



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και αξιολόγηση οπτικού δονητόμετρου Doppler
βασισμένο σε φωτονική ολοκλήρωση.**

Ζωή Ι. Γεωργιοπούλου

Επιβλέπων:

Αλέξανδρος Παπαγιάννης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και αξιολόγηση οπτικού δονητόμετρου Doppler
βασισμένο σε φωτονική ολοκλήρωση.

Ζωή Ι. Γεωργιοπούλου

Επιβλέπων:

Αλέξανδρος Παπαγιάννης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1η Οκτωβρίου 2020.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
A. Παπαγιάννης

.....
H. Αβραμόπουλος

.....
Γ. Ματσόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

(Υπογραφή)

.....

Ζωή Ι. Γεωργιοπούλου

Φυσικός Εφαρμογών Ε.Μ.Π

Copyright © Γεωργιοπούλου Ι. Ζωή, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Το Laser Doppler Vibrometer είναι μια εξελιγμένη τεχνική μέτρησης που αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη μέτρηση μετατοπίσεων και ταχύτητας μίας δονούμενης επιφάνειας . Τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι η άνευ-επαφής φύση του, η ικανότητα μέτρησης σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, η πολύ υψηλή ακρίβεια, η ικανότητα μέτρησης απομακρυσμένων αντικειμένων και η ευκολία του να αλλάζει το σημείο μέτρησης. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα το καθιστούν απαραίτητο για ανάλυση σε πολλούς διαφορετικούς βιομηχανικούς και ερευνητικούς τομείς.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η θεωρητική μελέτη ενός LDV συστήματος που πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB, με σκοπό την ανάλυση και αξιολόγηση τριών σχημάτων διαμόρφωσης φάσης (Simple Serrrodyne Shifter, Four-Branch Shifter, Sophisticated Serrrodyne Shifter), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ολοκληρωμένες φωτονικές διατάξεις για να επιτελέσουν τη μετατόπιση της οπτικής συχνότητας, μία στοιχειώδη λειτουργία στα συστήματα LDVs. Εν συνεχεία, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον χαρακτηρισμό ενός ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος, το οποίο υλοποιεί έναν Simple Serrrodyne Shifter σε τεχνολογία silicon nitride (Si_3N_4) και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα.

Όσον αφορά την δομή της διπλωματικής εργασίας, στο 1^ο Κεφάλαιο δίνεται μια σύντομη εισαγωγή για τις θεμελιώδεις έννοιες για τη δομή και τη λειτουργία ενός Laser Doppler Vibrometer και θα περιγραφούν θεωρητικά όλα τα λειτουργικά τμήματα ενός Laser Doppler Vibrometer. Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται υλοποιήσεις LDV που έχουν διεξαχθεί σε διαφορετικά πεδία εφαρμογών. Στο 3^ο κεφάλαιο μελετώνται θεωρητικά και προσομοιωτικά τα τρία σχήματα διαμόρφωσης και στο 4^ο κεφάλαιο αναλύεται η διάταξη LDV βασισμένη σε οπτικές ίνες και περιγράφεται το chip του Simple Serrrodyne Shifter και η πειραματική διαδικασία χαρακτηρισμού που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο. Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται συμπεράσματα και προοπτικές υλοποίησης της διάταξης.

Λέξεις κλειδιά

Laser Doppler Vibrometer, Ετερόδυνο Συμβολόμετρο, Σχήματα διαμόρφωσης, Simple Serrrodyne Shifter, Four-Branch Shifter, Sophisticated Serrrodyne Shifter, Θερμό-οπτικοί phase shifter, PZT phase shifter

Abstract

LDV is a very sophisticated measurement technique becoming a standard for measuring displacements and velocities. Its main advantages are the non-contact nature, its wide frequency measurement capability, a very high precision, the ability to measure distant objects and its simplicity to change the measurement point. All the advantages make it indispensable for analysis in many different industrial and research fields.

We present an extensive analysis of three modulation schemes (Simple Serrodyne Shifter, Four-Branch Shifter, Sophisticated Serrodyne Shifter) which cause a shift in optical frequency by changing the phase of the measurement signal to compare and evaluate the performance of different LDVs systems. Subsequently, this work focuses on experimental attempts to characterize a chip that implements a Simple Serrodyne Shifter.

This manuscript consists of five chapters. The 1st Chapter gives a brief introduction to the basic concepts for the structure and operation of a Laser Doppler Vibrometer and a description of the functional parts of the LDV. The second chapter presents applications from different LDV implementations that have been performed in various application fields. In the 3rd chapter, the description of the three modulation schemes and their simulations are provided and in the 4th chapter, the fiber-based LDV expansion is analyzed and the Simple Serrodyne Shifter chip and the experimental characterization process are described. Finally, the 5th Chapter provides conclusions and an outlook for future possibilities in the direction of this work.

Keywords

Laser Doppler Vibrometer, Heterodyne Interferometer, Modulation Schemes, Simple Serrodyne Shifter, Four-Branch Shifter, Sophisticated Serrodyne Shifter, Thermo-optic phase shifter, PZT phase shifter

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου την περίοδο 2019-2020.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αλέξανδρο Παπαγιάννη, για την εμπιστοσύνη του, τη καθοδήγηση του και τη αδιάκοπη στήριξη του σε κάθε προσπάθεια μου να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου στον τομέα της Οπτικής και Φωτονικής.

Με την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο που μου έδωσε την ευκαιρία να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου στο τομέα της Φωτονικής και να παρακολουθήσω ερευνητικές δραστηριότητες στα πλαίσια ενός αξιόλογου εργαστηριακού περιβάλλοντος.

Ειδικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Αδάμ Ραπτάκη για τη πολύτιμη βοήθεια, την καθοδήγηση και την ακούραστη στήριξη του από την αρχή έως το τέλος της διεκπεραίωσης της διπλωματικής.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους υποψήφιους διδάκτορες Λευτέρη Γουναρίδη και Νίκο Λύρα για το ενδιαφέρον τους και τη προθυμία τους να παρέχουν βοήθεια σε κάθε ζήτημα της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου που με στηρίζει αδιαλείπτως σε κάθε νέο μου βήμα καθώς και όλους του συμφοιτητές και φίλους που μοιραστήκαμε τις ίδιες φοιτητικές ανησυχίες όλα αυτά τα χρόνια.

Ζωή Γεωργιοπούλου

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

*Στη γονείς μου,
Γιάννη και Ζαφειρούλα*

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Ευχαριστίες.....	9
Κεφάλαιο 1 ^ο . Εισαγωγή	16
1.1 Η Αρχή Λειτουργίας του LDV.....	16
1.2 Το Φαινόμενο Doppler	18
1.3 Συμβολομετρία.....	19
1.4 Φωτοανίχνευση.....	22
1.6. Συστήματα LDVs	23
1.6.1 Ηλεκτρονική αλυσίδα επεξεργασίας σήματος Doppler	24
1.7 Εφαρμογές του Laser Doppler Vibrometer	29
1.8 Διαφορετικές διατάξεις LDVs πολλαπλών βαθών ελευθερίας.....	30
Κεφάλαιο 2 ^ο . Εφαρμογές LDVs.....	32
2.1 Laser Doppler Vibrometer σε διάταξη οπτικών ινών για δυναμική μέτρηση ενεργοποιητών MEMs με συνεπίπεδη κίνηση.....	32
2.2 Μέτρηση των χαρακτηριστικών συντονισμού μιας δονούμενης φουσαλίδας με χρήση ενός Laser Doppler Vibrometer.....	34
2.3 On-chip Laser Doppler vibrometer για μέτρηση της ταχύτητας του αρτηριακού σφυγμικού κύματος	37
Κεφάλαιο 3 ^ο . Σχήματα Διαμόρφωσης	40
3.1 Οπτικός Ολισθητής Φάσης (Phase Shifter)	40
3.2 Σχήματα Διαμόρφωσης (Modulation Schemes).....	41
3.2.1 Simple Serrrodyne Shifter.....	41
3.2.2 Four-Branch Shifter.....	42
3.2.3 Sophisticated Serrrodyne Shifter	43
3.3 Μελέτη των σχημάτων διαμόρφωσης.....	44
3.3.1 Περιγραφή του κώδικα σε περιβάλλον Matlab	44
3.3.2 Προσομοιωτική μελέτη σχημάτων διαμόρφωσης.....	52
Κεφάλαιο 4 ^ο . Χαρακτηρισμός του LDV module.....	64
4.1 Fiber-based διάταξη LDV	64
4.2 Πειραματική διάταξη χαρακτηρισμού του chip.....	69
4.2.1 Θερμό-οπτικοί Phase Shifters	70

4.2.2 PZT Phase Shifters	71
4.3 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα	71
Κεφάλαιο 5°. Σύνοψη	80
Βιβλιογραφία	81

Κεφάλαιο 1^ο. Εισαγωγή

Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, υπήρξε επιτακτική ανάγκη για ακριβείς μετρήσεις ταχύτητας και συχνότητας ενός δονούμενου αντικειμένου μέσω μίας ανέπαφης τεχνικής. Οι θεωρητικές βάσεις για την υλοποίηση ενός τέτοιου λειτουργικού συστήματος τέθηκαν λίγο μετά την ανακάλυψη του λέιζερ το 1960. Συγκεκριμένα, οι πρώτοι που ανέπτυξαν μία τεχνική μέτρηση της ταχύτητας που βασίζεται στην αλλαγή φάσης που υφίσταται μία σκεδαζόμενη δέσμη φωτός από κινούμενα σωματίδια ή αντικείμενα λόγω του φαινομένου Doppler, ήταν οι Yen και Cummins το 1964. Έπειτα, ακολούθησε το βιβλίο του Drain το 1975 με τίτλο «The Laser Doppler Technique», στο οποίο υπήρξαν οι πρώτες αναφορές για την αρχή λειτουργίας ενός Laser Doppler Vibrometer (LDV). Τα πρώτα σχέδια του LDV βασίστηκαν αποκλειστικά σε ογκώδη (bulk) οπτικά στοιχεία ενώ μία βελτιωμένη εκδοχή του, που ενσωμάτωνε κυματοδηγούς οπτικών ινών στην διάταξη, παρουσίασε ο Lewin το 1985 και το 1988. Από τότε το Laser Doppler Vibrometer έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές διαφορετικών επιστημονικών πεδίων.

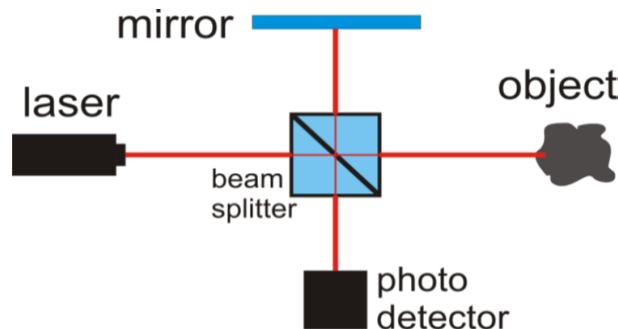
Στο παρόν κεφάλαιο θα εισαχθούν όλες οι θεμελιώδεις έννοιες που συνδέονται άρρηκτα με τη δομή και τη λειτουργία του Laser Doppler Vibrometer στον ελεύθερο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει μνεία στην αρχή λειτουργίας του LDV και θα αναλυθεί εκτενώς το οπτικό μέρος του σε free space διάταξη. Επιπλέον, το κεφάλαιο αυτό θα επικεντρωθεί στην ηλεκτρονική αλυσίδα επεξεργασίας σήματος Doppler και θα αναλυθούν εκτενώς οι μέθοδοι αποδιαμόρφωσης του ετερόδυνου σήματος. Τέλος, θα παρουσιαστεί ένα σύνολο εφαρμογών του LDV στο βιομηχανικό και στον ερευνητικό τομέα.

1.1 Η Αρχή Λειτουργίας του LDV

Το Laser Doppler Vibrometer ορίζεται ως ένας ακριβής μορφοτροπέας (transducer) και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας και της μετατόπισης μίας δονούμενης επιφάνειας σε πολύ μεγάλο εύρος πλάτους και συχνότητας. Συγκεκριμένα, αφορά μία πολύ ευαίσθητη οπτική τεχνική που δύναται να μετρήσει μετατοπίσεις ακόμα και μικρότερες των 10^{-12} m με εύρος συχνότητας από το κοντινό DC έως μερικά MHz. Στην ευρεία περιοχή συχνοτήτων, το LDV έχει δυναμικό εύρος που δεν ταιριάζει με άλλους αισθητήρες με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται μετρήσεις που δεν είναι εφικτές από άλλες οπτικές τεχνικές.

Η αποδεδειγμένη υψηλή ακρίβεια του LDV οφείλεται στην συμβολομετρική αρχή λειτουργίας του η οποία περιγράφεται παρακάτω. Σε μία διάταξη ενός Laser Doppler Vibrometer στον ελεύθερο χώρο χρησιμοποιείται ένα οπτικό συμβολόμετρο Michelson ή Mach-Zehnder το οποίο οδηγείται από την δέσμη ενός laser. Η δέσμη του laser διαχωρίζεται μέσω ενός

διαχωριστή δέσμης (beamsplitter) σε μία δέσμη αναφοράς και σε μία δέσμη μέτρησης. Η δέσμη αναφοράς διατηρεί την αρχική πληροφορία αναλλοίωτη καθώς οδηγείται στο συμβολόμετρο. Η δέσμη μέτρησης εστιάζεται στη δονούμενη επιφάνεια η οποία τη διαχέει ή την ανακλά. Στην συνέχεια, μέρος του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός συλλέγεται από ένα φακό και έπειτα συμβάλλει με την δέσμη αναφοράς. Τέλος, το οπτικό σήμα που προκύπτει από την συμβολή εισέρχεται σε ένα φωτοανιχνευτή. Παρακάτω απεικονίζεται το περιγραφόμενο συμβολόμετρο Michelson.



Εικόνα 1.1 Βασική Πειραματική Διάταξη του LDV

Η απόσταση που διανύει η δέσμη μεταξύ του διαχωριστή δέσμης και του κάθε ανακλαστή συμβολίζεται ως x_r για την δέσμη αναφοράς και ως x_m για τη δέσμη μέτρησης ενώ οι αντίστοιχες φάσεις των οπτικών σημάτων στο συμβολόμετρο είναι $\varphi_r = 2 \cdot k \cdot x_r$ και $\varphi_m(t) = 2 \cdot k \cdot x_m$, όπου $k = 2 \cdot \pi / \lambda$. Η διαφορά φάσης στο οπτικό σήμα συμβολής αντιστοιχεί σε $\varphi(t) = \varphi_r - \varphi_m = 2 \cdot k \cdot \Delta L$ όπου ΔL είναι η μετατόπιση δόνησης του αντικειμένου και λ του μήκους κύματος του laser.

Μαθηματικά, και οι δύο δέσμες φωτός μπορούν να θεωρηθούν ως ελεύθερα κύματα που περιγράφονται από τις εξισώσεις:

$$E_r = E_{r0} \cdot e^{j(\omega_r t + \varphi_r)} \quad (1.1)$$

$$E_{m0} \cdot e^{j(\omega_m t + \varphi_m)} = E_{m0} \cdot e^{j((\omega_r + \omega_d) t + \varphi_r - \varphi(t))} \quad (1.2)$$

όπου ω_d η γωνιακή συχνότητα λόγω φαινομένου Doppler.

Έπειτα, ο φωτοανιχνευτής μετρά τη χρονοεξαρτώμενη ένταση του οπτικού σήματος συμβολής, $I(t)$, σύμφωνα με τον τετραγωνικό νόμο και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I(t) = |E_m + E_r|^2 = I_m + I_r + 2 \cdot \sqrt{I_m \cdot I_r} \cdot \cos(\omega_d(t) \cdot t - \varphi(t)) \quad (1.3)$$

Εισάγοντας το συντελεστή ανάμειξης, K και το συντελεστή απόδοσης της επιφάνειας, R , η εξίσωση (1.3) γίνεται:

$$I(t) = I_m I_r R + 2 \cdot K \cdot \sqrt{I_m I_r R} \cdot \cos(\omega_d(t) \cdot t - \varphi(t)) \quad (1.4)$$

Στην περίπτωση που το ΔL μεταβάλλεται συνεχώς, η ένταση του οπτικού σήματος συμβολής, $I(t)$, μεταβάλλεται περιοδικά. Συγκεκριμένα, μία διαφορά φάσης, φ , ίση με 2π rad αντιστοιχεί

σε μία μετατόπιση, L , των $\lambda/2$. Συνεπώς, απαιτείται μία μονοχρωματική και συνεκτική φωτεινή πηγή για πολύ καλά καθορισμένη φάση και μήκος κύματος.

Μέσω της έντασης του οπτικού σήματος συμβολής, $I(t)$, είναι πιθανό να προσδιορίσουμε την μετατόπιση της δονούμενης επιφάνειας αλλά δεν είναι δυνατή η άμεση ανάκτηση της φάσης της έντασης. Η κίνηση του αντικειμένου που εξετάζεται προκαλεί την ίδια αλλαγή στο οπτικό σήμα του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός στην συγκεκριμένη πειραματική διάταξη ανεξάρτητα από την κατεύθυνση και άρα η πληροφορία της κατεύθυνσης του δονούμενου αντικειμένου δεν μπορεί να ληφθεί. Προκειμένου να εισάγουμε κατευθυντική ευαισθησία θα χρησιμοποιηθούν δύο εκδοχές συμβολόμετρων που θα αναλυθούν ενδελεχώς στις επόμενες ενότητες.

1.2 Το Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler του φωτός παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Αυστριακό Φυσικό Christian Doppler, το 1842 στο άρθρο “Concerning the Coloured Light of Double Stars” που εξηγούσε τις παρατηρούμενες περιοδικές αλλαγές χρώματος των δυαδικών αστεριών δηλαδή ενός συστήματος δύο αστεριών σε τροχιά γύρω από ένα κοινό κέντρο μάζας. Το παρατηρούμενο φως από το αστέρι αυξάνει σε συχνότητα (blueshift) καθώς το αστέρι κινείται προς τη γη ενώ η συχνότητα του θα μειωθεί (redshift) καθώς θα απομακρύνεται από τη γη. Επομένως, ο Doppler εξήγησε πρώτος ότι η περιοδική αλλαγή της συχνότητας του φωτός που εκπέμπεται από ένα δυαδικό αστέρι οφείλεται στην περιοδική κίνηση ενός δυαδικού αστεριού.

Ως φαινόμενο Doppler ορίζεται η σχετική αλλαγή στο μήκος κύματος και στη συχνότητα ενός κύματος όταν ο παρατηρητής βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων. Η συχνότητα του εκπεμπόμενου κύματος δεν μεταβάλλεται ποτέ καθώς αλλάζει μόνο η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής, δηλαδή η συχνότητα με την οποία φτάνουν σε αυτόν τα μέτωπα του κύματος.

Το φυσικό αυτό φαινόμενο μπορεί να συμβεί είτε όταν το κύμα διαδίδεται σε κάποιο υλικό μέσο είτε όχι. Όταν υπάρχει μέσο διάδοσης, η ταχύτητα τόσο του παρατηρητή όσο και της πηγής, πρέπει να προσδιορίζεται σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Συνεπώς, το τελικό φαινόμενο Doppler μπορεί να προκύψει από την κίνηση του παρατηρητή, από την κίνηση της πηγής, από την κίνηση του μέσου διάδοσης ή από την κίνηση ενός παρεμβαλλόμενου αντικειμένου που ανακλά ή διαχέει. Σχετικά με τα κύματα που δεν χρειάζονται ένα υλικό μέσο για τη διάδοσή τους, όπως είναι τα ηλεκτρομαγνητικά και τα βαρυτικά κύματα, δίνεται ιδιαίτερη σημασία μόνο στην σχετική ταχύτητα μεταξύ του παρατηρητή και της πηγής.

Η λειτουργία ενός Laser Doppler Vibrometer βασίζεται στο φαινόμενο Doppler σύμφωνα με το οποίο η πηγή του κύματος είναι ένα laser ενώ το ρολό του παρατηρητή έχει η εξεταζόμενη δομή δηλαδή μία δονούμενη επιφάνεια. Ως εκ τούτου, πρόκειται για την περίπτωση ακίνητης πηγής φωτός και κινούμενου παρατηρητή. Καθώς εκπέμπεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, η δονούμενη επιφάνεια θα μετρήσει μία διαφορετική συχνότητα, f' , η οποία περιγράφεται από τη σχέση:

$$f' = f * \left(\frac{c}{c \pm u} \right) \quad (1.6)$$

Όπου f είναι η συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτός, $c = 299792458$ m/s η ταχύτητα διάδοσης και u η ταχύτητα δόνησης της επιφάνειας. Η πρόσθεση ή η αφαίρεση στον παρονομαστή επιλέγεται σύμφωνα με την κατεύθυνση που κινείται η εξεταζόμενη δομή, εάν αυτή απομακρύνεται από την πηγή έχουμε πρόσθεση ενώ όταν την πλησιάζει αφαίρεση.

Η ταχύτητα του φωτός είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με την ταχύτητα δόνησης, $c \gg u$ και άρα η εξίσωση (1.6) γίνεται μέσω της σειράς Taylor, $\frac{1}{1-x} \approx 1 - x$:

$$f' = f * \left(\frac{c}{c \pm u} \right) \approx f * \left(\frac{c \mp u}{c} \right) = f * \left(1 \mp \frac{u}{c} \right) = f + f_d \quad (1.7)$$

Συμπερασματικά, η συχνότητα αλλαγής ισούται με $f_d = f * \frac{u}{c}$ και αντιστοιχεί στη συχνότητα Doppler. Η εξίσωση (1.7) εκφράζει τη συχνότητα που μετρά η δονούμενη επιφάνεια.

Συνολικά στην περίπτωση του LDV, μελετάται το ανακλώμενο φως οπότε πρέπει να ληφθεί ξανά υπόψη το φαινόμενο Doppler καθώς η δονούμενη επιφάνεια λειτουργεί πριν την ανάκλαση ως παρατηρητής και έπειτα ως πηγή. Συνεπώς, μετά την ανάκλαση του φωτός από τη δονούμενη επιφάνεια έχουμε την περίπτωση κινούμενης πηγής και του ακίνητου παρατηρητή και η συνολική αλλαγή συχνότητας είναι ίση με το διπλάσιο της συχνότητας Doppler δηλαδή

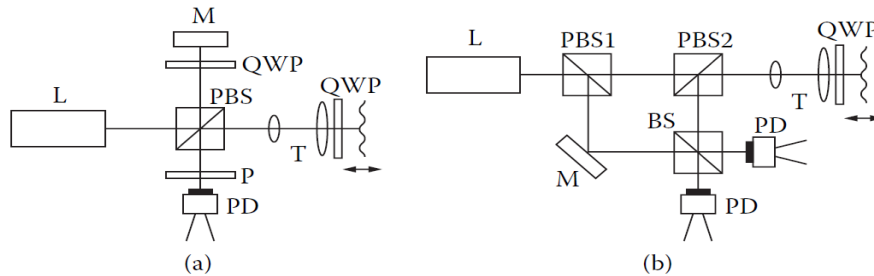
$$f_d^{all} = 2 * f * \frac{u}{c} = 2 * \frac{u}{\lambda} \quad (1.8)$$

Όπου λ το μήκος κύματος του laser.

1.3 Συμβολομετρία

Το LDV είναι μία τεχνική που βασίζεται αποκλειστικά στην οπτική συμβολομετρία, υπέρθεση δύο οπτικών σημάτων ώστε να προκύψει το φαινόμενο συμβολής και να εξαχθεί πληροφορία, σύμφωνα με την οποία έχουν αναπτυχθεί δύο βασικές οπτικές πειραματικές διατάξεις LDV που εισάγουν κατευθυντική ευαισθησία. Πρόκειται για το Ομόδυνο και το Ετερόδυνο Συμβολόμετρο.

Σημειώνεται ότι οι οπτικές διατάξεις της ομόδυνας και της ετερόδυνας τεχνικής θα περιγραφθούν με ένα συμβολόμετρο Michelson στην παρούσα εργασία. Ωστόσο, στην περιγραφή αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ισοδύναμα και ένα συμβολόμετρο Mach-

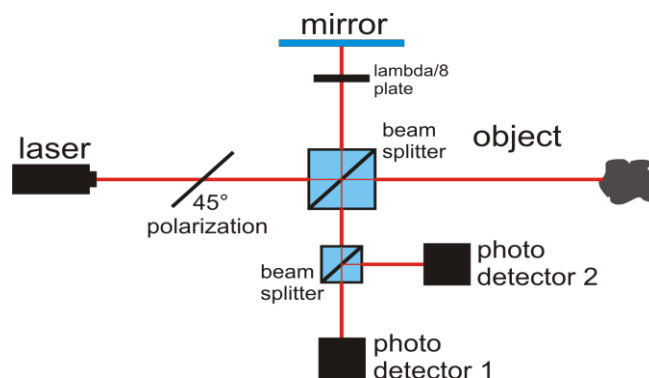


Zehnder.

Εικόνα 1.2 Οπτικές διατάξεις των κλασικών συμβολόμετρων (a) Michelson και (b) Mach-Zehnder. BS είναι ο διαχωριστής δέσμης, M είναι το κάτοπτρο, PBS είναι ένας διαχωριστής πόλωσης, L είναι ένα laser, T είναι ένα τηλεσκόπιο, P είναι ένας πολωτής, QWP είναι μία πλάκα $\lambda/4$ και PD είναι μία φωτοδίοδος.

Ομόδυνο Συμβολόμετρο

Η πειραματική διάταξη της ομόδυνας τεχνικής προσθέτει στη βασική πειραματική διάταξη του LDV μία πλάκα επιβράδυνσης κύματος, ένα διαχωριστή πόλωσης, ένα διαχωριστή δέσμης και ένα φωτοανιχνευτή. Το συμβολόμετρο πολώνει τη δέσμη του laser σε μία κλίση 45° . Το φως στο βραχίονα αναφοράς διέρχεται διπλά μέσα από μία πλάκα επιβράδυνσης $\lambda/8$ και επιστρέφει στον διαχωριστή δέσμης κυκλικά πολωμένο ως ένα διάνυσμα αθροίσματος δύο καταστάσεων ορθογωνικής πόλωσης.



Εικόνα 1.3 Ομόδυνο Συμβολόμετρο.

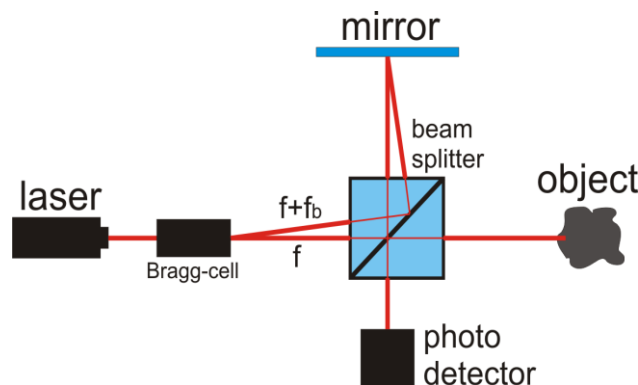
Ένας διαχωριστής πόλωσης τοποθετείται μπροστά από δύο φωτοανιχνευτές και διαχωρίζει τις δύο ορθογωνικές καταστάσεις έχοντας ως αποτέλεσμα μία τετραγωνική σχέση στους

ανιχνευτές (έξοδος sine και cosine). Από τα μοτίβα συμβολής του ανακλώμενου σήματος με τις δύο ορθογωνικές καταστάσεις είναι εφικτό να υπολογιστεί η κατεύθυνση της κίνησης.

Ένα τετραγωνικό ομόδυνο συμβολόμετρο είναι πολύ εύκολο να υλοποιηθεί καθώς χρησιμοποιούνται απλοί και χαμηλής συχνότητας φωτοανιχνευτές και ενισχυτές. Ωστόσο, η ομόδυνη τεχνική χαρακτηρίζεται από σοβαρές αστοχίες όπως αρμονικές παραμορφώσεις του σήματος μέτρησης λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς διάφορων στοιχείων της διάταξης, αδυναμία σταθεροποίησης πλάτους του σήματος, ευαισθησία στον ηλεκτρονικό θόρυβο και η αλλαγή φάσης 90° εξαρτάται σημαντικά από την οπτική ευθυγράμμιση. Οι αστοχίες αυτές περιορίζονται αισθητά μέσω της ετερόδυνης τεχνικής που περιγράφεται παρακάτω.

Ετερόδυνο Συμβολόμετρο

Στην ετερόδυνη τεχνική τοποθετείται ένας ακουστό-οπτικός διαμορφωτής στην δέσμη αναφοράς, ο οποίος μεταβάλλει στατικά τη συχνότητα φωτός κατά μία συχνότητα $f_b = 40\text{MHz}$. Η μεταβολή στη συχνότητα προκαλεί μία διαμόρφωση συχνότητας των κροσσών των 40MHz όταν το αντικείμενο που εξετάζεται είναι ακίνητο. Ως αποτέλεσμα αυτού, η θέση μηδενικής ταχύτητας του αντικείμενου μετατοπίζεται και εισάγεται κατευθυντική ευαισθησία στη διάταξη. Εάν το αντικείμενο κινείται προς το συμβολόμετρο, η συχνότητα της δέσμης μέτρησης διαμόρφωσης μειώνεται ενώ αντίθετα αν απομακρύνεται η συχνότητα διαμόρφωσης αυξάνεται. Επομένως, μέσω της ετερόδυνης τεχνικής ανιχνεύεται το πλάτος και η κατεύθυνση



της κίνησης.

Εικόνα 1.4 Ετερόδυνο Συμβολόμετρο.

Η συχνότητα αναφοράς μεταβάλλεται και επομένως μεταβάλλεται και η διαφορά στη συχνότητα ως εξής:

$$\Delta f = f - f' = -f_d \rightarrow \Delta f = f + f_b - f - f_d = f_b - f_d \quad (1.9)$$

Και η ένταση του ανιχνευτή εκφράζεται από:

$$I(t) = I_m I_r R + 2 * K * \sqrt{I_m I_r R} * \cos[2\pi(f_b - f_d)t - \varphi(t)] \quad (1.10)$$

Η ετερόδυνα τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως στις μέρες μας καθώς είναι η πιο κατάλληλη τεχνική για την ανίχνευση αδύναμων σημάτων. Υπερτερεί ως προς την άμεση ανίχνευση επειδή χαρακτηρίζεται από καλύτερη ευαισθησία (συντελεστή βαθμονόμησης). Στην άμεση ανίχνευση το όριο του θορύβου βολής προσεγγίζεται σε σήματα υψηλής ισχύος ενώ με την ετερόδυνα τεχνική το τυπικό κβαντικό όριο προσεγγίζεται για χαμηλότερης ισχύος σήματα.

1.4 Φωτοανίχνευση

Στο οπτικό τμήμα του LDV το σήμα που προκύπτει από την συμβολή του σήματος αναφοράς και του σήματος μέτρησης, εισέρχεται σε ένα φωτοανιχνευτή. Ο φωτοανιχνευτής μετατρέπει το οπτικό σήμα συμβολής σε ηλεκτρικό ρεύμα και το ενισχύει με στόχο να εξαχθεί η πληροφορία. Αναλυτικότερα, όλοι οι φωτοανιχνευτές ανιχνεύουν μόνο την οπτική ισχύ ή ένταση σύμφωνα με τον τετραγωνικό νόμο και δεν μπορούν να ανακτήσουν πλήρως την περιγραφή του οπτικού πεδίου, ως εξής:

$$I \propto P = |E * \exp(-i(\omega * t + \varphi))|^2 = E^2 \quad (1.11)$$

Επομένως, όταν διέρχεται ένα οπτικό πεδίο από ένα φωτοανιχνευτή ανιχνεύεται μόνο ο DC όρος. Αντίθετα, όταν στο φωτοανιχνευτή προσπέσει ένα οπτικό πεδίο που αποτελείται από δυο συνιστώσες συχνοτήτων, δημιουργείται της οπτικός κτύπος (optical beat) δηλαδή το σήμα της διαφοράς των συχνοτήτων και ανιχνεύεται και ο DC και ο AC όρος.

Για παράδειγμα, έστω ένα οπτικό πεδίο που εκφράζεται από την εξίσωση:

$$E(t) = a_c e^{i\omega_c t} + a_1 e^{i\omega_1 t} \quad (1.12)$$

Όπου ο δείκτης c αναφέρεται στο κεντρικό φέρον και ο δείκτης 1 σε μία πλευρική ζώνη. Η οπτικής ισχύς που ανιχνεύει ο φωτοανιχνευτής προκύπτει από την σχέση:

$$P(t) = E(t) * \overline{E(t)} = |E(t)|^2 = |a_c|^2 + |a_1|^2 + a_c \bar{a}_1 e^{-i\omega_s t} + \bar{a}_c a_1 e^{i\omega_s t} \rightarrow$$

$$P(t) = |a_c|^2 + |a_1|^2 + 2Re(\bar{a}_c a_1 e^{i\omega_s t}) \quad (1.13)$$

Συνεπώς, όταν στο φωτοανιχνευτή προσπέσει ένα οπτικό πεδίο που αποτελείται από δυο συνιστώσες συχνοτήτων, η έξοδος περιλαμβάνει, σύμφωνα με τη σχέση (1.13) της οπτικής ισχύος, εκτός από το DC όρο, ($|a_c|^2 + |a_1|^2$), ο οποίος δεν δίνει κάποια πληροφορία επειδή το πλάτος της πλευρικής ζώνης είναι πολύ «κοντά» με το πλάτος του φέροντος, και το AC όρο, $2Re(\bar{a}_c a_1 e^{i\omega_s t})$, με συχνότητα $\omega_s = |\omega_c - \omega_1|$ και μέσω αυτού μπορεί να ανακτηθεί η πληροφορία του πλάτους, της συχνότητας και της φάσης.

1.5 Θεμελιώδεις σχέσεις της διαμόρφωσης Doppler

Ένα ετερόδουνο σήμα Doppler εκφράζεται από το δεύτερο όρο της σχέσης (1.10), $I(t) = I_m I_r R + 2 * K * \sqrt{I_m I_r R} * \cos[2\pi(f_b - f_d)t - \varphi(t)]$. Ο όρος αυτός περιέχει την πληροφορία της κατεύθυνσης της δονούμενης επιφάνειας καθώς για το συνημίτονο ισχύει $\cos(x) = \cos(-x)$. Επιπλέον, η μετατόπιση της δονούμενης επιφάνειας δημιουργεί ένα διαμορφωμένο κατά φάση σήμα το οποίο εκδηλώνει μία γραμμική σχέση μεταξύ φάσης και μετατόπισης ως εξής:

$$\varphi(t) = 2 * k * s = \frac{4 * \pi * n * s(t)}{\lambda} \quad (1.14)$$

Η διαμόρφωση φάσης του σήματος δημιουργεί ταυτόχρονα και μία διαμόρφωση συχνότητας η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα, $v(t)$ και τη συχνότητα δόνησης, f_{vib} . Επειδή ο ρυθμός αλλαγής της μετατόπισης ορίζεται ως ταχύτητα, $v(t) = \frac{ds(t)}{dt}$ και ο ρυθμός αλλαγής της φάσης ορίζεται ως συχνότητα, $\frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t) = 2\pi f$, προκύπτει ότι η πληροφορία της ταχύτητας της επιφάνειας που εξετάζεται προκύπτει μέσω της συχνότητας. Η συχνότητα αυτή είναι η συχνότητα Doppler και προκύπτει από την σχέση:

$$f_d(t) = \frac{2 * n * v(t)}{\lambda} \quad (1.15)$$

Στην περίπτωση που μελετάται μία δόνηση απλής αρμονικής ταλάντωσης με συχνότητα δόνησης f_{vib} , η μετατόπιση της επιφάνειας περιγράφεται από την σχέση:

$$s = s_{max} * \sin(2 * \pi * f_{vib} * t) \quad (1.16)$$

Όπου s_{max} η μέγιστη μετατόπιση της δονούμενης επιφάνειας. Η μέγιστη ταχύτητα και η μέγιστη συχνότητα Doppler προσδιορίζονται από:

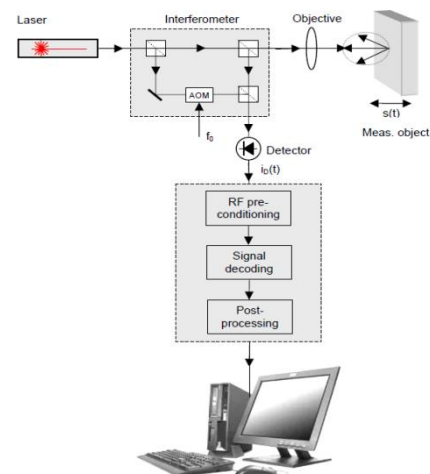
$$v_{max} = s_{max} * 2 * \pi * f_{vib} \quad (1.17)$$

$$f_{dmax} = \frac{2 * n * v_{max}}{\lambda} \quad (1.18)$$

Το εύρος ζώνης του σήματος διαμορφωμένο κατά συχνότητα είναι $E.Z. = (f_c \pm f_{dmax})$ και εξαρτάται από τη συχνότητα και την ταχύτητα δόνησης.

1.6. Συστήματα LDVs

Ένα Laser Doppler Vibrometer απαρτίζεται από το οπτικό τμήμα, την ηλεκτρονική αλυσίδα επεξεργασίας σήματος και το τμήμα απόκτησης σήματος. Οι ιδιότητες των τμημάτων που συγκροτούν τα τρία λειτουργικά τμήματα αυτά σε συνδυασμό με το πώς έχει διαμορφωθεί το σύστημα, επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του LDV.



Εικόνα 1.5 Λειτουργικά τμήματα LDV.

1.6.1 Ηλεκτρονική αλυσίδα επεξεργασίας σήματος Doppler

Το πρώτο στοιχείο της ηλεκτρονικής αλυσίδας αποτελεί ουσιαστικά τη διεπαφή μεταξύ οπτικού και ηλεκτρονικού τμήματος και είναι ο φωτοανιχνευτής. Κατά τη φωτοανίχνευση, ο οπτικός κτύπος της έντασης του φωτός ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση της αλλαγής της συχνότητας Doppler. Το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται είναι πάντα ένα διαμορφωμένο κατά φάση και συχνότητα ευρυζωνικό σήμα. Επιπλέον, ο φωτοανιχνευτής θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από κατάλληλο εύρος ζώνης του φάσματος συχνοτήτων ώστε να είναι επαρκώς ευρύ για να μεταδίδει τη συχνότητα Doppler χωρίς να επηρεάζει τη φάση και το πλάτος του σήματος.

Πριν την αποδιαμόρφωση του σήματος Doppler κρίνεται απαραίτητη η προετοιμασία του σήματος Doppler. Πιο συγκεκριμένα, το σήμα Doppler διέρχεται από τα εξής στάδια προετοιμασίας:

- **Σταθεροποίηση πλάτους.** Απαιτείται το σήμα Doppler να έχει απαλλαχθεί από ανεπιθύμητες διακυμάνσεις πλάτους για να αποδιαμορφωθεί σωστά. Στα ετερόδυνα δονητόμετρα, αυτό επιτυγχάνεται μέσω κυκλωμάτων περιορισμού και επομένως, υψηλότερες αρμονικές του φέροντος, οι οποίες δημιουργούνται αναπόφευκτα, δεν επηρεάζουν το περιεχόμενο διαμόρφωσης του σήματος Doppler.
- **Περιορισμός εύρους ζώνης.** Το εύρος ζώνης της αλυσίδας επεξεργασίας σήματος περιορίζεται στο σχετικό εύρος ζώνης του σήματος Doppler μέσω φίλτρων μειώνοντας το θόρυβο και τις παραμορφώσεις. Ωστόσο, τα φίλτρα χαρακτηρίζονται από μη ιδανικές ιδιότητες με αποτέλεσμα να την απόδοση του LDV ως προς την απόκριση συχνότητας και τη γραμμικότητα πλάτους. Ο χρόνος καθυστέρησης των φίλτρων περιορισμού ζώνης μπορεί επίσης να συμβάλει σημαντικά στην απόκριση φάσης του LDV. Στην ιδανική περίπτωση, είναι σταθερή ως προς τη συχνότητα, με αποτέλεσμα τη γραμμική απόκριση φάσης και τη μετάδοση παλμού χωρίς παραμόρφωση.
- Η λεγόμενη **καταστολή “dropout”** εφαρμόζεται μόνο στην ετερόδυνη προσέγγιση και γεφυρώνει τα κενά σήματος που προκαλούνται από την επίδραση της οπτικής κηλίδας σε τραχιές επιφάνειες. Οι κοινές ηλεκτρονικές προσεγγίσεις βασίζονται σε κυκλώματα βρόχου κλειδωμένης φάσης (*Phase Locked Loop, PLL*) αλλά χαρακτηρίζονται από ένα συγκεκριμένο σφάλμα φάσης σε υψηλές συχνότητες δόνησης.

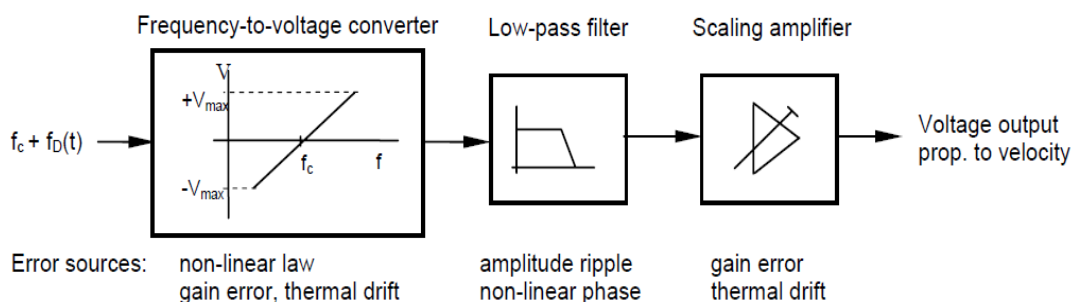
1.6.2 Αποδιαμόρφωση του σήματος Doppler

Το LDV μετρά τη συχνότητα και τη φάση της ανακλώμενης δέσμης και μέσω των μεγεθών αυτών προσδιορίζονται η στιγμιαία ταχύτητα και μετατόπιση της δονούμενης επιφάνειας,

αντίστοιχα. Ωστόσο, λόγω των ταλαντώσεων του φωτορεύματος που παράγεται από τον φωτοανιχνευτή, οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να αναχθούν απευθείας μετά την φωτοανίχνευση και απαιτείται ένας αποδιαμορφωτής.

Ο αποδιαμορφωτής είναι το πιο σημαντικό στοιχείο της ηλεκτρονικής αλυσίδας επειδή ανακτά το σήμα μέτρησης από τη διαμόρφωση Doppler και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό του καθώς μία αστοχία μπορεί να εισάγει σφάλματα μέτρησης της τάξης του 10%. Συνεπώς, απαιτούνται κατάλληλες τεχνικές αποδιαμόρφωσης φάσης και συχνότητας για την ανάκτηση της μετατόπισης και της ταχύτητας της δονούμενης επιφάνειας για κάθε χρονική στιγμή που διήρκεσε η μέτρηση.

Υπάρχουν πολλά καθιερωμένα σχήματα αποδιαμόρφωσης όπως ο κλειδωμένος βρόχος φάσης (*Phase Locked Loop, PLL*), η αριθμητική μέθοδος μέτρησης κροσσών, ο FM αποκωδικοποιητής, η πυκνότητα παλμών ή οι αποδιαμορφωτές γραμμής καθυστέρησης. Ωστόσο, στα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα LDVs χρησιμοποιούνται αναλογικοί αποδιαμορφωτές συχνότητας για να μετατρέψουν άμεσα τη στιγμιαία συχνότητα Doppler σε μία ποσότητα «τάσης ανάλογης προς την ταχύτητα». Το γενικό σχήμα ενός αναλογικού αποδιαμορφωτή ταχύτητας απεικονίζεται παρακάτω:



Εικόνα 1.6 Αναλογικός αποδιαμορφωτής ταχύτητας

Εντούτοις, πολλά σφάλματα εισάγονται λόγω μη ιδανικών ιδιοτήτων των ηλεκτρονικών στοιχείων και μπορούν να επηρεάσουν τη γραμμικότητα καθώς και τη σταθερότητα του αποδιαμορφωτή. Οι περιορισμοί της αναλογικής επεξεργασίας επιλύονται μέσω της ψηφιοποίησης του σήματος LDV και της αποδιαμόρφωσης του μέσω κατάλληλης αριθμητικής μεθόδου.

Πιο συγκεκριμένα, η επιτακτική ανάγκη για ελαχιστοποίηση του θορύβου και για υψηλότερη ανάλυση οδήγησε στην επικράτηση της ψηφιακής αποδιαμόρφωσης στην οποία συμμετέχουν υψηλής ταχύτητας επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (*Digital Signal Processors, DSPs*), για την αποκωδικοποίηση του σήματος σε σχεδόν πραγματικό χρόνο με μεγαλύτερη ανάλυση, ενώ για την αντιμετώπιση του μεγάλου εύρους ζώνης του σήματος Doppler γίνεται χρήση μετατροπένων αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, (*Analog-to-Digital Converters, ADCs*) που χαρακτηρίζονται από υψηλό εύρος ζώνης.

Πριν την αναλυτική περιγραφή της ηλεκτρονικής αλυσίδας ψηφιακής αποδιαμόρφωσης που λαμβάνουν χώρα σε LDVs, θα παρουσιαστεί γενικά η μέθοδος της αποδιαμόρφωσης φάσης η οποία χρησιμοποιείται εκτενώς σε πολλά συστήματα LDVs.

- **Σύγχρονη Ανίχνευση και Αποδιαμόρφωση Φάσης**

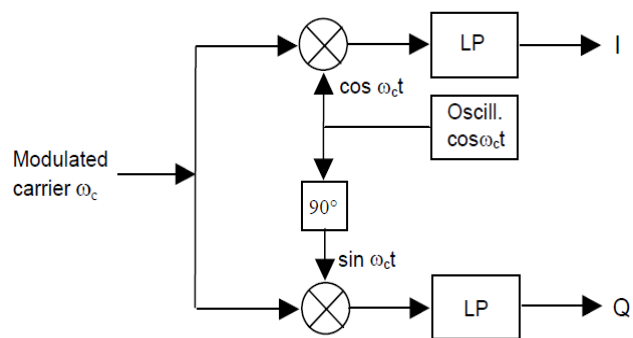
Η πιο προηγμένη μέθοδος ανίχνευσης είναι η σύγχρονη ανίχνευση στην οποία ένας οπτικός δέκτης μπορεί να παρακολουθεί συνέχεια τη φάση ενός οπτικού πομπού και επομένως, οι μετρήσεις να χαρακτηρίζονται από «συνοχή φάσης» ώστε να εξαχθεί οποιαδήποτε πληροφορία φάσης και συχνότητας μεταφέρεται από ένα μεταδιδόμενο σήμα. Η σύγχρονη ανίχνευση έχει τη μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τις μορφές διαμόρφωσης, καθώς οι πληροφορίες μπορούν να κωδικοποιηθούν σε πλάτος και φάση ή σε *In-phase (I)* και *Quadrature (Q)* στοιχεία του φέροντος. Επιπλέον, απαιτεί από το δέκτη να γνωρίζει τη φάση του φέροντος κάθε στιγμή, καθώς το λαμβανόμενο σήμα αποδιαμορφώνεται με τη βοήθεια ενός τοπικού ταλαντωτή (*Local Oscillator, LO*) που χρησιμεύει ως απόλυτη φάση αναφοράς.

Η μέθοδος της αποδιαμόρφωσης φάσης υλοποιεί συνεχείς μετρήσεις φάσης και προαπαιτεί ένα τετραγωνικό ζεύγος σημάτων I & Q χωρίς αντιστάθμιση συχνότητας:

$$u_i(t) = U_i \cos\varphi(t) \text{ και } u_q(t) = U_q \sin\varphi(t) \quad (1.19)$$

Κάθε ένα από τα σήματα περιέχει την πληροφορία της μετατόπισης ενώ από το συνδυασμό των δύο σημάτων μπορεί να εξαχθεί η κατεύθυνση της κίνησης. Το τετραγωνικό ζεύγος σημάτων I & Q δημιουργείται αριθμητικά μετά από τη ψηφιοποίηση του σήματος Doppler ή από τον αναλογικό τετραγωνικό αποδιαμορφωτή.

Στο κύκλωμα του αναλογικού τετραγωνικού αποδιαμορφωτή, το διαμορφωμένο ετερόδυνα σήμα πολλαπλασιάζεται με το σήμα ενός τοπικού ταλαντωτή για την δημιουργία του in-phase στοιχείου ενώ για την δημιουργία του quadrature στοιχείου

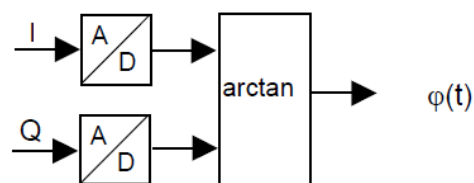


Εικόνα 1.7 Αναλογικός τετραγωνικός αποδιαμορφωτής

το σήμα του τοπικού ταλαντωτή υφίσταται διαφορά φάσης κατά 90°.

Έπειτα, και τα δύο σήματα διέρχονται από ένα βαθυπερατό φίλτρο ώστε το φάσμα να μετατοπιστεί πάνω και κάτω από την κεντρική συχνότητα του φέροντος, έστω f_c και να καταστείλει τις υψηλές αρμονικές συχνότητες.

Συνεπώς, στο σύστημα του LDV το κύκλωμα του αναλογικού αποδιαμορφωτή μετατρέπει το διαμορφωμένο κατά συχνότητα Doppler σήμα σε I & Q σήματα βασικής ζώνης με διαφορά φάσης 90° μεταξύ τους. Στη συνέχεια, κάθε ένα από τα σήματα



Εικόνα 1.8 Αποδιαμόρφωση φάσης

I & Q ψηφιοποιούνται από μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, A/Ds. Επειδή πρόκειται για σήματα βασικής ζώνης με αντιστάθμιση συχνότητας (συνήθως 40MHz) η οποία έχει ήδη αποκοπεί, οι απαιτήσεις απόδοσης για το κύκλωμα των μετατροπέων A/D είναι πολύ χαμηλότερες από ότι για μια άμεση ψηφιοποίηση του ετερόδυνου σήματος Doppler.

Από την ψηφιοποίηση του ζεύγους I&Q σημάτων προσδιορίζεται αριθμητικά η γωνιακή φάση ως εξής:

$$\varphi(t_n) = \arctan\left(\frac{u_q}{u_i}\right) + m, \quad m = 1, 2, \dots \quad (1.20)$$

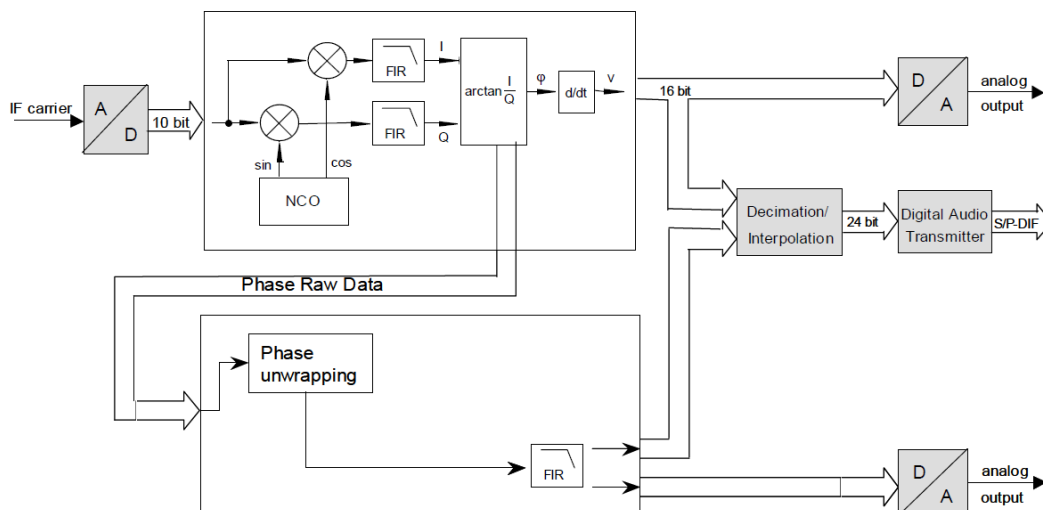
Μέσω του υπολογισμού της φάσης, μία μέτρηση μετατόπισης με πολύ υψηλή ανάλυση μπορεί να επιτευχθεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$s(t_n) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(t_n) \quad (1.21)$$

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποδιαμόρφωσης φάσης σε συνδυασμό με την ετερόδυνη τεχνική είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα να φιλτραριστεί ο θόρυβος χαμηλής συχνότητας και να περιοριστεί το εύρος ζώνης αποτελεσματικά και γραμμικά πριν την αποδιαμόρφωση του σήματος μέσω ψηφιακών βαθυπερατών φίλτρων.

- **Επεξεργασία Laser Doppler Σήματος**

Η ψηφιοποίηση του ζεύγους σημάτων I&Q και η επεξεργασία της φάσης που περιγράφηκαν παραπάνω υλοποιείται μέσω μιας πλατφόρμας υπολογιστή. Ως εκ τούτου, απαιτείται η χρήση κατάλληλου λογισμικού υπολογιστή για επεξεργασία και προβολή δεδομένων καθώς δεν υφίσταται αναλογική έξοδος πραγματικού χρόνου. Οι πληροφορίες της ταχύτητας και της μετατόπισης της δονούμενης επιφάνειας μπορούν να ανακτηθούν από έναν επεξεργαστή ψηφιακού σήματος (DSP) που έπεται μετά τον αναλογικό τετραγωνικό αποδιαμορφωτή. Κατά συνέπεια, το επόμενο βήμα ανάπτυξης του συστήματος αυτού περιλαμβάνει την υλοποίηση μίας πλατφόρμας πραγματικού χρόνου DSP χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για PC hardware.



Εικόνα 1.9 Επεξεργαστής Ψηφιακού Σήματος (DSP) Πραγματικού Χρόνου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε ένα σύστημα LDV με DSP, το σήμα Doppler αναμιγνύεται σε μια χαμηλότερη ενδιάμεση συχνότητα (*Intermediate Frequency, IF*) και ψηφιοποιείται από ένα μετατροπέα A/D. Το ζεύγος σημάτων I&Q δημιουργείται αριθμητικά αναμιγνύοντας το σήμα με ένα αριθμητικό ταλαντωτή (*Numerical Oscillator, NCO*) και αποτελεί ιδανική προϋπόθεση για να την επακόλουθη αποδιαμόρφωση φάσης μέσω του αλγορίθμου \arctan , καθώς δε περιέχει καθόλου σφάλματα. Η \arctan μέθοδος ουσιαστικά υπολογίζει τα αρχικά δεδομένα φάσης σε μορφή 16-bit.

Για να εξοικονομηθεί χρόνος υπολογισμού και ισχύς του DSP, η φάση δεν ξετυλίγεται (*phase unwrapping*) αλλά διαφοροποιείται αριθμητικά (*numerical differentiation*) για να παραχθεί η πληροφορία της ταχύτητας η οποία μετατρέπεται σε μία αναλογική τάση με τη βοήθεια ενός 16-bit μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό, D/A.

Χρησιμοποιώντας ένα πρόσθετο κύκλωμα DSP, η αποδιαμόρφωση φάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο μέσω *phase unwrapping*. Συνεπώς, στο σύστημα υπάρχει άλλη μια σύγχρονη έξοδος με την πληροφορία της μετατόπισης επιπλέον των δεδομένων της ταχύτητας. Η ανάλυση των δεδομένων μετατόπισης περιορίζεται από τον μετατροπέα D/A σε 15mV ανά bit το οποίο δεν είναι τόσο «καλό» αποτέλεσμα επειδή μέσω της αποδιαμόρφωσης \arctan που βασίζεται σε υπολογιστή μπορεί να επιτύχει ανάλυση μικρότερη από 1 mV. Ωστόσο, υπερτερεί σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις συμβατικές μεθόδους της μέτρησης κροσσών ή του αναλογικού ολοκληρωτή.

Μετά την αποδιαμόρφωση, το σήμα της μετρούμενης δόνησης υφίσταται μία επιπλέον επεξεργασία. Αυτό το σύμπλεγμα επεξεργασίας αποτελείται από διαφορετικά ψηφιακά φίλτρα για περιορισμό εύρους ζώνης και καταστολή θορύβου και έπειτα ακολουθεί ένας ενισχυτής

κλιμάκωσης ώστε το χωρητικό φορτίο του συνδεδεμένου καλωδίου να οδηγείται χωρίς περιορισμό του μέγιστου ρυθμού μεταβολής (*slew-rate*).

Τελικά, όταν το σύστημα του LDV στηρίζεται σε ψηφιακούς αποκωδικοποιητές, επιδιώκεται η μετάδοση των σημάτων εξόδου σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή χωρίς αντίστροφη μετατροπή στην αναλογική περιοχή για τελική απόκτηση σήματος.

1.7 Εφαρμογές του Laser Doppler Vibrometer

Το *Laser Doppler Vibrometry* είναι η μέθοδος που προσφέρει την καλύτερη μελέτη δονήσεων σε βιομηχανικές εφαρμογές και σε διάφορα ερευνητικά πεδία λόγω της υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης που παρέχει. Πρόκειται για μία ευέλικτη οπτική τεχνική όπου η εξ επαφής φύση του επιτρέπει στην εξεταζόμενη δομή να διατηρείται αναλλοίωτη παρέχοντας ακόμη πιο αξιόπιστη απεικόνιση των ιδιοτήτων της. Το κυριότερο πλεονέκτημα της είναι ότι παράγει σήματα με την πληροφορία της ταχύτητας ή της μετατόπισης σε πραγματικό χρόνο. Επιτρέπει μετρήσεις σε ταλαντώσεις που χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή συχνότητα και ως εκ τούτου ανιχνεύει πλάτη ταλάντωσης μικρότερα από 1 μm .

Συγκεκριμένα, το LDV αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στους εξής τομείς:

- Στην αεροδιαστημική όπου το LDV χρησιμοποιείται για μη καταστροφικό έλεγχο εξαρτημάτων του αεροσκάφους.
- Σε ακουστικές και υπερηχητικές μελέτες για το σχεδιασμό ηχείων και το δομικό έλεγχο μουσικών οργάνων.
- Στην αυτοκινητοβιομηχανία καθώς συνεισφέρει στην δομική δυναμική, στον έλεγχο φρένων και στην ποσοτικοποίηση του θορύβου.
- Στην βιολογία σε μηχανισμούς καταγραφής διαφόρων ειδών και τον έλεγχο της ωρίμανσης των φρούτων.
- Στην ιατρική τεχνολογία, χρησιμοποιείται για βελτιστοποίηση μεθόδων μέτρησης και διάγνωσης της μετάδοσης του ήχου από το τύμπανο στο εσωτερικό αυτί καθώς και για την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών και αξιόπιστων προϊόντων υγειονομικής περίθαλψης.
- Στην ανάλυση των σκληρών δίσκων έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς ειδικά στον τομέα της τοποθέτησης της κεφαλής.
- Στη βιομηχανία ηλιακών, ημιαγωγών και ηλεκτρονικών για την ανάπτυξη και διασφάλιση της ποιότητας σε τυπωμένα κυκλώματα, PCB, ηλεκτρονικά και φωτοβολταϊκά στοιχεία.
- Στη βιομηχανία καταναλωτικών αγαθών για τη βελτιστοποίηση προϊόντων και διαδικασιών μέσω γρήγορης και αυτοματοποιημένης διασφάλισης ποιότητας των αγαθών.

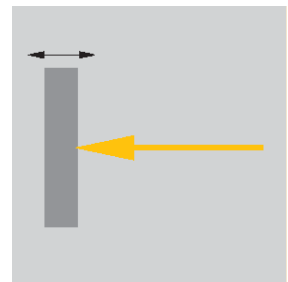
- Στην ανάπτυξη σύγχρονων υλικών όπου ελέγχονται οι επιφανειακές δονήσεις των σύγχρονων υλικών για εντοπισμό και μελέτη ελαττωμάτων.
- Στη μικρο- και νανο- τεχνολογία για την βαθμονόμηση άλλων αισθητήρων και μικροσυστημάτων.

1.8 Διαφορετικές διατάξεις LDVs πολλαπλών βαθών ελευθερίας

Τα Laser Doppler Vibrometers χρησιμοποιούνται κυρίως για την μελέτη επιφανειακών δονήσεων και οι οπτικές διατάξεις που τα αποτελούν διαφέρουν σύμφωνα με το πεδίο εφαρμογή τους. Η ετερόδυνη ή η ομόδυνη διάταξη που περιγράφηκαν παραπάνω εισάγουν κατευθυντική ευαισθησία που μπορεί να μελετηθεί η κίνηση μόνο παράλληλα με τη δέσμη του laser. Για να ανιχνευθεί η κίνηση της επιφάνειας σε περισσότερες από μία κατευθύνσεις, τα LDVs χαρακτηρίζονται από μονής, διπλής ή πολλαπλής δέσμης laser σε διαφορετικές οπτικές διατάξεις. Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε διάφορες διατάξεις LDVs πολλαπλών βαθών ελευθερίας σύμφωνα με την κατεύθυνση της κίνησης που μελετούν.

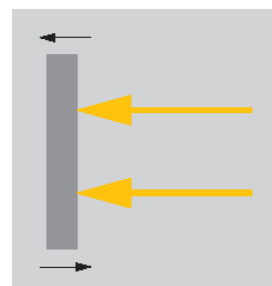
- **“Out-of-plane” Single-Point Vibrometers**

Τα Single-Point Vibrometers χρησιμοποιούν μία μόνο δέσμη laser για να μετρούν την ταχύτητα της επιφάνειας στην κατεύθυνση της δέσμης του laser. Εάν η δέσμη ευθυγραμμιστεί σε μία σωστή γωνία με την επιφάνεια του επιπέδου τότε χρησιμοποιείται ο όρος «μη συνεπίπεδο» vibrometer. Τα LDVs μονής δέσμης, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μηχανικής, σε βιοϊατρικές έρευνες και σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν την αξιολόγηση της εσωτερικής δυναμικής καταπόνησης σε ένα συμπαγές δονούμενο σώμα.



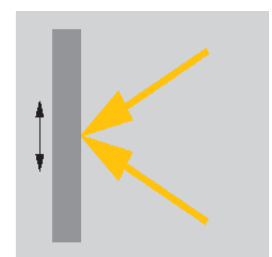
- **“Out-of-plane” Differential Vibrometers**

Τα διαφορικά Vibrometers επιτρέπουν μετρήσεις δονήσεων ανάμεσα σε δύο σημεία που κινούνται σχετικά μεταξύ τους. Εξειδικευμένοι ανιχνευτές οπτικών ινών που στηρίζονται στην οπτική διάταξη των διαφορικών δονητόμετρων μετρήσεις σε δυσπρόσιτες περιοχές.



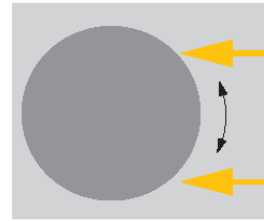
- **“In-Plane” Vibrometers**

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται συγκλίνουσες δέσμες laser για να μετρήσουν συνεπίπεδες δονήσεις της επιφάνειας. Για παράδειγμα, αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω κατάλληλης γωνίας εστίασης των δεσμών ως προς τον οπτικό άξονα.



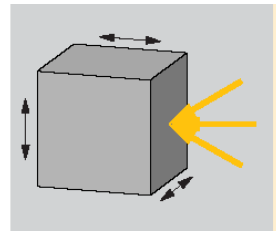
- **“Rotational” Vibrometers**

Τα περιστροφικά δονητόμετρα εστιάζουν τις δέσμες laser για να μετρήσουν στρεπτικές δονήσεις σε επιφάνειες που περιστρέφονται συνεχώς ή γωνιακές δονήσεις σε σταθερές επιφάνειες ανεξάρτητα από το σχήμα της επιφάνειας.



- **“3D Vibrometers”**

Τρεις ανεξάρτητες δέσμες laser συγκλίνουν στο σημείο εστίασης και μετρούν τα χαρακτηριστικά της δόνησης σε τρεις διαστάσεις.



Κεφάλαιο 2^ο. Εφαρμογές LDVs

Ο υπολογιστικός προσδιορισμός μίας δόνησης αποτελεί επιτακτική ανάγκη σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές και ερευνητικούς τομείς, όπως είναι ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής, της βιοϊατρικής, στις μονάδες αποθήκευσης δεδομένων κλπ. Σε κάθε πεδίο εφαρμογής υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις για το σύστημα LDV όσον αφορά την ανάλυση και τη συχνότητα. Ως εκ τούτου, ο μόνος τρόπος να καλυφθούν όλες αυτές οι εφαρμογές με ένα μόνο LDV είναι ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνικών και διατάξεων.

Παρακάτω περιγράφονται υλοποιήσεις LDV που έχουν διεξαχθεί σε διαφορετικά πεδία εφαρμογών.

2.1 Laser Doppler Vibrometer σε διάταξη οπτικών ινών για δυναμική μέτρηση ενεργοποιητών MEMs με συνεπίπεδη κίνηση.

Γενικά, οι ενεργοποιητές MEMS είναι ένα μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό σύστημα (MEMS) που μετατρέπει την ενέργεια σε κίνηση της τάξης των μικρομέτρων και αποτελούν βασικά λειτουργικά στοιχεία σε πολλές συσκευές και συστήματα. Για το σκοπό αυτό, είναι σημαντικό να επικυρώνεται μέσω δυναμικού ελέγχου η λειτουργία τους για να είναι αξιόπιστοι και εγγυημένοι καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος και σε δύσκολες συνθήκες λειτουργίας.

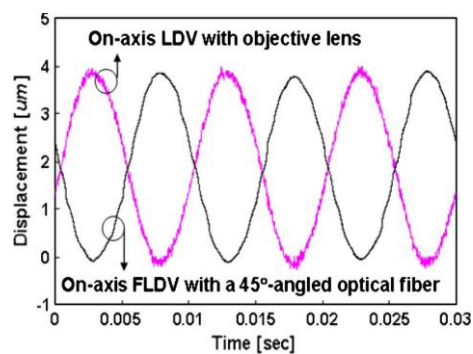
Η μόνη διαθέσιμη μέθοδος LDV για ακριβή δυναμική μέτρηση ενός ενεργοποιητή MEMs είναι ένα εκτός-άξονα, διαφορικό LDV. Ωστόσο, χαρακτηρίζεται από σοβαρά προβλήματα στο δυναμικό χαρακτηρισμό της συνεπίπεδης κίνησης του αντικειμένου λόγω του θορύβου της οπτικής κηλίδας και επειδή η προσπίπτουσα δέσμη λέιζερ δεν ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση του κινούμενου αντικειμένου.

Μία άλλη μέθοδος δυναμικής μέτρησης είναι ένα αξονικό (on-axis) LDV όπου η κατεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης είναι η ίδια με την κατεύθυνση της κίνησης του ενεργοποιητή, αλλά δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ενεργοποιητές MEMS με συνεπίπεδη κίνηση λόγω της περιορισμένης πρόσβασης στο πλευρικό τοίχωμα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μέσω μίας ερευνητικής προσέγγισης σύμφωνα με την οποία προτείνεται ένα αξονικό LDV σε διάταξη 45^ο γωνιακής οπτικής ίνας (FLDV) ως μέσο μέτρησης μίας συνεπίπεδης κίνησης σε ένα ενεργοποιητή MEMs. Πρόκειται για μία μέθοδο με εύκολη πρόσβαση στο πλευρικό τοίχωμα ενός ενεργοποιητή, ανεξάρτητα από το πάχος του ή τη ράβδωση U του υποστρώματος του κυματοδηγού. Κατά την ενεργοποίηση, η θέση της δέσμης μέτρησης

διατηρείται κάθετα στο πλευρικό τοίχωμα μέσω αλλαγής της κατεύθυνσης της δέσμης από 90° σε 45° γωνίας όψης της ίνας.

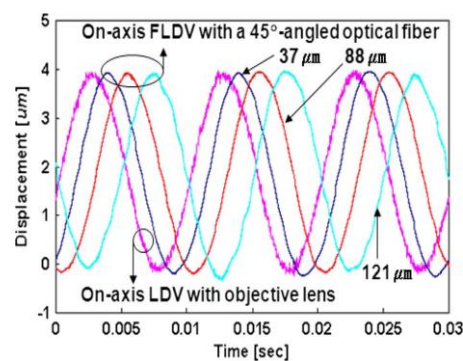
Συγκεκριμένα, για την βαθμονόμηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε ως αντικείμενο μέτρησης ένα χρυσό chip επικαλυμμένο από πυρίτιο που οδηγείται από έναν ενεργοποιητή PZT με μη συνεπίπεδη κίνηση. Η 45° γωνιακή οπτική ίνα με έναν αυτο-ευθυγραμμισμένο μικρο-φακό ευθυγραμμίστηκε οριζόντια πάνω από το τσιπ πυριτίου και η ανακλώμενη δέσμη λαμβάνεται μέσω ενός φωτοανιχνευτή με τη βοήθεια μικροφακών. Τέλος, η ενεργοποίηση του chip επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής ημιτονοειδούς τάσης 100 Hz στον ενεργοποιητή PZT. Επιπλέον, ένα συμβατικό αξονικό σύστημα LDV με αντικειμενικό φακό τοποθετήθηκε ως σύστημα αναφοράς. Η συνολική διάταξη αυτή ρυθμίστηκε προσωρινά για να παρέχει τόσο στο σύστημα αναφοράς LDV όσο και στο προτεινόμενο σύστημα FLDV τις ίδιες πειραματικές συνθήκες προκειμένου να συγκρίνει την απόδοση και δεν μετρά στο πλευρικό τμήμα κατά τη συνεπίπεδη κίνηση.

Στην εικόνα 2.2 απεικονίζεται η σύγκριση των δύο συστημάτων κατά τη μέτρηση της μετατόπισης που διεξήχθησαν για να αξιολογήσουν την ακρίβεια του προτεινόμενου συστήματος. Επειδή και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν την arctangent μέθοδο δεν διαφέρουν ως προς την ακρίβεια αλλά ο θόρυβος στο σύστημα αναφοράς υποβαθμίζει σε μεγάλο βαθμό την



Εικόνα 2.1

ανάλυση. Επίσης, παρατηρείται ότι οι δύο καμπύλες έχουν το ίδιο πλάτος και επομένως το προτεινόμενο σύστημα είναι ακριβές για να μετρήσει τα δυναμικά χαρακτηριστικά της συνεπίπεδης κίνησης του αντικειμένου.



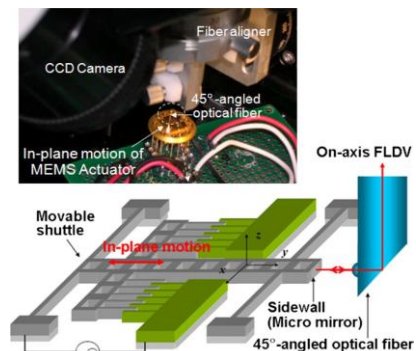
Εικόνα 2.2

Η ανάλυση του προτεινόμενου FLDV καθορίστηκε από τη συχνότητα του σήματος θορύβου. Για τον προσδιορισμό του επιτρεπόμενου μέγιστου κενού μεταξύ των μικροφακών και της επιφάνειας του κινούμενου αντικειμένου, μετρήθηκε η αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) σύμφωνα με το κενό. Έτσι, για τη διερεύνηση των επιπτώσεων του κενού στο SNR, επιλέχθηκαν κενά 37, 88 και 121 μm για τα πειράματα μετατόπισης λαμβάνοντας υπόψη ένα περιθώριο ασφαλείας (περίπου 30 μm) και μια μέγιστη μετατόπιση (90 μm).

Στην εικόνα 2.3 απεικονίζονται οι μετατοπίσεις που εκτιμήθηκαν από το σήμα Doppler για διαφορετικά κενά. Τα δεδομένα SNR εξήχθησαν από το τετράγωνο του λόγου πλάτους προς τη συχνότητα οδήγησης και τη κυρίαρχη συχνότητα θορύβου. Για κενά 37, 88 και 121 μm, τα

SNR υπολογίστηκαν στα 37,5, 35,6 και 31,7 dB, αντίστοιχα και είναι σχεδόν συγκρίσιμα με αυτά του συστήματος αναφοράς LDV με έναν αντικειμενικό φακό (32,3 dB). Επομένως, το προτεινόμενο FLDV είναι ικανό να εκτελεί δυναμικές μετρήσεις σε συνεπίπεδες κινήσεις των ενεργοποιητών MEMS με κενά λειτουργίας έως και 121 μm .

Συμπερασματικά, προτείνεται ένα αξονικό FLDV που βασίζεται σε 45°-γωνιακή οπτική ίνα με ένα αυτό-ευθυγραμμισμένο μικροφακό για να παρέχει δυναμικές μετρήσεις σε συνεπίπεδη κίνηση ενός ενεργοποιητή MEMS. Η δέσμη μέτρησης, που είναι «λυγισμένη» από 90° γωνία στις 45°, ευθυγραμμίζεται κάθετα στο πλευρικό τοίχωμα του ενεργοποιητή. Το άνοιγμα του πλευρικού τοιχώματος απαιτείται να είναι περίπου 150 $\mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$

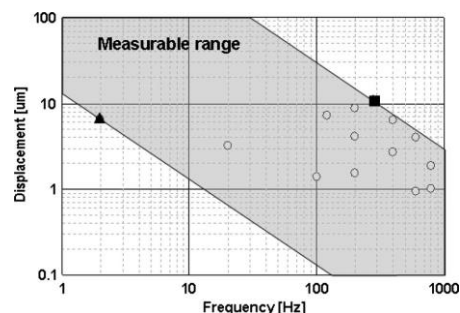


Εικόνα 2.3

για να ταιριάζει με την 45°-γωνιακή οπτική ίνα, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάμετρος της οπτικής ίνας είναι 125 μm . Η κατάλληλη ρύθμιση της ίνας για να ευθυγραμμιστεί με το στόχο με ακρίβεια και να διατηρήσει ταυτόχρονα ένα επαρκές κενό μεταξύ της ίνας και του ορίου ανοίγματος, διεξάγεται με την βοήθεια μίας κάμερας CCD. Η ίνα μετακινείται προς τα κάτω έως ότου η ανακλώμενη οπτική ισχύ φτάσει στη μέγιστη τιμή της.

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, το SNR του προτεινόμενου συστήματος είναι 31,6 dB, το οποίο είναι σχεδόν συγκρίσιμο με αυτό του συστήματος αναφοράς (32,3 dB) και επιβεβαιώθηκε ότι η μετατόπιση του ενεργοποιητή MEMS μπορεί να μετρηθεί ακόμη και όταν ο ενεργοποιητής, περιβάλλεται από εξωτερικό πλαίσιο που δεν επιτρέπει οπτική πρόσβαση, κατά τη συνεπίπεδη κίνηση.

Τέλος, στην εικόνα 2.4 απεικονίζεται το μετρήσιμο εύρος ως προς τη συχνότητα λειτουργίας και τη μετατόπιση με την προϋπόθεση ότι η μετατόπιση του ενεργοποιητή MEMS οδηγείται από ημιτονοειδή είσοδο. Οι κύκλοι (°) υποδεικνύουν τα μετρούμενα σημεία εντός του θεωρητικά μετρήσιμου εύρους και επιβεβαιώνεται η ικανότητα μέτρησης του προτεινόμενου συστήματος να καλύψει τη συνεπίπεδη κίνηση των περισσότερων ενεργοποιητών MEMS.



Εικόνα 2.4

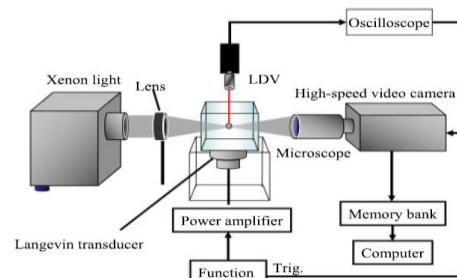
2.2 Μέτρηση των χαρακτηριστικών συντονισμού μιας δονούμενης φουσαλίδας με χρήση ενός Laser Doppler Vibrometer.

Οι μικροφουσαλίδες έχουν ευρεία εφαρμογή στη βιομηχανία, τη βιοεπιστήμη και την ιατρική. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται και στην ιατρική διάγνωση ως παράγοντας αντίθεσης για

απεικόνιση με υπερήχους. Πρόκειται για φυσαλίδες με διάμετρο μεγαλύτερη από ένα μικρόμετρο και έχουν τη δυνατότητα να ταλαντώνονται και δονούνται όταν περιέχουν κάποιο αέριο και εφαρμόζεται σε αυτές ένα ηχητικό ενεργειακό πεδίο. Για να οδηγηθεί αποτελεσματικά μια μικροφυσαλίδα πρέπει να κατανοηθεί η συμπεριφορά της όπου το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι η κατάσταση συντονισμού. Ο συμβατικός τρόπος παρατήρησης της συμπεριφοράς των φυσαλίδων περιλαμβάνει μία κάμερα υψηλής ταχύτητας και τη μέθοδος σκέδασης Mie αλλά χαρακτηρίζεται από κακή χωρική και χρονική ανάλυση.

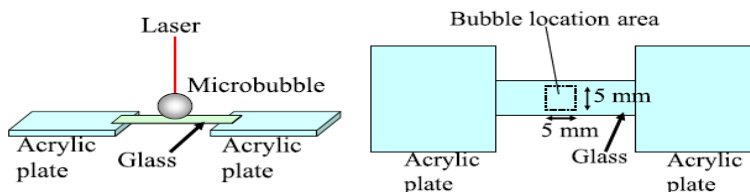
Σε μία ερευνητική μελέτη, κατασκευάστηκε ένα πειραματικό σύστημα Laser Doppler Vibrometer για την μέτρηση μίας μόνο μικροφυσαλίδας. Για πρώτη φορά κατέστη δυνατή η μέτρηση της δόνησης μιας μικροφυσαλίδας με πλάτος μετατόπισης της τάξης μερικών νανομέτρων και δόθηκε η δυνατότητα διερεύνησης των γραμμικών χαρακτηριστικών συντονισμού. Το σύστημα μέτρησης LDV αναμένεται να είναι το πιο αποτελεσματικό εργαλείο για την αξιολόγηση μίας ταχείας και μικροσκοπικής συμπεριφοράς φυσαλίδων.

Στα πλαίσια της μελέτης αναπτύχθηκε η πειραματική διάταξη που απεικονίζεται στην εικόνα 2.5. Αυτό το σύστημα αποτελείται από ένα LDV (Polytec NLV-2500) με αντικειμενικό φακό, μια βιντεοκάμερα υψηλής ταχύτητας, ένα μικροσκόπιο μεγάλων αποστάσεων, ένα πειραματικό κύτταρο για την παρατήρηση μίας φυσαλίδας, ένα οπτικό φακό και μια λάμπα xenon.



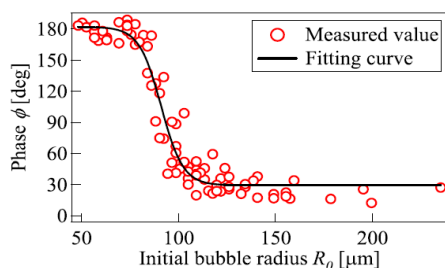
Εικόνα 2.5

Η κάμερα χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της αρχικής ακτίνας φυσαλίδων. Το πειραματικό κύτταρο γεμίστηκε με νερό. Κύματα υπερήχων με συχνότητα 27,8 kHz ακτινοβολήθηκαν συνεχώς από τον μοροτροπέα Langevin που είναι στερεωμένος στο κάτω μέρος του κυττάρου. Στο κύτταρο σχηματίστηκε ένα ακουστικό κύμα με αποτέλεσμα να παραχθεί μία φυσαλίδα μέσω ηλεκτρόλυσης νερού και να τοποθετηθεί πάνω σε γυαλί. Στην εικόνα 2.7 απεικονίζονται το σχήμα του γυαλιού που έχει προσαρτηθεί η μικροφυσαλίδα ακτίνας που κυμαίνονταν από 45 έως 235 μm .



Εικόνα 2.6

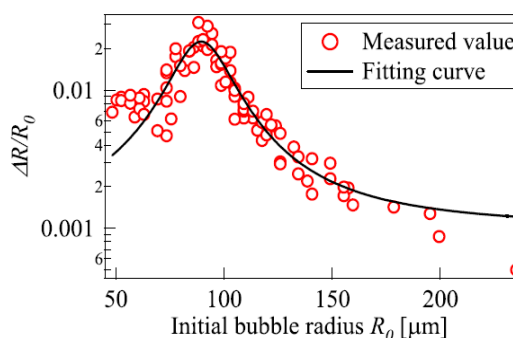
Η δέσμη laser από το σύστημα του LDV εστιάζεται στην κορυφή της επιφάνειας της φυσαλίδας και προσδιορίζεται η ταχύτητα δόνησης της φυσαλίδας. Η πληροφορία της μετατόπισης της δόνησης της φυσαλίδας προκύπτει μέσω της ολοκλήρωσης της καμπύλης χρόνου ταχύτητας. Μέσω του μετασχηματισμού Fourier της κυματομορφής της μετατόπισης, μετρήθηκε το πλάτος ΔR και η φάση της



Εικόνα 2.7

θεμελιώδους συχνότητας (27,8 kHz). Η αρχική φάση της προσπίπτουσας ηχητικής πίεσης ήταν 0° . Επειδή το πλάτος της δεύτερης αρμονικής συχνότητας (55,6 kHz) ήταν το πολύ 10% της θεμελιώδους, συμπεραίνεται ότι η φυσαλίδα ανταποκρίθηκε γραμμικά με την προσπίπτουσα ηχητική πίεση.

Στην εικόνα 2.7 δίνεται η πειραματική καμπύλη (Λορεντζιανή κατανομή) του κανονικοποιημένου πλάτους μετατόπισης για φυσαλίδες με διάφορες αρχικές ακτίνες. Η διακύμανση των σημείων μέτρησης οφείλεται σε κακή χωρική ανάλυση του συστήματος απεικόνισης (περίπου 4 nm) η οποία μπορεί



Εικόνα 2.8

να προκαλέσει σφάλμα μέτρησης της αρχικής ακτίνας. Παρατηρείται ότι το μέγιστο πλάτος μετατόπισης αντιστοιχεί σε ακτίνα 90μm.

Στην εικόνα 2.8 φαίνεται η εξάρτηση της φάσης δόνησης για διαφορετικές αρχικές ακτίνες. Είναι γνωστό ότι η φάση δόνησης μιας φυσαλίδας αντιστρέφεται στην ακτίνα συντονισμού. Επομένως, από την πειραματική καμπύλη παρατηρούμε αντιστροφή για $\varphi=90^\circ$ που αντιστοιχεί σε αρχική ακτίνα φυσαλίδας και άρα η ακτίνα συντονισμού περίπου 90 m.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε η διαφορά μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων οφείλεται στην επίδραση του γυαλιού (τοιχώμα) στο οποίο είναι προσαρτημένη η φυσαλίδα. Είναι πολύ σημαντικό να κατανοηθεί η επίδραση του τοιχώματος στη συμπεριφορά των φυσαλίδων επειδή μία φυσαλίδα περιορίζεται συχνά ή βρίσκεται κοντά σε τοίχωμα σε ορισμένες εφαρμογές, όπως όταν είναι ένας παράγοντας αντίθεσης σε ένα αιμοφόρο αγγείο.

Το LDV μας δίνει τη δυνατότητα να διερευνήσουμε το επίδραση του τοιχώματος καθώς και την δυνατότητα να παρέχει μετρήσεις σε μικροκάψουλες. Οι μικροκάψουλες, οι οποίες καλύπτονται με κέλυφος, έχουν χρησιμοποιηθεί ως παράγοντες αντίθεσης ή φορείς φαρμάκων σε συστήματα παροχής φαρμάκων με υπερήχους. Το κέλυφος περιορίζει τη δόνηση της κάψουλας και επηρεάζει σημαντικά τα συντονιστικά χαρακτηριστικά της. Η

δόνηση της κάψουλας είναι συνήθως πολύ μικρή και δεν μπορούμε να μετρήσουμε τη δόνηση της κάψουλας χρησιμοποιώντας άλλα όργανα μέτρησης. Το LDV αναμένεται να γίνει ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την παρατήρησή του.

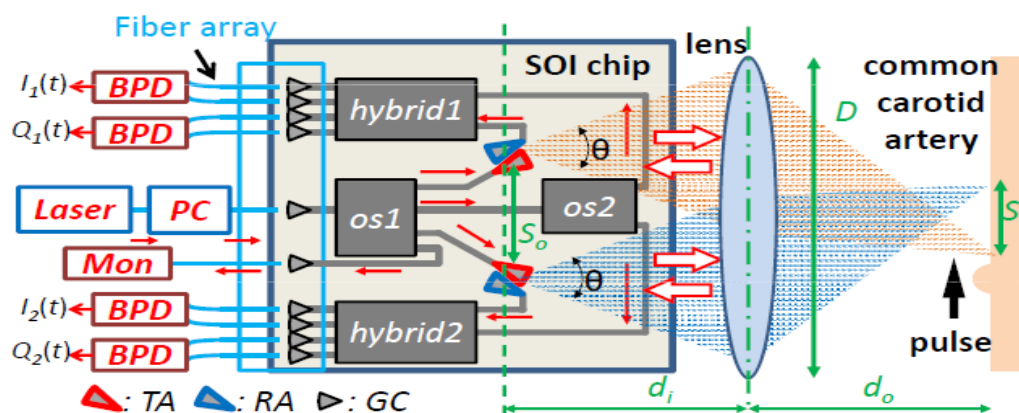
Συμπερασματικά, το σύστημα μέτρησης LDV είναι το μοναδικό εργαλείο για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών δόνησης μιας μικροκάψουλας ή μιας μικροφουσαλίδας που είναι προστατημένα σε ένα τοίχωμα.

2.3 On-chip Laser Doppler vibrometer για μέτρηση της της ταχύτητας του αρτηριακού σφυγμικού κύματος

Η ταχύτητα των σφυγμικών κυμάτων (*Pulse Wave Velocity, PWV*) δηλώνει την ταχύτητα με την οποία ο σφυγμός της αρτηριακής πίεσης διαδίδεται μέσω του κυκλοφορικού συστήματος και είναι ένας σημαντικός δείκτης για καρδιαγγειακό κίνδυνο. Μία μεγαλύτερη τιμή του PWV δείχνει μεγαλύτερη αρτηριακή δυσκαμψία άρα υψηλότερο κίνδυνο καρδιαγγειακών επεισοδίων. Επομένως, το PWV χρησιμοποιείται ως ένας σημαντικός και ανεξάρτητος προγνωστικός παράγοντας της καρδιαγγειακής θνησιμότητας.

Το Laser Doppler Vibrometer μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πιθανή τεχνική για τη μέτρηση του τοπικού καρωτιδικού PWV, μετρώντας τον χρόνο διέλευσης του παλμικού κύματος μεταξύ δύο τοποθεσιών κατά μήκος της κοινής καρωτιδικής αρτηρίας (*Common Carotid Artery, CCA*) από δονήσεις επιφάνειας του δέρματος. Ωστόσο, οι τρέχουσες διατάξεις LDV εξακολουθούν να είναι ογκώδεις και δύσκολα διαχειρίσιμες.

Σε μία ερευνητική μελέτη προτάθηκε μία πιο συμπαγή συσκευή που στηρίζεται σε ένα φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα (*Photonics Integrated Circuit, PIC*) που αποτελείται από δύο μεμονωμένα ομόδυνα LDVs. Το on-chip σύστημα LDV και η διάταξη μέτρησης απεικονίζονται στο σχήμα 2.9.

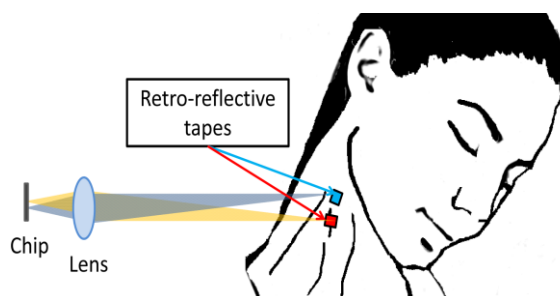


Εικόνα 2.9 Η πειραματική διάταξη της συσκευής μέτρησης PWV χρησιμοποιώντας ένα dual-LDV PIC chip. Ως *os* (*os1* και *os2*) συμβολίζεται ο οπτικός διαχωριστής, ως *hybrid* το 90° οπτικό υβρίδιο, ως *PC* ο ελεγκτής πόλωσης, ως *BPD* ο balanced φωτοανιχνευτής, ως *Mon* η οθόνη, ως *TA* η κεραία μετάδοσης, ως *RA* η κεραία λήψης, ως *GC* για grating coupler.

Στην πειραματική διάταξη έχει επιλεγθεί το laser και η φωτοδίοδος να εφαρμόζονται εξωτερικά από το chip και να μην ενσωματώνονται σε αυτό για να ελεγχθεί αποκλειστικά η απόδοση του παθητικού οπτικού συστήματος και συνδέονται με το chip μέσω συστοιχίας ινών, στην οποία 12 μονορυθμικές ίνες (μήκος 2 μέτρων, πυρήνας/ επένδυση = 9/125 μm).

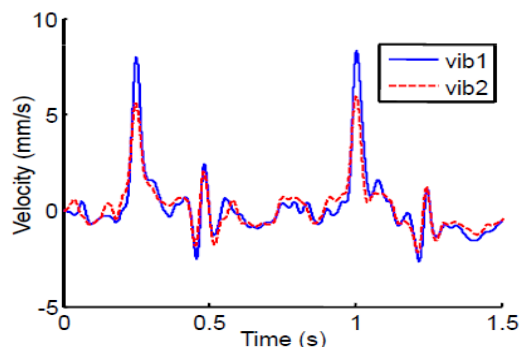
Το συνεκτικό φως του εξωτερικού laser εισέρχεται στο chip μέσω της συστοιχίας οπτικών ινών και εξασφαλίζεται μία βελτιστοποιημένη οπτική σύζευξη μεταξύ της ίνας και του on-chip grating συζεύκτη από έναν ελεγκτή πόλωσης. Στο 1×4 οπτικό διαχωριστή (os1) το φως χωρίζεται σε τέσσερα μέρη: τα δύο μέρη αποστέλλονται στους βραχίονες μέτρησης των δύο αυτόνομων LDV, το τρίτο μέρος διαχωρίζεται ξανά σε δύο σήματα αναφοράς από ένα δεύτερο οπτικό διαχωριστή (os2), και το τέταρτο μέρος αποστέλλεται απευθείας σε έναν ανιχνευτή για την παρακολούθηση των διακυμάνσεων της έντασης του φωτός. Δύο κεραίες μετάδοσης φωτός και δύο κεραίες λήψης φωτός, που πραγματοποιούνται μέσω grating συζευκτών, τοποθετούνται στους βραχίονες μέτρησης για να στείλουν φως από το τσιπ και να λάβουν πίσω την ανάκλαση του, αντίστοιχα. Ένας φακός είναι τοποθετημένος μπροστά από το chip για την εστίαση των δύο δεσμών φωτός από τη κεραία μετάδοσης φωτός σε δύο θέσεις στην περιοχή του λαιμού πάνω σε κοινή καρωτιδική αρτηρία (CCA) όπου έχει τοποθετηθεί και μία κατάλληλη ανακλαστική ταινία σε κάθε ένα σημείο. Τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα συλλέγονται από τον ίδιο φακό και εστιάζονται πίσω στο chip, όπου συλλέγονται από τις κεραίες λήψης που είναι τοποθετημένες αρκετά κοντά στις κεραίες μετάδοσης.

Σύμφωνα με το φαινόμενο Doppler, τα ανακτημένα σήματα ανάκλασης μεταφέρουν τις πληροφορίες των δονήσεων στις χρονοεξαρτώμενες μεταβολές συχνότητας και αναμειγνύονται με τα σήματα αναφοράς στα δύο 90° οπτικά υβρίδια. Από κάθε 90° οπτικό υβρίδιο, τέσσερα οπτικά σήματα λαμβάνονται και αποστέλλονται σε δύο εξωτερικούς balanced φωτοανιχνευτές. Με τη βοήθεια ενός μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και τη ψηφιακή μέθοδο αποδιαμόρφωσης arctangent, επιτυγχάνεται η ανάκτηση της στιγμιαίας ταχύτητας κάθε δόνησης και άρα είναι εφικτό να ληφθούν δύο καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τις στιγμιαίες ταχύτητες των δονήσεων.



Εικόνα 2.10

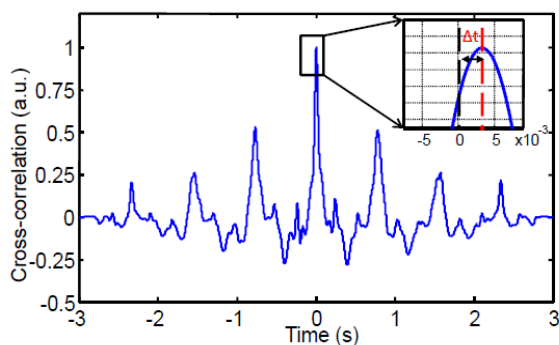
Σε μία πειραματική δοκιμή της παραπάνω συσκευής για τη μέτρηση του CCA PWV in vivo, το υπό δοκιμή άτομο ήταν ένας υγιής άνδρας εθελοντής ηλικίας 26 ετών. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ο εθελοντής καθόταν σε όρθια θέση μπροστά από τη συσκευή, με δύο ανακλαστικές ταινίες στις θέσεις-στόχους κατά μήκος του CCA, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.10. Οι δύο δέσμες φωτός ρυθμίστηκαν κατάλληλα ώστε να εστιάζονται



Εικόνα 2.11

στις θέσεις στόχους, αντίστοιχα. Στην εικόνα 2.11 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της αποδιαμορφωμένης ταχύτητας για μια αντιπροσωπευτική μέτρηση και στην εικόνα 2.17 η αλληλοσυσχέτιση των ταχυτήτων. Παρατηρήθηκε ότι ο χρόνος διέλευσης του παλμού είναι περίπου $3,3 \pm 0,1$ ms, και αυτό αντιστοιχεί σε PWV μεταξύ $4,85 \pm 0,45$ m / s.

Τελικά, η μέθοδος αλληλοσυσχέτισης χρησιμοποιείται για την παραγωγή του PWV και το σφάλμα χρονικής καθυστέρησης προσδιορίστηκε ίσο με 0,1 ms. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι όταν ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο σημείων μέτρησης απέχουν μεταξύ τους μόλις 1,5 cm, το μετρήσιμο εύρος αυτής της συσκευής μπορεί να καλύψει όλες τις πιθανές τιμές του CCA PWV. Η



Εικόνα 2.12

συγκεκριμένη υλοποίηση αποτέλεσε η βάση για να τεθούν ως μελλοντικοί στόχοι η ενσωμάτωση της φωτεινής πηγής (λείζερ) και των φωτοανιχνευτών στα ολοκληρωμένα κυκλώματα καθώς και η δημιουργία ενός κυκλώματος PIC με περισσότερα από δύο συστήματα LDVs για τη λήψη περισσότερων πληροφοριών σε σφυγμούς σε διαφορετικά σημεία του ανθρώπινου σώματος.

Κεφάλαιο 3°. Σχήματα Διαμόρφωσης

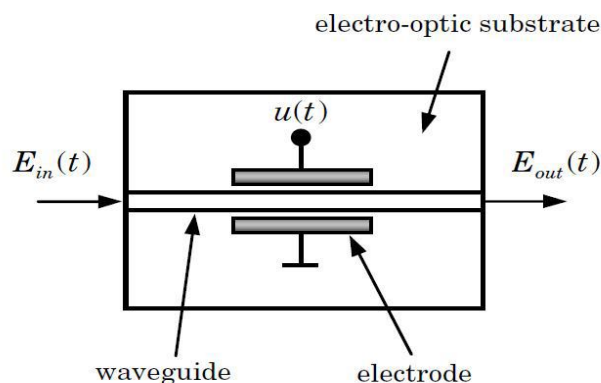
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τρία διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης που προτάθηκαν από την εταιρία της Polytec και έχουν στόχο να αξιολογήσουν την απόδοση και τις διαφορετικές απαιτήσεις του συστήματος LDV σε κάθε περίπτωση. Αρχικά, θα δοθεί η θεωρητική περιγραφή του κάθε σχήματος διαμόρφωσης και έπειτα θα συγκριθεί η επίδοση του LDV σε σχέση με τα τρία διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό του Matlab.

3.1 Οπτικός Ολισθητής Φάσης (Phase Shifter)

Απαραίτητο δομικό στοιχείο για κάθε σχήμα διαμόρφωσης που θα αναλυθεί στο παρόν κεφάλαιο είναι ο οπτικός ολισθητής φάσης (*phase shifter*). Ένας *phase shifter* αποτελεί μία ολοκληρωμένη οπτική διάταξη και κατασκευάζεται εισάγοντας έναν οπτικό κυματοδηγό σε ένα ηλεκτρο-οπτικό υπόστρωμα, συνήθως από νιοβικό λίθιο, LiNbO_3 . Ο δείκτης διάθλασης του υλικού και κυρίως, ο ενεργός δείκτης διάθλασης του κυματοδηγού (*effective refractive index*) μεταβάλλεται όταν εφαρμόζεται σε αυτόν μία εξωτερική τάση μέσω ενός επικαλυμμένου ηλεκτροδίου με αποτέλεσμα το ηλεκτρικό πεδίο του εισερχόμενου οπτικού φορέα να μεταβάλλεται στο πεδίο της φάσης.

Η μεταβολή φάσης του ηλεκτρικού πεδίου του εισερχόμενου οπτικού φορέα εξαρτάται από το μήκος κύματος, λ , το μήκος του ηλεκτροδίου στο οποίο εφαρμόζεται η εξωτερική τάση, l_{el} και την αλλαγή του ενεργού δείκτη διάθλασης, Δn_{eff} . Λαμβάνοντας υπόψη μόνο το φαινόμενο Pockels, η αλλαγή του δείκτη διάθλασης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι γραμμική σε σχέση με την εφαρμοζόμενη εξωτερική τάση, $u(t)$, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\phi_{PM}(t) = 2\pi \cdot \lambda \cdot \Delta n_{eff}(t) \cdot l_{el} \sim u(t) \quad (3.1)$$



Εικόνα 3.1 Ολοκληρωμένος Οπτικός Διαμορφωτής Φάσης

Η πιο κρίσιμη παράμετρος ενός *phase shifter* είναι η τάση οδήγησης, V_{π} , η οποία εκφράζει τη τάση που απαιτείται για να επιτευχθεί αλλαγή φάσης π rad. Συνεπώς, η σχέση του εισερχόμενου οπτικού πεδίου, $E_{in}(t)$ και του εξερχόμενου οπτικού πεδίου, $E_{out}(t)$, που έχει υποστεί αυτή την αλλαγή φάσης, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot e^{j\phi_{PM}(t)} = E_{in}(t) \cdot e^{j\frac{u(t)}{V_{\pi}}\pi} \quad (3.2)$$

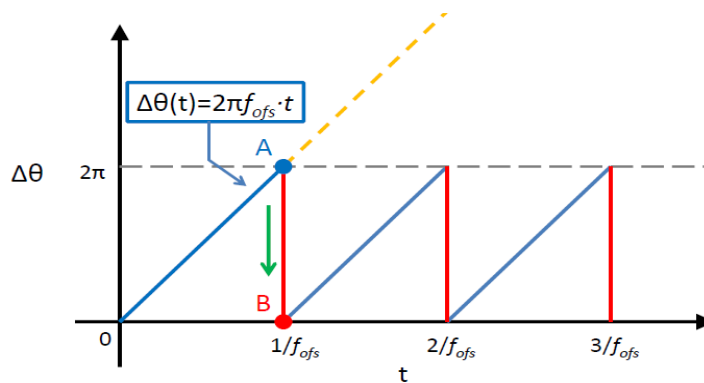
3.2 Σχήματα Διαμόρφωσης (Modulation Schemes)

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, είναι πολύ σημαντική η ολίσθηση της συχνότητας στη δέσμη μέτρησης καθώς στο σύστημα αντιλαμβάνεται και εξάγει τη πληροφορία της κατευθυνσης του μετρούμενου στόχου και παρακάμπει το θόρυβο χαμηλής συχνότητας στο σύστημα του LDV. Η συνήθης μέθοδος που χρησιμοποιείται για ολίσθηση συχνότητας είναι μέσω του ακουστο-οπτικού διαμορφωτή σε free space και fiber-based διατάξεις. Ωστόσο, λόγω της δυσκολίας να δημιουργηθεί ακουστικό κύμα στο υπόστρωμα πυριτίου λόγω της έλλειψης πιεζοηλεκτρισμού, ο ακουστο-οπτικός διαμορφωτής δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μία πλατφόρμα κυματοδηγού από νιτρίδιο του πυριτίου.

Στις επόμενες ενότητες θα περιγραφούν θεωρητικά τα τρία σχήματα διαμόρφωσης και έπειτα θα αναλυθεί ο κώδικας και οι προκύπτουσες προσομοιώσεις σε περιβάλλον του matlab. Τέλος, θα συγκριθεί η επίδοση τους στο σύστημα του LDV.

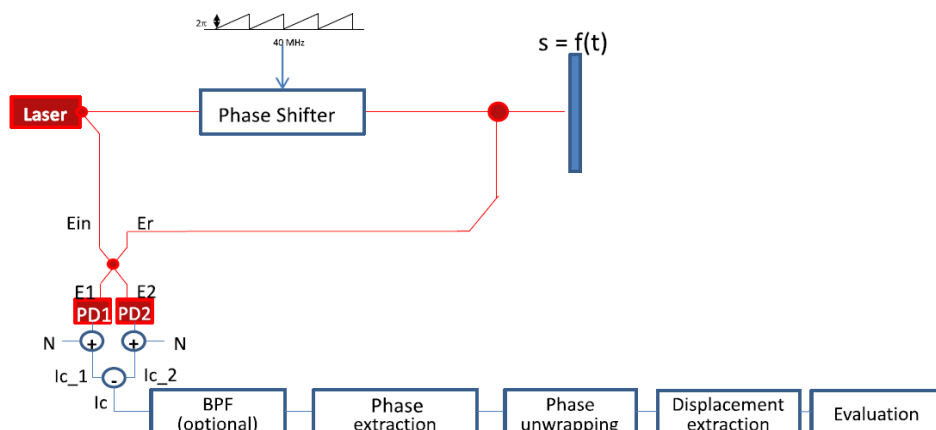
3.2.1 Simple Serrodyne Shifter

Η μέθοδος του *Simple Serrodyne Shifter* χρησιμοποιεί έναν *phase shifter* στη δέσμη μέτρησης του συστήματος LDV, ο οποίος οδηγείται από ένα πριονωτό ηλεκτρικό σήμα με συχνότητα 40 MHz και πλάτος $2V_{\pi}$. Συνεπώς, η φάση του εισερχόμενου οπτικού πεδίου μεταβάλλεται στο πεδίο του χρόνου από ένα πριονωτό ηλεκτρικό σήμα με peak-to-peak πλάτος φάσης 2π rad για να παραχθεί η επιθυμητή ολίσθηση φάσης των 40MHz.



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα φάσης ενός οπτικού σήματος διαμορφωμένου από ένα serrodyne shifter σε συνάρτηση με το χρόνο.

Επιδιώκεται ο χρόνος επιστροφής της προιονωτής φάσης να είναι αρκετά μικρός (η διάρκεια από το σημείο Α στο Β στην εικόνα 3.2), ώστε ο δέκτης να μην «αντιλαμβάνεται» τη μετάβαση αυτή, δηλαδή να «αντιλαμβάνεται» μόνο ότι η διαμόρφωση είναι μια γραμμική αλλαγή φάσης στο χρόνο. Δεδομένου ότι μια γραμμική αλλαγή φάσης $\varphi(t) = k_{\text{slop}}t$ είναι ισοδύναμη με μια σταθερή μετατόπιση συχνότητας $\Delta f = k_{\text{slop}}/2\pi$, το προφίλ της προιονωτής φάσης στην εικόνα 3.2 μπορεί να θεωρηθεί μετατόπιση συχνότητας.

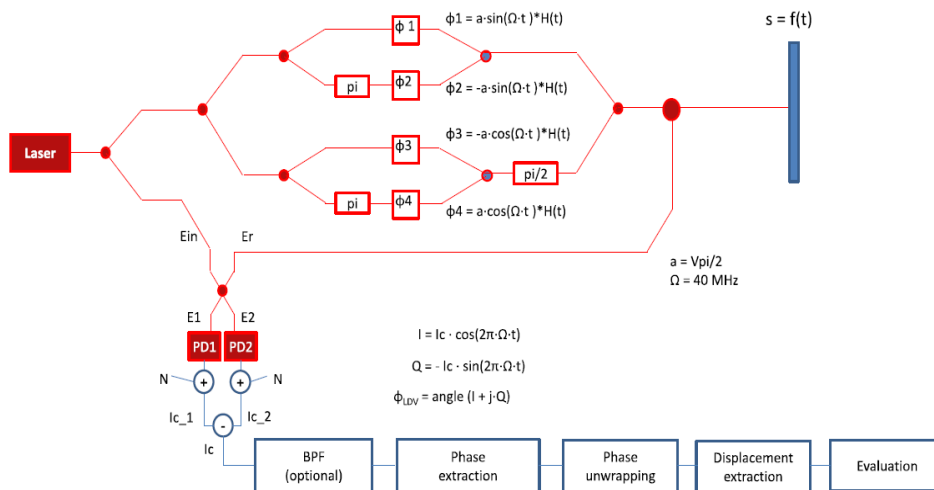


Εικόνα 3.3 Διάταξη ενός συστήματος LDV με Simple Serrodyne Shifter.

Η μέγιστη συχνότητα Doppler της δονούμενης επιφάνειας υποδεικνύει το εύρος ζώνης του λαμβανόμενου σήματος βασικής ζώνης. Επειδή το σήμα διαμορφώνεται στα 40 MHz, η μέγιστη συχνότητα Doppler πρέπει να είναι κάτω από αυτή τη τιμή ώστε να αποφευχθούν παραμορφώσεις κατά τη μετατροπή του σήματος από 40MHz στη βασική ζώνη. Επιπροσθέτως, ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο (SNR) του συστήματος επηρεάζεται από πολλές πηγές θορύβου, όπως είναι ο θόρυβος πλάτους, ο θόρυβος φάσης του laser, η επίδραση της οπτικής κηλίδας της δονούμενης επιφάνειας.

3.2.2 Four-Branch Shifter

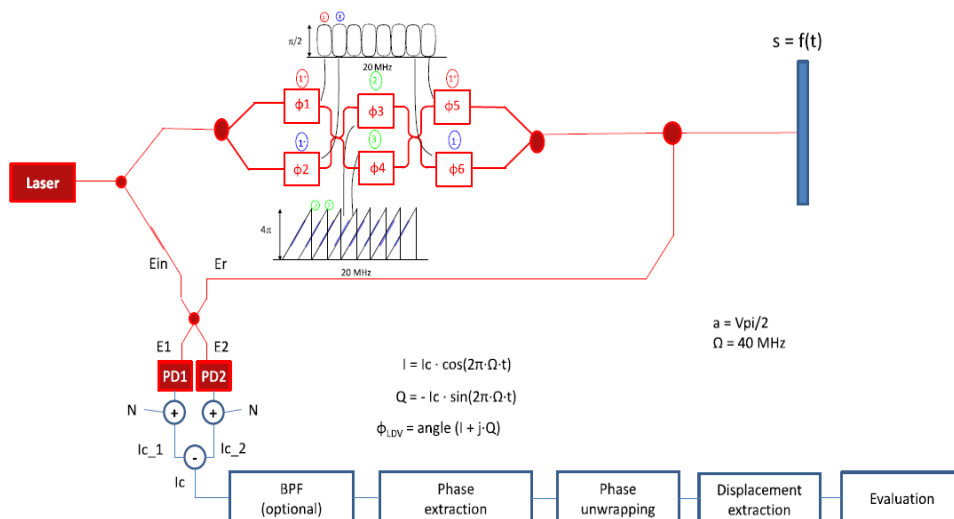
Ένα σύστημα LDV που βασίζεται στο σχήμα διαμόρφωσης *Four-Branch Shifter* συγκροτείται από τέσσερις διαφορετικούς *phase shifters* που οδηγούνται από ημιτονοειδή σήματα με συχνότητα 40 MHz και πλάτος $V_{\pi}/2$, τα οποία έχουν διαφορά φάσης $\frac{\pi}{2}$ rad μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, το οπτικό σήμα μέτρησης διαχωρίζεται σε τέσσερις βραχίονες και έπειτα, σε κάθε βραχίονα η φάση του εισερχόμενου οπτικού πεδίου μεταβάλλεται στο πεδίο του χρόνου από ένα διαφορετικό ημιτονοειδές ηλεκτρικό σήμα πλάτους $V_{\pi}/2$ και συχνότητας 40 MHz. Επιπλέον, σε δύο βραχίονες έχουν εισαχθεί ελεγχόμενες καθυστερήσεις φάσης σύμφωνα με την εικόνα 3.4, ώστε οι πλευρικές ζώνες στο τελικό σήμα να καταστέλλονται σημαντικά.



Εικόνα 3.4 Διάταξη ενός συστήματος LDV με Four-Branch Shifter.

3.2.3 Sophisticated Serrodyne Shifter

Ένα σύστημα LDV που βασίζεται στο σχήμα διαμόρφωσης *Sophisticated Serrodyne Shifter* συγκροτείται από έξι *phase shifters* όπου οι τέσσερις *phase shifters* οδηγούνται από τετραγωνικά σήματα με συχνότητα 20 MHz και πλάτος $V_{\pi}/2$ ενώ οι δύο *phase shifters* οδηγούνται από πριονωτά σήματα με συχνότητα 20 MHz και πλάτος $4V_{\pi}$. Συγκεκριμένα, το οπτικό σήμα μέτρησης διαχωρίζεται και έπειτα, σε κάθε βραχίονα η φάση του εισερχόμενου οπτικού πεδίου μεταβάλλεται στο πεδίο του χρόνου από ένα διαφορετικό ηλεκτρικό σήμα σύμφωνα με την εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5 Διάταξη ενός συστήματος LDV με Sophisticated Serrodyne Shifter.

3.3 Μελέτη των σχημάτων διαμόρφωσης

Σε αυτή την ενότητα θα μελετηθούν οι προσομοιώσεις των τριών σχημάτων διαμόρφωσης με τη βοήθεια του Matlab για την σύγκριση και την αξιολόγηση της επίδοσης των διαφορετικών συστημάτων LDVs. Αρχικά, θα περιγραφεί ο κώδικας που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον του Matlab και έπειτα, θα παρατεθούν οι προσομοιώσεις με τις οι αντίστοιχες παρατηρήσεις που προκύπτουν.

3.3.1 Περιγραφή του κώδικα σε περιβάλλον Matlab

Η βασική πλατφόρμα που έχει αναπτυχθεί στο λογισμικό του Matlab για να προσομοιώνει μία πλήρη διάταξη LDV η οποία περιλαμβάνει:

- *Laser* συνεχούς κύματος στα 1550nm.
- Έναν *Frequency Shifter* διαφορετικό σε κάθε σχήμα διαμόρφωσης.
- Δημιουργία της συνάρτησης μετατόπισης του στόχου.
- Απόκτηση σήματος (Ως επιλογή η ισορροπημένη ανίχνευση).
- Ανάκτηση της μετατόπισης του στόχου.

Επιπλέον, ορίστηκε μία μετρική για την αξιολόγηση της απόδοσης του LDV ως εξής:

$$dev = \frac{mean(|sm - s'm|)}{\max(s) - \min(s)} \quad (3.3)$$

Όπου η μέση ποσότητα της διαφοράς ανάμεσα της πραγματικής συνάρτησης μετατόπισης του δονούμενου αντικειμένου και της μετρούμενης αντίστοιχης συνάρτησης μετατόπισης υπολογίζεται για κάθε δείγμα και κανονικοποιείται στο μέγιστο εύρος της μετατόπισης.

Σε μία πιο αναλυτική ανασκόπηση, ως κρίσιμες παράμετροι στον κώδικα θεωρούνται οι εξής:

- Η κεντρική συχνότητα φέροντος, f_c .
- Ο αριθμός των περιόδων δόνησης, NT_{vib} .
- Η συχνότητα της δονούμενης επιφάνειας, f_{vib} .
- Η μέγιστη μετατόπιση της δονούμενης επιφάνειας, s_{max} .

Αρχικά, στον κώδικα ορίζονται οι βασικοί παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να περιγραφούν οι βασικές λειτουργίες, όπως είναι οι παράμετροι συχνότητας και οι δειγματοληπτικοί παράμετροι.

Η μετατόπιση της δονούμενης επιφάνειας δημιουργεί ένα διαμορφωμένο κατά φάση σήμα το οποίο εκδηλώνει μία γραμμική σχέση μεταξύ φάσης και μετατόπισης ως εξής:

$$\varphi(t) = 2 * k * s = \frac{4 * \pi * n * s(t)}{\lambda} \quad (3.4)$$

Στον κώδικα, μελετάται η δόνηση μίας απλής αρμονικής ταλάντωσης με συχνότητα δόνησης f_{vib} . Σε αυτή τη περίπτωση, η μετατόπιση της επιφάνειας περιγράφεται από την σχέση:

$$s = s_{max} * \sin(2 * \pi * f_{vib} * t) \quad (3.5)$$

Όπου s_{max} η μέγιστη μετατόπιση, η οποία ανήκει στο εύρος 10^{-7} έως 10^{-4} m. Προκύπτει ότι η πληροφορία της ταχύτητας της επιφάνειας που εξετάζεται, προκύπτει μέσω του ρυθμού αλλαγής της μετατόπισης ως εξής:

$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt} \quad (3.6)$$

Η διαμόρφωση φάσης του οπτικού σήματος που δημιουργεί η δόνηση της επιφάνειας έχει ως άμεσο αποτέλεσμα και τη διαμόρφωση συχνότητας επειδή ο ρυθμός αλλαγής της φάσης εκφράζει τη γωνιακή συχνότητα:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_d(t) = 2\pi f_d \quad (3.7)$$

Η συχνότητα αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα, $v(t)$ και τη συχνότητα δόνησης, f_{vib} και είναι η συχνότητα Doppler :

$$f_d(t) = \frac{2 * n * v(t)}{\lambda} \quad (3.8)$$

Έχουμε θεωρήσει την περίπτωση όπου η μετατόπιση της δονούμενης επιφάνειας εκτελεί μία απλή αρμονική ταλάντωση και επομένως, προκύπτουν οι εξισώσεις:

- Η μετατόπιση της επιφάνειας: $s = s_{max} * \cos(2 * \pi * f_{vib} * t)$ (3.9)

- Η μέγιστη ταχύτητα της επιφάνειας: $v_{max} = s_{max} * 2 * \pi * f_{vib}$ (3.10)

- Η μέγιστη συχνότητα Doppler: $f_{dmax} = \frac{2n}{\lambda} * v_{max}$ (3.11)

Στη συνέχεια, μέσω σημαιών (*flags*) δίνεται η δυνατότητα να επιλεγεί το επιθυμητό σχήμα διαμόρφωσης, η ύπαρξη θορύβου στα σήματα οδήγησης και ο θόρυβος στη φωτοδίοδο. Επιπλέον, ο κώδικας περιέχει και ένα διάνυσμα SNRdB που αφορά το λόγο σήματος προς θόρυβο των σημάτων οδήγησης σε decibel. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο σηματοθορυβικός λόγος όλου του συστήματος εισάγεται ως θόρυβος στη φωτοδίοδο μέσω της αντίστοιχης σημαίας (*flag*). Ακόμη, ορίζουμε τα *amplitude factors*, που είναι διανύσματα πλάτους των σημάτων οδήγησης για κάθε σχήμα διαμόρφωσης και η τελευταία τιμή του διανύσματος αντιστοιχεί στο πλάτος ιδανικής διαμόρφωσης.

Μέσω μίας εντολής *flag* είναι εφικτή η χρήση ενός φίλτρου έπειτα από κάθε *phase shifter* για να περιορίζει το εύρος ζώνης των PZTs με αποτέλεσμα να αποκόβονται οι συχνότητες διαφορετικής τάξης από της συνάρτησης μεταφοράς των PZTs και να αυξάνεται η αποδοτικότητα του συστήματος. Αν έχουμε επιλέξει περιορισμό του εύρους ζώνης των *phase*

shifters τότε στον κώδικα προστίθεται ένα επιπλέον διάνυσμα BW_{6dB} (Εύρος ζώνης 6-dB της συνάρτησης μεταφοράς των PZTs) και τα *amplitude factors* επιλέγονται να είναι διανύσματα ίδιου αριθμού στοιχείων με το διάνυσμα BW_{6dB} και να περιέχει τιμές πλάτους ιδανικής διαμόρφωσης.

Μετά τον ορισμό των βασικών παραμέτρων, στον κώδικα υλοποιούνται βασικές λειτουργίες όπως η διαμόρφωση φάσης των σημάτων οδήγησης με ή χωρίς βαθυπερατό φίλτρο στους PZTs, η συμβολή και η φωτοανίχνευση των οπτικών σημάτων και η IQ αποδιαμόρφωση. Η τάση V_{π} επιλέγεται να είναι ίση με 1V δηλαδή ο *phase shifter* δημιουργεί αλλαγή φάσης ίση με π rad όταν του εφαρμόσουμε τάση 1V.

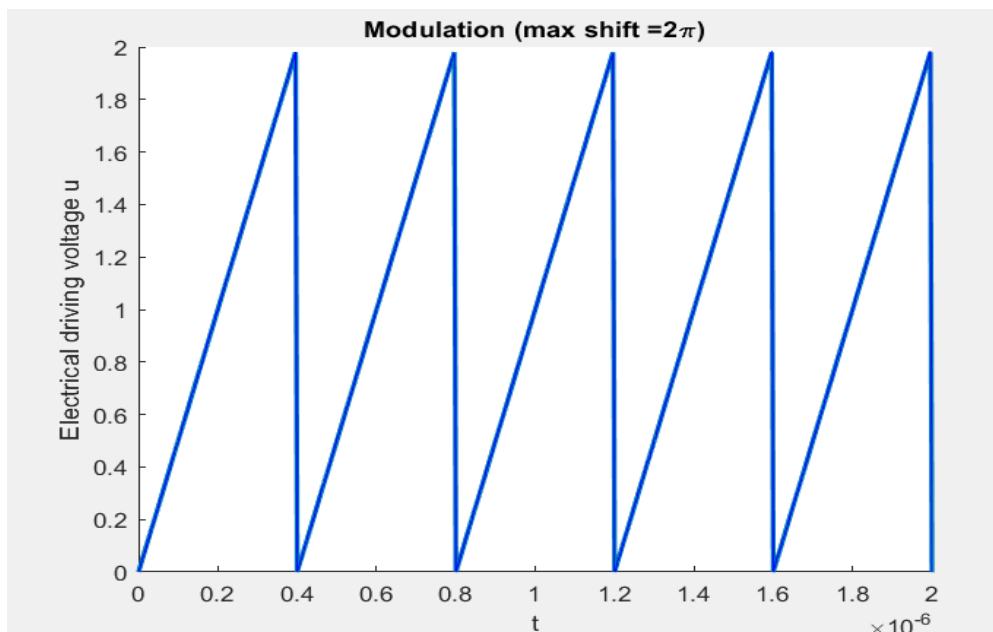
Simple Serrodyne Shifter

Σε αυτό το σχήμα διαμόρφωσης το πριονωτό ηλεκτρικό σήμα οδήγησης του *phase shifter* δίνεται από την εξίσωση:

$$u_{mod}(t) = \alpha * u_{mod_{ideal}}(t) = a * V_{\pi} (1 + \text{sawtooth}(2\pi f_c t)) \quad (3.12)$$

Όπου ως $u_{mod_{ideal}}$ και u_{mod} συμβολίζονται το ιδανικό και το μη ιδανικό ηλεκτρικό σήμα οδήγησης και ως a συμβολίζεται ο *amplitude factor*, ο οποίος δημιουργεί ένα μη ιδανικό πριονωτό σήμα όταν έχει τιμές μικρότερες του 1 και ένα ιδανικό όταν ισούται με 1. Το διαμορφωμένο οπτικό σήμα που εξέρχεται από το *phase shifter* έχει εξίσωση:

$$E_{mod} = e^{\frac{i * u_{mod} * \pi}{V_{\pi}}} \quad (3.13)$$



Εικόνα 3.6 Ιδανικό πριονωτό ηλεκτρικό σήμα οδήγησης του Simple Serrodyne Shifter.

Four-Branch Shifter

Σε αυτό το σχήμα διαμόρφωσης, ο *Four-Branch Shifter* οδηγείται από τέσσερα ημιτονοειδή ηλεκτρικά σήματα οδήγησης τα οποία έχουν διαφορά φάσης $\frac{\pi}{2}$ μεταξύ τους και περιγράφονται από τις εξής εξισώσεις:

$$\blacksquare u_{mod1}(t) = V_{\pi} * a * \sin(2\pi f_c t) \quad (3.14)$$

$$\blacksquare u_{mod2}(t) = -V_{\pi} * a * \sin(2\pi f_c t) \quad (3.15)$$

$$\blacksquare u_{mod3}(t) = -V_{\pi} * a * \cos(2\pi f_c t) \quad (3.16)$$

$$\blacksquare u_{mod4}(t) = V_{\pi} * a * \cos(2\pi f_c t) \quad (3.17)$$

Όπου το διαμορφωμένο οπτικό σήμα που εξέρχεται από το *phase shifter* έχει εξίσωση:

$$E_{mod} = \frac{1}{2} \left(\left(e^{\frac{i * u_{mod1} * \pi}{V_{\pi}}} - e^{\frac{i * u_{mod2} * \pi}{V_{\pi}}} \right) + i \left(e^{\frac{i * u_{mod3} * \pi}{V_{\pi}}} - e^{\frac{i * u_{mod4} * \pi}{V_{\pi}}} \right) \right) \quad (3.18)$$



Εικόνα 3.7 Ιδανικά ημιτονοειδή ηλεκτρικά σήματα οδήγησης του Four-Branch Shifter

Sophisticated Serrodyne Shifter

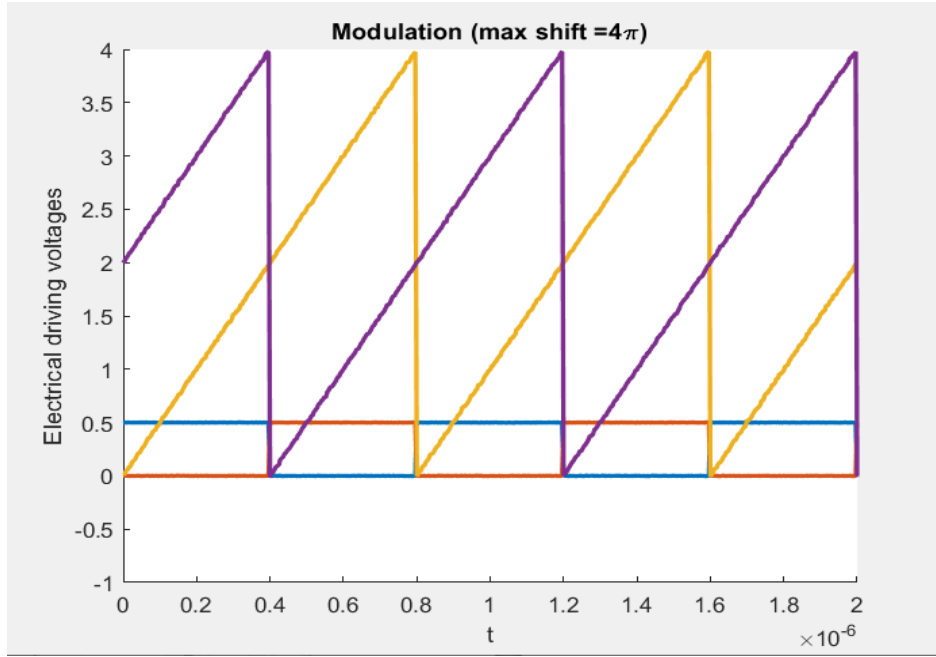
Ο *Sophisticated Serrodyne Shifter* αποτελείται από τέσσερις *phase shifters* οι οποίοι οδηγούνται από τετραγωνικά σήματα που περιγράφονται από τις εξισώσεις (3.19) και (3.20) και από δύο *phase shifters* οι οποίοι οδηγούνται από πριονωτά σήματα, σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.21) και (3.22).

$$\blacksquare u_{mod1}(t) = \frac{V_{\pi}}{4} + \frac{V_{\pi}}{4} * \text{square}\left(2\pi \frac{f_c}{2} t\right) \quad (3.19)$$

$$\blacksquare u_{mod2}(t) = \frac{V_{\pi}}{4} - \frac{V_{\pi}}{4} * \text{square}\left(2\pi \frac{f_c}{2} t\right) \quad (3.20)$$

$$\blacksquare u_{mod3}(t) = 2 * V_{\pi} * a * \left(1 + \text{sawtooth}\left(2\pi \frac{f_c}{2} t\right) \right) \quad (3.21)$$

$$\blacksquare u_{mod4}(t) = 2 * V_{\pi} * a * \left(1 + \text{sawtooth}\left(2\pi \frac{f_c}{2} t + \pi\right) \right) \quad (3.22)$$

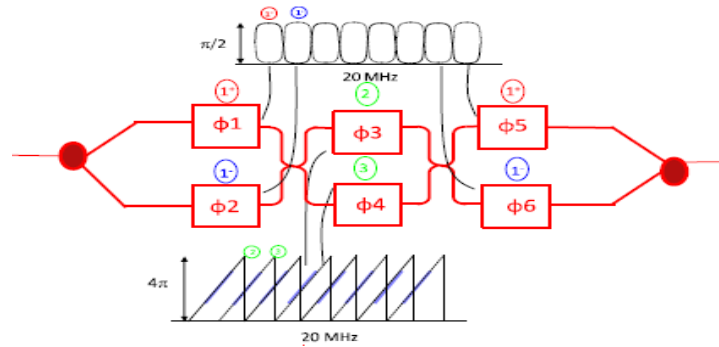


Εικόνα 3.8 Ιδανικά πριονωτά και τετραγωνικά σήματα οδήγησης του Sophisticated Serrodyne Shifter.

Το εισερχόμενο οπτικό πεδίο στο *Sophisticated Serrodyne Shifter* διαχωρίζεται από ένα οπτικό διαχωριστή (*coupler*) σε δύο οπτικά πεδία E_1 και E_2 , τα οποία διέρχονται από *phase shifters* με τετραγωνικά ηλεκτρικά σήματα οδήγησης. Συνεπώς, έχουμε τις εξισώσεις:

$$\blacksquare E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} * e^{\frac{i * u_{mod1} * \pi}{V\pi}} \quad (3.23)$$

$$\blacksquare E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} * e^{\frac{i * u_{mod2} * \pi}{V\pi}} * e^{i\frac{\pi}{2}} \quad (3.24)$$



Εικόνα 3.9: Sophisticated Serrodyne Shifter

Έπειτα, τα οπτικά σήματα E_1 και E_2 διέρχονται από ένα δεύτερο *coupler*, διαχωρίζονται και έπειτα διέρχονται ξανά από *phase shifters* που οδηγούνται από πριονωτά σήματα και αποκτούν τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\blacksquare E_3 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} * E_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} * e^{j\frac{\pi}{2}} * E_2 \right) * e^{\frac{i * u_{mod3} * \pi}{V\pi}} \quad (3.25)$$

$$\blacksquare E_4 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} * e^{j\frac{\pi}{2}} * E_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} * E_2 \right) * e^{\frac{i * u_{mod4} * \pi}{V\pi}} \quad (3.26)$$

Παρόμοια, τα οπτικά πεδία E_3 και E_4 διέρχονται με τη σειρά τους από ένα τρίτο *coupler*, διαχωρίζονται και έπειτα διέρχονται ξανά από *phase shifters* που οδηγούνται από τετραγωνικά σήματα και αποκτούν τις παρακάτω εξισώσεις;

$$\bullet E_5 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} * E_3 + \frac{1}{\sqrt{2}} * e^{j*\frac{\pi}{2}} * E_4 \right) * e^{\frac{i*u_{mod1}*\pi}{V\pi}} \quad (3.27)$$

$$\bullet E_6 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} * e^{j*\frac{\pi}{2}} * E_3 + \frac{1}{\sqrt{2}} * E_4 \right) * e^{\frac{i*u_{mod2}*\pi}{V\pi}} \quad (3.28)$$

Τέλος, τα οπτικά σήματα E_5 και E_6 επανενώνονται μέσω ενός τέταρτου *coupler* και το τελικό οπτικό σήμα που εξέρχεται από το *Sophisticated Serrodyne Shifter* αντιστοιχεί στο οπτικό πεδίο E_7 ενώ το οπτικό πεδίο E_8 παραβλέπεται.

$$\blacksquare E_7 = \frac{1}{\sqrt{2}} * E_5 + \frac{1}{\sqrt{2}} * e^{j*\frac{\pi}{2}} * E_6 = E_{mod} \quad (3.29)$$

$$\blacksquare E_8 = \frac{1}{\sqrt{2}} * e^{j*\frac{\pi}{2}} * E_5 + \frac{1}{\sqrt{2}} * E_6 \quad (3.30)$$

Σε κάθε σχήμα διαμόρφωσης μπορεί να εισαχθεί λευκός θόρυβος μέσω της σημαίας (*flag*) του θορύβου των σημάτων οδήγησης για ένα συγκεκριμένο σηματοθορυβικό λόγο, SNR_{dB} . Συγκεκριμένα, σε κάθε ένα ηλεκτρικό σήμα οδήγησης, u_{mod} , εισάγεται λευκός θόρυβος μέσω της εξίσωσης:

$$\begin{aligned} u_{mod} &= u_{mod} + \sqrt{P_{noise}} * randn(size(t)) \rightarrow \\ u_{mod} &= u_{mod} + \sqrt{\frac{P_{umod}}{SNR}} * randn(size(t)) \rightarrow \\ u_{mod} &= u_{mod} + \sqrt{10^{-0.1*SNR_{dB}} * mean(u_{mod} * \overline{u_{mod}})} * randn(size(t)) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Επιπροσθέτως, ο περιορισμός του εύρους ζώνης των *phase shifters* (PZTs) σε κάθε σχήμα διαμόρφωσης εισάγεται μέσω της αντίστοιχης σημαίας (*flag*) και των εντολών *filter* και *circshift*. Μετά τη αλλαγή φάσης της οπτικής δέσμης μέτρησης, ο κώδικας υλοποιεί τις λειτουργίες της συμβολής και της φωτοανίχνευσης.

Η δέσμης μέτρησης που πρόκειται για το οπτικό σήμα που ανακλάται από τη δονούμενη επιφάνεια εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$E_{mes} = \frac{1}{AF} * E_{mod} * e^{i(2\pi f_0 t + 2ks)} \quad (3.32)$$

Και η δέσμη αναφοράς: $E_{ref} = e^{i(2\pi f_0 t)}$ (3.33)

Η δέσμη μέτρησης και η δέσμη αναφοράς διέρχονται από έναν οπτικό συζεύκτη και κατά την έξοδο τους κατευθύνονται προς μία φωτοδίοδο για να μετατραπούν σε ηλεκτρικά σήματα.

Επομένως, τα οπτικά σήματα στην έξοδο του συζεύκτη είναι:

$$\blacksquare E_{out1} = \frac{1}{\sqrt{2}} * E_{mes} + \frac{1}{\sqrt{2}} * e^{i*\frac{\pi}{2}} * E_{ref} \quad (3.34)$$

$$\blacksquare E_{out2} = \frac{1}{\sqrt{2}} * e^{i\frac{\pi}{2}} * E_{mes} + \frac{1}{\sqrt{2}} * E_{ref} \quad (3.35)$$

Η οπτική ισχύς σε κάθε έξοδο του συζεύκτη είναι:

$$P_{out1} = E_{out1} * \overline{E}_{out1} \quad (3.36)$$

$$P_{out2} = E_{out2} * \overline{E}_{out2} \quad (3.37)$$

Το ρεύμα σε κάθε φωτοδίοδο αντίστοιχα δίνεται από:

$$I_1 = R * P_{out1} \quad (3.38)$$

$$I_2 = R * P_{out2} \quad (3.39)$$

Εάν έχουμε επιλέξει στο σύστημα του LDV να υπάρχει θόρυβος στη φωτοδίοδο, προσθέτουμε ένα λευκό θόρυβο σε κάθε ρεύμα ως εξής:

$$I_1 = I_1 + \sqrt{10^{-\frac{SNRdB}{10}} * mean(I_1 * \overline{I}_1)} * randn(size(t)) \quad (3.40)$$

$$I_2 = I_2 + \sqrt{10^{-\frac{SNRdB}{10}} * mean(I_2 * \overline{I}_2)} * randn(size(t)) \quad (3.41)$$

Κατά την ανίχνευση προκύπτει ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μετά τη φωτοανίχνευση ισούται με την ευρυζωνική διαφορά σημάτων δύο φωτοδίοδων, $I_{PD} = I_1 - I_2$ και η αντίστοιχη τάση ισούται με $u_{PD} = R_L * I_{PD}$. Έπειτα, κατά τη IQ αποδιαμόρφωση, το τετραγωνικό ζεύγος σημάτων I & Q δημιουργείται αριθμητικά από έναν αναλογικό τετραγωνικό αποδιαμορφωτή ο οποίος χρησιμοποιεί έναν ηλεκτρικό τοπικό ταλαντωτή με εξίσωση:

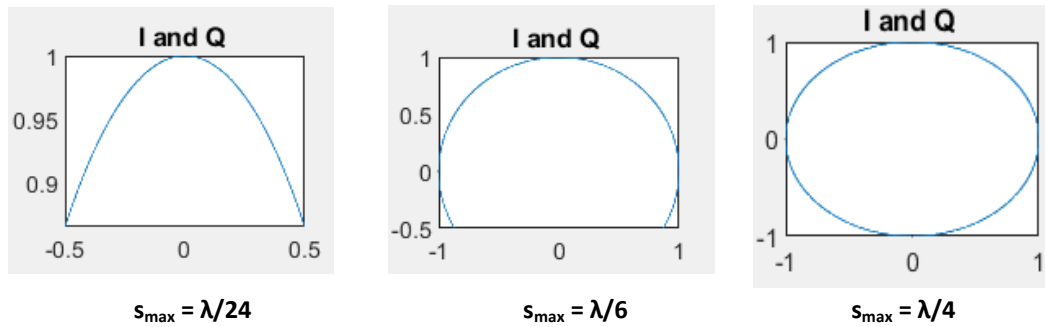
$$u_{LO} = e^{i(2\pi f_c t)} \quad (3.42)$$

Συνεπώς, το *In-phase* και το *Quadrature* στοιχείο περιγράφονται από τις εξισώσεις:

$$u_I = u_{PD} * real(u_{LO}) \quad (3.43)$$

$$u_Q = -u_{PD} * imag(u_{LO}) \quad (3.44)$$

Στη συνέχεια, μετατρέπουμε τα u_I και u_Q στοιχεία μέσω του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων με κέντρο συχνοτήτων γύρω από το 0. Με τη βοήθεια ενός βαθυπερατού φίλτρου με συχνότητα αποκοπής ίση με f_c , επιτρέπουμε τη διέλευση ορισμένων συχνοτήτων. Μέσω του Αντίστροφου Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier τα στοιχεία u_I και u_Q εκφράζονται ξανά στο πεδίο του χρόνου για την ανάκτηση της πληροφορίας της φάσης και της μετατόπισης.



Εικόνα 3.10 Μοναδιαίοι κύκλοι του μιγαδικού αριθμού $z = u_I + i * u_Q$ για διαφορετικές τιμές s_{max} .

Υπολογισμός Φάσης

Η φάση της δονούμενης επιφάνειας προσδιορίζεται μέσω της μιγαδικής ποσότητας:

$$z = u_I + i * u_Q \quad (3.45)$$

Μέσω της εντολής $angle(z)$ επιστρέφεται η φάση στο διάστημα $[-\pi, \pi]$ σε rad για κάθε στοιχείο του μιγαδικού διανύσματος z . Έπειτα, με την εντολή $unwrap$ όταν η διαφορά μεταξύ διαδοχικών γωνιών είναι μεγαλύτερη ή ίση με π rad, η εντολή αυτή μετατοπίζει τις γωνίες προσθέτοντας πολλαπλάσια των $\pm 2\pi$ rad μέχρι η διαφορά τους να γίνει μικρότερη από π rad. Αναλυτικότερα, η φάση υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις;

$$\varphi_1 = unwrap(angle(z)) - \frac{\pi}{2} \quad (3.46)$$

$$\varphi = \varphi_1 - mean(\varphi_1) \quad (3.47)$$

Όπου η εντολή $mean$ εκφράζει τη μέση τιμή των στοιχείων του διανύσματος φ_1 .

Υπολογισμός μετατόπισης

Η πληροφορία της μετατόπισης της δονούμενης επιφάνειας εξάγεται από την σχέση:

$$s_{calc} = \frac{\lambda}{4 * \pi * n} * \varphi \quad (3.48)$$

Η αξιολόγηση του υπολογισμού της μετατόπισης γίνεται μέσω της μετρικής της απόκλισης ως ποσοστό της μέγιστης μετατόπισης s .

$$dev = \frac{mean(|s_{calc} - s|)}{\max(s) - \min(s)} \quad (3.49)$$

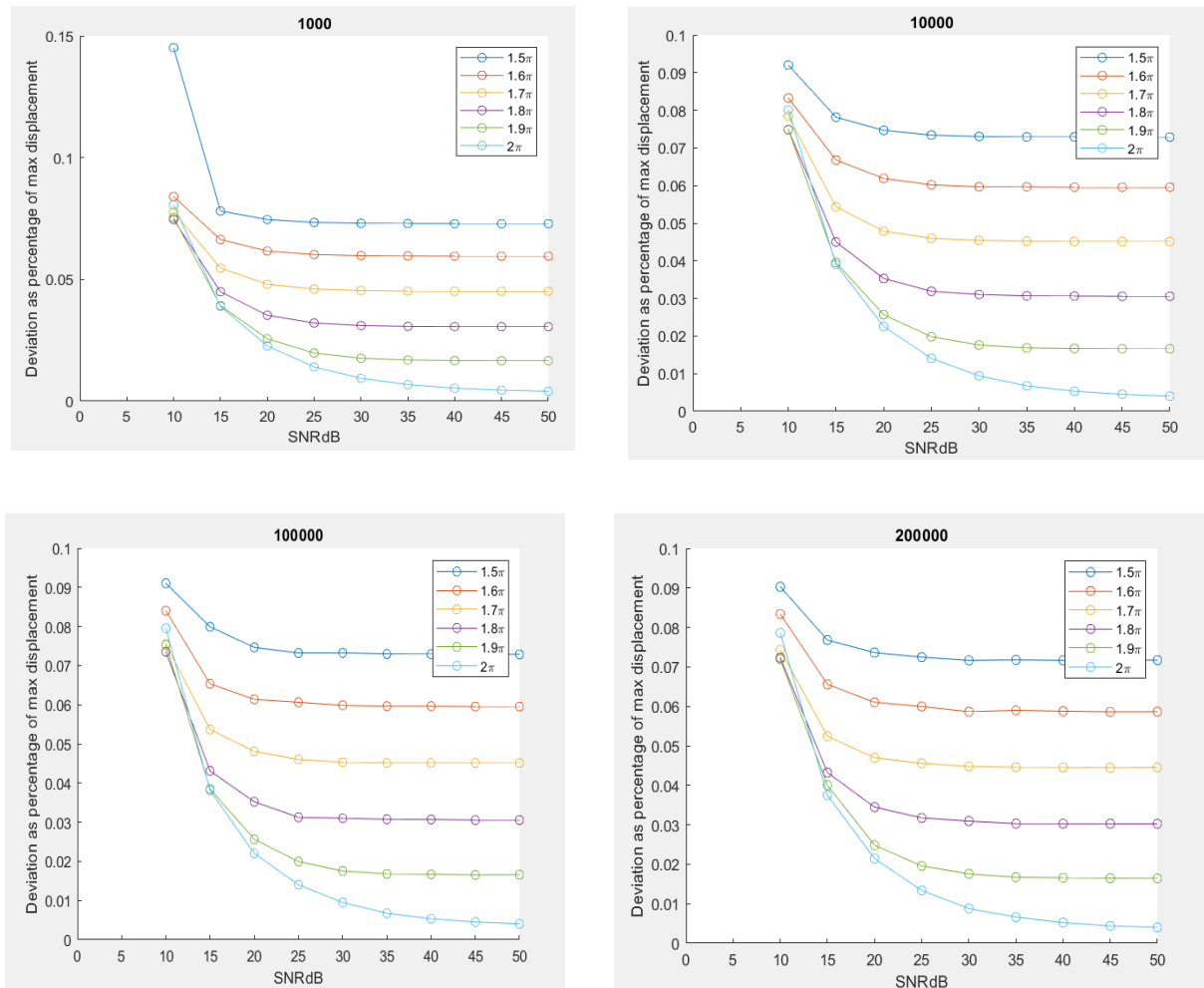
Όπου s η μετατόπιση της δονούμενης επιφάνειας με εξίσωση: $s = s_{max} * \cos(2\pi f_{vib} t)$.

3.3.2 Προσομοιωτική μελέτη σχημάτων διαμόρφωσης

- Αρχικά, εξετάζουμε την περίπτωση όπου δεν έχει εισαχθεί περιορισμός του εύρους ζώνης των PZTs στο σύστημα του LDV.

Έχοντας επιλέξει κεντρική συχνότητα φέροντος, $f_c = 2.5$ MHz και μέγιστη μετατόπιση δονούμενης επιφάνειας $s_{max} = \lambda/10$, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα της απόκλισης (άξονας y) σε σχέση με το σηματοθορυβικό λόγο των σημάτων οδήγησης σε dB (άξονας x) για κάθε στοιχείο του διανύσματος των παραγόντων πλάτους (amplitude factors) και για κάθε σχήμα διαμόρφωσης σε συχνότητες δόνησης $f_{vib} = 1$ kHz, 10kHz, 100kHz και 200kHz.

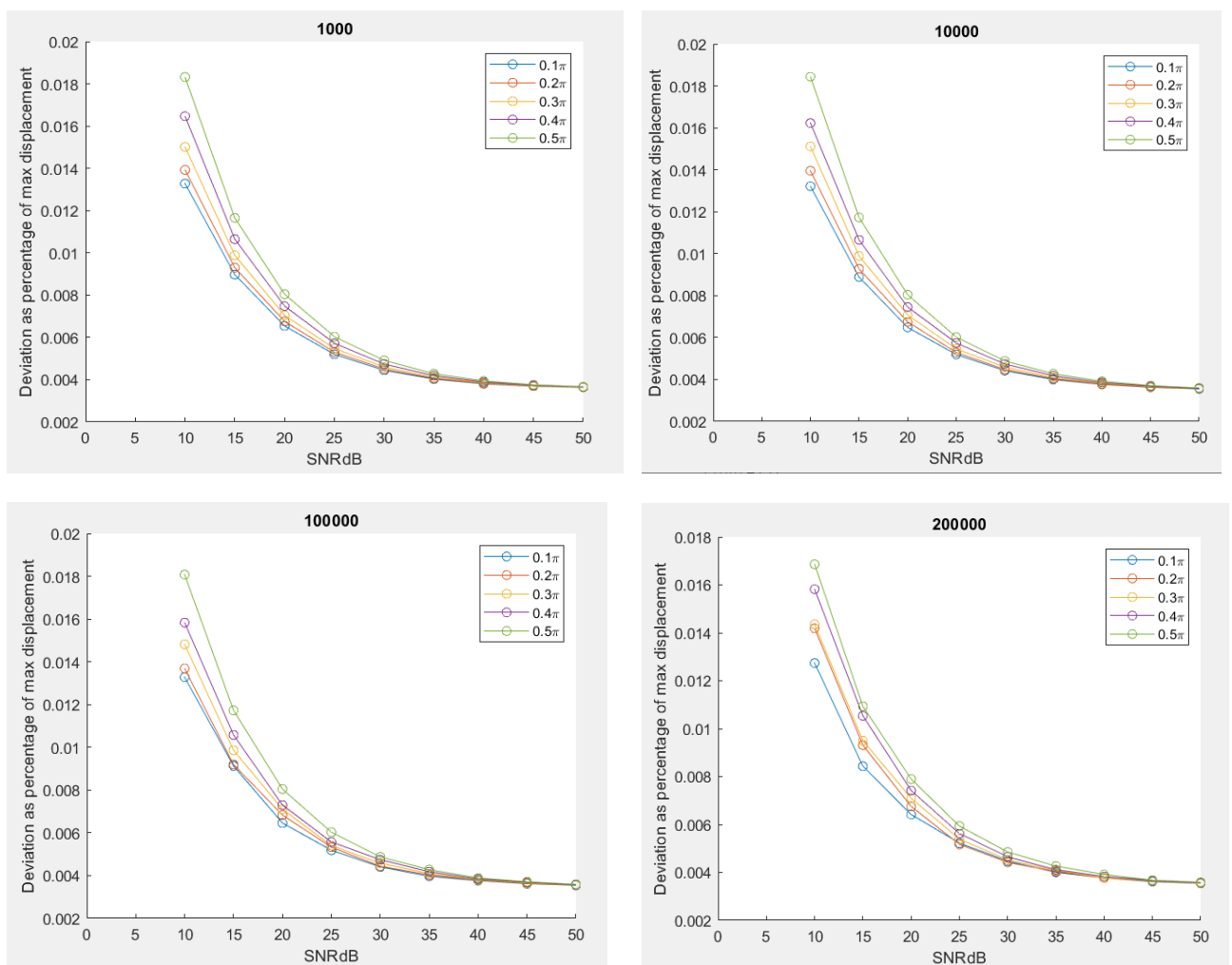
Simple Serrodyne Shifter



Εικόνα 3.11 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές συχνότητες δόνησης

Τα παραπάνω διαγράμματα αντιστοιχούν στην απόκλιση (*deviation*) ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές συχνότητες δόνησης. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε πλάτη μικρότερα των 2π (μη ιδανικό πριονωτό σήμα) αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες αποκλίσεις. Για μεγαλύτερες τιμές σηματοθορυβικού λόγου δηλαδή εκεί που ο θόρυβος του σήματος είναι μικρότερος, οι καμπύλες αντιστοιχούν σε μικρότερες τιμές απόκλισης ενώ όταν ο σηματοθορυβικός λόγος είναι μικρός, δηλαδή υπερισχύει ο θόρυβος των σημάτων οδήγησης, παρουσιάζουν πολύ μεγάλη απόκλιση. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στο μικρότερο πλάτος (1.5π) παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές απόκλισης σε κάθε συχνότητα δόνησης.

Four-Branch Shifter

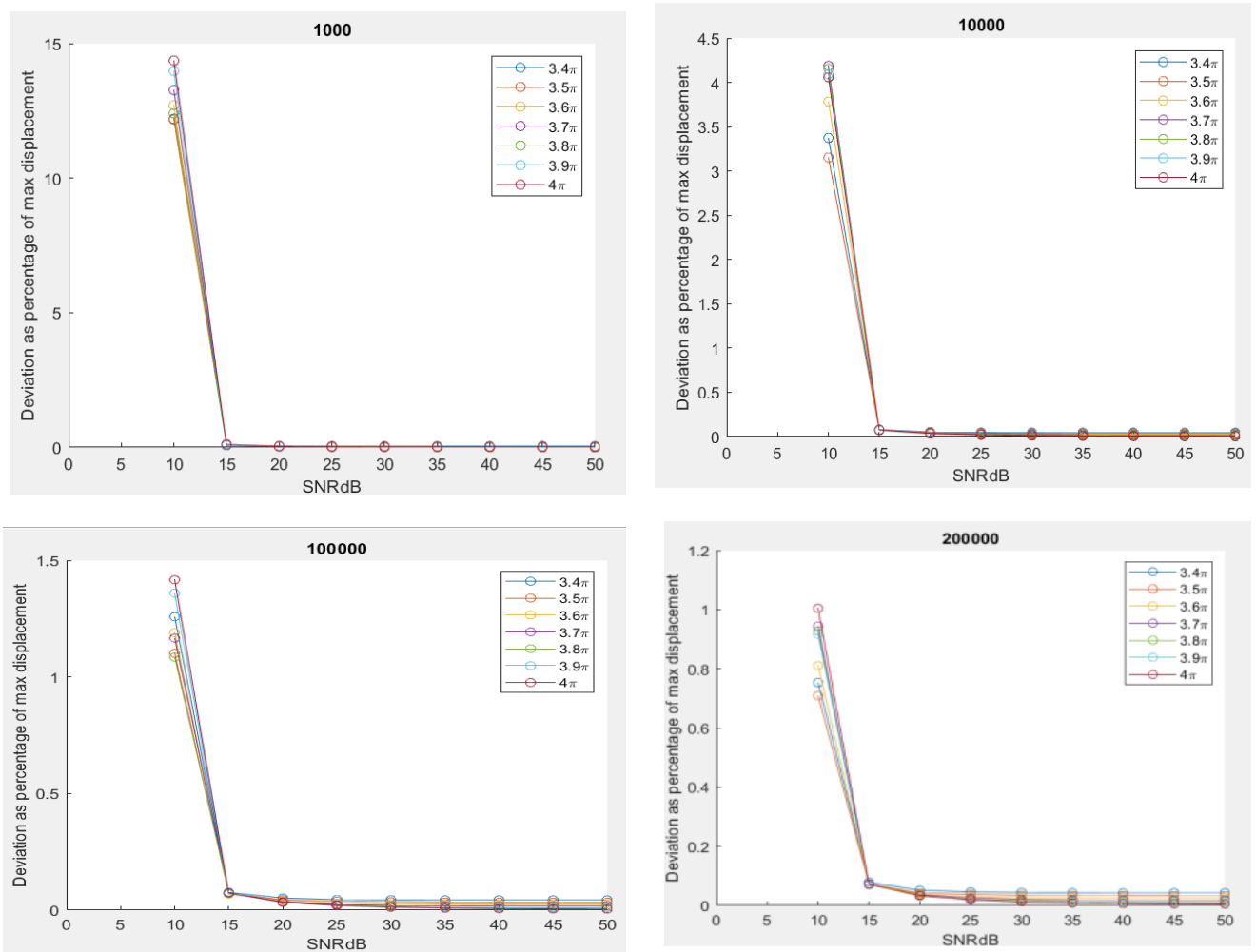


Εικόνα 3.12 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές συχνότητες δόνησης

Παρατηρείται ότι όταν ο *Four-Branch Shifter* οδηγείται από μη ιδανικά ημιτονοειδή σήματα (καμπύλες που αντιστοιχούν σε πλάτη μικρότερα των $\frac{\pi}{2}$) παρουσιάζουν μικρότερες τιμές

απόκλισης από την ιδανική. Τα μη ιδανικά σήματα οδήγησης επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό το σύστημα από την περίπτωση του *Simple Serrodyne Shifter*. Για μικρές τιμές του σηματοθορυβικού λόγου, δηλαδή όταν υπερισχύει ο θόρυβος των σημάτων οδήγησης, οι καμπύλες παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές απόκλισης ενώ για τιμές σηματοθορυβικού λόγου $SNR_{dB} > 35$, ταυίζονται και η απόκλιση είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Σε αυτό το σχήμα διαμόρφωσης οι καμπύλες αντιστοιχούν γενικά σε πολύ μικρότερες τιμές απόκλισης από τα υπόλοιπα σχήματα.

Sophisticated Serrodyne Shifter

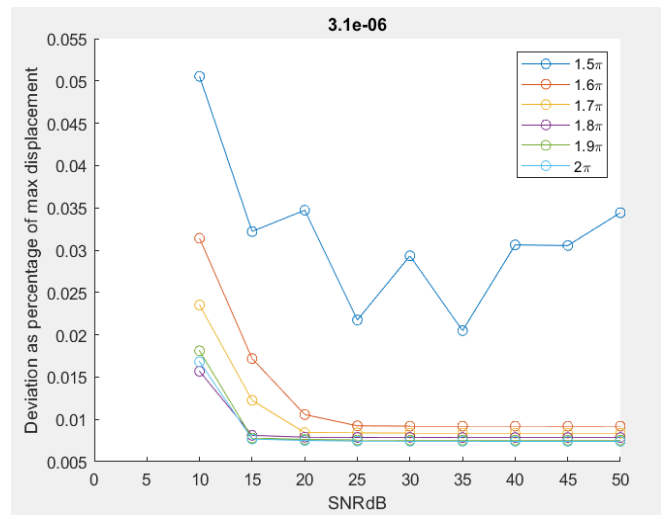
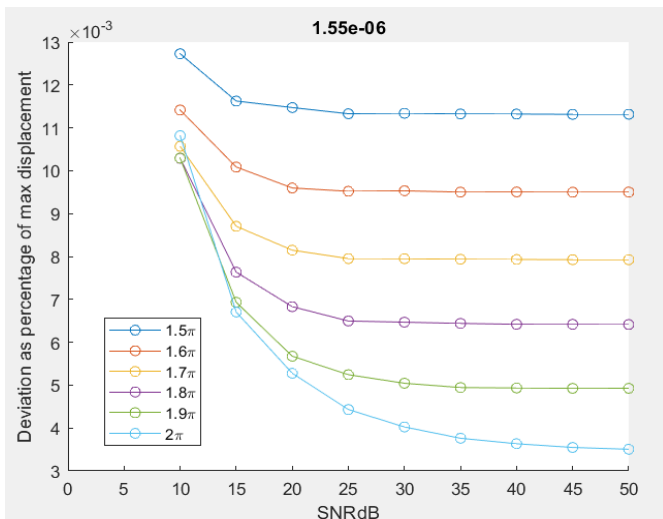
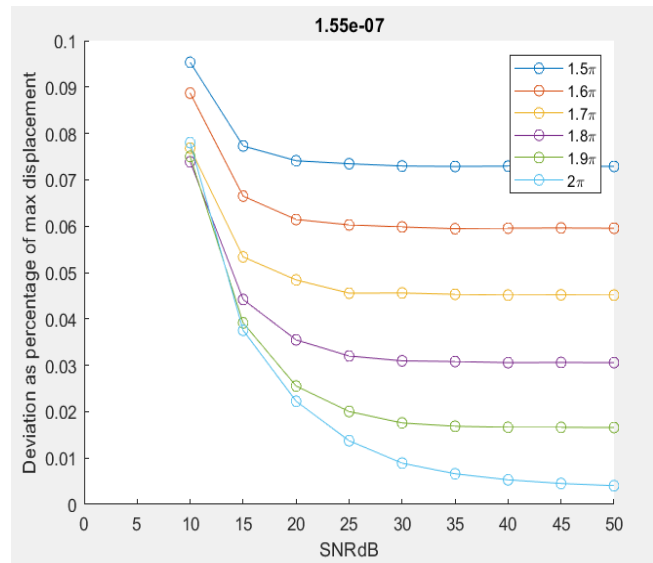
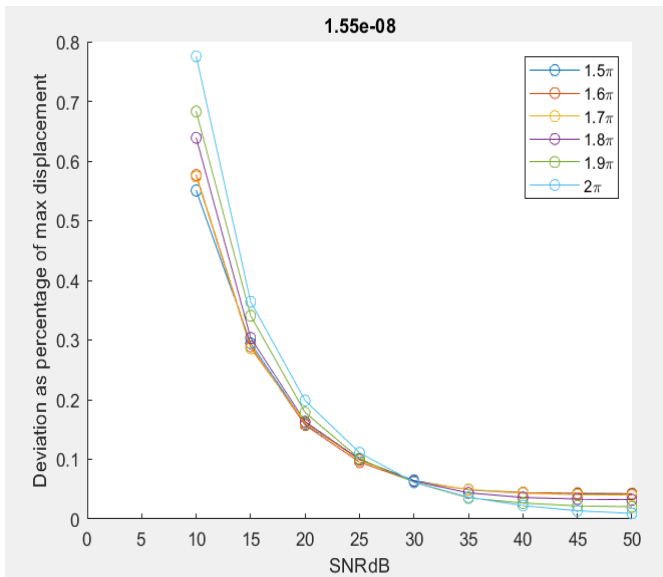


Εικόνα 3.13 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές συχνότητες δόνησης

Από τα παραπάνω διαγράμματα για το *Sophisticated Serrodyne Shifter* παρατηρείται ότι για σηματοθορυβικό λόγο $SNR_{dB} < 15$ η απόκλιση είναι πολύ μεγάλη ενώ για $SNR_{dB} > 15$ η απόκλιση είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Επιπλέον, για μικρότερες συχνότητες δόνησης παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές απόκλισης.

Έχοντας επιλέξει συχνότητα δόνησης, $f_{\text{vib}} = 100\text{kHz}$ και κεντρική συχνότητα φέροντος, $f_c = 2.5\text{ MHz}$ προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα της απόκλισης (άξονας y) σε σχέση με το σηματοθορυβικό λόγο των σημάτων οδήγησης σε dB (άξονας x) για κάθε στοιχείο του διανύσματος των παραγόντων πλάτους (amplitude factors) και για κάθε σχήμα διαμόρφωσης σε μέγιστες μετατοπίσεις, $s_{\text{max}} = \lambda/100, \lambda/10, \lambda, 2\lambda$.

Simple Serrodyne Shifter

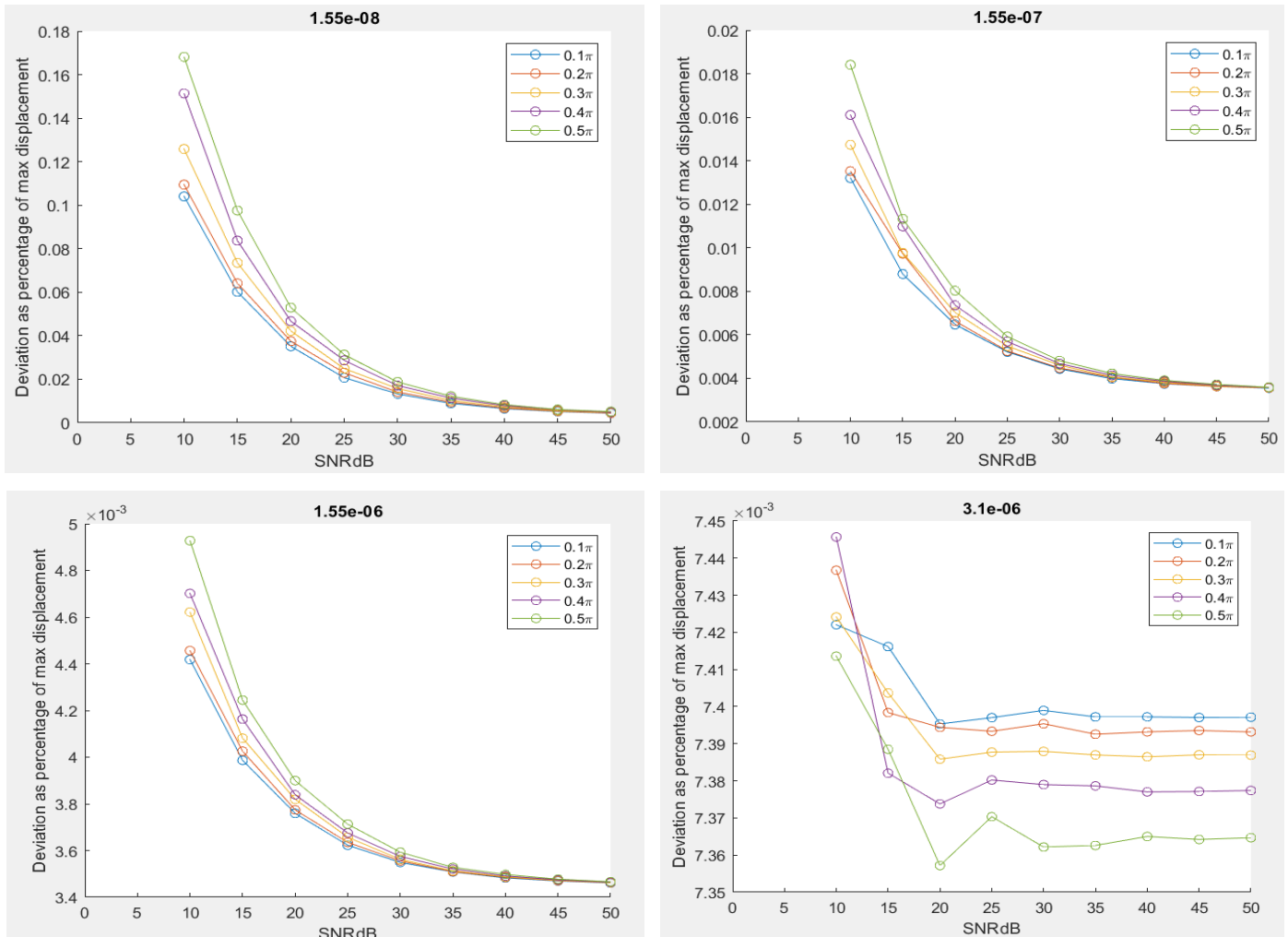


Εικόνα 3.14 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές μέγιστες μετατοπίσεις της δονούμενης επιφάνειας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, σε μεγαλύτερες μέγιστες μετατοπίσεις της δονούμενης επιφάνειας παρατηρούνται μικρότερες τιμές αποκλίσεων. Οι καμπύλες που

αντιστοιχούν σε πλάτη μικρότερα των 2π δηλαδή σε μη ιδανικά σήματα οδήγησης αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες αποκλίσεις από την ιδανική (2π).

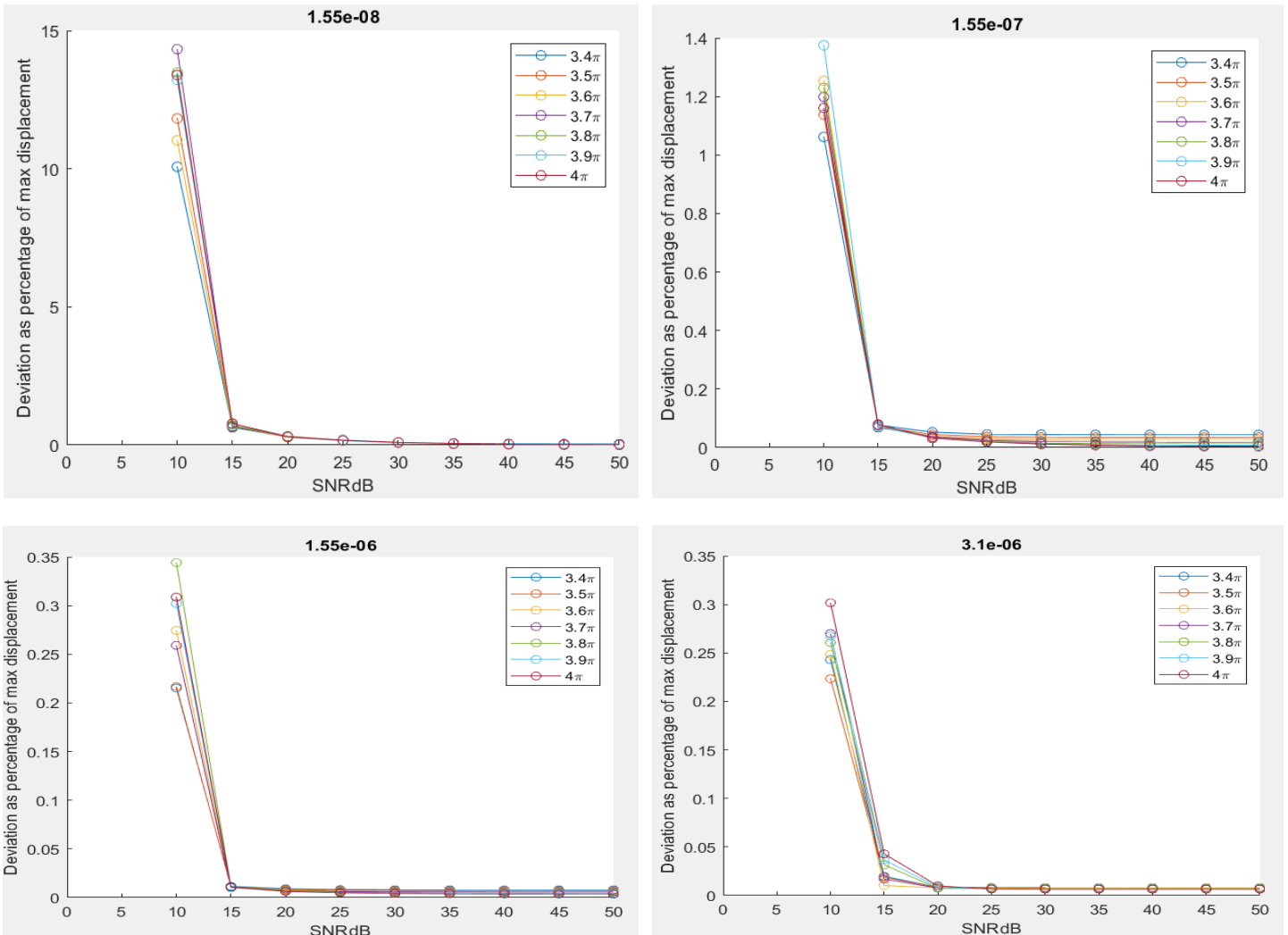
Four-Branch Shifter



Εικόνα 3.15 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθρομβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές μέγιστες μετατοπίσεις της δονούμενης επιφάνειας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, σε μεγαλύτερες μέγιστες μετατοπίσεις της δονούμενης επιφάνειας παρατηρούνται μικρότερες τιμές αποκλίσεων. Οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε πλάτη μικρότερα των $\frac{\pi}{2}$ δηλαδή σε μη ιδανικά σήματα οδήγησης, χαρακτηρίζονται ξανά από χαμηλότερες αποκλίσεις από της ιδανικής εκτός από το διάγραμμα για $s_{max} = 2\lambda$. Επιπλέον, όσο αυξάνεται ο σηματοθρομβικός λόγος των αποκλίσεων μειώνεται η απόκλιση.

Sophisticated Serrodyne Shifter



Εικόνα 3.16 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθροβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές μέγιστες μετατόψεις της δονούμενης επιφάνειας.

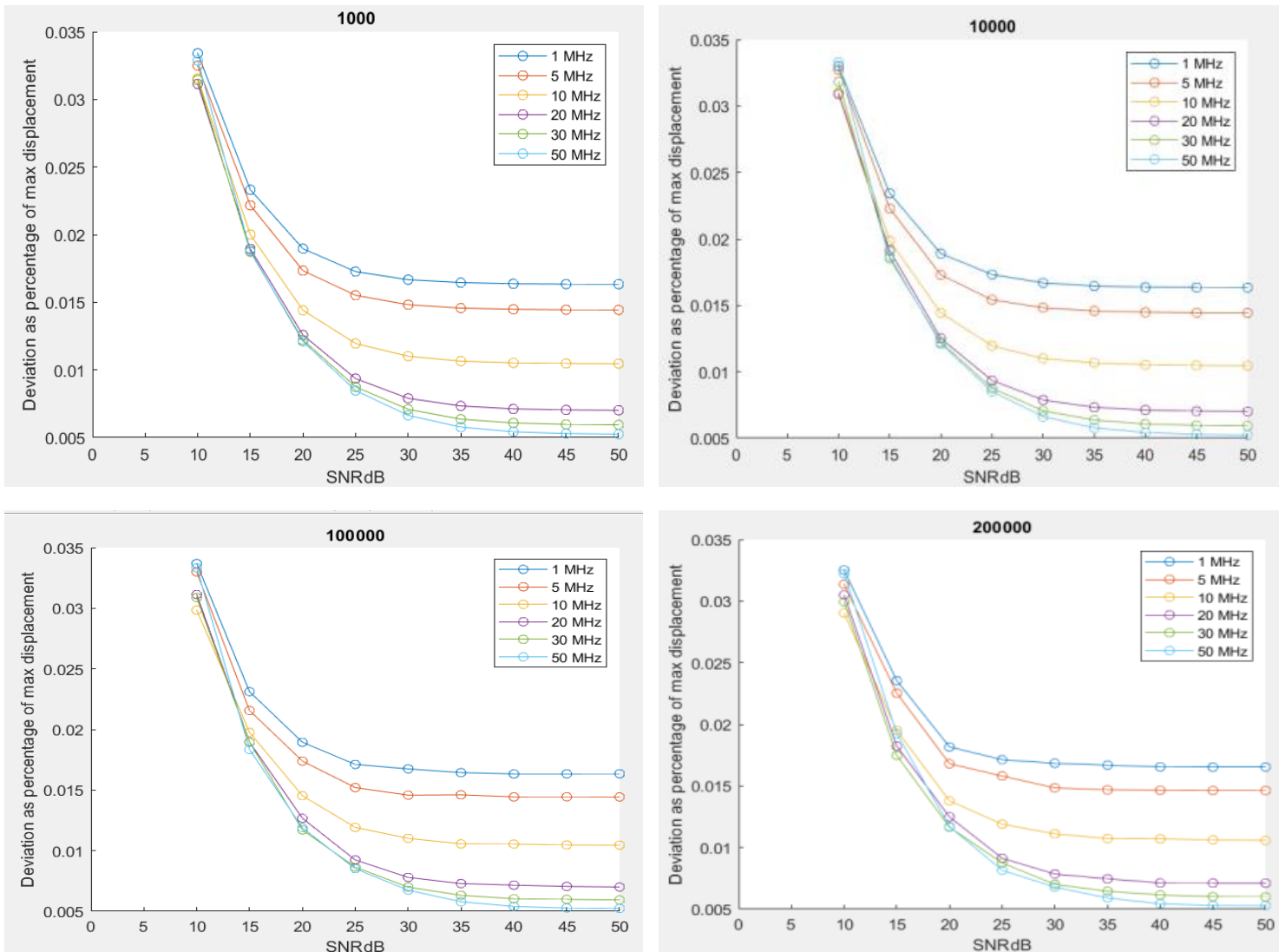
Από τα παραπάνω διαγράμματα για το *Sophisticated Serrodyne Shifter* παρατηρείται ότι για σηματοθροβικό λόγο SNRdB < 15 η απόκλιση είναι πολύ μεγάλη ενώ για SNRdB > 15 η απόκλιση είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε διαφορετικά πλάτη συμφωνούν μεταξύ τους και σε μεγαλύτερες τιμές μέγιστης μετατόπισης της δονούμενης επιφάνειας παρατηρούνται μικρότερες τιμές αποκλίσεων.

- Παρόμοια, στην περίπτωση που έχει εισαχθεί περιορισμός του εύρους ζώνης των PZTs στο σύστημα του LDV έχουμε τα εξής αποτελέσματα.

Έχοντας επιλέξει κεντρική συχνότητα φέροντος $f_c = 2.5 \text{ MHz}$ και μέγιστη μετατόπιση δονούμενης επιφάνειας, $s_{\max} = \lambda/10$, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα της

απόκλισης (άξονας y) σε σχέση με το σηματοθροβικό λόγο των σημάτων οδήγησης σε dB (άξονας x) για όλους τους παράγοντες πλάτους και για κάθε σχήμα διαμόρφωσης σε συχνότητες δόνησης $f_{\text{vib}} = 1\text{kHz}, 10\text{kHz}, 100\text{kHz}$ και 200kHz .

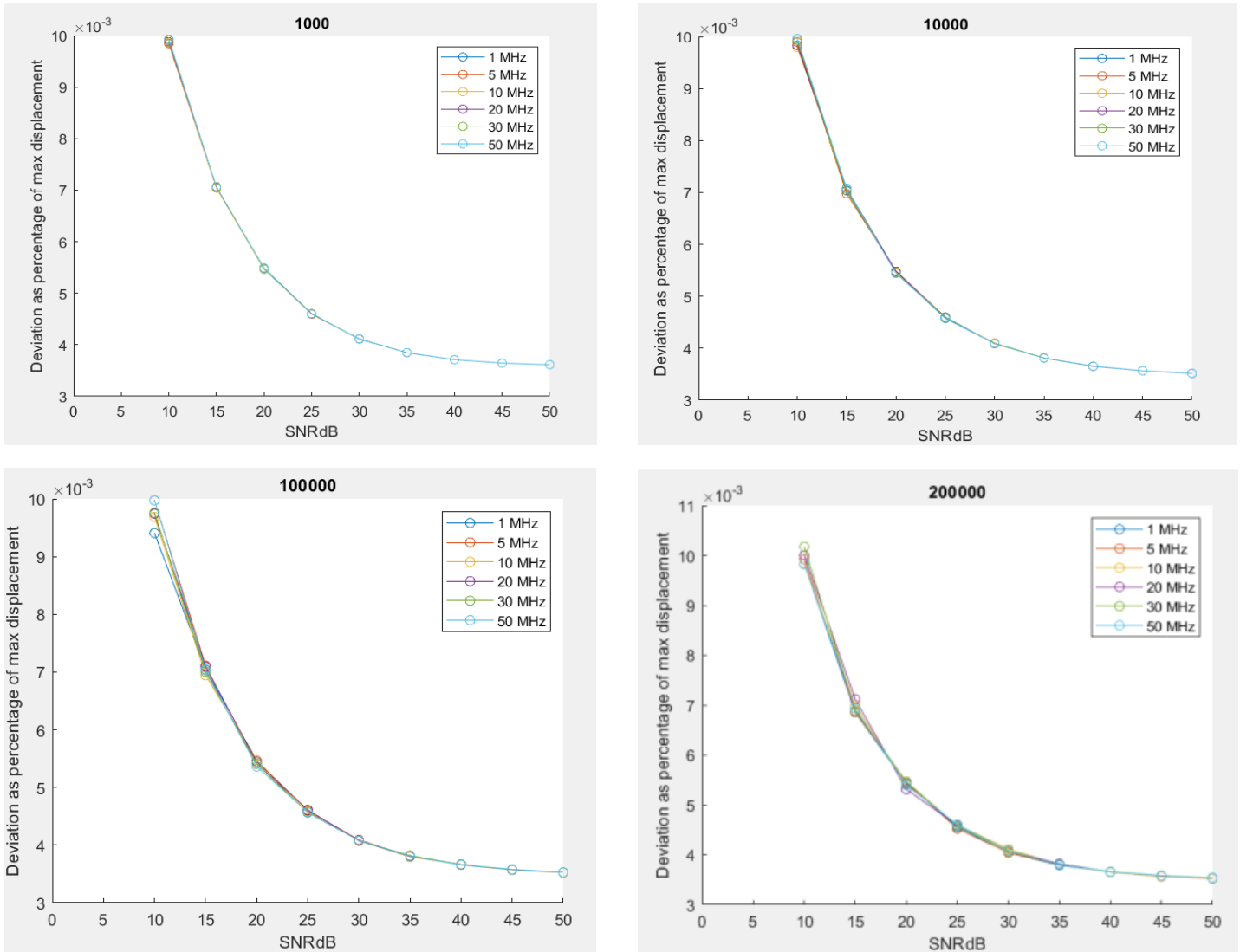
Simple Serrodyne Shifter



Εικόνα 3.17 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθροβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές συχνότητες δόνησης

Σε αυτή τη περίπτωση, η χρήση φίλτρων για περιορισμό του εύρους ζώνης των PZTs μειώνει την απόκλιση αλλά δεν εμφανίζει μεγάλη βελτίωση του συστήματος. Συγκριμένα, όταν ο σηματοθροβικός λόγος είναι μικρός, δηλαδή υπερισχύει ο θόρυβος των σημάτων οδήγησης, οι καμπύλες παρουσιάζουν πολύ μεγάλη απόκλιση. Αντίθετα, για μεγαλύτερες τιμές σηματοθροβικού λόγου η ιδανική καμπύλη έχει σχεδόν μηδενική απόκλιση ενώ οι μη ιδανικές καμπύλες (δηλαδή αυτές που αντιστοιχούν σε εύρος ζώνης μικρότερου των 50 MHz) αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες αποκλίσεις όσο μικρότερο εύρος ζώνης έχουν.

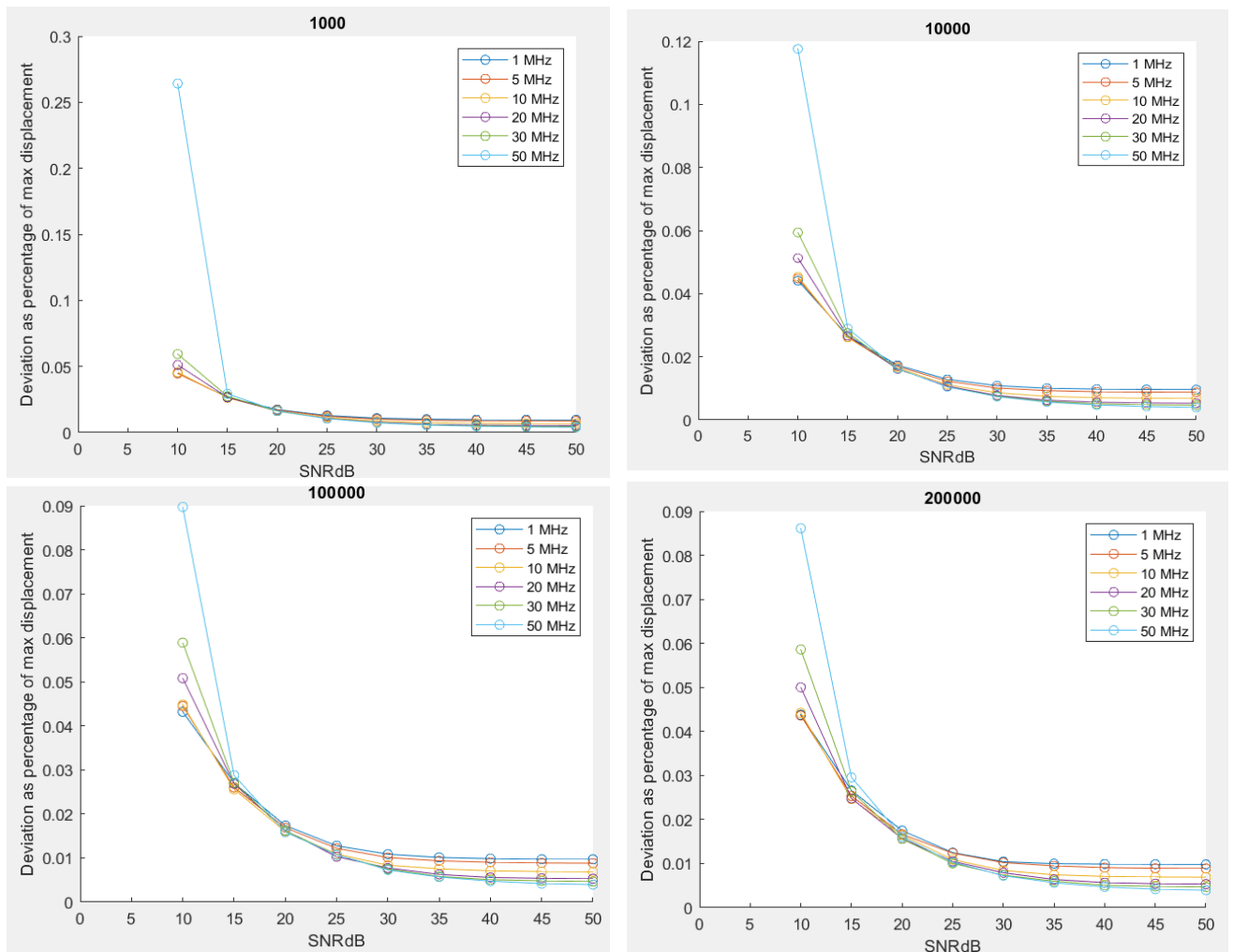
Four-Branch Shifter



Εικόνα 3.18 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές συχνότητες δόνησης

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του *Four-Branch Shifter* με χρήση φίλτρων για περιορισμό του εύρους ζώνης των PZTs στο σύστημα του LDV οι τιμές της απόκλισης για κάθε συχνότητα δόνησης είναι μικρές και οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε διαφορετικά εύρη ζώνης ταυτίζονται μεταξύ τους. Συνεπώς, ο θόρυβος των σημάτων οδήγησης δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το σύστημα.

Sophisticated Serrodyne Shifter

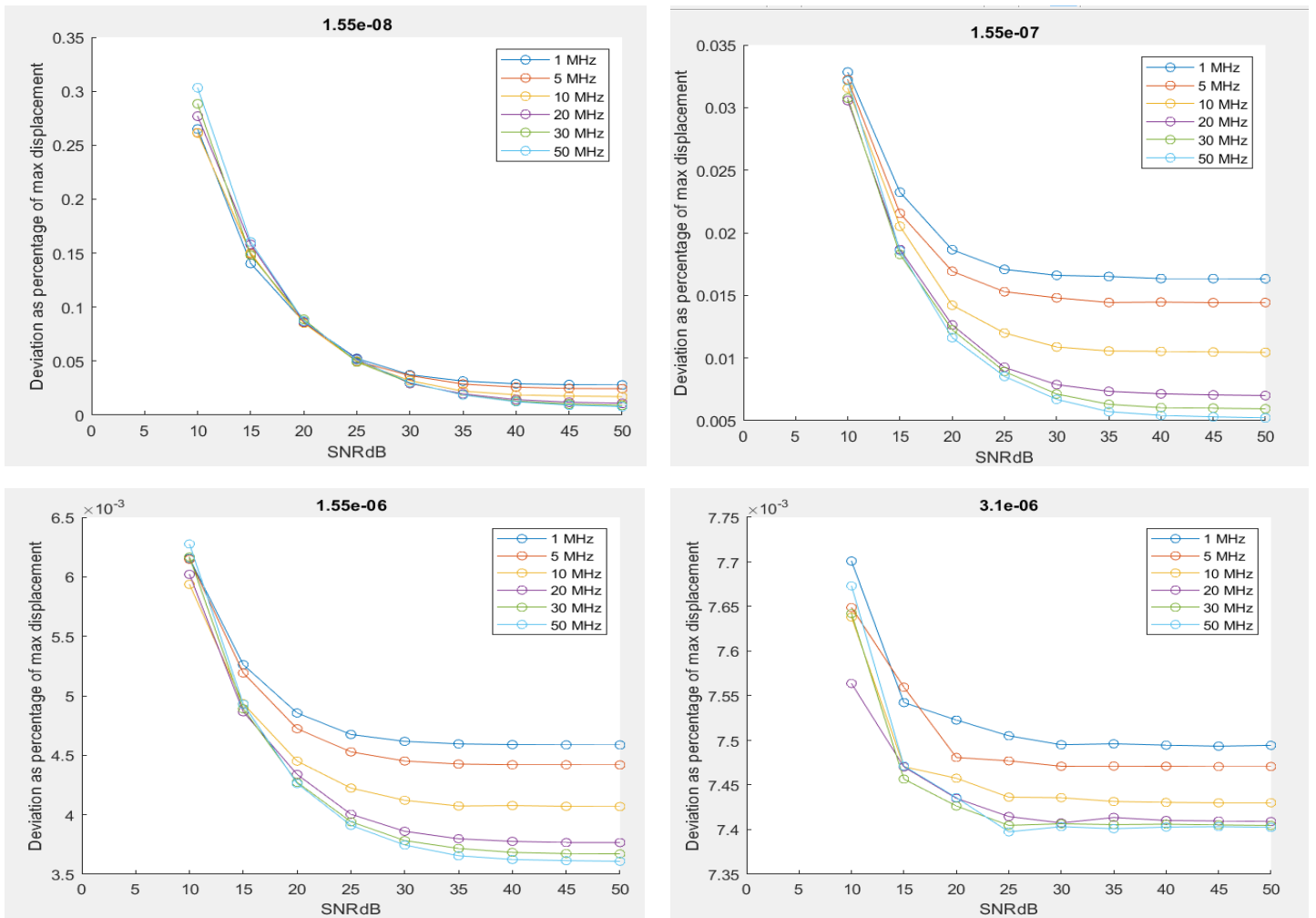


Εικόνα 3.19 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές συχνότητες δόνησης

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, η χρήση φίλτρων για περιορισμό του εύρους ζώνης των PZTs στο σύστημα του LDV μειώνει σημαντικά τις τιμές της απόκλισης για κάθε τιμή του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι για σηματοθορυβικό λόγο $SNR_{dB} < 15$ η απόκλιση είναι μεγαλύτερη ενώ για $SNR_{dB} > 15$ η απόκλιση είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Όσο μικρότερο το εύρος ζώνης έχουμε καμπύλες που αντιστοιχούν σε μικρότερες αποκλίσεις.

Έχοντας επιλέξει συχνότητα δόνησης, $f_{vib} = 100kHz$ και κεντρική συχνότητα φέροντος, $f_c = 2.5 MHz$ προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα της απόκλισης (άξονας y) σε σχέση με το σηματοθορυβικό λόγο των σημάτων οδήγησης σε dB (άξονας x) για κάθε στοιχείο του διανύσματος των παραγόντων πλάτους (amplitude factors) και για κάθε σχήμα διαμόρφωσης σε μέγιστες μετατοπίσεις, $s_{max} = \lambda/100, \lambda/10, \lambda, 2\lambda$.

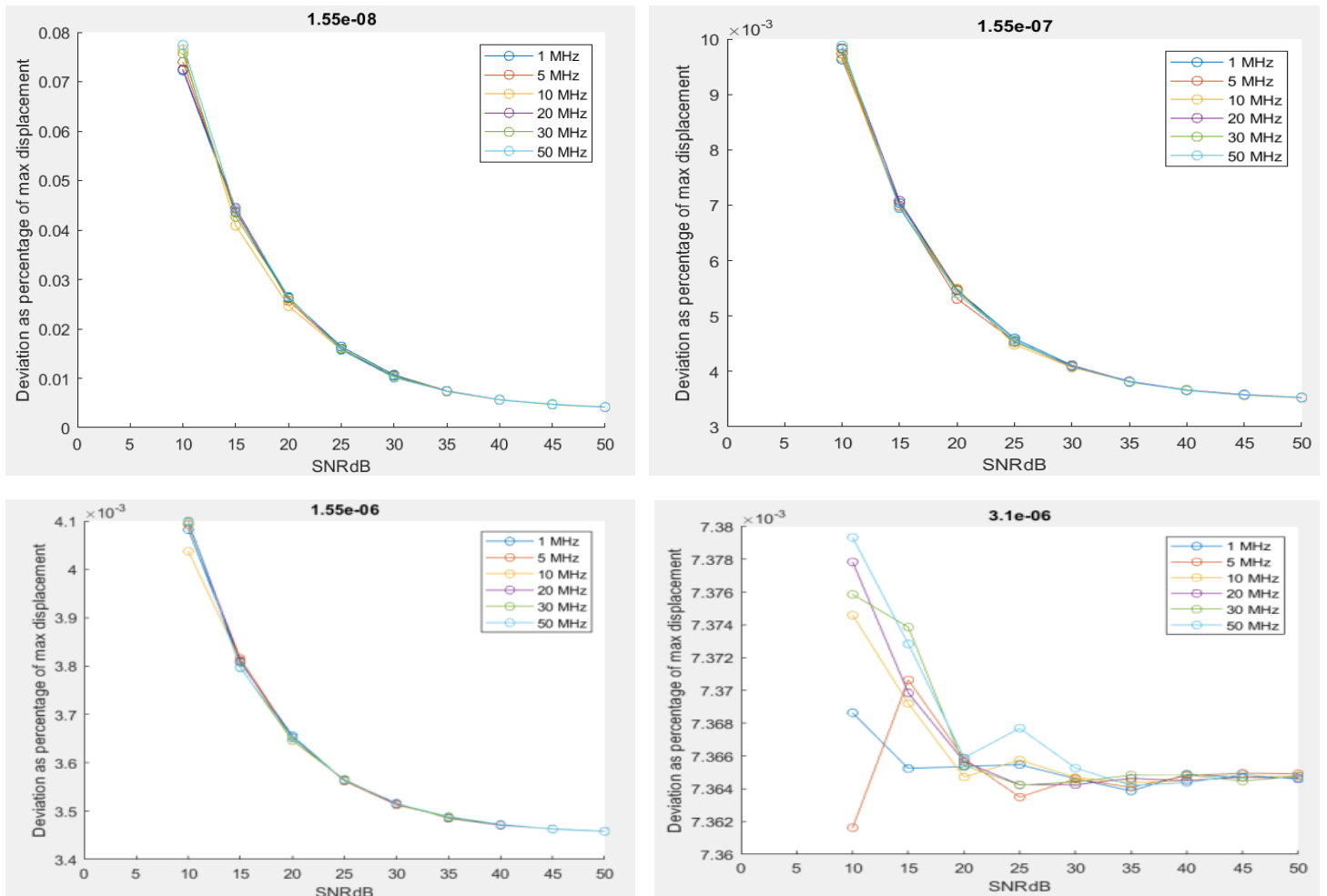
Simple Serrodyne Shifter



Εικόνα 3.20 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθρομβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές μέγιστες μετατοπίσεις της δονούμενης επιφάνειας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, η χρήση φίλτρων για περιορισμό του εύρους ζώνης των PZTs μειώνει σημαντικά τις τιμές της απόκλισης για κάθε τιμή της μέγιστης μετατόπισης, s_{max} . Οι μη ιδανικές καμπύλες όσο μικρότερο εύρος ζώνης έχουν τόσο μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζουν από την ιδανική με την αύξηση του σηματοθρομβικού λόγου.

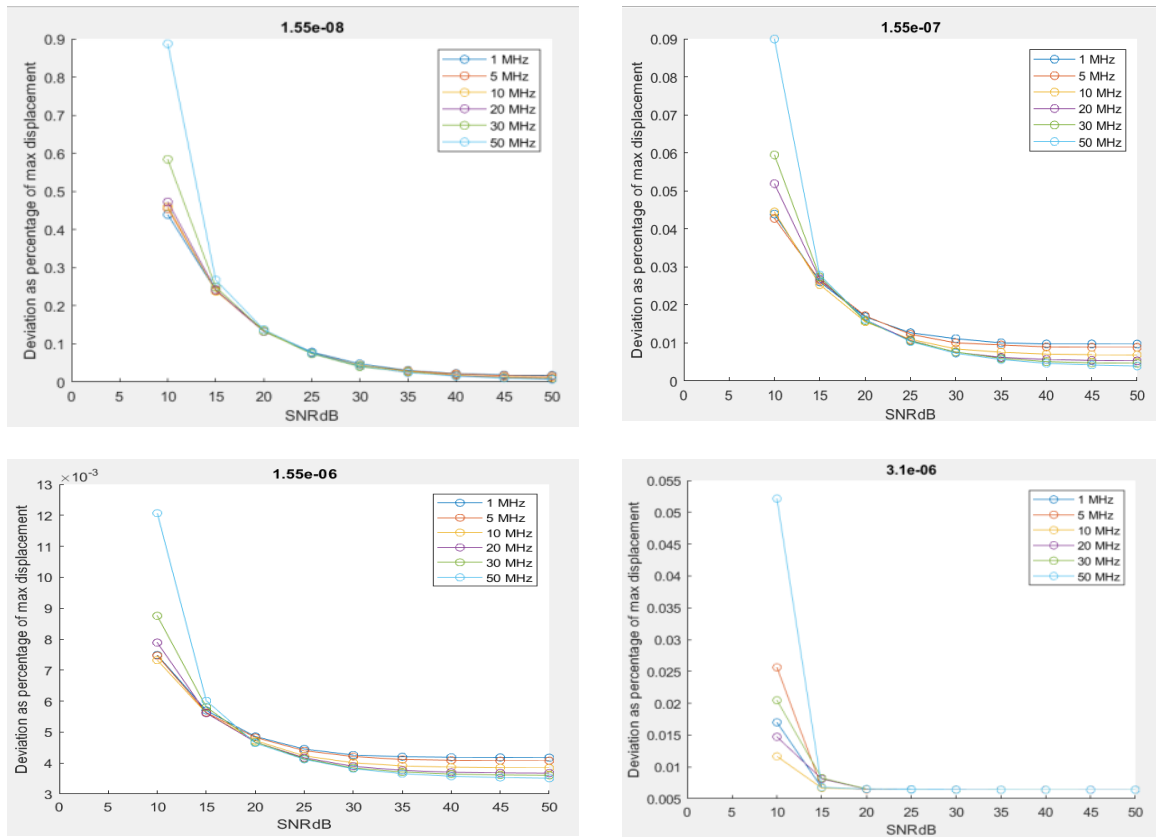
Four-Branch Shifter



Εικόνα 3.21 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές μέγιστες μετατοπίσεις της δονούμενης επιφάνειας.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του *Four-Branch Shifter* με χρήση φίλτρων για περιορισμό του εύρους ζώνης των PZTs, οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε διαφορετικά εύρη ζώνης ταυτίζονται μεταξύ τους σε κάθε διαφορετική τιμή μέγιστης μετατόπισης, s_{\max} εκτός από την περίπτωση $s_{\max} = 2\lambda$ που οι μη ιδανικές καμπύλες έχουν μεγαλύτερες αποκλίσεις από την ιδανική για σηματοθορυβικό λόγο σημάτων οδήγησης $\text{SNRdB} < 20 \text{ dB}$.

Sophisticated Serrodyne Shifter



Εικόνα 3.22 Διαγράμματα της απόκλισης ως συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου των σημάτων οδήγησης για διαφορετικές μέγιστες μετατοπίσεις της δονούμενης επιφάνειας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε ότι για σηματοθορυβικό λόγο $\text{SNRdB} < 20$ η απόκλιση είναι μεγαλύτερη ενώ για $\text{SNRdB} > 20$ η απόκλιση είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Οι μη ιδανικές καμπύλες αντιστοιχούν σε μικρότερες αποκλίσεις από την ιδανική για $\text{SNRdB} < 15$.

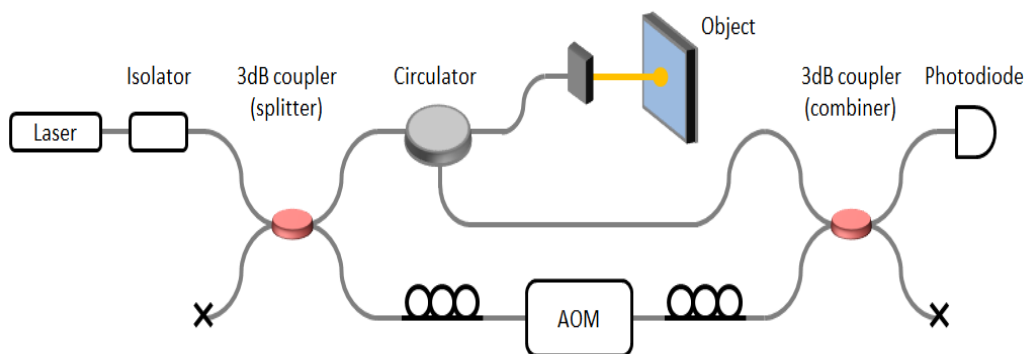
Συμπερασματικά, το σχήμα διαμόρφωσης που παρουσιάζει την μικρότερη επίδραση από το θόρυβο των σημάτων οδήγησης είναι ο Four-Branch Shifter καθώς οι μη ιδανικές καμπύλες δεν αποκλίνουν σημαντικά από την ιδανική καμπύλη σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Αντίθετα, η μεγαλύτερη επίδραση του θορύβου παρατηρήθηκε στο σχήμα διαμόρφωσης του Simple Serrodyne Shifter.

Κεφάλαιο 4°. Χαρακτηρισμός του LDV module

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθούν οι πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο. Αρχικά, θα αναλυθεί ενδελεχώς μία fiber-based διάταξη που συγκροτήθηκε για να εξακριβωθεί και να κατανοηθεί πλήρως κάθε λειτουργία ενός συστήματος LDV. Έπειτα, θα παρουσιαστεί η διάταξη, η πειραματική διαδικασία καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα από τον χαρακτηρισμό του integrated LDV module για το σχήμα διαμόρφωσης του Simple Serrodyne Shifter.

4.1 Fiber-based διάταξη LDV

Προκειμένου να διαπιστωθεί πειραματικά το σύστημα του LDV, που περιγράφηκε στο 1^ο κεφάλαιο, αναπτύχθηκε στο εργαστήριο η πειραματική διάταξη που απεικονίζεται στην εικόνα 4.1 και βασίστηκε σε οπτικές ίνες. Κύριος στόχος της υλοποίησης αυτής ήταν η διερεύνηση και η εξοικείωση με την επεξεργασία του σήματος που λαμβάνουμε από τη φωτοδίοδο. Παρακάτω θα περιγραφούν σύντομα τα δομικά μέρη που τη συγκροτούν.



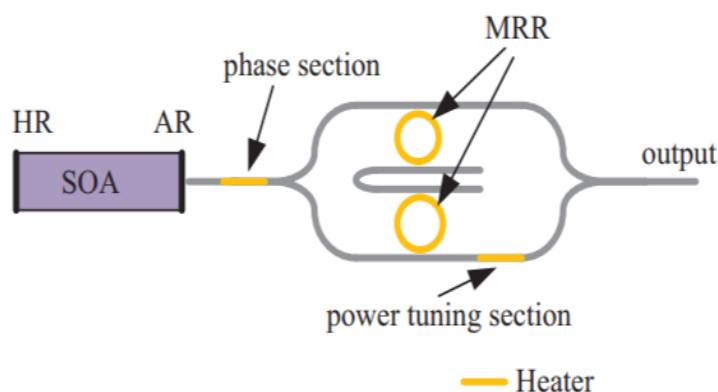
Εικόνα 3.1 Fiber-based set-up LDV

Πηγή Laser

Στο εργαστήριο χρησιμοποιήσαμε ένα ολοκληρωμένο laser εξωτερικής κοιλότητας βασισμένο σε υβριδική ολοκλήρωση InP και Si₃N₄ (TriPleX platform). Συγκεκριμένα, το laser αυτό σχηματίζεται από την ολοκλήρωση ενός ανακλαστικού ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή από InP (φωσφίδιο του ινδίου) με ένα κύκλωμα κυματοδηγού ανατροφοδότησης από νιτρίδιο πυριτίου (Si₃N₄ based feedback waveguide circuit). Το κύκλωμα περιλαμβάνει ένα ρυθμιζόμενο κάτοπτρο Vernier με δυνατότητα επιλογής της συχνότητας και συγκροτείται από δύο αντηχεία μικρο-δακτυλίων (microring resonators) με ελαφρώς διαφορετικές ακτίνες. Επιπλέον, το laser αποτελείται από ένα τμήμα φάσης και ένα τμήμα ρύθμισης ισχύος. Η

μπροστά και η πίσω όψεις του ενισχυτή αποτελούνται από μία υψηλής ανάκλασης και αντι-ανακλαστική επίστρωση, αντίστοιχα. Τα δύο αντηχεία μικρό-δακτυλίων (microring resonators) με ελαφρώς διαφορετικές ακτίνες χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν το εύρος ρύθμισης του μήκους κύματος μέσω του φαινομένου Vernier. Τα τμήματα ρύθμισης φάσης και ισχύος χρησιμοποιούνται για τη προσαρμογή του διαμήκη ρυθμού διάδοσης και της ισχύος εξόδου, αντίστοιχα.

Πρόκειται για ένα υβριδικό laser εξωτερικής κοιλότητας που χαρακτηρίζεται από στενό φασματικό εύρος δηλαδή πολύ χαμηλό θόρυβο φάσης και από μεγάλο εύρος ρύθμισης του μήκους κύματος (tunability) που είναι μεγαλύτερο από 43nm και επιτυγχάνεται μέσω του θερμό-οπτικού φαινομένου. Το πιο στενό φασματικό εύρος που εκπέμπεται δηλαδή το εύρος συχνοτήτων εκτός από την ιδανική, είναι περίπου στα 90 kHz ενώ τα μήκη κύματος ανήκουν στο διάστημα από 1530nm έως 1580nm.



Εικόνα 4.2 Σχηματικό διάγραμμα του ολοκληρωμένου InP-Si₃N₄ υβριδικού laser

Optical Isolator

Ο οπτικός απομονωτής (*optical isolator*) είναι μία οπτική δίοδος που επιτρέπει τη μετάδοση του φωτός σε μία μόνο κατεύθυνση.

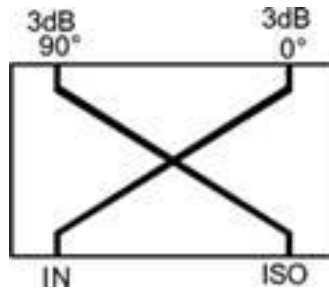
Χρησιμοποιούν την αρχής της μη αμοιβαιότητας (non reciprocity) που χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο «στροφή Faraday». Σύμφωνα με το φαινόμενο του Faraday, η κατεύθυνση της στροφής του επιπέδου πόλωσης είναι ανεξάρτητη της πόλωσης του πεδίου αλλά εξαρτάται μόνο από τη ένταση του μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο, B, που εφαρμόζεται στον στροφέα Faraday προκαλεί μία περιστροφή στην πόλωση του φωτός λόγω του φαινομένου Faraday. Η γωνία περιστροφής, β, δίνεται από τη σχέση:

$$\beta = \nu B d \quad (4.1)$$

όπου ν η σταθερά Verdet του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο περιστροφέας και d το μήκος του περιστροφέα. Ειδικά για έναν οπτικό μονωτή, οι τιμές επιλέγονται για να δώσουν μια περιστροφή 45°. Στο εργαστήριο, ο isolator χρησιμοποιείται για την αποτροπή ανεπιθύμητης ανάδρασης στην οπτική διάταξη που μελετάμε.

Οπτικός συζεύκτης 3dB

Ένας 90° υβριδικός συζεύκτης 3dB, είναι μια συσκευή τεσσάρων θυρών που χρησιμοποιείται είτε για να διαιρέσει εξίσου ένα σήμα εισόδου με μια προκύπτουσα διαφορά φάσης 90° μεταξύ των θυρών εξόδου ή για να συνδυάσει δύο σήματα διατηρώντας ταυτόχρονα υψηλή απομόνωση μεταξύ των θυρών.



Εικόνα 4.3 90° Υβριδικός Συζεύκτης 3dB

Ένας 90° Υβριδικός Συζεύκτης 3 αποτελείται από δύο διασταυρούμενες γραμμές μετάδοσης με μήκος $\frac{\lambda}{4}$ που αντιστοιχεί στην κεντρική συχνότητα λειτουργίας. Τα εισερχόμενα σήματα διαχωρίζονται σε συνιστώσες ίσης ισχύος με διαφορά φάσης $\frac{\pi}{2}$ μεταξύ τους δηλαδή όταν εισάγεται ισχύς στη θύρα IN, η μισή ισχύς (3dB) ρέει στη θύρα 0° και η υπόλοιπη συνδέεται στη θύρα 90° σύμφωνα με την εικόνα 4.3. Οι ανακλάσεις από αναντιστοιχίες αποστέλλονται πίσω στις θύρες εξόδου και κατευθύνονται απευθείας στη θύρα ISO ή ακυρώνονται στην είσοδο.

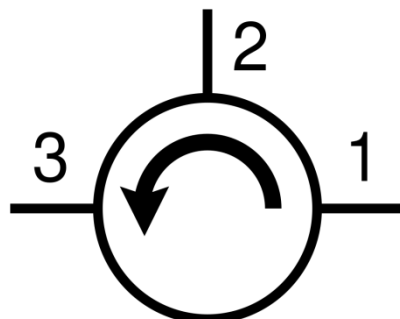
Γενικά, ένας οπτικός συζεύκτης είναι μία οπτική παθητική διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διαχωριστής ισχύος, ως πολυπλέκτης και αποπολυπλέκτης μήκους κύματος (WDM), ως πολλαπλές θύρες εισόδων-εξόδων και ως συνδυαστής ισχύος (*combiner*). Η λειτουργία των συζευκτών στηρίζεται στη θεωρία του διαφυγόντος πεδίου. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός συζεύκτη 3 dB όπου ο συντελεστής ζεύξης ισχύος είναι $\epsilon = 0,5$ δίνεται από:

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Circulator

Ο οπτικός κυκλοφορητής είναι μια οπτική συσκευή τριών ή τεσσάρων θυρών σχεδιασμένη έτσι ώστε το φως που εισέρχεται σε οποιαδήποτε θύρα να εξέρχεται από την επόμενη. Αυτό σημαίνει ότι εάν το φως εισέλθει στη θύρα 1 εκπέμπεται από τη θύρα 2, αλλά εάν μέρος του εκπεμπόμενου φωτός ανακλάται προς τα πίσω στον κυκλοφορητή, δεν βγαίνει από τη θύρα 1 αλλά εξέρχεται από τη θύρα 3. Οι κυκλοφορητές οπτικών ινών χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό οπτικών σημάτων που ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις σε μια οπτική ίνα,

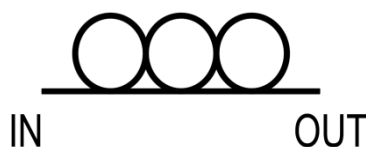
για παράδειγμα για την επίτευξη αμφίδρομης μετάδοσης μέσω μίας μόνο ίνας. Λόγω της υψηλής απομόνωσης της εισόδου και των ανακλώμενων οπτικών δυνάμεων και της χαμηλής απώλειας εισαγωγής τους, οι οπτικοί κυκλοφορητές χρησιμοποιούνται ευρέως σε προηγμένα συστήματα επικοινωνίας και εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών.



Εικόνα 4.4 Optical Circulator

Ρυθμιστής Πόλωσης

Ένας ρυθμιστής πόλωσης είναι μια οπτική συσκευή που επιτρέπει τη τροποποίηση της κατάστασης πόλωσης του φωτός. Στο εργαστήριο τους χρησιμοποιήσαμε πριν τον ακουστο-οπτικό διαμορφωτή ώστε το φως να διέλθει στο εσωτερικό του με κατάλληλη πόλωση και στην έξοδο του ακουστο-οπτικού διαμορφωτή για να εισέρχονται στον επόμενο συζεύκτη με ίδια πόλωση με τη δέσμη μέτρησης και τελικά να έχουμε φωτοανίχνευση με optical beating



Εικόνα 4.5 Ρυθμιστής Πόλωσης

Ακουστο-οπτικός διαμορφωτής

Ένας ακουστό-οπτικός διαμορφωτής αποτελείται από ένα κομμάτι διαφανούς υλικού (π.χ. fused Quartz) στη μια άκρη του οποίου είναι στερεωμένος ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος. Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος τίθεται σε λειτουργία από έναν ταλαντωτή ραδιοσυχνότητας και ταλαντούμενος προκαλεί την διάδοση ενός υπερηχητικού κύματος στο ακουστο-οπτικό υλικό. Το μέρος του υλικού απέναντι από τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο είναι κομμένο υπό γωνία και φέρει υλικό απορρόφησης των υπερήχων. Έτσι η ανάκλαση των υπερήχων στην επιφάνεια του υλικού μειώνεται δραστικά και τα υπερηχητικά κύματα διαδίδονται μόνο σε μια κατεύθυνση μέσα στο ακουστο-οπτικό υλικό. Το υλικό παραμορφώνεται τοπικά εξαιτίας των

υπερηχητικών κυμάτων και παρουσιάζει διπλοθλαστικότητα, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται τοπικά ο δείκτης διάθλασής του. Το εισερχόμενο φως σκεδάζεται στην προκύπτουσα περιοδική διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης και συμβαίνει συμβολή. Μια δέσμη περίθλασης εμφανίζεται σε γωνία θ που εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός, λ σε σχέση με το μήκος κύματος του ήχου Λ :

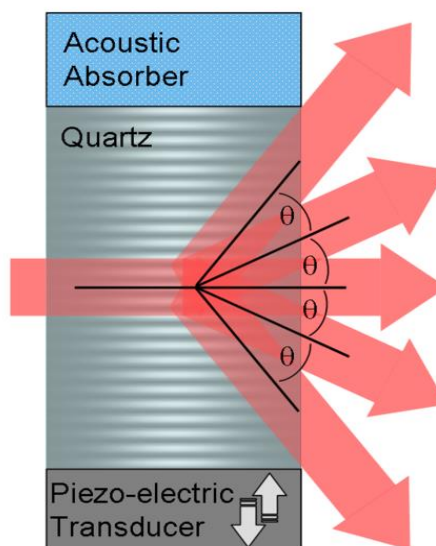
$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2\Lambda} \quad (4.3)$$

Όπου $m = \dots -1, 0, 1, \dots$ είναι η τάξη της περίθλασης.

Συνεπώς, το φως σκεδάζεται από τα κινούμενα επίπεδα του γυαλιού με αποτέλεσμα η συχνότητα της περιθλώμενης δέσμης τάξης m να μεταβάλλεται από το φαινόμενο Doppler κατά μία ποσότητα ίση με τη συχνότητα του ηχητικού κύματος F .

$$f \rightarrow f + mF \quad (4.4)$$

Μία τυπική αλλαγή συχνότητας ενός ακουστό-οπτικού διαμορφωτή ποικίλλει από 27 MHz ως 400 MHz.



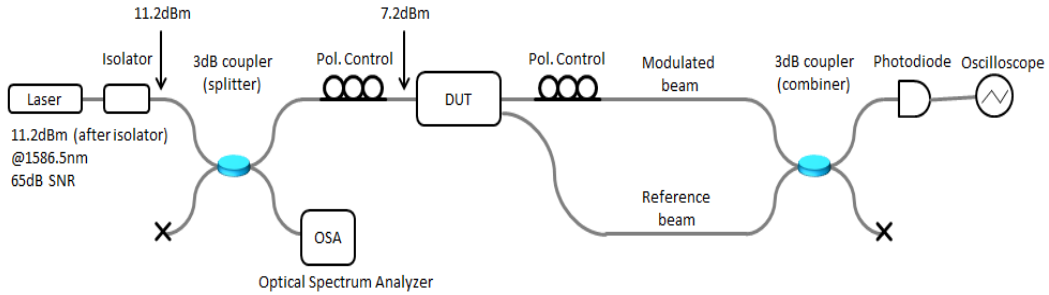
Εικόνα 4.6 Ακουστό-οπτικός Διαμορφωτής

Φωτοδίοδος

Η φωτοδίοδος είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα δημιουργείται όταν τα φωτόνια απορροφώνται στη φωτοδίοδο. Η λειτουργία των φωτοδιόδων βασίζεται στη δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίων-οπών από φωτόνια που προσπίπτουν σε μία επαφή pn . Όταν η δίοδος πολώνεται ορθά, τότε λειτουργεί σαν απλή δίοδος και η μεταβολή του φωτός μεταβάλλει ελάχιστα την λειτουργία της. Όταν πολώνεται ανάστροφα, η δίοδος διαρρέεται από ρεύμα, που αυξάνει ανάλογα με την αύξηση του φωτός που δέχεται η δίοδος.

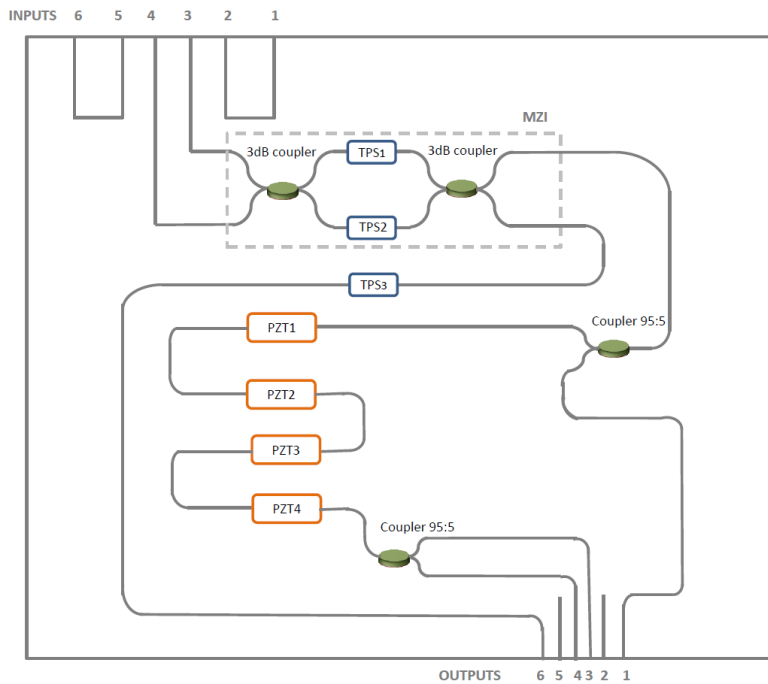
4.2 Πειραματική διάταξη χαρακτηρισμού του chip

Στο εργαστήριο αναπτύχθηκε η πειραματική διάταξη που απεικονίζεται στην εικόνα 4.7 με κύριο στόχο τον έλεγχο και την αξιολόγηση του chip το οποίο θα υλοποιεί την λειτουργία ενός *Simple Serrrodyne Shifter*. Σύμφωνα με αυτή τη διάταξη εξετάζουμε πόσο αποτελεσματικά υλοποιείται η διαμόρφωση φάσης στο chip.



Εικόνα 4.7 Πειραματική διάταξη χαρακτηρισμού του chip

Παρακάτω απεικονίζεται το chip του *Simple Serrrodyne Shifter* που θα αποτελέσει μέρος ενός φωτονικού ολοκληρωμένου κυκλώματος το οποίο θα υλοποιεί ένα σύστημα LDV.



Εικόνα 4.8 Ολοκληρωμένο Φωτονικό Κύκλωμα του Simple Serrrodyne Shifter.

PZT: PZT phase shifter, TPS: Thermo-optic phase shifter

Το chip του *Simple Serrrodyne Shifter* αποτελείται από τις θύρες 1,2,5,6 οι οποίες συμβάλλουν στην ευθυγράμμιση του εισερχόμενου στο chip, fiber array το οποίο διέρχεται από τις θύρες 3 και 4. Έπειτα, ακολουθεί ένα συμβολόμετρο Mach–Zehnder στο οποίο επιλέγουμε πόση

ισχύς θα διέλθει σε κάθε εξερχόμενη δέσμη (αναφοράς και μέτρησης). Το chip αποτελείται από τρεις phase shifters που στηρίζονται στο θερμό-οπτικό φαινόμενο, οι δύο αποτελούν δομικά μέρη ενός Mach-Zehnder συμβολόμετρου και ο τρίτος είναι τοποθετημένος στη δέσμη αναφοράς του MZI που εξέρχεται από την θύρα 6. Επιπλέον, έχουν τοποθετηθεί τέσσερις PZT phase shifters προκειμένου να υλοποιήσουν τη αλλαγή φάσης ενός Simple Serrrodyne σχήματος διαμόρφωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένας PZT phase shifter αρκούσε για να υλοποιήσει την επιθυμητή αλλαγή φάσης σύμφωνα με το Simple Serrrodyne σχήμα αλλά στο σύστημα δημιουργήθηκαν τέσσερις για να αποφεύγεται η εφαρμογή μεγάλων τάσεων στο chip και για λόγους αντικατάστασης του ενός σε περίπτωση βλάβης. Τέλος, οι θύρες εξόδου 2 και 5 δεν αξιοποιούνται στην παρούσα πειραματική μελέτη, η θύρα 1 λειτουργεί ως δέσμη αναφοράς ενώ από τις θύρες 3 και 4 εξέρχεται το διαμορφωμένο σήμα.

Στην πειραματική διάταξη που μελετάμε στο εργαστήριο, η θερμοκρασία του συστήματος ελέγχεται από μία πλακέτα TEC.

Παρακάτω θα περιγραφούν η λειτουργία ενός θερμό-οπτικού phase shifter και ενός PZT phase shifter.

4.2.1 Θερμό-οπτικοί Phase Shifters

Σύμφωνα με το θερμό-οπτικό φαινόμενο, σε ένα οπτικό υλικό, ο δείκτης διάθλασης του μεταβάλλεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τη μακροσκοπική εξίσωση Clausius-Mossotti που μπορεί να γραφθεί με τη μορφή:

$$\alpha = \frac{\frac{3}{4\pi N}}{(\varepsilon - 1) / (\varepsilon - 2)} \quad (4.6)$$

όπου N είναι ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου. Η εξίσωση (4.6) αποτελεί μία σχέση μεταξύ της πολικότητας, α ενός μορίου και της διηλεκτρικής σταθεράς, ε μιας διηλεκτρικής ουσίας που αποτελείται από μόρια με αυτήν την πολικότητα. Η εξίσωση Clausius-Mossotti για ένα ιστροπικό διηλεκτρικό δηλώνει την εξάρτηση από τη θερμοκρασία μιας διηλεκτρικής σταθεράς (ανάλογη προς το τετράγωνο του δείκτη διάθλασης) και μέσω αυτής αποδείχθηκε ότι η απορρόφηση λόγω του θερμό-οπτικού φαινομένου είναι πολύ μικρή, επομένως ένας θερμό-οπτικός phase shifter αποτελεί έναν πολύ πολύ καλό διαμορφωτή φάσης.

Ένας συνήθης θερμό-οπτικός phase shifter αποτελείται από έναν θερμαντήρα λεπτής μεμβράνης που εναποτίθεται πάνω από την επένδυση ενός κυματοδηγού που παρέχει μια αλλαγή του δείκτη διάθλασης. Δεδομένου ότι η θερμική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη στο γυαλί από τον αέρα, η θερμότητα θα μεταφερθεί στο υπόστρωμα πυριτίου που λειτουργεί ως ψύκτρα στο σύστημα.

Ένας θερμό-οπτικός phase shifter έχει σημαντικό ρόλο στα ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα βασισμένα σε πυρίτιο σε υποστρώματα πυριτίου. Το πυρίτιο έχει σχετικά μεγάλο θερμό-

οπτικό συντελεστή. Η κατανάλωση ισχύος του θερμό-οπτικού phase shifter καθορίζεται από το συντελεστή θέρμανσης και τη θερμική αγωγιμότητα ενός chip. Όλη η θερμότητα παράγεται στην περιοχή του πυρήνα του κυματοδηγού, για να δημιουργηθεί αλλαγή του οπτικού του δρόμου και συνεπώς αλλαγή φάσης. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις η θέρμανση δεν είναι αρκετά αποτελεσματική. Ένα από τα προβλήματα που τους διέτουν είναι είναι η σχετικά μεγάλη κατανάλωση ισχύος και η πλευρική διάχυση θερμότητας στο γυαλί, οδηγώντας σε αύξηση της θερμοκρασίας. Τέλος, οι θερμό-οπτικοί phase shifter χαρακτηρίζονται από βραδύτητα λειτουργίας, η οποία προκαλείται από τις θερμικές ιδιότητες των υλικών. Το μέγιστο εύρος ζώνης ενός θερμό-οπτικού phase shifter είναι της τάξης μερικών MHz.

4.2.2 PZT Phase Shifters

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η ικανότητα ορισμένων υλικών να παράγουν ηλεκτρικό φορτίο ως απόκριση στην εφαρμοζόμενη μηχανική τάση. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου είναι ότι είναι αναστρέψιμο, που σημαίνει ότι τα υλικά που εμφανίζουν άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (η παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου όταν εφαρμόζεται τάση) εμφανίζουν επίσης το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (η παραγωγή τάσης όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο).

Ο PZT phase shifter στηρίζεται στο αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο δηλαδή η μικρο-μετατόπιση του αντίστοιχου σήματος τάσης μπορεί να παραχθεί με το εφαρμοζόμενο σήμα τάσης. Ο PZT phase shifter χαρακτηρίζεται από υψηλή ανάλυση και ταχύτητα απόκρισης της τάξης των ms, η οποία ανταποκρίνεται στην ακρίβεια της οπτικής διαμόρφωσης φάσης. Ως PZT συμβολίζεται το Lead Zirconate Titanate, είναι το πιο διαδεδομένο κεραμικό piezo. Οι lead zirconate titanate κρύσταλλοι αλλάζουν περίπου 0,1% του στατικού τους μήκους όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο λόγω του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.

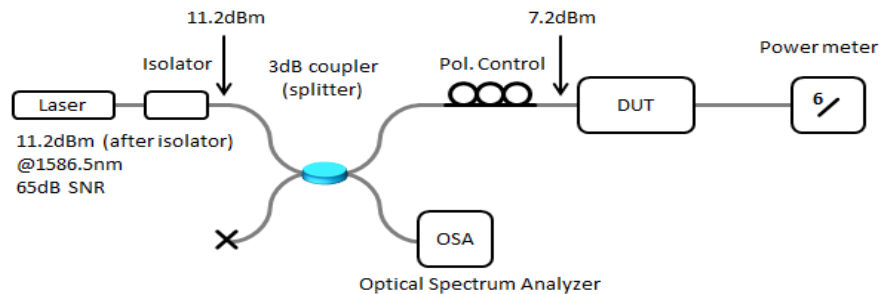
4.3 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Εδώ θα περιγραφούν τα πειραματικά βήματα που ακολουθήθηκαν στο εργαστήριο προκειμένου να ελεγχθεί και να αξιολογηθεί η λειτουργία του Chip για το σχήμα διαμόρφωσης του Simple Serrodyne Shifter και θα δοθούν τα πειραματικά αποτελέσματα από το χαρακτηρισμό του chip.

A. Οπτικός χαρακτηρισμός του chip

Αρχικά, επιβεβαιώσαμε ότι το οπτικό σήμα που εισέρχεται μέσω του fiber array στο chip, εξέρχεται και επομένως, υλοποιείται κανονικά η κυματοδότηση στο εσωτερικό του chip. Με αυτόν τον τρόπο διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει κάποια αλλοίωση του fiber array και

ότι η σύζευξη του με το chip είναι επιτυχής (έλεγχος *optical coupling*). Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια ενός power meter μετρήσαμε την οπτική ισχύ στην είσοδο και σε κάθε θύρα εξόδου του chip και προσδιορίσαμε την απώλεια της ισχύος σε dB.

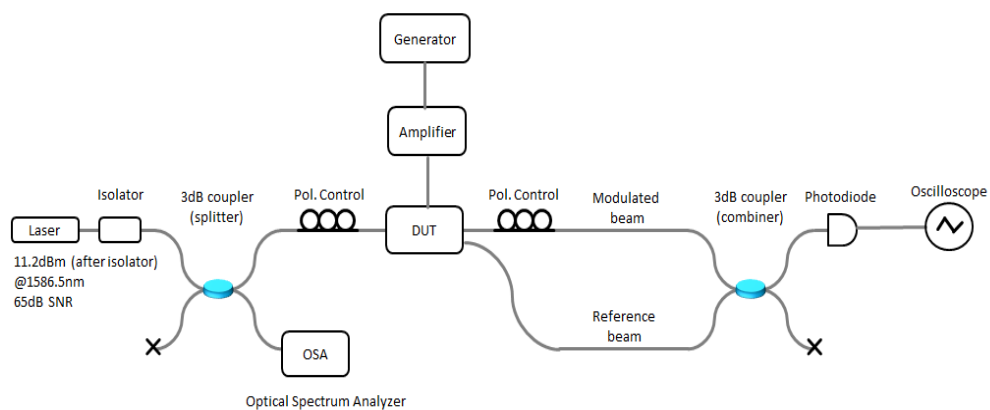


Εικόνα 4.9 Διάταξη οπτικού χαρακτηρισμού του chip

B. Έλεγχος του chip σχετικά με τη διαμόρφωση οπτικού σήματος

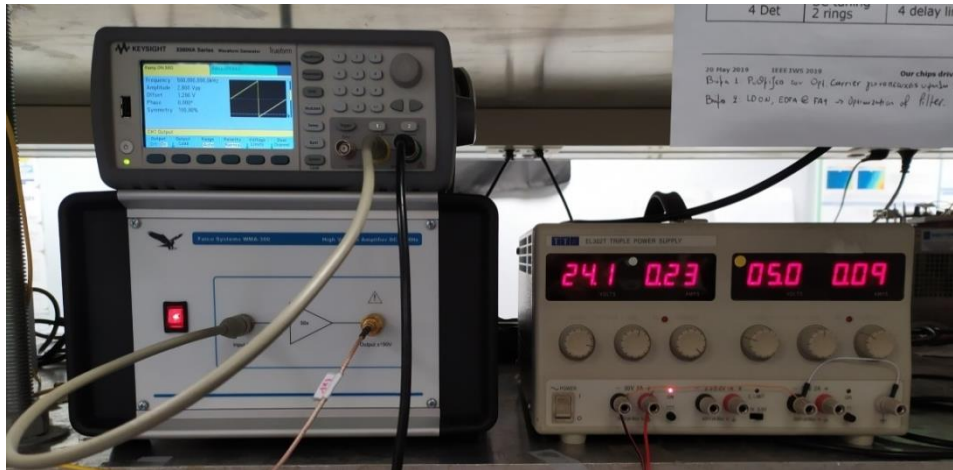
Έπειτα από τον οπτικό χαρακτηρισμό του chip, υλοποιήθηκαν μετρήσεις για να εξακριβωθεί εάν το chip υλοποιεί επιτυχώς τη διαμόρφωση της οπτικής δέσμης. Οι PZTs οδηγήθηκαν με τα εξής τρία διαφορετικά σενάρια και παρατηρήθηκε η διαμόρφωση του σήματος:

1. Οδήγηση ενός PZT μέσω της γεννήτριας και του ενισχυτή

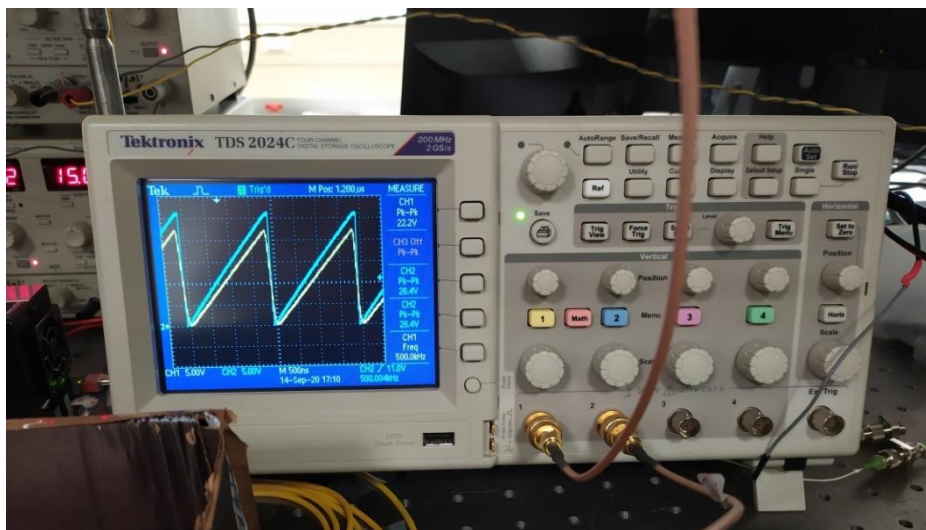


Εικόνα 4.10 Διάταξη οδήγησης των PZTs

Η γεννήτρια και ο ενισχυτής τροφοδοτούσε είτε τον PZT1 είτε τον PZT2 με ένα σήμα οδήγησης συχνότητας 500kHz. Η γεννήτρια δημιουργούσε μία πριονωτή κυματομορφή με πλάτος από 0 έως $A = 1, 1.5, 2, 2.5, 2.8$ V. Μέσω του ενισχυτή επιτεύχθηκε μία ενίσχυση πλάτους επί 50 και συνεπώς, για τις τιμές πλάτους $A' = 50, 75, 100, 125, 140$ V παρατηρήσαμε τη διαμόρφωση είτε στο PZT1 είτε στο PZT2. Επιλέξαμε πριονωτές κυματομορφές στη γεννήτρια με πλάτος 0.9V, 0.8V, 0.5V και δεν παρατηρήσαμε διαμόρφωση.



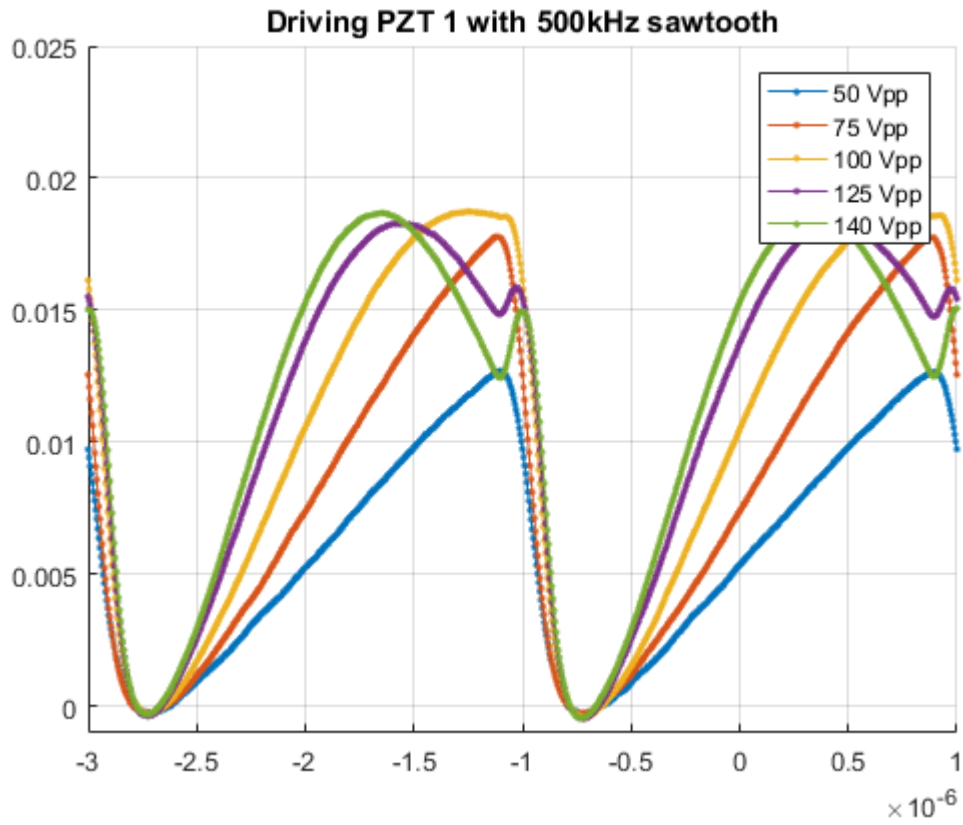
Εικόνα 4.11 Γεννήτρια και ενισχυτής για την οδήγηση των PZTs.



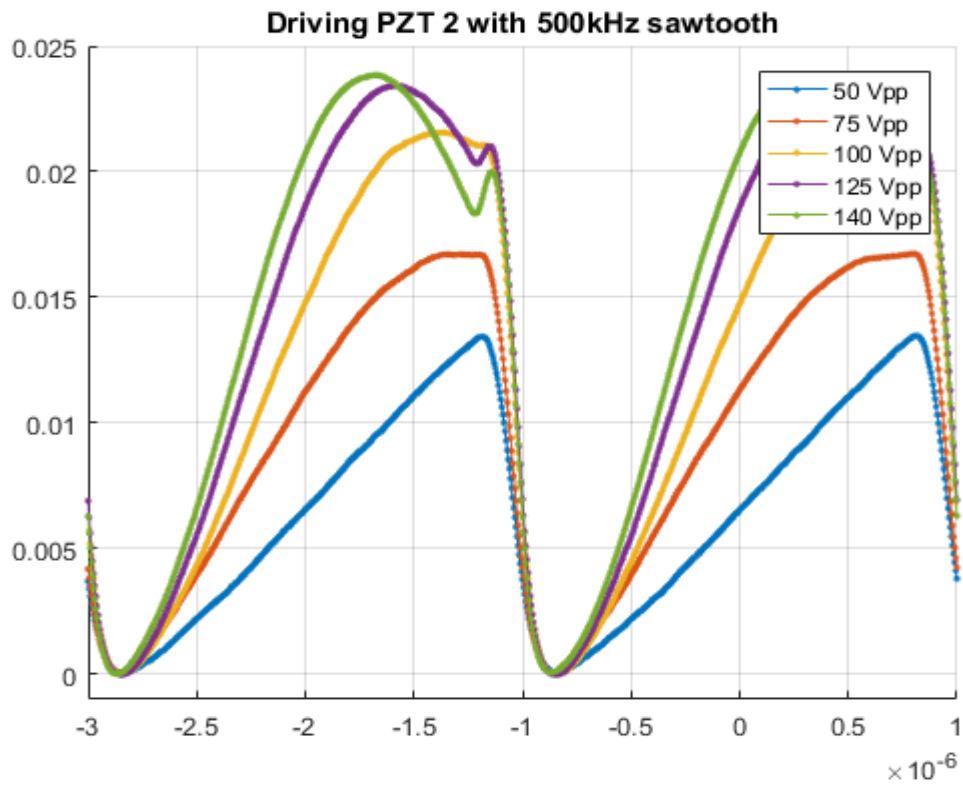
Εικόνα 4.12 Πριονωτό σήμα οδήγησης των PZTs.



Εικόνα 4.13 Πειραματική Διάταξη



Εικόνα 4.14 Διαμορφωμένα σήματα από το PZT1



Εικόνα 4.15 Διαμορφωμένα σήματα από το PZT2

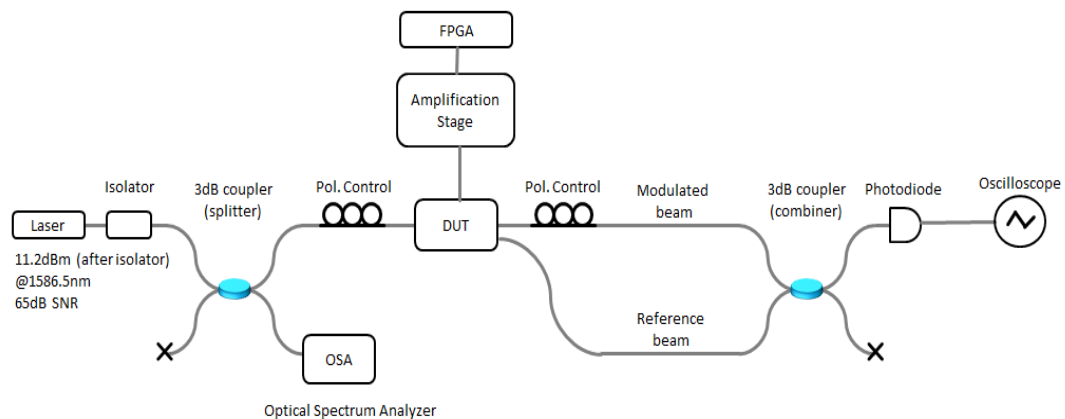
2. Οδήγηση PZTs μέσω ηλεκτρονικών FPGA και εξωτερικών ενισχυτών.

Σε αυτό το πειραματικό κομμάτι αντικαθιστούμε τη γεννήτρια με ηλεκτρονικά FPGA (Field Programmable Gate Arrays) τα οποία παράγουν πριονωτές κυματομορφές με μικρά πλάτη και τον ενισχυτή του προηγούμενου βήματος με ένα amplification stage, το οποίο ενισχύει τις κυματομορφές της γεννήτριας. Τα ηλεκτρονικά FPGA και το amplification stage έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε συχνότητα πολύ μεγαλύτερη, όπου συγκεκριμένα τα σήματα οδηγήθηκαν σε συχνότητα 2,5 MHz και να δίνουν τέσσερις εξόδους που σημαίνει ότι μπορούν να οδηγηθούν και τα τέσσερα PZTs ταυτόχρονα.

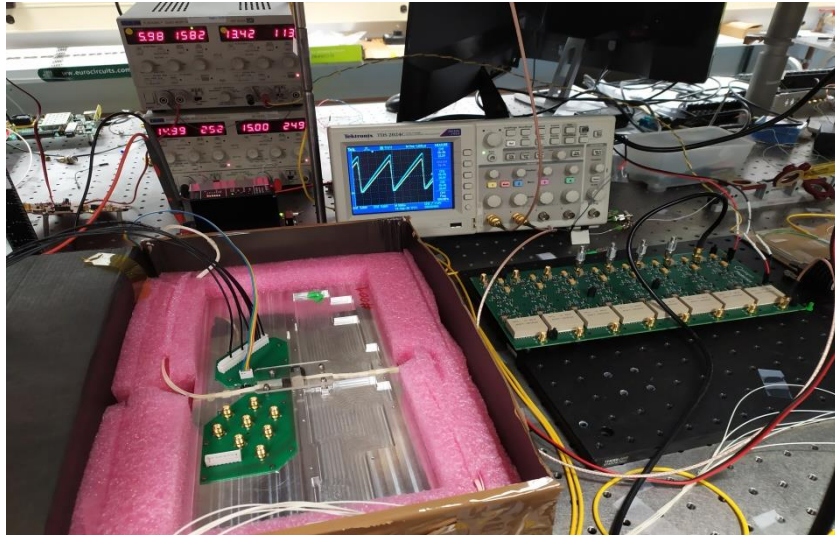
Χρησιμοποιείται ένα πριονωτό σήμα από 0 έως μία τάση η οποία να προκαλέσει μία αλλαγή φάσης 2π . Ωστόσο, τα PZTs για να πετύχουν αυτή τη στροφή φάσης απαιτούν μεγάλες τιμές τάσης. Στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη αυτό αποφεύγεται γιατί έχοντας μικρότερη τάση σε κάθε έναν PZT και οδηγώντας τα τέσσερα PZTs ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται η επιθυμητή στροφή φάσης καθώς κάθε ένα PZT δημιουργεί μία στροφή φάσης περίπου $\frac{\pi}{2}$.

Πιο αναλυτικά, η έξοδος από το FPGA ήταν μία πριονωτή κυματομορφή με πλάτος από 0 έως 1,5 V και η έξοδος από το amplification stage ήταν μία πριονωτή κυματομορφή με πλάτος από 0 έως 30 V. Συνεπώς, κάθε ένα από τα τέσσερα PZTs οδηγείται από 30 V για να επιτευχθεί στροφή φάσης περίπου 2π .

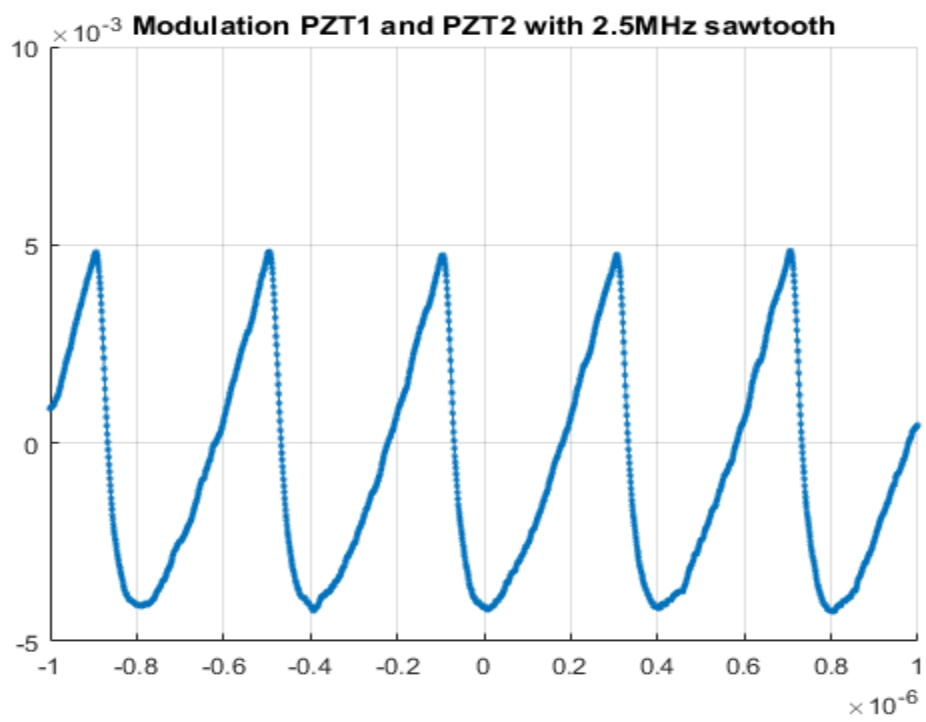
Ωστόσο, στην πειραματική μας διάταξη λειτουργούν μόνο δύο PZTs. Κατά συνέπεια, οδηγήθηκαν δύο PZTs ταυτόχρονα στα 2,5MHz με peak-to-peak πλάτος κυματομορφής 30V.



Εικόνα 4.16 Πειραματική Διάταξη 2^{ου} σεναρίου



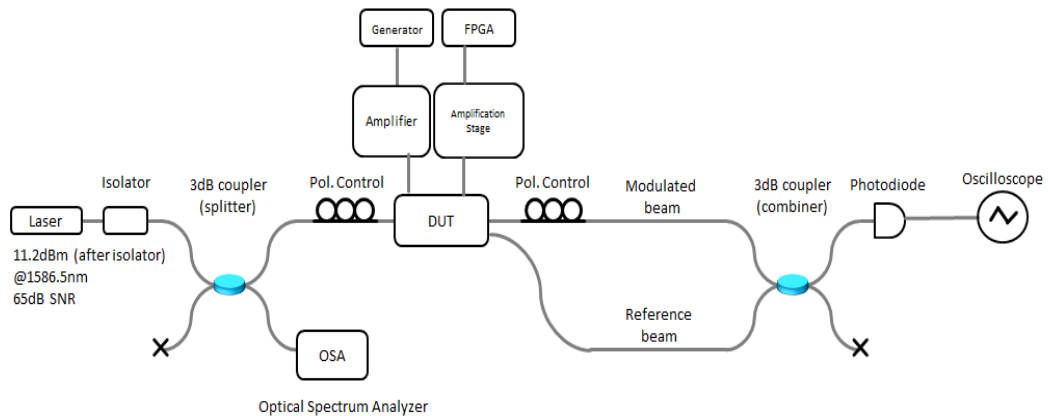
Εικόνα 4.17 Πειραματική διάταξη 2^{ου} σεναρίου



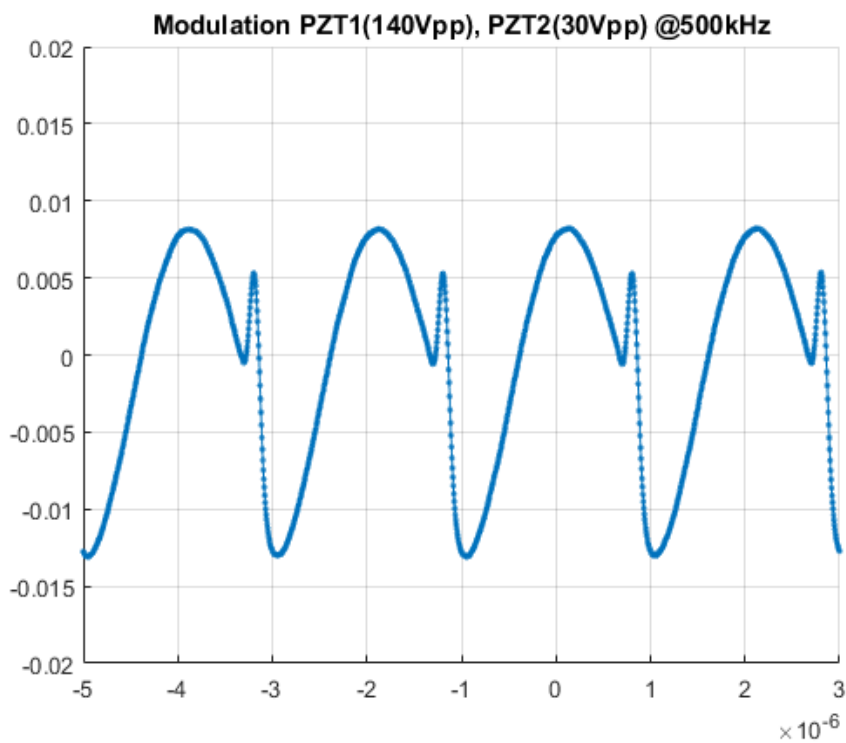
Εικόνα 4.18 Διαμορφωμένο σήμα που προκύπτει από το 2ο σενάριο

3. Συνδυασμός σεναρίου 1 και 2

Σε αυτό το πειραματικό βήμα, οδηγήσαμε τον PZT1 χρησιμοποιώντας την γεννήτρια και τον ενισχυτή του σεναρίου 1 και τον PZT2 μέσω των ηλεκτρονικών FPGA και του amplification stage από το σενάριο 2. Συνεπώς, οδηγήσαμε τον PZT1 με μία πριονωτή κυματομορφή με peak-to-peak πλάτος 140 V στα 500kHz και τον PZT2 με μία πριονωτή κυματομορφή με peak-to-peak πλάτος 30V στα 2,5MHz. Συνεπώς, εφαρμόσαμε συνολικά στο σύστημα 170V.



Εικόνα 4.19 Πειραματική Διάταξη 3ου σεναρίου



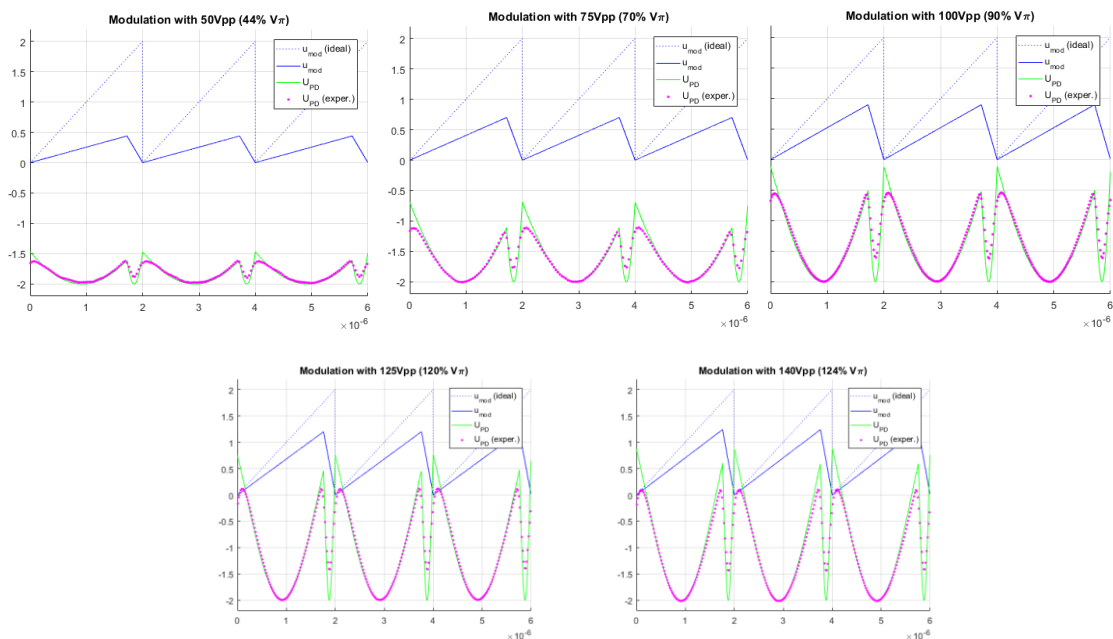
Εικόνα 4.20 Διαμορφωμένο σήμα που προκύπτει από το 3ο σενάριο

Εκτίμηση τάσης V_{π}

Από τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα παρατηρήσαμε ότι ακόμα και στα 170V (σενάριο 3) δεν καταφέραμε να πετύχουμε την τάση $2V_{\pi}$ δηλαδή τη τάση που θα επέφερε αλλαγή φάσης 2π rad στο οπτικό σήμα. Προκειμένου να εκτιμηθεί η τάση V_{π} , χρησιμοποιήσαμε τον αλγόριθμο σε περιβάλλον MATLAB που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 για να προσομοιώσουμε τη διαμόρφωση που αναμένεται μέσω της εφαρμογής ενός συγκεκριμένου πριονωτού σήματος οδήγησης. Συγκεκριμένα, προσπαθήσαμε να προσαρμόσουμε τα αποτελέσματα του Matlab πάνω στα πειραματικά δεδομένα δηλαδή μέσω της εφαρμογής πολλών διαφορετικών πριονωτών κυματομορφών βρήκαμε αυτή που είναι πολύ κοντά στην πειραματική κυματομορφή.

Παρακάτω απεικονίζονται τα διαγράμματα για διαφορετική τάση οδήγησης, V_{pp} όπου η πράσινη καμπύλη είναι η κυματομορφή που αντιστοιχεί στο μη ιδανικό πριονωτό σήμα (μπλε καμπύλη) ενώ η μωβ καμπύλη προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα στο εργαστήριο.

Για κάθε ένα από τα παρακάτω γραφήματα μπορεί να γίνει μία εκτίμηση V_{π} μέσω της τιμής του amplitude factor στην οποία η πράσινη καμπύλη (προσομοίωση) «ταυτίζεται» σε μεγάλο βαθμό με τη μωβ (πειραματική καμπύλη).



Εικόνα 4.21 Διαγράμματα εκτίμησης του V_{π}

Από τα παραπάνω διαγράμματα προέκυψαν οι παρακάτω εκτιμήσεις του V_{π} που απεικονίζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1

Ampl. (Vpp)	50	75	100	125	140
% V_{π}	44%	70%	90%	120%	124%
Estim. V_{π} (V)	113.6	107.1	111.1	104.2	112.9

Σύμφωνα με τον πίνακα 1, η τάση V_{π} εκτιμάται να είναι περίπου 100 έως 120 V.

Κεφάλαιο 5°. Σύνοψη

Αξιοποιώντας τη θεωρητική περιγραφή για το Laser Doppler Vibrometer και τα λειτουργικά τμήματα που το συγκροτούν, αναπτύχθηκε κατάλληλος αλγόριθμος στο λογισμικό MATLAB για τη θεωρητική και προσομοιωτική μελέτη των προτεινόμενων σχημάτων διαμόρφωσης, Simple Serrrodyne Shifter, Four-Branch Shifter, Sophisticated Serrrodyne Shifter. Σύμφωνα με την προσομοιωτική ανάλυση αυτή έγινε σύγκριση της επίδοσης του κάθε σχήματος διαμόρφωσης όπου την μικρότερη επίδραση από το θόρυβο των σημάτων οδήγησης την παρουσίασε ο Four-Branch Shifter ενώ η μεγαλύτερη επίδραση του θορύβου παρατηρήθηκε στο σχήμα διαμόρφωσης του Simple Serrrodyne Shifter.

Η προσομοιωτική μελέτη έχει στόχο την αξιολόγηση του κάθε σχήματος διαμόρφωσης καθώς και τα τρία από αυτά τα οπτικά κυκλώματα θα μελετηθούν σε ολοκληρωμένη μορφή δηλαδή σε ένα chip που θα επιτελεί το τμήμα της «αλλαγής φάσης» του οπτικού σήματος μέτρησης και θα αποτελεί δομικό μέρος μιας ολοκληρωμένης φωτονικής πλατφόρμας προκειμένου τελικά να έχουμε ένα miniaturized Laser Doppler Vibrometer ολοκληρωμένο σε μία φωτονική πλατφόρμα πυριτίου. Συγκεκριμένα, η πλατφόρμα που θα αναπτυχθεί το σύστημα είναι μία πλατφόρμα TriPleX της Ολλανδικής εταιρείας Lionix η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλές απώλειες διάδοσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με τη πειραματική διεξαγωγή μετρήσεων για να χαρακτηριστεί το ολοκληρωμένο φωτονικό κύκλωμα του Simple Serrrodyne Shifter. Κατά τη πειραματική διαδικασία διαπιστώσαμε την επιτυχή λειτουργία του chip να επιτελεί διαμόρφωση στο οπτικό σήμα αλλά δεν καταφέραμε να πετύχουμε τάση $2V_{\pi}$ η οποία προκαλεί στροφή φάσης 2π στο οπτικό σήμα, ακόμα και με την εφαρμογή τάσης 170 V στο σύστημα. Με τη βοήθεια προσομοιωτικής μελέτης και των πειραματικών κυματομορφών η τάση V_{π} εκτιμήθηκε να είναι 100-120V. Τα επόμενα βήματα της πειραματικής μελέτης περιλαμβάνουν περαιτέρω προσομοιωτική μελέτη η οποία θα λαμβάνει υπόψη παραμέτρους όπως το linewidth του laser ή κατασκευαστικές ατέλειες των couplers και πειραματικό χαρακτηρισμό των ολοκληρωμένων φωτονικών κυκλωμάτων του Four-Branch Shifter και του Sophisticated Serrrodyne Shifter με στόχο να ενταχθούν σε ένα miniaturized Laser Doppler Vibrometer που θα αναπτυχθεί στο εργαστήριο στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

- [1] Rok Prislán, "Laser Doppler vibrometry and modal testing", 2008.
- [2] Seimetz, Matthias." High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission".doi: 10.1007/978-3-540-93771-5. (2009)
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Bragg_Cell
- [4] L.E. Drain: "The Laser Doppler Technique", Chichester, John Wiley & Sons
- [5] Andrew C. Lewin: Introduction to interferometric Measurement Systems, 1988
- [6] Martin Johansmann, Georg Siegmund, Mario Pineda."Targeting the Limits of Laser Doppler Vibrometry", 2005.
- [7] Georg Siegmund."Sources of Measurement Error in Laser Doppler Vibrometers and Proposal for Unified Specifications".(2008)
- [8] Yanlu Li, Stijn Meersman, and Roel Baets,"Optical frequency shifter on SOI using thermo-optic serrodyne modulation", doi: 978-1-4244-6345-9/10/\$26.00. (2010) IEEE
- [9] [https://www.polytec.com/eu/vibrometry/technology/\\$laser-doppler-vibrometry/](https://www.polytec.com/eu/vibrometry/technology/$laser-doppler-vibrometry/)
- [10] Man-Geun Kim, Kyoungwoo Jo, Hyuk-Sang Kwon, Wongun Jang, Youngsik Park, and Jong-Hyun Lee." Fiber-Optic Laser Doppler Vibrometer to Dynamically Measure MEMS Actuator With In-Plane Motion".doi: 1057-7157/\$26.00 © 2009 IEEE
- [11] Yanlu Li, Roel Baets. "Realization of fiber-based laser Doppler vibrometer with serrodyne frequency Shifting". DOI: 10.1364/AO.50.002809.(2011)
- [12] Taisuke Yoshikawa. *et al.*"Measurement of the Resonant Characteristics of a Single Bubble Vibration by Using a Laser Doppler Vibrometer".(2011)
- [13] Yanlu Li,1,2,* Patrick Segers,3 Joris Dirckx,4 and Roel Baets1,2."On-chip laser Doppler vibrometer for arterial pulse wave velocity measurement." DOI:10.1364/BOE.4.001229.(2020)
- [14] C. Roeloffzen et al, "Low-Loss Si3N4 TriPleX Optical Waveguides: Technology and Applications Overview," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,(2018).
- [15] Yanlu Li. PhD Thesis:"Miniaturized Laser Doppler Vibrometer Integrated on a Silicon Photonics Platform"
- [16] Yanlu Li, Stijn Meersman, and Roel Baets." Optical frequency shifter on SOI using thermo-optic serrodyne modulation".doi: 978-1-4244-6345-9/10/\$26.00 ©2010 IEEE
- [17] Bo Asp Mdlér, Lars Jensen, Member, ZEEE, Christian Laurent-Lund, and Carsten Thirstrup." Silica-Waveguide Thermo-optic Phase Shifter with Low Power Consumption and Low Lateral Heat Diffusion".doi: 1041-1135/93\$03.00 0 1993 IEEE
- [18]: Kazuro Kikuchi." Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications".doi: 0733-8724 © 2015 IEEE
- [19] S.O. Kasap."Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices", 2nd edition,ISBN 978-0-13-215149-8, published by Pearson Education.(2013)

- [20] M. Lauermann, et al..”Integrated optical frequency shifter in siliconorganic hybrid (SOH) technology”.DOI:10.1364/OE.24.011694
- [21] Taisuke Yoshikawa, et al..”Measurement of the Resonant Characteristics of a Single Bubble Vibration by Using a Laser Doppler Vibrometer”.(2011)
- [22] Tian-Ling Ren, et al..” Design of PZT and PT based RF filters”. doi:10.1080/10584580108012809.(2001)
- [23] Peng-Zhi Li, et al..”Piezoelectric Actuated Phase Shifter Based on External Laser Interferometer: Design, Control and Experimental Validation”.doi:10.3390/s17040838.(2017)
- [24] J. Zhao, et al..”Narrow-linewidth widely tunable hybrid external cavity laser using Si₃N₄/SiO₂ microring resonators”. Doi:10.1109/GROUP4.2016.7739109.(2016)
- [25] Bo Asp Møller, et al..”Silica-waveguide thermo-optic phase shifter with low power consumption and low lateral heat diffusion”.doi: 10.1109/68.262559(1993)
- [26] Youwen Fan, et al..” Optically integrated InP-Si₃N₄ hybrid laser.”Article in IEEE Photonics Journal DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2633402.(2016)
- [27] Rongqing Hui.”Introduction to Fiber-Optic Communications”. 1st Edition. ISBN: 9780128053454,(2020)
- [28] https://www.rp-photonics.com/external_cavity_diode_lasers.html
- [29]<https://www.neophotonics.com/merits-coherent-detection-optical-transmission/#:~:text=A%20E%80%9Ccoherent%20E%80%9D%20optical%20transmission%20system,carried%20by%20a%20transmitted%20signal.>
- [30] <https://www.reade.com/products/lead-zirconate-titanate-pzt>
- [31]<https://www.americanpiezo.com/piezothory/pzt.html#:~:text=PZT%20is%20composed%20of%20the,shape%20from%20an%20electric%20field.>
- [32]http://www.photonics.ntua.gr/Diafaneies_Fwtonikhs/Pathitika_Stoixeia_Syzeftes_Apomonotes.pdf
- [33] https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_isolator
- [34] https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_circulator
- [35] https://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_controller
- [36]<https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode#:~:text=A%20photodiode%20is%20a%20semiconductor,large%20or%20small%20surface%20areas.>
- [37]https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM_AN_VIB-G05_Vibrations_Everywhere_2011_01_PDF_US.pdf
- [38] <http://www.e-meca.com/rf-microwave-blog/hybrid-coupler-basics>
- [39] https://www.rp-photonics.com/beat_note.html

[40] http://ecourse.uoi.gr/pluginfile.php/87958/mod_resource/content/6/LASER-CH8.pdf

[41] http://users.sch.gr/siliadakis/images/docs/light%20sensors%203_4.pdf

[42] <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095616156#:~:text=Quick%20Reference,of%20molecules%20per%20unit%20volume.>

[43] <https://www.piezohannas.com/Optical-phase-modulation-based-on-PZT-piezoelectric-ceramics-id3769542.html>