

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:  
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ  
ΟΡΓΑΝΩΝ  
ΠΟΛΙΤΙΚΟ ΛΑΟΥΤΟ ΚΑΙ ΟΥΤΙ**

---

**ΕΚΠΟΝΗΤΗΣ: ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΜΟΛΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: ΔΡ. ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ ΠΑΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ**

**ΔΡ. ΕΥΘΥΜΙΟΣ ΜΠΑΚΑΡΕΖΟΣ**

**ΡΕΘΥΜΝΟ 2015**



## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά, όσους συμμετείχαν και στήριξαν την παρούσα εργασία και με το δικό τους τρόπο την έφεραν στη διεκπεραίωσή της.

Συγκεκριμένα τους:

Δρ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη (επιβλέποντα καθηγητή), Δρ. Ευθύμιο Μπακαρέζο (επιβλέποντα καθηγητή), Στέλιο Πετράκη, Γιάννη Ορφανό, Βαγγέλη Γαβριηλίδη και Βασίλειο Μολή (οργανοπαίκτη).



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

**Λέξεις κλειδιά:** ESPI, τεχνική ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων, δονητικά χαρακτηριστικά, ακουστική μελέτη.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μελέτη και η σύγκριση των ακουστικών χαρακτηριστικών των παραδοσιακών μουσικών οργάνων ούτι και πολίτικο λαούτο. Καταγράφεται, υπό ελεγχόμενες συνθήκες και με συστηματικό τρόπο, και αναλύεται ο εκπεμπόμενος από τα όργανα ήχος. Τα όργανα μελετώνται με τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας, συγκεκριμένα με την χρονικά ολοκληρωμένη ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry - ESPI). Η τεχνική αυτή έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Οπτικής & Ακουστικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στο παρελθόν στη μελέτη των δονητικών χαρακτηριστικών διαφόρων μουσικών οργάνων.

Καθώς αναλύονται τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των δύο υπό μελέτη μουσικών οργάνων, διαπιστώνεται ότι ποικίλουν σε ποιότητα, λόγω μεγάλου αριθμού ειδών ξύλου, όπως επίσης και λόγω όγκου και κουρδισμάτων, ανάλογα με την περιοχή προέλευσής τους.

Η διαδικασία ηχογράφησης αποσκοπεί στην καταγραφή του απαραίτητου ηχητικού υλικού, το οποίο στη συνέχεια υπόκειται σε ανάλυση με τεχνικές επεξεργασίας σήματος, τόσο για την αποκοπή περιττών στοιχείων όσο και για την εξαγωγή ηχητικών φασμάτων μέσω μετασχηματισμού Fourier. Τα αποτελέσματα της τεχνικής ESPI αναλύονται και συγκρίνονται με το επεξεργασμένο ηχητικό υλικό. Με τον τρόπο αυτό εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τα δονητικά χαρακτηριστικά των δύο υπό μελέτη μουσικών οργάνων και τη σύνδεσή τους με τον εκπεμπόμενο ήχο.

## **ABSTRACT**

### **Comparative acoustic study of the Constantinopolitan Lute and the Oud**

**Key words:** Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), vibrational characteristics, acoustic study.

In this work the study and comparison of the acoustical characteristics of two traditional musical instruments, namely the Constantinopolitan Lute and the Oud, is presented. The sound emitted by these instruments is systematically recorded under controlled conditions. The instruments are studied using a holographic interferometry technique, namely the time-integrated Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI). This particular technique has been developed in the Laboratory of Acoustical and Optical Technology of the department of Music Technology and Acoustics Engineering of the T.E.I. of Crete, and has been successfully applied in the past in the study of the vibrational characteristics of various musical instruments.

As the morphological characteristics of the two musical instruments are analyzed, it is concluded that they differ in quality, since, depending on their region of origin, different wood species are used, while there are differences in their tuning and structural characteristics.

The recording of the emitted sound results in a collection of sound material that is subsequently analyzed using signal processing techniques, in order to extract the spectral content. The results of the ESPI technique are compared to the processed sound material. In this way useful conclusions are drawn for the vibrational characteristics of the instruments as well as for their relation to the emitted sound.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u></b>	<b>σελ. 7</b>
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ	σελ. 8
1.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ	σελ. 12
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΙΚΕΣ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</u></b>	<b>σελ. 14</b>
2.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΗΣ	σελ. 14
2.1.1 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΕΓΧΟΡΔΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ	σελ. 18
2.1.2 ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ & ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	σελ. 32
2.1.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	σελ. 33
2.2 Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ESPI	σελ. 33
2.2.1 ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ	σελ. 34
2.2.2 ΜΗΚΟΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ	σελ. 35
2.2.3 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ	σελ. 37
2.2.4 ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ	σελ. 38
2.2.5 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ESPI	σελ. 40
2.2.6 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ	σελ. 41
2.2.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ESPI	σελ. 45
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u></b>	<b>σελ. 48</b>
3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ	σελ. 48
3.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	σελ. 49
<b><u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u></b>	<b>σελ. 50</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν ερευνηθεί εκτεταμένα, τα ακουστικά χαρακτηριστικά πολλών ειδών μουσικών οργάνων. Μέσα σε αυτά και σε μεγάλη ποικιλία, είναι τα έγχορδα όργανα, είτε αυτά είναι νυκτά, είτε τοξωτά. Για την ανίχνευση κίνησης και δονήσεων επιφανειών, είτε πρόκειται για κάποιο μουσικό όργανο (όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση), είτε πρόκειται για οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο, το οποίο δύναται να μελετηθεί, έχουν αναπτυχθεί εδώ και δεκαετίες διάφορες μηχανικές τεχνικές οι οποίες βασίζονται, εν γένει, στη χρήση επιταχυνσιομέτρων.

Οι μηχανικές μέθοδοι που εφαρμόζονται μέχρι σήμερα εκτός από χρονοβόρες παρουσιάζουν προβλήματα ακρίβειας και περιορισμένης (χωρικής) διακριτικής ικανότητας, ενώ ενέχουν την επαφή κάποιου αισθητηρίου με το υπό μελέτη αντικείμενο.

Η εξέλιξη στον τομέα των λέιζερ και των ολογραφικών τεχνικών έχει επιτρέψει την ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή τους τις τελευταίες δεκαετίες για την αποτύπωση των δονήσεων οπτικά μη-επίπεδων αντικειμένων, σε συνδυασμό με ηλεκτρονικούς υπολογιστές και ψηφιακά καταγραφικά όργανα (π.χ. CCD κάμερα).

Η χρήση ολογραφικών τεχνικών για τέτοιες εφαρμογές είναι ιδιαίτερα επιτυχημένη για τρεις κυρίως λόγους:

- (α) προσφέρουν εξαιρετική (χωρική) διακριτική ικανότητα (της τάξης των λίγων δεκάδων nm) κάθετα στην επιφάνεια του δονούμενου αντικειμένου, εξαιτίας του πολύ μικρού μήκους κύματος του φωτός,
- (β) είναι δυνατή η καταγραφή της συμπεριφοράς μιας επιφάνειας με μία μέτρηση και χωρίς την ανάγκη επαφής με αυτήν κάποιου αισθητηρίου και την προσθήκη επιπλέον μάζας,
- (γ) προσφέρουν τη δυνατότητα της παρακολούθησης της δόνησης του αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο (on-line) και τέλος
- (δ) επιτρέπουν την ταυτόχρονη απεικόνιση του ολικού πεδίου της δόνησης.

Επιπλέον, και με την χρήση παλμικών λέιζερ, παρέχεται η δυνατότητα μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς των υπό μελέτη αντικειμένων, δηλαδή της χρονικής εξέλιξης των φαινομένων σε πολύ μικρές χρονικές κλίμακες (nsec έως και fsec). Διάφορες τέτοιες τεχνικές έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμες για αυτό το σκοπό, με την επιλογή της πιο κατάλληλης, κατά περίπτωση, τεχνικής να βασίζεται στα χαρακτηριστικά του αντικειμένου και το είδος της ζητούμενης πληροφορίας (μετατόπιση κάθετη ή οριζόντια, τάση, κλίση κτλ) [3].



## 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

### Το ούτι [31]:



Ετυμολογικά, το περσικό όργανο που οι Πέρσες το έλεγαν «Μπαρπάτ» (ούτι), έμοιαζε με το αιγυπτιακό ούτι που έπαιζαν στην εποχή των Φαραώ πριν 3.500 χρόνια. Οι Άραβες πήραν τον τρόπο παιξίματος αυτού του οργάνου από τους Πέρσες. Αυτό το όργανο αργότερα ονομάστηκε από τους Άραβες «al oud» που σημαίνει στα αραβικά «ψηλό ξύλο». Από εκεί έχει πάρει το ούτι την τελική του ονομασία. Στην Αίγυπτο, στη Συρία και σε άλλα αραβικά κράτη έχει μεγάλο σκάφος, στην Τουρκία λίγο μικρότερο και στο Ιράκ οι τρύπες του σκάφους στο καπάκι είναι ανοικτές χωρίς ροζέτες. Η αρχική του μορφή σίγουρα δεν ήταν αυτή που έχει σήμερα, κάτι που φαίνεται και σε παλαιότερα χαρακτηριστικά. Τα έγχορδα όργανα, όπως το ούτι ή το βιολί δεν τα γνώριζαν οι Άραβες. Τα έμαθαν από τους Βυζαντινούς, τους Πέρσες και τους Ρωμαίους μετά την εξάπλωση του Ισλάμ. Το ούτι είναι ο βασιλιάς των οργάνων για τους Άραβες, σε βαθμό τέτοιο που, παλαιότερα, ένας σύνθετης για να γράψει ένα τραγούδι, στηριζόταν αποκλειστικά σε αυτό.

Καθαρά σολιστικό όργανο, ιδανικό για ταξίμια (αυτοσχεδιασμούς) και συνοδεία τραγουδιού. Το ηχείο του έχει μεγάλο σχήμα αχλαδιού, κοντό και φαρδύ μπράτσο χωρίς μπερντέδες (τάστα). Το σχήμα και οι διαστάσεις του οργάνου διαμορφώνονται από τόπο σε τόπο, αποκλίνοντας λίγο από την ακρίβεια.

Το ούτι παλαιότερα είχε 2 χορδές, μετά 4 και κατέληξε με 5 ή και 6 όπως είναι σήμερα. Ο Λιβανέζος μουσικός Farahat Hashem έβαλε και 7 χορδές. Αυτό βοήθησε το όργανο να αποδίδει τόσο στη χαμηλή του έκταση, όσο και την ψηλή. Οι χορδές που χρησιμοποιούσαν παλιά ήταν από έντερο και το πλήκτρο («πένα») από φλούδα κερασιάς ή κέρατο ζώου, που σήμερα έχουν αντικατασταθεί από πλαστικές ύλες.

Η πένα είναι μακρόστενη και συνήθως σχετικά σκληρή. Επίσης, είναι είτε πλαστική (χαμηλής ποιότητας), είτε κοκάλινη (καλής ποιότητας). Το συνολικό βάρος του οργάνου είναι περίπου 1000 γραμμάρια (1Kg). Γενικά, όσο πιο ελαφρύ είναι ένα ούτι, τόσο καλύτερο θεωρείται. Τα καλύτερα ξύλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του σκάφους και του μπράτσου είναι: Μαόνι, Μαύρη Μουριά, Σφενδάμι, Τριανταφυλλιά, Κερασιά ή Παλίσανδρος. Για το καπάκι Έλατος. Για την ταστιέρα και τα κλειδιά-στριφτάρια, Έβενος, Παλίσανδρος ή Τριανταφυλλιά. Για τη Ροζέτα χρησιμοποιείται κέρατο, ταρταρούγα ή ξύλο. Η χρήση υλικών κατασκευής πέραν των προαναφερθέντων, επηρεάζει αρνητικά στην ποιότητα της ακουστικής του οργάνου.

Παρακάτω (πίνακας 1), αναφέρονται κάποια από τα είδη ξύλων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του οργάνου, όπως και για το πολιτικό λαούτο, το οποίο θα αναφερθεί αργότερα.

**Πίνακας 1**



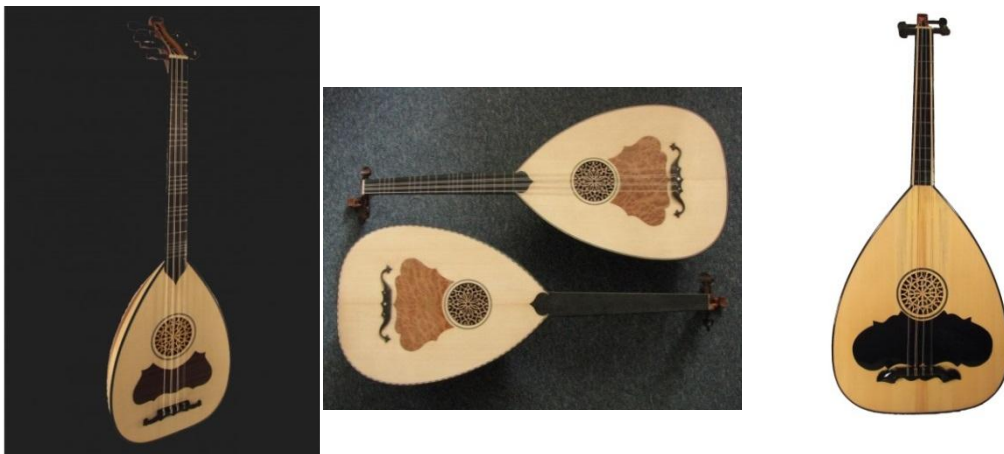
Το ούτι είναι σήμερα διαδεδομένο σε όλο σχεδόν τον κόσμο. Από τον 9<sup>ο</sup> αιώνα συστηματοποιήθηκε πάνω στο ούτι πρακτικά και θεωρητικά η μουσική παράδοση της Μεσογείου. Κατά τον Μεσαίωνα οι σταυροφόροι μεταφέρανε το όργανο από τους Αγίους Τόπους στην Ευρώπη, όπου εξελίχθηκε στο Αναγεννησιακό λαούτο, και στην Μικρά Ασία όπου παρέμεινε όπως ήταν μέχρι και σήμερα. Το ούτι είναι ένα από τα λίγα όργανα στην ανατολή και για τους Άραβες το μοναδικό που έπαιξε και διαμόρφωσε τις μουσικές κλίμακες που λέγονται μακάμ (ή δρόμοι, όπως αποκαλούνται, από κάποιους μουσικούς). Ένα μακάμ αποτελείται από ένα τετράχορδο (4 νότες) και ένα πεντάχορδο (5 νότες) τα οποία αυτά εναλλάσσονται από μακάμ σε μακάμ.

Ο αριθμός των μακάμ είναι αρκετά μεγάλος και διαφέρει από χώρα σε χώρα. Στην Τουρκία και την Αίγυπτο διαφέρει περισσότερο στο ύφος και λιγότερο στα διαστήματα, πολλές φορές το διάστημα είναι ίδιο, αλλά το παίζουν σε διαφορετικό ύφος και φαίνεται να αλλάζει το μακάμ, ενώ στην πραγματικότητα παραμένει ίδιο. Το βάθος που έχουν τα μακάμ είναι τόσο μεγάλο που για να πει κανείς σήμερα ότι τα έμαθε ή τα έπαιξε ή τα κατάλαβε χρειάζονται πάρα πολλά χρόνια.

Το αραβικό ούτι έχει κυρίως 5 διπλές χορδές και το κούρδισμα είναι ΣΟΛ-ΛΑ-ΡΕ-ΣΟΛ-ΝΤΟ (G-A-D-G-C), όπως επίσης υπάρχει και με πέντε διπλές χορδές και μια μονή και το κούρδισμα είναι ΡΕ-ΣΟΛ-ΛΑ-ΡΕ-ΣΟΛ-ΝΤΟ (D-G-A-D-G-C) και ένα άλλο κούρδισμα είναι ΡΕ-ΜΙ-ΛΑ-ΡΕ-ΣΟΛ-ΝΤΟ (D-E-A-D-G-C). Τα παρακάτω κουρδίσματα από τα χαμηλά προς τα ψηλά δηλαδή η ΣΟΛ η ΡΕ είναι η μπάσα πέμπτη και έκτη χορδή και η ΝΤΟ είναι η πιο ψηλή χορδή. Το τούρκικο (το οποίο θα εξετάσουμε για την παρούσα εργασία), έχει πέντε διπλές και μια μόνη και κουρδίζεται ΜΙ-ΛΑ-ΣΙ-ΜΙ-ΛΑ-ΡΕ (E-A-B-E-A-D) και ένα άλλο, ΜΙ-ΦΑ#-ΣΙ-ΜΙ-ΛΑ-ΡΕ (E-F#-B-E-A-D).

Πολλές φορές αλλάζει το κούρδισμα του οργάνου ανάλογα με τις απαιτήσεις του οργανοπαίχτη και το ύφος του μουσικού κομματιού. Δηλαδή διάφοροι οργανοπαίχτες κουρδίζουν το ούτι διαφορετικά (πιο ψηλό κούρδισμα ή πιο χαμηλό).

### **Το πολιτικό λαούτο/λάφτα [32]:**



Το λαούτο, είναι έγχορδο όργανο, που στην ελληνική παραδοσιακή μουσική χρησιμοποιείται κυρίως σαν συνοδεία σε βιολί, λύρα ή άλλα όργανα. Αποτελεί σύνθεση στοιχείων από την αρχαιοελληνική πανδούρα. Συγγενεύει με το ούτι αλλά έχει μεγαλύτερο μπράτσο. Κουρδίζεται Μι-λα-ρε-σολ (E-A-D-G), από κάτω προς τα πάνω. Είναι όργανο υποτιμημένο, ιδιαίτερα στις στεριανές περιοχές. Χρησιμοποιείται όμως

αρκετά στα νησιά. Παρόλα αυτά οι δυνατότητές του είναι πολύ μεγάλες. Η χρήση του είναι πολύ διαδεδομένη στην Κρήτη, όπου συνοδεύει κυρίως την λύρα, καθώς και στην Κύπρο, όπου συνοδεύει συνήθως το βιολί. Πολλές φορές όμως, το συναντάμε και μόνο του ή σε ζευγάρια. Η οικογένεια του λαούτου, αποτελείται και από άλλα όργανα, όπως την λάφτα (η οποία λέγεται και πολιτικό λαούτο).

Έχει το μικρότερο μέγεθος και αρματώνεται με πλαστικές χορδές. Ο ήχος του μοιάζει με το ούτι, και το κούρδισμα του είναι Ρε - Λα - Ρε - Λα (D - A - D - A). Σε κάθε διάστημα τόνου, έχει τους περισσότερους μπερντέδες από κάθε όργανο ώστε να μπορεί να αποδίδει ξεκάθαρα τα κόμματα της Ελληνικής μουσικής, δηλαδή τα αρχαία γένη και τους Βυζαντινούς ήχους. Το σκάφος είναι συνήθως από μουριά, κελεμπέκι, μουαρέ, παλίσανδρο, καρυδιά, ή από έβενο. Στην ταστιέρα πάντα βάζουμε έβενο. Το καπάκι είναι ερυθρελάτη και ανάλογα τον ήχο που θέλουμε να δώσουμε στο όργανο τότε επιλέγουμε την ποικιλία του ελάτου. Αν θέλουμε βάζουμε και κέδρο για ορισμένους άλλους ήχους. Τοποθετούμε λεπτά μανίκια ώστε να είναι ευκολόπαιχτα τα όργανά μας, και με τις χορδές χαμηλά.

Η πένα και εδώ είναι μακρόστενη και σχετικά σκληρή και οι οργανοπαίκτες χρησιμοποιούν συνήθως πλαστικές πένες. Τέτοιου είδους πένες είναι οι παρακάτω:



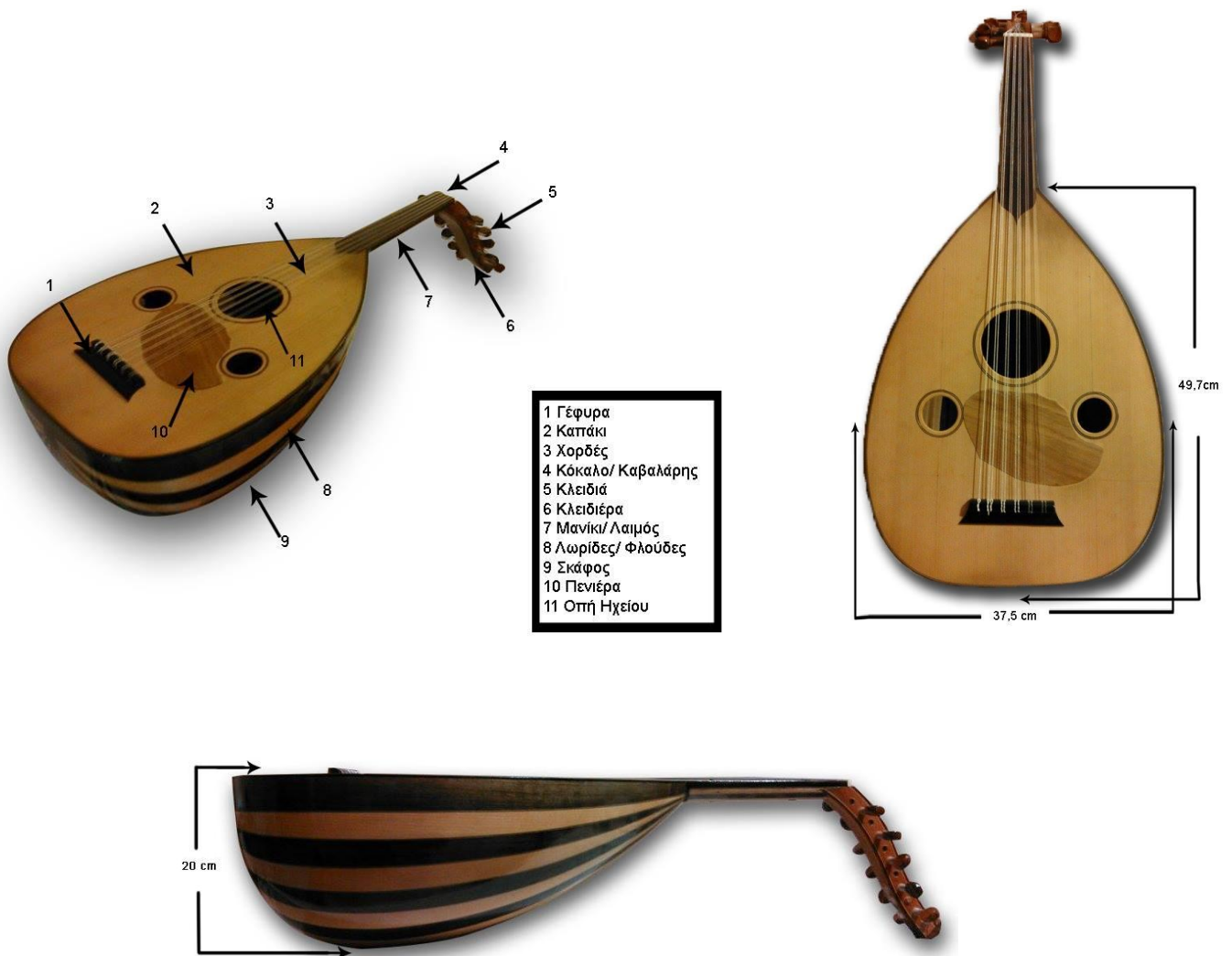
## 1.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

Αφού λοιπόν είδαμε τα μορφολογικά χαρακτηριστικά (σε γενικές γραμμές) των δύο μουσικών αυτών οργάνων, θα δούμε τώρα πιο συγκεκριμένα τα δύο υπό μελέτη όργανα.

Στις παρακάτω εικόνες, αναδεικνύονται το ούτι και η λάφτα, όπως επίσης τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις αυτών:

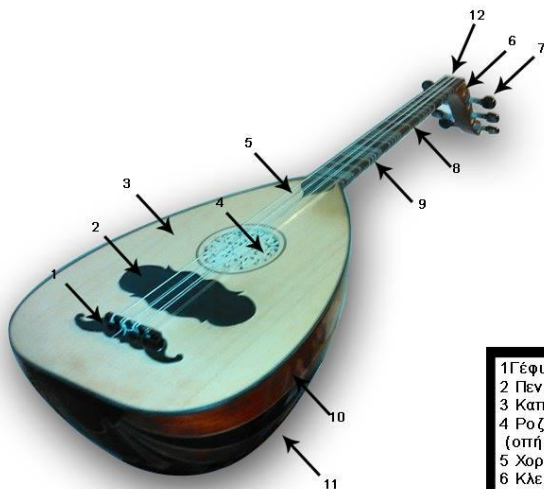
**Το ούτι, με:**

- Όγκο σκάφους:  $V_1 = 17.5 \text{ lit}$
- Πάχος: καπακιού  $d_1 = 1.8 \text{ mm}$
- Διάμετρος μεγάλης οπής καπακιού:  $\Delta_1 = 8.7 \text{ cm}$
- Διάμετρος μικρών οπών καπακιού:  $\delta_1 = 4.4 \text{ cm}$



Και το πολιτικό λαούτο/λάφτα, με:

- Όγκο σκάφους:  $V_2 = 12lit$
- Πάχος καπακιού:  $d_2 = 1.8mm$
- Πάχος Ροζέτας/Ροδάντζας:  $d'_2 = 2mm$
- Διάμετρος οπής καπακιού:  $\Delta_2 = 8.9cm$



- |    |                                      |
|----|--------------------------------------|
| 1  | Γέφυρα                               |
| 2  | Πενιέρα                              |
| 3  | Καπάκι                               |
| 4  | Ροζέτα/ Ροδάντζα<br>(οπή του ηχείου) |
| 5  | Χορδές                               |
| 6  | Κλειδιέρα                            |
| 7  | Κλειδιά                              |
| 8  | Μανίκι/ Λαιμός                       |
| 9  | Μπερντιέδες                          |
| 10 | Λωρίδες/ Φλούδα                      |
| 11 | Σκάφος                               |
| 12 | Κόκαλο/ Καβαλάρης                    |



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΙΚΕΣ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

### 2.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΗΣ

Για τα δύο υπό μελέτη μουσικά όργανα, χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί ηχογράφηση, έτσι ώστε να αντλήσουμε ηχητικό υλικό, το οποίο στην πορεία θα υποστεί κάποια ψηφιακή επεξεργασία και θα αναλυθεί, ούτως ώστε να δύναται η σύγκριση της ακουστικής τους συμπεριφοράς. Με το παίξιμο των υπό μελέτη μουσικών οργάνων, ασχολήθηκε ένας οργανοπαίκτης, έτσι ώστε να διατηρηθεί η ίδια δεξιότητα και στα δύο υπό μελέτη μουσικά όργανα. Αυτό που ζητήθηκε από τον ίδιο, ήταν να παίζει και στα δύο όργανα όλες τις νότες (συχνότητες), πάνω στο εύρος, το οποίο έχουν κουρδιστεί και παίζονται, τα όργανα. Επειδή, όμως, το ούτι έχει πολλά εναλλακτικά κουρδίσματα, ενώ η λάφτα έχει ένα συγκεκριμένο, το οποίο είναι D (73,5Hz) – A (110,0Hz) – D (147,0) – A (219,6Hz), χρησιμοποιήσαμε και για το ούτι το ανάλογο κούρδισμα D (73,5Hz) – E (82,4Hz) – A (110,0Hz) – D (147,0Hz) – G (195,7Hz) – C (261,0Hz). Ο οργανοπαίκτης, λοιπόν, κλήθηκε να παίζει την ίδια έκταση (συχνοτήτων) και στα δύο όργανα. Πιο συγκεκριμένα από  $D_2(73,5Hz)$  έως  $D_4(294,0Hz)$ , μία προς μία, την κάθε νότα.

Στα πλαίσια αυτής της ακουστικής μελέτης (ηχητικής εκπομπής), καταγράφηκε ο εκπεμπόμενος από τα όργανα ήχος, ύστερα από ελεγχόμενη εκτέλεση. Η ηχογράφηση ενός οργάνου παρέχει χρήσιμες πληροφορίες, όπως το φασματικό εύρος του, την ένταση των αρμονικών του και την εξέλιξή τους στο χρόνο.

Για την ηχογράφηση των οργάνων, χρησιμοποιήθηκαν τα μικρόφωνα (όπως τοποθετήθηκαν, κατά σειρά):

- Ένα μικρόφωνο της εταιρείας Neumann, μοντέλο U89i, κοντά στη γέφυρα των οργάνων,
- Ένα μικρόφωνο της εταιρείας EARTHWORKS, μοντέλο TC30k, μπροστά από τις μεγάλες οπές των οργάνων και
- Ένα μικρόφωνο της εταιρείας Neumann, μοντέλο U89i, στην αρχή του μανικιού/λαιμού των οργάνων.

Τα μικρόφωνα τοποθετήθηκαν κάθετα ως προς την επιφάνεια των υπό μελέτη οργάνων, σε απόσταση 25 cm.

Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης και του ιδανικότερου μοντέλου, αναλύσαμε, πρωτίστως, τις συχνотικές αποκρίσεις αυτών, μέσα από τα εγχειρίδιά τους, τα οποία παρέχονται στις συσκευασίες, αλλά και στις ιστοσελίδες των αντίστοιχων εταιρειών, στο διαδίκτυο.

Παρακάτω, αναγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μικροφώνων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ηχογράφιση, καθώς επίσης και οι συχνοτικές αποκρίσεις αυτών:

**» NEUMANN.BERLIN**

**8. Technical data and connector assignments**

Permissible atmospheric conditions:<sup>1)</sup>  
Operating temperature range..... 0 °C ... +70 °C  
Storage temperature range..... -20 °C ... +70 °C  
Humidity range..... 0% ... 90% at +20 °C  
0% ... 85% at +60 °C

Acoustical operating principle..... Pressure gradient transducer  
Directional pattern..... Omni, wide angle cardioid, cardioid, hypercardioid, figure 8  
Frequency range..... 20 Hz... 20 kHz  
Sensitivity<sup>2)</sup>..... 8 mV/Pa = - 42 dBV ± 1 dB  
Rated impedance..... 150 ohms  
Rated load impedance..... 1000 ohms  
Signal-to-noise ratio<sup>3)</sup>, CCIR<sup>4)</sup>..... 66 dB  
Signal-to-noise ratio<sup>3)</sup>, A-weighted<sup>4)</sup>..... 77 dB  
Equivalent noise level, CCIR<sup>4)</sup>..... 28 dB  
Equivalent noise level, A-weighted<sup>4)</sup>..... 17 dB-A  
Max. SPL for<sup>5)</sup> less than 0.5% THD..... 134 dB  
with preattenuation..... 140 dB  
Max. output voltage..... 800 mV (0.3 dBu)  
Supply voltage<sup>6)</sup>..... 48V ± 4V  
Current consumption<sup>6)</sup>..... 0.8 mA  
Matching connector..... XLR3F  
Weight..... 400 g  
Dimensions..... Ø 46 mm x 185 mm

94 dB SPL equiv. to 1 Pa = 10 µbar  
0 dB equiv. to 20 µPa

The microphone has a balanced transformer output. The 3-pin XLR connector has the following standard pin assignments:  
Pin 1: 0V/Ground  
Pin 2: Modulation (+phase)  
Pin 3: Modulation (-phase)

**9. Selected Accessories\* (see photos in appendix)**

**Elastic Suspension**  
EA 89 A.....ni..... Cat. No.007195

**Auditorium Hanger**  
MNV 87.....ni..... Cat. No.006804

**Mount**  
DS 120.....blk..... Cat. No.007343  
SG 289.....ni..... Cat. No.006619

**Popscreen**  
PS 15.....blk..... Cat. No.008472  
PS 20 a.....blk..... Cat. No.08488

**Windscreen**  
WS 89.....blk..... Cat. No.007197

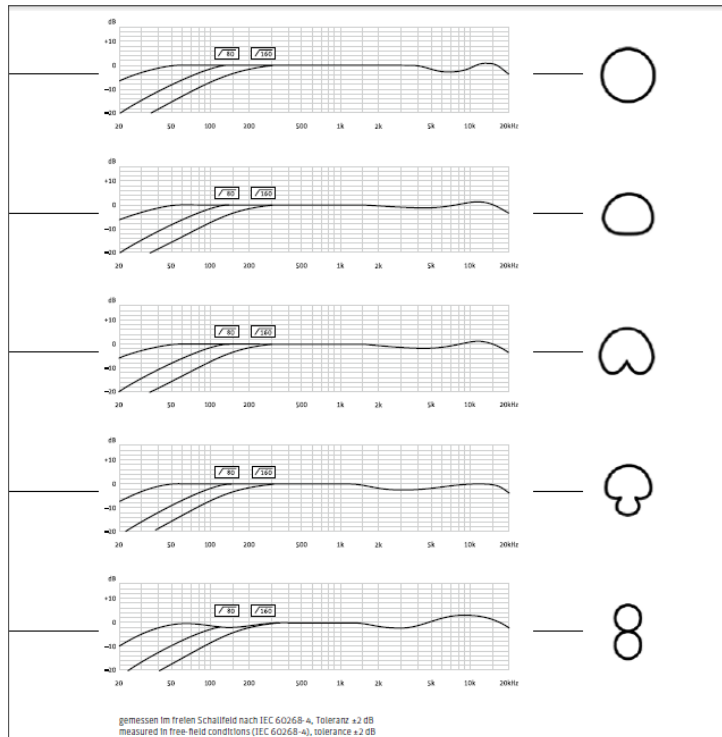
**Power Supply**  
N 248.....blk..... Cat. No.008537

**Connecting Cable**  
IC 3 mt (10 m).....blk..... Cat. No.006543  
IC 4 (10 m).....ni..... Cat. No.006547

Meaning of color codes:  
ni = nickel, blk = black

Εικόνα 1α: : Τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροφώνου εταιρείας Neumann, μοντέλο U89i.





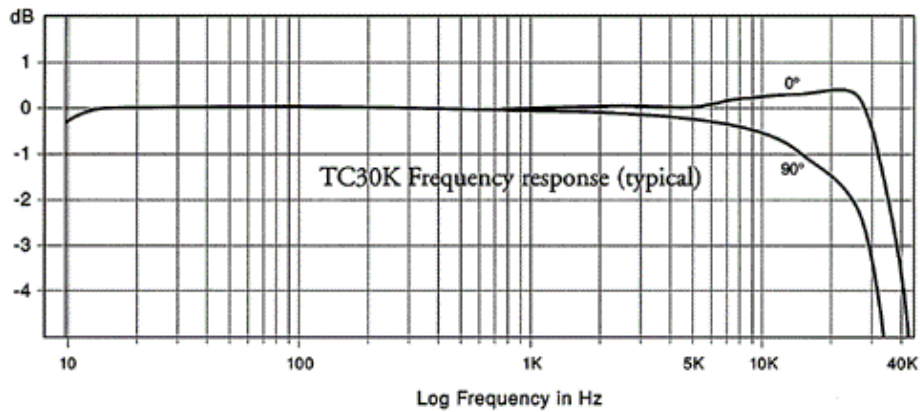
Εικόνα 1β: Συχνотική απόκριση του μικροφώνου εταιρείας Neumann, μοντέλο U89i.

## Earthworks TC30K

### SPECIFICATIONS

Frequency response on axis:	$\pm 1$ dB 9Hz to 25kHz, $+1/-3$ dB 5 Hz to 30 kHz
Polar pattern:	Omnidirectional
Sensitivity:	8 mV/Pa (-42 dBV/Pa)
Power requirements:	48 V Phantom, 10 mA
Peak acoustic input:	150 dB SPL with 5 K capacitor coupled load
Peak output voltage:	3 V into 1 k ohm, 10 V into 5 k ohm
Output:	XLR intended to drive a balanced input (Pin 2+)
Min output load:	600 ohms between pins 2 and 3
Noise:	27 dB SPL equivalent (A weighted)
Dimensions (L x D):	229 mm x 22 mm (9 x .860 inches)
Weight:	225 g (.5 lb)

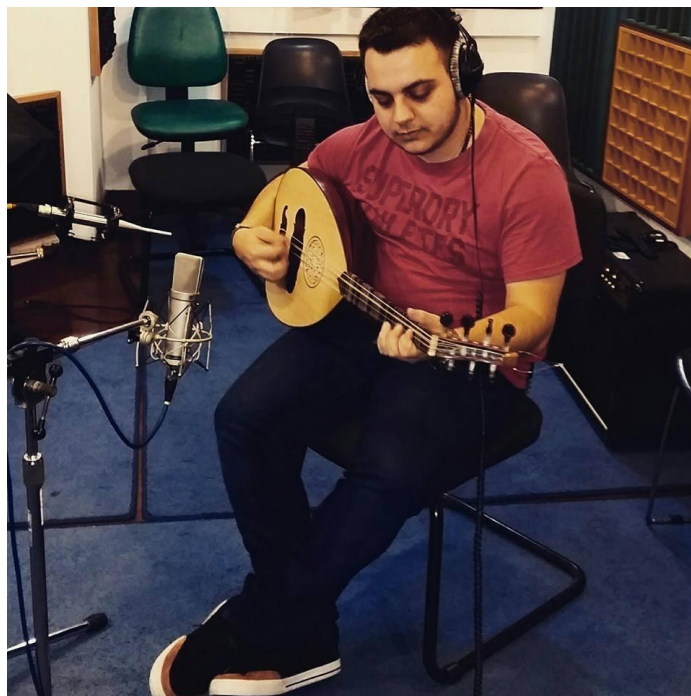
Εικόνα 2α: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροφώνου εταιρείας EARTHWORKS, μοντέλο TC30k.



Εικόνα 2β: Συχνотική απόκριση του μικροφώνου εταιρείας EARTHWORKS, μοντέλο TC30k.

Τελικά επιλέχθηκε το μικρόφωνο της εταιρείας Neumann, μοντέλο U89i, το οποίο βρισκόταν κοντά στο μανίκι, έτσι ώστε να λαμβάνουμε την συχνотική απόκριση, από όλο το σώμα του οργάνου, αλλά και για τον λόγο του ότι, όπως φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες, το συγκεκριμένο μοντέλο (U89i), σε σύγκριση με αυτό της εταιρείας EARTHWORKS (TC30k), μας έδωσε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε τη λειτουργία του ως καρδιοειδούς πολικού διαγράμματος, κατά την οποία έχει σχετικά «flat» συχνотική απόκριση.

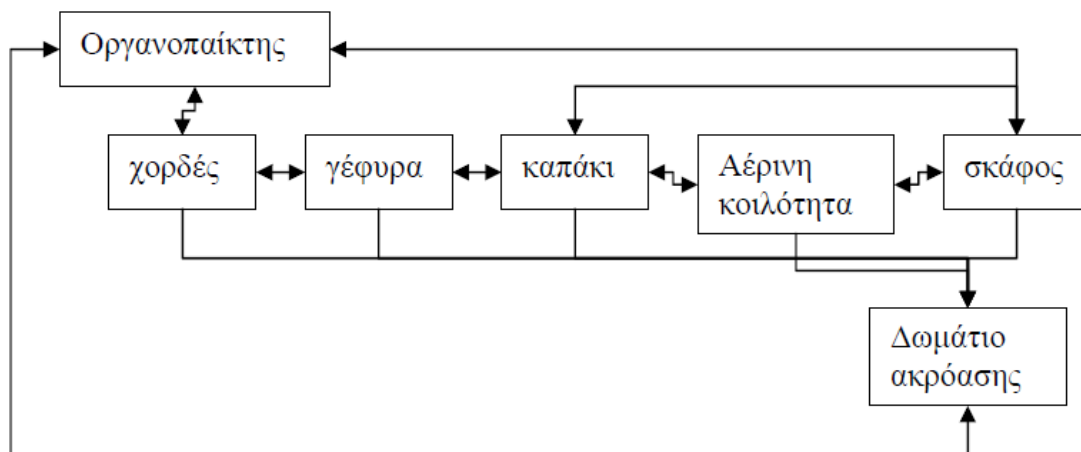
Η ηχογράφηση των υπό μελέτη μουσικών οργάνων, πραγματοποιήθηκε στο studio ηχοληψίας, του τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, του ΤΕΙ Κρήτης.



Εικόνα 3: Ο Βασίλειος Μολής, εδώ, με το πολιτικό λαούτο, κατά την ηχογράφηση του υπό μελέτη μουσικού οργάνου, στο studio του τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, του ΤΕΙ Κρήτης.

### 2.1.1 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΕΓΧΟΡΔΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ [1]

Η αρχική διέγερση των χορδών στα όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού γίνεται μέσω μιας πέννας που συνήθως κατασκευάζεται από συνθετικό υλικό. Ο εκτελεστής οδηγεί την χορδή πέρα από την θέση ισορροπίας της μέσω δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται ανάμεσα στην πένα και την χορδή. Όταν η (συνισταμένη) δύναμη επαναφοράς της χορδής γίνει μεγαλύτερη από την δύναμη που την συγκρατεί πάνω στην πένα (ή όταν ο οργανοπαίκτης απομακρύνει την πένα από την χορδή) τότε η χορδή ελευθερώνεται και εκτελεί φθίνουσα ταλάντωση έως ότου βρεθεί στην αρχική θέση ισορροπίας της (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Σύστημα παραγωγής ήχου κατά το παίξιμο ενός έγχορδου μουσικού οργάνου.

Κατά την διάρκεια ταλάντωσής της η χορδή εκπέμπει πολύ μικρά ποσοστά ακουστικής ενέργειας στον αέρα (λόγω της μικρής της επιφάνειας) ενώ τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας της ταλάντωσης διοχετεύονται στο καπάκι μέσω της γέφυρας και το θέτουν σε εξαναγκασμένη ταλάντωση. Η ταλάντωση του καπακιού έχει ως αποτέλεσμα την ηχητική εκπομπή αλλά και την περιοδική μεταβολή του αέρινου όγκου των αντηχείων των οργάνων θέτοντας σε ταλάντωση την αέρια μάζα που εσωκλείεται στα όργανα διαμέσου της ηχητικής οπής. Το σκάφος των οργάνων διεγείρεται από το καπάκι μέσω άμεσης σύζευξης αλλά κυρίως μέσω του αέρα που ταλαντώνεται στο εσωτερικό των αντηχείων.

Κατά την αντίθετη φορά, το δονούμενο σκάφος διαμορφώνει εκ νέου τις ταλαντώσεις της αέρινης μάζας μεταφέροντας ενέργεια στο καπάκι το οποίο με την σειρά του ταλαντώνεται διαταράσσοντας τις δονήσεις της χορδής.

Από τα προαναφερθέντα γίνονται αντιληπτά δύο στοιχειώδη χαρακτηριστικά των μουσικών οργάνων:

1. Όλες οι επιφάνειες των οργάνων και η αέρινη μάζα των αντηχείων που ταλαντώνονται περιοδικά σε συχνότητες που βρίσκονται εντός του ακουστικού εύρους ηχοβολούν στο δωμάτιο ακρόασης (ανεξάρτητα με τις σχετικές εντάσεις τους) και γίνονται αντιληπτές από τον οργανοπαίκτη μέσω του αισθητηρίου της ακοής.

2. Δεν υπάρχει μέρος του συστήματος που να μην αλληλεπιδρά με όλα τα υπόλοιπα είτε μέσω άμεσης (όπως γέφυρα-καπάκι) είτε μέσω έμμεσης (όπως γέφυρα-σκάφος) σύζευξης.

Μια ακόμα πιο πολύπλοκη αλληλεπίδραση συμβαίνει μεταξύ του οργανοπαίκτη και του οργάνου. Ο οργανοπαίκτης δέχεται ερεθίσματα μέσω της άμεσης επαφής του με το όργανο όπου οι δονήσεις γίνονται αντιληπτές μέσω των χεριών και του ποδιού όπου στηρίζει το όργανο, αλλά και μέσω του ακουστικού του συστήματος που δέχεται το ερέθισμα του ήχου. Και στις δύο περιπτώσεις ο εγκέφαλος του οργανοπαίκτη εκτελεί πολύπλοκες διεργασίες που συνδέονται άμεσα με το νευρικό και το μυϊκό του σύστημα με αποτέλεσμα να αναπροσαρμόζει την τεχνική του ανάλογα με τα ηχητικά χαρακτηριστικά που επιθυμεί να μεταβάλλει. Τέλος, οι ανακλάσεις του ήχου στα τοιχώματα του δωματίου συμβάλλουν με τον απευθείας ήχο που δέχεται ο οργανοπαίκτης από το όργανο συμβάλλοντας δραστικά στην υποκειμενική του εκτίμηση για τα χαρακτηριστικά του ήχου.

Παρατηρείται πως στο σύστημα οργανοπαίκτης – όργανο - δωμάτιο ακρόασης συμβαίνουν αλληλεπιδράσεις ακουστικής και ψυχοακουστικής φύσεως που όλες υπάγονται στον ευρύτερο τομέα της ακουστικής.

Ο τομέας της ψυχοακουστικής καλείται να περιγράψει τον τρόπο με τον «ερμηνεύονται» από τον ανθρώπινο εγκέφαλο τα χαρακτηριστικά της ηχητικής χροιάς των οργάνων. Στον τομέα αυτό, που δεν απασχολεί ιδιαίτερα την συγκεκριμένη εργασία, είναι ότι, οι γνώσεις που υπάρχουν βασίζονται σε ψυχοακουστικά πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε πλήθος ανθρώπων και με τον τρόπο αυτό έχουν περιγραφεί σημαντικά στοιχεία για τον «αντικειμενικό» τρόπο με τον οποίο γίνονται αντιληπτά κάποια βασικά χαρακτηριστικά των ήχων.

Η επιστήμη της μουσικής ακουστικής, που αφορά το μεγαλύτερο τμήμα της εργασίας καλείται να περιγράψει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν τα μουσικά όργανα. Οι λειτουργίες των μουσικών οργάνων μπορεί να αφορούν τόσο στην δονητική συμπεριφορά των επιμέρους τμημάτων τους όσο και την συνολική περιγραφή της λειτουργίας τους ως συζευγμένοι ταλαντωτές.

Στην λειτουργία των μουσικών οργάνων εμπλέκονται και άλλοι τομείς της επιστήμης με βασικότερο αυτόν της μουσικής τεχνολογίας όπου μέσα από την ανάλυση και τον προσδιορισμό των ηχητικών τους χαρακτηριστικών επιτυγχάνεται η σύνθεσή τους με χρήση ψηφιακών ή αναλογικών ηλεκτρονικών συστημάτων.

Η παρούσα εργασία δεν επεκτείνεται στον τομέα της σύνθεσης, ωστόσο η ανάλυση των βασικότερων χαρακτηριστικών του ήχου σε συνδυασμό με την περιγραφή της δονητικής συμπεριφοράς των οργάνων είναι προφανές πως δίδει χρήσιμα στοιχεία και στον τομέα αυτό της επιστήμης του ήχου.

## Η «ιδανική» χορδή

Αρχικά, περιγράφεται η κίνηση μιας αβαρούς, ελαστικής χορδής μήκους  $L$  πακτωμένης στα δύο άκρα, η οποία απομακρύνεται σε μία απόσταση  $h$  από την θέση ισορροπίας της σε ένα σημείο της  $l$  από μια στιγμιαία δύναμη  $F$ . Όταν δεν λαμβάνονται υπόψη οι μηχανισμοί τριβής και θεωρηθεί πως η τάση που ασκείται στη χορδή είναι εφαπτομενική σε κάθε σημείο της τότε τα εγκάρσια κύματα που διαδίδονται στην χορδή ικανοποιούν την μονοδιάστατη κυματική εξίσωση [1,5,6]:

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

Όπου  $c^2 = \frac{T}{\mu}$  η ταχύτητα διάδοσης του εγκάρσιου κύματος στη χορδή,  $T$  η τάση και  $\mu$  η γραμμική της πυκνότητα. Η κυματική εξίσωση περιγράφει και την διαμήκη ταλάντωση της χορδής αντικαθιστώντας την ταχύτητα διάδοσης στην εγκάρσια διεύθυνση με αυτήν της διαμήκου,  $c^2 = \frac{ES}{\mu}$ , όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας της χορδής και  $S$  η διατομή ( $\pi r^2$ ). Η γενική λύση της κυματικής εξίσωσης στο πεδίο του χρόνου δίδεται με χρήση της μεθόδου d'Alembert [1,6] και εκφράζεται με την μορφή:

$$y(x, t) = y^+ \left( \frac{t-x}{c} \right) + y^- \left( \frac{t+x}{c} \right) \quad 2.2$$

Όπου τα  $y^+$  και  $y^-$  είναι συναρτήσεις που περιγράφουν δύο όμοια κύματα που οδεύουν κατά μήκος της χορδής ( $x$ ) με αντίθετη φορά. Στην ιδανική διέγερση, όπου η δύναμη  $F$  εφαρμόζεται στιγμιαία σε ένα σημείο της χορδής προκαλώντας εγκάρσια μετατόπιση, οι δονήσεις μπορούν να θεωρηθούν ως δύο παλμοί που οδεύουν με αντίθετη φορά. Τα οδεύοντα κύματα ανακλώνται στα άκρα της χορδής και εφαρμόζοντας τις συνοριακές συνθήκες [1,6,7] προκύπτει πως η ανάκλασή τους στα άκρα έχει ως αποτέλεσμα την αναστροφή της φάσης τους. Με άλλα λόγια ένας θετικός παλμός ανακλάται ως αρνητικός και αντίστροφα. Η γενική λύση της εξίσωσης για την ιδανική χορδή του παραδείγματος είναι το άθροισμα όλων των κανονικών τρόπων δόνησης αυτής:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2\pi f_n t + \Phi_n) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad 2.3$$

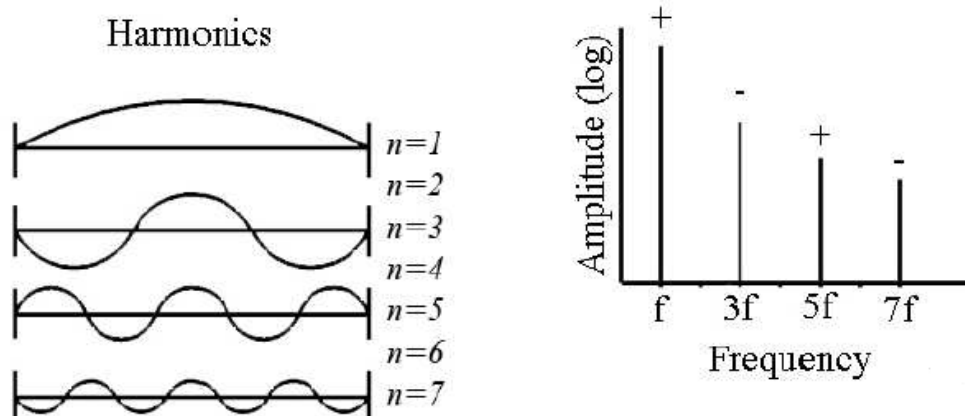
Από την λύση της εξίσωσης προκύπτει πως οι ευκρινέστεροι τρόποι δόνησης είναι ημιτονοειδούς μορφής με δεσμούς ταλάντωσης στα πακτωμένα άκρα της χορδής. Η σχέση που δέπει την συχνότητα των τρόπων δόνησης μιας ιδανικής χορδής πακτωμένης και στα δύο άκρα της είναι η γνωστή:

$$f_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad 2.4$$

Όπου  $f$  η συχνότητα,  $n$  ο δείκτης του τρόπου δόνησης  $L$  το ενεργό μήκος της χορδής,  $T$  η τάση και  $\mu$  η γραμμική πυκνότητα. Από την ανάλυση Fourier της γενικής λύσης μπορούν να υπολογιστούν και τα αρχικά πλάτη ταλάντωσης των τρόπων δόνησης  $A_n$ :

$$A_n = \frac{2h}{n\pi^2} \frac{L^2}{l(L-l)} \sin\left(\frac{n\pi l}{L}\right) \quad 2.5$$

Όπου  $h$  η αρχική απόκλιση και  $l$  η απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης  $f$  από το ένα άκρο της.



Εικόνα 4: κανονικοί τρόποι δόνησης (δεξιά) και μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας με + και - να συμβολίζει την αρχική φάση των αρμονικών (αριστερά)

Γενικά, προκύπτει από την λύση της εξίσωσης στο πεδίο της συχνότητας πως όταν η χορδή μήκους  $L$  δέχεται αρχική διέγερση σε ένα σημείο της  $l$  (που είναι η απόσταση από το ένα άκρο της) τότε τα αρμονικά στοιχεία με δείκτη  $n(L/l)$  έχουν μηδενικό πλάτος ταλάντωσης, όταν  $L/l$  είναι ακέραιος.

Η δύναμη της εγκάρσιας ταλάντωσης της χορδής που εφαρμόζεται στο ένα άκρο της

$$F = T\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=0} \quad 2.6$$

Έχει τη μορφή:

$$F(t) = A \sum_n^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(\frac{n\pi l}{L}\right)}{n} \right] \cos n\omega_l t \quad 2.7$$

Όπου  $\omega_l$ , η συχνότητα της πρώτης αρμονικής συνιστώσας.

## Χορδές και σκληρότητα

Από την κυματική εξίσωση της απλής χορδής αναφέρεται πως η χορδή είναι ιδανικά ελαστική και δεν επιφέρει δυνάμεις αντίστασης στην παραμόρφωσή της από την αρχική κατάσταση στην θέση ισορροπίας. Με άλλα λόγια, το μέτρο ελαστικότητας είναι ισούται με μηδέν [1,7]. Κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό να ισχύει για τις πραγματικές χορδές και η κυματική εξίσωση της «ιδανικής» χορδής που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο τροποποιείται στην [1,5,8]:

$$\sigma S \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{ESr^2}{4} \frac{\partial y^4}{\partial x^4} = \rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad 2.8$$

Όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα, και  $\sigma$  είναι η παραμόρφωση της χορδής που ισούται με  $T/S$ . Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση προκύπτει πως οι συχνότητες των τρόπων δόνησης αποκλίνουν από την αρμονική σχέση (ακέραια πολλαπλάσια μιας θεμελίου) φαινόμενο που είναι γνωστό με τον όρο "μη αρμονικότητα" (inharmonicity) [1,9].

Οι συχνότητες των τρόπων δόνησης των χορδών συνυπολογίζοντας την σκληρότητα (stiffness) δίδονται από την σχέση [1,10]:

$$\omega_n \approx n\omega_l \left( 1 + \frac{n^2 \pi^3 E r^4}{8 T L^2} \right) \quad 2.9$$

## Ενεργειακές απώλειες

Στις πραγματικές χορδές αναπτύσσονται μηχανισμοί τριβής με αποτέλεσμα την απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης των τρόπων δόνησης που συνήθως συμβαίνει με εκθετικό ρυθμό. Οι βασικές αιτίες που προκαλούν απώλειες στην ενέργεια ταλάντωσης των χορδών οφείλονται σε τριβές με τον αέρα, σε εσωτερικές τριβές (θερμοκρασιακές απώλειες) και σε απώλειες μέσω των στηριγμάτων [7]. Η αλληλεπίδραση της ταλαντούμενης χορδής με την ιξώδη ροή του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την απόσβεση της ενέργειας και επηρεάζει περισσότερο τους υψηλότερους τρόπους δόνησης των χορδών το πλάτος των οποίων φθίνει με ταχύτερο ρυθμό. Οι εσωτερικές τριβές χαρακτηρίζονται από το μέτρο ελαστικότητας της χορδής και επιδρούν σε μεγαλύτερο βαθμό στις υψηλότερες συχνότητες αφού η χορδή κάμπτεται σε μεγαλύτερο βαθμό και με μεγαλύτερη ταχύτητα. Τέλος, οι ενεργειακές απώλειες μέσω των στηριγμάτων εξαρτώνται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Συχνά, αυτή η σχέση της χορδής με την γέφυρα (στήριγμα) ενός οργάνου περιγράφεται με την μορφή της μιγαδικής μηχανικής αντίστασης, μιας μέτρησης της δύναμης ( $F$ ) που προκαλεί μια ταλάντωση σε σχέση με την ταχύτητα ( $u$ ) της ταλάντωσης αυτής [11].

$$\hat{Z} = \frac{\hat{F}}{\hat{u}} \quad 2.10$$

Από την μιγαδική μηχανική αντίσταση των συζευγμένων ταλαντωτών προκύπτουν χρήσιμες σχέσεις για την μετάδοση της ενέργειας. Όσο μεγαλύτερη η αντίσταση τόσο περισσότερη ενέργεια ανακλάται από το στήριγμα και το αντίθετο. Εκτός από την μηχανική αντίσταση στις μελέτες των μουσικών οργάνων χρησιμοποιείται συχνότερα η αντίστροφη σχέση που ονομάζεται αγωγιμότητα. Το μέτρο της αγωγιμότητας είναι ανάλογο με την μεταφορά ενέργειας στα στηρίγματα που μεταφράζεται σε ενεργειακές απώλειες της ταλάντωσης των χορδών.

### Ενεργό μήκος και διαμόρφωση της τάσης

Στις πραγματικές χορδές το μήκος  $L$ , που ορίζεται ως το μήκος της χορδής στην θέση ισορροπίας, δεν παραμένει σταθερό καθ' όλη την διάρκεια της ταλάντωσης. Συγκεκριμένα, μετατοπίζοντας την χορδή από την θέση ισορροπίας της το μήκος της αυξάνεται κατά  $\delta_l$  το οποίο υπολογίζεται από την σχέση [12]:

$$\delta_l = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2} dx - L \quad 2.11$$

Ωστόσο η επιμήκυνση  $\delta_l$  μεταβάλλεται περιοδικά με τον χρόνο και με συχνότητα διπλάσια από αυτήν της θεμελίου. Η διαμόρφωση του ενεργού μήκους της χορδής προκαλεί ανάλογη διαμόρφωση και στην τιμή της τάσης της που μετατρέπεται σε:

$$T_t = T_0 + \frac{ES\delta_l}{L} \quad 2.12$$

Όπου  $T_0$  η στατική τάση της χορδής στην θέση ισορροπίας,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας και  $S$  η διατομή. Το φαινόμενο αυτό γνωστό ως διαμόρφωση τάσης (Tension modulation) επιδρά στις χορδές και δημιουργούνται φαινόμενα όπως:

- Η μεταβολή του τονικού ύψους (pitch) των αρμονικών λόγω της βαθμιαίας μείωσης του μήκους και συνεπώς της τάσης της χορδής σε αντιστοιχία με το πλάτος της ταλάντωσης.
- Η μη γραμμική αλληλεπίδραση των τρόπων δόνησης υπό την έννοια της μεταφοράς ενέργειας από έναν ή περισσότερους τρόπους δόνησης σε έναν ή περισσότερους άλλους. Αυτή η μεταφορά ενέργειας μπορεί να παρουσιάσει φαινόμενα όπως η εμφάνιση των τρόπων δόνησης που εξαφανίζονται κατά την διέγερση λόγω της θέσεις διέγερσης κατά μήκος της χορδής [σχέση  $n(L/l)$ ].
- Επίσης, μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα όπως η ενδοδιαμόρφωση των τρόπων δόνησης δημιουργώντας μη αρμονικά στοιχεία στο φάσμα μιας νότας.
- Τέλος, λόγω του ότι η τάση διαμορφώνεται με διπλάσια συχνότητα όταν το πλάτος ταλάντωσης είναι αρκετά μεγάλο εμφανίζονται αρμονικά στοιχεία σε διπλάσια συχνότητα από αυτήν των αντίστοιχων της εγκάρσιας ταλάντωσης.



## Η πραγματική φύση της διέγερσης

Όταν η χορδή φθάνει στο σημείο όπου μεγάλες δυνάμεις επαναφοράς έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνσή της από την πένα, τότε, κατά το αρχικό στάδιο η κίνησή της συνήθως γίνεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα έως ότου επέλθει σε μία «σταθερή» κατάσταση. Η σταθερή αυτή κατάσταση ταλάντωσης παράγει το σύνθετο, αρμονικό (κατά προσέγγιση) σήμα διέγερσης που έχει περιγραφεί στα παραπάνω. Ωστόσο, η στιγμιαία απομάκρυνση από την πένα κατά το αρχικό στάδιο της ταλάντωσης έχει ως αποτέλεσμα την, κατά προσέγγιση, στιγμιαία διέγερση του οργάνου μέσω της γέφυρας. Έτσι, το όργανο αποκρίνεται με τον ίδιο τρόπο που θα αποκρινόταν σε ένα σήμα παλμού στην είσοδό του με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη διέγερση όλων των συντονισμών του (τρόπων δόνησης). Γίνεται έτσι κατανοητό πως στο αρχικό φάσμα μιας νότας μπορεί κάποιος να εντοπίσει εκτός άλλων τους συντονισμούς του απλά με την διέγερση από την πένα. Ιδίως όταν αυτή η διέγερση πραγματοποιηθεί σε μια νότα όπου ο πρώτος τρόπος δόνησης της χορδής βρίσκεται σε πολύ υψηλή συχνότητα, τότε τα δονητικά χαρακτηριστικά του οργάνου εντοπίζονται ξεκάθαρα στο φάσμα της κατά τους αρχικούς της χρόνους.

## Διπλές χορδές

Τα όργανα που απασχολούν την μελέτη αποτελούνται από ζεύγη χορδών που συνεπάγεται σε ταυτόχρονη διέγερση του οργάνου από δύο σύνθετους ταλαντωτές. Η ταυτόχρονη λειτουργία δύο ταλαντωτών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας που μεταδίδεται στο σώμα του οργάνου και ως εκ τούτου παράγεται ήχος μεγαλύτερης έντασης. Ωστόσο, το σχετικό τονικό ύψος των χορδών είναι ένας σημαντικός παράγοντας που διαμορφώνει την σχέση αλληλεπίδρασης τους.

Όταν τα τονικά ύψη των χορδών συμπίπτουν τότε παράγεται ήχος με ισχυρή ένταση στην αρχή που αποσβένει με πολύ ταχύ ρυθμό έως μία χαμηλότερη ένταση και στην συνέχεια αποσβένει με πιο ομαλό ρυθμό. Αυτός ο τρόπος πτώσης της έντασης είναι γνωστός ως «απόσβεση δύο σταδίων» (two stage decay) [6] και παρατηρείται πολύ συχνά στα όργανα της μελέτης. Οι χορδές που είναι κουρδισμένες με μεγάλη απόκλιση έχουν ως αποτέλεσμα έντονα φαινόμενα διαμόρφωσης της έντασης με την μορφή διακροτημάτων. Χορδές με μικρή απόκλιση στο τονικό ύψος έχουν ως αποτέλεσμα ήχο η ένταση του οποίου αποσβένει με αργό ρυθμό και τα διακροτήματα εμφανίζονται με πολύ αργό ρυθμό.

Ωστόσο, εκτός από τα σχετικά ύψη μεγάλο ρόλο στην σύζευξη διακατέχουν και οι σχετικές φάσεις των τρόπων δόνησης κατά την αρχή της ταλάντωσης. Θεωρώντας τις χορδές κουρδισμένες σε ταυτοφωνία όταν ταλαντώνονται σε φάση παρατηρείται το χαρακτηριστικό της πτώσης σε δύο στάδια που περιγράφηκε παραπάνω. Όταν όμως η αρχική φάση είναι αντίθετη τότε δεν θα υπάρξει μεγάλο πλάτος ταλάντωσης στην αρχή και η πτώση της έντασης θα είναι πιο ομαλή [6,9].

### **Χορδές σε κοινή γέφυρα**

Το ότι οι χορδές τερματίζουν σε κοινό στήριγμα (γέφυρα) έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά ενέργειας από μία χορδή που τίθεται σε ταλάντωση προς όλες τις υπόλοιπες μέσω του στηρίγματος αυτού. Έτσι, κάθε φορά που οργανοπαίκτης οδηγεί ένα ζεύγος χορδών σε ταλάντωση, έμμεσα διεγείρονται με μικρότερο πλάτος και τα υπόλοιπα ζεύγη χορδών. Προφανώς η μεγαλύτερη ροή ενέργειας συμβαίνει όταν οι τρόποι δόνησης των ελεύθερων-ανοιχτών χορδών συμπίπτουν με αντίστοιχους των χορδών που διεγείρονται άμεσα (φαινόμενα συντονισμού).

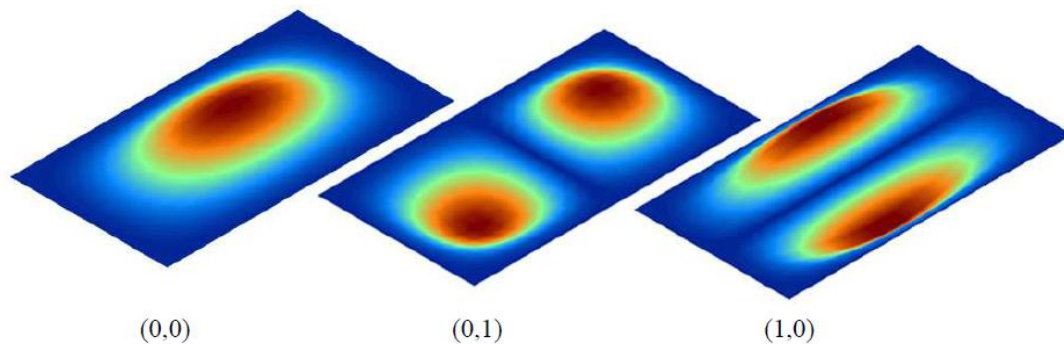
Ωστόσο, η πραγματική φύση της διέγερσης από τον οργανοπαίκτη έχει ως αποτέλεσμα την διέγερση των χορδών ακόμα και όταν οι τρόποι δόνησής τους δεν συμπίπτουν σε συχνότητα.

### **Τα ελεύθερα τμήματα των οργάνων**

Τα δονητικά χαρακτηριστικά των τμημάτων των μουσικών οργάνων εξαρτώνται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία κατασκευάζονται, τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Ωστόσο, κατά την μελέτη των τρόπων δόνησης σημαντικός παράγοντας είναι η μέθοδος διέγερσης αλλά και ο τρόπος στήριξής τους. Ακόμα, ο τρόπος με τον οποίο δονούνται τα καπάκια διαμορφώνει και τα χαρακτηριστικά της ηχητικής τους εκπομπής. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα τμήματα των οργάνων είναι το ξύλο οι μηχανικές ιδιότητες του οποίου χαρακτηρίζονται από ανισοτροπία, παρουσιάζει δηλαδή διαφορετικές ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση κάθετη προς τον κορμό [14]. Η σύνθετη συμπεριφορά του ξύλου ως υλικό σε συνδυασμό με την πολύπλοκη γεωμετρία των τμημάτων (καπάκι με στηρίγματα, κοιλότητα του σκάφους) διαμορφώνουν την συμπεριφορά στους τρόπους δόνησης οι οποίοι όμως έχουν ερευνηθεί κυρίως για τα όργανα του βιολιού και της κιθάρας και πολλά χαρακτηριστικά τους είναι πλέον γνωστά.

### **Το καπάκι**

Όταν ένα ξύλινο καπάκι δεχθεί ημιτονική διέγερση σε συχνότητα που συμπίπτει με κάποιον από τους τρόπους δόνησής του τότε συμβαίνει το φαινόμενο του συντονισμού. Ανάλογα με τον τρόπο δόνησης του καπακιού η επιφάνεια ταλαντώνεται εγκάρσια σχηματίζοντας περιοχές με μέγιστο πλάτος ταλάντωσης (κοιλίες) και περιοχές με μηδενικό ή πολύ μικρό πλάτος αντίστοιχα (δεσμοί). Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των τρόπων δόνησης στα ελεύθερα καπάκια προκύπτει από τον αριθμό των δεσμών ταλάντωσης που είναι παράλληλοι κατά μήκος και κατά πλάτος ως ένα ζευγάρι ακεραίων  $(x,y)$  αντίστοιχα.



Εικόνα 5: Οι πρώτοι 3 τρόποι δόνησης ενός παραλληλόγραμμου καπακιού πακτωμένου στα άκρα του. Οι μπλε περιοχές συμβολίζουν το μηδενικό πλάτος ταλάντωσης.

Ο υπολογισμός των τρόπων δόνησης με μία μαθηματική σχέση αντίστοιχης με την χορδή είναι δυνατός για «ιδανικές» συνθήκες (μεμβράνες) αλλά και για απλές δομές [15] ως εφαρμογή της κυματικής εξίσωσης σε περισσότερες διαστάσεις. Ωστόσο, τα πράγματα είναι πολύ σύνθετα στα ολοκληρωμένα καπάκια των οργάνων όπου και με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν αναπτυχθεί αριθμητικά μοντέλα (FEM) [6] και οπτικές τεχνικές που βασίζονται σε φωτεινές δέσμες laser, που μπορούν να λύσουν το πρόβλημα τόσο της περιγραφής όσο και του εντοπισμού τους. Οι οργανοποιοί όμως γνώριζαν την σπουδαιότητα του καπακιού στα μουσικά όργανα αιώνες πριν την ανακάλυψη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των laser.

Αυτό αποδεικνύεται από το ότι έκρουαν τα καπάκια σε διαφορετικά σημεία διεγείροντας διαφορετικούς τρόπους δόνησης και με «γνώμονα» την ακοή και την εμπειρία τους έκαναν τις απαραίτητες διορθώσεις με στόχο το επιθυμητό αποτέλεσμα [16]. Ένα μεγάλο βήμα πραγματοποιήθηκε από τον Ernst Chladni (1787) [16] που παρατήρησε πως όταν ένα υλικό στοιχείο με κόκκους όπως η άμμος απλωθεί πάνω στην δονούμενη επιφάνεια κατά την στιγμή του συντονισμού έχει την τάση να συγκεντρώνεται στις περιοχές όπου υπάρχει πολύ μικρό πλάτος ταλάντωσης διαγράφοντας τους δεσμούς ταλάντωσης και ως εκ τούτου το σχήμα του κάθε διαφορετικού τρόπου δόνησης. Ωστόσο, η ανάγκη της επιστήμης για τον προσδιορισμό της κατανομής του πλάτους ταλάντωσης πάνω στις δονούμενες επιφάνειες, της αποδέσμευσης από τις δυνάμεις της βαρύτητας (καθώς στην μέθοδο Chladni οι επιφάνειες τοποθετούνται υποχρεωτικά παράλληλα με το έδαφος) και την μελέτη μη επίπεδων επιφανειών ικανοποιήθηκε μέσω της ανακάλυψης της ολογραφικής συμβολομετρίας.

Εξέλιξη της προαναφερθείσας τεχνικής αποτελεί και η ολογραφική συμβολομετρία ψηφίδων που είναι η βασική μέθοδος μελέτης στην παρούσα εργασία. Η ολογραφική συμβολομετρία επιτυγχάνει μέσω της συμβολής μιας συνεχούς μονοχρωματικής πηγής φωτός να εξάγει πληροφορίες τόσο για το πλάτος ταλάντωσης όσο και για την κατανομή του σε μια δονούμενη επιφάνεια. Ο Jansson ήταν ο πρώτος που εφάρμοσε την ολογραφική συμβολομετρία για να εντοπίσει τους τρόπους δόνησης του καπακιού της κιθάρας [17].

Επίσης, κατέγραψε την ηχητική απόκριση συχνότητας της κιθάρας με χρήση μικροφώνων και διέγερση στην γέφυρα του οργάνου και έκανε συσχετισμό των συντονισμών που σημειώθηκαν στο διάγραμμα της απόκρισης με τους τρόπους δόνησης που κατέγραψε μέσω της ολογραφίας. Η σχέση που εντόπισε ήταν πως οι τρόποι δόνησης των οργάνων συμπίπτουν με τις περιοχές συντονισμών στην απόκριση συχνότητας, κάτι που σήμερα μπορεί να θεωρείται αυτονόητο.

Ωστόσο, σημαντικοί παράγοντες που αφορούν την θέση τοποθέτησης των μικροφώνων και στην θέση διέγερσης των οργάνων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Η παρατήρηση του Jansson αφορά τους τρόπους που εκπέμπουν ως δίπολα με διαφορά φάσης, οι οποίοι δεν εμφανίζονται όταν η τοποθέτηση του μικροφώνου γίνεται μπροστά από το όργανο. Ωστόσο στην ηχητική εκπομπή μεγάλο ρόλο διακατέχει η συμμετρία με την οποία εμφανίζονται οι τρόποι δόνησης. Σχετικά με την θέση διέγερσης ο Jansson υποδεικνύει πως εάν στο σημείο διέγερσης κάποιος τρόπος δόνησης παρουσιάζει δεσμό ταλάντωσης τότε δεν θα διεγερθεί.

### Οι τρόποι δόνησης της αέρινης κοιλότητας

Σημαντικές δονήσεις των οργάνων είναι αυτές του αέρινου όγκου των αντηχείων που ταλαντώνεται περιοδικά δια της ηχητικής οπής σε συγκεκριμένες συχνότητες. Όταν τα τοιχώματα του αντηχείου (καπάκι – σκάφος) θεωρηθούν ακίνητα το σύστημα αέρα – αντηχείο λειτουργεί περίπου ως ένας συντονιστής **Helmholtz [18]**, μια κατασκευή που αποτελείται από μία κοιλότητα σε συνδυασμό με ένα κυλινδρικό επιστόμιο (απλοϊκά, όπως ένα γυάλινο μπουκάλι). Σε αυτήν την περίπτωση η κίνηση του αέρα μπορεί να μελετηθεί με την μορφή ενός απλού αρμονικού ταλαντωτή με έναν βαθμό ελευθερίας. Ως «ελατήριο» θεωρείται ο αέρινος όγκος ( $V$ ) στο εσωτερικό της κοιλότητας, ενώ ως «μάζα» θεωρείται το τμήμα του αέρα που ταλαντώνεται στο κυλινδρικό στόμιο του συντονιστή και ισούται με

$$m = \rho S l \quad 2.13$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα,  $S$  η επιφάνεια εγκάρσιας τομής ( $\pi r^2$ ) του κυλινδρικού στομίου και  $l$  το ύψος του αντίστοιχα. Η θεμέλιος συχνότητα του συντονιστή που συναντάται με τον όρο «συχνότητα **Helmholtz**» ή «συχνότητα του αέρα» είναι μια συνάρτηση των παραπάνω γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της ταχύτητας του ήχου στον αέρα ( $c$ ) και υπολογίζεται από την σχέση [19]:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \quad 2.14$$

Η παραπάνω σχέση όμως δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη στα μουσικά όργανα κυρίως λόγω της γεωμετρικής ασυμφωνίας του στομίου με την ηχητική οπή. Συγκεκριμένα, για να ισχύει η σχέση 2.14 υπάρχει η προϋπόθεση ότι η επιφάνεια της διατομής της οπής πρέπει να είναι πολύ μικρότερη του τετραγώνου του ύψους της επί την σταθερά του Αρχιμήδη ( $S \ll \pi l^2$ ).

Στα μουσικά όργανα, όμως, για τις διαστάσεις των οπών, ισχύει ότι το ύψος του καπακιού (ουσιαστικά είναι το πάχος αλλά αποφεύγεται για να γίνει άμεση σύγκριση με τους συντονιστές),  $l$ , είναι της τάξης των mm ενώ η επιφάνεια,  $S$ , της τάξης των cm<sup>2</sup>. Σε αυτή την περίπτωση η αέρινη μάζα που ταλαντώνεται εκατέρωθεν της οπής δεν περιορίζεται στα όρια που θέτει το ύψος των καπακιών  $l$  αλλά το ξεπερνά τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά ως αποτέλεσμα της αδράνειας που αναπτύσσεται κατά την ταλάντωση. Έτσι, λόγω του ότι η «ενεργή μάζα» του αέρα είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής στο ύψος  $l$  προστίθεται ένας διορθωτικός παράγοντας,  $d$ , και στην σχέση 2.14 το ύψος αντικαθίσταται από το ενεργό ύψος  $l_{eff} = l + d$ . Η διαδικασία αυτή συναντάται στην βιβλιογραφία με τον όρο “end correction” (διόρθωση των άκρων), λόγω του ότι ο παράγοντας  $d$  προσδιορίζεται από τις συνθήκες που επικρατούν στα άκρα της οπής. Παραδείγματος χάριν, στις κιθάρες, όπου η αέρινη μάζα ταλαντώνεται εκατέρωθεν μιας κυκλικής οπής που «τερματίζει» σε επίπεδη επιφάνεια το συνολικό ενεργό μήκος προσδιορίζεται ως  $d = 1.7r$ , όπου  $r$  η ακτίνα της οπής. Αυτή η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στα όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού μόνο στην περίπτωση που έχουν κυκλικές οπές (όπως και στα δύο υπό μελέτη όργανα, ούτι και πολίτικο λαούτο). Στα μπουζούκια όμως η ύπαρξη κυκλικής οπής σπανίζει, ενώ εκτός από τις ελλειπτικές οπές που έχουν τα όργανα της μελέτης υπάρχουν και όργανα με οπές που σκαλίζονται από τους οργανοποιούς παίρνοντας διάφορα σχήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ως παράγοντας διόρθωσης χρησιμοποιείται η τετραγωνική ρίζα της συνολικής επιφάνειας της οπής και η σχέση που δίδει την συχνότητα Helmholtz μετατρέπεται στην [20]:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l+\sqrt{A})}} \quad 2.15$$

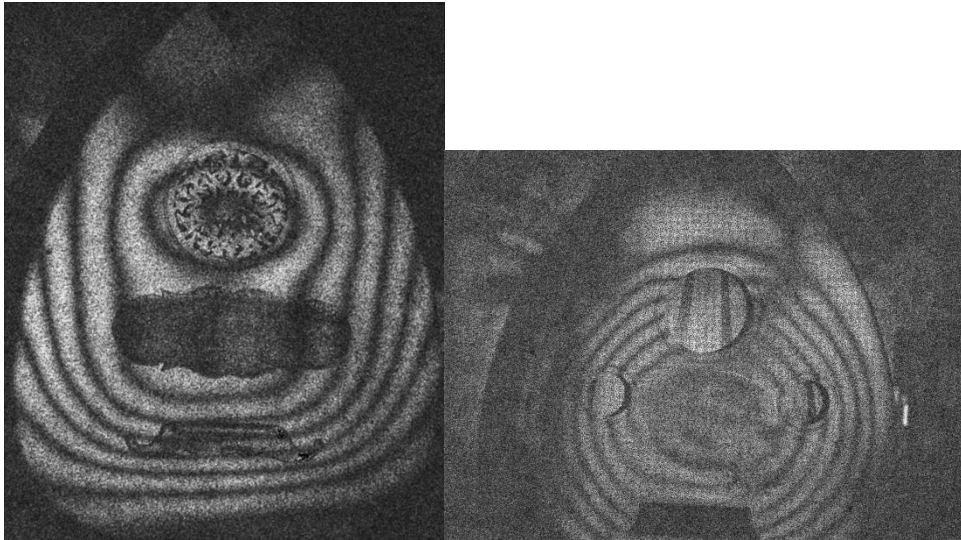
Η προσέγγιση με την οποία υπολογίζεται η συχνότητα Helmholtz μέσω των παραπάνω σχέσεων είναι αρκετά καλή και χρησιμοποιείται από πλήθος οργανοποιών κατά τα στάδια κατασκευής της κιθάρας. Ωστόσο, ο υπολογισμός αυτής της συχνότητας με μεγάλη ακρίβεια θεωρώντας τα άκρα των αντηχείων ακλόνητα είναι αρκετά επισφαλής διότι στην πραγματικότητα τόσο τα καπάκια όσο και τα σκάφη των οργάνων ταλαντώνονται μεταβάλλοντας τον όγκο των αντηχείων εκφυλίζοντας την ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης της αέρινης μάζας. Στις κιθάρες ως βασικός τρόπος δόνησης του αέρα (συχνότητα Helmholtz) θεωρείται το αποτέλεσμα της σύζευξης του ιδανικού ταλαντωτή (με ακλόνητα άκρα) με τον χαμηλότερο τρόπο δόνησης του καπακιού [6]. Εκτός όμως από την συχνότητα Helmholtz που είναι ο χαμηλότερος τρόπος συντονισμού στα περισσότερα έγχορδα μουσικά όργανα η ταλάντωση της αέρινης μάζας συμβαίνει και σε υψηλότερες συχνότητες με αποτέλεσμα την πιθανή σύζευξη κάποιου τρόπου δόνησης του καπακιού και του αέρα. Η ύπαρξη του αέρα τόσο μέσα όσο και έξω από τα όργανα έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της απόσβεσης των τρόπων δόνησης. Σε μετρήσεις πραγματοποίησε ο Gough [21], στην κιθάρα σε θάλαμο εκκένωσης του αέρα, παρατήρησε αύξηση της απόσβεσης στον βασικότερο συντονισμό της κιθάρας. Εκτός όμως από τις τριβές που αναπτύσσονται η ύπαρξη του αέρα επηρεάζει δραστικά και τις συχνότητες ταλάντωσης των τρόπων δόνησης. Αυτό προκύπτει από τις παρατηρήσεις του McLennan [22], ο οποίος μελέτησε τις συχνотικές μεταβολές στους δύο χαμηλότερους τρόπους δόνησης του βιολιού σε διοξείδιο του άνθρακα, Ήλιο και διάφορες μίξεις αέρα με Ήλιο.

### **Σχέσεις σύζευξης στα ολοκληρωμένα όργανα**

Στα ολοκληρωμένα όργανα η συνολική δονητική συμπεριφορά και παραγωγή του ήχου εξαρτάται από την αλληλεπίδραση όλων των τμημάτων τους. Αυτό αποτελεί και την μεγαλύτερη δυσκολία στην αναλυτική περιγραφή της συμπεριφοράς τους καθώς θα πρέπει να «απομονωθούν» όλοι οι παράγοντες και να μελετηθεί η συνεισφορά του καθενός ξεχωριστά. Στην παρούσα εργασία όμως μελετάται η συνολική δονητική συμπεριφορά των οργάνων και ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνεται ως σύζευξη όλων των τμημάτων των οργάνων αποτελεί εξειδικευμένη ακουστική ανάλυση που απέχει από τον βασικό της στόχο.

### **Τρόποι δόνησης και ονομασία**

Οι τρόποι δόνησης που εμφανίζονται στα ολοκληρωμένα όργανα είναι πολλοί πιο σύνθετοι σε μορφή από τους αντίστοιχους των ελεύθερων καπακιών. Οι περιοχές όπου σχηματίζονται δεσμοί και κοιλίες πλάτους ταλάντωσης δεν παρουσιάζονται με την ίδια συμμετρία που έχουν, για παράδειγμα, σε μια παραλληλόγραμμη επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό το σύστημα αρίθμησης δεν βασίζεται στην καταμέτρηση των δεσμών ταλάντωσης κατά πλάτος και κατά μήκος της επιφάνειας αλλά στον αριθμό των μεγίστων κατά τους αντίστοιχους άξονες.



Εικόνα 6: Η μέθοδος ονομασίας των τρόπων δόνησης σε ολοκληρωμένα όργανα με βάση τις περιοχές που εντοπίζονται μηδενικά πλάτη ταλάντωσης (κόμβοι) κατά πλάτος και κατά μήκος των καπακιών (x,y): Λάφτα (0,0), Ούτι (0,0).

Η σύζευξη των επιμέρους τμημάτων των οργάνων έχει ως αποτέλεσμα και τον εκφυλισμό των τρόπων δόνησης με αποτέλεσμα κάποιοι να εμφανίζονται περισσότερες φορές από μια σε διαφορετικές συχνοτικές περιοχές. Για παράδειγμα, στο ούτι, ο τρόπος (1,1), όπως στην εικόνα 6 (αντίστοιχα ισχύει και για το πολιτικό λαούτο) εμφανίζεται τουλάχιστον δύο (μπορεί και τρεις) φορές ως αποτέλεσμα της σύζευξης του καπακιού με την αέρινη κοιλότητα και την πλάτη. Για να ξεχωρίζονται αυτοί οι τρόποι χρησιμοποιούνται δείκτες που προκύπτουν από το τμήμα του οργάνου από το οποίο προέρχονται κατά βάση. Έτσι για παράδειγμα η συχνότητα **Helmholtz** ή **αέρινη** συχνότητα συναντάται με τους δείκτες **H** ή **A** αντίστοιχα ενώ στους τρόπους που προέρχονται από τον εκφυλισμό βασικών τρόπων δόνησης του καπακιού ο δείκτης που χρησιμοποιούνται είναι το **T** εκ του αγγλικού "**top plate**".

### Σύζευξη καπακιού, αέρινης συχνότητας και σκάφους (στην κιθάρα)

Τα χαρακτηριστικά της σύζευξης των τμημάτων που απαρτίζουν την κιθάρα προέρχονται από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε ολοκληρωμένα όργανα «απομονώνοντας» όσο το δυνατό την επιρροή μεμονωμένων τμημάτων. Από τις έρευνες αυτές προέκυψε ότι οι πρώτοι δύο τρόποι δόνησης της κιθάρας (1,1)<sub>T</sub> και (1,1)<sub>H</sub> είναι αποτέλεσμα της σύζευξης της αέρινης συχνότητας με τον πρώτο τρόπο δόνησης του καπακιού [24,6]. Συγκεκριμένα, η σύζευξη του πρώτου τρόπου δόνησης του καπακιού με τον αέρινο όγκο έχει ως αποτέλεσμα την μικρή μεταβολή της συχνότητάς του προς τα πάνω. Αντίθετα, η συχνότητα του αέρα μειώνεται λίγο από την «ιδανική» κατάσταση (που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους). Η σχέση που συνδέει τις μη συζευγμένες συχνότητες των τρόπων αυτών με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από την σύζευξη είναι [25]:

$$f_T^2 + f_H^2 = f_-^2 + f_+^2 \quad 2.16$$

Το πίσω καπάκι της κιθάρας επιδρά και αυτό στην συχνότητα του πρώτου τρόπου δόνησης του καπακιού μειώνοντας της συχνότητά του όταν η θεμέλιος του πίσω καπακιού είναι μικρότερη από αυτήν του καπακιού ( $f_B < f_T$ ) και αυξάνοντάς την στην αντίθετη περίπτωση ( $f_B > f_T$ ) [6]. Στις υψηλότερες συχνότητες υπάρχει μεγάλη ομοιότητα των τρόπων δόνησης με τους αντίστοιχους των ελευθέρων καπακιών ωστόσο οι συχνότητες και κυρίως οι παράγοντες απόσβεσης μεταβάλλονται από την σύζευξη [26].

### Σύζευξη χορδής καπακιού

Όπως αναφέρθηκε, η σύζευξη της χορδής με το καπάκι είναι μια μέτρηση της αγωγιμότητας, του βαθμού δηλαδή με τον οποίο αποκρίνεται ένα σημείο διέγερσης (με την μορφή της ταχύτητας ταλάντωσης που αναπτύσσει) προς μια δύναμη που εφαρμόζεται σε αυτό. Είναι προφανές από τα όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής πως η αγωγιμότητα είναι συχνοτικά εξαρτώμενη με αποτέλεσμα το καπάκι να αποκρίνεται διαφορετικά στους διαφορετικούς τρόπους της χορδής ακόμα και όταν αυτοί έχουν ίδιο πλάτος. Στις περιπτώσεις όπου η χορδή οδηγεί το καπάκι σε συχνότητες το οποίο δεν αποκρίνεται (αδύναμη σύζευξη) τότε οι συχνότητες των τρόπων δόνησης της χορδής διαταράσσονται ομαλά ενώ αύξηση παρατηρείται και στον ρυθμό πτώσης της έντασής τους.

Έχει παρατηρηθεί επίσης πως οι συχνοτικές σχέσεις των τρόπων δόνησης των χορδών με τους αντίστοιχους του καπακιού επιδρούν στην σχετική φάση με την οποία ταλαντώνονται τα δύο συστήματα. Σε έναν τρόπο δόνησης της χορδής που συμβαίνει σε χαμηλότερη συχνότητα από έναν αντίστοιχο του καπακιού η γέφυρα κινείται συμφασικά με το καπάκι με αποτέλεσμα την αύξηση του ενεργού μήκους της χορδής που συνεπάγεται σε μείωση της συχνότητας συντονισμού. Αντίθετα, όταν ένας τρόπος δόνησης της χορδής συμβαίνει σε υψηλότερη συχνότητα από έναν αντίστοιχο του καπακιού η γέφυρα κινείται σε αντίθετη φάση με το καπάκι με αποτέλεσμα την μείωση του ενεργού μήκους της χορδής που συνεπάγεται σε αύξηση της συχνότητας συντονισμού [27].

Την περίπτωση που ένας τρόπος της χορδής συμπίπτει σε συχνότητα με έναν αντίστοιχο του καπακιού εξέτασε πρώτος ο Gough [28,26], ο οποίος όρισε μια τιμή  $K$  που αντιστοιχεί στον βαθμό σύζευξης και δίδεται από την σχέση:

$$K = \frac{2Q_B}{n\pi} \sqrt{\frac{2m}{M_{eff}}} \quad 2.17$$

Όπου  $Q_B$  ο παράγοντας  $Q$  του τρόπου δόνησης του καπακιού,  $n$  ο δείκτης του τρόπου δόνησης της χορδής,  $m$  η μάζα της χορδής και  $M_{eff}$  η ενεργή μάζα του τρόπου δόνησης του καπακιού. Έτσι, με βάση τον βαθμό σύζευξης προκύπτουν δύο περιπτώσεις που διέπουν τα χαρακτηριστικά της:



- Όταν ο βαθμός σύζευξης  $K < 1$  τότε η σύζευξη δεν επιδρά σημαντικά στις ιδιοσυχνότητες των τρόπων δόνησης αλλά αυξάνεται ο ρυθμός απόσβεσης.
- Όταν όμως υπάρχει δυνατή σύζευξη, με  $K > 1$ , το αποτέλεσμα είναι η συμμετρική διχοτόμηση των τρόπων δόνησης γύρω από τις ιδιοσυχνότητες των ταλαντωτών (χορδής και καπακιού) και την διαμόρφωση του παράγοντα ποιότητας σε  $2Q_B$  και για τους δύο. Στην χαμηλότερη συχνότητα η χορδή και το καπάκι ταλαντώνονται σε φάση ενώ στην υψηλότερη με αντίθετη φάση.

Ο Wright [26] επεκτείνει τις παρατηρήσεις του Gough σε περιπτώσεις όπου οι συχνότητες των δύο τρόπων δόνησης δεν συμπίπτουν συχνοτικά αλλά βρίσκονται σε μικρή απόσταση. Το συμπέρασμά του είναι πως στην περίπτωση της πολύ ισχυρής σύζευξης  $K \gg 1$  ο συζευγμένος τρόπος που βρίσκεται πιο κοντά στην φυσική συχνότητα συντονισμού της χορδής κυριαρχεί στην απόκριση μεταβάλλοντας σημαντικά την φυσική συχνότητα συντονισμού του ταλαντωτή. Τα χαρακτηριστικά που αναπτύχθηκαν παραπάνω αφορούν ωστόσο μια δύναμη που εφαρμόζεται σε μία διεύθυνση προς το καπάκι.

Η ιδιότητα των χορδών να ταλαντώνονται και στους τρεις άξονες έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικούς τρόπους σύζευξης με τα καπάκια καθώς η αγωγιμότητα εξαρτάται και από την κατεύθυνση. Από τις τρεις διευθύνσεις της ταλάντωσης της χορδής (x,y,z) έχει παρατηρηθεί πως η κάθετη προς το καπάκι (z) είναι και αυτή που συζευγνύεται πιο ισχυρά με αυτό [26]. Η παρατήρηση αυτή φαίνεται λογική λόγω του ότι το καπάκι ταλαντώνεται κατά κύριο λόγο προς αυτήν την διεύθυνση. Προκύπτει από τα παραπάνω πως ο εκτελεστής εκτός από την θέση κατά μήκος της χορδής μπορεί να ελέγξει και την αρχική γωνία με την οποία θα απομακρύνει την χορδή από την θέση ισορροπίας διεγείροντας αντίστοιχα περισσότερο την κάθετη ή την παράλληλη κίνηση της χορδής σε σχέση με το καπάκι και ως εκ τούτου και διαφορετικούς τρόπους δόνησης ανάλογα με τον σχηματισμό τους πάνω στο καπάκι. Σύμφωνα με τον Jansson [29], οι χορδές στην κιθάρα που διεγείρονται με παράλληλη φορά προς το καπάκι συζευγνύονται σχεδόν αποκλειστικά με τους τρόπους της μορφής (2,1). Οι δυνάμεις που ασκούνται κατά μήκος της χορδής (διαμήκης ταλάντωση) συζευγνύονται με τον (1,2) να κυριαρχεί, ενώ η κάθετη ταλάντωση έχει σχεδόν αποκλειστική σύζευξη με τον (1,1)T.

### Σύνδεση ήχου και δονητικών χαρακτηριστικών των οργάνων

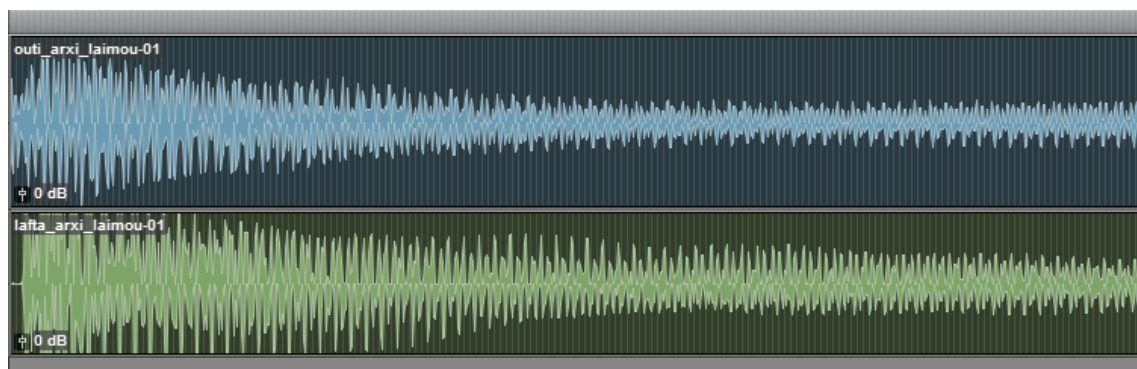
Οι Caldersmith και Jansson [30,16,6], ερεύνησαν τις ηχητικές ιδιότητες της κιθάρας σε σχέση με τις αντίστοιχες δονητικές σε ολοκληρωμένα όργανα. Ηχογραφήθηκαν νότες μιας οκτάβας σε κάθε χορδή και η μέθοδος επαναλήφθηκε. Στην ανάλυση που ακολούθησε πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της περιβάλλουσας έντασης για τα αρμονικά στοιχεία κάθε νότας και επιλέχθηκαν δύο τιμές από κάθε περιβάλλουσα. Το λεγόμενο αρχικό επίπεδο έντασης που είναι η μέγιστη τιμή της περιβάλλουσας (initial level) και η ένταση ένα δευτερόλεπτο μετά από την χρονική τιμή που αντιστοιχεί στο μέγιστο (initial level fall).

Ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκαν λήψεις της ηχητικής απόκρισης των οργάνων και της συνάρτησης αγωγιμότητας σε μία θέση πάνω στην γέφυρα. Συγκεντρώνοντας αυτές τις τιμές μέγιστης αρχικής έντασης και της αντίστοιχης μετά από ένα δευτερόλεπτο και σχεδιάζοντάς τις ως συνάρτηση της συχνότητας παρατηρήθηκαν δύο σημαντικά χαρακτηριστικά που διέπουν τον ήχο των οργάνων σε σχέση με τις δονήσεις τους:

1. Συγκρίνοντας τις τιμές της αρχικής έντασης ανά συχνότητα με τις ηχητικές αποκρίσεις και τις συναρτήσεις αγωγιμότητας παρατηρήθηκε μεγάλος βαθμός συσχέτισης στις περιοχές όπου υπάρχουν τα μέγιστα των διαγραμμάτων.
2. Συγκρίνοντας τις τιμές της έντασης ένα δευτερόλεπτο μετά από την μέγιστη με τις ηχητικές αποκρίσεις και τις συναρτήσεις αγωγιμότητας παρατηρήθηκε η αντίθετη συμπεριφορά. Εκεί που στις συναρτήσεις ηχητικής απόκρισης και αγωγιμότητας υπήρχαν μέγιστα (που αντιστοιχούν στους συντονισμούς των οργάνων), στο διάγραμμα της πτώσης της έντασης υπήρχαν τοπικά ελάχιστα αφού λόγω της μεγάλης αγωγιμότητας το καπάκι μετατρέπει την ενέργεια ταλάντωσης των χορδών σε ακουστική ενέργεια σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα με αποτέλεσμα την ταχεία απόσβεση.

### 2.1.2 ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ & ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

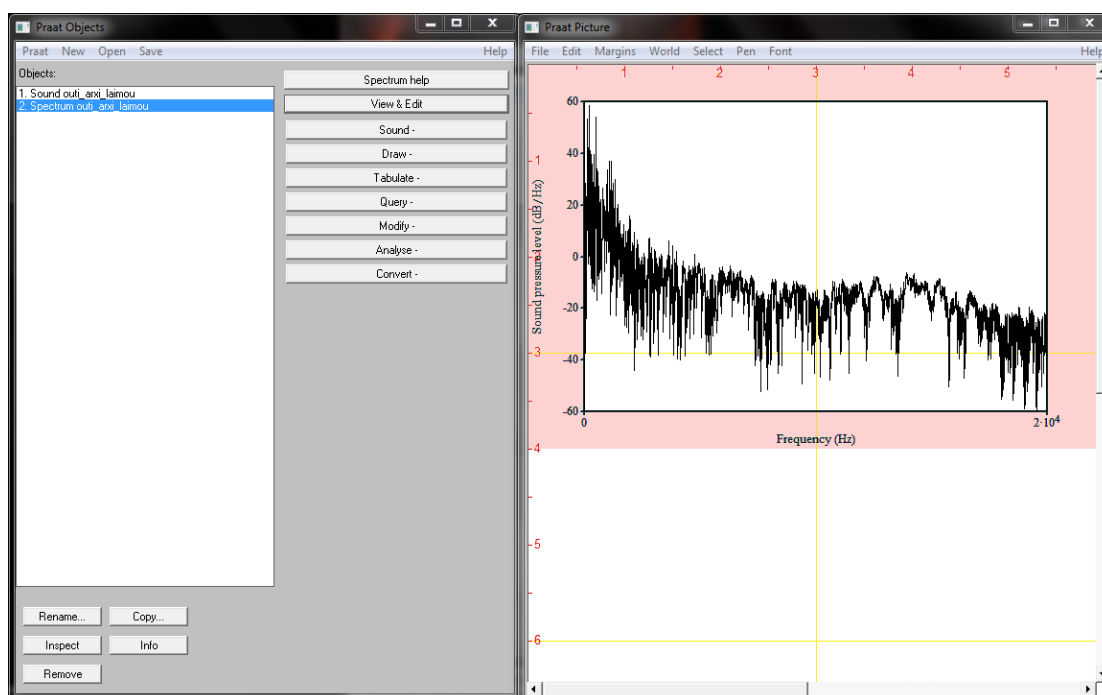
Το επόμενο βήμα είναι να πάρουμε το ηχογραφημένο υλικό και να το περάσουμε στο στάδιο της ψηφιακής επεξεργασίας από κάποιο πρόγραμμα το οποίο θα μας δώσει το ουσιώδες μέρος του υλικού μας. Έτσι, επιτυγχάνουμε να «κόψουμε» το ηχητικό υλικό και να αποκτήσουμε ένα σύνολο το οποίο περιλαμβάνεται από τις νότες των οργάνων, ξεχωριστά πλέον, η μία από την άλλη.



Εικόνα 7: Παράδειγμα από την ψηφιακή επεξεργασία των ηχητικών υλικών, διάρκειας 1sec, που λήφθηκαν από τις ηχογραφήσεις των υπό μελέτη μουσικών οργάνων.

Κατά την ηχογράφιση, επίσης, είχαν παιχτεί πολλές νότες, πάνω από μία φορά. Συνεπώς, έπρεπε να ακουστούν αναλυτικά και να επιλεγθούν αυτές, οι οποίες δεν παρουσίαζαν λάθη κατά το παίξιμο (δηλαδή κατά τη διέγερση των χορδών από την πένα). Στη συνέχεια, περιορίσαμε τα τελικά ηχητικά δείγματα, σε διάρκεια ενός δευτερολέπτου (1sec).

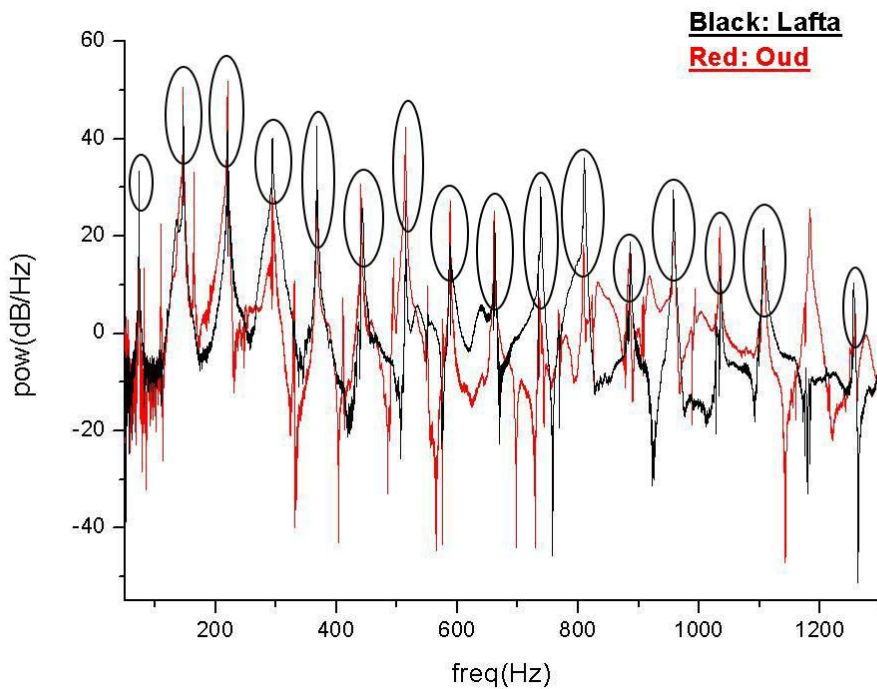
Για την φασματική επεξεργασία των δειγμάτων, επιλέχθηκε το δωρεάν και αξιόπιστο λογισμικό PRAAT (του οποίου η αξιοπιστία, ελέγχθηκε μέσω ταύτισης των αποτελεσμάτων του με αντίστοιχα, από γνωστές εμπορικές εφαρμογές και αρκετά υψηλού κόστους, software λογισμικά), το περιβάλλον του οποίου φαίνεται παρακάτω (**εικόνα 8**):



**Εικόνα 8: Το λογισμικό PRAAT.**

### 2.1.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την απεικόνιση του φασματικού περιεχομένου των χρονικά μεταβαλλόμενων σημάτων, εφαρμόστηκε Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (FFT), σε όλες τις νότες που παίχτηκαν και στα δύο υπό μελέτη μουσικά όργανα. Έπειτα, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων, για την κάθε νότα, η οποία παίχτηκε και από τα δύο μουσικά όργανα. Στην παρακάτω εικόνα, περιγράφεται η διαδικασία σύγκρισης των αποτελεσμάτων από το γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT).



Εικόνα 9: Αποτελέσματα σύγκρισης του πλάτους των αρμονικών, για τη νότα D2, του κάθε οργάνου, σε σχέση με τη συχνότητα, για χρονικό διάστημα 1sec. Στο διάγραμμα αυτό, είναι κυκλωμένες οι κοινές περιοχές, στις οποίες παρουσιάζονται αρμονικές και από τα δύο όργανα.

## 2.2 Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ESPI

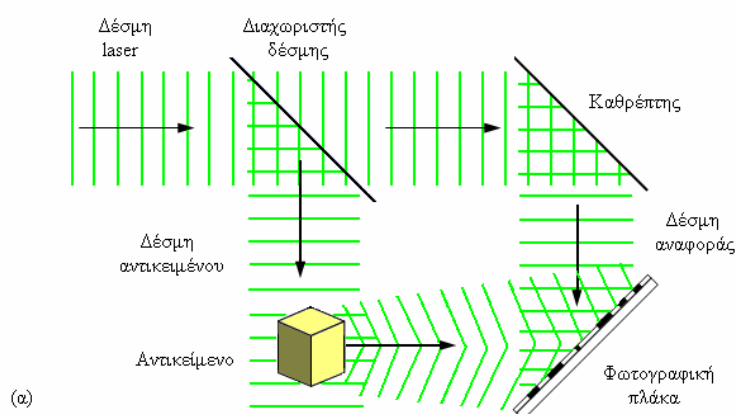
Μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές, στην οποία θα εστιάσουμε στην παρούσα εργασία, είναι η τεχνική της χρονικά ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφιδών (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI), η οποία είναι μια τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας. Αυτή η διάταξη ESPI συνίσταται στην καταγραφή δύο δεσμών λέιζερ από μια CCD κάμερα, από τις οποίες η μια προέρχεται από ανάκλαση στο υπό εξέταση δονούμενο αντικείμενο (δέσμη αντικειμένου) και η άλλη είναι αδιατάρακτο μέρος της αρχικής δέσμης λέιζερ που οδηγείται απ' ευθείας στην CCD κάμερα (δέσμη αναφοράς). Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η χρήση ενός laser με αρκετά ικανοποιητικό μήκος συμφωνίας, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στη διαδικασία αφαίρεσης διαδοχικών εικόνων που καταγράφονται καθώς το αντικείμενο δονείται [33].

## 2.2.1 ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

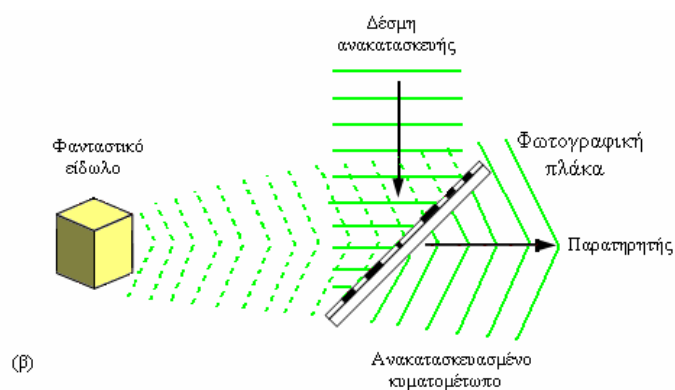
Η τεχνική που παρέχει τη δυνατότητα λήψης φωτογραφιών τριών διαστάσεων καλείται ολογραφία. Ο όρος ετυμολογικά προέρχεται από το επίθετο «όλος» και το ουσιαστικό «γραφή» και επινοήθηκε από τον Dennis Gabor, το 1948.

Παρόλο που αρχικά η ολογραφία βρήκε εφαρμογή κατά κύριο λόγο σε ηλεκτρονικά μικροσκόπια, η εποχή του laser έφερε στο προσκήνιο κάποιες άλλες αξιοσημείωτες λειτουργικές της δυνατότητες.

Η τεχνική της ολογραφίας επιτρέπει την καταγραφή τόσο της φωτεινής έντασης όσο και της φάσης του αντικειμένου που τοποθετούμε προς φωτογράφιση. Η απλή φωτογραφία συνιστά απλή χαρτογράφηση της φωτεινής έντασης των αντικειμένων δίχως να καταγράφονται οι βασικότερες πληροφορίες του πλάτους και της φάσης του ηλεκτρικού πεδίου. Τούτη όμως η τεχνική λύνει αυτό το πρόβλημα επιτρέποντας τη φωτογράφιση του αντικειμένου προς αναπαραγωγή σε τρεις διαστάσεις, όπως περιγράφουν τα παρακάτω σχήματα:



Σχ. 2α



Σχ. 2β

Για να εξηγηθεί καλύτερα αυτό, ας θεωρήσουμε μια πρότυπη διάταξη ολογραφίας που δίνεται στις παραπάνω εικόνες. Μια δέσμη σύμφωνης ακτινοβολίας (laser) χωρίζεται σε δυο μέρη μέσω ενός διαχωριστή δέσμης. Το ένα μέρος (δέσμη αναφοράς) οδηγείται απ' ευθείας πάνω στο καταγραφικό (π.χ. μια φωτογραφική πλάκα), ενώ το άλλο μέρος (δέσμη αντικειμένου) φωτίζει το αντικείμενο που είναι προς ολογράφηση (Σχ. 2α) [33].

Το σκεδαζόμενο από το αντικείμενο φως προσπίπτει επάνω στην φωτογραφική πλάκα και οι δυο δέσμες δημιουργούν ένα διάγραμμα συμβολής που αποτελείται από κροσσούς συμβολής. Οι κροσσοί ακολούθως περιέχουν ένα πλήρες «αρχείο» του αρχικού αντικειμένου που αντιστοιχεί στις διαφορές φάσης της δέσμης του αντικειμένου με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η πλήρης καταγραφή των πληροφοριών που φέρει [33].

Η τρισδιάστατη όψη του αντικειμένου είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα της ανακατασκευής του αρχικού αντικειμένου. Όταν η φωτογραφική πλάκα φωτιστεί με μια δέσμη ανακατασκευής πανομοιότυπη με τη δέσμη αναφοράς, τότε το αρχικό αντικείμενο ανακατασκευάζεται πλήρως και ως προς την ένταση και ως προς τη φάση εξαιτίας της περίθλασης της δέσμης ανακατασκευής από το καταγεγραμμένο στην φωτογραφική πλάκα διάγραμμα συμβολής. Αυτό φυσικά συμβαίνει στις περιπτώσεις εκείνες όπου η φωτογραφική πλάκα βρίσκεται στη θέση που καταλάμβανε αρχικά ενώ το αντικείμενο που τίθεται προς ολογράφηση αλλάζει θέση (Σχ. 2β). Σε αυτές τις περιπτώσεις και με την απαραίτητη προϋπόθεση αλλαγής του σημείου παρατήρησης, ο παρατηρητής βλέπει το αντικείμενο να περιστρέφεται μπροστά του σαν να ήταν ακόμη εκεί [33].

## 2.2.2 Μήκος Συμφωνίας [2,3]

Το μήκος συμφωνίας μπορεί να οριστεί εάν για κάθε ηλεκτρομαγνητικό (H/M) κύμα εισαγάγουμε τις έννοιες της χωρικής και χρονικής συμφωνίας. Για τον ορισμό της χωρικής συμφωνίας, ας θεωρήσουμε δύο σημεία Σ1 και Σ2 τα οποία, για χρόνο  $t = 0$ , βρίσκονται πάνω στο ίδιο μέτωπο του H/M κύματος και έστω ότι τα αντίστοιχα ηλεκτρικά πεδία για τα σημεία αυτά είναι  $E_1(t)$  και  $E_2(t)$ . Εξ ορισμού, η διαφορά μεταξύ των φάσεων των δύο πεδίων στο χρόνο  $t=0$ , είναι μηδέν. Εάν αυτή η διαφορά παραμείνει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή  $t>0$ , τότε λέμε ότι υπάρχει τέλεια συμφωνία μεταξύ των δύο σημείων.

Εάν αυτό συμβεί για κάθε δύο σημεία του μετώπου του H/M κύματος, τότε λέμε ότι το κύμα έχει ιδανική χωρική συμφωνία. Στην πράξη, για κάθε σημείο Σ1, το σημείο Σ2 πρέπει να βρίσκεται μέσα σε μια πεπερασμένη γύρω από το Σ1 περιοχή, εάν θέλουμε να έχουμε καλό φασικό συσχετισμό.

Σε αυτή την περίπτωση λέμε ότι το κύμα έχει μερική χωρική συμφωνία και, για κάθε σημείο Σ, μπορούμε να εισαγάγουμε μια κατάλληλα ορισμένη περιοχή συμφωνίας. Συνεπώς, το μήκος συμφωνίας είναι η απόσταση διάδοσης του κύματος μέσα στην οποία το κύμα διατηρεί ατσαλάκωτα χαρακτηριστικά.

Για να ορίσουμε τώρα την χρονική συμφωνία ως θεωρήσουμε το ηλεκτρικό πεδίο του H/M κύματος σε δεδομένο σημείο Σ για χρόνους t και t + τ. Εάν, για δεδομένη χρονική υστέρηση τ, η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τιμών του πεδίου παραμένει η ίδια για κάθε χρονική στιγμή t, τότε λέμε ότι υπάρχει χρονική συμφωνία για ένα χρονικό διάστημα τ. Εάν αυτό συμβεί για κάθε τιμή του τ, τότε λέμε ότι το H/M κύμα έχει τέλεια χρονική συμφωνία. Εάν αυτό συμβεί για κάθε χρονική υστέρηση τ, τέτοια ώστε  $0 < \tau < \tau_0$ , τότε λέμε ότι το κύμα έχει μερική χρονική συμφωνία, με χρόνο συμφωνίας ίσο με  $\tau_0$ .

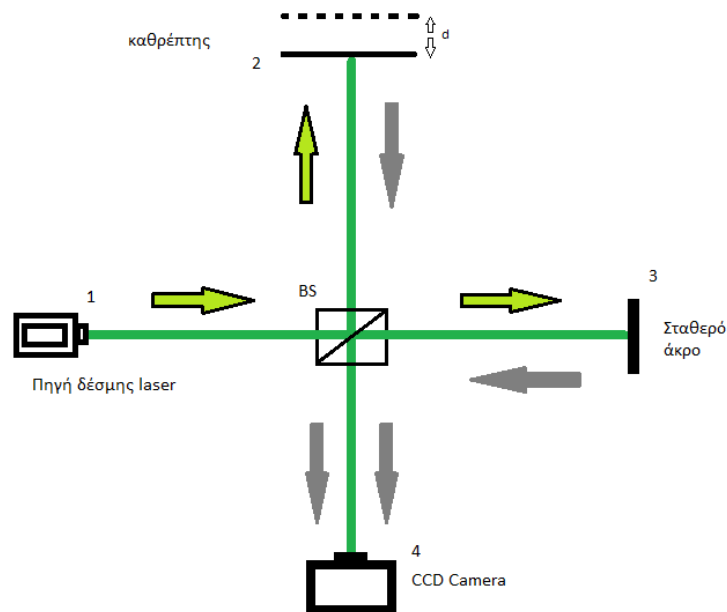
Η έννοια της χρονικής συμφωνίας συνδέεται άμεσα με την μονοχρωματικότητα της πηγής laser. Συγκεκριμένα, ένα H/M κύμα με χρόνο συμφωνίας  $\tau_0$  έχει εύρος ζώνης  $\Delta\nu \cong 1/\tau_0$ .

Το μήκος συμφωνίας είναι μια έννοια καθοριστικής σημασίας για το φαινόμενο της συμβολής, διότι μπορούμε να έχουμε συμβολή μόνο μέσα στο μήκος συμφωνίας της πηγής και όχι πέρα από αυτό. Συνήθως το μήκος συμφωνίας ορίζεται ως η διαφορά δρόμου μιας δέσμης laser που συμβάλλει με τον εαυτό της (π.χ. σε ένα συμβολόμετρο Michelson, βλ. Σχ.2), η οποία αντιστοιχεί σε μείωση της ορατότητας των κροσσών συμβολής (fringe visibility) κατά 50%, όπου η ορατότητα των κροσσών, V, ορίζεται ως:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad 2.18$$

Όπου  $I_{max}$  και  $I_{min}$  η μέγιστη και η ελάχιστη ένταση των κροσσών αντίστοιχα.

### 2.2.3 Συμβολομετρία



Σχ. 3: τυπική διάταξη συμβολόμετρου Michelson: BS διαχωριστής δέσμης, σημείο 2 καθρέπτης, σημείο 3 σταθερό άκρο/καθρέπτης και σημείο 4 κάμερα καταγραφής.

Η δέσμη έρχεται από το σημείο 1 μπαίνει στο διαχωριστή δέσμης (BS) και ένα μέρος της δέσμης συνεχίζει ευθεία στο σημείο 3 και το άλλο μέρος ανακλάτε προς τα πάνω στο σημείο 2. Όταν η δέσμη φτάσει στο σημείο 3 ανακλάται και γυρίζει προς τον διαχωριστή δέσμης όπου ένα μέρος συνεχίζει ευθεία (το οποίο δεν μας απασχολεί) και το άλλο καταλήγει στην κάμερα καταγραφής (CCD) στο σημείο 4. Το μέρος της δέσμης που έχει πάει στο σημείο 2 ανακλάται και γυρίζει στον διαχωριστή δέσμης όπου καταλήγει επίσης στην κάμερα καταγραφής (CCD) στο σημείο 4 [2,3].

Ανάλογα με τη διαφορά οπτικού δρόμου,  $\delta = nd$ , (όπου  $n$  ο δείκτης διάθλασης και  $d$  η διαφορά δρόμου), που σχετίζεται με τη διαφορά φάσης,  $\varphi$ , των δύο δεσμών στο σημείο της συμβολής, αποτυπώνεται είτε φωτεινός κροσσός είτε σκοτεινός κροσσός, όταν οι δύο δέσμες είναι απόλυτα συγγραμικές.

Συγκεκριμένα, όταν η διαφορά οπτικού δρόμου / διαφορά φάσης είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος ή μηδέν τότε στο σημείο 4 δημιουργείται ενισχυτική συμβολή και δημιουργείται φωτεινός κροσσός, δηλαδή όταν [2,3]:

$$\delta = nd = m\lambda \quad 2.19$$

Όπου  $m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$



Αντίστοιχα, αν η διαφορά δρόμου είναι περιττό πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος,  $\lambda/2$ , τότε τα δύο κύματα έχουν διαφορά φάσης  $180^\circ$  και έχουμε στο σημείο 4 καταστρεπτική συμβολή, δηλαδή όταν [2,3]:

$$\delta = nd = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad 2.20$$

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η διαφορά φάσης των κυμάτων  $\varphi$  στο σημείο 4 εξαρτάται από τη διαφορά οπτικού δρόμου,  $\delta$ . Αφού διαφορά οπτικού δρόμου ίση με  $\lambda$  αντιστοιχεί σε διαφορά φάσης  $2\pi$  (ενισχυτική συμβολή) και διαφορά οπτικού δρόμου ίση με  $\lambda/2$  αντιστοιχεί σε διαφορά φάσης  $\pi$  (καταστρεπτική συμβολή), θα ισχύει [2,3]:

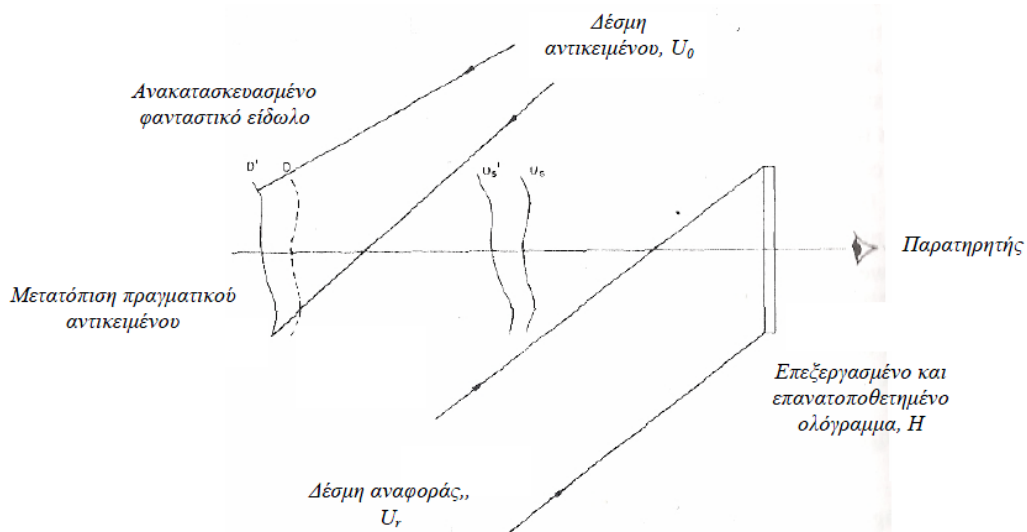
$$\frac{\delta}{\varphi} = \frac{\lambda}{2\pi} \Leftrightarrow \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd \quad 2.21$$

### 2.2.4 Ολογραφική Συμβολομετρία:

Η εφαρμογή της ολογραφίας, δημιούργησε τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη κάποιων σημαντικών τεχνικών, όσον αφορά τη μελέτη των αλλαγών στην επιφάνεια των αντικειμένων. Από τις πιο σημαντικές τεχνικές είναι η ολογραφική συμβολομετρία. Η τεχνική αυτή καθιστά επιτυχή την συμβολομετρική ανάλυση των στατικών και δυναμικών αλλαγών μιας οπτικά ανώμαλης επιφάνειας.

Αυτό σημαίνει ότι αναιρείται η βασική αδυναμία της κλασικής συμβολομετρίας σύμφωνα με την οποία η υπό μελέτη επιφάνεια πρέπει να είναι οπτικά ομαλή.

Ας δούμε ποιοτικά πως η ολογραφική καταγραφή μίας σκεδάζουσας επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της κίνησής της (Σχ. 3), όπου απεικονίζεται διαγραμματικά η λεγόμενη τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας απλής έκθεσης (ή πραγματικού χρόνου) [2,3].



Σχ. 4: Απεικόνιση τεχνικής της ολογραφικής συμβολομετρίας απλής έκθεσης.

Το επεξεργασμένο ολόγραμμα, σύμφωνα με τις προηγούμενες αναφορές, επιτρέπει την ανακατασκευή ενός φανταστικού ειδώλου του αρχικού αντικειμένου. Αν το αντικείμενο υποστεί μια μικρή στατική μετατόπιση, ικανή να δημιουργήσει μια μικρή διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυματομετώπων, τότε παρατηρούνται κροσσοί συμβολής [2,3].

Στη διάταξη του σχήματος 3, το αντικείμενο βρίσκεται στην αρχική του θέση καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και καταγράφεται ένα ολόγραμμα,  $H$ . Στη συνέχεια το ολόγραμμα επεξεργάζεται και επανατοποθετείται στην αρχική του θέση, έτσι ώστε το φανταστικό είδωλο,  $D$ , να επικαλύπτεται ακριβώς με το αντικείμενο. Η δέσμη αναφοράς είναι  $U_r$  και το μετατοπισμένο αντικείμενο,  $D'$ , φωτίζεται με την αρχική δέσμη αντικειμένου,  $U_0$ . Τα κυματομέτωπα  $U_S$  και  $U'_S$  είναι το κυματομέτωπο του ανακατασκευασμένου φανταστικού ειδώλου και το σκεδασμένο κυματομέτωπο από το μετατοπισμένο αντικείμενο, αντίστοιχα [2,3].

Αυτά τα δύο κυματομέτωπα συμβάλλουν για να δώσουν κροσσούς συμβολής, η μορφή των οποίων εξαρτάται από τη γεωμετρία της μετατόπισης και τη θέση παρατήρησης [2,3].

Μια άλλη παραλλαγή είναι η τεχνική της διπλής έκθεσης, όπου αρχικά καταγράφεται ολόγραμμα του αρχικού αντικειμένου, και στη συνέχεια και πριν την επεξεργασία του ολογράμματος, το ολόγραμμα εκτίθεται στο φως από το μετατοπισμένο αντικείμενο. Το αποτέλεσμα είναι δύο επικαλυπτόμενα ανακατασκευασμένα κύματα, τα οποία δίνουν κροσσούς συμβολής, χαρακτηριστικούς της μετατόπισης του αντικειμένου (δηλαδή της διαφοράς στον οπτικό δρόμο) [2,3].

Μια τρίτη παραλλαγή, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη γρήγορα ταλαντούμενων αντικειμένων με μικρό πλάτος ταλάντωσης, είναι η χρονικά ολοκληρωμένη μέθοδος. Στην τεχνική αυτή η φωτογραφική πλάκα εκτίθεται στο φως για σχετικά μεγάλο χρόνο, κατά τον οποίο το δονούμενο αντικείμενο έχει εκτελέσει έναν αριθμό ταλαντώσεων. Το ολόγραμμα που προκύπτει μπορεί να θεωρηθεί ως η υπέρθεση πολλαπλών εικόνων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός σχήματος στάσιμου κύματος [2,3].

### 2.2.5 Τρόπος λειτουργίας της ESPI

Στην κατηγορία των μη-καταστρεπτικών ολογραφικών συμβολομετρικών οπτικών τεχνικών ανήκει και η ονομαζόμενη συμβολομετρία ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry - ESPI). Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται όταν ένα από τα συμβάλλοντα πεδία είναι ένα πεδίο ψηφίδων, το οποίο προκύπτει από την ανάκλαση φωτός από μια οπτικά ανώμαλη επιφάνεια. Το όνομα «ψηφίδα» χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διάστικτη, κοκκώδη και τυχαία φύση της κατανομής έντασης του ανακλώμενου φωτός, όπως αυτή παρατηρείται σε κάποια απόσταση από το αντικείμενο. Ιστορικά, η τεχνική ESPI χρονολογείται από το 1971, ένα χρόνο αργότερα από την εισαγωγή της ιδέας της συμβολής δύο σύμφωνων πεδίων τυχαίας φάσης πριν και μετά την παραμόρφωση ενός αντικειμένου.

Σύντομα ακολούθησε σημαντική ερευνητική εργασία τόσο σε θεωρητικό όσο σε πειραματικό επίπεδο, με την τεχνική να γνωρίζει ιδιαίτερη άνθιση μετά την εισαγωγή της πειραματικής τεχνικής της ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης (phase shifting) και της ψηφιακής καταγραφής και ανάλυσης κροσσών με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σήμερα η τεχνική ESPI έχει πλέον καθιερωθεί ως μια από τις πλέον σημαντικές συμβολομετρικές τεχνικές για τη μελέτη δονήσεων ή παραμορφώσεων αντικειμένων [33].

Η τεχνική ESPI είναι στενά συνδεδεμένη με την ολογραφική συμβολομετρία. Ενώ και οι δύο τεχνικές παρέχουν την ίδια ευαισθησία, η τεχνική ESPI δεν απαιτεί την καταγραφή ολογράμματος, οπότε απλουστεύεται η πειραματική διαδικασία. Η χρήση κάμερας, ως ψηφιακό πλέον καταγραφικό, στην τεχνική ESPI δίνει το πλεονέκτημα της καταγραφής και ταυτόχρονης απεικόνισης των κροσσών σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη μεριά, οι κροσσοί που καταγράφονται με την ESPI είναι σε γενικές γραμμές λιγότερο ευκρινείς σε σχέση με την ολογραφική συμβολομετρία.

Σε γενικές γραμμές, η βασική διάταξη ESPI περιλαμβάνει την καταγραφή δύο δεσμών laser από μια CCD κάμερα, από τις οποίες η μια προέρχεται από ανάκλαση στην υπό εξέταση δονούμενη επιφάνεια (δέσμη αντικειμένου) και η άλλη είναι αδιατάρακτο κομμάτι της αρχικής δέσμης laser που οδηγείται απευθείας στην CCD κάμερα (δέσμη αναφοράς). Η τεχνική βασίζεται στην διαδικασία αφαίρεσης ή πρόσθεσης διαδοχικών εικόνων που καταγράφονται καθώς το αντικείμενο μετατοπίζεται. Για την μελέτη περιοδικών, αρμονικών παραμορφώσεων χρησιμοποιείται πιο συχνά η χρονικά ολοκληρωμένη ESPI, όπου τα δεδομένα λαμβάνονται υπό μορφή τηλεοπτικών καρτέ με μεγάλους χρόνους έκθεσης σε σχέση με την περίοδο της κίνησης.

## 2.2.6 Μαθηματική Θεώρηση – Πειραματική υλοποίηση

Η τεχνική ESPI και οι εφαρμογές της για τη μελέτη δονούμενων αντικειμένων έχουν παρουσιαστεί λεπτομερώς σε πολλά αξιόλογα άρθρα αναφοράς και βιβλία. Εδώ θα περιγραφούν οι βασικές μαθηματικές αρχές που αφορούν αρμονικά ταλαντούμενα σώματα με τη συγκεκριμένη χρονικά ολοκληρωμένη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή αυτή της αφαίρεσης διαδοχικών εικόνων.

Θεωρούμε μια εγκάρσια αρμονικά δονούμενη επιφάνεια και ότι η απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας  $w$  σε κάθε σημείο της επιφάνειας  $(x, y)$  για κάθε χρονική στιγμή,  $t$ , είναι της μορφής:

$$w(x, y, t) = A(x, y)\cos[\omega t + \varphi_0(x, y)] \quad 2.22$$

όπου  $A(x, y)$  είναι η κατανομή του πλάτους ταλάντωσης πάνω στην επιφάνεια,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης και  $\varphi_0(x, y)$  η κατανομή της φάσης δόνησης πάνω στην επιφάνεια.

Η κατανομή φωτεινής έντασης που ανιχνεύει η κάμερα μέσα στο χρόνο έκθεσης  $\tau$  είναι:

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} * \cos \left[ \phi + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta) A \cos(\omega t + \phi_0) \right] \right\} dt \quad 2.23$$

όπου  $I_A$  και  $I_B$  είναι οι κατανομές έντασης των δεσμών αντικειμένου και αναφοράς αντίστοιχα,  $\phi$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο παραπάνω δεσμών,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της πηγής λέιζερ, και  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης φωτισμού του αντικειμένου και της διεύθυνσης παρατήρησης.

Στην περίπτωση μας  $\theta \cong 0^\circ$ . Θέτοντας  $\Gamma = \frac{4\pi}{\lambda}$  και  $\tau = \frac{2m\pi}{\omega}$ , όπου  $m$  είναι ακέραιος, και ολοκληρώνοντας την εξίσωση προκύπτει ότι:

$$I_1 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} |(\cos\phi) J_0(A\Gamma)| \quad 2.24$$

Όπου  $J_0$  είναι η συνάρτηση **Bessel** μηδενικής τάξης πρώτου είδους. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της χρονικής ολοκλήρωσης, στην παραπάνω εξίσωση έχει εξαλειφθεί η φάση της δόνησης,  $\phi_0$ .

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

$$I_2 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} |(\cos\phi) \left[ 1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(A\Gamma)| \quad 2.25$$

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

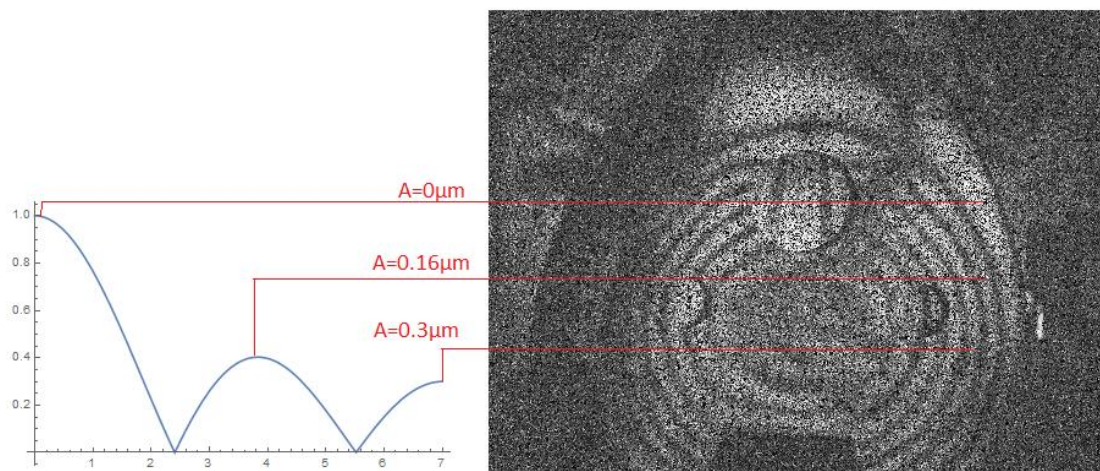
$$I = I_1 + I_2 = \frac{\sqrt{I_A I_B}}{2} |(\cos\phi) \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(A\Gamma)| \quad 2.26$$

Από την εξίσωση 2.26 είναι προφανές ότι το χρονικά ολοκληρωμένο συμβολόγραμμα,  $I$ , είναι διαμορφωμένο από τη συνάρτηση Bessel  $|J_0(A\Gamma)|$ .

Οι εναλλασσόμενοι φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί είναι ουσιαστικά ισοϋψείς καμπύλες ίδιου πλάτους ταλάντωσης. Οι φωτεινοί κροσσοί αντιστοιχούν στα μέγιστα της  $|J_0(A\Gamma)|$ , με τον φωτεινότερο κροσσό να αντιστοιχεί σε δεσμό ( $A=0$ ) και τον σκοτεινότερο κροσσό να αντιστοιχεί σε μέγιστο πλάτος  $A_{\max}$ .

Οι υπόλοιποι φωτεινοί κροσσοί, διαδοχικά μειωμένης φωτεινότητας, αντιστοιχούν σε τιμές πλάτους ταλάντωσης 0.16 $\mu$ m, 0.3 $\mu$ m κλπ. Στην εικόνα 10 απεικονίζεται η αντιστοιχία αυτή για την περίπτωση συμβολογράμματος ESPI για το ούτι, όπου φαίνονται οι υπολογισμένες τιμές πλάτους ταλάντωσης ( $\lambda=532$ nm).

Από τα παραπάνω διαφαίνεται το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής ESPI, που είναι ο περιορισμός στη διακριτική ικανότητα που επιβάλλει το γεγονός ότι δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια μετατόπισης, που αντιστοιχεί σε λιγότερο από ένα κροσσό. Επιπλέον, λόγω της διαμόρφωσης του συμβολογράμματος με τη συνάρτηση Bessel, δεν μπορούν να μετρηθούν πολύ μεγάλες μετατοπίσεις, αφού σε τέτοια περίπτωση η χωρική πυκνότητα των κροσσών θα είναι τόσο μεγάλη ώστε να καθίστανται πλέον μη ορατοί.



**Εικόνα 10: Αντιστοιχία μεγίστων συνάρτησης Bessel  $|J_0(A\Gamma)|$  και κατανομής πλάτους ταλάντωσης μετρημένης με την τεχνική ESPI (παρόν μουσικό όργανο, ως παράδειγμα, το ούτι).**

Πρακτικά, τώρα, στο πείραμα αυτό που συμβαίνει, είναι το εξής:

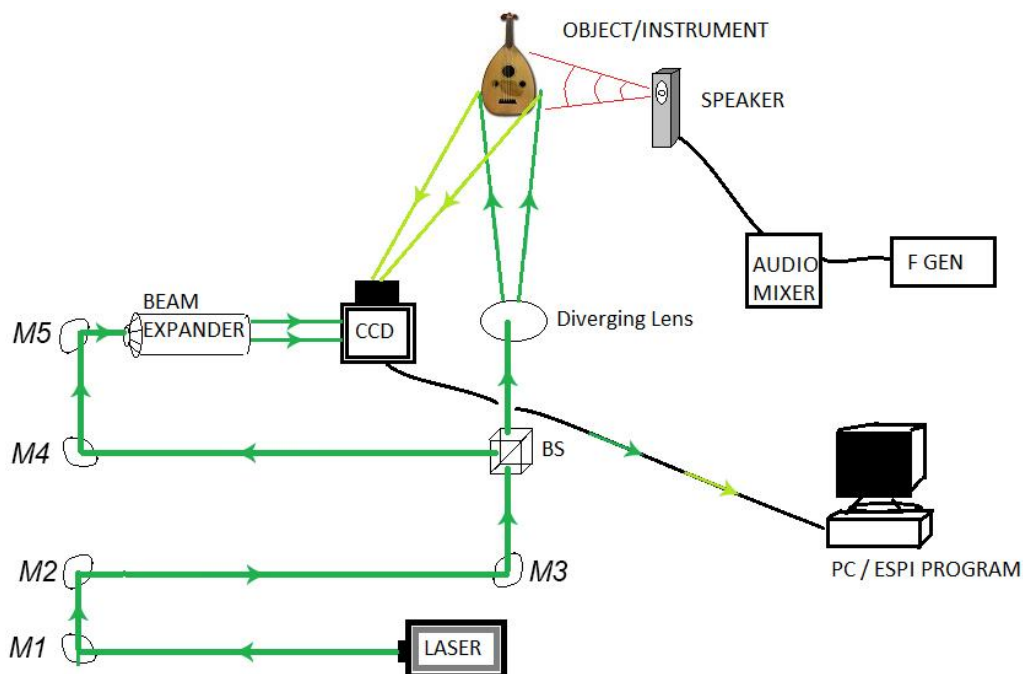
Καταρχήν, σύμφωνα και με την παρακάτω διάταξη (Σχήμα 5), το (δέσμης) πράσινου χρώματος laser της εταιρείας Cobolt Samba<sup>TM</sup>, συνεχούς μήκους κύματος και πολύ καλής μονοχρωματικότητας (με μήκος συμφωνίας 532nm) κατευθύνεται με την καθοδήγηση φακών / καθρεπτών προς ένα διασπαστή δέσμης. Από τον τελευταίο, η δέσμη διασπάται (καθότι το λέει και η ονομασία του κρυστάλλου) σε δύο. Η μία οδηγείται κατευθείαν προς το υπό μελέτη μουσικό όργανο / αντικείμενο (δέσμη αντικειμένου) και από εκεί αντανακλάται σε μία ειδική, καταγραφική (CCD) κάμερα. Η δεύτερη μέσω ενός παραλληλοποιητή δέσμης κατευθύνεται απευθείας στην κάμερα CCD (δέσμη αναφοράς).

Για τη διέγερση των οργάνων, χρησιμοποιήθηκε, online γεννήτρια συχνοτήτων (χρησιμοποιήθηκε φορητός υπολογιστής για αυτό), από την οποία το σήμα οδηγείται σε μία κονσόλα μίξης, «XENYX-1002» της εταιρείας Behringer. Τέλος, το σήμα οδηγείται σε ένα ηχείο «8030A» της εταιρείας GENELEC κι από εκεί, ως ήχος πλέον, απευθείας στο υπό μελέτη μουσικό όργανο. Η κάμερα είναι συνδεδεμένη με έναν υπολογιστή, ο οποίος κατέχει κάποιο ειδικό πρόγραμμα το οποίο δέχεται το υλικό (σήμα) από την πρώτη και επεξεργάζεται τα δεδομένα. Αυτό που συμβαίνει, ουσιαστικά, είναι η χρονική συσχέτιση των δύο σημάτων (της δέσμης αναφοράς και της ανακλώμενης από τη δέσμη αντικειμένου).

Η εικόνα καταγράφεται στο πρόγραμμα, συνεχώς, καθώς αλλάζει η συχνότητα της διέγερσης. Σε κάθε συχνότητα καταγράφονται αρκετές εικόνες με κυμαινόμενους χρόνους του κλείστρου, ανάλογα με τον τρόπο που εμφανίζονται οι συντονισμοί. Όταν η συχνότητα διέγερσης από το ηχείο πλησιάζει στην συχνότητα του εκάστοτε συντονισμού το όργανο αρχίζει να δονείται με σταδιακά αυξανόμενο πλάτος και εμφανίζονται κροσσοί, με τον αριθμό τους να μεγιστοποιείται ακριβώς στη συχνότητα συντονισμού όπου υπάρχει και το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης της δονούμενης επιφάνειας. Με αυτό τον τρόπο εντοπίστηκαν και οι συχνότητες συντονισμού αλλά και η κατανομή των τρόπων ταλάντωσης των ελεύθερων καπακιών και των οργάνων της μελέτης.



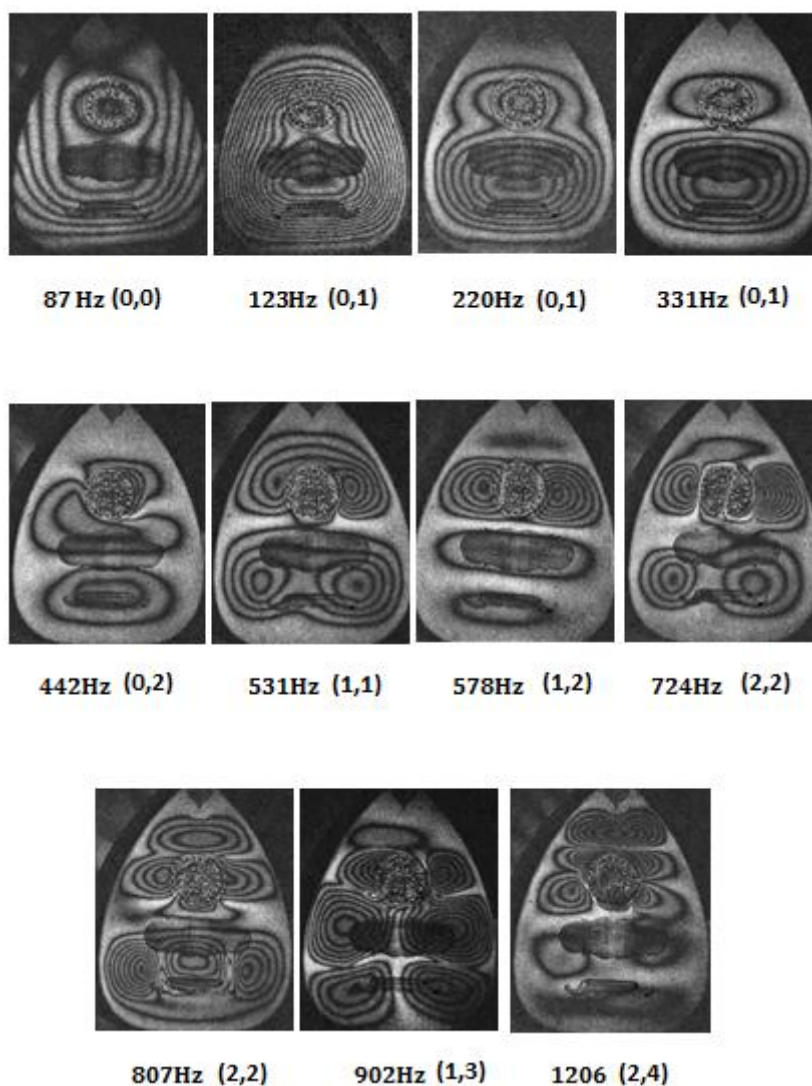
Εικόνα 11: Τα ακριβή μοντέλα οργάνων, που χρησιμοποιήθηκαν για την διέγερση των υπό μελέτη μουσικών οργάνων



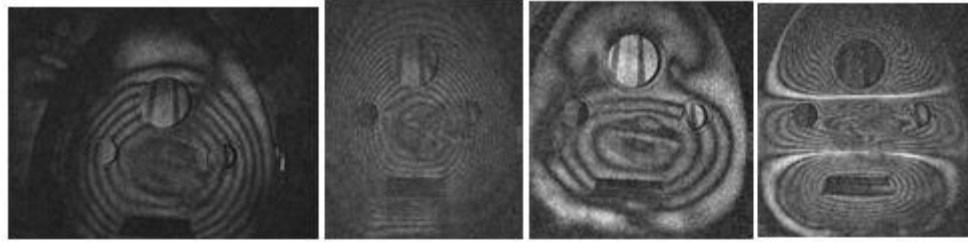
Σχ. 5: Διάταξη της ESPI και του συστήματος διέγερσης των υπό μελέτη μουσικών οργάνων

## 2.2.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ESPI

Αφού, λοιπόν, έχουμε πραγματοποιήσει τη διαδικασία λήψης εικόνων για τους κανονικούς τρόπους δόνησης των δύο υπό μελέτη μουσικών οργάνων, μέσω της χρονικά ολοκληρωμένης τεχνικής ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI), έχει έρθει η στιγμή να συλλεχθούν και φυσικά να προβληθούν τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας.



Εικόνα 12: Αποτελέσματα των βασικών τρόπων δόνησης του μουσικού οργάνου, λάφτα (πολίτικο λαούτο)

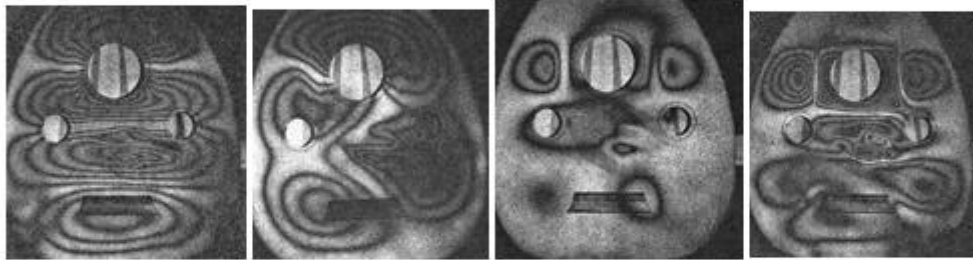


75Hz (0,0)

111Hz (0,0)

281Hz (0,1)

405Hz (0,2)



460Hz (0,3)

523Hz (1,2)

705Hz (2,2)

785Hz (2,3)



872Hz (2,3)



944Hz (3,3)



1208Hz (4,4)

Εικόνα 13: Αποτελέσματα των βασικών τρόπων δόνησης του μουσικού οργάνου, ούτι



### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πολιτικό λαούτο και το ούτι είναι δύο σολιστικά όργανα με παρόμοια μορφολογικά χαρακτηριστικά. Παρ' όλα αυτά τα ηχοχρώματά τους είναι διαφορετικά. Η εργασία αυτή αποσκοπούσε στο να συμβάλλει στην αποτύπωση αυτής της διαφοράς με επιστημονικές μεθόδους και μετρήσεις. Μελετήθηκαν και τα δύο αυτά όργανα με τις ίδιες τεχνικές, ώστε να καταγραφεί και να αναλυθεί ο εκπεμπόμενος από τα όργανα ήχος αλλά και να καταγραφούν τα δονητικά τους χαρακτηριστικά, συγκεκριμένα οι κανονικοί τρόποι δόνησης του οργάνου, με την μέθοδο ESPI.

Όσον αφορά τον εκπεμπόμενο από τα όργανα ήχο, παρατηρήθηκε ότι τα όργανα εμφανίζουν μεγάλο μέρος κοινών, συχνοτικά, αρμονικών (π.χ. βλ. Εικόνα 9). Επιπρόσθετα, γι αυτές τις κοινές συχνότητες εκπομπής ήχου, παρατηρείται ότι μέχρι την συχνότητα των  $\sim 700\text{Hz}$  οι αρμονικές από το ούτι είναι μεγαλύτερου πλάτους, ενώ για υψηλότερες συχνότητες ( $700\text{Hz} - 1300\text{Hz}$ ) οι αρμονικές από το πολιτικό λαούτο έχουν μεγαλύτερο πλάτος, μ' εξαίρεση τη συχνότητα των  $1035\text{Hz}$ . Αυτό το γεγονός μπορεί να αποδοθεί, σε μεγάλο βαθμό, στις μεγαλύτερες διαστάσεις και μεγαλύτερο όγκο σκάφους που έχει το ούτι. Σημαντική για τον ήχο και το ηχοχρώμα του οργάνου θεωρείται η απουσία κάποιων χαρακτηριστικών υψηλότερων συχνοτήτων για το πολιτικό λαούτο που όμως εμφανίζονται στο ούτι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η απουσία της αρμονικής των  $\sim 1180\text{Hz}$  από το φάσμα του πολιτικού λαούτου, η οποία εμφανίζεται αρκετά ισχυρή στο ούτι. Αυτό ίσως να είναι και κάτι αναμενόμενο, δεδομένου ότι το πολιτικό λαούτο που μελετήθηκε είναι μεγαλύτερο, σε διαστάσεις, όργανο από το ούτι που μελετήθηκε. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί και η μεγάλη διαφορά στις οπές, όπου το ούτι έχει τρεις ανοιχτές οπές, ενώ το πολιτικό λαούτο έχει μία (λίγο μεγαλύτερη σε διάμετρο από τη μεγάλη στο ούτι) και με ροζέτα (δηλαδή κλειστή κατά μεγάλο ποσοστό).

Με την τεχνική ESPI καταγράφηκαν οι κανονικοί τρόποι δόνησης και για τα δύο όργανα μέχρι και τη συχνότητα  $\sim 1250\text{Hz}$ . Αυτοί είναι στενά συνδεδεμένοι με τον εκπεμπόμενο από το όργανο ήχο, και κατά συνέπεια με την ηχητική του συμπεριφορά [34]. Πολλοί από αυτούς τους τρόπους μπορούν συχνοτικά να ταυτιστούν με τις εμφανιζόμενες κορυφές (αρμονικές) του καταγεγραμμένου από τα όργανα ήχου (βλ. Εικόνα 9). Η ταύτιση αυτή είναι πολύ πιο ικανοποιητική για το πολιτικό λαούτο, ιδιαίτερα στις χαμηλότερες συχνότητες. Και για τα δύο όργανα παρατηρήθηκαν κανονικοί τρόποι δόνησης ίδιας μορφής να εμφανίζονται σε δύο διαφορετικές συχνότητες: για παράδειγμα, για το πολιτικό λαούτο ο τρόπος δόνησης (0,0) εμφανίζεται τόσο σε συχνότητα  $87\text{Hz}$  όσο και σε συχνότητα  $123\text{Hz}$ , ενώ για το ούτι ο ίδιος τρόπος δόνησης εμφανίζεται σε συχνότητες  $75\text{Hz}$  και  $111\text{Hz}$ . Αυτό αποδίδεται στο ότι μπορεί αυτοί οι ίδιοι «εμφανισιακά» κανονικοί τρόποι δόνησης να έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους.

Επίσης συγκρίθηκαν συχνοτικά οι παρατηρούμενοι κοινοί κανονικοί τρόποι δόνησης για τα δύο όργανα (πίνακας 2). Παρατηρείται ότι οι συχνότητες που εμφανίζονται αυτοί οι κοινοί τρόποι δόνησης είναι πάντα χαμηλότερες για το ούτι, με τη διαφορά μεταξύ τους, εν γένει, να μικραίνει όσο υψηλότερη συχνότητα έχουν οι συντονισμοί αυτοί.

Τρόπος δόνησης	Συχνότητα - πολίτικο λαούτο (Hz)	Συχνότητα - ούτι (Hz)	% διαφορά
(0,0)	87	75	14
(0,0) <sub>2</sub>	-	111	-
(0,1)	123	-	-
(0,1) <sub>2</sub>	220	-	-
(0,1) <sub>3</sub>	331	281	15
(0,2)	442	405	8
(1,2)	578	523	10
(2,2)	724	705	3

**Πίνακας 2: Κοινοί τρόποι δόνησης των υπό μελέτη μουσικών οργάνων και συχνοτική τους διαφορά.**

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και κάποιες άλλες συχνότητες στις οποίες παρατηρούνται τρόποι δόνησης που είναι μοναδικοί για το κάθε όργανο (όπως φαίνεται και στις εικόνες 12 και 13). Οι παραπάνω παρατηρήσεις για τους εμφανιζόμενους κανονικούς τρόπους δόνησης σε κάθε όργανο, και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της σύγκρισης της ηχητικής τους εκπομπής, συνάδουν με το γεγονός ότι αυτά τα παρόμοια μορφολογικά όργανα έχουν διαφορετικό ηχόχρωμα.

Τέλος, αξίζει να σχολιαστεί η διαφορά του όγκου του κάθε οργάνου, καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογος της συχνότητας Helmholtz. Δηλαδή όσο μικρότερος είναι ο όγκος τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η συχνότητα συντονισμού του οργάνου. Και όπως έχουμε δει στο κεφάλαιο 1.2 το ούτι έχει κατά πολύ, μεγαλύτερο όγκο από αυτόν του πολίτικου λαούτου (17.5lit το ούτι / 12lit το πολίτικο λαούτο).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] MSc Thesis Chartofylakas, «Ακουστική και ηχητική ανάλυση των οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού», ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ «Τέχνες και τεχνολογίες του ήχου κατεύθυνση: Ηλεκτρονική Μουσική Τεχνολογία», Κέρκυρα, - Δεκέμβρης 2009

[2] Βασίλειος Βάθης, «Ανακατασκευή, ακουστική μελέτη και εκτέλεση αρχαίας Ελληνικής λύρας (Χέλυσ)», Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, Οκτώβριος 2011

[3] ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΤΣΑΣ, «ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΕΣΡΙ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΝΟΝΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ», ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ, Ρέθυμνο, 2009

[4] Κουκουρίγκος, Ι., «Η τεχνική της φέτας». (Περιγραφή του τρόπου κατασκευής του σκάφους και χρήσιμες πληροφορίες πάνω στα παραδοσιακά και όχι μόνο μουσικά όργανα)

[http://www.lutherie.gr/stave/stave\\_3.htm](http://www.lutherie.gr/stave/stave_3.htm)

[5] Kinsler, L. E., et al., *Fundamentals of Acoustics*. 4th ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 2000

[6] Fletcher, N. and Rossing, T., *The Physics of musical instruments*. 2nd ed., Springer, New York, 1998.

[7] Boyce, E. W. and DiPrima, C. R., *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. John Wiley & Sons, 1992.

[8] Roederer G. J., *The Physics and Psychophysics of Music*. 3rd ed., Springer, New York, 1995.

[9] Fletcher, N. H., *the nonlinear physics of musical instruments*. *Rep. Prog. Phys.*, 62, pp. 723-764, Institute of Physics, Bristol, 1999

[10] Goodway, M. and Odell, S., *The metallurgy of the 17th and 18th century music wire (In The historical Harpichord)*. Pendragon Press, Stuyvensant, Vol. 2, Ch. 6, New York, 1987

[11] Benade, H. A., *Fundamentals of Musical Acoustics*. 2nd ed., Oxford University Press, London, 1976

[12] Legge K. A. and Fletcher N. H., *Nonlinear generation of missing modes on a vibrating string*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 76, pp. 5-12, 1984.

- [13] Gough, C., *The nonlinear free vibration of a damped elastic string*, J. Acoust. Soc. Am., 75, pp. 1770–1776, 1984
- [14] Bucur, V., *Acoustic of Wood*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [15] Chakraverty, S., *Vibration of Plates*. Taylor & Francis, Inc., 2008
- [16] Janson, E., *Acoustics for Violin and guitar makers*. Erik Janson, 2002  
<http://www.speech.kth.se/music/acviguit4/>
- [17] Jansson, E. V., *A study of acoustical and hologram interferometric measurements on the top plate vibrations of a guitar*. Acustica, 25, pp. 95-100, 1971
- [18] Helmholtz, H.V., *On the Sensations Of tone*. Dover, New York, 1954 (Αγγλική μετάφραση της γερμανικής έκδοσης του 1877)
- [19] Morse, P. and Ingard, U., *Theoretical Acoustics*, Princeton University Press, 1986
- [20] Harry, F. O., *Music, Physics and Engineering*. 2nd ed., Dover, New York, 1967
- [21] C. E. Gough, *Acoustical studies of stringed instruments using string resonances*, SMAC83, Royal Swedish Academy of Music, pp. 19-45, 1983
- [22] McLennan, J. E., *A0 and A1 studies on the violin using CO2, Helium and air/Helium mixtures*, Acustica, 89, pp. 176–180, 2003
- [23] Φρονιμόπουλος, Ν. και Παντελιάς, Γ., *Τρόποι δόνησης και διαγράμματα Chladni*. Άρθρο στο διαδικτυακό περιοδικό «Klika».  
[http://www.klika.gr/cms/index.php?option=com\\_content&task=view&id=306&Itemid=151](http://www.klika.gr/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=306&Itemid=151)
- [24] French, R. M., *Eginnering the guitar*. Springer, New York, 2009
- [25] Intra, R., *The acoustics of the steel string guitar*. PhD thesis, UNSW, 2007
- [26] Wright, H., *The Acoustics and psychoacoustics of the guitar*. PhD Thesis. University of Wales, College of Cardiff. 1996.
- [27] Rossing, T. D., Fletcher, N. H., *Principles of Vibration and Sound*. 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 2004
- [28] Gough C. E., *The theory of string resonances on musical instruments"*, Acustica, 49, pp. 124-141, 1981
- [29] Jansson, E. V., *Coupling of string motions to top plate motions in a guitar*. Preliminary report, STL-QPSR, 14, pp. 19-38, 1973

[30] Caldersmith, G.W. and Jansson, E.V., *Frequency Response and Played Tones of Guitars. STL-QPSR, (Dept of Speech Communication and Music Acoustics, Royal Inst. of Technology)*, pp. 50-61, 1980

[31] ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ, «Ούτι»

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%8D%CF%84%CE%B9>

[32] ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ, «Λαούτο»

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9B%CE%B1%CE%BF%CF%8D%CF%84%CE%BF>

[33] ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΧΑΤΖΗΝΙΚΟΛΑΟΥ - ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΟΣ, «ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΜΕΓΑΦΩΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΣΡΙ (ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΨΗΦΙΔΩΝ)», ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ, ΡΕΘΥΜΝΟ, 2007

[34] E. Bakarezos, V. Vathis, S. Brezas, Y. Orphanos, and N.A. Papadogiannis, *Acoustics of the Chelys – An ancient Greek tortoise-shell lyre, Applied Acoustics* **73**, 478 (2012)