

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗΣ
ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΕΣΡΙ ΓΙΑ ΤΗ
ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΝΟΝΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ
ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ**

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΤΣΑΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΔΡ ΕΥΘΥΜΙΟΣ ΜΠΑΚΑΡΕΖΟΣ**

Ρέθυμνο, 2009

Περίληψη

Τεχνικές ολογραφικής συμβολομετρίας έχουν επιτυχημένα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη δονούμενων αντικειμένων και των κανονικών τρόπων ταλάντωσης αυτών. Στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας έχει αναπτυχθεί χρονικά ολοκληρωμένη τεχνική ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI), η οποία στο παρελθόν έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία στη μελέτη δονητικών χαρακτηριστικών μουσικών οργάνων.

Η τεχνική αυτή ως έχει δεν επιτρέπει τον καθορισμό της φάσης της δόνησης, καθώς είναι χρονικά ολοκληρωμένη και η πληροφορία της φάσης χάνεται. 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.

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν τροποποιήσεις με στόχο την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων περιορισμών. Για τον επιπλέον καθορισμό της φάσης συνδυάστηκε η παραπάνω τεχνική ESPI με την τεχνική διαμόρφωσης φάσης, η οποία στην προκειμένη περίπτωση συνίσταται στη χρήση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου για την ελεγχόμενη μετατόπιση της δέσμης αναφοράς. Για την αύξηση του αριθμού των ανιχνεύσιμων κροσσών, δηλαδή την βελτίωση στον καθορισμό της κατανομής του πλάτους ταλάντωσης, συνδυάστηκε η παραπάνω τεχνική ESPI με την τεχνική της στροβοσκοπίας, χρησιμοποιώντας κατάλληλο διαμορφωτή δέσμης (optical chopper).

Τέλος, έγινε επιτυχημένη επίδειξη των δυνατοτήτων των αναπτυχθέντων τεχνικών με την εφαρμογή τους στη μελέτη κανονικών τρόπων ταλάντωσης επιλεγμένων μουσικών οργάνων.

Ευχαριστώ,

Τον **Δρ. Ευθύμιο Μπακαρέζο**, ως *επιβλέποντα καθηγήτη* αυτής της διπλωματικής εργασίας, για την επίβλεψη, την επιστημονική του καθοδήγηση, την παροχή υλικού, καθώς και για τις εισαγωγικές έννοιες που μου μετέδωσε στον τομέα των Laser και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο αυτό.

Τον **Δρ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη**, τόσο για τις εισαγωγικές γνώσεις κυματικής που μου μετέδωσε ως διδάσκων καθηγητής του τμήματος μουσικής τεχνολογίας και ακουστικής όσο και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου ως προϊστάμενος του τμήματος δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με τον τομέα της οπτικής φυσικής και να εργαστώ στο εργαστήριο ακουστικής & οπτικής τεχνολογίας που ήταν απαραίτητο για την περάτωση της παρούσης πτυχιακής εργασίας.

Τον **κ. Γιάννη Ορφανό**, για τη βοήθεια που προσέφερε κατά τη διάρκεια σημαντικού μέρους των εργαστηριακών μετρήσεων, ο οποίος με την εμπειρία του στον τομέα της ολογραφικής συμβολομετρίας συνέβαλε στην ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Τον **κ. Μπρέζα Σπύρο**, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών πειραμάτων, καθώς και για την ηθική υποστήριξη που μου προσέφερε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές **Μαργιορή Τσιούντα** και **Κωνσταντινίδα Γιώργο** και *ιδιαίτερα* τους αδελφικούς μου φίλους **Παραδείση Γιώργο**, **Δρ. Μπλαβούκο Σπύρο**, **π. Βασίλειο Αυγουστίνο** δίχως την ηθική και ψυχολογική υποστήριξη των οποίων δεν θα είχε συμβεί τίποτα...!

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
2. ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΝΗΣΕΩΝ...4	4
2.1. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ.....	4
2.1.1. Χωρική και χρονική συμφωνία	6
2.1.2. Το συμβολόμετρο Michelson	7
2.2. ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	8
2.2.1. Ολογραφία.....	8
2.2.2. Ολογραφική συμβολομετρία.....	10
2.2.3. Χρονικά ολοκληρωμένη ESPI	12
2.2.3.1. Μαθηματική θεώρηση	13
2.2.3.2. Πειραματική διάταξη & διαδικασία μετρήσεων.....	15
3. ESPI & ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΑ.....	19
3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΑΣ ΣΤΗΝ ESPI.....	20
3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ.....	21
4. ESPI & ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΦΑΣΗΣ	25
4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ESPI	26
4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ.....	28
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	32
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	34

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την ανίχνευση κίνησης και δονήσεων επιφανειών, είτε πρόκειται για κάποιο μουσικό όργανο είτε πρόκειται για οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο προς μελέτη, 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 επιτυχημένη 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 nm), 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 (γ) προσφέρουν τη δυνατότητα της παρακολούθησης της δόνησης του αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο (on-line). 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 κ.τ.λ.). Μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές είναι η τεχνική της χρονικά ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφιδών (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI), η οποία είναι μια τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας. Τέτοια τεχνική χρονικά ολοκληρωμένης ESPI έχει ήδη αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής. Η υπάρχουσα διάταξη ESPI περιλαμβάνει την καταγραφή δύο δεσμών λέιζερ 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 λέιζερ που οδηγείται απ' ευθείας στην CCD κάμερα (δέσμη αναφοράς). Η συγκεκριμένη τεχνική που έχει αναπτυχθεί βασίζεται στη διαδικασία αφαίρεσης διαδοχικών εικόνων που καταγράφονται καθώς το αντικείμενο μετατοπίζεται. Το αποτέλεσμα είναι ένα χρονικά ολοκληρωμένο συμβολόγραμμα διαμορφωμένο από τη συνάρτηση Bessel $|J_0(\Gamma A)|$, με τους εναλλασσόμενους φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς να είναι ουσιαστικά ισούψεις καμπύλες ίδιου πλάτους ταλάντωσης.

Η διάταξη αυτή, ως έχει, δεν επιτρέπει τον καθορισμό της φάσης της δόνησης, καθώς είναι χρονικά ολοκληρωμένη και η πληροφορία της φάσης χάνεται. 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.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση τροποποιήσεων με στόχο την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων περιορισμών. Για τον επιπλέον καθορισμό της φάσης επιχειρείται ο συνδυασμός της παραπάνω τεχνικής ESPI με την τεχνική διαμόρφωσης φάσης, η οποία στην προκειμένη περίπτωση συνίσταται στη χρήση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου για την ελεγχόμενη μετατόπιση της δέσμης αναφοράς. Για την αύξηση του αριθμού των ανιχνεύσιμων κροσσών, δηλαδή την βελτίωση στον καθορισμό της κατανομής του πλάτους ταλάντωσης, συνδυάζεται η παραπάνω τεχνική ESPI με την τεχνική της στροβοσκοπίας, χρησιμοποιώντας κατάλληλο διαμορφωτή δέσμης. Επίσης, πραγματοποιείται επίδειξη των δυνατοτήτων των αναπτυχθέντων τεχνικών με την εφαρμογή τους στη μελέτη κανονικών τρόπων ταλάντωσης επιφανειών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας αυτής αναλύονται οι απαραίτητες έννοιες για την καλύτερη κατανόηση της τεχνικής ESPI (συμβολή του φωτός, ολογραφία και ολογραφική συμβολομετρία), παρουσιάζεται η τεχνική αυτή καθώς και η υφιστάμενη πειραματική διάταξη και η διαδικασία πραγματοποίησης των μετρήσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τροποποιημένες διατάξεις που υλοποιήθηκαν, συνδυάζοντας την τεχνική ESPI με την τεχνική της στροβοσκοπίας (τρίτο κεφάλαιο) και την τεχνική διαμόρφωσης φάσης (τέταρτο κεφάλαιο), όπως και τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα και η ανάλυσή τους. Τέλος, παρατίθενται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εν λόγω εργασία καθώς και οι προτάσεις του γράφοντα για μελλοντική εργασία και εξέλιξη του αντικειμένου.

2. ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΝΗΣΕΩΝ

2.1. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

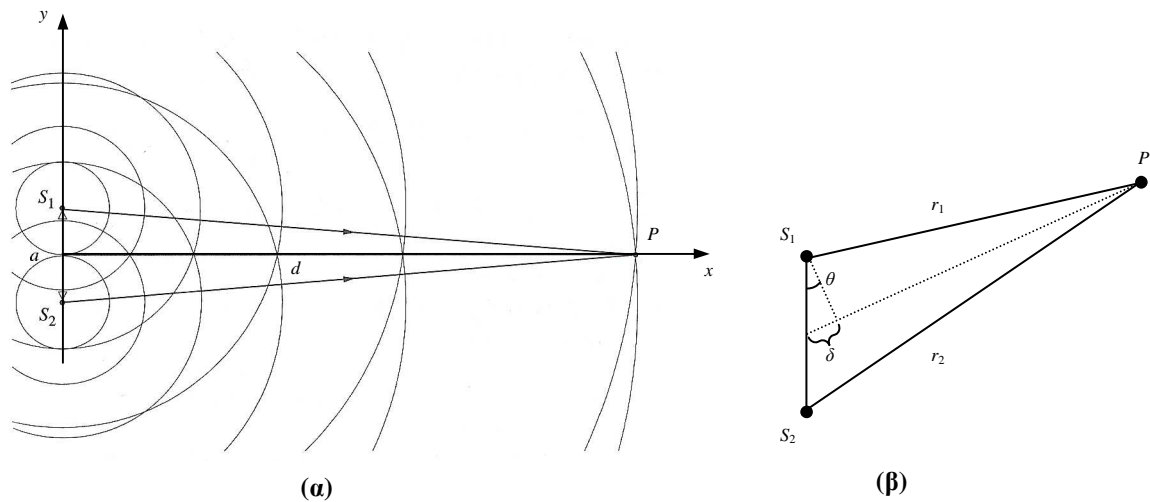
Ο όρος *συμβολή* αναφέρεται γενικότερα σε κάθε περίπτωση κατά την οποία δυο ή περισσότερα κύματα αλληλεπικαλύπτονται σε κάποιο σημείο στο χώρο. Όταν υπάρχει αυτή η χωρική επικάλυψη, η ολική μετατόπιση σε οποιοδήποτε σημείο και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή υπαγορεύεται από την *αρχή της γραμμικής υπέρθεσης (ή επαλληλίας)*, η οποία ορίζει ότι [1]: *όταν δυο ή περισσότερα κύματα αλληλεπικαλύπτονται, η προκύπτουσα μετατόπιση σε οποιοδήποτε σημείο και οποιαδήποτε χρονική στιγμή μπορεί να βρεθεί, αν προστεθούν οι στιγμιαίες μετατοπίσεις που θα παράγονταν στο σημείο αυτό από τα κύματα, αν το καθένα από αυτά υφίσταται αφ' εαυτού.*

Ο όρος «μετατόπιση» χρησιμοποιείται με την ευρύτερη έννοια. Αν πρόκειται για κύματα στην επιφάνεια υγρού, εννοείται η μετατόπιση της επιφάνειας πάνω ή κάτω από το επίπεδο ηρεμίας της, ενώ για κύματα ήχου ο όρος αναφέρεται στην αύξηση και στη μείωση της πίεσης σε σχέση με την ατμοσφαιρική. Για τα οπτικά κύματα (κύματα φωτός), με τα οποία θα ασχοληθούμε αποκλειστικά στη συνέχεια, εννοείται συνήθως μια ορισμένη συνιστώσα του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η συμβολή οπτικών κυμάτων είναι δυνατή, εάν οι οπτικές πηγές (ή τα συμβάλλοντα κύματα) είναι *σύμφωνες*, είναι *μονοχρωματικές* (ή σχεδόν μονοχρωματικές) και η αρχή της *γραμμικής υπέρθεσης (ή επαλληλίας)* ισχύει. Τι όμως σημαίνουν αυτά; Όσον αφορά στη *μονοχρωματικότητα*, αυτό σημαίνει ότι οι πηγές (ή τα συμβάλλοντα κύματα) έχουν την ίδια συχνότητα. Η μονοχρωματικότητα είναι μια βασική ιδιότητα του φωτός λέιζερ, γι αυτό το λόγο πηγές λέιζερ είναι ιδανικές για συμβολομετρικές εφαρμογές. Όσο αφορά στην λεπτομερή περιγραφή της αρχής της *γραμμικής υπέρθεσης (ή επαλληλίας)*, αυτή είναι έξω από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, όμως ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία [π.χ. 2-4]. Η έννοια της συμφωνίας εξηγείται αναλυτικότερα παρακάτω, καθώς είναι ουσιαστική για τις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Για την περιγραφή των βασικών σημείων της συμβολής, ας θεωρήσουμε δυο πανομοιότυπες πηγές μονοχρωματικών οπτικών κυμάτων σε σύστημα αξόνων xy , τοποθετημένες στα σημεία S_1 και S_2 (σχήμα 1.α). Τα σημεία αυτά βρίσκονται κατά μήκος του άξονα y (ισαπέχοντα από την αρχή των αξόνων) και απέχουν απόσταση a μεταξύ τους. Έστω τώρα ένα σημείο P στον κάθετο άξονα x και σε απόσταση d από την αρχή των

αξόνων. Οι αποστάσεις των S_1 και S_2 ως προς το P είναι ίσες λόγω συμμετρίας, έτσι τα κύματα από τις δύο πηγές χρειάζονται ίσους χρόνους (ίσες αποστάσεις) για να φθάσουν στο P . Κατά συνέπεια, κύματα που φεύγουν από τα S_1 και S_2 σε φάση φθάνουν στο P σε φάση.



Σχήμα 1: (α) Στα σημεία S_1 και S_2 βρίσκονται μονοχρωματικές πηγές οπτικών κυμάτων τα οποία συμβάλλουν στο σημείο P . Το αποτέλεσμα της συμβολής εξαρτάται από τη διαφορά οπτικού δρόμου, δ , η οποία απεικονίζεται με λεπτομέρεια στο (β).

Η φωτεινή ένταση στο σημείο αυτό εξαρτάται από το αποτέλεσμα της συμβολής των δύο κυμάτων. Έχοντας αυτά διανύσει ίδιο οπτικό δρόμο, nd (όπου n ο δείκτης διάθλασης του μέσου διάδοσης), στο σημείο P τα κύματα συμβάλλουν ενισχυτικά. Στη γενικότερη περίπτωση όπου το σημείο P βρίσκεται σε τυχαία θέση στο χώρο (σχήμα 1.β), η διαφορά οπτικού δρόμου, δ , είναι:

$$\delta = r_2 - r_1 = nd \sin \theta \quad 2.1$$

Αν αυτή είναι κάποιο ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ του φωτός (ή μηδέν όπως προηγουμένως), τότε τα δύο κύματα είναι σε φάση και έχουμε στο σημείο P ενισχυτική συμβολή. Συνεπώς η συνθήκη για ύπαρξη στο σημείο P φωτεινού κροσσού είναι:

$$\delta = nd \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad 2.2$$

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

$$\delta = nd \sin \theta = (m + 1/2)\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad 2.3$$

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

$$\frac{\delta}{\varphi} = \frac{\lambda}{2\pi} \Leftrightarrow \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd \sin \theta \quad 2.4$$

2.1.1. Χωρική και χρονική συμφωνία

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

Για να ορίσουμε τώρα τη χρονική συμφωνία θεωρούμε το ηλεκτρικό πεδίο του H/M κύματος σε δεδομένο σημείο Π για χρόνους t και $t + \tau$. Εάν για δεδομένη χρονική υστέρηση τ η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τιμών του πεδίου παραμένει η ίδια για κάθε χρονική στιγμή t , θα λέμε πως υπάρχει χρονική συμφωνία για ένα χρονικό διάστημα τ . Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε τιμή του τ , το H/M κύμα θα λέγεται πως έχει *τέλεια χρονική συμφωνία*. Εάν αυτό συμβαίνει για χρονική υστέρηση τ , τέτοια ώστε $0 < \tau < \tau_0$, το κύμα θα λέγεται πως έχει *μερική χρονική συμφωνία*, με χρόνο συμφωνίας ίσο με τ_0 . Η έννοια της χρονικής συμφωνίας συνδέεται άμεσα με την μονοχρωματικότητα της πηγής λέιζερ. Συγκεκριμένα, ένα H/M κύμα με χρόνο συμφωνίας τ_0 έχει εύρος ζώνης $\Delta\nu \cong 1/\tau_0$.

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

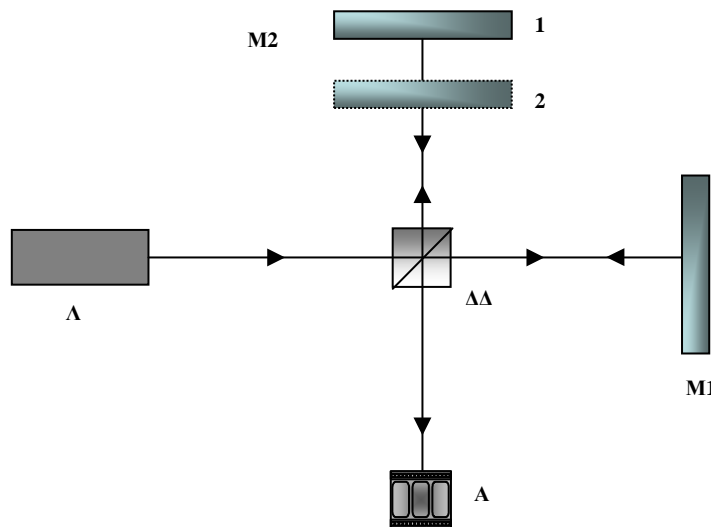
$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad 2.5$$

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

2.1.2. Το συμβολόμετρο Michelson

Ως παράδειγμα των παραπάνω σκόπιμο θα ήταν να αναφερθεί η λειτουργία του συμβολόμετρου Michelson, που άλλωστε σε αυτό βασίζονται και οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν. Ο σχεδιασμός των περισσοτέρων συμβολομέτρων βασίζεται πάνω στο πρωτότυπο που σχεδίασε ο Michelson το 1891 και είναι από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα στην τεχνική της ολογραφίας, καθώς αποτελούν το κυριότερο στοιχείο της.

Η λειτουργία του συμβολόμετρου Michelson συνίσταται στη διαίρεση μίας δέσμης οπτικής ακτινοβολίας σε δύο μέρη και στην μετέπειτα χωρική επανασύνδεσή τους αφού έχει ήδη υπάρξει μία διαφορά οπτικού δρόμου. Οι μεταβολές στην ένταση της συμβολής που προκύπτει από το συμβολόμετρο σαν συνάρτηση της διαφορά οπτικού δρόμου, μπορούν να μετρηθούν με έναν ανιχνευτή. Τυπική μορφή ενός συμβολόμετρου Michelson φαίνεται στο σχήμα 2:



Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση τυπικού συμβολόμετρου Michelson: Λ-λέιζερ, Α-ανιχνευτής, ΔΔ-διαχωριστής δέσμης, M1-ακίνητος καθρέπτης, M2-κινούμενος καθρέπτης.

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

Θεωρώντας ότι οι δύο δέσμες είναι χωρικά απόλυτα επικαλυπτόμενες και ότι διανύουν ίσους οπτικούς δρόμους, το αποτέλεσμα της συμβολής είναι ένας φωτεινός κροσσός (ενισχυτική συμβολή). Αν τώρα ο καθρέπτης $M2$ κινηθεί κατά $\lambda/4$ στη θέση (2), το οποίο ισοδυναμεί με εισαγωγή διαφοράς οπτικού δρόμου μεταξύ των δεσμών ίση $\lambda/2$, τότε το αποτέλεσμα της συμβολής είναι ένας σκοτεινός κροσσός (καταστρεπτική συμβολή). Με αυτό τον τρόπο το συμβολόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση διαφορών απόστασης με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

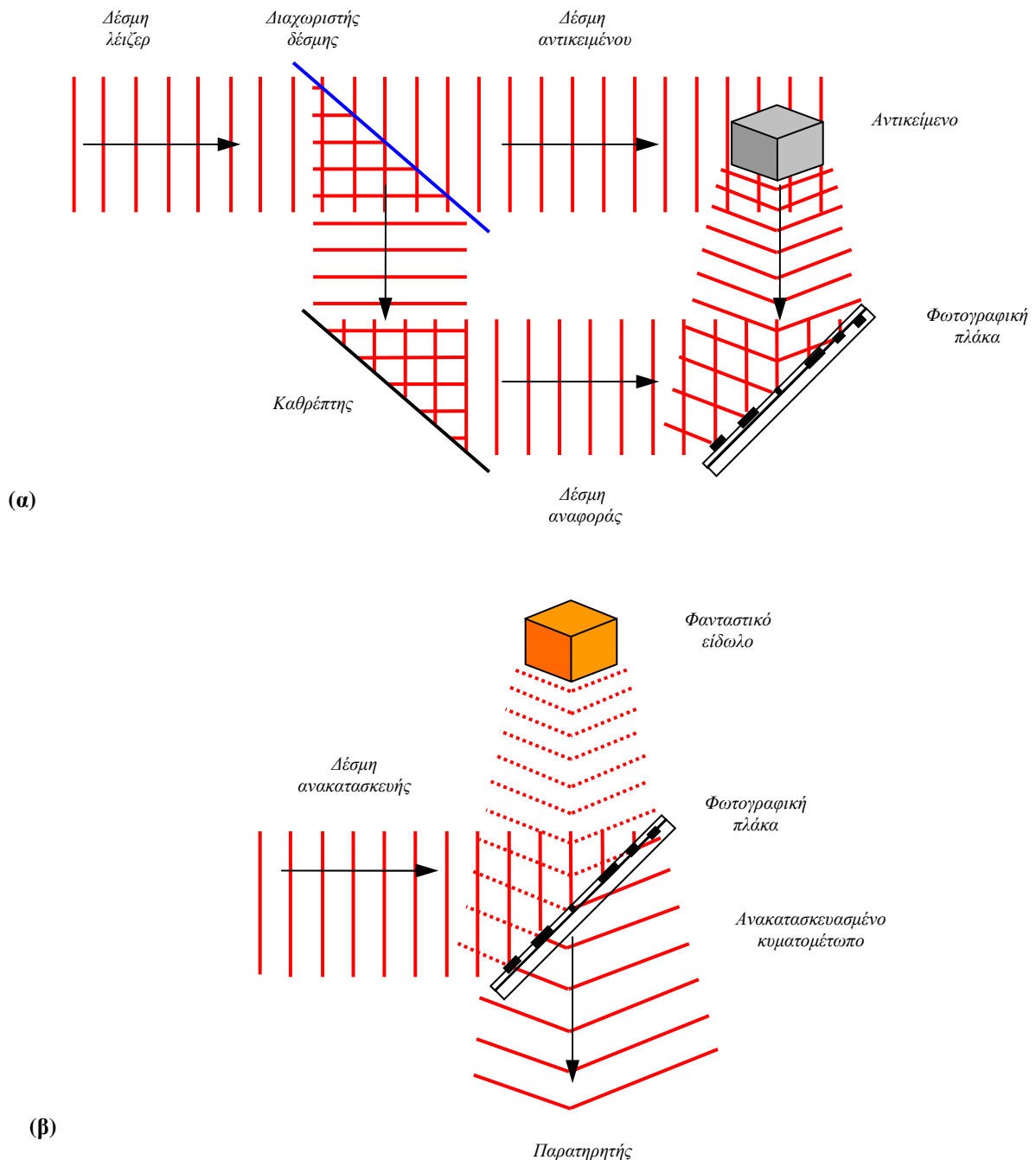
2.2. ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

2.2.1. Ολογραφία

Στην απλή φωτογραφία καταγράφεται σε δύο διαστάσεις η κατανομή φωτεινής έντασης από ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Η τεχνική αυτή έχει τον σοβαρό περιορισμό ότι αποτελεί μια απλή χαρτογράφηση της φωτεινής έντασης. Με άλλα λόγια, όταν αναπαράγεται η φωτογραφία ενός αντικειμένου από το φωτογραφικό φιλμ όπου καταγράφηκε, το αποτέλεσμα που βλέπουμε δεν είναι η πιστή αναπαραγωγή του ηλεκτρικού πεδίου που είχε φωτίσει το αντικείμενο αλλά ένα σημείο-προς-σημείο «αρχείο» μόνον του τετραγώνου του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου αυτού. Εάν, κατά κάποιο τρόπο, μπορούσε να καταγραφεί επιπλέον και πληροφορία για τη φάση του ηλεκτρικού πεδίου και μπορούσε να αναπαραχθεί τόσο το πλάτος όσο και η φάση του αρχικού ηλεκτρικού πεδίου (υποθέτοντας ότι η συχνότητα είναι η ίδια), τότε το αποτέλεσμα θα ήταν η πιστή αναπαραγωγή του αρχικού. Αυτό σημαίνει ότι κάποιος τότε θα μπορούσε να δει (και να «φωτογραφήσει») το αναπαραχθέν αντικείμενο σε τρεις διαστάσεις, ακριβώς σαν να ήταν το αντικείμενο μπροστά του και να παρήγαγε το ηλεκτρικό πεδίο.

Η τεχνική που επιτρέπει τη λήψη φωτογραφιών τριών διαστάσεων, δηλαδή καταγραφή τόσο του πλάτους όσο και της φάσης του ηλεκτρικού πεδίου από ένα αντικείμενο, ονομάζεται ολογραφία. Η λέξη προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις «όλος» και «γραφή», και εφευρέθηκε από τον Dennis Gabor το 1948 [5].

Για την ταυτόχρονη καταγραφή της φωτεινής έντασης και της φάσης, η τεχνική της ολογραφίας προϋποθέτει μία δέσμη σύμφωνης ακτινοβολίας (λείζερ), η οποία διαχωρίζεται με ένα διαχωριστή δέσμης σε δύο μέρη: 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 (σχήμα 3.α).



Σχήμα 3: Τυπική διάταξη ολογραφίας για (α) καταγραφή, και (β) ανακατασκευή.

Το σκεδαζόμενο από το αντικείμενο φως πέφτει επίσης πάνω στη φωτογραφική πλάκα. Οι δύο δέσμες συμβάλλουν πάνω στη φωτογραφική πλάκα και δημιουργείται

χαρακτηριστικό διάγραμμα συμβολής που αποτελείται από κροσσούς συμβολής, οι οποίοι περιέχουν ένα πλήρες «αρχείο» του αρχικού αντικειμένου, αφού τυχόν μεταβολές του αντικειμένου (π.χ. λόγω κίνησης) αντιστοιχούν σε διαφορές φάσης στην δέσμη αντικειμένου. Σε αντίθεση, λοιπόν, με την απλή φωτογραφία, καταγράφεται με αυτόν τον τρόπο η συνολική πληροφορία για το αντικείμενο.

Έστω τώρα, ότι η εμφανισμένη πλάκα επιστρέφει στην αρχική της θέση (σε αυτή δηλαδή που είχε όταν εκτέθηκε στο φως) και το αντικείμενο προς ολογράφηση απομακρύνεται (σχήμα 3.β). Όταν η φωτογραφική πλάκα φωτιστεί με δέσμη ανακατασκευής, πανομοιότυπη με τη δέσμη αναφοράς, τότε το αρχικό αντικείμενο ανακατασκευάζεται πλήρως (ένταση και φάση) λόγω περίθλασης της δέσμης ανακατασκευής από το καταγεγραμμένο στη φωτογραφική πλάκα διάγραμμα συμβολής. Λόγω του ότι ανακατασκευάζεται τόσο η φάση όσο και η ένταση, το είδωλο εμφανίζεται τρισδιάστατο. Ένας παρατηρητής μετακινώντας το σημείο παρατήρησής του θα δει το αντικείμενο να περιστρέφεται, όπως ακριβώς, εάν ήταν ακόμα εκεί.

Καθοριστικοί παράγοντες που καθιστούν επιτυχημένη την ολογραφία είναι:

(i) οι θέσεις του αντικειμένου, της πλάκας και της δέσμης λέιζερ δεν πρέπει να αλλάξουν κατά τη διάρκεια της έκθεσης της πλάκας. Οι θέσεις μπορούν να αλλάξουν μόνο λιγότερο από το μισό μήκος κύματος του λέιζερ, προς αποφυγή αμαύρωσης της συμβολής. Οπότε αντικείμενο, φωτογραφική πλάκα και λέιζερ πρέπει να είναι τοποθετημένα σε μέρος απαλλαγμένο από δονήσεις,

(ii) η διακριτική ικανότητα της φωτογραφικής πλάκας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μπορεί να καταγράφει τους κροσσούς συμβολής, και

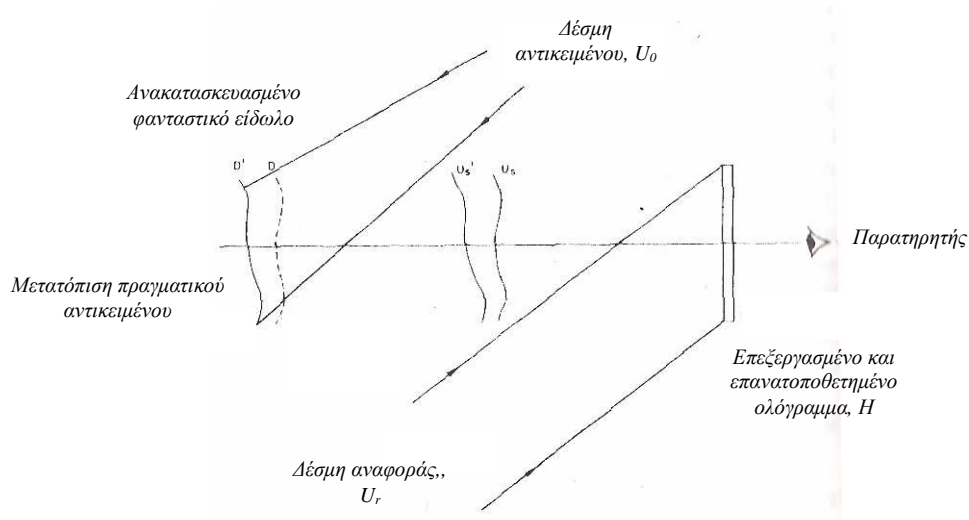
(iii) το μήκος συμφωνίας (coherence length) της δέσμης λέιζερ το οποίο πρέπει να είναι επαρκές για να σχηματισθούν οι κροσσοί συμβολής στην πλάκα.

2.2.2. Ολογραφική συμβολομετρία

Από τις πιο σημαντικές τεχνικές που προκύπτουν από την εφαρμογή της αρχής της ολογραφίας για τη μελέτη αλλαγών της επιφάνειας αντικειμένων είναι η ολογραφική συμβολομετρία [6]. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την συμβολομετρική ανάλυση στατικών και δυναμικών αλλαγών μιας οπτικά ανώμαλης επιφάνειας. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι άρει τον βασικό περιορισμό της κλασσικής συμβολομετρίας, δηλαδή ότι η υπό μελέτη επιφάνεια πρέπει να είναι οπτικά ομαλή.

Ας δούμε ποιοτικά πως η ολογραφική καταγραφή μιας σκεδάζουσας επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της κίνησής της, με τη βοήθεια του σχήματος 4, όπου

απεικονίζεται διαγραμματικά η λεγόμενη τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας απλής έκθεσης (ή πραγματικού χρόνου).



Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση διάταξης ολογραφικής συμβολομετρίας απλής έκθεσης.

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, το επεξεργασμένο ολόγραμμα 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.

Στη διάταξη του σχήματος 4, 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_o . Τα κυματομέτωπα U_s και U_s' είναι το κυματομέτωπο του ανακατασκευασμένου φανταστικού ειδώλου και το σκεδασμένο κυματομέτωπο από το μετατοπισμένο αντικείμενο αντίστοιχα. Αυτά τα δύο κυματομέτωπα συμβάλλουν για να δώσουν κροσσούς συμβολής, η μορφή των οποίων εξαρτάται από τη γεωμετρία της μετατόπισης και τη θέση παρατήρησης.

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).

Μια τρίτη παραλλαγή, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη γρήγορα ταλαντούμενων αντικειμένων με μικρό πλάτος ταλάντωσης, είναι η *χρονικά ολοκληρωμένη* μέθοδος. Σ' αυτή την περίπτωση, το καταγραφικό φιλμ εκτίθεται για σχετικά μεγάλη διάρκεια, κατά την οποία το δονούμενο αντικείμενο έχει εκτελέσει έναν αριθμό ταλαντώσεων. Το προκύπτον ολόγραμμα μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση ενός πλήθους εικόνων, το οποίο θα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός στάσιμου κύματος. Οι φωτεινές περιοχές φανερώνουν στάσιμες- κομβικές περιοχές, ενώ οι ισούψείς γραμμές (contour lines) υποδηλώνουν περιοχές σταθερού πλάτους ταλάντωσης.

2.2.3. Χρονικά ολοκληρωμένη ESPI

Από την πληθώρα ολογραφικών συμβολομετρικών τεχνικών, εξέχουσα θέση κατέχει η λεγόμενη συμβολομετρία ψηφίδων. 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, κοκκιδωτή 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 [7], ένα χρόνο αργότερα από την εισαγωγή της ιδέας της συμβολής δύο σύμφωνων πεδίων τυχαίας φάσης πριν και μετά την παραμόρφωση ενός αντικειμένου [8]. Σύντομα ακολούθησε σημαντική ερευνητική εργασία τόσο σε θεωρητικό όσο σε πειραματικό επίπεδο [π.χ. 9-12], με την τεχνική να γνωρίζει ιδιαίτερη άνθιση μετά την εισαγωγή της πειραματικής τεχνικής της ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης (phase shifting) και της ψηφιακής ανάλυσης κροσσών με ηλεκτρονικό υπολογιστή [13]. Σήμερα, η τεχνική ESPI έχει πλέον καθιερωθεί ως μια από τις πλέον σημαντικές συμβολομετρικές τεχνικές για τη μελέτη δονήσεων ή παραμορφώσεων αντικειμένων.

Η τεχνική ESPI, όπως όλες οι τεχνικές ψηφιακής συμβολομετρίας ψηφίδων (π.χ. TV holography, electronic holography, phase-shifting speckle pattern interferometry), 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 λέιζερ 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 λέιζερ που οδηγείται απ' ευθείας στην CCD κάμερα (δέσμη αναφοράς). Η τεχνική βασίζεται στην διαδικασία αφαίρεσης ή πρόσθεσης διαδοχικών εικόνων που καταγράφονται καθώς το αντικείμενο μετατοπίζεται. Για τη 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. Στη συνέχεια, δίνεται η μαθηματική θεώρηση της χρονικά ολοκληρωμένης τεχνικής ESPI και περιγράφεται με λεπτομέρεια η διαδικασία πραγματοποίησης μετρήσεων καθώς και η σχετική πειραματική διάταξη που έχει ήδη αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής.

2.2.3.1. Μαθηματική θεώρηση

Η τεχνική ESPI και οι εφαρμογές της για τη μελέτη δονούμενων αντικειμένων έχουν παρουσιαστεί λεπτομερώς σε πολλά αξιόλογα άρθρα αναφοράς και βιβλία [14-16]. Εδώ θα περιγραφούν οι βασικές μαθηματικές αρχές που αφορούν σε 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 ισοροπίας w σε κάθε σημείο της επιφάνειας (x,y) για κάθε χρονική στιγμή, t , είναι της μορφής:

$$w(x, y, t) = A(x, y) \cos[\omega t + \varphi_0(x, y)] , \quad 2.6$$

όπου $A(x, y)$ είναι η κατανομή του πλάτους ταλάντωσης πάνω στην επιφάνεια, ω 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 τ είναι:

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \left\{ I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cdot \cos \left[\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) A \cos(\omega t + \varphi_0) \right] \right\} dt , \quad 2.7$$

όπου I_A και I_B είναι οι κατανομές έντασης των δεσμών αντικειμένου και αναφοράς αντίστοιχα, φ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο παραπάνω δεσμών, λ είναι το μήκος κύματος της πηγής λέιζερ, και θ είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης φωτισμού του αντικειμένου και της διεύθυνσης παρατήρησης. Στην περίπτωση μας $\theta \cong 0^\circ$. Θέτοντας $\Gamma = 4\pi/\lambda$ και $\tau = 2m\pi/\omega$, όπου m είναι ακέραιος, και ολοκληρώνοντας από την εξίσωση 2.7 προκύπτει ότι:

$$I_1 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} |(\cos \varphi) J_0(\Gamma A)|, \quad 2.8$$

όπου J_0 είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης πρώτου είδους. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της χρονικής ολοκλήρωσης, στην εξίσωση 2.8 έχει εξαλειφθεί η φάση της δόνησης, φ_0 .

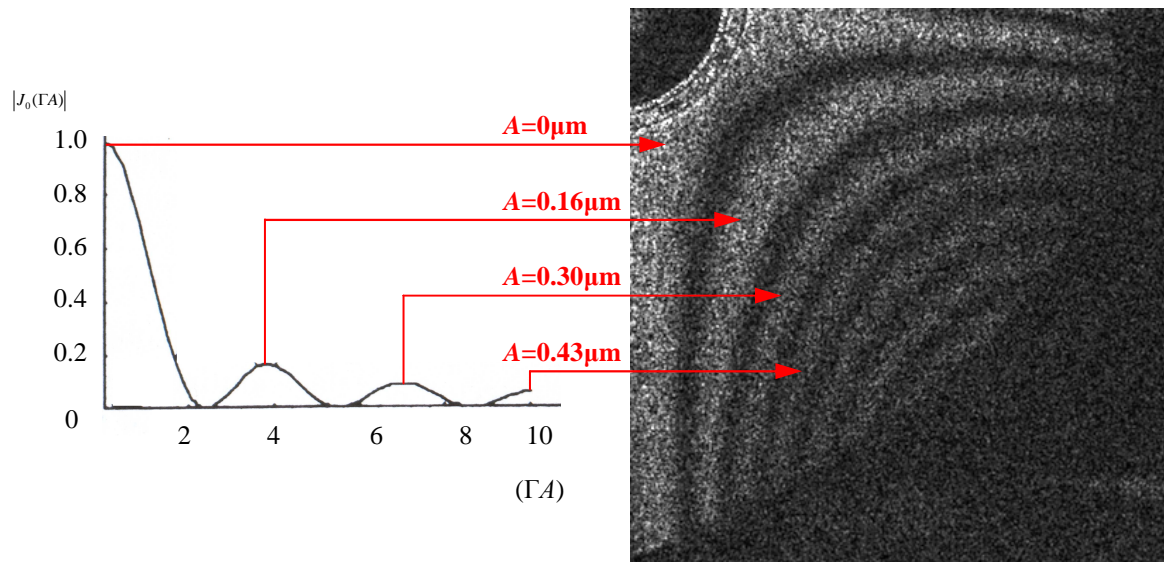
Καθώς η ταλάντωση του αντικειμένου εξακολουθεί, θεωρούμε ότι το πλάτος ταλάντωσης αλλάζει από A σε $A + \Delta A$, λόγω αστάθμητων παραγόντων. Τότε μια δεύτερη εικόνα καταγράφεται, της οποίας η κατανομή φωτεινής έντασης μπορεί παρομοίως να εκφραστεί, μετά από ανάπτυγμα Taylor (υποθέτοντας ΔA πολύ μικρό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

$$I_2 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \left| (\cos \varphi) \left[1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A) \right| \quad 2.9$$

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

$$I = I_1 - I_2 = \frac{\sqrt{I_A I_B}}{2} |(\cos \varphi) \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A)| \quad 2.10$$

Από την εξίσωση 2.10 είναι προφανές ότι το χρονικά ολοκληρωμένο συμβολόγραμμα, I , είναι διαμορφωμένο από τη συνάρτηση Bessel $|J_0(\Gamma A)|$. Οι εναλλασσόμενοι φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί είναι ουσιαστικά ισοϋψείς καμπύλες ίδιου πλάτους ταλάντωσης. Οι φωτεινοί κροσσοί αντιστοιχούν στα μέγιστα της $|J_0(\Gamma A)|$, με τον φωτεινότερο κροσσό να αντιστοιχεί σε δεσμό ($A = 0$). Οι υπόλοιποι φωτεινοί κροσσοί, διαδοχικά μειούμενης φωτεινότητας, αντιστοιχούν σε τιμές πλάτους ταλάντωσης 0.3λ , 0.56λ , 0.81λ , $1.07\lambda \dots$ Στο σχήμα 5 απεικονίζεται η αντιστοιχία αυτή για την περίπτωση συμβολογράμματος ESPI κρητικής λύρας όπου φαίνονται οι υπολογισμένες τιμές πλάτους ταλάντωσης ($\lambda = 532\text{nm}$).



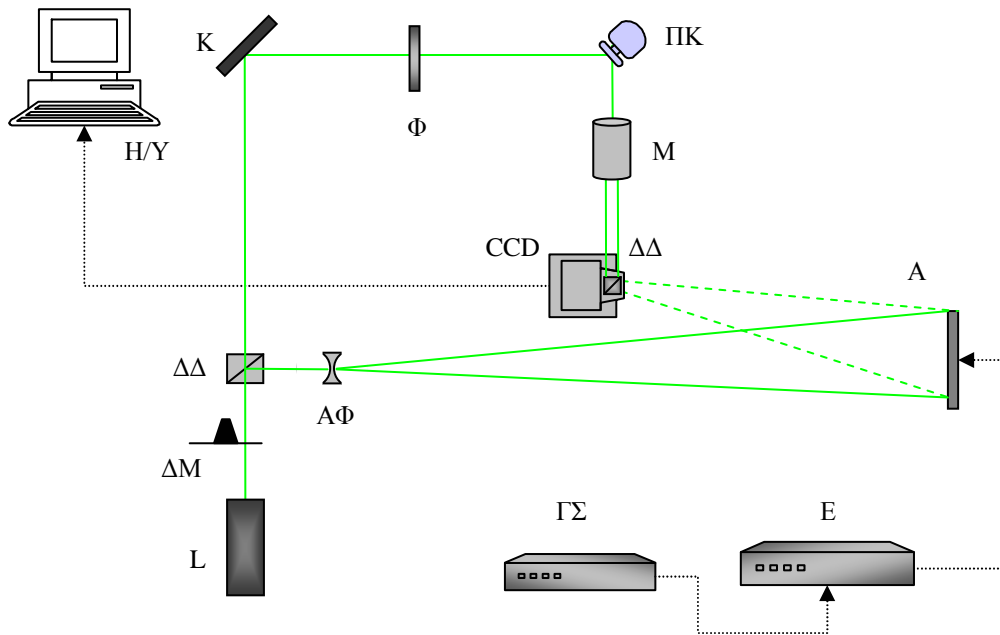
Σχήμα 5: Αντιστοιχία μεγίστων συνάρτησης Bessel $|J_0(\Gamma A)|$ και κατανομής πλάτους ταλάντωσης μετρούμενης με την τεχνική ESPI.

Από τα παραπάνω διαφαίνονται τα κύρια μειονεκτήματα της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI, που είναι: (i) ο περιορισμός στη χωρική διακριτική ικανότητα, που επιβάλλει το γεγονός ότι δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια μετατόπιση που αντιστοιχεί σε λιγότερο από ένα κροσσό, (ii) 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, και (iii) δεν μπορούμε να γνωρίζουμε κάθε στιγμή τη φάση με την οποία γίνεται η ταλάντωση στην επιφάνεια του εκάστοτε αντικειμένου που εξετάζεται.

Οι τροποποιήσεις της υπάρχουσας πειραματικής διάταξης χρονικά ολοκληρωμένης ESPI με στόχο την αντιμετώπιση των δυο τελευταίων μειονεκτημάτων είναι ο σκοπός αυτής της εργασίας.

2.2.3.2. Πειραματική διάταξη & διαδικασία μετρήσεων

Η πειραματική διάταξη χρονικά ολοκληρωμένης ESPI του Εργαστηρίου Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας δίνεται στο σχήμα 6. Στο σχήμα αυτό περιλαμβάνονται και οι τροποποιήσεις που έγιναν, με την προσθήκη στοιχείων που επέτρεψαν την επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων.



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης ESPI και των τροποποιήσεων που έγιναν στα πλαίσια της επίτευξης των στόχων της παρούσας εργασίας: L–πηγή λέιζερ, ΔM–διαμορφωτής δέσμης (optical chopper), ΔΔ–διαχωριστής δέσμης, K–καθρέπτης, ΠΚ–καθρέπτης σε πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, ΑΦ–αποκλίνοντες φακοί, Φ–φίλτρο μεταβλητής διαπερατότητας, M–μεγεθυντής/παραλληλοποιητής δέσμης, CCD – κάμερα καταγραφής, H/Y–σύστημα επεξεργασίας και αποθήκευσης εικόνας, Α–υπό μελέτη αντικείμενο, ΓΣ–γεννήτρια συχνοτήτων, και Ε–ενισχυτής.

Χρησιμοποιήθηκε μια πηγή λέιζερ συνεχούς μήκους κύματος (CW), στερεάς κατάστασης διοδικής άντλησης ενεργού υλικού Nd:YAG. Το μήκος κύματος εκπομπής είναι 532nm (πράσινο) και η μέγιστη ισχύς 150mW. Το λέιζερ είναι μονού διαμήκους ρυθμού ταλάντωσης, το οποίο σημαίνει ότι έχει μεγάλο μήκος συμφωνίας (>10m), καθώς και εγκάρσιου ρυθμού TEM₀₀.

Η δέσμη του λέιζερ διαχωρίζεται μέσω διαχωριστή δέσμης 80:20 σε δύο δέσμες. Από αυτές η ισχυρότερη χρησιμοποιείται για το φωτισμό του υπό μελέτη αντικειμένου (δέσμη αντικειμένου), αφού πρώτα περάσει από σύστημα αποκλινόντων φακών, ώστε να φωτιστεί κατά το δυνατόν ομοιόμορφα όλη η επιφάνεια του αντικειμένου. Η ασθενέστερη από τις δύο δέσμες χρησιμοποιείται ως δέσμη αναφοράς, και οδηγείται μέσω καθρεπτών απ' ευθείας στο καταγραφικό όργανο.

Για την καταγραφή χρησιμοποιήθηκε CCD κάμερα, με μέγεθος αισθητήρα 1392×1040 pixels, μέγεθος pixel 6.45×6.45μm και μέγιστο ρυθμό καταγραφής 15frames/sec. Η κάμερα διαθέτει κατάλληλο φακό συλλογής φωτός, ενώ συνδέεται απευθείας με H/Y με σύνδεση IEEE1394. Λόγω του ότι στη συγκεκριμένη διάταξη η δέσμη αναφοράς προσπίπτει κάθετα

στην κάμερα σε σχέση με την δέσμη αντικειμένου, παρεμβάλλεται διαχωριστής δέσμης 50:50 μεταξύ του αισθητήρα και του φακού της, ώστε οι δύο δέσμες να προσπίπτουν τελικά ευθυγραμμισμένες και οι δύο μαζί πάνω στον αισθητήρα. Για την ρύθμιση της σχετικής έντασης των δύο δεσμών χρησιμοποιείται ουδέτερο φίλτρο μεταβλητής διαπερατότητας (variable neutral optical density filter) τοποθετημένο στη δέσμη αναφοράς. Η σχετική ένταση των δεσμών στον αισθητήρα είναι τυπικά 1:1. Για την ομοιόμορφη κατανομή της έντασης της δέσμης αναφοράς πάνω στον αισθητήρα, χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν μεγεθυντής ($\times 20$) και παραλληλοποιητής δέσμης. Τέλος, σημειώνεται ότι όλη η οπτική διάταξη είναι τοποθετημένη σε αντικραδασμική τράπεζα με πνευματικά πόδια, για την απομόνωση των κραδασμών του περιβάλλοντος.

Τα αντικείμενα που επιλέχθηκαν να μελετηθούν με τη διάταξη ESPI είναι Κρητικές λύρες, των οποίων οι συχνότητες των κανονικών τρόπων ταλάντωσής τους είναι γνωστές από παλαιότερες μελέτες στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής. Για την στήριξη των αντικειμένων χρησιμοποιήθηκε ειδικά κατασκευασμένη βάση στήριξης. Οι λύρες στηρίζονται αναρτημένες στα δύο άκρα τους στην κατακόρυφη διεύθυνση, με ειδικό απορροφητικό υλικό (sorbothane) τοποθετημένο στα σημεία στήριξης, ώστε να απομονώνονται τυχόν κραδασμοί από τη βάση στήριξης προς τη λύρα. Η απουσία ανεπιθύμητων κραδασμών από το περιβάλλον διαπιστώθηκε και πειραματικά, χωρίς διέγερση, καθώς η τεχνική ESPI είναι ευαίσθητη σε πολύ μικρές μετατοπίσεις.

Η διέγερση των αντικειμένων έγινε με τη χρήση μικρού μεγέθους πιεζοηλεκτρικού στοιχείου μετατόπισης, το οποίο λειτουργεί με dc τάση 0-100V, ικανό να παρέχει μετατοπίσεις 0-8.5 μm , σχεδόν γραμμικά στο προαναφερθέν εύρος τάσης. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο ελέγχεται από γεννήτρια συχνοτήτων συνδεδεμένη με κατάλληλο ενισχυτή χαμηλής παραμόρφωσης.

Η ηλεκτρονική καταγραφή, επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων (εικόνων) γίνεται σε πραγματικό χρόνο μέσω ειδικού λογισμικού που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον LabView από το επιστημονικό προσωπικό και συνεργάτες του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής. Το λογισμικό αυτό επίσης παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου των λειτουργιών της CCD κάμερας (φωτεινότητα, χρόνος έκθεσης, ρυθμός καταγραφής κτλ). Τελικά, τα δεδομένα (εικόνες) απεικονίζονται στην οθόνη του Η/Υ.

Τέλος, και για την εφαρμογή της αρχής της στροβοσκοπίας, στη διάταξη τοποθετήθηκε διαμορφωτής δέσμης (optical chopper) που ελεγχόταν από κατάλληλο όργανο οδήγησης. Επίσης, στη διάταξη τοποθετήθηκε καθρέπτης σε ειδικά κατασκευασμένη βάση η οποία περιλαμβάνει πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, μέσω του οποίου ήταν δυνατή η δόνηση του

καθρέπτη (εφαρμογή της τεχνικής διαμόρφωσης φάσης) σε συχνότητες που επιλέγονται από γεννήτρια συχνοτήτων συνδεδεμένη με κατάλληλο ενισχυτή χαμηλής παραμόρφωσης.

Η διαδικασία των μετρήσεων (καταγραφή συμβολογραμμάτων) πραγματοποιήθηκε ως εξής: Αρχικά γίνεται οπτική ευθυγράμμιση και ρυθμίζονται οι σχετικές εντάσεις των δεσμών αναφοράς και αντικειμένου στον αισθητήρα της κάμερας. Η εικόνα $I(x,y)$, που περιγράφεται από την εξίσωση 2.10 καταγράφεται συνεχώς καθώς αλλάζει η συχνότητα διέγερσης. Η συχνότητα διέγερσης μεταβάλλεται κατά μικρά βήματα (τυπικά 5Hz), ενώ σε κάθε συχνότητα καταγράφονται αρκετές εικόνες. Όταν η συχνότητα διέγερσης πλησιάζει μια συχνότητα συντονισμού του οργάνου εμφανίζονται κροσσοί, με τον αριθμό τους να μεγιστοποιείται (μέγιστο πλάτος ταλάντωσης) ακριβώς στη συχνότητα συντονισμού. Με αυτόν τον τρόπο, προσδιορίζονται ακριβώς οι ιδιοσυχνότητες και καταγράφονται οι αντίστοιχες ιδιομορφές κατανομής πλάτους ταλάντωσης της επιφάνειας. Επιλέχθηκαν, κατά περίπτωση, χαρακτηριστικές ιδιομορφές και σε αυτές πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με την εφαρμογή της στροβοσκοπίας και της διαμόρφωσης φάσης, λεπτομέρειες για τις οποίες δίνονται στο τρίτο και το τέταρτο κεφάλαιο αντίστοιχα.

3. ESPI & ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην αρχή της στροβοσκοπίας και εξηγείται λεπτομερώς το πώς και για ποιο λόγο αυτή χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την τεχνική ESPI, καθώς και το πώς ακριβώς εφαρμόστηκε στην υφιστάμενη πειραματική διάταξη ESPI. Τέλος, παρατίθεται η διαδικασία των μετρήσεων, τα αποτελέσματα και η ανάλυσή τους.

Η στροβοσκοπία είναι μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη τεχνική για τη μελέτη κινούμενων αντικειμένων (περιστρεφόμενων, ταλαντούμενων, δονούμενων κτλ) και συνίσταται στον συγχρονισμό του φωτισμού τους μέσω ειδικών οργάνων (στροβοσκόπια) με σκοπό την εμφάνιση των αντικειμένων ως ακίνητων ή ως αργά κινούμενων. Στην απλούστερή του μορφή ένα στροβοσκόπιο μπορεί να είναι ένας περιστρεφόμενος δίσκος με ισαπέχουσες οπές, ο οποίος τοποθετείται ενδιάμεσως του αντικειμένου και του φωτισμού του. Η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου συγχρονίζεται με την κίνηση του αντικειμένου έτσι ώστε να παρατηρείται το συνεχώς κινούμενο αντικείμενο σε συγκεκριμένες τακτικές χρονικές στιγμές, με αποτέλεσμα αυτό να εμφανίζεται ακίνητο. Στην ηλεκτρονική του μορφή ένα στροβοσκόπιο είναι μια συσκευή ικανή να εκπέμπει στενούς φωτεινούς παλμούς με ελεγχόμενη επαναληψιμότητα (τυπικά από λίγα Hz έως αρκετές δεκάδες kHz). Εν γένει, τέτοια στροβοσκόπια αποτελούνται από λυχνία ευγενούς αερίου ειδικής κατασκευής οδηγούμενη από γεννήτρια.

Τα στροβοσκόπια χρησιμοποιούνται ευρύτατα για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής αντικειμένων. Φωτίζοντας στροβοσκοπικά ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο και ρυθμίζοντας τη συχνότητα φωτισμού να είναι ακριβώς ίση με τη συχνότητα περιστροφής του αντικειμένου, το αντικείμενο παρουσιάζεται ακίνητο. Έτσι, για παράδειγμα, τα φύλλα της έλικας ενός ανεμιστήρα περιστρεφόμενου με ταχύτητα 1600rpm φωτιζόμενα με κοινό φως δεν διακρίνονται, λόγω της μεγάλης ταχύτητας περιστροφής. Αν, όμως, φωτιστούν με στροβοσκόπιο, του οποίου η συχνότητα φωτισμού είναι 1600 λάμπεις (flashes) ανά λεπτό, τότε σε κάθε «άναμμα» του προβολέα η έλικα θα βρίσκεται στην ίδια θέση και ο παρατηρητής θα βλέπει την έλικα ακίνητη. Αν η συχνότητα του στροβοσκοπίου γίνει 1599 λάμπεις ανά λεπτό, τότε η έλικα θα φαίνεται να κινείται με ταχύτητα μόνο 1rpm. Αν η συχνότητα του στροβοσκοπίου γίνει 1601 λάμπεις ανά λεπτό, η έλικα θα φαίνεται να κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση με ταχύτητα και πάλι 1rpm.

Τα στροβοσκόπια χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία: Για την ακριβή μέτρηση στροφών των μηχανών και την άνετη και λεπτομερή παρακολούθηση των

μεταβολών βασικών εξαρτημάτων τους, όπως πιθανές κάμψεις αξόνων, για την παρατήρηση και μέτρηση της ταχύτητας οδοντωτών μηχανισμών στους ρότορες των μηχανών κλπ. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για τη φωτογράφιση αντικειμένων, τα οποία κινούνται με μεγάλη ταχύτητα, όπως είναι τα βλήματα των όπλων, έλικες και άλλα. Τέλος, τα στροβοσκόπια χρησιμοποιούνται και για επιστημονικούς σκοπούς, όπως για την επαλήθευση και την επίδειξη βασικών νόμων της Φυσικής.

3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΑΣ ΣΤΗΝ ESPI

Για την εφαρμογή της στροβοσκοπίας στην ESPI χρησιμοποιείται συσκευή διαμόρφωσης οπτικής δέσμης (optical chopper), η οποία πρόκειται ουσιαστικά για μοτέρ που περιστρέφει κυκλικό δίσκο με ισοκατανεμημένες οπές. Καθώς αυτός περιστρέφεται μια δέσμη λέιζερ που περνάει διαμέσου των οπών διαμορφώνεται με περιοδικό τρόπο. Στην ESPI η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή φωτεινών παλμών διάρκειας τουλάχιστον 10 φορές μικρότερης από την περίοδο δόνησης του υπό μελέτη αντικειμένου. Αυτοί οι παλμοί συγχρονίζονται με την δόνηση του αντικειμένου με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνονται πολλαπλές καταγραφές σε δυο παρεμφερή τμήματα του κύκλου της δόνησης. Λόγω της χρονικά βραχείας έκθεσης του αντικειμένου στον φωτεινό παλμό το αντικείμενο «παγώνει» σε αυτές τις δυο θέσεις της δόνησής του. Ως αποτέλεσμα θα εμφανίζεται συμβολόγραμμα που αντιπροσωπεύει την κατανομή του πλάτους δόνησης, $a_0(x, y)$, μετρούμενο σε πολλαπλάσια του μήκους κύματος του χρησιμοποιούμενου λέιζερ.

Η κατανομή της έντασης, $I_s(x, y)$, που καταγράφεται με αυτό τον τρόπο μπορεί να γραφτεί [17-18]:

$$I_s(x, y) \propto I_0(x, y) \cos^2 \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) a_0(x, y) (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right], \quad 3.1$$

όπου $I_0(x, y)$ είναι η κατανομή έντασης σε ηρεμία, ενώ θ_1 και θ_2 οι γωνίες της διεύθυνσης παρατήρησης με το διάνυσμα της κίνησης και τη διεύθυνση φωτισμού αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από την 3.1, τώρα το χρονικά ολοκληρωμένο συμβολόγραμμα έχει συνημιτονοειδή διαμόρφωση (σε αντίθεση με τη διαμόρφωση με συνάρτηση Bessel προηγουμένως). Τώρα δηλαδή, τώρα όλοι οι φωτεινοί κροσσοί θα έχουν την ίδια φωτεινότητα, κατά συνέπεια ο μέγιστος αριθμός των κροσσών που μπορούν να ανιχνευτούν με τη στροβοσκοπική ESPI (ισοδύναμα, το μέγιστο ανιχνεύσιμο πλάτος δόνησης) είναι μεγαλύτερος από αυτόν που μπορούν να ανιχνευτούν με την κοινή χρονικά ολοκληρωμένη ESPI. Υπό ευνοϊκές συνθήκες είναι δυνατό να ανιχνευτούν ευκρινώς πάνω

από 100 κροσσοί. Το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής αυτής έγκειται στο γεγονός ότι τώρα είναι δύσκολο να ανιχνευτούν οι ακίνητες περιοχές (δεσμοί) του αντικειμένου, καθώς όλοι οι κροσσοί έχουν την ίδια φωτεινότητα.

Στην δική μας περίπτωση, η αρχή της στροβοσκοπίας εφαρμόζεται με τη χρήση ενός optical chopper. Η συχνότητα των οπτικών παλμών που προκύπτουν όταν περνά η δέσμη λέιζερ μέσα από τις οπές του περιστρεφόμενου δίσκου καθορίζεται επιλεκτικά με τη βοήθεια του οργάνου οδήγησης και την επιλογή ανάμεσα σε πλειάδα μεταλλικών δίσκων με διαφορετικό αριθμό οπών, τους οποίους παρέχει ο κατασκευαστής.

Στην διάταξη ο optical chopper τοποθετήθηκε ακριβώς πριν τον διαχωριστή της δέσμης, με συνέπεια η διαμόρφωση να γίνεται ταυτόχρονα τόσο στη δέσμη αναφοράς όσο και στη δέσμη του αντικειμένου. Ρυθμίστηκε κατάλληλα η γεννήτρια συχνοτήτων, ώστε να παραχθούν φωτεινοί παλμοί σε συχνότητα διπλάσια από την εκάστοτε συχνότητα συντονισμού (ιδιοσυχνότητα) της υπό μελέτη επιφάνειας, οι οποίοι ελέγχονταν με τη χρήση φωτοδιόδου και καταγραφή σε ψηφιακό παλμογράφο.

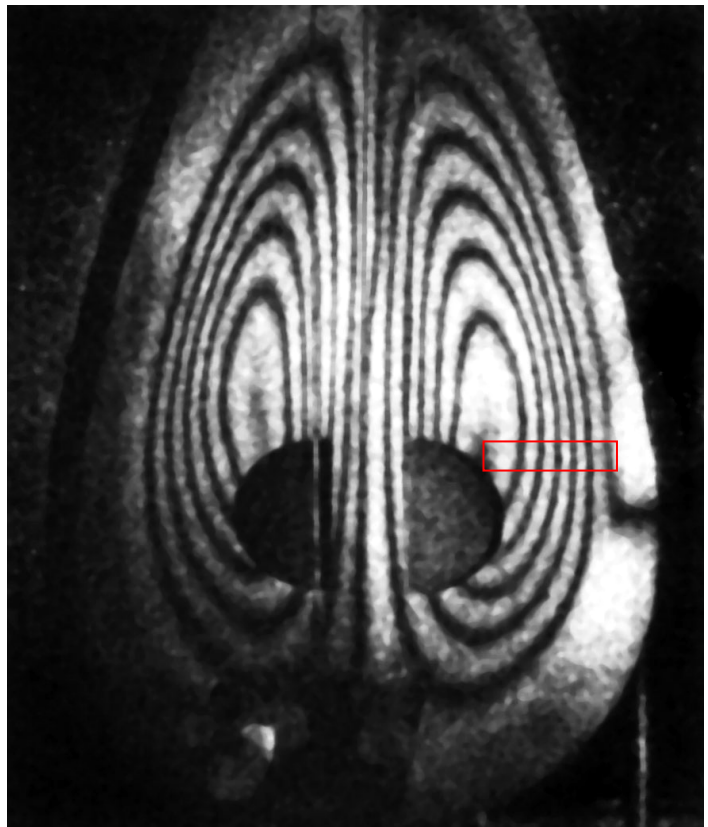
3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ

Παρακάτω, στα σχήματα 7 και 8, παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα για δύο διαφορετικές λύρες, αχλαδόσχημη και τύπου Σταγάκη, και για τις συχνότητες συντονισμού 416Hz (αχλαδόσχημη) και 1106Hz (τύπου Σταγάκη). Η συχνότητα διαμόρφωσης της δέσμης του λέιζερ ήταν 832Hz και 2212Hz αντίστοιχα, φωτίζοντας έτσι το αντικείμενο σε δύο σημεία του κύκλου ταλάντωσής του. Ενδεικτικά τμήματα (με κόκκινο πλαίσιο στα σχήματα 7 και 8) των συμβολογραμμάτων αναλύθηκαν με ειδικό λογισμικό (ImageJ) ώστε να καταστεί εμφανής η διαμόρφωση της κατανομής των κροσσών πριν και μετά την εφαρμογή της στροβοσκοπίας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής δίνονται στα σχήματα 9α και 9β, ενώ επιπλέον έγινε σε αυτά μαθηματική ανάλυση (fit), ώστε να διαφανεί η εξάρτηση (Bessel ή συνημιτονοειδής) της κατανομής των κροσσών.

Από τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα είναι προφανής η απόλυτα επιτυχημένη εφαρμογή της στροβοσκοπίας και η επίτευξη του αρχικού στόχου, καθώς είναι ξεκάθαρη η αλλαγή στο είδος της διαμόρφωσης της κατανομής των κροσσών.



(α)



(β)

Σχήμα 7: Συμβολόγραμμα του κανονικού τρόπου ταλάντωσης σε συχνότητα 416Hz για την αχλαδόσχημη λύρα (α) πριν, και (β) μετά την εφαρμογή της στροβοσκοπίας. Με κόκκινο πλαίσιο οι περιοχές του συμβολογράμματος που αναλύθηκαν με ειδικό λογισμικό.



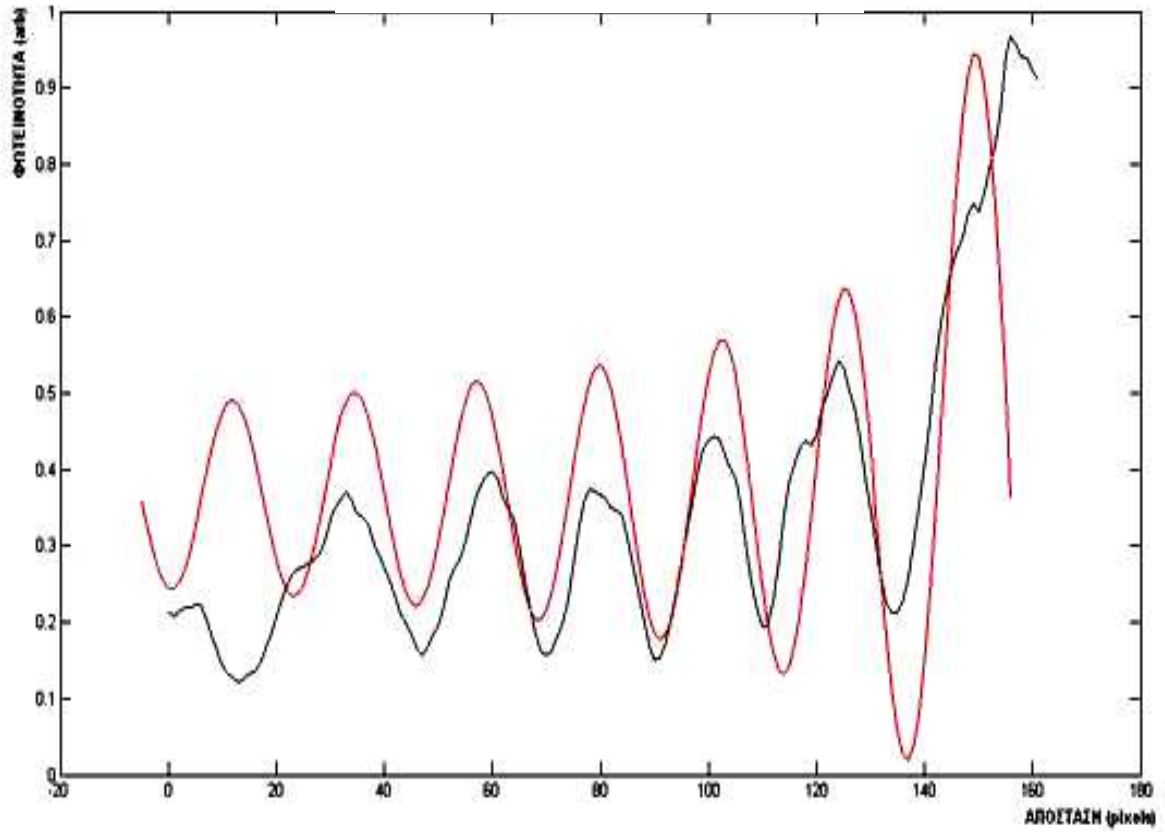
(α)



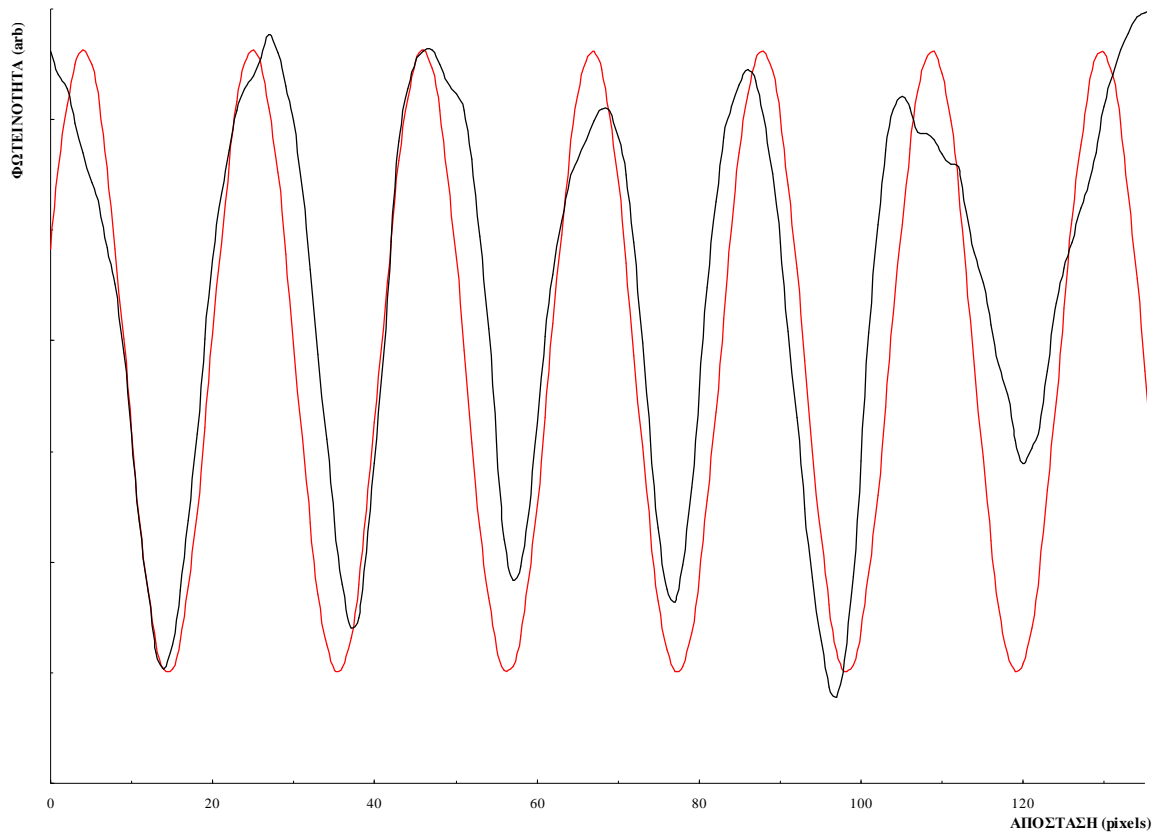
(β)

Σχήμα 8: Συμβολόγραμμα του κανονικού τρόπου ταλάντωσης σε συχνότητα 1106Hz για την λύρα τύπου Σταγάκη (α) πριν, και (β) μετά την εφαρμογή της στροβοσκοπίας. Με κόκκινο πλαίσιο οι περιοχές του συμβολογράμματος που αναλύθηκαν με ειδικό λογισμικό.

ΑΧΑΛΛΟΣΧΗΜΗ ΛΥΡΑ - 416Hz - ΧΩΡΙΣ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΑ

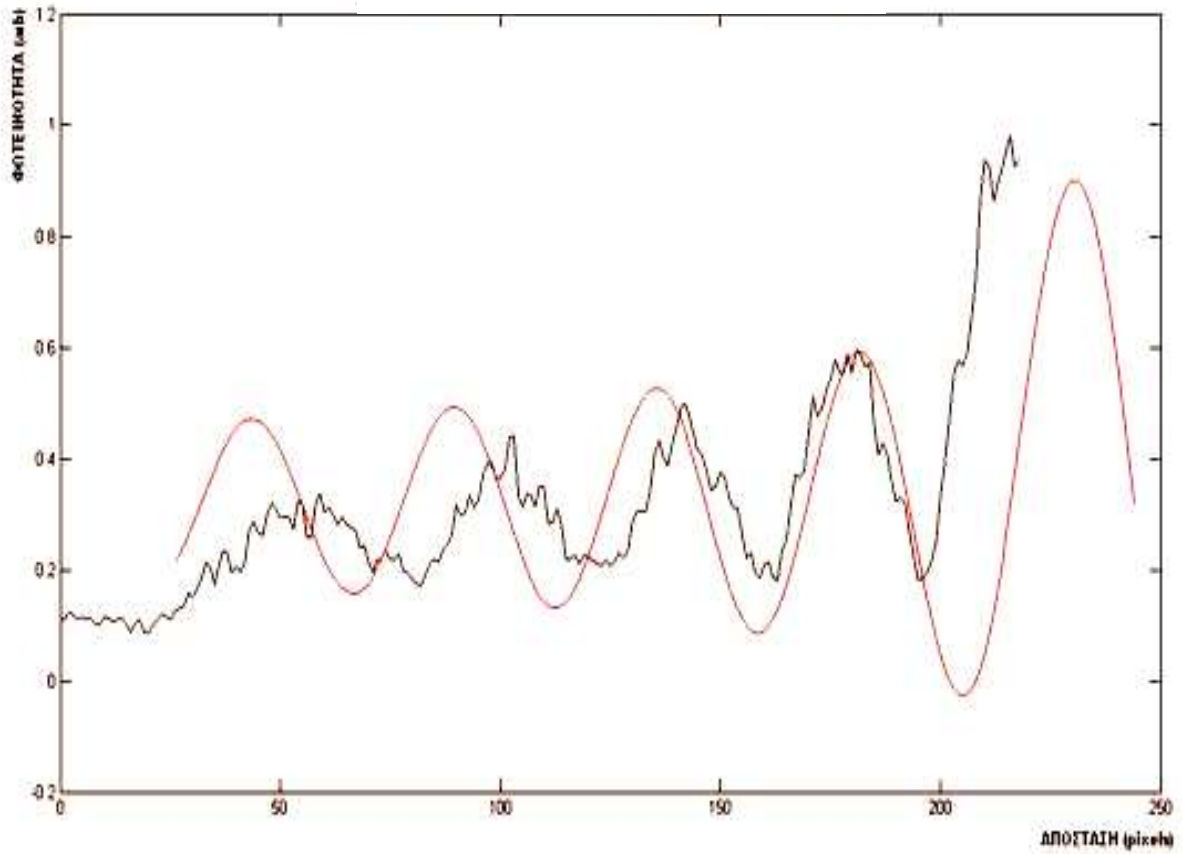


ΑΧΑΛΛΟΣΧΗΜΗ ΛΥΡΑ - 416Hz - ΜΕΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΑ

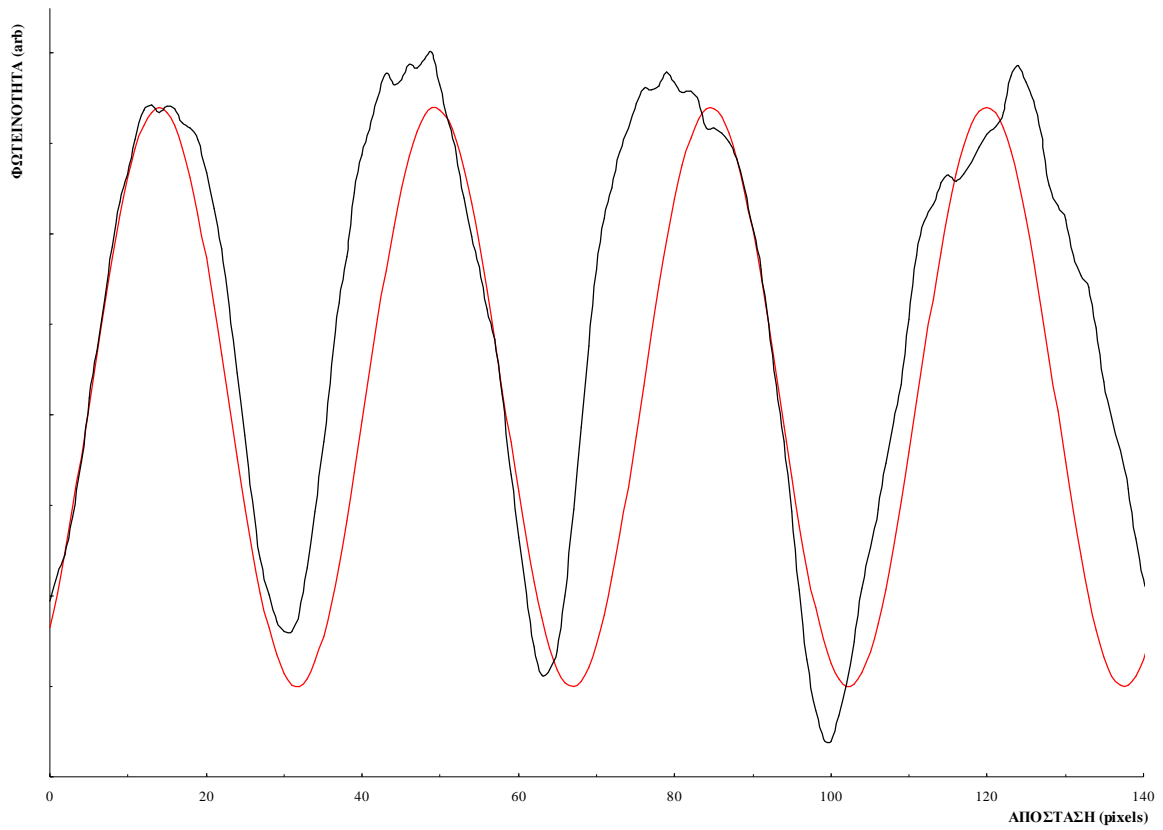


Σχήμα 9α: Ανάλυση (τομή) των συμβολογραμμάτων του σχ. 7 πριν (επάνω), και μετά (κάτω) την εφαρμογή της στροβοσκοπίας (μαύρο χρώμα). Καμπύλες με κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν σε fits συνάρτησης Bessel και συνημίτονου αντίστοιχα.

ΛΥΡΑ ΤΥΠΟΥ ΣΤΑΓΑΚΗ - 1106Hz - ΧΩΡΙΣ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΑ



ΛΥΡΑ ΤΥΠΟΥ ΣΤΑΓΑΚΗ - 1106Hz - ΜΕ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΑ



Σχήμα 9β: Ανάλυση (τομή) των συμβολογραμμάτων του σχ. 8 πριν (επάνω), και μετά (κάτω) την εφαρμογή της στροβοσκοπίας (μαύρο χρώμα). Καμπύλες με κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν σε fits συνάρτησης Bessel και συνημίτονου αντίστοιχα.

4. ESPI & ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΦΑΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό εξηγείται λεπτομερώς το πώς και για ποιο λόγο η τεχνική της διαμόρφωσης φάσης χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την τεχνική ESPI, καθώς και το πώς ακριβώς εφαρμόστηκε στην υφιστάμενη πειραματική διάταξη ESPI. Τέλος, παρατίθεται η διαδικασία των μετρήσεων, τα αποτελέσματα και η ανάλυσή τους.

4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ESPI

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, ένας βασικός περιορισμός της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI είναι ότι χάνεται η πληροφορία για τη φάση της δόνησης. Σε περιπτώσεις χαρακτηριστικών περιπτώσεων δονήσεων, όπως για παράδειγμα για τους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης μιας τετράγωνης πλάκας, μπορεί κανείς να συνάγει τις περιοχές \pm φάσης. Όταν όμως, η κατανομή πλάτους είναι περίπλοκη, όπως για παράδειγμα σε κώνους ηχείων, τότε είναι σχεδόν αδύνατη η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τη φάση.

Με το συνδυασμό της ESPI με τη λεγόμενη αρχή της διαμόρφωσης φάσης αυτός ο περιορισμός μπορεί να αρθεί και να ανακτηθεί η πληροφορία της φάσης. Στη γενικευμένη της μορφή η διαμόρφωση φάσης μπορεί να είναι ένα ιδιαίτερα περίπλοκο αντικείμενο (π.χ. βλ. [19]). Μπορεί όμως, κανείς να πάρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα εφαρμόζοντας την απλούστερη μορφή της, την ημιτονοειδή διαμόρφωση φάσης (ΗΔΦ). Αυτή μπορεί να επιτευχθεί στην ESPI με την ανάκλαση είτε της δέσμης αναφοράς είτε της δέσμης αντικειμένου από έναν δονούμενο καθρέπτη.

Θεωρώντας ότι η μετατόπιση u_R , του καθρέπτη περιγράφεται από την:

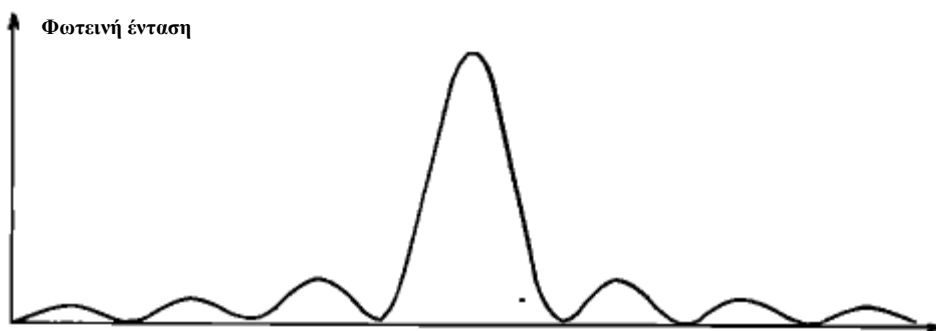
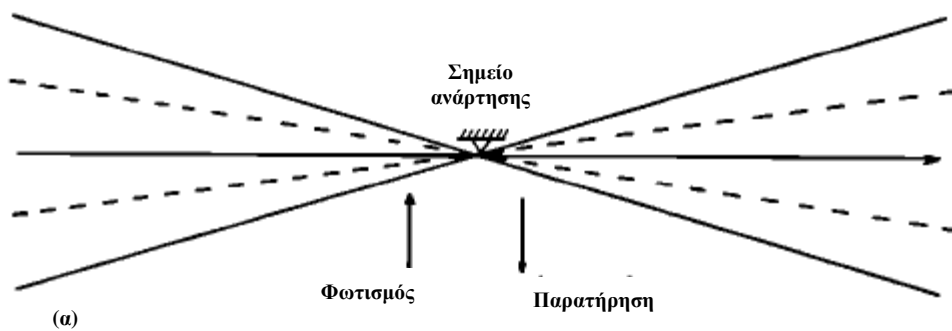
$$u_R(x, y, t) = a_R \cos(2\pi ft + \theta_R) , \quad 4.1$$

όπου f η συχνότητα δόνησης, a_R το πλάτος δόνησης, και θ_R μια αρχική φάση, τότε η προκύπτουσα τροποποιημένη κατανομή φωτεινής έντασης I_{mod} , μπορεί να εκφραστεί ως [20]:

$$I_{\text{mod}}(x, y) \propto I_0 [J_0^2((4\pi/\lambda)\{a_0^2(x, y) + a_R^2 - 2a_0(x, y)a_R \cos[\varphi_0(x, y) - \varphi_R]\}^{1/2})] \quad 4.2$$

Από την εξίσωση 4.2 (και σε σχέση με την 4.1) φαίνεται ότι στην περίπτωση της ΗΔΦ μπορούμε να κάνουμε χρήση του γεγονότος ότι ο κροσσός μέγιστης φωτεινότητας, $J_0^2(0)$, παρατηρείται μόνον όταν το πλάτος δόνησης $a_0(x, y)$ και η φάση $\varphi_0(x, y)$ του αντικειμένου ισούται με το πλάτος δόνησης a_R και τη φάση φ_R του δονούμενου καθρέπτη. Στην περίπτωση αυτή μικρή σημασία έχει να γνωρίζει κανείς την ακριβή σχέση της διαφοράς των κινήσεων του αντικειμένου και του καθρέπτη.

Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω, ας πάρουμε ως παράδειγμα μεταλλικό έλασμα που δονείται αναρτημένο από ένα σημείο στο κέντρο του (σχήμα 10.α). Στο σχήμα 10.β φαίνεται τομή του αντίστοιχου συμβολογράμματος όπου ο κροσσός μέγιστης φωτεινότητας (ακίνητο αντικείμενο) βρίσκεται στη θέση ανάρτησης. Στο σχήμα 10.γ φαίνεται πως αυτός ο κροσσός αλλάζει όταν δονείται ο καθρέπτης με πλάτος και φάση που αντιστοιχούν στα άκρα του ελάσματος.



(β)



(γ)

Σχήμα 10: (α) Μεταλλικό έλασμα που δονείται αναρτημένο από ένα σημείο στο κέντρο του, (β) Τομή του αντίστοιχου συμβολογράμματος, όπου ο κροσσός μέγιστης φωτεινότητας (ακίνητο αντικείμενο) βρίσκεται στη θέση ανάρτησης, και (γ) Δόνηση με πλάτος και φάση που αντιστοιχούν στα άκρα του ελάσματος.

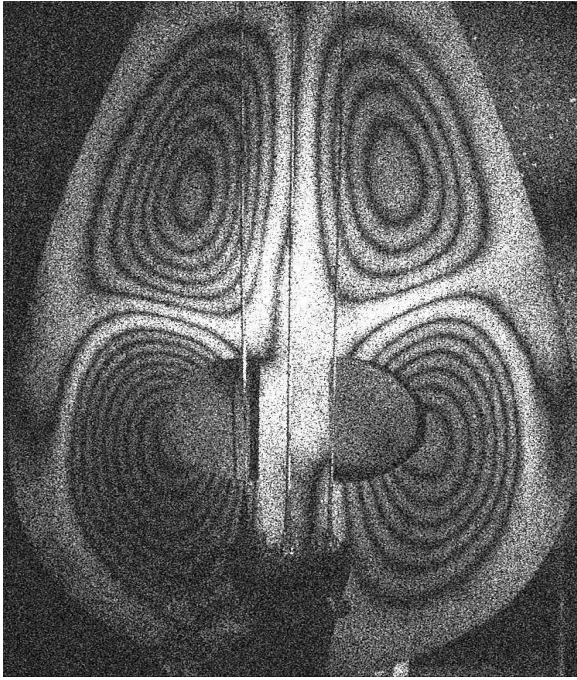
Για να χαρτογραφηθούν τέτοιες ισοϋψείς καμπύλες πλάτους δόνησης θα πρέπει να ρυθμιστεί η φάση του καθρέπτη καθώς αυτός δονείται στο επιθυμητό πλάτος. Αν το αντικείμενο δονείται σε ένα κανονικό τρόπο ταλάντωσης μόνο δύο αλλαγές φάσης είναι αρκετές για να έχουμε πλήρη πληροφορία για τη φάση της δόνησης. Η ανίχνευση του κροσσού μέγιστης φωτεινότητας στην ΗΔΦ μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την ανίχνευση ισοϋψών καμπυλών φάσης. Σ' αυτή τη περίπτωση το πλάτος δόνησης του καθρέπτη ρυθμίζεται από μηδέν έως το μέγιστο, ενώ η φάση είναι σταθερή στην επιθυμητή τιμή.

4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ

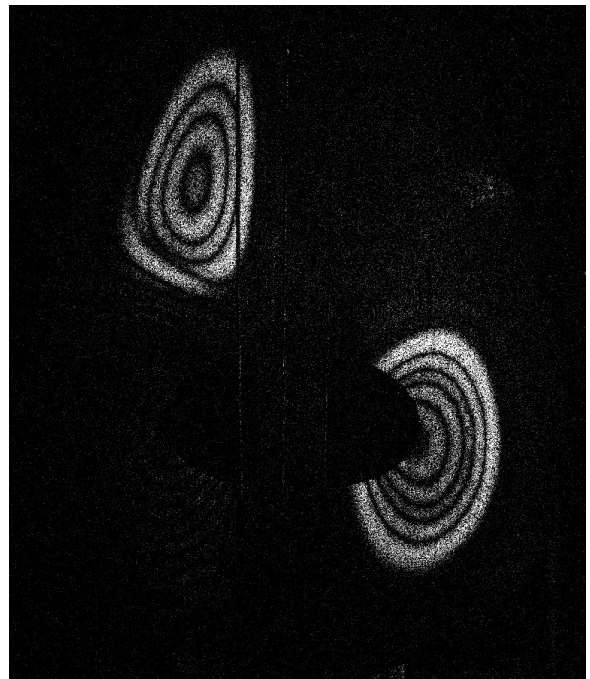
ΗΔΦ επιτεύχθηκε εδώ με την ανάκλαση της δέσμης αναφοράς από έναν δονούμενο καθρέπτη πριν αυτή προσπέσει στην κάμερα. Ο καθρέπτης δονούταν μέσω ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που εφαρμόστηκε μέσω ειδικής κατασκευής στην πίσω μεριά του. Η συχνότητα αλλά και το πλάτος δόνησης ήταν ελεγχόμενα από γεννήτρια συχνοτήτων και ενισχυτή αντίστοιχα. Σύμφωνα με προδιαγραφές του κατασκευαστή (Physik Instrumente GmbH), με το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο αυτό μπορούσε να επιτευχθεί μετατόπιση 0-15 μm με εφαρμογή DC τάσης 0-100V κατά γραμμικό τρόπο. Για τον ακριβέστερο όμως, υπολογισμό των τιμών μετατόπισης χρησιμοποιήθηκαν διαθέσιμα στοιχεία πειραματικής βαθμονόμησης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου [21].

Στις πειραματικές μετρήσεις το πλάτος δόνησης του καθρέπτη ήταν σταθερό και αντιστοιχούσε σε τιμές που προσδιορίστηκαν πειραματικά (συγκεκριμένα ήταν 0.4 μm). Καθώς είχε ήδη διαπιστωθεί ότι τα δονούμενα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία αυτού του τύπου λειτουργούν καλύτερα όταν έχει ήδη εισαχθεί αρχική μετατόπιση (offset) της τάξης των λίγων μm [20], επιλέχθηκε να εισαχθεί offset 3 μm (= 20V DC). Η συχνότητα δόνησης του καθρέπτη συνέπιπτε με αυτήν της δόνησης του υπό μελέτη αντικειμένου. Η φάση δόνησης του καθρέπτη άλλαζε ρυθμίζοντας το offset της κυματομορφής τάσης οδήγησης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Με αυτό τον τρόπο, ήταν δυνατή η αλλαγή φάσης με επαρκή ακρίβεια.

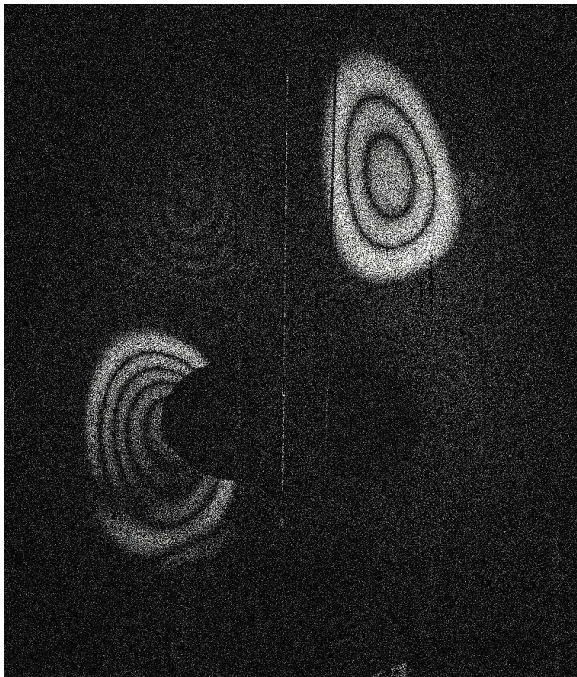
Στα σχήματα 12 και 13 παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα εφαρμογής της παραπάνω τεχνικής στην περίπτωση κανονικών τρόπων ταλάντωσης λύρας τύπου Σταγάκη σε συχνότητες 1290Hz και 1663Hz. Η αλλαγή φάσης δόνησης του καθρέπτη που επέτρεψε τον προσδιορισμό της φάσης δόνησης της λύρας αντιστοιχούσε σε αλλαγή του offset κατά ~0,15 μm (~1V DC).



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 12: (α) Συμβολόγραμμα του κανονικού τρόπου ταλάντωσης σε συχνότητα 1290Hz για τη λύρα τύπου Σταγάκη πριν την εφαρμογή διαμόρφωσης φάσης. (β) και (γ) μετά την εφαρμογή διαμόρφωσης φάσης, αλλάζοντας το πλάτος δόνησης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου κατά $\sim 0,15\mu\text{m}$ και $\sim 0,30\mu\text{m}$ αντίστοιχα.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 13: (α) Συμβολόγραμμα του κανονικού τρόπου ταλάντωσης σε συχνότητα 1663Hz για τη λύρα τύπου Σταγάκη πριν την εφαρμογή διαμόρφωσης φάσης. (β) και (γ) μετά την εφαρμογή διαμόρφωσης φάσης, αλλάζοντας το πλάτος δόνησης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου κατά $\sim 0,15\mu\text{m}$ και $\sim 0,30\mu\text{m}$ αντίστοιχα.

Από τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα είναι προφανής η απόλυτα επιτυχημένη εφαρμογή της διαμόρφωσης φάσης και η επίτευξη του αρχικού στόχου, καθώς είναι ξεκάθαρος ο προσδιορισμός των περιοχών του αντικειμένου που ταλαντώνονται σε φάση και εκτός φάσης μεταξύ τους (180° διαφορά φάσης).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκαν τροποποιημένες πειραματικές διατάξεις ολογραφικής συμβολομετρίας ESPI με στόχο την αντιμετώπιση περιορισμών της υφιστάμενης διάταξης χρονικά ολοκληρωμένης ESPI του Εργαστηρίου Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής. Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί της υφιστάμενης διάταξης συνίστανται: (i) στην αδυναμία καταγραφής μεγάλων πλατών δόνησης αντικειμένων, καθώς τα προκύπτοντα συμβολογράμματα εμφανίζουν διαμόρφωση των κροσσών με συνάρτηση Bessel $|J_0(\Gamma A)|$, δηλαδή οι φωτεινοί κροσσοί έχουν ολοένα και μειούμενη φωτεινότητα. Το πλάτος δόνησης εξάγεται από την καταμέτρηση των κροσσών, το οποίο σημαίνει ότι για μεγάλα πλάτη ταλάντωσης το συμβολόγραμμα εμφανίζει τόσο μεγάλη πυκνότητα κροσσών που αυτοί καθίστανται πλέον μη διακριτοί. (ii) στην αδυναμία καταγραφής της φάσης δόνησης του αντικειμένου, καθώς πρόκειται για χρονικά ολοκληρωμένη τεχνική και κατά συνέπεια χάνεται η πληροφορία της φάσης.

Έχοντας εξ' αρχής καλά καθορισμένους στόχους, οι λύσεις οι οποίες δόθηκαν για την αντιμετώπιση των παραπάνω ήταν ο συνδυασμός της τεχνικής ESPI με τις τεχνικές της στροβοσκοπίας και της διαμόρφωσης φάσης αντίστοιχα. Για το σκοπό αυτό έγιναν τροποποιήσεις στην υφιστάμενη διάταξη, οι οποίες ήταν:

(α) η χρήση διαμορφωτή δέσμης (optical chopper), ώστε να φωτιστεί στροβοσκοπικά το υπό μελέτη αντικείμενο σε δύο σημεία του κύκλου δόνησής του. Με αυτό τον τρόπο, οι κροσσοί του συμβολογράμματος είναι πλέον διαμορφωμένοι συνημιτονοειδώς, δηλαδή οι φωτεινοί κροσσοί έχουν πάντα την ίδια φωτεινότητα. Αυτό συνεπάγεται την αύξηση του μέγιστου αριθμού μετρούμενων κροσσών, άρα και του μέγιστου ανιχνεύσιμου πλάτους.

(β) η χρήση δονούμενου καθρέπτη για την ανάκλαση της δέσμης αναφοράς, ώστε να εφαρμοστεί η αρχή της διαμόρφωσης φάσης στην υφιστάμενη διάταξη ESPI. Ο καθρέπτης δονούταν με χρήση κατάλληλα προσαρμοσμένου πιεζοηλεκτρικού και η συχνότητα δόνησής του συνέπιπτε με αυτήν του υπό μελέτη αντικειμένου. Με το πλάτος δόνησης του καθρέπτη να αντιστοιχεί σε αυτό του αντικειμένου, ο καθορισμός των περιοχών του αντικειμένου που ταλαντώνονται σε φάση επιτεύχθηκε αλλάζοντας το offset της δόνησης του καθρέπτη.

Από τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα είναι προφανής η επιτυχημένη εφαρμογή των παραπάνω τεχνικών. Αξιολογώντας γενικότερα τα αποτελέσματα και τη διαδικασία

υλοποίησης των παραπάνω, μπορούν να γίνουν κάποια σχόλια σχετικά με τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν και μέσω αυτής της διαδικασίας να προταθούν από το γράφοντα βελτιώσεις των διατάξεων αυτών.

Αυτές κυρίως έχουν να κάνουν με τη διάταξη διαμόρφωσης φάσης και με το γεγονός ότι παρουσιάστηκαν κάποια προβλήματα σταθερότητας στην καταγραφή των συμβολογραμμάτων. Το πρόβλημα εντοπίζεται στη χρήση γεννήτριας συχνοτήτων και τροφοδοτικού περιορισμένων δυνατοτήτων, όχι καλά σταθεροποιημένης εξόδου. Καθώς οι αλλαγές που απαιτούνται για τον καθορισμό της φάσης είναι πολύ μικρές (της τάξης των λίγων μm) είναι προφανές ότι απαιτείται η χρήση καλά σταθεροποιημένων οργάνων οδήγησης. Ο γράφων εκτιμά ότι κάτι τέτοιο θα αποτελούσε δραστική βελτίωση στην πειραματική διαδικασία.

Οι διατάξεις, ως έχουν, δεν επιτρέπουν τη δυναμική μελέτη των αντικειμένων, δηλαδή τη χρονική εξέλιξη της δόνησής τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λοιπόν, θα παρουσίαζε η επέκταση των χρονικά ολοκληρωμένων τεχνικών προς αυτό το σκοπό, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση παλμικών πηγών λέιζερ (δυναμική ESPI). Τέτοιες πηγές είναι διαθέσιμες στο εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας. Στο πλαίσιο μιας τέτοιας εξέλιξης, θα πρέπει να διερευνηθεί το ενδεχόμενο οπτικής διέγερσης των αντικειμένων, που θα μπορούσε να γίνει με χρήση μέρους της ίδιας της δέσμης της παλμικής πηγής λέιζερ που χρησιμοποιείται για την καταγραφή της δόνησης. Αυτό προσφέρει το πλεονέκτημα της πλήρως ελεγχόμενης διέγερσης υπό τις ίδιες πάντα συνθήκες.

Τέλος, με τις υπάρχουσες διατάξεις γίνεται δισδιάστατη καταγραφή της κατανομής του πλάτους δόνησης της επιφάνειας του αντικειμένου. Στην περίπτωση της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI, όπου η φωτεινότητα των κροσσών είναι διαμορφωμένη με συνάρτηση Bessel, το πλάτος εξάγεται σχετικά εύκολα. Στην περίπτωση της δυναμικής ESPI θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να αναπτυχθούν τεχνικές όπου να γίνεται «τρισδιάστατη» καταγραφή του αντικειμένου, με την έννοια της άμεσης εξαγωγής του πλάτους δόνησης σε κάθε σημείο από τα καταγεγραμμένα συμβολογράμματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] H.D. Young, *Πανεπιστημιακή Φυσική, Τόμος Β: Ηλεκτρομαγνητισμός, Κυματική, Οπτική*, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα (1995).
- [2] R.A. Serway, *Physics for scientists and engineers with modern Physics*, Saunders College Publishing, San Francisco (1992).
- [3] E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, San Francisco (2002).
- [4] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Cambridge University Press, Cambridge (1999).
- [5] D. Gabor, *A new microscopic principle*, Nature **161**, pp. 777 – 778 (1948).
- [6] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
- [7] J.N. Butters and J.A. Leendertz, *Holographic and video techniques applied to engineering measurement*, J. Meas. Control **4**, pp. 349 – 354 (1971).
- [8] J.A. Leendertz, *Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect*, J. Phys. E: Scientific Instruments **3**, pp. 214 – 218 (1970).
- [9] E.R. Robertson and J.M. Harvey (Eds.), *The engineering uses of holography*, Proceedings of the Symposium, University of Strathclyde, Cambridge University Press, Cambridge (1970).
- [10] K. Biedermann and L. Ek, *A recording and display system for hologram interferometry with low resolution imaging devices*, J. Phys. E: Scientific Instruments **8**, pp. 571 – 576 (1975).
- [11] O.J. Løkberg and K. Høgmoen, *Vibration phase mapping using electronic speckle pattern interferometry*, Appl. Opt. **15**, pp. 2701 – 2704 (1976).
- [12] K. Høgmoen and O.J. Løkberg, *Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry*, Appl. Opt. **16**, pp. 1869 – 1875 (1977).
- [13] P. Meinschmidt, K.D. Hinsch and R.S. Sirohi (Eds.), *Selected papers on electronic speckle pattern interferometry*, SPIE MS132, SPIE, Bellingham (1996).
- [14] N.E. Molin, *Applications of whole field interferometry in mechanics and acoustics*, Opt. Lasers Eng. **31**, pp. 93-111 (1999).
- [15] P.K. Rastogi (Ed.), *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester (2001).

- [16] C-H. Huang and C-C. Ma, *Experimental and numerical investigations of resonant vibration characteristics for piezoceramic plates*, J. Acoust. Soc. Am. **109**, pp. 2780-2788 (2001).
- [17] H.M. Pedersen, O.J. Løkberg and B.M. Førre, *Holographic vibration measurement using a TV speckle interferometer with silicon target vidicon*, Opt. Commun. **12**, pp. 421 – 426 (1974).
- [18] O.J. Løkberg, *ESPI – The ultimate holographic tool for vibration analysis?*, J. Acoust. Soc. Am. **75**, pp. 1783-1791 (1984).
- [19] C.C. Aleksoff, *Temporally modulated holography*, Appl. Opt. **15**, 1329-1341 (1971).
- [20] O.J. Løkberg and K. Høgmoen, *Use of modulated reference wave in electronic speckle pattern interferometry*, J. Phys. E **9**, 847-851 (1976).
- [21] Ιωάννης Ορφανός, *Οπτική προφίλομετρία λευκού φωτός*, MSc Thesis, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ηράκλειο (2008).