

ΕΣΠΑ 2007-2013, Ε.Π. «ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ»
ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

«Σύμφωνα Ασύρματα Οπτικά Συστήματα ως
Δομικά Στοιχεία για την Υλοποίηση Δικτύων
Οικίας και Επαγγελματικών Χώρων Επόμενης
Γενιάς, (COWS)»

Κωδικός Έργου : 3525

COWS

Παραδοτέο:	Π4.2
Τίτλος:	Αποτίμηση και Χαρακτηρισμός Καναλιού
Ημερομηνία:	31/10/2015
Επιμέρους Δράση:	Π.Ε. 4
Υπεύθυνος Σύνταξης:	Θωμάς Καμαλάκης
Ομάδα Εργασίας:	Θωμάς Καμαλάκης, Αντώνιος Μπόγρης, Βασίλειος Δαλάκας, Γεωργία Δέδε, Δημήτριος Αλεξόπουλος, Εμμανουήλ Φυτράκης
Είδος:	Τεχνική Αναφορά



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
Επένδυση για τη γνώση
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

1. Περιεχόμενα

1. Περιεχόμενα.....	2
2. Σκοπός του παραδοτέου.....	3
3. Σύντομη περιγραφή της πειραματικής διάταξης COWS.....	3
4. Αναλυτική περιγραφή της διάταξης του πομπού του συστήματος COWS.....	5
4.1 Laser πομπού.....	5
4.2 Οπτικός διαμορφωτής.....	7
4.3 Οπτική διόπτρα τριπλού φακού.....	10
5. Αναλυτική περιγραφή της διάταξης του δέκτη του συστήματος COWS.....	14
5.1 Οπτική πύλη (Fiber port).....	14
5.2 Laser τοπικού ταλαντωτή.....	15
5.3 Σύμφωνος δέκτης.....	17
5.4 Ελεγκτές πόλωσης.....	19
6. Ισολογισμός Ισχύος.....	20
6.1 Παράλληλη οπτική δέσμη.....	20
6.2 Διάχυτη οπτική δέσμη.....	22
7. Σύμφωνη αποδιαμόρφωση σήματος.....	25
7.1 Πειραματική διάταξη.....	25
7.2 Διαδικασία ανάκτησης φάσης.....	26
7.3 Πειραματικά αποτελέσματα ανάκτησης φάσης.....	28
8. Συνδεσιμότητα οργάνων.....	31
9. Αναφορές.....	37

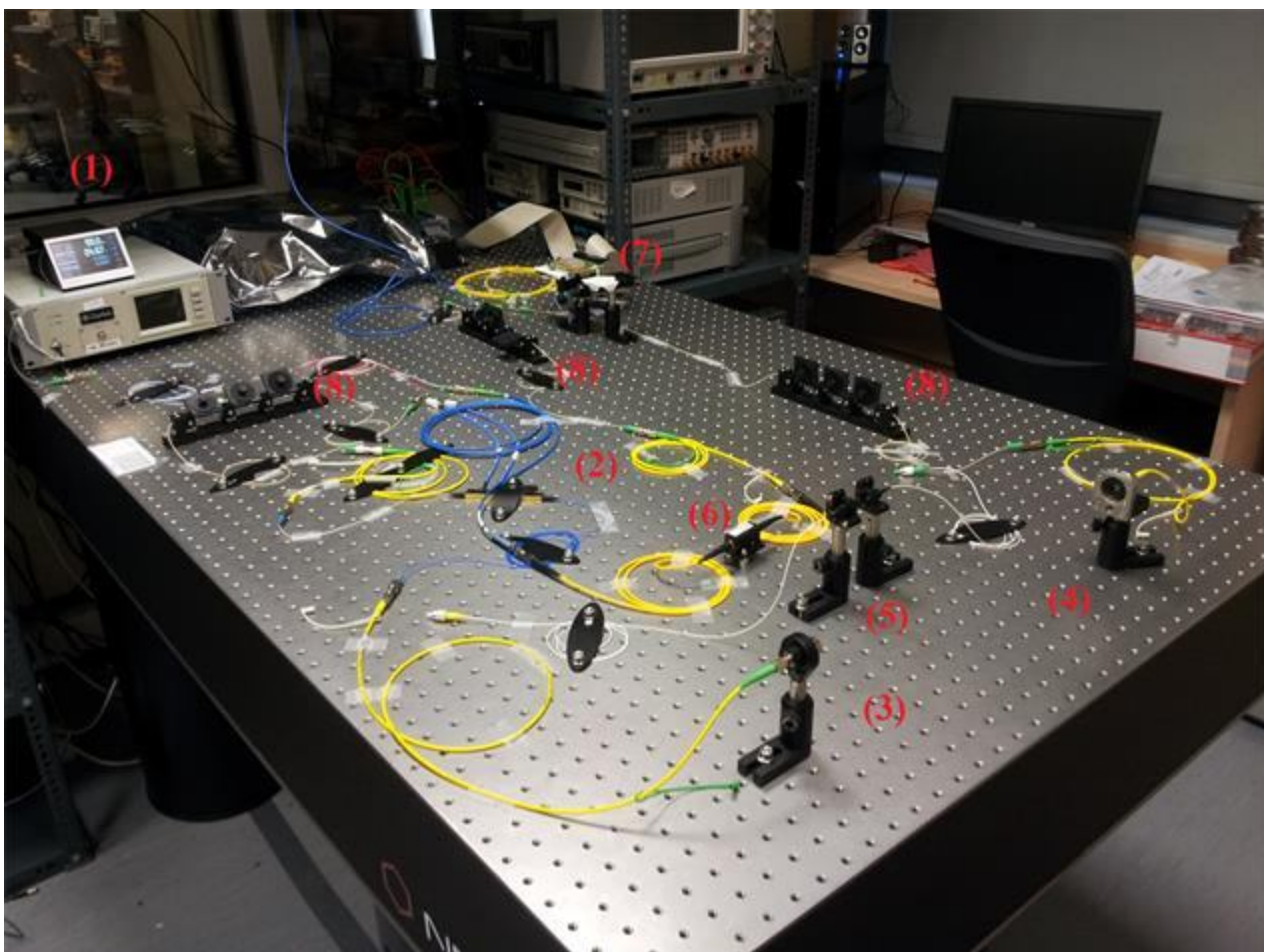
2. Σκοπός του παραδοτέου

Στο παρόν παραδοτέο παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός του σύμφωνου οπτικού καναλιού που μελετήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος «Σύμφωνα Ασύρματα Οπτικά Συστήματα ως Δομικά Στοιχεία για την Υλοποίηση Δικτύων Οικίας και Επαγγελματικών Χώρων Επόμενης Γενιάς, (COWS)». Η δραστηριότητα αυτή θα συμπληρώσει την πληροφορία που παρέχεται από την Π.Ε.1. σχετικά με τον ισολογισμό ισχύος της ζεύξης και την ισχύ του θορύβου για διαφορετικές τοποθετήσεις του πομπού και του δέκτη. Επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά οι χαρακτηρισμοί των επιμέρους διατάξεων που απαρτίζουν την πειραματική διάταξη του παρόντος ερευνητικού έργου.

3. Σύντομη περιγραφή της πειραματικής διάταξης COWS.

Ο πειραματικός χαρακτηρισμός του καναλιού αποτελεί πιθανότατα το ουσιαστικότερο κομμάτι του παρόντος ερευνητικού έργου. Μία εκδοχή ενός ολοκληρωμένου συστήματος σύμφωνης φάρασης, όπως περιγράφει το πρόγραμμα COWS, αποτυπώνεται στην Εικόνα 3-1. Το σύστημα αυτό στήθηκε το τρέχον έτος στο εργαστήριο οπτικών επικοινωνιών του τμήματος Τηλεπικοινωνιών και Τηλεματικής του Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου Αθηνών, στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού έργου. Στην Εικόνα 3-1, παρουσιάζεται η πλήρης αποτύπωση ενός συστήματος COWS εν λειτουργία. Για την ευκολότερη αναγνώριση των επιμέρους στοιχείων του συστήματος έχει τοποθετηθεί κόκκινη αρίθμηση δίπλα από τις σημαντικότερες οπτικές διατάξεις. Στην Εικόνα 3-1, ξεχωρίζουμε το σύστημα του πομπού, το οποίο αποτελείται από τις οπτικές διατάξεις κλειδιά με αρίθμηση (1), (2) και (3) όπως αποτυπώνονται στο ίδιο σχήμα. Με τον αριθμό (1) συναντάμε το laser του πομπού, το οποίο μας παρέχει το οπτικό φέρον πάνω στο οποίο θα μεταφερθεί η πληροφορία που θέλουμε να μεταδώσουμε. Στην συνέχεια με τον αριθμό (2) συναντάμε τον οπτικό διαμορφωτή, διάταξη υπεύθυνη για την υπέρθεση της πληροφορίας στο οπτικό φέρον. Με τον αριθμό (3), αποτυπώνεται μία οπτική διόπτρα τριπλού φακού υπεύθυνη για την μεταφορά του διαμορφωμένου οπτικού σήματος στον ελεύθερο χώρο. Όλες οι προαναφερθείσες οπτικές διατάξεις περιγράφονται με λεπτομέρεια στα επόμενα κεφάλαια του παρόντος παραδοτέου.

Στην Εικόνα 3-1, ξεχωρίζουμε επίσης το σύστημα του σύμφωνου δέκτη, το οποίο αποτελείται από τις οπτικές διατάξεις κλειδιά με αρίθμηση (4), (7). Η διάταξη με την αρίθμηση (4) καλείται οπτική θύρα (fiber port) και είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά του οπτικού σήματος από τον ελεύθερο χώρο σε μονότροπη οπτική ίνα. Στην συνέχεια συναντάμε μία από τις σημαντικότερες οπτικές διατάξεις, το σύμφωνο οπτικό δέκτη, με αρίθμηση (7). Ο σύμφωνος οπτικός δέκτης είναι υπεύθυνος για τον συνδυασμό του εισερχόμενου οπτικού σήματος με ένα αδιαμόρφωτο και ισχυρότερο φως ίδιας συχνότητας με σκοπό την ενίσχυση και ανάδειξη της πληροφορίας. Απαραίτητη οπτική διάταξη για τον σκοπό αυτό είναι το laser του τοπικού ταλαντωτή το οποίο αποτυπώνεται με την αρίθμηση (6). Αναπόσπαστη οπτική διάταξη για τον πομπό αλλά και το σύμφωνο δέκτη του παρόντος ερευνητικού έργου αποτελούν οι ελεγκτές πόλωσης, οι οποίοι αριθμούνται με (8) στην Εικόνα 3-1.



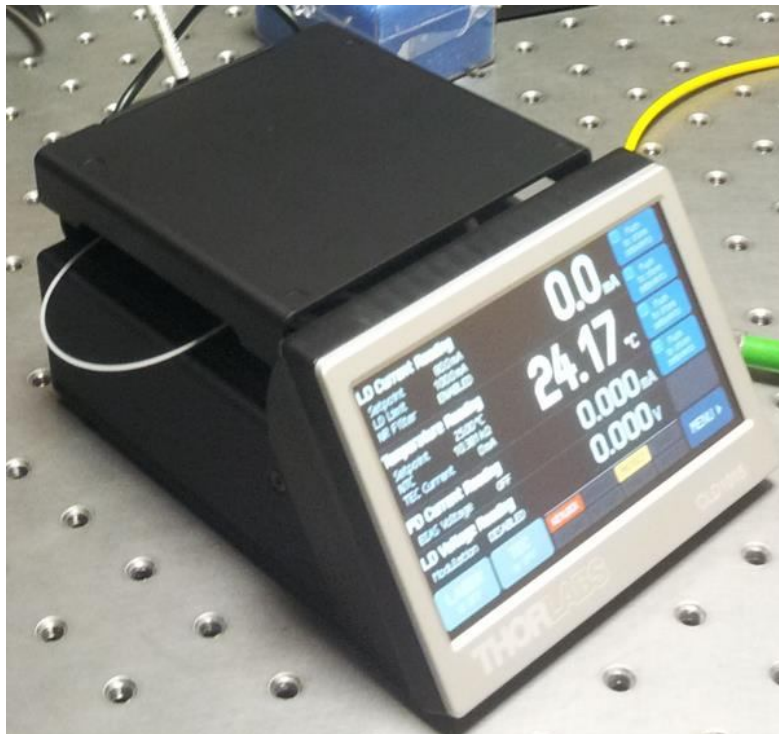
Εικόνα 3-1. Πειραματική διάταξη του συστήματος COWS. Κόκκινη αρίθμηση έχει τοποθετηθεί δίπλα σε οπτικές διατάξεις κλειδιά ώστε να βοηθήσει την αναγνώρισή τους

4. Αναλυτική περιγραφή της διάταξης του πομπού του συστήματος COWS.

Το σύστημα του πομπού αποτελείται από το laser σήματος το οποίο παρέχει το οπτικό φέρον της πληροφορίας. Το laser απεικονίζεται δίπλα στον αριθμό (1) στην Εικόνα 3-1. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά του laser σήματος παρουσιάζονται στην συνέχεια. Η έξοδος του laser σήματος τροφοδοτεί την είσοδο ενός οπτικού διαμορφωτή, ο οποίος αποτυπώνεται δίπλα στον αριθμό (2) στην Εικόνα 3-1. Ο οπτικός διαμορφωτής υπερθέτει την πληροφορία οποιουδήποτε σχήματος διαμόρφωσης στο οπτικό φέρον. Ο χαρακτηρισμός του οπτικού διαμορφωτή παρουσιάζεται στη συνέχεια. Το σύστημα του πομπού ολοκληρώνεται με την εκπομπή της οπτικής δέσμης στον ελεύθερο χώρο. Οι διαδρομές ελεύθερου χώρου που εξετάστηκαν περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια. Στη συνέχεια παρατίθεται ο αναλυτικός χαρακτηρισμός των επιμέρους διατάξεων που απαρτίζουν τον πομπό του πειραματικού συστήματος COWS.

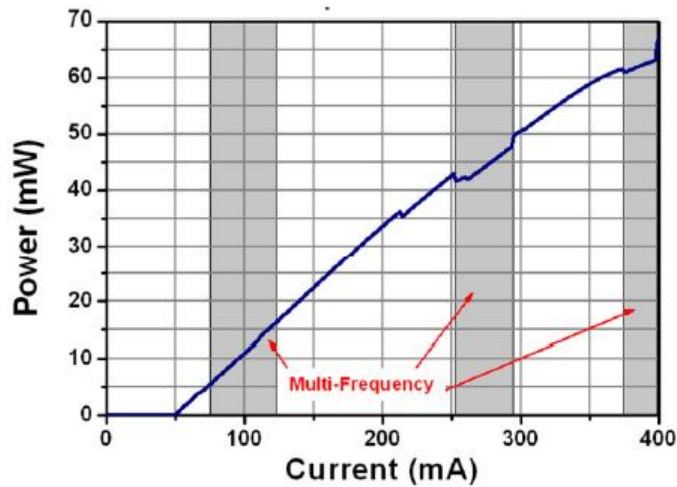
4.1 Laser πομπού.

Όπως προαναφέρουμε στη σύντομη περιγραφή της πειραματικής διάταξης του παρόντος ερευνητικού έργου, βασική και αναπόσπαστη οπτική διάταξη αποτελεί το laser του πομπού, το οποίο αποτυπώνεται με τον αριθμό (1) στην Εικόνα 3-1. Ως laser σήματος επιλέχθηκε το laser με τον κωδικό THORLABS SFL-1550P, το οποίο εκπέμπει με σταθερό μήκος κύματος στα 1550nm με ονομαστικό εύρος γραμμής (linewidth) 50kHz και μέγιστη ισχύ εκπομπής στα 40mW (με ένταση ρεύματος προτεινόμενης λειτουργίας στα 220mA) [1]. Η λειτουργία του laser γίνεται με την βοήθεια ενός κυκλώματος οδήγησης με την κωδική ονομασία CLD1015. Το κύκλωμα CLD1015 είναι υπεύθυνο για την καταγραφή και τον έλεγχο του διερχόμενου ρεύματος αλλά και της θερμοκρασίας του laser. Ο κατασκευαστής του laser μας ενημερώνει ότι η μονοσυχνотική εκπομπή του laser εξαρτάται από το ρεύμα πόλωσης του laser και επομένως και από την ισχύ εκπομπής του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-2. Παρόλα αυτά στην ίδια εικόνα, ο κατασκευαστής δεν μας ενημερώνει για τη θερμοκρασία λειτουργίας του laser, για την οποία αντιστοιχεί αυτή η χαρακτηριστική. Γνωρίζοντας ότι η λειτουργία ενός laser εξαρτάται αυστηρώς από τη θερμοκρασία επιλέξαμε να μελετήσουμε την εξάρτηση αυτή, για το συγκεκριμένο laser.

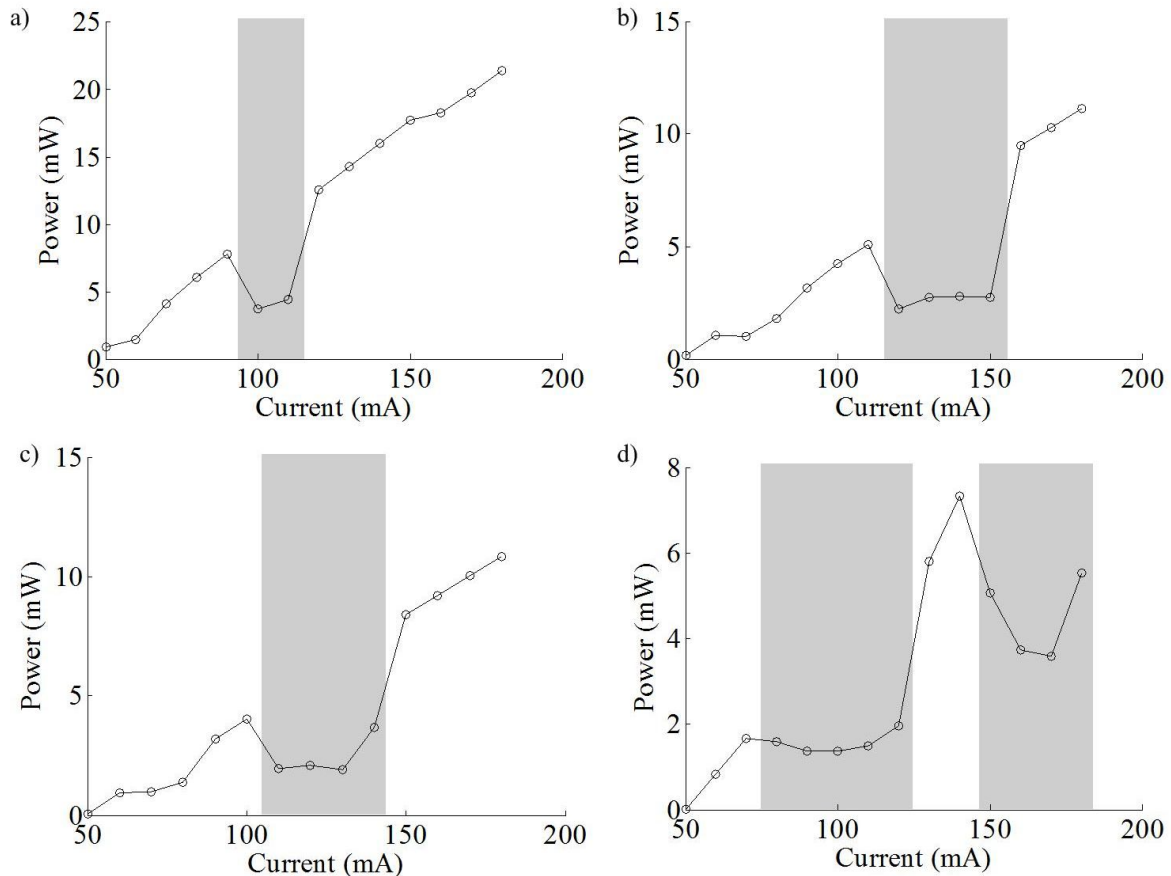


Εικόνα 4-1. Απεικόνιση του laser THORLABS SFL-1550P στο κύκλωμα οδήγησης CLD1015.

Στο πλαίσιο του προγράμματος COWS πραγματοποιήσαμε τη δική μας αξιολόγηση του laser THORLABS SFL-1550P, ώστε να διαπιστωθεί σε ποιο βαθμό το laser παραμένει μονοσυχνотικό συναρτήσει του διερχόμενου ρεύματος αλλά και συναρτήσει της θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα δίνονται στην Εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-2. Χαρακτηριστική ρεύματος-οπτικής ισχύος του laser SFL-1550P, όπως δίνεται από τον κατασκευαστή. Οι γραμμοσκιασμένες περιοχές υποδεικνύουν την πολυσυχνотική λειτουργία.



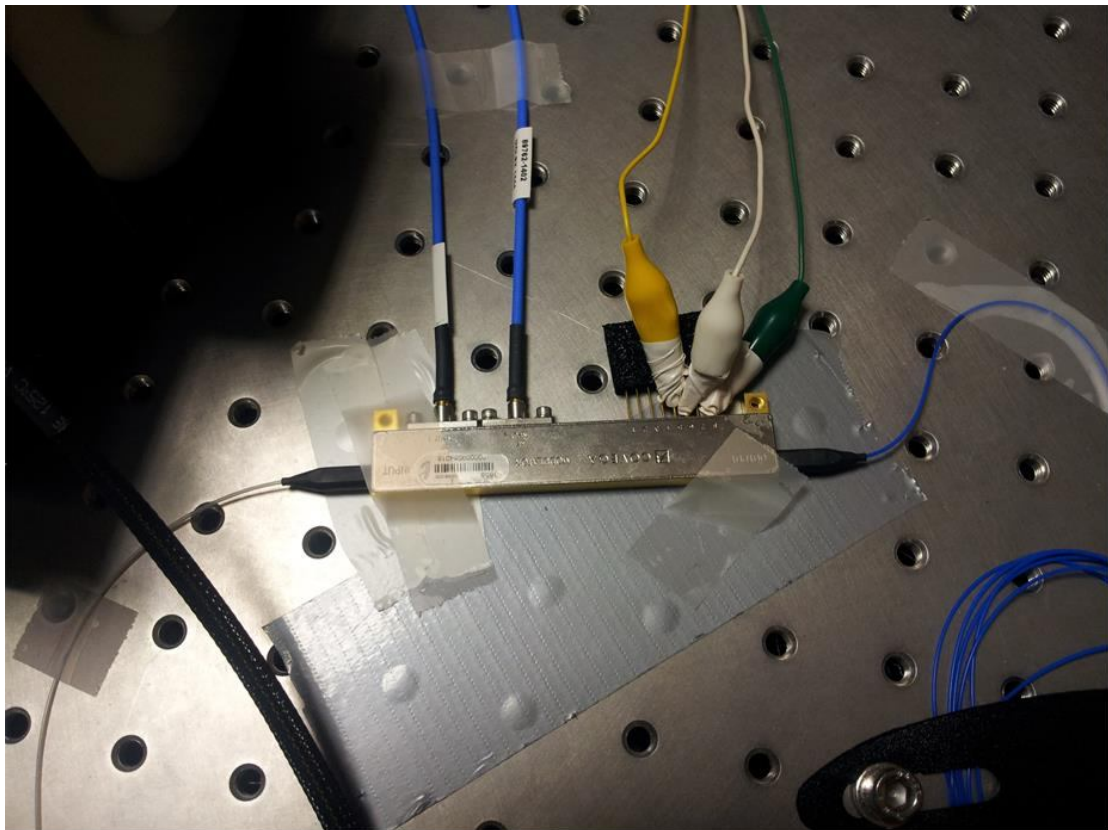
Εικόνα 4-3. Χαρακτηριστικές ρεύματος-οπτικής ισχύος του laser SFL-1550P για θερμοκρασία λειτουργίας a) 21°C, b) 22°C, c) 22.5°C και d) 23°C.

Στην Εικόνα 4-3(a) έως (d), αποτυπώνονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος-ισχύος του laser για θερμοκρασίες 21°C, 22°C, 22.5°C και 23°C αντίστοιχα. Στην ίδια εικόνα με γκρι γραμμοσκίαση αποτυπώνονται οι περιοχές ρεύματος τροφοδοσίας, στις οποίες το laser δεν είναι μονοσυχνотικό. Το γεγονός ότι η ισχύς του φωτός μοιράζεται σε περισσότερες συχνότητες εμφανίζεται ως πτώση της ισχύος που συγκεντρώνεται στα 1550nm. Από τις ανωτέρω χαρακτηριστικές συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερη η πτώση ισχύος στις

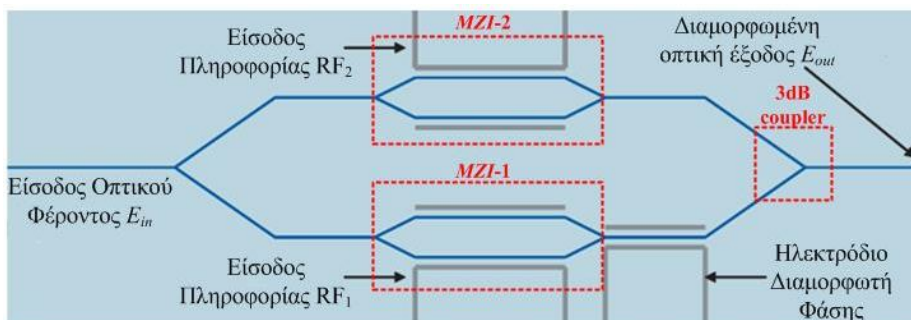
γραμμοσκιασμένες περιοχές τόσο πιο πολυσυχνотικό είναι το εκπεμπόμενο φως. Γνωρίζοντας τις περιοχές ρευμάτων τροφοδοσίας συναρτήσει της θερμοκρασίας, μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι το laser θα λειτουργεί σε μονοσυχνотική λειτουργία αποφεύγοντας τις ανεπιθύμητες επιδράσεις της πολυσυχνотικής λειτουργίας. Η πολυσυχνотική λειτουργία συνοδεύεται με την αύξηση του εύρους γραμμής (linewidth) της πηγής και επομένως με μείωση της συμφωνίας του φωτός που με την σειρά της οδηγεί σε επιδείνωση της σύμφωνης ζεύξης.

4.2 Οπτικός διαμορφωτής.

Ο οπτικός διαμορφωτής είναι η οπτική διάταξη η οποία θα μεταφέρει την πληροφορία από τις RF συχνότητες στο οπτικό πεδίο. Ο οπτικός διαμορφωτής που χρησιμοποιήσαμε στην πειραματική διάταξη του παρόντος ερευνητικού έργου φέρει τον κωδικό LN86S-FC [2], ο οποίος αποτυπώνεται στην Εικόνα 4-4. Στην ίδια εικόνα φαίνεται η είσοδος και η έξοδος του οπτικού φέροντος καθώς και οι δύο RF είσοδοι πληροφορίας. Επιπλέον οκτώ ακροδέκτες τροφοδοσίας τάσης επιτρέπουν την καλύτερη λειτουργία του διαμορφωτή. Ο Πίνακας 4-1 περιγράφει τον σκοπό του εκάστοτε ακροδέκτη τροφοδοσίας.



Εικόνα 4-4. Απεικόνιση του οπτικού διαμορφωτή που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος COWS.



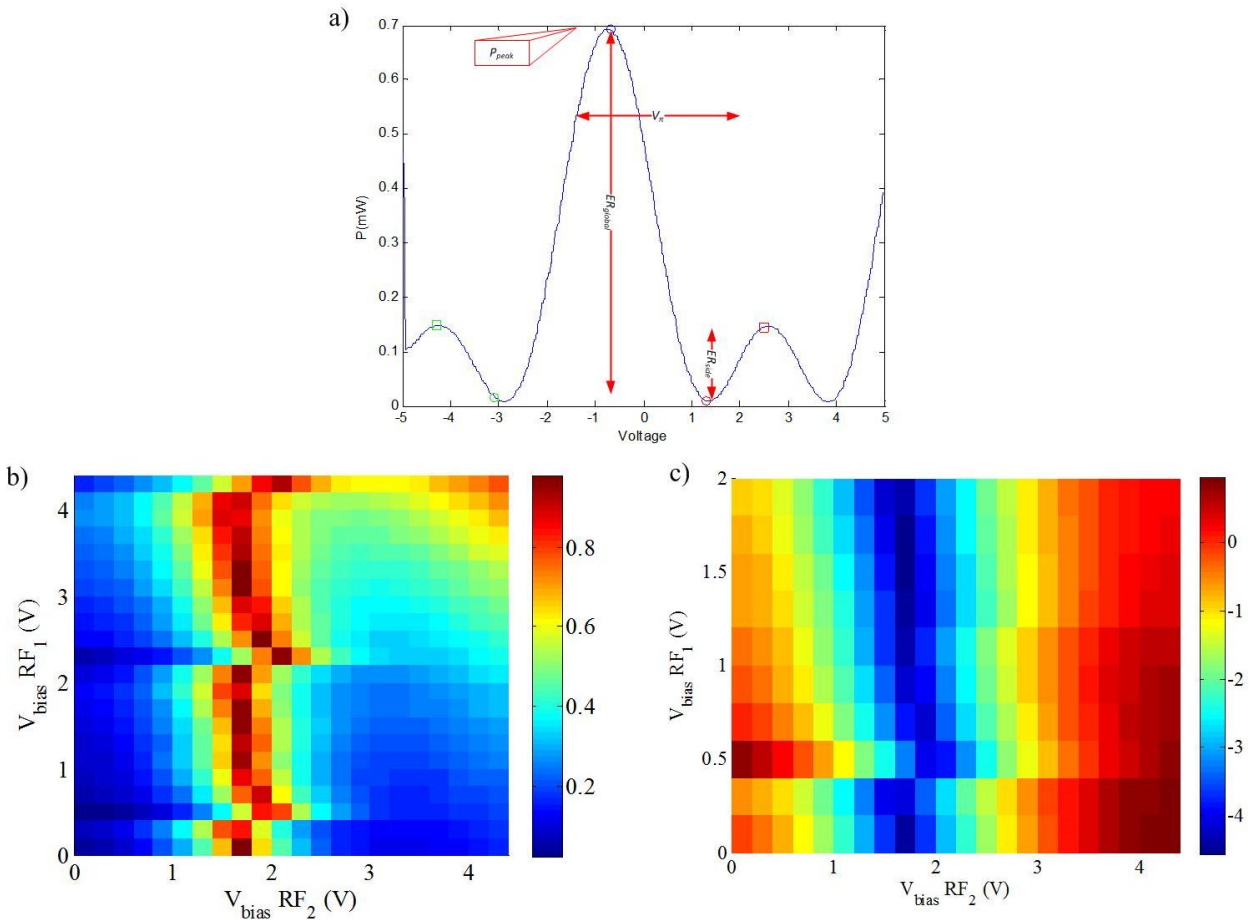
Εικόνα 4-5. Σχηματική αναπράσταση της αρχής λειτουργίας του οπτικού διαμορφωτή.

Ο οπτικός διαμορφωτής αποτελείται από δύο συμβολόμετρα Mach-Zehnder τοποθετημένα στους βραχίονες ενός τρίτου συμβολομέτρου Mach-Zehnder, όπως αποτυπώνει η Εικόνα 4-5. Η αναλυτική περιγραφή του οπτικού σήματος που παράγεται από τον οπτικό διαμορφωτή περιγράφεται με λεπτομέρεια στο παραδοτέο Π4.1. Η δυνατότητα εισόδου δύο ξεχωριστών RF σημάτων στον διαμορφωτή δίνει την δυνατότητα να υπερθέσουμε στο οπτικό φέρον οποιοδήποτε δισδιάστατο αστερισμού διαμόρφωσης όπως M-PSK ή M-QAM, χωρίς παρόλα αυτά να είναι απαγορευτική η χρήση μονοδιάστατου σχήματος διαμόρφωσης όπως το BPSK. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο διαμορφωτής LN86S-FC δέχεται φως συγκεκριμένης πολωτικής κατάστασης, γεγονός που απαιτεί το αδιαμόρφωτο κύμα να περάσει από έναν ελεγκτή πόλωσης πριν διοχετευθεί στο διαμορφωτή. Σε περίπτωση που το οπτικό σήμα δεν συμφωνεί με την πολωτική κατάσταση του διαμορφωτή, τότε η έξοδος θα παρουσιάζεται υποβαθμισμένη σε ισχύ. Το ποσοστό της υποβάθμισης θα είναι αντιστρόφως ανάλογο της ισχύος της προβολής του πεδίου στην πολωτική κατάσταση που ορίζει ο διαμορφωτής.

Πίνακας 4-1. Προσδιορισμός των ακροδεκτών (pin) τροφοδοσίας του οπτικού διαμορφωτή LN86S-FC.

Pin 1 :	NC
Pin 2 :	RF2 Detector
Pin 3 :	NC
Pin 4 :	RF1 Detector
Pin 5 :	RF2 Bias
Pin 6 :	RF1 Bias
Pin 7 :	Phase Modulator
Pin 8 :	Ground

Η καλύτερη διαμόρφωση της πληροφορίας στο οπτικό φέρον γίνεται μέσω της σωστής πόλωσης του οπτικού διαμορφωτή. Η κατάλληλη πόλωση του οπτικού διαμορφωτή επιτυγχάνεται γνωρίζοντας την χαρακτηριστική καμπύλη τάσης πόλωσης συναρτήσει της οπτικής ισχύος. Στην Εικόνα 4-6(a), αποτυπώνεται μία χαρακτηριστική τάσης πόλωσης-ισχύος του διαμορφωτή, δίνοντας έμφαση στα κυριότερα μεγέθη που πρέπει να αξιολογηθούν. Παρατηρώντας την Εικόνα 4-6(a), τα μεγέθη που θα πρέπει να μας απασχολήσουν είναι ο λόγος σβέσης (Extinction Ratio, ER), η μεταβολή του δυναμικού V_{π} του διαμορφωτή, η μέγιστη ισχύς και το πηλίκο των λόγων σβέσης μεταξύ πλευρικών και κεντρικού λοβού (ER_{side}/ER_{global}). Για την καλύτερη αποτύπωση του σήματος πληροφορίας στο οπτικό φέρον θα ήταν επιθυμητό, ο λόγος ER_{side}/ER_{global} να πλησιάζει την μονάδα ενώ ταυτόχρονα να μεγιστοποιείται η ισχύς κορυφής. Προφανώς κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν καθώς τα δύο αυτά μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα. Στην Εικόνα 4-6(b) αποτυπώνεται ο λόγος ER_{side}/ER_{global} συναρτήσει των τάσεων πόλωσης στα συμβολόμετρα MZI-1 και MZI-2, όπως αποτυπώνονται στην Εικόνα 4-5. Στην Εικόνα 4-6(c) αποτυπώνεται η μέγιστη οπτική ισχύς εξόδου του οπτικού διαμορφωτή συναρτήσει του δυναμικού πόλωσης των δύο βραχιόνων. Παρατηρώντας την Εικόνα 4-6(b) βλέπουμε ότι εφαρμόζοντας δυναμικό πόλωσης στον δεύτερο βραχίονα του κεντρικού συμβολομέτρου Mach-Zehnder (V_{bias} RF₂) της τάξης περίπου 2V επιτυγχάνεται μοναδιαίος λόγος ER_{side}/ER_{global} . Κατά την διάρκεια των πειραμάτων επιλέξαμε το μέγιστο που εντοπίζεται στην Εικόνα 4-6(b) για τον συνδυασμό τάσεων (V_{bias} RF₁, V_{bias} RF₂) = (3.3V, 1.7V). Στην Εικόνα 4-7 δίνονται τα επίπεδα διαφοράς δυναμικού όπως εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της πειραματικής διάταξης COWS.



Εικόνα 4-6. Χαρακτηριστική τάσης πόλωσης και οπτικής ισχύος του οπτικού διαμορφωτή (b) Λόγος σβέσης ER_{side}/ER_{global} και c) η οπτική ισχύς εξόδου σε dBm συναρτήσει των τάσεων πόλωσης των δύο βραχιόνων του οπτικού διαμορφωτή.

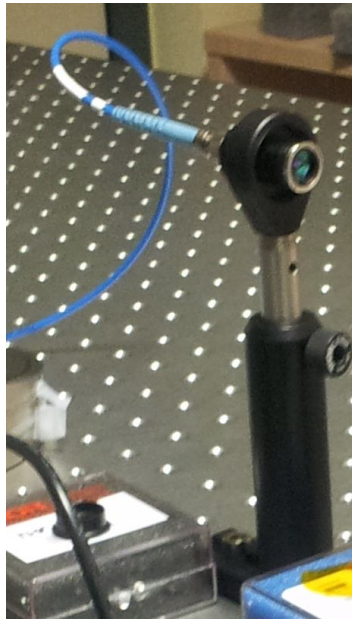
Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του οπτικού διαμορφωτή που θα πρέπει να μελετηθεί ξεχωριστά είναι το δυναμικό V_{π} . Το δυναμικό V_{π} είναι το δυναμικό το οποίο πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να προκληθεί διαφορά φάσης μεταξύ των δύο βραχιόνων ίση με π rad. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το δυναμικό V_{π} εξαρτάται από τη συχνότητα του εισερχόμενου RF σήματος. Βάσει των μετρήσεων που κάναμε στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού έργου, το δυναμικό V_{π} κυμαίνεται από περίπου $2V_{pp}$ για $f_{RF}=1$ kHz έως τα $6.5V_{pp}$ για $f_{RF}=100$ MHz.



Εικόνα 4-7. Επίπεδα διαφοράς δυναμικού όπως εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο της πειραματικής διάταξης του προγράμματος COWS.

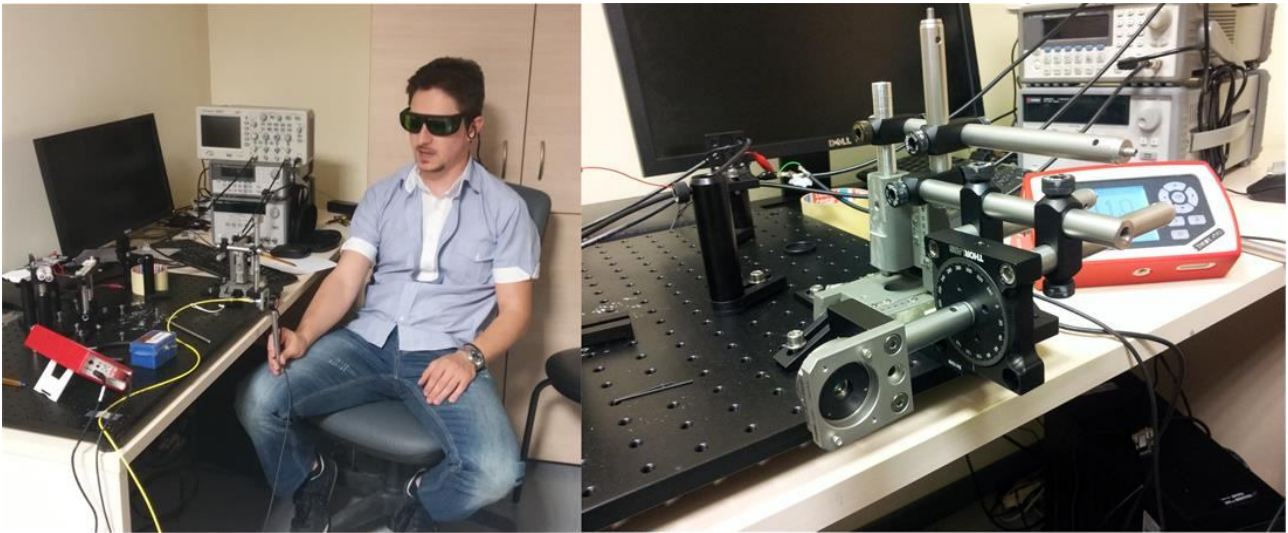
4.3 Οπτική δίοπτρα τριπλού φακού.

Η υπεύθυνη οπτική διάταξη για τη μετάβαση του διαμορφωμένου φωτός από τον περιορισμό της οπτικής ίνας στον ελεύθερο χώρο είναι μία δίοπτρα τριπλού φακού. Η οπτική δίοπτρα που επιλέχθηκε για την πειραματική διάταξη του παρόντος ερευνητικού έργου καλείται TC18FC-1550 [3], η οποία διακρίνεται με τον αριθμό (3) στην Εικόνα 3-1. Η οπτική δίοπτρα TC18FC-1550 είναι ικανή να εκπέμψει τη δέσμη που εξέρχεται από μονότροπη ίνα σε ακτίνα 3.5mm (full width at $1/e^2$) από μονότροπη ίνα, αποτυπώνεται στην Εικόνα 4-8. Η εκπεμπόμενη δέσμη παραμένει παράλληλη (collimated) για περισσότερο από 3m, χωρίς να αυξηθεί η ακτίνα της σημαντικά. Η λειτουργία της οπτικής δίοπτρας περιγράφηκε λεπτομερώς στο παραδοτέο Π4.1. Στην Εικόνα 3-1, η ζεύξη ελεύθερου χώρου ολοκληρώνεται με τη συλλογή της διαμορφωμένης οπτικής δέσμης και την είσοδό της ξανά σε μονότροπη ίνα μέσω της οπτικής πύλης (fiber port) που αριθμείται με (4). Η οπτική πύλη ανήκει στην διάταξη του δέκτη, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια.



Εικόνα 4-8. Οπτική δίοπτρα τριπλού φακού TC18APC-1550.

Στο πλαίσιο των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών ελέγχθηκε η ικανότητα της δίοπτρας τριπλού φακού να διατηρεί την εκπεμπόμενη δέσμη παράλληλη για ένα σεβαστό μήκος. Το μήκος αυτό κατά τις προδιαγραφές του κατασκευαστή ανέρχεται στα 5μ. Στην Εικόνα 4-9, διακρίνεται μέρος της πειραματικής διαδικασίας για την αξιολόγηση της εκπεμπόμενης, από την δίοπτρα, οπτικής δέσμης συναρτήσει της απόστασης. Δειγματοληπτικά αναφέρουμε ότι η μετρούμενη διατομή της δέσμης σε απόσταση 2.2 m ανέρχεται στα 2mm.



Εικόνα 4-9. Μέρος των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της αξιολόγησης της δίοπτρας τριπλού φακού. Αριστερά εικονίζεται μέλος της ερευνητικής ομάδας του προγράμματος COWS να καταμετρά την διάμετρο της δέσμης που εκπέμπεται από την δίοπτρα. Δεξιά διακρίνεται η πειραματική διάταξη για την είσοδο της δέσμης ξανά σε μία οπτική ίνα.

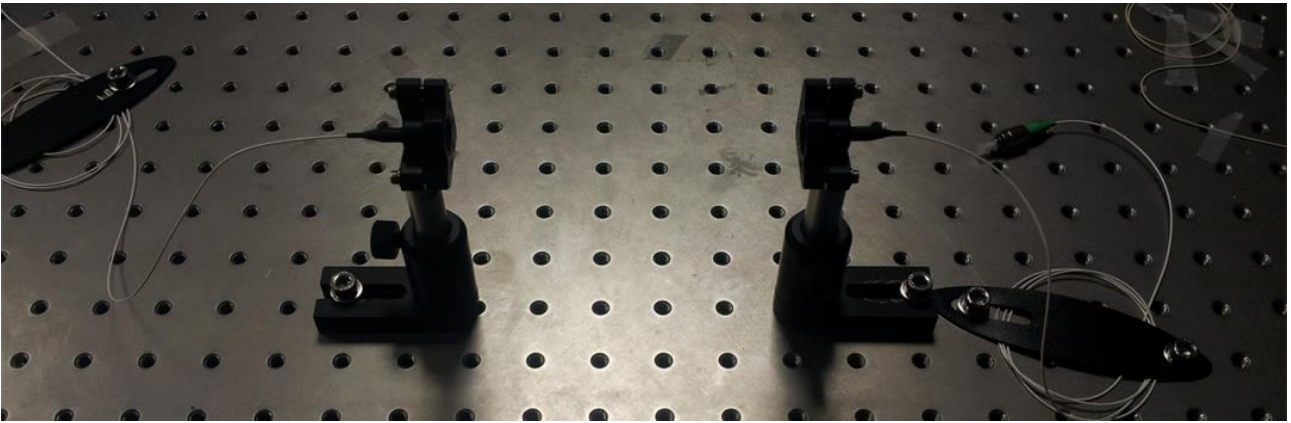
Η καταμέτρηση της διαμέτρου της δέσμης έγινε με την χρήση μετρητή οπτικής ισχύος PM100D [4] εφοδιασμένο με φωτοδέκτη S122C [5], διατάξεις που αναδεικνύονται στην Εικόνα 4-10. Από τα πειράματα που διεξήχθησαν συμπεραίνεται ότι η εκπεμπόμενη δέσμη από τη δίοπτρα τριπλού φακού διατηρεί την αρχική διάμετρο της εγκάρσιας διατομής της σε απόσταση περίπου των τεσσάρων μέτρων, ενώ σε απόσταση των οκτώ μέτρων, η διάμετρος της διατομής της οπτικής δέσμης μετρήθηκε στα 3cm ($1/e^2$ spot size). Στο πλαίσιο της εκτίμησης της εκπεμπόμενης δέσμης προσπαθήσαμε να εισάγουμε τη διευρυμένη δέσμη ξανά σε μία μονότροπη οπτική ίνα με τη βοήθεια της οπτικής πύλης. Η οπτική διάταξη που αποτυπώνεται δεξιά στην Εικόνα 4-9 χρησιμοποιήθηκε για τη σύζευξη της οπτικής δέσμης σε μία οπτική ίνα. Το πολύπλοκο μηχανικό-στήριγμα που διακρίνεται δεξιά στην Εικόνα 4-9 σκοπό έχει την μικρο-μετατόπιση της οπτικής πύλης όσον το δυνατόν κάθετα στη διεύθυνση που ορίζει η οπτική δέσμη ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη είσοδος της δέσμης στην οπτική ίνα.



Εικόνα 4-10. Δεξιά ο μετρητής PM100D και αριστερά ο φωτοδέκτης S122C. Ο συνδυασμός των δύο οπτικών διατάξεων βοηθά στην καταμέτρηση οπτικής ισχύος στον ελεύθερο χώρο.

Μετά από μία αλληλουχία μηχανικών ρυθμίσεων για τη σωστή τοποθέτηση της οπτικής πύλης, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικότερα στην ενότητα 5.1, επετεύχθη η σύζευξη της δέσμης σε οπτική ίνα καταγράφοντας τα αποτελέσματα στον οπτικό φασματικό αναλυτή (Optical Spectrum Analyzer, OSA) με την ισχύ να καταγράφεται στα -4.92dBm .

Μία εναλλακτική ασύρματη οπτική ζεύξη εμφανίζεται επίσης στην Εικόνα 3-1, και αριθμείται με (5). Σε αυτή την εκδοχή, η διαμορφωμένη οπτική δέσμη εκπέμπεται στον ελεύθερο χώρο μέσω μίας διόπτρας μεταβλητού δείκτη διάθλασης (GRIN). Στην Εικόνα 4-11, η ασύρματη ζεύξη απεικονίζεται όπως υλοποιήθηκε μέσω της διόπτρας με κωδική ονομασία 50-1550A-FC [6], η οποία παρέχεται με ενσωματωμένη μονότροπη ίνα. Η διόπτρα 50-1550A-FC εκπέμπει παράλληλη οπτική δέσμη με διάμετρο 0.5mm σε απόσταση περίπου 20cm . Όσο η απόσταση μεγαλώνει, η διάμετρος της δέσμης αυξάνεται, καλύπτοντας με αυτό τον τρόπο μεγαλύτερη επιφάνεια με κόστος την μικρότερη πυκνότητα ισχύος. Στο πλαίσιο της ανάλυσης της οπτικής δέσμης που εκπέμπουν οι διόπτρες GRIN, αξιολογήθηκε η διάμετρος της εγκάρσιας διατομής σε διάφορες αποστάσεις. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι σε απόσταση 1.5m η διάμετρος $1/e^2$ της εγκάρσιας διατομής μετρήθηκε στα 14mm . Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του οπτικού μετρητή ισχύος που αποτυπώνεται στην Εικόνα 4-10. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι για τα προαναφερθέντα πειράματα, όπου η οπτική δέσμη εκπέμπεται στον ελεύθερο χώρο, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά γυαλιά (με κωδική ονομασία LG2) για την προστασία των οφθαλμών του ερευνητικού προσωπικού.



Εικόνα 4-11. Ασύρματη ζεύξη μεταξύ δύο διόπτρων με φακούς βαθμωτού δείκτη διάθλασης (GRIN lens) σε απόσταση 15cm κατά προσέγγιση.

5. Αναλυτική περιγραφή της διάταξης του δέκτη του συστήματος COWS.

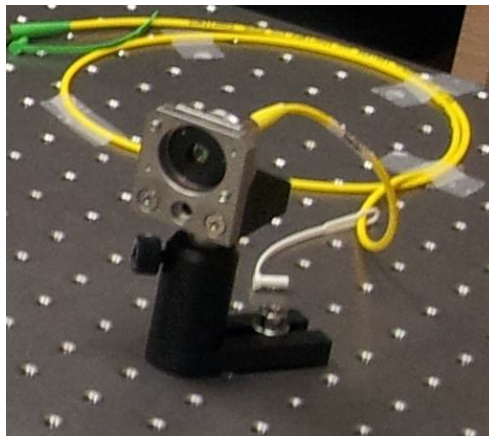
Το σύστημα του δέκτη, αποτελείται από την οπτική πύλη, το laser του τοπικού ταλαντωτή και το σύμφωνο δέκτη, διατάξεις που εμφανίζονται στην Εικόνα 3-1 με τις αριθμήσεις (4), (6) και (7) αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας της οπτικής πύλης παρουσιάζονται στη συνέχεια. Επίσης, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του laser τοπικού ταλαντωτή αλλά και του σύμφωνου δέκτη παρατίθενται στις παρακάτω παραγράφους.

5.1 Οπτική πύλη (Fiber port).

Η οπτική πύλη είναι η υπεύθυνη οπτική διάταξη για την είσοδο του φωτός από τον ελεύθερο χώρο σε μία μονότροπη οπτική ίνα. Η οπτική πύλη που επιλέχθηκε στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού έργου καλείται με την κωδική ονομασία PAF-X-11-C [7] και απεικονίζεται στην Εικόνα 3-1, δίπλα στον αριθμό (4). Η επιλογή της κατάλληλης οπτικής πύλης γίνεται με βάση την αναμενόμενη διάμετρο της οπτικής δέσμης που αναμένεται να φτάσει στην οπτική πύλη, σύμφωνα με την έκφραση,

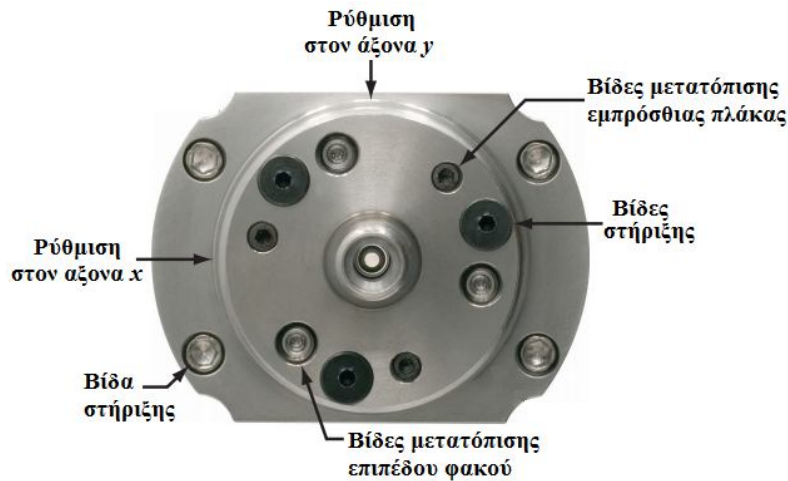
$$f = \frac{\pi D(MFD)}{4\lambda} \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) εκφράζει το επιθυμητό μήκος εστίασης του φακού που θα πρέπει να έχει η οπτική πύλη με βάση τα χαρακτηριστικά της αναμενόμενης προσπίπτουσας δέσμης. Στην εξίσωση (1) με λ συμβολίζεται το προσπίπτον μήκος κύματος, D είναι η διάμετρος της προσπίπτουσας δέσμης και MFD είναι η διάμετρος της εστιασμένης δέσμης. Η οπτική πύλη PAF-X-11-C αποτελείται από ένα ασφαιρικό φακό με την ικανότητα να μετακινείται στις τρεις διαστάσεις χάρη στον εγκιβωτισμό του. Στην Εικόνα 5-2, αποτυπώνεται η πίσω όψη του εγκιβωτισμού της οπτικής πύλης, στην οποία εμφανίζονται όλες οι ρυθμίσεις της θέσεως του φακού στις τρεις διαστάσεις.



Εικόνα 5-1. Απεικόνιση της οπτικής πύλης PAF-X-11-C.

Σημαντικότερες ρυθμίσεις για την επιτυχή συγκέντρωση του μεγαλύτερου ποσοστού του προσπίπτοντος φωτός στην οπτική ίνα, αποτελούν οι ρυθμίσεις στο επίπεδο του φακού (ρύθμιση στους άξονες x και y). Η μετατόπιση του επιπέδου του φακού μέσω των ρυθμίσεων μετατόπισης της εμπρόσθιας πλάκας, επιτυγχάνει την καλύτερη είσοδο και την εστίαση της προσπίπτουσας δέσμης στον πυρήνα της οπτικής ίνας.

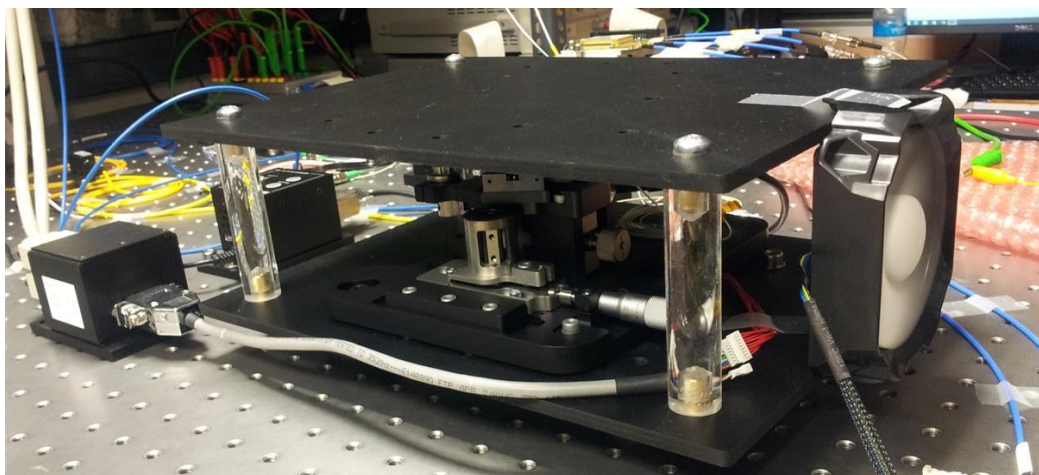


Εικόνα 5-2. Πίσω όψη του εγκιβωτισμού της οπτικής πύλης.

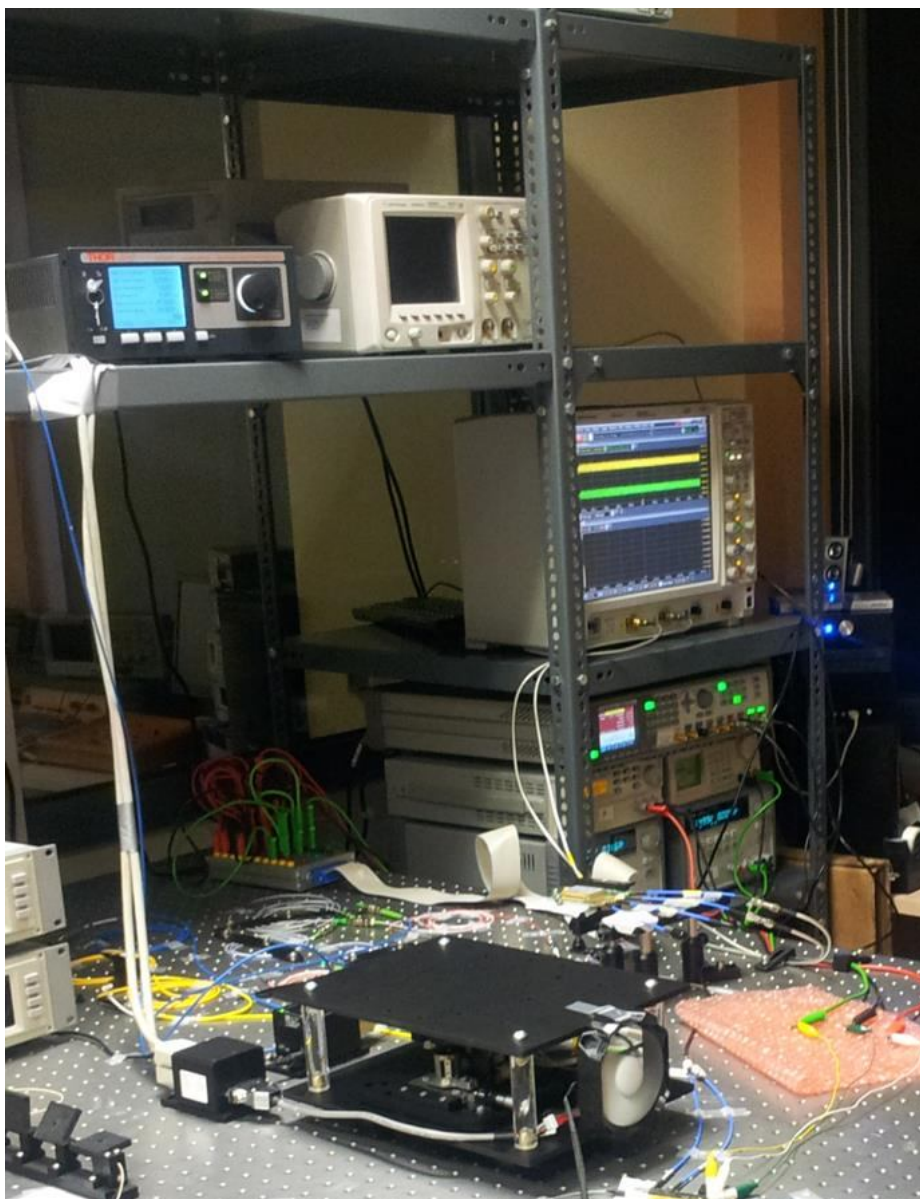
Απαραίτητη προϋπόθεση για την βέλτιστη εστίαση της προσπίπτουσας δέσμης στην οπτική ίνα είναι η απόλυτη ευθυγράμμιση της διόπτρας τριπλού φακού με την οπτική πύλη. Για την κατάλληλη ευθυγράμμιση είναι απαραίτητο να δαπανηθεί ο απαραίτητος χρόνος για τη σωστή τοποθέτηση των διατάξεων, όπως αποτυπώνονται στην Εικόνα 3-1 (διατάξεις με αριθμηση (3), (4) και (5)). Οι ρυθμίσεις που αποτυπώνονται στην Εικόνα 5-2, θα βοηθήσουν για μικρορυθμίσεις της εστίασης του φακού, αφού έχει προηγηθεί η ευθυγράμμιση των διατάξεων. Σε επόμενη παράγραφο περιγράφεται ο ισολογισμός ισχύος της ζεύξης (power link budget), που μας δίνει μία εντύπωση για το πόσο επιτυχής είναι η ασύρματη ζεύξη.

5.2 Laser τοπικού ταλαντωτή.

Το laser τοπικού ταλαντωτή είναι απαραίτητη διάταξη για ένα δέκτη σύμφωνης φώρασης. Το laser του τοπικού ταλαντωτή που επιλέχθηκε για την πειραματική διάταξη του παρόντος ερευνητικού έργου είναι ένα laser ρυθμιζόμενης εξωτερικής κοιλότητας με κωδικό TLK-L1550M [8], το οποίο απεικονίζεται με τον αριθμό (6) στην Εικόνα 3-1. Το laser TLK-L1550M παρέχεται εγκιβωτισμένο, εφοδιασμένο με ηλεκτροκινητήρα ο οποίος αυξομειώνει ηλεκτρονικά την απόσταση της εξωτερικής κοιλότητας του laser παρέχοντας συντονισμούς σε διαφορετικά μήκη κύματος σε μία περιοχή $\pm 50\text{nm}$ γύρω από τα 1550nm. Απαραίτητο χαρακτηριστικό για την οδήγηση του laser TLK-L1550M είναι το κύκλωμα ελέγχου διερχόμενου ρεύματος και θερμοκρασίας του laser, το οποίο καλείται με τον κωδικό ITC4001 [9] και το οποίο αποτυπώνεται με τον αριθμό (9) στην Εικόνα 3-1. Παρά το γεγονός ότι το κύκλωμα ITC4001 προορίζεται για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του laser κατά τη λειτουργία του, η διατήρηση της θερμοκρασίας καθίσταται δύσκολη διαδικασία όταν άλλα όργανα λειτουργούν κοντά στο laser. Στην προσπάθειά μας να βοηθήσουμε στη μείωση της θερμοκρασίας του laser τοποθετήσαμε ένα εξωτερικό ανεμιστήρα ώστε να βελτιώσει τη ροή αέρα από τη διάταξη του laser. Η προσπάθεια αυτή βελτίωσε κατά επιπλέον μισό βαθμό κελσίου την επίδοση του ITC4001.

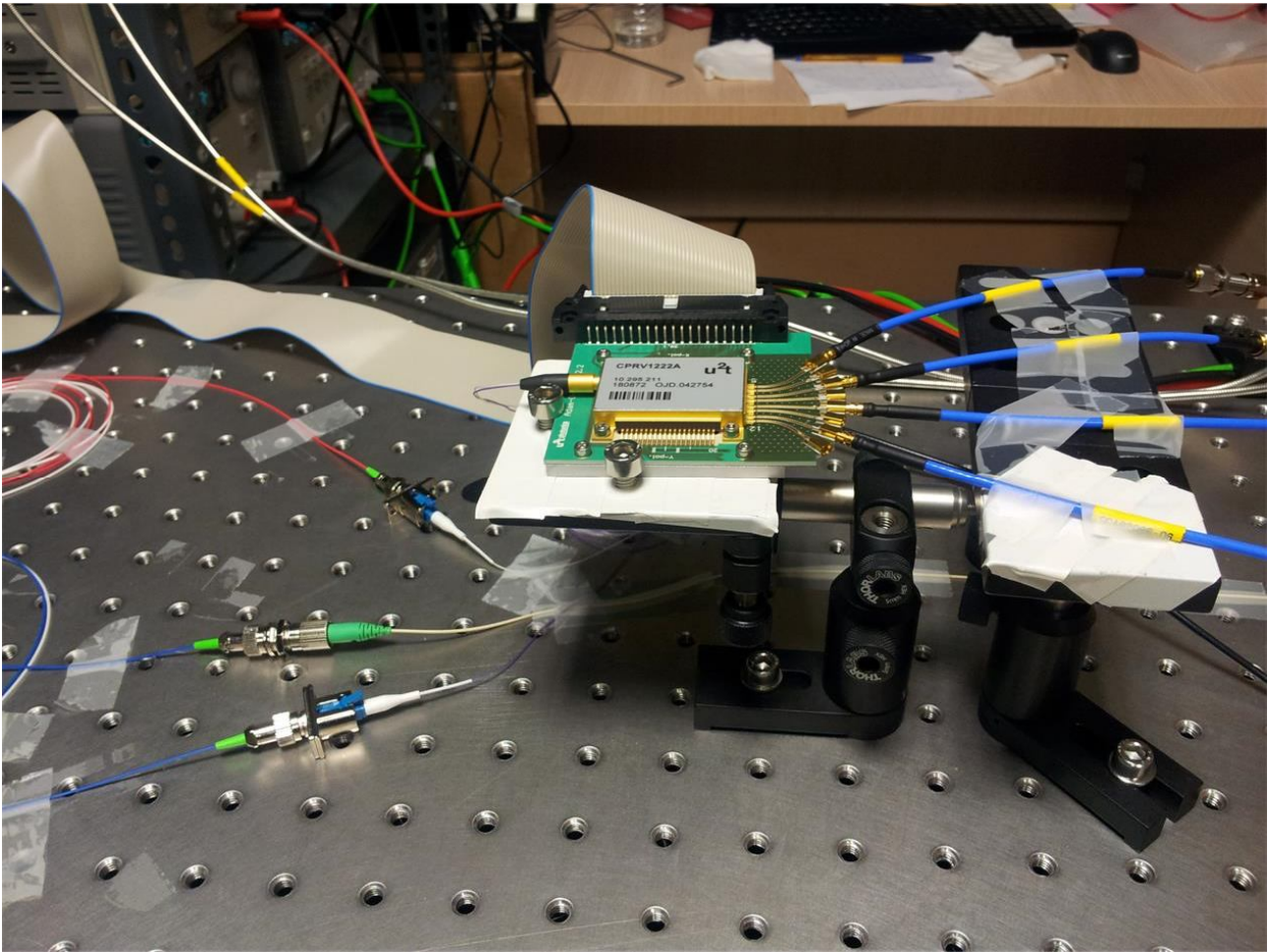


Εικόνα 5-3. Απεικόνιση του laser TLK-L1550M με ενσωματωμένο εξωτερικό ανεμιστήρα.



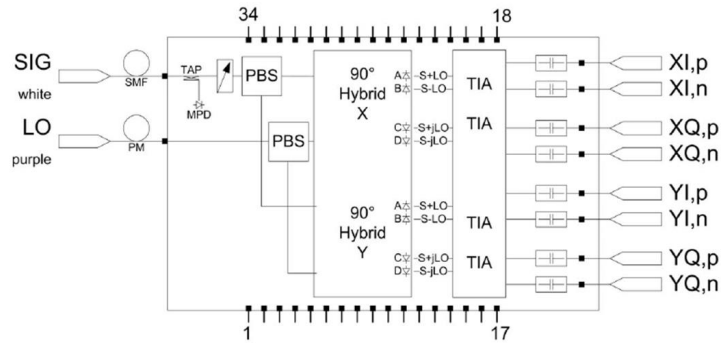
Εικόνα 5-4. Το laser TLK-L1550M ελεγχόμενο από το ελεγκτή ρεύματος και θερμοκρασίας ITC4001 κατά τη διάρκεια πειραμάτων στο πλαίσιο του προγράμματος COWS.

5.3 Σύμφωνος δέκτης.



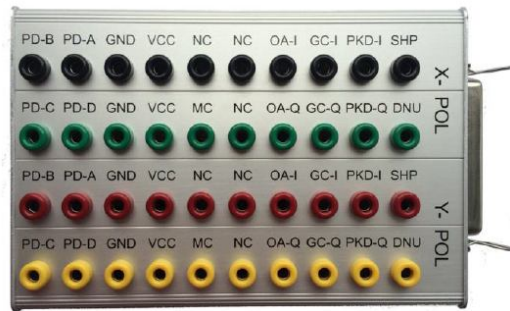
Εικόνα 5-5. Φωτογραφία του σύμφωνου δέκτη CPDV1200 εν ώρα λειτουργίας.

Στην Εικόνα 5-5 διακρίνεται ο σύμφωνος οπτικός δέκτης ο οποίος επιλέχθηκε στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου καλείται με την κωδική ονομασία CPDV1200 της εταιρίας Finisar [10]. Ο CPDV1200 διαθέτει δύο οπτικές εισόδους, μία για το οπτικό διαμορφωμένο σήμα και μία για το σήμα του τοπικού ταλαντωτή. Μετά την διαδικασία της σύμφωνης φώρασης, ο CPDV1200 παρέχει οκτώ RF εξόδους. Οι οκτώ RF εξοδοί αποτελούνται από δύο εξόδους για κάθε πόλωση (IX, QX και IY, QY) καθώς και τις συζυγείς τους εκφράσεις, στο σύνολο λοιπόν οκτώ. Το αναλυτικό κύκλωμα του σύμφωνου δέκτη CPDV1200 απεικονίζεται στην Εικόνα 5-6. Το διαμορφωμένο σήμα αλλά και ο τοπικός ταλαντωτής διέρχονται από διαχωριστές πόλωσης (polarization beam splitter), ώστε να διαχωριστούν οι δύο βασικές συνιστώσες πόλωσης x, y. Στην συνέχεια τα ορθογώνια πολωμένα κύματα εισέρχονται σε ένα υβριδικό συζεύκτη 90 μοιρών, ο οποίος περιγράφηκε στο παραδοτέο 4.1. Στην έξοδο του συζεύκτη λαμβάνουμε το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του μιγαδικού σήματος για κάθε μία από τις συνιστώσες πόλωσης. Τα τελικά σήμα εισέρχονται σε ενισχυτές ΤΙΑ. Στην συνέχεια τα ηλεκτρικά σήματα διέρχονται από υψιπερατά φίλτρα, που στόχο έχουν να απομακρύνουν DC συνιστώσες, πριν φτάσουν στον ακροδέκτη εξόδου (mini SMP).



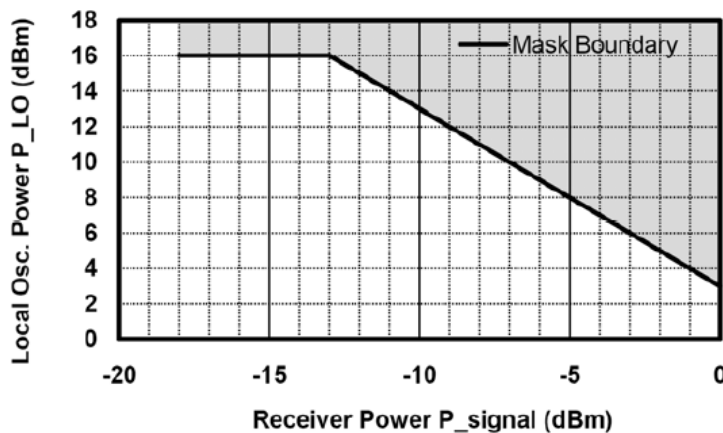
Εικόνα 5-6. Κυκλωματική αναπαράσταση της λειτουργίας του σύμφωνου δέκτη CPDV1200.

Ο σύμφωνος δέκτης είναι μία πολύ ευαίσθητη οπτική διάταξη, η λειτουργία της οποίας θα πρέπει να γίνεται με προσοχή για την αποφυγή βλάβης των φωτοδιόδων και των ενισχυτών TIA. Οι ενισχυτές TIA και οι φωτοδιόδοι που εμπεριέχει ο σύμφωνος δέκτης CPDV1200, πρέπει να τροφοδοτηθούν πρώτοι με DC ισχύ από τους ακροδέκτες που φαίνονται στην Εικόνα 5-7. Για το χειροκίνητο έλεγχο του σύμφωνου δέκτη, τροφοδοτούμε τις φωτοδιόδους (PD-A έως PD-D) και τους TIAs (Vcc) με τάση 3.3V. Στη συνέχεια θέτουμε τους ακροδέκτες ελέγχου ενίσχυσης (GC) με τάση 1.5V, ενώ οι ακροδέκτες MC παραμένουν γειωμένοι. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι φωτοδιόδοι και οι ενισχυτές TIA θα πρέπει να τροφοδοτηθούν με DC ισχύ, προτού εκτεθούν στην οπτική ισχύ. Η αντίστροφη διαδικασία θα πρέπει να τηρηθεί κατά την διαδικασία απενεργοποίησης του σύμφωνου δέκτη.



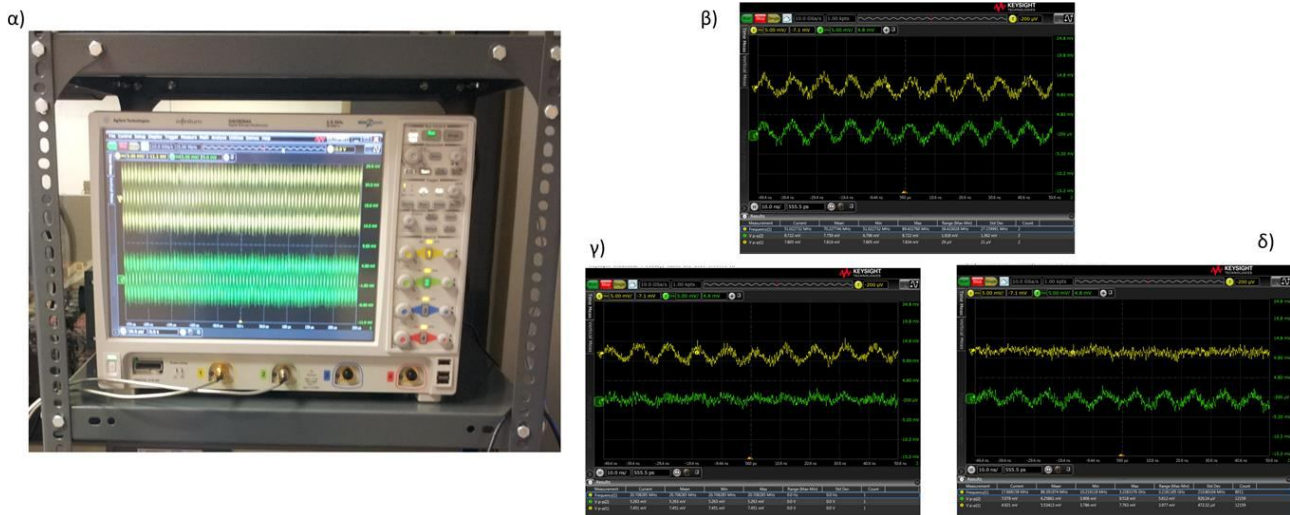
Εικόνα 5-7. Πλατφόρμα DC τροφοδοσίας του σύμφωνου δέκτη CPDV1200.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει δοθεί στο επίπεδο της οπτικής ισχύος που φτάνει στις εισόδους του σύμφωνου δέκτη. Η μέγιστη επιτρεπτή ισχύς του τοπικού ταλαντωτή του επιτρέπεται να μπει στην είσοδο του δέκτη σε σύγκριση με την ισχύ του σήματος αποτυπώνεται στην Εικόνα 5-8. Για παράδειγμα, εάν το οπτικό σήμα που φτάνει στην είσοδο του σύμφωνου δέκτη είναι -10dBm, τότε το σήμα του τοπικού ταλαντωτή στην αντίστοιχη είσοδο του σύμφωνου δέκτη δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα +13dBm.



Εικόνα 5-8. Προτεινόμενη μέγιστη επιτρεπόμενη οπτική ισχύς τοπικού ταλαντωτή συναρτήσει της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος του σήματος.

Στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου, διαπιστώσαμε την καλή λειτουργία του σύμφωνου δέκτη CPDV1200. Χρησιμοποιώντας την πειραματική διάταξη όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 3-1, το σήμα εκπέμπεται από τη διάταξη του πομπού στον ελεύθερο χώρο και συλλέγεται από την οπτική πύλη. Στην συνέχεια εισέρχεται στην είσοδο του σήματος του σύμφωνου δέκτη αφότου έχει διέλθει από έναν ελεγκτή πόλωσης. Χρησιμοποιήθηκε το laser TLK-L1550M ως τοπικός ταλαντωτής τροφοδοτώντας την αντίστοιχη είσοδο του σύμφωνου δέκτη αφότου η οπτική δέσμη πέρασε και αυτή από έναν ελεγκτή πόλωσης. Η έξοδος του σύμφωνου δέκτη τροφοδοτούσε τις εισόδους ενός ψηφιακού παλμογράφου Agilent DSO9254A, ο οποίος αποτυπώνεται στην Εικόνα 5-9(α). Φροντίζεται ώστε τα κανάλια του παλμογράφου να τροφοδοτούνται με τις δύο κάθετες πολώσεις του σήματος, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 5-9(β), στην οποία φαίνεται το διακρότημα που συνεπάγεται η ταυτόχρονη μίξη των δύο κυμάτων στη φωτοδίοδο. Όσο η πόλωση του οπτικού σήματος αλλά και του τοπικού ταλαντωτή δεν είναι προσανατολισμένες στην μία εκ των δύο βασικών συνιστωσών πόλωσης, μία ημιτονική συμπεριφορά παρουσιάζεται και στα δύο κανάλια του παλμογράφου (Εικόνα 5-9(β)). Μεταβάλλοντας τους δακτυλίους του ελεγκτή πόλωσης που έχουμε τοποθετήσει στην οπτική είσοδο του σύμφωνου δέκτη που αντιστοιχεί στο laser του τοπικού ταλαντωτή επιτυγχάνουμε την τάττισης της πόλωσης του τοπικού ταλαντωτή σε μία εκ των βασικών αξόνων της πόλωσης ελαχιστοποιώντας την ορθογώνια πολωτική συνιστώσα. Στην Εικόνα 5-9(γ) και Εικόνα 5-9(δ) προβάλλεται αυτή η διαδικασία για τις δύο κάθετες πολώσεις.



Εικόνα 5-9. α) Ο ψηφιακός παλμογράφος Agilent DSO9254A ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη του COWS, β) αποτύπωση του διακροτήματος στις δύο κάθετες πολώσεις στην έξοδο του σύμφωνου δέκτη. Αλλάζοντας την πολωτική κατάσταση του τοπικού ταλαντωτή με έναν ελεγκτή πόλωσης επιτυγχάνουμε την απομόνωση του ενός γ) και του άλλου καναλιού δ).

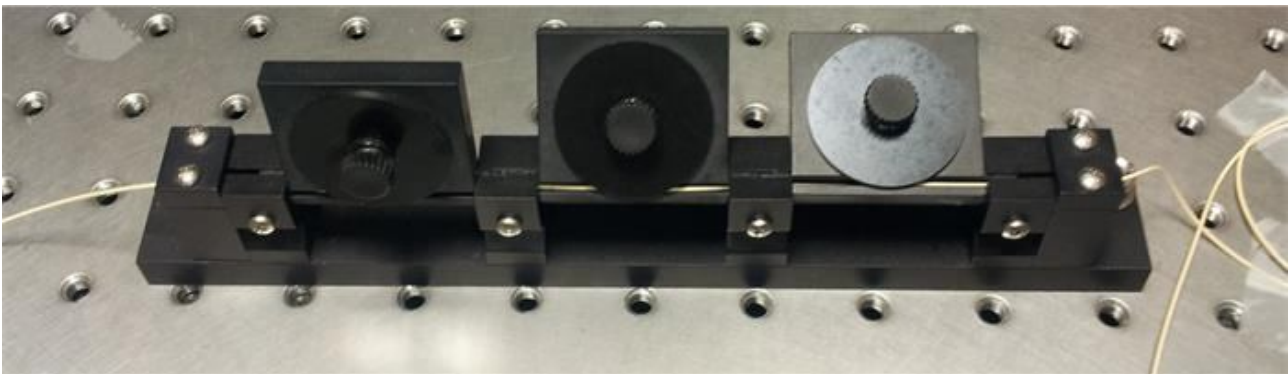
5.4 Ελεγκτές πόλωσης.

Οι ελεγκτές πόλωσης (polarization controller) είναι παθητικές οπτικές διατάξεις οι οποίες επιτρέπουν εν μέρει τον έλεγχο της πολωτικής κατάστασης του διερχόμενου από αυτούς οπτικού κύμα. Στην πειραματική διάταξη του παρόντος ερευνητικού έργου χρησιμοποιήσαμε ελεγκτές πόλωσης στη διάταξη του πομπού αλλά και στη διάταξη του δέκτη. Στην Εικόνα 3-1, αποτυπώνονται οι διάφοροι ελεγκτές πόλωσης με την αρίθμηση (8). Η λειτουργία ενός ελεγκτή πόλωσης είναι σχετικά απλή, καθώς επιτρέπει την μεταβολή της πόλωσης του εισερχόμενου φωτός μέσω της καλά καθορισμένης στρέψης ίνας συγκεκριμένου μήκους που αντιστοιχεί σε κάποιο κλάσμα του μήκους κύματος του φωτός. Επί της ουσίας ένας ελεγκτής πόλωσης εκμεταλλεύεται την εξάρτηση της διπλοθλαστικότητας από την στρέψη της ίνας. Αποδεικνύεται ότι το ποσό της αποφέρουσας διπλοθλαστικότητας είναι ανάλογο του μήκους της ίνας και αντιστρόφως ανάλογο της ακτίνας στρέψης. Ως εκ τούτου, η πιο συχνή μορφή ενός ελεγκτή πόλωσης, η οποία συμπίπτει με αυτή που επιλέχθηκε στα πλαίσια της πειραματικής διάταξης του παρόντος ερευνητικού έργου, είναι αυτή που υποδεικνύεται στην Εικόνα 5-10.



Εικόνα 5-10. Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας ενός ελεγκτή πόλωσης.

Στην Εικόνα 5-10 αποτυπώνεται ένας ελεγκτής πόλωσης που αποτελείται από τρία σπειρώματα ίνας συγκεκριμένου μήκους αλλά και συγκεκριμένης ακτίνας, τέτοιας ώστε να προκαλεί καθυστέρηση στην μία εκ των δύο πολωτικών συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλοντας με αυτό τον τρόπο την πολωτική κατάσταση του φωτός. Αν η καθυστέρηση που προκαλεί το εκάστοτε σπείρωμα ισοδυναμεί με διαφορά μήκους ίσο με $\lambda/4$ ή $\lambda/2$ τότε καλείται σπείρωμα ή πλακίδιο $\lambda/4$ ή $\lambda/2$ αντίστοιχα.



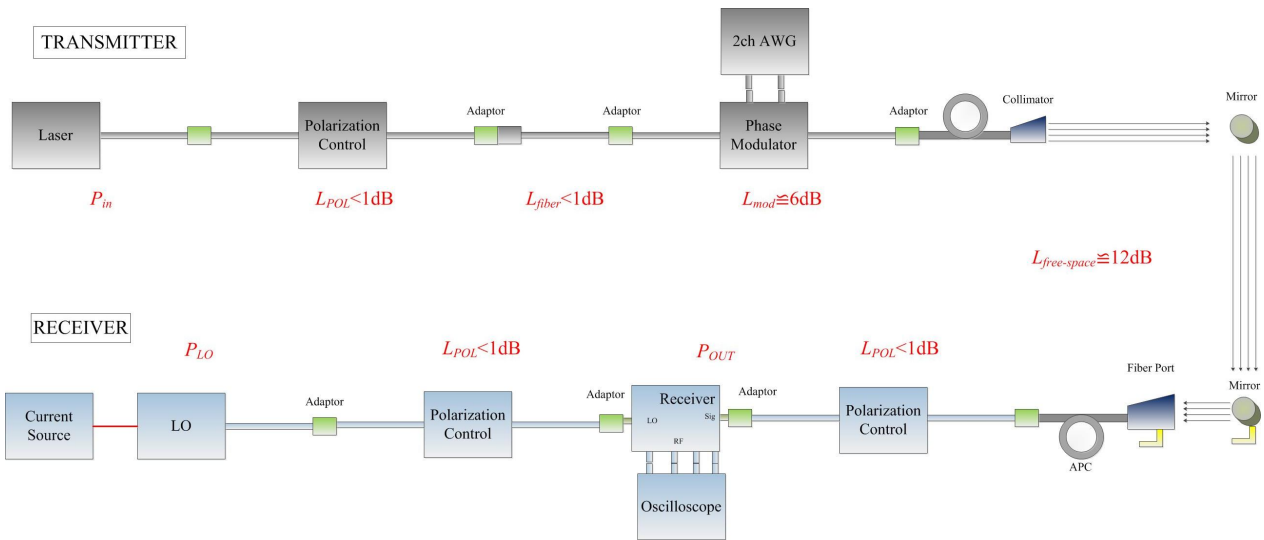
Εικόνα 5-11. Σχηματική απεικόνιση του ελεγκτή πόλωσης τριών πλακιδίων που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος COWS.

6. Ισολογισμός Ισχύος

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η μελέτη για τον προσδιορισμό του ισολογισμού ισχύος των επιμέρους οπτικών διατάξεων και στοιχείων που απαρτίζουν την πειραματική διάταξη του προγράμματος COWS. Στη μελέτη αυτή αξιολογήθηκαν τα επιμέρους οπτικά στοιχεία ως προς την απώλεια ισχύος που επιφέρουν στο διερχόμενο φως σε dB.

6.1 Παράλληλη οπτική δέσμη.

Στην Εικόνα 6-1 παρατίθεται η σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης του προγράμματος COWS με επισήμανση στο επίπεδο των απωλειών που επιφέρει η εκάστοτε διάταξη στο διερχόμενο οπτικό σήμα. Στην ίδια εικόνα με γκρι και μπλε χρώμα προβάλλονται οι διατάξεις, οι οποίες αποτελούν το κύκλωμα του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα.

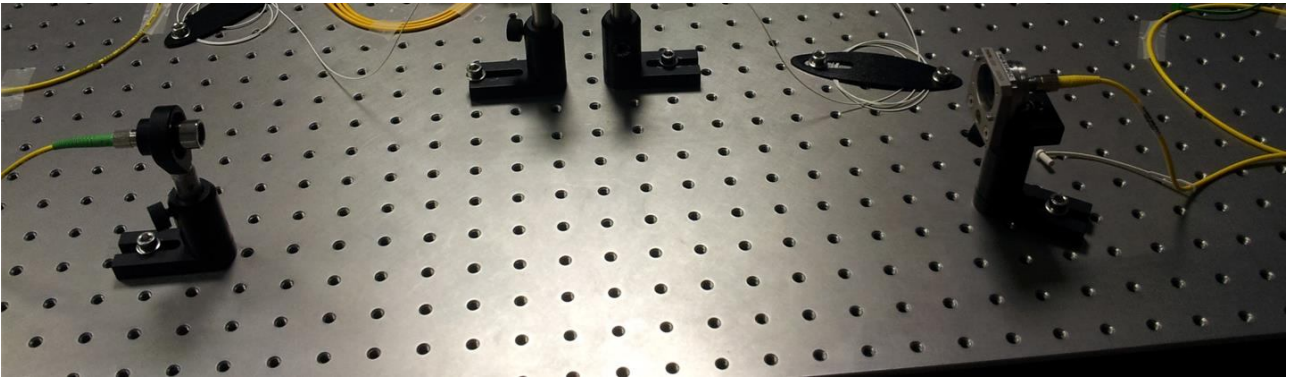


Εικόνα 6-1. Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης του προγράμματος COWS. Με διαφορετικό χρωματισμό αποτυπώνονται οι διατάξεις που αποτελούν τον πομπό (TRANSMITTER) και τον δέκτη (RECEIVER) του συστήματος σύμφωνα με τη φάραση. Με κόκκινη σήμανση αποτυπώνεται το επίπεδο απωλειών που επιφέρουν οι κυριότερες διατάξεις στο διερχόμενο οπτικό σήμα.

Στην Εικόνα 6-1 παρατηρούμε ότι οι επιμέρους συζεύξεις ίνας (απεικονιζόμενες με πράσινα τετράγωνα) καταναλώνουν σε ανακλάσεις αμελητέα ισχύ, η οποία αθροιστικά μπορεί να υποτεθεί ότι επιφέρει απώλειες της τάξης του 1dB στο σύστημα. Η υπόθεση αυτή γίνεται υπό την παραδοχή ότι έχουμε σεβαστεί τις απαιτήσεις κάθε ακροδέκτη (connector) ως προς την συνδεσιμότητα του (επιτρεπτές συνδέσεις είναι μόνο μεταξύ PC/PC και μεταξύ APC/APC). Με αυτό εννοούμε ότι ίνες τερματισμένες με κάθετης ή υπό-γωνία κοπής ακροδέκτη (regular or angular patch cord, PC/APC) θα πρέπει να συνδέονται με όμοιου τύπου ακροδέκτες. Σε αντίθετη περίπτωση, οι προκαλούμενες ανακλάσεις θα επιβαρύνουν άσκοπα το σύστημα. Στην συνέχεια, οι ελεγκτές πόλωσης, οι οποίοι περιγράφονται στην ενότητα 5.4, με την σειρά τους επιφέρουν αμελητέα επιβάρυνση ισχύος στο σύστημα (<1dB ανά ελεγκτή πόλωσης).

Ο οπτικός διαμορφωτής αποτελεί μία πιο πολύπλοκη διάταξη καθώς οι απώλειες που επιφέρει στο σύστημα εξαρτώνται από την τάση πόλωσης που επιβάλλεται στους δύο ακροδέκτες MZI-1 και MZI-2, όπως αναφέρεται στην ενότητα 4.2. Στην περίπτωση όπου καμία διαφορά δυναμικού δεν έχει εφαρμοστεί στους προαναφερθέντες ακροδέκτες, ο οπτικός διαμορφωτής επιφέρει στο σύστημα μία επιβάρυνση περίπου 6dB, η οποία αυξάνεται όταν επιβληθεί διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες MZI-1 και MZI-2 ώστε να πολωθεί κατάλληλα ο διαμορφωτής. Η επιπλέον επιβάρυνση εξηγείται με βάση την Εικόνα 4-6.

Η ασύρματη ζεύξη, η οποία ξεκινά από τον collimator και τελειώνει στο fiber port όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-2, επιφέρει στο σύστημα μία επιβάρυνση της τάξης των 12dB. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της επιβάρυνσης αυτής είναι το γεγονός ότι δεν εξαρτάται από την απόσταση αλλά από τις απώλειες εκπομπής του collimator στον ελεύθερο χώρο καθώς και σε απώλειες σύζευξης πίσω στην οπτική ίνα που προκαλεί το fiber port. Η υπόθεση αυτή ισχύει όσο η δέσμη που εκπέμπεται στον ελεύθερο χώρο παραμένει ευθυγραμμισμένη (collimated) και δεν διευρύνεται.



Εικόνα 6-2. Ασύρματη ζεύξη μεταξύ οπτικής δίοπτρας (collimator) και οπτικής πύλης (fiber port) σε απόσταση 60cm κατά προσέγγιση.

Οι απώλειες που προκαλούν τα επιμέρους οπτικά στοιχεία (collimator και fiber port) ίσως να οφείλονται στο γεγονός ότι περιέχουν φακούς σε περιβάλλον αέρα οι οποίοι είναι πιο επιρρεπείς σε ανακλάσεις. Στο συμπέρασμα αυτό καταλήγουμε, όταν μικρότερο ποσοστό απωλειών καταμετράται με τη χρήση φακών βαθμωτού δείκτη διάθλασης (GRIN), οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι απευθείας σε οπτική ίνα (pigtailed), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-3.



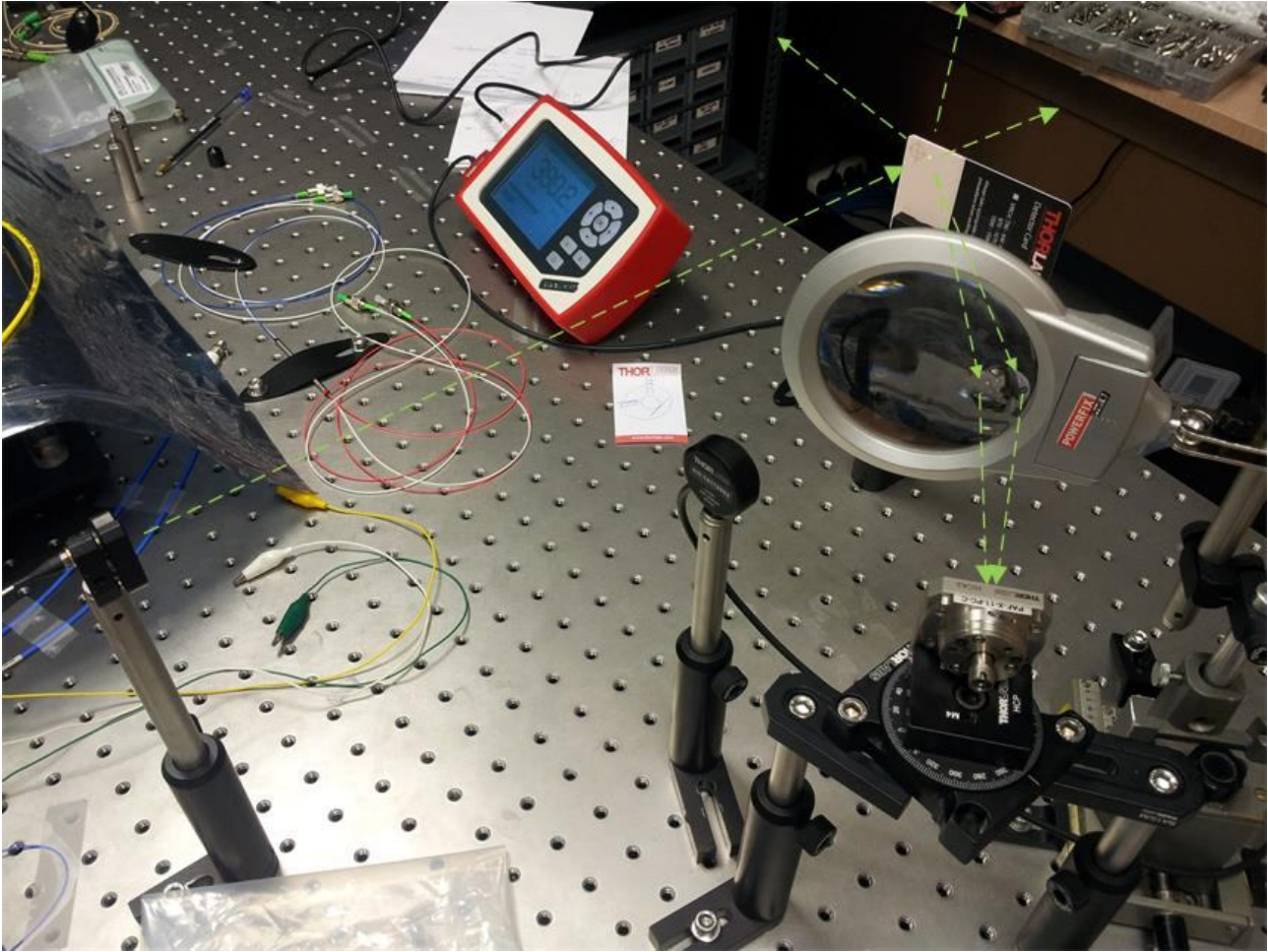
Εικόνα 6-3. Ασύρματη ζεύξη μεταξύ δύο δίοπτρων με φακούς βαθμωτού δείκτη διάθλασης (GRIN lens) σε απόσταση 15cm κατά προσέγγιση.

6.2 Διάχυτη οπτική δέσμη.

Στην προηγούμενη ενότητα περιγράψαμε τον ισολογισμό ισχύος της πειραματικής διάταξης που αποτυπώνεται στην Εικόνα 6-1, στην οποία η οπτική δέσμη που εκπέμπεται στον ελεύθερο χώρο παραμένει παράλληλη (collimated) μέχρι τη συλλογή της από την οπτική πύλη. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη του ισολογισμού ισχύος στην περίπτωση που η δέσμη υπόκειται σε διάχυση. Ένα τέτοιο σενάριο συναντάται συχνά σε συστήματα VLC (Visible Light Communications) καθώς σε εσωτερικούς χώρους υπάρχει μία πληθώρα επιφανειών, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν τη διάχυση της προσπίπτουσας δέσμης. Ο ισολογισμός ισχύος στην περίπτωση όπου η οπτική δέσμη υφίσταται διάχυση (diffusion) σε μία επιφάνεια, είναι πολύ διαφορετική. Παρά το γεγονός ότι με βάση τα συμπεράσματα των προηγούμενων παραδοτέων του προγράμματος COWS η συλλογή διάχυτης ακτινοβολίας δεν θα προκαλέσει πρόβλημα στην περίπτωση της σύμφωνης φώρασης. Επομένως στην περίπτωση που εστιάζουμε το φως σε μία οπτική ίνα, ο θόρυβος shot θα οφείλεται κυρίως στον τοπικό ταλαντωτή και όχι στο περιβάλλον φως.

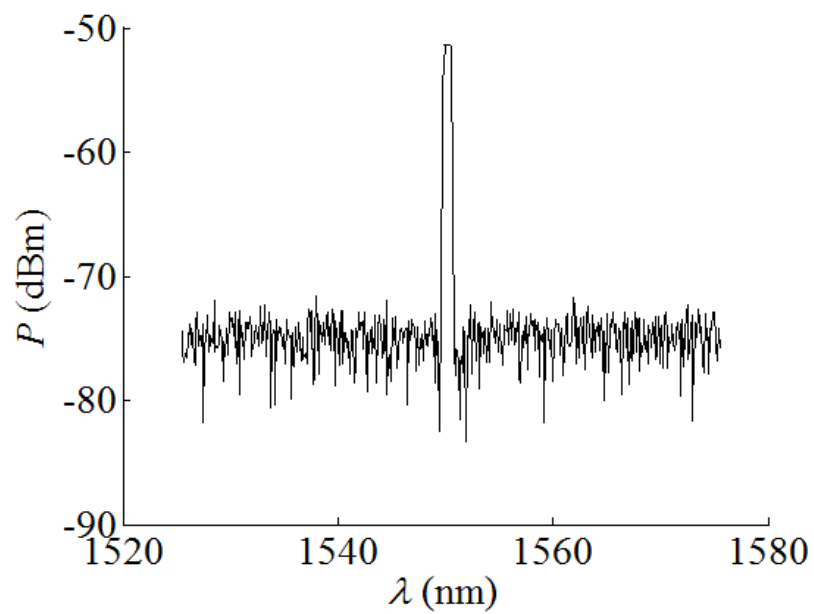
Το χαμηλό επίπεδο της ισχύος του διάχυτου σήματος το οποίο συζεύγνται στην ίνα ($\cong -50\text{dBm}$) δεν επαρκεί για τη διέγερση των φωτοδεκτών του σύμφωνου δέκτη. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το ασύμφωνο ή το μερικώς ασύμφωνο φως δεν μπορεί εύκολα να συζευχθεί σε μία μονότροπη οπτική ίνα

επειδή θα πρέπει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο να ταιριάζει με το βασικό τρόπο διάδοσής της. Η μελέτη αυτή γίνεται καθαρά για την πλήρη περιγραφή του ισολογισμού ισχύος της πειραματικής διάταξης του παρόντος ερευνητικού έργου.



Εικόνα 6-4. Πειραματική διάταξη για τη συλλογή διάχυτης ακτινοβολίας σε μονότροπη ίνα.

Η πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της σύζευξης διαχεόμενης δέσμης σε οπτική ίνα, φαίνεται στην Εικόνα 6-4. Στην εικόνα, αποτυπώνεται ο φακός GRIN να εκπέμπει οπτική δέσμη, η οποία παραμένει παράλληλη μέχρι τη στιγμή που προσπίπτει στην επιφάνεια που προκαλεί τη διάχυση της. Μετρώντας την ανακλώμενη οπτική ισχύ σε διάφορα σημεία μακριά από την διάχυτη επιφάνεια, εντοπίζουμε περίπου το ίδιο επίπεδο ισχύος (περίπου $20\mu\text{W}$). Το γεγονός αυτό μας δίνει μίας πρώτης τάξης ένδειξη ότι η ακτινοβολία έχει υποστεί διάχυση. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένας τυπικός αμφίκυβος φακός ώστε να συγκεντρώσουμε ένα κομμάτι ακτινοβολίας στην είσοδο της οπτικής πύλης, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 6-4. Με την χρήση του φακού αυξήθηκε η προσπίπτουσα οπτική ισχύς αυξήθηκε στα $80\mu\text{W}$. Η έξοδος της οπτικής πύλης τροφοδοτεί την είσοδο ενός οπτικού φασματογράφου, ο οποίος κατέγραφε το ποσοστό της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος που διεγείρει τον κυματοδηγούμενο τρόπο της ίνας. Στην Εικόνα 6-5, αποτυπώνεται η οπτική ισχύς που κατέγραψε ο οπτικός φασματογράφος MS9740A. Στην ίδια εικόνα, φαίνεται ότι η καταγεγραμμένη οπτική ισχύς φτάνει τα -51dBm . Εάν αναλογιστούμε ότι στην είσοδο της οπτικής πύλης φτάνουν περί τα $80\mu\text{W}$, τότε η συνολική υποβάθμιση της διάχυτης ακτινοβολίας κυμαίνεται περίπου στα -40dB .



Εικόνα 6-5. Οπτική ισχύς που μετρήθηκε από τον οπτικό φασματογράφο.

7. Σύμφωνη αποδιαμόρφωση σήματος.

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η επεξεργασία του διαμορφωμένου σήματος που θα πρέπει να υλοποιηθεί για την μετά την εκπομπή και λήψη του σήματος στον ελεύθερο χώρο αλλά και τη συλλογή του από τον σύμφωνο οπτικό δέκτη. Επίσης παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και η ανάλυση της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (digital signal processing, DSP) σύμφωνης αποδιαμόρφωσης ενός οπτικού M-PSK σήματος.

7.1 Πειραματική διάταξη.

Προτού ξεκινήσουμε την περιγραφή της διαδικασίας αποδιαμόρφωσης της πληροφορίας που εκπέμφθηκε στον ελεύθερο χώρο, θεωρούμε χρήσιμο να επαναλάβουμε τη διαδρομή που ακολουθεί το φως και η πληροφορία στο προαναφερθέν τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Ξεκινώντας λοιπόν το οπτικό φέρον, το οποίο γεννιάται από το laser SFL-1550P (βλέπε παράγραφο 4.1), τροφοδοτεί την οπτική είσοδο του διαμορφωτή LN86S-FC (βλέπε παράγραφο 4.2). Όπως αναφέρεται στην ενότητα 4.2, είναι απαραίτητο να παρεμβληθεί ένας ελεγκτής πόλωσης μεταξύ του laser και της οπτικής εισόδου του διαμορφωτή ώστε να ευθυγραμμιστεί το εισερχόμενο φως με την πολωτική κατάσταση του διαμορφωτή. Στη συνέχεια το φως διαμορφώνεται με βάση το RFσήμα που εισέρχεται στις δύο εισόδους του διαμορφωτή και εξέρχεται διαμορφωμένο. Το διαμορφωμένο φως στη συνέχεια εκπέμπεται στον ελεύθερο χώρο με τη βοήθεια μίας διόπτρας τριπλού φακού (βλέπε ενότητα 4.3). Το φως διανύει μία απόσταση στον ελεύθερο χώρο, η οποία κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως αρκετά μέτρα (πάνω από οκτώ μέτρα σύμφωνα με τις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πειραματική διάταξη του παρόντος ερευνητικού έργου), όπως αναφέρεται στην ενότητα 4.3. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ζεύξη δεν είναι απαραίτητο να υλοποιηθεί σε ευθεία γραμμή (line-of-sight, LOS), καθώς η χρήση κατάλληλων καθρεπτών, όπως παρουσιάζει η Εικόνα 7-1, μπορεί να οδηγήσει τη δέσμη από τον πομπό στο δέκτη μέσω διαδοχικών ανακλάσεων.



Εικόνα 7-1. Καθρέπτης διαμέτρου 4cm, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την οδήγηση της οπτικής δέσμης από την διόπτρα τριπλού φακού στην οπτική πύλη σε πειράματα όπου οι δύο free-space διατάξεις δεν ήταν ευθυγραμμισμένες.

Στη συνέχεια, το εκπεμπόμενο φως συλλέγεται από μία οπτική πύλη, ρυθμισμένη με προσοχή ώστε να παρέχει τις λιγότερες δυνατές απώλειες σύζευξης (βλέπε ενότητα 5.1). Το διαμορφωμένο φως, συλλεγμένο από την οπτική πύλη τροφοδοτεί την οπτική είσοδο του σύμφωνου δέκτη, ο οποίος παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3. Ταυτόχρονα, αδιαμόρφωτο φως από το laser του τοπικού ταλαντωτή (βλέπε ενότητα 5.2), με όσον το δυνατόν ίδιο μήκος κύματος με το αρχικά εκπεμπόμενο οπτικό σήμα, από το laser SFL-1550P, τροφοδοτεί την δεύτερη οπτική είσοδο του σύμφωνου δέκτη. Όπως περιγράφει η ενότητα 5.3, ο σύμφωνος δέκτης είναι εφοδιασμένος με διαχωριστές πόλωσης (polarization beam splitters, PBS) για την οπτική είσοδο που αντιστοιχεί στο διαμορφωμένο σήμα. Ειδική προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην οπτική ισχύ που εισέρχεται στο σύμφωνο δέκτη και στις δύο οπτικές εισόδους, όπως προτείνει η Εικόνα 5-8, για να προστατευθούν οι φωτοδέκτες.

Ο εν λόγω σύμφωνος δέκτης, μας παρέχει στην έξοδο RF σήματα, τα οποία αντιστοιχούν στην παράλληλη (in-phase, I) και την ορθογώνια (quadrature, Q) συνιστώσα της διαμόρφωσης, στις δύο πολώσεις (x και y). Για την ολοκλήρωση της πειραματικής διάταξης, τα τέσσερα RF σήματα (I_x, I_y και Q_x, Q_y) τροφοδοτούν τα κανάλια ενός ψηφιακού παλμογράφου, με σκοπό την οπτική αποτύπωση και την διοχέτευσή τους σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία (DSP). Η DSP διαδικασία εμπεριέχει την αναγνώριση και αντιστάθμιση φαινομένων που επιδρούν στην φάση αλλά και στη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος. Η διαδικασία ανάκτησης της φάσης (phase recovery) αφορά το θόρυβο φάσης που επιβάλλει το εκάστοτε laser στη διαδικασία με αποτέλεσμα ο αστερισμός της εκάστοτε διαμόρφωσης στο μιγαδικό επίπεδο να απεικονίζεται με μία στροφή φάσης. Από την άλλη η ανάκτηση της συχνότητας (frequency recovery) απαιτείται για την αντιμετώπιση μικρών διαφορών στο μήκος κύματος μεταξύ οπτικού σήματος και τοπικού ταλαντωτή, το οποίο θα προκαλέσει μία συχνοτική διαφορά που θα εμφανιστεί ως εναπομείνουσα ενδιάμεση συχνότητα στην απεικόνιση του παλμογράφου [11]. Κατα αντιστοιχία μία διαφορά στα μήκη κύματος κατά 0.8nm θα προκαλέσει μία συχνοτική περιβάλλουσα της τάξης των 100GHz. Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάκτηση της φάσης του σήματος, την αποδιαμόρφωση της πληροφορίας και την εκτίμηση ποιοτικών στοιχείων της ζεύξης όπως το πηλίκο ισχύος συμβόλου προς ισχύ θορύβου (symbol to noise ration, SNR), το πηλίκο οπτικής ισχύος συμβόλου προς ισχύ θορύβου (optical SNR, OSNR) και το πηλίκο των λαθών προς τα συνολικά bit πληροφορίας που εστάλησαν (bit-error rate, BER) [11].

7.2 Διαδικασία ανάκτησης φάσης.

Η διαδικασία ανάκτησης της φάσης ξεκινάει με την υπόθεση ότι οι διακυμάνσεις της φάσης της φέρουσας συχνότητας είναι πολύ πιο αργές από τις διακυμάνσεις που προκαλεί στο σήμα το επιλεγμένο σχήμα διαμόρφωσης. Επομένως η διαδικασία εκτίμησης της φάσης βασίζεται στο γεγονός ότι μία ακριβής εκτίμηση της φάσης μπορεί να εξαχθεί παίρνοντας το μέσο όρο της φάσης πάνω σε διαστήματα που περιέχουν πολλά σύμβολα, όπως περιγράφει η παρακάτω διαδικασία. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τα δεδομένα που αντλούνται από τον ψηφιακό παλμογράφο, αποθηκεύονται σε μορφή δειγμάτων (samples), το πλήθος των οποίων επιλέγεται με βάση την ικανότητα δειγματοληψίας του παλμογράφου.

Η διαδικασία ξεκινά με την δημιουργία των δειγμάτων σήματος $E(n)=I(n)+jQ(n)$, όπου n είναι το πλήθος των δειγμάτων που επεξεργάζεται κάθε φορά η διαδικασία. Στη συνέχεια το σήμα $E(n)$ χωρίζεται σε M μπλοκ N δειγμάτων το καθένα, τα $E_k(i)$ με $k=1..M$ και $i=1..N$. Στη συνέχεια αφαιρείται η διαμόρφωση φάσης που έχει υιοθετηθεί (τάξης N_Q) υψώνοντας κάθε μπλοκ δειγμάτων στην αντίστοιχη N_Q δύναμη, $E_k^{N_Q}(i)$.

Αθροίζοντας τα μιγαδικά δείγματα $E_k^{N_Q}(i)$ του k -οστού μπλοκ δειγμάτων, ώστε να παρθεί ο μέσος όρος της φάσης στο συγκεκριμένο μπλοκ. Η προκύπτουσα φάση στη συνέχεια διαιρείται με την τάξη διαμόρφωσης N_Q ώστε η εκτίμηση που θα προκύψει να εντοπίζεται μεταξύ της περιοχής δράσης ενός συμβόλου διαμόρφωσης φάσης, δηλαδή από $-\pi/N_Q$ έως π/N_Q . Συνοπτικά η προαναφερθείσα διαδικασία συγκεντρώνεται στην παρακάτω έκφραση,

$$\varphi_{est}(k) = \frac{1}{N_Q} \arg \left[\sum_{i=1}^N E_k^{N_Q}(i) \right] \quad (2),$$

όπου το $\varphi_{est}(k)$ είναι η εκτίμηση της φάσης για το k -οστό μπλοκ δειγμάτων. Στη συνέχεια η εκτίμηση φάσης του εκάστοτε μπλοκ αφαιρείται από την πραγματική φάση του μπλοκ. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι τα αρχικά δεδομένα θα πρέπει αν είναι διαφορικά προκωδικοποιημένα (differentially precoded data) για να λειτουργεί σωστά η προαναφερθείσα διαδικασία, παρά το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιείται διαφορική φάραση (differential detection).

Η διαδικασία αυτή, υλοποιημένη σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB παρατίθεται παρακάτω:

```
Phase estimation.m
```

```
function phi=phase_estimate(s,NQ,N)
%
% phi=phase_tracking(sm,Nq,nblock)
```



```

%
% Phase tracking of a NQ-QAM signal s impaired by phase noise
% N is the block length of the phase estimator
% for the phase estimation algorithm see Gagnon et al, JOURNAL OF LIGHTWAVE
% TECHNOLOGY, VOL. 24, NO. 1, JANUARY 2006, p. 12
%
M=floor(length(s)/N);          % number of blocks to be used
phi=zeros(1,length(s));      % phase estimates

for m=0:(M-1)
    sb=s(m*N+1:m*N+N);      % symbols of the block
    e=sum(sb.^NQ);          % remove phase modulation
    phie=1/NQ*angle(e);      % obtain phase estimate inside [-pi/NQ +pi/NQ]
    phi(m*N+1:m*N+N)=phie;  % assign phase estimates
end

```

PSK Demodulation.m

```

function [sdr,sr]=psk_demod(s,Nq,nb);
% sdr=psk_demod(s,Nq);
%
% decode the PSK symbols using phase estimation
% nb is the block size used in the phase estimator modules
% Nq is the PSK order
% s are the symbol estimates

phie=phase_estimate(s,Nq,nb); % estimate phase
phir=angle(s)-phie; % calculate phase difference
spsk=psk_constellation(Nq); % PSK constellation
sr=zeros(1,length(phir)); % received symbol estimates

for m=1:length(sr)
    [~,i]=min(abs(exp(j*phir(m))-spsk));
    sr(m)=spsk(i);
end

sdr=zeros(1,length(sr)-1); % obtain differential symbol
for m=1:length(sr)-1
    % estimate differential phase between two successive symbols
    dphir=angle(sr(m+1))-angle(sr(m));
    [~,i]=min(abs(exp(j*dphir)-spsk)); % obtain the corresponding symbol
    sdr(m)=spsk(i);
end

```

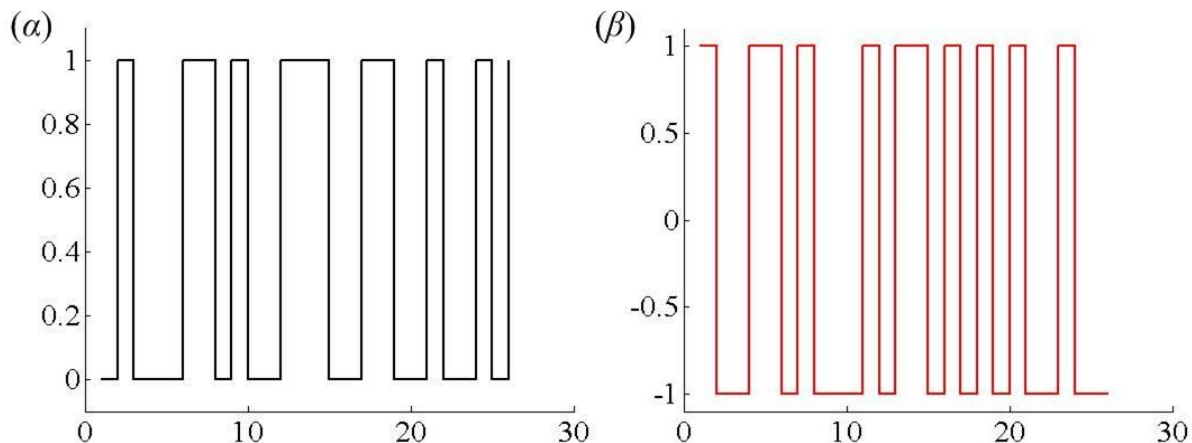
```

% Apply phase correction
if m~=1
    if (phie(m)-phie(m-1))<~-pi/Nq
        sdr(m-1)=sdr(m-1)*exp(-j*2*pi/Nq);
    elseif (phie(m)-phie(m-1))>pi/Nq
        sdr(m-1)=sdr(m-1)*exp(+j*2*pi/Nq);
    end
end
end
end

```

7.3 Πειραματικά αποτελέσματα ανάκτησης φάσης.

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας του παρόντος ερευνητικού έργου εφαρμόζουμε την παραπάνω διαδικασία για την αποδιαμόρφωση ενός απλού σχήματος διαμόρφωσης φάσης. Υιοθετούμε το δυαδικό PSK (ή BPSK) για την απλή διαπίστωση της ορθότητας της προαναφερθείσας διαδικασίας ανάκτησης φάσης. Με βάση την διαδικασία αυτή, δημιουργούμε μία τυχαία ακολουθία bit πληροφορίας η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-2(α). Κωδικοποιώντας την ίδια ακολουθία διαφορετικά καταλήγουμε στην Εικόνα 7-2(β).

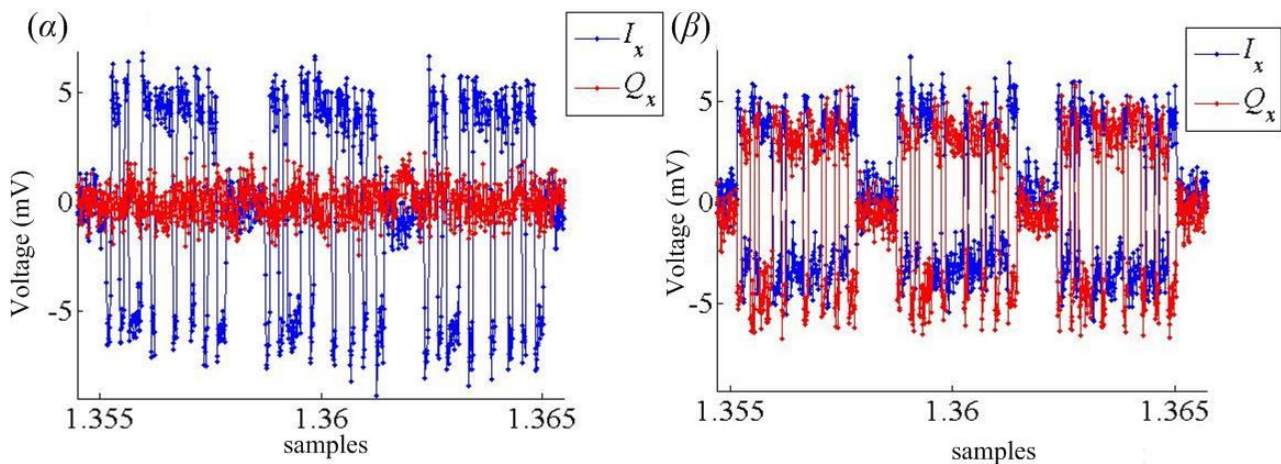


Εικόνα 7-2. (α) Ακολουθία bit πληροφορίας και (β) η ίδια ακολουθία bit κωδικοποιημένη διαφορικά (differentially coded).

Στη συνέχεια αντιστοιχούμε τις στάθμες της πληροφορίας (1 και -1, της Εικόνα 7-2(β)) σε στάθμες διαφοράς δυναμικού V_{amp} . Σε αυτό το σημείο είναι καλό να αναφέρουμε ότι η ακολουθία bit που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-2(β) τροφοδοτείται στις εισόδους του οπτικού διαμορφωτή με την βοήθεια μίας γεννήτριας υψηλών συχνοτήτων. Η γεννήτρια αυτή μετατρέπει την πεπερασμένου μήκους ακολουθία bit πληροφορίας σε μία θεωρητικά απείρου μήκους ακολουθία (πρακτικά το μήκος εξαρτάται από την χωρητικότητα της εσωτερικής μνήμης που διαθέτει), η οποία προκύπτει με την συνεχή επανάληψη της αρχικής ακολουθίας bit. Ο οπτικός διαμορφωτής παραμένει συνεχώς πολωμένος στα $V_{bias1}=3.3V$ και $V_{bias2}=1.7V$, καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος, όπως αναφέρουμε στην ενότητα 4.2. Τροφοδοτούμε το οπτικό φέρον με την ακολουθία bit που αποτυπώνεται στην Εικόνα 7-2(β) επιλέγοντας διαφορετικές τιμές V_{amp} , οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ των $2V_{p-p}$ έως $6.4V_{p-p}$ (peak-to-peak). Στην συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, το διαμορφωμένο φως διανύει μία απόσταση περί τα 65cm στον ελεύθερο χώρο, συλλέγεται από την οπτική πύλη και οδηγείται στον σύμφωνο δέκτη. Με ένα διαχωριστή οπτικής ισχύος 50/50 (fiber splitter) οδηγούμε μέρος της αρχικής αδιαμόρφωτης φέρουσας στην οπτική είσοδο του σύμφωνου δέκτη, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως σήμα τοπικού ταλαντωτή. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε ότι το διαμορφωμένο σήμα και ο τοπικός ταλαντωτής έχουν το ίδιο ακριβώς μήκος κύματος, οπότε δεν είναι απαραίτητη η εφαρμογή της ανάκτησης συχνότητας (frequency recovery). Χρησιμοποιώντας ελεγκτές πόλωσης ευθυγραμμίζουμε

την εισερχόμενη δέση στον σύμφωνο δέκτη ως προς την μία μόνο πόλωση ώστε να απλοποιήσουμε το πρόβλημα. Με αυτό τον τρόπο μόνο δύο κανάλια RF είναι απαραίτητα στον ψηφιακό παλμογράφο για την πλήρη απεικόνιση του σήματος (I_x και Q_x).

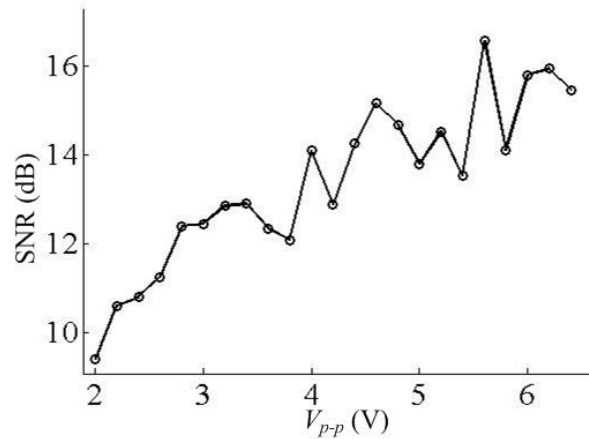
Παρατηρώντας την οθόνη του ψηφιακού παλμογράφου βλέπουμε ότι τα δύο κανάλια παρουσιάζουν μία έντονη χρονική διακύμανση του πλάτους. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε τυχαίες μεταβολές της φάσης σε όλη την έκταση της πειραματικής διάταξης, που οφείλεται σε μικρό-δονήσεις της οπτικής ίνας αλλά και μικρο-διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που προκαλούν αυτή την τυχειότητα στην φάση. Η Εικόνα 7-3(α) παρουσιάζει την περίπτωση όπου το ένα κανάλι του παλμογράφου εμφανίζεται υποβαθμισμένο λόγω του φαινομένου αυτού¹. Στην ίδια εικόνα αποτυπώνονται τρεις διαδοχικές ακολουθίες bit διαχωρισμένες από διαδοχικούς μηδενισμούς που τοποθετήσαμε σαν σήματα οδηγούς (pilot signals) για τον ευκολότερο εντοπισμό των ακολουθιών bit. Στην Εικόνα 7-3(α) παρατηρούμε ένα στιγμιότυπο των δύο συνιστωσών του σήματος που λαμβάνουμε από τον σύμφωνο δέκτη, όπου φαίνεται ξεκάθαρα η απώλεια μίας συνιστώσας λόγω χρονικών διακυμάνσεων της φάσης. Σε ένα διαφορετικό χρονικό στιγμιότυπο που αποτυπώνεται στην Εικόνα 7-3(β), το πρόβλημα έχει αρθεί και οι δύο συνιστώσες του σήματος αποτυπώνονται κανονικά. Εξασφαλίζουμε την εξάλειψη αυτού του φαινομένου λαμβάνοντας πολλά στιγμιότυπα των δύο καναλιών του παλμογράφου σε ένα διάστημα μερικών δευτερολέπτων ώστε να λάβουμε υπόψη την περίπτωση που και τα δύο κανάλια αποτυπώνονται ξεκάθαρα στην οθόνη του παλμογράφου.



Εικόνα 7-3. (α) Χρονικό στιγμιότυπο των δύο συνιστωσών του σήματος όπου τυχαίες διακυμάνσεις της φάσης εκμηδένισαν την Q συνιστώσα του σήματος. Σε ένα άλλο χρονικό στιγμιότυπο (β) οι δύο συνιστώσες του σήματος αποτυπώνονται ξεκάθαρα.

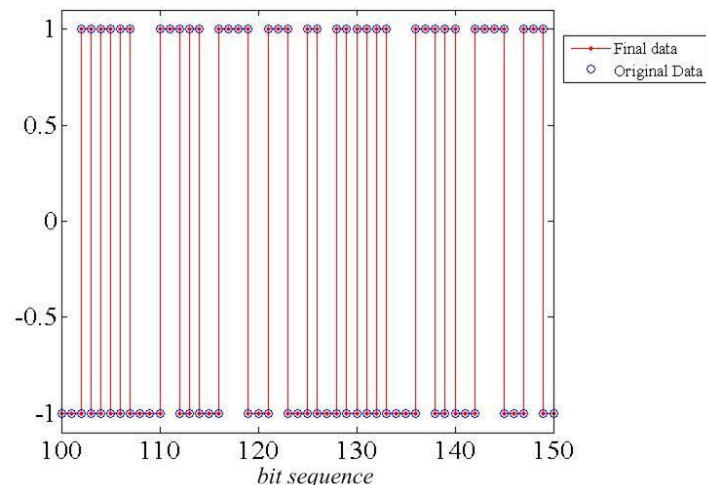
Οι μηδενισμοί που εισάγαμε σαν σήματα οδηγούς εκτός από τον εύκολο διαχωρισμό των ακολουθιών bit πληροφορίας μας παρέχουν επίσης και μία πολύ καλή απεικόνιση του θορύβου του συστήματος. Στην Εικόνα 7-4 παρουσιάζεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio, SNR) μετρημένος σε dB για το σύνολο των τάσεων V_{p-p} που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα. Το επίπεδο του θορύβου εκτιμήθηκε υπολογίζοντας την μέση τιμή του σήματος οδήγησης (pilot). Όπως αναμενόταν, το SNR αυξάνει με την αύξηση της διαφοράς δυναμικού από κορυφή σε κορυφή του σήματος εισόδου. Μικρές διακυμάνσεις στη μονοτονία της συνάρτησης οφείλεται στην τυχειότητα του θορύβου από μέτρηση σε μέτρηση.

¹ Η αναλυτική περιγραφή της συνδεσιμότητας των οργάνων με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 8.



Εικόνα 7-4. Το ηλιόκο σήματος προς θόρυβο μετρημένο σε dB ως προς το δυναμικό V_{p-p} του σήματος εισόδου στον οπτικό διαμορφωτή.

Στην Εικόνα 7-4 παρατηρούμε ότι για όλες τις τιμές των V_{p-p} που εφαρμόσαμε το σήμα είναι ξεκάθαρα ισχυρότερο από το θόρυβο, κατά 9dB στην χειρότερη περίπτωση. Το γεγονός αυτό μας βοήθησε να επιβεβαιώσουμε τη σωστή λειτουργία της διαδικασίας ανάκτησης φάσης. Τυχαία επιλέγουμε πενήντα διαδοχικά bit πληροφορίας, τα οποία προέκυψαν από τη διαδικασία της ανάκτησης φάσης και τη διαδικασία της αποδιαμόρφωσης, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 7-5. Στην ίδια εικόνα αντιπαραβάλλουμε και τα αρχικά bit πληροφορίας για χάρη σύγκρισης. Από την Εικόνα 7-5, αλλά και από όλο το δείγμα των 2600bit που καταγράψαμε συμπεραίνουμε ότι το σφάλμα σε πλήθος bit λόγω της τυχαιότητας της φάσης ανέρχεται σε μηδέν bit, χάρη στην διαδικασία ανάκτησης φάσης που εφαρμόστηκε.

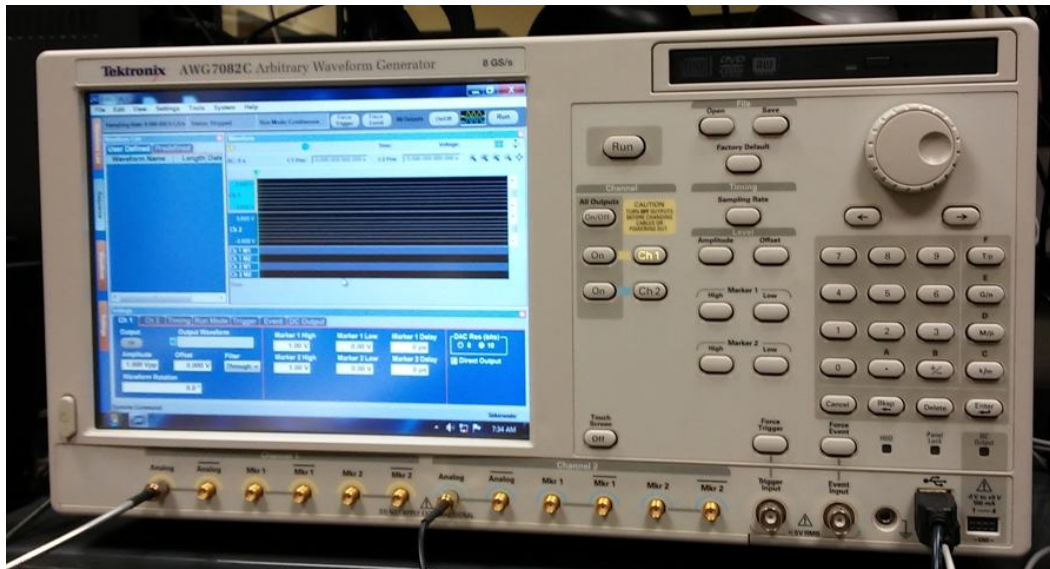


Εικόνα 7-5. Με κόκκινες κουκκίδες αποτυπώνονται τα bit που προέκυψαν από την διαδικασία ανάκτησης φάσης και αποδιαμόρφωσης. Με μπλέ κύκλους αποτυπώνονται τα αρχικά bit πληροφορία για χάρη σύγκρισης.

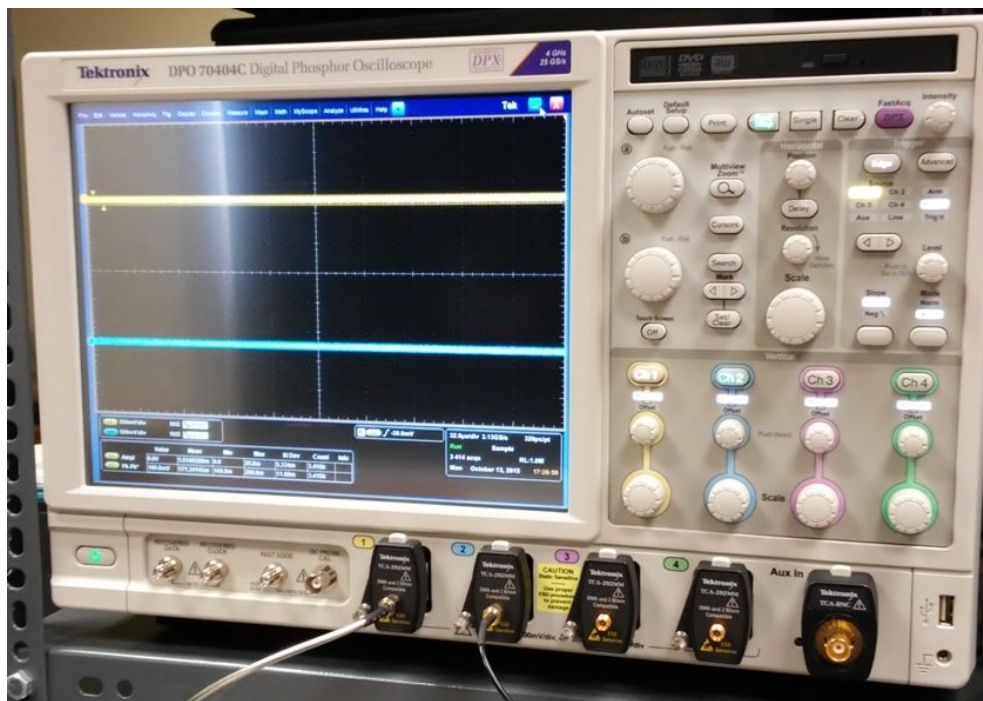
8. Συνδεσιμότητα οργάνων.

Στην παρούσα ενότητα θα περιγράψουμε τον κώδικα που αναπτύχθηκε, στα πλαίσια του προγράμματος COWS, για να μπορέσουμε να μεταδώσουμε στην πειραματική διάταξη διαμορφωμένα δεδομένα. Σκοπός μας ήταν ο κώδικας να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα από το είδος διαμόρφωσης

Ένα σημαντικό κομμάτι του κώδικα έχει να κάνει με την επικοινωνία του Matlab με τη γεννήτρια (Εικόνα 1) και τον παλμογράφο (Εικόνα 2) που χρησιμοποιήσαμε καθώς και τη μετατροπή του σήματος σε μορφή κατάλληλη για να μπορεί να το διαβάσει η γεννήτρια σημάτων κατά τη μετάδοση, και το Matlab κατά τη λήψη. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τον κώδικα και τη μεθοδολογία που ακολουθήσαμε.



Εικόνα 8-1. Η γεννήτρια σημάτων της Tektronix - AWG7082C που χρησιμοποιήσαμε.



Εικόνα 8-2. Ο παλμογράφος της Tektronix - DPO 70404C που χρησιμοποιήσαμε.

Ο παλμογράφος και η γεννήτρια που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση του κώδικα και την πραγματοποίηση των δοκιμών είναι της Tektronix και το πρωτόκολλο που χρησιμοποιούν για να επικοινωνούν με τον Η/Υ είναι το GPIB. Για τον έλεγχο των μηχανημάτων μέσω του Matlab χρησιμοποιήσαμε την γλώσσα SCPI. Για την επικοινωνία μέσω GPIB του Η/Υ με τη γεννήτρια και τον παλμογράφο απαιτείται ειδικός ελεγκτής (Εικόνα 3) ο οποίος συνδέεται στην GPIB θύρα της συσκευής και δίνει έξοδο σε USB για να συνδεθεί με τον Η/Υ. Θα πρέπει επίσης να έχουν εγκατασταθεί και τα κατάλληλα προγράμματα οδήγησης στον Η/Υ για να μπορέσουν να επικοινωνήσουν και να μας δώσουν την GPIB διεύθυνση της κάθε συσκευής, η οποία είναι απαραίτητη κατά τον προγραμματισμό στο Matlab.



Εικόνα 8-3. Ο GPIB ελεγκτής που μας δίνει USB έξοδο για να συνδέσουμε τον εξοπλισμό με τον Η/Υ

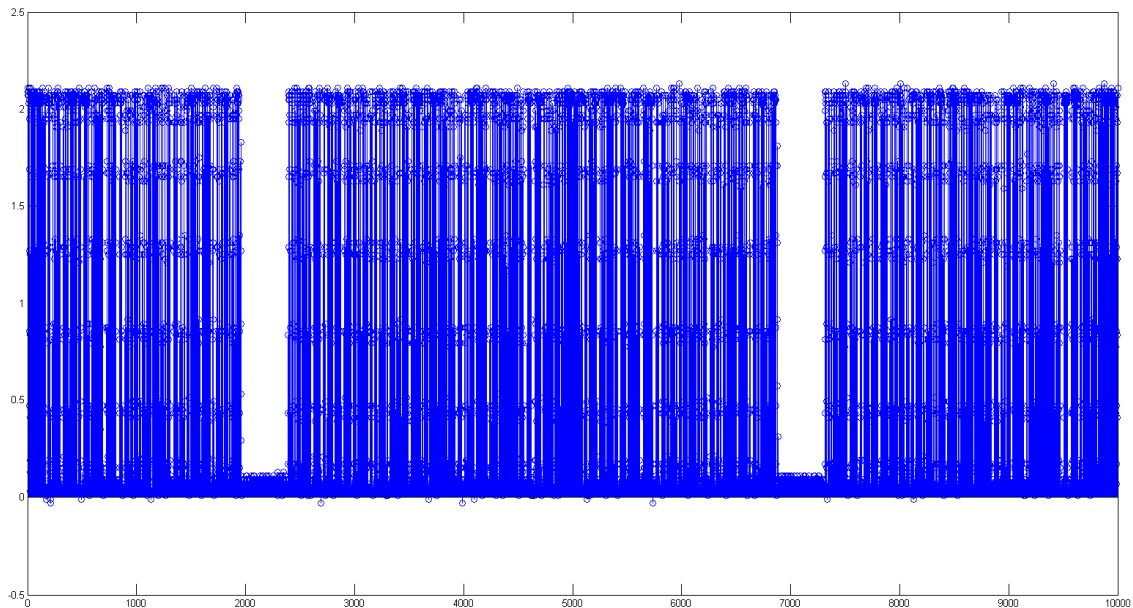
Τα δεδομένα που μεταδίδουμε για να αξιολογήσουμε τη ζεύξη είναι τυχαία και παράγονται από το Matlab με τη συνάρτηση `randi`, στη συνέχεια την τυχαία αυτή σειρά από bit την μετατρέπουμε, ανάλογα με την τάξη διαμόρφωσης, σε δεκαδικούς τους οποίους τους περνάμε στη συνάρτηση `gammod` του Matlab για να πάρουμε τα δεδομένα μας διαμορφωμένα. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιούμε 4-QAM διαμόρφωση.

```
% signal generation in bit stream
x = (randi([0 1],N,1));
% convert the bit stream into symbol stream
xsym = bi2de(reshape(x,k,length(x)/k).','left-msb');
% modulation
datamod = gammod(xsym,mlevel);
```

Εικόνα 4. Μπλοκ κώδικα στο οποίο παράγουμε τυχαία δεδομένα, τα μετατρέπουμε σε δεκαδικούς και μετά τα διαμορφώνουμε.

Για να είναι δυνατή η ανίχνευση και η αποδιαμόρφωση του σήματος στο δέκτη θα πρέπει να εισάγουμε και ένα σύμβολο συγχρονισμού. Το σύμβολο αυτό είναι μία ακολουθία από μηδέν όπου στην αρχή και το τέλος της έχει μία μονάδα. Η ακολουθία μηδενικών επιλέχθηκε για να μπορούμε στον δέκτη να βρίσκουμε τα μηδενικά περάσματα ή τα περάσματα με την χαμηλότερη τιμή ολοκλήρωσης, εάν έχουμε ένα ενθόρυβο σύστημα. Για να μπορέσουμε να έχουμε μηδενικά περάσματα στο δέκτη, θα πρέπει η βάση ολοκλήρωσης να είναι τουλάχιστον ίση με το σύμβολο συγχρονισμού. Η μονάδα στην αρχή και στο τέλος επιλέχθηκαν για να

είμαστε βέβαιοι ότι μετά το τέλος των μηδενικών θα έχουμε μονάδα και θα γνωρίζουμε πια είναι η τιμή του πρώτου συμβόλου. Επίσης στο πραγματικό - αναλογικό σήμα που θα λάβουμε είναι πιο εύκολο να βρούμε μία υψηλή τιμή τάσης που αντιπροσωπεύει το 1 στα δεδομένα μας μετά από μία μεγάλη ακολουθία από 0 όπως μπορούμε να δούμε και στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Μέρος του σήματος που λαμβάνουμε στον παλμογράφο στο οποίο είναι ευδιάκριτα τα μηδενικά περάσματα του συμβόλου συγχρονισμού.

Στη συνέχεια χωρίζουμε τα διαμορφωμένα δεδομένα σε δύο ακολουθίες, μία για το πραγματικό μέρος του σήματος (I) και μία για το φανταστικό (Q), με τις οποίες τροφοδοτούμε δύο διαφορετικά κανάλια στη γεννήτρια σημάτων. Για να έχουμε πιο ομαλές μεταβάσεις από 0 σε 1 στη γεννήτρια και να αποφύγουμε το θόρυβο από τα DSP εφαρμόζουμε τη συνάρτηση `interp1` του Matlab με την παράμετρο της μεθόδου παρεμβολής σε `'cubic'` για να είναι πιο ομαλές οι μεταβάσεις.

Το επόμενο βήμα είναι να συνδεθούμε στη γεννήτρια σημάτων και να φορτώσουμε το σήμα μας. Για να συνδεθούμε χρησιμοποιούμε την GPIB διεύθυνση που μας δίνει ο Driver την οποία μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 6 καθώς και πώς ενσωματώνεται στον κώδικα του Matlab. Οι εντολές μέσα στις παρενθέσεις είναι της γλώσσας SCPI και τις περνάμε σαν ορίσματα string στις εντολές του Matlab, το οποίο μας παρέχει ένα σύνολο από εντολές για τον σκοπό αυτό. Με τον ίδιο τρόπο έχουμε την δυνατότητα να ελέγξουμε και να παρέμβουμε σε όλες τις ρυθμίσεις του παλμογράφου.

```
%AWG communication and signal uploading
awg=visa('tek','GPIB2::6::INSTR');
awg.OutputBufferSize = 2e17;
fopen(awg);
fprintf(awg, '*IDN?');
fscanf(awg)
```

Εικόνα 6. Μπλοκ κώδικα στο οποίο βλέπουμε την GPIB διεύθυνση και τις απαραίτητες εντολές για να συνδεθούμε στην γεννήτρια.

Στη συνέχεια φορτώνουμε το σήμα μας στην γεννήτρια όπως βλέπουμε στην Εικόνα 7 και ρυθμίζουμε το

ρυθμό δειγματοληψίας και τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή τάσης που θα δίνει η γεννήτρια.

```
% create the waveform
fwrite(awg, ['wlist:waveform:new "iwave",' num2str(length(tx_i)) ',integer;']);
% send the data to new waveform
fwrite(awg, ['wlist:waveform:data "iwave",' iheader iwave 10], 'uint8');
fwrite(awg, 'SOURCE1:FREQUENCY:CW 250.0000E+6');
fwrite(awg, 'source1:waveform "iwave;');
fwrite(awg, 'source1:voltage:high 1;low -1;');
|
% turn on channel
fwrite(awg, 'output1 on');
```

Εικόνα 7. Μπλοκ κώδικα με τις εντολές που φορτώνουμε το σήμα μας στη γεννήτρια και ρυθμίζουμε την συχνότητα δειγματοληψίας και τα high και low voltage.

Την ίδια διαδικασία κάνουμε και για το δεύτερο κανάλι:

```
fwrite(awg, ['wlist:waveform:new "qwave",' num2str(length(tx_q)) ',integer;']);
fwrite(awg, ['wlist:waveform:data "qwave",' qheader qwave 10], 'uint8');
fwrite(awg, 'SOURCE2:FREQUENCY:CW 250.0000E+6');
fwrite(awg, 'source2:waveform "qwave;');
fwrite(awg, 'source2:voltage:high 1;low -1;');

% turn on channel
fwrite(awg, 'output2 on');
```

Εικόνα 8. Βλέπουμε ότι και στην Εικόνα 7 αλλά εδώ στην εντολή source και output έχουμε δώσει την τιμή 2.

Μετά συνδεόμαστε στον παλμογράφο και περνάμε τις ρυθμίσεις που επιθυμούμε σχετικά με τον ρυθμό δειγματοληψίας, ο οποίος θα πρέπει να είναι ίδιος με αυτόν της γεννήτριας ή κάποιο πολλαπλάσιο της, και το μήκος της εγγραφής εκφρασμένο σε αριθμό δειγμάτων. Όπως μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 9 στην περίπτωση μας έχουμε θέσει τον ρυθμό δειγματοληψίας σε $250.000E+6$ και το μήκος της εγγραφής σε $1.000.000$.

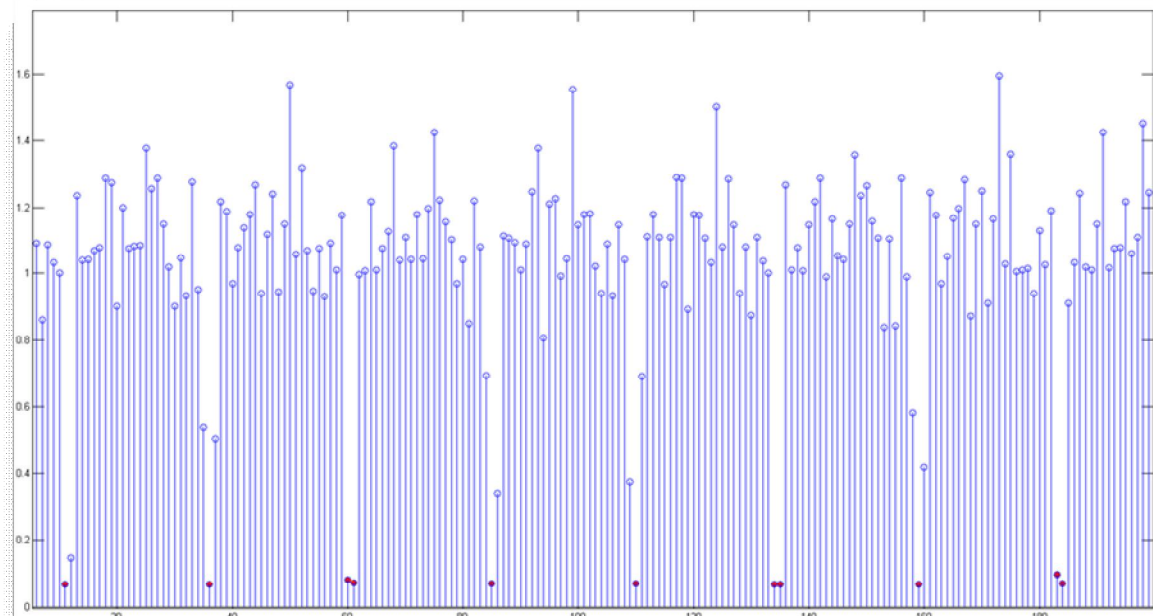
```

%DPO communication
pause(2);
osc=visa('tek','GPIB0::2::INSTR');
osc.InputBufferSize=10e5;
fopen(osc);
fprintf(osc, 'ACQUIRE:MODE SAMple');
fprintf(osc, 'HORizontal:MODE MANual');
fprintf(osc, 'HORizontal:MODE:SAMPLERate 250.0000E+6'); % 3.1250E+9
fprintf(osc, 'HORizontal:MODE:RECORDLENGTH 1000000');
fprintf(osc, 'SAVe:WAVEform:FILEForma MATLab');
fprintf(osc, 'SAVe:WAVEFORM CH1, "C:\results\ch1.dat"');
fprintf(osc, 'SAVe:WAVEFORM CH2, "C:\results\ch2.dat"');
fclose(osc);

```

Εικόνα 9. Μπλοκ κώδικα στο οποίο συνδεόμαστε στον παλμογράφο και ρυθμίζουμε το μήκος της εγγραφής και τον ρυθμό δειγματοληψίας.

Στη συνέχεια και αφού έχουμε πάρει το σήμα μας μέσω του παλμογράφου στον Η/Υ ξεκινάει η διαδικασία της αποδιαμόρφωσης. Το πρώτο πράγμα που κάνουμε είναι να βρούμε τα σύμβολα συγχρονισμού μέσα στο ληφθέν σήμα. Όπως είπαμε και νωρίτερα αυτό το πετυχαίνουμε ολοκληρώνοντας το σήμα με βάση ολοκλήρωση τουλάχιστον όσο το μήκος των μηδενικών του συμβόλου συγχρονισμού. Στην παρούσα εφαρμογή έχουμε επιλέξει η βάση ολοκλήρωσης να είναι το μισό του πλήθους των μηδενικών του συμβόλου συγχρονισμού. Στην Εικόνα 10 μπορούμε να δούμε με κόκκινο κάποια από τα ελάχιστα που μας δείχνουν που υπάρχουν μηδενικά περάσματα.

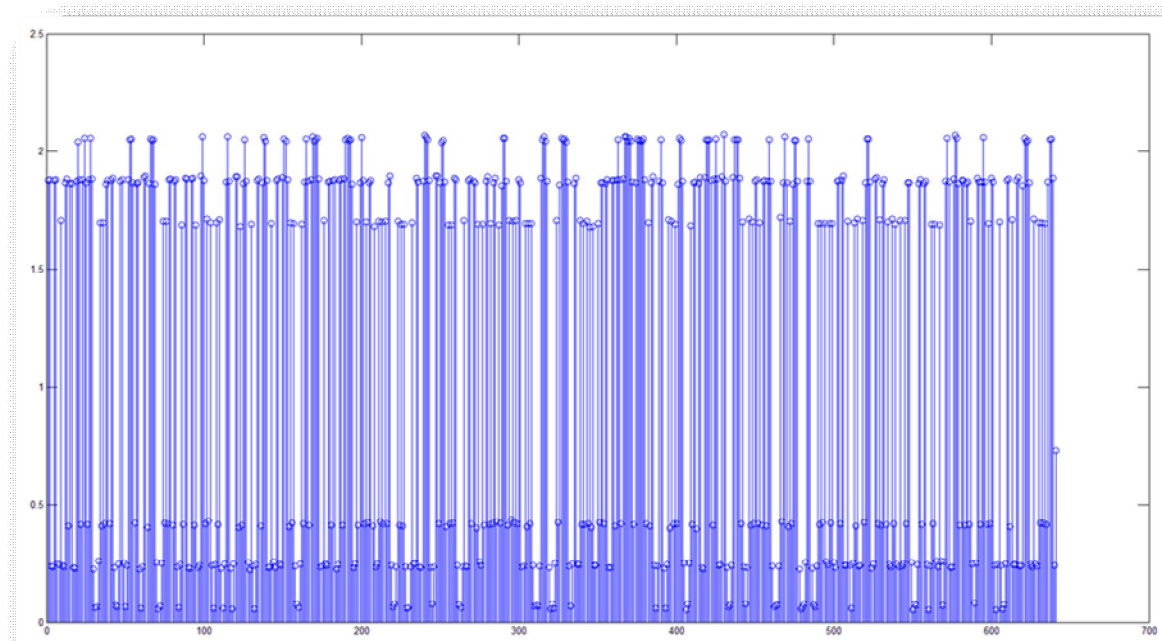


Εικόνα 10. Μέρος του σήματος μετά την ολοκλήρωση για την εύρεση των μηδενικών περασμάτων, με κόκκινο μπορούμε να διακρίνουμε μερικά από αυτά.

Αφού βρούμε τα μηδενικά περάσματα πετάμε τα μηδενικά του συμβόλου συγχρονισμού και μας μένουν τα δεδομένα αλλά με τα επιπλέον δύο bit, ένα στην αρχή και ένα στο τέλος, του συμβόλου συγχρονισμού. Τα

συγκεκριμένα bit έχουμε επιλέξει να τα απομακρύνουμε αφού έχουμε μετατρέψει το σήμα μας σε σειρά από bit και πριν τα εισάγουμε στην `gamdemod` για να πάρουμε το BER.

Για να πάρουμε τα σύμβολα που μεταδώσαμε από το σήμα που λάβαμε ολοκληρώνουμε το σήμα με την `intdump` συνάρτηση του Matlab και σαν βάση ολοκλήρωσης χρησιμοποιούμε τον αριθμό δειγμάτων που αντιστοιχεί στο κάθε σύμβολο, το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής μπορούμε να το δούμε στην Εικόνα 11. Για να βρούμε τον ακριβή αριθμό δειγμάτων σε κάθε σύμβολο διαιρούμε τον αριθμό δειγμάτων του ληφθέντος σήματος με τον αριθμό των συμβόλων που μεταδώσαμε. Από το σήμα της Εικόνας 11 για να πάρουμε bit, θέτουμε ένα κατώφλι από το οποίο οποιαδήποτε τιμή είναι μεγαλύτερη τη λαμβάνουμε ως ένα, και οποιαδήποτε είναι μικρότερη ως μηδέν.



Εικόνα 11. Το αποδιαμορφωμένο σήμα από το οποίο θα πάρουμε τα 0 και 1.

Την ίδια διαδικασία την επαναλαμβάνουμε και για δεύτερο κανάλι του παλμογράφου, το οποίο αντιστοιχεί στο Q branch του διαμορφωμένου σήματος.

Τέλος με την συνάρτηση `complex` του Matlab μετατρέπουμε τα I και Q branch σε μιγαδικούς αριθμούς που εκφράζουν ένα QAM διαμορφωμένο σήμα, και το περνάμε σαν όρισμα στην `gamdemod` μαζί με το αρχικά σήμα για να πάρουμε το BER.

9. Αναφορές

- [1] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά εκπομπής του laser THORLABS SFL-1550P συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <http://www.thorlabs.de/thorcat/21000/SFL1550P-SpecSheet.pdf>
- [2] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του οπτικού διαμορφωτή LN86S-FC συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <http://www.thorlabs.de/thorcat/20800/LN86S-FC-MFGSpec.pdf>
- [3] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά της οπτικής διόπτρας τριπλού φακού TC18FC-1550 συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <http://www.thorlabs.de/thorcat/STN/TC18FC-1550-AutoCADPDF.pdf>
- [4] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του μετρητή οπτικής ισχύος PM100D συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <http://www.thorlabs.de/thorcat/17600/PM100D-Manual.pdf>
- [5] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του φωτοδέκτη S122C συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <http://www.thorlabs.de/thorcat/18300/S122C-AutoCADPDF.pdf>
- [6] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά της διόπτρας GRIN 50-1550A-FC συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <http://www.thorlabs.de/thorcat/TTN/50-1550A-FC-AutoCADPDF.pdf>
- [7] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά της οπτικής πύλης PAF-X-11-C συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <http://www.thorlabs.de/thorcat/16100/PAF-X-11-C-Manual.pdf>
- [8] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του laser εξωτερικής κοιλότητας συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <http://www.thorlabs.de/thorcat/21000/TLK-L1550M-Manual.pdf>
- [9] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του ελεγκτή θερμοκρασίας και ρεύματος συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <http://www.thorlabs.de/thorcat/16400/ITC4001-Manual.pdf>
- [10] Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του σύμφωνου οπτικού δέκτη συγκεντρώνονται στο παρακάτω ιστότοπο: <https://www.finisar.com/optical-components/epdv1200r-0>
- [11] A. Leven, N. Kaneda, Ut-Va Koc, and Y.-K. Chen, “Frequency Estimation in Intradyne Reception,” *Phot. Tech. Lett.*, vol.19, 366-368 (2007).
- [12] D.-S. Ly-Gagnon, S. Tsukamoto, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Coherent Detection of Optical Quadrature Phase-Shift Keying Signals With Carrier Phase Estimation,” *Jour. of Light. Tech.*, vol. 24, pp. 12-21 (2006).