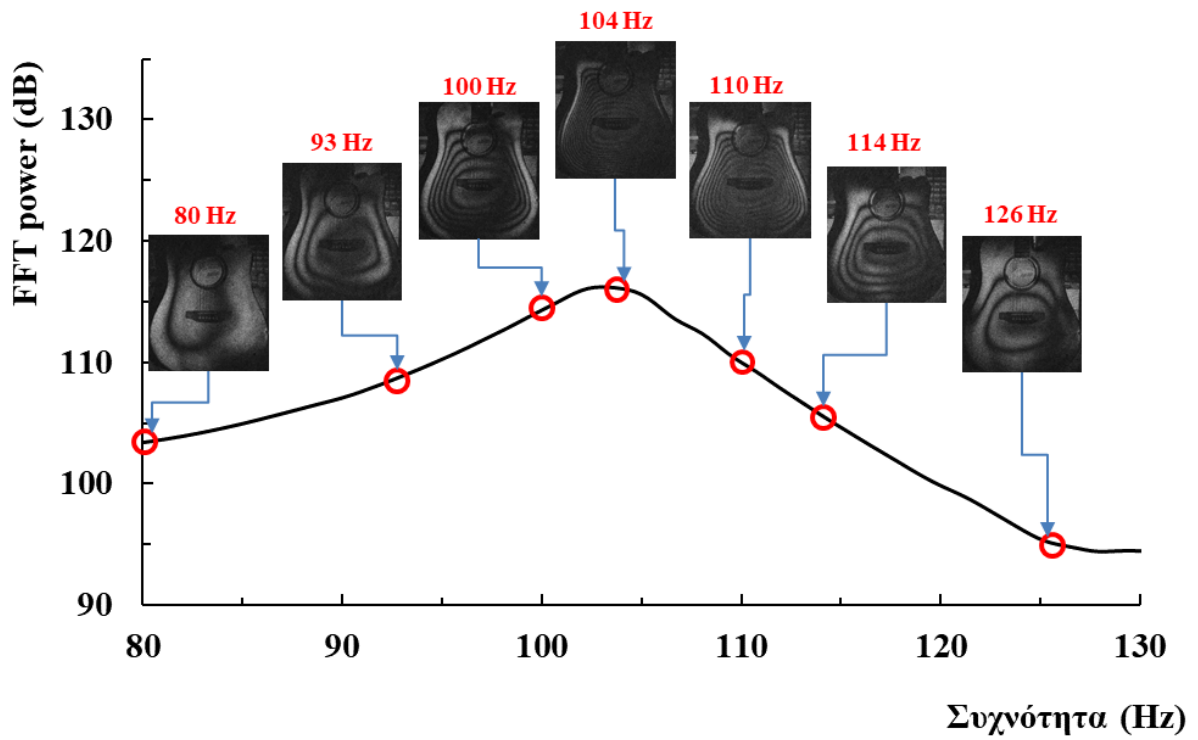
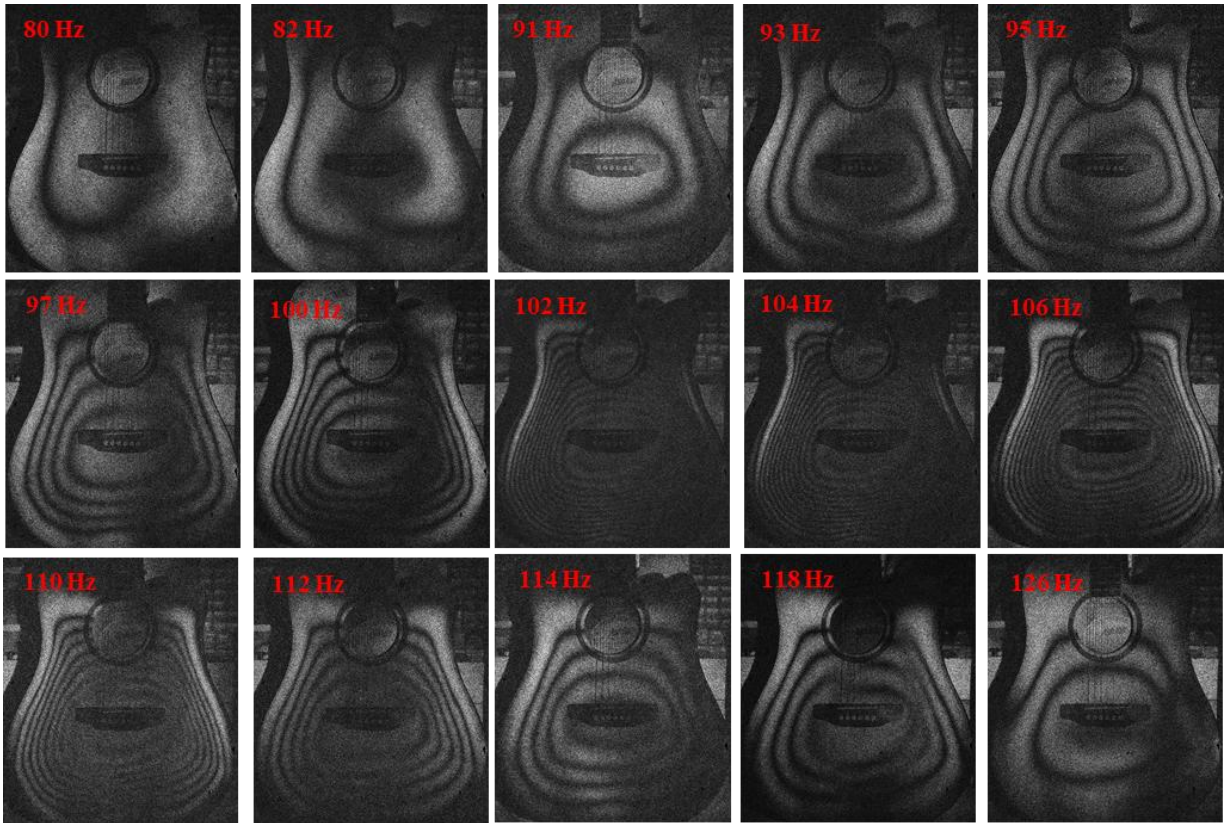
$$2^{\text{ος}} \text{ φωτεινός κροσσός: } \Gamma A_2 = \frac{4\pi}{\lambda} A_2 \approx 3,830 \Rightarrow A_2 \approx \frac{3,830 \cdot 532 \text{ nm}}{4\pi} \Rightarrow A_2 \approx 162 \text{ nm}$$

...

$$13^{\text{ος}} \text{ φωτεινός κροσσός: } \Gamma A_{13} = \frac{4\pi}{\lambda} A_{13} \approx 38,484 \Rightarrow A_{13} \approx \frac{38,484 \cdot 532 \text{ nm}}{4\pi} \Rightarrow A_{13} \approx 1629 \text{ nm}$$

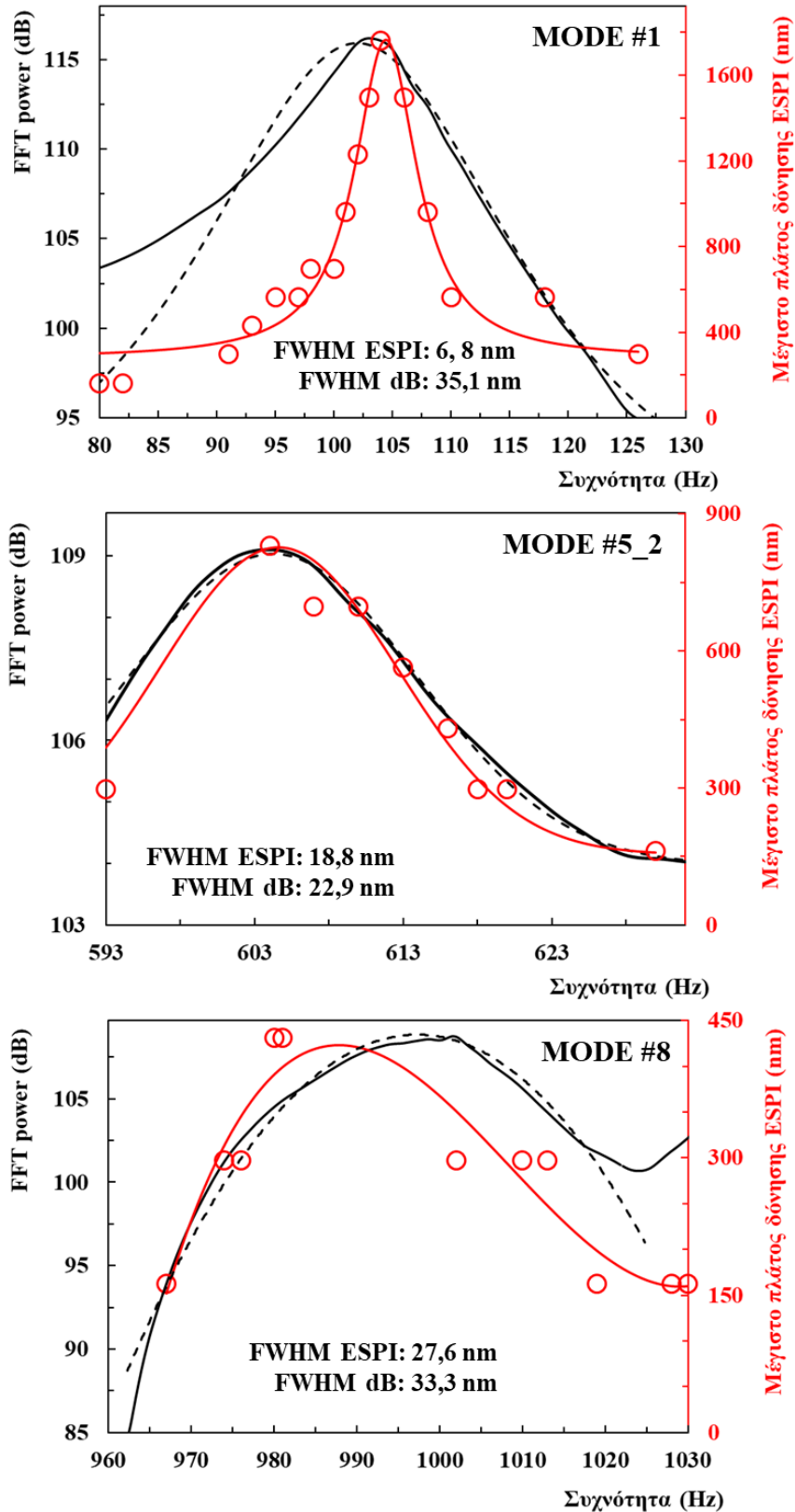
Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι το ελάχιστο ανιχνεύσιμο πλάτος δόνησης με την συγκεκριμένη διάταξη ESPI είναι  $\sim 162$ nm, δηλαδή περίπου  $\lambda / 3$ . Η διαδικασία αυτή, λοιπόν, συνίσταται ουσιαστικά στην καταμέτρηση φωτεινών κροσσών σε κάθε συμβολόγραμμα. Αυτό έγινε για όλα τα συμβολογράμματα μέσα στο πλήρες συχνοτικό εύρος εμφάνισης ενός mode, και απεικονίζεται ενδεικτικά για την περίπτωση του mode #1 στο σχήμα 25. Σε σύνθετες μορφές κατανομής πλάτους δόνησης επιλέχθηκε η περιοχή με τον μέγιστο εμφανιζόμενο αριθμό φωτεινών κροσσών.

**Τέλος,** για άμεση σύγκριση, κι επειδή στα αποτελέσματα εξαγωγής μέγιστου πλάτους δόνησης από την ESPI δεν μπορεί να γίνει υπολογισμός της μορφής όπως στον παράγοντα  $Q$ , επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η δόκιμη διαδικασία εξαγωγής του πλήρους εύρους στο σημείο του μισού μεγίστου (Full Width at Half-Maximum – FWHM) των συντονισμών και στις δύο πειραματικές περιπτώσεις (συχνοτική απόκριση και ESPI). Το FWHM είναι αντιπροσωπευτική ποσότητα του συχνοτικού εύρους: όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο μεγαλύτερο το συχνοτικό εύρος, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει με τον παράγοντα  $Q$ . Η εξαγωγή τιμών FWHM έγινε με προσαρμογή στα δεδομένα (fitting) συναρτήσεων της μορφής Gauss [79] και Lorentz [80], κατά περίπτωση, και με χρήση ειδικού λογισμικού. Τυπικά αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης απεικονίζονται στο σχήμα 26 μαζί με τις αντίστοιχες εξαγόμενες τιμές FWHM σε κάθε περίπτωση.



**Σχήμα 25:** Ενδεικτικά συμβολογράμματα σε όλο το συχνοτικό εύρος του κανονικού τρόπου δόνησης #1 με ιδιοσυχνότητα 104 Hz (πάνω) και η θέση μερικών από αυτά στην καμπύλη συχνοτικής απόκρισης (κάτω). Σε κάθε περίπτωση αναγράφονται οι αντίστοιχες συχνότητες.





**Σχήμα 26:** Εξαγωγή και τιμές του FWHM συχνοτικού εύρους των κανονικών τρόπων δόνησης #1, #5\_2, και #8, από τη συχνοτική απόκριση (μαύρες συνεχείς γραμμές) και τα μέγιστα πλάτη δόνησης των συμβολογραμμάτων ESPI (κόκκινοι κύκλοι). Οι καμπύλες προσαρμογής στα δεδομένα (fitting curves) με μαύρες διακεκομμένες γραμμές (συχνοτική απόκριση) και κόκκινες συνεχείς γραμμές (ESPI). Ο οριζόντιος άξονας (συχνότητα) είναι κοινός, ενώ οι κατακόρυφοι άξονες είναι χρωματισμένοι ανάλογα με τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε αυτούς.

Για τις περιπτώσεις των mode #5\_2 και #8 τα οι τιμές FWHM είναι σε αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ τους, το οποίο σημαίνει ότι από τα αποτελέσματα εξαγωγής μέγιστου πλάτους δόνησης από τα συμβολογράμματα είναι δυνατόν να καθοριστεί η οξύτητα κάθε συντονισμού με έγκυρο τρόπο. Η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στις αντίστοιχες τιμές για το mode #1 μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 4.3 ότι η διέγερση του οργάνου στις μετρήσεις ESPI γινόταν με ηχείο, του οποίου ο εκπεμπόμενος ήχος είχε σταθερή στάθμη 90 dB-SPL σε όλες τις συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν, για να είναι δυνατή η συγκριτική μελέτη. Η τιμή αυτή προσδιορίστηκε από προκαταρκτικά πειράματα, ώστε να είναι ευδιάκριτα τα συμβολογράμματα ESPI σε όλο το συχνοτικό εύρος μελέτης (~50 – 1100 Hz). Όμως, όπως είναι προφανές, το όργανο ανταποκρίνεται καλύτερα σε συχνότητες κοντά στην αέρινη συχνότητα, όπου και τα συμβολογράμματα κοντά στην ιδιοσυχνότητα των 104 Hz έχουν περίπου 13 φωτεινούς κροσσούς, που αντιστοιχεί σε πλάτος δόνησης ~1762 nm. Περαιτέρω αύξηση της στάθμης dB-SPL του ηχείου θα είχε ως αποτέλεσμα οι κροσσοί να μην είναι πλέον ευδιάκριτοι ώστε να μετρηθούν: μεγαλύτερο πλάτος δόνησης σημαίνει μεγαλύτερος αριθμός φωτεινών κροσσών. Με βάση τα αποτελέσματα για τα modes #5\_2 και #8 είναι σίγουρο ότι με κατάλληλη αύξηση της στάθμης διέγερσης θα ήταν δυνατή η καταγραφή του πλήρους εύρους του mode #1, αν, φυσικά, ήταν δυνατή η καταμέτρηση όλων των φωτεινών κροσσών.

## 6. Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή έγινε ακουστικός χαρακτηρισμός μιας εμπορικά διαθέσιμης ακουστικής κιθάρας (μοντέλο D4OSCEQ NT της εταιρίας Ashton). Για το σκοπό αυτό συνδυάστηκαν τρεις διαφορετικές τεχνικές. Συγκεκριμένα: **(α)** καταγράφηκε ο εκπεμπόμενος από το όργανο ήχος κατά την ελεγχόμενη εκτέλεσή του, και προσδιορίστηκαν πειραματικά χρήσιμες πληροφορίες, όπως το φασματικό εύρος του οργάνου και η ένταση των αρμονικών του, **(β)** μελετήθηκε η απόκριση του οργάνου σε ελεγχόμενη κρουστική διέγερση, και εκτιμήθηκε ποιες είναι οι συχνότητες που αυτό υποστηρίζει, και **(γ)** τροποποιήθηκε κατάλληλα σύστημα χρονικά ολοκληρωμένης ESPI του Εργαστηρίου Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, και καταγράφηκαν συμβολογράμματα ιδιομορφών του οργάνου σε αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες.

Η ανάλυση του εκπεμπόμενου ήχου από το όργανο έδειξε ότι ο κύριος όγκος του εκπεμπόμενου ήχου ήταν μεταξύ 80 – 1100 Hz περίπου. Για το λόγο αυτό η μελέτη του οργάνου, τόσο της απόκρισής του συνέπεια κρουστικής διέγερσης όσο και με την τεχνική ESPI, επικεντρώθηκε σε συχνότητες έως περίπου 1000 Hz.

Με την τεχνική ESPI καταγράφηκαν συνολικά οκτώ διαφορετικοί κανονικοί τρόποι δόνησης στο παραπάνω συχνοτικό εύρος, με τρεις από αυτούς να εμφανίζονται ως διπλά εκφυλισμένοι. Οι εντονότεροι ήταν μέχρι τα περίπου 200 Hz, σε συμφωνία τόσο με τον εκπεμπόμενο ήχο όσο και με τα αποτελέσματα συχνοτικής απόκρισης. Γενικά υπήρχε πολύ καλή ποιοτική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφορετικών τεχνικών.

Για την ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων της συχνοτικής απόκρισης με αυτά της τεχνικής ESPI (και τα δύο αφορούν σε προσδιορισμό των κανονικών τρόπων δόνησης του οργάνου), αρχικά εξήχθησαν οι παρατηρούμενες ιδιοσυχνότητες και τα συχνοτικά εύρη των ιδιομορφών. Ως προς τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων η συμφωνία ήταν πολύ καλή. Όμως υπήρχαν συχνοτικές περιοχές όπου δεν παρατηρήθηκαν ιδιομορφές με την τεχνική ESPI, παρόλο που υπήρχαν ευδιάκριτες κορυφές συχνοτικής απόκρισης. Δεδομένου τα διαθέσιμα μέσα δεν επέτρεψαν εξαγωγή της καμπύλης κρουστικής απόκρισης με τη χρήση ανάδρασης κρούσης ώστε να υπάρχει συσχετισμός μεταξύ διέγερσης και καταγραφόμενου σήματος απόκρισης, αξιολογήθηκαν ως πιο έγκυρα τα αποτελέσματα της τεχνικής ESPI ως προς τον προσδιορισμό των κανονικών τρόπων δόνησης και των αντίστοιχων ιδιοσυχνοτήτων.

Η περαιτέρω ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων, περιλάμβανε εξαγωγή παράγοντα  $Q$  συχνοτικής απόκρισης/εκπομπής, εξαγωγή πλατών δόνησης από συμβολογράμματα ESPI, και εξαγωγή FWHM πλατών συντονισμών, έδειξε ότι αυτά είναι σε

πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους. Οι όποιες διαφορές εξηγήθηκαν στα πλαίσια του τρόπου εφαρμογής και την ακρίβεια των μεθόδων.

Από τη συνολική πειραματική μελέτη συμπεραίνεται ότι το μουσικό όργανο έχει χαμηλο-μεσαίου συχνοτικού εύρους χαρακτήρα, καθώς εκεί παρουσιάζει και τους εντονότερους συντονισμούς. Διαπιστώνεται επίσης, ότι η χρονικά ολοκληρωμένη ESPI είναι μια υψηλής ακρίβειας μέθοδος που μπορεί να δώσει αξιόπιστη πληροφορία για τη φύση των δονήσεων ενός μακροσκοπικού αντικειμένου. Παρέχει τα πλεονεκτήματα της σε πραγματικό χρόνο (on-line) ανίχνευσης ενώ είναι μη-καταστρεπτική και μη-επεμβατική καθώς δεν χρειάζεται κάποιο αισθητήριο να έρθει σε επαφή με το υπό μελέτη αντικείμενο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η πραγματοποίηση μετρήσεων απόκρισης σε κρουστική διέγερση με χρήση ανάδρασης κρούσης και η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με εκείνα της ESPI.

## **Βιβλιογραφικές αναφορές**

- [1] X. Εκμεκτσόγλου, *Ιστορία της Κιθάρας από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα*, 2<sup>η</sup> έκδοση, Αθήνα (1985)
- [2] Ε. Αβέρωφ, *Εισαγωγή στην οργανογνωσία*, Αθήνα (1992)
- [3] Τηλέμαχος Κ. Τάτσης, *Οργανογνωσία Ακουστική, Μουσικά Συστήματα και Σκάλες*, Αθήνα (1986)
- [4] Popp, J., and Rossing, T.D. Sound radiation from classical and folk guitars. *International Symposium on Musical Acoustics, West Hartford*, (1986)
- [5] Rossing, T.D., Popp, J., and Polstein, D. *Acoustical response of guitars*. Proc. SMAC 83. Royal Swedish Academy of Music, Stockholm. (1985)
- [6] Caldersmith, G. W. and Jansson, E. V. *Frequency response and played tones of guitars*, (1980)
- [7] <https://www.designofaclassicalguitar.com/principles>
- [8] Μ. Ελευθερίου. *Μουσική Ακουστική Οργανολογία*, Σημειώσεις Μαθήματος ΤΕΙ Κρήτης τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής. (2012)
- [9] <https://www.violinist.com/blog/laurie/20154/16714/>
- [10] N.H. Fletcher and T.D. Rossing, *The physics of musical instruments*, Springer, New York (1998).
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Holography>
- [12] E. Hecht, *Optics*, 4<sup>th</sup> Edition, Addison-Wesley, New York (2001).
- [13] W.H. Duan, Q. Wang, and S.T. Quek, *Applications of piezoelectric materials in structural health. Monitoring and repair: selected research examples*, *Materials* **3**, 5169 (2010).
- [14] S. Tadigadapa and K. Mateti, *Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives*, *Meas. Sci. Technol.* **20**, 092001 (2009).
- [15] C.Y.K. Chee, L. Tong, and G.P. Steven, *A review on the modelling of piezoelectric sensors and actuators incorporated in intelligent structures*, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **9**, 3 (1998).
- [16] G.L. Cloud, *Optical methods of engineering analysis*, Cambridge University Press, Cambridge (1995).
- [17] P. Hariharan, *Optical holography: principles, techniques, and applications*, Cambridge University Press, Cambridge (1996).
- [18] P.K. Rastogi (Ed.), *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*, Wiley,

New York (2001).

- [19] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry: a discussion of the theory, practice, and application of the techniques*, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
- [20] U. Schnars and W. Jueptner, *Digital holography: digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques*, Springer, Berlin (2005).
- [21] L. Yang, X. Xie, L. Zhu, S. Wu, and Y. Wang, *Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement*, Chin. J. Mech. Eng. **27**, 1 (2014).
- [22] B.E.A. Saleh and M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley Interscience (2007).
- [23] J. Løkberg, K. Høgmoen, and M. Hoije, *Vibration measurement on the human ear drum in vivo*, Appl. Opt. **18**, 763 (1979).
- [24] P. Neiswander and G.A. Slettemoen, *Electronic speckle pattern interferometric measurements of the basilar membrane in the inner ear*, Appl. Opt. **20**, 4271 (1981).
- [25] H. Wada, M. Ando, M. Takeuchi, H. Sugawara, and T. Koike, *Vibration measurement of the tympanic membrane of guinea pig temporal bones using time-averaged speckle pattern interferometry*, J. Acoust. Soc. Am. **111**, 2189 (2002).
- [26] F. Jin and F.P. Chiang, *ESPI and digital speckle correlation applied to inspection of crevice corrosion on aging aircraft*, Res. Nondestruct. Eval. **10**, 63 (1998).
- [27] J.P. Fugal, R.A. Shaw, E.W. Saw, and A.V. Sergeyev, *Airborne digital holographic system for cloud particle measurements*, Appl. Opt. **43**, 5987 (2004).
- [28] N-E. Molin, *Applications of whole field interferometry in mechanics and acoustics*, Opt. Lasers Eng. **31**, 93 (1999).
- [29] E. Bakarezos, V. Vathis, S. Brezas, Y. Orphanos, and N.A. Papadogiannis, *Acoustics of the Chelys – An ancient Greek tortoise-shell lyre*, Appl. Acoust. **73**, 478 (2012).
- [30] F. Pinard, B. Laine, and H. Vach, *Musical quality assessment of clarinet reeds using optical holography*, J. Acoust. Soc. Am. **113**, 1736 (2003).
- [31] S. Ellingsrud and O.J. Lokberg, *Full field amplitude and phase measurement of loudspeakers by using TV-holography and digital image processing*, J. Sound Vib. **168**, 193 (1993).
- [32] P. Perz, *Holographic visualization of vibration distribution on a loudspeaker membrane in the growth and decay of the excitation signal*, J. Sound Vib. **197**, 589 (1996).
- [33] F. Chen, W.D. Luo, M. Dale, A. Petniunas, P. Harwood, and G.M. Brown, *High-speed*

- ESPI and related techniques: overview and its application in the automotive industry*, Opt. Lasers Eng. **40**, 459 (2003).
- [34] D.I. Farranta, J.N. Petzingb, and J.R. Tyrer, *Geometrically qualified ESPI vibration analysis of an engine*, Opt. Lasers Eng. **41**, 659 (2004).
- [35] K. Genovesea, L. Lamberti, and C. Pappalettere, *A comprehensive ESPI based system for combined measurement of shape and deformation of electronic components*, Opt. Lasers Eng. **42**, 543 (2004).
- [36] M. Olfatnia, V.R. Singh, T. Xu, J.M. Miao, and L.S. Ong, *Analysis of the vibration modes of piezoelectric circular microdiaphragms*, J. Micromech. Microeng. **20**, 085013 (2010).
- [37] C-C. Maa, H-Y. Lin, Y-C. Lin, and Y-H. Huang, *Experimental and numerical investigations on resonant characteristics of a single-layer piezoceramic plate and a cross-ply piezolaminated composite plate*, J. Acoust. Soc. Am. **119**, 1476 (2006).
- [38] M.D. Waller, *Vibrations of free circular plates. Part 1: Normal modes*, Proc. Phys. Soc. **50**, 70 (1938).
- [39] M.D. Waller, *Vibrations of free circular plates. Part 2: Compounded normal modes*, Proc. Phys. Soc. **50**, 77 (1938).
- [40] M.D. Waller, *Vibrations of free circular plates. Part 3: A study of Chladni's original figures*, Proc. Phys. Soc. **50**, 83 (1938).
- [41] M.D. Waller, *Vibrations of free rectangular plates*, Proc. Phys. Soc. **B62**, 277 (1949).
- [42] M.D. Waller, *Vibrations of free elliptical plates*, Proc. Phys. Soc. **B63**, 451 (1950).
- [43] N.H. Fletcher and T.D. Rossing, *The physics of musical instruments*, Springer, New York (1998).
- [44] J. Curie, P. Curie, *Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres a faces inclinées*, Compt. Rend. **91**, 294 (1880).
- [45] G. Lippmann, *Principe de la conversation de l'électricité*, Ann. de Chim. et de Phys. **24**, 145 (1881).
- [46] J. Curie, P. Curie, *Contractions et dilatations produits par des tensions électriques dans les cristaux hémihédres a faces inclinées*, Compt. Rend. **93**, 1137 (1881).
- [47] P. Langevin, *Précédé et appareil d'émission et de réception des ondes élastiques sous-marines a l'aide des propriétés piézoélectriques du quartz*, Fr. Pat., 1918, No 505703.
- [48] B. Wool, I. Goldman, *Dielectric permeability titanium barium depending on intensity in a variation field*, Rep. Acad. Sci. USSR **49**, 179 (1945).
- [49] A.S. Sedra and K.C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 5<sup>th</sup> edition, Oxford University Press, Oxford (2003).

- [50] R. Le Letty, F. Barillot, N. Lhermet, F. Claeysen, M. Yorck, and J. Gavira Izquierdo, *The scanning mechanism for ROSETTA/MIDAS: from an engineering model to the flight model*, in *Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Space Mechanisms and Tribology Symposium* (R.A. Harris Ed.), ESA SP-480, pp. 75-81, ESA Publications Division, Noordwijk, Netherlands (2001).
- [51] M. Labanca, F. Azzola, R. Vinci, and L.F. Rodella, *Piezoelectric surgery: twenty years of use*, Br. J. Oral Maxillofac. Surg. **46**, 265 (2008).
- [52] S. Shoaee, J. Briscoe, J.R. Durrant, and S. Dunn, *Acoustic enhancement of polymer/ZnO nanorod photovoltaic device performance*, Adv. Mater. **26**, 263 (2014).
- [53] T. Young, *The Bakerian Lecture: On the theory of light and colours*, Phil. Trans. R. Soc. Lond. **92**, 12 (1802).
- [54] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 7<sup>th</sup> Edition, Cambridge University Press, Cambridge (1999).
- [55] D. Gabor, *A new microscopic principle*, Nature **161**, 777 (1948).
- [56] <http://how-does-things-work.blogspot.gr/2010/02/working-of-hologram.html>
- [57] E. Hecht, *Optics*, 4<sup>th</sup> Edition, Addison-Wesley, New York (2001).
- [58] K. Haines, *Emmett Leith: Misconceptions and realities*, J. Holography Speckle **3**, 35 (2006).
- [59] R.L. Powell and K.A. Stetson, *Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction*, J. Opt. Soc. Amer. **55**, 1593 (1965).
- [60] K.A. Stetson and R.L. Powell, *Interferometric hologram evaluation of real-time vibration analysis of diffuse objects*, J. Opt. Soc. Amer. **55**, 1694 (1965).
- [61] E.R. Robertson and J.M. Harvey (Eds.), *The engineering uses of holography* in Proceedings of the Symposium, University of Strathclyde, Cambridge University Press, Cambridge (1970).
- [62] A. Macovski, S.D. Ramsey, and L.F. Schaefer, *Time-lapse interferometry and contouring using television systems*, Appl. Opt. **10**, 2722 (1971).
- [63] J.N. Butters and J.A. Leendertz, *Holographic and video techniques applied to engineering measurement*, J. Meas. Control **4**, 349 (1971).
- [64] J.A. Leendertz, *Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect*, J. Phys. E: Scientific Instruments **3**, 214 (1970).
- [65] J.N. Butters, *Speckle pattern interferometry using video techniques*, Opt. Eng. **10**, 100105 (1971).
- [66] J.N. Butters and J.A. Leendertz, *Speckle pattern and holographic techniques in*



- engineering metrology*, Opt. Laser Technol. **3**, 26 (1971).
- [67] K. Biedermann and L. Ek, *A recording and display system for hologram interferometry with low resolution imaging devices*, J. Phys. E: Scientific Instruments **8**, 571 (1975).
- [68] O.J. Løkberg and K. Høgmoen, *Vibration phase mapping using electronic speckle pattern interferometry*, Appl. Opt. **15**, 2701 (1976).
- [69] K. Høgmoen and O.J. Løkberg, *Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry*, Appl. Opt. **16**, 1869 (1977).
- [70] P. Meinschmidt, K.D. Hinsch and R.S. Sirohi (Eds.), *Selected papers on electronic speckle pattern interferometry*, SPIE MS132, SPIE, Bellingham (1996).
- [71] C-H. Huang and C-C. Ma, *Experimental and numerical investigations of resonant vibration characteristics for piezoceramic plates*, J. Acoust. Soc. Amer. **109**, 2780 (2001).
- [72] H.M. Pedersen, O.J. Løkberg and B.M. Førre, *Holographic vibration measurement using a TV speckle interferometer with silicon target vidicon*, Opt. Commun. **12**, 421 (1974).
- [73] O.J. Løkberg, *ESPI – The ultimate holographic tool for vibration analysis?*, J. Acoust. Soc. Amer. **75**, 1783 (1984).
- [74] C.C. Aleksoff, *Temporally modulated holography*, Appl. Opt. **15**, 1329 (1971).
- [75] O.J. Løkberg and K. Høgmoen, *Use of modulated reference wave in electronic speckle pattern interferometry*, J. Phys. E **9**, 847 (1976).
- [76] <http://www.murata.com/en-us/products/sound/>
- [77] <http://www.sonitron.be/site/index.php>
- [78] G.T. Smith, *Industrial metrology: surfaces and roundness*, p. 253, Springer-Verlag, London (2002).
- [79] [https://en.wikipedia.org/wiki/Normal\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution)
- [80] <http://mathworld.wolfram.com/LorentzianFunction.html>