

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΑΣ ΠΟΙΜΕΝΙΔΟΥ

*ΤΡΟΠΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ*

*ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΕΓΧΟΡΔΩΝ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ*

*ΜΕΣΩ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ.*

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Δρ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ ΠΑΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Ρέθυμνο Σεπτέμβριος 2007





## ***ΠΕΡΙΛΗΨΗ***

Η ποιότητα του εκπεμπόμενου ήχου ενός μουσικού οργάνου εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων. Πολλοί από αυτούς σχετίζονται άμεσα με τον τρόπο δόνησης του σώματος του μουσικού οργάνου. Στη μελέτη αυτή εξετάζονται οι τρόποι δόνησης παραδοσιακών μουσικών οργάνων μέσω μη καταστρεπτικών τεχνικών (Κρητικής λύρας και λαούτου). Ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή της μηχανικής και της οπτικής τεχνικής με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς κατά τη δόνηση, κάθε μουσικού οργάνου. Σκοπός είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την καταλληλότητα και την αξιοπιστία κάθε τεχνικής που εφαρμόστηκε κατά τη διεξαγωγή της μελέτης. Η τεχνική ηλεκτρονικής συμβολομετρίας σχεδίων ψηφίδας (χρονικού μέσου όρου) αποδεικνύεται ιδανική για τις δυναμικές μετρήσεις και είναι μη καταστρεπτική αφού οι δονήσεις μετρώνται με την ανάκλαση φωτός από την δονούμενη επιφάνεια.

## ***ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ***

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη για τη συνεχή και πλήρη υποστήριξή μου κατά τη διάρκεια της εργασίας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

#### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ιστορικά στοιχεία ανίχνευσης ταλάντωσης επιφανειών ( <i>Chladni plates</i> ) – Καταστάσεις δόνησης (modes of vibration).....	3
1.3 Μέθοδοι ανίχνευσης ταλάντωσης επιφανειών.....	5
1.4 Εφαρμογή μεθόδων στα μουσικά όργανα.....	6

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

#### ΟΠΤΙΚΗ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Συμβολή φωτός.....	8
2.1.1 Έννοια – Δύο τρόποι συμβολής κυμάτων.....	8
2.1.2 Συνθήκες συμβολής.....	8
2.1.3 Ενισχυτική – Καταστρεπτική συμβολή (πείραμα Young).....	9
2.1.3.1 Διαφορά διαδρομής.....	9
2.1.3.2 Ενισχυτική – Καταστρεπτική συμβολή.....	10
2.2 Laser.....	11
2.2.1 Έννοια – Τρία βασικά φαινόμενα.....	11
2.2.1.1 Αυθόρμητη Εκπομπή.....	11
2.2.1.2 Εξαναγκασμένη Εκπομπή.....	12
2.2.1.3 Απορρόφηση.....	12
2.2.2 Ιδιότητες των δεσμών Laser.....	12
2.3 Εισαγωγή.....	13
2.3.1 Ολογραφία – Αρχή ολογραφικής απεικόνισης.....	13
2.3.1.1 Παραγωγή ολογράμματος.....	15
2.3.1.2 Ανακατασκευή από το ολόγραμμα.....	17
2.4 Ολογραφική Συμβολομετρία.....	19
2.4.1 Στατική – Διπλής έκθεσης ολογραφική συμβολομετρία.....	20
2.4.2 Δυναμική – Χρονικά ολοκληρωμένη ολογραφική συμβολομετρία.....	21
2.4.2.1 Περιγραφή χρονικά ολοκληρωμένης τεχνικής ολογραφικής συμβολομετρίας.....	22
2.5 Speckle Interferometry (SI) - Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) – Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI).....	24
2.5.1 Βασικές αρχές.....	26
2.5.2 Τεχνικές Μέτρησης Αρμονικών Δονήσεων.....	27
2.5.2.1 Διαμόρφωση ενός συμβολογραφήματος.....	27
2.5.2.2 Αφαίρεση κροσών σχηματισμού.....	29
2.5.2.3 Χρονική Ετεροδύναση – Επέκταση μέτρησης εύρους πλάτους και ανάλυσή του.....	32
2.6 Συμβολόμετρο Michelson.....	33

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

### **ΚΡΗΤΙΚΗ ΛΥΡΑ**

<i>Εισαγωγή</i> .....	38
3.1 Ιστορικά στοιχεία κατασκευής-μορφολογίας της λύρας.....	38
3.1.1 Μορφολογική εξέλιξη της λύρας – Η Κρητική λύρα.....	38
3.1.2 Κατασκευαστικά στοιχεία – Λειτουργία.....	39
3.2 Παλαιότερες ακουστικές μελέτες Κρητικής λύρας.....	42
3.2.1 Παλαιότερες ακουστικές μελέτες βιολιού.....	42
3.2.2 Παλαιότερες ακουστικές μελέτες καπακιών Κρητικής λύρας.....	44
3.3 Μετρήσεις-αποτελέσματα.....	46
3.3.1 Μέθοδος ηχοβόλισης - Πειραματική διάταξη .....	46
3.3.2 Λύρα 17 <sup>ου</sup> αιώνα (Κατσαντώνη).....	49
3.3.2.1 Αποτελέσματα ηχοβόλισης.....	49
3.3.2.2 Αποτελέσματα μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας.....	53
3.3.3 Λύρα αχλαδόσχημη (Σταγάκη).....	55
3.3.3.1 Αποτελέσματα ηχοβόλισης.....	55
3.3.3.2 Αποτελέσματα μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας.....	59
3.3.4 Λύρα αχλαδόσχημη (Λαγουδάκη).....	61
3.3.4.1 Αποτελέσματα ηχοβόλισης.....	61
3.3.4.2 Αποτελέσματα μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας.....	65
3.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων-συγκρίσεις.....	66
3.4.1 Σύγκριση δονητικής συμπεριφοράς λυρών – Μηχανική μέθοδος.....	66
3.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων οπτικής μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας.....	69
3.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ηχοβόλισης και ολογραφικής συμβολομετρίας (ESPI).....	72
3.5 Συμπεράσματα.....	77

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

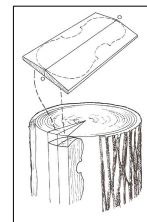
### **ΛΑΟΥΤΟ**

<i>Εισαγωγή</i> .....	78
4.1 Ιστορικά στοιχεία κατασκευής-μορφολογίας του λαούτου.....	78
4.1.1 Μορφολογική εξέλιξη του λαούτου – Το λαούτο.....	78
4.1.2 Κατασκευαστικά στοιχεία – Λειτουργία.....	79
4.1.3 Παλαιότερες ακουστικές μελέτες λαούτου.....	79
4.2 Μετρήσεις-αποτελέσματα.....	84
4.2.1 Μέθοδος ηχοβόλισης - Πειραματική διάταξη .....	84
4.2.2 Καπάκια λαούτων – Αποτελέσματα ηχοβόλισης.....	87
4.2.3 Αποτελέσματα μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας.....	93
4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων-συγκρίσεις.....	97
4.3.1 Σύγκριση δονητικής συμπεριφοράς καπακιών λαούτων - Μηχανική μέθοδος.....	97
4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ολογραφικής συμβολομετρίας.....	99
4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ηχοβόλισης και ολογραφικής συμβολομετρίας (ESPI).....	101

4.4 Συμπεράσματα.....	105
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup></b>	
5.1 Συμπεράσματα.....	107
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>110</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ



### 1.1 Εισαγωγή

Στα περισσότερα μουσικά όργανα, η παραγωγή του ήχου εξαρτάται από τη συλλογική συμπεριφορά των διαφόρων δονούμενων μερών, τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η σύνδεση αυτή, μαζί με τη μη γραμμική ανάδραση, καθιστούν το μουσικό όργανο ως ένα σύνθετο δονούμενο σύστημα παρόλο που τα μεμονωμένα στοιχεία του - με καλή προσέγγιση - είναι απλοί ταλαντωτές. Η συμπεριφορά ενός μουσικού οργάνου κατά τη δόνηση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην ποιότητα του εκπεμπόμενου ήχου και στη δυνατότητα παιξίματος. Στην προσπάθεια ανακάλυψης των «μυστικών» κατασκευής των κλασικών μουσικών οργάνων από παλιούς δεξιότεχνες, η ακουστική μελέτη (ανίχνευση τρόπων δόνησης σώματος οργάνου πριν και μετά τη συναρμολόγηση) κρίνεται απαραίτητη ώστε να γίνει δυνατή η κατασκευή νέων, εξίσου «καλών» οργάνων (πιστοποίηση ηχητικής ποιότητας).

Παρόλο που η μελέτη των μουσικών οργάνων απασχολεί το ενδιαφέρον των επιστημόνων από την εποχή του Πυθαγόρα (2500 χρόνια πριν), η κατανόηση της ακουστικής συμπεριφοράς τους έχει επιτευχθεί τα τελευταία 50-60 χρόνια. Η ανάπτυξη της οπτικής ολογραφίας (χρήση laser), η εξέλιξη των ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης / απεικόνισης και η διαθεσιμότητα ψηφιακής επεξεργασίας μέσω της τεράστιας υπολογιστικής ισχύος των computers έχουν συμβάλει στην περαιτέρω κατανόηση των καταστάσεων δόνησης ενός αντικειμένου.

Αρκετά μεγάλος αριθμός διαφορετικών πειραματικών μεθόδων έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη δονήσεων των εγχόρδων μουσικών οργάνων. Είναι αποδεκτό ότι για μία ολοκληρωμένη μελέτη είναι απαραίτητη η εφαρμογή τόσο μηχανικών όσο και οπτικών τεχνικών καταγραφής των δονήσεων. Στη συγκεκριμένη μελέτη έγινε εφαρμογή των δύο τεχνικών για ορισμένα παραδοσιακά όργανα (Κρητική λύρα και λαούτο). Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στους εργαστηριακούς χώρους οπτικής απεικόνισης δονήσεων του εργαστηρίου Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής.

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη του τρόπου ταλάντωσης των επιφανειών, των μουσικών οργάνων, που έρχονται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα, μέσω μη καταστρεπτικών τεχνικών. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε μεθόδου αλλά και η μεταξύ τους σύγκριση, θα κάνει εφικτή την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητα και τους περιορισμούς κάθε τεχνικής.

Ακολουθεί η γενική δομή της εργασίας.

### *1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο*

Ιστορική αναφορά στα στοιχεία ανίχνευσης ταλάντωσης επιφανειών και στις καταστάσεις δόνησης αυτών. Εισαγωγή στις μεθόδους ανίχνευσης της ταλάντωσης επιφανειών και στην εφαρμογή των μεθόδων στα μουσικά όργανα.

### *2ο Κεφάλαιο*

Θεωρητική αναφορά στις έννοιες συμβολή φωτός και laser. Ακολουθεί θεωρητική παρουσίαση της οπτικής τεχνικής ολογραφίας και της ολογραφικής συμβολομετρίας. Οι μέθοδοι της συμβολομετρίας ψηφίδας (SI) και της ηλεκτρονικής / ψηφιακής συμβολομετρίας σχεδίου ψηφίδας (ESPI / DSPI – εφαρμογή στη μελέτη των μουσικών οργάνων), περιγράφονται αναλυτικά. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και η λειτουργία του συμβολόμετρου Michelson.

### *3ο Κεφάλαιο*

Μελέτη της Κρητικής λύρας. Ιστορική αναφορά στην κατασκευή και τη μορφολογία της λύρας. Τρόπος παραγωγής του ήχου. Εφαρμογή της μηχανικής τεχνικής ηχοβόλισης και οπτικής συμβολομετρίας ψηφίδων για την ανίχνευση των καταστάσεων δόνησης και παρουσίαση των πειραματικών μετρήσεων. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μετρήσεων, συγκρίσεις και εξαγωγή συμπερασμάτων.

### *4ο Κεφάλαιο*

Μελέτη του λαούτου. Ιστορική αναφορά στην κατασκευή και τη μορφολογία του λαούτου. Τρόπος παραγωγής του ήχου. Εφαρμογή της μηχανικής τεχνικής ηχοβόλισης και οπτικής συμβολομετρίας ψηφίδων για την ανίχνευση των καταστάσεων δόνησης και παρουσίαση των πειραματικών μετρήσεων. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μετρήσεων, συγκρίσεις και εξαγωγή συμπερασμάτων.

### *5ο Κεφάλαιο*

Παρουσίαση βασικών συμπερασμάτων που προέκυψαν από και κατά τη διεξαγωγή της μελέτης. Αξιολόγηση των τεχνικών μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν και αποτίμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Παραδοχές, αποκλίσεις και περιορισμοί για αξιοποίηση σε μελλοντικές έρευνες.

## 1.2 Ιστορικά στοιχεία ανίχνευσης ταλάντωσης επιφανειών ( *Chladni plates* ) - Καταστάσεις δόνησης ( *modes of vibration* )<sup>23</sup>

Κάθε ήχος μπορεί να περιγραφεί ως υπέρθεση ημιτονικών κυμάτων. Η ταλάντωση αυτή αναπαριστάται σε ένα γράφημα μετατόπισης – χρόνου ως ημιτονικό κύμα, λόγω της απλής αρμονικής κίνησης. Όταν ένα αντικείμενο δονείται σε πολλαπλές συχνότητες το αναπαριστάμενο κύμα γίνεται σύνθετο και δεν μπορεί να περιγραφεί εύκολα με την απλή τριγωνομετρία. Αυτό το κύμα αναλύεται σε διάφορα ημιτονικά κύματα με διαφορετικές συχνότητες μέσω του μετασχηματισμού *Fourier*. Η μελέτη του τρόπου δόνησης ενός αντικειμένου στις διαφορετικές αυτές συχνότητες που ονομάζονται *resonances* ή *modes* (ιδιοσυχνότητες / καταστάσεις συντονισμού), μας βοηθάει να προβλέψουμε τον τρόπο παραγωγής του ήχου από το αντικείμενο καθώς και το είδος του ήχου αυτού.

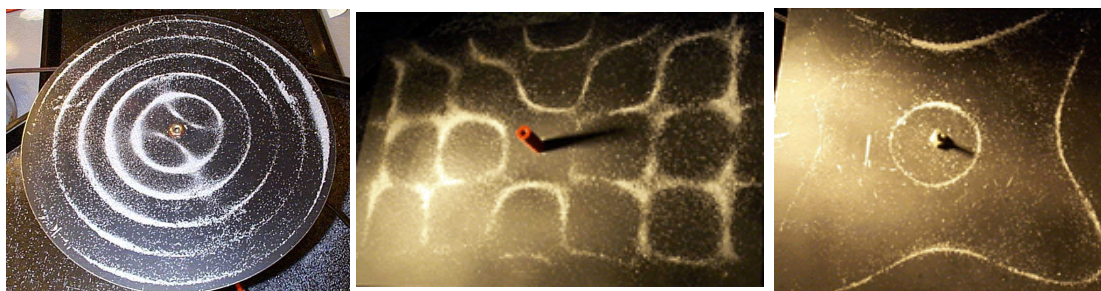


Ο *Ernst Chladni* (Γερμανός χημικός και ερασιτέχνης μουσικός (1756-1827)) ήταν ο πρώτος που μελέτησε αυτές τις καταστάσεις δόνησης (*modes*) το 1787. Χρησιμοποίησε επίπεδους δίσκους (*Chladni plates*) για να μελετήσει τη συμπεριφορά δόνησης επίπεδων επιφανειών.

Ο τυπικός δίσκος που χρησιμοποιήθηκε είχε ομοιόμορφο πάχος έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η κατανόηση των φυσικών καταστάσεων δόνησης (*natural modes*). Λόγω της ανικανότητας του ανθρώπινου ματιού να ανιχνεύσει την κίνηση του δονούμενου δίσκου κρίθηκε απαραίτητη η οδήγηση του δίσκου στις φυσικές καταστάσεις δόνησης (συχνότητων ημιτονικών κυμάτων).

Ο *Chladni* για να αναλύσει τις καταστάσεις δόνησης κατάφερε να διεγείρει τους δίσκους με το δοξάρι ενός βιολιού. Σήμερα η μέθοδος αυτή γίνεται ηλεκτρομηχανικά, με την χρήση μίας γεννήτριας συχνότητων, ενός μικρής μάζας οδηγούμενου μαγνήτη και ενός ηλεκτρομαγνητικού πηνίου. Κάποιες καταστάσεις δόνησης, οι οποίες εξαρτώνται από το υλικό του μετάλλου, το σχήμα και την πυκνότητα, θα «συνηχίσουν» σε συγκεκριμένες συχνότητες (συχνότητες συντονισμού).

Η μέθοδος *Chladni* προϋποθέτει την τοποθέτηση μικρής μάζας κόκκων άμμου ή αλατιού στην επιφάνεια του δίσκου, έτσι ώστε με την οδήγηση του δίσκου στις «ηχηρές» συχνότητες να σχηματιστούν κομβικές διαμέτροι και κομβικοί κύκλοι (κυκλικοί δίσκοι – εικόνα 1.2.1).



Εικόνα 1.2.1 Μοτίβα Chladni σε κυκλική, ορθογώνια και τετράγωνη επιφάνεια δίσκου [23].



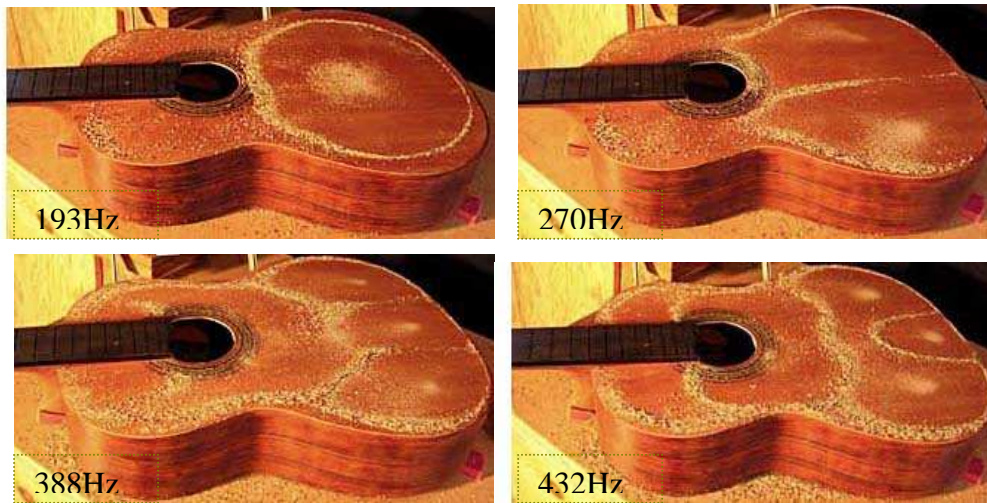
Οι κόκκοι άμμου μετακινούνται προς τα σημεία του δίσκου που δεν κινούνται, στα «νεκρά» δηλαδή σημεία δόνησης που ονομάζονται κομβικές γραμμές (nodal lines). Η κίνηση των κόκκων άμμου κρυσταλλώνεται σε ένα ειδικό σχήμα που εξαρτάται από τη συχνότητα (Hz) και το πλάτος (dB) ταλάντωσης της κάθε επιφάνειας. Η τεχνική αυτή οριοθετείται από το γεγονός ότι η ταλαντούμενη επιφάνεια πρέπει να είναι συγκριτικά οριζόντια και επίπεδη.

Οι καταστάσεις συντονισμού ενός κυκλικού δίσκου καταγράφονται με τα σύμβολα  $m$  και  $n$ , έτσι ώστε να ορίζεται ο αριθμός των κομβικών διαμέτρων και των κομβικών κύκλων, αντίστοιχα. Ο Chladni παρατήρησε ότι οι συχνότητες των διαφόρων καταστάσεων συντονισμού σε ένα δίσκο είναι ανάλογες προς το  $(m+2n)^2$ . Η παραπάνω διατύπωση αποτελεί το νόμο του Chladni (“Chladni’s law”). Ένας άλλος τρόπος για να διεγερθεί ένας δίσκος είναι μέσω ενός ισχυρού ηχητικού κύματος με συχνότητα ίση με αυτήν της επιθυμητής κατάστασης συντονισμού (ηχοβόλιση).

Τα σχήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου Chladni σε μουσικά όργανα μας δίνουν πληροφορίες για την ποιότητα κατασκευής τους. Οι συχνότητες συντονισμού της πλάτης και του καπακιού ενός μουσικού οργάνου που μπορεί να σχετίζονται εμπειρικά με την ποιότητα του ολοκληρωμένου οργάνου αλλά και η συμμετρικότητα των παραγόμενων σχημάτων, που υποδηλώνει συμμετρικότητα και στην υπό μέτρηση επιφάνεια, αποτελούν βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η τοποθέτηση της μάζας μαγνήτη και άμμου, οι οποίες επιφέρουν μία αλλοίωση στην απόκριση της επιφάνειας που μετράται (διαφορά 1Hz στην εκτίμηση της συχνότητας).



Εικόνα 1.2.2 Μοτίβα Chladni στο καπάκι και στην πλάτη ενός βιολιού [23].



Εικόνα 1.2.3 Μοτίβα Chladni σε κλασική κιθάρα [22].

### 1.3 Μέθοδοι ανίχνευσης ταλάντωσης επιφανειών

Η ανίχνευση και καταγραφή των κανονικών καταστάσεων δόνησης (καταστάσεις συντονισμού) μιας επιφάνειας μπορούν να πραγματοποιηθούν μηχανικά (χρήση επιταχυνσιομέτρων ή ανιχνευτών τάσης), οπτικά (εφαρμογή τεχνικών ολογραφίας) και έμμεσα μέσω παρατήρησης του εκπεμπόμενου ηχητικού πεδίου.

Οι οπτικές μέθοδοι ανίχνευσης της ταλάντωσης επιφανειών παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνικές «επαφής», γεγονός που κάνει την χρήση των οπτικών μεθόδων περισσότερο συμπληρωματική παρά ανταγωνιστική ως προς τις συμβατικές πιεζοηλεκτρικές μεθόδους.

Περισσότερο αξιόπιστη και αποδοτικότερη παρουσιάζεται η τεχνική της ολογραφικής συμβολομετρίας σχεδίων ψηφίδας (*ESPI – Electronic Speckle Pattern Interferometry*). Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός ότι δεν απαιτείται καμία επαφή με την επιφάνεια του υπό μέτρηση αντικειμένου. Επιπλέον, η εφαρμογή της συμβολομετρίας ψηφίδων παρέχει πληροφορίες υψηλής ανάλυσης (συσχετογράμματα κροσσών συμβολής) όσον αφορά το πλάτος (διαμόρφωση κροσσών), τη συχνότητα ταλάντωσης του αντικειμένου και τη φάση (θέση κροσσών). Τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής οπτικοποιούνται σχεδόν σε πραγματικό χρόνο γεγονός που αποτελεί σπουδαίο πλεονέκτημα. Ακόμη, η μέτρηση πραγματοποιείται ταυτόχρονα σε ένα εκτεταμένο πεδίο (η δέσμη αντικειμένου σαρώνει ολόκληρη την επιφάνεια που μετράται) έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι ιδιότητες των καταστάσεων δόνησης του υπό μέτρηση αντικειμένου. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή των οπτικών μεθόδων ανίχνευσης χαρακτηρίζεται από μικρή ευαισθησία - όσον αφορά την ποιότητα των συμβολογραμμάτων - σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους «επαφής». Η ευαισθησία ανίχνευσης ηχητικών κυμάτων ποικίλλει ανάλογα με την αντανάκλαστικότητα και την τραχύτητα της μετρούμενης επιφάνειας και σχετίζεται άμεσα με το φασματικό εύρος που απαιτείται για μία συγκεκριμένη μέτρηση.

Βασικό μειονέκτημα στην τεχνική με χρήση πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων (μηχανική διέγερση) αποτελούν τα πειραματικά σφάλματα (ακρίβεια μετρήσεων, πειραματική διάταξη) καθώς και το γεγονός ότι απαιτείται πολύς χρόνος για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Για να μελετηθεί η δόνηση ενός αντικειμένου είναι απαραίτητη η προσκόλληση ενός ή περισσότερων πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων στην επιφάνεια του αντικειμένου. Ωστόσο, ο κρύσταλλος έχει μάζα και με την τοποθέτησή του προσθέτει ακαμψία στην επιφάνεια του υπό μέτρηση αντικειμένου. Αποτέλεσμα είναι η διαταραχή του ακουστικού πεδίου της επιφάνειας και συνεπώς η τροποποίηση της συμπεριφοράς του αντικειμένου. Οι συμβατικοί αισθητήρες αναπόφευκτα «επιβαρύνουν» το αντικείμενο προς μέτρηση και επομένως διαταράσσουν τη δυναμική του απόκριση.

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ηχοβόλισης και η ολογραφική συμβολομετρία σχεδίων ψηφίδας με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων και τη συλλογή περαιτέρω στοιχείων σχετικά με την καταλληλότητα και αποτελεσματικότητα κάθε τεχνικής για την καταγραφή δονήσεων.

#### ***1.4 Εφαρμογή μεθόδων στα μουσικά όργανα***

Τα μουσικά όργανα αποτελούν την κύρια πηγή μουσικού ήχου και ένα πρακτικό μέσο μουσικής έκφρασης. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάση των κατασκευαστικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών τους αλλά και βάση της ακουστικής συμπεριφοράς τους.

Σύμφωνα με επίσημες μουσικολογικές και οργανολογικές ταξινομήσεις τα μουσικά όργανα κατατάσσονται σε τέσσερις γενικές κατηγορίες : α) τα έγχορδα, β) τα πνευστά, γ) τα κρουστά και δ) τα ιδιόφωνα. Στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με όργανα της πρώτης κατηγορίας και ειδικότερα με παραδοσιακά λαϊκά όργανα, όπως η Κρητική λύρα και το λαούτο.

Ένας σημαντικός παράγοντας στην ποιότητα του εκπεμπόμενου ήχου και συνεπώς στην χρησιμότητα κάθε μουσικού οργάνου είναι η συμπεριφορά του σώματος του οργάνου καθώς αυτό δονείται. Η συμπεριφορά αυτή συχνά περιγράφεται από τις κανονικές καταστάσεις δόνησης (καταστάσεις συντονισμού), οι οποίες συνίστανται από τις αλληλενδεδετες κινήσεις των καπακιών (έγχορδα όργανα) και του εσωκλειώμενου αέρα. Οι πλευρικές επιφάνειες, ο λαιμός και η επιφάνεια εφαρμογής των δακτύλων (ταστιέρα) έχουν μικρότερη επίδραση στη συμπεριφορά δόνησης του οργάνου.

Η συχνοτική απόκριση ενός μουσικού οργάνου χαρακτηρίζεται από μία σειρά ηχηρών (resonances) και μη ηχηρών (antiresonances) αντηχήσεων – συντονισμών. Για να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνεται το όργανο κατά τη διάρκεια δόνησής του στις συχνότητες συντονισμού, εφαρμόζεται μία εξωτερική δύναμη σε ένα ή περισσότερα σημεία («οδήγηση» οργάνου) και η συμπεριφορά του παρατηρείται οπτικά, ακουστικά, ηλεκτρικά ή μηχανικά.

Η τεχνική της ολογραφίας (ολογραφική συμβολομετρία) χρησιμοποιεί την υπέρθεση κύματος για να μελετηθούν οι καταστάσεις συντονισμού των ταλαντούμενων επιφανειών. Γίνεται χρήση δεσμών laser σε ενισχυτική ή καταστρεπτική συμβολή μίας δέσμης αναφοράς και μίας δέσμης αντικειμένου έτσι

ώστε να προκύψουν οι κομβικές και μη κομβικές περιοχές του αντικειμένου που δονείται. Έτσι καταγράφεται και αναπαράγεται ένα αντικείμενο τριών διαστάσεων.

Στην εργασία αυτή έγινε εφαρμογή οπτικών και μηχανικών τεχνικών σε δείγματα τριών Κρητικών λυρών (σώματα οργάνων) και δύο λαούτων (καπάκια). Μέσω της ποιοτικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων θα προσπαθήσουμε να αξιολογήσουμε τη δονητική συμπεριφορά κάθε μουσικού οργάνου και να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με την κατασκευή των οργάνων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>



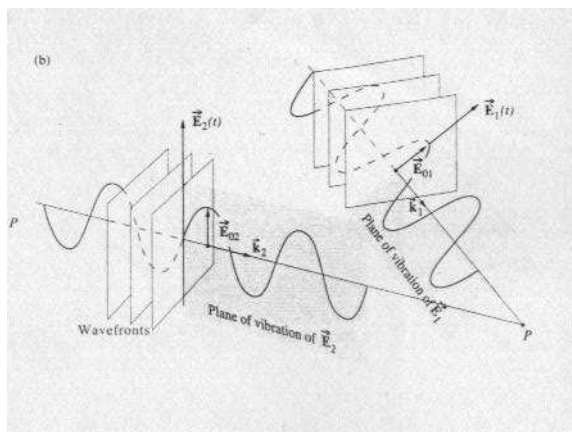
### ΟΠΤΙΚΗ ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η αναφορά σε γενικές έννοιες (συμβολή φωτός, δέσμη laser) οι οποίες σχετίζονται άμεσα με την τεχνική της ολογραφικής απεικόνισης αντικειμένων και αποτελούν το «θεωρητικό» υπόβαθρο για την κατανόηση του οπτικού φαινομένου.

### 2.1 ΣΥΜΒΟΛΗ ΦΩΤΟΣ <sup>24</sup>

#### 2.1.1 Έννοια – Δύο τρόποι συμβολής κυμάτων

Η συμβολή των κυμάτων φωτός είναι αποτέλεσμα της γραμμικής υπέρθεσης (επαλληλίας) δύο ή περισσότερων κυμάτων στο ίδιο σημείο. Πρόκειται για τη συμβολή των αντίστοιχων πεδίων από τα οποία αποτελούνται τα κύματα. Δύο κύματα φωτός μπορεί να συμβάλλουν ενισχυτικά ή καταστρεπτικά. Στην ενισχυτική συμβολή, το πλάτος του συνιστάμενου κύματος είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του κάθε συμβάλλοντος κύματος. Αντίθετα, στην καταστρεπτική συμβολή, το πλάτος του συνιστάμενου κύματος είναι μικρότερο.



Εικόνα 2.1.1 Συμβολή κυμάτων από δύο σημειακές πηγές [E.Hecht, Optics ].

#### 2.1.2 Συνθήκες συμβολής

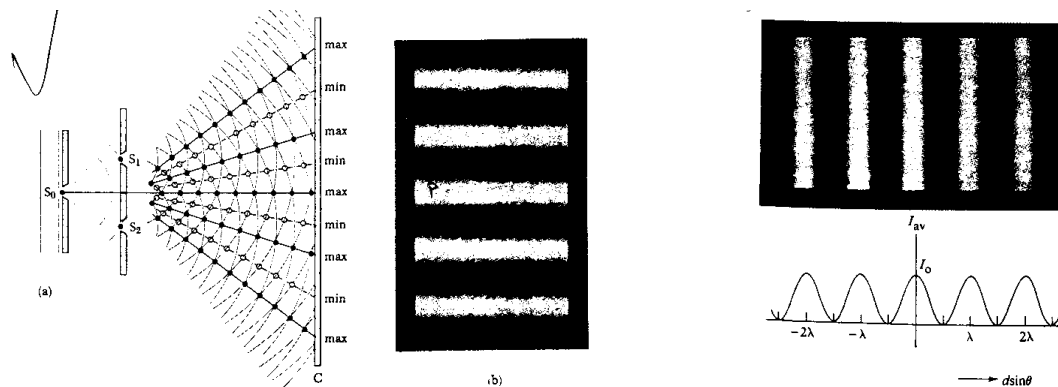
Τα φαινόμενα συμβολής του φωτός είναι δύσκολο να παρατηρηθούν, διότι το μήκος κύματος του ορατού φωτός είναι πάρα πολύ μικρό ( $4 \times 10^{-7} \text{ m}$  έως  $7 \times 10^{-7} \text{ m}$ ). Για να είναι δυνατή η παρατήρηση μιας στάσιμης συμβολής ορατού φωτός, πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένες συνθήκες.

1. Οι πηγές πρέπει να είναι σύμφωνες, να έχουν δηλαδή σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ τους.
2. Οι πηγές πρέπει να είναι μονοχρωματικές, να εκπέμπουν δηλαδή ένα μήκος κύματος φωτός (ίδιο και για τα δύο κύματα που υπερθέτονται).
3. Πρέπει να ισχύει η αρχή της γραμμικής επαλληλίας.

Ένας συνήθης τρόπος παραγωγής δύο σύμφωνων πηγών φωτός είναι ο εξής : με πηγή μονοχρωματικού φωτός φωτίζεται ένα πέτασμα, το οποίο έχει δύο μικρές οπές. Το φως που εξέρχεται από τις δύο οπές είναι σύμφωνο εφόσον προέρχεται από την ίδια πηγή. Οι σχισμές ουσιαστικά χωρίζουν την αρχική δέσμη σε δύο, επομένως οποιαδήποτε τυχαία μεταβολή της φωτεινής πηγής μεταβάλλει ταυτόχρονα τις δύο ξεχωριστές δέσμες. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η παρατήρηση στάσιμων εικόνων συμβολής.

### 2.1.3 Ενισχυτική – Καταστρεπτική συμβολή ( πείραμα Young )

Το φαινόμενο της συμβολής δύο φωτεινών κυμάτων μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί με την χρήση της πειραματικής διάταξης του *Young* (όπως περιγράφεται και στην προηγούμενη παράγραφο). Στο πείραμα αυτό, των δύο σχισμών, μία πηγή μονοχρωματικού φωτός φωτίζει δύο στενές σχισμές, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d$ . Οι σχισμές παίζουν το ρόλο ενός ζεύγους σύμφωνων πηγών φωτός, αφού τα κύματα που αναδύονται από αυτές προέρχονται από το ίδιο κυματικό μέτωπο (ισοφασική επιφάνεια) και η διαφορά φάσης είναι σταθερή. Μία οθόνη τοποθετείται σε απόσταση  $L$  από τις σχισμές και έτσι παρατηρείται μια εικόνα συμβολής, αποτελούμενη από φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς.

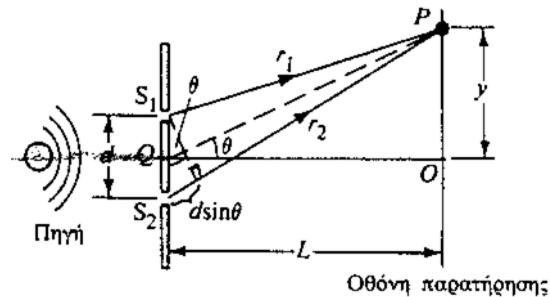


**Εικόνα 2.1.3** Πείραμα των δύο σχισμών Young : α) διάγραμμα πειράματος, β) κροσσοί συμβολής, γ) κατανομή έντασης [ Raymond A. Serway, Physics, 3<sup>rd</sup> Edition, 1990 ].

#### 2.1.3.1 Διαφορά διαδρομής

Η διαφορά  $\delta$  των δύο διαδρομών (από τις δύο σχισμές) ονομάζεται *διαφορά διαδρομής* και ισούται :  $\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$ , αφού το κύμα που αναδύεται από την μία σχισμή καλύπτει μεγαλύτερη διαδρομή από το κύμα της δεύτερης σχισμής. Αυτή

η διαφορά διαδρομής καθορίζει τη διαφορά φάσης ανάμεσα στις συμβάλλουσες ακτίνες σε ένα σημείο της οθόνης παρατήρησης (σημείο P).



Εικόνα 2.1.3.1 Γεωμετρική κατασκευή του πειράματος Young [Raymod A. Serway, Physics, 3<sup>rd</sup> Edition, 1990 ].

### 2.1.3.2 Ενισχυτική – Καταστροφική συμβολή

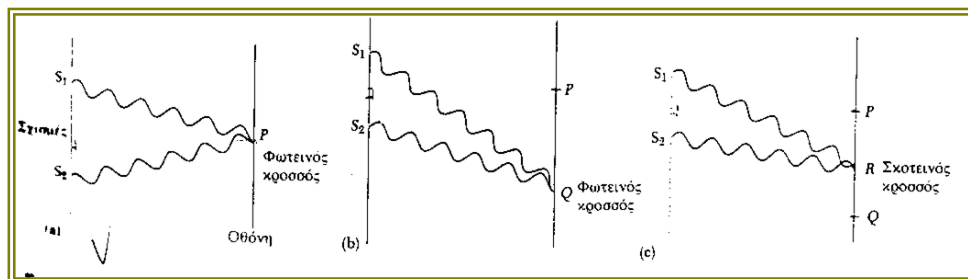
- Αν η διαφορά διαδρομής είναι μηδενική ή ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, τότε τα δύο κύματα βρίσκονται σε φάση και συμβάλλουν ενισχυτικά. Για να υπάρχουν επομένως φωτεινοί κροσσοί (στο σημείο P) πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη :

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

- Αν η διαφορά διαδρομής των δύο κυμάτων είναι περιττό πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος, τότε τα κύματα έχουν διαφορά φάσης  $180^\circ$  και συμβάλλουν καταστρεπτικά. Για να παρατηρηθούν σκοτεινοί κροσσοί (στο σημείο P) πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη :

$$\delta = d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

όπου  $m$  : ο αριθμός τάξης του κροσσού.



Εικόνα 2.1.3.2 Υπέρθυση κυμάτων : α,β) ενισχυτική συμβολή, γ) καταστρεπτική συμβολή [ Raymod A. Serway, Physics, 3<sup>rd</sup> Edition, 1990 ].



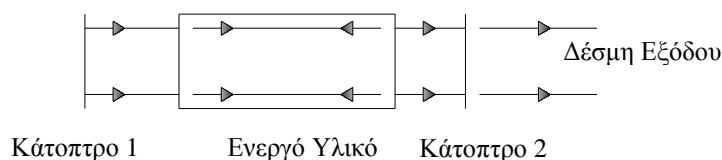
## 2.2 LASER <sup>7</sup>

### 2.2.1 Έννοια – Τρία βασικά φαινόμενα

Το laser αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης της κβαντικής ηλεκτρονικής. Η λέξη laser σημαίνει : ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Το laser παράγει ένα συνεχόμενο φως αποτελούμενο από φωτόνια του ίδιου μήκους κύματος και φάσης, με μεγάλη κατευθυντικότητα. Αυτό επιτρέπει στην ακτίνα φωτός να μην διαχέεται αλλά να εστιάζει σε ένα πολύ μικρού μεγέθους σημείο παρόμοιου με το μήκος κύματος του ίδιου του φωτός.

Εκμεταλλεύεται τρία βασικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος με ένα υλικό. Πρόκειται για την αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή καθώς και τη διεργασία της απορρόφησης.

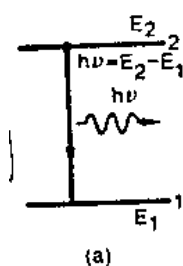
Μία σχηματική αναπαράσταση της διάταξης ενός laser φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.2.1 Laser : α) τυπική διάταξη laser [ E.Hecht, Optics, 4<sup>th</sup> Edition, 2002 ].

Ένα ενεργό υλικό τοποθετείται σε μια συντονιστική κοιλότητα, μεταξύ δύο κατόπτρων μεγάλης ανακλαστικότητας. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνεται η επιθυμητή ανάδραση. Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδιδόμενο σε διεύθυνση ορθογώνια προς τα κάτοπτρα πηγαиноέρχεται μεταξύ των δύο κατόπτρων. Σε κάθε διέλευση από το ενεργό υλικό, το κύμα αυτό ενισχύεται. Ένα από τα δύο κάτοπτρα είναι μερικά διαπερατό και έτσι μπορεί να εξαχθεί μία χρήσιμη δέσμη.

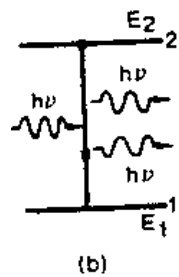
#### 2.2.1.1 Αυθόρμητη Εκπομπή



Η αυθόρμητη εκπομπή χαρακτηρίζεται από την εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας  $h\nu = E_2 - E_1$  (όπου  $\nu$ , η συχνότητα του ακτινοβολούμενου κύματος,  $h$ , η σταθερά του *Planck* και  $E_1$ ,  $E_2$  : οι ενέργειες στα ενεργειακά επίπεδα 1 και 2, με  $E_1 < E_2$ ), όταν το άτομο αποδιεγείρεται από το επίπεδο 2 στο επίπεδο 1. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται από το άτομο δεν έχει ορισμένη φασική σχέση με εκείνο που εκπέμπεται από άλλο άτομο και το κύμα μπορεί να εκπεμφθεί σε οποιαδήποτε διεύθυνση.

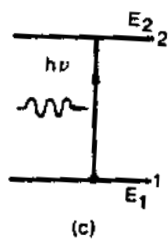


### 2.2.1.2 Εξαναγκασμένη Εκπομπή



Κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα (με συχνότητα ίση με εκείνη του αυθόρμητα εκπεμπόμενου κύματος) εξαναγκάζει το άτομο να υποστεί μετάπτωση από το ενεργειακό επίπεδο 2 στο επίπεδο 1. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται εξαιτίας της ενεργειακής διαφοράς ( $E_2 - E_1$ ) προστίθεται στο προσπίπτον κύμα. Συνεπώς, η εκπομπή κάθε ατόμου είναι σε φάση με το προσπίπτον κύμα και το κύμα αυτό καθορίζει τη διεύθυνση του εκπεμπόμενου κύματος.

### 2.2.1.3 Απορρόφηση



Κατά τη διεργασία της απορρόφησης, εφαρμόζεται στο άτομο ένα εξωτερικό ερέθισμα (ηλεκτρομαγνητικό κύμα) με αποτέλεσμα την μετάπτωση του ατόμου στο επίπεδο 2, λόγω ενεργειακής διαφοράς ( $E_2 - E_1$ ), η οποία προκύπτει από την παρεχόμενη ενέργεια του προσπίπτοντος κύματος.

## 2.2.2 Ιδιότητες των δεσμών laser

Βασικά χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας laser είναι η μονοχρωματικότητα, η συμφωνία, η κατευθυντικότητα και η λαμπρότητα.

### Μονοχρωματικότητα

Η μονοχρωματικότητα στηρίζεται στο γεγονός ότι ένα μόνο ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να ενισχυθεί κατά την εκπομπή ακτινοβολίας. Η δέσμη laser δηλαδή, μπορεί να έχει μόνο ένα μήκος κύματος.

### Συμφωνία

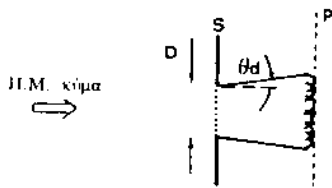
Για κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, η ιδιότητα αυτή διακρίνεται σε α) χωρική και β) χρονική συμφωνία.

α) Η διαφορά μεταξύ των φάσεων των ηλεκτρικών πεδίων δύο συγκεκριμένων σημείων, τα οποία βρίσκονται στο ίδιο κυματομέτωπο ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, όταν διατηρείται ίση με το μηδέν για κάθε χρονική στιγμή, φέρνει τα σημεία αυτά σε μια τέλεια συμφωνία. Αν η παραπάνω κατάσταση υφίσταται για κάθε δύο σημεία του ηλεκτρομαγνητικού κυματομέτρου τότε το κύμα παρουσιάζει ιδανική χωρική συμφωνία. Στην πράξη όμως, είναι απαραίτητη η εισαγωγή μιας κατάλληλα ορισμένης περιοχής συμφωνίας για κάθε σημείο, έτσι ώστε να διατηρείται ένας καλός φασικός συσχετισμός (μερική χωρική συμφωνία).

β) Αν για δεδομένη χρονική υστέρηση  $\tau$  η διαφορά φάσης μεταξύ δύο τιμών του ηλεκτρικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, σε δεδομένο σημείο, παραμένει ίδια για κάθε χρονική στιγμή  $t$  τότε υπάρχει μια χρονική συμφωνία για το χρονικό διάστημα  $t$ . Αν το παραπάνω συμβαίνει για οποιαδήποτε τιμή του  $\tau$ , το ηλεκτρομαγνητικό κύμα θα παρουσιάζει τέλεια χρονική συμφωνία. Αν η χρονική υστέρηση είναι τέτοια ώστε να ισχύει  $0 < \tau < \tau_0$ , τότε το κύμα παρουσιάζει μερική χρονική συμφωνία με χρόνο συμφωνίας  $\tau_0$  και εύρος ζώνης  $\Delta\nu \approx 1/\tau_0$ .

Η χωρική και χρονική συμφωνία αποτελούν δύο έννοιες ανεξάρτητες μεταξύ τους.

### Κατευθυντικότητα



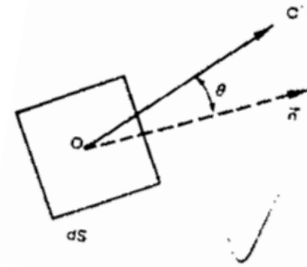
Οι δέσμες laser χαρακτηρίζονται από υψηλή κατευθυντικότητα εφόσον η ακτίνα φωτός δεν διαχέεται αλλά μπορεί και εστιάζει σε ένα πολύ μικρού μεγέθους σημείο παρόμοιο με το μήκος κύματος του ίδιου του φωτός. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ίδιου μήκους κύματος και φάσης των φωτονίων, από τα οποία αποτελείται το συνεχόμενο φως του laser.

### Λαμπρότητα

Η λαμπρότητα μιας δεδομένης πηγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ορίζεται ως η ισχύς που εκπέμπει ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα στερεάς γωνίας. Συγκεκριμένα, για την ισχύ  $dP$  που εκπέμπεται από ένα στοιχείο επιφάνειας  $dS$  μέσα στη στερεά γωνία  $d\Omega$  γύρω από τη διεύθυνση  $OO'$  ισχύει :

$$dP = B \cos \theta dS d\Omega$$

όπου  $\theta$  η γωνία μεταξύ  $OO'$  και της καθέτου  $n$  πάνω στην επιφάνεια. Η ποσότητα  $B$  ονομάζεται λαμπρότητα της πηγής στο σημείο  $O$  και εξαρτάται από τις πολικές συντεταγμένες ( $\theta$  και  $\varphi$ ) της διεύθυνσης  $OO'$  και από το σημείο  $O$ . Όταν το  $B$  είναι ανεξάρτητο των πολικών συντεταγμένων, η πηγή καλείται ισότροπη (πηγή Lambert).



## 2.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε όλες τις συμβατικές τεχνικές απεικόνισης, όπως η φωτογραφία, μία τρισδιάστατη εικόνα καταγράφεται σε φωτοευαίσθητη επιφάνεια μέσω φακών ή μίας σχισμής σε αδιαφανή οθόνη. Αυτό που καταγράφεται είναι μόνο η κατανομή της έντασης, ενώ κάθε πληροφορία για τις σχετικές φάσεις των κυμάτων φωτός από διαφορετικά σημεία ή αλλιώς για τους σχετικούς οπτικούς δρόμους σε διαφορετικά μέρη της εικόνας, έχει χαθεί.

### 2.3.1 ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ – Αρχή ολογραφικής απεικόνισης <sup>4</sup>

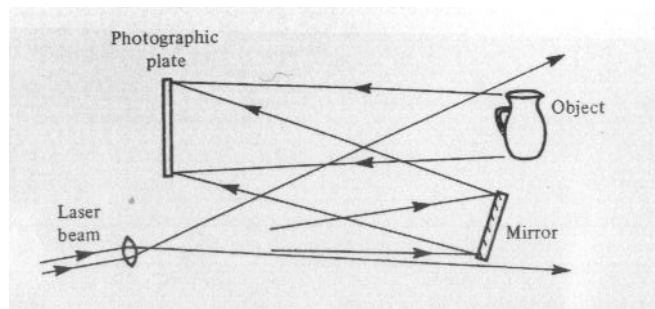
Οι ρίζες της ολογραφικής απεικόνισης ανιχνεύονται στη δουλειά των Wolfke (1920) και Bragg (1939, 1932) στην κρυσταλλογραφία με ακτίνες X, η οποία οδήγησε στην εμφάνιση του Bragg X-ray μικροσκοπίου.

Ο Gabor (1948, 1949, 1951) πρότεινε την ιδέα της ολογραφικής απεικόνισης με σκοπό να εξασφαλίσει βελτίωση της διακριτικής ικανότητας των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων. Η λέξη ολογραφία προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις «όλος» και «γραφή». Η ολογραφία, σαν τεχνική καταγραφής και αναπαραγωγής εικόνων τριών

διαστάσεων, έχει μέχρι σήμερα μεγάλη επιτυχία στον τομέα της τέχνης και σε επιστημονικές εφαρμογές.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ολογραφικής τεχνικής αποτελεί η καταγραφή του ολοκληρωμένου πεδίου κύματος, δηλαδή της φάσης και της έντασης των κυμάτων φωτός που διασκορπίζονται από ένα αντικείμενο. Κρίνεται απαραίτητη η μετατροπή της φασικής πληροφορίας σε μεταβολές έντασης.

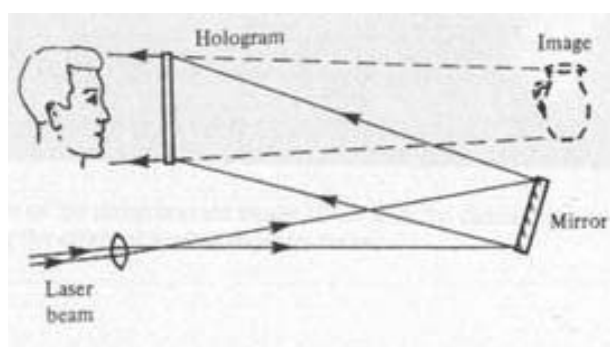
Αυτό πραγματοποιείται με χρήση συμφώνου μήκους κύματος φωτισμού για την καταγραφή σε φωτογραφική πλάκα ενός κύματος αναφοράς μαζί με το κύμα που διασκορπίζεται από το αντικείμενο προς ολογράφηση.



**Εικόνα 2.3.1α** Παραγωγή ολογράμματος [ P.Hariharan, Optical Holography, Second Edition ]

Κατά συνέπεια αυτό που καταγράφεται στην φωτογραφική πλάκα είναι η *συμβολή* των δύο κυμάτων. Η ένταση σε κάθε σημείο της προκύπτουσας εικόνας συμβολής εξαρτάται τόσο από τη φάση όσο και από το πλάτος του κύματος του αυθεντικού αντικειμένου. Έτσι η τελική εικόνα που προκύπτει στην φωτογραφική πλάκα και ονομάζεται *ολόγραμμα* περιέχει πληροφορίες φάσης και πλάτους του κύματος του αντικειμένου. Ωστόσο, η πληροφορία αυτή βρίσκεται σε κωδικοποιημένη μορφή και το ολόγραμμα δε φέρει καμία ομοιότητα με το αντικείμενο.

Η επιτυχία της ολογραφικής απεικόνισης οφείλεται στο γεγονός ότι το κύμα αντικειμένου μπορεί να αναπαραχθεί από το ολόγραμμα απλά φωτίζοντάς το με το κύμα αναφοράς.

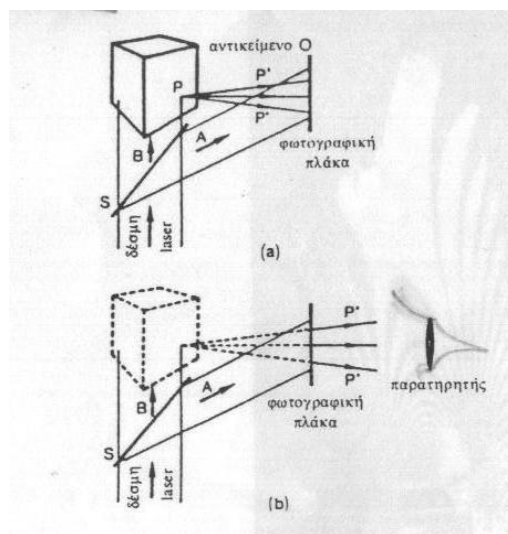


**Εικόνα 2.3.1β** Ανακατασκευή από το ολόγραμμα [P.Hariharan, Optical Holography, Second Edition ]

Το ανακατασκευασμένο κύμα δε διαφέρει από το αυθεντικό κύμα αντικειμένου και διαθέτει όλα τα φυσικά εφέ, προοπτικής και βάθους εστίασης που θα επιδείκνυε το αντικείμενο αν βρισκόταν ακόμη εκεί.

### 2.3.1.1 Παραγωγή Ολογράμματος

Μία δέσμη laser χωρίζεται μέσω ενός μερικά διαπερατού κατόπτρου σε δύο δέσμες, μία ανακλώμενη (Α δέσμη αναφοράς) και μία διαδιδόμενη (Β δέσμη αντικειμένου). Η πρώτη πέφτει πάνω στην φωτογραφική πλάκα ενώ η δεύτερη φωτίζει το αντικείμενο που πρόκειται να υποστεί την ολογράφηση. Ένα μέρος του σκεδασμένου φωτός από το αντικείμενο πέφτει επίσης πάνω στην φωτογραφική πλάκα. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένα διάγραμμα συμβολής στην φωτογραφική πλάκα, σαν αποτέλεσμα της συμφωνίας της δέσμης λόγω της αλληλοεπικάλυψης των δύο δεσμών. Οι κροσσοί συμβολής που εμφανίζονται πάνω στην φωτογραφική πλάκα περιέχουν ένα πλήρες αρχείο του αρχικού αντικειμένου (συνήθως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών φωτεινών κροσσών είναι περίπου 1μm), γεγονός που παρατηρείται κάτω από μεγάλη μεγέθυνση.



**Εικόνα 2.3.1<sub>1</sub>** Αρχή ολογραφίας α) παραγωγή ολογράμματος, β) ανακατασκευή από το ολόγραμμα  
[ Orazio Svelto and David C.Hanna, Principles of Lasers, 4<sup>th</sup> Edition ]

Οι κροσσοί περιέχουν πληροφορία τόσο για τη φάση (ως χωρική πληροφορία) όσο και για το πλάτος (ως διαμόρφωση των κροσσών).

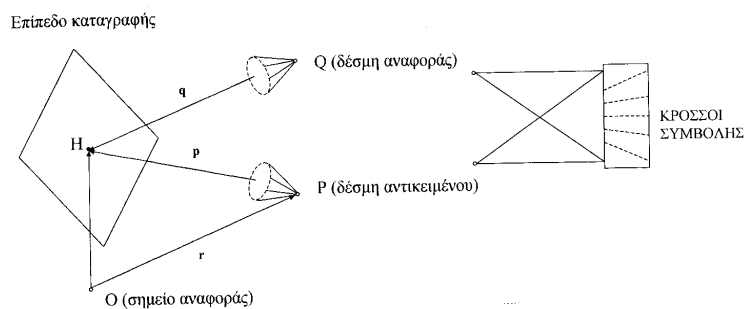
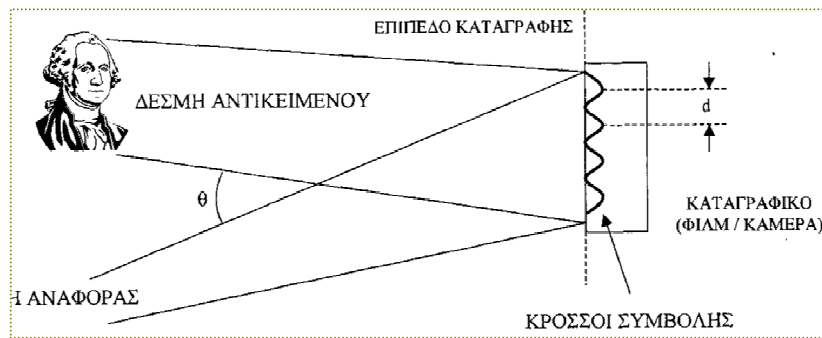
Η απόσταση μεταξύ δύο μεγίστων τιμών των κροσσών συμβολής είναι :

$$2d \sin \theta = \lambda \Leftrightarrow d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

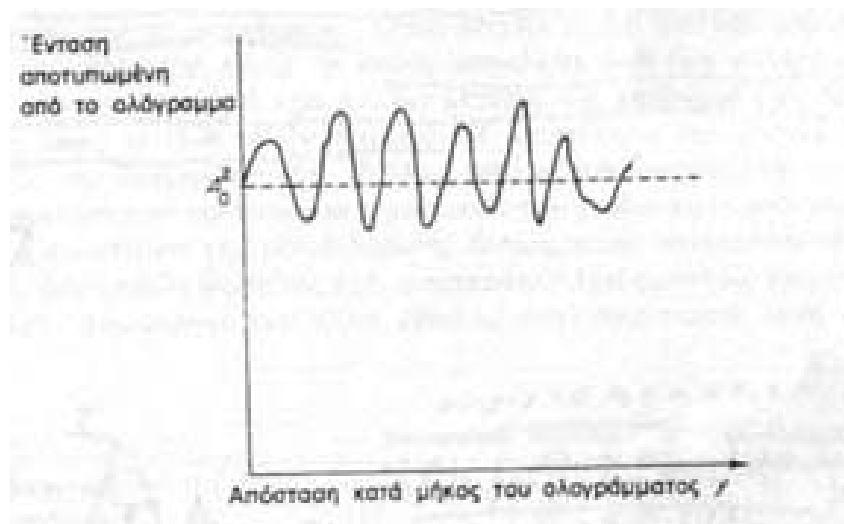
όπου :  $\lambda$  το μήκος κύματος

$\theta$  η γωνία μεταξύ δέσμης αναφοράς και δέσμης αντικειμένου.

- Για  $\theta = 0^\circ$  σχηματίζεται μόνο ένας κροσσός (φωτεινός ή σκοτεινός)
- Η γωνία  $\theta$  και η απόσταση μεταξύ των κροσσών συμβολής είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη.



**Εικόνα 2.3.1<sub>2</sub>** Διάταξη ολογραφικής απεικόνισης [ Σεμινάριο 7<sup>ο</sup> εξαμήνου, Ανάλυση και επεξεργασία ολογραφημάτων για την απεικόνιση δονήσεων με το λογισμικό Fringe Processor ].



**Εικόνα 2.3.1<sub>3</sub>** Ολική ένταση αποτυπωμένη σαν συνάρτηση του  $y$  (απόσταση κατά μήκος του ολογράμματος) από την ολογραφική πλάκα. Η ένταση της απευθείας αναφοράς  $A_0^2$  διαμορφώνεται από τις πληροφορίες που περιέχονται στο σκεδαζόμενο μέτωπο κύματος. Αυτό εμφανίζεται με τη μορφή μεταβολών της έντασης μίας εικόνας συμβολής [ Η. J. Pain, «Φυσική των ταλαντώσεων και των κυμάτων», 3<sup>η</sup> Έκδοση ].

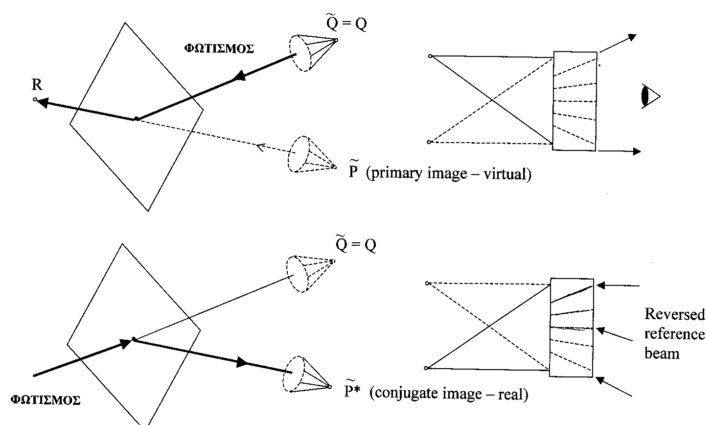
Η ένταση που καταγράφει η ολογραφική πλάκα <sup>9</sup> κατά την παραγωγή ενός ολογράμματος φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (εικόνα 2.3.1<sub>3</sub>). Η ένταση αναφοράς ( $A_0^2$ ) διαμορφώνεται από το αρχικό πλάτος σκέδασης ( $A(y)$ ) και την πληροφορία για τη φάση ( $\varphi(y)$ ). Η διαμόρφωση αυτή εμφανίζεται με τη μορφή φωτεινών και σκοτεινών κροσσών συμβολής, η τοπική ένταση των οποίων εξαρτάται από το πλάτος  $A(y)$ , ενώ η κατανομή τους πάνω στον άξονα των  $y$  καθορίζεται από τη φάση  $\varphi(y)$ .

### 2.3.1.2 Ανακατασκευή από το Ολόγραμμα <sup>6-24</sup>

Με την απομάκρυνση του αντικείμενου (εικόνα 2.3.1<sub>2</sub>), η δέσμη αναφοράς αλληλεπιδρά με τους κροσσούς συμβολής πάνω στην φωτογραφική πλάκα και αναπαράγει μία περιθλαστική δέσμη πέρα από την πλάκα, ίδια με αυτήν που αρχικά σκεδάστηκε από το αντικείμενο ( $P'$ , εικόνα 2.3.1<sub>1</sub>). Ένας παρατηρητής μπορεί να δει το αντικείμενο πέρα από την πλάκα, σαν αυτό να υπάρχει ακόμη εκεί (αναπαραγόμενο αντικείμενο τριών διαστάσεων, εικόνα 2.3.1<sub>2</sub>).

Η διαδικασία της ανακατασκευής διακρίνεται σε δύο ειδικές περιπτώσεις :

α ) η δέσμη ανακατασκευής είναι ταυτόσημη με τη δέσμη αναφοράς (φωτισμός με δέσμη αναφοράς) και β) η δέσμη ανακατασκευής είναι ταυτόσημη με το συζυγές της δέσμης αναφοράς (φωτισμός με συζυγές δέσμης αναφοράς).



**Εικόνα 2.3.1.2** Ανακατασκευή από το ολόγραμμα [ Σεμινάριο 7<sup>ου</sup> εξαμήνου, Ανάλυση και επεξεργασία ολογραφημάτων για την απεικόνιση δονήσεων με το λογισμικό Fringe Processor ].

### Προϋποθέσεις για την κατασκευή ολογράμματος :

1. Ο βαθμός συμφωνίας της δέσμης laser πρέπει να είναι επαρκής για το σχηματισμό των κροσσών συμβολής στην φωτογραφική πλάκα.
2. Οι σχετικές θέσεις αντικείμενου, πλάκας και δέσμης laser δεν πρέπει να αλλάζουν κατά τη διάρκεια της έκθεσης της πλάκας γι' αυτό χρησιμοποιείται μια βάση απαλλαγμένη από δονήσεις (μπορούν να αλλάξουν μόνο κατά λιγότερο από το μισό μήκος κύματος του laser προς αποφυγή αμαυρώματος της συμβολής).

3. Η φωτογραφική πλάκα πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη διακριτική ικανότητα (απαιτούνται φιλμ με διακριτική ικανότητα τουλάχιστον 2000 γραμμών / mm για καταγραφή των κροσσών συμβολής).

**Περιγραφή ολογραφικής απεικόνισης μέσω βασικών εξισώσεων μετατόπισης κυμάτων (ίδιου πλάτους  $u_0$ )**<sup>6</sup>

Έστω  $U = u_0 \sin(2\pi f t + \varphi)$ , η μετατόπιση του κύματος που φωτίζει το αντικείμενο και  $U(r)$  η συνάρτηση που περιγράφει το μιγαδικό πλάτος φωτός που σκεδάζεται από μία επιφάνεια σε σημείο της  $r$ .

Το κυματομέτωπο φωτός  $U(r)$ , μονοχρωματικού και επίπεδου κύματος ( $z = 0$ ), έχει πλάτος  $U(x, y, 0)$  και δίνεται από τη σχέση :

$$U(x, y, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u_0(f_x, f_y) \exp[2\pi i(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (1.0)$$

όπου  $\lambda f_{x,y} = n_{x,y}$  συνημίτονα κατεύθυνσης των μεμονωμένων επίπεδων κυμάτων.

Το μιγαδικό πλάτος του επίπεδου κυματομέτρου που ορίζεται ως δέσμη αναφοράς και συμβάλλει με κάθε ένα από τα επίπεδα κύματα της εξίσωσης (1.0) δίνεται από τη σχέση :

$$U_r(x, y, 0) = u_r \exp \frac{2\pi i}{\lambda} (n_r r) \quad (1.1)$$

Όλα τα επίπεδα κυματομέτωπα που περιγράφονται από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να ανακατασκευαστούν αν το κύμα αναφοράς φωτίσει το ήδη καταγεγραμμένο ολόγραμμα.

Η συνολική ένταση του ολογράμματος δίνεται από τη σχέση:

$$I \propto U_0 U_0^* + U_r U_r^* + U_0 U_r^* + U_0^* U_r \quad (1.2)$$

με  $U_0$  και  $U_r$  τα πλάτη της δέσμης αντικειμένου και αναφοράς αντίστοιχα.

Η μετάδοση του επίπεδου ολογραφήματος δίνεται από τη σχέση :

$$t = 1 - \alpha I = 1 - \alpha [U_0 U_0^* + U_r U_r^* + U_0 U_r^* + U_0^* U_r] \quad (1.3)$$

όπου  $\alpha$ , σταθερά που καθορίζεται από την καταγραφή και την επεξεργασία.

Το μεταδιδόμενο πλάτος κατά την ανακατασκευή από το ολόγραμμα δίνεται από την εξίσωση :

$$U_T = U_r - \alpha [U_0 U_0^* U_r + U_r U_r^* U_r + U_0 U_r^* U_r + U_0^* U_r U_r] \quad (1.4)$$

Η ανακατασκευή του  $U_0$  παρουσιάζεται στον τέταρτο όρο της παραπάνω εξίσωσης, όπου  $U_0^* U_r U_r = |U_r|^2 U_0^*$  με  $U_r = u_r \exp i\phi_0$ .

## 2.4 Ολογραφική Συμβολομετρία <sup>4-6-24</sup>

Η ολογραφική συμβολομετρία είναι μία τεχνική που βασίζεται στην ολογραφία. Χρησιμοποιείται σε επιστημονικές εφαρμογές σαν μέσο καταγραφής και μέτρησης τάσεων και ταλαντώσεων αντικειμένων τριών διαστάσεων. Η παραπάνω τεχνική καθιστά δυνατή τη μελέτη αλλαγών στο αντικείμενο, όπως παραμόρφωση από πίεση, δόνηση, αλλαγές λόγω θερμοκρασίας.

Κατά την ολογραφική συμβολομετρία καταγράφονται δύο (ή περισσότερα) ολογράμματα ενός μεταβαλλόμενου αντικειμένου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Κατά την ανακατασκευή, δύο ανακατασκευασμένα κύματα ανακατασκευάζονται ταυτόχρονα και επομένως συμβάλλουν, παρόλο που αρχικά καταγράφηκαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

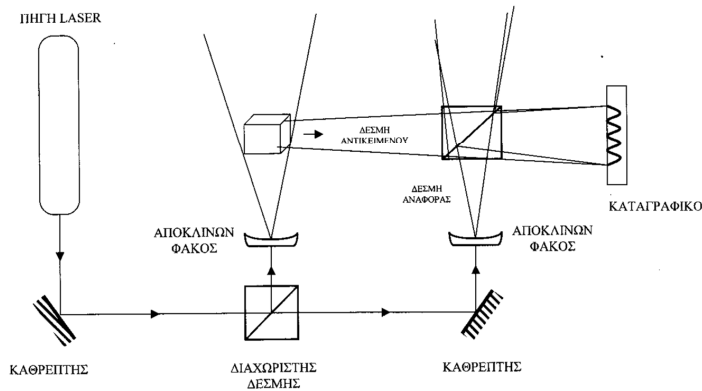
Μπορούμε να εξηγήσουμε την αρχή της ολογραφικής συμβολομετρίας βάση της εικόνας 2.3.1.1β. Υποθέτουμε ότι το αντικείμενο τοποθετείται στην αρχική του θέση. Ο παρατηρητής τότε θα δει δύο δέσμες : τη δέσμη P' που περιθλάται από το ολόγραμμα και τη δέσμη που σκεδάζεται από το αντικείμενο, ως αποτέλεσμα του φωτισμού του αντικειμένου από τη δέσμη B του laser, η οποία μερικώς διαπερνά τη φωτογραφική πλάκα. Εάν το αντικείμενο υποστεί κάποια παραμόρφωση από το αρχικό του σχήμα, ο παρατηρητής βλέπει να εμφανίζονται κροσσοί πάνω στο αντικείμενο λόγω της συμβολής των δύο παραπάνω δεσμών. Οι κροσσοί εμφανίζουν κύκλους της ίδιας μετατόπισης από το αντικείμενο κατά μήκος της διεύθυνσης παρατήρησης. Η διαφορά στην τιμή της μετατόπισης για δύο γειτονικούς κροσσούς είναι το μισό του μήκους κύματος του laser που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία της αναπαραγωγής (για χρήση ορατού laser He-Ne, η διαφορά είναι  $\approx 0.3\mu\text{m}$ ). Η τεχνική αυτή ονομάζεται ολογραφική συμβολομετρία γιατί η μέτρηση της μετατόπισης γίνεται με συμβολή δύο ακτίνων, από τις οποίες η μία τουλάχιστον δημιουργείται από το ολόγραμμα.

Η τεχνική της ολογραφικής συμβολομετρίας έχει πολλές παραλλαγές, ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής των ολογραμμάτων. Η τεχνική που περιγράφεται παραπάνω είναι μία από τις λιγότερο χρησιμοποιούμενες τεχνικές και ονομάζεται *ολογραφική συμβολομετρία αληθινού χρόνου*. Η *στατική, διπλής έκθεσης ολογραφική συμβολομετρία* και η *δυναμική, χρονικά ολοκληρωμένη ολογραφική συμβολομετρία* αποτελούν μεθόδους που χρησιμοποιούνται περισσότερο.

Οι εφαρμογές της ολογραφικής συμβολομετρίας είναι πολυάριθμες και καλύπτουν ποικιλία πεδίων, από μετρήσεις τάσεων και ταλαντώσεων μέχρι την ανίχνευση ατελειών σε υλικά και την αποτύπωση κατανομής ιδιοτήτων αντικειμένων.



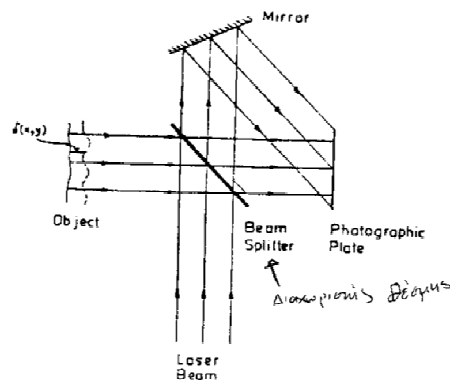
## ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΤΥΠΙΚΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ



**Εικόνα 2.4** Τυπική πειραματική διάταξη ολογραφικής συμβολομετρίας [ Σεμινάριο 7<sup>οο</sup> εξαμήνου, Ανάλυση και επεξεργασία ολογραφημάτων για την απεικόνιση δονήσεων με το λογισμικό Fringe Processor ].

### 2.4.1 Στατική – Διπλής Έκθεσης Ολογραφική Συμβολομετρία

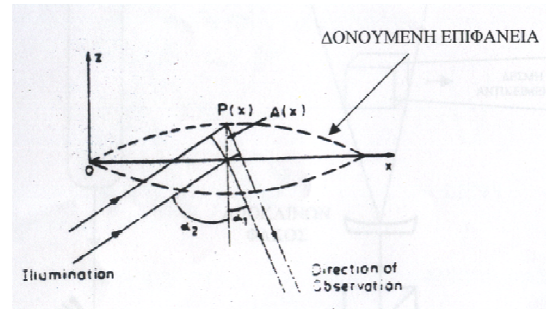
Κατά την ολογραφική συμβολομετρία διπλής έκθεσης πραγματοποιείται συμβολή μεταξύ των κυματομετώπων που έχουν ανακατασκευαστεί από δύο ολογράμματα του αντικειμένου που καταγράφηκαν στην ίδια φωτογραφική πλάκα. Το πρώτο ολόγραμμα καταγράφεται με το αντικείμενο στην αρχική, χωρίς παραμόρφωση κατάσταση του και το δεύτερο λαμβάνεται με το αντικείμενο υπό παραμόρφωση. Το αντικείμενο απομακρύνεται (εικόνα 2.3.1<sub>β</sub>) και το επεξεργασμένο ολόγραμμα φωτίζεται με τη δέσμη αναφοράς οπότε ανακατασκευάζονται και οι δύο εικόνες, πριν και μετά την παραμόρφωση του αντικειμένου αφού η πλάκα φέρει και τα αντίστοιχα διαγράμματα συμβολής. Το διάγραμμα συμβολής που προκύπτει αποκαλύπτει τις αλλαγές στο σχήμα του αντικειμένου μεταξύ των δύο εκθέσεων.



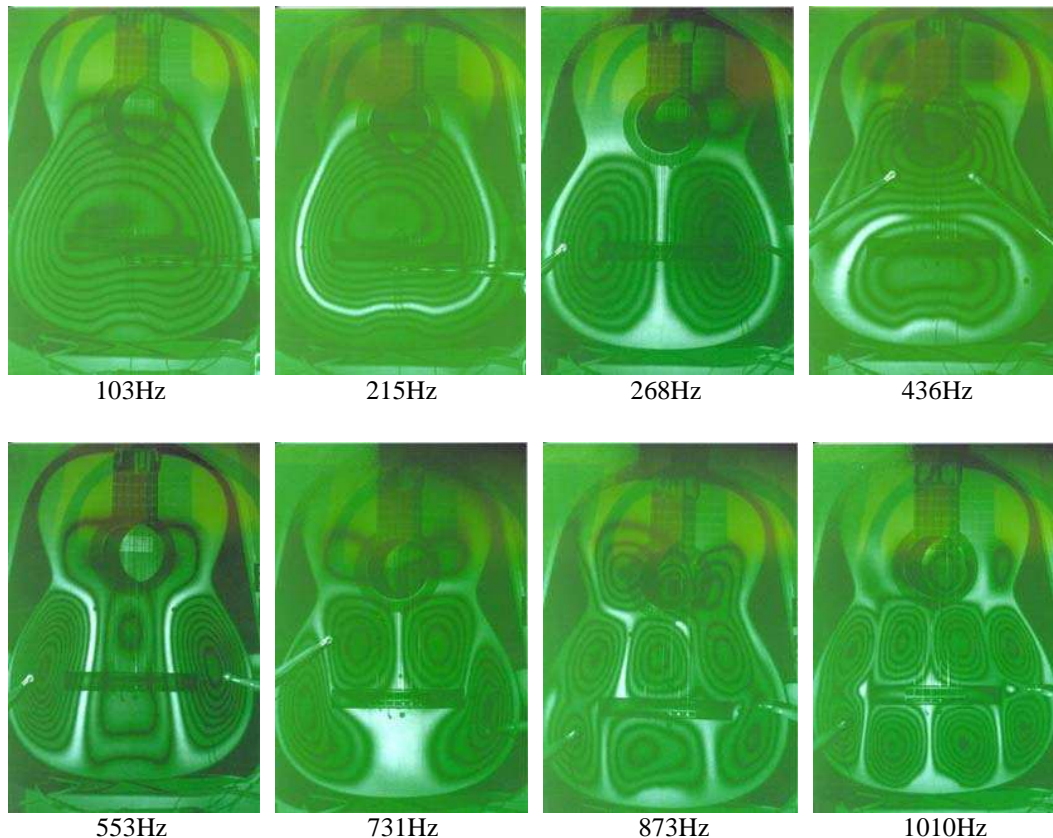
## 2.4.2 Δυναμική – Χρονικά Ολοκληρωμένη Ολογραφική Συμβολομετρία

Η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη για ταλαντούμενα αντικείμενα (μικρού πλάτους ταλαντώσεις). Αποτελεί επέκταση της τεχνικής διπλής έκθεσης σε μεγάλο αριθμό ολογραμμάτων.

Στην χρονικά ολοκληρωμένη ολογραφική συμβολομετρία παίρνουμε ένα μόνο ολόγραμμα αλλά με χρόνο έκθεσης μεγαλύτερο από την περίοδο ταλάντωσης. Στο ίδιο ολόγραμμα καταγράφεται μια συνεχής σειρά εικόνων που αντιστοιχούν σε όλες τις θέσεις του αντικειμένου κατά την ταλάντωση και επομένως το προκύπτον ολόγραμμα μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση εικόνων, με την εμφάνιση ενός στάσιμου κύματος. Οι σκοτεινοί κροσσοί υποδηλώνουν μέγιστο πλάτος ταλάντωσης (κοιλίες) ενώ οι φωτεινοί κροσσοί, ελάχιστο πλάτος ταλάντωσης (δεσμοί – κομβικές περιοχές).



Το παρακάτω σχήμα δείχνει το αποτύπωμα κροσσών που παρατηρείται σε ταλαντούμενη κιθάρα καθώς και την εξάρτησή τους από τη συχνότητα ταλάντωσης.



**Εικόνα 2.4.2** Ανακατασκευή μέσω της τεχνικής χρονικού μέσου όρου μιας κλασικής κιθάρας υπό δόνηση [22].

Για τον υπολογισμό των ρυθμών ταλάντωσης, από τις φωτογραφίες, θα περίμενε κανείς να βρει ένα φωτεινό κροσσό που αντιστοιχεί στα ακίνητα σημεία (στους κόμβους ταλάντωσης). Για κάθε ταλαντούμενο σημείο, το ανακατασκευασμένο είδωλο του σημείου αυτού αποτελείται από ένα σταθμισμένο μέσο όρο της συμβολής μεταξύ των ειδώλων αυτού του σημείου κατά την περίοδο της ταλάντωσης. Το βάρος είναι μέγιστο για τα είδωλα που αντιστοιχούν στο σημείο του μέγιστου της μετατόπισης του (όπου το σημείο παραμένει περισσότερο χρόνο). Οι φωτεινοί κροσσοί (χαμηλότερης έντασης) θα παρατηρηθούν στα σημεία για τα οποία η διαφορά μετατόπισης μεταξύ των άκρων της ταλάντωσης (κατά μήκος της διεύθυνσης παρατήρησης) είναι ίση προς έναν ακέραιο αριθμό μηκών κύματος.

#### 2.4.2.1 Περιγραφή χρονικά ολοκληρωμένης τεχνικής ολογραφικής συμβολομετρίας<sup>5</sup>

Υποθέτουμε ότι ένα επίπεδο αντικείμενο δονείται περιοδικά γύρω από μία θέση ισορροπίας. Η μετατόπιση του αντικειμένου δίνεται από τη σχέση :

$$d_1(t) = a_0 \cos \omega t \quad (1.5)$$

όπου  $a_0$  το πλάτος ταλάντωσης και  $f = \frac{2\pi}{\omega}$  η συχνότητα ταλάντωσης.

Κατά την ολογραφική καταγραφή του αντικειμένου, το σκεδασμένο φως από το αντικείμενο για χρονική διάρκεια  $t$  είναι :

$$U_s(t) = U_s \exp i \left[ \frac{4\pi a_0 (\cos \omega t)}{\lambda} \right] \quad (1.6)$$

όπου  $U_s = u_s \exp i \phi_s$  και  $U_r = u_r \exp i \phi_r$ , τα μιγαδικά πλάτη του σκεδασμένου φωτός από το αντικείμενο όταν αυτό είναι ακίνητο και της δέσμης αναφοράς αντίστοιχα.

Η ένταση του ολογράμματος για χρονική διάρκεια  $t$  δίνεται από τη σχέση :

$$\begin{aligned} I(t) &\propto U_r U_r^* + U_s(t) U_s^*(t) + U_s(t) U_r^* + U_s^*(t) U_r = \\ &= u_r^2 + u_s^2 + U_r^* U_s \exp i \frac{4\pi a_0 (\cos \omega t)}{\lambda} + U_r U_s^* \exp -i \frac{4\pi a_0 (\cos \omega t)}{\lambda} \end{aligned} \quad (1.7)$$

Ο χρόνος έκθεσης του ολογράμματος είναι μεγαλύτερος από μία περίοδο δόνησης ( $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ) επομένως η πραγματική ένταση που καταγράφεται δίνεται από το μέσο όρο  $\langle I \rangle$  του  $I(t)$  για χρόνο μεγαλύτερο μίας περιόδου :

$$\langle I \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt \propto u_r^2 + u_s^2 + \frac{U_r^* U_s}{T} \int_0^T \exp i \left[ \frac{4\pi a_0 (\cos \omega t)}{\lambda} \right] dt + \frac{U_r U_s^*}{T} \int_0^T \exp -i \left[ \frac{4\pi a_0 (\cos \omega t)}{\lambda} \right] dt \quad (1.8)$$

Ο τρίτος όρος της παραπάνω εξίσωσης περιγράφει την ανακατασκευασμένη εικόνα από το ολόγραμμα και ισχύει :

$$\int_0^T \exp i \left[ \frac{4\pi\alpha_0 (\cos \omega t)}{\lambda} \right] dt = \frac{1}{\omega} \int_0^{2\pi} \exp i \left[ \frac{4\pi\alpha_0 (\cos \omega t)}{\lambda} \right] d(\omega t) = \frac{2\pi}{\omega} J_0 \left( \frac{4\pi\alpha_0}{\lambda} \right) \quad (1.9)$$

εφόσον  $\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp i(x \cos a) da = J_0(x)$ , το μηδενικό όρισμα της συνάρτησης Bessel.

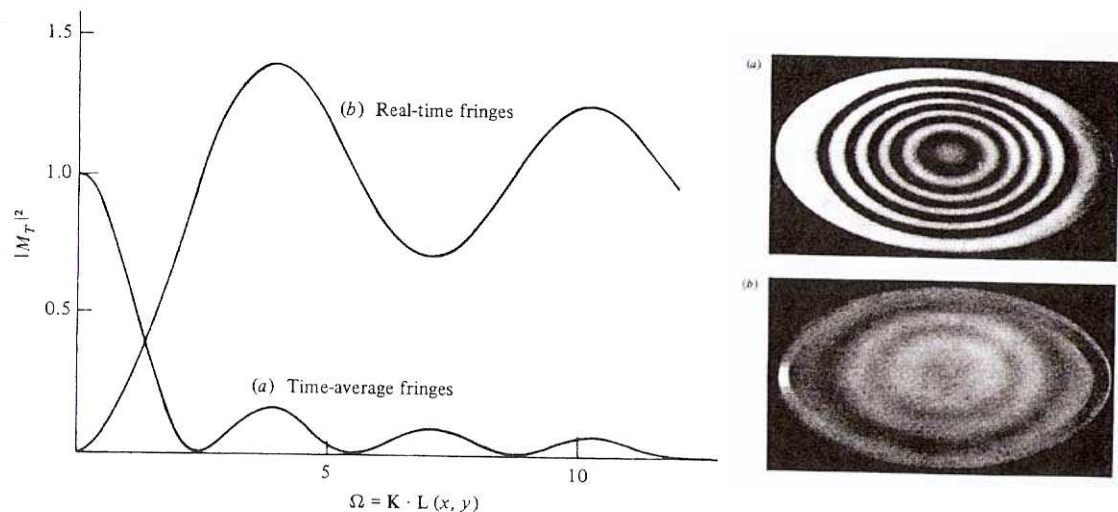
Όταν η δέσμη αναφοράς φωτίσει ξανά το ολόγραμμα, το εικονικό ανακατασκευασμένο κυματομέτωπο δίνεται από τη σχέση :

$$U_{rec} = U_r^2 U_s J_0 \left( \frac{4\pi\alpha_0}{\lambda} \right) \quad (1.10)$$

όπου  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , με ένταση ανάλογη του :

$$U_{rec} U_{rec}^* = k J_0^2 \left( \frac{4\pi\alpha_0}{\lambda} \right) \quad (1.11)$$

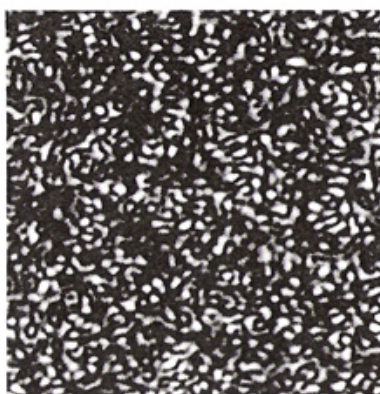
όπου  $k$  μία σταθερά και  $J_0$  η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης.



**Εικόνα 2.4.2.1** Χαρακτηριστικές συναρτήσεις για ένα δονούμενο αντικείμενο, η μετατόπιση του οποίου μεταβάλλεται ημιτονικά με τον χρόνο (αριστερά) και αντίστοιχα σχέδια κροσσών αντικειμένου : α) κροσσοί χρονικά-ολοκληρωμένης τεχνικής, β) κροσσοί αληθινού-χρόνου [ P.Hariharan, Optical Holography, Second Edition ].

## 2.5 Speckle Interferometry ( SI ) - Electronic Speckle Pattern Interferometry ( ESPI ) - Digital Speckle Interferometry ( DSPI ) <sup>3-15-16-18</sup>

Όταν φωτίζεται μία τραχιά επιφάνεια με σύμφωνο, μονοχρωματικό κύμα δημιουργείται μία κοκκώδης δομή που ονομάζεται σχέδιο ψηφίδων (*speckle pattern*). Η ανακάλυψη ότι ένα σχέδιο ψηφίδων έφερε σημαντικές πληροφορίες οδήγησε σε μία καινούρια τεχνική μέτρησης, γνωστή ως συμβολομετρία ψηφίδων (*Speckle Interferometry – SI*). Στο σχέδιο ψηφίδας που είναι αποτέλεσμα της συμβολής μεταξύ πολυάριθμων - τυχαίας φάσης – κυμάτων, προστίθεται μία δέσμη αναφοράς για να κωδικοποιήσει τη φάση του.



Εικόνα 2.5 Σχέδιο ψηφίδων.

Η συμβολομετρία ψηφίδων παρουσιάζει ιστορική σπουδαιότητα και αποτελεί τεχνική σημαντικής αξίας όσον αφορά την υλοποίηση διαφόρων τεχνικών με χρήση της ηλεκτρονικής ανίχνευσης. Αρχικά, στην εφαρμογή της τεχνικής SI γινόταν χρήση ειδικών γαλακτωμάτων ως καταγραφικό υλικό. Σε αντίθεση με την κλασική συμβολομετρία, η κατανομή έντασης αναπαριστά ένα σχέδιο ψηφίδων και όχι ένα σχέδιο κροσσών (*fringe pattern*).

Για να παράγουμε ένα σχέδιο κροσσών, το κύμα αντικειμένου πρέπει να φέρει μία επιπλέον φάση που θα προέρχεται από την «αλλοίωση»/παραμόρφωση του αντικειμένου. Όταν το αντικείμενο μετακινείται ή παραμορφώνεται, η ακτινοβολία (ένταση) του σχεδίου ψηφίδας αλλάζει. Στο διπλής-έκθεσης γράφημα ψηφίδων που προκύπτει (κροσσοί συσχέτισης – *correlation fringes*), η αντίθεση φωτεινότητας των κροσσών (*contrast*) μπορεί να αυξηθεί με δύο τρόπους. Μπορούμε να εφαρμόσουμε ένα φίλτρο για να εξαχθεί η επιθυμητή πληροφορία (εισαγωγή ενός φορέα) είτε να ακολουθήσουμε τη διαδικασία της αφαιρετικής <sup>1</sup> συμβολομετρίας ψηφίδων.

Το μέγεθος μιας ψηφίδας μπορεί να ελεγχθεί από τον αριθμό και το διάφραγμα των φακών απεικόνισης και σχετίζεται με την ανάλυση του ηλεκτρονικού ανιχνευτή, επομένως η χρήση της ηλεκτρονικής ανίχνευσης στην εφαρμογή της συμβολομετρίας ψηφίδων μπορεί να πετύχει αύξηση της ακρίβειας και της ταχύτητας μέτρησης. Επιπλέον, η τεχνική της μετατόπισης φάσης (*phase-shifting method*) παρέχει ποσοτική ανάλυση στα συμβολογραφήματα που προκύπτουν από τα δεδομένα της μετρήσιμης έντασης.

<sup>1</sup> Εξαιτίας της αφαιρετικής διαδικασίας οι συνθήκες για τους φωτεινούς / σκοτεινούς κροσσούς στην τεχνική ESPI είναι αντίθετες με αυτές της SI.

Η ηλεκτρονική συμβολομετρία σχεδίων ψηφίδας (*ESPI-Electronic Speckle Pattern Interferometry*<sup>2</sup>) συνδυάζει την συμβολομετρία ψηφίδας με την ηλεκτρονική ανίχνευση (ίδιες πειραματικές διατάξεις). Η ESPI ενδείκνυται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές εφόσον συμπληρώνει την ολογραφική συμβολομετρία (*HI-Holographic Interferometry*).

Η τεχνική ESPI χρησιμοποιεί ένα laser, μία CCD κάμερα και ένα ψηφιακό επεξεργαστή για να παράγει συμβολογράμματα (interferograms) στο ρυθμό καρτέ της κάμερας. Ουσιαστικά πρόκειται για εφαρμογή της ολογραφικής συμβολομετρίας στην απεικόνιση και παρουσίαση αυτής μέσω ηλεκτρονικής ανίχνευσης και για αυτό το αποτέλεσμα είναι διαθέσιμο σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Οι εικόνες στην ESPI καταγράφονται μέσω ηλεκτρονικής φωτογραφικής μηχανής και επεξεργάζονται χρησιμοποιώντας αναλογικά φίλτρα, ενώ στην DSPI (Digital Speckle Pattern Interferometry<sup>3</sup>) οι εικόνες καταγράφονται μέσω μίας CCD κάμερας (Charge-Coupled Device) και επεξεργάζονται ψηφιακά με την χρήση κατάλληλου λογισμικού. Η τεχνική DSPI δεν αντικαθιστά την ολογραφική συμβολομετρία αλλά τη συμπληρώνει.

Η τεχνική συμβολομετρίας ψηφίδων έχει αναπτυχθεί έτσι ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση δυναμικών παραμορφώσεων με σκοπό τον χαρακτηρισμό της δόνησης μιας επιφάνειας. Η πρότυπη διάταξη ηλεκτρονικής συμβολομετρίας, η οποία είναι ευαίσθητη σε κινήσεις εκτός επιπέδου του αντικειμένου που μετράται, περιγράφεται παρακάτω (Εικόνα 2.5.1.1). Η περιοδική αρμονική παραμόρφωση, ως συνθήκη πειράματος, εξετάζεται χρησιμοποιώντας την τεχνική χρονικού μέσου όρου (*Time-Averaged Method*). Διατηρώντας την περίοδο δόνησης του αντικειμένου αρκετά μικρότερη από την περίοδο καταγραφής έτσι ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή πολλών κύκλων δόνησης, τα δεδομένα λαμβάνονται σε μορφή τηλεοπτικών καρτέ. Το σχέδιο κροσσών που καταγράφεται, εκφράζεται μέσω της μηδενικής τάξης συνάρτησης Bessel<sup>4</sup> του πλάτους δόνησης.

---

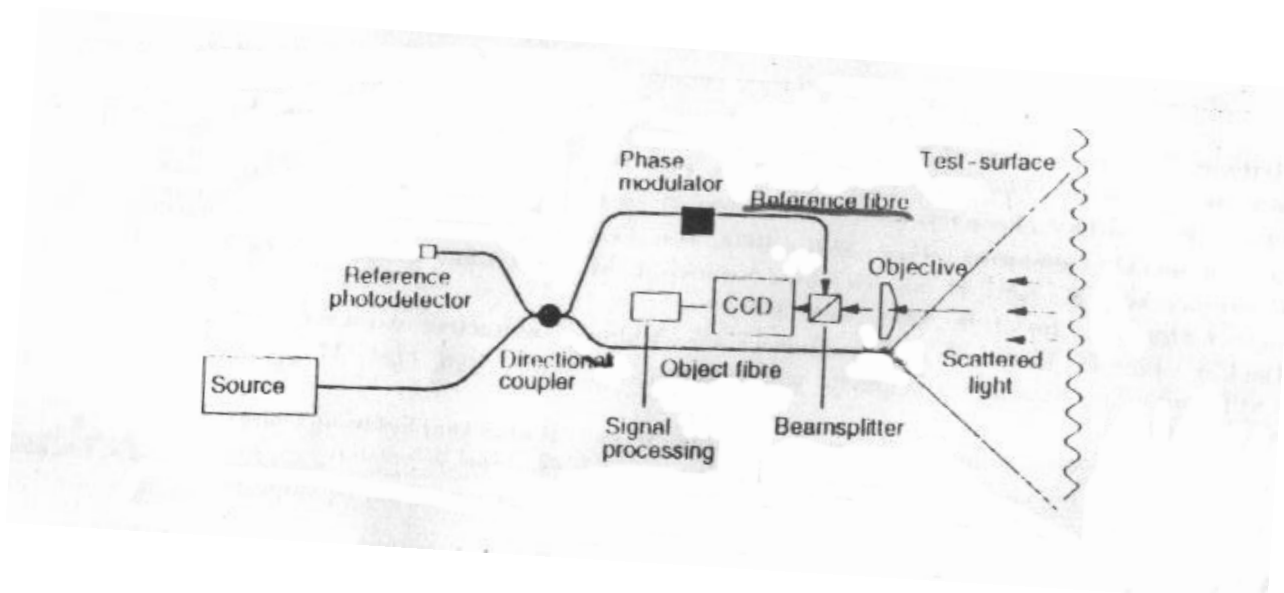
<sup>2</sup> Οι Butters και Leendertz διατύπωσαν τις βασικές αρχές για την ESPI το 1971.

<sup>3</sup> Η τεχνική DSPI αναφέρεται και ως συμβολομετρία ψηφίδων με μετατόπιση φάσης (phase-shift SI) ή TV ολογραφία που έχει εξελιχθεί από την ESPI.

<sup>4</sup> Ένα μειονέκτημα των Bessel κροσσών στην χρονικού μέσου όρου DSPI μέτρηση δόνησης είναι η χαμηλή ορατότητα / διακριτότητα των κροσσών υψηλής τάξης.

### 2.5.1 Βασικές Αρχές<sup>3</sup>

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο δίνεται μία συνοπτική περιγραφή του ηλεκτρονικού συμβολόμετρου ως αφετηρία στην εφαρμογή του, σαν βασικό όργανο, στις δυναμικές μετρήσεις.



Εικόνα 2.5.1.1 Πειραματική διάταξη ESPI συστήματος [ Pramod K. Rastogi, Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques ]

Το σχήμα (Εικόνα 2.5.1.1) παρουσιάζει μία απλή διάταξη της τεχνικής που ακολουθείται σε ένα ESPI σύστημα. Το φως από μία πηγή laser συνδέεται σε σύστημα παροχής δεσμών, το οποίο χωρίζει το φως σε δύο δέσμες, του αντικειμένου και της αναφοράς. Το σχήμα δείχνει μία οπτική ίνα σαν παροχή μίας δέσμης. Η ακτίνα του αντικειμένου ρυθμίζεται έτσι ώστε να φωτίζει ολόκληρη την επιφάνεια του αντικειμένου υπό μέτρηση. Μία CCD κάμερα<sup>5</sup> χρησιμοποιείται συνήθως σαν ανιχνευτής για την απεικόνιση του αντικειμένου μέσω ενός φακού. Η ακτίνα αναφοράς ρυθμίζεται έτσι ώστε να προσπίπτει στην κάμερα καταγραφής και είναι συζευγμένη με την ακτίνα του αντικειμένου.

Η συμβολή των δεσμών αντικειμένου και αναφοράς (με το αντικείμενο σε ηρεμία) διαμορφώνει ένα συμβολογράφημα, το οποίο καταγράφεται ψηφιακά και μορφοποιεί ένα καρέ αναφοράς. Με την παραμόρφωση του αντικειμένου καταγράφεται ένα δεύτερο συμβολογράφημα και λόγω της τραχιάς επιφάνειας του αντικειμένου (σε σύγκριση με το μήκος κύματος του φωτός) τα συμβολογραφήματα που προκύπτουν παίρνουν τη μορφή ψηφίδων. Η παραμόρφωση μπορεί να γίνει εμφανής με συσχέτισμό των δύο καρέ που καταγράφηκαν (π.χ. με αφαίρεση του ενός από το άλλο). Για τα σημεία του αντικειμένου που παραμένουν ακίνητα μεταξύ των καρέ, η φωτεινότητά τους παραμένει σταθερή (πλήρης συσχέτισμός). Τα σημεία που κινούνται έτσι ώστε να επιφέρουν αλλαγή στον οπτικό δρόμο κατά έναν ακέραιο αριθμό του μήκους κύματος του laser,  $N$ , έχουν επίσης σταθερή φωτεινότητα λόγω των θεμελιωδών περιοδικοτήτων των συμβολογραφημάτων. Τα σημεία, των οποίων ο

<sup>5</sup> Η CCD κάμερα μετατρέπει την κατανομή έντασης του σχεδίου συμβολής του αντικειμένου στο αντίστοιχο video σήμα. Το σήμα επεξεργάζεται ηλεκτρονικά και τελικά μετατρέπεται σε εικόνα στο video monitor.



οπτικός δρόμος αλλάζει κατά  $N+1/2$  του μήκους κύματος του laser, παρουσιάζουν αλλαγή στην φωτεινότητά τους (αντι-συσχετισμός). Συνεπώς, με την αφαίρεση των καρέ (pixel by pixel) παράγεται ένα συσχετογράφημα, το οποίο παρουσιάζει κροσσούς συμβολής που περιγράφουν περιοχές ίσης μετατόπισης μεταξύ των καρέ. Το διάστημα μεταξύ των κροσσών αντιστοιχεί σε μία αλλαγή στον οπτικό δρόμο ενός μήκους κύματος.

## 2.5.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ<sup>3</sup>

Η τεχνική ESPI περιλαμβάνει χρήση μιας φωτογραφικής μηχανής για μέτρηση της -εξαρτώμενης από τη θέση - έντασης μίας επιφάνειας για ένα αντικείμενο σε δύο καταστάσεις. Σκοπός είναι να επιδειχθεί πώς η μέτρηση μπορεί να προέλθει από δύο χρονικά στιγμιότυπα της - εξαρτώμενης από τη θέση του αντικειμένου - έντασης της επιφάνειας. Η μέτρηση είναι ο χρόνος και η - εξαρτώμενη από τη θέση - μετατόπιση ενός σημείου πάνω στην επιφάνεια του υπό μέτρηση αντικειμένου. Συνεπώς η μέτρηση μπορεί να θεωρηθεί ως μία περίπλοκη περιγραφή της μη περιοδικής τρισδιάστατης κίνησης όλων των σημείων στην επιφάνεια του αντικειμένου. Στην πράξη, η οπτική στοχεύει στη μέτρηση μίας μόνο συνισταμένης της κίνησης. Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει ενδιαφέρον για τη μέτρηση αρμονικής δόνησης, κατά την οποία μετράται το - εξαρτώμενο από τη θέση - πλάτος, η συχνότητα και η φάση της ταλάντωσης. Σε αυτήν την περίπτωση ενδιαφερόμαστε για μία μόνο συνισταμένη της κίνησης.

### 2.5.2.1 Διαμόρφωση ενός Συμβολογραφήματος

Θεωρούμε ότι οι μετρήσεις έγιναν σε αντικείμενο του οποίου η επιφάνεια σε κάθε σημείο υφίσταται αρμονική δόνηση, έτσι ώστε η εξίσωση μετατόπισής του να δίνεται από τη σχέση :

$$w_n = w_{on} \cos(\omega t + \phi) \quad (1.12)$$

όπου  $w_{on}$  το πλάτος μετατόπισης,  $\omega$  η κυκλική ιδιοσυχνότητα και  $\phi$  η φάση της ταλάντωσης. Συσχετίζοντας την αλλαγή στον οπτικό δρόμο μεταξύ των ακτινών, αντικειμένου και αναφοράς, με τη μετατόπιση,  $w_n$ , του αντικειμένου, προκύπτει :

$$\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} (e_l - e_L) n w_n \quad (1.13)$$

όπου  $e_l$  και  $e_L$  τα μοναδιαία διανύσματα διάδοσης της ακτίνας αντικειμένου και της κατεύθυνσης παρατήρησης αντίστοιχα,  $n$  το μοναδιαίο διάνυσμα στην επιφάνεια και  $\lambda$  το μήκος κύματος του laser. Συνήθως χρησιμοποιείται κάθετος φωτισμός και ανίχνευση, οπότε ισχύει :

$$\phi(t) = \frac{4\pi w_{on}}{\lambda} \cos(\omega t + \phi) \quad (1.14)$$



Η στιγμιαία οπτική ένταση που μετριέται στην επιφάνεια του ανιχνευτή λόγω της συμβολής των ακτινών, αντικειμένου και αναφοράς, περιγράφεται ως εξής :

$$I_l(x, y, z) = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos[\psi(x, y) + \phi(x, y, t)] \quad (1.15)$$

όπου  $I_0(x, y)$  και  $I_r(x, y)$  οι εντάσεις των ακτινών, αντικειμένου και αναφοράς, αντίστοιχα, που μετριοούνται στην επιφάνεια του ανιχνευτή και  $x, y$  οι συντεταγμένες περιγραφής της θέσης στην επίπεδη επιφάνεια. Υποθέτουμε ότι οι ακτίνες είναι αμοιβαία συσχετισμένες και έχουν ίδια κατάσταση πόλωσης.

Η φάση  $\psi(x, y)$  περιγράφει τη διαφορά οπτικού δρόμου μεταξύ των ακτινών, αντικειμένου και αναφοράς,  $d(x, y)$ , όπου :

$$\psi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} d(x, y) \quad (1.16)$$

όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος του laser. Η επιφάνεια του αντικειμένου υπό μέτρηση είναι τραχιά με αποτέλεσμα το  $d$  να ποικίλει ανάλογα με τη θέση κατά ένα πλάτος πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος του φωτός.

Η στιγμιαία ένταση του ειδώλου στην εξίσωση (1.15) καταγράφεται από τον ανιχνευτή, που μετρά το συνολικό ενεργειακό γεγονός (ανάλογα προς την ένταση) σε κάθε σημείο του ανιχνευτή κατά τη διάρκεια μιας πεπερασμένης περιόδου έκθεσης,  $T$  και δίνεται από τη σχέση :

$$I_l(x, y) = I(x, y) \left\{ 1 + V(x, y) \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \cos[\psi(x, y) + \phi(t)] dt \right\} \quad (1.17)$$

όπου  $I(x, y) = I_0(x, y) + I_r(x, y)$ .

Η μέγιστη πιθανή τιμή για τη διακριτότητα της συμβολής,  $V$ , είναι η μονάδα και μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν οι δύο ακτίνες που συμβάλλουν είναι ίσης έντασης, ίδιας πολικότητας και είναι αμοιβαία συσχετισμένες. Γενικά, είναι δυνατό να επιτευχθεί μία καλή προσέγγιση για τις συνθήκες πόλωσης και συσχετισμού των ακτινών οπότε η διακριτότητα είναι :

$$V \approx \frac{2\sqrt{I_0 I_r}}{I_0 + I_r} \quad (1.18)$$

Ισχύει σχεδόν πάντα :  $I_r \gg I_0$  οπότε  $V \ll 1$ . Η ένταση της ακτίνας αναφοράς δεν επιλέγεται για τη βελτιστοποίηση της διακριτότητας αλλά για να βελτιώσει το πλάτος των κροσσών. Ως πλάτος κροσσών ορίζεται η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής του  $I_l$  καθώς η φάση  $\psi$  αλλάζει.

$$I_{l(\max)} - I_{l(\min)} = 4\sqrt{I_0 I_r} \quad (1.19)$$

Η μορφή του ολοκληρώματος της εξίσωσης (1.17) εξαρτάται από τον τύπο φωτισμού και από την κίνηση της επιφάνειας. Υποθέτουμε ότι ο φωτισμός είναι σταθερός κατά τη διάρκεια της έκθεσης του αντικειμένου και ότι ένας πλήρης αριθμός κύκλων αρμονικής κίνησης της επιφάνειας (1.16) ολοκληρώνεται κατά τη διάρκεια  $T$  της έκθεσης. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ταυτότητα :

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{in \cos \xi} d\xi = J_0(n) \quad (1.20)$$

όπου  $J_0$  η μηδενικής τάξης συνάρτηση Bessel,  $\xi$  μία ανεξάρτητη μεταβλητή και  $n$  ένα όρισμα της εξίσωσης Bessel. Η παραπάνω ταυτότητα αποτελεί μία καλή προσέγγιση ακόμη και αν ο αριθμός των περιόδων δόνησης κατά τη διάρκεια της έκθεσης δεν είναι ακέραιος. Ολοκληρώνονται έτσι πολλές περιόδους ταλάντωσης ανά έκθεση, δηλαδή ισχύει  $T \gg \frac{2\pi}{\omega}$ .

Η εξίσωση (1.17) επομένως γίνεται :

$$I_l(x, y) = I \left[ 1 + \cos(\psi) J_0 \left( \frac{4\pi w_{on}}{\lambda} \right) \right] \quad (1.21)$$

όπου το  $(x, y)$  εξαρτάται από τα  $I$ ,  $V$  και  $\psi$ . Το χρονικά ολοκληρωμένο πρότυπο συμβολής αποτελείται από ένα σύνολο ψηφίδων, στο οποίο η αντίθεση διαμορφώνεται από τη συνάρτηση Bessel (1.23). Ως δεσμοί ορίζονται οι γεωμετρικοί τόποι μηδενικού πλάτους δόνησης, ενώ οι κοιλίες περιγράφουν τους γεωμετρικούς τόπους μέγιστου πλάτους δόνησης που εμφανίζονται μεταξύ των δεσμών. Τα επόμενα μέγιστα και ελάχιστα του μηδενισμού της συνάρτησης Bessel (που αντιστοιχούν στα σημεία με μηδενικό πλάτος δόνησης της επιφάνειας αντικειμένου) είναι πολύ χαμηλότερα και η παραλλαγή στην αντίθεση των ψηφίδων είναι δύσκολο να ανιχνευτεί οπτικά. Εξαιτίας της δυσκολίας στον καθορισμό του πλάτους δόνησης, η βελτίωση της διακριτότητας των κροσσών κρίνεται απαραίτητη έτσι ώστε να γίνουν μετρήσιμα τα πλάτη δόνησης.

### 2.5.2.2 Αφαίρεση Κροσσών Σχηματισμού

Ο όρος  $J_0 \left( \frac{4\pi w_{on}}{\lambda} \right)$  της εξίσωσης (1.21) περιλαμβάνει χρήσιμες πληροφορίες

σχετικά με το πλάτος της δόνησης, όμως ο λόγος σήματος προς θόρυβο υποβαθμίζεται από την ένταση υποβάθρου,  $I(x, y)$ . Ένα υψηλοπερατό φίλτρο και μια διόρθωση μπορούν να εφαρμοστούν στο video σήμα για να μειωθεί η ένταση βάθους. Ωστόσο, η ένταση υποβάθρου δεν μπορεί να εξαλειφθεί εξαιτίας του πεπερασμένου εύρους ζώνης του υψηλοπερατού φίλτρου και της επικάλυψης στην χωρική

συχνότητα μεταξύ της έντασης βάθους ( $I$ ) και της διαμόρφωσης ( $IV$ ). Με άνοιγμα του φακού διαχωρίζονται οι συχνότητες που συνδέονται με αυτούς τους δύο όρους, αλλά υψηλότερη απόρριψη της έντασης θορύβου ( $I$ ) (του στάσιμου οπτικού θορύβου) μπορεί γενικά να επιτευχθεί με αφαίρεση εικόνας .

Στην ανάλυση δονήσεων, οι κροσσοί εξαρτώνται από την κατάσταση του αντικειμένου (στάσιμο ή δονούμενο) κατά την καταγραφή της πρώτης εικόνας. Επιπλέον, η επαναλαμβανόμενη παραμόρφωση του αντικειμένου που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια κάθε καρέ, καθιστά εφαρμόσιμες τεχνικές όπως η διαδοχική αφαίρεση που εφαρμόζεται για την αποβολή χρονικά-μεταβαλλόμενων αλλαγών στη φάση.

Γενικά η αφαίρεση δύο εικόνων (με ψηφίδες), που αντιστοιχούν στις δύο θέσεις αντικειμένου, παράγει αρνητικές τιμές έντασης. Είναι σύνηθες, να ορίζονται θετικές τιμές έντασης σε αυτά τα σημεία έτσι ώστε να αποφεύγονται «μαύρα σημεία» στην οθόνη. Στην απεικόνιση κροσσών σε πραγματικό χρόνο, η απόλυτη τιμή της διαφοράς της έντασης υπολογίζεται με αναλογικά ηλεκτρονικά (χρήση ανορθωτή) και με ψηφιακά ηλεκτρονικά (χρήση λογικών πυλών “OR” και PC grabbers). Αν οι κροσσοί υπολογίζονται από ψηφιακές εικόνες σε χρόνο μεγαλύτερο από την περίοδο ενός καρέ, τότε οι διαφορές της έντασης τετραγωνίζονται.

Υποθέτουμε ότι οι διαφορές έντασης τετραγωνίζονται και θεωρούμε δύο καρέ, κάθε ένα από τα οποία καταγράφονται ενώ το αντικείμενο δονείται. Το πρώτο περιγράφεται από την εξίσωση (1.21) και το δεύτερο, με μια μετατόπιση φάσης  $\pi$  που εισάγεται μεταξύ των δύο καρέ, δίνεται από τη σχέση :

$$I_2(x, y) = I \left[ 1 + V \cos(\psi + \pi) J_0 \left( \frac{4\pi w_{on}}{\lambda} \right) \right] \quad (1.22)$$

Η διαφορά έντασης προκύπτει :

$$I_1 - I_2 \propto IV \cos(\psi) J_0 \left( \frac{4\pi w_{on}}{\lambda} \right) \quad (1.23)$$

Η παρουσία θερμικού θορύβου μπορεί να προκαλέσει μετατόπισης φάσης κατά  $\pi$  rad. Σε αυτή την περίπτωση, καταγράφονται διάφορες εικόνες και παράγεται ένα σύνθετο σχέδιο κροσσών το οποίο περιέχει τη μέγιστη ένταση από το σύνολο εικόνων σε κάθε εικονοστοιχείο.

Ο όρος  $\cos(\psi)$  μεταβάλλεται γρηγορότερα, σε σχέση με τη θέση, από τον όρο  $J_0 \left( \frac{4\pi w_{on}}{\lambda} \right)$ . Ένα χαμηλοπερατό φίλτρο επιδρά για την αντικατάσταση του πρώτου όρου με τη μέση τιμή του ενώ ο δεύτερος όρος παραμένει αμετάβλητος. Τετραγωνίζοντας την εξίσωση (1.23) προκύπτει :

$$\Delta I = I^2 V^2 J_0^2 \left( \frac{4\pi w_{on}}{\lambda} \right) \quad (1.24)$$

Εάν εισαχθεί μία μετατόπιση φάσης  $\pi$  rad μεταξύ της ακτίνας αντικειμένου και της ακτίνας αναφοράς σε κάθε καρέ, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί *διαδοχική αφαίρεση*, κατά την οποία κάθε καρέ γίνεται η αναφορά για το επόμενο καρέ, έτσι ώστε η εικόνα αναφοράς να ενημερώνεται συνεχώς. Ένα πλεονέκτημα της διαδοχικής αφαίρεσης είναι ότι βοηθά στη μείωση των ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων της κίνησης ολόκληρου του σώματος του αντικειμένου. Με τη διαδοχική αφαίρεση, η επίδραση της ολόσωμης κίνησης του αντικειμένου περιορίζεται στη μετακίνηση που πραγματοποιείται μεταξύ των μεμονωμένων ζευγαριών καρέ, παρά στη συσσώρευση των ολόσωμων κινήσεων κατά τη διάρκεια μιας περιόδου του πειράματος από το σημείο απόκτησης του πρώτου καρέ αναφοράς.

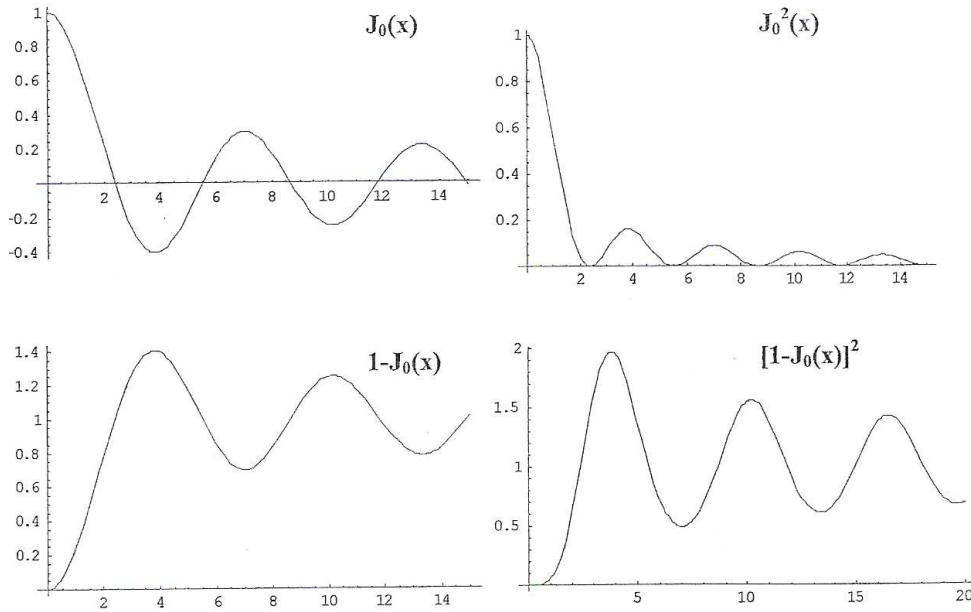
Η υπόθεση ότι το  $\psi$  και το  $I_0$  παραμένουν ίδια μεταξύ των καρέ (συσχετισμένες εικόνες ψηφίδων) είναι βάσιμη όταν η κίνηση μεταξύ των καταγεγραμμένων στιγμιότυπων είναι μικρή σε σύγκριση με τις διαστάσεις μιας μεμονωμένης ψηφίδα.

Από την εξίσωση (1.23) προκύπτει ότι οι χρονικά ολοκληρωμένοι κροσσοί διαφέρουν στην εμφάνιση από τους κροσσούς στατικής παραμόρφωσης και επομένως δεν έχουν περιοδική μορφή. Στην εικόνα 2.5.2.2 που ακολουθεί περιγράφεται η μορφή της συνάρτησης  $J_0$ , η οποία δείχνει ότι ο φωτεινός κροσσός αντιστοιχεί σε μηδενικό όρισμα (δηλαδή σε δεσμό μετατόπισης). Οι κροσσοί των οποίων η φωτεινότητα μειώνεται με το πλάτος δόνησης, καθιστούν δύσκολη τη μέτρηση σε μεγάλα πλάτη όπου η διαμόρφωση είναι μικρή. Οι κροσσοί δεν ισαπέχουν για κάθε πλάτος δόνησης. Από την εξίσωση (1.23) φαίνεται ότι οι χρονικά ολοκληρωμένοι κροσσοί δεν περιέχουν καμία πληροφορία για τη φάση δόνησης.

Βάση μίας δεύτερης τεχνικής αφαίρεσης, καταγράφεται το πρώτο συμβολογράφημα με μηδενικό πλάτος δόνησης ( $w_{on} = 0$ ) και το δεύτερο με μη μηδενικό πλάτος (εξίσωση 1.25). Η τετραγωνισμένη και φιλτραρισμένη διαφορά έντασης δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta I = I^2 V^2 \left[ 1 - J_0 \left( \frac{4\pi w_{on}}{\lambda} \right) \right]^2 \quad (1.25)$$

Η εικόνα 2.5.2.2 παρουσιάζει τη μορφή των συναρτήσεων  $J_0$ ,  $J_0^2$ ,  $1 - J_0$ ,  $(1 - J_0)^2$ . Στη συνάρτηση  $(1 - J_0)^2$ , το μηδενικό όρισμα (μηδενικό πλάτος δόνησης) αντιστοιχεί σε ένα σκοτεινό κροσσό και η ευαισθησία κροσσού μοιράζεται εξίσου σε σύγκριση με τη συνάρτηση  $J_0^2$ . Ωστόσο, η τεχνική  $(1 - J_0)^2$  επιτρέπει μία γρήγορη σάρωση της συχνότητας κατά τη διάρκεια της οποίας οι τρόποι δόνησης του αντικειμένου μπορούν να αναγνωριστούν. Καμία νέα εικόνα αναφοράς δεν χρειάζεται να καταγραφεί κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Αφού προσδιοριστούν οι συχνότητες που μας ενδιαφέρουν, καταγράφονται υψηλής διακριτότητας κροσσοί  $J_0^2$ .



**Εικόνα 2.5.2.2** Συναρτήσεις  $J_0$ ,  $J_0^2$ ,  $(1 - J_0)$ ,  $(1 - J_0)^2$  [ Σ.Ε.Γυμνόπουλος, Μελέτη Δονήσεων Καπακίων Παραδοσιακών Μουσικών Οργάνων με Μηχανικές και Οπτικές Τεχνικές, 2004 ].

### 2.5.2.3 ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΤΕΡΟΔΥΝΩΣΗ<sup>3-18</sup>

#### Επέκταση μέτρησης εύρους πλάτους και ανάλυσή του

Για την εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων από τους κροσσούς συμβολής (χρονικά ολοκληρωμένους) πραγματοποιείται μία δυναμική διαμόρφωση φάσης της ακτίνας αναφοράς. Η διαμόρφωση που εφαρμόζεται, ελέγχεται έτσι ώστε να έχει την ίδια συχνότητα με το δονούμενο αντικείμενο υπό μέτρηση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *χρονική ετεροδύνωση*.

Για να γίνει κατανοητή η τεχνική της ετεροδύνωσης υποθέτουμε ότι η ακτίνα αναφοράς διαμορφώνεται από την ανάκλασή της, μέσω καθρέπτη, σε κάθετη πρόσπτωση και με πλάτος ταλάντωσης  $w_{or}$ . Η διαμόρφωση φάσης της ακτίνας αναφοράς δίνεται από τη σχέση :

$$w_r = w_{or} \cos(\omega t + \phi_r) \quad (1.26)$$

Συνεπώς το όρισμα της συνάρτησης Bessel στην εξίσωση (1.24) γίνεται το διανυσματικό άθροισμα των φασόρων που αναπαριστούν την κίνηση της επιφάνειας και τη διαμόρφωση της ακτίνας αναφοράς, έτσι ώστε :

$$\Delta I = I^2 V^2 J_0^2 \left[ \frac{4\pi}{\lambda} [w_{on}^2 + w_{or}^2 - 2w_{on} w_{or} \cos(\phi - \phi_r)]^{1/2} \right] \quad (1.27)$$

Όταν η διαμόρφωση φάσης της ακτίνας αναφοράς ρυθμίζεται ώστε να είναι σε φάση ( $\phi - \phi_r = 0$ ) ή σε αντίθεση φάσης ( $\phi - \phi_r = \pi$ ) με την κίνηση της επιφάνειας, η εξίσωση (1.27) παίρνει τις παρακάτω απλούστερες μορφές :

$$\Delta I = I^2 V^2 J_0^2 \left[ \frac{4\pi}{\lambda} (w_{on} - w_{or}) \right] \quad (1.28)$$

$$\Delta I = I^2 V^2 J_0^2 \left[ \frac{4\pi}{\lambda} (w_{on} + w_{or}) \right] \quad (1.29)$$

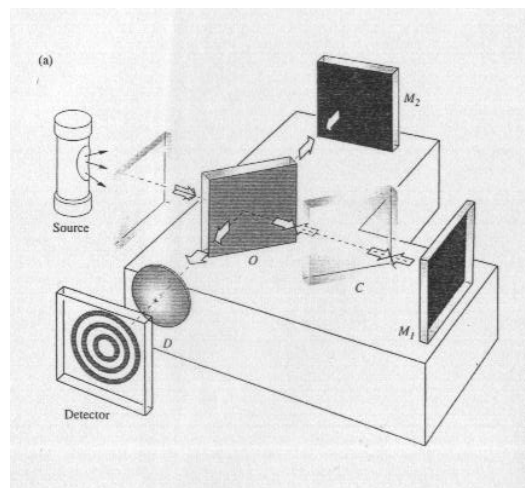
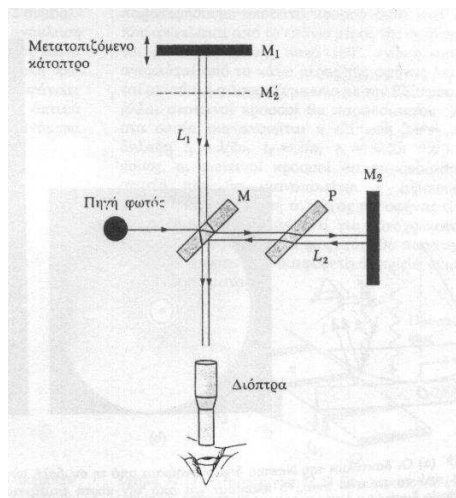
αντίστοιχα.

Είναι εμφανές ότι με ρύθμιση του πλάτους της διαμορφούμενης ακτίνας, ο φωτεινός κροσσός (μηδενικού πλάτους) μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο στην επιφάνεια του υπό μέτρηση αντικειμένου και στο σημείο αυτό το πλάτος κίνησης να αντιστοιχεί στο πλάτος της διαμορφούμενης φάσης της ακτίνας αναφοράς. Περαιτέρω ρύθμιση μπορεί να οδηγήσει την ένταση σε ένα σημείο της εικόνας στην επιφάνεια αντικειμένου στο σημείο καμπής της συνάρτησης Bessel (μεταξύ του κεντρικού μεγίστου και του πρώτου μηδενισμού), μεγιστοποιώντας την ανάλυση πλάτους της μέτρησης. Με αυτήν τη διαδικασία μπορεί κανείς να παρατηρήσει τα δονούμενα σημεία της επιφάνειας που βρίσκονται σε φάση και σε αντίθεση φάσης με την ακτίνα αναφοράς. Αυξάνοντας το πλάτος της διαμορφούμενης ακτίνας αναφοράς επιφέρουμε αύξηση στη διαμόρφωση κροσσών Bessel που αντιστοιχούν στα μέρη επιφάνειας υπό μέτρηση, με μεγαλύτερο πλάτος δόνησης. Κατά συνέπεια, αυξάνονται τα μέγιστα μετρήσιμα πλάτη.

## 2.6 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟ MICHELSON <sup>37</sup>συμβολή φωτός-8

Το συμβολόμετρο είναι μία διάταξη με την οποία μετρούνται αποστάσεις ή μήκη κύματος (ή οι μεταβολές τους) με μεγάλη ακρίβεια με τη βοήθεια κροσσών συμβολής. Ο αρχικός τύπος συμβολόμετρου παρουσιάστηκε το 1881 από τον Αμερικανό φυσικό *A.A. Michelson* (1852-1931). Χρησιμοποιείται μία δέσμη φωτός η οποία διαιρείται αρχικά στα δύο, με το κάθε μέρος να ακολουθεί τη δική του διαδρομή μέχρι την ένωσή τους και την παραγωγή μιας εικόνας συμβολής.

Στην ακόλουθη εικόνα περιγράφεται η διάταξη ενός συμβολόμετρου Michelson.



Εικόνα 2.6.1 Συμβολόμετρο Michelson [ Raymod A. Serway, Physics, 3<sup>rd</sup> Edition, 1990 – E. Hecht, Optics ]

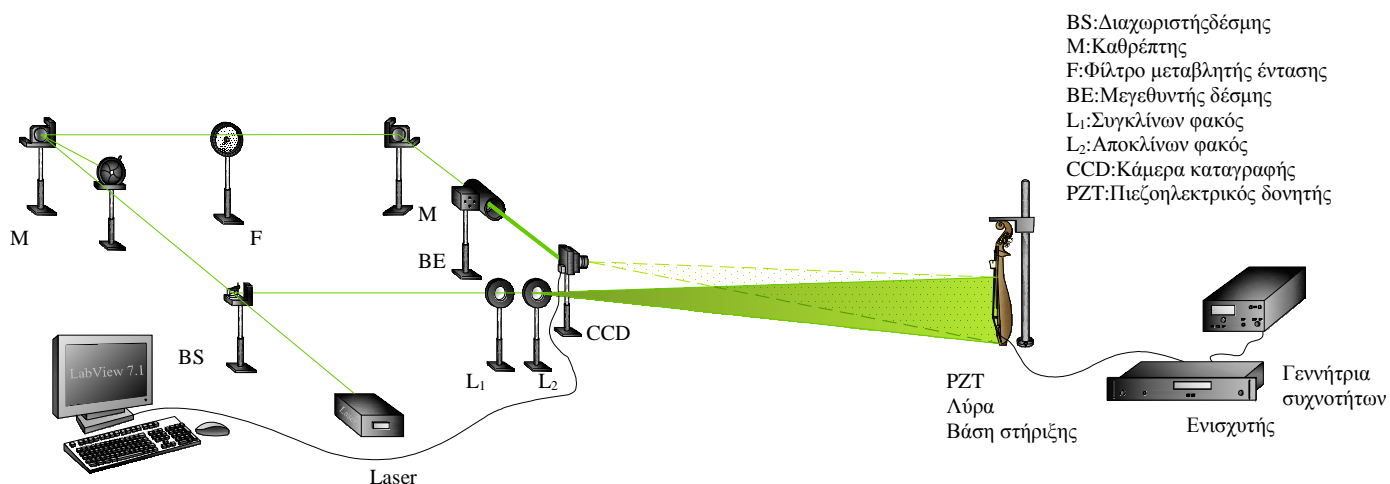
Μία δέσμη φωτός διαιρείται στα δύο από το επίπεδο κάτοπτρο M (ημιεπαγυρωμένο) το οποίο σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με την κατεύθυνση της αρχικής δέσμης. Το ένα μέρος της αρχικής δέσμης ανακλάται από το κάτοπτρο M και οδεύει στη διαδρομή  $L_1$  προς το επίπεδο κάτοπτρο  $M_1$ . Το άλλο μέρος της δέσμης διαπερνά το κάτοπτρο M και μέσω της διαδρομής  $L_2$  κατευθύνεται προς το επίπεδο κάτοπτρο  $M_2$ . Μετά την ανάκλαση των δύο μερών της αρχικής δέσμης από τα κάτοπτρα  $M_1$  και  $M_2$ , οι ακτίνες συμβάλλουν. Η εικόνα συμβολής των δύο ακτίνων που προκύπτει παρατηρείται με τηλεσκόπιο ή φιλμ και καθορίζεται από τις δύο οπτικές διαδρομές καθώς και από τη γωνία που συμβάλλουν οι δέσμες.

Ένας παρατηρητής από τη θέση του τηλεσκοπίου βλέπει το είδωλο του  $M_2$  στο  $M_2'$  και με κίνηση του κατόπτρου  $M_1$  (μέσω μικρομετρικού μηχανισμού) έχουμε μία εικόνα συμβολής από εναλλασσόμενους φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς<sup>6-9</sup>. Οι δύο ακτίνες συμβάλλουν καταστρεπτικά εάν στο κέντρο υπάρχει σκοτεινός κροσσός. Μετακινώντας το κάτοπτρο  $M_1$  κατά απόσταση  $\lambda/4$ , η διαφορά διαδρομής των ακτίνων μεταβάλλεται κατά  $\lambda/2$  (δηλαδή το διπλάσιο της απόστασης  $M_1M_2'$ ). Οι ακτίνες τώρα θα συμβάλλουν ενισχυτικά παράγοντας ένα φωτεινό κυκλικό κροσσό στη μέση. Κάθε φορά που μετατοπίζουμε το  $M_1$  κατά  $\lambda/4$ , οι φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί θα εναλλάσσονται.

Για τον προσδιορισμό του μήκους κύματος του φωτός που χρησιμοποιούμε, αρκεί να μετρήσουμε τον αριθμό των εναλλαγών των κροσσών για δεδομένη μετατόπιση του  $M_1$ . Αντιστρόφως, είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς διαδρομής (μετατοπίσεις κατόπτρων) με ακρίβεια κλάσματος του μήκους κύματος, αν γνωρίζουμε το μήκος κύματος του φωτός (ακτίνα laser) που χρησιμοποιείται.

<sup>6-9</sup> Το συμβολόμετρο Michelson μπορεί να δημιουργήσει και τους δύο τύπους κροσσών συμβολής : κυκλικούς κροσσούς ίσης κλίσης στο άπειρο και εντοπισμένους κροσσούς ίσου πάχους. Στο τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα ήταν ένα από τα πιο σπουδαία όργανα για τη μέτρηση της δομής των φασματικών γραμμών.

## Πειραματική Διάταξη Μετρήσεων



Εικόνα 2.6.2 Πειραματική διάταξη ολογραφικής συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI) του εργαστηρίου Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας στο Ρέθυμνο.

Στην πειραματική διάταξη της ολογραφικής συμβολομετρίας που έκανα τις μετρήσεις και θα σας παρουσιάσω παρακάτω χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία :

- Γεννήτρια συχνοτήτων
- Ενισχυτής σήματος
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής (πρόγραμμα *LabView 7.1*)
- Laser (*Cobolt Samba™*)\*
- CCD κάμερα
- Πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος (*AKG*)
- Απορροφητική βάση στήριξης οργάνων
- Απορροφητικό πλαίσιο
- Επίπεδα κάτοπτρα (καθρέπτες)
- Διαχωριστής δέσμης και μεγεθυντής δέσμης
- Αποκλίνων φακός
- Συγκλίνων φακός
- Φίλτρο μεταβλητής έντασης
- Σώματα λυρών και καπάκια λαούτων (προς μέτρηση)
- Καλώδια για τις συνδεσμολογίες
- Οπτική τράπεζα (για την τοποθέτηση της πειραματικής διάταξης)



\* Laser *Cobolt Samba*<sup>TM</sup>

Στις πειραματικές μετρήσεις ολογραφικής συμβολομετρίας χρησιμοποιήθηκε ένα laser στερεάς κατάστασης διοδικής άντλησης με τα παρακάτω χαρακτηριστικά στοιχεία.

### *Cobolt Samba*<sup>TM</sup>



- Στερεάς κατάστασης – διοδικής άντλησης laser
- CW μέγιστη ισχύς εξόδου πάνω από 100mW – μήκος κύματος 532 nm
- Μονή διαμήκης κατάσταση
- Στενό φασματικό εύρος
- Υψηλής ποιότητας δέσμη laser, TEM00
- Θόρυβος βάθους <0.3% rms

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για την οπτική ανίχνευση των τρόπων ταλάντωσης των μουσικών οργάνων προσαρμόζεται επάνω στην επιφάνεια μιας οπτικής τράπεζας προς αποφυγή των δονήσεων / κραδασμών που προέρχονται από εξωγενείς παράγοντες (κτίριο, φυσικό περιβάλλον).

Κάθε μουσικό όργανο προς μέτρηση στηρίζεται σε απορροφητική βάση (σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία του κατακόρυφου άξονα σώματος). Ένα απορροφητικό πλαίσιο τοποθετείται πίσω ακριβώς από τη βάση στήριξης του οργάνου με σκοπό την εξάλειψη ανεπιθύμητων ανακλάσεων της δέσμης που φωτίζει την επιφάνεια του οργάνου.

Η γεννήτρια συχνοτήτων χρησιμοποιείται σαν πηγή ημιτονοειδούς σήματος και μέσω του ενισχυτή (επίπεδης απόκρισης σε μεγάλο συχνοτικό εύρος) το σήμα καταλήγει στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο (δονητή), ο οποίος προσαρμόζεται στην επιφάνεια του καπακιού κάθε οργάνου. Το πλάτος σήματος ρυθμίζεται έτσι ώστε να διατηρείται σταθερό κατά τη διάρκεια κάθε μέτρησης παρουσιάζοντας μικρή αύξηση στις υψηλές συχνότητες ανίχνευσης. Έτσι οδηγείται το όργανο στις συχνότητες συντονισμού του.

Ο διαχωριστής δέσμης διαχωρίζει την ακτίνα laser (με ποσοστό 50%) σε μία δέσμη που φωτίζει το αντικείμενο (δέσμη αντικειμένου) και σε μία άλλη (δέσμη αναφοράς), η οποία συμβάλλει με την προηγούμενη. Η δέσμη αντικειμένου διαμορφώνεται κατάλληλα μέσω δύο φακών (συγκλίνων και αποκλίνων) με σκοπό το φωτισμό ολόκληρης της επιφάνειας του καπακιού του οργάνου. Η δέσμη αναφοράς, εφόσον ρυθμιστεί η έντασή της μέσω του φίλτρου μεταβλητής έντασης, κατευθύνεται σε έναν μεγεθυντή δέσμης έτσι ώστε να καταλήξει στην καταγραφική επιφάνεια της κάμερας. Η ρύθμιση της έντασης της δέσμης αναφοράς σε σχέση με την ένταση της δέσμης αντικειμένου κρίνεται απαραίτητη για την παρατήρηση ευδιάκριτων εικόνων συμβολής.

Η CCD κάμερα της διάταξης χρησιμοποιείται σαν καταγραφικό στοιχείο της προκύπτουσας συμβολής των δύο ακτίνων δέσμης και διοχετεύει τα αποτελέσματα

της μέτρησης (εικόνες συμβολής) κάθε οργάνου στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για αποθήκευση και περαιτέρω ψηφιακή επεξεργασία (πρόγραμμα *LabView 7.1*).

Είναι σημαντικό το γεγονός ότι πριν από κάθε μέτρηση πρέπει να τηρούνται ορισμένες προϋποθέσεις (πειραματικές ρυθμίσεις) έτσι ώστε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Πρώτα από όλα είναι απαραίτητη η παρατήρηση του φαινομένου συμβολής των δύο δεσμών με γυμνό μάτι (τοποθέτηση φακού στην έξοδο της διάταξης Michelson) και η μέτρηση του μήκους συμφωνίας του laser που χρησιμοποιείται στην πειραματική διάταξη της ολογραφικής συμβολομετρίας. *Ως μήκος συμφωνίας ενός laser (coherence length) ορίζεται η μέγιστη διαφορά οπτικού δρόμου κατά την οποία οι κροσσοί συμβολής είναι ευδιάκριτοι.*

Το πρόγραμμα *LabView 7.1* παρέχει δύο τεχνικές καταγραφής των εικόνων συμβολής : α) Subtract Two Continuous (για δυναμικές, γρήγορες, συνεχόμενες μετρήσεις) και β) Subtract (για πιο σταθερές μετρήσεις). Η πρώτη τεχνική δέχεται δύο αρχικές εικόνες σαν είσοδο και εφαρμόζει αφαίρεση των εικόνων αυτών (αφαιρεί την πρώτη από την δεύτερη) ενώ η δεύτερη τεχνική δέχεται μία αρχική εικόνα σαν είσοδο και αφαιρεί την αρχική εικόνα αναφοράς από κάθε μία εικόνα που έρχεται.

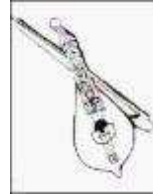
Χρησιμοποιώντας την τεχνική της αφαίρεσης δύο συνεχόμενων εικόνων (τεχνική α) ακολουθούμε συγκεκριμένα βήματα ενεργειών με βασικό στόχο την αντιστάθμιση της έντασης των δύο δεσμών (αντικειμένου και αναφοράς). Αρχικά κόβεται η δέσμη αναφοράς και καταγράφεται η μέση τιμή έντασης της δέσμης αντικειμένου (Maximal / Mean Value στο υπομενού Camera Control <sup>7</sup>). Παράλληλα ρυθμίζεται το διάφραγμα της κάμερας έτσι ώστε να φωτίζεται ολόκληρη η επιφάνεια του αντικειμένου που μετράται και αποθηκεύεται η τιμή της προκύπτουσας έντασης. Στη συνέχεια, ελευθερώνεται η δέσμη αναφοράς και κόβεται η δέσμη αντικειμένου με αποτέλεσμα στο φακό της κάμερας να προσπίπτει μόνο η δέσμη αναφοράς. Αφού ρυθμιστεί η τιμή της έντασης αναφοράς μέσω κατάλληλου φίλτρου (μεταβλητής έντασης) με σκοπό να επιτευχθεί ίδια φωτεινότητα στις δύο δέσμες, αποθηκεύεται η μέση τιμή έντασης της δέσμης αναφοράς. Επιστρέφοντας στο κυρίως πρόγραμμα επιλέγουμε τις επιθυμητές τιμές Delay (msec – χρονική καθυστέρηση μεταξύ των εισερχόμενων εικόνων), Zoom Subtracted (εστίαση) και Control BCG (Brightness, Contrast, Gamma).

---

<sup>7</sup> Το μέγεθος ψηφίδας ρυθμίζεται από την ίριδα της κάμερας καταγραφής και από το focus. Μειώνοντας την ίριδα της κάμερας αυξάνεται το μέγεθος ψηφίδας ( καταγραφή εικόνας 8bit / μέγεθος ψηφίδας 2-3 pixels ).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΚΡΗΤΙΚΗ ΛΥΡΑ



#### Εισαγωγή

Για την μελέτη της Κρητικής λύρας, ως προς την ακουστική της συμπεριφορά κατά τη δόνηση, κρίνεται απαραίτητη η αναφορά στα κατασκευαστικά στοιχεία του οργάνου καθώς και η εκτενέστερη αξιολόγηση της συμπεριφοράς του κατά την εξωτερική διέγερση του σώματός του.

Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τρία διαφορετικά είδη Κρητικής λύρας, έτσι ώστε να μελετηθεί η δονητική συμπεριφορά κάθε οργάνου αλλά και να γίνει δυνατή η μεταξύ τους σύγκριση (ποιοτική σύγκριση φασμάτων με διατήρηση ίδιων πειραματικών συνθηκών). Τα αποτελέσματα της μηχανικής μεθόδου ηχοβόλισης εισαχθήκανε στο πρόγραμμα *OriginPro 7.5* με μορφή αριθμητικών τιμών (.txt), έτσι ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή τους οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία δημιουργήθηκαν τα φάσματα μέσου όρου για κάθε μουσικό όργανο που μετρήθηκε, εφόσον κρίθηκε ότι αυτά αποτελούν αξιόπιστο μέτρο σύγκρισης μεταξύ των αποτελεσμάτων της μηχανικής τεχνικής και της οπτικής μεθόδου.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων με τη μέθοδο ηχοβόλισης και τη μέθοδο ολογραφικής συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI) έτσι ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα και η καταλληλότητα κάθε μεθόδου (σύγκριση απόκρισης συχνότητας μέσου όρου και εικόνων συμβολής).

### 3.1 Ιστορικά στοιχεία κατασκευής-μορφολογίας της λύρας

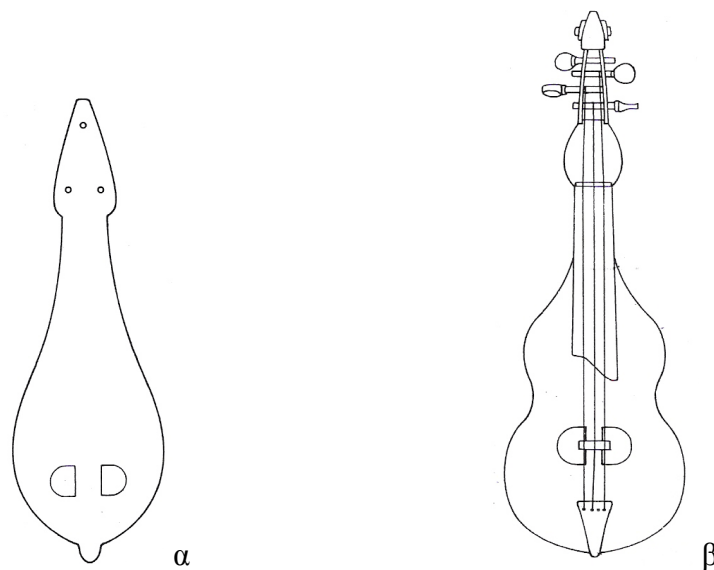
#### 3.1.1 Μορφολογική εξέλιξη της λύρας – Η Κρητική λύρα <sup>10</sup>

Η λύρα, ανήκει στην κατηγορία των τοξοτών οργάνων που ονομάστηκε από τους Άραβες μελετητές του Μεσαίωνα, Καμαντζά-ρουμ. Συναντάται επίσης στην υπόλοιπη ηπειρωτική και νησιωτική Ελλάδα, καθώς και στα Βαλκάνια αλλά και σε χώρες της Μέσης Ανατολής.

Με το πέρασμα των χρόνων η λύρα παρουσιάζει ορισμένες μορφολογικές αλλαγές που συντελούνται προοδευτικά με κέντρο την Κρήτη.

Η αρχική μορφή της λύρας είναι το λυράκι, με μικρή και χωρίς μεγάλο βάθος σκάφη, παράγει έναν οξύ και διαπεραστικό ήχο. Οι ανάγκες της μουσικής όμως τόσο στον χορό όσο και στο τραγούδι, περιορίζουν το λυράκι για τις χορευτικές μελωδίες. Για τη συνοδεία του τραγουδιού δημιουργείται σταδιακά ένας μεγαλύτερος τύπος οργάνου, η βροντόλυρα. Το νέο αυτό όργανο που αντικατέστησε το λυράκι, έχει μεγαλύτερη, βαθύτερη και πιο πλατιά στη βάση της σκάφη. Κουρδίζεται χαμηλότερα από το λυράκι, γεγονός που της προσδίδει βαθύτερο ήχο.

Γύρω στο 1925, στην προσπάθεια η λύρα να αποκτήσει τον ήχο και τις τεχνικές δυνατότητες του βιολιού, δημιουργείται ένας τύπος λύρας, η βιολόλυρα. Βασικό χαρακτηριστικό της βιολόλυρας αποτελεί το οκτάσχημο ηχείο της.



**Εικόνα 3.1.1** α) λυράκι, β) βιολόλυρα [ Φ. Ανωγειανάκης, Ελληνικά Λαϊκά Μουσικά Όργανα ].

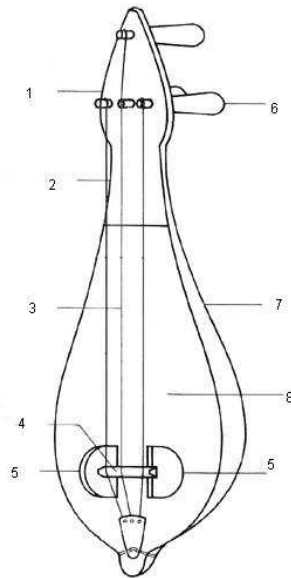
Μεταξύ των παραπάνω τύπων λύρας δημιουργήθηκε η κοινή κρητική λύρα (αχλαδόσχημη), η οποία δέχεται μία σειρά αλλαγών στη σκάφη, το λαιμό και την κεφαλή της, βάση της μορφολογίας του βιολιού. Οι αλλαγές αυτές βοηθούν στο παίξιμο (πιο σταθερό κούρδισμα, ευκολότερη τεχνική δακτυλοθεσίας) και συμβάλλουν στη δημιουργία ενός πιο «στρογγυλού» ηχοχρώματος.

### 3.1.2 Κατασκευαστικά στοιχεία – Λειτουργία<sup>10-21</sup>

Η λύρα έχει αχλαδόσχημο ηχείο (επιπεδόκυρτο) και κοντό χέρι, χωρίς μπερντέδες, που συνεχίζει το ηχείο, κλειδιά από πίσω προς τα εμπρός, καβαλάρη, τρεις μονές χορδές στερεωμένες στο άκρο του ηχείου και παίζεται με δοξάρι. Κατασκευάζεται συνήθως από τον ίδιο τον εκτελεστή σε διάφορα μεγέθη, ανάλογα με τις διαστάσεις του ξύλου<sup>8</sup> που διαθέτει, τη σωματική του διάπλαση και τη χροιά που επιθυμεί να έχει η λύρα του (ψιλή, διαπεραστική, χοντρή, βαθιά).

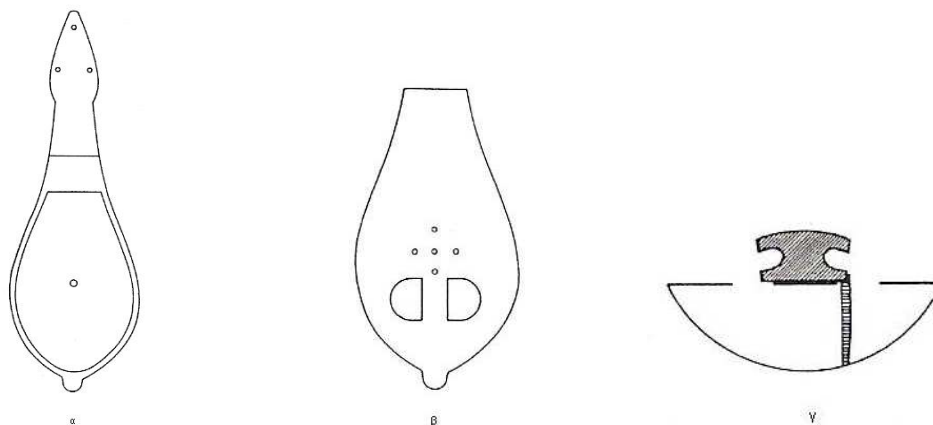
<sup>8</sup> Για τη σκάφη, το χέρι και την κεφαλή, που κατασκευάζονται από μονοκόμματο ξύλο, χρησιμοποιούνται συνήθως ξύλα όπως η μουριά, ο κισσός και η αγριοαχλαδιά. Για το καπάκι χρησιμοποιείται λευκή ξυλεία, όπως πεύκη.

Στα σχήματα που ακολουθούν, αναφέρεται η ονοματολογία των συστατικών μερών της λύρας (εικόνα 3.1.2.1).



**Εικόνα 3.1.2.1** Βασικά μέρη λύρας : 1. κεφαλή, 2. λαιμός, 3. χορδές, 4. καβαλάρης, 5. «μάτια», 6. στριφτάλια, 7. σκάφη, 8. καπάκι [ Φ. Ανωγειανάκης, Ελληνικά Λαϊκά Μουσικά Όργανα ].

Η σκάφη της λύρας είναι πάντα σκαφτή και το πάχος της δεν είναι το ίδιο σε όλη την έκτασή της. Στις άκρες είναι λεπτότερη ενώ στο βάθος, τον πυθμένα, πιο χοντρή. Παλιότερα, στο βάθος άνοιγαν και μία μικρή τρύπα για τη «φωνή» της λύρας (εικόνα 3.1.2.2α). Το καπάκι με τις δύο ημισφαιροειδείς τρύπες, τα «μάτια», ίσιο ή λίγο κυρτό, έχει το ίδιο πάχος σε όλη του την έκταση και κατασκευάζεται από καλά ξεραμένο ξύλο, χωρίς ρόζους, με ίσια και πυκνά νερά. Παλιότερα ανοίγονταν μία ή περισσότερες τρύπες, όπως και στη σκάφη (εικόνα 3.1.2.2β). Ο στύλος ή ψυχή της λύρας, στηρίζεται με τη μία άκρη στον πυθμένα της σκάφης (πλάτη) και με την άλλη στη βάση του καβαλάρη, και όχι στο καπάκι, όπως γίνεται στα όργανα της οικογένειας του βιολιού (εικόνα 3.1.2.2γ).



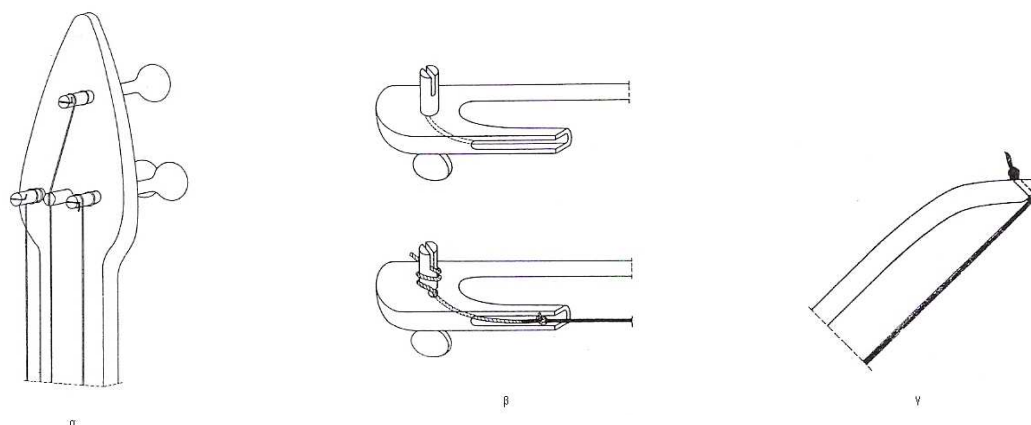
**Εικόνα 3.1.2.2** Κατασκευαστικά στοιχεία λύρας : α) «φωνή», β) «μάτια», γ) «ψυχή» [ Φ. Ανωγειανάκης, Ελληνικά Λαϊκά Μουσικά Όργανα ].

Στα τρία κλειδιά, τα στριφτάλια, τυλίγονται οι τρεις χορδές, που ακουμπούν πάνω στον καβαλάρη και δένονται στο άλλο άκρο της λύρας, τον κορδοδέτη, φτιαγμένο από σκληρό ξύλο ή κόκκαλο.

Για τις χορδές της λύρας παλιά χρησιμοποιούσαν έντερο, ενώ σήμερα οι κατασκευαστές μεταχειρίζονται τις χορδές του εμπορίου που χρησιμοποιούνται και στα υπόλοιπα χορδόφωνα όργανα. Εκτός από τις τρεις αυτές χορδές, συχνά προσθέτονται μία έως τρεις συμπαθητικές χορδές, οι οποίες πάλλονται ταυτόχρονα με τις τρεις κύριες χορδές, με αποτέλεσμα να προσδίδουν ένα πιο δυνατό και «γλυκό» ηχόχρωμα στο όργανο. Στην κεφαλή της λύρας προσθέτουν συχνά ένα μεσακό πείρο, για να ακουμπά επάνω του η μεσαία χορδή και να ευθυγραμμίζονται οι τρεις χορδές.

Το δοξάρι (λυρόξυλο, βέργα) της λύρας ήταν κυρτό έως το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, φτιαγμένο από διάφορα ξύλα και σε διάφορα μεγέθη. Είχε τρίχες από ουρά αλόγου και σφαιρικά κουδουνάκια, τα γερακοκούδουνα ή λυραροκούδουνα, κρεμασμένα από το ξύλο του. Οι τρίχες στερεώνονται στις άκρες του δοξαριού με διάφορους τρόπους και για το παίξιμο τρίβονταν με ρετσίνι ή λιβάνι. Σήμερα οι λυράρηδες χρησιμοποιούν δοξάρι βιολιού.

Παλιότερα, η λύρα διατηρούσε το φυσικό χρώμα του ξύλου ή βαφόταν με φυτικά χρωστικά υγρά. Σήμερα η σκάφη και το καπάκι της λύρας λουστράρεται με βερνίκι.



**Εικόνα 3.1.2.3** Κατασκευαστικά στοιχεία λύρας : α) πείρος, β,γ) δοξάρι [ Φ. Ανωγειανάκης, Ελληνικά Λαϊκά Μουσικά Όργανα ].

Η λειτουργία της λύρας καθορίζεται από τρεις βασικούς παράγοντες : τη διέγερση μέσω των χορδών, την απόκριση του σώματος και την εκπομπή του ήχου από το σώμα. Η πίεση των χορδών με την επιφάνεια του νυχιού των δακτύλων πάνω στην ταστιέρα αλλάζει το ενεργό μήκος τους και συνεπώς τη συχνότητα του εκπεμπόμενου ήχου. Ως μήκος χορδής (ανοικτής) ορίζεται η απόσταση γέφυρας – επάνω κορδοδέτη. Το χόρδισμα της λύρας σε συγκεκριμένες συχνότητες πραγματοποιείται αυξομειώνοντας την τάση των χορδών μέσω των τριών κλειδιών.

Η διέγερση των χορδών με το δοξάρι παράγει παράπλευρες δυνάμεις στη γέφυρα, η οποία με τη σειρά της μεταδίδει τις δυνάμεις αυτές στο καπάκι. Η κίνηση του καπακιού (πρωτογενής πηγή ήχου) είναι αποτέλεσμα της σύνθετης αλληλεπίδρασης μεταξύ της οδηγούμενης δύναμης από τη γέφυρα και των αντηχήσεων του σώματος. Το σώμα της λύρας στηρίζει τις χορδές ώστε να δονούνται κανονικά και μεταδίδει τις ταλαντώσεις τους στην αέρια κοιλότητα και στη συνέχεια

στον εξωτερικό αέρα μέσω των οπών του καπακιού. Έτσι το σώμα ενισχύει τον ασθενή ήχο των χορδών.

Οι δονήσεις του καπακιού της λύρας μεταδίδονται μέσω της «ψυχής» στην πλάτη του οργάνου. Η στήριξη της «ψυχής» στο ένα άκρο της γέφυρας, αφήνει ελεύθερο το άλλο άκρο έτσι ώστε να εξαλείφεται οποιαδήποτε κίνηση εξουδετέρωσης του καπακιού. Χωρίς την παρουσία της «ψυχής», οι ταλαντώσεις της γέφυρας θα παρήγαγαν δονήσεις με διαφορά μισού κύκλου φάσης στο καπάκι. Έτσι οι μετακινήσεις του αέρα θα εξουδετερώνονταν στις χαμηλές συχνότητες λόγω των αντίθετων κινήσεων στα δύο άκρα της γέφυρας.

Το φάσμα των ταλαντούμενων χορδών (αρμονικοί), ο τρόπος μετάδοσης της δόνησης από τη γέφυρα στο σώμα και η κατευθυντικότητα του οργάνου αποτελούν παράγοντες ποιότητας του εκπεμπόμενου ήχου από τη λύρα.

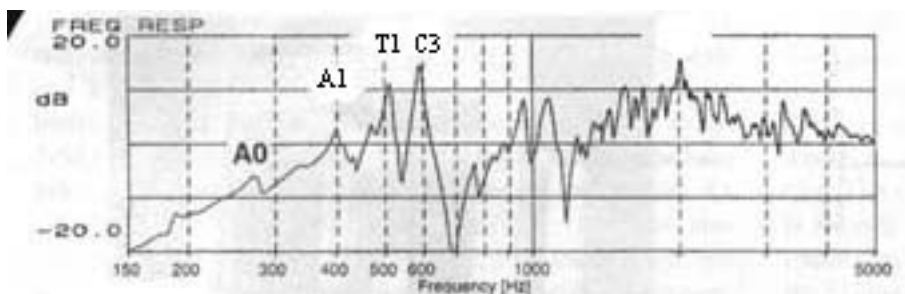
### 3.2 Παλαιότερες ακουστικές μελέτες Κρητικής λύρας

Παλαιότερες μελέτες σχετικά με την ακουστική (δονητική) συμπεριφορά Ελληνικών παραδοσιακών μουσικών οργάνων και ιδιαίτερα της Κρητικής λύρας, έχουν ελάχιστα αναφερθεί. Η επιστημονική έρευνα έχει στραφεί κυρίως σε κλασικά μουσικά όργανα, οι μελέτες των οποίων έχουν κατακλύσει τη διεθνή βιβλιογραφία.

#### 3.2.1 Παλαιότερες ακουστικές μελέτες βιολιού<sup>1-13</sup>

Το έγχορδο μουσικό όργανο που έχει μελετηθεί εκτενώς από τους επιστήμονες και αποτελεί απόγονο της λύρας, είναι το βιολί<sup>9</sup>. Η ακουστική συμπεριφορά του βιολιού κατά τη δόνηση έχει μελετηθεί τόσο με μηχανικές όσο και με οπτικές μεθόδους και μερικά από τα αποτελέσματα μετρήσεων παραθέτονται παρακάτω. Τα αποτελέσματα αυτά θα αποτελέσουν βασικό κριτήριο σύγκρισης / αξιολόγησης για τις μετρήσεις των λυρών στη συγκεκριμένη εργασία.

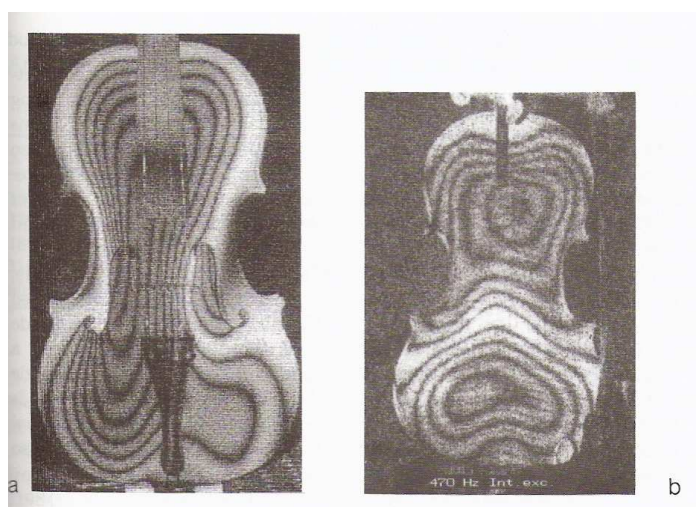
Η οπτικοποίηση των τρόπων δόνησης των ελεύθερων πλακών του βιολιού μέσω ολογραφικών τεχνικών, έχει απασχολήσει πολλούς μελετητές λόγω της πολυπλοκότητας των ανιχνεύσιμων συντονισμών. Παρόλα αυτά, το σώμα ενός συναρμολογημένου βιολιού εμφανίζει ακόμη πιο σύνθετη συμπεριφορά εφόσον αυτό κατασκευάζεται από τη σύνδεση αυτών των πλακών. Μία ενδεικτική καμπύλη απόκρισης παρουσιάζεται παρακάτω. Ακολουθούν δύο εικόνες συμβολής που προέκυψαν με χρήση της ηλεκτρονικής TV ολογραφικής μεθόδου.



Εικόνα 3.2.1 Καμπύλη απόκρισης ενός βιολιού στην περιοχή της γέφυρας [ J. Acoust. Soc. Am., Vol.107, No. 6, June 2000 ].

<sup>9</sup> Ο Saunders ανακάλυψε τη λειτουργία του βιολιού και προσπάθησε να τη συσχετίσει με την ποιότητά του.





**Εικόνα 3.2.2** Συμβολογράμματα βιολιού με χρήση ηλεκτρονικής TV ολογραφίας : α) Α<sub>0</sub> αέρινη συχνότητα β) Α<sub>1</sub> αέρινη συχνότητα [ N. H. Fletcher - T. D. Rossing, The Physics of Musical Instruments, 2<sup>nd</sup> Edition ].

Από την καμπύλη απόκρισης ξεχωρίζουν τέσσερις βασικοί συντονισμοί βάση των οποίων επιτυγχάνεται η αξιολόγηση ενός βιολιού (ως προς τη δονητική του συμπεριφορά). Οι σημαντικοί αυτοί συντονισμοί περιγράφονται ως γραμμικοί συνδυασμοί τεσσάρων στοιχειωδών κινήσεων :

- κίνηση του αέρα μέσα στην κοιλότητα (Α<sub>0</sub> αέρινη συχνότητα - συχνότητα Helmholtz<sup>10</sup>)
- κίνηση του αέρα κατά μήκος της κοιλότητας – δονήσεις πλάτης (Α<sub>1</sub> συχνότητα ξύλου)
- κίνηση «αναπνοής» του σώματος του βιολιού (Τ<sub>1</sub> πρώτο μέγιστο – “breathing” motion)
- κίνηση «κάμψης» του σώματος του βιολιού (C<sub>3</sub> δεύτερο μέγιστο – “bending” motion).

Τα δύο μέγιστα (κορυφές) αναφέρονται και ως P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> έτσι ώστε να υποδηλώνουν ένα σταθμικό άθροισμα διαφόρων ιδιοσυχνοτήτων. Οι ιδιοσυχνότητες Α<sub>1</sub>, Τ<sub>1</sub> και C<sub>3</sub> ανιχνεύονται μεταξύ των 400Hz και 600Hz. Σημειώνεται ότι η ιδιοσυχνότητα Α<sub>1</sub> βρίσκεται κοντά στα δύο μέγιστα και το δεύτερο μέγιστο ανιχνεύεται συνήθως με μεγαλύτερη στάθμη ηχητικής έντασης σε σχέση με το πρώτο μέγιστο.

<sup>10</sup> «Αέρινη συχνότητα» ή συχνότητα «συντονιστή Helmholtz» ονομάζεται η βασική συχνότητα συντονισμού της αέριας μάζας εντός του αντηχείου ενός μουσικού οργάνου. Οφείλεται στην περιοδική μεταβολή της πίεσης στο αντηχείο, κατά τη δόνηση. Οποιαδήποτε μεταβολή στον όγκο του αντηχείου επιφέρει μετακίνηση της αέριας μάζας εντός ή εκτός του σώματος μέσω των οπών. Η τιμή της εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία του οργάνου ( όγκος αντηχείου, διαστάσεις οπών, πάχος καπακιού ).



### 3.2.2 Παλαιότερες ακουστικές μελέτες καπακιών Κρητικής λύρας

Αξιόλογη έρευνα για την ανίχνευση δονήσεων σε Ελληνικά παραδοσιακά μουσικά όργανα έχει λάβει χώρα στο τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης (Ρέθυμνο 2004,2007). Σημαντικά στοιχεία για τη μελέτη της Κρητικής λύρας έχουν καταγραφεί με εφαρμογή τόσο μηχανικών όσο και οπτικών μεθόδων μέτρησης.

Βασικά συμπεράσματα από την εφαρμογή της ηλεκτρονικής συμβολομετρίας σχεδίου ψηφίδας (μέθοδος ESPI στα πλαίσια του προγράμματος Αρχιμήδης Ι) σε ασυναρμολόγητες λύρες (καπάκια) αναφέρονται παρακάτω <sup>25-26</sup>.

- Συντονισμοί ελεύθερων καπακιών λύρας στις χαμηλές συχνότητες 65-80Hz και 140-160Hz.
- Ύπαρξη ισχυρών συντονισμών στα 400-580Hz και σε στενό συχνοτικό εύρος εκατέρωθεν των 650Hz.
- Σημαντικοί ιδιορυθμοί στις συχνότητες 745Hz, 830Hz και 920Hz.
- Αξιόλογοι συντονισμοί ανιχνεύονται στις συχνότητες 1.1kHz, 1.3kHz, 1.45kHz και 1.75Hz.
- Σημαντική πτώση πλάτους συντονισμών μετά τη συχνότητα των 2kHz.

Αντίστοιχη έρευνα για τη μελέτη δονήσεων της Κρητικής λύρας («δεμένου» οργάνου) έχουν πραγματοποιηθεί - στα πλαίσια πτυχιακής εργασίας - καταλήγοντας σε σημαντικά αποτελέσματα <sup>26</sup>.

Η γενική φασματική συμπεριφορά της απόκρισης καπακιών με εφαρμογή της μεθόδου ηχοβόλισης χαρακτηρίζεται από :

- Συγκέντρωση ενέργειας στην αέρινη συχνότητα (350Hz).
- Ισχυρός συντονισμός στα 500Hz.
- Συντονισμός στα 1.1kHz και μεγάλη πλάτη ταλάντωσης έως τα 1.3kHz.
- Πλάτος ταλάντωσης και στην περιοχή 1.6-1.7kHz αλλά μικρότερο σε σχέση με αυτό της αέρινης συχνότητας και των ισχυρότερων τρόπων δόνησης.

Από την εφαρμογή της μεθόδου ESPI (με τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου αριστερά του χορδοστάτη) προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα :

- Πλήρη απουσία πλάτους ταλάντωσης κάτω από τη συχνότητα των 600Hz με ελάχιστους κροσσούς συμβολής μετά τα 450-500Hz.
- Πρώτος ισχυρός συντονισμός μετά τα 800Hz με μορφή διπόλου (2,0).
- Μεγάλη κατανομή ενέργειας ταλάντωσης (πλήθος κροσσών) στις υψηλές συχνότητες 1-2kHz.
- Δυσκολία στον ορθό σχηματισμό των ιδιορυθμών και «τάση» μετατόπισης των μεγίστων στην πλευρά όπου είναι τοποθετημένος ο διεγέρτης.

Συμπεράσματα σχετικά με τις συνθήκες των πειραματικών μετρήσεων (ηχοβόλιση και ESPI) :

- Ελάχιστη είναι η επιρροή των ελεύθερων χορδών στη συμπεριφορά του οργάνου κατά την ηχοβόλιση σε σύγκριση με όταν αυτές είναι πακτωμένες.

- Κατά την εφαρμογή της ESPI το σημείο που βρίσκεται κοντά στο κέντρο του καπακιού αποτελεί την ιδανική θέση τοποθέτησης του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου για ταύτιση των αποτελεσμάτων με αυτά της ηχοβόλισης αλλά και για «ορθό» σχηματισμό των εικόνων συμβολής. Ακόμη, η δονητική συμπεριφορά του σημείου αυτού κατά την ηχοβόλιση προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τον μέσο όρο ενός πλέγματος σημείων.
- Η τοποθέτηση του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (διεγέρτη) σε θέσεις αριστερά ή δεξιά και στο κάτω μέρος του καπακιού, επιφέρει διαφορετική δονητική συμπεριφορά των καπακιών κατά την εφαρμογή της ESPI σε σχέση με την ηχοβόλιση όπου απουσιάζουν όλοι οι τρόποι ταλάντωσης κάτω των 600Hz – 800Hz.

Βασικά συμπεράσματα για τα δονητικά χαρακτηριστικά του κεντρικού σημείου του καπακιού με τον εκπεμπόμενο ήχο :

- Τα φασματικά χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου ήχου σχετίζονται άμεσα με τα δονητικά του κεντρικού σημείου τοποθέτησης του κρυστάλλου.
- Η διαδοχική μόνωση των οπών επιφέρει εξαφάνιση των συντονισμών γύρω από την αέρινη συχνότητα και μεταφορά ενέργειας στις χαμηλότερες συχνότητες εκτέλεσης του οργάνου.

### 3.3 Μετρήσεις – Αποτελέσματα

#### 3.3.1 Μέθοδος ηχοβόλισης - Πειραματική διάταξη

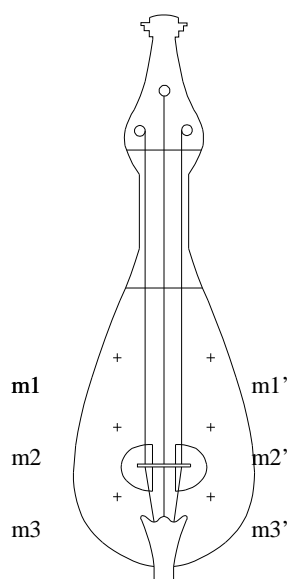


Κάθε λύρα στηρίζεται σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία (στον κάθετο άξονα της) πάνω σε μία απορροφητική βάση. Μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή (spectralab), που λειτουργεί σαν πηγή ήχου, κάθε όργανο ηχοβολείται με frequency sweep tones (20Hz – 20kHz). Ένα μεγάφωνο συνδέεται με έναν ενισχυτή σήματος και τοποθετείται σε απόσταση 30cm από το υπό μέτρηση μουσικό όργανο.

Το συνολικό μήκος του καπακιού κάθε λύρας διαιρέθηκε σε τέσσερα ίσα μέρη (βάση της συνολικής του διάστασης) έτσι ώστε να τοποθετηθεί ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος σε έξι συγκεκριμένα αντιδιαμετρικά σημεία, ως προς τον άξονα των χορδών. Ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος τοποθετείται στα έξι διαφορετικά σημεία πάνω στο καπάκι του οργάνου (βάση του πλέγματος της εικόνας 3.3.1.1) και μέσω μιας κονσόλας (προενισχυτής) γίνεται η καταγραφή του φάσματος σε έναν δεύτερο υπολογιστή (spectrum analyzer).

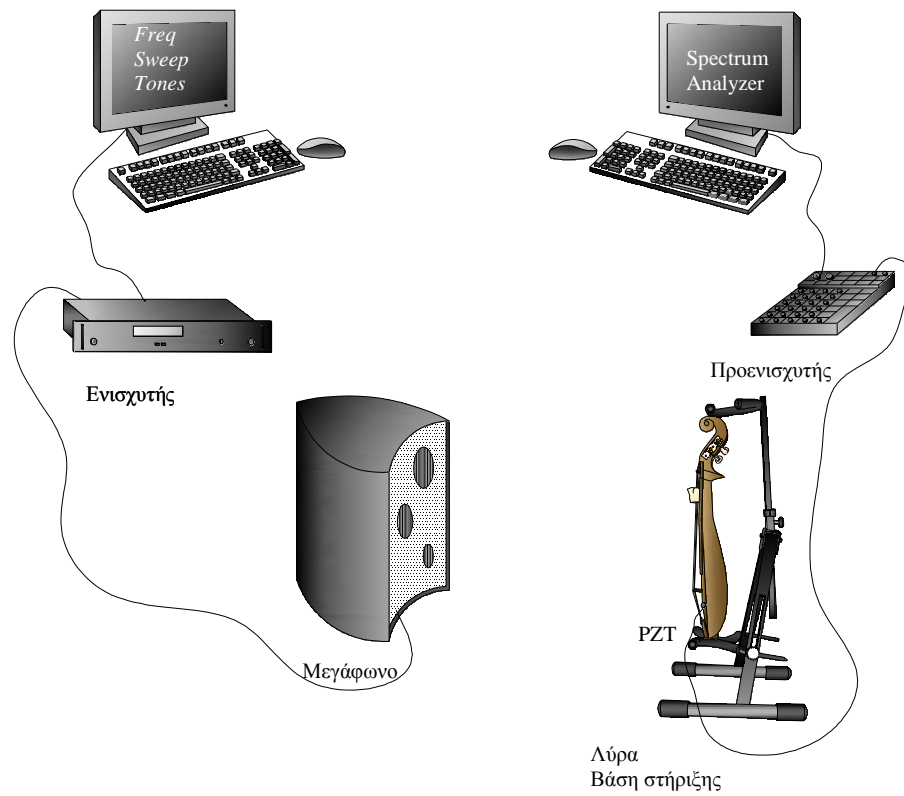
Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένα γράφημα απεικόνισης της συχνοτικής απόκρισης για κάθε σημείο μέτρησης πάνω στο καπάκι του οργάνου (dBVpk – frequency (3Hz – 15kHz)). Στον οριζόντιο άξονα της συχνότητας (Hz) εφαρμόστηκε ημιλογαριθμική αρίθμηση έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση των αποτελεσμάτων έχοντας σαν κριτήριο παλαιότερες μελέτες για δονήσεις μουσικών οργάνων μέσω ηχοβόλισης (βλ. § 3.2.1 Παλαιότερες ακουστικές μελέτες για την Κρητική λύρα).

Κάθε κύκλος των frequency sweep tones επαναλαμβάνεται τουλάχιστον δέκα φορές έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί το επίπεδο ισχύος (Power Level) κάθε μέτρησης. Οι χορδές σταθεροποιήθηκαν με την τοποθέτηση αφρώδους απορροφητικού υλικού για την αποφυγή αλλοίωσης των αποτελεσμάτων (ελαχιστοποίηση των δονήσεων).



Εικόνα 3.3.1.1 Σώμα λύρας και σημεία μέτρησης.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για τρία διαφορετικά είδη λυρών βάση της πειραματικής διάταξης που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.3.1.2 Πειραματική διάταξη μηχανικής τεχνικής ( ηχοβόλιση λύρας ).

Οι διαστάσεις και η μορφή των λυρών που μετρήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη παρατίθενται στο παρακάτω σχήμα.



Λύρα 17<sup>ου</sup> αιώνα

Λύρα Σταγάκη

Λύρα Λαγουδάκη

### Εικόνα 3.3.1.3 Διαστάσεις λυρών

Λύρα 17<sup>ου</sup> αιώνα : ύψος σώματος 51cm, ύψος καπακιού 26.2cm, πλάτος 14.2cm, πάχος 7.8cm.

Λύρα Σταγάκη : ύψος σώματος 53cm, ύψος καπακιού 29cm, πλάτος 23cm, πάχος 7.5cm.

Λύρα Λαγουδάκη : ύψος σώματος 54.9cm, ύψος καπακιού 29.2cm, πλάτος 18.1cm, πάχος 7.9cm.

### 3.3.2 Λύρα 17<sup>ου</sup> αιώνα ( Κατσαντώνη )

#### 3.3.2.1 Αποτελέσματα ηχοβόλισης

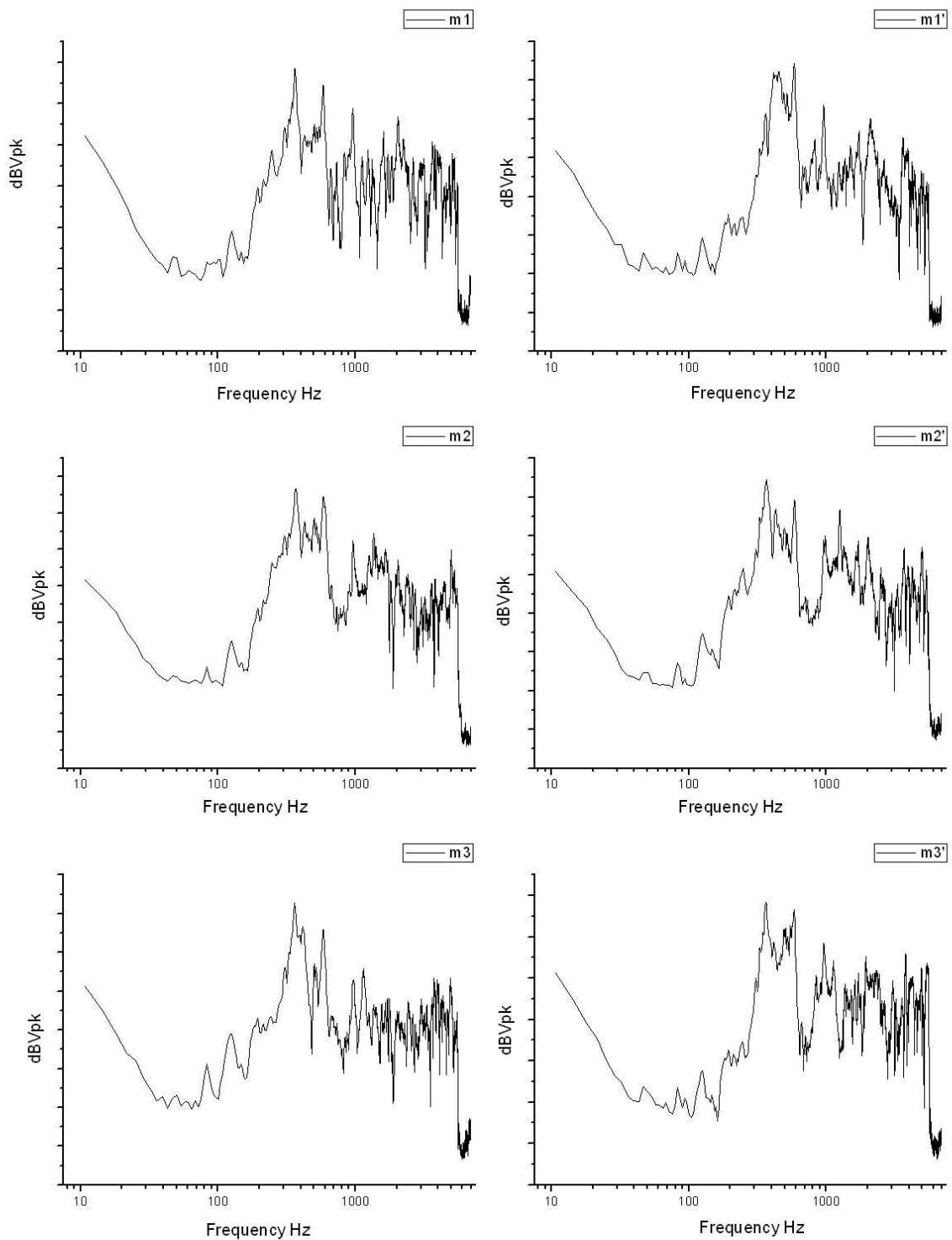
Η συγκεκριμένη λύρα αποτελεί ανακατασκευή λύρας του 17<sup>ου</sup> αιώνα. Πρόκειται για μία αχλαδόσχημη λύρα, με σκάφη κατασκευασμένη από ξύλο μουριάς. Από την εφαρμογή της μηχανικής μεθόδου (ηχοβόλιση) στις τρεις λύρες της μελέτης προέκυψαν συχνοτικά φάσματα για συγκεκριμένα σημεία μέτρησης (σημεία τοποθέτησης του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου). Η σύγκριση μεταξύ των αντιδιαμετρικών σημείων μέτρησης μπορεί να μας οδηγήσει σε συμπεράσματα σχετικά με τη συμμετρικότητα της κατασκευής του οργάνου που μετρήσαμε.

Για να είναι δυνατή όμως η σύγκριση της δονητικής συμπεριφοράς ολόκληρης της μετρούμενης επιφάνειας του καπακιού κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός τελικού συχνοτικού φάσματος, το οποίο να αντιστοιχεί στο μέσο όρο των επιμέρους μετρήσεων.

Μέσω του προγράμματος *OriginPro 7.5* και μετά από κατάλληλη επεξεργασία προέκυψαν τα γραφήματα μέσου όρου για κάθε λύρα και παρατίθενται παρακάτω. Σκοπός είναι η μελέτη της δονητικής συμπεριφοράς ολόκληρου του καπακιού και έμμεσα ολόκληρου του μουσικού οργάνου. Η δημιουργία των γραφημάτων αυτών καθιστά δυνατή τη σύγκριση (ποιοτική) μεταξύ της συμπεριφοράς κατά τη δόνηση, των τριών λύρων, σε επόμενο κεφάλαιο. Η σύγκριση θα γίνει ως προς το πεδίο συχνότητας, εφόσον λόγω της φύσης των πειραματικών μετρήσεων δεν είναι δυνατή καμία ποσοτική ανάλυση.



**Εικόνα 3.3.2.1** Συνθήκες μέτρησης ( βάση στήριξης - μόνωση χορδών ) ανακατασκευασμένης λύρας 17<sup>ου</sup> αιώνα.



**Εικόνα 3.3.2.2** Αποτελέσματα μεθόδου ηχοβόλισης ( για τα έξι σημεία μέτρησης ).

Συγκρίνοντας τα αντιδιαμετρικά σημεία ( $m_1-m_1'$ ,  $m_2-m_2'$ ,  $m_3-m_3'$ ), είναι εμφανές ότι τα σημεία της αριστερής πλευράς του καπακιού της λύρας ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ) χαρακτηρίζονται από οξύτερους (μεγαλύτερες τιμές μεγίστων-peaks) και πιο πυκνούς (με μικρότερο συχνοτικό εύρος) συντονισμούς. Το γεγονός αυτό προσδίδει μία ασυμμετρία στην κατασκευή του οργάνου.

Από την αρχή καταγραφής του κάθε φάσματος (περιοχή χαμηλών συχνοτήτων) έως και την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, είναι σχεδόν ξεκάθαρη η αέρινη συχνότητα ( $A_0$  : συχνότητα Helmholtz) καθώς και η συχνότητα ξύλου του οργάνου ( $A_1$  : δεύτερη αέρινη συχνότητα), η οποία εντοπίζεται λίγο πριν τη συχνότητα του πρώτου μεγίστου για όλα τα σημεία μέτρησης. Οι δύο βασικοί συντονισμοί (μέγιστα  $T_1$  και  $C_3$ ) καταγράφονται στη συχνοτική περιοχή των 300Hz – 600Hz για όλα τα σημεία μέτρησης.

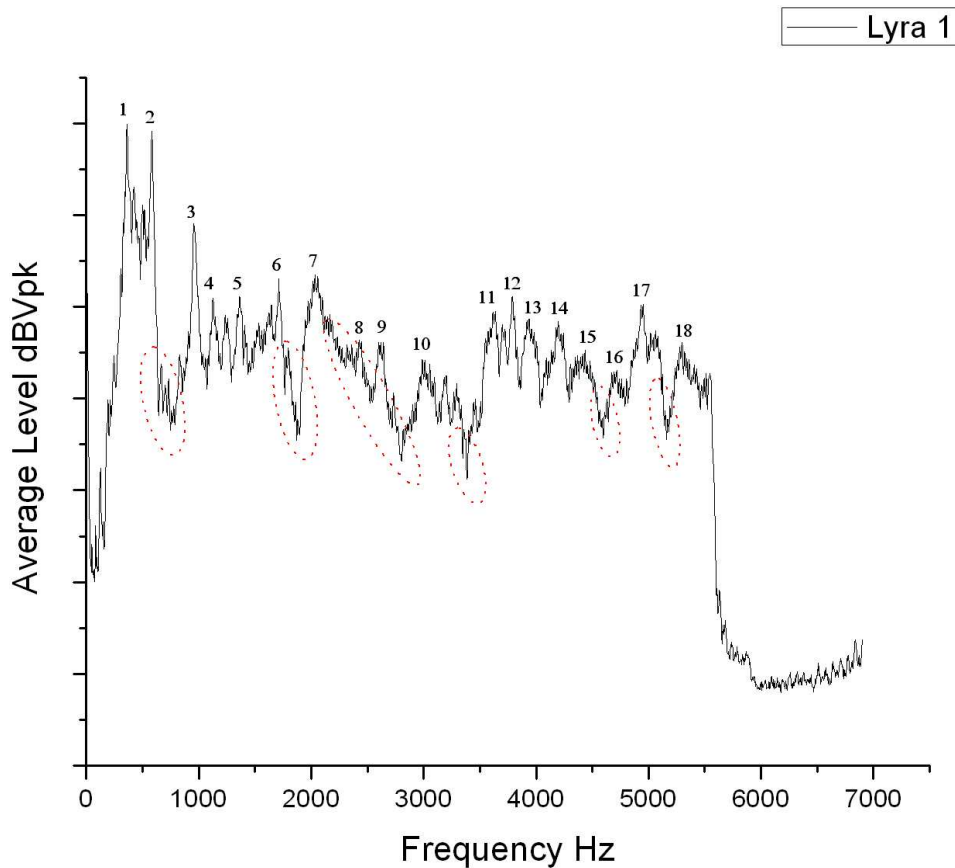
Στις υψηλές συχνότητες, τα σημεία της αριστερής πλευράς του οργάνου, ως προς τον κάθετο άξονα του καπακιού, παρουσιάζουν μία περισσότερο επίπεδη απόκριση σε σχέση με τα αντιδιαμετρικά τους σημεία ( $m_1'$ ,  $m_2'$ ,  $m_3'$ ). Οξείς συντονισμοί που διατηρούν σχεδόν ίδιο το πλάτος τους για μεγάλο εύρος συχνοτήτων (600Hz – 6kHz) και ανιχνεύονται κυρίως στην αριστερά πλευρά του καπακιού ( $m_1$ ,  $m_3$ ), αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα για την ακουστική ποιότητα (δονητική συμπεριφορά) του οργάνου. Η απόκριση του σημείου  $m_1$  (επάνω αριστερά στο καπάκι) είναι η περισσότερο «αποδεκτή» στη συγκεκριμένη μέτρηση, δίνοντας σημαντικούς – ξεκάθαρους συντονισμούς και σταδιακή μείωση του πλάτους ταλάντωσης, χωρίς απότομα «βυθίσματα» σε όλο σχεδόν το φασματικό εύρος.


Αρνητικό παράγοντα αποτελούν κάποιες «νεκρές» φασματικές περιοχές εξαιτίας της απότομης μείωσης του πλάτους των συντονισμών. Συγκεκριμένα, τα σημεία  $m_1'$ ,  $m_2'$ ,  $m_3'$  παρουσιάζουν μία συνεχή αυξομείωση των πλατών των συντονισμών με μικρό παράγοντα ποιότητας  $Q$ <sup>11</sup> (600 Hz – 6 KHz). Τα φάσματα των αντιδιαμετρικών σημείων  $m_2-m_2'$  διαφέρουν ελάχιστα, με κοινό σημείο μία περιοχή χωρίς συντονισμούς από 600Hz-1kHz και μία πτώση πλάτους των συντονισμών από 1.5kHz-3kHz.

---

<sup>11</sup> Παράγοντας ποιότητας  $Q = \frac{f_0}{|f_2 - f_1|}$ , όπου  $f_0$  η συχνότητα συντονισμού και  $f_1, f_2$  οι συχνότητες υποδιπλασιασμού της τάσης (-6dBv).





**Εικόνα 3.3.2.3** Συχνοτική απόκριση για τη λύρα 17<sup>ου</sup> αιώνα ( φάσμα μέσου όρου : η αρίθμηση υποδεικνύει σημαντικούς συντονισμούς ενώ οι «νεκρές» περιοχές / «βυθίσματα» καταγράφονται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή .

Το φάσμα μέσου όρου για την πρώτη λύρα προσεγγίζει ικανοποιητικά τη συνολική δονητική συμπεριφορά της επιφάνειας του καπακιού του δεμένου οργάνου. Σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν από την παρατήρηση του φάσματος αναφέρονται παρακάτω.

- Στην χαμηλή περιοχή συχνοτήτων δεν εντοπίζονται αξιόλογοι συντονισμοί εκτός από τον 2<sup>ο</sup> συντονισμό (125,6Hz) που είναι πιο εμφανής.
- Οι δύο βασικοί / μέγιστοι συντονισμοί (peaks 1,2) του φάσματος ανιχνεύονται στα 362,5Hz και 585Hz, αντίστοιχα και με αρκετά υψηλό πλάτος.
- Ακολουθεί μία «νεκρή» συχνοτική περιοχή (εύρους  $\approx 230\text{Hz}$ ) μεταξύ του δεύτερου και τρίτου, κατά σειρά, σημαντικού συντονισμού (2-3, 642Hz-872Hz). Ο τρίτος σημαντικός συντονισμός εμφανίζεται στα 958Hz με εμφανές μικρότερο πλάτος.
- Μετά τη συχνότητα 1kHz (από τα 1073Hz) και μέχρι τα 2035Hz περίπου υπάρχει μία περιοχή μικρής αλλά σταθερής / σταδιακής ενίσχυσης του πλάτους συντονισμών. Τέσσερις σημαντικοί συντονισμοί στην περιοχή αυτή εντοπίζονται στις συχνότητες 1127Hz, 1364Hz, 1712Hz και 2035Hz, αντίστοιχα (σημεία 4, 5, 6, 7). Αρνητικό στοιχείο είναι το μεγάλο «βύθισμα» (“dip”) που ακολουθεί μετά τον έκτο συντονισμό, δηλαδή από τα 1712Hz μέχρι τα 1900Hz.

- Μετά τον 7<sup>ο</sup> σημαντικό συντονισμό ακολουθεί σταθερή μείωση του πλάτους των συντονισμών μέχρι τα 3.4kHz περίπου ( $\approx 3474\text{Hz}$ ). Συντονισμοί μικρού πλάτους (8, 9, 10) ανιχνεύτηκαν στην περιοχή αυτή. Ανεπιθύμητα είναι τα απότομα «βυθίσματα» με αρνητικές κορυφές στις συχνότητες 2800Hz και 3384Hz (9-10, 10-11).
- Πυκνοί συντονισμοί με ικανοποιητικό πλάτος (λίγο μικρότερο από το πλάτος των συντονισμών στην περιοχή 1kHz – 2kHz, 4, 5, 6, 7) ανιχνεύονται μετά τα 3.5kHz (11, 12, 13, 14-3617,5Hz, 3790Hz, 3940,5Hz, 4199Hz αντίστοιχα). Ακολουθεί μείωση του πλάτους συντονισμών (15, 16) μέχρι τα 4.7kHz. Στην υψηλή περιοχή συχνοτήτων εντοπίζονται ακόμη δύο οξείς συντονισμοί λίγο πριν και μετά τα 5kHz (17,18-4953Hz, 5297Hz). Σαν μειονεκτήματα αναφέρονται ακόμη δύο «βυθίσματα» εύρους  $\approx 200\text{Hz}$  εκατέρωθεν των συχνοτήτων 4600Hz και 5160Hz.

### 3.3.2.2 Αποτελέσματα μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας

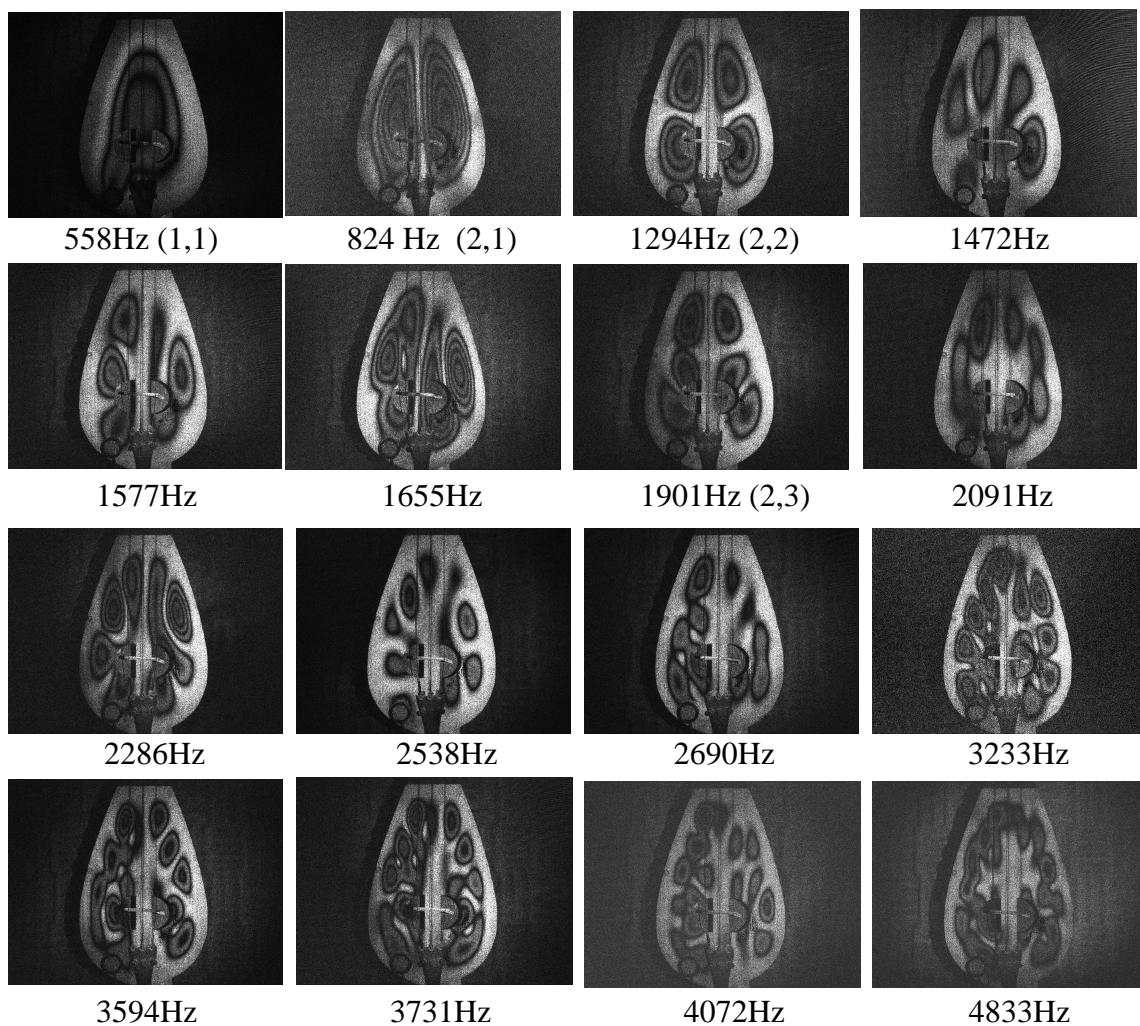
Τα αποτελέσματα της μεθόδου της ολογραφικής συμβολομετρίας παρουσιάζονται παρακάτω με σκοπό την αναγνώριση των σημαντικών συντονισμών της λύρας (17<sup>ου</sup> αιώνα) εφόσον αυτοί αποτελούν βασικό κριτήριο για την ακουστική συμπεριφορά του οργάνου.

Οι εικόνες συμβολής που παρουσιάζονται στην παράγραφο αυτή περιλαμβάνουν τόσο σημαντικούς συντονισμούς του δεμένου οργάνου όσο και ενδιάμεσες καταστάσεις δόνησης με μεγάλη σχετικά διακρίσιμότητα. Κάθε εικόνα αναφέρεται σε μία συχνότητα μέτρησης και όταν η συχνότητα αυτή είναι και ιδιοσυχνότητα του οργάνου προκύπτει μία εικόνα συμβολής <sup>12</sup> (κροσσών). Το πλάτος ταλάντωσης κάθε σημείου στην επιφάνεια του καπακιού της λύρας εμφανίζεται βάση των διαβαθμίσεων λευκού-μαύρου, με μέγιστο πλάτος ταλάντωσης τα «σκοτεινά» σημεία και ελάχιστο πλάτος τα «φωτεινά» σημεία.

Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων (των σημαντικών εντοπισμένων εικόνων συμβολής) με εκείνα της μηχανικής τεχνικής έτσι ώστε να αξιολογήσουμε τις δύο μεθόδους μέτρησης.

---

<sup>12</sup> Ο τρόπος ταλάντωσης που αντιστοιχεί σε κάθε εικόνα συμβολής προσδιορίζεται στην παρένθεση που ακολουθεί μετά την αναγραφόμενη συχνότητα ταλάντωσης. ( x, y ) όπου x ο αριθμός λοβών κροσσών στον οριζόντιο άξονα και y ο αριθμός λοβών κροσσών στον κατακόρυφο άξονα.



Εικόνα 3.3.2.2 Αποτελέσματα μεθόδου ESPI ( λύρα 1 ).

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι εμφανές ότι η συγκεκριμένη λύρα παρουσιάζει έναν ικανοποιητικό αριθμό καταστάσεων συντονισμού με ευδιάκριτους σχηματισμένους κροσσούς συμβολής σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Οι τρεις πρώτοι ανιχνεύσιμοι συντονισμοί καταγράφηκαν στις συχνότητες **558Hz**, **824Hz** και **1294Hz**. Ακολουθούν εικόνες συμβολής με έντονους λοβούς κροσσούς, η διάταξη των οποίων δεν προδίδει την ύπαρξη κάποιου συγκεκριμένου τρόπου ταλάντωσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μεταξύ των καταγεγραμμένων εικόνων συμβολής ανιχνεύτηκαν ελάχιστες περιοχές χωρίς καθόλου συντονισμούς («νεκρές» περιοχές). Μία εικόνα συμβολής που περιγράφει ένα σημαντικό συντονισμό μετασχηματίζεται σταδιακά στον επόμενο τρόπο ταλάντωσης. Σημαντικοί τρόποι ταλάντωσης με μεγάλη διακριτότητα ανιχνεύτηκαν επίσης στις υψηλές συχνότητες **1655Hz**, **1901Hz**, **2286Hz** και **3233Hz**. Κάποιες εικόνες συμβολής στη μεσαία περιοχή συχνοτήτων δεν είναι αρκετά ξεκάθαρες και συμμετρικές ώστε να είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός του τρόπου ταλάντωσης. Ιδιαίτερα στην υψηλή περιοχή εμφανίστηκαν πολύπλοκοι συντονισμοί με ικανοποιητική διακριτική ικανότητα. Η συμμετρία των εντοπισμένων εικόνων συμβολής αποτελεί ακόμη ένα πλεονέκτημα στη συμπεριφορά της λύρας κατά τη δόνηση.

### 3.3.3 Λύρα Αχλαδόσχημη ( Σταγάκη )

#### 3.3.3.1 Αποτελέσματα ηχοβόλισης

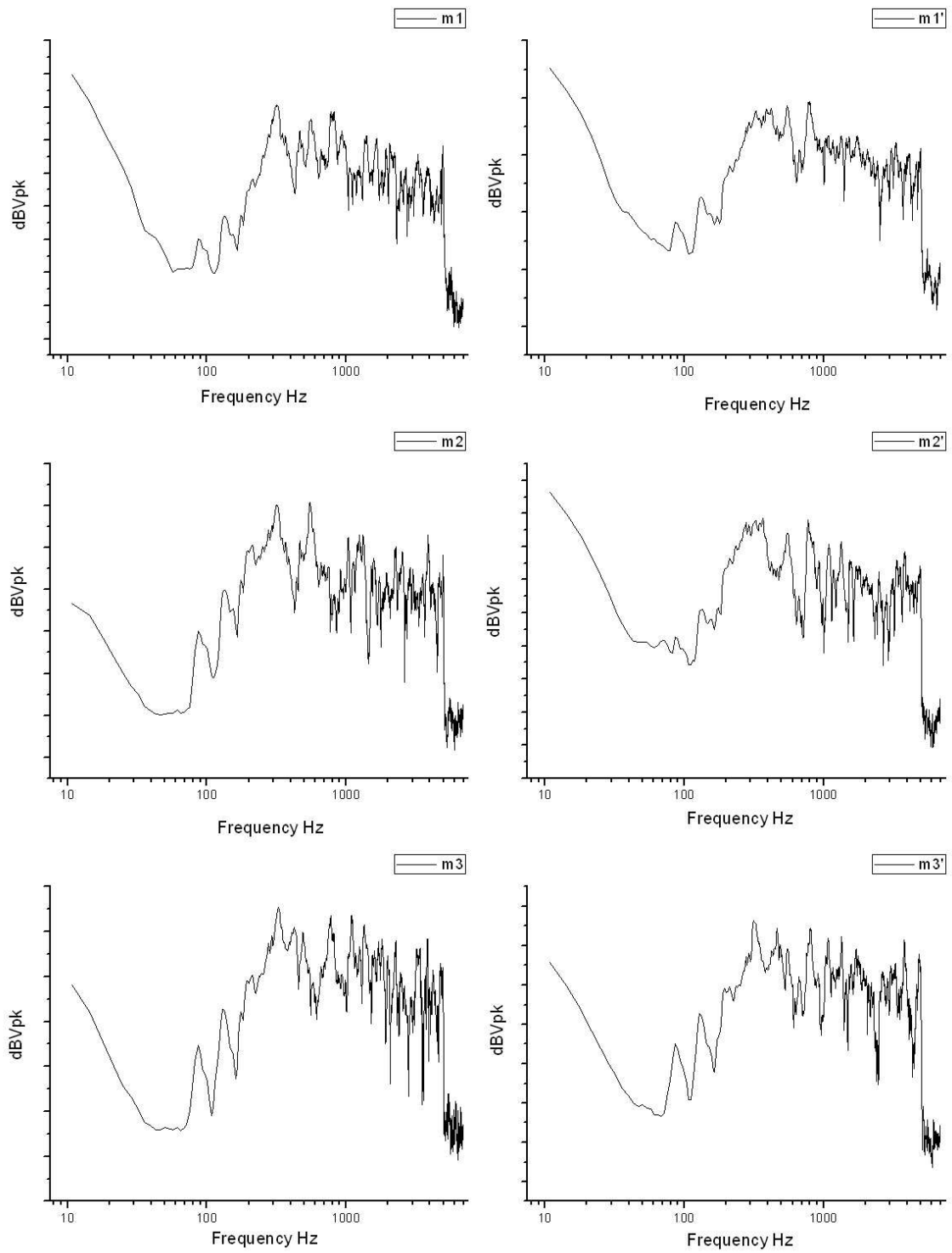
Η δεύτερη λύρα μετρήθηκε με τη μέθοδο της ηχοβόλισης, χρησιμοποιώντας την ίδια πειραματική διάταξη και βάση των ίδιων συνθηκών πειράματος (εξοπλισμός, στήριξη) με την λύρα του 17<sup>ου</sup> αιώνα. Πρόκειται για μία λύρα της οποίας το σχήμα είναι το πιο διαδεδομένο, όσον αφορά την αχλαδόσχημη μορφή του.



**Εικόνα 3.3.3.1** Συνθήκες μέτρησης αχλαδόσχημης λύρας 2 :

α) καπάκι λύρας ( μόνωση χορδών ) – πλάτη λύρας, β) τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου/ανιχνευτή πάνω στην επιφάνεια καπακιού – διέγερση σώματος λύρας με ηχείο.

Για κάθε σημείο μέτρησης πάνω στην επιφάνεια του καπακιού της αχλαδόσχημης λύρας προέκυψε ένα συχνοτικό φάσμα. Τα γραφήματα που προέκυψαν αναφέρονται στα έξι σημεία μέτρησης και στο μέσο όρο δονητικής συμπεριφοράς του καπακιού, σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην παράγραφο 3.3.2.1. Ακολουθεί ποιοτική ανάλυση (ανίχνευση των σημαντικών συντονισμών, αναγνώριση θετικών και αρνητικών στοιχείων των αποτελεσμάτων μέτρησης) και σύγκριση των φασμάτων των αντιδιαμετρικών σημείων, έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμμετρία κατασκευής του οργάνου αλλά και τη συνολική συμπεριφορά του καπακιού κατά τη δόνηση (φάσμα μέσου όρου).

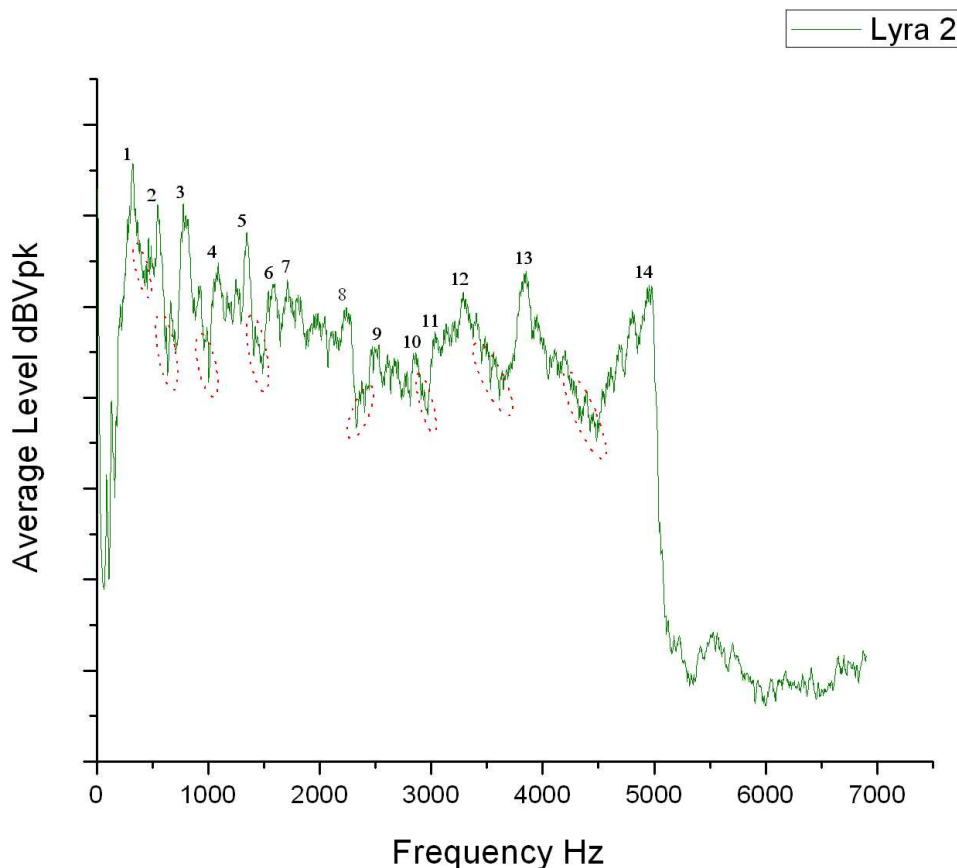


**Εικόνα 3.3.3.2** Αποτελέσματα μεθόδου ηχοβόλισης ( για τα έξι σημεία μέτρησης ).

Από τα γραφήματα φαίνεται ότι η αριστερή πλευρά της συγκεκριμένης λύρας (σημεία m1, m2, m3) ενισχύει τους μεσαίους και υψηλόσυχνους συντονισμούς μετά την περιοχή των δύο μεγίστων (πάνω από τα 600Hz) παρουσιάζοντας οξείς και πυκνούς συντονισμούς.

Αξιολογή είναι η δονητική συμπεριφορά των σημείων μέτρησης στην χαμηλή περιοχή συχνοτήτων. Οι συχνότητες ξύλου και αέρα είναι αρκετά ξεκάθαρες σε όλα τα φάσματα εκτός από τα σημεία m1' και m2'. Επιπλέον, στα φάσματα των σημείων αυτών (δεξιά πλευρά οργάνου) δεν ανιχνεύονται τα δύο μέγιστα με το αναμενόμενο πλάτος ενώ σταδιακή μείωση του πλάτους ταλάντωσης εμφανίζεται στην υψηλόσυχη περιοχή μέτρησης. Οι δύο βασικοί ισχυροί συντονισμοί καταγράφονται με μικρότερο πλάτος από το αναμενόμενο στο σημείο m1.

Η αριστερή πλευρά του οργάνου παρουσιάζει μία ελαφρώς μεγαλύτερη ενίσχυση συντονισμών (ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες) με συνέπεια την ασυμμετρία στην κατασκευή του οργάνου. Συνολικά όμως εντοπίζονται πολλές ομοιότητες μεταξύ των φασμάτων των σημείων μέτρησης (σχετικά επίπεδη απόκριση σε όλο το φάσμα καταγραφής) γεγονός που προσδίδει μία «επιθυμητή» δονητική συμπεριφορά στη συγκεκριμένη λύρα.



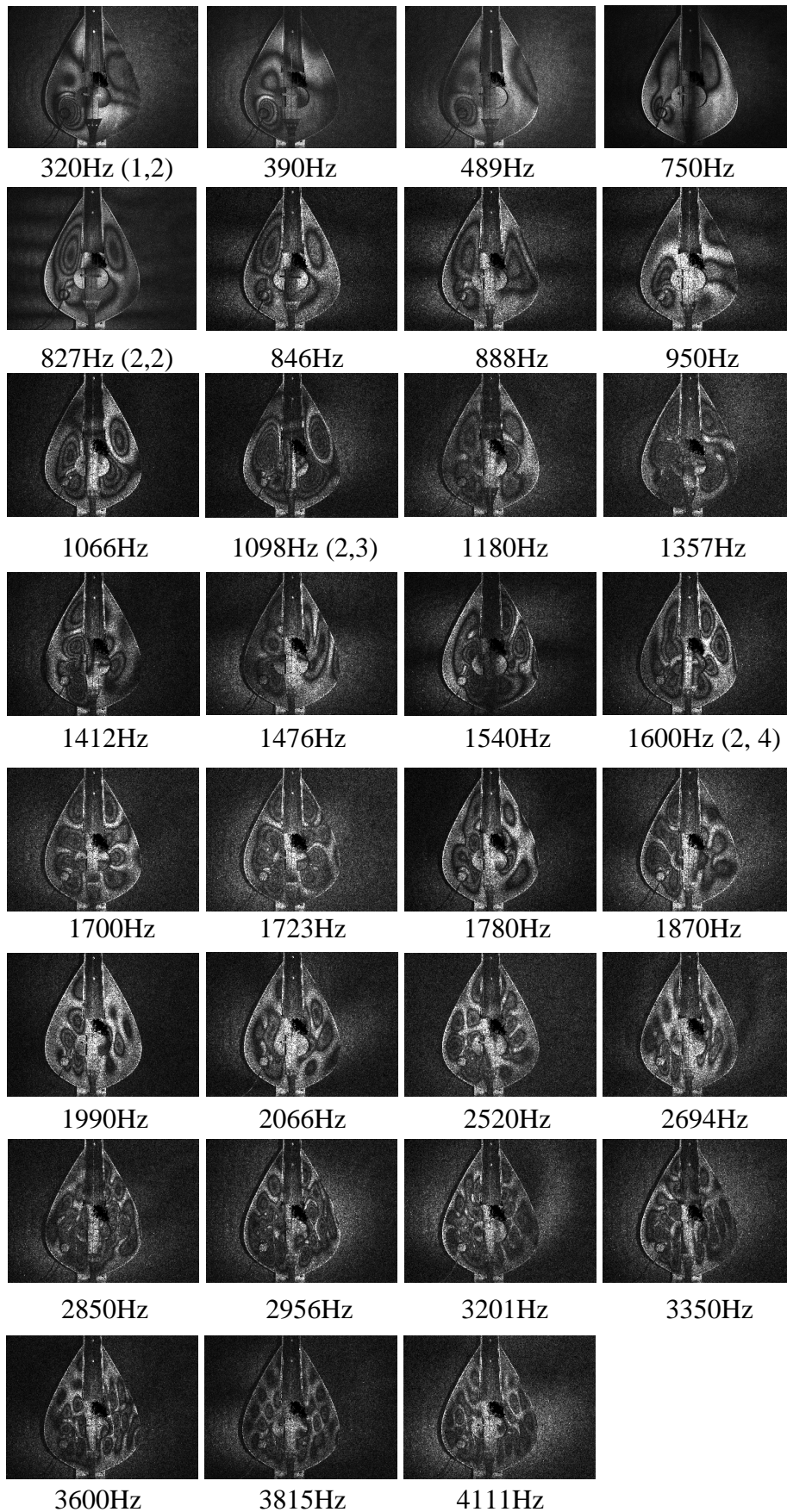
**Εικόνα 3.3.3.3** Συχνωτική απόκριση για την αχλαδόσχημη λύρα 2 ( φάσμα μέσου όρου : η αρίθμηση υποδεικνύει σημαντικούς τρόπους ταλάντωσης ενώ οι «νεκρές» περιοχές / «βυθίσματα» καταγράφονται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή).

Από το παραπάνω φάσμα μέσου όρου που προέκυψε για τη δεύτερη λύρα που μετρήθηκε με τη μέθοδο της ηχοβόλισης εξάγονται σημαντικά στοιχεία για τη δονητική συμπεριφορά του καπακιού.

- Τρεις σημαντικοί συντονισμοί ανιχνεύονται στην χαμηλή περιοχή συχνοτήτων στις συχνότητες 86Hz, 132,7Hz και 211,7Hz αντίστοιχα με τους δύο πρώτους να είναι πιο ξεκάθαροι.
- Το πρώτο μέγιστο (peak) του φάσματος ανιχνεύεται στα 323Hz. Ένας συντονισμός με μικρό πλάτος αλλά ξεκάθαρος εμφανίζεται μετά το πρώτο μέγιστο, στα 466,5Hz στην περιοχή του «βυθίσματος» μεταξύ των δύο πρώτων μεγίστων (1-2).
- Ο δεύτερος και ο τρίτος σημαντικός συντονισμός (2,3-545,5Hz, 779Hz αντίστοιχα) ανιχνεύονται με σχεδόν ίδιο πλάτος ενώ κυριαρχεί ένα απότομο «βύθισμα» μεταξύ αυτών. Στη «νεκρή» αυτή περιοχή εύρους  $\approx 130\text{Hz}$  εντοπίζεται ένας συντονισμός, μικρού πλάτους, στα 664Hz.
- Μειονέκτημα αποτελεί το απότομο «βύθισμα» (με ελάχιστο πλάτος στα 1004Hz) μετά τον τρίτο συντονισμό. Ακολουθεί μία περιοχή με δύο ισχυρούς συντονισμούς στις συχνότητες 1091Hz και 1346Hz (4,5). Μετά τα 1346Hz ανιχνεύεται ακόμη ένα ανεπιθύμητο «βύθισμα».
- Η περιοχή με τους αξιόλογους συντονισμούς 6, 7, 8 (1597Hz, 1712Hz και 2239,5Hz αντίστοιχα) παρουσιάζει μία σχεδόν επίπεδη απόκριση με ικανοποιητικούς συντονισμούς και μία μικρή, σταδιακή μείωση πλάτους από το σημείο 7 έως 8.
- Μετά τα 2.2kHz αρνητικό στοιχείο αποτελεί η απότομη απώλεια πλάτους ταλάντωσης μέχρι τα 2.45kHz. Η φθίνουσα πορεία του πλάτους συνεχίζεται (9, 10) μέχρι την παρουσία ακόμη ενός «βυθίσματος» στη συχνότητα 2953Hz.
- Στην υψηλή περιοχή καταγραφής του φάσματος, μετά τα 3kHz διακρίνεται μία ενίσχυση του πλάτους συντονισμών με εντοπισμένους τέσσερις ισχυρούς συντονισμούς (11, 12, 13, 14-3036kHz, 3287kHz, 3851kHz και 4956kHz αντίστοιχα), αλλά καθόλου ενδεικτικούς μίας «καλής» και επιθυμητής δονητικής συμπεριφοράς. Αρνητικό χαρακτηριστικό της περιοχής αυτής είναι οι «νεκρές» περιοχές που εκτείνονται σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων.



### 3.3.3.2 Αποτελέσματα μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας



Εικόνα 3.3.3.2 Αποτελέσματα μεθόδου ESPI ( λύρα 2 ).



Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της ολογραφικής συμβολομετρίας πραγματοποιήθηκαν σε συχνοτικό εύρος 10Hz – 4500Hz. Περαιτέρω αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης του οργάνου δεν υποστηρίζεται από την καμπύλη απόκρισης του οργάνου και για αυτό δεν προέκυψε κάτι αξιόλογο (δυσδιάκριτοι συντονισμοί) στην καταγραφή των μετρήσεων.

Από τα αποτελέσματα είναι φανερό ότι στις χαμηλές συχνότητες (**320Hz - 750Hz**) δεν είναι ξεκάθαροι οι δύο πρώτοι συντονισμοί (τρόπος συντονισμού (1,1) και (1,2)). Στα 320Hz εντοπίζονται κροσσοί συμβολής μεγαλύτερου πλάτους, χωρίς όμως να σχηματίζεται κάποια κατάσταση συντονισμού (αναμενόμενα modes).

Η κατάσταση συντονισμού (2,2) εντοπίζεται στα 827Hz με πιο έντονους (μεγαλύτερο πλάτος) τους κροσσούς συμβολής στο επάνω μέρος του καπακιού του οργάνου. Κατά τις επόμενες συχνότητες μέτρησης οι κροσσοί μετασχηματίζονται σταδιακά για να καταλήξουν στην επόμενη κατάσταση συντονισμού στα 1098Hz (2,3). Στα 1357Hz και 1600Hz καταγράφονται κάποιες καταστάσεις συντονισμού με αρκετά καθαρούς και πυκνούς κροσσούς. Στα 1700Hz εμφανίζεται μία αρκετά συμμετρική εικόνα συμβολής που κορυφώνεται στα 1723Hz. Έντονο είναι το φαινόμενο του συντονισμού στα 2520Hz και 2956Hz.

Με περαιτέρω αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου πληθαίνουν οι κροσσοί συμβολής και ταυτόχρονα παρατηρείται μείωση του πλάτους τους. Μία σχετικά συμμετρική εικόνα συμβολής ανιχνεύεται στα **3815Hz** χωρίς ευδιάκριτο πλάτος ταλάντωσης κροσσών.

Από το σύνολο των εικόνων που καταγράφηκαν μέσω της οπτικής μεθόδου ανίχνευσης των τρόπων ταλάντωσης της δεύτερης λύρας είναι εμφανές ότι η επάνω περιοχή (από τα «μάτια» / οπές και πάνω) του καπακιού χαρακτηρίζεται από περισσότερους και πιο οξείς συντονισμούς σε σχέση με την κάτω περιοχή. Το ίδιο συμβαίνει και με τη δεξιά πλευρά (δεξιά του κατακόρυφου άξονα στήριξης) της επιφάνειας του καπακιού, γεγονός που προδίδει μία ασυμμετρία στην κατασκευή του οργάνου (διαφορετικό πλάτος καπακιού, ύπαρξη ασύμμετρων ραβδώσεων ξύλου). Τόσο η ασυμμετρία στις εικόνες συμβολής όσο και η έλλειψη ξεκάθαρων-εμφανών κροσσών (χαμηλό contrast κροσσών) προσδίδουν «ανισορροπία» στη συμπεριφορά του οργάνου κατά την ταλάντωσή του και συνεπώς στον εκπεμπόμενο ήχο.

### 3.3.4 Λύρα Αχλαδόσχημη ( Λαγουδάκη )

#### 3.3.4.1 Αποτελέσματα ηχοβόλισης

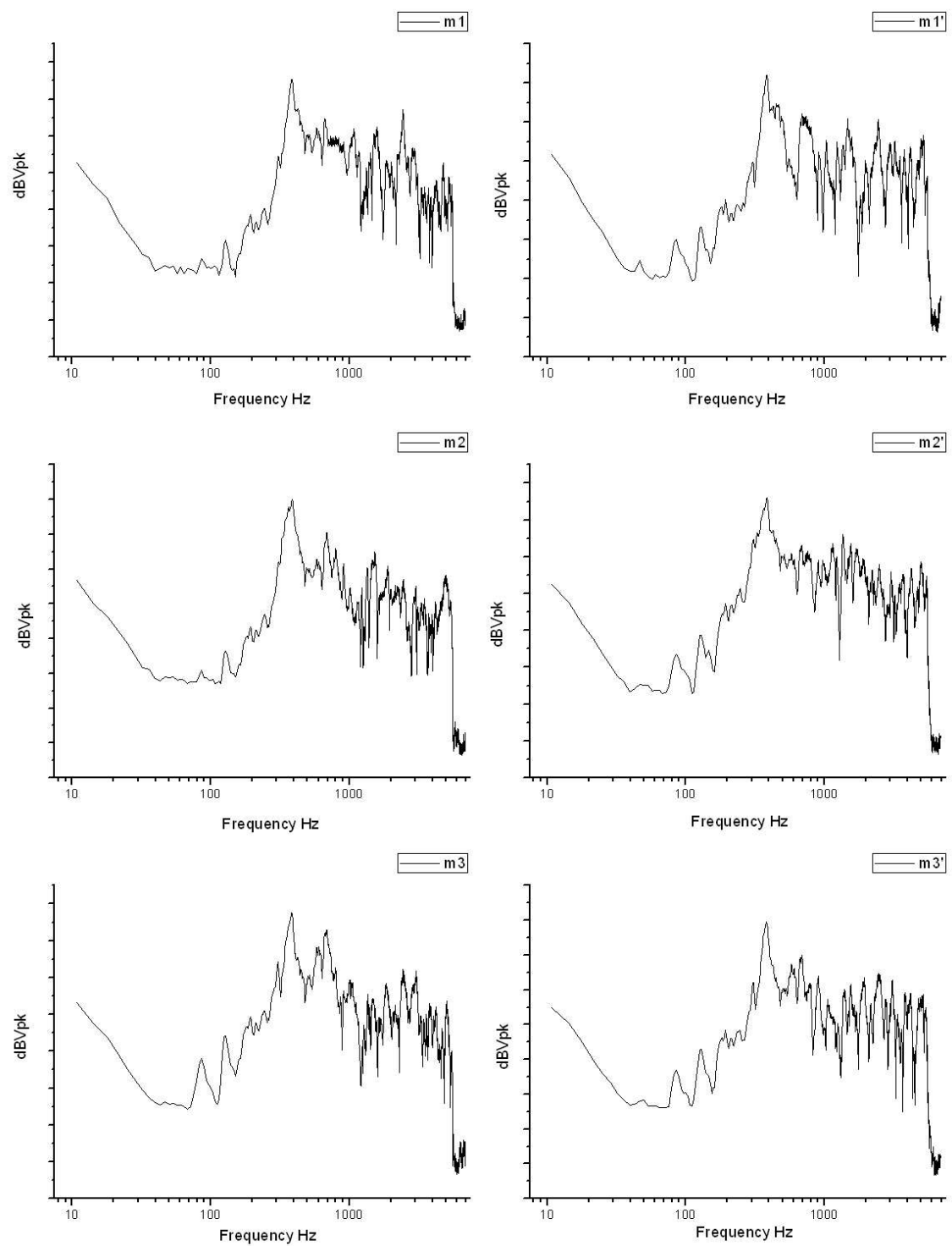
Η τρίτη λύρα είναι μία αχλαδόσχημη λύρα, η οποία κάτω από τις ίδιες συνθήκες μέτρησης με τις δύο προηγούμενες λύρες (ίδιος εξοπλισμός, ίδια στήριξη, ίδιες συνθήκες πειράματος-βλ. §3.3.1) ηχοβολήθηκε με σκοπό να εξαχθούν τα γραφήματα των συχνοτικών αποκρίσεων και να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις άλλες λύρες.



**Εικόνα 3.3.4.1** Συνθήκες μέτρησης αχλαδόσχημης λύρας 3 :

- α) στήριξη σώματος λύρας ( μόνωση χορδών ) – εφαρμογή πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου/ανιχνευτή πάνω στην επιφάνεια καπακιού, β) διέγερση λύρας με ηχείο.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στα έξι αντιδιαμετρικά σημεία τοποθέτησης του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη παρουσιάζονται παρακάτω. Ακολουθεί το φάσμα μέσου όρου που απεικονίζει τη συνολική δονητική συμπεριφορά του οργάνου (βλ. §3.3.2.1).

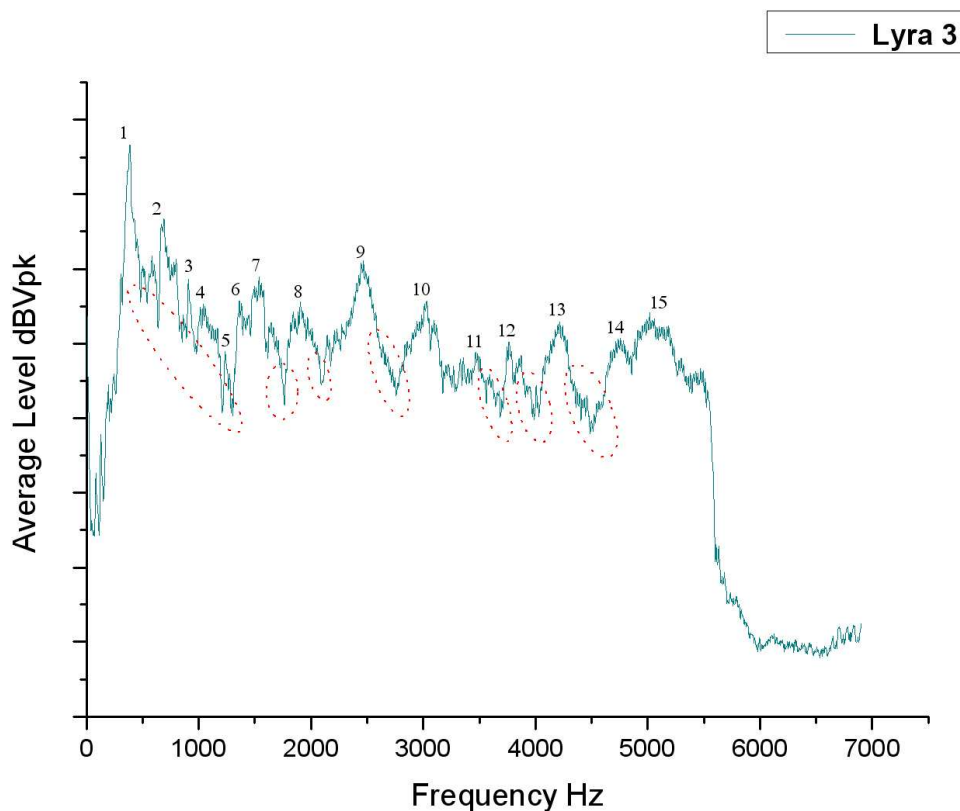


**Εικόνα 3.3.4.2** Αποτελέσματα μεθόδου ηχοβόλισης ( για τα έξι σημεία μέτρησης ).

Μία γενική σύγκριση των γραφημάτων που προέκυψαν οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η λύρα που μετρήθηκε χαρακτηρίζεται από μία ανομοιομορφία στον τρόπο που συμπεριφέρεται κατά την αρμονική διέγερση. Αυτό φαίνεται από τις «νεκρές» περιοχές που καταγράφονται σε όλα τα σημεία μέτρησης ιδιαίτερα στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων. Είναι εμφανείς οι συνεχείς και απότομες πτώσεις πλάτους στις καμπύλες απόκρισης αλλά και οι συντονισμοί με μικρό παράγοντα Q (μεγάλη διαφορά συχνοτικού εύρους  $f_2-f_1$ ).

Τα δύο μέγιστα πλάτη της καμπύλης απόκρισης εντοπίζονται στην συχνοτική περιοχή 280Hz-600Hz. Ειδικότερα, το πρώτο μέγιστο είναι εμφανές σε όλα τα σημεία μέτρησης ενώ το δεύτερο μέγιστο καταγράφεται με αρκετά μικρό έως καθόλου ανιχνεύσιμο πλάτος.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα γραφήματα συχνοτικής απόκρισης της τρίτης λύρας απέχουν αρκετά από την χαρακτηριστική καμπύλη αποκρίσης ενός «καλού» οργάνου. Βασικά μειονεκτήματα αποτελούν οι «νεκρές» περιοχές, η «ανισόρροπη» ενίσχυση των συντονισμών και η «εξαφάνιση» βασικών συντονισμών. Επιπλέον, η διαφορά ανάμεσα στις καμπύλες απόκρισης των αντιδιαμετρικών σημείων προσδίδει μία ασυμμετρία στην κατασκευή του καπακιού.

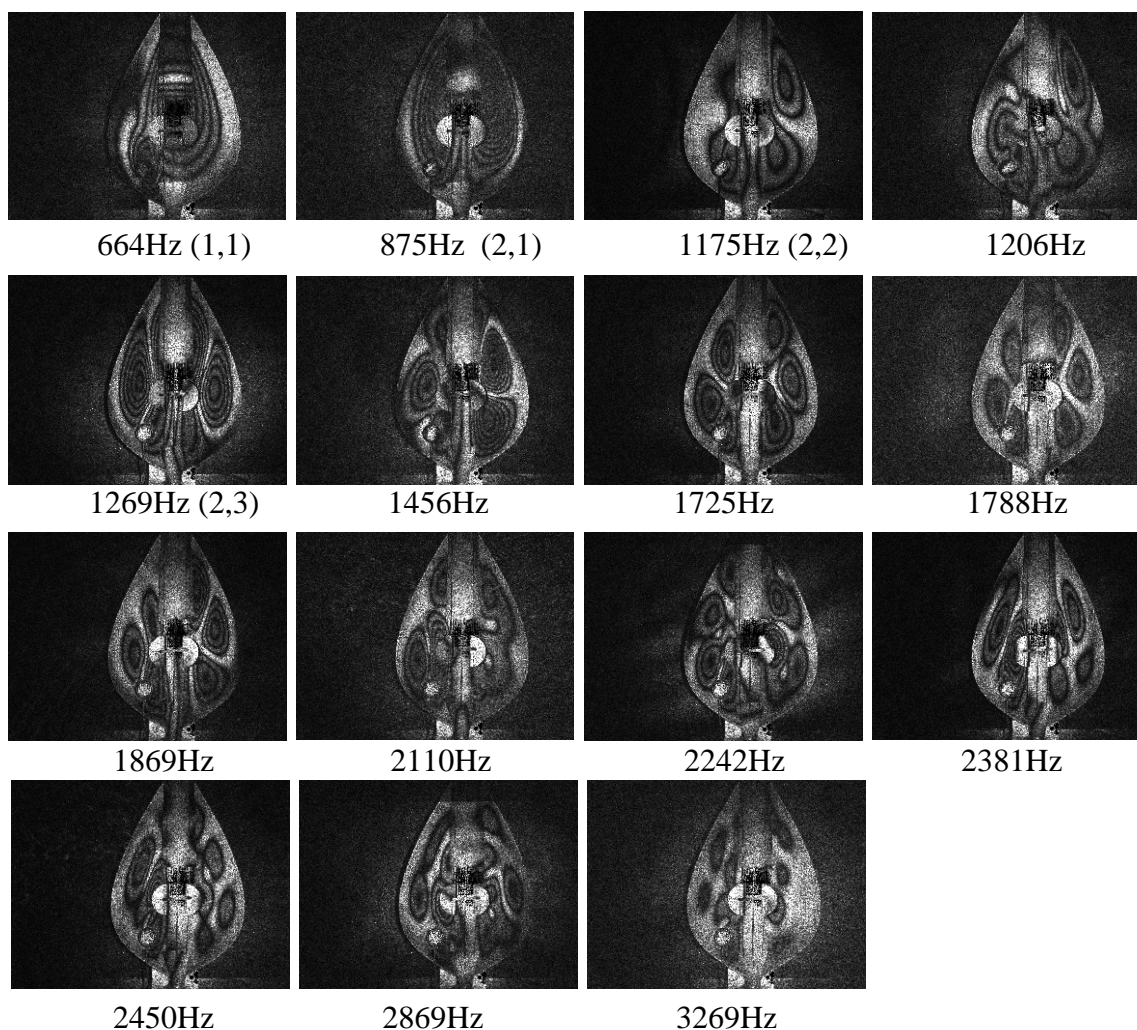


**Εικόνα 3.3.4.3** Συχνοτική απόκριση για την αχλαδόσχημη λύρα 3 ( φάσμα μέσου όρου : η αρίθμηση υποδεικνύει σημαντικούς τρόπους ταλάντωσης ενώ οι «νεκρές» περιοχές / «βυθίσματα» καταγράφονται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή ).

Από το φάσμα μέσου όρου για την τρίτη λύρα που μετρήθηκε με τη μέθοδο της ηχοβόλισης προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία :

- Δεν εντοπίζονται ξεκάθαρα οι συντονισμοί στην χαμηλή περιοχή συχνοτήτων από την αρχή καταγραφής του φάσματος έως τα 305Hz. Ελάχιστα εμφανής είναι ο συντονισμός στα 129Hz.
- Το πρώτο μέγιστο ανιχνεύεται στη συχνότητα 387,6Hz ενώ ο δεύτερος, κατά σειρά αναμενόμενος σημαντικός συντονισμός εντοπίζεται με πολύ μικρότερο πλάτος στα 689Hz.
- Μετά το δεύτερο μέγιστο το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται απότομα (3, 4, 5) μέχρι τα 1300Hz περίπου, με κύριο αρνητικό χαρακτηριστικό το «βύθισμα» στο σημείο 1238Hz (συντονισμός 5). Ο τρίτος αναμενόμενος σημαντικός συντονισμός μόλις που ανιχνεύεται – με πολύ μικρό πλάτος – στη συχνότητα των 908Hz.
- Η περιοχή 1300Hz-3170Hz δεν αποτελεί χαρακτηριστική μίας «καλής» δονητικής συμπεριφοράς εφόσον κατακλύζεται από «κακούς» συντονισμούς (με μικρό παράγοντα ποιότητας /  $\Delta f \gg$ ), οι οποίοι ακολουθούνται από απότομη μείωση του πλάτους ταλάντωσης («βυθίσματα» μεγάλου εύρους ζώνης). Οι συντονισμοί αυτοί σημειώνονται στις συχνότητες 1360Hz, 1536Hz, 1906Hz, 2469Hz και 3032,6Hz (6, 7, 8, 9, 10 αντίστοιχα).
- Στην υψηλή περιοχή καταγραφής του φάσματος η απόκριση θεωρείται ελαφρώς «καλύτερη» στο συχνοτικό εύρος 3.1kHz-4.22kHz. Καταγράφεται μία μικρή ενίσχυση του πλάτους συντονισμών (11, 12, 13-3467Hz, 3765Hz, 4220,5Hz αντίστοιχα) από τα 3170Hz έως τα 4220Hz, με τις τιμές πλάτους να είναι οι χαμηλότερες της μέτρησης. Αρνητικά είναι τα απότομα, διαδοχικά «βυθίσματα» μετά τα μέγιστα (peaks) των συντονισμών 11, 12, 13. Στο εύρος συχνοτήτων 4.5kHz-5.5kHz ανιχνεύονται δύο «κακοί» συντονισμοί (αξιόλογου πλάτους) στα 4784Hz και 5017Hz (14, 15).

### 3.3.4.2 Αποτελέσματα μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας



Εικόνα 3.3.4.2 Αποτελέσματα μεθόδου ESPI ( λύρα 3 ).

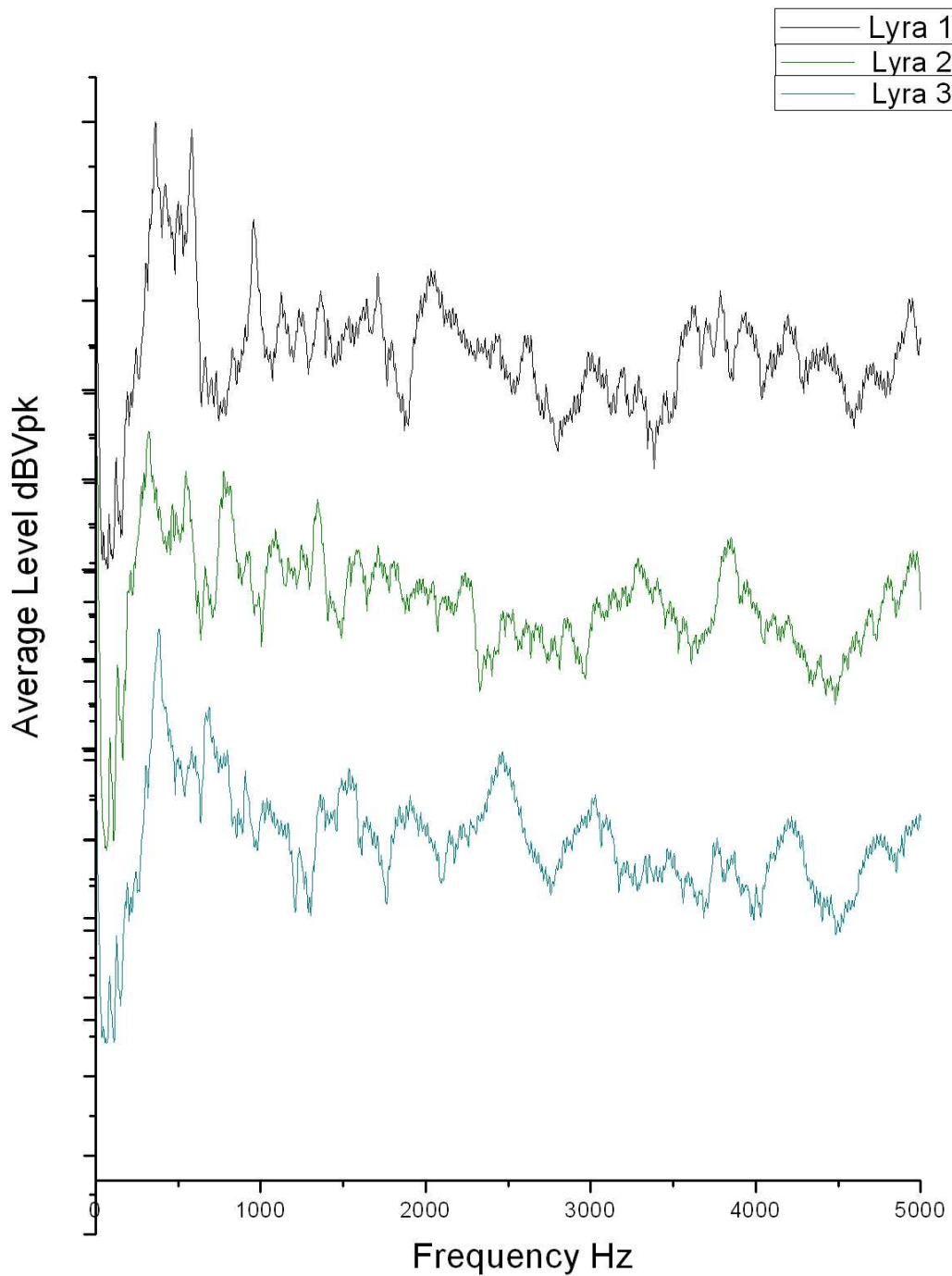
Το συχνοτικό εύρος των μετρήσεων της ολογραφικής συμβολομετρίας για την τρίτη λύρα ήταν 40Hz-3500Hz. Οι εικόνες που παρουσιάζονται παραπάνω περιέχουν τόσο τις σημαντικές καταστάσεις δόνησης που ανιχνεύτηκαν όσο και κάποιες ενδιάμεσες – «μεταβατικές» εικόνες με έντονους σχηματισμούς κροσσών. Περαιτέρω αύξηση της συχνότητας δεν επέφερε κάποιο αξιολογικό αποτέλεσμα.

Στην πρώτη εικόνα συμβολής, στη συχνότητα των 664Hz, καταγράφηκε η πρώτη κατάσταση συντονισμού (1,1) με εμφανή το συμμετρικό λοβό κροσσών στο κέντρο της επιφάνειας του καπακιού. Ο επόμενος τρόπος ταλάντωσης (2,1) με δύο ευδιάκριτους λοβούς κροσσών, αριστερά και δεξιά του κατακόρυφου άξονα στήριξης, ανιχνεύτηκε στη συχνότητα των 875Hz. Στα 1175Hz εμφανίστηκε η τρίτη κατάσταση συντονισμού (2,2) με τους δύο λοβούς κροσσών να είναι ξεκάθαρα σχηματισμένη στην αριστερά πλευρά του καπακιού της λύρας. Στην αριστερή πλευρά οι αντίστοιχοι αναμενόμενοι κροσσοί δεν είναι τόσο ορατοί. Αυξάνοντας τη συχνότητα διέγερσης οι κροσσοί συμβολής διατηρούν το πλάτος τους και μετασχηματίζονται μέχρι να καταλήξουν στο σχηματισμό της εικόνας των 1269Hz

(επόμενο mode (2,3)) με αριστερά και δεξιά (στα κοίλα μέρη του καπακιού) να εμφανίζονται δύο ξεκάθαροι λοβοί κροσσών.

### 3.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων-συγκρίσεις

#### 3.4.1 Σύγκριση δονητικής συμπεριφοράς λυρών – Μηχανική μέθοδος



Εικόνα 3.4.1.1 Συχνотική απόκριση μέσου όρου για τις τρεις λύρες ( μέθοδος ηχοβόλισης ).

Στην παράγραφο αυτή κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός κοινού γραφήματος απεικόνισης της μέσου όρου δονητικής συμπεριφοράς των τριών λυρών έτσι ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της μηχανικής μεθόδου. Σημαντικές ομοιότητες αλλά και διαφορές (στο πεδίο της συχνότητας) εντοπίστηκαν για κάθε όργανο και παρατίθενται παρακάτω, στα πλαίσια πάντα μιας ποιοτικής ανάλυσης.

1. Συντονισμοί (μικρού πλάτους) ανιχνεύονται στην χαμηλότερη περιοχή καταγραφής των φασμάτων στις συχνότητες 83Hz-86Hz, 125Hz-133Hz, 193Hz-212Hz και 248Hz. Η δεύτερη λύρα εμφανίζει πιο ξεκάθαρους χαμηλόσυχνους συντονισμούς.
2. Μέγιστο πλάτος ταλάντωσης στις συχνότητες 362,5Hz, 323Hz και 388Hz για την πρώτη, δεύτερη και τρίτη λύρα, αντίστοιχα.
3. Σημαντική κατανομή ενέργειας στις συχνότητες 585Hz, 545,5Hz και 689Hz (δεύτερη «κορυφή» φάσματος). Στην τρίτη λύρα ο συντονισμός αυτός ανιχνεύεται με πολύ μικρότερο πλάτος.
4. Απότομη πτώση πλάτους για όλες τις λύρες μεταξύ του δεύτερου και τρίτου σημαντικού συντονισμού, ο οποίος (τρίτος) καταγράφεται στις συχνότητες 958Hz, 779Hz και 908Hz.
5. Ενίσχυση πλάτους συντονισμών για την πρώτη λύρα στο εύρος 1kHz-2kHz με οξείς συντονισμούς στα 1127Hz, 1364Hz, 1712Hz, 2035Hz. Σταδιακή μείωση πλάτους ταλάντωσης για τη δεύτερη λύρα στο ίδιο συχνοτικό εύρος με εμφανείς συντονισμούς στα 1091Hz, 1346Hz, 1597Hz, 1712Hz. Απότομη πτώση πλάτους συντονισμών μέχρι τα 1.3kHz για την τρίτη λύρα, με ασθενείς συντονισμούς στα 1360Hz, 1536Hz, 1906Hz.
6. Σταδιακή μείωση πλάτους ταλάντωσης στην περιοχή 2kHz-3.4kHz (λύρα 1) και καταγραφή συντονισμών με το χαμηλότερο πλάτος φάσματος στην περιοχή 2.2kHz-2.9kHz (λύρα 2-σημαντικός συντονισμός στα 2240Hz). «Κακοί» συντονισμοί για την τρίτη λύρα στο εύρος 2kHz-3kHz, με δύο μόνο ισχυρούς συντονισμούς στα 2469Hz και 3033Hz.
7. Στην υψηλή περιοχή καταγραφής υπάρχει ενίσχυση πλάτους συντονισμών στο εύρος 3.5kHz-4.7kHz, με αξιόλογους συντονισμούς στις συχνότητες 3617Hz, 3790Hz, 3940Hz, 4199Hz, 4953Hz, 5160Hz (λύρα 1). Μετά τα 3kHz ανιχνεύονται εξίσου ισχυροί συντονισμοί (όχι τόσο οξείς) στα 3036Hz, 3287Hz, 3851Hz, 4956Hz (λύρα 2). Μικρή ενίσχυση πλάτους εντοπίζεται στο εύρος 3.1kHz-4.22kHz με συντονισμούς στα 3467Hz, 3765Hz, 4221kHz (λύρα 3) και στα 4784Hz, 5017Hz.

Σημαντικό πλεονέκτημα για την πρώτη λύρα αποτελούν οι ισχυροί συντονισμοί ιδιαίτερα στις μεσαίες και υψηλές περιοχές καταγραφής (οξύτερα τα δύο πρώτα μέγιστα). Ακόμη η σχετικά επίπεδη απόκριση που παρουσιάζει στην περιοχή 958Hz-1.7kHz καθώς και το ικανοποιητικό πλάτος συντονισμών στην υψηλή περιοχή 3.5kHz-5kHz αποτελούν θετικά στοιχεία στη συνολική δονητική συμπεριφορά της. Αρνητικό χαρακτηριστικό θεωρείται η φθίνουσα πορεία της απόκρισης στην περιοχή 2kHz-3.4kHz καθώς και κάποια απότομα «βυθίσματα» στην περιοχή αυτή.

Η συχνοτική απόκριση της δεύτερης λύρας χαρακτηρίζεται από σταδιακή μείωση του πλάτους συντονισμών μετά τη βασική συχνότητα 779Hz (τρίτο μέγιστο) έως τα 2.3kHz ενώ παρουσιάζει ξεκάθαρους συντονισμούς σε ιδιαίτερα χαμηλές συχνότητες. Τα χαμηλότερα πλάτη ταλάντωσης καταγράφονται στην περιοχή



2.3kHz-2.9kHz. Η απόκριση στην υψηλή περιοχή όμως δεν είναι αντιπροσωπευτική μιας «επιθυμητής» δονητικής συμπεριφοράς. Πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη και στα «βυθίσματα» που εντοπίζονται στο δεύτερο φάσμα ανιχνεύονται μικροί αλλά διακριτοί συντονισμοί. Οι συχνότητες των σημαντικών συντονισμών στη δεύτερη λύρα είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές των άλλων δύο λυρών.

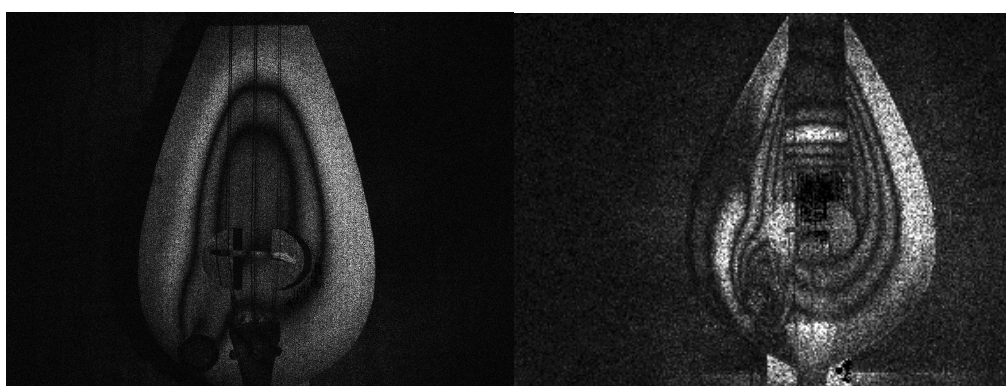
Το φάσμα μέσου όρου για την τρίτη λύρα χαρακτηρίζεται από μία γενική ανομοιομορφία, με κυρίαρχα τα απότομα «βυθίσματα» και τους συντονισμούς μικρού παράγοντα ποιότητας.

Στηριζόμενοι στην παραδοχή ότι είναι προτιμότερη μία σταδιακά φθίνουσα πορεία φάσματος από μία ανομοιόμορφη, με απότομες αυξομειώσεις πλάτους ταλάντωσης, απόκριση εύκολα συμπεραίνουμε την «υπεροχή» της δεύτερης λύρας. Οι ισχυροί συντονισμοί που ανιχνεύτηκαν στο φάσμα της πρώτης λύρας αλλά και η αξιόλογη συμπεριφορά της στις υψηλές συχνότητες υποδεικνύουν την ύπαρξη μίας εξίσου «καλής» δονητικής συμπεριφοράς.

### 3.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων οπτικής μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας

Στην παράγραφο αυτή κρίθηκε σκόπιμη η συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας των τριών λυρών που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις. Ακολουθούν οι εικόνες συμβολής των κοινών καταστάσεων συντονισμού που ανιχνεύτηκαν σε κάθε λύρα έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση αυτών. Τα αγγλικά γράμματα a, b, c αναφέρονται στις λύρες 17<sup>ου</sup> αιώνα, Σταγάκη και Λαγουδάκη αντίστοιχα.

Στην εικόνα 3.4.2.1 παρουσιάζεται η πρώτη κατάσταση συντονισμού (mode (1,1)) που προέκυψε από τη μέτρηση της λύρας 17<sup>ου</sup> αιώνα και της λύρας Λαγουδάκη (a και c). Πρόκειται για έναν ξεκάθαρο λοβό κροσσών στο κέντρο του καπακιού κάθε λύρας. Οι ιδιοσυχνότητες του πρώτου / κύριου συντονισμού διαφέρουν κατά 100Hz. Κατά τη μέτρηση της δεύτερης κατά σειρά λύρας (b-Σταγάκη) δεν εντοπίστηκε ο πρώτος ανιχνεύσιμος συντονισμός με τη μέθοδο ESPI.

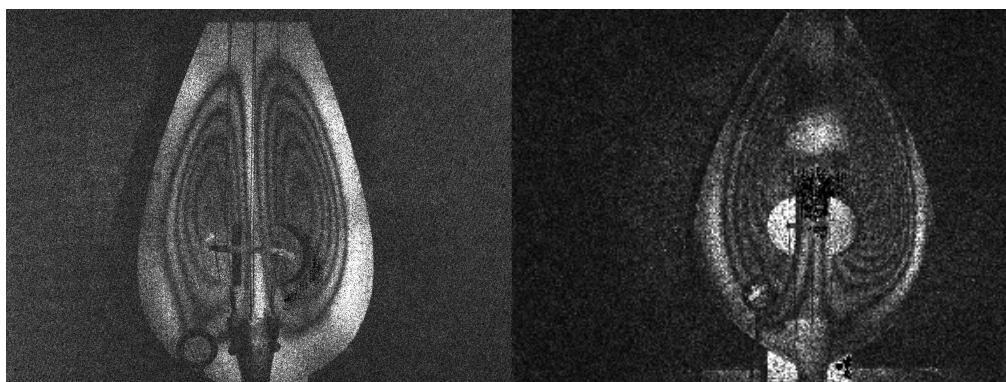


558Hz (1,1)a

664Hz (1,1)c

Εικόνα 3.4.2.1

Ο δεύτερος συντονισμός, με δύο λοβούς αριστερά και δεξιά του κατακόρυφου άξονα στήριξης, ανιχνεύτηκε στα 824Hz και 875Hz για τις λύρες a και c, αντίστοιχα (Εικόνα 3.4.2.2, (2,1)). Οι κροσσοί της λύρας a είναι πιο καθαροί και συμμετρικοί σε σχέση με τους κροσσούς της λύρας c, η οποία εμφανίζει τον δεύτερο τρόπο ταλάντωσης εξίσου καλά. Στην καταγραφή αυτή δεν ανιχνεύτηκε το δεύτερο mode στη λύρα b.

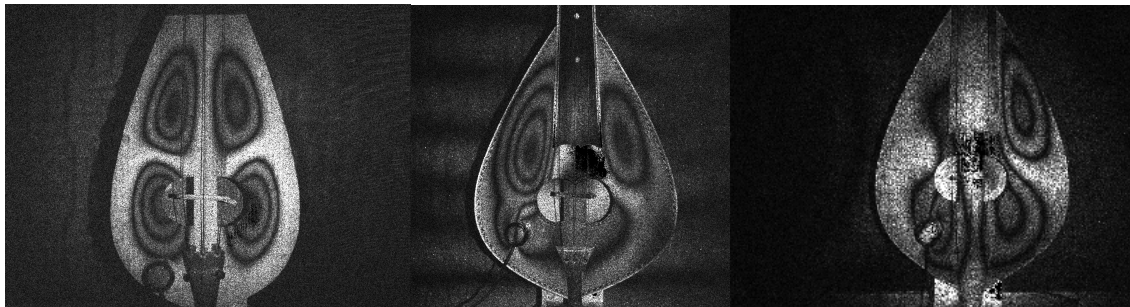


824Hz (2,1)a

875Hz (2,1)c

Εικόνα 3.4.2.2

Ακολουθούν οι εικόνες συμβολής του τρίτου συντονισμού (Εικόνα 3.4.2.3-(2,2)), ο οποίος εντοπίστηκε και στις τρεις λύρες. Εκτός από τη διαφορά στις τιμές των ανιχνεύσιμων συχνοτήτων, παρατηρούνται «αλλοιώσεις» στην εικόνα συμβολής των λυρών b και c (ασυμμετρία και έλλειψη κροσσών). Αντίθετα, η λύρα a υποστηρίζει τον τρίτο τρόπο ταλάντωσης πολύ καλά, εμφανίζοντας τέσσερις συμμετρικούς και ευδιάκριτους λοβούς κροσσών.



1294Hz a

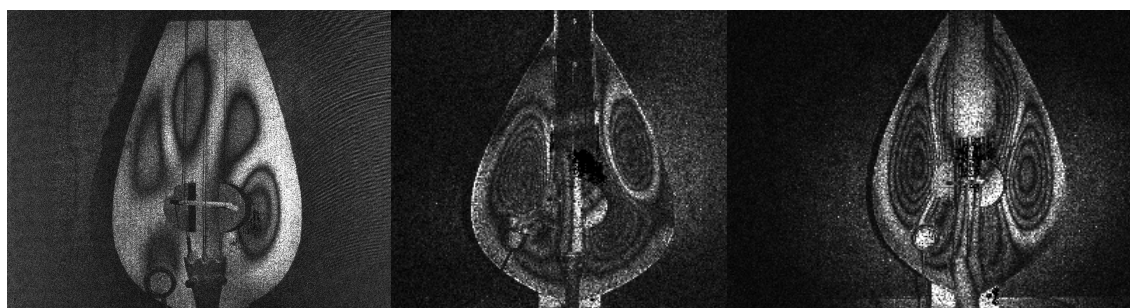
827Hz b

1175Hz c

mode (2,2)

Εικόνα 3.4.2.3

Ο τέταρτος συντονισμός των τριών λυρών φαίνεται στην Εικόνα 3.4.2.4. Η λύρα a δονείται στον επόμενο καταγεγραμμένο τρόπο ταλάντωσης παρουσιάζοντας σχεδόν συμμετρικούς, με μικρή διακριτότητα, κροσσούς στην επιφάνεια του καπακιού. Η προκύπτουσα διάταξη κροσσών προσεγγίζει ικανοποιητικά την εικόνα συμβολής του συγκεκριμένου συντονισμού σε σύγκριση με τις άλλες δύο λύρες. Οι εικόνες συμβολής των λυρών b και c χαρακτηρίζονται από περιοχές μεγαλύτερου πλάτους ταλάντωσης (σε ολόκληρη την επιφάνεια καπακιού) σε σχέση με τη λύρα a, η οποία παρουσιάζει έναν όχι τόσο ευκρινή και συμμετρικό συντονισμό.



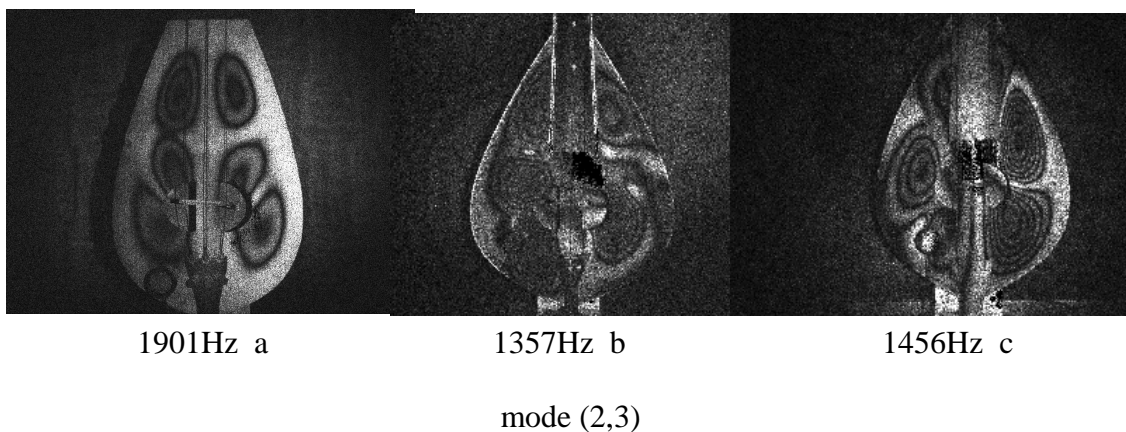
1472Hz a

1098Hz b

1269Hz c

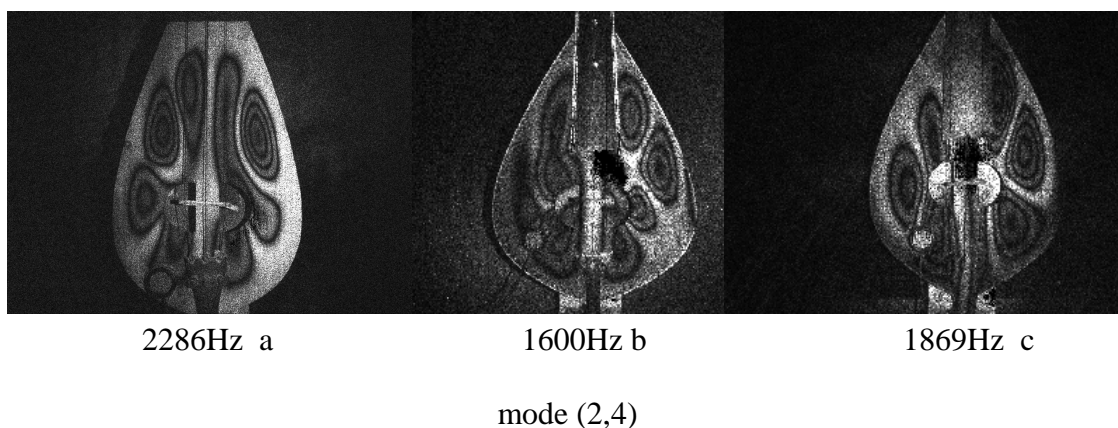
Εικόνα 3.4.2.4

Στα 1901Hz ανιχνεύτηκε ο 2,3 τρόπος ταλάντωσης για τη λύρα a. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.4.2.5) φαίνονται οι έξι, σχεδόν συμμετρικοί, «λοβοί» κροσσών της λύρας a (με την επάνω περιοχή καπακιού να ταλαντώνεται με μεγαλύτερο πλάτος). Η εικόνα συμβολής της λύρας b δεν παρουσιάζει ευδιάκριτους κροσσούς (ιδιαίτερα στην δεξιά πλευρά) χωρίς όμως να υπάρχουν αμφιβολίες για τον εντοπισμό του συγκεκριμένου ιδιορυθμού. Το καπάκι της λύρας c ταλαντώνεται με μεγαλύτερο πλάτος στην δεξιά πλευρά, προσδίδοντας ασυμμετρία στην εικόνα συμβολής. Αυτή η κατάσταση συντονισμού καταγράφεται ικανοποιητικά και για τις τρεις λύρες.



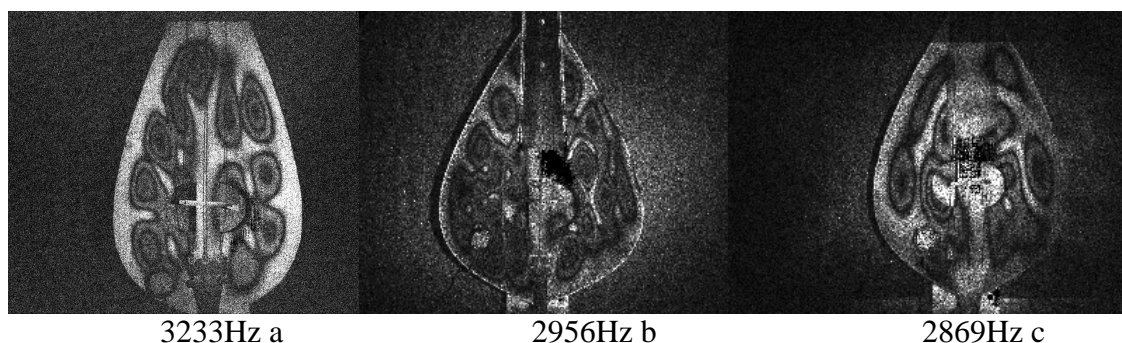
**Εικόνα 3.4.2.5**

Στις εικόνες συμβολής που ακολουθούν δεν είναι ξεκάθαρος ο τρόπος ταλάντωσης των λυρών. Υποθέτουμε ότι πρόκειται για τον 2,4 τρόπο ταλάντωσης (Εικόνα 3.4.2.6). Η μικρή διακρίτοτητα και η ασύμμετρη διάταξη των κροσσών (ιδιαίτερα στις λύρες b και c) αποτελούν αρνητικό στοιχείο και για τις τρεις λύρες. Η λύρα a δονείται σχεδόν ομοιόμορφα (σε όλη την επιφάνεια του καπακιού) υποστηρίζοντας το συγκεκριμένο τρόπο ταλάντωσης ικανοποιητικά. Αντίθετα, οι άλλες δύο λύρες δεν παρουσιάζουν ξεκάθαρους κροσσούς σε όλη την επιφάνεια του καπακιού, με τη δεξιά πλευρά (ως προς τον κατακόρυφο άξονα στήριξης) να εμφανίζει μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης από ότι η αριστερή.



**Εικόνα 3.4.2.6**

Στις υψηλότερες συχνότητες μέτρησης ανιχνεύτηκε ένας ακόμη κοινός τρόπος ταλάντωσης. Η διακριτότητα της εικόνας συμβολής της λύρας a είναι αρκετά μεγάλη γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά τη δονητική συμπεριφορά της στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων. Όλη η επιφάνεια του καπακιού (λύρα a) κατακλύζεται από ξεκάθαρους κροσσούς στα 3233Hz (Εικόνα 3.4.2.7). Ακολουθεί η λύρα b με αρκετούς κροσσούς, σχετικά μικρής διακριτότητας και η λύρα c με ελάχιστους ευδιάκριτους κροσσούς στο κέντρο του καπακιού (οριζόντιος άξονας). Είναι εμφανής η δυσκολία σχηματισμού του συγκεκριμένου τρόπου ταλάντωσης στη λύρα c.



3233Hz a

2956Hz b

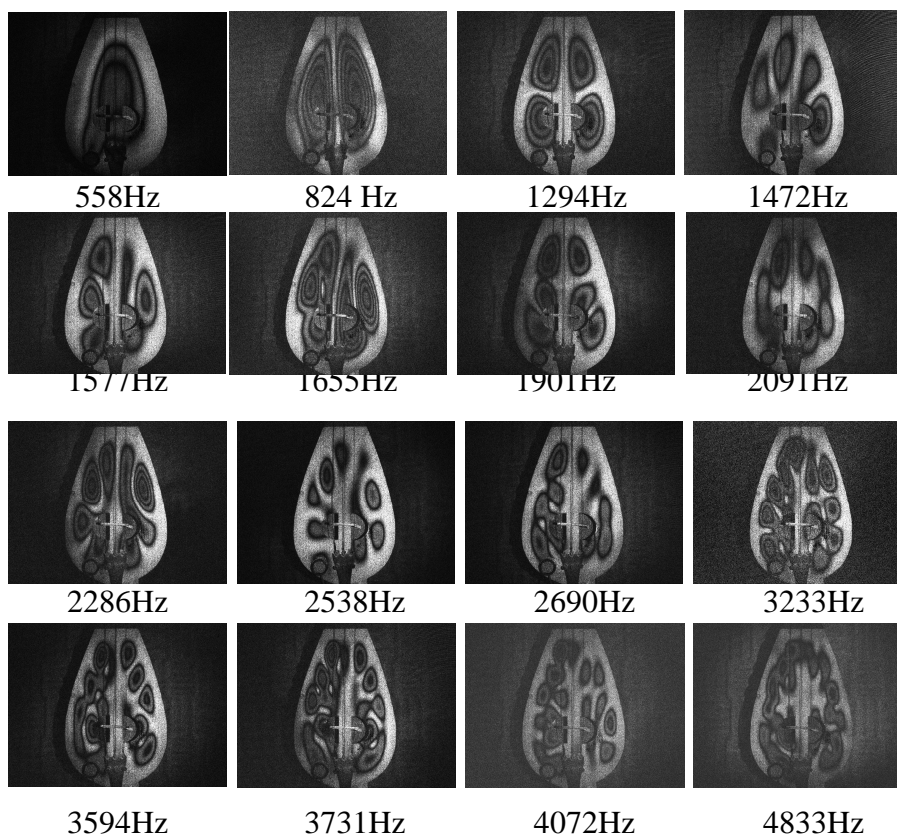
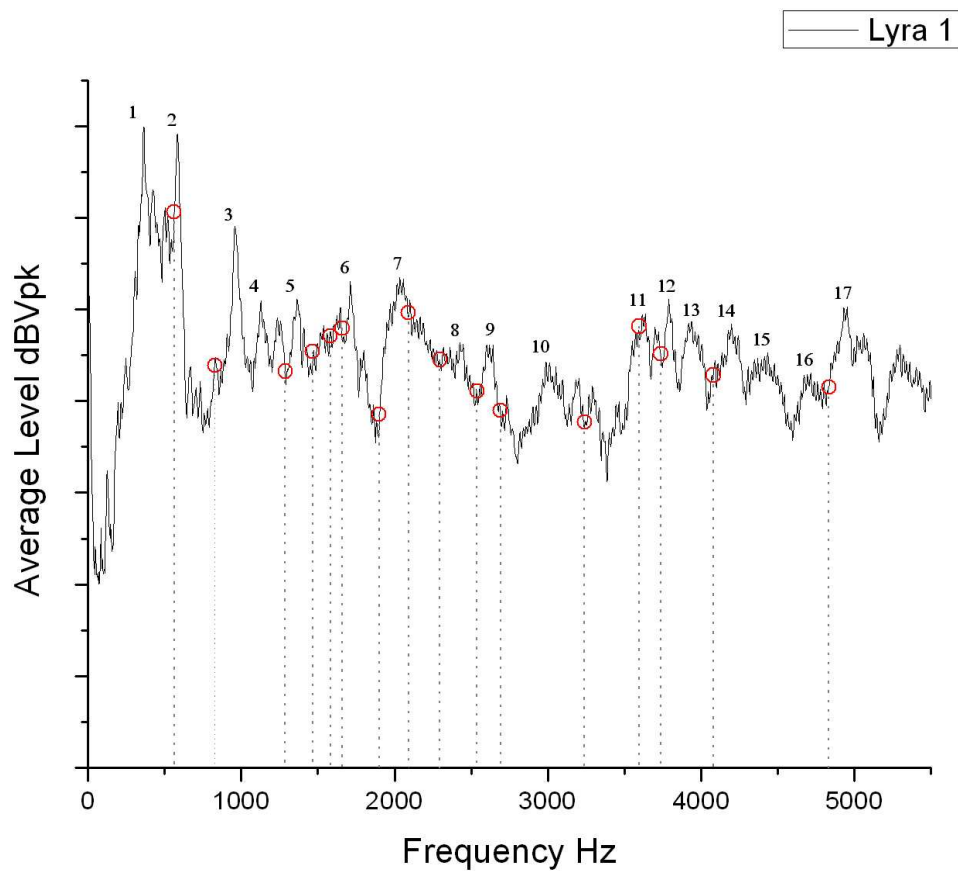
2869Hz c

Εικόνα 3.4.2.7

### 3.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ηχοβόλισης και ολογραφικής συμβολομετρίας (ESPI)

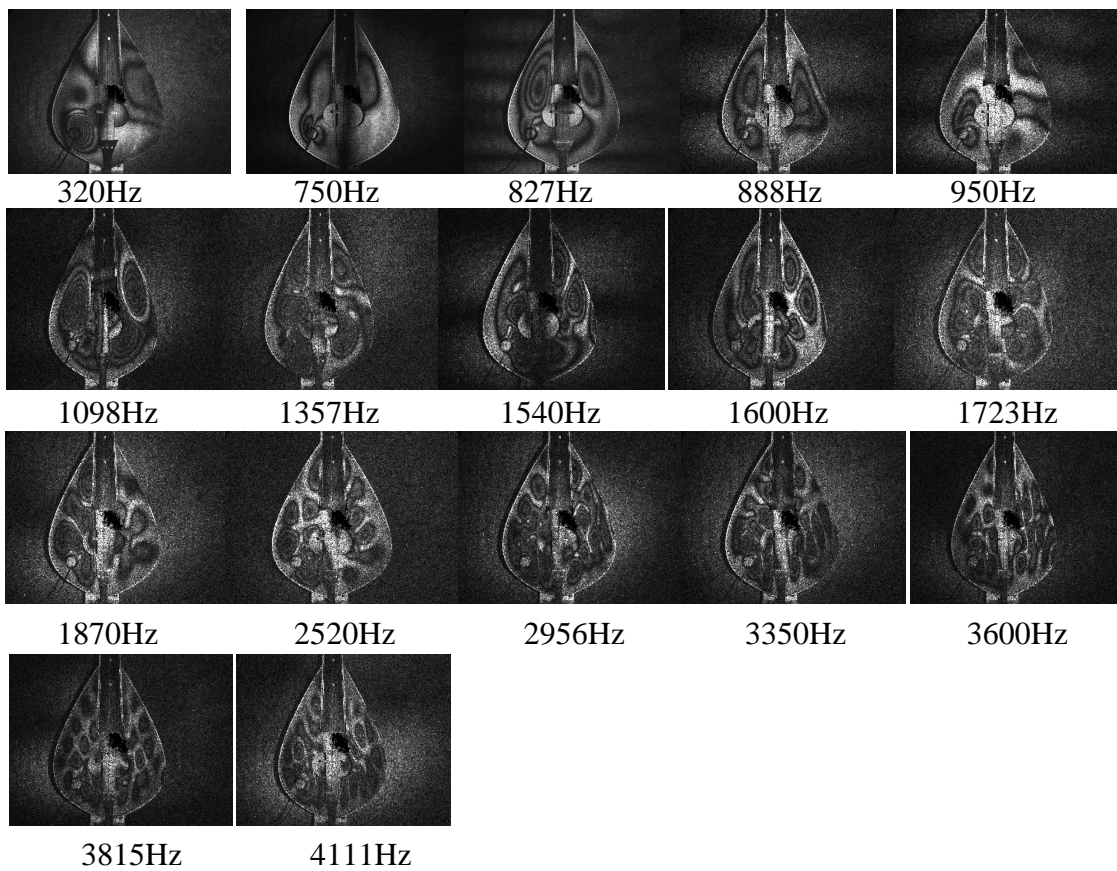
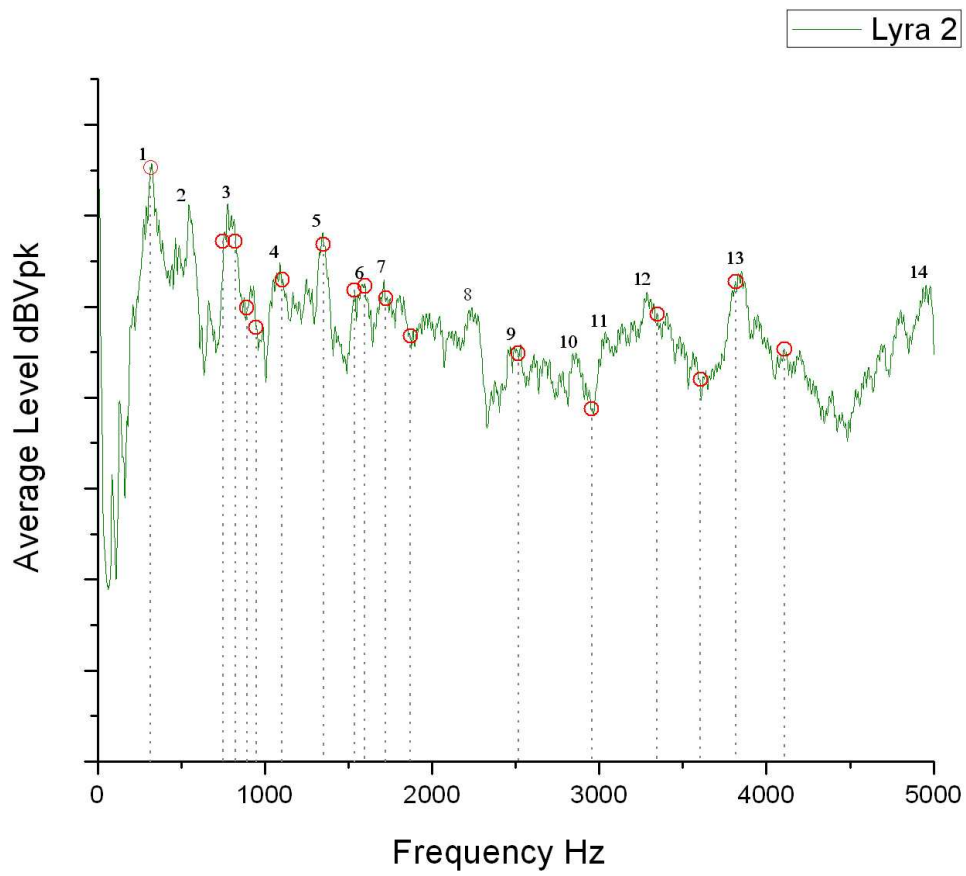
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα και των δύο μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην εργασία, σε ένα κοινό γράφημα (για κάθε λύρα) έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολη η σύγκριση μεταξύ τους.

Κάθε συχνοτική απόκριση μέσου όρου που προέκυψε για τις τρεις λύρες απεικονίζει τόσο τους σημαντικούς εντοπισμένους συντονισμούς από την εφαρμογή της ηχοβόλισης (αρίθμηση) όσο και την αντιστοιχία – στο πεδίο συχνότητας - των βασικών εικόνων συμβολής που ανιχνεύτηκαν από την εφαρμογή της ESPI (κόκκινοι κύκλοι). Παρατηρώντας τα συγκριτικά αυτά διαγράμματα μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα κάθε μεθόδου αλλά και να εντοπίσουμε ομοιότητες και διαφορές στη συνολική δονητική συμπεριφορά κάθε οργάνου.

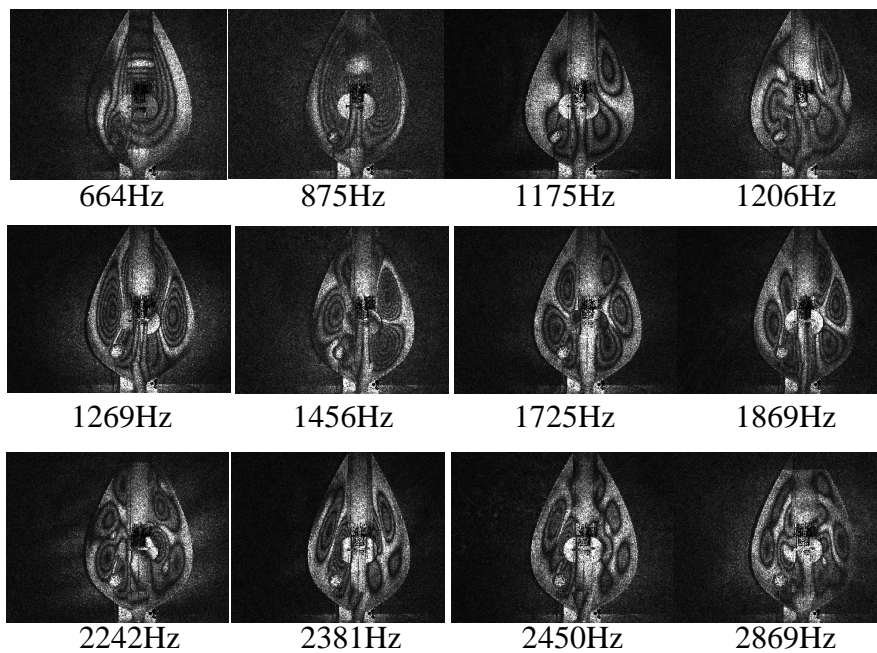
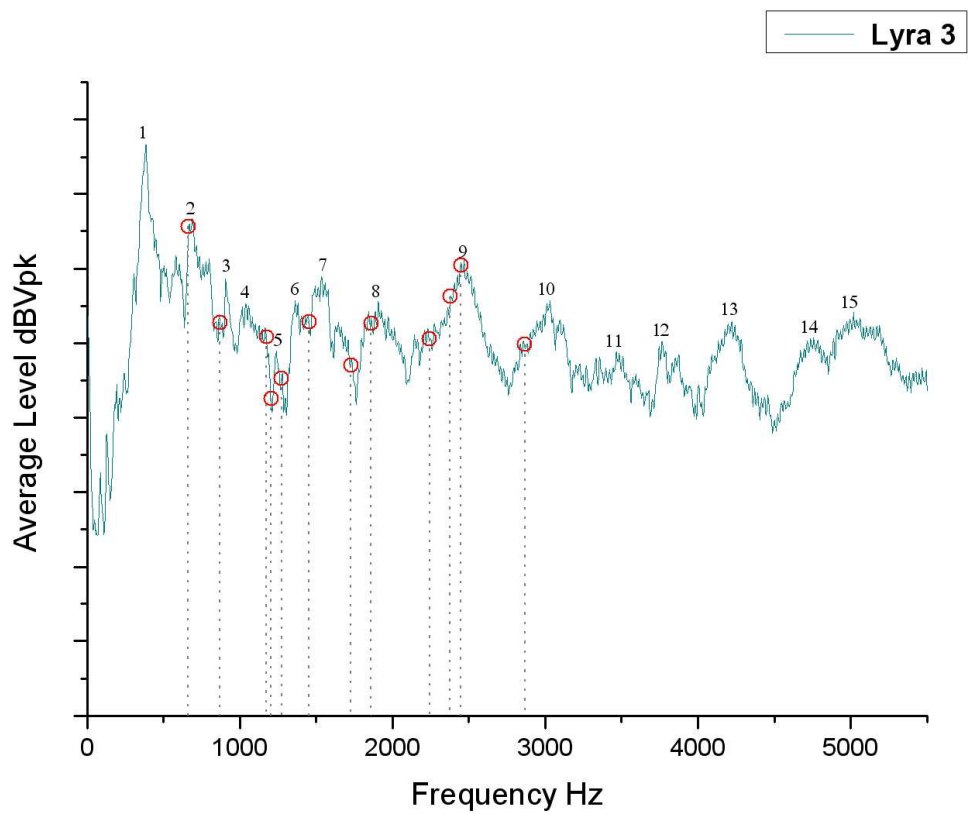


**Εικόνα 3.4.3.1** Φάσμα μέσου όρου ηχοβόλισης και κατανομή πλάτους ταλάντωσης μέσω ESPI για τη λύρα 1.





**Εικόνα 3.4.3.2** Φάσμα μέσου όρου ηχοβόλισης και κατανομή πλάτους ταλάντωσης μέσω ESPI για τη λύρα 2.



**Εικόνα 3.4.3.3** Φάσμα μέσου όρου ηχοβόλισης και κατανομή πλάτους ταλάντωσης μέσω ESPI για τη λύρα 3.



Από τις εικόνες 3.4.3.1, 3.4.3.2, 3.4.3.3 (λύρα 1, λύρα 2, λύρα 3 αντίστοιχα) εξάγονται συγκριτικά στοιχεία μεταξύ των δύο μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην εργασία. Ομοιότητες αλλά και διαφορές στα αποτελέσματα των μετρήσεων ηχοβόλισης και ESPI παρουσιάζονται για κάθε λύρα.

#### Λύρα 1

- Συμμετρικοί κροσσοί (συμμετρία κατασκευής οργάνου) και μεγάλης διακριτότητας εικόνες συμβολής σε αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων χρίζουν την ολογραφική συμβολομετρία ως την αποτελεσματικότερη μέθοδο καταγραφής της δονητικής συμπεριφοράς της πρώτης λύρας.
- Δεν εντοπίζεται ο πρώτος μέγιστος συντονισμός στα 362,5Hz (ESPI) σε αντίθεση με το φάσμα ηχοβόλισης όπου ανιχνεύεται με το μέγιστο πλάτος.
- Μέγιστη κατανομή πλάτους με τη μέθοδο ESPI στις συχνότητες 558Hz, 824Hz, 1.2kHz, 1.6kHz, 1.9kHz και 2.2kHz. Ικανοποιητική «ταύτιση» στην αυξομείωση πλάτους ταλάντωσης στις δύο μεθόδους (φθίνουσα πορεία από 2.2-2.6kHz, πολύπλοκοι / έντονοι συντονισμοί στις υψηλές συχνότητες).
- Σημαντική απόκλιση στη συχνότητα καταγραφής εντοπίζεται μεταξύ των δύο μεθόδων, ιδιαίτερα στους ιδιορυθμούς των 824Hz, 1.2kHz, 1.9kHz, 3.2kHz (μικρό πλάτος με ηχοβόλιση).
- Σχεδόν μηδαμινές οι περιοχές καταγραφής χωρίς συντονισμούς με τη μέθοδο ESPI σε αντίθεση με τα «βυθίσματα» που φαίνονται στο φάσμα ηχοβόλισης.

#### Λύρα 2

- Μικρή απόκλιση συχνότητας στους βασικούς τρόπους δόνησης.
- Καταγραφή των εικόνων συμβολής μέσω ESPI (320Hz-4.1kHz) στο μεγαλύτερο εύρος του φάσματος ηχοβόλισης (συγκριτικά με τις άλλες λύρες).
- Λίγες περιοχές με μη ανιχνεύσιμο πλάτος με την ESPI (ανυπαρξία δευτέρου μέγιστου στα 545,5Hz και «νεκρή» περιοχή στο εύρος 1.8-2.5kHz).
- Μέγιστη κατανομή πλάτους στις συχνότητες 320Hz, 827Hz (1,3 συντονισμοί στο φάσμα ηχοβόλισης) και γύρω από τα 1kHz, 1.3kHz, 1.5kHz-1.7kHz (και για τις δύο μεθόδους). Πολύπλοκοι / ισχυροί συντονισμοί ανιχνεύονται στα 2.9kHz και 3.8kHz (ESPI) με σημαντική απόκλιση για την ηχοβόλιση (ανάμεσα στα σημεία 10, 11).

#### Λύρα 3

- Μικρό εύρος καταγραφής αποτελεσμάτων με την ολογραφική συμβολομετρία (664Hz-2.8kHz).
- Δυσκολία στον ορθό σχηματισμό βασικών τρόπων δόνησης.
- Ανυπαρξία πρώτου σημαντικού συντονισμού στην αναμενόμενη συχνότητα των 388Hz (σημείο 1 φάσματος ηχοβόλισης).
- Μέγιστη κατανομή πλάτους ταλάντωσης στις συχνότητες 664Hz, 875Hz, 1.2kHz, 1.4kHz, 1.7kHz (ESPI) με μικρή απόκλιση συχνότητας καταγραφής (απόκλιση πλάτους συντονισμών στα 875Hz και 1269Hz-σημεία 3, 5 φάσματος).
- Ανομοιομορφία στους υψηλότερους τρόπους ταλάντωσης και μη ανιχνεύσιμο πλάτος μετά τη συχνότητα των 2.8kHz.

### 3.5 Συμπεράσματα

Συγκεντρώνοντας τα σημαντικότερα στοιχεία που προέκυψαν από τη μέθοδο της ηχοβόλισης για τις τρεις Κρητικές λύρες, καταλήγουμε στα παρακάτω :

- Συντονισμοί εντοπίζονται από τις πολύ χαμηλές συχνότητες σε ένα εύρος γύρω από τα 85Hz, 129Hz και 210Hz περίπου.
- Μέγιστη κατανομή πλάτους ταλάντωσης ανιχνεύεται στις συχνότητες (κατά μέσο όρο) 358Hz και 600Hz. Ακολουθεί η περιοχή γύρω από τα 880Hz με σημαντικά πλάτη συντονισμών.
- Αξιόλογοι συντονισμοί καταγράφονται στις περιοχές 1.1-1.3kHz, 1.5-1.7kHz και κοντά στα 1.9-2kHz.
- Σημαντική πτώση πλάτους συντονισμών εντοπίζεται στο συχνοτικό εύρος 2-3.4kHz με τις χαμηλότερες τιμές πλάτους να καταγράφονται στην περιοχή αυτή.
- Στην υψηλότερη περιοχή συχνοτήτων κυριαρχούν λίγο μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης (με εύρος τιμών παρόμοιο με αυτό της περιοχής 1.1-2kHz). Συντονισμοί καταγράφονται σε εύρος συχνοτήτων γύρω από τα 3.4kHz, 3.7kHz, 4kHz, 5kHz.
- Σημειώνονται περιοχές με απότομα «βυθίσματα» 600-880Hz (μεταξύ δεύτερου και τρίτου μέγιστου), 1.5-2kHz και γύρω από τα 3.5kHz και 4.5kHz.

Από την εφαρμογή της μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας για τις λύρες οδηγούμαστε στα παρακάτω συμπεράσματα :

- Οι δύο πρώτοι τρόποι δόνησης δεν ανιχνεύτηκαν για τη δεύτερη λύρα παρόλο που καταγράφηκαν εικόνες συμβολής από τα 320Hz.
- Μέγιστη κατανομή πλάτους σε ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από τα 611Hz (κατά μέσο όρο) για την πρώτη και τρίτη λύρα καθώς και στο εύρος 824-888Hz για όλες τις λύρες.
- Σημαντικοί συντονισμοί εντοπίστηκαν σε εύρος συχνοτήτων 1-1.2kHz και γύρω από τα 1.4kHz, 1.6-1.7kHz, 1.8-1.9kHz.
- Εικόνες συμβολής μικρότερου πλάτους ταλάντωσης ανιχνεύονται στην περιοχή 2.2-2.8kHz για όλες τις λύρες.
- Καλύτερη δονητική συμπεριφορά καταγράφηκε στις υψηλότερες συχνότητες μέτρησης για την πρώτη και δεύτερη λύρα (πολύπλοκοι συντονισμοί μέχρι και τις συχνότητες των 4.1kHz και 4.8kHz).
- Χαμηλότερες συχνότητες καταγραφής των σημαντικών ιδιορυθμών για τη δεύτερη λύρα ενώ στις υψηλότερες συχνότητες ανιχνεύτηκαν σημαντικοί συντονισμοί για την πρώτη λύρα.
- Ευκολότερος εντοπισμός των βασικών τρόπων δόνησης για την πρώτη λύρα (συμμετρικοί κροσσοί, ορθός σχηματισμός ιδιορυθμών, μεγαλύτερη διακριτότητα) σε όλο το εύρος καταγραφής.
- Ελάχιστες «νεκρές» περιοχές για την πρώτη λύρα (μετασχηματισμός των διαδοχικών εικόνων συμβολής) και λίγες για τη δεύτερη λύρα (1.8-2.5kHz). Η τρίτη λύρα εμφάνισε περισσότερες περιοχές χωρίς συντονισμούς (1.4-1.7kHz και πάνω από τα 2.8kHz).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>



ΛΑΟΥΤΟ

### *Εισαγωγή*

Για τη μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς του λαούτου ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτή που αναφέρεται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η μηχανική τεχνική της ηχοβόλισης αλλά και η εφαρμογή της ολογραφικής συμβολομετρίας ψηφίδων πραγματοποιήθηκαν σε δύο λαούτα με σκοπό την ανίχνευση των τρόπων δόνησης και την εξαγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων.

Επίσης, γίνεται αναφορά στα κατασκευαστικά στοιχεία και τον τρόπο παραγωγής του ήχου του λαούτου έτσι ώστε να δοθεί μία πλήρης εικόνα της λειτουργίας του και να κατανοηθεί καλύτερα η ακουστική του συμπεριφορά κατά τη δόνηση.

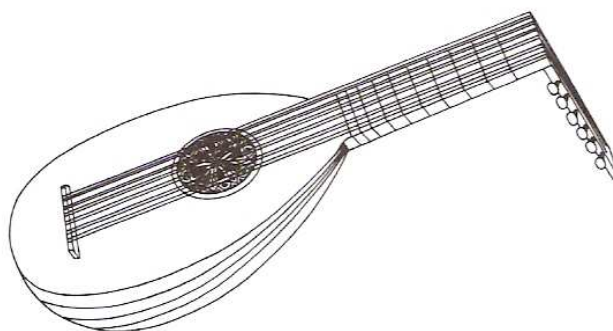
### *4.1 Ιστορικά στοιχεία κατασκευής-μορφολογίας λαούτου*

#### *4.1.1 Μορφολογική εξέλιξη του λαούτου – Το λαούτο<sup>10</sup>*

Το λαούτο πιθανώς εμφανίστηκε αρχικά στην Ανατολή και έγινε ένα από τα πιο δημοφιλή μουσικά όργανα σε όλη την Ευρώπη (16ο -17ο αιώνα). Είναι ο παλαιότερος πρόγονος του βιολιού και της κιθάρας. Η ονομασία λαούτο προέρχεται από την αραβική φράση “al-oud”, που σημαίνει «φτιαγμένος από ξύλο» (ή από ευλύγιστο ραβδί - Sachs). Είναι γνωστό ακόμη, ως λαγούτο ή λαβούτο ενώ σε ορισμένες περιοχές ονομάζεται και ταμπουράς ή τσαμπουράς.

Στην οικογένεια του λαούτου ανήκει κάθε χορδόφωνο μουσικό όργανο που έχει ηχείο, χέρι, χορδές τεντωμένες παράλληλα προς το καπάκι του ηχείου και το χέρι, που παίζονται είτε με τα δάκτυλα είτε με πλήκτρο (πένα). Όλα αυτά τα όργανα παρουσιάζουν σημαντικές μορφολογικές διαφορές (διαφορετικό σχεδιασμό) και πολλές παραλλαγές του βασικού σχεδιασμού. Διαιρούνται σε δύο βασικούς τύπους : τα μακριά λαούτα και τα κοντά λαούτα.

Τα μακριά λαούτα, με μικρό ηχείο και μακρύ χέρι, είναι τα αρχαιότερα της οικογένειας (3η χιλιετία π.Χ. , Μεσοποταμία) και τα κοντά λαούτα, με μικρό ηχείο και κοντό χέρι που συνεχίζει το ηχείο, ανιχνεύονται ήδη στον 8ο αιώνα π.Χ. (ελαμιτική τέχνη). Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν και τα λαούτα με μεγάλο αχλαδόσχημο ηχείο και κοντό, ξεχωριστό χέρι (αραβικό λαούτο).



**Εικόνα 4.1.1** Λαούτο του 16<sup>ου</sup> αιώνα [ N. H. Fletcher - T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, 2<sup>nd</sup> Edition ].

Το σημερινό ελληνικό λαούτο, με το μεγάλο αχλαδόσχημο ηχείο και το μακρύ χέρι, αποτελεί την νεότερη παραλλαγή που διαμορφώνεται γύρω στο 17ο αιώνα (Κρητικό λαούτο). Μορφολογικά, συνθέτει στοιχεία και από τους δύο βασικούς τύπους λαούτου.

Το ηχείο του λαούτου στον ελλαδικό χώρο δέχτηκε διάφορους μετασχηματισμούς, με το χέρι να ξεχωρίζει ολοένα και περισσότερο από το ηχείο, διατηρώντας όμως την αχλαδόσχημη μορφή του. Το μέγεθος του ηχείου ποικίλλει και το χέρι δέχεται ουσιαστικές αλλαγές (1920-πιο κοντό χέρι) για ευκολότερο παίξιμο (δακτυλοθεσία συγχορδιών).

Στα τέλη του 19ου αιώνα το λαούτο κατασκευαζόταν σε τρία μεγέθη (μπόγια) με σημαντική την επικράτηση του μεσαίου μεγέθους σήμερα.

#### **4.1.2 Κατασκευαστικά στοιχεία – Λειτουργία**<sup>10-21</sup>

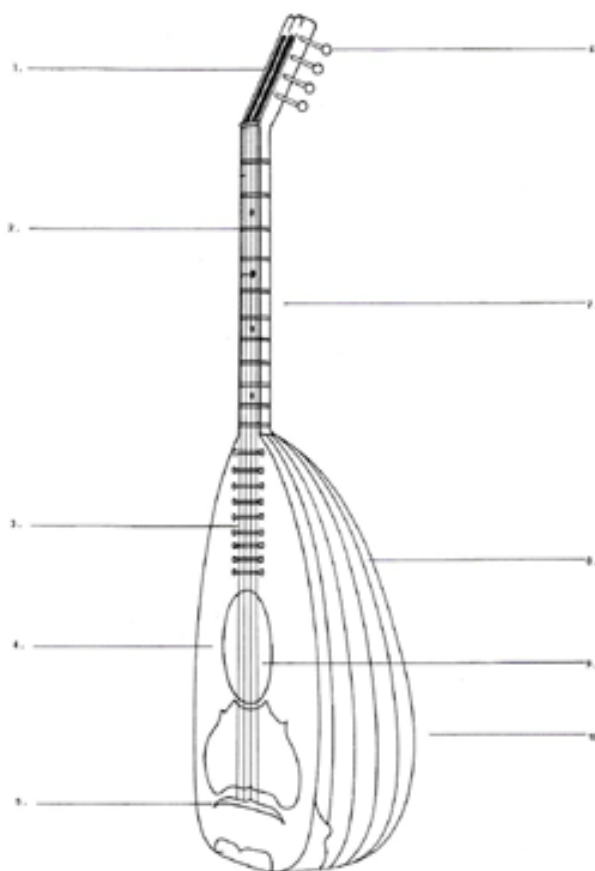
Το λαούτο έχει μεγάλο αχλαδόσχημο (επιπεδόκυρτο) ηχείο και μακρύ χέρι, με μπερντέδες, με μία κλίση προς τα πίσω, στο επάνω μέρος. Τα κλειδιά (8 στριφτάρια) βρίσκονται στα πλάγια και οι τέσσερις διπλές χορδές είναι στερεωμένες στον καβάλάρη, πάνω στο καπάκι<sup>13</sup>. Για το παίξιμο του λαούτου χρησιμοποιείται ένα πλήκτρο (πένα).

Η σκάφη κατασκευάζεται με τη βοήθεια ενός ξύλινου καλουπιού και αποτελείται συνήθως από 23 ντούγες. Το καπάκι μπορεί να είναι ίσιο ή κυρτό. Η ελαφριά κύρτωση του καπακιού, το καθιστά πιο ανθεκτικό στην πίεση των χορδών.

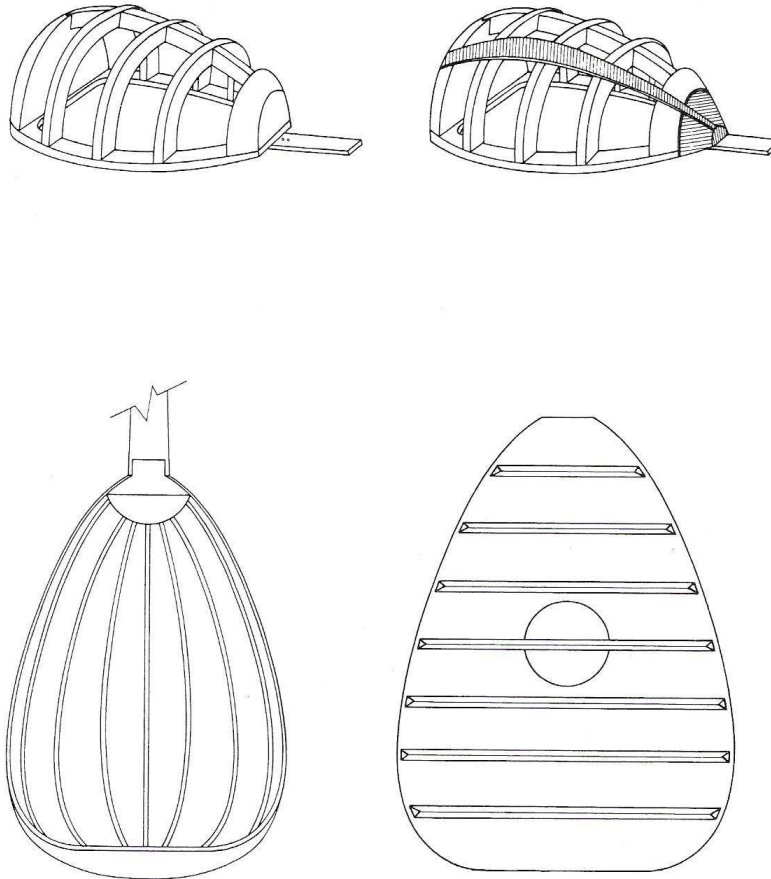
<sup>13</sup> Η κατασκευή του λαούτου ακολουθεί πάντα την ίδια σειρά (σκάφη, χέρι, καπάκι) και χρησιμοποιούνται αποξηραμένα ξύλα, σκληρά για τη σκάφη (έβενος, σφεντάμι), μαλακά ξύλα (φλαμουρί) για το χέρι και λευκή ξυλεία (πεύκη) για το καπάκι.

Το χέρι ενώνεται με το ηχείο (σώμα λαούτου) στο σημείο που αντιστοιχεί στο μισό του μήκους της χορδής. Η κλίση στο επάνω μέρος του χεριού βοηθάει το παίξιμο του οργάνου. Οι μπερντέδες παλιότερα από έντερο και σήμερα από πλαστική ύλη, τοποθετούνται κατά ημιτόνια και μπορούν να κινηθούν σε περίπτωση σκέβρωσης του οργάνου. Οι χορδές αρχικά ήταν φτιαγμένες από έντερο ενώ σήμερα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά μεταλλικές (μήκος χορδής νησιώτικου λαούτου 66-68cm). Η πένα του λαούτου γίνεται από φτερό αρπακτικού πουλιού (για μεγαλύτερη αντοχή) ή πλαστικό.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα μέρη ενός μεσαίου μεγέθους λαούτου.



**Εικόνα 4.1.2.1** Βασικά μέρη λαούτου : 1. κεφάλι, 2. μπερντέδες, 3. χορδές, 4. καπάκι, 5. καβαλάρης, 6. κλειδιά, 7. χέρι, 8. ντούγκες, 9. οπή, 10. σκάφη.



**Εικόνα 4.1.2.2** Κατασκευή λαούτου ( ξύλινο καλούπι, ντούγες, βάση σκάφης, ραβδώσεις καπακιού )  
[ Φ. Ανωγειανάκης, Ελληνικά Λαϊκά Μουσικά Όργανα ].

Ο τρόπος παραγωγής του ήχου ενός λαούτου συνίσταται σε τρία διακριτά βήματα : διέγερση καπακιού, απόκριση σώματος και εκπομπή ήχου από το σώμα.

Οι χορδές του λαούτου, λόγω της μικρής επιφάνειάς τους, δεν έχουν τη δυνατότητα να κινήσουν μεγάλες μάζες αέρα κατά τη διέγερσή τους, έτσι ώστε ο ήχος να γίνει ακουστός. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση των χορδών με τον ατμοσφαιρικό αέρα προκαλεί απόσβεση των ταλαντώσεων των χορδών. Οι εγκάρσιες ταλαντώσεις των χορδών ασκούν μία χρονικά μεταβαλλόμενη δύναμη στη γέφυρα με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους να μετατρέπεται σε ενέργεια ταλάντωσης του καπακιού του λαούτου.

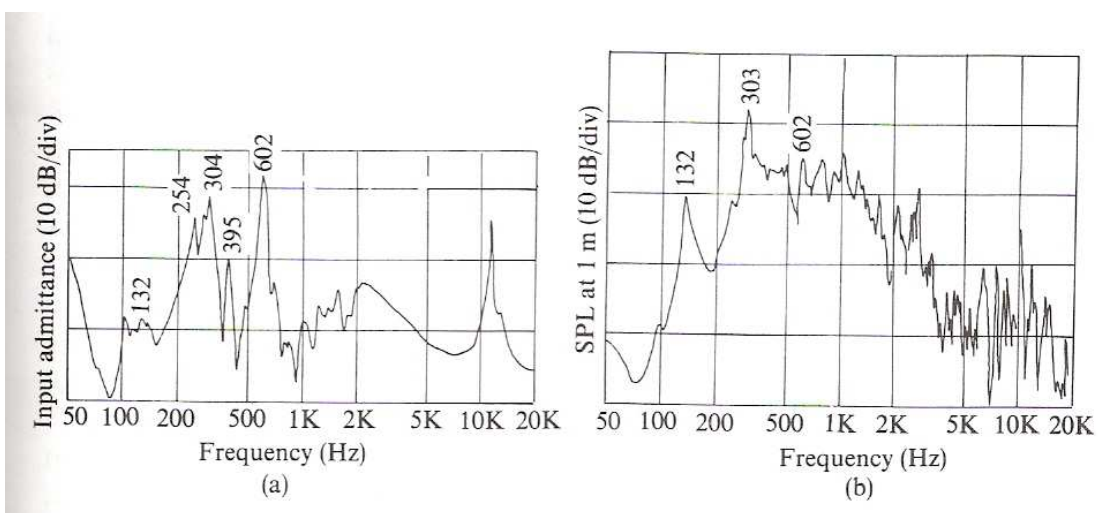
Η απόκριση του καπακιού (πλάτος-συχνότητα ταλαντώσεων) καθορίζεται από τη διέγερσή του και περιγράφει τον τρόπο ταλάντωσης κάθε συχνότητας συντονισμού. Η διέγερση του καπακιού δεν επηρεάζει τις ιδιότητές του ενώ η θέση του σημείου διέγερσης επιδρά μόνο στο πλάτος ταλαντώσεων. Το καπάκι κινεί τον αέρα που βρίσκεται μέσα στο αντηχείο μέσω ηχητικών κυμάτων, των οποίων οι ανακλάσεις είτε εξασθενούν είτε βρίσκουν διέξοδο από το άνοιγμα του καπακιού (οπή). Η ενέργεια ταλάντωσης του καπακιού μεταδίδεται σε ολόκληρο το σώμα του λαούτου, το οποίο ενισχύει τον ασθενή ήχο των χορδών. Η ενίσχυση των συχνοτήτων ακολουθεί την καμπύλη απόκρισης ή την καμπύλη ακουστότητας του οργάνου.

Η διέγερση των χορδών και η μηχανική απόκριση του σώματος του λαούτου σχετίζονται με την ποιότητα του εκπεμπόμενου ήχου. Λόγω της μη γραμμικής απόκρισης του σώματος, το φάσμα του εκπεμπόμενου ήχου διαφέρει από το φάσμα της ταλαντούμενης χορδής, του οποίου τα σχετικά ύψη αρμονικών καθορίζονται από τον οργανοπαίκτη. Ο εκπεμπόμενος ήχος από το σώμα του λαούτου εξαρτάται κυρίως από το πλάτος και τη διαφορά φάσης ταλάντωσης στην επιφάνεια του καπακιού. Το ηχητικό φάσμα διαφέρει ως προς τη συχνότητα και τη θέση του ακροατή στον χώρο (κατευθυντικότητα οργάνου).

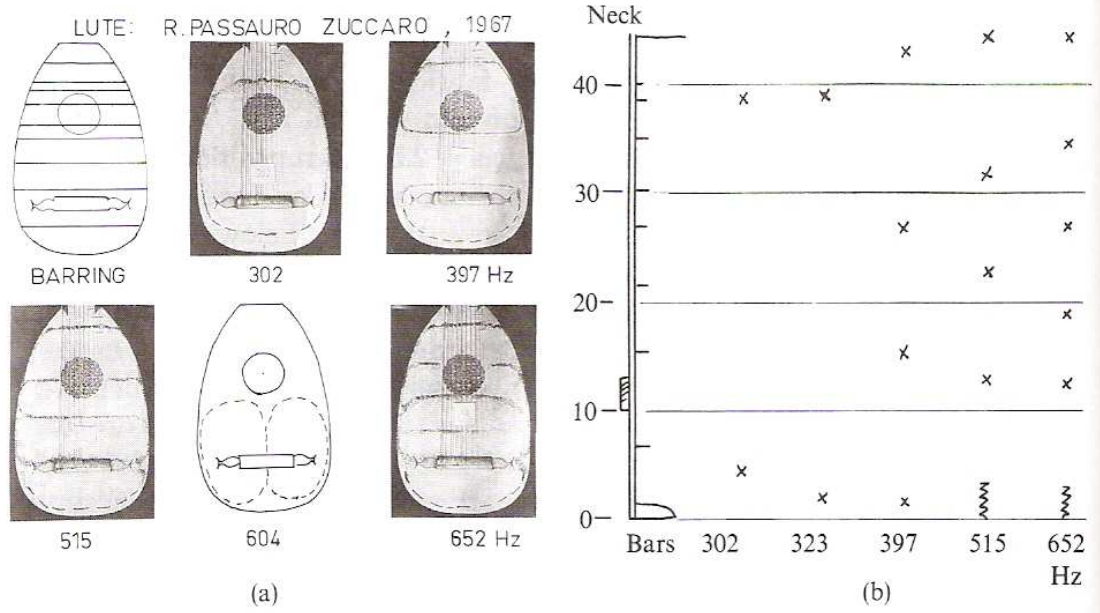
#### 4.1.3 Παλαιότερες ακουστικές μελέτες λαούτου <sup>1</sup>

Οι μελέτες της ακουστικής συμπεριφοράς των λαούτων που έχουν αναφερθεί είναι πολύ λίγες. Ο Firth (1977) μέτρησε την απόκριση (κινητικότητα οδηγούμενου σημείου) στο δονούμενο άκρο της γέφυρας και τη στάθμη του εκπεμπόμενου ήχου σε απόσταση ενός μέτρου από το καπάκι (εικόνα 4.1.3.1).

Ο Firth συνέδεσε την κορυφή στα 132Hz με την αέρια συχνότητα Helmholtz και τις κορυφές (μέγιστα καμπύλης) στις συχνότητες 304Hz, 395Hz και 602Hz με τους συντονισμούς του καπακιού. Στην εικόνα 4.1.3.2 απεικονίζονται πέντε συντονισμοί του καπακιού ενός λαούτου. Επιπλέον, παρουσιάζεται η σχέση των κομβικών γραμμών με τις θέσεις των ραβδώσεων (bars) του καπακιού. Στις καταστάσεις δόνησης στα 515Hz και 652Hz δε διεγείρεται κανένα σημείο από την εφαρμοσμένη δύναμη στη γέφυρα επειδή παρουσιάζονται κομβικές περιοχές πολύ κοντά στη γέφυρα.



**Εικόνα 4.1.3.1** α) Μηχανική κινητικότητα με οδηγούμενο σημείο τη γέφυρα λαούτου, β) στάθμη ηχητικής πίεσης σε απόσταση 1m από το καπάκι ( Firth, 1977 ) [ N. H. Fletcher - T. D. Rossing, The Physics of Musical Instruments, 2<sup>nd</sup> Edition ].



**Εικόνα 4.1.3.2** α) Σχέδιο ραβδώσεων και κομβικά σχέδια στο καπάκι ενός λαούτου σε πέντε συντονισμούς, β) σύγκριση κομβικών θέσεων στη γέφυρα και στα πλευρά ( Firth, 1977 ) [ N. H. Fletcher - T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, 2<sup>nd</sup> Edition ].



## 4.2 Μετρήσεις – Αποτελέσματα

### 4.2.1 Μέθοδος ηχοβόλισης - Πειραματική διάταξη

Κάθε καπάκι λαούτου στηρίζεται σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία (στα άκρα του κατακόρυφου άξονα του οργάνου) πάνω σε απορροφητική βάση. Η βάση τοποθετείται σε απόσταση 30cm από ένα μεγάφωνο, το οποίο ηχοβολεί το καπάκι του οργάνου με frequency sweep tones (20Hz-6kHz). Η πηγή ήχου είναι ουσιαστικά ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής (spectralab) που συνδέεται μέσω ενισχυτή στο μεγάφωνο για την απαραίτητη ενίσχυση του σήματος.

Ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος «ανιχνεύει» τις ταλαντώσεις στο καπάκι του λαούτου και μέσω μιας κονσόλας (προενισχυτής σήματος) το σήμα καταγράφεται σε ένα δεύτερο ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη μορφή φάσματος (spectrum analyzer).



**Εικόνα 4.2.1.1** Συνθήκες μέτρησης καπακιού λαούτου :

α) στήριξη καπακιού ( βάση στήριξης ), β) διέγερση καπακιού με ηχείο - εφαρμογή πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου/ανιχνευτή πάνω στην επιφάνεια καπακιού.

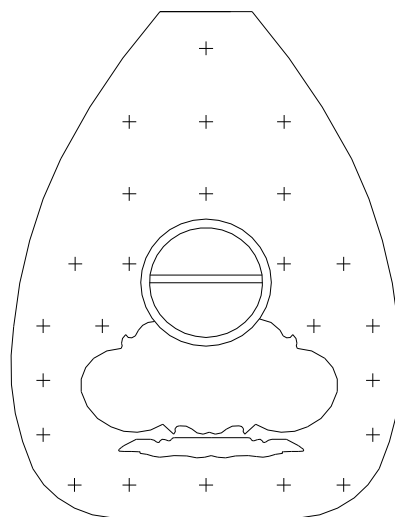
Η ηχοβόλιση πραγματοποιείται σε δύο καπάκια λαούτων, σε 24 διαφορετικά σημεία για κάθε καπάκι (βάση του πλέγματος που φαίνεται στην εικόνα 4.2.1.3). Η καταγραφή του παραγόμενου φάσματος γίνεται σε γράφημα με ημιλογαριθμικό άξονα συχνότητας (dBVpk-frequency (3Hz-6kHz)). Σε κάθε μέτρηση ο κύκλος των

frequency sweep tones επαναλαμβάνεται τουλάχιστον δέκα φορές έτσι ώστε η μέση ηχητική ισχύς να διατηρείται περίπου ίδια (Power Level). Η διαδικασία ηχοβόλισης καθώς και η πειραματική διάταξη είναι κοινές και στις δύο μελέτες (λύρες-λαούτα βλ. § 3.3.1).



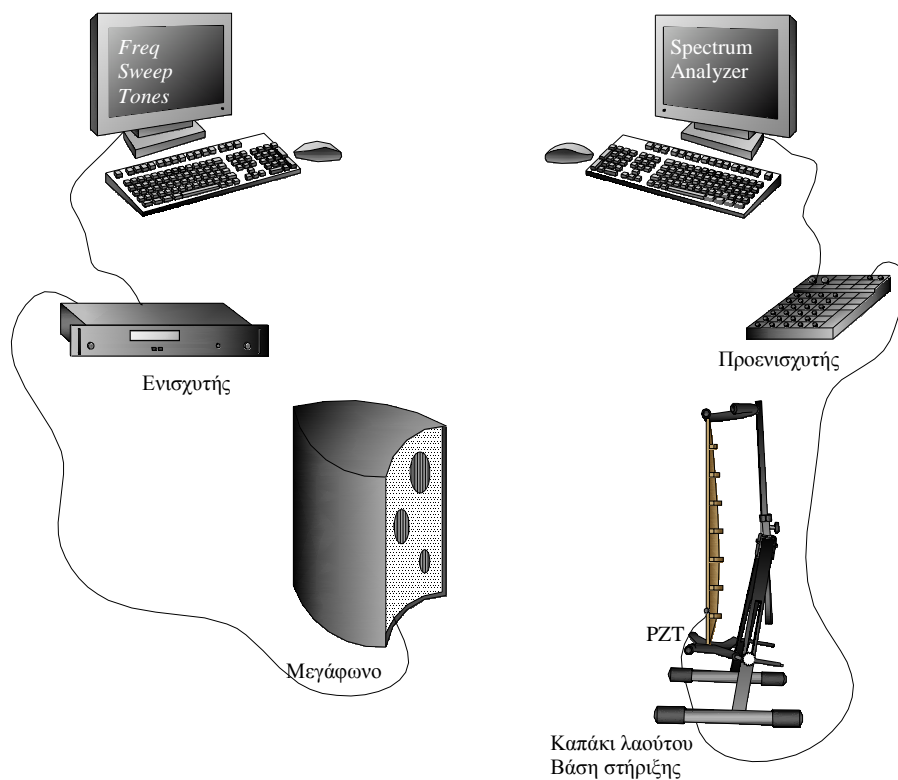
**Εικόνα 4.2.1.2** Διαστάσεις καπακιών λαούτων

Καπάκι λαούτου No.1 : μεγάλη διάσταση 50cm, μικρή διάσταση 37.5cm, πάχος 2.1mm.  
Καπάκι λαούτου No.2 : μεγάλη διάσταση 49.8cm, μικρή διάσταση 37.4cm, πάχος 2.1mm.



**Εικόνα 4.2.1.3** Καπάκι λαούτου και σημεία μέτρησης.

Η πειραματική διάταξη ηχοβόλισης των καπακιών των λαούτων αναπαρίσταται στο ακόλουθο σχήμα.

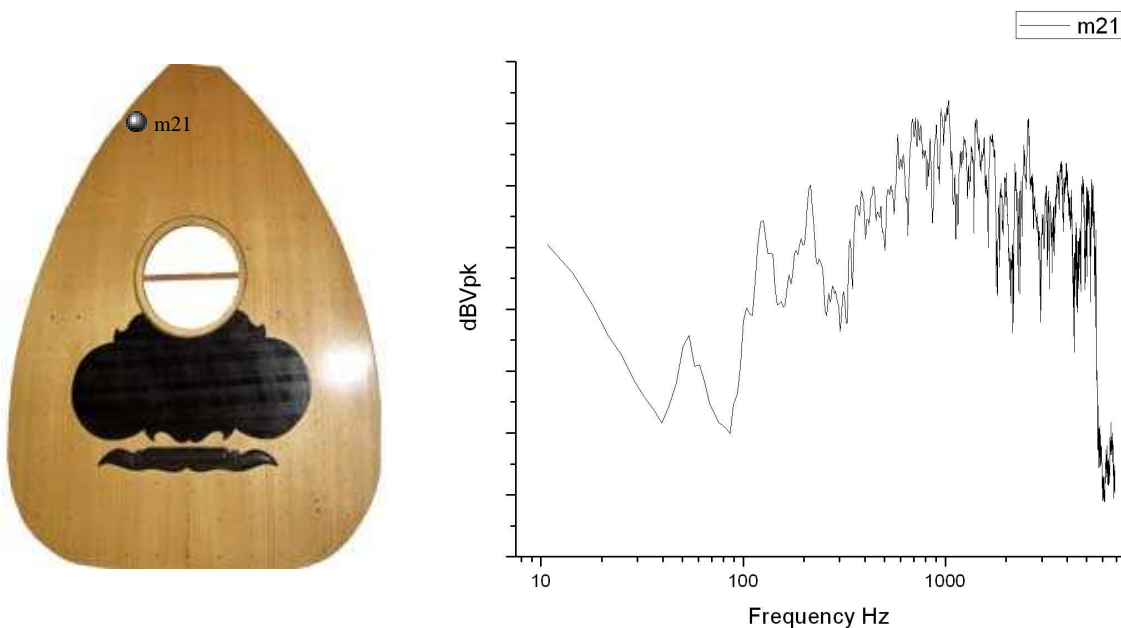


**Εικόνα 4.2.1.4** Πειραματική διάταξη μηχανικής τεχνικής ( ηχοβόλιση ).

#### 4.2.2 Καπάκια λαούτων – Αποτελέσματα ηχοβόλισης

Για κάθε σημείο μέτρησης πάνω στα καπάκια των λαούτων, παρουσιάζεται το αντίστοιχο συχνοτικό φάσμα που καταγράφηκε με τη μηχανική τεχνική. Στη συνέχεια επιλέγουμε ενδεικτικά δύο φάσματα (που αναφέρονται σε δύο συγκεκριμένα σημεία μέτρησης πάνω σε κάθε καπάκι) με σκοπό τη σύγκριση των επιμέρους σημείων. Σημειώνεται ότι η σύγκριση των φασμάτων βασίζεται στην ποιοτική ανάλυση αυτών, εφόσον τα αποτελέσματα της μεθόδου ηχοβόλισης δεν παρέχουν περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο ταλάντωσης του οργάνου.

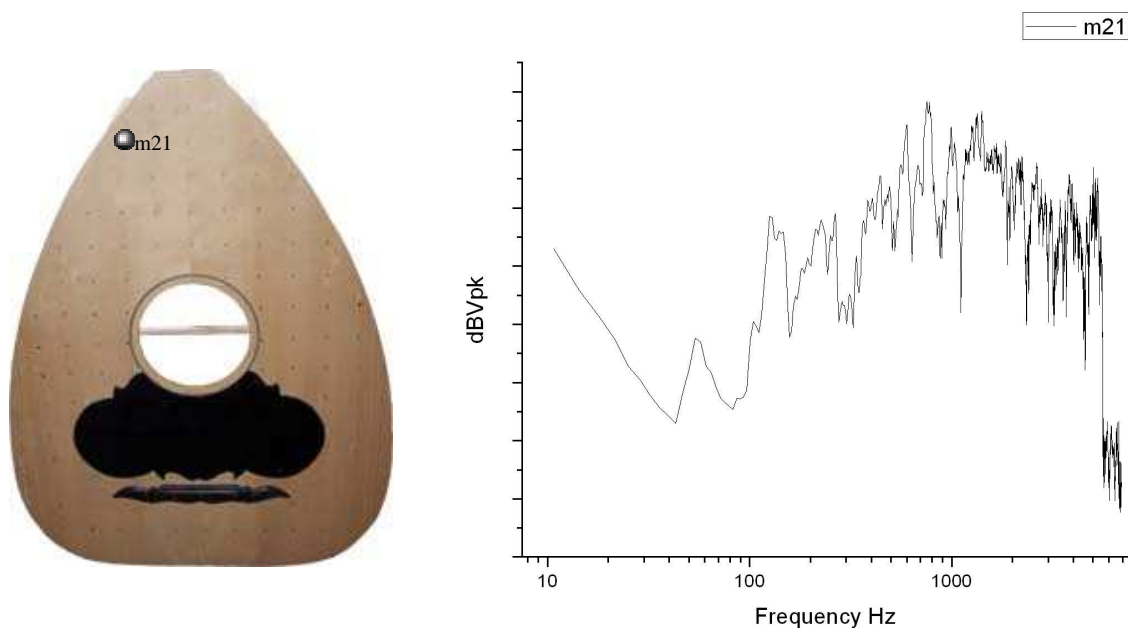
Για τη μελέτη της συνολικής δονητικής συμπεριφοράς των καπακιών αλλά και την περαιτέρω σύγκριση μεταξύ τους είναι απαραίτητη η δημιουργία φασμάτων μέσου όρου. Η επεξεργασία που απαιτείται για την εξαγωγή αυτών των φασμάτων είναι η ίδια με αυτήν που ακολουθήθηκε στη μελέτη των λυρών (βλ. § 3.3.2.1).



**Εικόνα 4.2.2.1** Συχνοτική απόκριση ενός σημείου μέτρησης για το καπάκι λαούτου No.1 και θέση σημείου τοποθέτησης διεγέρτη πάνω στην επιφάνεια καπακιού.

Το καπάκι του πρώτου λαούτου μετρήθηκε στο σημείο m21 (στην επάνω αριστερή περιοχή) και από το φάσμα που προέκυψε είναι ξεκάθαροι τρεις σημαντικοί / οξείς συντονισμοί στις χαμηλές συχνότητες (συχνότητα αέρα και συχνότητα ξύλου σε εύρος 50Hz – 300Hz). Το πλάτος των συντονισμών ενισχύεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα καταγραφής (300Hz-700Hz) μέχρι την εμφάνιση των δύο βασικών μεγίστων ( $P_1$  και  $P_2$ ) στην περιοχή 700Hz-1kHz. Στην υψηλή περιοχή συχνοτήτων (1kHz-6kHz) παρατηρείται σταδιακή μείωση του πλάτους των συντονισμών γεγονός που αποτελεί αρνητικό παράγοντα για την ακουστική συμπεριφορά του καπακιού. Οι νεκρές περιοχές που εντοπίστηκαν στο φάσμα (περιοχές με απότομη μείωση του πλάτους συντονισμών\*), ιδιαίτερα μετά τον τρίτο σε σειρά σημαντικό συντονισμό και μετά το δεύτερο μέγιστο της απόκρισης, δεν υποστηρίζονται από την καμπύλη απόκρισης του οργάνου.

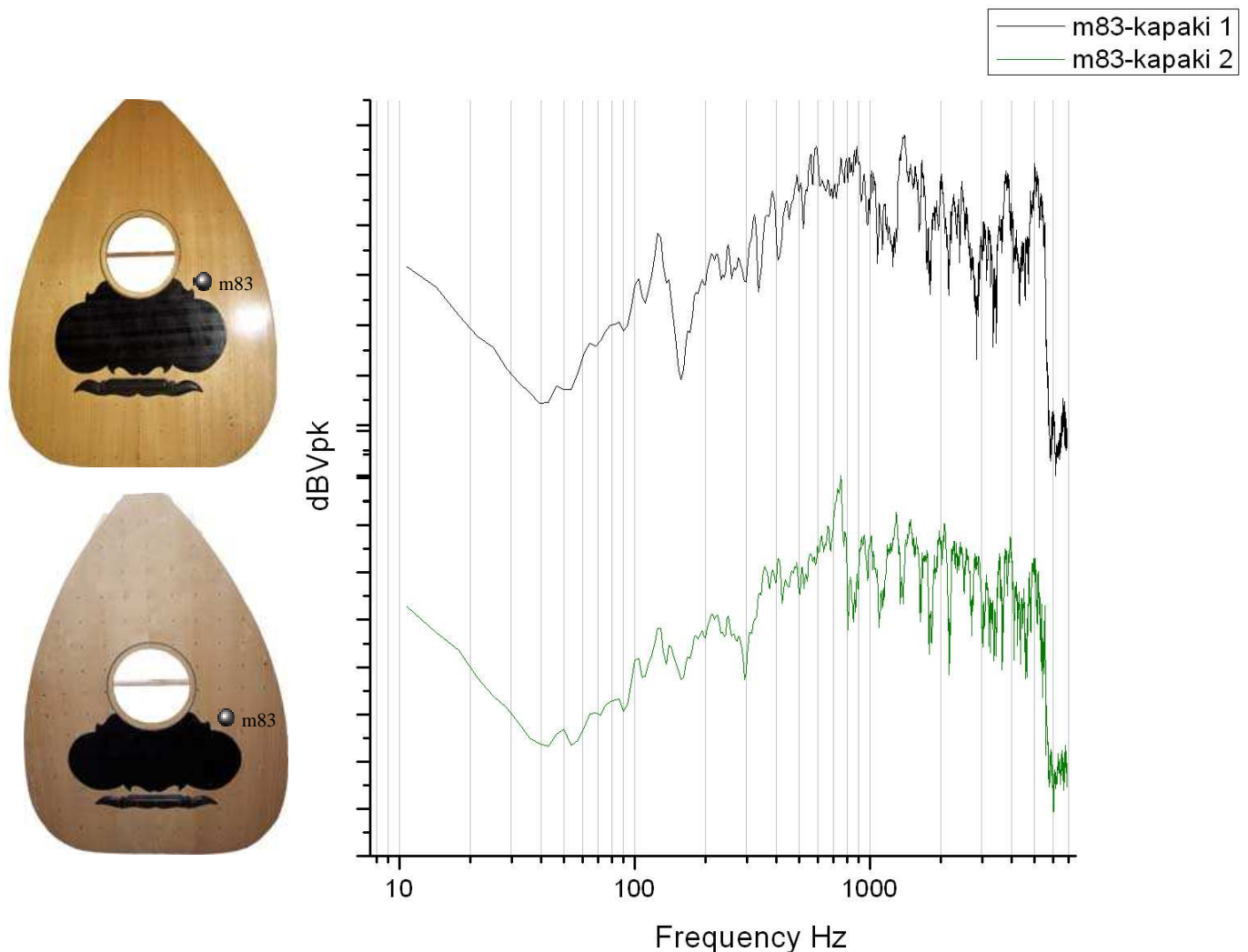
\* Οι «νεκρές» περιοχές σημειώνονται με μία διακεκομμένη γραμμή σε κάθε συχνοτικό φάσμα.



**Εικόνα 4.2.2.2** Συχνοτική απόκριση ενός σημείου μέτρησης για το καπάκι λαούτου No.2 και θέση σημείου τοποθέτησης διεγέρτη ( πάνω αριστερά ) στην επιφάνεια καπακιού.

Από τη μέτρηση του ίδιου σημείου m21 για το δεύτερο καπάκι προέκυψε το παραπάνω φάσμα. Ενώ είναι εμφανής ο πρώτος βασικός συντονισμός ( $\cong 55\text{Hz}$ ) ο δεύτερος δεν είναι αρκετά ξεκάθαρος (παρουσιάζει μικρό παράγοντα ποιότητας Q). Οι «κακοί» συντονισμοί συνεχίζονται στη μεσαία περιοχή συχνοτήτων μέχρι την εμφάνιση των δύο ξεκάθαρων μέγιστων ( $P_1$  και  $P_2$ ) από τα 600Hz έως τα 800Hz. Ακολουθεί μία περιοχή συχνοτήτων χωρίς έντονους συντονισμούς αλλά με σταδιακή πτώση του πλάτους μετά τα 1.5kHz. Το συγκεκριμένο φάσμα χαρακτηρίζεται από ήπιους συντονισμούς με μικρό παράγοντα ποιότητας (μεγάλο  $\Delta f$ ) και αρκετές «νεκρές» περιοχές συχνοτήτων. Αυτή η συμπεριφορά δεν αντιπροσωπεύει μία επιθυμητή δονητική συμπεριφορά.

Στη συνέχεια συγκρίνουμε τα φάσματα που προέκυψαν από τη μέτρηση στο σημείο m83 (κάτω δεξιά πλευρά) για τα καπάκια των δύο λαούτων.



**Εικόνα 4.2.2.3** Συχνотική απόκριση ενός σημείου μέτρησης για τα δύο καπάκια λαούτου και αντίστοιχη θέση σημείου τοποθέτησης διεγέρτη ( κάτω δεξιά ) στην επιφάνεια κάθε καπακιού.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω φάσματα εύκολα διακρίνουμε την «υπεροχή» του πρώτου καπακιού, όσον αφορά στη συμπεριφορά του κατά την αρμονική διέγερση. Οι συντονισμοί του πρώτου φάσματος είναι σαφώς πιο διακριτοί / οξείς από αυτούς του δεύτερου φάσματος.

Συγκεκριμένα, το καπάκι του πρώτου λαούτου εμφανίζει έναν μόνο ξεκάθαρο συντονισμό στην χαμηλή περιοχή συχνοτήτων (λίγο πάνω από τα 100Hz). Από τα 200Hz και πάνω ακολουθεί μία περιοχή σταδιακής ενίσχυσης του πλάτους των συντονισμών με κορύφωση την ανίχνευση των δύο μεγίστων της καμπύλης απόκρισης ( $P_1$  και  $P_2$ ), στο συχνотικό εύρος 600Hz-900Hz. Στη συχνότητα 1.5kHz καταγράφεται ένας οξύς συντονισμός (με πλάτος μεγαλύτερο του πλάτους των δύο μεγίστων) που είναι αναμενόμενος βάση της «επιθυμητής» απόκρισης ενός οργάνου<sup>13</sup>. Ακολουθεί μείωση του πλάτους συντονισμών μέχρι τα 3kHz περίπου ενώ στις υψηλές συχνότητες (4kHz και 5kHz) διακρίνονται δύο ξεκάθαροι συντονισμοί.

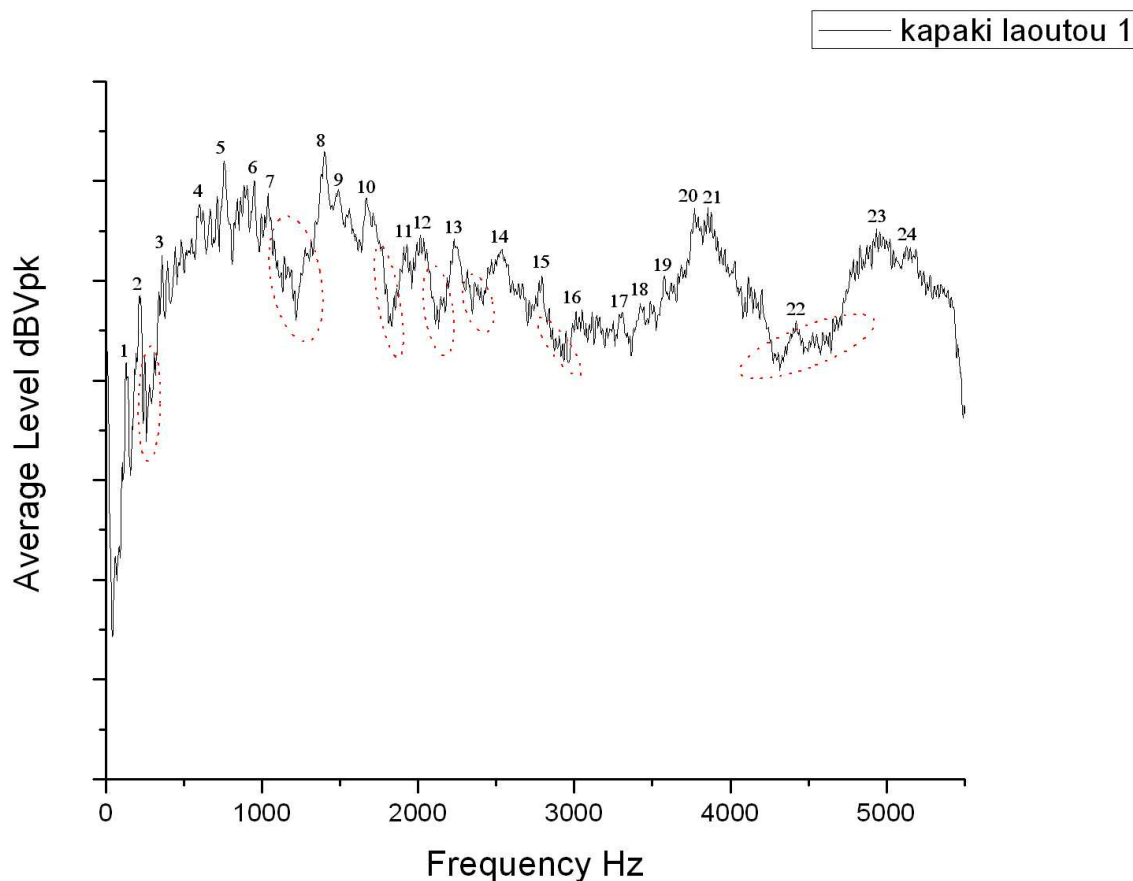
Το δεύτερο φάσμα δεν εμφανίζει ευδιάκριτους συντονισμούς στην χαμηλή περιοχή συχνοτήτων (συντονισμοί 100Hz-250Hz με μεγάλο παράγοντα ποιότητας Q). Από τα 300Hz και πάνω υπάρχει μία «ουδέτερη» περιοχή μέχρι τα 750Hz περίπου, όπου ανιχνεύεται μόνο το δεύτερο μέγιστο της καμπύλης ( $P_2$  peak). Στην υψηλή



συχνοτική περιοχή (1kHz-5kHz) το καπάκι παρουσιάζει μία έντονη συμπεριφορά, με αρκετούς και πυκνούς συντονισμούς.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το πρώτο καπάκι παρουσιάζει μικρές αυξομειώσεις στο πλάτος των συντονισμών σε σχετικά μεγάλο εύρος συχνοτήτων σε σύγκριση με το δεύτερο καπάκι. Αυτή η σχετικά επίπεδη απόκριση αποτελεί πλεονέκτημα στην ακουστική συμπεριφορά του πρώτου καπακιού. Αντίθετα, το δεύτερο καπάκι εμφανίζει «κακούς» έως ανύπαρκτους συντονισμούς στην χαμηλή περιοχή. Παρόλα αυτά το δεύτερο καπάκι παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά στις υψηλές συχνότητες (πυκνοί συντονισμοί). Απότομες πτώσεις του πλάτους των συντονισμών (όπως υποδεικνύονται σε κάθε φάσμα \*) ή περιοχές με «ουδέτερη» συμπεριφορά (ανυπαρξία συντονισμών) αποτελούν αρνητικά παράγοντα στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς κάθε οργάνου.

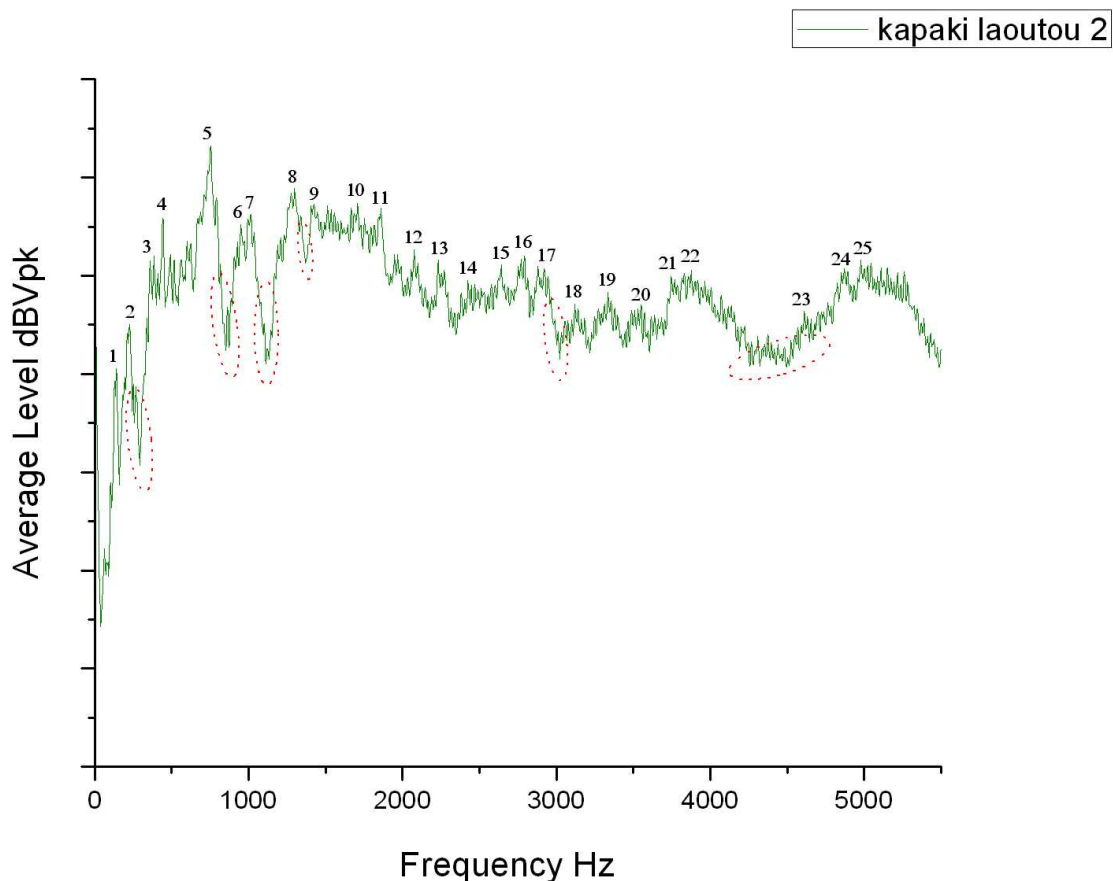
Παρακάτω παρουσιάζονται τα φάσματα μέσου όρου που προέκυψαν για τα δύο καπάκια. Το συχνοτικό εύρος των φασμάτων δεν εκτείνεται πάνω από τα 5500Hz εφόσον η καμπύλη απόκρισης του λαούτου δεν υποστηρίζεται σε υψηλότερες συχνότητες. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της οπτικής μεθόδου περιορίζονται μέχρι τα 2.5-2.6kHz και επομένως μπορεί να γίνει σύγκριση των μεθόδων.



**Εικόνα 4.2.2.4** Συχνοτική απόκριση για το πρώτο καπάκι λαούτου ( φάσμα μέσου όρου : η αρίθμηση υποδεικνύει σημαντικούς συντονισμούς ενώ οι «νεκρές» περιοχές / «βυθίσματα» καταγράφονται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή).

- Πρώτος ανιχνεύσιμος συντονισμός (χαμηλού πλάτους) στην πολύ χαμηλή συχνότητα των 61Hz.
- Οι δύο επόμενοι ξεκάθαροι συντονισμοί καταγράφονται στις συχνότητες 129Hz και 215Hz (1,2). Μετά το δεύτερο ισχυρό συντονισμό υπάρχει μία «νεκρή» περιοχή (με εύρος  $\approx 140\text{Hz}$ ) μέχρι την εμφάνιση του τρίτου, κατά σειρά, σημαντικού συντονισμού στα 359Hz (3).
- Ακολουθεί σταδιακή ενίσχυση του πλάτους συντονισμών (σημεία 3,4,5) μέχρι την ανίχνευση ενός ισχυρού συντονισμού στα 757Hz (5). Ο συντονισμός στα 599Hz (4) εντοπίζεται στην περιοχή αυτή.
- Από τα 757Hz έως τα 1400Hz περίπου (5-8), υπάρχει μία ανομοιομορφία στην απόκριση του καπακιού. Αρνητικό στοιχείο είναι η μείωση του πλάτους ταλάντωσης (6,7-947Hz, 1037Hz αντίστοιχα) με χαρακτηριστικά τα δύο «βυθίσματα» μετά τον 5<sup>ο</sup> και 7<sup>ο</sup> συντονισμό. Ιδιαίτερο μειονέκτημα αποτελεί η «νεκρή» περιοχή εύρους 350Hz περίπου μεταξύ της 7<sup>ης</sup> και 8<sup>ης</sup> κορυφής.
- Ο ισχυρότερος συντονισμός του φάσματος ανιχνεύεται στη συχνότητα 1400Hz (8) ενώ ακολουθείται από σημαντική πτώση πλάτους (9,10-1489Hz, 1665Hz αντίστοιχα) μέχρι το απότομο «βύθισμα» με αρνητική κορυφή στα 1830Hz.
- Οι πιο ασθενείς συντονισμοί στις συχνότητες 1927Hz, 2013Hz, 2229Hz και 2537Hz (11, 12, 13,14) παρουσιάζουν μικρή διαφορά πλάτους μεταξύ τους με αποτέλεσμα μία περισσότερο επίπεδη απόκριση αλλά με «κακούς» συντονισμούς (μικρού παράγοντα ποιότητας Q - «βυθίσματα» αμέσως μετά την κορυφή κάθε συντονισμού). Η πτώση πλάτους γίνεται μεγαλύτερη μετά τα 2.5kHz και συνεχίζεται μέχρι λίγο πριν τα 3kHz (μοναδικός οξύς συντονισμός στα 2792Hz-15).
- Η συχνοτική περιοχή 3kHz-3.3kHz δεν χαρακτηρίζεται από αξιόλογους συντονισμούς (ιδιαίτερα χαμηλό πλάτος ταλάντωσης, 16-17). Σημαντική ενίσχυση στο πλάτος εντοπίζεται μετά τα 3.3kHz με κορύφωση στις συχνότητες 3768Hz και 3854Hz (20,21 αντίστοιχα).
- Μετά τα 3.8kHz ακολουθεί σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης με μία «νεκρή» περιοχή εύρους 1000Hz περίπου (21-22-23). Στις υψηλότερες συχνότητες καταγραφής ανιχνεύεται μία ακόμη περιοχή συντονισμών, με λίγο μικρότερο πλάτος ταλάντωσης από τις τιμές πλάτους στα 3.7kHz/3.8kHz, στις συχνότητες 4831Hz, 4935Hz, 5128Hz (23,24).





**Εικόνα 4.2.2.5** Συχνотική απόκριση για το δεύτερο καπάκι λαούτου ( φάσμα μέσου όρου : η αρίθμηση υποδεικνύει σημαντικούς συντονισμούς ενώ οι «νεκρές» περιοχές / «βυθίσματα» καταγράφονται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή).

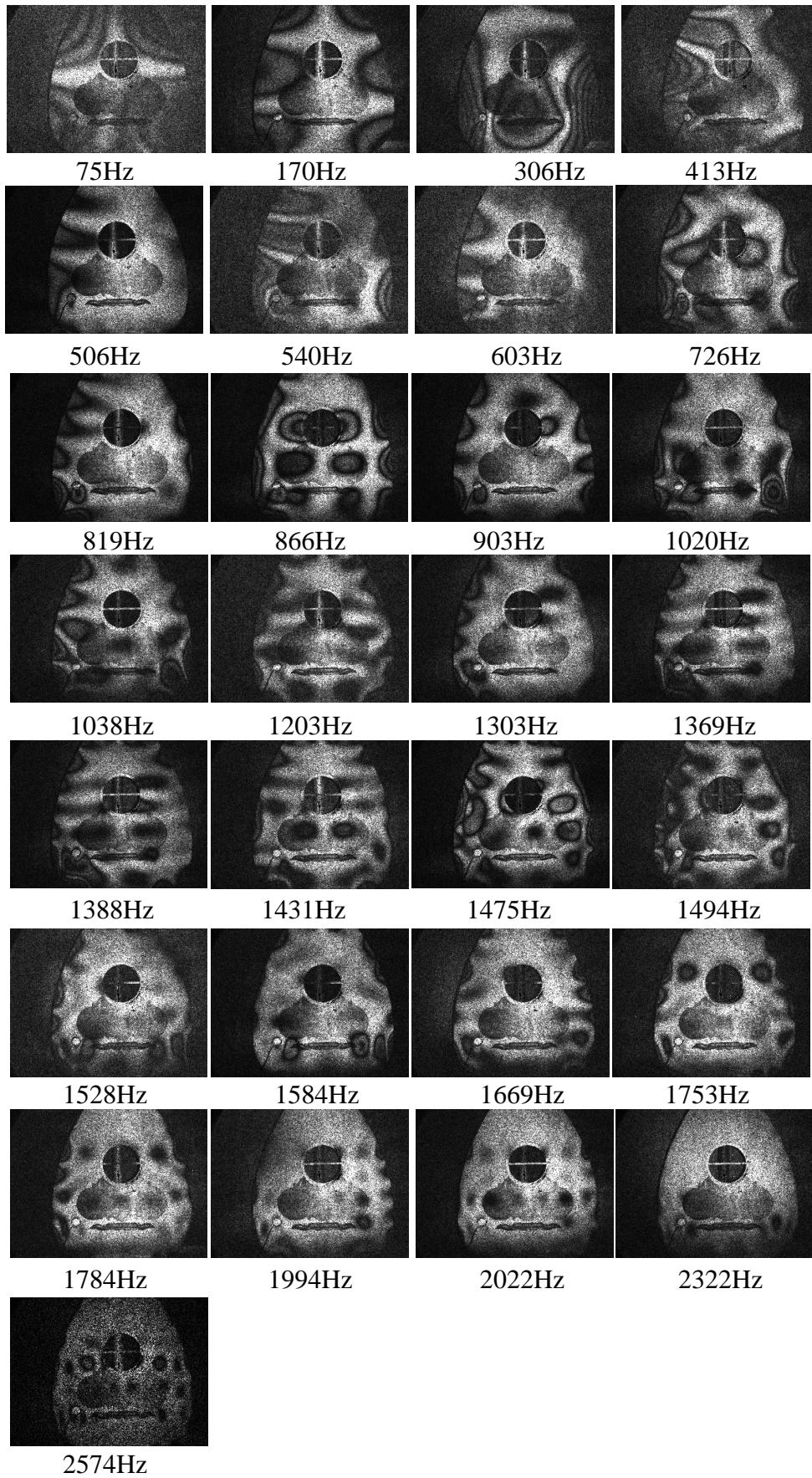
- Στις πολύ χαμηλές συχνότητες καταγράφονται δύο συντονισμοί στα 64,5Hz και 104Hz (μικρού πλάτους).
- Οι δύο ισχυροί συντονισμοί εντοπίζονται ξεκάθαρα στις συχνότητες 140Hz και 226Hz (σημεία 1,2 αντίστοιχα). Αρκετά μεγάλο «βύθισμα» ανιχνεύεται μετά την κορυφή του 2<sup>ου</sup> συντονισμού.
- Από τα 359Hz (3) μέχρι τα 754Hz (5-μέγιστος συντονισμός φάσματος) υπάρχει μικρή ενίσχυση του πλάτους ταλάντωσης με έναν σχετικά ισχυρό συντονισμό να ανιχνεύεται στη συχνότητα 441Hz (4).
- Αρνητικά στοιχεία αποτελούν τα δύο απότομα «βυθίσματα» μετά τον 5<sup>ο</sup> σημαντικό συντονισμό (με αρνητικές κορυφές στις συχνότητες 850,5Hz και 1112,5Hz). Ανάμεσα στα δύο «βυθίσματα» εντοπίζεται μία μικρή περιοχή με δύο «καλούς» συντονισμούς στα 951Hz και 1015,6Hz (6,7).
- Σχετικά επίπεδη απόκριση με ικανοποιητικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζει η περιοχή 1274Hz-1863Hz (8,9,10,11-1299Hz, 1425Hz, 1708Hz, 1863Hz αντίστοιχα). Ένα ανεπιθύμητο μικρό «βύθισμα» εντοπίζεται μεταξύ 1.2kHz και 1.4kHz (8,9).
- Μετά τα 1.8kHz το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται σημαντικά με πυκνούς αλλά ασθενείς συντονισμούς να ανιχνεύονται μέχρι τα 2950Hz. Σημειώνονται

οι εμφανείς συντονισμοί στις συχνότητες 2078Hz, 2232Hz, 2426Hz, 2641Hz, 2792Hz, 2882Hz, 2921Hz (12, 13, 14, 15, 16, 17).

- Στο συχνοτικό εύρος 2.9kHz-3.7kHz το πλάτος συντονισμών μειώνεται ακόμη περισσότερο. Κάποιοι συντονισμοί, όχι όμως ξεκάθαροι, καταγράφονται στις συχνότητες 3122Hz, 3338Hz, 3549Hz (18, 19, 20). Αρνητικό είναι το απότομο «βύθισμα» μετά τα 2.9kHz.
- Στην υψηλότερη περιοχή καταγραφής του φάσματος 3.7kHz-5.5kHz είναι εμφανείς δύο «καμπύλες» / «όρη» που κατακλύζονται από πυκνούς αλλά δυσδιάκριτους συντονισμούς (3747Hz-3876Hz, 4874Hz-4981Hz, 21-22 και 24-25 αντίστοιχα). Μειονέκτημα αποτελεί η «νεκρή» περιοχή στο εύρος 3.8kHz-4.8kHz.

#### ***4.2.3 Αποτελέσματα μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας***

Οι εικόνες συμβολής που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας (ESPI) για τα καπάκια λαούτων παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη παράγραφο. Μεταξύ των εικόνων που περιγράφουν κάποιο σημαντικό συντονισμό του οργάνου (ιδιοσυχνότητα συστήματος) εμπεριέχονται εικόνες συμβολής, με καλή διακριτότητα, οι οποίες αποτελούν ένα μεταβατικό στάδιο. Ο τρόπος ταλάντωσης του καπακιού σε ενδιάμεσες συχνότητες, μεταξύ δηλαδή των βασικών συντονισμών, αποτελεί ακόμη ένα κριτήριο για τη δονητική συμπεριφορά μίας επιφάνειας.



**Εικόνα 4.2.3.1** Αποτελέσματα ολογραφικής συμβολομετρίας σχεδίου ψηφίδας ( ESPI ) για το πρώτο καπάκι λαούτου.

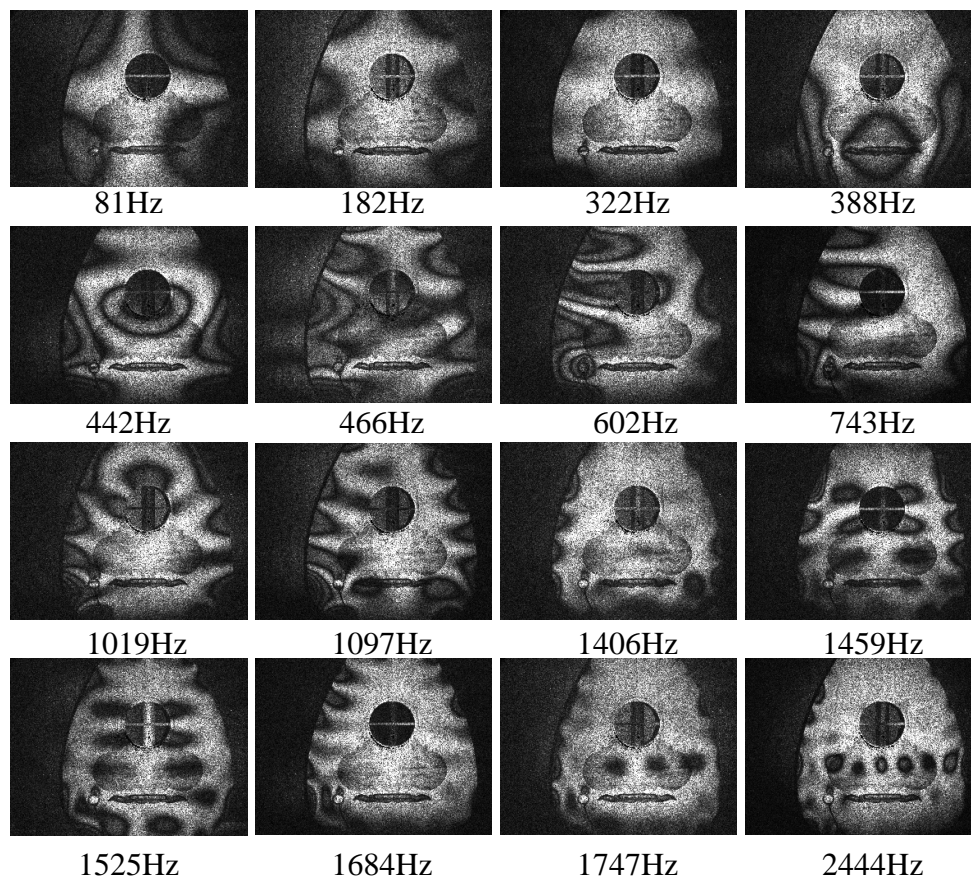
Η μέτρηση για το πρώτο καπάκι λαούτου ξεκίνησε από τα 50Hz και ολοκληρώθηκε στα 2600Hz, εφόσον περαιτέρω αύξηση στη συχνότητα διέγερσης δεν απέδωσε κάτι αξιόλογο. Άλλωστε η καμπύλη απόκρισης ενός λαούτου δεν υποστηρίζεται σε τόσο υψηλές συχνότητες.

Στις χαμηλές συχνότητες προέκυψαν αρκετά ξεκάθαροι, τέσσερις βασικοί συντονισμοί. Οι εικόνες συμβολής που καταγράφηκαν στις συχνότητες **75Hz**, **170Hz**, **306Hz** και **413Hz** περιγράφουν τις πρώτες καταστάσεις συντονισμού. Στα 75Hz σχηματίστηκε ένας «σταυρός» κομβικών γραμμών με τέσσερις λοβούς κροσσών στην αριστερή και δεξιά περιοχή του καπακιού (ως προς τον κατακόρυφο άξονα στήριξης). Στη συχνότητα των 170Hz εμφανίζονται τρεις συμμετρικοί λοβοί κροσσών αριστερά του κατακόρυφου άξονα και τρεις ακόμη στην δεξιά πλευρά. Στα 306Hz προέκυψε η τρίτη κατάσταση συντονισμού με έναν κεντρικό λοβό κροσσών (κοντά στη γέφυρα του οργάνου) και δύο λοβούς στην αριστερή και δεξιά πλευρά του καπακιού. Ο επόμενος συντονισμός ανιχνεύτηκε στα 413Hz με εμφανείς κροσσούς κυρίως στην αριστερά πλευρά του καπακιού.

Περνώντας στη μεσαία περιοχή συχνοτήτων η αριστερά πλευρά του καπακιού διατηρεί αμυδρά κάποιους κροσσούς ώσπου να καταλήξει σε μία έντονη κατάσταση δόνησης στα **540Hz**. Χωρίς να χαθούν εντελώς οι κροσσοί στην αριστερά πλευρά, αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης μέχρι τα **726Hz** όπου ανιχνεύεται ένας αρκετά ξεκάθαρος συντονισμός. Ευδιάκριτοι είναι οι τέσσερις - αρκετά συμμετρικοί - λοβοί κροσσών στο κέντρο του καπακιού καθώς και οι λοβοί στην περιμετρική περιοχή του οργάνου. Στα **866Hz** αυξάνονται οι λοβοί κροσσών στο κέντρο του καπακιού (σε έξι) διατηρώντας τη συμμετρία τους, καθώς και οι «περιμετρικοί» κροσσοί. Πρόκειται επομένως για μία ακόμη σημαντική κατάσταση συντονισμού.

Πλησιάζοντας την υψηλή συχνοτική περιοχή καταγραφής, ανιχνεύτηκε μία κατάσταση συντονισμού στα **903Hz** με εμφανείς τρεις λοβούς κροσσών (που σχηματίζουν τρίγωνο) στην επάνω περιοχή του καπακιού. Η διάταξη αυτή μετασχηματίζεται σταδιακά (εμφάνιση έξι κροσσών στο κάτω μέρος) μέχρι να καταλήξει στην εικόνα συμβολής των **1038Hz**. Στη συχνότητα αυτή, η επιφάνεια του καπακιού ταλαντώνεται σημαντικά σε εννέα σημεία (τρεις επάνω και έξι κάτω λοβοί κροσσών) διατηρώντας τους κροσσούς της περιμέτρου. Από τη συχνότητα **1203Hz** αρχίζει να εμφανίζεται μία άλλη κατάσταση συντονισμού, η οποία ολοκληρώνεται στη συχνότητα **1388Hz**. Παρατηρείται αύξηση των λοβών (δέκα-σχεδόν συμμετρικοί-κροσσοί στην κεντρική περιοχή) με την αριστερή πλευρά (περιμετρικά) να παρουσιάζει λίγο πιο έντονο το φαινόμενο του συντονισμού. Στα **1475Hz** εντοπίζεται μία αρκετά έντονη κατάσταση συντονισμού με σχετικά καθαρούς κροσσούς να «κατευθύνονται» προς την περιμετρική περιοχή. Στα **1753Hz** προέκυψε μία εικόνα συμβολής που συνεχίζει να υπάρχει μέχρι και τα **1784Hz** με μικρές διαφορές.

Στις τελευταίες συχνότητες καταγραφής ανιχνεύτηκε μία κατάσταση συντονισμού (μικρής διακριτότητας), η οποία αρχίζει να είναι εμφανής από τα 1.9kHz-1944Hz και ολοκληρώνεται στα **2022Hz**. Στα **2574Hz** ίσως να εμφανίζεται μία άλλη κατάσταση συντονισμού που όμως δεν είναι ευδιάκριτη.



**Εικόνα 4.2.3.2** Αποτελέσματα ολογραφικής συμβολομετρίας σχεδίου ψηφίδας ( ESPI ) για το δεύτερο καπάκι λαούτου.

Η καταγραφή των αποτελεσμάτων της οπτικής μεθόδου για το δεύτερο καπάκι λαούτου πραγματοποιήθηκε σε συχνοτικό εύρος 50Hz-2500Hz. Περαιτέρω αύξηση της συχνότητας διέγερσης της επιφάνειας καπακιού κρίθηκε μη απαραίτητη δεδομένου ότι η καμπύλη απόκρισης του οργάνου δεν υποστηρίζεται σε υψηλότερες περιοχές συχνοτήτων.

Η πρώτη κατάσταση συντονισμού ανιχνεύτηκε στα **81Hz** και πρόκειται για το σχήμα «σταυρού» των κομβικών γραμμών-περιοχών. Οι λοβοί κροσσών που σχηματίζονται στην δεξιά πλευρά του καπακιού (ως προς τον κατακόρυφο άξονα στήριξης) έχουν μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης από αυτούς της αριστερής πλευράς (ασυμμετρία κατασκευής). Ο δεύτερος συντονισμός εντοπίστηκε στα **182Hz** με αρκετά συμμετρικούς κροσσούς (έξι «περιμετρικούς» - μικρού πλάτους ταλάντωσης) μικρής διακριτότητας. Στα **322Hz** ανιχνεύτηκε μία εικόνα συμβολής μικρής διακριτότητας που πιθανώς αντιστοιχεί στον τρίτο συντονισμό του λαούτου. Σχεδόν όλη η κεντρική περιοχή του καπακιού αποτελείται από σημεία με ελάχιστο πλάτος ταλάντωσης ενώ στη περιμετρική περιοχή διακρίνονται οκτώ κροσσοί. Αυξάνοντας τη συχνότητα διέγερσης στα **388Hz** εμφανίζεται ένας κεντρικός κροσσός (στο κάτω μέρος του καπακιού-περιοχή γέφυρας) και δύο ευδιάκριτοι λοβοί κροσσών (αριστερά και δεξιά του κεντρικού κροσσού), με αποτέλεσμα μία νέα κατάσταση συντονισμού, η οποία μετασχηματίζεται σταδιακά στην εικόνα συμβολής των **442Hz**. Ο κεντρικός κροσσός έχει «μετακινηθεί» στο κέντρο του καπακιού, ενώ οι λοβοί κροσσών έχουν αυξηθεί στην περίμετρο του καπακιού. Με αύξηση της συχνότητας οι κροσσοί δεν

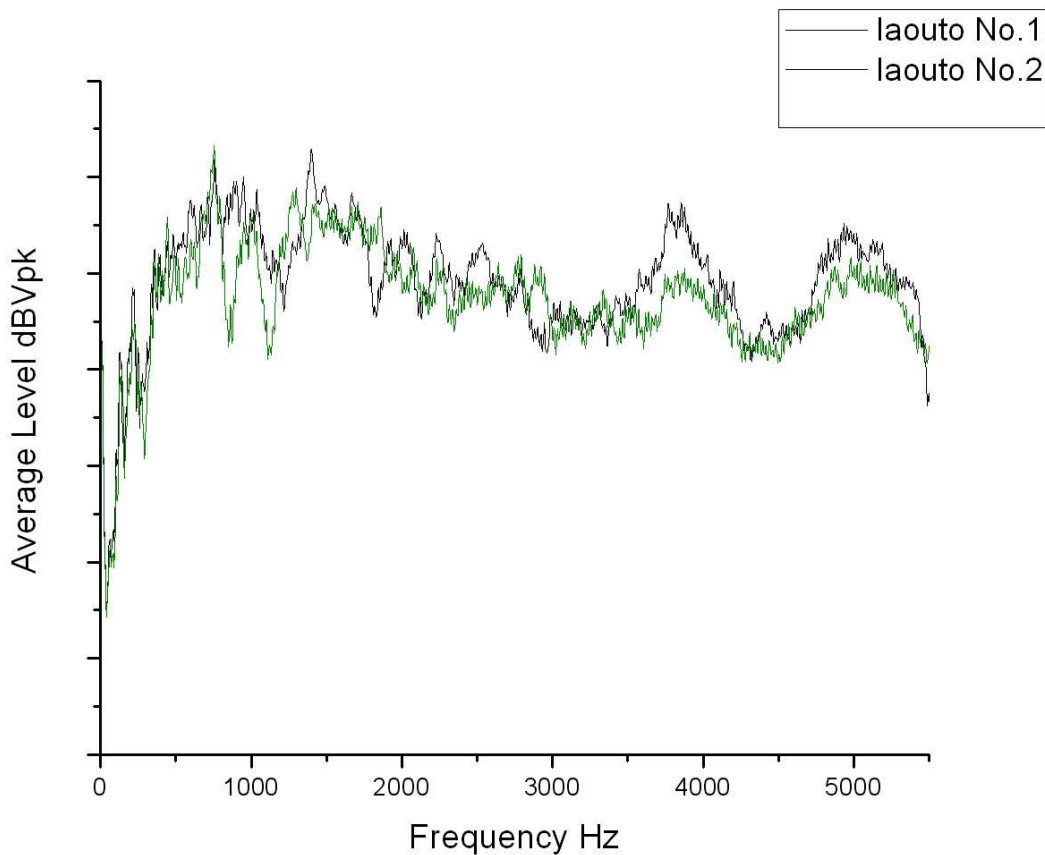
χάνονται αλλά μετασχηματίζονται στην εικόνα συμβολής των **466Hz**, μεγάλης διακριτότητας, μέχρι να καταλήξουν στην κατάσταση συντονισμού των **602Hz**. Στη συχνότητα αυτή, οι λοβοί κροσσών στη δεξιά περιοχή του καπακιού είναι ελάχιστοι (ασυμμετρία κατασκευής).

Ακολουθεί μία σχετικά «φτωχή» συχνοτική περιοχή μέχρι την ανίχνευση του σημαντικού συντονισμού στα **1019Hz**. Πρόκειται για το συντονισμό που χαρακτηρίζεται από τρεις εμφανείς κροσσούς (που σχηματίζουν τρίγωνο) στο επάνω μέρος του καπακιού και αρκετούς λοβούς κροσσών περιμετρικά. Οι έξι αναμενόμενοι κροσσοί στο κάτω μέρος του καπακιού δεν εμφανίζονται. Στα **1459Hz** προκύπτει ο επόμενος ιδιορυθμός με εμφανείς τους οκτώ - αρκετά συμμετρικούς - λοβούς κροσσών στην κεντρική περιοχή του καπακιού. Οι λοβοί κροσσών στο κέντρο της επιφάνειας του καπακιού αυξάνονται σε δέκα με αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας αξιολογής εικόνας συμβολής στα **1525Hz**.

Στις υψηλότερες συχνότητες καταγραφής ανιχνεύτηκαν δύο ακόμη σημαντικοί συντονισμοί στις συχνότητες των **1747Hz** (με τέσσερις κροσσούς κάτω από την οπή) και **2444Hz** (με έξι κροσσούς κάτω από την οπή).

### 4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων-συγκρίσεις

#### 4.3.1 Σύγκριση δονητικής συμπεριφοράς καπακιών λαούτων – Μηχανική μέθοδος



Εικόνα 4.3.1 Συχνοτική απόκριση μέσου όρου για τα δύο καπάκια λαούτων.

Από το συγκριτικό φάσμα μέσου όρου για τα δύο καπάκια προκύπτουν τόσο σημαντικές ομοιότητες όσο και διαφορές μεταξύ των δονητικών συμπεριφορών, οι οποίες συγκεντρώνονται παρακάτω.

1. Συντονισμοί στα ελεύθερα καπάκια των λαούτων ανιχνεύονται από τις πολύ χαμηλές συχνότητες των 61Hz-86Hz και 104Hz.
2. Δύο σημαντικοί συντονισμοί καταγράφονται σε κάθε φάσμα στις συχνότητες 129Hz/215Hz και 140Hz/226Hz, αντίστοιχα. Σημειώνεται η σταθερή διαφορά των 86Hz μεταξύ των δύο αυτών συντονισμών και στα δύο καπάκια.
3. Κοινό «βύθισμα» μετά τη συχνότητα του δεύτερου ισχυρού συντονισμού (215Hz και 226Hz, αντίστοιχα) και εντοπισμός σημαντικού συντονισμού στα 359Hz για τα δύο καπάκια. Ακολουθεί ενίσχυση του πλάτους ταλάντωσης (σταδιακή / ομοιόμορφη αύξηση για το πρώτο καπάκι) μέχρι τα 754Hz-757Hz (ο οξύτερος συντονισμός για το δεύτερο καπάκι σε ολόκληρο το συχνοτικό εύρος καταγραφής).
4. Ανεπιθύμητη δονητική συμπεριφορά από 754Hz/757Hz έως 1.3kHz/1.4kHz. Δύο απότομα «βυθίσματα» για το δεύτερο έναντι ενός για το πρώτο καπάκι, στην περιοχή αυτή.
5. Εμφανής μείωση πλάτους συντονισμών στα δύο καπάκια στην συχνοτική περιοχή 1.3kHz/1.4kHz μέχρι τα 3kHz περίπου. Οξύτεροι και πιο διακριτοί οι συντονισμοί του πρώτου καπακιού σε σύγκριση με τους πυκνούς αλλά ασθενείς συντονισμούς του δεύτερου καπακιού. Κυριαρχεί ανομοιομορφία στην απόκριση του πρώτου σε σχέση με τη σταδιακή πτώση πλάτους ταλάντωσης του δεύτερου.
6. Περαιτέρω μείωση του πλάτους ταλάντωσης μετά τα 3kHz, με ασθενείς και δυσδιάκριτους συντονισμούς (χαμηλότερο πλάτος ταλάντωσης στο φάσμα).
7. Σημαντική ομοιότητα στη δονητική συμπεριφορά των δύο καπακιών στην υψηλή περιοχή μέτρησης. Υψηλά πλάτη συντονισμών σε ένα εύρος γύρω από τα 3.8kHz και 4.9kHz (μεγαλύτερες τιμές πλάτους για το πρώτο καπάκι). «Νεκρή» περιοχή συχνοτήτων μεγάλου εύρους ( $\approx 1000\text{Hz}$ ) από 3.8kHz μέχρι 4.8kHz.
8. Σταδιακή μείωση του πλάτους συντονισμών μετά την τελευταία «κορύφωση» στα 4.9kHz και για τα δύο καπάκια.

Συνοψίζοντας, στην χαμηλή περιοχή καταγραφής των φασμάτων, το πρώτο καπάκι εμφανίζει οξύτερους συντονισμούς (υψηλότερο πλάτος ταλάντωσης) και λιγότερες περιοχές απότομης μείωσης του πλάτους από το δεύτερο καπάκι. Αντίθετα, στη μεσαία προς υψηλή συχνοτική περιοχή «υπερτερεί» το δεύτερο καπάκι, το οποίο παρουσιάζει μία σταδιακή πτώση πλάτους των συντονισμών παρόλο που στο πρώτο καπάκι ανιχνεύονται μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης. Τέλος, η υψηλότερη περιοχή των φασμάτων παρουσιάζει ελάχιστες διαφορές για τα δύο καπάκια (μικρότερο πλάτος στην απόκριση του δεύτερου). Σημειώνεται η διαφορετική συμπεριφορά του δεύτερου καπακιού στις συχνότητες 1300Hz, 1863Hz, 2.8kHz-2.9kHz (κορυφές συντονισμών) «εις βάρος» του πρώτου και ο μικρού πλάτους συντονισμός στα 4.4kHz στο πρώτο καπάκι (στην αντίστοιχη «νεκρή» περιοχή του δεύτερου).

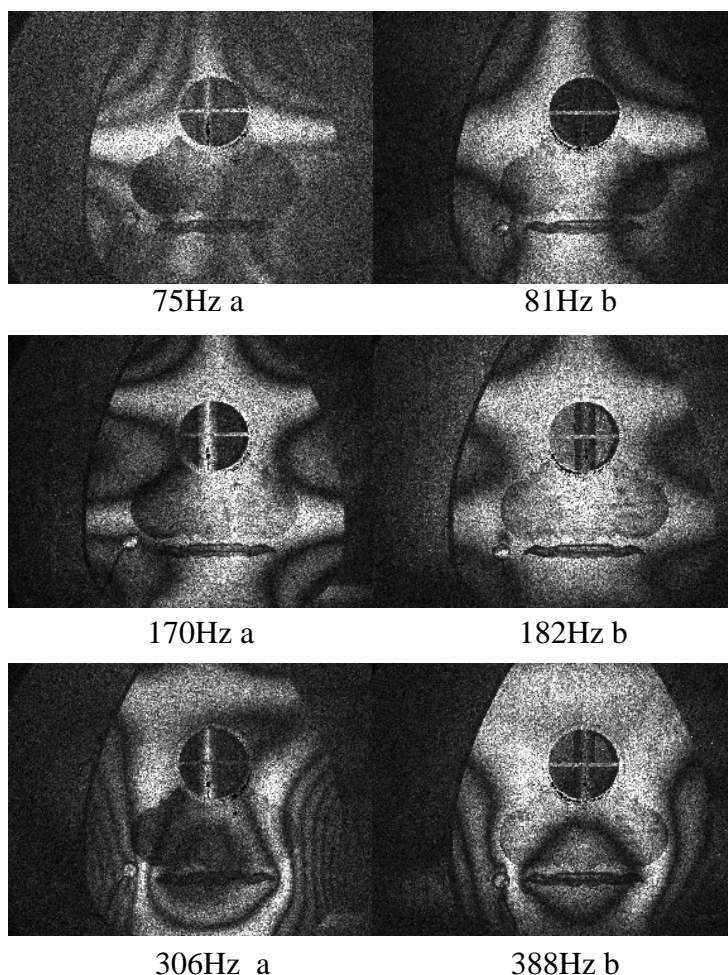


### 4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ολογραφικής συμβολομετρίας

Από τα αποτελέσματα της οπτικής μεθόδου που εφαρμόστηκε για τη μέτρηση των δύο λαούτων, επιλέχθηκαν οι κοινοί τρόποι ταλάντωσης (κοινές καταστάσεις συντονισμού) και παρουσιάζονται παρακάτω.

Σκοπός είναι η ποιοτική σύγκριση των εικόνων συμβολής των καπακιών των λαούτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά τους κατά τη δόνηση. Πληροφορίες σχετικά με τη συμμετρικότητα του καπακιού κάθε λαούτου προκύπτουν από τη μορφή των εικόνων. Η επιλογή των εικόνων συμβολής που απεικονίζουν τους σημαντικούς ιδιορυθμούς στα δύο καπάκια, έγινε βάση της κοινής μορφής κροσσών που καταγράφηκε ανά συχνότητα.

Το σημείο αρμονικής διέγερσης του καπακιού (σημείο επαφής πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου με την ξύλινη επιφάνεια) βρίσκεται στην κάτω αριστερή πλευρά της δονούμενης επιφάνειας. Κάποιοι κροσσοί που εμφανίζονται περιμετρικά του σημείου διέγερσης οφείλονται στον τοποθετημένο δονητή και δε λαμβάνονται υπόψη εφόσον παραμορφώνουν την εικόνα συμβολής.

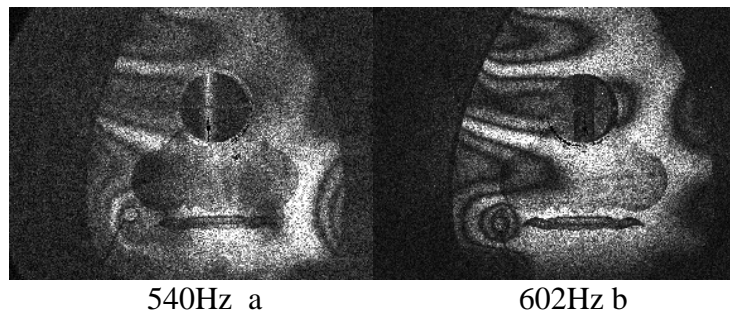
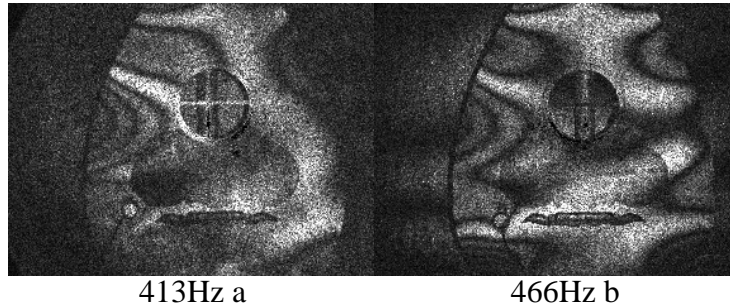


Εικόνα 4.3.2.1

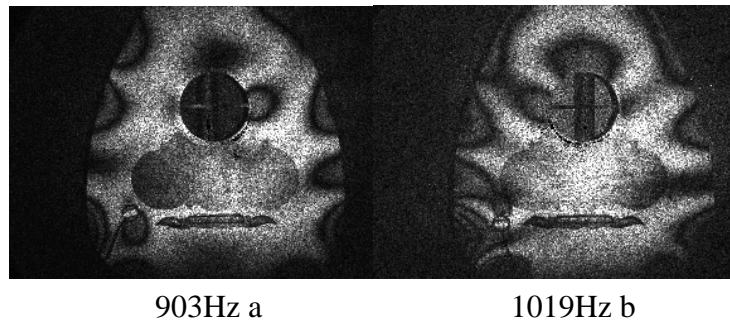
Οι τρεις πρώτοι / κοινοί συντονισμοί που ανιχνεύτηκαν για τα καπάκια στην χαμηλή περιοχή συχνοτήτων, φαίνονται στην εικόνα 4.3.2.1. Το καπάκι a εμφανίζει μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης από το καπάκι b (a : λαούτο No.1, b : λαούτο No.2).



Αυτό προκύπτει από τον μεγαλύτερο αριθμό κροσσών στους λοβούς για το καπάκι a (μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κροσσών). Συνεπώς το καπάκι a παρουσιάζει εντονότερο το φαινόμενο συντονισμού στις χαμηλές συχνότητες.



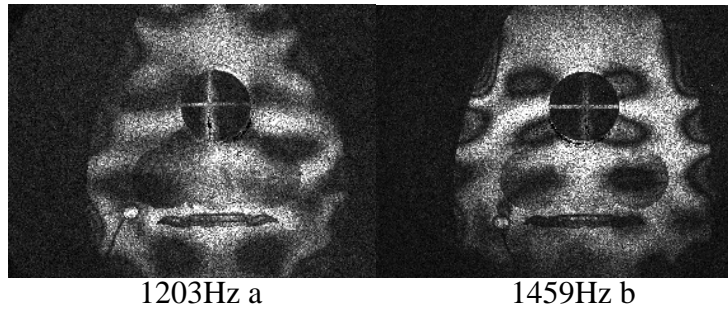
**Εικόνα 4.3.2.2**



**Εικόνα 4.3.2.3**



**Εικόνα 4.3.2.4**



1203Hz a

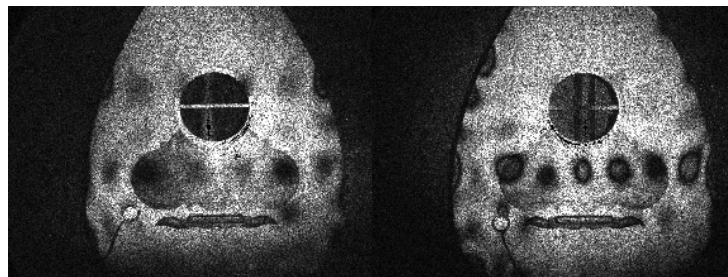
1459Hz b



1388Hz a

1525Hz b

Εικόνα 4.3.2.5



2022Hz a

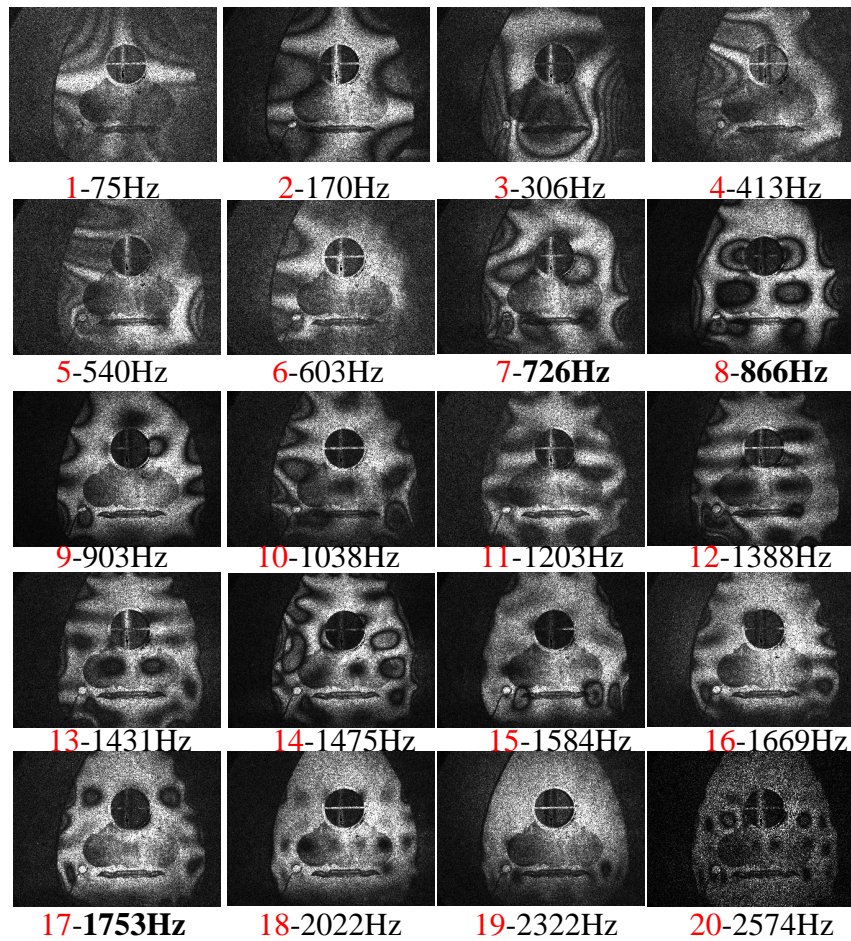
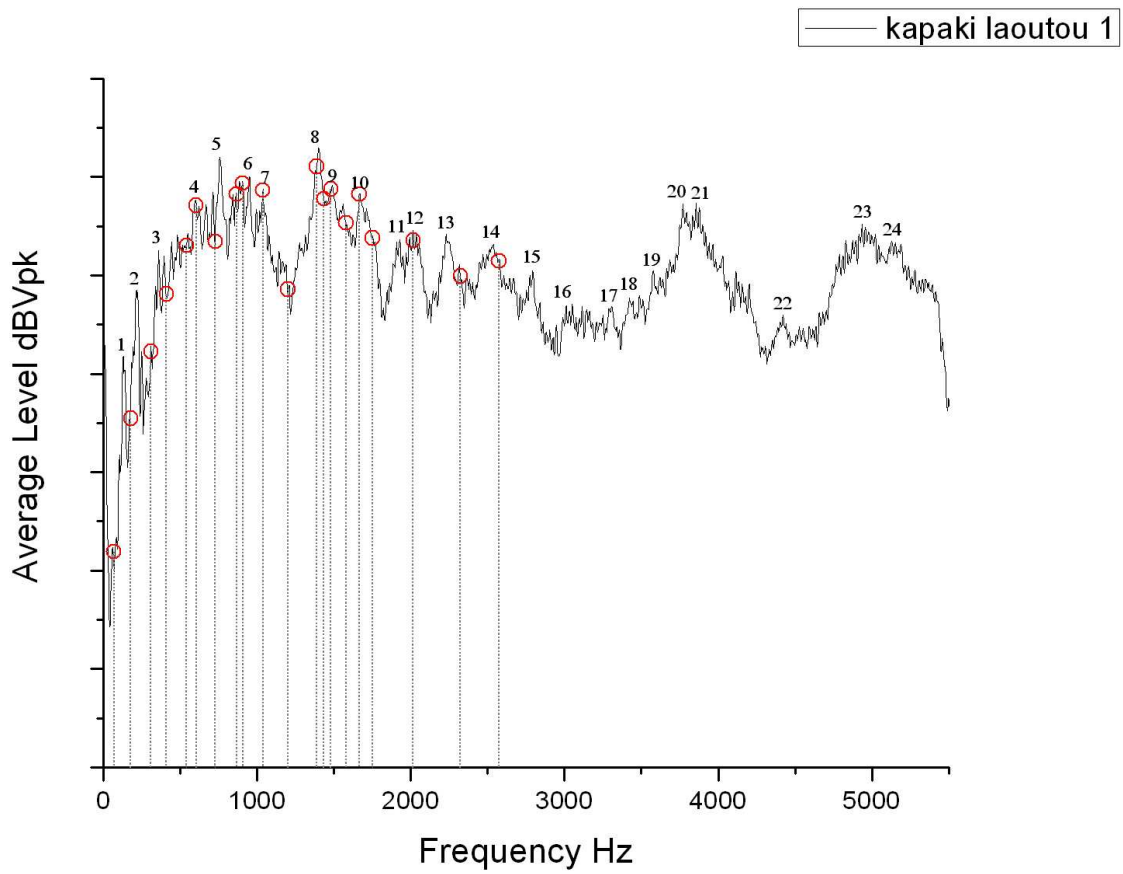
2444Hz b

Εικόνα 4.3.2.6

Οι εικόνες συμβολής που καταγράφηκαν στις μεσαίες και υψηλές περιοχές συχνοτήτων διαφέρουν ελάχιστα ως προς την ένταση / διακριτικότητα και την κατανομή / θέση κροσσών. Το πλήθος και η συμμετρία των εντοπισμένων κροσσών διαφέρουν ελάχιστα στα δύο καπάκια. Η συχνότητα καταγραφής των εικόνων για το καπάκι b είναι και πάλι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες συχνότητες του καπακιού a. Αξιοσημείωτη είναι η αυξανόμενη διαφορά μεταξύ των συχνοτήτων συντονισμού των καπακιών στις κοινές καταστάσεις.

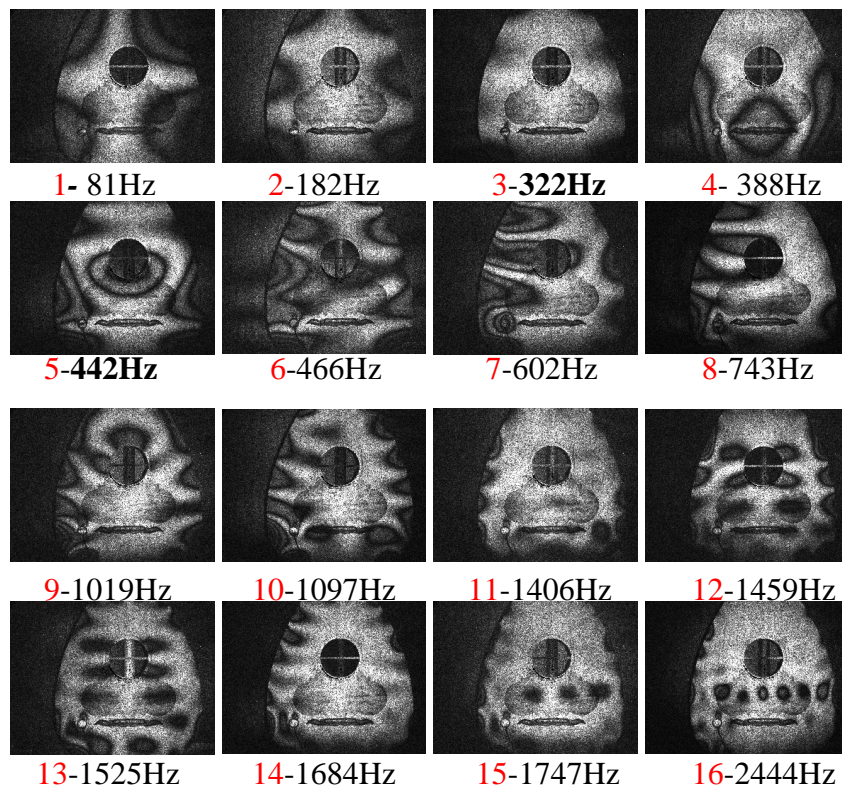
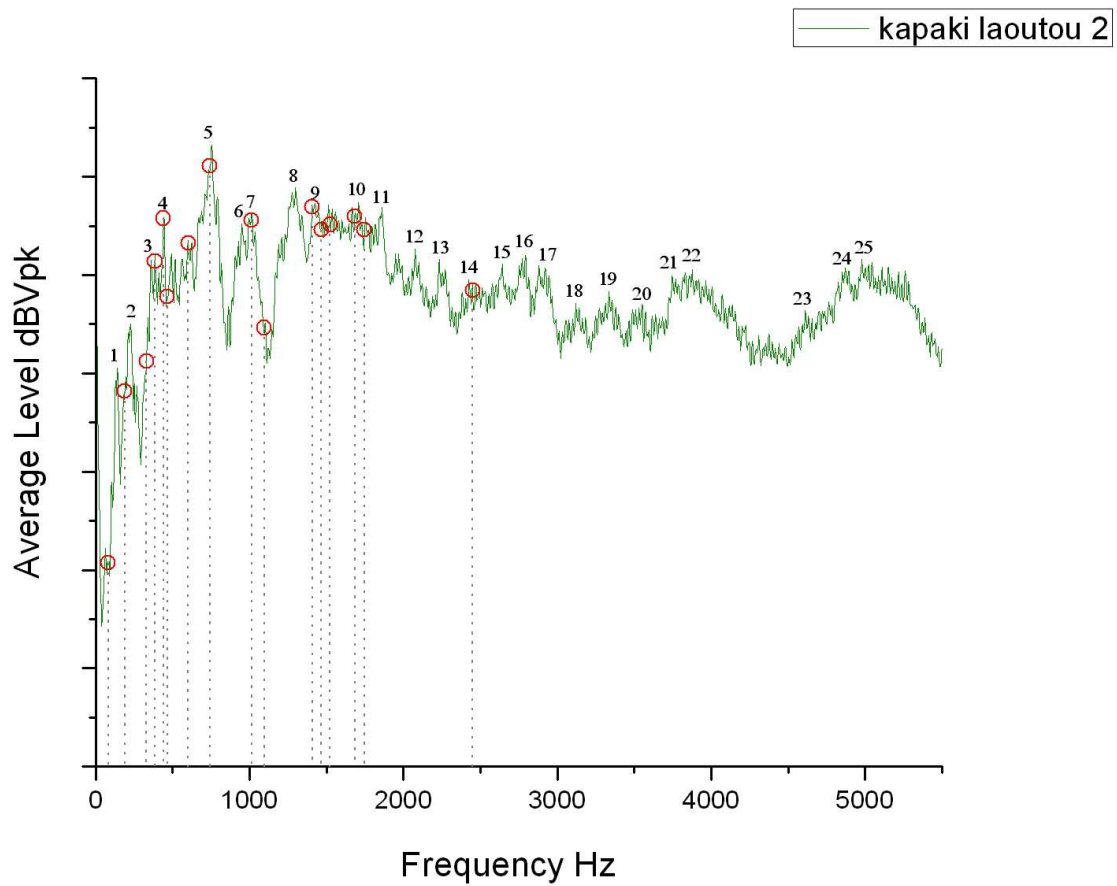
### 4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων *ESPI* με ηχοβόλιση

Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων καταγραφής της δονητικής συμπεριφοράς των καπακιών λαούτων παρουσιάζονται στην παράγραφο αυτή, σε κοινό γράφημα, με σκοπό την ευκολότερη και άμεση σύγκριση. Στο κοινό γράφημα απεικονίζονται οι σημαντικοί συντονισμοί (αρίθμηση στο φάσμα) της μεθόδου ηχοβόλισης καθώς και οι βασικοί ιδιορυθμοί (εικόνες συμβολής) που προέκυψαν με τη μέθοδο της ολογραφικής συμβολομετρίας (κόκκινοι κύκλοι στο φάσμα).



Εικόνα 4.3.3.1 Φάσμα μέσου όρου ηχοβόλσης και κατανομή πλάτους ταλάντωσης μέσω ESPI για το καπάκι λαούτου 1.





**Εικόνα 4.3.3.2** Φάσμα μέσου όρου ηχοβόλισης και κατανομή πλάτους ταλάντωσης μέσω ESPI για το καπάκι λαούτου 2.

Από τις εικόνες 4.3.3.1 και 4.3.3.2 (καπάκι λαούτου 1 και 2, αντίστοιχα) προέκυψαν συγκριτικά συμπεράσματα για τις δύο μεθόδους καταγραφής της δονητικής συμπεριφοράς των καπακιών και παρουσιάζονται παρακάτω.

#### Καπάκι λαούτου 1

- Ικανοποιητικό εύρος καταγραφής των αποτελεσμάτων της ολογραφικής συμβολομετρίας (75Hz-2.5kHz) και σημαντική «ταύτιση» των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων ως προς την κατανομή πλάτους.
- Ισχυροί τρόποι δόνησης στις χαμηλές συχνότητες καταγραφής (75Hz, 170Hz, 306Hz, 413Hz) με τον πρώτο και δεύτερο σημαντικό συντονισμό (129Hz, 215Hz) του φάσματος ηχοβόλισης να μην ανιχνεύονται με την ESPI.
- Μέγιστη κατανομή πλάτους στις συχνότητες 540Hz, 726Hz (με μικρότερο πλάτος στην ηχοβόλιση), 866Hz, 1kHz, 1.4kHz με την ESPI αλλά και στην ηχοβόλιση.
- Μικρή απόκλιση συχνότητας στους χαμηλόσυχνους τρόπους δόνησης και καλύτερη προσέγγιση στις υψηλές συχνότητες καταγραφής.
- Μικρότερα ανιχνεύσιμα πλάτη ταλάντωσης στην υψηλότερη περιοχή καταγραφής και στις δύο μεθόδους. Δυσκολότερος σχηματισμός των ιδιορυθμών στις υψηλές συχνότητες.
- Στο μεγάλο εύρος «βύθισμα» μετά τα 1kHz έως τα 1.4kHz (σημεία 7-8 ηχοβόλισης) ανιχνεύεται μία αξιόλογη εικόνα συμβολής στη συχνότητα 1203Hz (μικρού πλάτους ταλάντωσης) με την ESPI.

#### Καπάκι λαούτου 2

- Μικρό εύρος καταγραφής αποτελεσμάτων με την ESPI (81Hz-2.44Hz). Δυσκολία ανιχνεύσιμου πλάτους ταλάντωσης μετά τη συχνότητα 2.44kHz.
- Οι βασικοί τρόποι ταλάντωσης στις χαμηλές συχνότητες ανιχνεύονται με μικρότερο πλάτος (μικρός αριθμός κροσσών) και χαμηλότερη διακριτικότητα με τη μέθοδο ESPI από ότι στο φάσμα ηχοβόλισης.
- Μικρή απόκλιση στη συχνότητα καταγραφής των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.
- Μέγιστη κατανομή πλάτους στις συχνότητες 388Hz, 442Hz, 466Hz, στο εύρος 600-740Hz (με έντονη ασυμμετρία), 1kHz, 1.45kHz στην ESPI. Ο μέγιστος συντονισμός στο φάσμα ηχοβόλισης στα 754Hz (σημείο 5) δεν συμπίπτει με την ανιχνεύσιμη εικόνα συμβολής στα 743Hz (ασυμμετρία κροσσών / μικρό πλάτος δόνησης).
- Ομοιόμορφη δονητική συμπεριφορά (σταδιακή μείωση πλάτους) μετά τα 1.2kHz (ηχοβόλιση) και 1.45kHz (ESPI).
- Στη «νεκρή» περιοχή 1-1.2kHz (7-8 στο φάσμα ηχοβόλισης) εντοπίζεται αξιόλογος συντονισμός (σημαντικού πλάτους) στα 1097Hz με τη μέθοδο ESPI. Μη ανιχνεύσιμος είναι επίσης ο ισχυρός συντονισμός στα 1.2kHz (σημείο 8 φάσματος) με την ESPI. Κανένας συντονισμός δεν καταγράφεται στο εύρος 1.7-2.44kHz με την οπτική μέθοδο σε αντίθεση με την ηχοβόλιση.

#### 4.4 Συμπεράσματα

Από την εφαρμογή της μεθόδου ηχοβόλισης προέκυψαν τα παρακάτω στοιχεία τα οποία κρίνονται σημαντικά για την αξιολόγηση της δονητικής συμπεριφοράς των καπακιών λαούτων που μετρήθηκαν με τη μηχανική τεχνική.

- Χαμηλοί συντονισμοί, «ικανοποιητικής» διακριτότητας, εντοπίζονται στις πολύ χαμηλές συχνότητες καταγραφής για τα καπάκια λαούτων (από τα 63Hz, 172Hz, 183Hz κατά μέσο όρο).
- Μέγιστη κατανομή πλάτους καταγράφεται στο συχνοτικό εύρος 359Hz-754/757Hz (ενίσχυση συντονισμών), 1.2/1.4kHz έως λίγο πριν τα 2kHz και γύρω από τις υψηλές συχνότητες των 3.8kHz, 4.9kHz.
- Σημαντικοί συντονισμοί ανιχνεύονται στις συχνότητες 359Hz (κοινός συντονισμός / 3<sup>ο</sup> μέγιστο φάσματος) και 755,5Hz.
- Σταδιακή πτώση πλάτους ταλάντωσης μετά τη συχνότητα 1.3/1.4kHz και μέχρι τα 3kHz περίπου. Περαιτέρω μείωση του πλάτους συντονισμών παρατηρείται στην περιοχή μετά τα 3kHz έως τα 3.5kHz περίπου.
- Ομοιότητα στην απόκριση παρουσιάζουν τα δύο καπάκια στις υψηλές περιοχές συχνοτήτων με σημαντικούς συντονισμούς να εντοπίζονται γύρω από τα 3.8kHz και 4.9kHz.
- Κοινές «νεκρές» περιοχές καταγράφονται μεταξύ 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> μέγιστου συντονισμού (215/226Hz-359Hz), 7<sup>ο</sup> και 8<sup>ο</sup> τρόπου δόνησης (1037/1016-1.2/1.4kHz) και στην περιοχή 3.8-4.8kHz. Μείωση στο πλάτος ταλάντωσης ανιχνεύεται μετά τα 4.9kHz.

Συγκεντρώνοντας τα σημαντικότερα στοιχεία (ομοιότητες και διαφορές) που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου ολογραφικής συμβολομετρίας για τα καπάκια λαούτων καταλήγουμε στις παρακάτω παραδοχές.

-- Το δεύτερο καπάκι εμφανίζει τις κοινές καταστάσεις δόνησης σε μεγαλύτερες συχνότητες από το πρώτο (μέθοδος ESPI). Αυτό μπορεί να οφείλεται στη διαφορά της κατασκευής των επιφανειών (διαφορετικό ξύλο καπακιών). Επιπλέον, η ασυμμετρία που εντοπίζεται σε αρκετές από τις εικόνες συμβολής είναι δυνατό να οφείλεται στην ανομοιομορφία της κατασκευής του καπακιού, όπως για παράδειγμα το διαφορετικό πάχος σε διάφορα σημεία του, τα νερά του ξύλου, την έλλειψη κατακόρυφου άξονα συμμετρίας.

-- Ορισμένοι σημαντικοί τρόποι δόνησης δεν ανιχνεύτηκαν και για τα δύο καπάκια λαούτων, γεγονός που προσδίδει «αρνητική» συμπεριφορά στο όργανο που στερείται αυτών των συντονισμών και αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα ως προς την εξαγωγή κάποιων περισσότερο γενικευμένων συμπερασμάτων. Άλλωστε το ότι στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε μέτρηση μόνο δύο καπακιών λαούτων, δεν μας επιτρέπει να κάνουμε λόγο για γενική δονητική συμπεριφορά καπακιών λαούτων. Κάτι τέτοιο θα ήταν αξιόπιστο και επιστημονικά σωστό αν η μελέτη γινόταν σε μεγάλο αριθμό οργάνων, έτσι ώστε η προσέγγιση μίας γενικής συμπεριφοράς να ήταν δυνατή.

- ▶ Συγκεκριμένα στο δεύτερο καπάκι ανιχνεύτηκε μία εικόνα συμβολής στα **322Hz** ενώ το πρώτο καπάκι δεν εμφάνισε την αντίστοιχη εικόνα. Το ίδιο έγινε με τον τρόπο ταλάντωσης στα **442Hz**, ο οποίος ανιχνεύτηκε ξεκάθαρα στο δεύτερο καπάκι. Αντίθετα το πρώτο καπάκι εμφάνισε τρεις τρόπους ταλάντωσης στα **726Hz**, **866Hz** και **1753Hz**, οι οποίοι δεν ανιχνεύτηκαν στο δεύτερο καπάκι. Η έλλειψη αναμενόμενων εικόνων συμβολής προσδιορίζει «νεκρές» περιοχές ταλάντωσης και αποτελεί αρνητικό παράγοντα αξιολόγησης μίας δονητικής συμπεριφοράς.

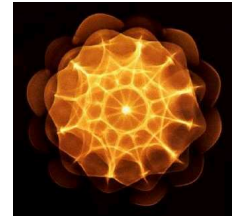
-- Στο πρώτο καπάκι ανιχνεύτηκαν περισσότερες σημαντικές εικόνες συμβολής, σε μεγαλύτερο συχνοτικό εύρος καταγραφής. Μικρή απόκλιση συχνότητας στον εντοπισμό των βασικών τρόπων δόνησης παρουσιάστηκε και για τα δύο καπάκια.

-- Από το σύνολο των κοινών τρόπων συντονισμού διαπιστώνουμε ότι στις χαμηλές συχνότητες καταγραφής, το πρώτο καπάκι παρουσιάζει πιο έντονο το φαινόμενο συντονισμού (περισσότεροι και πιο διακριτοί κροσσοί). Με αύξηση της συχνότητας όμως οι εικόνες συμβολής και των δύο οργάνων δε διαφέρουν πολύ ως προς τη διάταξη κροσσών και τη διακριτότητα. Από την «ποιότητα» των εικόνων συμβολής μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι το πρώτο καπάκι παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά δόνησης στις χαμηλομεσαίες συχνότητες ενώ το δεύτερο καπάκι συμπεριφέρεται ικανοποιητικά στη μεσαία και ιδιαίτερα στην υψηλή συχνοτική περιοχή.

-- Μείωση πλάτους ταλάντωσης καταγράφεται στις συχνότητες 603Hz, 1203Hz και μετά τα 1.5kHz (πρώτο καπάκι) καθώς και στο εύρος 182-322Hz, στα 1406Hz και μετά τα 1.6kHz (δεύτερο καπάκι).

-- Περιοχές με μη ανιχνεύσιμο πλάτος εντοπίζονται και στα δύο καπάκια. Μεταξύ των χαμηλών συχνοτήτων 75Hz-170Hz-306Hz και υψηλών 1.7kHz-2kHz-2.3kHz (καπάκι 1) αλλά και ανάμεσα στις συχνότητες 182Hz-322Hz-466Hz-602Hz, 1-1.4kHz, 1.7-2.44kHz (καπάκι 2).

-- Μέγιστη κατανομή πλάτους και για τα δύο καπάκια στην περιοχή 1-1.4kHz ενώ στις μεσαίες συχνότητες ανιχνεύονται σημαντικοί συντονισμοί γύρω από τα 440Hz και στο εύρος 600-726Hz. Το πρώτο καπάκι εμφανίζει αξιόλογους / ισχυρούς συντονισμούς από τις πολύ χαμηλές συχνότητες (75Hz) σε αντίθεση με το δεύτερο καπάκι, το οποίο συγκεντρώνει τη μέγιστη ενέργεια ταλάντωσης μετά τα 388Hz.



### **5.1 Συμπεράσματα**

Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη του τρόπου ταλάντωσης των επιφανειών εγχόρδων μουσικών οργάνων μέσω μη καταστρεπτικών τεχνικών, όπως η ψηφιακή συμβολομετρία ψηφίδων με χρήση laser, αλλά και μηχανικών μεθόδων, όπως η ηχοβόλιση. Ακόμη η εφαρμογή των δύο τεχνικών εξασφάλισε την μεταξύ τους σύγκριση όσον αφορά την καταλληλότητα και ακρίβεια της κάθε μεθόδου.

Από τη μορφή και μόνο των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων που εφαρμόστηκαν στις τρεις λύρες και τα δύο καπάκια λαούτων, είναι εμφανές ότι η τεχνική συμβολομετρίας ψηφίδων είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος για τη μελέτη δονούμενων αντικειμένων (ημιτονοειδούς διέγερσης). Οι εικόνες συμβολής περιέχουν πληροφορίες (εξαιρετικής ποιότητας συμβολογράμματα) για την χωρική κατανομή του πλάτους ταλάντωσης της επιφάνειας των δονούμενων οργάνων (φάση και διαμόρφωση κροσσών). Επιπλέον, η διακριτική ικανότητα της οπτικής τεχνικής, εξαιτίας του φαινομένου συμβολής, είναι πολύ μεγάλη και επιτρέπει την πραγματοποίηση μετρήσεων πολύ μικρών μετατοπίσεων (της τάξης του μήκους κύματος του laser - nm) σε μεγάλο συχνοτικό εύρος. Συμπεράσματα σχετικά με την ασυμμετρία της κατασκευής, που προκύπτουν από τις εικόνες συμβολής, είναι σημαντικά για την κατανόηση του τρόπου ταλάντωσης των μουσικών οργάνων. Το γεγονός ότι η συμβολομετρία σχεδίου ψηφίδων (ESPI / DSPI) αποτελεί μία μη καταστρεπτική τεχνική (δεν απαιτείται καμία επαφή με την επιφάνεια του μουσικού οργάνου υπό μέτρηση) και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ταυτόχρονα σε μία εκτεταμένη περιοχή (σε ολόκληρη την επιφάνεια του καπακιού) καθιστούν τη μέθοδο αυτή εφαρμόσιμη για δυναμικές μετρήσεις σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Η ακρίβεια των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητική λόγω της χρήσης του laser, η οποία επιτρέπει τη μελέτη δονήσεων σε περιβάλλον εφαρμοσμένης μηχανικής και παρέχει γρήγορη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα της μηχανικής μεθόδου της ηχοβόλισης δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτικά της πραγματικής ακουστικής συμπεριφοράς των οργάνων. Βασικά μειονεκτήματα, όπως η διατάραξη της δυναμικής απόκρισης του οργάνου από την προσκόλληση του πιεζοηλεκτρικού ανιχνευτή (προσθήκη ακαμψίας στο σημείο τοποθέτησης / υπολογισμός συχνοτικής απόκρισης κρυστάλλου), η μικρή διακριτική ικανότητα ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες όπου απαιτούνται πολλαπλάσια σημεία μέτρησης για την ανίχνευση των πολύπλοκων συντονισμών και συνεπώς ο πολύς χρόνος που χρειάζεται για την ολοκλήρωση αυτών των μετρήσεων, καθιστούν τη μηχανική μέθοδο λιγότερο αξιόπιστη και τις προσδίδουν πρακτικές αδυναμίες. Παρόλα αυτά ένα σημαντικό πλεονέκτημα του τρόπου διέγερσης κατά την εφαρμογή της ηχοβόλισης (διέγερση με



πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο) είναι το ότι δεν υπάρχει συμμετοχή του χώρου όπου πραγματοποιείται η μέτρηση.

Μειονεκτήματα των δύο μεθόδων αποτελούν ορισμένοι εξωγενείς παράγοντες (επίδραση εξωτερικού περιβάλλοντος) καθώς και η ύπαρξη της βάσης στήριξης του οργάνου υπό μέτρηση (δημιουργία κόμβων στα σημεία επαφής της βάσης με το δονούμενο σώμα). Στα παραπάνω οφείλονται τυχόν αποκλίσεις και πειραματικά σφάλματα. Παρόλα αυτά, η υψηλή ποιότητα του εξοπλισμού στις οπτικές μετρήσεις (τράπεζα τοποθέτησης της διάταξης, CCD κάμερα καταγραφής, laser, λογισμικό ψηφιακής απεικόνισης και επεξεργασίας) αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα όσων αφορά στην ποιότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων στη συγκεκριμένη μελέτη συμφωνούν με τις παραπάνω παραδοχές καθιστώντας την οπτική μέθοδο περισσότερο αξιόπιστη. Η εφαρμογή της μηχανικής τεχνικής ενισχύει τη μελέτη εφόσον αποτελεί μέτρο σύγκρισης των δύο εφαρμόσιμων τεχνικών. Βέβαια, η εφαρμογή περισσότερων μεθόδων ανίχνευσης των τρόπων ταλάντωσης μίας επιφάνειας οδηγεί σε μία πιο ολοκληρωμένη μελέτη της επιφάνειας.

Από τις τρεις λύρες που μελετήθηκαν, οι δύο πρώτες παρουσίασαν την «καλύτερη» δονητική συμπεριφορά (οξύτεροι - ευδιάκριτοι συντονισμοί σε σχετικά μεγάλο εύρος συχνοτικού φάσματος, καλοσηματισμένες, συμμετρικές και πυκνότερες εικόνες συμβολής). Σημαντικό θετικό στοιχείο στη συμπεριφορά της πρώτης λύρας είναι ότι αρκετές εικόνες συμβολής (μέθοδος ESPI) μετασχηματιζόταν με αύξηση της συχνότητας, μέχρι να καταλήξουν στον επόμενο σημαντικό τρόπο δόνησης. Ορισμένες «νεκρές» περιοχές όμως που ανιχνεύτηκαν με τη μέθοδο της ηχοβόλισης στην πρώτη λύρα έρχονται σε αντίθεση με τη συμπεριφορά της δεύτερης λύρας (σταδιακή πτώση πλάτους) κατά την οποία εμφανίστηκαν λιγότερα «βυθίσματα». Η τρίτη λύρα παρουσίασε μικρότερο ενδιαφέρον ως προς τη δονητική της συμπεριφορά και με τις δύο μεθόδους καταγραφής. Στα δύο καπάκια λαούτων ανιχνεύτηκαν εξίσου αξιόλογοι συντονισμοί σε διαφορετικές όμως, περιοχές συχνοτήτων. Στις χαμηλές συχνότητες, το πρώτο καπάκι παρουσίασε καλύτερη συμπεριφορά ενώ στο δεύτερο καπάκι υποστηρίζονται ιδιαίτερα οι υψηλόσυχνοι τρόποι δόνησης. Ομοιομορφία καταγράφηκε στη δονητική συμπεριφορά στις μεσαίες συχνότητες. Έτσι αντισταθμίζεται η συμπεριφορά των δύο καπακιών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συχνοτική απόκλιση που ανιχνεύτηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων είναι αποτέλεσμα της τάσης που εφαρμόζεται στα όργανα κατά τη στήριξή τους (ακινήσια) πάνω στην τράπεζα τοποθέτησής τους. Αυτό προκύπτει από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος Αρχιμήδης I, σύμφωνα με τις οποίες η τάση είναι ανάλογη της συχνότητας εμφάνισης κάποιων τρόπων δόνησης των αντηχείων των οργάνων. Παρατηρήθηκε ολίσθηση συχνότητας από 20Hz (για κάποιους χαμηλούς τρόπους ταλάντωσης) έως 100Hz (για κάποιους υψηλότερους). Η απόκλιση στη συχνότητα καταγραφής των σημαντικών τρόπων δόνησης οφείλεται και σε τυχόν πειραματικά σφάλματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Επιπλέον, απόκλιση ανιχνεύτηκε και μεταξύ των αποτελεσμάτων της ολογραφικής συμβολομετρίας. Οι κοινοί τρόποι δόνησης καταγράφηκαν για τις λύρες και τα καπάκια λαούτων σε διαφορετικές συχνότητες. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη διαφορετική κατασκευή των οργάνων (διαφορετικά δομικά χαρακτηριστικά ξύλου, διαστάσεις) και ιδιαίτερα στον διαφορετικό όγκο του αντηχείου κάθε οργάνου.

Το γεγονός ότι υπάρχουν ελάχιστες παλαιότερες μελέτες για την ακουστική συμπεριφορά ελληνικών παραδοσιακών εγχόρδων οργάνων (Κρητική λύρα - Κρητικό λαούτο), αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα στη διεξαγωγή της εργασίας. Η

συγκεκριμένη μελέτη για τα καπάκια λαούτων πραγματοποιείται για πρώτη φορά και ίσως στο μέλλον αποτελέσει ισχυρό μέτρο σύγκρισης για την Κρητική λύρα. Κρίνεται απαραίτητη η βελτίωση των συνθηκών της οπτικής πειραματικής διάταξης (χρήση βάσης στήριξης η οποία δεν θα έρχεται σε επαφή με το σώμα του μουσικού οργάνου) καθώς και η ελαχιστοποίηση των εξωγενών παραγόντων (ηχομόνωση δωματίου διεξαγωγής μετρήσεων).

Μελλοντικός στόχος είναι η πιστοποίηση της ηχητικής ποιότητας των μουσικών οργάνων. Έτσι θα είναι δυνατή η βελτίωση / τελειοποίηση των μουσικών οργάνων τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους όσο και μετά την ολοκλήρωση της τεχνικής συγκόλλησης («δέσιμο» οργάνου) των δύο πλακών (καπακιού και πλάτης). Η συνέχιση παρόμοιων μετρήσεων και για άλλα παραδοσιακά μουσικά όργανα (πέρα της Κρητικής λύρας και του λαούτου) μπορεί να αποτελέσει σημαντικό μέτρο σύγκρισης για την περαιτέρω «εξερεύνηση» της δονητικής και ακουστικής συμπεριφοράς των ήδη καταγεγραμμένων οργάνων.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1 Neville H. Fletcher and Thomas D. Rossing [1993], «The Physics of Musical Instruments», 2<sup>nd</sup> Edition.
- 2 Thomas D. Rossing, F. Richard Moore and Paul A. Wheeler [2002], «The science of sound», 3<sup>rd</sup> Edition.
- 3 Pramod K. Rastogi [2001], «Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques».
- 4 P.Hariharan, «Optical Holography», Cambridge University Press, Second Edition.
- 5 R. Jones and C. Wykes [1989], «Holographic and Speckle Interferometry», 2<sup>nd</sup> Edition.
- 6 Orazio Svelto and David C. Hanna, «Principles of Lasers», 4<sup>th</sup> Edition.
- 7 E. Hecht [2002], «Optics», 4<sup>th</sup> Edition.
- 8 Raymond A. Serway [1990], «Physics», 3<sup>rd</sup> Edition.
- 9 H. J. Pain [1994], «Φυσική των ταλαντώσεων και των κυμάτων», 3<sup>η</sup> Έκδοση.
- 10 Φ. Ανωγειανάκης, «Ελληνικά Λαϊκά Μουσικά Όργανα».

### Αναφορές

- 11 W. O. Wong, K. T. Chan [1998], «Quantitative vibration amplitude measurement with time-averaged digital speckle pattern interferometry», Elsevier Science Ltd.
- 12 Chi-Hung Huang and Chien-Ching Ma [2001], «Experimental and numerical investigations of resonant vibration characteristics for piezoceramic plates», J. Acoust. Soc. Am., Vol. 109, No.6, June 2001.
- 13 Anna Runnemain and Nils Erik Molin, Erik Jansson [2000], «On Operating deflection shapes of the violin body including in-plane motions», J. Acoust. Soc. Am., Vol. 107, No.6, June 2000.
- 14 Maurizio Vannoni and Giuseppe Molesini [2004], «Speckle interferometry experiments with a digital photcamera», Am. J. Phys. Vol. 72, No.7, July 2004.

- 15 Nils-Erik Molin [1999], «Applications of whole field interferometry in mechanics and acoustics», Elsevier Science Ltd.
- 16 Pierre Slangen, Leon Berwart, Christophe de Veuster, Jean-Claude Golinval and Yves Lion [1996], «Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI): A Fast Procedure to Detect and Measure Vibration Mode Shapes», Elsevier Science Ltd, Vol. 25, p.311-321.
- 17 Applied Optics Group, «Holographic Interferometry», Modern Optics, University of Edinburgh.
- 18 Rajpal S. Sirohi [2002], «Speckle Interferometry», Contemporary Physics, Vol. 43, No.3, p.161-180.
- 19 Ν. Α. Παπαδογιάννης [2000], Σημειώσεις «Φυσική Ακουστική Μουσικών Οργάνων».
- 20 Ν. Η. Fletcher, Σημειώσεις «The nonlinear physics of musical instruments».
- 21 Γ. Αδαμίδης [2001], Σημειώσεις «Ελληνικά Λαϊκά Μουσικά Όργανα».
- 22 Cardiff University, Optical Holography of Classical Guitars, «<http://www.classicalguitars.ca>»
- 23 «<http://www.E.Chladni.com>»
- 24 Ποιμενίδου Μαρία [2004], Σεμινάριο 7<sup>ο</sup> εξαμήνου, «Ανάλυση και επεξεργασία ολογραφημάτων για την απεικόνιση δονήσεων με το λογισμικό Fringe Processor».
- 25 Σ.Ε.Γυμνόπουλος [2004], Μελέτη Δονήσεων Καπακιών Παραδοσιακών Μουσικών Οργάνων με Μηχανικές και Οπτικές Τεχνικές.
- 26 Λ. Χαρτοφύλακας [2007], Διερεύνηση του ρόλου των δονητικών χαρακτηριστικών του αντηχείου εγχόρδων παραδοσιακών μουσικών οργάνων και συγκεκριμένα της Κρητικής λύρας, στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φυσικά εκπεμπόμενου ήχου.