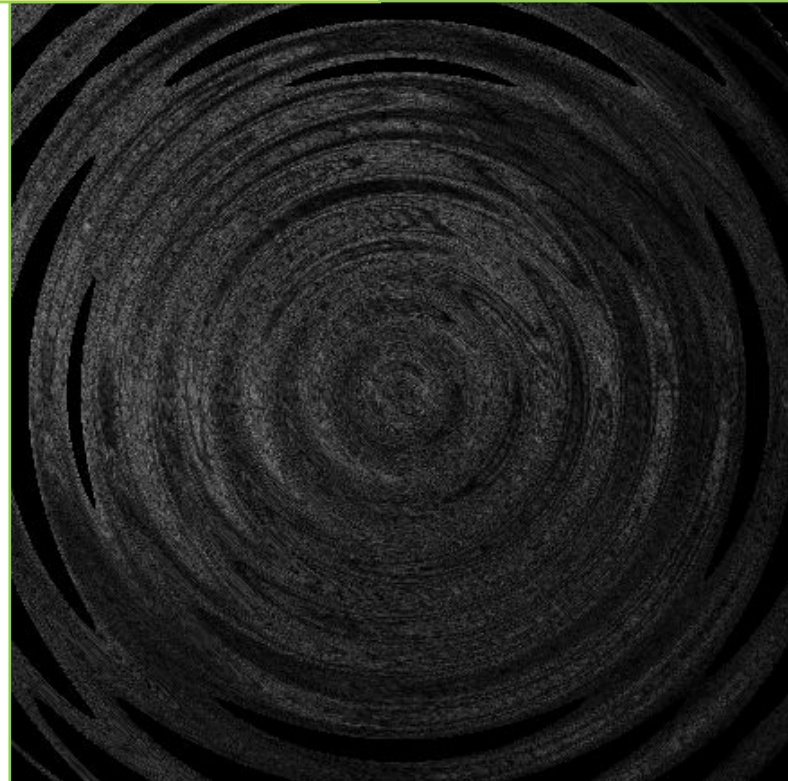




ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ &
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

Ανίχνευση κίνησης και δονήσεων με
συμβολομετρικές οπτικές τεχνικές



Μαργιορή Τσιούντα

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Δρ Ευθύμιος Μπακαρέζος,

Δρ Νεκτάριος Παπαδογιάννης

Ρέθυμνο, Σεπτέμβριος 2009

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Ευχαριστίες	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ & ΣΥΣΚΕΥΕΣ	8
2.1. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ	8
2.1.1. Συμφωνία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	9
2.1.2. Συμβολόμετρο Michelson	10
2.2. ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ	12
2.3. ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ	14
2.4. ΧΡΟΝΙΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ESPI	15
2.4.1. Μαθηματική περιγραφή χρονικά ολοκληρωμένης ESPI	17
2.5. ΔΥΝΑΜΙΚΗ (ΠΑΛΜΙΚΗ) ESPI	19
2.5.1. Μαθηματική περιγραφή δυναμικής ESPI	20
2.6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	22
2.6.1. Παλμική πηγή λέιζερ	22
2.6.2. Γεννήτρια παλμών	23
2.6.3. CCD κάμερα	24
2.6.4. Κάρτα & ειδικό λογισμικό καταγραφής	25
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	27
3.1. ΧΡΟΝΙΣΜΟΣ	27
3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	30
3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	37
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ	44
4.1. ΤΥΠΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	44
4.2. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	48
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	53
Παράρτημα	54

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η χρονική εξέλιξη της κίνησης δονούμενης επιφάνειας. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε διάταξη δυναμικής ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφιδών (Dynamic ή Pulsed ESPI), όπου χρησιμοποιείται παλμική πηγή λέιζερ και αποτελεί εξέλιξη της υπάρχουσας διάταξης της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI, η οποία προσέφερε τη δυνατότητα στατικής καταγραφής ρυθμών ταλάντωσης μέσω της χρήσης συνεχούς πηγής λέιζερ. Η διάταξη αυτή, εκτός από το οπτικό μέρος, περιλάμβανε και ηλεκτρονικό σύστημα χρονικού ελέγχου των επιμέρους συσκευών για το συγχρονισμό των λειτουργιών τους. Η απαίτηση ακρίβειας στον συγχρονισμό των συσκευών βασίστηκε στον πολύ σύντομο χρόνο εξέλιξης του υπό μελέτη φαινομένου, που είναι της τάξεως από μερικά μs έως μερικά ms. Μέσω των παραπάνω διατάξεων μελετήθηκε η διάδοση ελαστικών κυμάτων σε πρότυπες επιφάνειες, που διεγέρθηκαν κρουστικά με ελεγχόμενο τρόπο από ειδικό μηχανικό σύστημα που κατασκευάστηκε. Τα αποτελέσματα δείχνουν την καταλληλότητα της αναπτυχθείσας διάταξης για την μελέτη της χρονικής εξέλιξης δονούμενου συστήματος.

Ευχαριστίες

Η παρούσα πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε χάρη στη συνεισφορά πολλών ατόμων. Πρώτο θέλω να ευχαριστήσω τον Προϊστάμενο του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής και συνεπιβλέποντα Καθηγητή Δρ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την πτυχιακή αυτή εργασία, καθώς και για τα εύστοχα σχόλιά του. Ακόμη θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον συνεπιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή Δρ. Ευθύμιο Μπακαρέζο για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράστασή του στην διεκπεραίωση της παρούσας μελέτης και της συγγραφής αυτής. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον βασικό σύμβουλο και συντελεστή της εφαρμοζόμενης πειραματικής διάταξης, κ. Ιωάννη Ορφανό, του οποίου η βοήθεια ήταν καθοριστική.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συμβολομετρικές τεχνικές, καθώς και τεχνικές ολογραφικής συμβολομετρίας, με χρήση πηγών λέιζερ εφαρμόζονται πλέον ευρέως για την ανίχνευση κίνησης και δονήσεων, ιδιαίτερα μετά την ανάπτυξη της ψηφιακής κάμερας και του Η/Υ, καθώς προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων παραδοσιακών τεχνικών [R.S. Sirohi, *Speckle Interferometry*, Contemporary Physics **43**, p.p. 161-180 (2002)] . Αυτά περιλαμβάνουν την μεγάλη χωρική διακριτική ικανότητα (της τάξης των μm), τη δυνατότητα απεικόνισης δονούμενων επιφανειών σε πραγματικό χρόνο (on-line), ενώ είναι μη-καταστρεπτικές και δεν απαιτούν επαφή μηχανικών μερών με το υπό μελέτη αντικείμενο.

Μια τέτοια τεχνική είναι η ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI). Τέτοια τεχνική χρονικά ολοκληρωμένης ESPI, στην οποία γίνεται χρήση πηγής λέιζερ συνεχούς μήκους κύματος (CW), έχει ήδη αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, και έχουν μελετηθεί, κατά κύριο λόγο, τα δονητικά χαρακτηριστικά διαφόρων μουσικών οργάνων [M. Bakarezos, S. Gymnopoulos, S. Brezas, Y. Orphanos, E. Maravelakis, C.I. Papadopoulos, M. Tatarakis, A. Antoniadis, N.A. Papadogiannis, *Vibration analysis of the top plates of traditional Greek string musical instruments*, 13th International Congress of Acoustics and Vibration (ICSV13), Vienna, Austria, 2-6 July 2006, CD-ROM Proceedings, EDS.: J. Eberhardsteiner, H.A. Mang and H. Waubke (2006), B. Βάθης, E. Μπακαρέζος, I. Ορφανός, N.A. Παπαδογιάννης, *Ακουστική μελέτη πιστής ανακατασκευής της αρχαίας ελληνικής λύρας χέλυς*, Ακουστική 2008, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, Ελλάδα, 29 Σεπτεμβρίου - 1 Οκτωβρίου 2008, Πρακτικά Σ.Σ. 173-181, Εκδ.:N. Μπάρκας (2008), Σ. Γυμνόπουλος, E. Μπακαρέζος, B. Βάθης, Λ. Χαρτοφύλακας, Σ. Μπρέζας, I. Ορφανός, E. Μαραβελάκης, X. Παπαδόπουλος, M. Ταταράκης, A. Αντωνιάδης, N.A. Παπαδογιάννης, *Ακουστική και συμβολομετρική ανάλυση της Κρητικής λύρας*, Ακουστική 2006. I.T.E., Ηράκλειο, Ελλάδα, 18-19 Σεπτεμβρίου 2006, Πρακτικά Σ.Σ. 239-246, Εκδ.: M. Ταρουδάκης & Π. Παπαδάκης (2006)] .Η τεχνική αυτή, ωστόσο, δεν επιτρέπει τη δυναμική μελέτη (χρονική εξέλιξη) φαινομένων.

Για το σκοπό αυτό, τα τελευταία χρόνια στις διατάξεις ESPI χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο λέιζερ παλμικής εκπομπής φωτός [F. Chen, W.D. Luo, M. Dale, A. Petniunas, P. Harwood, G.M. Brown, *High-speed ESPI and related techniques: overview and its application in the automotive industry*, Opt. Las. Eng. **40**, p.p. 459-485 (2003), H. Van der Ausweraer, H. Steinbichler, S. Vanlanduit, C. Haberstock, R. Freymann, D. Storer, V. Linet, *Application of stroboscopic and pulsed-laser electronic speckle pattern interferometry (ESPI) to modal analysis problems*, Meas. Sci. Technol. **13**, p.p. 451-463 (2002)], σε αντικατάσταση των λέιζερ συνεχούς εκπομπής. Η νέα τεχνική καλείται δυναμική ή παλμική (dynamic or pulsed) ESPI και δίνει τη δυνατότητα της μελέτης της χρονικής εξέλιξης φαινομένων με πολύ μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα. Οι δυνατότητές της έχουν επεκταθεί σε 3-D μετρήσεις δυναμικής απόκρισης και ανάλυσης δονήσεων σε διεγερμένα αντικείμενα. Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική, έχουν σχεδιαστεί συστήματα ανίχνευσης αλλοιώσεων σε κίνηση σε ελεγχόμενα δονούμενα αντικείμενα. Η ανάλυση των συμβολογραμμάτων των αντικειμένων που καταγράφονται με την δυναμική ESPI δίνει επίσης τη δυνατότητα λεπτομερούς χαρτογράφησης των αλλοιώσεων και της χρονικής εξέλιξης αυτών στο υλικό του υπό παρατήρηση αντικειμένου [H. Van der Auweraer, H. Steinbichler, C. Haberstock, R. Freymann, D. Storer, V. Linet, *Industrial applications of pulsed-laser espi vibration analysis*, Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering **4359**, p.p. 490-496 (2001)]. Με σωστά εφαρμοσμένη διέγερση του υπό μελέτη αντικειμένου, η προκύπτουσα δόνηση σε αυτό φανερώνει τυχόν φθορές, είτε στο υλικό της επιφάνειάς του, είτε στο υλικό του υποστρώματός του.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση πειραματικής διάταξης δυναμικής ESPI, με απώτερο στόχο την επίδειξη καταλληλότητάς της για τη μελέτη της χρονικής εξέλιξης δονούμενου συστήματος. Στη διάταξη αυτή χρησιμοποιείται παλμική πηγή λέιζερ με χρονική διάρκεια παλμού δt , ώστε να καταστεί δυνατή η ανίχνευση της κίνησης μιας μηχανικά διεγερμένης επιφάνειας σε μικρές χρονικές κλίμακες (της τάξης των $\mu\text{s/ms}$).

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι έννοιες και τα φαινόμενα στα οποία βασίζεται η αρχή λειτουργίας τέτοιων διατάξεων, και συγκεκριμένα η συμβολή του φωτός, η χωρική και χρονική συμφωνία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, καθώς και το συμβολόμετρο Michelson, η ολογραφία και η ολογραφική συμβολομετρία. Οι αρχές λειτουργίας και οι μαθηματικές περιγραφές των τεχνικών της χρονικά

ολοκληρωμένης και της δυναμικής ESPI παρουσιάζονται στη συνέχεια. Στο ίδιο κεφάλαιο ακολουθούν οι περιγραφές των βασικών ηλεκτρονικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για τη μελέτη της χρονικής εξέλιξης φαινομένων, όπως είναι η διάδοση μίας κίνησης σε ένα ελεγχόμενο διεγερμένο αντικείμενο. Στη συνέχεια αναλύεται η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για τον χρονισμό των χρησιμοποιηθέντων συσκευών και περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την καταγραφή της εξέλιξης της κίνησης σε πρότυπη επιφάνεια. Επίσης, προσδιορίζεται πειραματικά η ταχύτητα της διάδοσης της διέγερσης στην επιφάνεια αυτή.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα τυπικά πειραματικά αποτελέσματα και γίνεται η ανάλυση της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στην μελετούμενη επιφάνεια, καθώς επίσης υπολογίζεται και η συχνότητα αυτών. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 γίνεται η σύνοψη του συνόλου της πειραματικής αυτής μελέτης και παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις της γράφουσας για μελλοντική έρευνα και εξέλιξη της αναπτυχθείσας διάταξης, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε πιο λεπτομερή μελέτη της χρονικής εξέλιξης δονούμενων συστημάτων.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ & ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται η έννοια της συμβολής του φωτός και περιγράφονται οι δύο έννοιες της χωρικής και χρονικής συμφωνίας, που αποτελούν βασικά στοιχεία μίας δέσμης λέιζερ που χρησιμοποιείται για τέτοιους σκοπούς. Παρουσιάζεται το συμβολόμετρο Michelson, η τεχνική της ολογραφίας και της ολογραφικής συμβολομετρίας, που χρησιμοποιείται για την μελέτη των μεταβολών που συμβαίνουν στην ομαλή ή μη επιφάνεια ενός αντικειμένου. Εν συνεχεία περιγράφεται η αρχή λειτουργίας και η μαθηματική θεώρηση της τεχνικής της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI, όπου χρησιμοποιείται λέιζερ συνεχούς εκπομπής φωτός, και της τεχνικής της δυναμικής ESPI, όπου χρησιμοποιείται λέιζερ παλμικής εκπομπής φωτός, ενώ και οι δύο τεχνικές αξιοποιούνται για την μελέτη δονούμενων συστημάτων. Ακολουθούν οι περιγραφές των βασικών ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη του παρόντος πειραματικού σκοπού.

2.1. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Η συμβολή των κυμάτων φωτός είναι αποτέλεσμα της γραμμικής υπέρθεσης δύο ή περισσότερων κυμάτων στο ίδιο σημείο [1]. Για την ξεκάθαρη παρατήρηση του φαινομένου της συμβολής του φωτός πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Πρώτον, οι πηγές που εκπέμπουν τα κύματα φωτός που θα συμβάλλουν πρέπει να είναι σύμφωνες. Δεύτερον, οι πηγές αυτές πρέπει να είναι μονοχρωματικές, δηλαδή να εκπέμπουν ένα μόνο μήκος κύματος φωτός το οποίο θα είναι το ίδιο και για τις δύο πηγές. Και τρίτον, πρέπει να ισχύει η αρχή της γραμμικής επαλληλίας.

Αν δύο φωτεινές πηγές σύμφωνου φωτός τοποθετηθούν σε απόσταση d μεταξύ τους και μία οθόνη σε απόσταση L από τις πηγές, θα παρατηρήσουμε μία εικόνα συμβολής πάνω στην οθόνη, που αποτελείται από φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς. Για να παρατηρηθούν οι φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί, πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες της ενισχυτικής και καταστρεπτικής συμβολής. Όταν τα φωτεινά κύματα των πηγών συμβάλλουν ενισχυτικά, δηλαδή το πλάτος του συνιστάμενου κύματος είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του ενός ή του άλλου των συμβαλλόντων κυμάτων, δημιουργούν φωτεινό κροσσό. Όταν συμβάλλουν

καταστρεπτικά, δηλαδή το πλάτος του συνιστάμενου κύματος είναι μικρότερο από το πλάτος του ενός ή του άλλου των συμβαλλόντων κυμάτων, δημιουργούν σκοτεινό κροσσό. Για την ικανοποίηση της ενισχυτικής συμβολής, πρέπει να ισχύει:

$$n d \sin \theta = m \lambda \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.1)$$

Για την ικανοποίηση της καταστρεπτικής συμβολής, πρέπει να ισχύει:

$$n d \sin \theta = (m + 1/2) \lambda \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.2)$$

όπου $n d \sin \theta$ η διαφορά οπτικού δρόμου (n ο δείκτης διάθλασης του μέσου διάδοσης), λ το μήκος κύματος και m ακέραιος.

2.1.1. Συμφωνία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

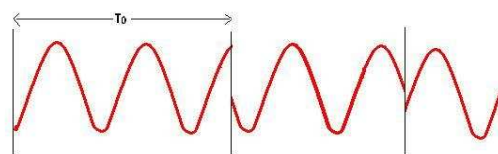
Ιδιαίτερη μνεία αξίζει η έννοια της συμφωνίας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Για κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορούμε να εισαγάγουμε δύο έννοιες συμφωνίας, τη χωρική και τη χρονική.

Για τον ορισμό της χωρικής θεωρούμε δύο σημεία P_1 και P_2 τα οποία, στο χρόνο $t=0$ βρίσκονται πάνω στο ίδιο κυματομέτωπο δεδομένου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Παίρνουμε τα αντίστοιχα για το κάθε σημείο ηλεκτρικά πεδία $E_1(t)$ και $E_2(t)$. Η διαφορά μεταξύ των φάσεων των δύο πεδίων στο χρόνο $t=0$ είναι μηδέν. Αν αυτή η διαφορά παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή $t>0$, λέμε ότι υπάρχει τέλεια συμφωνία μεταξύ των δύο σημείων. Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε δύο σημεία του ηλεκτρομαγνητικού μετώπου, λέμε πως το κύμα έχει ιδανική χωρική συμφωνία. Στην πράξη, για κάθε σημείο P_1 , το σημείο P_2 πρέπει να βρίσκεται μέσα σε κάποια πεπερασμένη περιοχή γύρω από το P_1 για να έχουμε καλό φυσικό συσχετισμό. Σ' αυτήν την περίπτωση λέμε πως το κύμα έχει μερική χωρική συμφωνία και για κάθε σημείο P μπορούμε να εισαγάγουμε μια κατάλληλα ορισμένη περιοχή συμφωνίας.

Για τον ορισμό της χρονικής συμφωνίας θεωρούμε το ηλεκτρικό πεδίο του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα δεδομένο σημείο P σε 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 , λέμε πως υπάρχει χρονική συμφωνία για ένα χρονικό διάστημα τ . Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε τιμή του τ , το ηλεκτρομαγνητικό κύμα λέγεται πως έχει τέλεια χρονική συμφωνία. Εάν αυτό

συμβαίνει για χρονική υστέρηση τ τέτοια ώστε $0 < \tau < \tau_0$, το κύμα λέγεται πως έχει μερική χρονική συμφωνία, με χρόνο συμφωνίας ίσο προς τ_0 .

Ένα παράδειγμα ηλεκτρομαγνητικού κύματος με χρόνο συμφωνίας ίσο προς τ_0 φαίνεται στο σχήμα 2.1. Αυτό δείχνει ένα ημιτονοειδές ηλεκτρικό πεδίο που υφίσταται φασικά πηδήματα σε χρονικά διαστήματα ίσα προς τ_0 . Η έννοια της χρονικής συμφωνίας συνδέεται άμεσα με τη μονοχρωματικότητα [2].

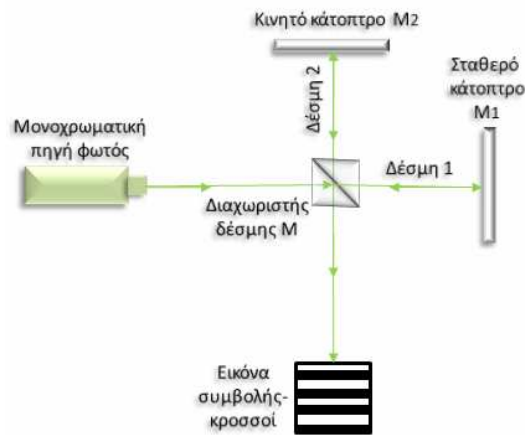


Σχήμα 2.1: Παράδειγμα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος με χρόνο συμφωνίας περίπου τ_0

Οι δύο έννοιες της χρονικής και χωρικής συμφωνίας είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Υπάρχουν παραδείγματα κυμάτων που έχουν τέλεια χωρική συμφωνία, αλλά μόνο περιορισμένη χρονική ή και το αντίστροφο. Αν στο σχήμα 2.1 αναπαριστάνονταν τα ηλεκτρικά πεδία στα σημεία P_1 και P_2 που αναφέρθηκαν πιο πάνω, η χωρική συμφωνία μεταξύ αυτών των σημείων θα ήταν πλήρης, ενώ το κύμα θα είχε περιορισμένη χρονική συμφωνία.

2.1.2. Συμβολόμετρο Michelson

Το συμβολόμετρο Michelson αποτελεί μία επινόηση του τελευταίου μέρους του δεκάτου ενάτου αιώνα από τον Αμερικανό φυσικό A.A. Michelson (1852-1931) και αποτελεί το πιο ευρέως διαδεδομένο συμβολόμετρο [3]. Στο σχήμα 2.2. δίνεται η χρησιμοποιούμενη διάταξη του συμβολόμετρου αυτού.



Σχήμα 2.2: Συμβολόμετρο Michelson

Η αρχή λειτουργίας του έχει ως εξής: μία μονοχρωματική δέσμη φωτός διαιρείται στα δύο από έναν διαχωριστή δέσμης M , που σχηματίζει γωνία 45° με την κατεύθυνση της αρχικής δέσμης. Μέρος του φωτός της δέσμης (δέσμη 2) ανακλάται από την επιφάνεια του διαχωριστή δέσμης M προς το κινητό κάτοπτρο M_2 και επιστρέφει μέσω του M προς μία επιφάνεια συμβολής. Το υπόλοιπο φωτεινό μέρος της δέσμης (δέσμη 1) περνά από τον διαχωριστή δέσμης M και στη συνέχεια ανακλάται από το σταθερό κάτοπτρο M_1 , επιστρέφοντας κι αυτή μέσω του M στην επιφάνεια συμβολής. Έτσι, η δέσμη της φωτεινής πηγής αρχικά διαιρείται στα δύο, και στη συνέχεια κάθε μέρος της ακολουθεί μια δική του ξεχωριστή διαδρομή, για να καταλήξουν τελικά να ενωθούν δημιουργώντας μια εικόνα συμβολής.

Η εικόνα συμβολής των δύο δεσμών καθορίζεται από τη διαφορά οπτικού δρόμου, δηλαδή τις δύο οπτικές διαδρομές που ακολουθούν οι δέσμες και αποτελείται από φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς. Όταν στο κέντρο υπάρχει σκοτεινός κροσσός, τότε οι δύο ακτίνες συμβάλλουν καταστρεπτικά. Εάν μετακινήσουμε το κάτοπτρο M_2 κατά απόσταση ίση προς $\lambda/4$, η διαφορά διαδρομής των δύο ακτινών μεταβάλλεται κατά $\lambda/2$ και τότε αυτές συμβάλλουν ενισχυτικά, παράγοντας έναν φωτεινό κυκλικό κροσσό στο κέντρο της εικόνας. Συνεχίζοντας τη μετακίνηση του M_2 κατά ακόμη $\lambda/4$, τότε θα εμφανιστεί και πάλι στο κέντρο σκοτεινός κροσσός κ.ο.κ. Έτσι κάθε φορά που μετακινούμε το M_2 , θα εναλλάσσονται φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί.

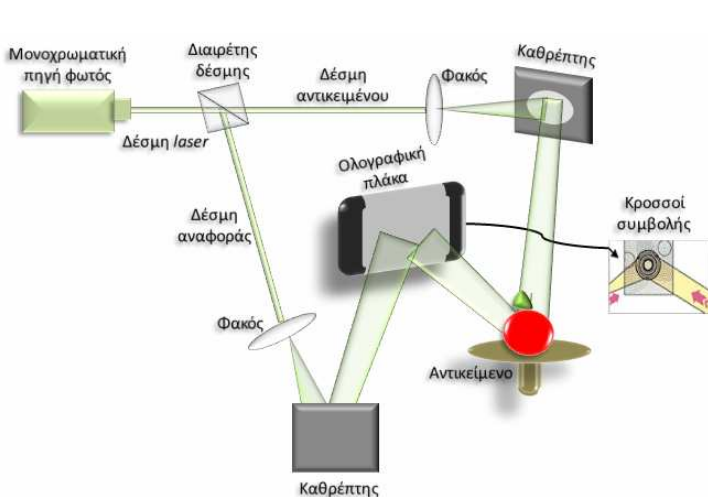
Έτσι, σε περίπτωση που χρησιμοποιείται δέσμη λέιζερ ως μονοχρωματική πηγή φωτός, αυτό θα πρέπει να εκπέμπει δέσμη ενός μήκους κύματος. Εν γένει, τα λέιζερ δίνουν ακτινοβολία που δεν είναι απόλυτα μονοχρωματική. Ιδιαίτερα οι παλμικές

πηγές λέιζερ έχουν φασματικό εύρος της τάξης των μερικών δεκάτων του nm (έως και δεκάδων σε ορισμένες περιπτώσεις, δηλαδή 0,1–100nm). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζεται μόνιμο σχήμα συμβολής, το οποίο σε περιπτώσεις χρήσης συμβολομετρικών ή/και ολογραφικών τεχνικών (π.χ. ESPI) για τη μελέτη δονούμενων αντικειμένων είναι ανεπιθύμητο και εμφανίζεται ως «θόρυβος» στο σχήμα συμβολής που καταγράφεται, οφειλόμενο στη δόνηση του αντικειμένου. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων γίνεται χρήση λέιζερ (συνεχούς μήκους κύματος ή παλμικών) μονού διαμήκους ρυθμού (single longitudinal mode), το οποίο επιτυγχάνεται με τεχνικές η περιγραφή των οποίων είναι έξω από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Αυτές οι πηγές λέιζερ παρουσιάζουν και μεγάλο μήκος συμφωνίας, το οποίο είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε ολογραφικές εφαρμογές [2]. Οι πηγές λέιζερ που ήταν διαθέσιμες στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας και χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία ήταν παλμικές, αλλά και μονού διαμήκους ρυθμού, πράγμα εξαιρετικά χρήσιμο.

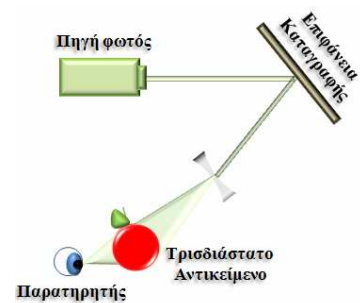
2.2. ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

Η λέξη ολογραφία προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις «όλος» και «γραφή», και σημαίνει την καταγραφή του συνόλου της οπτικής πληροφορίας. Η οπτική ολογραφία επινοήθηκε αρχικά από τον Denis Gabor το 1947, αλλά η ουσιαστική ανάπτυξη της μεθόδου πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1960, όπου σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τα πρώτα λέιζερ. Οι απεικονίσεις της μεθόδου αυτής ονομάζονται ολογράμματα και παρουσιάζουν τις τρεις διαστάσεις του αντικειμένου. Στη δημιουργία ολογράμματος η φωτεινή ακτινοβολία που φωτίζει το αντικείμενο προέρχεται από το λέιζερ και δεν είναι μία, αλλά δύο ξεχωριστές δέσμες, έτσι ώστε να μην καταγράφεται μόνο η κατανομή της έντασης του φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο, αλλά και η αντίστοιχη κατανομή της φάσης του.

Το σχήμα 2.3 αναπαριστά την διαδρομή της δέσμης της μονοχρωματικής πηγής φωτός, καθώς και τα οπτικά όργανα που χρησιμοποιούνται κατά την ολογράφηση ενός αντικειμένου και το σχήμα 2.4 αναπαριστά τη διάταξη ανακατασκευής του ολογραφημένου αντικειμένου.



Σχήμα 2.3: Διάταξη των οπτικών οργάνων κατά την ολογράφηση ενός αντικειμένου



Σχήμα 2.4: Διάταξη ανακατασκευής του αντικειμένου

Η σύμφωνη, μονοχρωματική δέσμη λέιζερ διαχωρίζεται σε δύο μέσω ενός διαχωριστή δέσμης. Η μία δέσμη στέλνεται στο αντικείμενο και ανακλάται από αυτό. Στη συνέχεια η δέσμη αυτή φτάνει σε ένα ειδικό φιλμ με φωτοευαίσθητη επιφάνεια, όπου και καταγράφεται. Η δεύτερη φτάνει στο φιλμ ακολουθώντας άλλη διαδρομή και μη ερχόμενη σε επαφή με το αντικείμενο. Η πρώτη δέσμη λέγεται δέσμη του αντικειμένου (object) και η δεύτερη δέσμη αναφοράς (reference). Στο σημείο όπου οι δύο δέσμες συναντιούνται αποτυπώνονται οι κροσσοί συμβολής. Στη διάταξη του σχήματος 2.3 φαίνονται καθαρά οι πορείες των δύο δεσμών ακτινοβολίας του λέιζερ, όπως και η περιοχή συνάντησής τους, στην επιφάνεια της ολογραφικής πλάκας, εκεί που οι δύο δέσμες συμβάλλουν. Στο χαρακτηριστικό διάγραμμα συμβολής που δημιουργείται καταγράφεται η συνολική πληροφορία του αντικειμένου, αφού τυχόν μεταβολές του θα προκαλέσουν μεταβολές στη φάση της δέσμης.

Στη συνέχεια, φωτίζοντας κατάλληλα το ολόγραμμα, και λόγω του ότι ένταση και φάση ανακατασκευάζονται πλήρως, βλέπουμε το τρισδιάστατο είδωλο του αντικειμένου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, κατά την ανακατασκευή του αντικειμένου, αυτό απομακρύνεται και η επιφάνεια που έχει καταγεγραμμένο το διάγραμμα φωτίζεται με μία δέσμη ανακατασκευής, όμοια με τη δέσμη αναφοράς.

Μια ολογραφία ενός αντικειμένου για να είναι επιτυχημένη πρέπει [4]:

α) οι θέσεις του αντικειμένου, της πλάκας και της δέσμης λέιζερ να είναι σταθερές για το χρονικό διάστημα που διεξάγεται η έκθεση στην φωτογραφική πλάκα. Οπότε αντικείμενο, πλάκα και λέιζερ πρέπει να είναι τοποθετημένα σε περιοχές που δεν επιδέχονται δονήσεις. Αυτό γιατί, αν οι θέσεις τους μεταβληθούν σε απόσταση μεγαλύτερη από το μισό μήκος κύματος του λέιζερ, θα δημιουργηθεί επάνω στην πλάκα αμαύρωση της συμβολής.

β) η διακριτική ικανότητα της φωτογραφικής πλάκας να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μπορεί να γίνει καταγραφή των κροσσών συμβολής, ακόμη κι αν αυτοί είναι τόσο μικροσκοπικοί που να μην διακρίνονται με γυμνό μάτι. Για τον λόγο αυτό συνήθως χρησιμοποιείται μια γυάλινη πλάκα ως ολογραφική, που καλύπτεται από ειδικό φωτογραφικό γαλάκτωμα, του οποίου η υφή είναι πολύ λεπτή, ακριβώς για την αποτύπωση κάθε είδους κροσσού συμβολής.

γ) Το μήκος συμφωνίας (coherence length) της δέσμης του λέιζερ να είναι το σωστό, ώστε να σχηματιστούν οι κροσσοί συμβολής στην φωτογραφική πλάκα. Συνήθως το μήκος συμφωνίας ορίζεται ως η διαφορά 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:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.3)$$

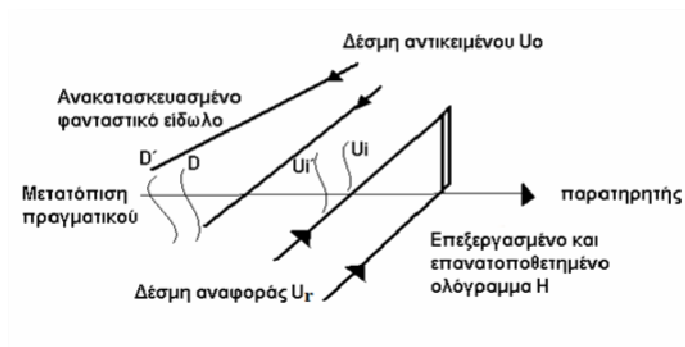
όπου I_{\max} και I_{\min} η μέγιστη και η ελάχιστη ένταση των κροσσών αντίστοιχα.

2.3. ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

Η τεχνική της ολογραφικής συμβολομετρίας αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές τεχνικές για την μελέτη των μεταβολών που συμβαίνουν στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Προκύπτει από την αρχή της ολογραφίας και δεν περιορίζεται από την ομαλότητα ή μη της υπό μελέτη επιφάνειας, όπως η κλασσική συμβολομετρία [4]. Δηλαδή, μέσω της τεχνικής αυτής μπορούμε να διεξάγουμε τη συμβολομετρική ανάλυση στατικών και δυναμικών αλλαγών μιας οπτικά μη ομαλής επιφάνειας.

Στο σχήμα 2.5 αναπαρίσταται τυπικό παράδειγμα ολογραφικής συμβολομετρίας και συγκεκριμένα η τεχνική της απλής έκθεσης ή πραγματικού χρόνου. Η τεχνική

αυτή εξυπηρετεί στο να ανιχνεύσουμε την κίνηση μιας επιφάνειας που σκεδάζεται μέσω της ολογραφικής καταγραφής.



Σχήμα 2.5: Σχηματική απεικόνιση διάταξης ολογραφικής συμβολομετρίας απλής έκθεσης

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην τεχνική της ολογραφίας, το αρχικό αντικείμενο ανακατασκευάζεται (φανταστικό) μέσω της ειδικής επεξεργασίας του ολογράμματός του. Αν το πραγματικό αντικείμενο υποστεί μια μικρή στατική μετατόπιση, που θα δημιουργήσει μια μικρή διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυματομετώπων, τότε παρατηρούνται κροσσοί συμβολής.

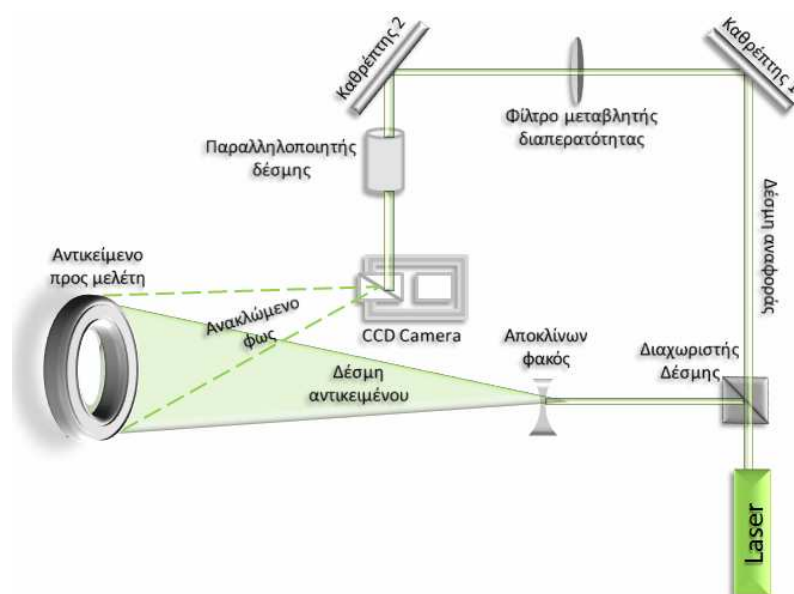
Στη διάταξη του σχήματος 2.5 το αντικείμενο βρίσκεται σε μία σταθερή θέση κατά τον χρόνο των μετρήσεων, για να αποτυπωθεί το ολόγραμμά του H . Στη συνέχεια το ολόγραμμα επιδέχεται επεξεργασία και τοποθετείται στην αρχική του θέση, έτσι ώστε το φανταστικό είδωλο D να επικαλύπτει πλήρως το πραγματικό αντικείμενο. Η U_r είναι η δέσμη αναφοράς. Το μετατοπισμένο αντικείμενο D' φωτίζεται με την δέσμη του αντικειμένου U_o . Το κυματομέτωπο U_i είναι αυτό του ανακατασκευασμένου φανταστικού ειδώλου και το U_i' είναι το σκεδασμένο κυματομέτωπο από το μετατοπισμένο αντικείμενο. Αυτά τα δύο κυματομέτωπα συμβάλλουν για να δώσουν κροσσούς συμβολής, η μορφή των οποίων εξαρτάται από την γεωμετρία της μετατόπισης και τη θέση παρατήρησης.

2.4. ΧΡΟΝΙΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ESPI

Μία τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας είναι και η ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων (ESPI), που χρησιμοποιείται ευρέως για την μελέτη

δονούμενων επιφανειών. Ο όρος «συμβολομετρία ψηφίδων» χρησιμοποιείται επειδή το ένα από τα συμβάλλοντα πεδία είναι πεδίο ψηφίδων. Το όνομα «ψηφίδα» χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διάστικτης, κοκκιωτής και τυχαίας φύσης της κατανομής της έντασης του φωτός, που παρατηρείται όταν αυτό προσπίπτει σε επιφάνεια που δεν είναι οπτικά επίπεδη.

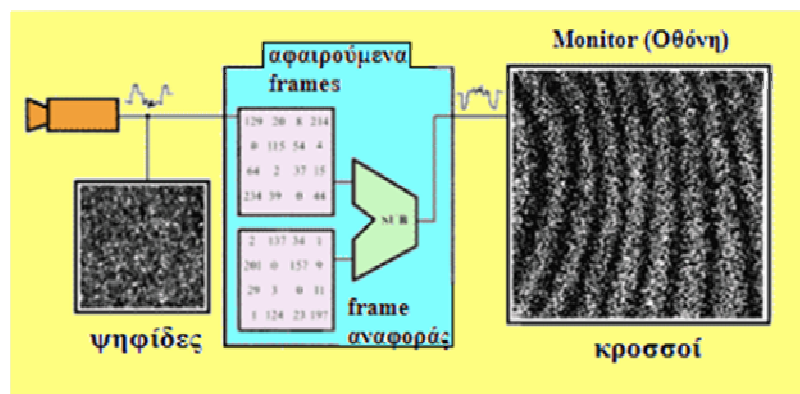
Τεχνική χρονικά ολοκληρωμένης ESPI έχει ήδη αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας, με βάση της οποίας έχει διεξαχθεί μια σειρά πειραμάτων. Η πειραματική της διάταξη περιγράφεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Διάταξη ESPI

Στην τεχνική της ESPI μία δέσμη φωτός λέιζερ χρησιμοποιείται με τρόπο ίδιο με αυτόν που χρησιμοποιείται και στην οπτική διάταξη της ολογραφικής συμβολομετρίας, όπως σε όλες τις τεχνικές ψηφιακής συμβολομετρίας ψηφίδων (π.χ. TV holography, electronic holography, phase-shifting speckle pattern interferometry). Η αρχή λειτουργίας της έχει ως εξής: με τη βοήθεια μίας CCD κάμερας καταγράφονται δύο δέσμες λέιζερ, 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 κάμερα (δέσμη αναφοράς). Ένας αριθμός τέτοιων εικόνων καταγράφεται στην CCD κάμερα (σχήμα 2.7), οι εικόνες αφαιρούνται διαδοχικά, και το αποτέλεσμα είναι ένα συμβολόγραμμα διαμορφωμένο με τη συνάρτηση Bessel. Η τεχνική αυτή δίνει την δυνατότητα της παρατήρησης σε πραγματικό χρόνο της εξέλιξης των μορφών

σηματισμού των κροσσών, οι οποίες σχετίζονται με την αλλοίωση που επιδέχεται η υπό μελέτη επιφάνεια. Χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας και διαχείρισης ψηφιακών εικόνων, η τεχνική ESPI δίνει ως αποτέλεσμα την παρουσίαση μίας ποσοτικής αποτίμησης της διαδικασίας της παραμόρφωσης ενός αντικειμένου.



Σχήμα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση της ESPI τεχνικής που δείχνει τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η χρήση οθόνης για την εμφάνιση σε αυτήν των αφαιρούμενων και συσχετισμένων κροσσών

2.4.1. Μαθηματική περιγραφή χρονικά ολοκληρωμένης ESPI

Για την καλύτερη κατανόηση της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI, παίρνουμε την μαθηματική της περιγραφή. 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:

$$w(x, y, t) = A(x, y) \cos[\omega t + \varphi_0(x, y)] \quad (2.4)$$

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:

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \left\{ I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \left[\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) A \cos(\omega t + \varphi_0) \right] \right\} dt \quad (2.5)$$

όπου I_O και I_R 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. Όταν $\theta \cong 0^\circ$ και θέτοντας $\Gamma = 4\pi/\lambda$ και $\tau = 2m\pi/\omega$, όπου m είναι ακέραιος, και ολοκληρώνοντας από την εξίσωση (2.5) προκύπτει ότι:

$$I_1 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} |(\cos \varphi) J_0(\Gamma A)| \quad (2.6)$$

όπου J_0 είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης πρώτου είδους. Ας σημειωθεί ότι λόγω της χρονικής ολοκλήρωσης, στην εξίσωση (2.6) 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:

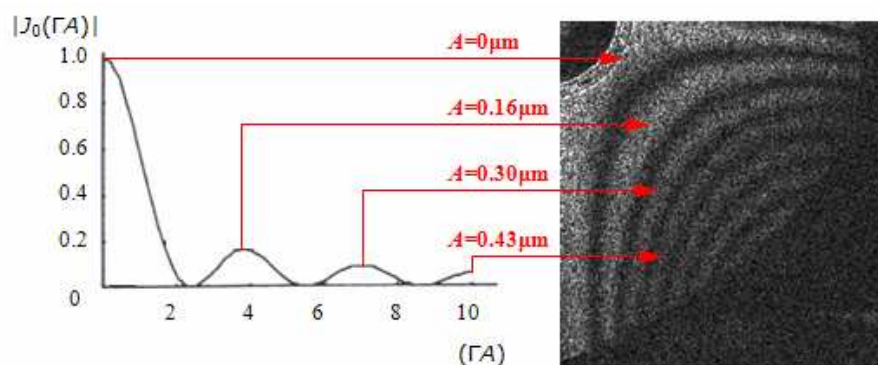
$$I_2 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \left| (\cos \varphi) \left[1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A) \right| \quad (2.7)$$

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

$$I = I_1 - I_2 = \frac{\sqrt{I_O I_R}}{2} |(\cos \varphi) \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A)| \quad (2.8)$$

Από την εξίσωση (2.8) 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 , 1.07λ κ.ο.κ. Στο σχήμα 2.8 απεικονίζεται η

αντιστοιχία αυτή για την περίπτωση συμβολογράμματος ESPI κρητικής λύρας όπου φαίνονται οι υπολογισμένες τιμές πλάτους ταλάντωσης ($\lambda = 532nm$).



Σχήμα 2.8: Αντιστοιχία μεγίστων συνάρτησης Bessel $|J_0(GA)|$ και κατανομής πλάτους ταλάντωσης μετρούμενης με την τεχνική ESPI.

Είναι προφανές, σύμφωνα με τα παραπάνω, ότι οι δύο βασικοί περιορισμοί της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI είναι πρώτον, η απουσία πληροφορίας της φάσης και δεύτερον, ο περιορισμός του μεγίστου ανιχνευόμενου πλάτους, καθώς από κάποιο σημείο κι έπειτα οι κροσσοί γίνονται τόσο πυκνοί που καθίστανται μη ορατοί. Τέλος, τέτοια τεχνική δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δυναμική καταγραφή φαινομένων, δηλαδή για την μελέτη της χρονικής εξέλιξής τους.

2.5. ΔΥΝΑΜΙΚΗ (ΠΑΛΜΙΚΗ) ESPI

Τη λύση για τη μελέτη της χρονικής εξέλιξης φαινομένων τη δίνει η τεχνική της λεγόμενης δυναμικής ή παλμικής ESPI. Σε αυτήν γίνεται χρήση παλμικής πηγής λέιζερ, αντί συνεχούς μήκους κύματος. Μια τέτοια διάταξη υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Για τη δυναμική μελέτη φαινομένων που εξελίσσονται σε χρονικές κλίμακες της τάξης των $\mu s/ms$ (ή και λιγότερο) θα πρέπει να καταγραφούν συμβολογράμματα, όπως στην χρονικά ολοκληρωμένη ESPI, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της εξέλιξης του φαινομένου, καθώς δεν υπάρχει τρόπος να καταγραφεί εφάπαξ η χρονική εξέλιξη φαινομένων σε τέτοια χρονική κλίμακα. Αυτό σημαίνει ότι το φαινόμενο πρέπει να δημιουργείται με ελεγχόμενο τρόπο και υπό τις ίδιες συνθήκες, ώστε να είναι κατά το δυνατόν επαναλήψιμο. Θα πρέπει επίσης να υπάρχει τρόπος ώστε το σύστημα να καταγράφει, μέσω της οπτικής διάταξης, τις μεταβολές του φαινομένου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά ελεγχόμενο και συστηματικό τρόπο.

Όπως στην χρονικά ολοκληρωμένη ESPI, και εδώ απαιτείται η καταγραφή ενός αριθμού εικόνων του υπό μελέτη αντικειμένου. Στην δυναμική ESPI απαιτείται η καταγραφή δύο εικόνων, γι' αυτό το λέιζερ πρέπει να εκπέμπει δύο παλμούς φωτός και το ψηφιακό καταγραφικό μέσο να ενεργοποιείται δύο φορές, σε συγχρονισμό με τους παλμούς. Η πρώτη φωτογραφία που καταγράφεται είναι η εικόνα αναφοράς (reference) και η δεύτερη η εικόνα αντικειμένου (object). Η αφαίρεση γίνεται μεταξύ των δύο αυτών εικόνων για την δημιουργία, μέσω της ψηφιακής επεξεργασίας, των συμβολογραμμάτων για την παρατήρηση της παραμόρφωσης που επιδέχεται η υπό μελέτη επιφάνεια.

2.5.1. Μαθηματική περιγραφή δυναμικής ESPI

Στην παλμική ESPI η κατανομή φωτεινής έντασης που ανιχνεύει η κάμερα μέσα στο χρόνο έκθεσης, τ , είναι (Conference centre "Het Pand", *Optical Measurements for Structures and Systems*, Optimes, University of Gent, 27 October 2005):

$$I_{(x,y)} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \left\{ I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \left[\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) \right] \right\} dt \quad (2.9)$$

όπου I_O και I_R 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. Η φωτεινή ένταση της εικόνας αναφοράς είναι:

$$I_1 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \psi \quad (2.10)$$

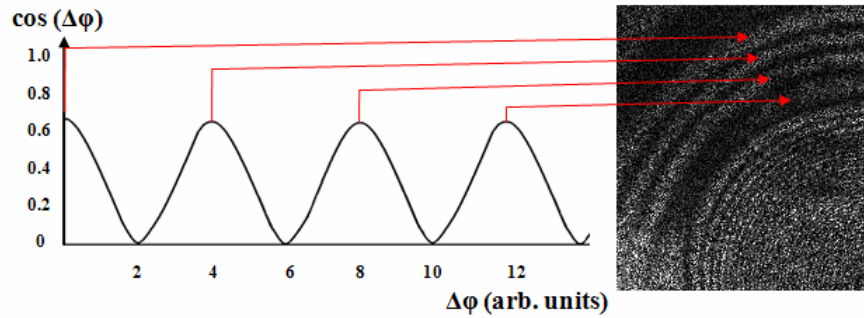
όπου ψ είναι μία τιμή φάσης κοινή στην εικόνα αναφοράς και την εικόνα αντικειμένου. Η φωτεινή ένταση της εικόνας αντικειμένου, που αφαιρείται από την εικόνα αναφοράς, και παρουσιάζει μια διαφορά φάσης $\Delta\phi$ με αυτήν, είναι:

$$I_2 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\psi + \Delta\phi) \quad (2.11)$$

Οι δύο εικόνες, αναφοράς (I_1) και αντικειμένου (I_2), που αφαιρούνται μέσω κατάλληλου λογισμικού, δίνουν ως αποτέλεσμα:

$$\begin{aligned}
(I_1 - I_2) &= 2\sqrt{I_O I_R} [\cos\psi - \cos(\psi + \Delta\phi)] \\
&= 4\sqrt{I_O I_R} \sin\left(\psi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right) \\
\Leftrightarrow (I_1 - I_2) &= 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\Delta\phi)
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

Παρατηρούμε ότι οι παράγοντες της κατανομής της έντασης των δύο εικόνων μένουν ίδιοι και ότι αυτό που αλλάζει είναι η διαφορά της φάσης τους. Οι κροσσοί συμβολής δεν είναι διαμορφωμένοι με τη συνάρτηση *Bessel*, όπως στη χρονικά ολοκληρωμένη ESPI. Στο σχήμα 2.9 απεικονίζεται η αντιστοιχία της φωτεινής έντασης με κάθε κροσσό ενός συμβολογράμματος Dynamic ESPI, που λήφθηκε στο πείραμά μας. Το συμβολόγραμμα είναι διαμορφωμένο με τον όρο $\cos(\Delta\phi)$, οπότε οι προκύπτοντες κροσσοί είναι ίσης φωτεινότητας (ισοφωτισμένη επιφάνεια του υπό μελέτη αντικειμένου).



Σχήμα 2.9: Αντιστοιχία μεγίστων συνάρτησης $\cos(\Delta\phi)$ και κατανομής πλάτους ταλάντωσης μετρούμενης με την τεχνική *Dynamic ESPI*.

Ακόμη, σε αντίθεση με την χρονικά ολοκληρωμένη ESPI, όπου αφαιρούνται διαδοχικά οι καταγραφημένες από την κάμερα εικόνες καθώς το αντικείμενο κινείται, στην παλμική ESPI αυτό που συμβαίνει είναι η αφαίρεση μίας εικόνας, όπου το αντικείμενο κινείται, από μία εικόνα, όπου το αντικείμενο βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας.

2.6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Στη διάταξη που υλοποιήθηκε τα κύρια όργανα και συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν είναι: Nd:YAG παλμικό λέιζερ (BrilliantB της εταιρείας Quantel), γεννήτρια παλμών (Digital Delay/Pulse Generator DG535 της εταιρείας SRS), ψηφιακή CCD κάμερα (A102f της εταιρείας Basler). Ο έλεγχος αυτών των οργάνων/συσκευών γινόταν με ειδικό λογισμικό που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον LabView, και με τη χρήση κατάλληλης κάρτας καταγραφής και αποστολής δεδομένων (DAQ card 6014 της εταιρείας National Instruments).

2.6.1. Παλμική πηγή λέιζερ

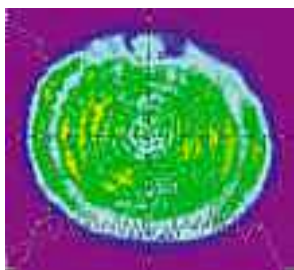
Η πηγή λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί ένα παλμικό λέιζερ, παράγει δηλαδή υπερβραχείς παλμούς ακτινοβολίας μέσω της χρήσης του συστήματος άντλησης flashlamp και της τεχνικής Q-switching [5]. Το ενεργό μέσο είναι κρύσταλλος Yttrium Aluminium Garnet (YAG), στον οποίο έχουν εμβαπτιστεί ιόντα Νεοδυμίου (Nd^{3+}). Αποτελείται από δύο κύριες μονάδες: την οπτική κεφαλή και την τροφοδότηση ισχύος, οι οποίες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους. Η διαχείριση του λέιζερ γίνεται από ένα τηλεχειριστήριο κουτί και την διασύνδεσή του με τον υπολογιστή μέσω του λογισμικού RS232.

Το λέιζερ διαθέτει μονάδα παραγωγής δεύτερης αρμονικής και έτσι μπορεί να παράγει ακτινοβολία φωτός και σε μήκος κύματος 532nm (η οποία και χρησιμοποιήθηκε) πέραν της θεμελιώδους του Nd:YAG μέσου (1064nm). Ο προκύπτων παλμός του λέιζερ έχει χρονική διάρκεια 6ns, και ο τυπικός ρυθμός επαναληψιμότητας (repetition rate) είναι 10Hz. Η μέγιστη ενέργεια ανά παλμό είναι 850mJ στα 1064nm, και 270mJ στα 532nm σε μονορυθμική λειτουργία.

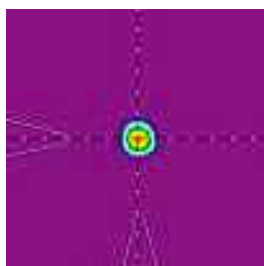
Μερικές από τις δυνατότητες του λέιζερ είναι ο συγχρονισμός του flashlamp με εσωτερικό ή εξωτερικό ηλεκτρικό σήμα, και η λειτουργία single shot που δίνει τη δυνατότητα εκπομπής ενός μόνο παλμού λέιζερ. Προσφέρει ακόμη τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη, όπως του χρονισμού της λειτουργίας του flashlamp και του Q-

switch. Επίσης διαθέτει εξωτερική μονάδα, που το επιτρέπει να λειτουργεί ως μονορυθμικό, που ήταν και επιλεγμένη λειτουργία (single longitudinal mode). Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας σε repetition rate $<10\text{Hz}$.

Στα σχήματα 2.10 και 2.11 φαίνεται η κατανομή της δέσμης του λείζερ, όπως μετρήθηκε σε κοντινό και μακρινό πεδίο αντίστοιχα, για εκπομπή δέσμης 1064nm και repetition rate 10Hz .



Σχήμα 2.10: Κατατομή της δέσμης του BrilliantB λείζερ σε κοντινό πεδίο στα 1064 nm και με repetition rate τα 10 Hertz



Σχήμα 2.11: Κατατομή της δέσμης του BrilliantB λείζερ σε μακρινό πεδίο στα 1064 nm και με repetition rate τα 10 Hertz

2.6.2. Γεννήτρια παλμών

Η γεννήτρια παλμών, που χρησιμοποιήθηκε για τον χρονοισμό και έλεγχο των συσκευών με την παροχή ηλεκτρικών σημάτων καλά διαχωρισμένων στο χρόνο, έχει μία είσοδο και τέσσερις εξόδους, που στέλνουν παλμούς σε ακριβώς καθορισμένους από τον χρήστη χρόνους [6]. Η χρονική στιγμή που η γεννήτρια ενεργοποιείται από την είσοδό της ονομάζεται T_0 (αρχικός χρόνος) και με βάση αυτήν ο χρήστης μπορεί να ρυθμίζει το χρόνο που θέλει να στέλνεται παλμός από τις εξόδους της. Οι παλμοί εξόδου της γεννήτριας μπορούν να έχουν καθυστέρηση (delay) που προστίθεται στον αρχικό χρόνο T_0 ή στο χρόνο delay κάποιας άλλης εξόδου. Οι έξοδοι της γεννήτριας

παρέχουν την δυνατότητα στους παραγόμενους παλμούς της να απέχουν μεταξύ τους από 1000s έως 5ps. Για παράδειγμα:

$$B = A + 0.000000220523$$

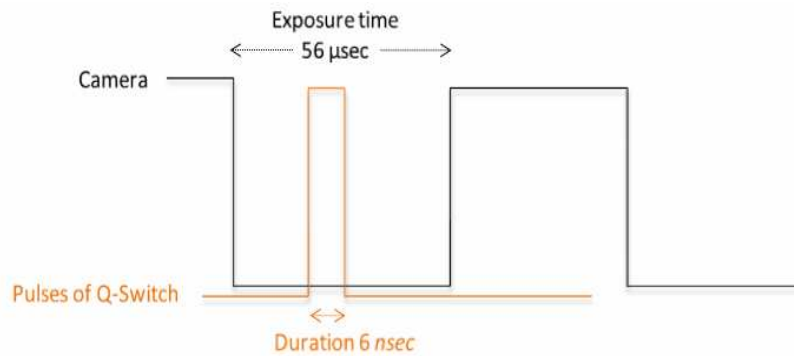
The diagram shows the equation $B = A + 0.000000220523$. Below the equation, arrows point from the terms to their respective units: 'delay A' under 'A', 'sec' under the first '0', 'msec' under the first '2', 'usec' under the first '0', 'nsec' under the first '5', and 'psec' under the first '2'.

Σχήμα 2.12: Παράδειγμα ρύθμισης τιμής delay για την έξοδο B της γεννήτριας

2.6.3. CCD κάμερα

Η CCD κάμερα που χρησιμοποιήθηκε έχει ανάλυση (resolution) 1392×1040pixels, μέγεθος pixel 6.45×6.45μm και μέγιστο ρυθμό καταγραφής (max frame rate) 15frames/s. Επίσης διαθέτει κατάλληλο φακό συλλογής φωτός. Συνδέθηκε απ' ευθείας σε H/Y μέσω διασύνδεσης firewall IEEE 1394a.

Από την στιγμή που δέχεται εντολή ενεργοποίησης η κάμερα απαιτούνται 8μs για να αρχίσει η λειτουργία της. Ο χρόνος έκθεσης (exposure time) της κάμερα έχει τη δυνατότητα ρύθμισης από τον χρήστη. Χρόνος έκθεσης είναι ο χρόνος που είναι ανοιχτός ο φακός της κάμερα για να καταγραφεί μία φωτογραφία. Η κάμερα ρυθμίστηκε στον ελάχιστο χρόνο έκθεσής της, που είναι τα 56μs. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι αφού η διάρκεια του φωτεινού παλμού είναι 6ns, τόσος θα ήταν ο χρόνος που αυτή αναγκαστικά θα χρησιμοποιούσε για να καταγράψει τις εικόνες, οπότε δεν είχε νόημα να αυξήσουμε τον χρόνο έκθεσής της. Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά, τους χρόνους αυτούς, δηλαδή τον διαθέσιμο χρόνο λήψης των εικόνων που δίνεται από το Q-Switch και τον ελάχιστο χρόνο έκθεσης για την κάμερα.

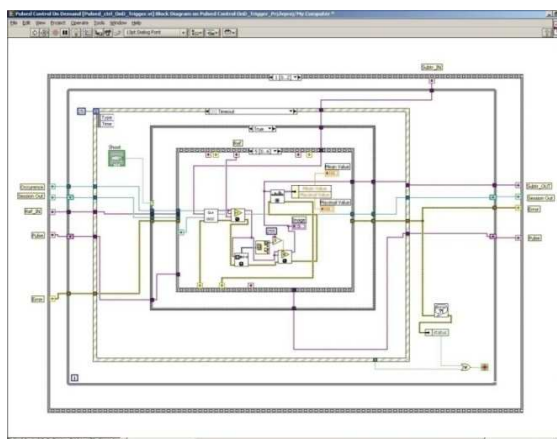


Σχήμα 2.13: Διάρκεια έκθεσης του υπό μελέτη αντικειμένου στην camera (duration). Οι χρόνοι δεν είναι σε κλίμακα.

2.6.4. Κάρτα & ειδικό λογισμικό καταγραφής

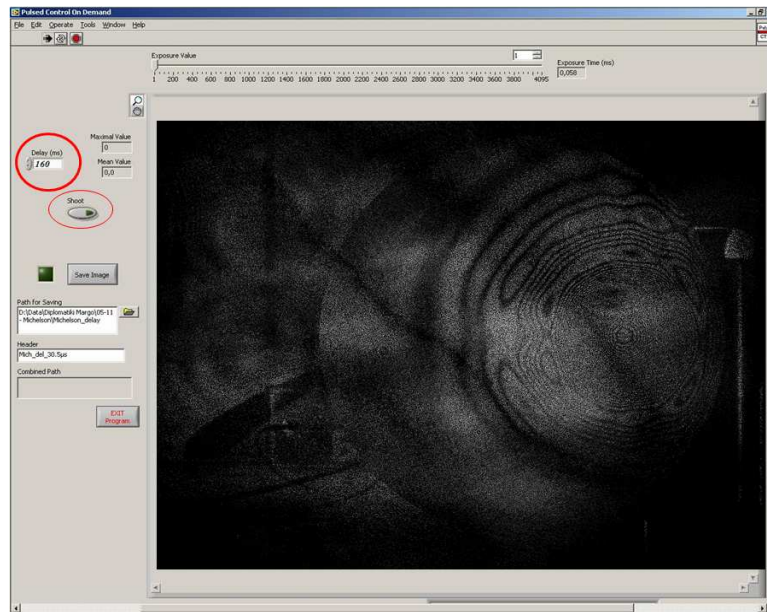
Στον Η/Υ ήταν εγκατεστημένη η κάρτα 6014 της National Instruments (Analog Inputs 16 SE/8 DI, Input Resolution 12 bits, Analog Outputs 2, Output Resolution 12 bits, Digital Triggers), η οποία ελεγχόταν μέσω προγραμμάτων οδήγησης περιφερειακών (drivers) και από το software LabView 8.5. Σε πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον LabView έγινε εφικτός ο συγχρονισμός των εμπλεκόμενων συσκευών με την αρχική παρέμβαση του χρήστη, καθώς η κάρτα NI6014 αποτελούσε τη master ηλεκτρονική συσκευή στο πείραμά μας.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε ένα τμήμα από τα αντικείμενα του LabView που χρησιμοποιήθηκαν και τις μεταξύ τους συνδέσεις.



Εικόνα 2.1: Ένα μέρος των αντικειμένων/εντολών που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα του LabView

Αυτό που συμβαίνει με την παραπάνω συνδεσμολογία είναι το εξής: ο χρήστης παρεμβαίνοντας στο γραφικό περιβάλλον που δημιουργήθηκε μέσω του LabView, με τη χρήση ενός εικονικού κουμπιού («shoot») ενεργοποιεί την κάρτα NI6014. Η διαδικασία της απεικόνισης ολοκληρώνεται αυτόματα και εμφανίζεται η τελική εικόνα του αντικειμένου. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το γραφικό αυτό τμήμα.



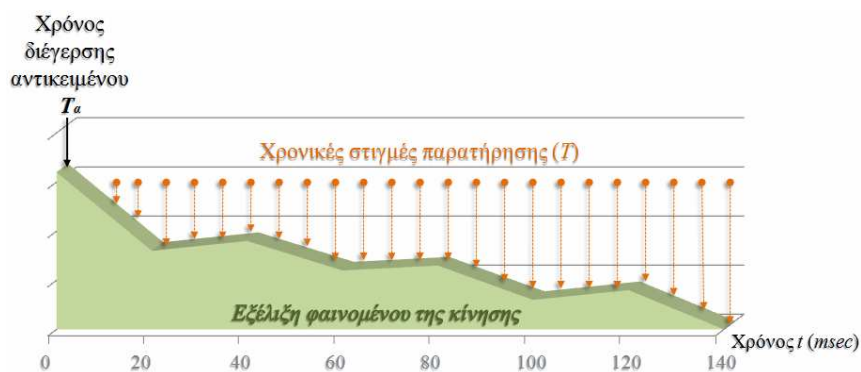
Εικόνα 2.2: Γραφικό περιβάλλον του LabView, το οποίο χρησιμοποιούνται άμεσα από τον χρήστη

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται για την καταγραφή στιγμιότυπων της εξέλιξης μίας κίνησης σε ένα ελεγχόμενο δονούμενο αντικείμενο. Ακόμη αναλύονται οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται, ώστε να επιτευχθεί ο σκοπός της πειραματικής αυτής εργασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διάταξη που υλοποιήθηκε και η διαδικασία που ακολουθήθηκε, ώστε με τη χρήση της τεχνικής δυναμικής ESPI, να παρατηρηθεί η εξέλιξη της κίνησης σε ένα τυπικό, μηχανικά διεγερμένο, αντικείμενο. Τέλος, υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης της κίνησης, που μετρήθηκε με τη βοήθεια του συμβολομέτρου Michelson, καθώς και η διάταξη αυτού.

3.1. ΧΡΟΝΙΣΜΟΣ

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη της χρονικής εξέλιξης της κίνησης στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, ως συνέπεια ελεγχόμενης μηχανικής διέγερσης. Αυτό που πρέπει να επιτευχθεί για να μελετηθεί η συνολική της εξέλιξη είναι η παρακολούθηση, καταγραφή και ανάλυση εικόνων, που θα αποτελέσουν τα στιγμιότυπα της κίνησης. Στο σχήμα 3.1 διαφαίνεται σε διάγραμμα το φαινόμενο μίας κίνησης, καθώς αυτή εξελίσσεται στο χρόνο, και οι χρόνοι παρατήρησης T του γεγονότος αυτού. Μέσω της παρατήρησης και καταγραφής του φαινομένου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές γίνεται εφικτή η μελέτη ολόκληρης της χρονικής εξέλιξής του.



Σχήμα 3.1: Εξέλιξη του φαινομένου της κίνησης και χρονικές στιγμές παρατήρησής του

Η σειρά ενεργειών για την ανίχνευση μίας κίνησης σε ελεγχόμενα διεγερμένο με μηχανικό τρόπο αντικείμενο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Διαδικασία πειραματικών ενεργειών για την καταγραφή του φαινομένου της κίνησης σε ελεγχόμενα διεγερμένο αντικείμενο

Η χρονική διάρκεια των κινήσεων που μελετήθηκαν είναι της τάξεως των μs και ms , πολύ σύντομη για να καταγραφεί με απλό τρόπο από μια συνηθισμένη ψηφιακή κάμερα. Γενικότερα, η δυνατότητα λήψης εικόνων ανά μs ή και ms με κάποιο μέσο καταγραφής, ώστε με τη μεμονωμένη διέγερση ενός αντικείμενου να παρατηρείται ολόκληρο το φαινόμενο της διάδοσης της κίνησης σε αυτό, είναι κάτι το μη εφικτό σύμφωνα με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα. Οπότε, για την μελέτη ολόκληρου του φαινομένου της διάδοσης μίας κίνησης πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Οι συνθήκες της μηχανικής διέγερσης να είναι επαναλήψιμες, ώστε με συνεχείς διεγέρσεις του υπό μελέτη αντικείμενου να γίνεται η λήψη διαφορετικών στιγμιότυπων της ίδιας κίνησης.

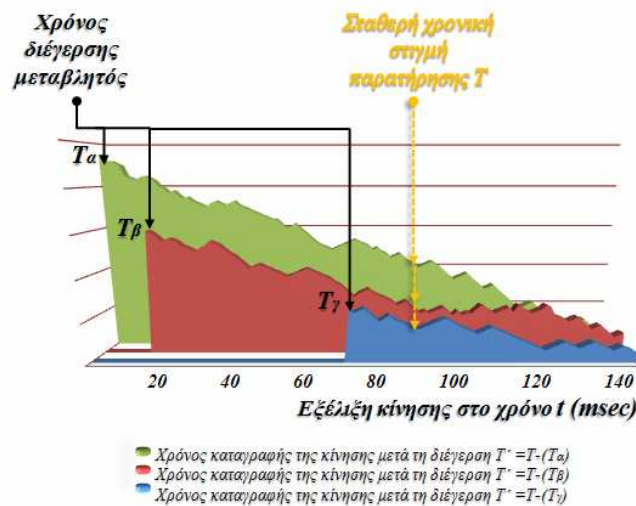
2. Η χρονική καθυστέρηση, για την καταγραφή μετά από κάθε διέγερση διαφορετικής στιγμής της κίνησης, δεν μπορεί να επιτευχθεί με εισαγωγή επιπλέον οπτικού δρόμου για την καθυστέρηση της φωτεινής δέσμης του λέιζερ. Αυτό γιατί χρονική καθυστέρηση φωτός της τάξης του 1ns αντιστοιχεί σε διαφορά οπτικού δρόμου $\sim 33\text{cm}$. Έτσι, εάν θέλαμε να καθυστερήσει η δέσμη καταγραφής του αντικείμενου σε επίπεδο $\mu\text{s}/\text{ms}$, θα απαιτούνταν η εισαγωγή επιπλέον οπτικού δρόμου της τάξεως των km . Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε οι επιθυμητές χρονικές καθυστερήσεις να επιτευχθούν μέσω του τεχνικού ελέγχου των χρησιμοποιηθέντων ηλεκτρονικών συσκευών, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί ταυτόχρονα και ο μεταξύ τους συγχρονισμός. Καθώς ο χρόνος φωτισμού παρέμενε σταθερός λόγω της λειτουργικότητας του παλμικού λέιζερ, η χρονική καθυστέρηση επιτεύχθηκε με την διαδοχική διαφοροποίηση του χρόνου ενεργοποίησης του μηχανικού συστήματος

διέγερσης, διαδικασία που αποτέλεσε πρωτοτυπία στην παρούσα πτυχιακή εργασία. Το σχήμα 3.3 περιγράφει αυτήν ακριβώς τη διαδικασία, όπου το μηχανικό σύστημα διεγείρει το αντικείμενο σε μεταβλητό χρόνο T_a και η εξέλιξη της κίνησης σε αυτό ανιχνεύεται σταθερά σε χρόνο T . Οπότε στο συγκεκριμένο παράδειγμα η εξέλιξη καταγράφεται στον χρόνο $T'=T-T_a$.



Σχήμα 3.3: Καταγραφή συγκεκριμένης χρονικής στιγμής ($T'=T-T_a$) της εξέλιξης της κίνησης σε μηχανικά διεγερμένο αντικείμενο

Με βάση τα παραπάνω, στο σχήμα 3.4 δίνεται ο τρόπος καταγραφής διαφορετικών χρονικών στιγμών T' της εξέλιξης μίας κίνησης. Αυτό επιτυγχάνεται με τους διαφορετικούς χρόνους διέγερσης T_a , T_b και T_γ και με σταθερό τον χρόνο παρατήρησης T .



Σχήμα 3.4: Γραφική αναπαράσταση της εξέλιξης μίας κίνησης, που ξεκινάει σε διαφορετικούς χρόνους T_a , T_b και T_γ , με αποτέλεσμα να καταγράφεται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές T' από το μέσο καταγραφής, το οποίο ενεργοποιείται πάντα στο χρόνο T

3. Καθώς το σύστημα διέγερσης είναι μηχανικό, παρουσιάζει αποκλίσεις της τάξεως των μs στους χρόνους που αυτό θέτει το αντικείμενο σε διέγερση. Λόγω αυτής της ανακρίβειας του χρόνου διέγερσης του αντικειμένου, απαιτήθηκε η χρήση συστήματος (πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας-pzt, συμβολόμετρο Michelson) που επέτρεπε τον έλεγχο των χρόνων διέγερσης και καταγραφής του αντικειμένου.

4. Η πληροφορία του χρόνου διέγερσης δεν είναι αρκετή, διότι το αντικείμενο διεγείρεται από τη μια πλευρά του και η πληροφορία του χρόνου διέγερσής του λαμβάνεται μέσω του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα και του συμβολομέτρου Michelson, από την άλλη του πλευρά. Έτσι χρειάζεται να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης της κίνησης στο υλικό του αντικειμένου.

Παρακάτω περιγράφεται η πειραματική ηλεκτρονική διάταξη που υλοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό. Το τεχνικό σύστημα που αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε είχε ως σκοπό να ελέγχει το υπό μελέτη αντικείμενο ανά $\sim 1\mu\text{s}$.

3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

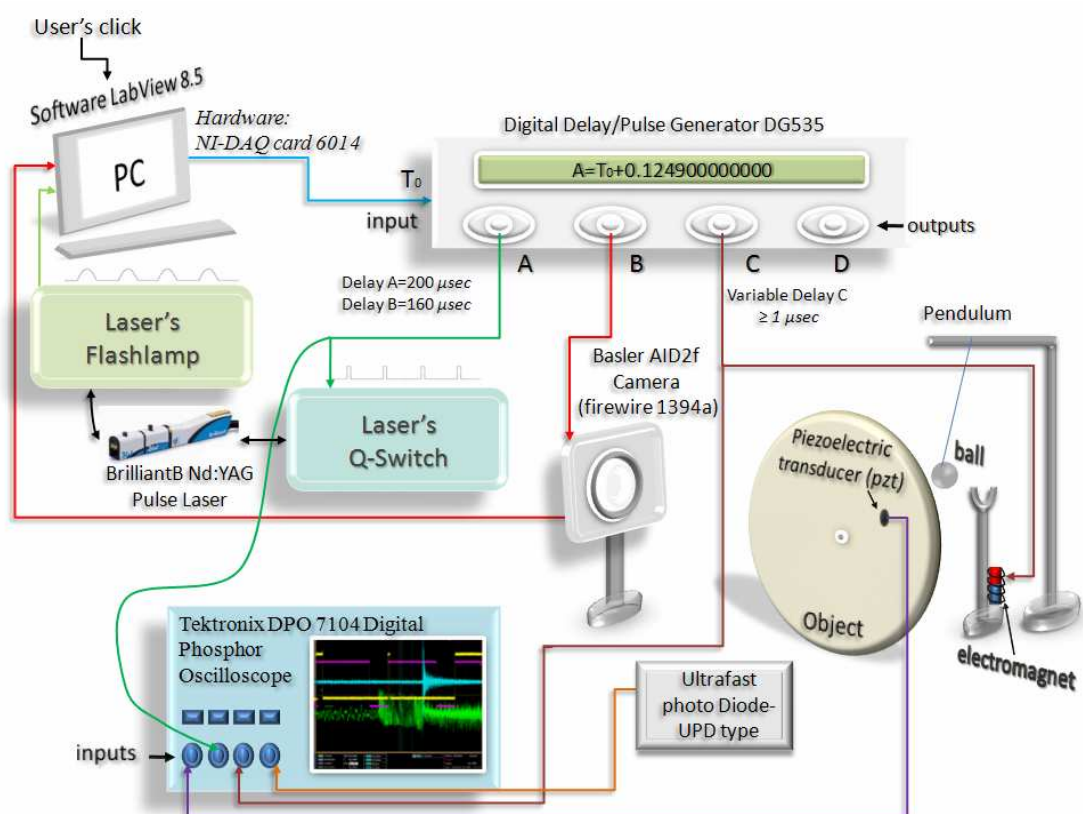
Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε για την καταγραφή των αποτελεσμάτων του πειράματος, αποτελεί μία μη τετριμμένη εφαρμογή. Ο επιλεκτικός χρονισμός των επιμέρους συσκευών έπρεπε να είναι μεγάλης ακρίβειας, καθώς οι χρόνοι καθυστέρησης της λειτουργίας τους αφορούσε τιμές της τάξεως των ns και ms.

Η μηχανική διέγερση της μελετούμενης επιφάνειας γινόταν με τη χρήση εκκρεμούς κατάλληλης μάζας (μεταλλική σφαίρα μάζας $3,5 \times 10^{-3}$ kg), ώστε η κίνηση που δημιουργείται σε αυτή να είναι μέσα στα όρια της διακριτικής ικανότητας της κάμερας. Η σφαίρα συγκρατούνταν σε σταθερή θέση από έναν ηλεκτρομαγνήτη. Το λέιζερ παλμικής εκπομπής εξέπεμπε μία δέσμη φωτός σε συγχρονισμό με την σφαίρα, που έκρουε την υπό μελέτη επιφάνεια, και η κάμερα θέτονταν σε λειτουργία για να καταγράψει το γεγονός. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία αυτή και αλλάζοντας τον χρόνο καθυστέρησης ενεργοποίησης του ηλεκτρομαγνήτη, έγινε δυνατή η καταγραφή της χρονικής εξέλιξης της κίνησης στην υπό εξέταση επιφάνεια.

Για τον συγχρονισμό της λειτουργίας των παραπάνω βασικών στοιχείων του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε ως «master» συσκευή ένας H/Y μέσω της κάρτας NI6014, ώστε οι υπόλοιπες συσκευές να ενεργοποιούνται με βάση αυτήν στον σωστό

χρόνο. Η master συσκευή, έχοντας κατάλληλο λογισμικό (LabView 8.5) και παίρνοντας εντολή από τον χρήστη, ενεργοποιούσε αυτόματα την γεννήτρια παλμών DG535. Η γεννήτρια ήταν συνδεδεμένη σε σειρά με την κάρτα NI6014 και αποτέλεσε στο πείραμά μας τη συσκευή χρονισμού, που έχοντας έναν επαρκή αριθμό εξόδων, ενεργοποιούσε στον επιθυμητό χρόνο τις υπόλοιπες τρεις συσκευές (λείζερ, κάμερα και ηλεκτρομαγνήτη).

Στο σχήμα 3.5 που ακολουθεί δίνεται η συνοπτική παρουσίαση των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς οι μεταξύ τους συνδέσεις.



Σχήμα 3.5: Παρουσίαση και συνδεσμολογία των επιμέρους στοιχείων του πειράματος

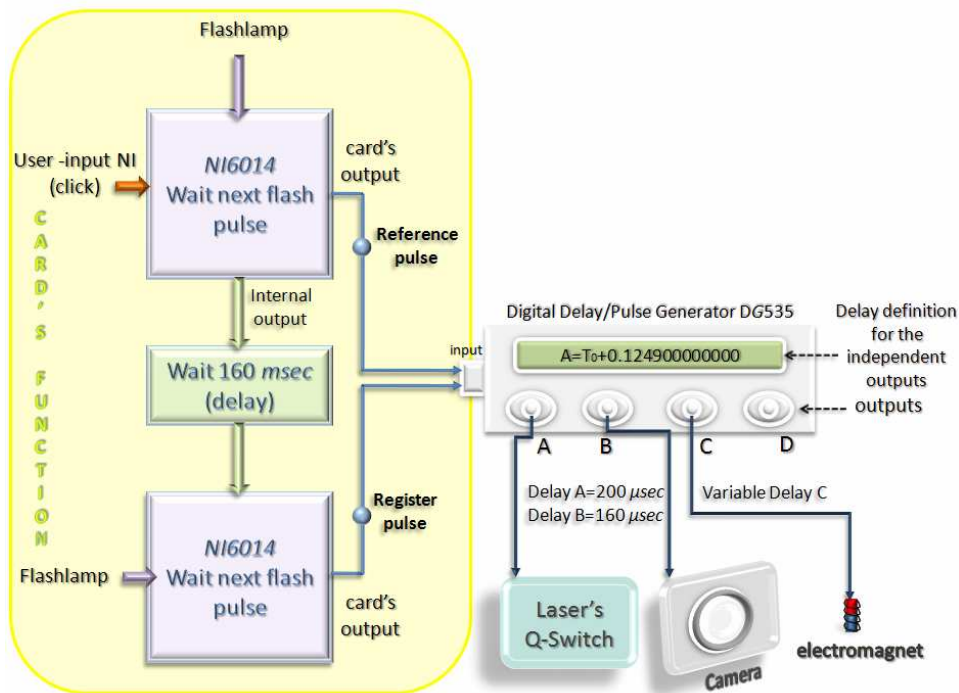
Με το πάτημα του κουμπιού «shoot» (βλ. εικόνα 2.2) στο γραφικό περιβάλλον του LabView ενεργοποιούνται η κάρτα NI6014, με αποτέλεσμα να παράγονται από αυτήν δύο σήματα:

I. Το πρώτο έδινε εντολή στην κάρτα να περιμένει τον επόμενο παλμό (wait next pulse) που θα δεχθεί από το flashlamp και να συγχρονισθεί με αυτόν. Ο παλμός αυτός στέλνόταν από την έξοδο της κάρτας NI6014 στην γεννήτρια παλμών (pulse generator), για να ενεργοποιήσει με τη σειρά της τα υπόλοιπα στοιχεία του

πειράματος (Q-Switch του λέιζερ, camera και ηλεκτρομαγνήτη). Ο παλμός αυτός ονομάζεται παλμός αναφοράς (reference pulse) και με αυτόν γινόταν η λήψη της εικόνας αναφοράς.

II. Το δεύτερο σήμα περίμενε έως ότου να περάσει ο χρόνος delay (160 ms) που ορίστηκε μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του LabView και στη συνέχεια συγχρονιζόταν με τον επόμενο παλμό (wait next pulse) που δεχόταν από το flashlamp. Τότε στελνόταν για δεύτερη φορά παλμός ενεργοποίησης στην γεννήτρια από την έξοδο της κάρτας NI6014, για να ενεργοποιηθούν και πάλι οι υπόλοιπες συσκευές. Ο παλμός αυτός ονομάζεται παλμός καταγραφής (register pulse) και μέσω αυτού γινόταν η λήψη της εικόνας του αντικειμένου σε διεγερμένη κατάσταση. Με τον παλμό αυτό, μαζί με το Q-Switch και την camera, ενεργοποιούνταν και ο ηλεκτρομαγνήτης για δεύτερη φορά, όμως αυτό δεν είχε πειραματικό ενδιαφέρον, αφού η σφαίρα που ήταν στηριγμένη επάνω του είχε ήδη αποδεσμευτεί με τον πρώτο παλμό.

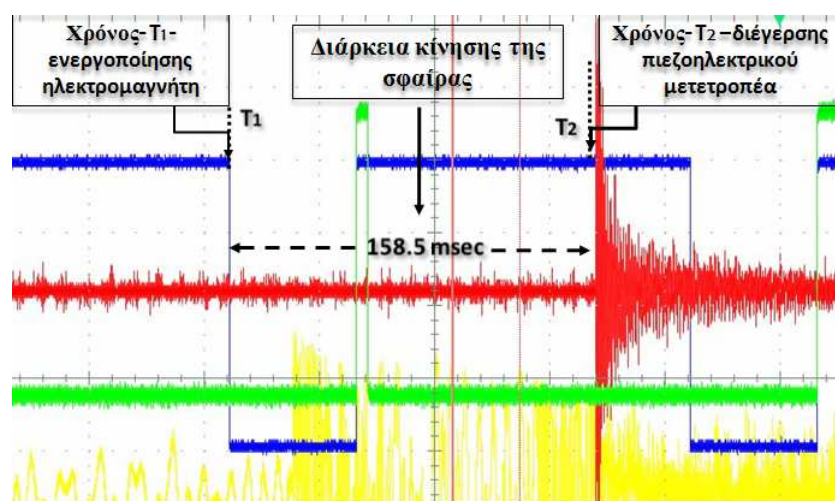
Η διαδικασία του σήματος στην κάρτα NI6014 που περιγράφεται παραπάνω αναπαριστάται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Διαδικασία σήματος στην κάρτα NI6014, έτσι ώστε η γεννήτρια DG535 να ενεργοποιείται δύο φορές στον επιθυμητό χρόνο

Ο χρόνος delay που ορίστηκε μέσω του LabView (160ms) εξαρτάται από τον παλμό flashlamp που θέλουμε να εκπεμφθεί, μετά την καταγραφή της εικόνας αναφοράς. Για την επιλογή της τιμής του delay αυτού, χρειάστηκε να διεξαχθεί μία σειρά μετρήσεων, ώστε να βρεθεί ο επιθυμητός χρόνος διαδρομής της σφαίρας από το σημείο εκκίνησής της στο σημείο κρούσης. Τα πειράματα αφορούσαν το μήκος της κλωστής του εκκρεμούς και την απόσταση της στηριγμένης σφαίρας από την μελετώμενη επιφάνεια, για ένα ικανοποιητικό μέτρο δύναμης της σφαίρας κατά την κρούση, έτσι ώστε να γίνεται ξεκάθαρη καταγραφή και απεικόνιση της δόνησης από την κάμερα. Ο χρόνος αυτός μετρούταν με τη χρήση παλμογράφου, στον οποίο καταγράφονταν το σήμα ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα, που ήταν επαπτόμενος στην υπό μελέτη επιφάνεια, και το σήμα των παλμών ενεργοποίησης που δέχονταν ο ηλεκτρομαγνήτης. Τα δύο σήματα έδειχναν τη χρονική διαφορά μεταξύ της στιγμής που η σφαίρα αφήνεται ελεύθερη και της στιγμής που η επιφάνεια άρχιζε να δονείται. Μετά την εύρεση του χρόνου αυτού, καταγράφηκε ένας αριθμός μετρήσεων και υπολογίστηκε ο μέσος όρος στα 158,5ms.

Στο σχήμα 3.7 απεικονίζεται το αποτέλεσμα μίας τέτοιας μέτρησης, όπου η κόκκινη διακύμανση αναφέρεται στον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα και η μπλε στον παλμό που δέχεται ο ηλεκτρομαγνήτης για να αφήσει την σφαίρα.



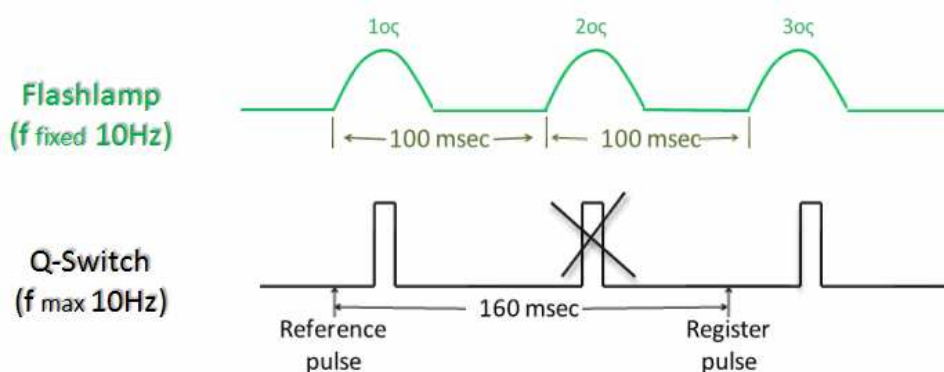
Σχήμα 3.7: Χρόνος σφαίρας για να φτάσει από την θέση ισορροπίας της στην θέση κρούσης, εικόνα παλμογράφου με οριζόντια ανάλυση 50 ms

Η διάρκεια της κίνησης της σφαίρας, από την απελευθέρωσή της μέχρι την άφιξή της στην επιφάνεια του υπό μελέτη αντικειμένου, ήταν $\Delta t = T_2 - T_1 = 158,5\text{ms}$. Είναι κατανοητό ότι η στιγμή της κρούσης συνέβαινε κάπου ανάμεσα στον δεύτερο και

τρίτο παλμό φωτός (ο πρώτος παλμός flashlamp απέχει από τον δεύτερο 100ms και από τον τρίτο 200ms). Έτσι επιλέχτηκε η χρήση του τρίτου παλμού flashlamp, ώστε όταν η πλάκα φωτιζόταν για δεύτερη φορά να είχε ήδη διεγερθεί, και η εικόνα αντικειμένου που θα παίρναμε να είναι η κατάλληλη. Οπότε η τιμή delay = 160ms ορίστηκε για να χρησιμοποιηθεί ο τρίτος παλμός του flashlamp και όταν η γεννήτρια ενεργοποιείται για δεύτερη φορά από την κάρτα NI6014, το Q-Switch να έχει προσπεράσει τον δεύτερο flashlamp παλμό και να αναμένει τον τρίτο. Εάν λοιπόν οριστεί ως $t_R = 0ms$ ο χρόνος που λαμβάνονταν η πρώτη εικόνα (reference), η εικόνα αντικειμένου (object) καταγράφονταν πάντα στο χρόνο $t_O = 200ms$.

Το flashlamp του λέιζερ, το οποίο ήταν συνδεδεμένο με την κάρτα NI6014 που λειτουργούσε ως εξωτερική πηγή σε αυτό και συγχρονίζονταν μαζί του, ενεργοποιούνταν από πριν από τον χρήστη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι παλμοί του flashlamp αξιοποιούνται μέσω του Q-Switch του λέιζερ. Το Q-Switch δημιουργεί σταθερούς παλμούς μέγιστης συχνότητας (f_{max}) 10Hz, οι οποίοι για όσο διαρκούν επιτρέπουν το παραγόμενο από το flashlamp φως να εξαχθεί από το άνοιγμα του λέιζερ. Με συνδεδεμένο το Q-Switch στην γεννήτρια, επιλέγονταν μέσω αυτής οι παλμοί φωτός του flashlamp που το Q-Switch θα αξιοποιούσε.

Στο σχήμα 3.8 μπορούμε να δούμε τους παλμούς των flashlamp και Q-Switch σε αντιστοιχία μεταξύ τους, καθώς και τους παλμούς αναφοράς και καταγραφής που στέλνει η κάρτα NI6014 στο Q-Switch μέσω της γεννήτριας παλμών, για την παραγωγή του πρώτου και του τρίτου φωτεινού παλμού.



Σχήμα 3.8: Σταθεροί παλμοί flashlamp και ρυθμιζόμενοι παλμοί Q-Switch σε αντιστοιχία μεταξύ τους (όχι σε κλίμακα)

Όπως αναφέρθηκε, μέσω των εξόδων χρονικής καθυστέρησης της γεννήτριας ελέγχονταν ο χρόνος ενεργοποίησης των συγχρονισμένων συσκευών, όπου στην έξοδο A της γεννήτριας ήταν συνδεδεμένο το Q-Switch του λέιζερ, στην έξοδο B η

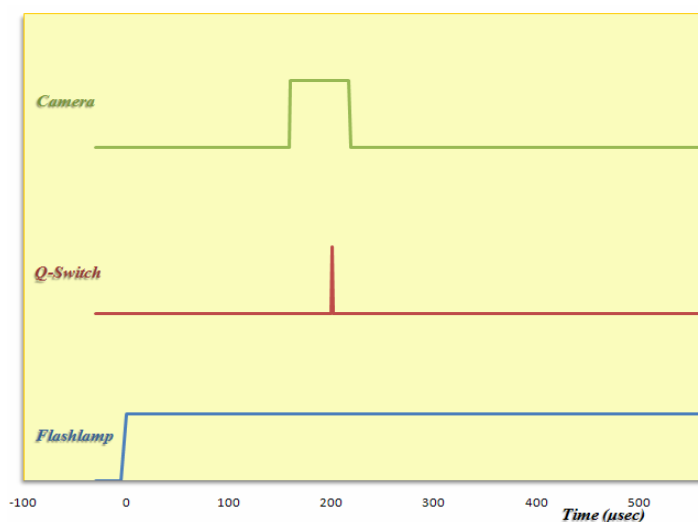
κάμερα και στην έξοδο C ο ηλεκτρομαγνήτης. Στις εξόδους A και B το delay που ορίστηκε παρέμενε σταθερό και η κάμερα ενεργοποιούνταν $5\mu\text{s}$ νωρίτερα από το Q-Switch, λόγω του χρόνου που απαιτείται για να μπει αυτή σε λειτουργία (βλ. κεφάλαιο 2.5.3). Στην έξοδο C ορίζονταν διαφορετικό delay για την καταγραφή της κάθε ξεχωριστής εικόνας. Οι τιμές των delays ήταν:

$$A = T_0 + 200\mu\text{s}$$

$$B = T_0 + 165\mu\text{s}$$

$$C \geq 1\mu\text{s}$$

Στο σχήμα 3.9 αναπαριστάται ο χρόνος -σε κλίμακα μs - εμφάνισης ενός παλμού flashlamp στα $0\mu\text{s}$, οι χρόνοι ενεργοποίησης ($200\mu\text{s}$) ενός παλμού Q-Switch και ενεργοποίησης ($165\mu\text{s}$) και χρόνου έκθεσης ($56\mu\text{s}$) της κάμερα. Ο χρόνος διάρκειας του παλμού Q-Switch δεν αναπαρίσταται, διότι είναι πολύ μικρής διάρκειας (6ns) σε αναλογία με την κλίμακα. Μπορεί να θεωρηθεί ότι η λήψη αυτή αφορά είτε μία εικόνα αναφοράς, είτε μία εικόνα αντικειμένου.

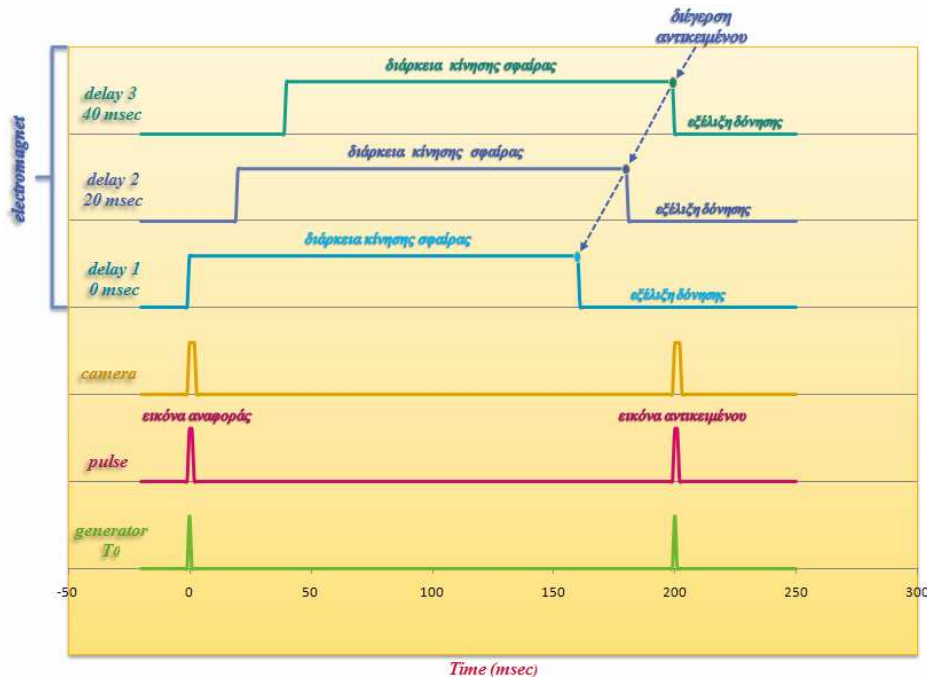


Σχήμα 3.9: Γραφική παράσταση χρονικής διαφοράς ενεργοποίησης μεταξύ των flashlamp, Q-Switch και camera σε κλίμακα μs

Σύμφωνα με αυτά που αναφέρονται στις παραπάνω παραγράφους, γίνεται κατανοητό ότι στην πειραματική μας διάταξη, η μηχανική διέγερση του υπό εξέταση αντικειμένου είναι ελεγχόμενη. Με το πάτημα ενός κουμπιού στο πρόγραμμα LabView, γίνεται η λήψη της εικόνας αναφοράς την στιγμή που η κάρτα NI6014 συναντάει τον πρώτο, μετά την ενεργοποίησή της, παλμό που εκπέμπεται από το flashlamp και ο ηλεκτρομαγνήτης απελευθερώνει την σφαίρα. Μετά από $158,5\text{ms}$, η

σφαίρα κρούει την επιφάνεια του μελετώμενου αντικειμένου. Η εικόνα του αντικειμένου, που λαμβάνεται με τον μεθεπόμενο παλμό flashlamp (μετά από 200ms), αναπαριστά το δονούμενο αντικείμενο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μετά τη διέγερσή του, μέσω του ορισμού διαφορετικών χρόνων απελευθέρωσης της σφαίρας, ώστε να γίνεται η λήψη της εξέλιξης της κίνησης σε διαφορετικά στάδια.

Στο σχήμα 3.10 αναπαρίσταται σε χρονική κλίμακα των ms οι χρόνοι ενεργοποίησης της γεννήτριας ($T_0 = 0\text{ms}$), εμφάνισης του φωτεινού παλμού (light pulse) και ενεργοποίησης της κάμερα. Επίσης δίνονται τρία παραδείγματα χρόνου ενεργοποίησης του ηλεκτρομαγνήτη, μαζί με την διάρκεια της κίνησης της σφαίρας, μέχρι αυτή να φτάσει στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Στο delay 1 του ηλεκτρομαγνήτη δεν έχει προστεθεί καθόλου τιμή delay (0ms) στην έξοδο της γεννήτριας, έτσι η εικόνα καταγράφεται 41,5ms μετά την αρχή της εξέλιξης της δόνησης (200 - 158,5ms), που σημαίνει ότι αυτή έχει ήδη εξαπλωθεί σε όλη την επιφάνεια του αντικειμένου. Στον delay 2 έχει οριστεί τιμή delay 20ms, οπότε η εικόνα καταγράφεται σε χρόνο 21,5ms μετά την κρούση [200-(158,5+20) ms]. Τέλος, στο delay 3 η τιμή που ορίστηκε είναι 40ms, που σημαίνει ότι η εικόνα αντικειμένου καταγράφεται λίγο μετά την κρούση [200-(158,5+40) = 1,5ms]. Κατά την εκτέλεση του πειράματος, το delay της εξόδου C της γεννήτριας (ηλεκτρομαγνήτης) μεταβαλλόταν με τιμές της τάξεως των ms και ms.



Σχήμα 3.10: Χρόνοι ενεργοποίησης των συσκευών σε αναλογία μεταξύ τους, με τρία παραδείγματα διαφορετικού χρόνου καθυστέρησης ενεργοποίησης (delay) του ηλεκτρομαγνήτη, σε κλίμακα ms

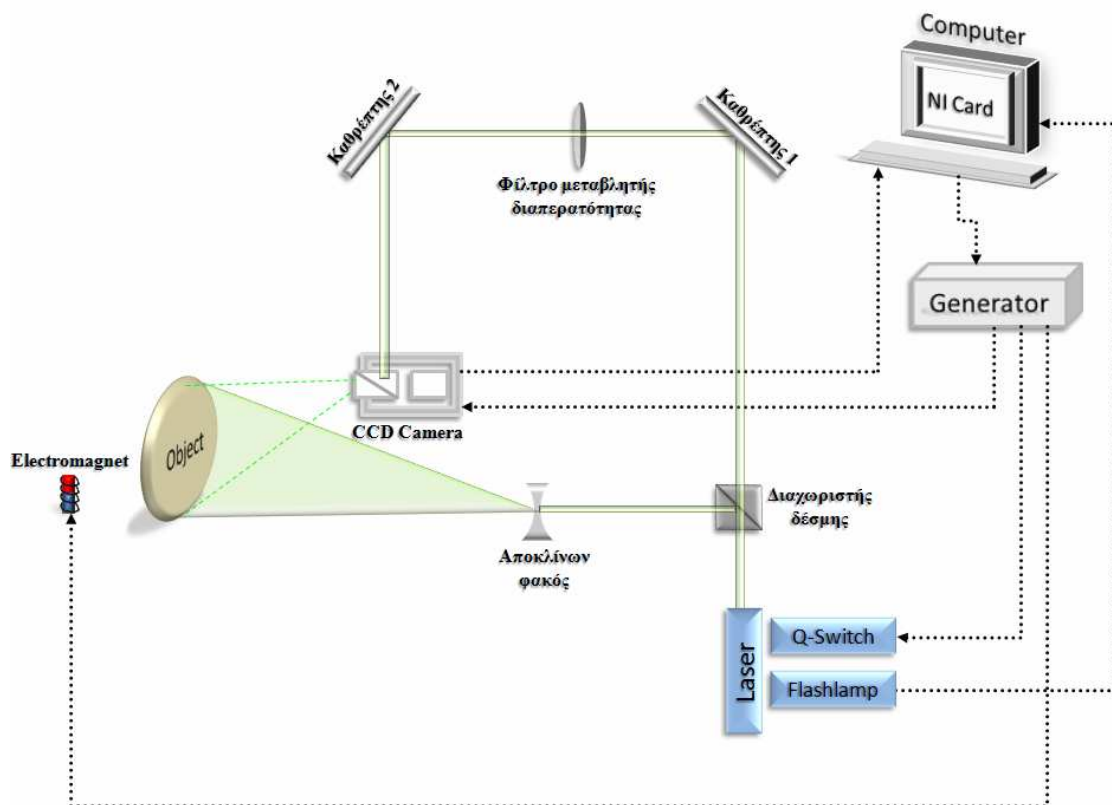
3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για την καταγραφή των εικόνων και την ανάλυση της μετατόπισης στο υπό μελέτη κρούμενο αντικείμενο, χρησιμοποιήθηκε η οπτική τεχνική δυναμικής ESPI. Η διάταξη της τεχνικής τοποθετήθηκε σε αντικραδασμική τράπεζα με πνευματικά πόδια για την απομόνωση των κραδασμών του περιβάλλοντος, αφού η τεχνική αυτή είναι ευαίσθητη σε πολύ μικρά μεγέθη μετατοπίσεων. Η δυναμική ESPI επιλέχθηκε όχι μόνο για την δυνατότητα της στιγμιαίας καταγραφής της κίνησης, αλλά και για την μη επήρεια αυτής στο μελετώμενο αντικείμενο. Παρακάτω περιγράφεται η τοποθέτηση και χρήση των οπτικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Η δέσμη του παλμικού λέιζερ διαχωρίστηκε μέσω διαχωριστή δέσμης 80:20 σε δύο δέσμες. Από αυτές η ισχυρότερη χρησιμοποιήθηκε για τον φωτισμό της πλάκας (δέσμη αντικειμένου), περνώντας πρώτα από ένα σύστημα αποκλινόντων φακών, ώστε να φωτιστεί κατά το δυνατόν ομοιόμορφα όλη η επιφάνεια του υπό μελέτη αντικειμένου. Η ασθενέστερη από τις δύο δέσμες χρησιμοποιήθηκε ως δέσμη αναφοράς, και μέσω καθρεπτών οδηγήθηκε απ' ευθείας στο καταγραφικό όργανο (camera).

Για την ρύθμιση της σχετικής έντασης των δύο δεσμών χρησιμοποιήθηκε ουδέτερο φίλτρο μεταβλητής διαπερατότητας (variable neutral optical density filter) τοποθετημένο στην δέσμη αναφοράς. Η σχετική ένταση των δεσμών στον αισθητήρα της φωτογραφικής μηχανής τυπικά ήταν 1:1.

Στο σχήμα 3.11 δίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3.11: Δυναμική ESPI διάταξη πειράματος

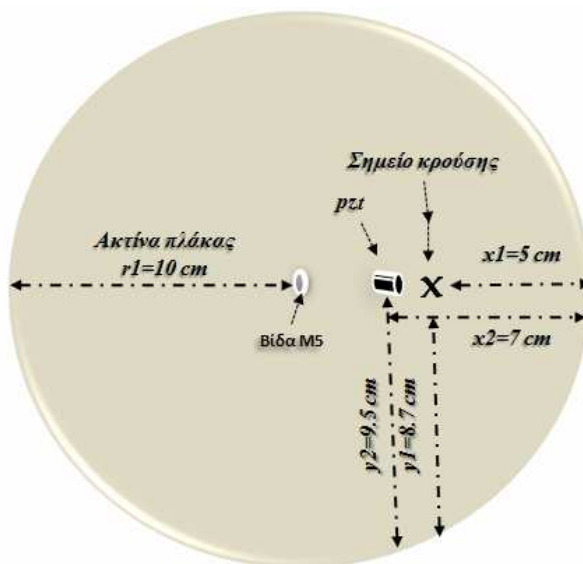
Με την δημιουργία της μηχανικής διάταξης του χρονικού ελέγχου των ηλεκτρονικών συσκευών και με τη χρήση της δυναμικής ESPI γίνεται πλέον δυνατή η καταγραφή εικόνων που αναπαριστούν την στιγμιαία κίνηση τυπικών επιφανειών.

Στην εργασία μας παρουσιάζουμε ως τυπική εξεταζόμενη επιφάνεια μία μεταλλική στρογγυλή πλάκα πάχους 2mm. Στην προσπάθεια καθορισμού των βέλτιστων παραμέτρων στήριξης της πλάκας, σημείου κρούσης της σφαίρας και απόστασης σφαίρας-πλάκας, για ένα όσο το δυνατόν ακριβές πειραματικό αποτέλεσμα, διεξήχθησαν διάφορες απόπειρες τοποθέτησης μεταξύ των πειραματικών στοιχείων και επανειλημμένες πειραματικές μετρήσεις.

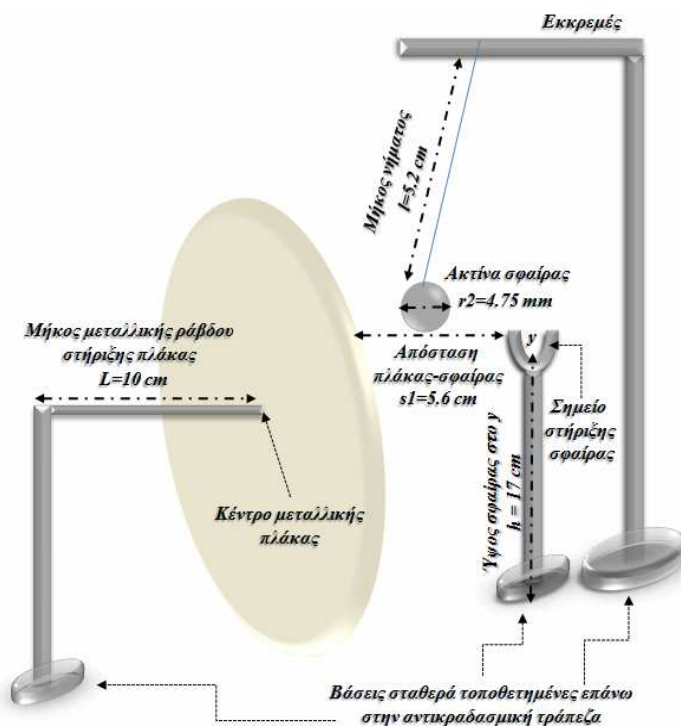
Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών ήταν η στήριξη της πλάκας να γίνει από το κέντρο της, όπου προϋπήρχε μία οπή, στην οποία στερεώθηκε μία βίδα M5. Στην άλλη πλευρά της η βίδα κατέληγε σε μία μεταλλική ράβδο, που στηρίχτηκε σε μεταλλικό πάστρο, του οποίου η βάση σταθεροποιήθηκε επάνω στην αντικραδασμική τράπεζα. Αυτός ο τρόπος στήριξης επέτρεψε την πιο ελεύθερη διάδοση της κίνησης πάνω στην πλάκα. Γύρω από την πλάκα ο χώρος έμεινε

ανοικτός, ώστε να μην εμποδίζεται η κίνηση της σφαίρας και να μην επηρεάζεται η κίνηση στην κρούσιμη επιφάνεια.

Τα παρακάτω σχήματα αναπαριστούν τις θέσεις των στοιχείων του πειράματος, όπως αυτά υφίστανται επάνω στην μεταλλική πλάκα (σχήμα 3.12) και στο σύστημα εκκρεμούς (σχήμα 3.13), κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 3.12: Ακτίνα της μεταλλικής πλάκας (r_1), σημείο τοποθέτησης του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου ($r_{\text{πζ}}$) και σημείο κρούσης της σφαίρας (x) επάνω στην πλάκα.



Σχήμα 3.13: Αναπαράσταση του συστήματος εκκρεμούς, των μεγεθών του και του τρόπου στήριξης της μεταλλικής πλάκας, που σταθεροποιήθηκαν στην αντικραδασμική τράπεζα.

Η σφαίρα μετατοπίζονταν από τη θέση ισορροπίας της κατά μία γωνία θ και αφού αφηνόταν ελεύθερη, αιωρούνταν υπό την επίδραση της βαρύτητας g και η μάζα της m έτεινε να διαγράψει κυκλικό τόξο ακτίνας L [7]. Την πορεία της διέκοπτε η επιφάνεια της πλάκας, η οποία βρισκόταν στη διεύθυνση του κυκλικού τόξου. Έτσι η δύναμη F , η οποία ασκούταν κατά μήκος του κυκλικού τόξου που διέγραφε η σφαίρα, είχε αντίθετη φορά από την μετατόπιση θ και έθετε σε κίνηση την πλάκα. Η δύναμη αυτή δίνεται από τη σχέση:

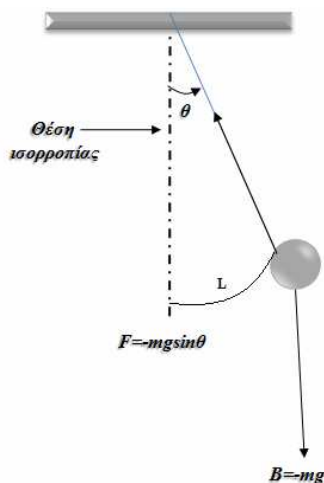
$$F = -m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (3.1)$$

όπου m η μάζα της σφαίρας, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, και θ η γωνία μετατόπισης.

Σύμφωνα με τον τύπο:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3.2)$$

όπου l το μήκος του νήματος σε m και T η περίοδος του εκκρεμούς, καταλαβαίνουμε ότι το μήκος της κλωστής l και ο χρόνος που χρειάζεται για να εκτελέσει μία πλήρη κίνηση το εκκρεμές (περίοδος T) είναι μεγέθη ανάλογα.



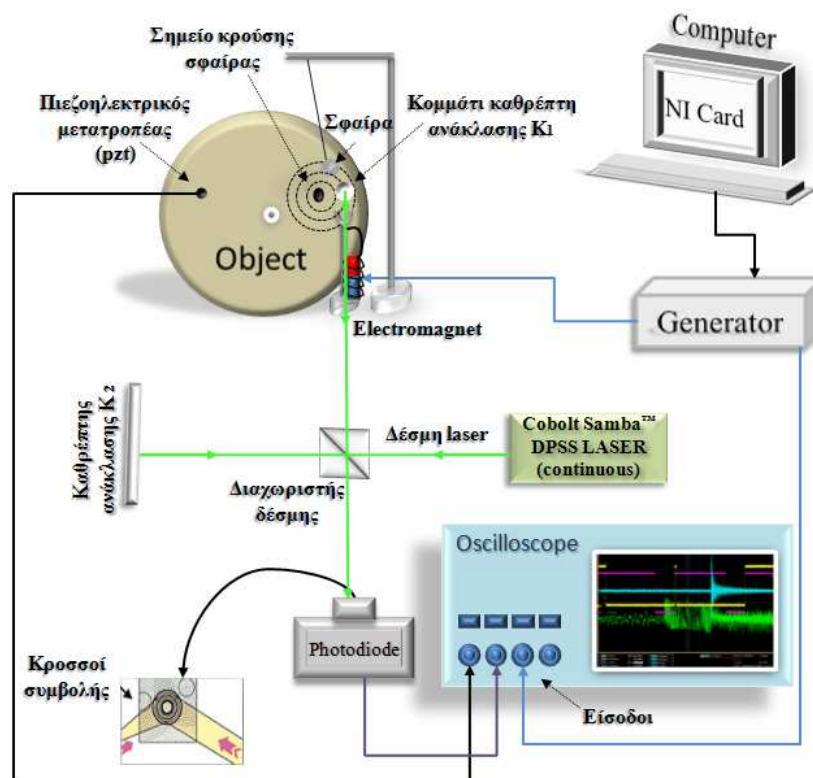
Σχήμα 3.14: Το εκκρεμές σφαίρας που εξαρτάται από αβαρές νήμα

Στο πείραμα δεν προλαβαίνει να ολοκληρωθεί η περίοδος T , οπότε η τιμή αυτή αφορά τον χρόνο που κάνει η σφαίρα, Δt ($= 0,158s$), για να κινηθεί από το σημείο εκκίνησης στο σημείο κρούσης στην πλάκα. Αναφορικά, αν δεν υπήρχε η πλάκα μπροστά από το κυκλικό τόξο που το εκκρεμές θα διέγραφε, η περίοδος του θα ήταν $T = 0,457s$.

Η επιλογή του εκκρεμούς θεωρήθηκε το καταλληλότερο σύστημα παραγωγής κρούσης, ώστε η δύναμη η οποία θέτει σε κίνηση το αντικείμενο να είναι η ίδια σε κάθε μέτρηση. Τοποθετώντας πάντα την ίδια μάζα m , στο ίδιο σημείο y , με το ίδιο μήκος κλωστής l , αυτή αποκτούσε την ίδια επιτάχυνση a , για να χτυπήσει τελικά την επιφάνεια της πλάκας με την ίδια ορμή P . Έτσι πραγματοποιούνταν η επαναληψιμότητα των συνθηκών της μηχανικής διέγερσης.

Στο παράρτημα δίνονται περεταίρω διευκρινήσεις σχετικά με το φαινόμενο της κρούσης, των δυνάμεων F που ασκούνταν στη σφαίρα και της ορμής P με την οποία έκρουε την επιφάνεια.

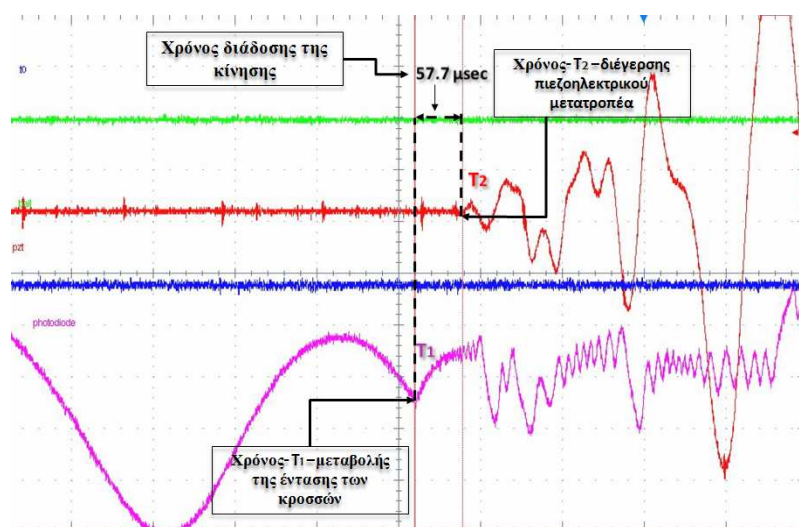
Χρησιμοποιήθηκε επίσης συμβολόμετρο Michelson, με την βοήθεια του οποίου υπολογίστηκε η ταχύτητας διάδοσης της κίνησης στο υλικό του υπό μελέτη αντικείμενου και καταγράφηκε ο χρόνος λήψης των εικόνων. Στο σχήμα 3.15 αναπαρίσταται η πειραματική διάταξη της τεχνικής του συμβολομέτρου Michelson, όπως χρησιμοποιήθηκε για τις απαιτήσεις των μετρήσεων του πειράματος.



Σχήμα 3.15: Πειραματική διάταξη του συμβολομέτρου Michelson, που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης της δόνησης στο υλικό της πλάκας και την αναγνώριση του χρόνου λήψης των εικόνων

Στο συμβολόμετρο Michelson χρησιμοποιήθηκε μία δέσμη συνεχούς φωτός λέιζερ που διαιρέθηκε στα δύο από έναν διαχωριστή δέσμης (splitter). Μέρος του φωτός επιδέχονταν ανάκλαση από τον διαχωριστή δέσμης, κατευθυνόταν προς ένα κάτοπτρο K_1 εφαπτομένο στην επιφάνεια του υπό μελέτη αντικειμένου, και επέστρεφε μέσω του διαχωριστή προς μία φωτοδίοδο. Το υπόλοιπο φωτεινό μέρος της δέσμης περνούσε μέσω του διαχωριστή δέσμης σε ένα δεύτερο κάτοπτρο K_2 και ανακλόταν. Λόγω της ανάκλασης, η δέσμη επέστρεφε στον διαχωριστή και κατευθυνόταν προς τη φωτοδίοδο, όπου δημιουργούνταν οι κροσσοί συμβολής (βλέπε Κεφάλαιο 2.1.2). Η συμβολή των δεσμών του λέιζερ γινόταν πάνω στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια της φωτοδίοδου. Ως κινούμενο κάτοπτρο λειτουργούσε το μικρό κομμάτι καθρέπτη K_1 , το οποίο είχε εφαρμοστεί επάνω στην μεταλλική πλάκα.

Ακριβώς δίπλα στο σημείο κρούσης της σφαίρας βρίσκονταν ο καθρέπτης K_1 . Όταν η σφαίρα έκρουε την πλάκα, εξαιτίας της αλλαγής φάσης που συνέβαινε σε αυτήν (άρα και στον καθρέπτη K_1 που ήταν εφαρμοσμένος σε αυτήν), οι κροσσοί συμβολής διαφοροποιούνταν και καταγράφονταν από την φωτοδίοδο. Ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας ήταν εφαπτόμενος στην πλάκα σε διαφορετικό σημείο στην απέναντι πλευρά της, και μαζί με την φωτοδίοδο, έστελναν το σήμα τους στον παλμογράφο. Το αποτέλεσμα ήταν να εμφανίζεται στον παλμογράφο η χρονική διαφορά μεταξύ της στιγμής της κρούσης της σφαίρας (σήμα φωτοδίοδου) και της στιγμής που στην άλλη πλευρά της η πλάκα άρχιζε να δονείται (σήμα μετατροπέα). Το σχήμα 3.16 απεικονίζει το στιγμιότυπο μιας μέτρησης στον παλμογράφο, όπου παρατηρείται ακριβώς αυτή η χρονική διαφορά.



Σχήμα 3.16: Χρόνος διάδοσης της κίνησης για να φτάσει από το σημείο κρούσης σε ένα άλλο (πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας), εικόνα παλμογράφου με οριζόντια ανάλυση $100 \mu\text{s}$

Κατά την καταγραφή μίας σειράς μετρήσεων του χρόνου διάδοσης του κύματος, η απόσταση s_2 μεταξύ του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου και του σημείου κρούσης παρέμενε σταθερή ($s_2 = 10\text{cm}$). Η μέση τιμή του χρόνου των μετρήσεων αυτών υπολογίστηκε και βρέθηκε $t = 57,77\mu\text{s}$. Η ταχύτητα u ενός κύματος υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$u = s/t \quad (3.3)$$

όπου s η απόσταση που διανύει το κύμα και t ο χρόνος που χρειάζεται το κύμα για να διανύσει την απόσταση αυτή. Γνωρίζοντας την απόσταση s_2 και τον χρόνο t , υπολογίζεται η ταχύτητα u_2 των κυμάτων της κίνησης:

$$u_2 = s_2/t = 0.1\text{ m} / 57,77 \times 10^{-6}\text{ s} = 1733\text{ m/s} \quad (3.4)$$

Επίσης, μέσω του συμβολομέτρου *Michelson*, έγινε εφικτή η αναγνώριση της διαφοράς χρόνου μεταξύ της διέγερσης της πλάκας και της λήψης κάθε εικόνας του δονούμενου αντικειμένου από την κάμερα. Σε αυτήν την περίπτωση το σήμα του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα δεν χρησιμοποιήθηκε, καθώς τα σήματα του Q-Switch του λέιζερ (εκπομπή φωτεινού παλμού), ενεργοποίησης της κάμερας (καταγραφή εικόνας) και φωτοδιόδου (διέγερση αντικειμένου) στέλνονταν στον παλμογράφο. Έτσι καταγράφονταν σε αυτόν η χρονική διαφορά, αναφερόμενη ως delay, της λήψης των φωτογραφιών από την στιγμή της κρούσης. Η μέθοδος αυτή θεωρήθηκε η περισσότερο ακριβής, καθώς ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας παρουσίαζε χρόνο καθυστέρησης που μετρήθηκε $\sim 1,5\text{ms}$.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ

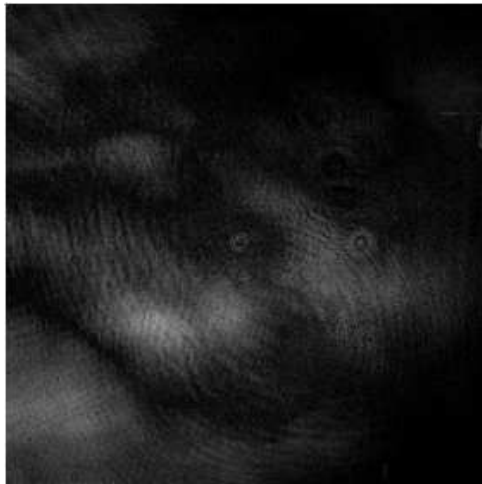
Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται τυπικά πειραματικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν, μετά την ελεγχόμενη διέγερση της χαρακτηριστικής μεταλλικής κυκλικής πλάκας με το μηχανικό σύστημα του εκκρεμούς. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς των παρατηρήσιμων κυμάτων στην επιφάνεια της πλάκας, καθώς επίσης υπολογίζεται και η συχνότητα της κίνησης σε αυτή.

4.1. ΤΥΠΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

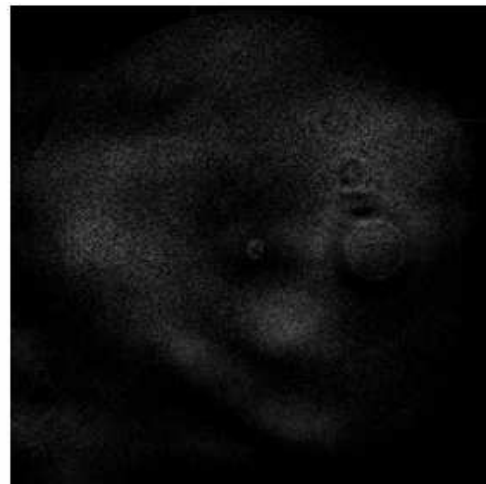
Τυπικό set των αποτελεσμάτων της χρονικής εξέλιξης των δημιουργουμένων από την κρούση μηχανικών κυμάτων στην υπό εξέταση επιφάνεια (μεταλλική πλάκα) που καταγράφηκαν, παρουσιάζεται στις παρακάτω σελίδες. Για τον εντοπισμό της χρονικής στιγμής καταγραφής του αντικειμένου, σε σχέση με τον χρόνο της διέγερσής του, χρησιμοποιήθηκε το συμβολόμετρο Michelson, όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, οι ονομασίες των φωτογραφιών προέρχονται από τον χρόνο καθυστέρησης (delay) της λήψης τους, σε σχέση με τον χρόνο κρούσης της επιφάνειας.

Η διαδικασία αποθήκευσης των εικόνων ήταν η εξής: με την αρχική εντολή του χρήστη πραγματοποιούνταν ο συγχρονισμός των λειτουργιών των συσκευών και η τελική φωτογραφία εμφανίζονταν αυτόματα στο γραφικό περιβάλλον του LabView. Στη συνέχεια μετρούνταν στον παλμογράφο η χρονική διαφορά μεταξύ της κρούσης του αντικειμένου και της λήψης της φωτογραφίας. Έτσι, η εικόνα μετονομαζόταν στην τιμή του delay αυτού και αποθηκεύονταν σε έναν προκαθορισμένο φάκελο στον σκληρό δίσκο του Η/Υ.

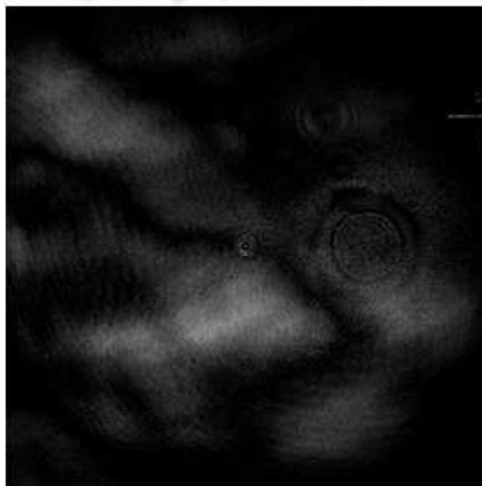
Οι εικόνες παρατίθενται σε χρονική ακολουθία, για τη παρουσίαση της εξέλιξης της κίνησης.



a) Delay 0,0009 msec



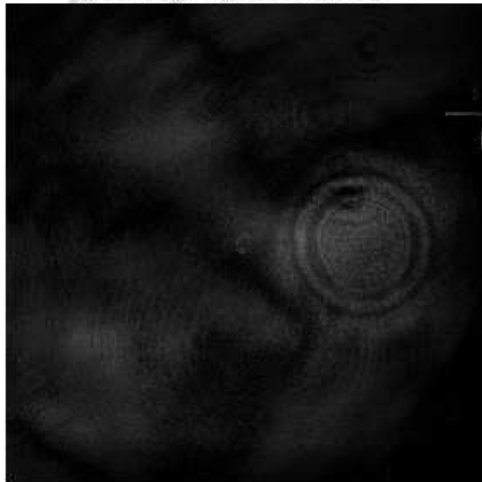
β) Delay 0,0010 msec



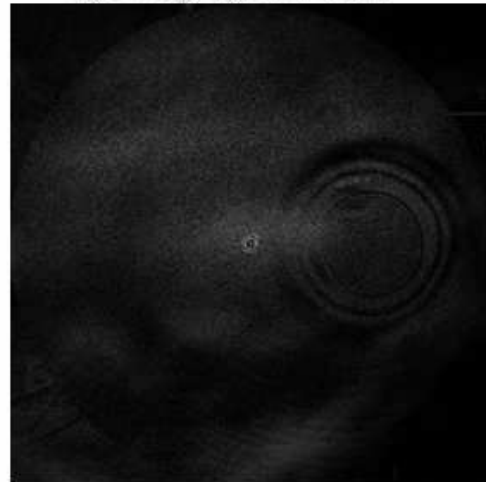
γ) Delay 0,0014 msec



δ) Delay 0,0017 msec

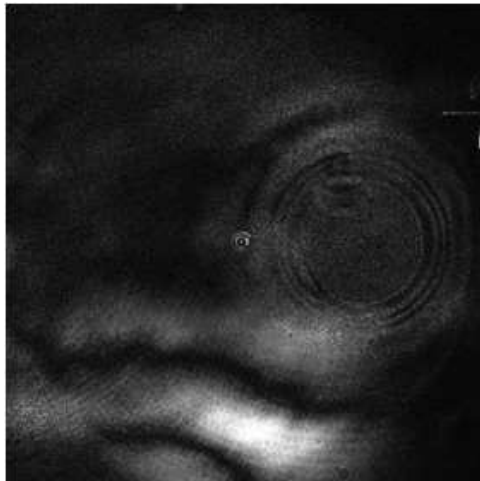


ε) Delay 0,0019 msec

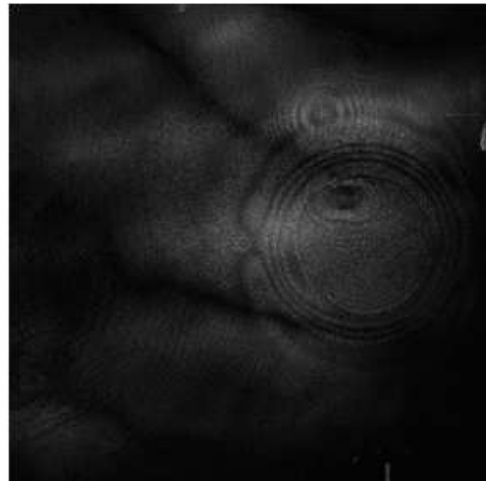


στ) Delay 0,0020 msec

Εικόνα 4.1: Η διάδοση της κίνησης στην μεταλλική πλάκα σε αρχικό στάδιο. Τα κύματά της εξαπλώνονται ομοιόμορφα κυκλικά γύρω από το σημείο κρούσης.



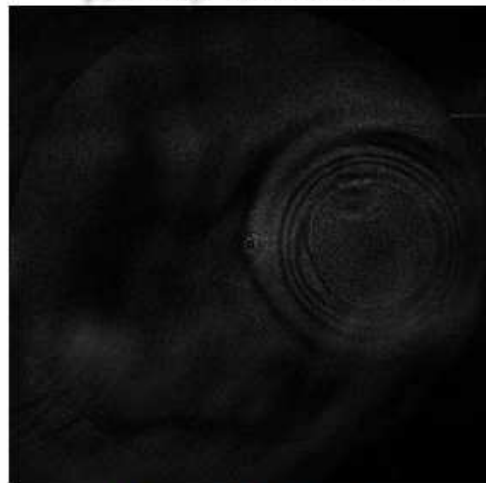
a) Delay 0,0030 msec



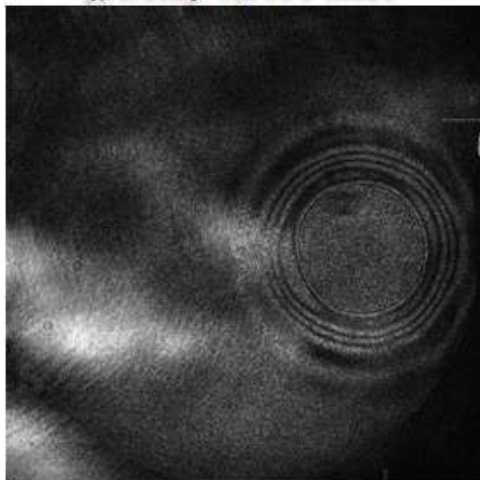
β) Delay 0,0032 msec



γ) Delay 0,0035 msec



δ) Delay 0,0039 msec



ε) Delay 0,0041 msec

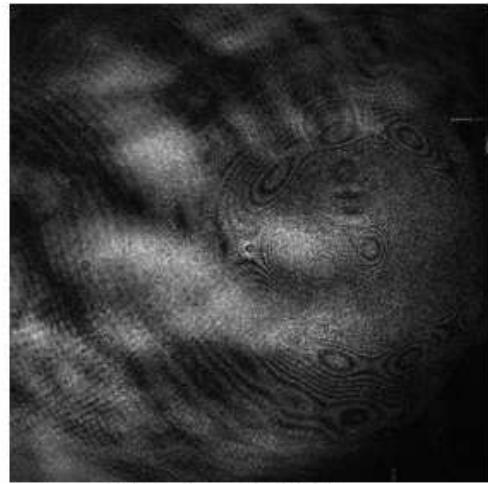


στ) Delay 0,0050 msec

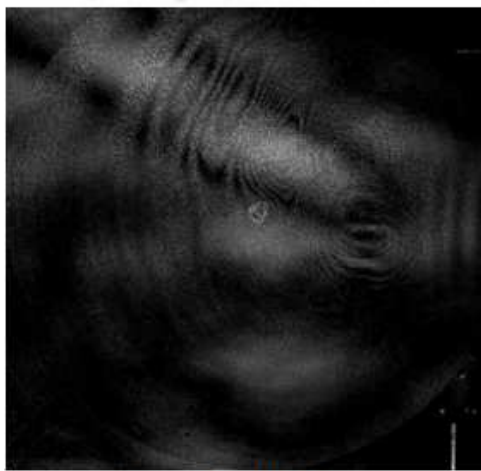
Εικόνα 4.2: Συνέχεια της εξέλιξης της κίνησης στην μεταλλική πλάκα στο ενδιάμεσο στάδιο. Καθώς τα κύματα διαδίδονται στην επιφάνεια της πλάκας, συναντούν το σημείο στήριξής της και αρχίζουν να περιθλώνται και να ανακλώνται από αυτό, με αποτέλεσμα να παραμορφώνονται.



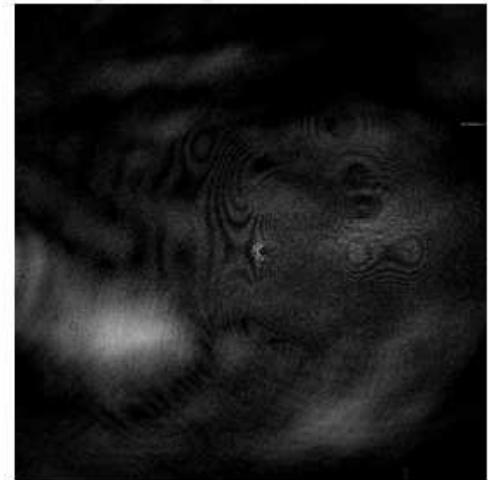
a) Delay 0,0052 msec



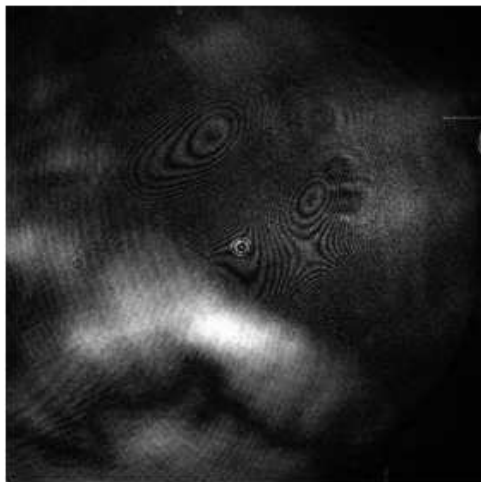
β) Delay 0,0115 msec



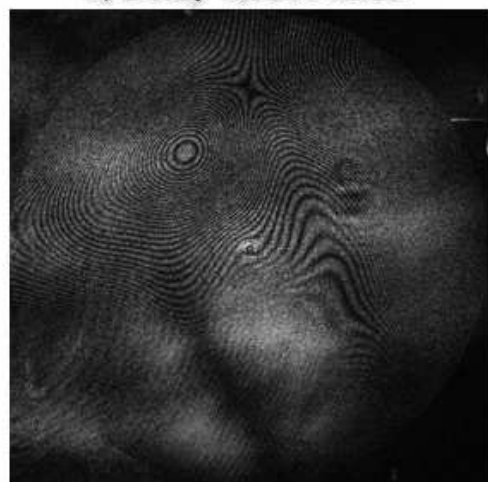
γ) Delay 0,0981 msec



δ) Delay 0,1260 msec



ε) Delay 0,9590 msec



στ) Delay 30,5200 msec

Εικόνα 4.3: Η κίνηση στην μεταλλική πλάκα στο τελικό στάδιο της εξέλιξής της. Τα κύματα αποκτούν όλο και περιπλοκότερους σχηματισμούς καθώς ανακλώντα από τα άκρα της πλάκας και συμβάλλουν μεταξύ τους.

4.2. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

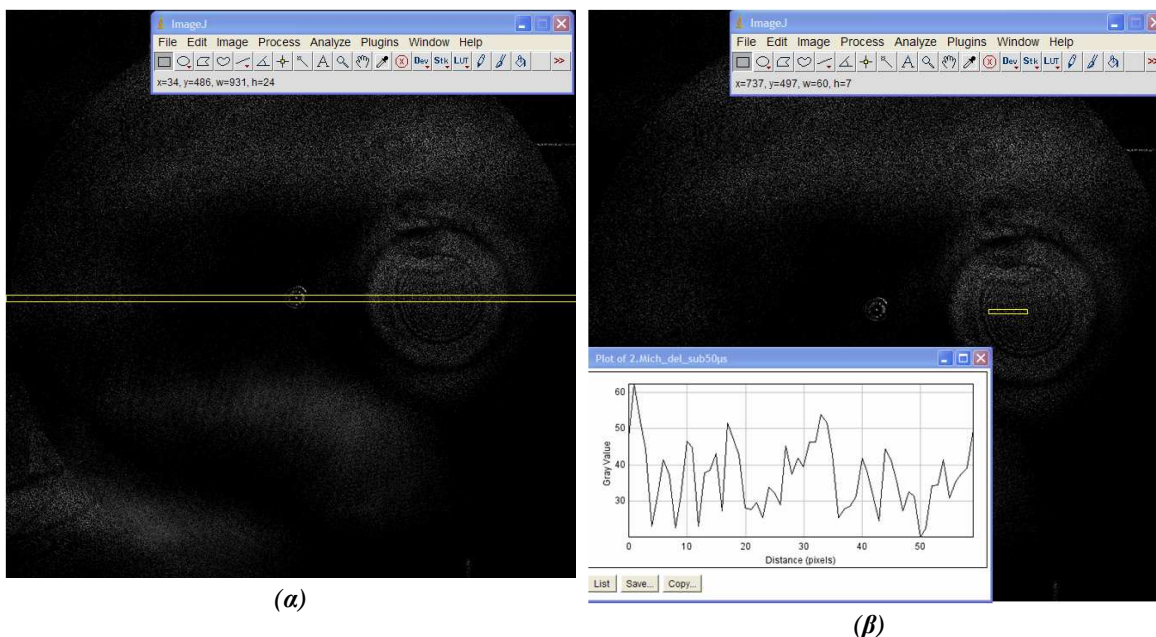
Η κίνηση έχει καταγραφεί από την αρχή της εμφάνισής της, με την πρώτη εικόνα που παρατίθεται να έχει ληφθεί 0,9ms μετά την κρούση. Η χρονική εξέλιξή της κατασταίνεται σαφής μέχρι το delay ~0,4ms, γιατί από εκείνο το στάδιο κι έπειτα έχει ήδη εξαπλωθεί σε όλη την επιφάνεια της πλάκας και τα κύματα που παρατηρούμε είναι τα ίδια που συνεχώς διαφοροποιούνται. Η τελευταία φωτογραφία που παρατίθεται έχει ληφθεί σε πολύ αργότερο χρόνο (delay 30,5ms) και επιλέχτηκε ως τυπικό παράδειγμα της εξέλιξης κίνησης σε αυτούς τους χρόνους.

Όταν η κίνηση φτάσει στην περιοχή του σημείου στήριξης, όπου βρίσκεται στερεωμένη η βίδα, αρχίζει να διαφοροποιείται. Η βίδα αποτελεί εμπόδιο στη ροή της κίνησης, με αποτέλεσμα να χάνεται η κυκλική ομοιομορφία της μετατόπισης των κυμάτων της (Εικ. 4.2 α-στ). Κάποια κύματα στο στάδιο αυτό περιθλώνται από την βίδα και αρχίζουν να κατευθύνονται προς άλλες διευθύνσεις στην επιφάνεια, και κάποια ανακλώνται και επιστρέφουν πίσω, συμβάλλοντας με τα νέα ερχόμενα, και δημιουργώντας έτσι ποικίλους σχηματισμούς (Εικ. 4.3 α-δ).

Στις πιο μακρινές περιοχές, όπου οι κροσσοί εμφανίζονται λιγότερο ομοιόμορφοι, η μετατόπιση της πλάκας παρουσιάζει πλέον πολλές διαφοροποιήσεις. Όσο περισσότερο ανομοιογενείς είναι οι κροσσοί μεταξύ τους, τόσο το μέγεθος της μετατόπισης της επιφάνειας είναι μεταβαλλόμενο. Καθώς τα κύματα φτάνουν στα άκρα της πλάκας, ανακλώνται από αυτήν και επιστρέφουν πίσω, συμβάλλοντας με άλλα κύματα που συναντούν (Εικ. 4.3 β-δ). Έτσι, μέσω των επαναλαμβανόμενων ανακλάσεων και συμβολών των κυμάτων στο χρόνο, δημιουργείται μια συνεχής εναλλαγή στην εξέλιξη της κίνησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα από κάποια χρονική στιγμή κι έπειτα η διάδοση της κίνησης να γίνεται τόσο πολύπλοκη, που η χρονική εξέλιξη αυτής να μην μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη (Εικ. 4.3 ε-στ).

Η συχνότητα των διαδιδόμενων ελαστικών κυμάτων υπολογίστηκε μέσω της ανάλυσης μερικών εκ των ληφθέντων, του αρχικού σταδίου της εξέλιξης, εικόνων με το πρόγραμμα ImageJ. Το πρόγραμμα αυτό δίνει την δυνατότητα στον χρήστη, επιλέγοντας μία περιοχή σε μια φωτογραφία, να βλέπει την κατανομή της έντασης των pixels που αντιστοιχούν στην περιοχή αυτή σε πλάτος (width) λαμβάνοντας την μέση τιμή των επιλεγμένων σε ύψος (height) pixels. Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν το

περιβάλλον του ImageJ, στο οποίο έχει εισαχθεί μία φωτογραφία του πειράματος προς ανάλυση.



Εικόνα 4.4: Φωτογραφικό στιγμιότυπο από το πρόγραμμα ImageJ σε διαδικασία ανάλυσης της φωτογραφίας delay 17 μs (α) ανάλυση width pixel στην διάμετρο της πλάκας και (β) ανάλυση width pixel και plot profile της επιλεγμένης περιοχής κροσσών.

Αρχικά η διάμετρος της πλάκας, της οποίας το μέγεθος είναι 0.2m, μετρήθηκε σε 931 width pixels. Στη συνέχεια επιλέχτηκε μια απόσταση μέσα στην περιοχή ομοιομορφίας των κροσσών. Στην επιλεγθείσα αυτή περιοχή έγινε ανάλυση plot profile (κατανομή της έντασης), δηλαδή μέσω του προγράμματος εμφανίστηκε αυτόματα διάγραμμα που αναπαριστά τον αριθμό των pixels (width) συναρτήσει της κλίμακας της φωτεινής έντασης (gray value), ενώ γίνεται αυτόματα λήψη της μέσης τιμής της έντασης από το ύψος (height) της επιλεγμένης περιοχής. Από το plot profile της περιοχής αυτής επιλέχτηκε ένας αριθμός n καθαρά διαγραμμένων κορυφών ($n = 5$, οι πέντε πρώτες στην εικόνα 4.4.β.). Με την μέτρηση των width pixels που κατέχουν οι πέντε αυτές κορυφές, που είναι 16, και μέσω της μεθόδου των τριών υπολογίστηκε σε m η απόσταση a που αυτές καταλαμβάνουν. Δηλαδή, γνωρίζοντας ότι $931 \text{ width pixels} \Rightarrow 0,2 \text{ m}$ και $16 \text{ width pixels} \Rightarrow a \text{ m}$, έχουμε $a = 3,43 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Από μία κορυφή μέχρι την επόμενη, στο διάγραμμα του plot profile, η απόσταση ισούται με μία περίοδο T , καθώς ανάμεσα σε δύο φωτεινούς κροσσούς η απόσταση είναι ένα μήκος κύματος λ . Έτσι το μήκος κύματος λ υπολογίστηκε σε m διαιρώντας

την απόσταση a με τον αριθμό των βυθισμάτων σε αυτή ($n - 1 = 4$), που σημαίνει ότι έχουμε $\lambda = a / (n-1) = 3,43 \cdot 10^{-3} \text{ m} / 4 \Rightarrow \lambda = 8,57 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση $f = u / \lambda$, όπου u η ταχύτητα του κύματος σε m/s και λ το μήκος του σε m , υπολογίζουμε την συχνότητα f των κυμάτων που διαδίδονται στην μεταλλική πλάκα. Γνωρίζουμε ότι η ταχύτητά τους είναι $u_2 = 1733 \text{ m/s}$ (3.14), οπότε έχουμε:

$$f = \frac{u_2}{\lambda} = \frac{1733}{0,000857} = 2020991 \text{ Hz} = 2,02 \text{ MHz} \quad (3.16)$$

Μετά από μια σειρά ανάλυσης ακόμη εννέα φωτογραφιών και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία πιστοποιήθηκε ότι **η συχνότητα των διαδιδόμενων κυμάτων στην μεταλλική επιφάνεια είναι $f = 1,905\text{MHz} (\pm 0,150\text{kHz})$.**

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε η πειραματική διάταξη δυναμικής ESPI για τη μελέτη της χρονικής εξέλιξης της διάδοσης ελαστικών κυμάτων σε πρότυπο αντικείμενο, ως συνέπεια ελεγχόμενης μηχανικής διέγερσης. Σημαντικό κομμάτι της υλοποίησης αποτέλεσε η ανάπτυξη τεχνικών και διατάξεων για τον χρονισμό των εμπλεκόμενων συσκευών. Έτσι, μέσω της υλοποιημένης πειραματικής διάταξης, μελετήθηκε η διάδοση των μηχανικών κυμάτων που παράγονται από ελεγχόμενη κρουστική διέγερση.

Τα αποτελέσματα αφορούν τη δόνηση μιας μεταλλικής κυκλικής πλάκας και το μηχανικό σύστημα διέγερσης ενός απλού εκκρεμούς με σφαιρική μάζα. Πάνω σε αυτά τα πειραματικά στοιχεία γίνεται η μελέτη της εξέλιξης των ελαστικών κυμάτων και υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης τους στα 1733 m/s. Με επιτυχία γίνεται δυνατή η καταγραφή εικόνων της κίνησης ανά $\sim 1\mu\text{s}$ και υπολογίζεται η συχνότητα των κυμάτων της στα 1,905MHz.

Από τα αποτελέσματα, χαρακτηριστικά στοιχεία της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων της κίνησης είναι εμφανή. Συγκεκριμένα, τα κύματα προέρχονται από το σημείο επαφής αντικειμένου-σώματος διέγερσης και εξαπλώνονται κυκλικά προς την υπόλοιπη επιφάνεια. Καθώς συναντούν ένα ξένο σώμα (π.χ. στο σημείο στερέωσης της επιφάνειας), η διάδοσή τους αρχίζει να διαφοροποιείται. Το ίδιο συμβαίνει και στα άκρα της επιφάνειας, όπου τα κύματα ανακλώνται και συμβάλλουν μεταξύ τους. Από κάποια χρονική στιγμή κι έπειτα η διάδοση της κίνησης, λόγω των συνεχών ανακλάσεων και συμβολών των κυμάτων, γίνεται τόσο πολύπλοκη, ώστε η χρονική εξέλιξή της να θεωρείται αναξιόπιστη.

Οι περιορισμοί της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε συνίστατο κυρίως:

1. Στον καθορισμό της ακριβούς χρονικής στιγμής διέγερσης, που παρ' όλη την προσπάθεια γνωστοποίησής της, παρουσίαζε αποκλίσεις, οφειλόμενες στον μηχανικό τρόπο διέγερσης.

2. Βασικός περιορισμός της μηχανικής διέγερσης είναι η συχνότητα της κίνησης που παράγεται, η οποία δεν μπορεί να υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή. Για μελέτη κυμάτων υψηλότερης συχνότητας (υψίσυχνα), χρειάζεται η κίνηση να παραχθεί με οπτικό τρόπο (δέσμη λέιζερ), όπου μέρος της δέσμης που «ανακρίνει» να αποτελεί

συγχρόνως και το μέσο διέγερσης. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται γνώση του ακριβούς χρόνου διέγερσης.

3. Μέσω της τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι δυνατή η πληροφόρηση του πλάτους των παραγόμενων κυμάτων. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αποτελέσει η εξέλιξη και τροποποίηση της παρούσας τεχνικής, με στόχο την τρισδιάστατη απεικόνιση των διαδιδόμενων κυμάτων, έτσι ώστε, πέρα από τον υπολογισμό του μήκους κύματος και της ταχύτητας αυτών, να μπορεί να εξαχθεί και το πλάτος τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] R.A. Serway, *Physics for scientists and engineers, Τόμος III, Θερμοδυναμική – κυματική – οπτική*, Εκδόσεις Saunders College, third edition, Αθήνα (1990)
- [2] O. Svelto, *Αρχές των Lasers*, Εκδόσεις Συμμετρία, 2^η έκδοση, Αθήνα (1986)
- [3] H.D. Young, *Φυσική Τόμος Β΄, Ηλεκτρομαγνητισμός, Οπτική, Σύγχρονη φυσική*, εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα (1994)
- [4] Β. Βάθης, *Ανακατασκευή, ακουστική μελέτη και εκτέλεση αρχαίας ελληνικής λύρας (χέλως)*, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο (2007)
- [5] *QUANTEL – Brilliant / BrilliantB Instruction Manual*
- [6] *Digital Delay / Pulse Generator-DG535 Manual*
- [7] Δρ Ν. Παπαδογιάννης, Δρ Ε. Μπακαρέζος, *Φυσική Κυματική*, Ρέθυμνο, 2004

Παράρτημα

Όταν υλικά σώματα αλληλεπιδρούν μόνο μεταξύ τους, χωρίς την ύπαρξη άλλων εξωτερικών δυνάμεων, διατηρείται η ολική ορμή ($P_{ολ}$) του συστήματος. Οι περιπτώσεις στις οποίες οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης κάνουν ιδιαίτερα αισθητή την παρουσία τους για μικρά χρονικά διαστήματα, εν σύγκριση με τους χαρακτηριστικούς χρόνους της κίνησης των σωμάτων όταν δεν εμφανίζονται αυτές οι δυνάμεις, καλούνται κρούσεις.

Σε ένα μονοδιάστατο περιβάλλον μία κρούση υλικών σημείων επιβάλλει την αρχή διατήρησης της ορμής, που είναι:

$$P = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2 = m_1 \cdot u'_1 + m_2 \cdot u'_2 \quad (5.1)$$

όπου m_1 και m_2 οι μάζες των δύο σωμάτων σε kg , και u_1 και u_2 οι ταχύτητές τους σε m/s . Οι ταχύτητες u'_1 και u'_2 μοιράζονται αμέσως μετά την κρούση με απρόβλεπτο τρόπο.

Υπάρχουν τρία είδη κρούσεων: η ελαστική, κατά την οποία διατηρούνται η ολική ορμή $P_{ολ}$ και η κινητική ενέργεια E_k του συστήματος, η μη ελαστική, κατά την οποία διατηρείται η ολική ορμή $P_{ολ}$, αλλά όχι και η κινητική ενέργεια E_k , και τέλος η τελείως μη ελαστική (πλαστική), που είναι περίπτωση μη ελαστικής κρούσης, κατά την οποία τα δύο σώματα που αλληλεπιδρούν κολλούν μεταξύ τους μετά την κρούση, με αποτέλεσμα να έχουν την ίδια ταχύτητα u .

Στην περίπτωση του πειράματός μας η κρούση είναι ελαστική, καθώς οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των δύο σωμάτων θεωρητικά έχουν συνολικό έργο μηδέν. Θεωρώντας τα μεγέθη της τριβής και της αντίστασης αμελητέα, το άθροισμα της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του σώματος παραμένει σταθερό:

$$E_\delta + E_k = \text{σταθ.} \quad (5.2)$$

Για τις ελαστικές κρούσεις, σε ένα μονοδιάστατο περιβάλλον, η κινητική ενέργεια είναι:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot u_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot u_2^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot u'^2_1 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot u'^2_2 \quad (5.3)$$

Η δυναμική ενέργεια ενός σώματος είναι ανάλογη του ύψους που βρίσκεται το σώμα από την επιφάνεια της θάλασσας και της μάζας του. Ο τύπος της δυναμικής ενέργειας είναι:

$$E_{\delta} = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \quad (5.4)$$

όπου m είναι η μάζα του σώματος σε kg , g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2), h_1 , h_2 είναι η αρχική και η τελική θέση του σώματος που κινήθηκε (υψομετρική διαφορά) σε m . Ο τύπος για τον υπολογισμό της μάζας ενός σώματος είναι:

$$m = \rho \cdot V \quad (5.5)$$

όπου ρ η γραμμική πυκνότητα του υλικού του σώματος σε kg/m^3 και V ο όγκος του σε m^3 . Το υλικό της μπίλιας είναι το ατσάλι (χρώμιο), οπότε $\rho = 7.84 \text{ g/cm}^3 = 7840 \text{ kg/m}^3$. Γνωρίζοντας ότι η ακτίνα της μπίλιας είναι $r_2 = 4.75 \text{ mm}$, υπολογίζεται ο όγκος της μπίλιας:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot 3.14 \cdot (0.00475 \text{ m})^3 = 4.48 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \quad (5.6)$$

Η μάζα της μπίλιας, σύμφωνα με την εξίσωση (5.5), είναι:

$$m = \rho \cdot V = 7840 \text{ kg/m}^3 \cdot (4.48 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3) = 0.0035 \text{ kg} \quad (5.7)$$

Με απλούστευση της εξίσωσης (5.4) στην μορφή $E_{\delta} = m \cdot g \cdot h$, όπου h ($=0.17 \text{ m}$) το ύψος που βρισκόταν η μπίλια από την επιφάνεια της αντικραδασμικής τράπεζας, υπολογίζουμε την δυναμική ενέργεια της μπίλιας:

$$\begin{aligned} E_{\delta} &= m \cdot g \cdot h = 0.0035 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.17 \text{ m} \\ &= 0.058 \text{ J} \cong 5.83 \text{ mJ} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Για τον υπολογισμό της κινητικής ενέργειάς της μπίλιας χρειάζεται πρώτα να υπολογιστεί η ταχύτητά της. Η ταχύτητα u του κύματος υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (3.3). Γνωρίζουμε ότι η απόσταση που διανύει η μπίλια είναι $s_1 = 5.6 \text{ cm}$ σε χρόνο $\Delta t = 158.5 \text{ ms}$, οπότε έχουμε:

$$u_1 = s_1 / \Delta t = 0.0056 \text{ m} / 0.1585 \text{ s} = 0.0353 \text{ m/s} \quad (5.9)$$

Η κινητική ενέργεια της μπίλιας, σύμφωνα με την εξίσωση (5.3), είναι:

$$E_{\kappa} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 0.0035 \text{ kg} \cdot (0.0353 \text{ m/s})^2$$

$$= 2.181 \cdot 10^{-6} \text{ J} \cong 2.18 \mu\text{J} \quad (5.10)$$

Γνωρίζοντας τη μάζα m της μπίλιας και την ταχύτητά της u_1 και σύμφωνα με την εξίσωση (5.1), η ορμή P με την οποία η μπίλια κρούει την επιφάνεια της πλάκας είναι:

$$P = m \cdot u_1 = 0.0035 \text{ kg} \cdot 0.0353 \text{ m/s} = 12.34 \cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m/s} \quad (5.11)$$

Η ενέργεια ενός σώματος δε χάνεται και δεν δημιουργείται, αλλά μετασχηματίζεται από μια μορφή σε μια άλλη. Το σώμα της μπίλιας περικλείει δυναμική ενέργεια, ακριβώς επειδή βρίσκεται συγκρατημένο από τον ηλεκτρομαγνήτη σε κάποιο ύψος από την οπτική τράπεζα. Η ενέργειά της παραμένει δυναμική όσο βρίσκεται στο σημείο στήριξης (υψηλότερο σημείο) και μετατρέπεται σε κινητική στο χαμηλότερο σημείο. Στα ενδιάμεσα σημεία όμως η ενέργεια της μπίλιας είναι και δυναμική και κινητική. Χάρη αυτής της ενέργειας της μπίλιας παράγεται έργο, που σημαίνει ότι μεταφέρεται ενέργεια από το σώμα της στο σώμα της πλάκας. Έτσι η ενέργεια αυτή αλλάζει μορφή και μετατρέπεται σε μηχανική κίνηση που διαδίδεται στο υλικό της μεταλλικής πλάκας.