



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης σε υπολογιστικά κέντρα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Σ. Παληογιάννης

Επιβλέπων: Ηρακλής Β. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Δεκέμβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης σε υπολογιστικά κέντρα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Σ. Παληογιάννης

Επιβλέπων: Ηρακλής Β. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Δεκεμβρίου 2014

.....
Η.Αβραμόπουλος

.....
Χ.Καψάλης

.....
Ν.Ουζούνου

Αθήνα, Δεκέμβριος 2014

.....
Ιωάννης Σ. Παληογιάννης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννης Σ. Παληογιάννης
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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχόμενη αύξηση της χρήσης υπολογιστικών συστημάτων ανά την υφήλιο και η διασύνδεση τους στο διαδίκτυο δημιουργεί συνεχώς την ανάγκη για ολοένα και ταχύτερη επεξεργασία, αποθήκευση και μεταφορά δεδομένων. Από τον παραδοσιακό τρόπο χρήσης της υπολογιστικής ισχύος κατά την οποία ο χρήστης είναι ταυτοχρόνα και ο κάτοχος της ισχύος αυτής, περνάμε σιγά σιγά στην εποχή του Cloud Computing το οποίο βασίζεται στην ιδέα της κατοχής της υπολογιστικής ισχύος από μεγάλες εταιρείες και οργανισμούς και του διαμοιρασμού αυτής της ισχύος στους υπόλοιπους χρήστες σύμφωνα με τις ανάγκες τους. Βασική δομή της λογικής του Cloud Computing είναι τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων, δηλαδή τεράστιες εγκαταστάσεις υπολογιστικών μονάδων με σκοπό την αποθήκευση και την επεξεργασία δεδομένων.

Καταλυτική στην εξέλιξη αυτή και στην ικανοποίηση της ανάγκης για αυξανόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση είναι η συμβολή των οπτικών επικοινωνιών. Εκμεταλλεύομενες την ελάχιστη απόσβεση της οπτικής ίνας σε ένα τεράστιο εύρος συχνοτήτων αντικαθιστούν τις παραδοσιακές επικοινωνίες χαλκού σε πολλές πρακτικές εφαρμογές. Προς το παρόν, όσον αφορά τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων χρησιμοποιούνται και εκεί οπτικές διατάξεις μετάδοσης με απλά σχήματα διαμόρφωσης, στο μέλλον όμως θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης προκειμένου να καλύψουν τις αυξημένες ανάγκες μεταφοράς δεδομένων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετούνται οπτικές διατάξεις διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης πληροφορίας με ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης καθώς και δύο τοπολογίες ενεργών οπτικών καλωδίων που μεταφέρουν οπτικά σήματα με ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους (16-QAM) μέσα σε ένα υπολογιστικό κέντρο δεδομένων. Πέρα από το σχεδιασμό των τοπολογιών αυτών, παρουσιάζονται ακόμα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της λειτουργίας αυτών των οπτικών διατάξεων μέσω απεικόνισης διαφόρων μορφών του διαμορφωμένου οπτικού σήματος, πλήθους διαγραμμάτων καθώς και πινάκων των βασικών μετρητικών μεγεθών.

Λέξεις-κλειδιά: οπτικές επικοινωνίες, υπολογιστικά κέντρα, ενεργό οπτικό καλώδιο, ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης, ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους

ABSTRACT

The continuous global growth of the use of computer systems and their connection to the internet create a constant need for more and faster processing, storage and data transfer. From the traditional manner of using the computer power to which the user is both the holder of this power, we pass slowly in the age of cloud computing, which is based on the idea of owning this computing power to large corporations and organizations, and sharing it to other users according to their needs. Basic structure of the idea of cloud computing is the computing data centers, namely huge installations of data storage and processing.

Catalytic to this trend and in order to meet the need for increasing traffic of data is the contribution of optical communications. Taking advantage of the minimum loss of the optical fiber in a huge range of frequencies optical communications are replacing the traditional copper communications in many practical applications. Currently in computer data centers are used optical devices with simple modulation schemes, but in the future will be needed to be implemented advanced modulation formats in order to meet the increased demand of data transfer.

In this diploma thesis we studied optical modulation and demodulation devices (transmitter and receiver) with advanced modulation formats and two topologies of active optical cables carrying 16-QAM optical signals inside a computer data center. Apart from the design of the topologies, are also presented the simulation results of their operations by illustrating various forms of the modulated optical signal, numerous diagrams and tables with basic measurement sizes.

Keywords: optical communications, computing centers, active optical cable, advanced modulation formats, quadrature amplitude modulation

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ηρακλή Αβραμόπουλο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εργαστώ σε αυτό το εξαιρετικά ενδιαφέρον αντικείμενο. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Βασίλη Κατωπόδη, υποψήφιο διδάκτορα και μέλος του εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τις πολύτιμες συμβουλές και τη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω στο κομμάτι των ευχαριστιών το Στέφανο Δρυ, μεταδιδακτορικό ερευνητή και μέλος του ίδιου εργαστηρίου, για τη δημιουργία του αλγορίθμου ψηφιακής επεξεργασίας σήματος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα MATLAB.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| Εικόνες..... | 10 |
| Κεφάλαιο 1 | 15 |
| 1.1 Cloud Computing..... | 15 |
| 1.2 Υπολογιστικά κέντρα δεδομένων | 17 |
| 1.3 Οπτικές διασυνδέσεις..... | 19 |
| 1.4 Σκοπός και οργάνωση της εργασίας..... | 20 |
| Κεφάλαιο 2 | 21 |
| 2.1 Εξωτερικοί οπτικοί διαμορφωτές..... | 21 |
| 2.1.1 Διαμορφωτής φάσης | 21 |
| 2.1.2 Mach-Zehnder διαμορφωτής..... | 22 |
| 2.1.3 IQ διαμορφωτής | 24 |
| 2.2 Σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης | 25 |
| 2.2.1 Διαμόρφωση Μετατόπισης Πλάτους (Amplitude Shift Keying) | 25 |
| 2.2.2 Διαφορική Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης (Differential Phase Shift Keying) .. | 26 |
| 2.2.3 Ορθογωνική Διαμόρφωση Πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation) | 29 |
| 2.3 Οπτικός δέκτης..... | 31 |
| 2.3.1 2 x 4 90° Hybrid..... | 31 |
| 2.3.2 Σύμφωνη λήψη | 33 |
| 2.3.3 Optical Quadrature Frontend..... | 35 |
| Κεφάλαιο 3 | 37 |
| 3.1 VPI Transmission Maker | 37 |
| 3.2 IQ διαμορφωτής..... | 38 |
| 3.3 Σύμφωνος δέκτης..... | 41 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| Κεφάλαιο 4 | 44 |
| 4.1 Multi-Parallel Transmitter | 44 |
| 4.2 Tandem-QPSK Transmitter | 71 |
| Κεφάλαιο 5 | 78 |
| 5.1 Συμπεράσματα..... | 78 |
| Βιβλιογραφία | 80 |

ΕΙΚΟΝΕΣ

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1.1: Η εξέλιξη του Cloud Computing | 16 |
| Εικόνα 1.2: Κέντρο δεδομένων του Facebook στη βόρεια Καρολίνα υπό κατασκευή | 17 |
| Εικόνα 1.3: Server room σε υπολογιστικό κέντρο της Google | 18 |
| Εικόνα 2.1: Ολοκληρωμένος διαμορφωτής φάσης | 21 |
| Εικόνα 2.2: Ολοκληρωμένος διαμορφωτής Mach-Zehnder | 22 |
| Εικόνα 2.3: Η συνάρτηση μεταφοράς του διαμορφωτή Mach-Zehnder | 23 |
| Εικόνα 2.4: Ολοκληρωμένος IQ διαμορφωτής | 24 |
| Εικόνα 2.5: Αρχή λειτουργίας IQ διαμορφωτή | 24 |
| Εικόνα 2.6: Κύκλωμα διαμόρφωσης 2ASK σήματος | 25 |
| Εικόνα 2.7: Διάγραμμα αστερισμού για 2ASK σήμα..... | 25 |
| Εικόνα 2.8: Διαγράμματα αστερισμού για DPSK διαμορφώσεις με κωδικοποίηση Gray..... | 26 |
| Εικόνα 2.9: Σειριακή τοπολογία εκπομπού DPSK | 27 |
| Εικόνα 2.10: Διαγράμματα αστερισμού για σήματα διαμορφωμένα από σειριακό εκπομπό DPSK..... | 27 |
| Εικόνα 2.11: Εκπομπός DPSK σήματος με παράλληλη υλοποίηση | 28 |
| Εικόνα 2.12: Διαγράμματα αστερισμού για σήματα διαμορφωμένα από παράλληλο εκπομπό DPSK..... | 28 |
| Εικόνα 2.13: Κύκλωμα παραγωγής σήματος 16 Star QAM | 29 |
| Εικόνα 2.14: Διαγράμματα αστερισμού σήματος 16 Star QAM για διάφορες κωδικοποιήσεις | 30 |
| Εικόνα 2.15: Διαγράμματα αστερισμού σημάτων με 16 Square QAM διαμόρφωση | 30 |
| Εικόνα 2.16: Υλοποίηση 2 x 4 90° Hybrid με 3dB συζεύκτες και μετατόπιση φάσης | 32 |
| Εικόνα 2.17: Υλοποίηση 2 x 4 90° Hybrid με 3dB συζεύκτη και polarization beam splitters | 32 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 2.18: 2 x 4 MMI Coupler | 33 |
| Εικόνα 2.19: Αρχή λειτουργίας σύμφωνης λήψης..... | 34 |
| Εικόνα 2.20: Optical Quadrature Frontend..... | 35 |
| Εικόνα 3.1: Διάφορες απεικονίσεις οπτικού σήματος στο VPIphotonics Analyzer | 37 |
| Εικόνα 3.2: Προσομοίωση του IQ διαμορφωτή στο πρόγραμμα VPI | 38 |
| Εικόνα 3.3: Διάγραμμα αστερισμού σήματος εξόδου του IQ διαμορφωτή αλλάζοντας την τάση οδήγησης DC | 39 |
| Εικόνα 3.4: Οπτική ισχύς σήματος εξόδου από τον IQ διαμορφωτή αλλάζοντας την τάση οδήγησης DC..... | 39 |
| Εικόνα 3.5: Διάγραμμα αστερισμού σήματος εξόδου του IQ διαμορφωτή αλλάζοντας την τάση οδήγησης RF..... | 40 |
| Εικόνα 3.6: Οπτική ισχύς σήματος εξόδου από τον IQ διαμορφωτή αλλάζοντας την τάση οδήγησης RF | 40 |
| Εικόνα 3.7: Ο σύμφωνος δέκτης όπως προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα VPI..... | 41 |
| Εικόνα 3.8: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου MMI_M_N..... | 42 |
| Εικόνα 3.9: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου Photodiode..... | 43 |
| Εικόνα 3.10: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου FilterEl | 43 |
| Εικόνα 4.1: Multi-Parallel Transmitter για την παραγωγή σήματος 16 Square QAM | 44 |
| Εικόνα 4.2: Multi-Parallel Transmitter για την παραγωγή σήματος 16 Square QAM στο πρόγραμμα VPI | 45 |
| Εικόνα 4.3: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου ModulatorDiffMZ_DSM | 47 |
| Εικόνα 4.4: Διάγραμμα αστερισμού για QPSK σήμα | 48 |
| Εικόνα 4.5: Γενικές παράμετροι προσομοίωσης | 48 |
| Εικόνα 4.6: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου από τον 1 ^ο IQ διαμορφωτή | 49 |
| Εικόνα 4.7: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του 1 ^{ου} IQ διαμορφωτή..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 4.8: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου από τον 2 ^ο IQ διαμορφωτή | 50 |
| Εικόνα 4.9: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του 2 ^{ου} IQ διαμορφωτή..... | 51 |
| Εικόνα 4.10: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου..... | 51 |
| Εικόνα 4.11: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του πομπού | 52 |
| Εικόνα 4.12: Προσομοίωση της εκπομπής από Multi-Parallel Transmitter και λήψης από σύμφωνο δέκτη μετά από διάδοση σε οπτική ίνα σήματος 16 Square QAM | 52 |
| Εικόνα 4.13: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου UniversalFiberFwd..... | 53 |
| Εικόνα 4.14: Ισχύς στην είσοδο του δέκτη αυξάνοντας την ισχύ του laser κατά 0.1mW ανά βήμα | 54 |
| Εικόνα 4.15: Ισχύς στην είσοδο των φωτοδιόδων αυξάνοντας την ισχύ του laser κατά 0.1mW ανά βήμα | 54 |
| Εικόνα 4.16: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του δέκτη..... | 55 |
| Εικόνα 4.17: In-Phase συνιστώσα στην έξοδο του δέκτη..... | 56 |
| Εικόνα 4.18: Διάγραμμα ματιού In-Phase συνιστώσας | 56 |
| Εικόνα 4.19: Διάγραμμα ματιού Quadrature συνιστώσας..... | 56 |
| Εικόνα 4.20: Διάγραμμα αστερισμού..... | 57 |
| Εικόνα 4.21: In-Phase συνιστώσα..... | 57 |
| Εικόνα 4.22: Διάγραμμα ματιού In-Phase συνιστώσας | 57 |
| Εικόνα 4.23: Διάγραμμα ματιού Quadrature συνιστώσας..... | 57 |
| Εικόνα 4.24: Διάγραμμα ματιού In-Phase συνιστώσας | 58 |
| Εικόνα 4.25: Διάγραμμα ματιού Quadrature συνιστώσας..... | 58 |
| Εικόνα 4.26: Διάγραμμα ματιού In-Phase συνιστώσας | 59 |
| Εικόνα 4.27: Διάγραμμα ματιού Quadrature συνιστώσας..... | 59 |
| Εικόνα 4.28: Διαγράμματα αστερισμού αυξάνοντας το μήκος της ίνας | 60 |

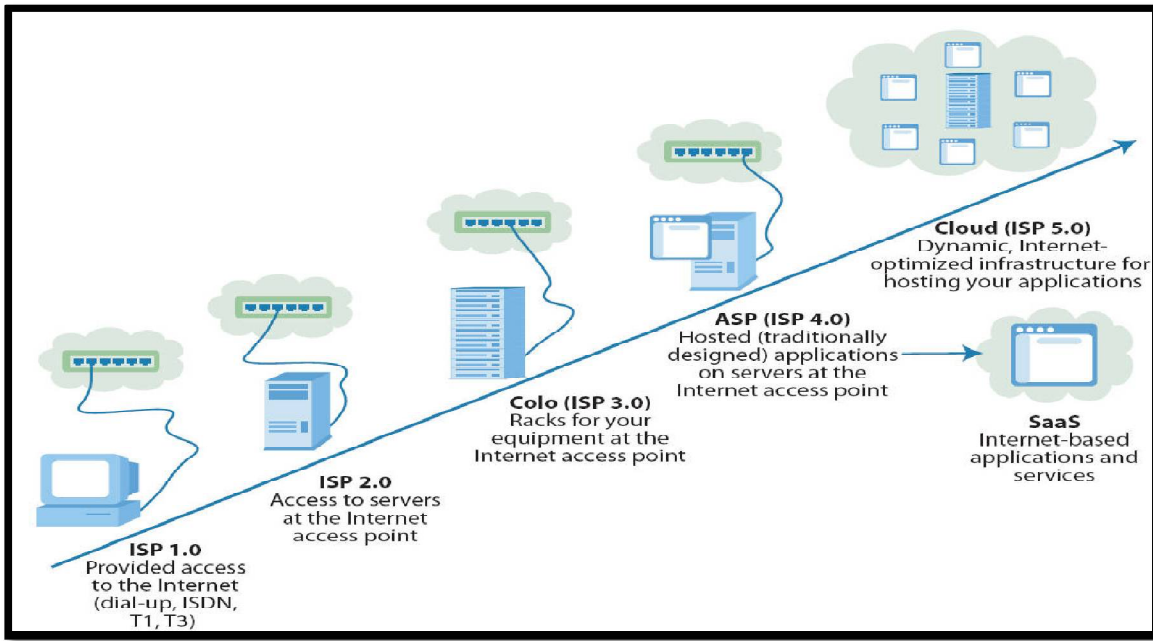
| | |
|---|----|
| Εικόνα 4.29: Διαγράμματα αστερισμού αυξάνοντας το μήκος της ίνας | 61 |
| Εικόνα 4.30: Μέτρηση του BER αυξάνοντας το μήκος της ίνας | 61 |
| Εικόνα 4.31: Διαγράμματα αστερισμού μειώνοντας την ισχύ εξόδου του laser | 62 |
| Εικόνα 4.32: Διαγράμματα αστερισμού μειώνοντας την ισχύ εξόδου του laser | 63 |
| Εικόνα 4.33: Μέτρηση του BER μειώνοντας την οπτική ισχύ του laser | 63 |
| Εικόνα 4.34: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 0m.. | 64 |
| Εικόνα 4.35: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 100m | 64 |
| Εικόνα 4.36: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 200m | 65 |
| Εικόνα 4.37: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 400m | 65 |
| Εικόνα 4.38: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 600m | 66 |
| Εικόνα 4.39: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 800m | 66 |
| Εικόνα 4.40: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 1000m | 67 |
| Εικόνα 4.41: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 2000m | 67 |
| Εικόνα 4.42: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 3000m | 68 |
| Εικόνα 4.43: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 4000m | 68 |
| Εικόνα 4.44: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 5000m | 69 |
| Εικόνα 4.45: Καμπύλες BER σε συνάρτηση με την οπτική ισχύ εισόδου στο δέκτη | 70 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 4.46: Tandem-QPSK Transmitter για την παραγωγή σήματος 16 Square QAM | 71 |
| Εικόνα 4.47: Tandem-QPSK Transmitter για την παραγωγή σήματος 16 Square QAM στο πρόγραμμα VPI | 72 |
| Εικόνα 4.48: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου από τον 1 ^ο IQ διαμορφωτή | 73 |
| Εικόνα 4.49: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του 1 ^{ου} IQ διαμορφωτή | 73 |
| Εικόνα 4.50: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου | 74 |
| Εικόνα 4.51: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του πομπού | 74 |
| Εικόνα 4.52: Προσομοίωση της εκπομπής από Tandem-QPSK Transmitter και λήψης από σύμφωνο δέκτη μετά από διάδοση σε οπτική ίνα σήματος 16 Square QAM | 75 |
| Εικόνα 4.53: Ισχύς στην είσοδο του δέκτη αυξάνοντας την ισχύ του laser κατά 0.1mW ανά βήμα | 75 |
| Εικόνα 4.54: Ισχύς στην είσοδο των φωτοδιόδων αυξάνοντας την ισχύ του laser κατά 0.1mW ανά βήμα | 76 |
| Εικόνα 4.55: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του δέκτη | 76 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Cloud Computing

Από τον παραδοσιακό τρόπο χρήσης και διαχείρισης της υπολογιστικής ισχύος κατά τον οποίο ο χρήστης είναι παράλληλα και ο κάτοχός της περνάμε τα τελευταία χρόνια σε νέα πρότυπα καταλήγοντας στο Cloud Computing. Η προέλευση του όρου και η σύνδεση με τη συγκεκριμένη τεχνολογία δεν είναι απολύτως ξεκάθαρη. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990 το σύννεφο σαν σύμβολο χρησιμοποιείται για να συμβολίζει το διαδίκτυο με τους servers να είναι εξωτερικά συνδεδεμένοι με αυτό. Από την εποχή εκείνη ξεκινούν και οι πρώτες αναφορές στην έννοια του Cloud Computing όπως την χρησιμοποιούμε σήμερα. Στην εποχή των υπερμεγέθων υπολογιστών που καταλάμβαναν χώρο ενός δωματίου, τη δεκαετία του 1950, άλλοι μικρότεροι υπολογιστές ,γνωστοί ως στατικά τερματικά, συνδέονταν στον κεντρικό υπολογιστή αφού οι ίδιοι δεν είχαν μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες και χρησίμευαν μόνο για τηλεπικοινωνιακούς λόγους. Προκειμένου να γίνει πιο αποδοτική η χρήση των κοστοβόρων μεγάλων υπολογιστικών μονάδων αναπτύχθηκε μια τεχνική που επέτρεπε σε πολλαπλούς χρήστες να μοιράζονται τόσο τη φυσική πρόσβαση στον κεντρικό υπολογιστή μέσω πολλαπλών τερματικών όσο και τον χρόνο της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU). Η πρακτική του διαμοιρασμού του χρόνου λειτουργίας της CPU γίνεται γνωστή σαν time-sharing. Στην δεκαετία του 1990 μεγάλες τηλεπικοινωνιακές εταιρίες οι οποίες προηγουμένως παρείχαν κατά κύριο λόγο point-to-point κυκλώματα δεδομένων άρχισαν να προσφέρουν υπηρεσίες εικονικού ιδιωτικού δικτύου (virtual private network – VPN) με ανταγωνιστική ποιότητα και χαμηλότερο κόστος. Επίσης χρησιμοποίησαν το σύμβολο του σύννεφου για να υποδηλώσουν την οριοθέτηση ανάμεσα στο κομμάτι του δικτύου για το οποίο είναι υπεύθυνος ο πάροχος και το κομμάτι του δικτύου για το οποίο είναι υπεύθυνος ο χρήστης. Το Cloud Computing επεκτείνει τα όρια του για να καλύψει όλους τους servers και τη δικτυακή υποδομή. Έτσι η χρήση των υπολογιστών διαδίδεται και οι επιστήμονες διερευνούν τεχνικές για να κάνουν διαθέσιμη σε πολλούς χρήστες υψηλής στάθμης υπολογιστική ισχύ μέσω της πρακτικής time-sharing. Η έννοια Cloud Computing σήμερα αναφέρεται στη χρήση υπολογιστικής ισχύος που χωροταξικά βρίσκεται σε ένα “σύννεφο” απόμακρων δικτύων. Με λίγα λόγια αντί ο οποιοσδήποτε χρήστης, είτε πρόκειται για φυσικό πρόσωπο είτε για επιχειρήσεις, οργανισμούς ή ακόμα και κράτη, να είναι αναγκασμένος για να χρησιμοποιήσει ένα συγκεκριμένο μέγεθος υπολογιστικής ισχύος να ξοδέψει μεγάλα ποσά για την αγορά, κατασκευή και συντήρηση των ανάλογων υποδομών, έχει τη δυνατότητα της “ενοικίασης” της συγκεκριμένης υπολογιστικής ισχύος και χρήσης της για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα χρειαστεί.



Εικόνα 1.1: Η εξέλιξη του Cloud Computing

Το Cloud Computing παρέχει δικτυακές υπηρεσίες που εμφανίζονται να παρέχονται από πραγματικούς servers ενώ στην πραγματικότητα παρέχονται από εικονικές υποδομές οι οποίες προσομοιάζονται από λογισμικό που τρέχει σε έναν ή περισσότερους πραγματικούς servers. Η πρακτική αυτή είναι γνώριμη σε όποιον χρήστη χρησιμοποιεί διαδικτυακές υπηρεσίες για τη διαχείριση και αποθήκευση δεδομένων, ηλεκτρονικό ταχυδρομείο ή social networks. Υπηρεσίες πληροφορικής για ιδιώτες και οργανισμούς φιλοξενούνται στο διαδίκτυο και έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για τοπικούς servers στο χώρο τους. Οι υπολογιστές βρίσκονται σε κέντρα δεδομένων σχεδιασμένα για βέλτιστη ενεργειακή αποδοτικότητα. Για παράδειγμα, τα υπολογιστικά κέντρα κατασκευάζονται όσο το δυνατόν πιο κοντά σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας και σε περιοχές με ψυχρότερο κλίμα ώστε να υπάρχει φυσικός τρόπος ψύξης των υπολογιστικών μονάδων και ως εκ τούτου μείωση της κατανάλωσης ισχύος. Επιπλέον, επιχειρήσεις και οργανισμοί αποφεύγουν την επένδυση και τη χρήση επιπλέον εξοπλισμού για να καλύψουν εποχιακές ανάγκες. Στα πλεονεκτήματα του Cloud Computing πέραν της μείωσης του περιβαλλοντικού και του οικονομικού κόστους για χρήστες, επιχειρήσεις και κράτη προστίθεται η βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας της χρήσης της διαμοιραζόμενης υπολογιστικής ισχύος. Η υπολογιστική ισχύς δεν μοιράζεται απλά στους πολλαπλούς χρήστες αλλά επανακατανέμεται δυναμικά ανάλογα με τη ζήτηση. Για παράδειγμα υπολογιστική ισχύς που χρησιμοποιείται κατά τις ευρωπαϊκές ώρες αιχμής για την κάλυψη αναγκών ηλεκτρονικού ταχυδρομίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τις ώρες αιχμής της Αμερικής σαν web server.

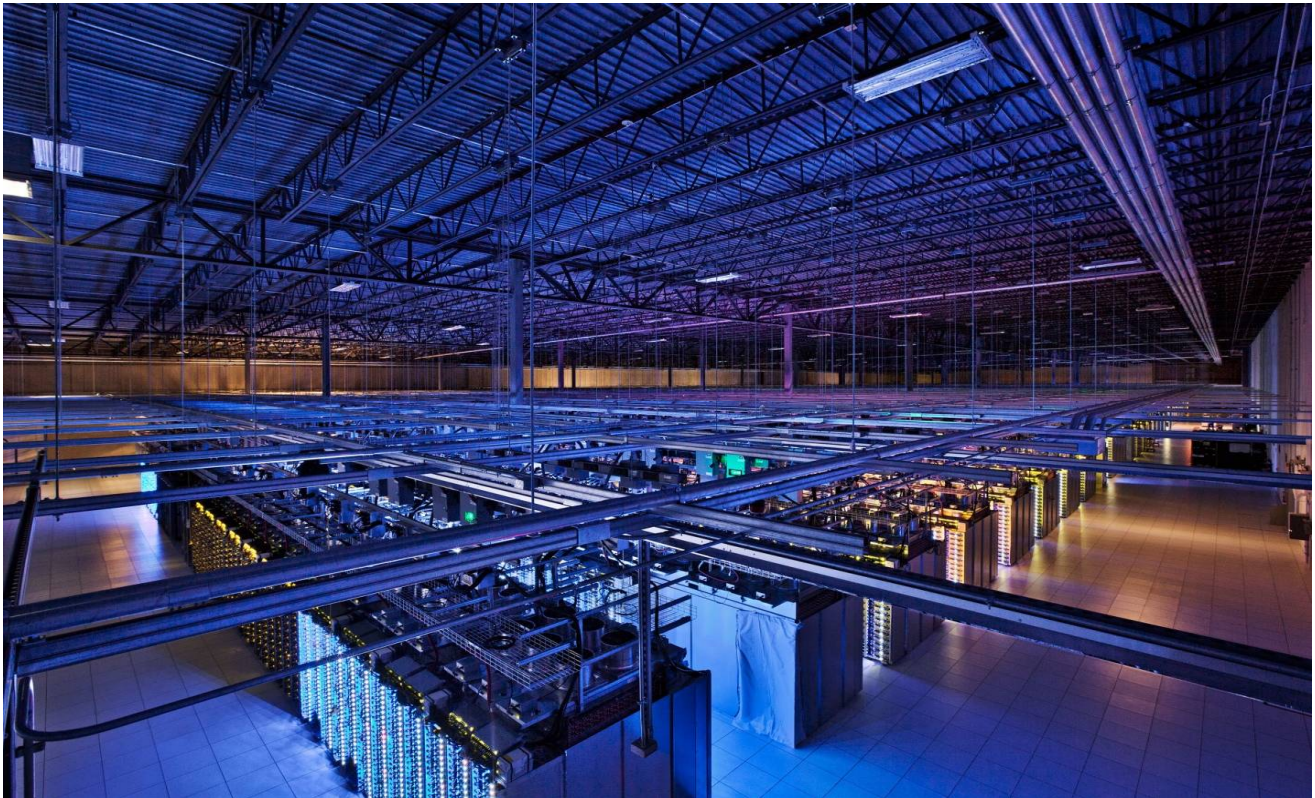
1.2 Υπολογιστικά κέντρα δεδομένων

Ενώ θεωρητικά το Cloud Computing αναφέρεται στο διαμοιρασμό υπολογιστικής ισχύος στον οποίο μπορεί να συμμετάσχει ο οποιοσδήποτε χρήστης είτε ως πάροχος είτε ως καταναλωτής στην πραγματικότητα ακολουθεί ένα περισσότερο συγκεντρωτικό μοντέλο. Η υπολογιστική ισχύς παρέχεται από κεντρικές δομές, τεράστια υπολογιστικά κέντρα δεδομένων μεγάλων εταιριών όπως η Google, η Amazon, η Microsoft και διαμοιράζεται στους χρήστες μέσω του διαδικτύου. Στην ουσία τα τεράστια αυτά κέντρα δεδομένων είναι που καθιστούν την έννοια του Cloud Computing βιώσιμη καθώς οποιαδήποτε άλλη προσπάθεια διαμοιρασμού υπολογιστικής ισχύος σε παγκόσμια βάση θα ήταν αδύνατη τόσο για τεχνικοοικονομικούς όσο και καθαρά τεχνικούς λόγους. Συνεπώς η ανάπτυξη και η μελλοντική εξέλιξη τόσο του Cloud Computing όσο και των υπολογιστικών κέντρων δεδομένων είναι αλληλένδετη και αλληλοεξαρτώμενη. Τα κέντρα δεδομένων είναι λοιπόν τεράστιες εγκαταστάσεις αποτελούμενες από υπολογιστικά και τηλεπικοινωνιακά συστήματα καθώς και συστήματα αποθήκευσης. Από άποψη ενεργειακής κατανάλωσης βρίσκονται στο επίπεδο μεγάλων βιομηχανιών καταναλώνοντας όση ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνει μια μικρή πόλη περίπου και εκλύοντας στην ατμόσφαιρα αντίστοιχη περιβαλλοντική ρύπανση. Για το λόγο αυτό περιλαμβάνουν τόσο εναλλακτικά συστήματα ηλεκτροδότησης όσο και συστήματα περιβαλλοντικού ελέγχου όπως εξαερισμού, κλιματισμού και πυρασφάλειας.



Εικόνα 1.2: Κέντρο δεδομένων του Facebook στη βόρεια Καρολίνα υπό κατασκευή

Τα σύγχρονα υπολογιστικά κέντρα έχουν τις ρίζες τους στα υπολογιστικά δωμάτια των πρώτων χρόνων της εποχής της πληροφορικής. Οι πρώτοι υπολογιστές λόγω μεγέθους και πολυπλοκότητας χρειάζονταν έναν ξεχωριστό χώρο για να οργανωθούν και να λειτουργήσουν. Με την πάροδο των χρόνων όμως και την εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής τα υπολογιστικά συστήματα εξαπλωθηκαν ανά την υφήλιο και κυρίως κατά την έκρηξη της χρήσης του διαδικτύου παρουσιάστηκε η ανάγκη να οργανωθεί η υπολογιστική ισχύς από τις μεγάλες επιχειρήσεις του χώρου σε κεντρικές δομές, τα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων. Με τη σύγχρονη ανάπτυξη του Cloud Computing επιχειρηματικοί και κυβερνητικοί οργανισμοί διερευνούν την εξέλιξη των υπολογιστικών κέντρων σε θέματα ασφάλειας, διαθεσιμότητας και περιβαλλοντικού κόστους. Από την άλλη, το κόστος ενός υπολογιστικού κέντρου είναι αρκετά υψηλό όσον αφορά το κομμάτι κατασκευής όσο και της συντήρησης. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι διεθνείς οργανισμοί καθορίζουν τις προδιαγραφές κατασκευής και λειτουργίας τους. Οι σημαντικότερες εξ αυτών αφορούν θέματα διαθεσιμότητας και ασφάλειας καθώς οι χρήστες που κατά κύριο λόγο είναι μεγάλοι οργανισμοί έχουν την ανάγκη της συνεχούς διεκπεραίωσης των λειτουργιών τους καθώς και την προφύλαξη των ευαίσθητων και ιδιωτικών τους πληροφοριών από οποιονδήποτε που μπορεί να εκμεταλλευτεί τα κενά ασφαλείας.



Εικόνα 1.3: Server room σε υπολογιστικό κέντρο της Google

1.3 Οπτικές διασυνδέσεις

Η συνεχής αύξηση της υπολογιστικής ισχύος παγκόσμια, η εξάπλωση της χρήσης του διαδικτύου και οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις του χρήστη στην καθημερινότητά του έχουν οδηγήσει τις παραδοσιακές τεχνικές μεταφοράς δεδομένων, όπως είναι τα χάλκινα καλώδια και οι Ψηφιακής Συνδρομητικής Γραμμής (Digital Subscriber Line - DSL) τεχνολογίες να φαίνονται ανεπαρκείς για την ολοένα και μεγαλύτερη κλιμάκωση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Οι οπτικές επικοινωνίες αποδεικνύονται η μόνη ρεαλιστική λύση εκμεταλλευόμενες την ελάχιστη απόσβεση των 0.2 dB ανά χιλιόμετρο της οπτικής ίνας με τεράστιο εύρος συχνοτήτων της τάξης των THz. Οι οπτικές ίνες πλέον φτάνουν μέχρι το σπίτι του χρήστη αντικαθιστώντας τον χαλκό για τη σύνδεση στο διαδίκτυο. Παρόμοια είναι και η εξέλιξη των επικοινωνιών και της μεταφοράς δεδομένων εντός των υπολογιστικών κέντρων όπου μπορεί οι αποστάσεις να είναι μικρότερες από ότι σε ένα εθνικό ή αστικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, η ποσότητα όμως της πληροφορίας που μεταφέρεται είναι τεράστια και διαρκώς αυξανόμενη. Οι συνδέσεις επομένως ανάμεσα σε κάθε δομή ενός υπολογιστικού κέντρου γίνονται μέσω οπτικών καλωδίων τα οποία στην παρούσα φάση χρησιμοποιούν το απλούστερο σχήμα διαμόρφωσης On-Off Keying (OOK) κατά το οποίο μεταφέρεται ένα bit πληροφορίας ανά σύμβολο, κωδικοποιημένο στην ύπαρξη ή την απουσία οπτικού παλμού. Αυτή η τεχνική διαμόρφωσης επιτρέπει τη χρήση πολύ απλών οπτικών διατάξεων για την εκπομπή και αποδιαμόρφωση του σήματος, έχει όμως περιορισμένες δυνατότητες καθώς η φασματική αποδοτικότητα του σήματος είναι πολύ χαμηλή αφού το εύρος ζώνης λειτουργίας των οπτικών και ηλεκτρονικών διατάξεων πρέπει να είναι περίπου ίσο με το ρυθμό μετάδοσης του συστήματος. Για να υποστηριχθούν ρυθμοί μετάδοσης μεγαλύτεροι από 10 Gb/s με OOK διαμόρφωση, οι οπτικές διατάξεις αποκτούν απαγορευτικό κόστος. Η διέδοξο στο διαφαινόμενο πρόβλημα είναι ο σχεδιασμός οπτικών διατάξεων που χρησιμοποιούν σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης (advanced modulation formats), κωδικοποιώντας πολλαπλά bits σε κάθε σύμβολο και σε συνδυασμό με τη χρήση σύμφωνων δεκτών (coherent receivers) στην πλευρά της αποδιαμόρφωσης. Τα σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης δίνουν την δυνατότητα να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας χωρίς να χρειαστούν αντίστοιχης ταχύτητας οπτικές και ηλεκτρονικές διατάξεις διατηρώντας έτσι το κόστος σε χαμηλά επίπεδα. Σε αντίθεση με τις ηλεκτρονικές επικοινωνίες στο επίπεδο των οπτικών επικοινωνιών βρίσκομαστε ακόμα πολύ μακριά από την πρακτική εφαρμογή των ανώτερων αυτών τεχνικών διαμόρφωσης σε εμπορικό επίπεδο και προς την κατεύθυνση αυτή θα πρέπει να κινηθούμε.

1.4 Σκοπός και οργάνωση της εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι ο σχεδιασμός δύο διατάξεων ενεργών οπτικών καλωδίων (active optical cables) τα οποία παράγουν, μεταφέρουν και αποδιαμορφώνουν οπτικό σήμα με 16 Square QAM διαμόρφωση (Quadrature Amplitude Modulation – Ορθογωνική Διαμόρφωση Πλάτους) χωρίς την χρήση οπτικού ενισχυτή μεταξύ οπτικού πομπού και δέκτη καθώς και η προσομοίωση λειτουργίας του με αρχικό ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps. Πρόκειται για οπτικές διατάξεις οι οποίες στην ουσία τετραπλασιάζουν την ποσότητα της μεταδιδόμενης πληροφορίας ανά δευτερόλεπτο σε σχέση με τις οπτικές διατάξεις On-Off Keying διαμόρφωσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται σήμερα στις οπτικές επικοινωνίες, αφού κωδικοποιούν 4 bits ανά σύμβολο με αποτέλεσμα η συνολική μεταφερόμενη πληροφορία στη μονάδα του χρόνου να αυξάνεται στα 40 Gbps. Διερευνούμε λοιπόν κατά πόσον αυτή η αύξηση είναι εφικτή τεχνικά και συμφέρουσα από άποψη κατανάλωσης ισχύος καθώς και κόστους.

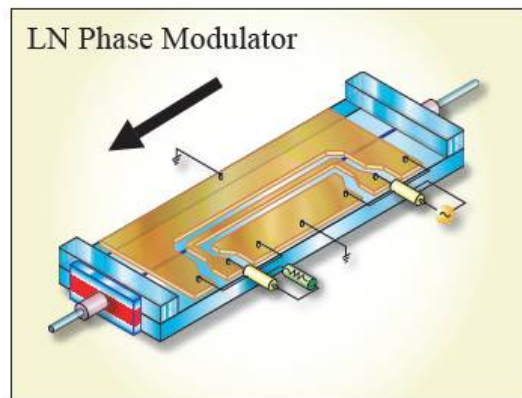
Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικά η εξέλιξη των σχημάτων διαμόρφωσης από την On-Off Keying διαμόρφωση στα σχήματα διαμορφώσης φάσης και κατόπιν στα συνδυαστικά σχήματα διαμόρφωσης πλάτους και φάσης. Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές οπτικές διατάξεις εξωτερικής διαμόρφωσης: ο διαμορφωτής φάσης, ο Mach-Zehnder διαμορφωτής και ο IQ (In Phase – Quadrature) διαμορφωτής. Τέλος, περιγράφεται η αρχή λειτουργίας της σύμφωνης λήψης (coherent detection) και οι βασικές οπτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό του οπτικού δέκτη. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αρχικά αναφορά στον πρόγραμμα σχεδιασμού και προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας αυτής, το VPItransmissionMaker & VPIcomponentMaker 9.2. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του IQ διαμορφωτή, του βασικότερου στοιχείου της συνολικής διάταξης, καθώς και αποτελέσματα της προσομοίωσης λειτουργίας του στο πρόγραμμα VPI. Ακολουθεί αντίστοιχα ο σχεδιασμός και η ανάλυση λειτουργίας του σύμφωνου δέκτη που χρησιμοποιήθηκε. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται ο σχεδιασμός και η προσομοίωση λειτουργίας της συνολικής δομής των δύο διατάξεων που αφορούν ενεργά οπτικά καλώδια. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής με οπτική απεικόνιση του σήματος και μετρήσεις οπτικής ισχύος σε διάφορα σημεία του κυκλώματος καθώς ποσοτικές μετρήσεις της πιθανότητας λάθους στην πλευρά του δέκτη. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση λειτουργίας των δύο οπτικών διατάξεων που σχεδιάστηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 – Εξωτερικοί οπτικοί διαμορφωτές

2.1.1 – Διαμορφωτής φάσης

Ο οπτικός διαμορφωτής φάσης κατασκευάζεται σαν μια ολοκληρωμένη οπτική διάταξη ενσωματώνοντας έναν οπτικό κυματοδηγό σε ένα ηλεκτρο-οπτικό υπόστρωμα συνήθως κατασκευασμένο από το υλικό Lithium Niobate (LiNbO_3). Εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης του υλικού και κατ' επέκταση ο δείκτης διάθλασης του κυματοδηγού αλλάζει εφαρμόζοντας εξωτερική ηλεκτρική τάση μέσω ηλεκτροδίου, το ηλεκτρικό πεδίο του εισερχόμενου οπτικού φέροντος μπορεί να διαμορφωθεί στο πεδίο της φάσης.



Εικόνα 2.1: Ολοκληρωμένος διαμορφωτής φάσης

Η φάση του διαμορφωμένου πλέον σήματος στην έξοδο του διαμορφωτή φάσης είναι συνάρτηση του μήκους κύματος λ , του μήκους του ηλεκτροδίου l που προσδίδει την εξωτερική ηλεκτρική τάση και της διαφοράς του δείκτη διάθλασης Δn πριν και μετά την εφαρμογή της εξωτερικής ηλεκτρικής τάσης. Αγνοώντας διάφορα φαινόμενα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η αλλαγή στην τιμή του δείκτη διάθλασης Δn είναι προσεγγιστικά ανάλογη της εφαρμοζόμενης εξωτερικά ηλεκτρικής τάσης.

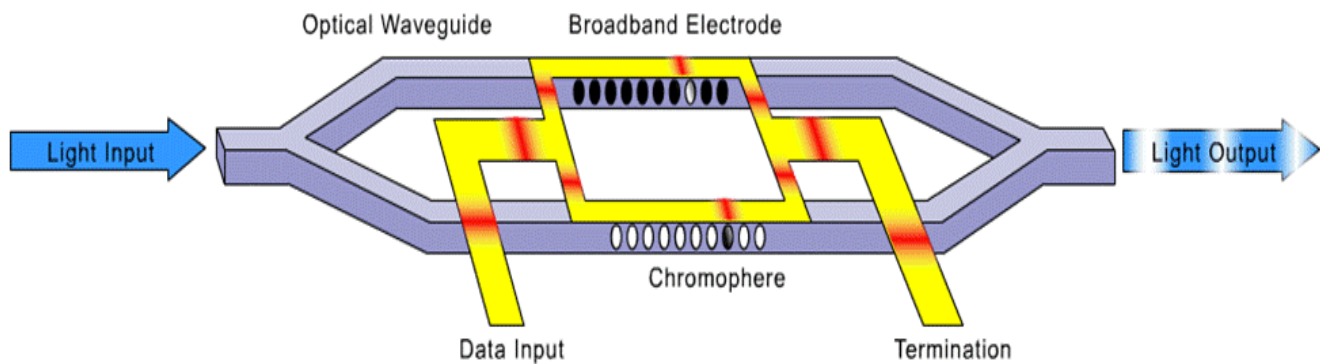
$$\phi_{PM}(t) = (2\pi \cdot \Delta n \cdot l) / \lambda \sim u(t)$$

Η απαιτούμενη τάση οδήγησης που πρέπει να εφαρμοστεί για να επιτευχθεί στρόφη φάσης ίση με π , δηλαδή 180° , ονομάζεται V_π και συνήθως δίνεται στις προδιαγραφές του κάθε διαμορφωτή. Καταλήγουμε λοιπόν στην παρακάτω έκφραση για το εξερχόμενο διαμορφωμένο κατά φάση οπτικό σήμα σε σχέση με το εισερχόμενο:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \exp[j \cdot \phi_{PM}(t)] \text{ όπου } \phi_{PM}(t) = \exp[j \cdot \pi \cdot u(t) / V_\pi]$$

2.1.2 – Mach-Zehnder διαμορφωτής

Μία από τις πλέον βασικές οπτικές διατάξεις είναι ο διαμορφωτής Mach-Zehnder, ο οποίος εκμεταλλευόμενος την αρχή της συμβολής, χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση φάσης για να επιτύχει διαμόρφωση πλάτους του οπτικού παλμού. Η διάταξη στην ουσία αποτελείται από δύο διαμορφωτές φάσης όπως τους περιγράψαμε παραπάνω. Το εισερχόμενο στη διάταξη φως χωρίζεται μέσω ενός συζεύκτη 50:50 σε δύο μονοπάτια, κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από ένα διαμορφωτή φάσης. Οι δύο συνιστώσες του αρχικού σήματος ξαναενώνονται στο τέλος της διάταξης αφού έχουν αποκτήσει η κάθε μία διαμόρφωση φάσης ανάλογη με την εξωτερικά εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση στον αντίστοιχο διαμορφωτή φάσης.



Εικόνα 2.2: Ολοκληρωμένος διαμορφωτής Mach-Zehnder

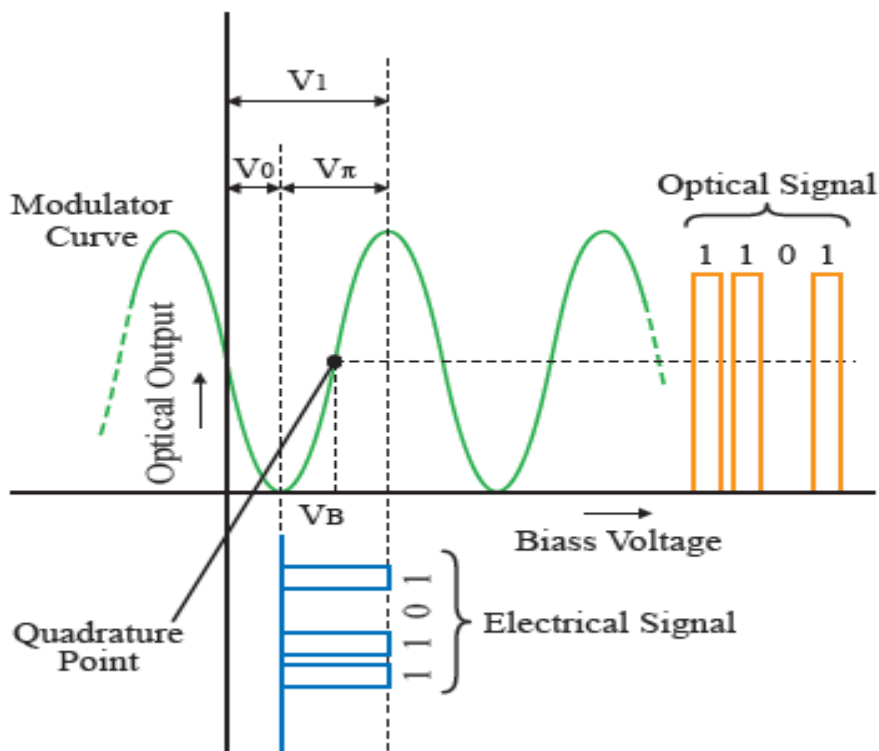
Ανάλογα με τη σχετική διαφορά φάσης που προκύπτει στα δύο πεδία η συμβολή τους μπορεί να κυμανθεί από αναιρετική σε ενισχυτική στην έξοδο του διαμορφωτή. Αγνοώντας απώλειες, η συνάρτηση μεταφοράς του διαμορφωτή Mach-Zehnder παίρνει τη μορφή:

$$E_{out}(t) = \frac{1}{2} \cdot E_{in}(t) \cdot \{ \exp[j \cdot \phi_1(t)] + \exp[j \cdot \phi_2(t)] \}$$

όπου $\phi_1(t) = u_1(t)/V\pi_1$ και $\phi_2(t) = u_2(t)/V\pi_2$ καθώς $u(t)$ είναι η εξωτερικά εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση στον αντίστοιχο διαμορφωτή φάσης και $V\pi$ η ηλεκτρική τάση προδιαγραφής για να επιτευχθεί στροφή φάσης ίση με π στον ίδιο διαμορφωτή. Όταν η στροφή φάσης που εισάγει ο διαμορφωτής φάσης στο ένα μονοπάτι του οπτικού σήματος ισούται με τη στροφή φάσης που εισάγεται στο δεύτερο μονοπάτι από τον έτερο διαμορφωτή φάσης επιτυγχάνεται μια απλή διαμόρφωση φάσης και η συνάρτηση μεταφοράς της διάταξης παίρνει τη μορφή της συνάρτησης μεταφοράς ενός απλού διαμορφωτή φάσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται push-push σε αντίθεση με τη διαδικασία push-pull όπου σε κάθε μονοπάτι

εισάγεται αντίθετη στροφή φάσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται διαμόρφωση πλάτους ελαχιστοποιώντας το chirp, το φαινόμενο δηλαδή της μεταβολής της συχνότητας με το χρόνο. Οι διαμορφωτές Mach-Zehnder μπορούν να κατασκευαστούν πάνω σε υπόστρωμα από Lithium Niobate (LiNbO₃), Gallium Arsenide (GaAs), Indium Phosphide (InP) καθώς και από πολυμερή (Polymers).

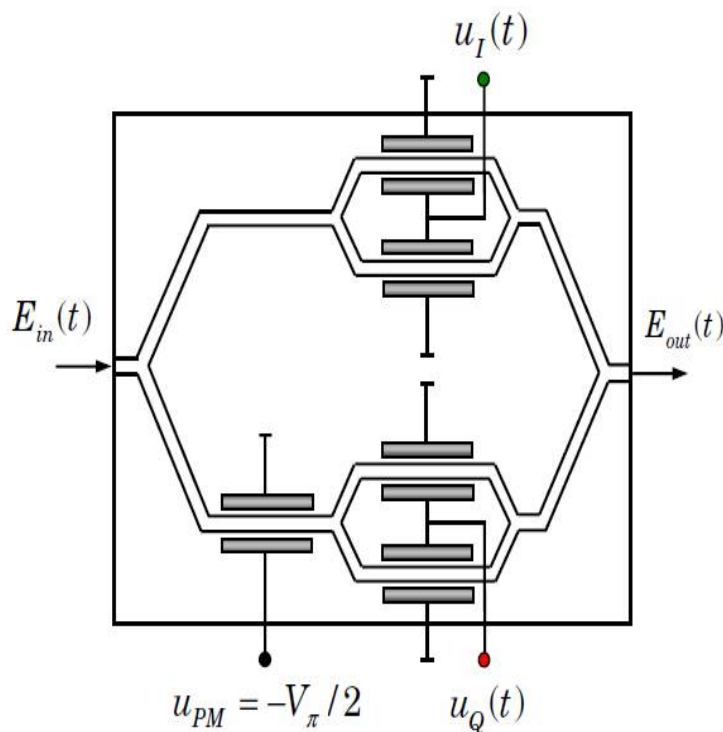
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς του διαμορφωτή Mach-Zehnder κατά τη διαμόρφωση πλάτους. Αρχικά, είναι απαραίτητο να ρυθμιστεί το στατικό σημείο πόλωσης στην καμπύλη μετάδοσης μέσω του ηλεκτροδίου πόλωσης που υπάρχει στους δύο βραχίονες του οπτικού κυκλώματος. Για να επιτευχθεί διαμόρφωση πλάτους, είναι απαραίτητο ο διαμορφωτής να δουλεύει στην γραμμική περιοχή (αυτό επιτυγχάνεται λόγω του γεγονότος ότι η συνάρτηση μεταφοράς του συγκεκριμένου διαμορφωτή προκύπτει από συνημιτονοειδή συνάρτηση) και συγκεκριμένα τίθεται το σημείο πόλωσης στο 50% του σημείου μετάδοσης, δηλαδή στο σημείο τετραγωνισμού. Τα ηλεκτρικά ψηφιακά σήματα μετατρέπονται σε οπτικό ψηφιακό σήμα με την μεταγωγή της τάσης τόσο στα άκρα όσο και στο σημείο τετραγωνισμού. Σε αυτού του είδους τη διαμόρφωση τα μη-γραμμικά χαρακτηριστικά του διαμορφωτή βελτιώνουν την ποιότητα του οπτικού σήματος ψαλιδίζοντας φαινόμενα όπως το overshoot και το patterning.



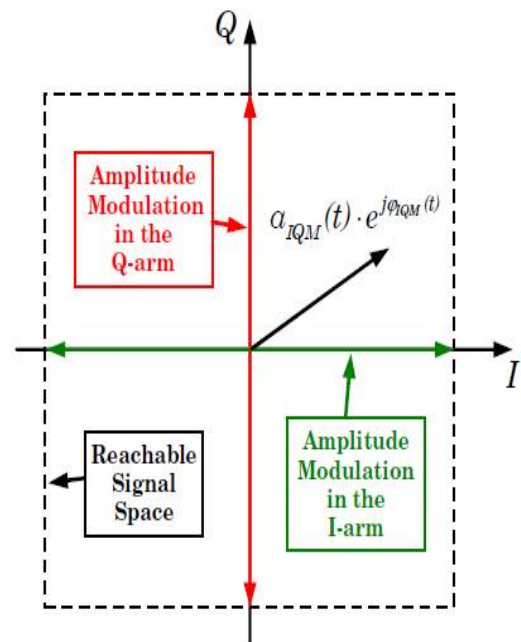
Εικόνα 2.3: Η συνάρτηση μεταφοράς του διαμορφωτή Mach-Zehnder

2.1.3 – IQ διαμορφωτής

Πρόκειται για μία από τις πιο βασικές δομές διαμόρφωσης και αποτελείται από δύο διαμορφωτές Mach-Zehnder. Το φως που εισέρχεται στη διάταξη χωρίζεται σε δύο διαφορετικά “μονοπάτια”, της φάσης (in-phase) και του πλάτους (quadrature), σε κάθε ένα από τα οποία πραγματοποιείται διαμόρφωση πλάτους από Mach-Zehnder διαμορφωτή ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία push-pull στο ελάχιστο σημείο μετάδοσης. Με έναν επιπλέον διαμορφωτή φάσης προστίθεται μια μετατόπιση φάσης κατά $\pi/2$ σε ένα από τα δύο μονοπάτια και έτσι με τον συνδυασμό των δύο συνιστωσών του σήματος στην έξοδο του IQ διαμορφωτή μπορούμε να επιτύχουμε οποιοδήποτε σύμβολο στο διάγραμμα αστερισμού (constellation diagram).



Εικόνα 2.4: Ολοκληρωμένος IQ διαμορφωτής



Εικόνα 2.5: Αρχή λειτουργίας IQ διαμορφωτή

Αγνοώντας τις απώλειες η συνάρτηση μετάφοράς της διάταξης παίρνει την παρακάτω μορφή:

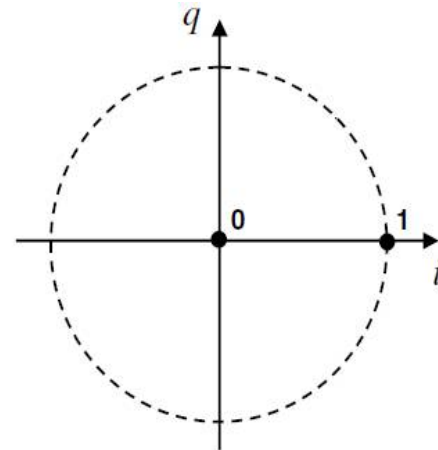
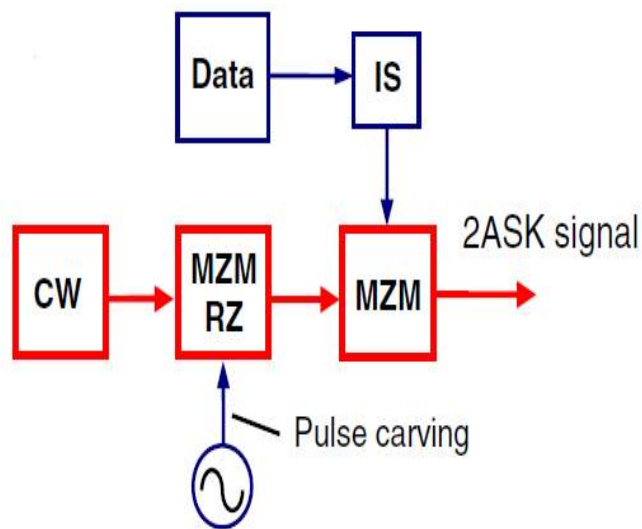
$$E_{out}(t)/E_{in}(t) = \frac{1}{2} \cdot \cos[\phi_1(t)/2] + \frac{1}{2} \cdot j \cdot \cos[\phi_2(t)/2]$$

όπου $\phi_1(t) = u_1(t) \cdot \pi/V\pi$ και $\phi_2(t) = u_2(t) \cdot \pi/V\pi$ οι φάσεις που αποκτούν οι δύο συνιστώσες του σήματος μετά την διάδοσή τους στα δύο σκέλη του IQ διαμορφωτή.

2.2 – Σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης

2.2.1 – Διαμόρφωση Μετατόπισης Πλάτους (Amplitude Shift Keying)

Η απλούστερη και συνηθέστερη μορφή διαμόρφωσης στις οπτικές επικοινωνίες είναι η διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους (Amplitude Shift Keying – ASK), στην οποία η πληροφορία εγγράφεται σε διάφορα επίπεδα οπτικής έντασης. Η πλέον διαδεδομένη μορφή διαμόρφωσης σε επίπεδο εφαρμογών είναι η δυαδική ASK (2ASK) ή αλλιώς On-Off Keying διαμόρφωση. Στην περίπτωση αυτή η λογική στάθμη 1 κωδικοποιείται με την ύπαρξη οπτικής ισχύος συγκεκριμένης τιμής ενώ η λογική στάθμη 0 με την ύπαρξη οπτικής ισχύος χαμηλότερης ή μηδενικής τιμής. Για να επιτύχουμε τη συγκεκριμένη διαμόρφωση μπορούμε είτε να διαμορφώσουμε απευθείας την οπτική πηγή, μέσω της τεχνικής της άμεσης διαμόρφωσης (direct modulation) κατά την οποία διαμορφώνεται το ρεύμα οδήγησης της οπτικής πηγής ανάλογα με τη λογική πληροφορία είτε χρησιμοποιώντας έναν εξωτερικό οπτικό διαμορφωτή. Η δεύτερη αυτή περίπτωση προτιμάται σε οπτικά συστήματα υψηλών ταχυτήτων και μεγάλων αποστάσεων καθώς προσδίδει λιγότερο chirp στο διαμορφωμένο σήμα και κατ'επέκταση μεγαλύτερη ανοχή στα φαινόμενα της διασποράς.



Εικόνα 2.6: Κύκλωμα διαμόρφωσης 2ASK σήματος

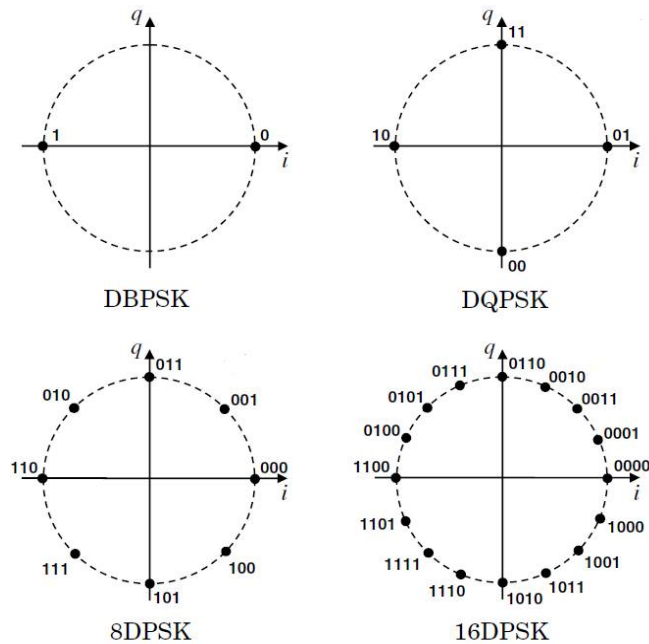
Εικόνα 2.7: Διάγραμμα αστερισμού για 2ASK σήμα

Στην εικόνα 2.6 απεικονίζεται το κύκλωμα εξωτερικής διαμόρφωσης για την παραγωγή OOK σήματος. Το παραγόμενο από ένα laser συνεχούς κύματος οπτικό φέρον διέρχεται προαιρετικά από έναν διαμορφωτή Mach-Zehnder για την δημιουργία οπτικού ρολογίου (τεχνική pulse carving) και καταλήγει στον τελικό διαμορφωτή Mach-Zehnder για τη διαμόρφωση πλάτους με βάση τη λογική πληροφορία που μεταφέρει το ηλεκτρικό σήμα.

Στην εικόνα 2.7 απεικονίζεται το παραγόμενο διάγραμμα αστερισμού με την λογική πληροφορία της χαμηλής και υψηλής στάθμης (0 και 1 δυαδική πληροφορία).

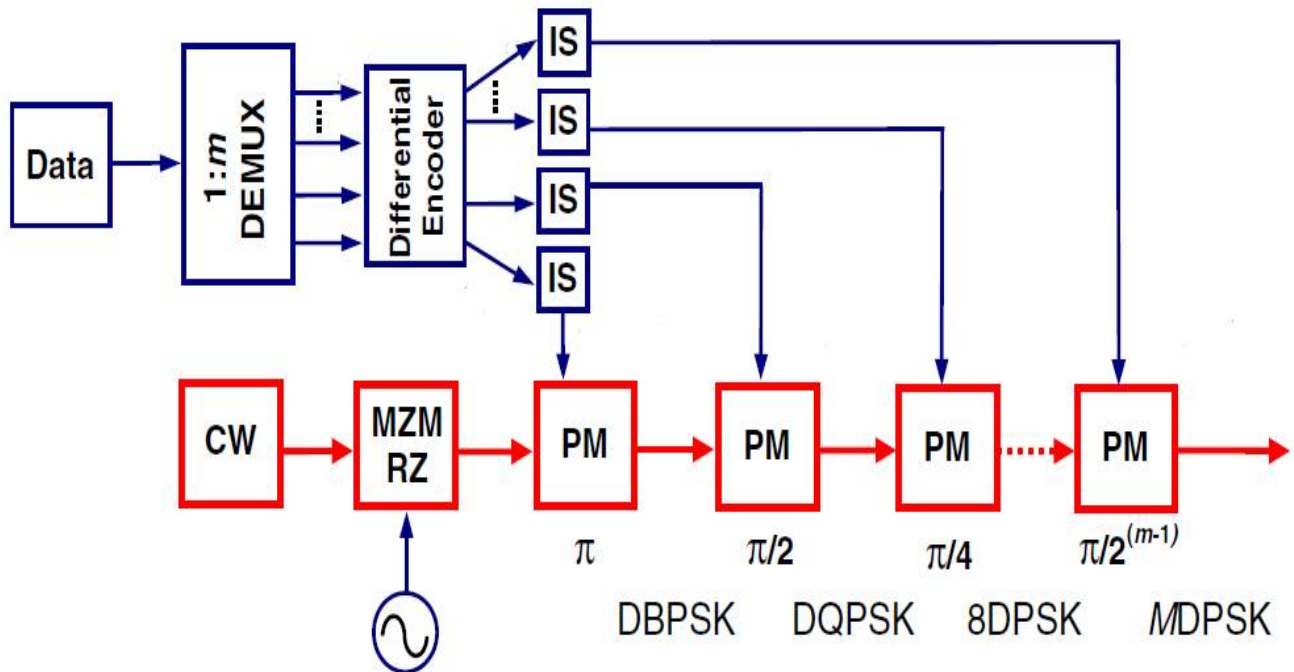
2.2.2 – Διαφορική Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης (Differential Phase Shift Keying)

Αναζητώντας τρόπους ώστε τα οπτικά σήματα να έχουν μεγαλύτερη ανεκτικότητα στα φαινόμενα διασποράς κατά τη διάδοση στην ίνα, τα απλά σχήματα διαμόρφωσης εξελίχθηκαν, οδηγώντας σε σχήματα Differential PSK. Το απλούστερο σχήμα διαμόρφωσης αυτής της κατηγορίας είναι η Differential Binary Phase Shift Keying διαμόρφωση (DBPSK). Το πλάτος του διαμορφωμένου σήματος διατηρείται σταθερό ενώ η φάση του μεταβάλλεται μεταξύ 0° και 180° αναλόγα με τη λογική πληροφορία. Ακολουθώντας παρόμοια λογική σχηματίζονται και οι υπόλοιπες μορφές διαμόρφωσης της κατηγορίας PSK όπως η Differential Quadrature Phase Shift keying (DQPSK), η 8-Differential Phase Shift keying (8DPSK), η 16-Differential Phase Shift keying (16DPSK) και ούτω καθεξής. Όσο βέβαια αυξάνεται ο αριθμός των bits ανά σύμβολο τόσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα των ηλεκτρικών σημάτων που οδηγούν τους οπτικούς διαμορφωτές όπως επίσης και η πολυπλοκότητα των οπτικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την αναπαραγωγή του διαμορφωμένου οπτικού σήματος στο δέκτη. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα αστερισμού διαφόρων PSK διαμορφώσεων, στα οποία τα σύμβολα τοποθετούνται με βάση την Gray κωδικοποίηση σύμφωνα με την οποία γειτονικά σύμβολα διαφέρουν μόνο κατά 1 bit, οδηγώντας έτσι σε καλύτερα αποτελέσματα από άποψη θορύβου.



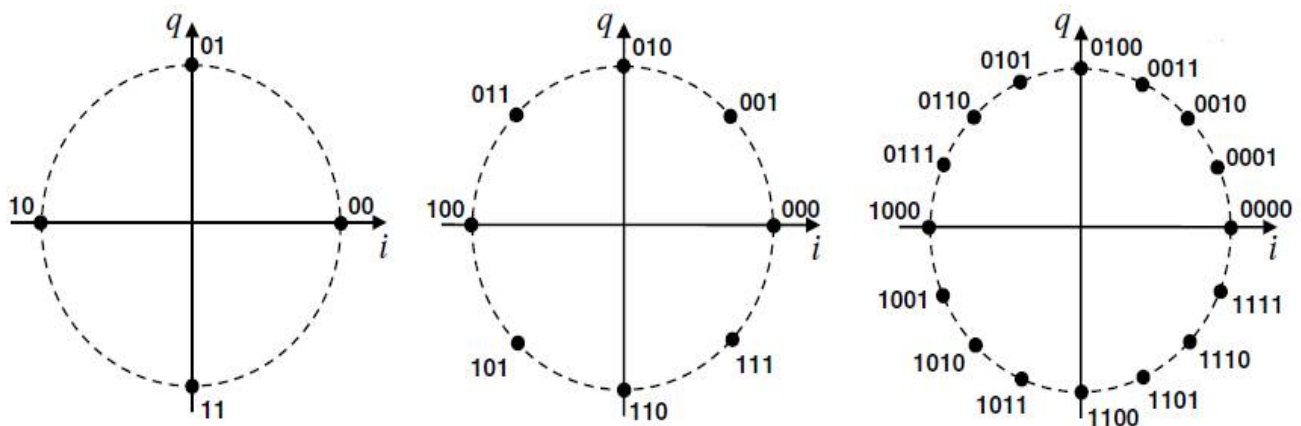
Εικόνα 2.8: Διαγράμματα αστερισμού για DPSK διαμορφώσεις με κωδικοποίηση Gray

Σχετικά με τα κυκλώματα παραγωγής των σημάτων με τη συγκεκριμένη διαμόρφωση υπάρχουν διαφορετικές πρακτικές υλοποιήσεις. Στην πρώτη περίπτωση το παραγόμενο από ένα laser συνεχούς κύματος οπτικό φέρον εισέρχεται σε διαδοχικούς διαμορφωτές φάσης ο αριθμός των οποίων ισούται με τον αριθμό των bits ανά σύμβολο που επιθυμούμε να κωδικοποιήσουμε. Ο κάθε διαμορφωτής φάσης οδηγείται από δυαδικό ηλεκτρικό ψηφιακό σήμα. Η υλοποίηση αυτή στο κομμάτι του εκπομπού ονομάζεται σειριακή τεχνική (serial technique) και στην εικόνα 2.9 απεικονίζεται το σχετικό κύκλωμα παραγωγής.



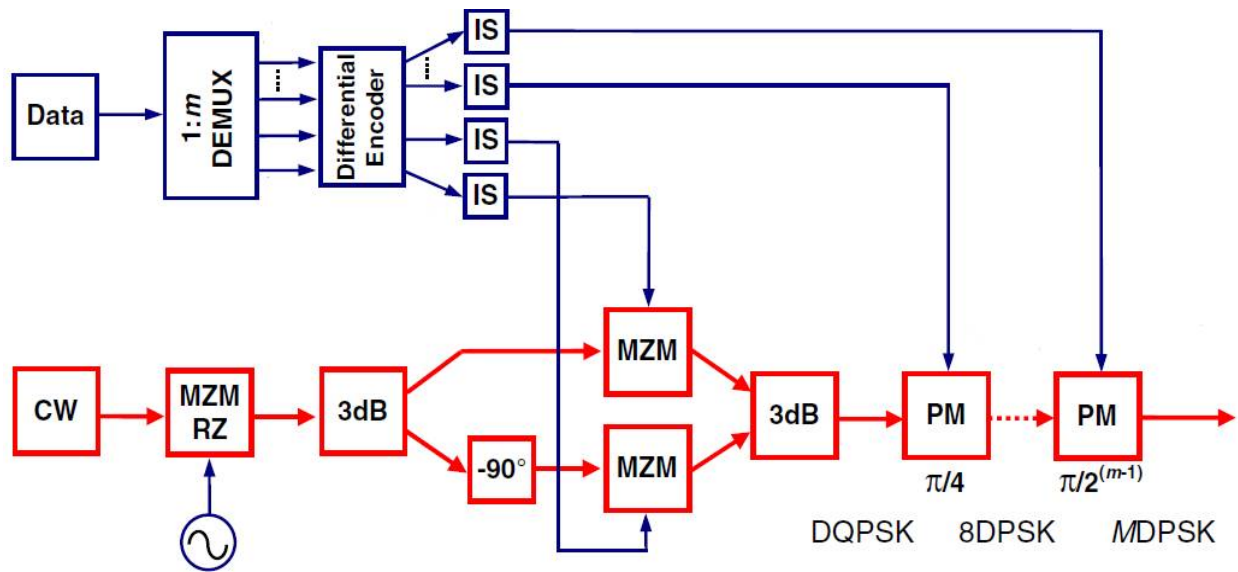
Εικόνα 2.9: Σειριακή τοπολογία εκπομπού DPSK

Στην εικόνα 2.10 απεικονίζονται τα διαγράμματα αστερισμού σημάτων παραγόμενων από το παραπάνω κύκλωμα παραγωγής με διαμορφώσεις DQPSK, 8DPSK και 16DPSK αντίστοιχα.



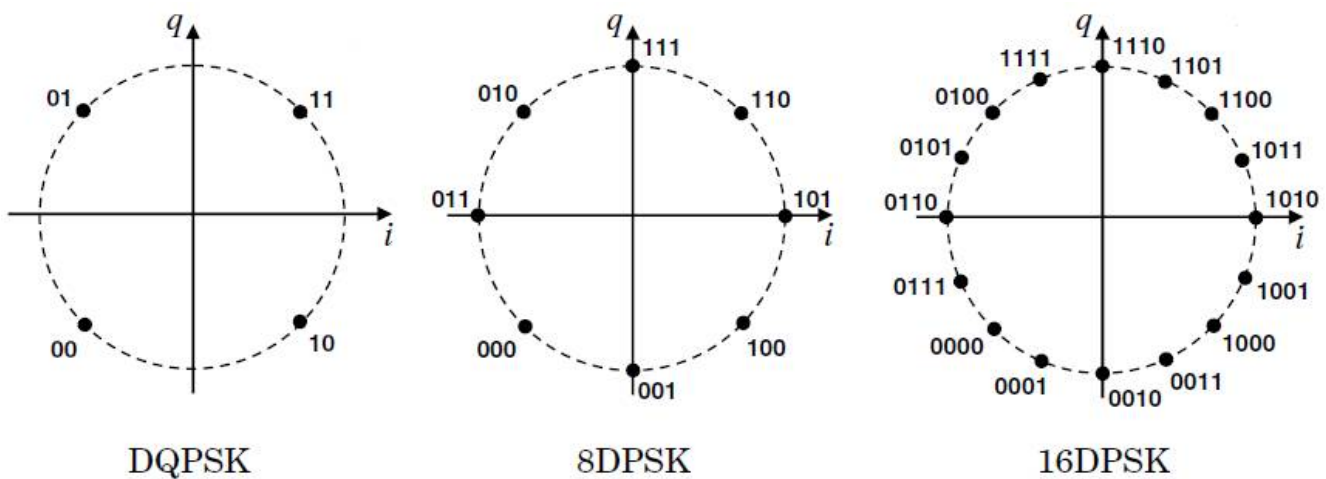
Εικόνα 2.10: Διαγράμματα αστερισμού για σήματα διαμορφωμένα από σειριακό εκπομπό DPSK

Μια διαφορετική προσέγγιση είναι η παράλληλη υλοποίηση (parallel technique) και στηρίζεται στο συνδυασμό ενός IQ διαμορφωτή και συνεχόμενων διαμορφωτών φάσης. Ένα laser συνεχούς κύματος τροφοδοτεί με το οπτικό φέρον έναν IQ διαμορφωτή ο οποίος παράγει αρχικά ένα DQPSK διαμορφωμένο σήμα και οι διαμορφωτές φάσης παράγουν στη συνέχεια υψηλότερης τάξης DPSK διαμορφωμένα σήματα. Ο κάθε διαμορφωτής φάσης και οι διαμορφωτές Mach-Zehnder οδηγούνται από δυαδικό ηλεκτρικό ψηφιακό σήμα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το σχετικό κύκλωμα παραγωγής.



Εικόνα 2.11: Εκπομπός DPSK σήματος με παράλληλη υλοποίηση

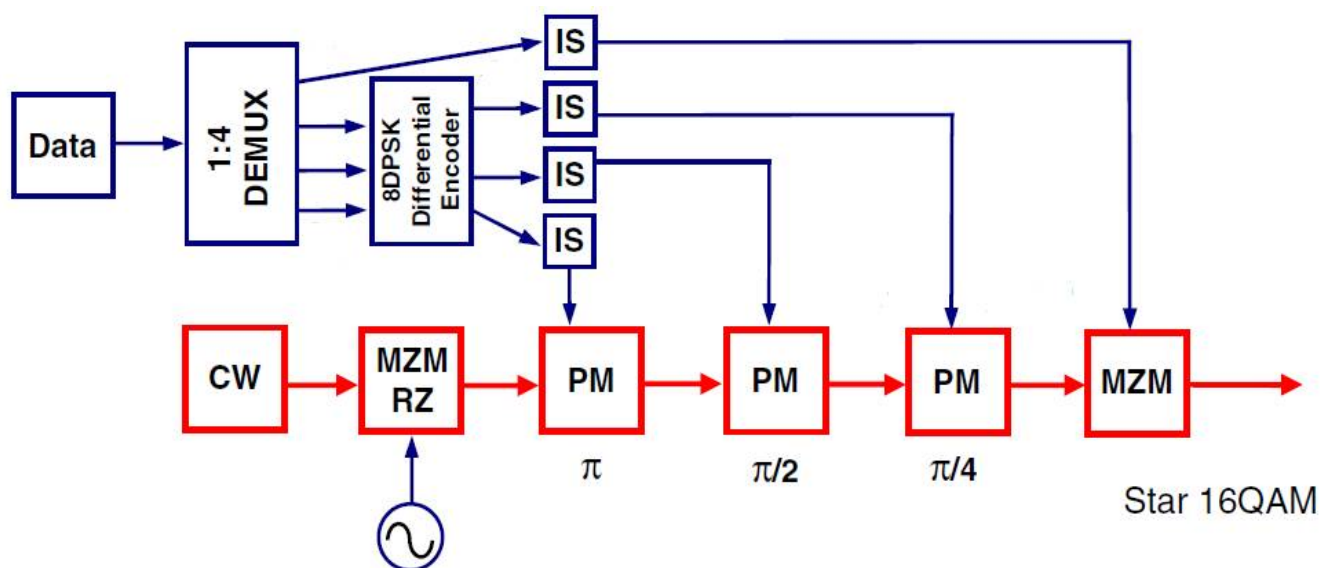
Στην εικόνα 2.12 απεικονίζονται τα διαγράμματα αστερισμού σημάτων παραγόμενων από το παραπάνω κύκλωμα παραγωγής με διαμορφώσεις DQPSK, 8DPSK και 16DPSK αντίστοιχα.



Εικόνα 2.12: Διαγράμματα αστερισμού για σήματα διαμορφωμένα από παράλληλο εκπομπό DPSK

2.2.3 – Ορθογωνική Διαμόρφωση Πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation)

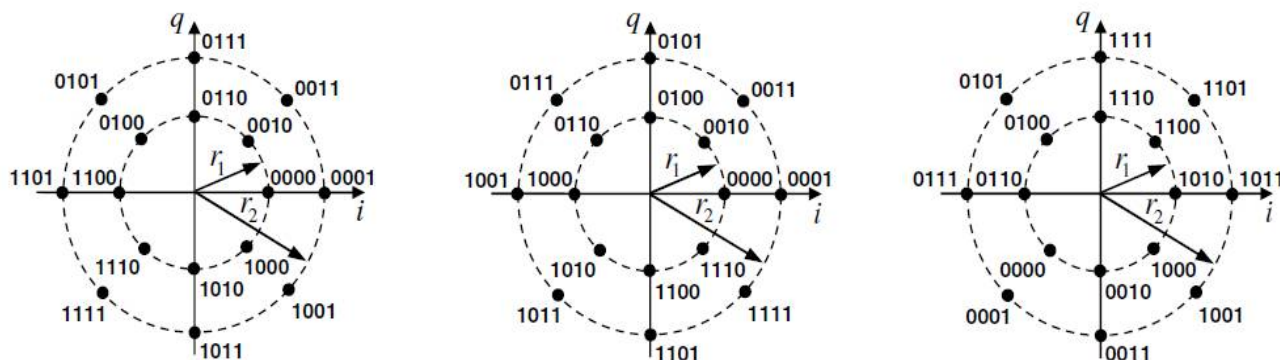
Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για μετάδοση της μέγιστης δυνατής ποσότητας πληροφορίας ανά σύμβολο με τις καλύτερες προδιαγραφές μετάδοσης στην οπτική ίνα οδήγησε σε συνδυαστικές διαμορφώσεις πλάτους και φάσης. Σε σχέση με τα απλά σχήματα διαμόρφωσης φάσης η ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation - QAM) χρησιμοποιεί μειωμένο αριθμό φάσεων για τον ίδιο αριθμό bits που μεταδίδονται ανα σύμβολο. Τα διαγράμματα αστερισμού μπορεί να έχουν τετραγωνική μορφή (Square QAM) ή να είναι διατεταγμένα σε ομόκεντρους κύκλους (Star QAM). Η διαδικασία παραγωγής των Star QAM οπτικών διαμορφωμένων σημάτων είναι ακριβώς η ίδια με την παραγωγή των DPSK διαμορφωμένων σημάτων που περιγράψαμε προηγουμένως προσθέτοντας μόνο έναν Mach-Zehnder διαμορφωτή για την διαμόρφωση στο πεδίο του πλάτους του οπτικού παλμού. Παρακάτω παρουσιάζεται το κύκλωμα ενός πομπού 16 Star QAM το οποίο αποτελείται από έναν σειριακό εκπομπό 8DPSK και ένα Mach-Zehnder διαμορφωτή που τοποθετεί το εκάστοτε σύμβολο στον εσωτερικό ή τον εξωτερικό κύκλο ανάλογα με την τιμή του κωδικοποιημένου bit πληροφορίας που τον τροφοδοτεί.



Εικόνα 2.13: Κύκλωμα παραγωγής σήματος 16 Star QAM

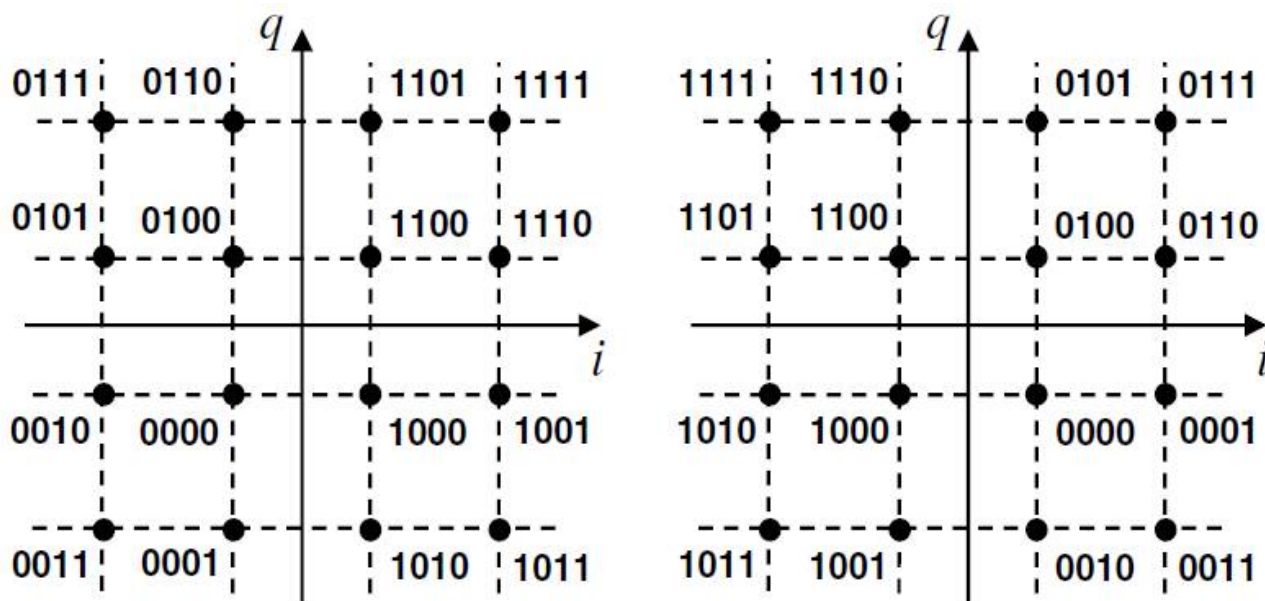
Παρά την ευκολία παραγωγής των σημάτων με τη συγκεκριμένη διαμόρφωση καθώς και την ευκολία σχεδιασμού των αντίστοιχων δεκτών, παρατηρήθηκε ότι δεν έχουν τα καλύτερα αποτελέσματα σε επίπεδο σηματοθρομβικού λόγου (signal to noise ratio - SNR) και ρυθμού ανάλυσης λαθών (bit error rate - BER) καθώς τα σύμβολα που είναι διατεταγμένα στους εσωτερικούς κύκλους των διαγραμμάτων αστερισμού βρίσκονται πολύ πιο κοντά το ένα στο

άλλο συγκρινόμενα με αυτά που είναι διατεταγμένα στους εξωτερικούς κύκλους των διαγραμμάτων αστερισμού.



Εικόνα 2.14: Διαγράμματα αστερισμού σήματος 16 Star QAM για διάφορες κωδικοποιήσεις

Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκαν περισσότερα σύμβολα στους εξωτερικούς κύκλους των διαγραμμάτων αστερισμού προκειμένου να υπάρξουν πιο ισορροπημένες ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα στα διατεταγμένα σύμβολα. Η εξέλιξη αυτή οδήγησε στη διαμόρφωση Square QAM στην οποία τα σύμβολα τοποθετούνται σε τετραγωνικές διατάξεις σε κάθε τεταρτημόριο του διαγράμματος αστερισμού. Η διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στα ηλεκτρονικά κυκλώματα σε αντίθεση με τις οπτικές τηλεπικοινωνίες όπου βρισκόμαστε πολύ μακριά από την πρακτική εφαρμογή της. Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα σημάτων με 16 Square QAM διαμόρφωση. Τα κυκλώματα παραγωγής τέτοιων σημάτων θα αναλυθούν λεπτομερώς στο 4^ο κεφάλαιο.



Εικόνα 2.15: Διάγραμμα αστερισμού σημάτων με 16 Square QAM διαμόρφωση

2.3 – Οπτικός δέκτης

2.3.1 – 2 x 4 90° Hybrid

Αποτελεί βασικό στοιχείο ενός οπτικού δέκτη στην περίπτωση σημάτων ανώτερης τάξης διαμόρφωσης καθώς επιτρέπει το διαχωρισμό των in-phase και quadrature συνιστωσών του λαμβανόμενου σήματος. Στους σύμφωνους δέκτες χρησιμοποιείται για την υπέρθεση του λαμβανόμενου οπτικού φέροντος με ένα σήμα αναφοράς προερχόμενο από έναν τοπικό ταλαντωτή, τον ρόλο του οποίου παίζει στις οπτικές επικοινωνίες ένα laser. Στις τέσσερις εξόδους του 2 x 4 90° Hybrid η ισχύς που προκύπτει περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{outn}(t) = \frac{1}{4} \cdot |E_{in1}(t)|^2 + \frac{1}{4} \cdot |E_{in2}(t)|^2 + \frac{1}{2} \cdot |E_{in1}(t)| \cdot |E_{in2}(t)| \cdot \cos[\phi_1(t) - \phi_2(t) - n \cdot 90^\circ + \psi]$$

όπου $E_{in1}(t) = |E_{in1}(t)| \cdot \exp[j \cdot \phi_1(t)]$ και $E_{in2}(t) = |E_{in2}(t)| \cdot \exp[j \cdot \phi_2(t)]$ τα πεδία των εισερχόμενων στο hybrid σημάτων και ψ γωνία, το μέγεθος της οποίας θα θεωρήσουμε τυχαίο αφού τυχαίες είναι και οι φάσεις του οπτικού φέροντος και του σήματος αναφοράς και $n = 0,1,2,3$ ανάλογα με την έξοδο του hybrid στην οποία αναφερόμαστε. Οι δύο πρώτοι όροι της παραπάνω εξίσωσης είναι κλάσματα της ισχύος των εισερχομένων στο hybrid σημάτων και είναι ίδιοι και στις τέσσερις εξόδους συνεπώς απαλείφονται κατά τη διαδικασία της ισοροπημένης λήψης (balanced detection). Ο τρίτος όρος χρησιμεύει στο διαχωρισμό της in-phase από την quadrature συνιστώσα στον balanced detector.

Για να προκύψει αυτή η ισχύς εξόδου από το hybrid θα πρέπει η συνάρτηση μεταφοράς του αγνοώντας τις απώλειες να έχει την παρακάτω μορφή:

$$E_{out1}(t) = \frac{1}{2} \cdot [\exp(j \cdot \psi_{11}) \cdot E_{in1}(t) + \exp(j \cdot \psi_{12}) \cdot E_{in2}(t)]$$

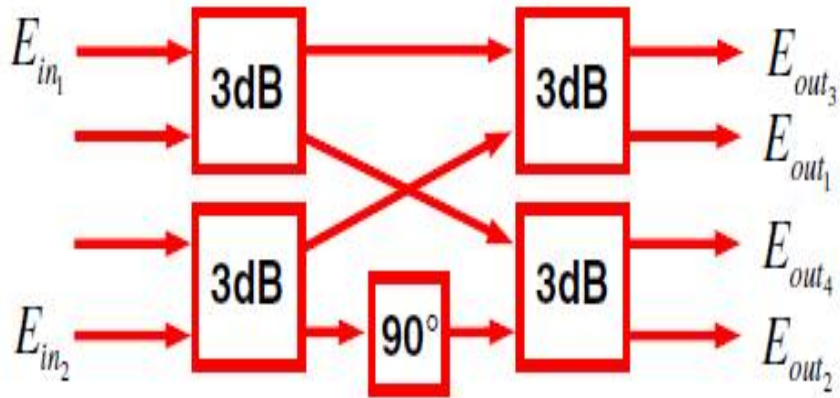
$$E_{out2}(t) = \frac{1}{2} \cdot [\exp(j \cdot \psi_{21}) \cdot E_{in1}(t) + j \cdot \exp(j \cdot \psi_{22}) \cdot E_{in2}(t)]$$

$$E_{out3}(t) = \frac{1}{2} \cdot [\exp(j \cdot \psi_{31}) \cdot E_{in1}(t) - \exp(j \cdot \psi_{32}) \cdot E_{in2}(t)]$$

$$E_{out4}(t) = \frac{1}{2} \cdot [\exp(j \cdot \psi_{41}) \cdot E_{in1}(t) - j \cdot \exp(j \cdot \psi_{42}) \cdot E_{in2}(t)]$$

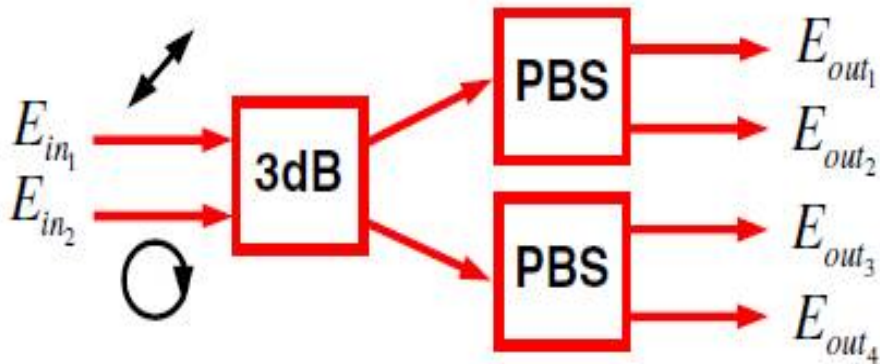
$$\text{και } \psi_{11} - \psi_{12} = \psi_{21} - \psi_{22} = \psi_{31} - \psi_{32} = \psi_{41} - \psi_{42} = \psi$$

Για την υλοποίηση ενός 2 x 4 90° Hybrid υπάρχουν διάφοροι κατασκευαστικοί τρόποι. Μια επιλογή είναι η κατασκευή του hybrid με 4 συζεύκτες 50:50 και ένα στοιχείο μετατόπισης φάσης κατά 90°. Με τις συνδέσεις που παρουσιάζονται στην εικόνα 2.16 και την τοποθέτηση της μετατόπισης φάσης στο κάτω σκέλος της διάταξης επιτυγχάνεται η συνάρτηση μεταφοράς του 2 x 4 90° Hybrid με $\psi=0$.



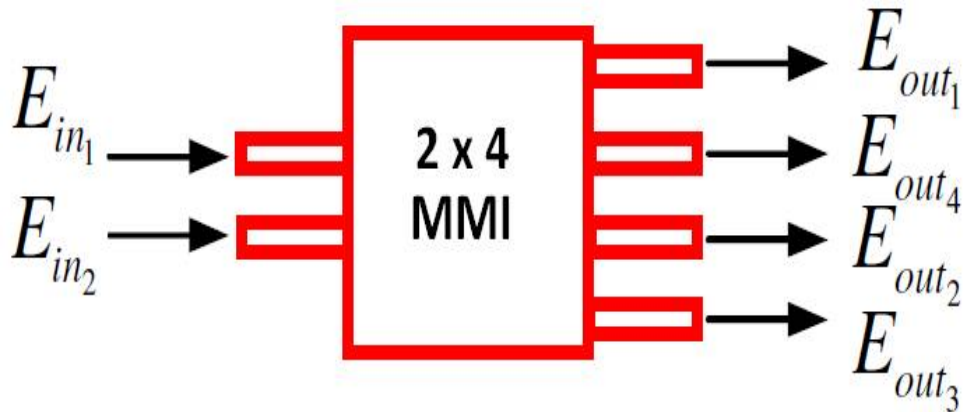
Εικόνα 2.16: Υλοποίηση 2 x 4 90° Hybrid με 3dB συζεύκτες και μετατόπιση φάσης

Μια δεύτερη επιλογή για την κατασκευή ενός 2 x 4 90° Hybrid παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα και αποτελείται από τον συνδυασμό ενός συζεύκτη 3dB με δύο συζεύκτες διαχωρισμού πόλωσης (polarization beam splitters-PBS). Για να προκύψει η παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς πρέπει η διάταξη να τροφοδοτηθεί με σήματα συγκεκριμένης πόλωσης. Το ένα σήμα εισόδου πρέπει να έχει πόλωση 45° σε σχέση με τη διεύθυνση αναφοράς του PBS ενώ το δεύτερο σήμα θα πρέπει να είναι κυκλικά πολωμένο.



Εικόνα 2.17: Υλοποίηση 2 x 4 90° Hybrid με 3dB συζεύκτη και polarization beam splitters

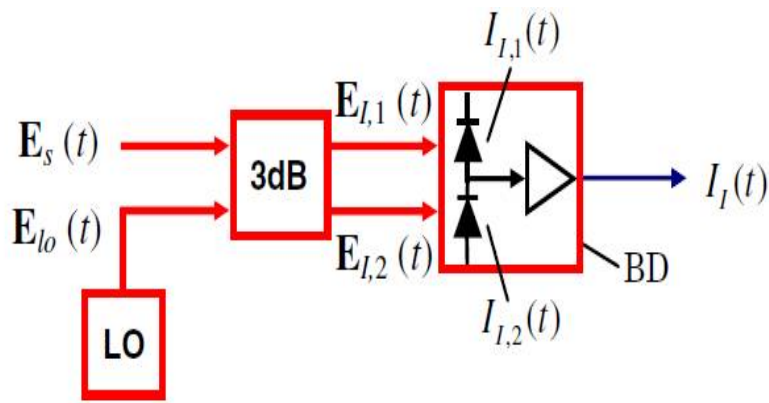
Στη συγκεκριμένη προσομοίωση θα χρησιμοποιηθεί ένας 2 x 4 πολλαπλών ρυθμών (multi-mode interference coupler-MMI coupler) συμβολομετρικός συζεύκτης ο οποίος παρέχει σταθερή λειτουργία χωρίς τη χρήση επιπρόσθετου ελέγχου. Η συγκεκριμένη διάταξη παράγει στην έξοδό της τις επιθυμητές διαφορές φάσεων όταν στις εισόδους της τοποθετηθούν τα κατάλληλα πεδία τα οποία κυματοδηγούνται με ακριβή κ συγκεκριμένο τρόπο εντός της διάταξης. Στα πλεονεκτήματα της χρήσης του MMI Coupler προστίθεται η δυνατότητα ολοκλήρωσης σε chip, η υποστήριξη μορφών διαμόρφωσης με βάση την πόλωση καθώς και η ευρυζωνικότητα της λειτουργίας του, που τον κάνει κατάλληλο για multi-band WDM εφαρμογές.



Εικόνα 2.18: 2 x 4 MMI Coupler

2.3.2 – Σύμφωνη λήψη

Η απλούστερη μορφή που θα συναντήσουμε σε έναν οπτικό δέκτη είναι αυτή που χρησιμοποιεί τη μέθοδο άμεσης λήψης (direct detection). Στην περίπτωση αυτή η οπτική ισχύς που φτάνει στο δέκτη μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρικό ρεύμα αφού προσπίπτει σε φωτοδίοδο. Το ρεύμα που παράγεται είναι ανάλογο του τετραγώνου του πλάτους του σήματος που προσπίπτει στη φωτοδίοδο. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να ανιχνευθεί μόνο η πληροφορία του σήματος που είναι “εγγεγραμμένη” στο πλάτος του φέροντος οπτικού σήματος και ως εκ τούτου οποιαδήποτε πληροφορία εγγράφεται στη φάση, στη συχνότητα ή στην πόλωση του σήματος χάνεται. Επομένως, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν ενδείκνυται για αποδιαμόρφωση σημάτων που χρησιμοποιούν ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης για την “εγγραφή” της πληροφορίας στο σήμα. Ενώ λοιπόν είναι αδύνατον να μετρήσουμε απευθείας την πολύ γρήγορα μεταβαλλόμενη φάση του οπτικού φέροντος, είναι δυνατόν να μετρήσουμε απευθείας την διαφορά φάσης μεταξύ του οπτικού φέροντος και ενός σήματος αναφοράς. Η διαφορά φάσης αυτή μετατρέπεται σε ένταση οπτικού παλμού μέσω οπτικών διατάξεων και κατόπιν προσπίπτει σε φωτοδίοδο για να μετατραπεί σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η μέθοδος αυτή ανίχνευσης της πληροφορίας ονομάζεται σύμφωνη λήψη (coherent detection) και αποτελεί την πλέον προηγμένη μέθοδο λήψης. Όλη η πληροφορία του οπτικού φέροντος (πλάτος, συχνότητα, φάση και πόλωση) μεταφέρεται στο ηλεκτρικό πεδίο. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει τη μέγιστη ελαστικότητα στα σχήματα διαμόρφωσης αφού ανιχνεύει την πληροφορία είτε αυτή έχει εγγραφεί στο πλάτος του οπτικού φέροντος είτε στη φάση του. Στην περίπτωση σημάτων διαμορφωμένων με υψηλής τάξης διαμορφώσεις έχουμε το πλεονέκτημα ότι η αποδιαμόρφωση γίνεται ολοκληρωτικά με ηλεκτρικές διατάξεις μειώνοντας έτσι την οπτική πολυπλοκότητα. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της βασικής αρχής της σύμφωνης λήψης:



Εικόνα 2.19: Αρχή λειτουργίας σύμφωνης λήψης

Το σήμα αναφοράς $E_{lo}(t)$ παράγεται από έναν τοπικό ταλαντωτή και κατόπιν εισέρχεται μαζί με το φέρον οπτικό σήμα $E_s(t)$ σε έναν 3dB συζεύκτη. Τα πεδία στην έξοδο του συζεύκτη έχουν υποστεί μια μετατόπιση φάσης και προσπίπτουν στις φωτοδιόδους. Στην απλή περίπτωση ενός 3dB συζεύκτη η σχετική διαφορά φάσης μεταξύ των δυο πεδίων είναι 180° . Τα προερχόμενο από τον τοπικό ταλαντωτή πεδίο αφαιρείται από το προερχόμενο από το οπτικό φέρον πεδίο σε έναν balanced detector ώστε το παραγόμενο τελικό ηλεκτρικό ρεύμα να περιέχει όλη την πληροφορία που μεταφέρουν τα δυο σήματα. Το κανονικοποιημένο ηλεκτρικό πεδίο του λαμβανόμενου οπτικού σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$E_s(t) = \sqrt{P_s} \cdot \exp[j \cdot (\omega_s \cdot t + \phi_s)] \cdot \alpha(t) \cdot \exp[j \cdot \phi(t)] \cdot \exp[j \cdot \phi_{ns}(t)] \cdot e_s$$

ενώ το ηλεκτρικό πεδίο του σήματος αναφοράς:

$$E_{lo}(t) = \sqrt{P_{lo}} \cdot \exp[j \cdot (\omega_{lo} \cdot t + \phi_{lo})] \cdot \exp[j \cdot \phi_{nlo}(t)] \cdot e_{lo}$$

όπου P η ισχύς του εκάστοτε σήματος και ω , ϕ , $\phi_n(t)$ και e η γωνιακή συχνότητα, η αρχική φάση, ο θόρυβος φάσης του laser και η πόλωση του εκάστοτε σήματος. Στην έξοδο του balanced detector παράγονται τα παρακάτω ρεύματα:

$$I_{I,1}(t) = \frac{1}{2} \cdot R \cdot (E_s + jE_{lo}) \cdot (E_s + jE_{lo})^* + ish1 = \frac{1}{2}RP_s \cdot \alpha^2(t) + \frac{1}{2}RP_{lo} + ish1 + R\sqrt{P_s}\sqrt{P_{lo}} \cdot \alpha(t) \cdot e_s e_{lo} \cdot \sin[\Delta\omega t + \phi_n(t) + \phi_0 + \phi(t)]$$

$$I_{I,2}(t) = \frac{1}{2} \cdot R \cdot (jE_s + E_{lo}) \cdot (jE_s + E_{lo})^* + ish2 = \frac{1}{2}RP_s \cdot \alpha^2(t) + \frac{1}{2}RP_{lo} + ish2 - R\sqrt{P_s}\sqrt{P_{lo}} \cdot \alpha(t) \cdot e_s e_{lo} \cdot \sin[\Delta\omega t + \phi_n(t) + \phi_0 + \phi(t)]$$

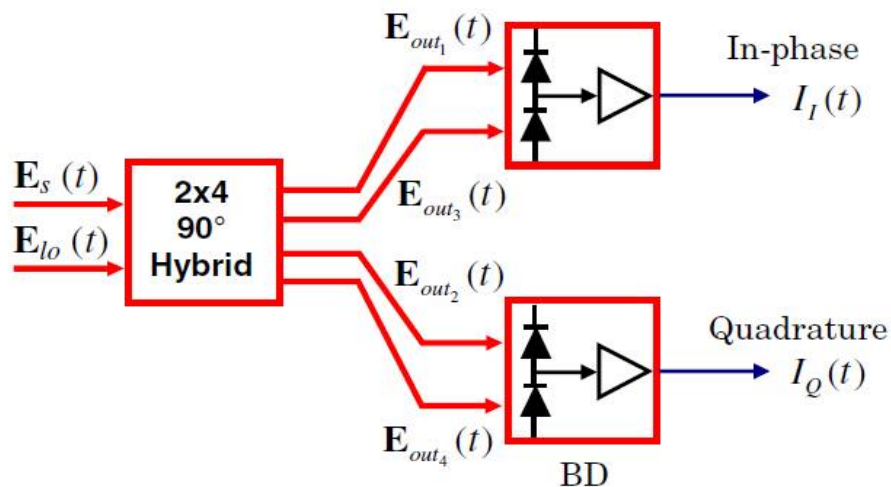
όπου $ish1$ και $ish2$ τα ρεύματα των δύο φωτοδίοδων που πηγάζουν από το θόρυβο βολής και $\Delta\omega = \omega_s - \omega_{lo}$, $\phi_n(t) = \phi_{ns}(t) - \phi_{nlo}(t)$, $\phi_0(t) = \phi_s - \phi_{lo}$. Οι δύο πρώτοι όροι των παραπάνω εξισώσεων είναι ακριβώς οι ίδιοι και αναπαριστούν την απευθείας ανιχνευόμενη ισχύ του οπτικού φέροντος και του σήματος αναφοράς αντίστοιχα. Από τους όρους αυτούς δεν προκύπτει πληροφορία καθώς $P_s \ll P_{lo}$. Μετά την είσοδο στον balanced detector εξαφανίζονται και παραμένουν μόνο οι όροι που περιέχουν όλες τις πεδιακές παραμέτρους του υπερτιθέμενου σήματος.

$$I_I(t) = 2RvPsVP_{Io} \cdot \alpha(t) \cdot e_{se_{Io}} \cdot \sin[\Delta\omega t + \phi_I(t) + \phi_0 + \phi(t)] + ish1 - ish2$$

Οι σύμφωνοι δέκτες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην περίπτωση που η συχνότητα του οπτικού φέροντος και του σήματος που προέρχεται από τον τοπικό ταλαντωτή διαφέρουν, η πληροφορία του οπτικού σήματος μετατρέπεται στο ηλεκτρικό πεδίο σε μια ενδιάμεση συχνότητα (intermediate frequency-IF). Η ενδιάμεση αυτή συχνότητα ισούται με τη διαφορά των συχνοτήτων των δύο οπτικών σημάτων και πρέπει να είναι τουλάχιστον όσο και το εύρος ζώνης του οπτικού σήματος που μεταφέρει την πληροφορία. Η συγκεκριμένη τεχνική ονομάζεται ετερόδυνη σύμφωνη ανίχνευση (heterodyne coherent detection). Στην περίπτωση που η συχνότητα του οπτικού φέροντος είναι ακριβώς η ίδια με τη συχνότητα του σήματος αναφοράς τότε αναφερόμαστε στην ομόδυνη σύμφωνη λήψη (homodyne coherent detection). Το πρόβλημα με τη συγκεκριμένη τεχνική είναι ο συγχρονισμός των δύο αυτών συχνοτήτων, καθώς οποιαδήποτε διαφορά ανάμεσα στις δύο συχνότητες οδηγεί σε στροφή του διαγράμματος αστερισμού. Το πλεονέκτημα της heterodyne coherent detection είναι ότι επιτυγχάνεται από απλές διατάξεις αποδιαμόρφωσης. Η homodyne coherent detection από την άλλη δεσμεύει το μισό ηλεκτρικό εύρος ζώνης από ότι η heterodyne coherent detection και είναι πολύ πιο αποδοτική. Γενικώς, από άποψη αποδοτικότητας της χρήσης φάσματος και πρακτικής σκοπιμότητας σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, οι διατάξεις που χρησιμοποιούν homodyne coherent detection είναι καταλληλότερες για τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα υψηλών ταχυτήτων. Στη δική μας περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε ένα δέκτη που λειτουργεί με βάση την homodyne coherent detection.

2.3.3 Optical Quadrature Frontend

Προκειμένου να αποδιαμορφωθούν μεταδιδόμενα οπτικά σήματα διαμορφωμένα με σχήματα διαμόρφωσης υψηλής τάξης είναι απαραίτητη η διάταξη optical quadrature frontend. Περιλαμβάνει αρχικά ένα 2 x 4 90° Hybrid για την υπέρθεση του οπτικού φέροντος και του σήματος αναφοράς και κατόπιν δύο balanced detectors προκειμένου να διαχωριστούν οι in-phase και quadrature συνιστώσες του σήματος.



Εικόνα 2.20: Optical Quadrature Frontend

Θέτοντας στην συνάρτηση μεταφοράς του hybrid $\psi=0$ και αγνοώντας τις αλλαγές φάσης προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\mathbf{E}_{out1}(t) = \frac{1}{2}[\mathbf{E}_s(t) + \mathbf{E}_{lo}(t)]$$

$$\mathbf{E}_{out2}(t) = \frac{1}{2}[\mathbf{E}_s(t) + j\mathbf{E}_{lo}(t)]$$

$$\mathbf{E}_{out3}(t) = \frac{1}{2}[\mathbf{E}_s(t) - \mathbf{E}_{lo}(t)]$$

$$\mathbf{E}_{out4}(t) = \frac{1}{2}[\mathbf{E}_s(t) - j\mathbf{E}_{lo}(t)]$$

Τα ρεύματα που προκύπτουν μετά την είσοδο των πεδίων στους balanced detectors είναι:

$$I_I(t) = R \cdot \mathbf{E}_{out1}(t) \cdot \mathbf{E}_{out1}^*(t) - R \cdot \mathbf{E}_{out3}(t) \cdot \mathbf{E}_{out3}^*(t) = R\sqrt{P_s}\sqrt{P_{lo}} \cdot \alpha(t) \cdot e^{j\phi_{lo}} \cdot \cos[\Delta\omega t + \phi_n(t) + \phi_0 + \phi(t)] + I_{shI}$$

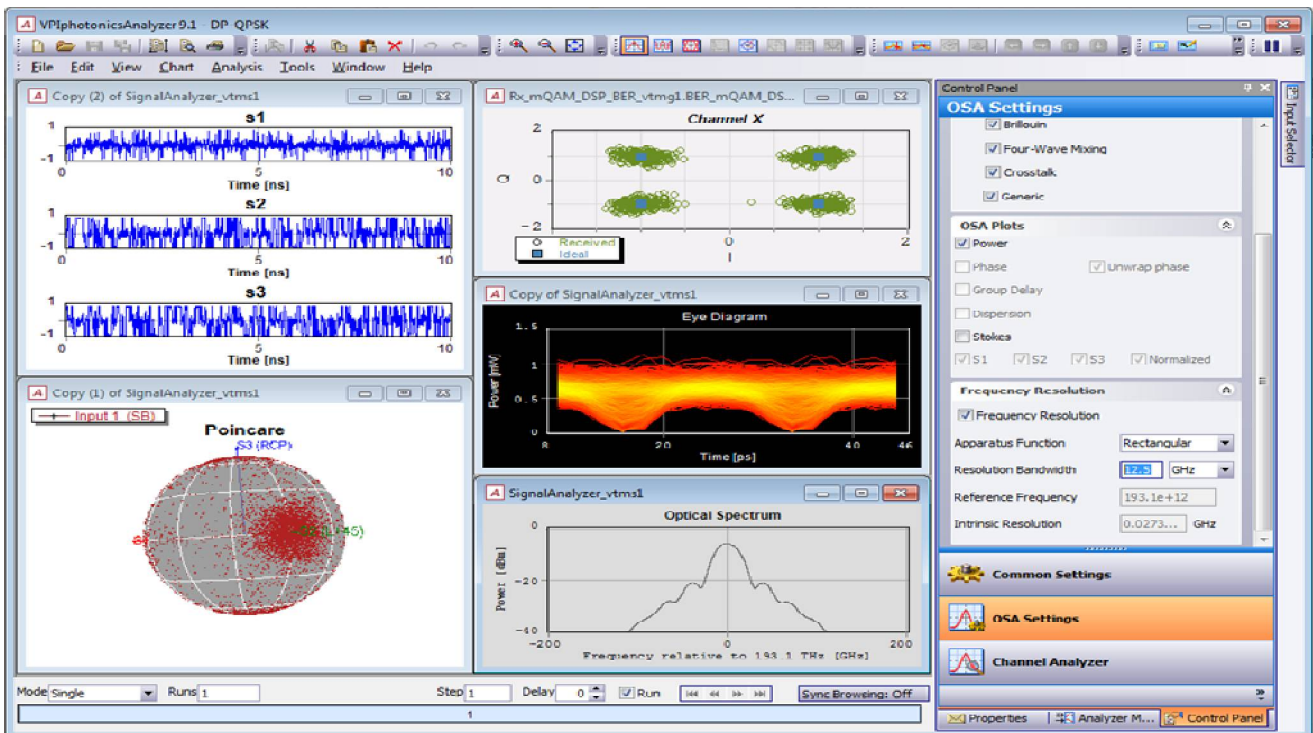
$$I_Q(t) = R \cdot \mathbf{E}_{out2}(t) \cdot \mathbf{E}_{out2}^*(t) - R \cdot \mathbf{E}_{out4}(t) \cdot \mathbf{E}_{out4}^*(t) = R\sqrt{P_s}\sqrt{P_{lo}} \cdot \alpha(t) \cdot e^{j\phi_{lo}} \cdot \sin[\Delta\omega t + \phi_n(t) + \phi_0 + \phi(t)] + I_{shQ}$$

και περιλαμβάνουν όλη την απαιτούμενη πληροφορία για την αποδιαμόρφωση της in-phase και quadrature συνιστώσας του λαμβανόμενου οπτικού φέροντος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 – VPI Transmission Maker

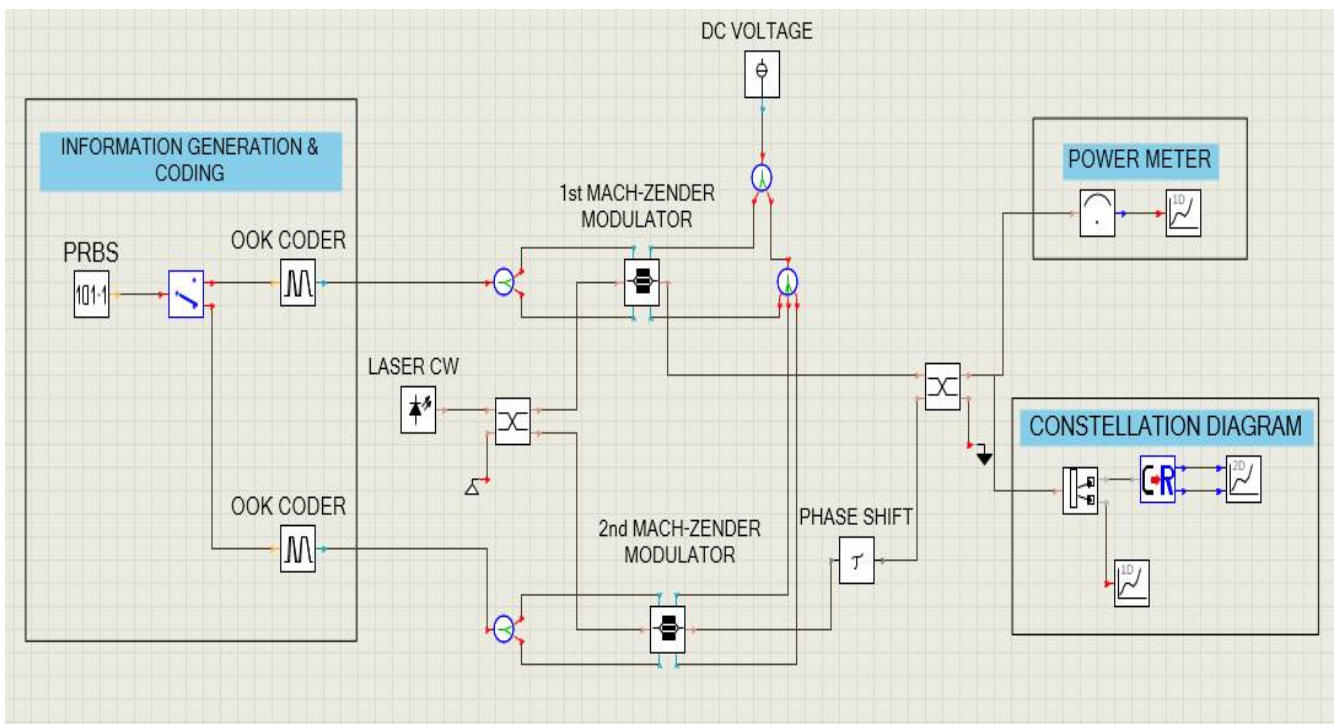
Για το σχεδιασμό και την προσομοίωση λειτουργίας των δύο τοπολογιών ενεργού οπτικού καλωδίου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα VPItransmissionMaker & VPIcomponentMaker 9.2. Πρόκειται για μια κονσόλα προσομοίωσης που επιτρέπει το σχεδιασμό φωτονικών συστημάτων τόσο μικρής εμβέλειας όσο και μεγάλων αποστάσεων οπτικών τηλεπικοινωνιών. Περιλαμβάνει επίσης βιβλιοθήκες με εκατοντάδες ηλεκτρονικά και οπτικά modules καθώς και ευρύτερων διατάξεων και κυκλωμάτων παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα προσομοίωσης και παραμετροποίησης οποιασδήποτε οπτικής διάταξης καθώς επίσης της μελέτης της απόκρισης και της απόδοσης των συστημάτων μέσω γραφικών απεικονίσεων, διαγραμμάτων, μετρήσεων ισχύος και άλλων μετρητικών εργαλείων στο πρόγραμμα VPIphotonicsAnalyzer. Η συμπεριφορά των διατάξεων τροποποιείται αλλάζοντας τις παραμέτρους τους. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι βασικές δομές των δύο οπτικών τοπολογιών με αναλυτική παρουσίαση των διατάξεων που τις αποτελούν, των παραμέτρων τους καθώς και των γενικών παραμέτρων προσομοίωσης καθώς και αποτελεσμάτων της προσομοίωσης λειτουργίας κάθε βασικής δομής των διατάξεων μας σχηματίζοντας έτσι βήμα βήμα τις τελικές διατάξεις που μας ενδιαφέρουν και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Το πρόγραμμα VPItransmissionMaker & VPIcomponentMaker 9.2 στο εξής θα αναφέρεται ως VPI. Σημειώνεται ότι τα όποια εξαγόμενα αποτελέσματα προκύψουν από τις προσομοιώσεις στο συγκεκριμένο γραφικό περιβάλλον ενδέχεται να αποκλίνουν από τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν σε εργαστηριακό επίπεδο.



Εικόνα 3.1 : Διάφορες απεικονίσεις οπτικού σήματος στο VPIphotonicsAnalyzer

3.2 – IQ διαμορφωτής

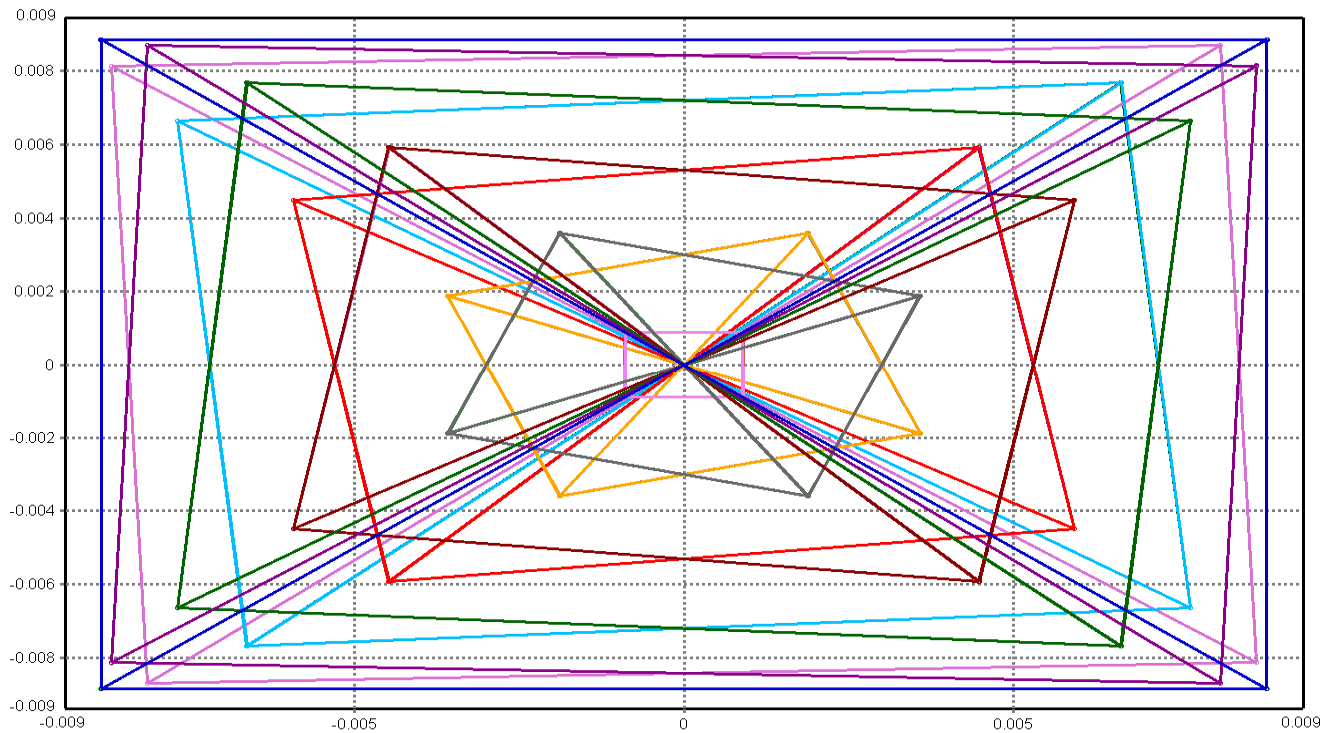
Η διάταξη του IQ διαμορφωτή όπως την προσομοιώσαμε στο VPI παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Μια γεννήτρια ακουλουθιών σε συνδυασμό με κωδικοποιητές μας παρέχουν το ηλεκτρικό σήμα πληροφορίας με το οποίο τροφοδοτούνται οι διαμορφωτές Mach-Zehnder. Το επίπεδο τάσης του λογικού 1 τίθεται στα 5 Volt όσο και η τάση V_{π} του διαμορφωτή Mach-Zehnder ενώ η τάση για το λογικό 0 είναι 0 Volt. Έτσι ο διαμορφωτής Mach-Zehnder προσδίδει στο οπτικό σήμα φάση 180° για κάθε λογικό 1 και φάση 0° για κάθε λογικό 0. Στους διαμορφωτές Mach-Zehnder εισέρχεται παράλληλα και το οπτικό σήμα προερχόμενο από ένα laser συνεχούς κύματος οπτικής ισχύος 1mW αφού πρώτα χωριστεί σε δυο σκέλη από ένα 3dB συζεύκτη ο οποίος προσδίδει και μια μετατόπιση φάσης κατά 90° στο σήμα που ακολουθεί το δεύτερο “μονοπάτι”. Για το λόγο αυτό στο συγκεκριμένο σκέλος της διάταξης ο Mach-Zehnder διαμορφωτής ακολουθείται από ένα στοιχείο μετατόπισης της φάσης κατά -90° . Τα δύο σήματα συνδυάζονται πάλι σε ένα 3dB συζεύκτη για να προκύψει το τελικό σήμα. Τα στοιχεία που ακολουθούν μετά την έξοδο του IQ διαμορφωτή στο σχήμα είναι διατάξεις για τη μέτρηση της ισχύος εξόδου και την απεικόνιση του διαγράμματος αστερισμού.



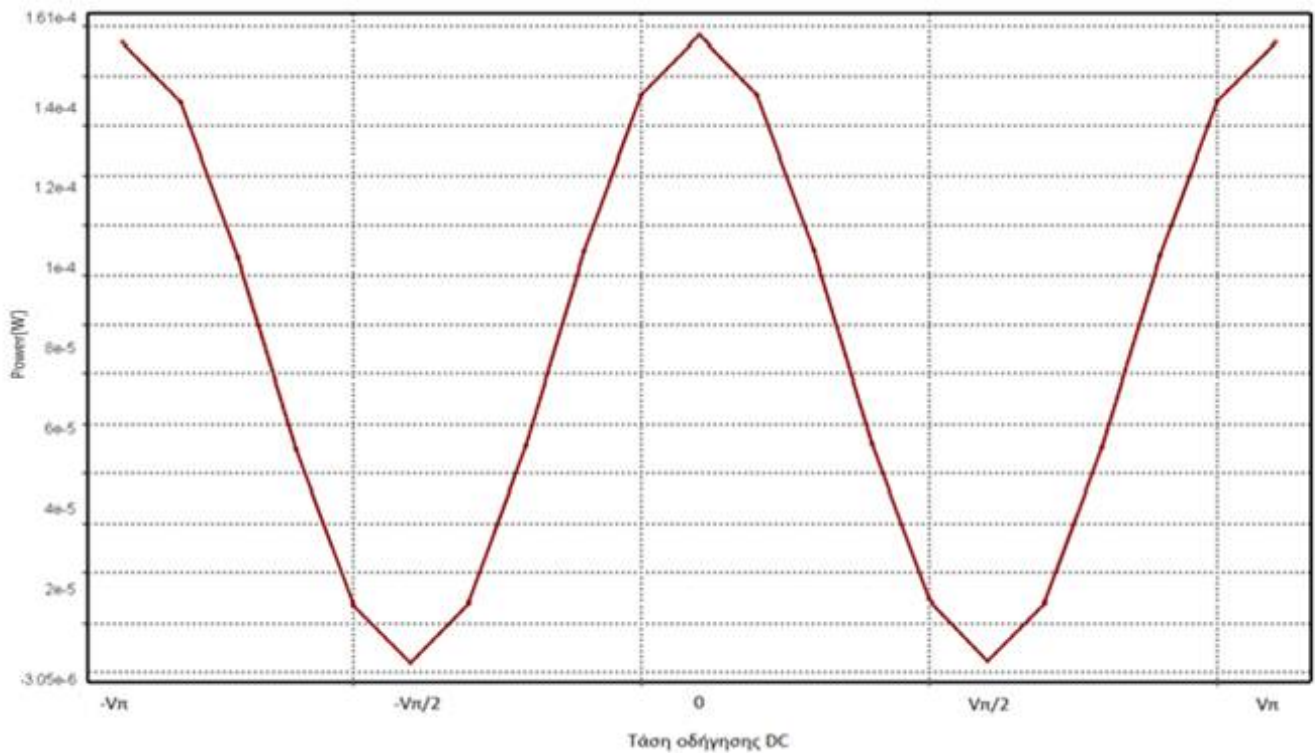
Εικόνα 3.2: Προσομοίωση του IQ διαμορφωτή στο πρόγραμμα VPI

Αρχικά παρουσιάζονται αποτελέσματα της προσομοίωσης της λειτουργίας του κυκλώματος αυτού για τάση οδήγησης από -5 Volt έως 5 Volt με βήμα 0,5 Volt ενώ η τάση V_{π} των διαμορφωτών Mach-Zehnder παραμένει σταθερή στα 5 Volt. Στην εικόνα 3.3 απεικονίζεται η μεταβολή του διαγράμματος αστερισμού κατά τη μεταβολή της τάσης οδήγησης, η οποία οφείλεται στη διαφορετική στροφή φάσης που εισάγεται στα μονοπάτια των διαμορφωτών

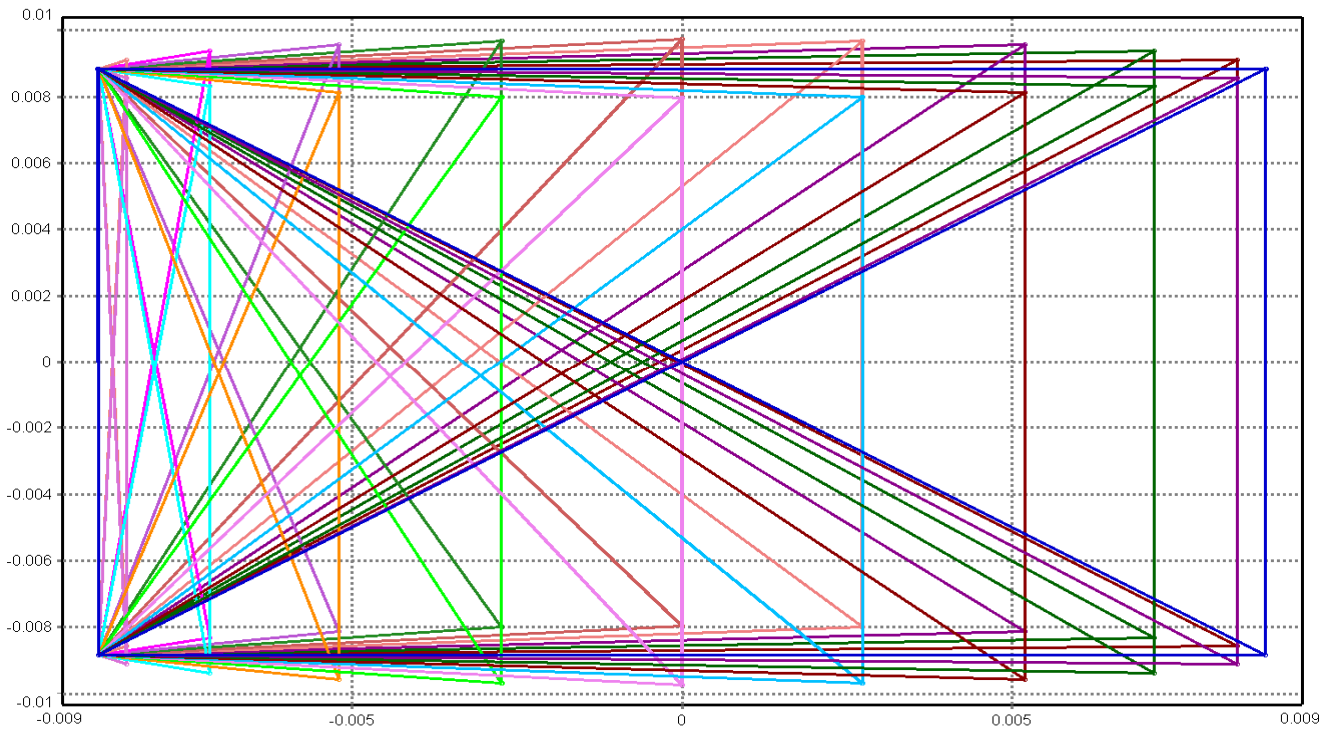
Mach-Zehnder με αποτέλεσμα τη συνεχόμενη στροφή και το “ανοιγμα” του διαγράμματος αστερισμού. Στην εικόνα 3.4 απεικονίζεται η μεταβολή της οπτικής ισχύος εξόδου.



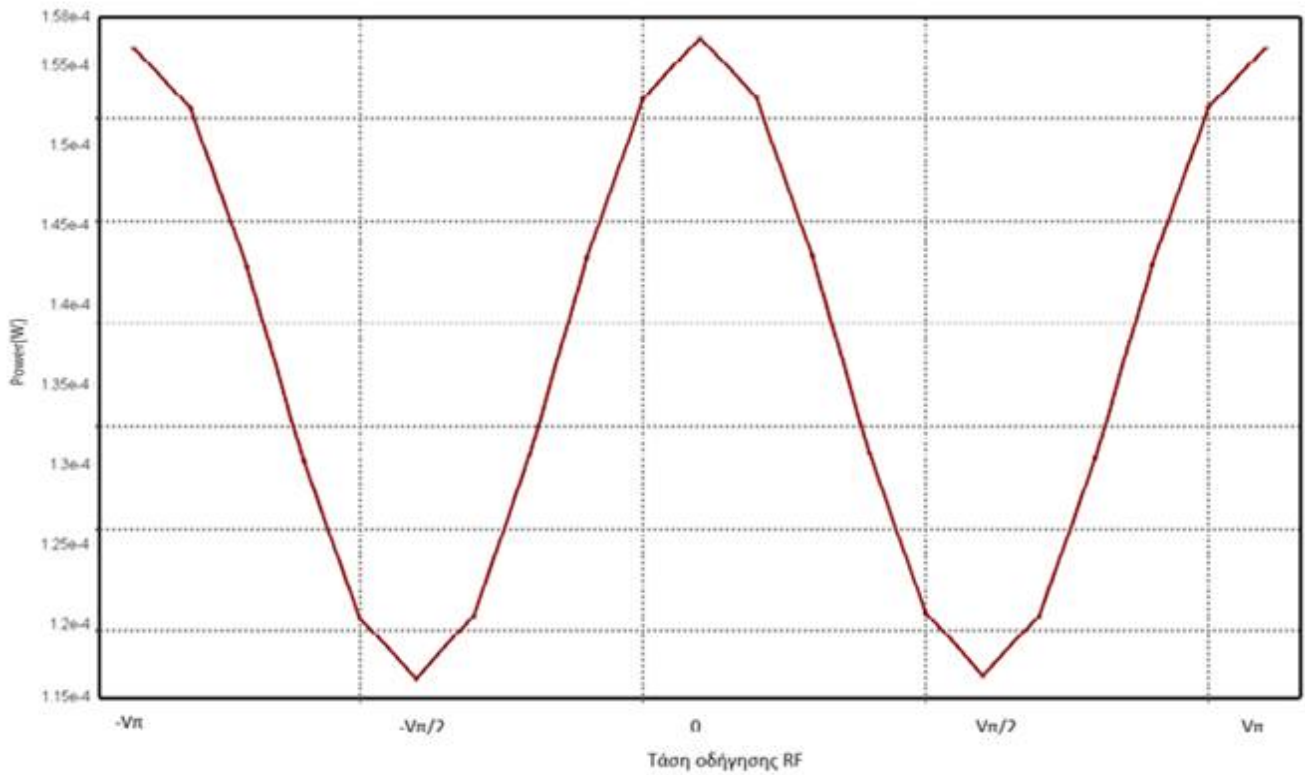
Εικόνα 3.3: Διάγραμμα αστερισμού σήματος εξόδου του IQ διαμορφωτή αλλάζοντας την τάση οδήγησης DC



Εικόνα 3.4: Οπτική ισχύς σήματος εξόδου από τον IQ διαμορφωτή αλλάζοντας την τάση οδήγησης DC



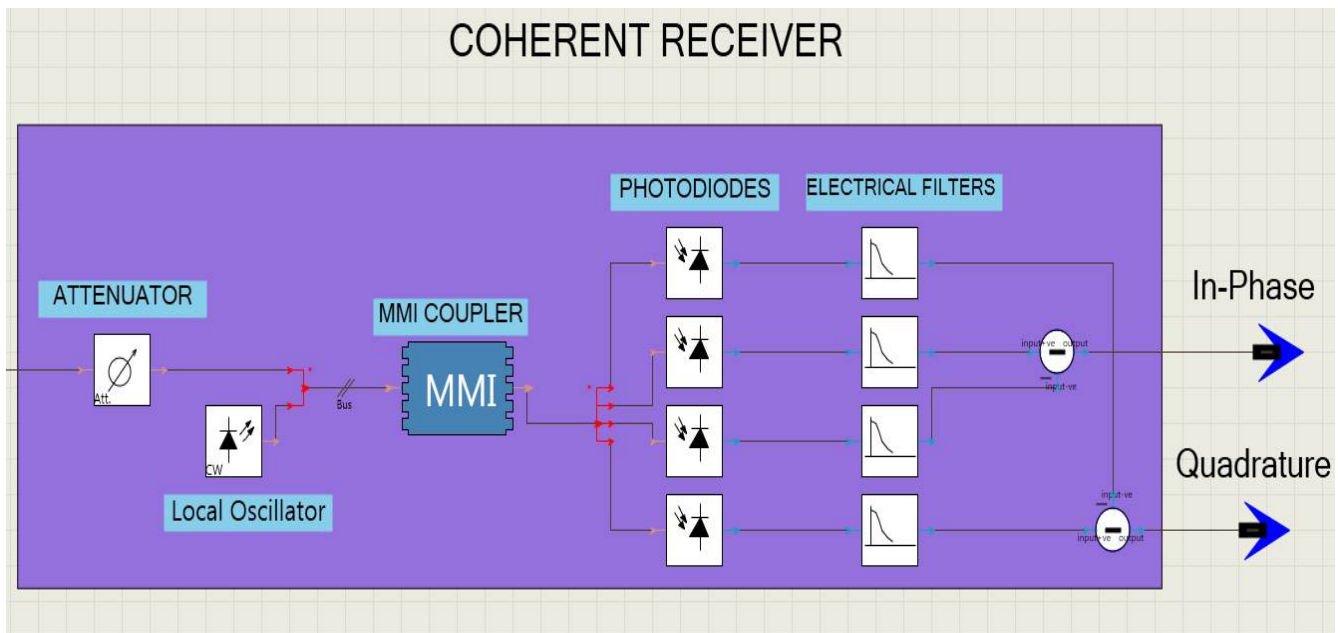
Εικόνα 3.5: Διάγραμμα αστερισμού σήματος εξόδου του IQ διαμορφωτή αλλάζοντας την τάση οδήγησης RF



Εικόνα 3.6: Οπτική ισχύς σήματος εξόδου από τον IQ διαμορφωτή αλλάζοντας την τάση οδήγησης RF

3.3 – Σύμφωνος δέκτης

Στην παρακάτω εικόνα παρατίθεται το κύκλωμα του οπτικού δέκτη ακριβώς όπως υλοποιήθηκε στην κονσόλα εξομοίωσης VPI.



Εικόνα 3.7: Ο σύμφωνος δέκτης όπως προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα VPI

Στην είσοδο του δέκτη τοποθετούμε έναν εξασθενητή ο οποίος εξασθενεί το σήμα κατά 2 dB. Με τον τρόπο αυτό προσομοιάζουμε τις απώλειες του MMI συζεύκτη. Ο τοπικός ταλαντωτής προσομοιάζεται με ένα laser συνεχούς κύματος με συχνότητα εκπομπής 193.1 THz, οπτική ισχύ 1 mW και αρχική φάση 45°. Στο παράδειγμα που περιγράψαμε στο 2^ο κεφάλαιο για την απλούστερη μορφή του σύμφωνου δέκτη ο 3 dB συζεύκτης παράγει στις εξόδους του δύο πεδία με σχετική διαφορά φάσης 180° με αποτέλεσμα το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται μετά την πρόσπτωση των δύο πεδίων στις φωτοδιόδους και την είσοδο τους στον balanced detector να είναι ανάλογο του ημιτόνου της σχετικής διαφοράς φάσης του οπτικού φέροντος και του σήματος αναφοράς. Εξαιτίας της περιοδικότητας της συνάρτησης του ημιτόνου μόνο διαφορές φάσεων 180° μπορούν να ανιχνευθούν και ως εκ τούτου η συγκεκριμένη διάταξη είναι χρήσιμη για την ανίχνευση BPSK σημάτων αλλά ανεπαρκής για την ανίχνευση σημάτων με πολυπλοκότερη μορφή διαμόρφωσης όπως είναι και η 16 Square QAM διαμόρφωση που υλοποιεί ο οπτικός πομπός της δικής μας διάταξης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οπτικές διατάξεις που μπορούν να προσδώσουν στροφή φάσης $\pi/2$ στο σήμα αναφοράς και να δημιουργήσουν την quadrature συνιστώσα του σήματος προσφέροντας έτσι κάλυψη 360° κατά την ανίχνευση στο δέκτη. Αυτή η διάταξη αποδιαμόρφωσης ονομάζεται 90° optical hybrid και έχει διαφορές πρακτικές υλοποιήσεις. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιούμε ένα 2 x 4 MMI coupler, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο οποίος παρέχει σταθερή λειτουργία χωρίς τη χρήση επιπρόσθετου ελέγχου. Η συγκεκριμένη διάταξη παράγει στην έξοδό της τις επιθυμητές

διαφορές φάσεων όταν στις εισόδους της τοποθετηθούν τα κατάλληλα πεδία τα οποία κυματοδηγούνται με ακριβή και συγκεκριμένο τρόπο εντός της διάταξης. Παρακάτω παρουσιάζεται το στοιχείο MMI_M_N του VPI που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση μας καθώς και οι παράμετροι λειτουργίας του.

| Name: | Value | Unit |
|---------------------------|----------------|------------------|
| Physical | | |
| ModelType | SelfImaging | |
| NumberOfLeftPorts | 2 | |
| NumberOfRightPorts | 4 | |
| MMIType | General | |
| LengthDefinition | Absolute | |
| Length | 2180e-6 | m |
| Width | 32e-6 | m |
| ReferenceFrequency | 193.1e12 | Hz |
| EffectiveIndex | 3.3 | |
| GroupIndex | EffectiveIndex | |
| Dispersion | 0.0 | s/m ² |
| DesignFrequency | 193.1e12 | Hz |
| DesignPolarization | TE | |
| NumberOfModesDefinition | Automatic | |
| LeftPortsPositions | 0.38 -0.12 | |
| RightPortsPositions | | |
| LeftPortsSpotSize | 2e-6 | m |
| RightPortsSpotSize | 2e-6 | m |
| LeftPortsLoss | 0.0 | dB |
| RightPortsLoss | LeftPortsLoss | dB |
| EffectiveIndexDefinition | Parameters | |
| Digital Filter | | |
| DigitalFilterDesigner | Automatic | |
| TransferFunctionRegula... | None | |
| Enhanced | | |
| LogicalDelay | Off | |
| ConserveMemory | On | |
| Visualization | | |
| VisualizationMode | None | |
| SaveSmatrix | Off | |

Εικόνα 3.8: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου MMI_M_N

Ο MMI Coupler που χρησιμοποιούμε παίρνει ως εισόδους το οπτικό φέρον και το σήμα αναφοράς και παράγει τέσσερα σήματα στην έξοδο του, δύο από τα οποία αναφέρονται στην In-Phase συνιστώσα και τα άλλα δύο στην Quadrature συνιστώσα του προς αποδιαμόρφωση ληφθέντος οπτικού σήματος. Στη συνέχεια τα τέσσερα αυτά σήματα θα εισέλθουν σε φωτοδιόδους προκειμένου να παράξουμε ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογο του τετραγώνου του πλάτους των οπτικών αυτών σημάτων. Στην υλοποίηση μας για την προσομοίωση της φωτοδίοδου χρησιμοποιούμε το στοιχείο Photodiode του VPI και η τιμή της παραμέτρου Responsivity τέθηκε στα 0.5 A/W που σημαίνει ότι για κάθε Watt οπτικής ισχύος που

προσπίπτει στη φωτοδίοδο αυτή παράγει ηλεκτρικό ρεύμα μεγέθους 0.5 A.

| Name: | Value | Unit |
|-------------------------|-----------------------|--------|
| Physical | | |
| ResponsivityDescription | ResponsivityParameter | |
| f Responsivity | 0.5 | A/W |
| PhotodiodeModel | PIN | |
| f DarkCurrent | 10e-9 | A |
| f ThermalNoise | 10.0e-12 | A/H... |
| ShotNoise | On | |
| Enhanced | | |
| JoinSignalBands | Yes | |
| i RandomNumberSeed | 0 | |

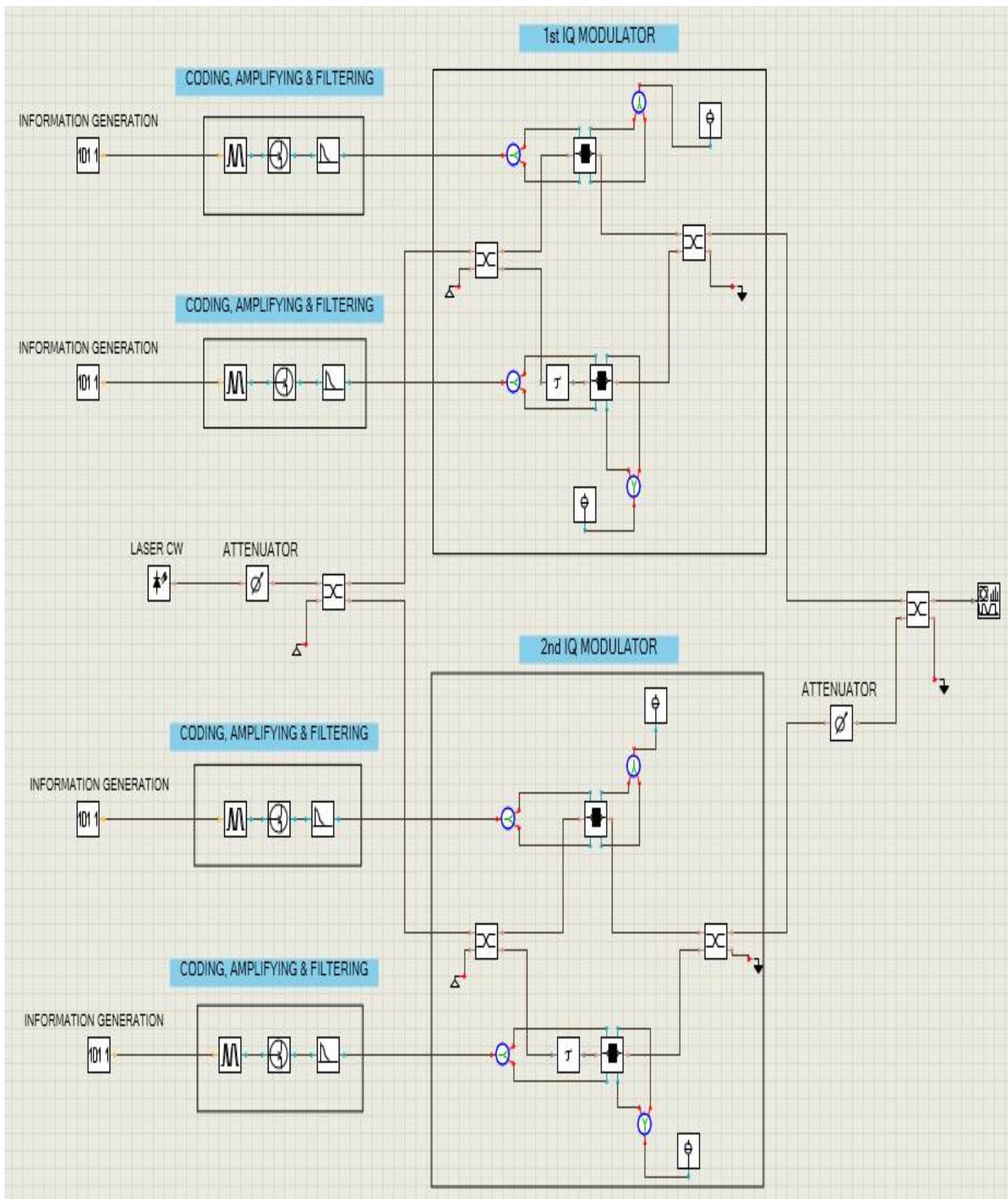
Εικόνα 3.9: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου Photodiode

Κατόπιν, τα δύο ηλεκτρικά ρεύματα που αντιστοιχούν στην In-Phase συνιστώσα του οπτικού σήματος πληροφορίας εισέρχονται στον balanced detector από τον οποίο θα προκύψει η In-Phase συνιστώσα και αντιστοίχως τα δύο ηλεκτρικά ρεύματα που αντιστοιχούν στην Quadrature συνιστώσα του σήματος πληροφορίας θα εισέλθουν στον έτερο balanced detector προκειμένου να προκύψει η Quadrature συνιστώσα. Τα τέσσερα ρεύματα ακριβώς πριν την είσοδο τους στους balanced detectors φιλτράρονται από βαθυπερατά φίλτρα προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος βολής και ο θερμικός θόρυβος του δέκτη καθώς και να προσομοιωθεί το εύρος ζώνης του δέκτη. Στην περίπτωση μας το εύρος ζώνης καθορίστηκε στα 40 GHz ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί το οπτικό σήμα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.10. Για το σκοπό αυτό στο VPI χρησιμοποιούμε το στοιχείο FilterEl με τις εξής παραμέτρους:

| Name: | Value | Unit |
|----------------------|-------------|------|
| Physical | | |
| FilterType | LowPass | |
| TransferFunction | Bessel | |
| f Bandwidth | 40e9 | Hz |
| i FilterOrder | 4 | |
| FrequencyAxisScaling | Logarithmic | |
| Enhanced | | |
| ConserveMemory | On | |
| Active | On | |
| Visualization | | |
| VisualizationMode | None | |
| SaveToFile | Off | |

Εικόνα 3.10: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου FilterEl

Παρακάτω παρουσιάζεται η οπτική διάταξη έτσι όπως σχεδιάστηκε στην κονσόλα προσομοίωσης VPI:



Εικόνα 4.2: Multi-Parallel Transmitter για την παραγωγή σήματος 16 Square QAM στο πρόγραμμα VPI

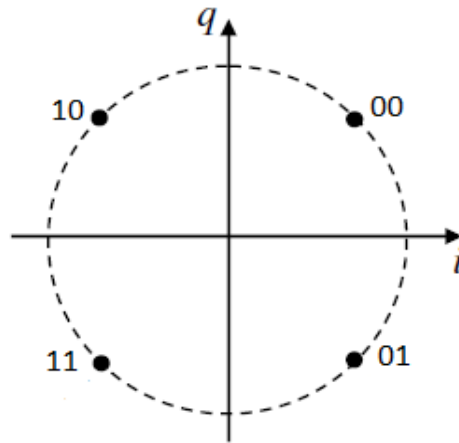
Το οπτικό σήμα με το οποίο τροφοδοτούνται όλα τα στοιχεία του οπτικού πομπού, προέρχεται από ένα laser συνεχούς κύματος που παράγει ένα οπτικό σήμα σταθερού πλάτους, συχνότητας εκπομπής $193,1e12$ Hz. Η παράμετρος `SampleRate` τίθεται στην τιμή της γενικής παράμετρου `SampleRateDefault` που στην προσομοίωση μας ισούται με $160e9$ Hz. Μεταβάλλουμε την τιμή της παράμετρου `AveragePower` αναλόγως με τις συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος που θέλουμε να μελετήσουμε. Στα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν η τιμή της παραμέτρου έχει τεθεί στα $2,7$ mW για λόγους που θα εξηγηθούν παρακάτω. Το στοιχείο `LaserCW` ακολουθείται από έναν στοιχείο `Attenuator`, το οποίο εισάγει 1 dB απώλεια στην τελική οπτική ισχύ του φέροντος, προσομοιάζοντας έτσι τις απώλειες σύνδεσης του laser με την οπτική ίνα. Η ηλεκτρονική λογική πληροφορία παράγεται από τις γεννήτριες PRBS, οι οποίες παράγουν ψευδοτυχαίες ακολουθίες δεδομένων, 0 και 1 αντίστοιχα. Στις παραμέτρους του `module` επιλέγουμε σαν `PRBS_Type` την επιλογή `PRBS_N`, δηλαδή την επανάληψη της ακολουθίας κάθε 2^N bit πληροφορίας, όπου N είναι η τάξη της ακολουθίας. Στην προσομοίωση μας είναι `PRBS_Order = 11`. Στη διάταξη μας υπάρχουν 4 γεννήτριες PRBS κάθε μία από τις οποίες παράγει 1 από τα 4 bits που μεταδίδονται σε ένα σύμβολο. Σε κάθε μία από τις PRBS γεννήτριες θέσαμε στην παράμετρο `RandomNumberSeed` διαφορετική τιμή προκειμένου να μην παραχθούν παρόμοιες ακολουθίες, προκειμένου να παραχθούν όλα τα δυνατά σύμβολα και να πραγματοποιηθούν όλες οι πιθανές μεταβάσεις μεταξύ των συμβόλων. Στην προσομοίωση μας οι τιμές αυτές είναι 1,7,15 και 21 αντίστοιχα. Οι γεννήτριες PRBS ακολουθούνται από το στοιχείο `CoderDriver_OOK`, το οποίο μετατρέπει την αριθμητική ακολουθία που δέχεται στην είσοδο του σε ηλεκτρικό σήμα προκειμένου να τροφοδοτήσει τους διαμορφωτές Mach-Zehnder. Το `ModulationType` επιλέγεται NRZ (Non Returning to Zero), δηλαδή στην περίπτωση που το bit παριστάνει το λογικό 1 ο παλμός δεν επιστρέφει στο επίπεδο του 0 εντός της διάρκειας του bit. Το `OutputLevel_0` τίθεται στο 0 ενώ το `OutputLevel_1` τίθεται στα 0,5 Volt. Στο `TransitionDefinition` επιλέγουμε `20_and_80`. Ο χρόνος για να μεταφερθεί ο παλμός από το επίπεδο του 0 στο επίπεδο του 1 τίθεται στα 24.4 psec ενώ ο χρόνος για να μεταφερθεί από το επίπεδο του 1 στο επίπεδο του 0 στα 25.6 psec. Τέλος η RMS τιμή του jitter είναι 1.37 psec. Μετά από τους Coders τοποθετούμε το στοιχείο `AmplSysEl` που αναπαριστά έναν ηλεκτρικό ενισχυτή προκειμένου να ενισχύσουμε το σήμα που παράγει ο Coder για να φτάσει το επίπεδο της τάσης του 1 στα 5 Volt, όσο δηλαδή είναι και η τάση V_{π} του Mach-Zehnder. Για το λόγο αυτό θέτουμε το κέρδος στα 20.0dB ενώ η παράμετρος για την φασματική πυκνότητα θορύβου τίθεται στα $10.0e-12$ A/Hz. Κατόπιν τοποθετείται ένα ηλεκτρικό φίλτρο για να προσαρμόσουμε το εύρος ζώνης μέσα στο οποίο θα λειτουργήσει ο διαμορφωτής Mach-Zehnder και θα πραγματοποιηθεί η διαμόρφωση. Το φίλτρο μας είναι βαθυπερατό, 4^{th} τάξης, με συνάρτηση μεταφοράς τύπου Bessel και εύρος ζώνης 60GHz. Αφού φιλτραριστεί το οπτικό σήμα τροφοδοτεί τα RF ηλεκτρόδια ενός διαμορφωτή Mach-Zehnder ο οποίος προσομοιάζεται από το στοιχείο `ModulatorDiffMZ_DSM`. Παριστάνει έναν dual-drive Mach-Zehnder διαμορφωτή σε κάθε σκέλος του οποίου η διαμόρφωση φάσης είναι ανεξάρτητη. Δύο ηλεκτρόδια οδηγούν το σήμα RF πληροφορίας στο διαμορφωτή, ενώ άλλα δύο ηλεκτρόδια παρέχουν DC τάση στο διαμορφωτή. Η τάση $V_{\pi RF}$ είναι 5 Volt γι'αυτό και η στάθμη του λογικού 1 στο σήμα

πληροφορίας έχει ρυθμιστεί προηγουμένως στα 5 Volt προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια στροφή φάσης 180 μοιρών όταν φτάνει bit που παριστάνει 1 στην είσοδο του διαμορφωτή. Η τάση VpiDC του διαμορφωτή είναι και αυτή 5 Volt. Κάθε σκέλος του Mach-Zehnder τροφοδοτείται με DC τάση 5 Volt έτσι ώστε σε κάθε πλευρά να πραγματοποιείται επιπλέον στροφή φάσης ίση με 180 μοίρες. Οι απώλειες που εισάγει ο διαμορφωτής στο σύστημα είναι 5 dB ενώ το ExtinctionRatio δηλαδή ο λόγος μεταξύ του επιπέδου τάσης του 1 και του επιπέδου τάσης του 0 ρυθμίζεται στα 20.0 dB. Τέλος, διάλεγμα για την παράμετρο LowerArmPhaseSense την επιλογή NEGATIVE έτσι ώστε στην κάτω πλευρά του διαμορφωτή να εισάγεται στροφή φάσης αντίθετου προσήμου από ότι στην πάνω για να επιτύχουμε chirp-free διαμόρφωση. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων λειτουργίας του στοιχείου ModulatorDiffMZ_DSM δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| Name: | Value | Unit |
|-------------------------|------------------|---------|
| Physical | | |
| f VpiDC | 5 | V |
| f VpiRF | 5 | V |
| f InsertionLoss | 5 | dB |
| f ExtinctionRatio | 20 | dB |
| LowerArmPhaseSense | NEGATIVE | |
| f dVpiDC_dTemperature | 0 | V/de... |
| f dVpiRF_dTemperature | 0 | V/de... |
| f OperatingTemperature | 25 | degC |
| f ReferenceTemperature | 25 | degC |
| S21_BandwidthResponse | Ideal | |
| i DigitalFilterOrder | 1024 | |
| Enhanced | | |
| LogicalChannelReference | UpperRfElectrode | |
| i ChannelIndex | -1 | |
| Active | On | |

Εικόνα 4.3: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου ModulatorDiffMZ_DSM

Με τα στοιχεία αυτά σε σειρά παράγουμε ένα PSK σήμα όπου το πλάτος του διαμορφωμένου σήματος παραμένει σταθερό και η πληροφορία μεταφέρεται στη φάση του σήματος. Τα bit που μεταφέρουν “άσσους” έχουν φάση 0 μοιρών ενώ τα bit που μεταφέρουν μηδενικά έχουν φάση 180 μοιρών. Ο συνδυασμός δύο τέτοιων σημάτων σε έναν 3db συζεύκτη παράγει τελικώς ένα QPSK σήμα και η συνολική διάταξη είναι ο IQ διαμορφωτής που έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω φαίνεται το ιδανικό διάγραμμα αστερισμού του παραγόμενου οπτικού σήματος:



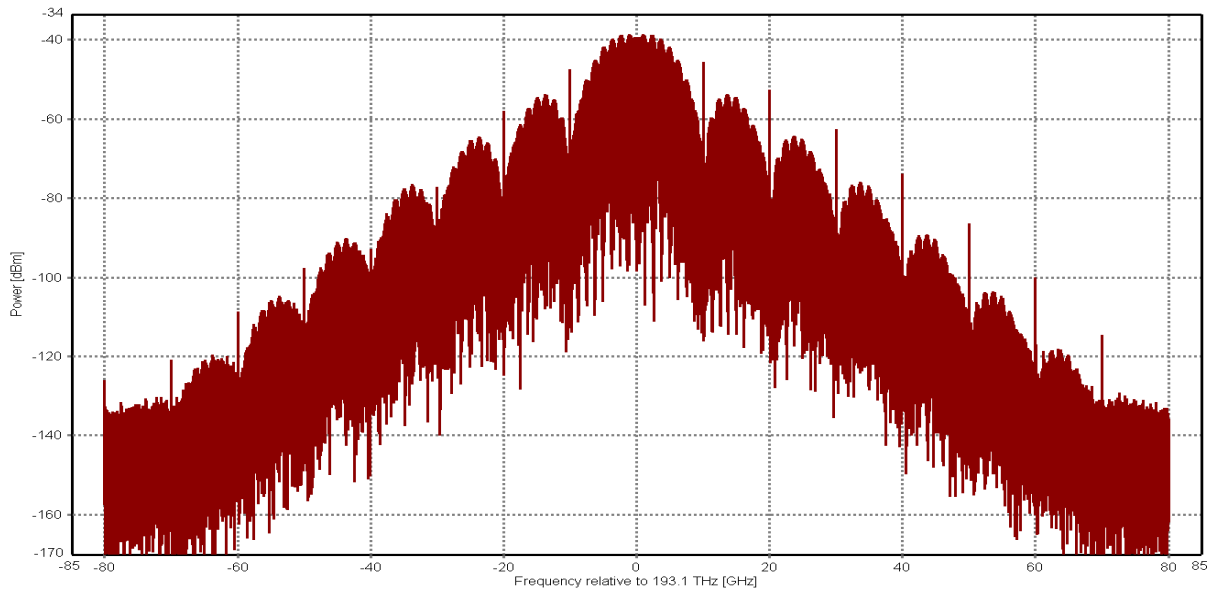
Εικόνα 4.4: Διάγραμμα αστερισμού για QPSK σήμα

Το συγκεκριμένο διάγραμμα αστερισμού προκύπτει επειδή ο συζεύκτης προσθέτει στο οπτικό σήμα του κάτω σκέλους 90 μοίρες συνεπώς οι “άσσοι” που μεταφέρει αποκτούν φάση 90 μοιρών και τα “μηδενικά” φάση 270 μοιρών. Ο συνδυασμός των δυο σημάτων δίνει στα σύμβολα τις φάσεις που δείχνει το διαγράμμα αστερισμού της εικόνας 4.4. Μια ακριβώς ίδια διάταξη, άλλος ένα IQ διαμορφωτής δηλαδή, παράγει ένα ακριβώς ίδιο σήμα το οποίο όμως εξασθενείται κατά 6.0 dB, προκειμένου να μειώσουμε την ισχύ του σήματος στο μισό για να προκύψει το επιθυτό διάγραμμα αστερισμού. Τα δύο QPSK σήματα συνδυάζονται πάλι σε έναν 3db συζεύκτη και προκύπτει το τελικό 16 QAM Square σήμα. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία περιγραφής της προσομοίωσης όσον αφορά τη λειτουργία του κυκλώματος και τη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, παραθέτουμε τις γενικές παραμέτρους προσομοίωσης που αφορούν το ρυθμό μετάδοσης, τη συχνότητα λειτουργίας, το ρυθμό δειγματοληψίας, το χρονικό μέγεθος του παραθύρου απεικόνισης στον VPIanalyzer και άλλες σταθερές παραμέτρους της διαδικασίας προσομοίωσης:

| Name: | Value | Unit |
|----------------------------|-------------------------|-------|
| Global | | |
| f TimeWindow | (2 ¹⁴)/10e9 | s |
| i GreatestPrimeFactorLimit | 2 | |
| InBandNoiseBins | OFF | |
| BoundaryConditions | Periodic | |
| LogicalInformation | ON | |
| f SampleModeBandwidth | 1280e9 | Hz |
| f SampleModeCenterFreq... | 193.1e12 | Hz |
| f SampleRateDefault | 160e9 | Hz |
| f BitRateDefault | 10e9 | bit/s |
| DesignRules | | |
| TrackingMode | None | |
| Scheduler | | |
| Simulation Domain | Auto | |
| Player | | |

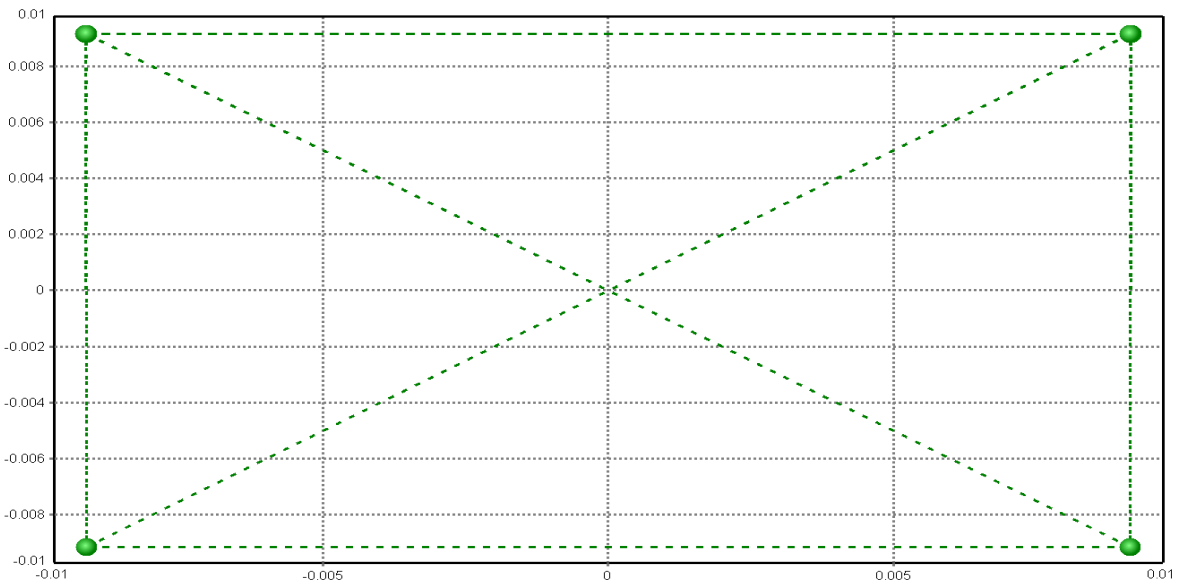
Εικόνα 4.5: Γενικές παράμετροι προσομοίωσης

Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται η έξοδος του άνω IQ διαμορφωτή χρησιμοποιώντας ένα οπτικό φασματογράφο του προγράμματος προσομοίωσης και γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το φάσμα του οπτικού παλμού έχει εύρος 160 GHz, όσο και το SampleRateDefault της οπτικής διάταξης με κεντρική συχνότητα τα 193.1 THz :



Εικόνα 4.6: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου από τον 1^ο IQ διαμορφωτή

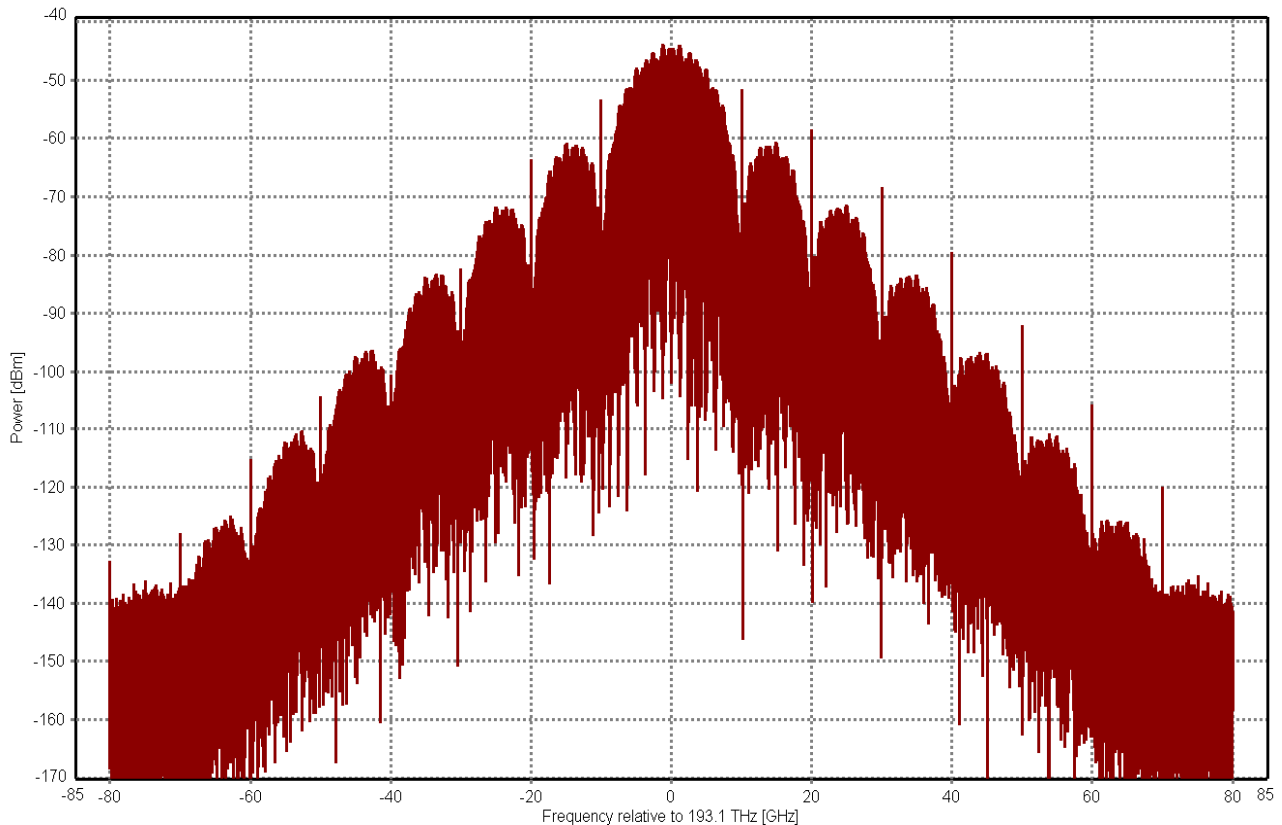
Παρακάτω παρουσιάζεται η απεικόνιση του διαγράμματος αστερισμού στην έξοδο του συγκεκριμένου IQ διαμορφωτή χωρίς να παρεμβάλλεται οπτική ίνα για μετάδοση της πληροφορίας και η οποία θα συγκριθεί αργότερα με τα διαγράμματα αστερισμού μετά από μετάδοση προκειμένου να εξαγάγουμε τα τελικά συμπεράσματα για την ποιότητα του λαμβανόμενου οπτικού σήματος.



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του 1^{ου} IQ διαμορφωτή

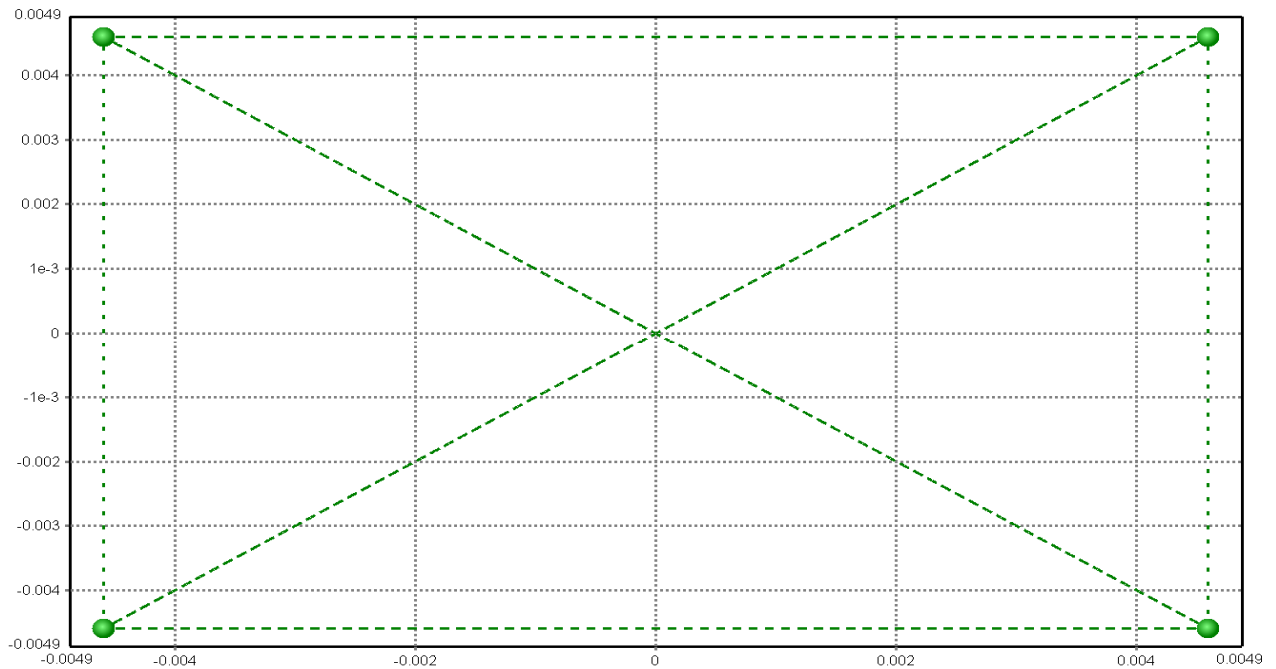
Στην εικόνα 4.6 παρουσιάστηκε το φάσμα του διαμορφωμένου οπτικού σήματος, το οποίο είναι συμμετρικό ως προς την κεντρική συχνότητα του φέροντος στα 193.1 THz. Με τη διαμόρφωση QPSK επιτυγχάνεται ο διπλασιασμός της μετάδοσης δεδομένων καθώς ενώ οι πηγές πληροφορίας παράγουν δεδομένα με ρυθμό 10 Gbit/s και ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων είναι επομένως 10 Gbaud/s, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αυξάνεται στα 20 Gbit/s καθώς σε κάθε σύμβολο εγγράφεται η πληροφορία από δύο bits. Αυτό γίνεται εμφανές και στο φάσμα του διαμορφωμένου σήματος καθώς η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών αρμονικών βρίσκεται στα 20 GHz. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αποδοτικότερη χρήση του φάσματος και δίνεται η δυνατότητα για επέκταση σε εφαρμογές πολυπλεξίας στο μήκος κύματος (Wavelength-Division Multiplexing-WDM). Το διάγραμμα αστερισμού που απεικονίζεται στην εικόνα 4.7 είναι ακριβώς το ίδιο με το θεωρητικό με τα τέσσερα σύμβολα να απέχουν ακριβώς το ίδιο από την αρχή των συντεταγμένων με διαφορά 90° μεταξύ τους τοποθετημένα στις 45°, 135°, 225° και 315° από τον άξονα x αντίστοιχα.

Αντιστοίχως για τον κάτω IQ modulator:



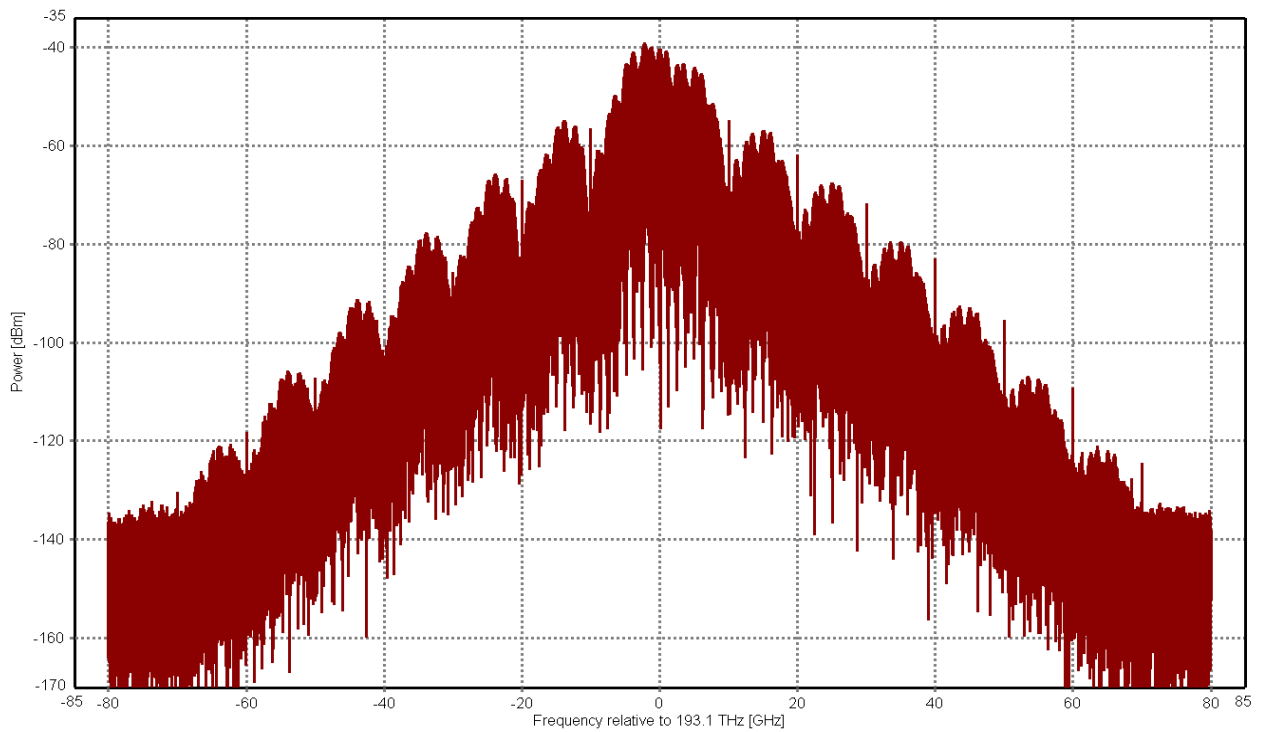
Εικόνα 4.8: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου από τον 2^ο IQ διαμορφωτή

Το φάσμα που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.8 και το διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του κάτω IQ διαμορφωτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.9 είναι ακριβώς τα ίδια όπως και στην έξοδο του πάνω IQ διαμορφωτή με τη μόνη διαφορά ότι η ισχύς είναι το 1/2 της ισχύος εξόδου του πάνω IQ διαμορφωτή.

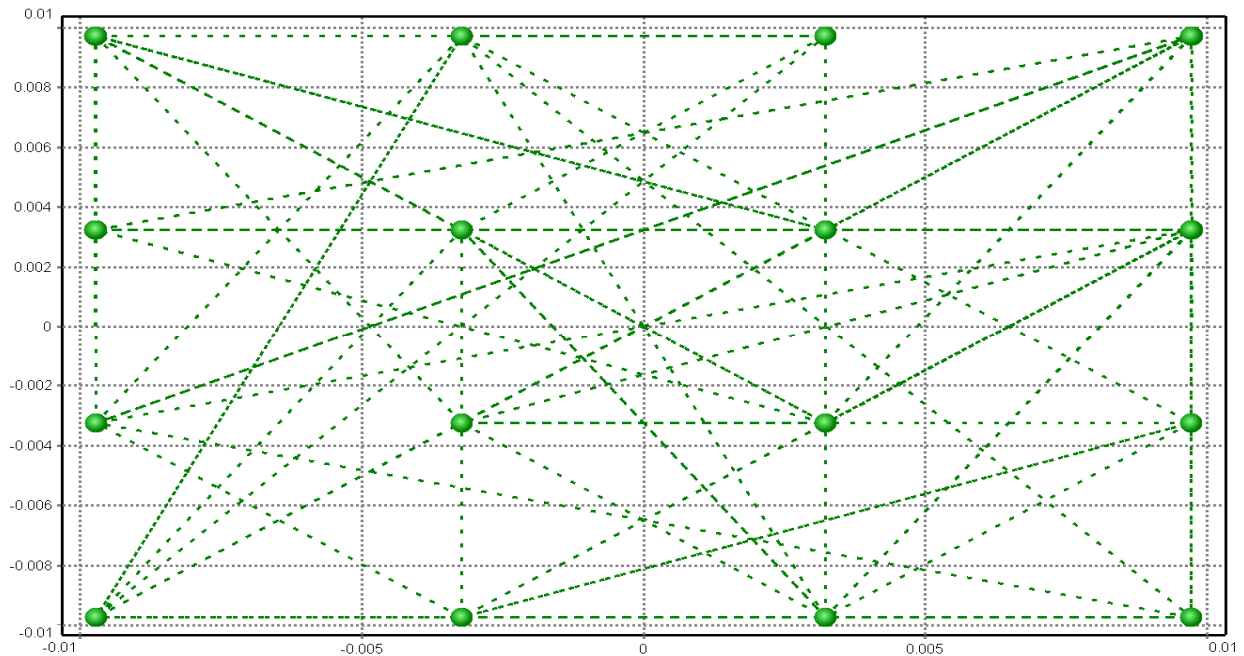


Εικόνα 4.9: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του 2^{ου} IQ διαμορφωτή

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δύο αντίστοιχα διαγράμματα στην έξοδο του πομπού μετά τη σύζευξη των σημάτων που προέρχονται από τους δύο IQ διαμορφωτές:

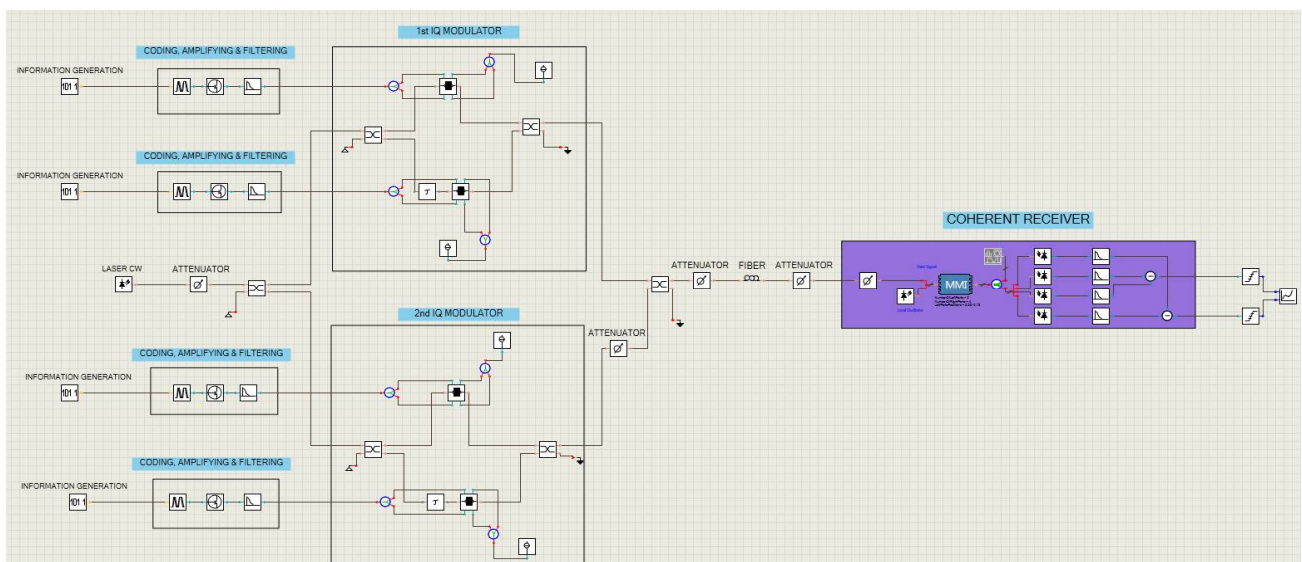


Εικόνα 4.10: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου



Εικόνα 4.11: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του πομπού

Στο παραπάνω διάγραμμα αστερισμού τα 16 σύμβολα τοποθετούνται σε τρεις ομόκεντρους κύκλους. Η διαμόρφωση QAM είναι συνδυαστική διαμόρφωση πλάτους και φάσης. Στην περίπτωση του σχήματος διαμόρφωσης 16 Square QAM τα σύμβολα κωδικοποιούνται με το συνδυασμό τριών επίπεδων έντασης παλμού και δώδεκα διαφορετικών φάσεων οι οποίες στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουν τιμές 18.5° , 45° , 71.5° , 108.5° , 135° , 161.5° , 198.5° , 225° , 251.5° , 288.5° , 315° και 341.5° . Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνολική διάταξη του κυκλώματος όπως ακριβώς την προσομοιώσαμε στο VPI:



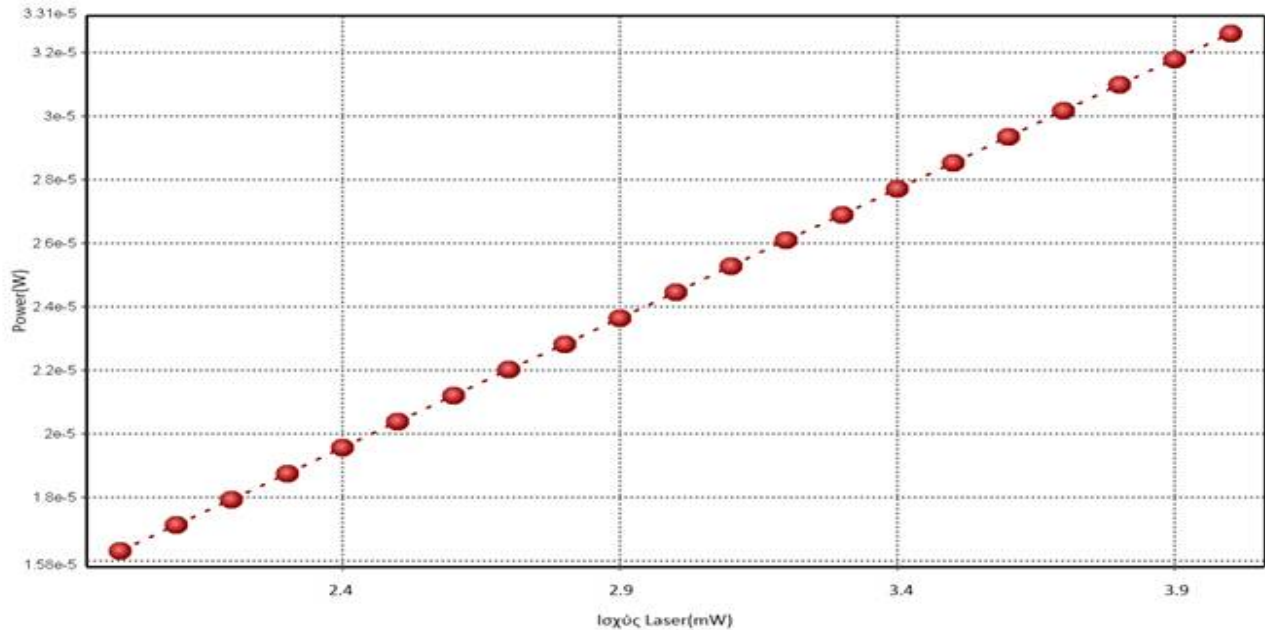
Εικόνα 4.12: Προσομοίωση της εκπομπής από Multi-Parallel Transmitter και λήψης από σύμφωνο δέκτη μετά από διάδοση σε οπτική ίνα σήματος 16 Square QAM

Πρόκειται για τις διατάξεις του δέκτη και του πομπού όπου ανάμεσά τους πραγματοποιείται μετάδοση με χρήση οπτικής ίνας. Εκατέρωθεν της οπτικής ίνας τοποθετούμε το στοιχείο Attenuator με την παράμετρο Attenuation ρυθμισμένη στα 3.0 dB προσομοιάζοντας τις απώλειες σύνδεσης του πομπού και του δέκτη στην ίνα αντίστοιχα. Για την προσομοίωση της οπτικής ίνας χρησιμοποιείται το στοιχείο UniversalFiberFwd (standar single mode fiber) με τις παρακάτω παραμέτρους λειτουργίας:

| Name: | Value | Unit |
|---------------------------|---|--------------------|
| Physical | | |
| NumberOfFiberSpans | 1 | |
| Length | 1000 | m |
| GroupRefractiveIndex | 1.47 | |
| AttenuationDescription | AttenuationParameter | |
| Attenuation | 0.2e-3 | dB/m |
| ReferenceFrequency | 193.1e12 | Hz |
| DispersionDescription | DispersionParameters | |
| Dispersion | 16e-6 | s/m ² |
| DispersionSlope | 0.08e3 | s/m ³ |
| PMDCoefficient | 0.1e-12/31.62 | s/sq... |
| Nonlinear Effects | | |
| RamanScattering | No | |
| NonlinearDescription | NonlinearIndexParameter | |
| NonLinearIndex | 2.6e-20 | m ² ... |
| CoreAreaDescription | CoreAreaParameter | |
| CoreArea | 80.0e-12 | m ² |
| SPM_EC | Yes | |
| XPM_EC | Yes | |
| FWM | No | |
| HigherOrderNLEffects | No | |
| NonlinearAdjustment... | (8./9.) 1.0 (2./3.) 1.0 (1./2.) 1.0 1.0 | |
| Event Loss | | |
| EventLossDescription | EventLossParameter | |
| EventLoss | 0.0 | dB |
| Numerical | | |
| Spectral Discretization | | |
| FreqResolutionNB | 100e9 | Hz |
| FreqResolutionSFB | 100e9 | Hz |
| GridReferenceFreque... | 193.1e12 | Hz |
| SpectralDiscretizerD... | FixedFrequencies | |
| Boundary Value Problem... | | |
| AccuracyGoal | 1e-3 | dB |
| MaximumIterations | 1000 | |
| IterationAccuracyFa... | 10.0 | |
| InitialStepSize | 1e3 | m |
| MinimumStepSize | 1 | m |
| StabilizationFactor | 0.5 | |

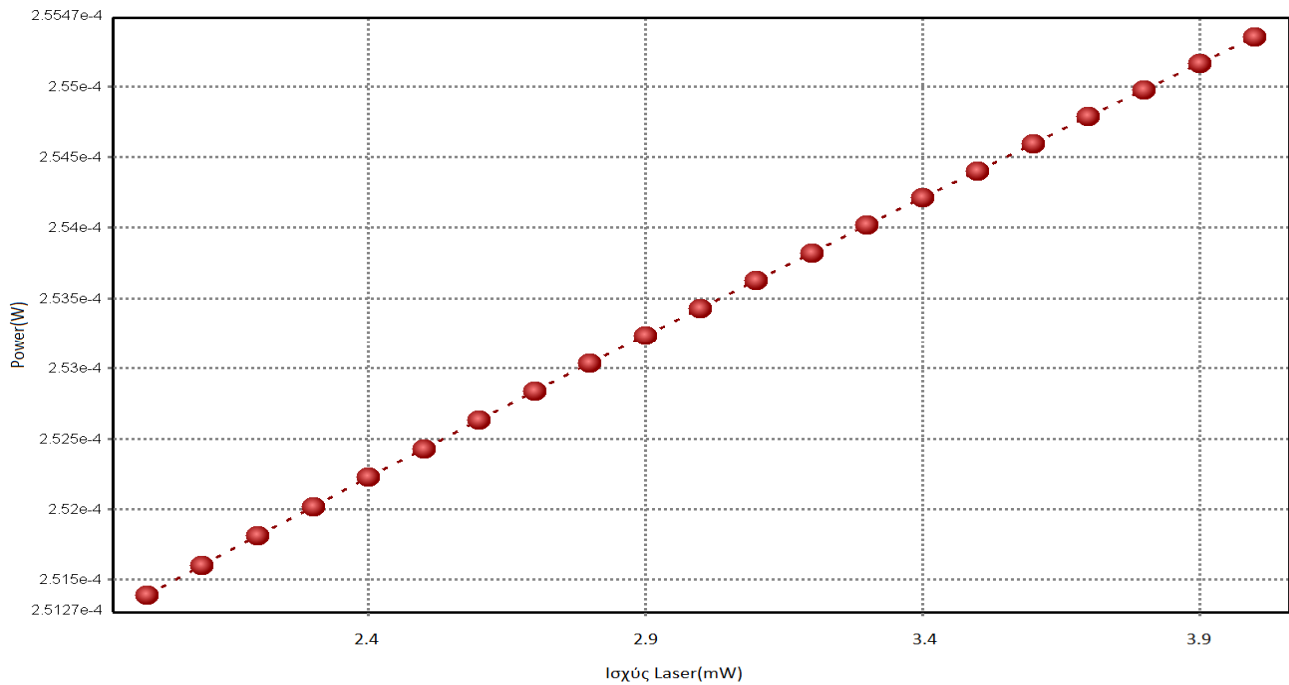
Εικόνα 4.13: Παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου UniversalFiberFwd

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της εξέλιξης της οπτικής ισχύος που φτάνει στην είσοδο του δέκτη όταν μεταβάλλεται η οπτική ισχύς του laser συνεχούς κύματος από τα 2 mW έως τα 4 mW με βήμα 0,1 mW.



Εικόνα 4.14: Ισχύς στην είσοδο του δέκτη αυξάνοντας την ισχύ του laser κατά 0.1mW ανά βήμα

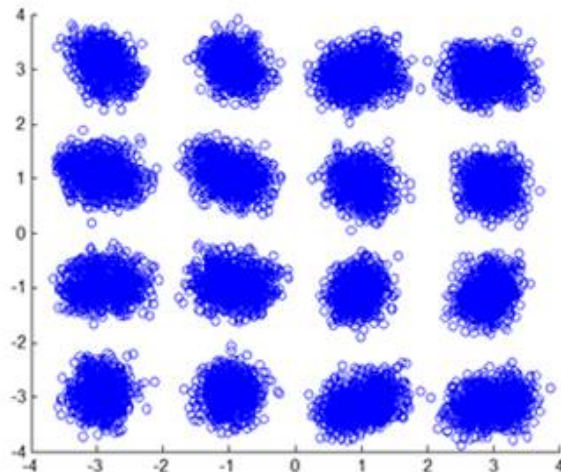
Παρομοίως το διάγραμμα της εξέλιξης της οπτικής ισχύος που φτάνει στις φωτοδιόδους όταν μεταβάλλεται η οπτική ισχύς του LaserCW από τα 2 mW έως τα 4 mW με βήμα 0,1 mW.



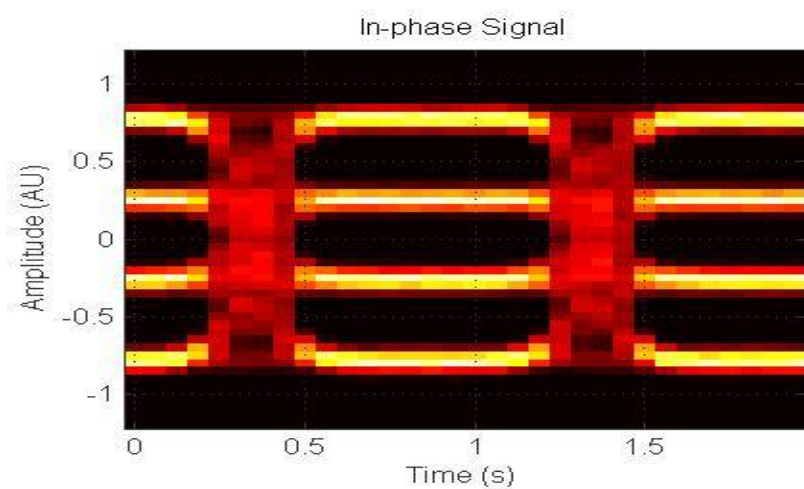
Εικόνα 4.15: Ισχύς στην είσοδο των φωτοδιόδων αυξάνοντας την ισχύ του laser κατά 0.1mW ανά βήμα

Παρατηρούμε πως η ισχύς που φτάνει στις φωτοδιόδους είναι περίπου μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που φτάνει στην είσοδο του δέκτη. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ενός άλλου laser συνεχούς κύματος εντός του δέκτη με οπτική ισχύ 1 mW που παρέχει το σήμα αναφοράς ως προς το οποίο μετράμε τη μεταβαλλόμενη φάση του φέροντος οπτικού σήματος που προέρχεται από τον οπτικό πομπό. Για το συγκεκριμένο μήκος οπτικής ίνας τροποποιώντας την παράμετρο AveragePower παίρνουμε αποτελέσματα για τις κυματομορφές της In-Phase και της Quadrature συνιστώσας του σήματος στην έξοδο του δέκτη και χρησιμοποιώντας DSP (Digital Signal Processing) αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα Matlab τα συγκρίνουμε με τις αντίστοιχες ιδανικές κυματομορφές στην έξοδο του οπτικού πομπού προκειμένου να εξάγουμε τα ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία της διάταξης όπως το BitErrorRate. Η διαδικασία του digital signal processing είναι μια μαθηματική επεξεργασία ενός σήματος πληροφορίας με στόχο τη βελτίωση του σήματος αυτού. Ουσιαστικά κύριο πεδίο ενασχόλησης του DSP είναι η αναπαράσταση σημάτων διακριτού χρόνου ως ακολουθιών αριθμών ή συμβόλων, καθώς και η επεξεργασία των σημάτων αυτών. Μετά από διαδοχικές μετρήσεις στο πρόγραμμα προσομοίωσης φωτονικών κυκλωμάτων και με τη βοήθεια του συγκεκριμένου αλγορίθμου που αναπτύχθηκε από την ομάδα του εργαστηρίου φωτονικών επικοινωνιών για ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης παρατηρούμε ότι η μικρότερη τιμή της οπτικής ισχύος του laser για την οποία δεν υπάρχουν λάθη μεταξύ της εκπεμπόμενης και της λαμβανόμενης οπτικής πληροφορίας χωρίς να πραγματοποιείται μετάδοση μέσω συγκεκριμένου μήκους οπτικής ίνας (ουσιαστικά μηδενίζεται το BER) είναι η τιμή 2.7mW. Για το λόγο αυτό όλα τα προηγούμενα διαγράμματα προέκυψαν από την προσομοίωση με τη συγκεκριμένη τιμή στην παράμετρο AveragePower του laser συνεχούς κύματος. Στην ουσία δεν πρόκειται για πραγματικά μηδενικό BER, μιας και ο αλγόριθμος που τρέχουμε στο matlab έχει κατώτερη τάξη μέτρησης την $1e-5$ λάθη. Παρακάτω παρουσιάζονται το BER, το διάγραμμα αστερισμού για συγκεκριμένα μήκη οπτικής ίνας (από 0m έως 5000m), η In-Phase και η Quadrature συνιστώσα του σήματος για την τιμή 2.7mW αλλά και για την αμέσως προηγούμενη μέτρηση με μη μηδενικό BER με οπτική ισχύ στο laser 2.6mW.

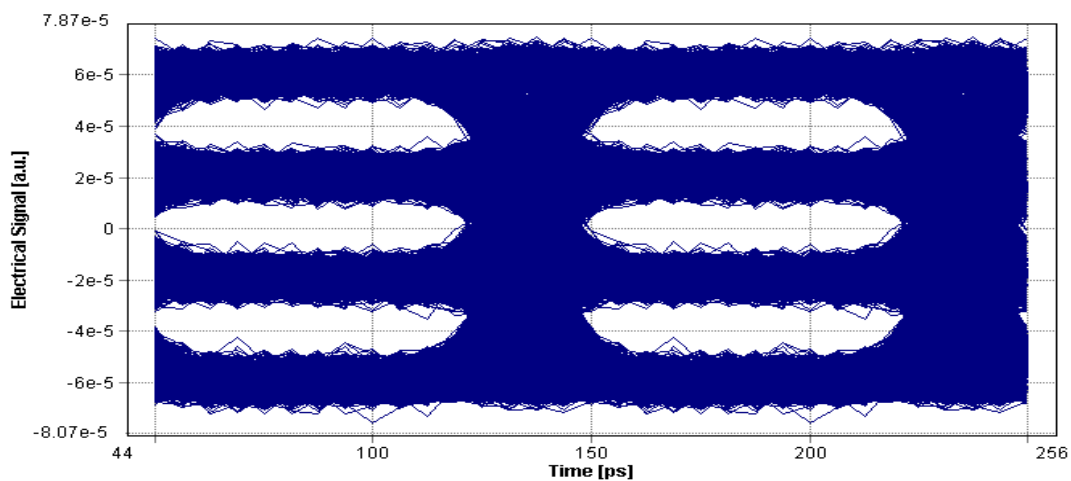
- PowerAverage : 2,7 mW
Length :100m
BER = 0



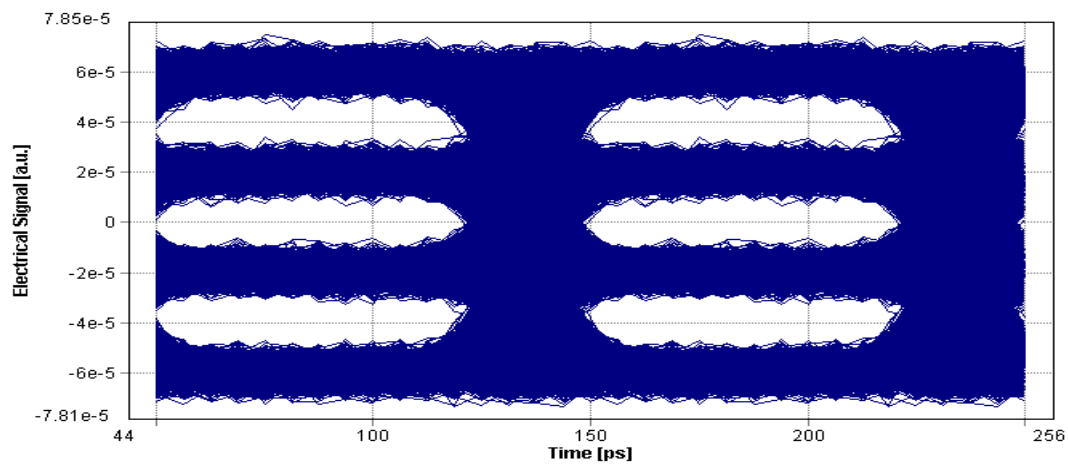
Εικόνα 4.16: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του δέκτη



Εικόνα 4.17: In-Phase συνιστώσα στην έξοδο του δέκτη

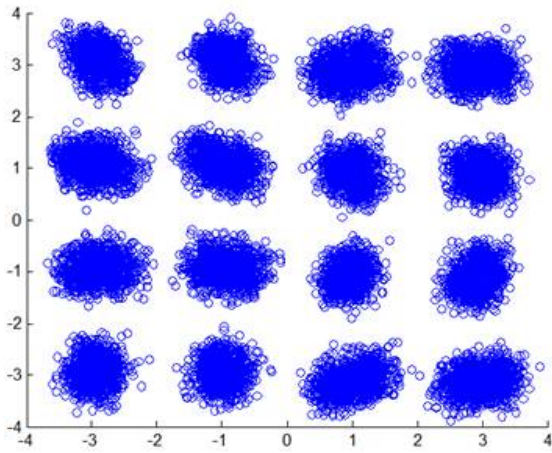


Εικόνα 4.18: Διάγραμμα ματιού In-Phase συνιστώσας

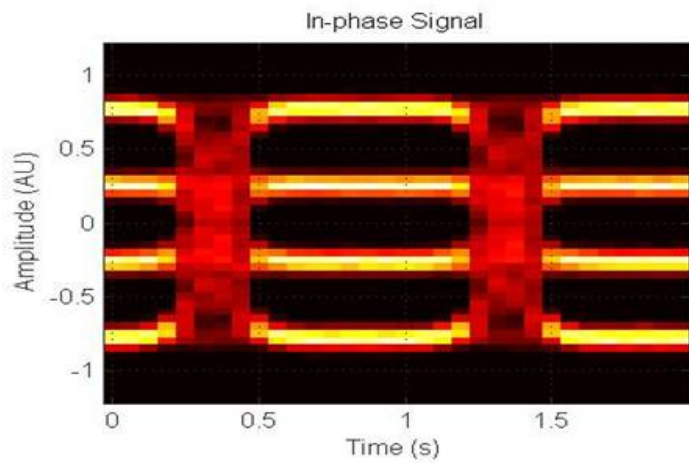


Εικόνα 4.19: Διάγραμμα ματιού Quadrature συνιστώσας

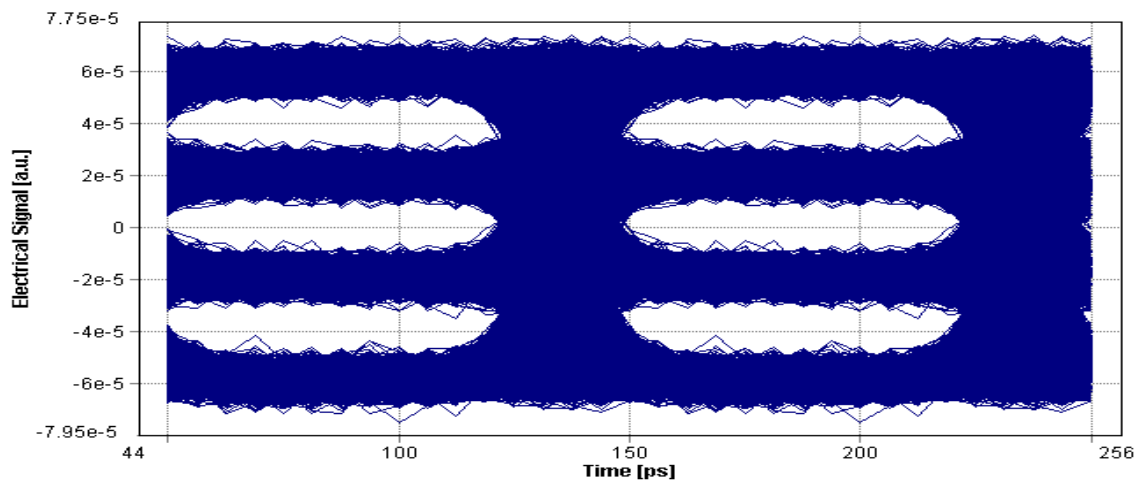
- PowerAverage : 2,6 mW - Length :100m - BER = 1,5261e-5



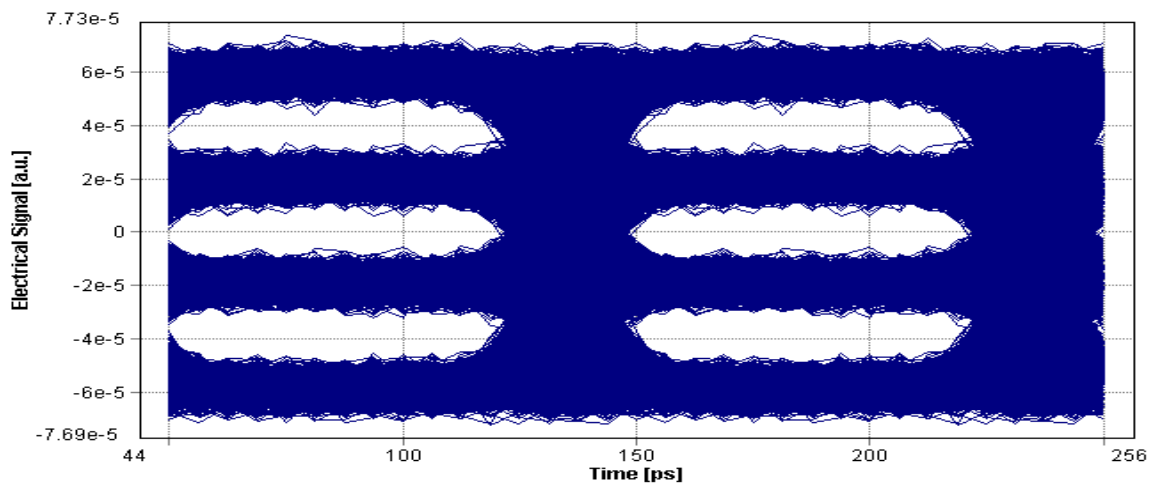
Εικόνα 4.20: Διάγραμμα αστερισμού



Εικόνα 4.21: In-Phase συνιστώσα

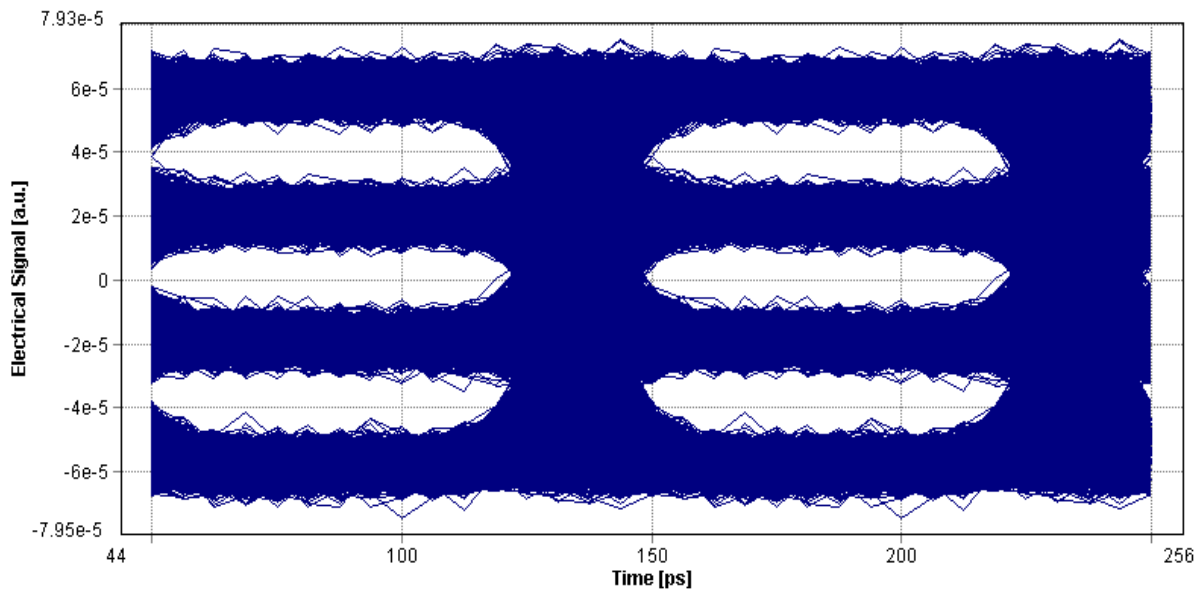


Εικόνα 4.22: Διάγραμμα ματιού In-Phase συνιστώσας

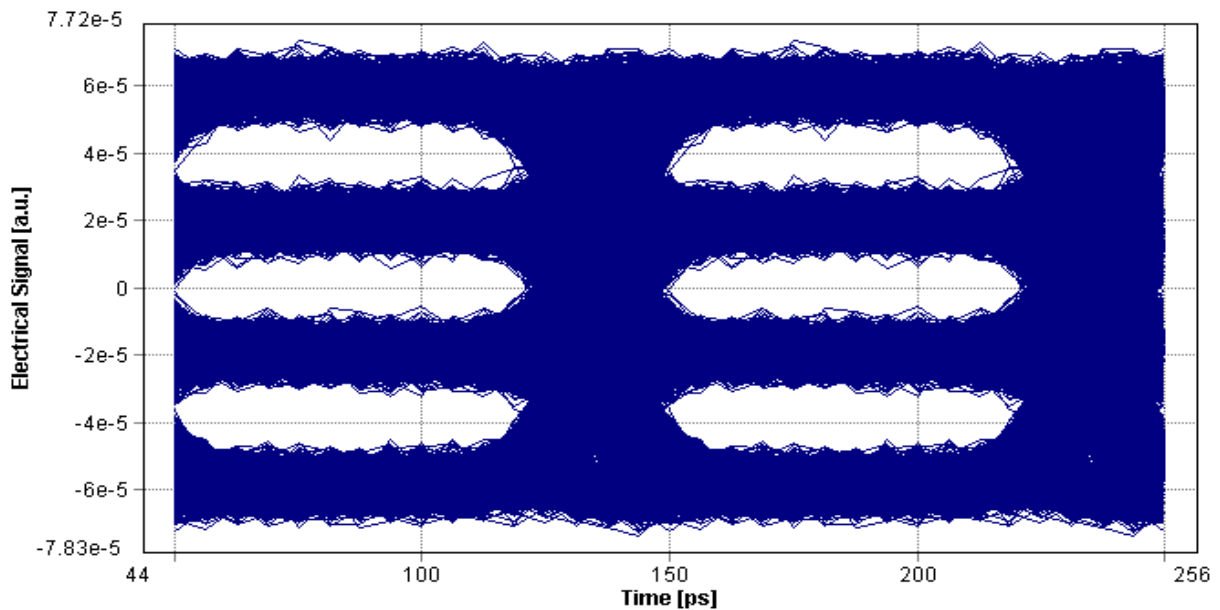


Εικόνα 4.23: Διάγραμμα ματιού Quadrature συνιστώσας

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα ματιού των In-Phase και Quadrature συνιστωσών του σήματος για μήκος ίνας 1000m και ισχύ laser 2.7mW.



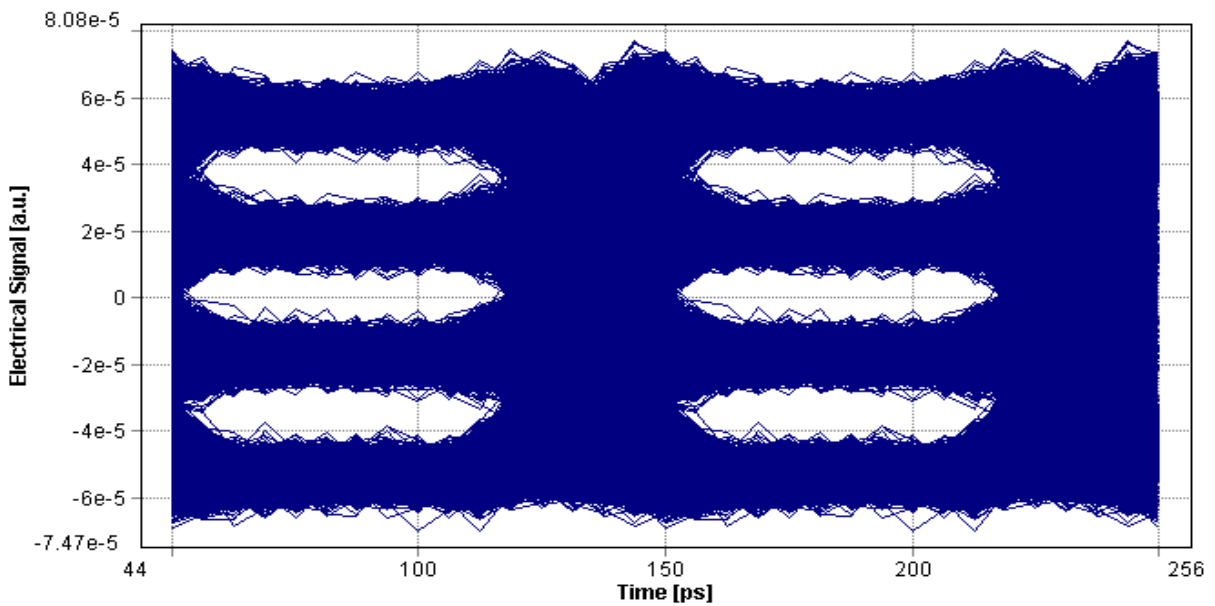
Εικόνα 4.24: Διάγραμμα ματιού In-Phase συνιστώσας



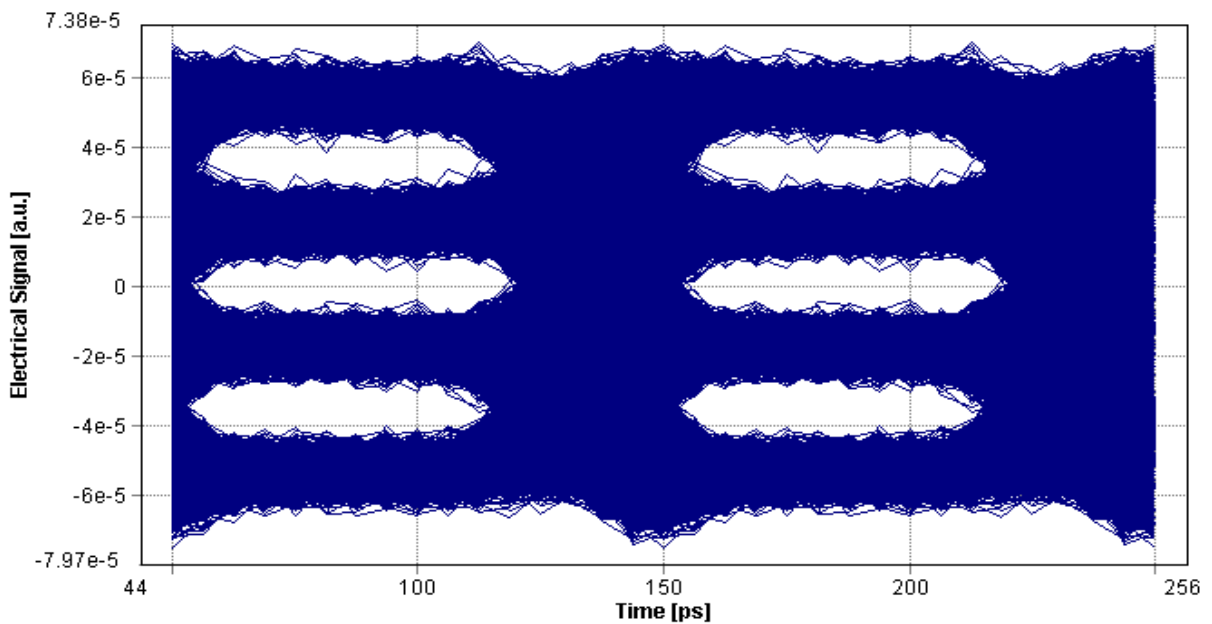
Εικόνα 4.25: Διάγραμμα ματιού Quadrature συνιστώσας

Παρατηρούμε πως μετά τη διάδοση σε οπτική ίνα μήκους ενός χιλιομέτρου η ποιότητα του διαγράμματος ματιού των In-Phase και Quadrature συνιστωσών του εξερχόμενου ηλεκτρικού σήματος παραμένει αναλλοίωτη σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα στην περίπτωση διάδοσης σε οπτική ίνα μήκους 100m.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα ματιού των In-Phase και Quadrature συνιστωσών του σήματος για μήκος ίνας 5000m και ισχύ laser 2.7mW.

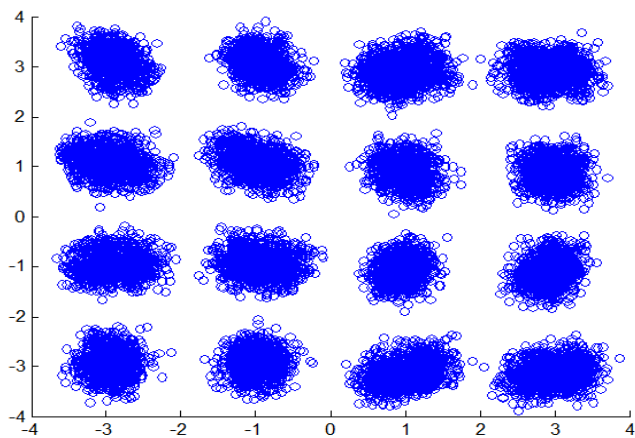


Εικόνα 4.26: Διάγραμμα ματιού In-Phase συνιστώσας

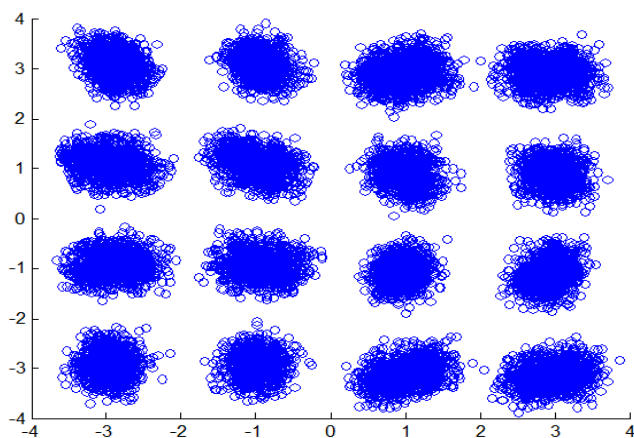


Εικόνα 4.27: Διάγραμμα ματιού Quadrature συνιστώσας

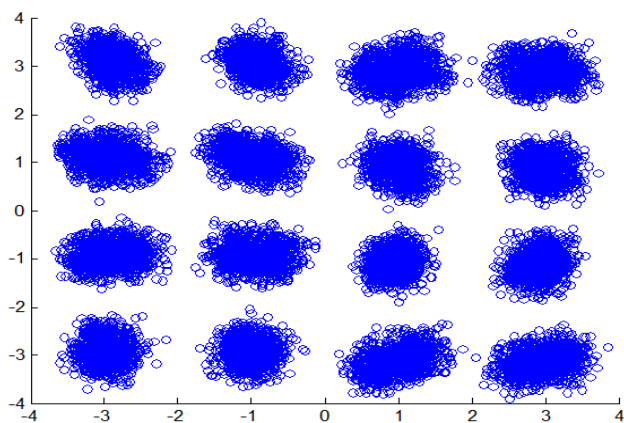
Στην συνέχεια παρουσιάζεται η εξέλιξη της ποιότητας του εξερχόμενου σήματος καθώς αυξάνεται το μήκος της οπτικής ίνας, ενώ διατηρείται σταθερή η οπτική ισχύς του laser συνεχούς κύματος στα 2,7 mW.



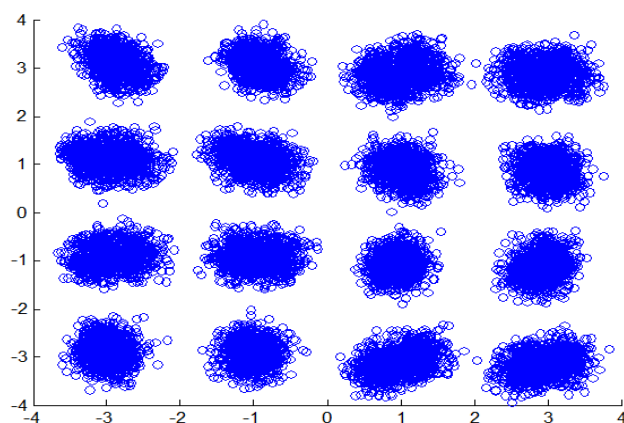
Length = 100m



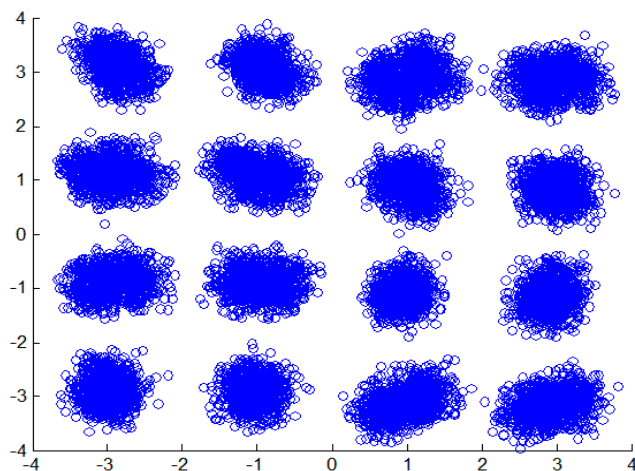
Length = 200m



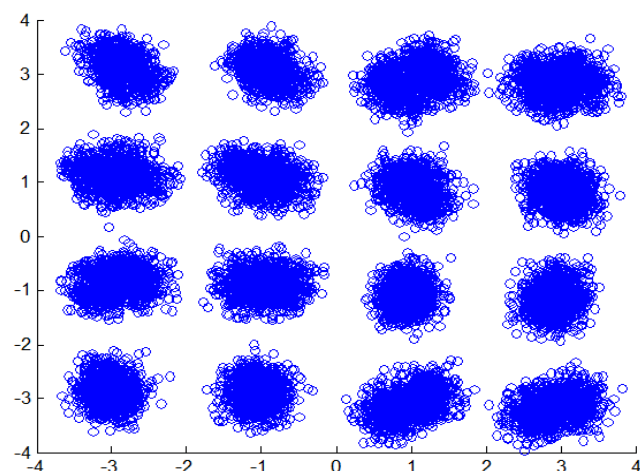
Length = 400m



Length = 600m

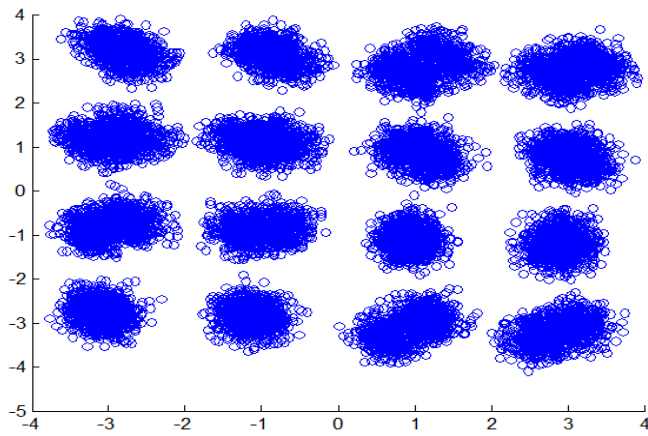


Length = 800m

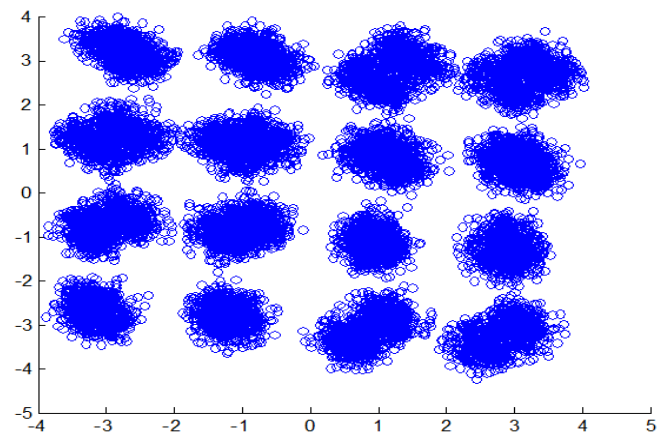


Length = 1000m

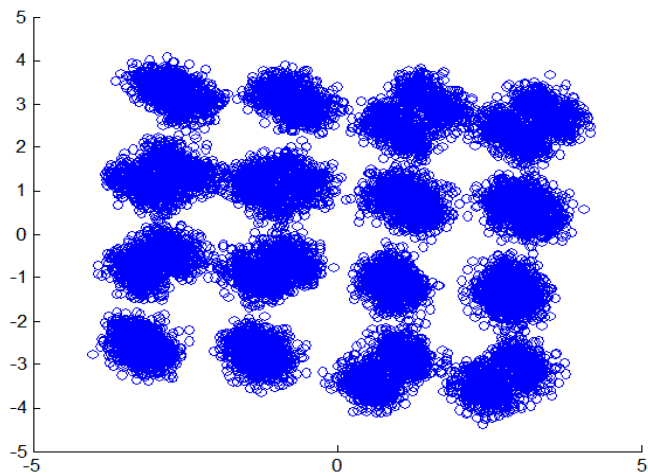
Εικόνα 4.28: Διαγράμματα αστερισμού αυξάνοντας το μήκος της ίνας



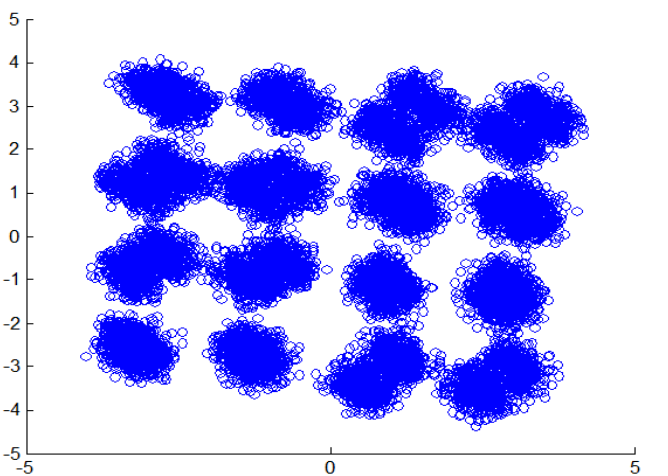
Length = 2000m



Length = 3000m



Length = 4000m



Length = 5000m

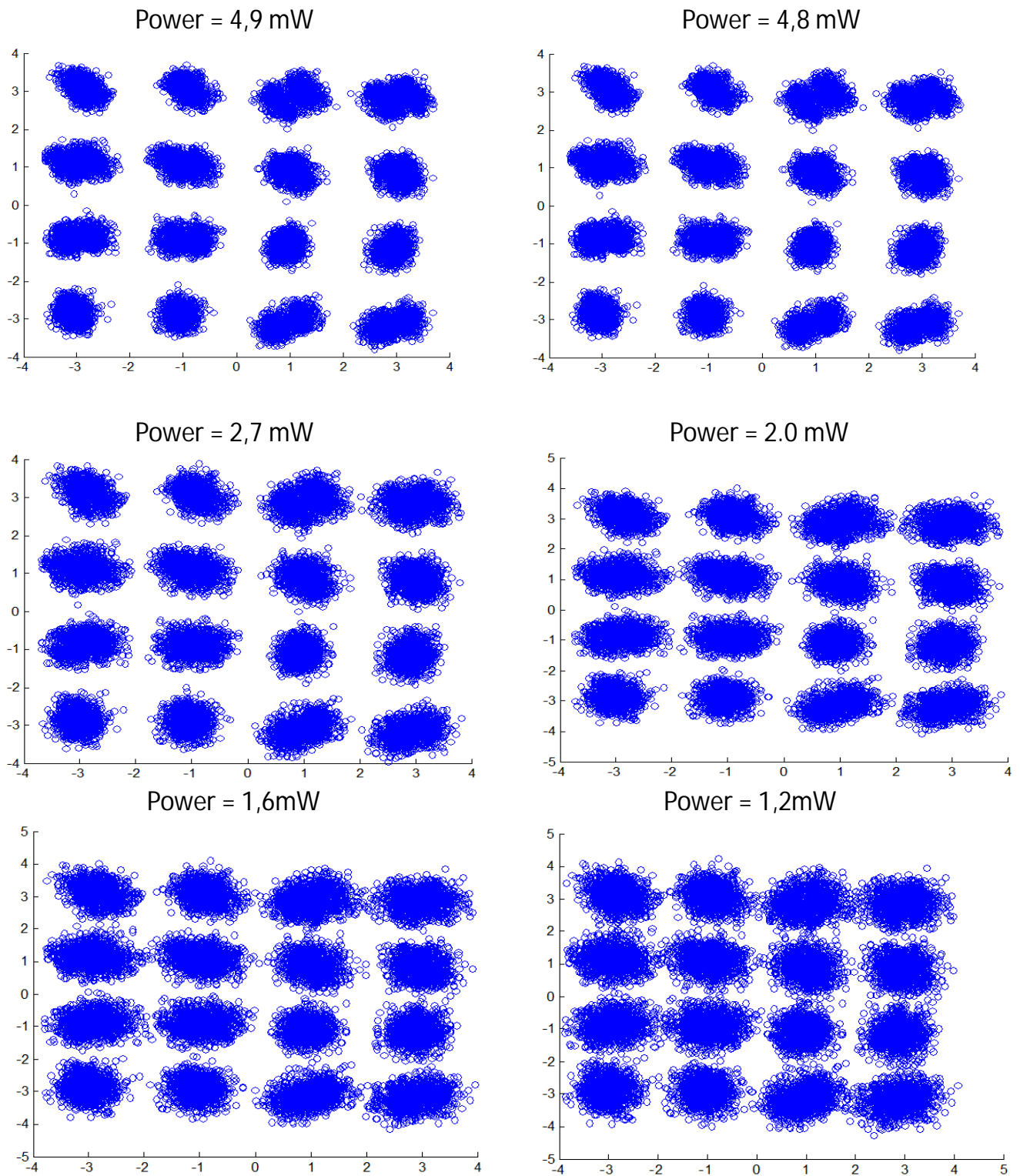
Εικόνα 4.29: Διαγράμματα αστερισμού αυξάνοντας το μήκος της ίνας

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές BER:

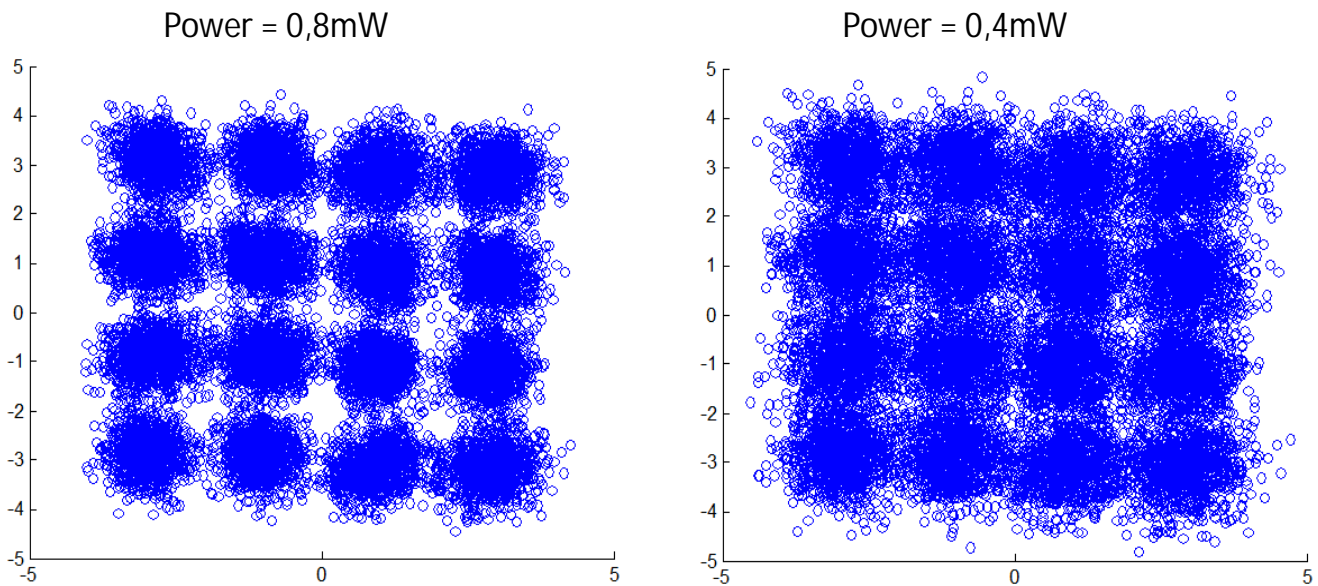
| Length (m) | BER |
|------------|------------|
| 100 | 0 |
| 200 | 0 |
| 400 | 0 |
| 600 | 1,5261e-5 |
| 800 | 1.5261e-5 |
| 1000 | 4.5782e-5 |
| 2000 | 2.5943e-04 |
| 3000 | 0.0018 |
| 4000 | 0.0062 |
| 5000 | 0.0143 |

Εικόνα 4.30: Μέτρηση του BER αυξάνοντας το μήκος της ίνας

Παρακάτω παρουσιάζεται η εξέλιξη της ποιότητας του εξερχόμενου σήματος καθώς μεταβάλλουμε την οπτική ισχύ του laser διατηρώντας το μήκος της ίνας σταθερό στα 1000m.



Εικόνα 4.31: Διαγράμματα αστερισμού μειώνοντας την ισχύ εξόδου του laser



Εικόνα 4.32: Διαγράμματα αστερισμού μειώνοντας την οπτική ισχύ εξόδου του laser

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές BER:

| Power (mW) | BER |
|------------|-----------|
| 4.9 | 0 |
| 4.8 | 1.5261e-5 |
| 2.7 | 4.5782e-5 |
| 2.0 | 1.5261e-4 |
| 1.6 | 4.7308e-4 |
| 1.2 | 0.0015 |
| 0.8 | 0.0050 |
| 0.4 | 0.0225 |

Εικόνα 4.33: Μέτρηση του BER αυξάνοντας την οπτική ισχύ του laser

Στη συνέχεια παρατίθενται πίνακες με αναλυτικά αποτελέσματα του ρυθμού ανάλυσης λαθών (BER) σε συνάρτηση με την οπτική ισχύ που εισέρχεται στον σύμφωνο δέκτη. Αυξάνοντας την απόσβεση που εισάγει ο εξασθενητής που προσομοιάζει τις απώλειες σύνδεσης του σύμφωνου δέκτη στην ίνα με βήμα 0.5dB, μειώνουμε την εισερχόμενη ισχύ στο δέκτη και για τα διάφορα μήκη της ίνας καταγράφουμε το μετρητικό μέγεθος BER.

| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|-------------|-----------|--------------|
| Length = 0m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 3 | 0 | 0.02351 | -16.28747371 |
| 3.5 | 1.5261 e -5 | 0.02095 | -16.78815973 |
| 4 | 3.0521 e -5 | 0.01867 | -17.28855682 |
| 4.5 | 1.0682 e -4 | 0.01664 | -17.78846678 |
| 5 | 2.4417 e -4 | 0.01483 | -18.28858849 |
| 5.5 | 3.9678 e -4 | 0.01322 | -18.78768545 |
| 6 | 5.4938 e -4 | 0.01178 | -19.2885471 |
| 6.5 | 9.6142 e -4 | 0.0105 | -19.78810701 |
| 7 | 0.0015 | 0.00935 | -20.29188389 |
| 7.5 | 0.0022 | 0.00834 | -20.78833949 |
| 8 | 0.0029 | 0.00743 | -21.29011186 |
| 8.5 | 0.0042 | 0.00662 | -21.79142011 |
| 9 | 0.0061 | 0.0059 | -22.29147988 |
| 9.5 | 0.008 | 0.00526 | -22.79014256 |
| 10 | 0.0104 | 0.00469 | -23.28827157 |

Εικόνα 4.34: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 0m

| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|-------------|------------|--------------|
| Length = 100m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 3 | 0 | 0.02339 | -16.30969778 |
| 3.5 | 1.5261 e -5 | 0.0208547 | -16.80796053 |
| 4 | 4.5782 e -5 | 0.0185868 | -17.30795374 |
| 4.5 | 1.2209 e -4 | 0.0165655 | -17.80795451 |
| 5 | 2.2891 e -4 | 0.014764 | -18.30795963 |
| 5.5 | 3.6626 e -4 | 0.01315845 | -18.80795265 |
| 6 | 4.8834 e -4 | 0.0117275 | -19.30794558 |
| 6.5 | 9.4616 e -4 | 0.010452 | -19.80800599 |
| 7 | 0.0015 | 0.00931547 | -20.30795228 |
| 7.5 | 0.0022 | 0.0083024 | -20.80796347 |
| 8 | 0.03 | 0.0073995 | -21.30797625 |
| 8.5 | 0.0043 | 0.00659485 | -21.80795078 |
| 9 | 0.006 | 0.00587766 | -22.3079554 |
| 9.5 | 0.0082 | 0.00523848 | -22.8079471 |
| 10 | 0.0105 | 0.0046688 | -23.3079473 |

Εικόνα 4.35: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 100m

| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|-------------|-----------|--------------|
| Length = 200m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 3 | 0 | 0.02329 | -16.32830511 |
| 3.5 | 1.5261 e -5 | 0.02076 | -16.82772651 |
| 4 | 6.1043 e -5 | 0.0185 | -17.32828272 |
| 4.5 | 1.2209 e -4 | 0.01649 | -17.82779344 |
| 5 | 2.2891 e -4 | 0.014696 | -18.32800857 |
| 5.5 | 3.9678 e -4 | 0.013098 | -18.82795014 |
| 6 | 5.9517 e -4 | 0.011674 | -19.32780311 |
| 6.5 | 9.9194 e -4 | 0.010404 | -19.82799656 |
| 7 | 0.0016 | 0.009272 | -20.32826577 |
| 7.5 | 0.0022 | 0.008264 | -20.82809691 |
| 8 | 0.031 | 0.007366 | -21.32768285 |
| 8.5 | 0.0043 | 0.006565 | -21.8276527 |
| 9 | 0.0061 | 0.005851 | -22.32769902 |
| 9.5 | 0.0077 | 0.005214 | -22.82828973 |
| 10 | 0.0099 | 0.004647 | -23.32827328 |

Εικόνα 4.36: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 200m

| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|--------------|-----------|--------------|
| Length = 400m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 3 | 0 | 0.02308 | -16.36764196 |
| 3.5 | 3.0521 e - 5 | 0.02057 | -16.86765708 |
| 4 | 7.6303 e - 5 | 0.01833 | -17.36837535 |
| 4.5 | 1.3735 e - 4 | 0.01633 | -17.87013815 |
| 5 | 2.2891 e -5 | 0.01456 | -18.36838625 |
| 5.5 | 3.9678 e -4 | 0.012978 | -18.8679223 |
| 6 | 6.4095 e -4 | 0.011566 | -19.36816812 |
| 6.5 | 0.0011 | 0.010308 | -19.8682559 |
| 7 | 0.0017 | 0.009188 | -20.36779013 |
| 7.5 | 0.0024 | 0.008189 | -20.86769129 |
| 8 | 0.0033 | 0.007298 | -21.36796141 |
| 8.5 | 0.0046 | 0.006504 | -21.86819467 |
| 9 | 0.0063 | 0.005797 | -22.367967 |
| 9.5 | 0.0087 | 0.005167 | -22.86761538 |
| 10 | 0.0111 | 0.004605 | -23.36770365 |

Εικόνα 4.37: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 400m

| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|-------------|-----------|--------------|
| Length = 600m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 2.5 | 0 | 0.025655 | -15.90827981 |
| 3 | 1.5261 e -5 | 0.022865 | -16.40828794 |
| 3.5 | 4.5782 e -5 | 0.02038 | -16.9079582 |
| 4 | 9.1564 e -5 | 0.018165 | -17.40764598 |
| 4.5 | 1.3735 e -4 | 0.016188 | -17.90806804 |
| 5 | 2.2891 e -4 | 0.014428 | -18.40793866 |
| 5.5 | 3.9678 e -4 | 0.012859 | -18.90792804 |
| 6 | 7.6303 e -4 | 0.01146 | -19.40815382 |
| 6.5 | 0.0012 | 0.010214 | -19.90804146 |
| 7 | 0.0018 | 0.009104 | -20.40767751 |
| 7.5 | 0.0026 | 0.008113 | -20.90818524 |
| 8 | 0.0035 | 0.007231 | -21.40801638 |
| 8.5 | 0.0048 | 0.006445 | -21.90777078 |
| 9 | 0.0067 | 0.005744 | -22.40785569 |
| 9.5 | 0.0091 | 0.005119 | -22.9081487 |
| 10 | 0.0118 | 0.004563 | -23.40749531 |

Εικόνα 4.38: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 600m

| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|-------------|-----------|--------------|
| Length = 800m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 2 | 0 | 0.02679 | -15.72027286 |
| 2.5 | 1.5261 e -5 | 0.02388 | -16.21965678 |
| 3 | 1.5261 e -5 | 0.02128 | -16.72028376 |
| 3.5 | 7.6303 e -5 | 0.01897 | -17.21932669 |
| 4 | 9.1564 e -5 | 0.0169 | -17.72113295 |
| 4.5 | 1.6787 e -4 | 0.01506 | -18.22175028 |
| 5 | 3.0521 e -4 | 0.01343 | -18.71923987 |
| 5.5 | 4.7308 e -4 | 0.01196 | -19.2226882 |
| 6 | 8.3934 e -4 | 0.01066 | -19.72242795 |
| 6.5 | 0.0013 | 0.0095 | -20.22276395 |
| 7 | 0.002 | 0.00847 | -20.7211659 |
| 7.5 | 0.0028 | 0.00755 | -21.22053048 |
| 8 | 0.0037 | 0.00673 | -21.71984936 |
| 8.5 | 0.0052 | 0.00599 | -22.22573178 |
| 9 | 0.0079 | 0.00534 | -22.72458743 |
| 9.5 | 0.0095 | 0.00476 | -23.22393047 |
| 10 | 0.0123 | 0.00424 | -23.72634143 |

Εικόνα 4.39: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 800m

| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|--------------|-----------|--------------|
| Length = 1000m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 2 | 0 | 0.02826 | -15.48827842 |
| 2.5 | 1.5261 e - 5 | 0.02519 | -15.98771833 |
| 3 | 4.5782 e - 5 | 0.02245 | -16.48783655 |
| 3.5 | 9.1564 e - 5 | 0.02001 | -16.98752911 |
| 4 | 1.0682 e - 4 | 0.01783 | -17.48848657 |
| 4.5 | 2.1365 e - 4 | 0.01589 | -17.98876103 |
| 5 | 3.5099 e - 4 | 0.01416 | -18.48936747 |
| 5.5 | 6.1043 e - 4 | 0.01262 | -18.98940645 |
| 6 | 0.001 | 0.01125 | -19.48847478 |
| 6.5 | 0.0015 | 0.01002 | -19.99132278 |
| 7 | 0.0022 | 0.00893 | -20.49148541 |
| 7.5 | 0.003 | 0.00796 | -20.99086932 |
| 8 | 0.0041 | 0.00709 | -21.49353765 |
| 8.5 | 0.0057 | 0.00632 | -21.99282922 |
| 9 | 0.0076 | 0.00563 | -22.49491605 |
| 9.5 | 0.0103 | 0.00502 | -22.99296283 |

Εικόνα 4.40: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 1000m

| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|--------------|-----------|--------------|
| Length = 2000m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 0 | 3.0521 e - 5 | 0.04018 | -13.95990068 |
| 0.5 | 6.1043 e - 5 | 0.03581 | -14.45995679 |
| 1 | 9.1564 e - 5 | 0.03192 | -14.95937117 |
| 1.5 | 1.0682 e - 4 | 0.02845 | -15.45917729 |
| 2 | 1.3735 e - 4 | 0.02535 | -15.96022036 |
| 2.5 | 1.8313 e - 4 | 0.0226 | -16.45891561 |
| 3 | 2.5943 e - 4 | 0.02014 | -16.95940534 |
| 3.5 | 3.9678 e - 4 | 0.01795 | -17.45935547 |
| 4 | 6.5621 e - 4 | 0.01599 | -17.96151536 |
| 4.5 | 8.8512 e - 4 | 0.01425 | -18.46185136 |
| 5 | 0.0013 | 0.0127 | -18.96196279 |
| 5.5 | 0.0017 | 0.01132 | -19.46153573 |
| 6 | 0.0024 | 0.01009 | -19.96108834 |
| 6.5 | 0.0031 | 0.00899 | -20.46240308 |
| 7 | 0.0041 | 0.00801 | -20.96367484 |
| 7.5 | 0.0054 | 0.00714 | -21.46301788 |
| 8 | 0.0069 | 0.00636 | -21.96542884 |
| 8.5 | 0.009 | 0.00567 | -22.46416941 |
| 9 | 0.011 | 0.00505 | -22.96708622 |

Εικόνα 4.41: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 2000m

| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|-------------|-----------|--------------|
| Length = 3000m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 0 | 4.273 e -4 | 0.03837 | -14.16008201 |
| 0.5 | 5.3412 e -4 | 0.0342 | -14.65973894 |
| 1 | 6.7147 e -4 | 0.03048 | -15.15985037 |
| 1.5 | 8.6983 e -4 | 0.02717 | -15.65910362 |
| 2 | 0.0011 | 0.02421 | -16.16005211 |
| 2.5 | 0.0014 | 0.02158 | -16.6594856 |
| 3 | 0.0018 | 0.01923 | -17.16020716 |
| 3.5 | 0.0022 | 0.01714 | -17.65989182 |
| 4 | 0.0027 | 0.01527 | -18.16160963 |
| 4.5 | 0.0033 | 0.01361 | -18.66141875 |
| 5 | 0.0039 | 0.01213 | -19.16139199 |
| 5.5 | 0.0046 | 0.01081 | -19.66174306 |
| 6 | 0.0056 | 0.00964 | -20.15922966 |
| 6.5 | 0.0067 | 0.00859 | -20.66006836 |
| 7 | 0.0083 | 0.00765 | -21.16338565 |
| 7.5 | 0.0098 | 0.00682 | -21.66215625 |

Εικόνα 4.42: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 3000m

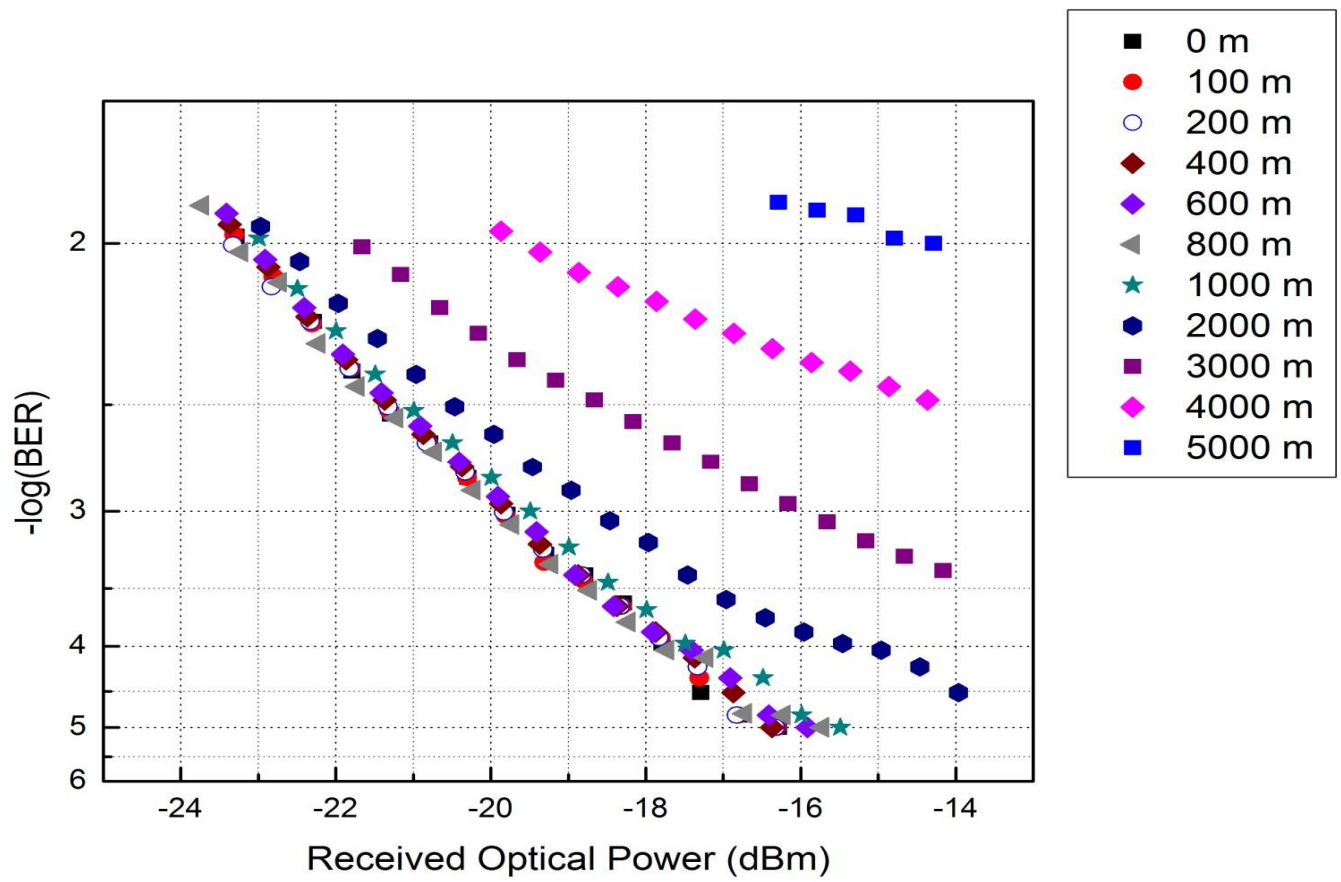
| Laser power = 2,7 mW | | | |
|----------------------|--------|-----------|--------------|
| Length = 4000m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 0 | 0.0033 | 0.03665 | -14.35926021 |
| 0.5 | 0.0037 | 0.03266 | -14.8598382 |
| 1 | 0.0042 | 0.02911 | -15.35957795 |
| 1.5 | 0.0045 | 0.02594 | -15.86030028 |
| 2 | 0.005 | 0.02312 | -16.3601217 |
| 2.5 | 0.0056 | 0.02061 | -16.85922008 |
| 3 | 0.0062 | 0.01837 | -17.35890844 |
| 3.5 | 0.007 | 0.01637 | -17.85951321 |
| 4 | 0.0077 | 0.01459 | -18.35944708 |
| 4.5 | 0.0084 | 0.013 | -18.86056648 |
| 5 | 0.0095 | 0.01159 | -19.35916564 |
| 5.5 | 0.0107 | 0.01032 | -19.86320303 |

Εικόνα 4.43: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 4000m

| | | | |
|----------------------|----------|-----------|--------------|
| Laser power = 2,7 mW | | | |
| Length = 5000m | | | |
| | | Receiver | Input |
| Attenuation (dB) | BER | Power(mW) | Power(dBm) |
| 0 | 0 | 0.0372576 | -14.28785124 |
| 0.5 | 1.03E-02 | 0.033205 | -14.78796515 |
| 1 | 0.012 | 0.029594 | -15.28796331 |
| 1.5 | 0.0117 | 0.0263757 | -15.78796006 |
| 2 | 0.0125 | 0.023507 | -16.28802793 |

Εικόνα 4.44: Πίνακας BER σε συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη για μήκος ίνας 5000m

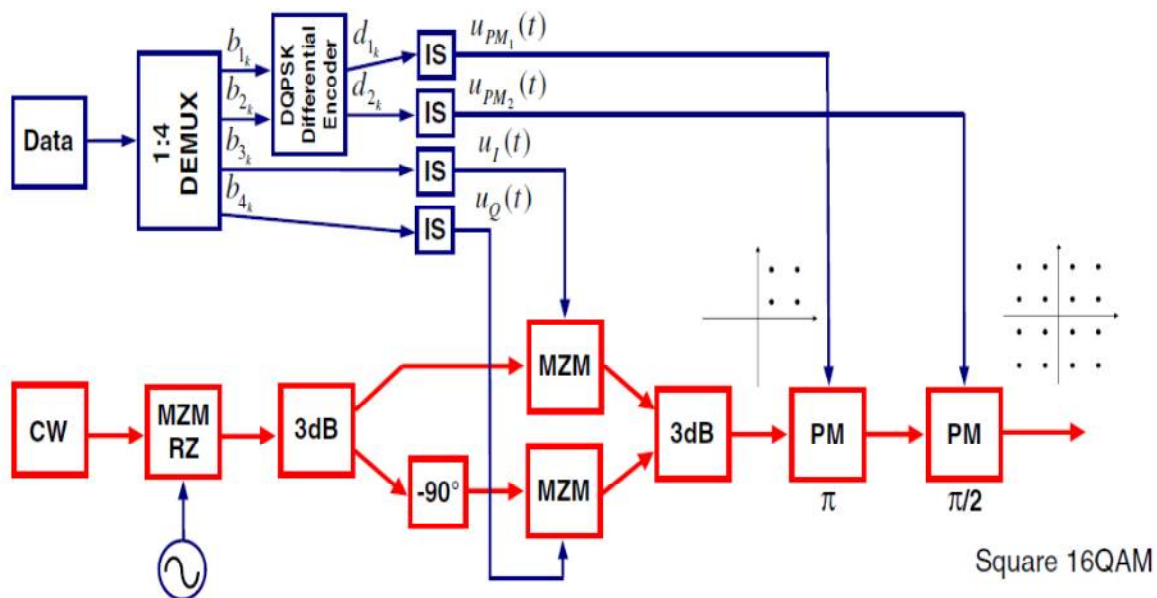
Μετά από επεξεργασία των παραπάνω στοιχείων στο πρόγραμμα ORIGIN προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα το οποίο παρουσιάζει τη μεταβολή του ρυθμού λαθών σε λογαριθμική κλίμακα σε σχέση με τη μεταβολή της εισερχόμενης ισχύος στο σύμφωνο δέκτη για μήκη οπτικής ίνας από 0 έως 5000m με στόχο να μελετηθεί η οπτική διάταξη ενδελεχώς όσον αφορά τις δυνατότητές της σε εφαρμογές τόσο για ενεργό οπτικό καλώδιο όσο και για διασύνδεση υπολογιστικών μονάδων εντός υπολογιστικών κεντρών. Τέτοιου είδους οπτικά συστήματα αξιολογούνται με βάση τη διαφορά που προκύπτει στην οπτική ισχύ στην είσοδο του σύμφωνου δέκτη ώστε να επιτευχθεί ο μικρότερος δυνατός αριθμός λαθών για διαφορετικά μήκη οπτικής ίνας. Η διαφορά αυτή ονομάζεται power penalty και μετριέται σε dB. Όσο μικρότερο είναι το power penalty τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του υπό μελέτη οπτικού συστήματος. Παρακάτω, μελετώντας την εικόνα 4.45 παρατηρούμε ότι το power penalty που προκύπτει από τις καμπύλες που σχηματίστηκαν από τα προηγούμενα αποτελέσματα για μήκη από 0m έως 1000m είναι 0,8dB αποδεικνύοντας ότι η οπτική μας διάταξη μπορεί να αποστείλει την οπτική πληροφορία με τα ελάχιστα δυνατά λάθη μετά από απόσταση 1000m χωρίς να απαιτείται οπτικός ενισχυτής μεταξύ πομπού και δέκτη. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται και στην εξαιρετικά χαμηλή απόσβεση που προσδίδει η οπτική ίνα στο σήμα και ισούται με 0.2 dB ανά χιλιόμετρο με αποτέλεσμα η επιβάρυνση του ρυθμού ανάλυσης λαθών από τη διάδοση στην ίνα να είναι πολύ μικρότερη από την επιβάρυνση που προκύπτει από την αύξηση της απόσβεσης που εισάγει ο εξασθενητής. Επίσης, από την παρακάτω εικόνα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για μετάδοση μέχρι 2km το power penalty είναι 2,3dB σε σχέση με το οπτικό σύστημα χωρίς να παραμβάλλεται οπτική ίνα, αποδεικνύοντας ότι η διάταξη που σχεδιάστηκε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για μεγαλύτερες αποστάσεις του 1km με την προϋπόθεση ο οπτικός εκπομπός να είχε μεγαλύτερη ισχύ εξόδου. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί είτε χρησιμοποιώντας ένα laser μεγαλύτερης οπτικής ισχύος της τάξης των 6,5 dBm στον οπτικό πομπό είτε με την χρήση οπτικού ενισχυτή. Τέλος, για μήκος ίνας 5km γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η οπτική διάταξη έχει μεγάλο αριθμό λαθών και απαιτείται η χρήση ενισχυτή ώστε να μπορέσει να γίνει λήψη στο σύμφωνο δέκτη. Με τη βοήθεια της συγκεκριμένης εικόνας ουσιαστικά αποδείχθηκε ότι η υπό μελέτη οπτική διάταξη που σχεδιάστηκε και μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενεργό οπτικό καλώδιο για αποστάσεις μέχρι 1km.



Εικόνα 4.45 Καμπύλες BER σε συνάρτηση με την οπτική ισχύ εισόδου στο δέκτη

4.2 – Tandem-QPSK Transmitter

Η υπό μελέτη οπτική διάταξη αποτελείται από δύο IQ διαμορφωτές, οι οποίοι συνδέονται στη σειρά για να παραχθεί το 16 Square QAM σήμα. Ο πρώτος IQ διαμορφωτής παράγει ένα διάγραμμα αστερισμού αποτελούμενο από τέσσερα σύμβολα σε τετραγωνική διατάξη σε ένα από τα τέσσερα τεταρτημόρια ανάλογα με της συνθήκες οδήγησης του ηλεκτρικού σήματος και ο δεύτερος ο οποίος στην ουσία λειτουργεί σαν DQPSK διαμορφωτής και προκαλεί στροφή των υπόλοιπων τεταρτημόριων ώστε να προκύψει το διάγραμμα αστερισμού της 16 Square QAM διαμόρφωσης.

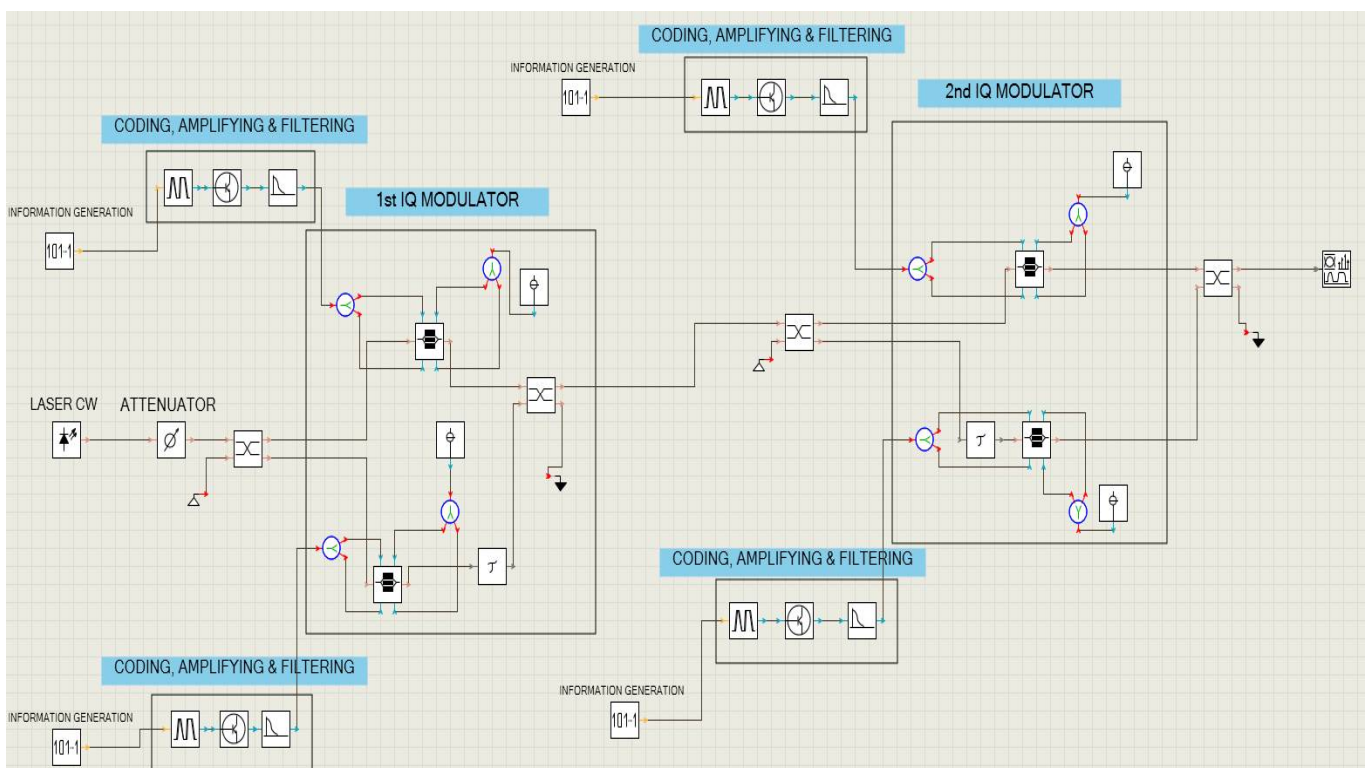


Εικόνα 4.46: Tandem-QPSK Transmitter για την παραγωγή σήματος 16 Square QAM

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούμε για την προσομοίωση της διάταξης αυτής είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά της προηγούμενης διάταξης με μοναδικές εξαιρέσεις κάποιες διαφοροποιήσεις στην παραμετροποίηση τους. Η παράμετρος `OutputLevel_1` στους δύο πρώτους `CoderDriver_OOK` τίθεται στην τιμή 0.4 Volt προκειμένου όταν ενισχυθεί από τον Amplifier να φτάσει στην τάση 4 Volt, δηλαδή στην τιμή $0.8V\pi$ ενώ στα `modules DC_Source` που τροφοδοτούν τους δύο πρώτους Mach-Zehnder Modulators στην παράμετρο `Amplitude` τίθεται η τιμή 3 Volt που ισούται με $0.6V\pi$. Με τον τρόπο αυτό λειτουργούμε τον IQ διαμορφωτή στη μη γραμμική περιοχή λειτουργίας του προκειμένου να παράγουμε ένα QPSK σήμα με το κέντρο του διαγράμματος αστερισμού μετατοπισμένο από την αρχή των αξόνων στο τρίτο τεταρτημόριο. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι των υπόλοιπων `modules` έχουν ακριβώς τις ίδιες τιμές όπως και στην προσομοίωση του Multi-Parallel Transmitter στην προηγούμενη παράγραφο. Σύμφωνα με την εικόνα 4.46 τροφοδοτούμε με ακριβώς τον ίδιο

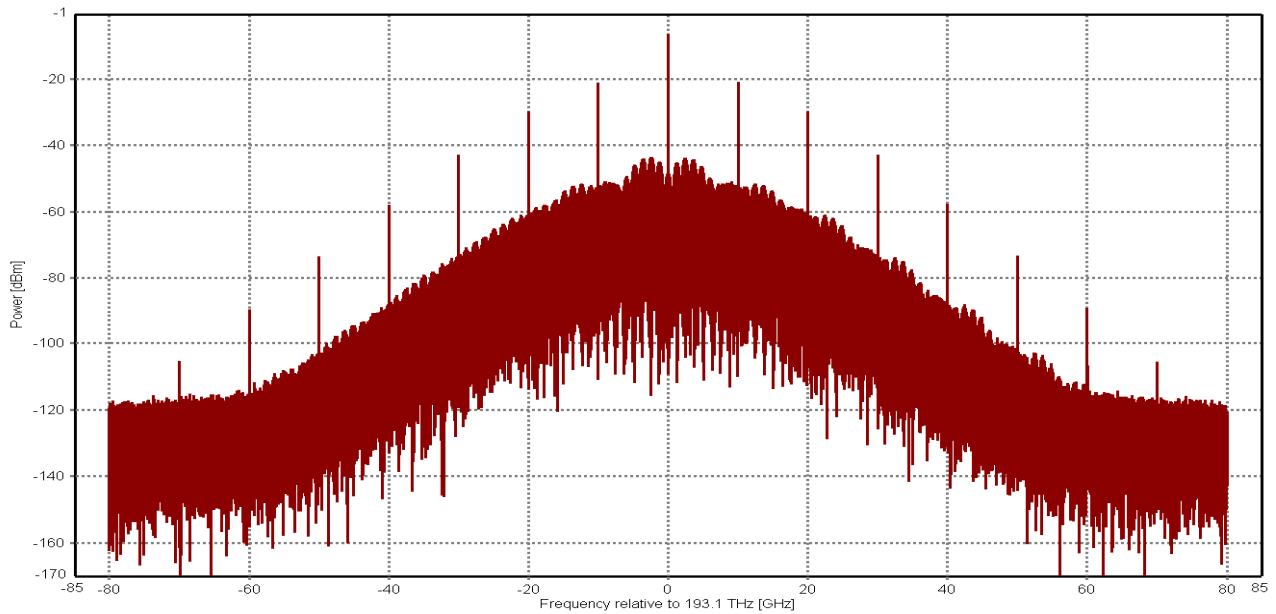
τρόπο και την ίδια τιμή τους δύο πρώτους Mach-Zehnder διαμορφωτές ή αλλιώς τον πρώτο IQ διαμορφωτή προκειμένου να πετύχουμε τη διαμόρφωση κατά πλάτος την οποία επιθυμούμε με αποτέλεσμα να εμφανιστεί στην έξοδο ένα διάγραμμα αστερισμού με τα τέσσερα σημεία διατεταγμένα σε τετραγωνική διάταξη στο τρίτο τεταρτημόριο. Το σήμα αυτό με τη συγκεκριμένη διαμόρφωση εισέρχεται σε ένα δεύτερο IQ διαμορφωτή ο οποίος λειτουργεί σαν QPSK διαμορφωτής όπως ακριβώς και οι IQ διαμορφωτές στην διάταξη Multi-Parallel Transmitter. Με λίγα λόγια το διάγραμμα αστερισμού που προκύπτει από τη διαμόρφωση πλάτους στον πρώτο IQ διαμορφωτή περιστρέφεται κατά 90, 180 ή 270 μοίρες αναλόγως με το σήμα πληροφορίας που τροφοδοτούν οι γεννήτριες PRBS τους Coders, με αποτέλεσμα στην τελική έξοδο του πομπού να προκύπτει 16 Square QAM διαμόρφωση.

Αυτή είναι διάταξη έτσι όπως σχεδιάσθηκε στην κονσόλα προσομοίωσης VPI:



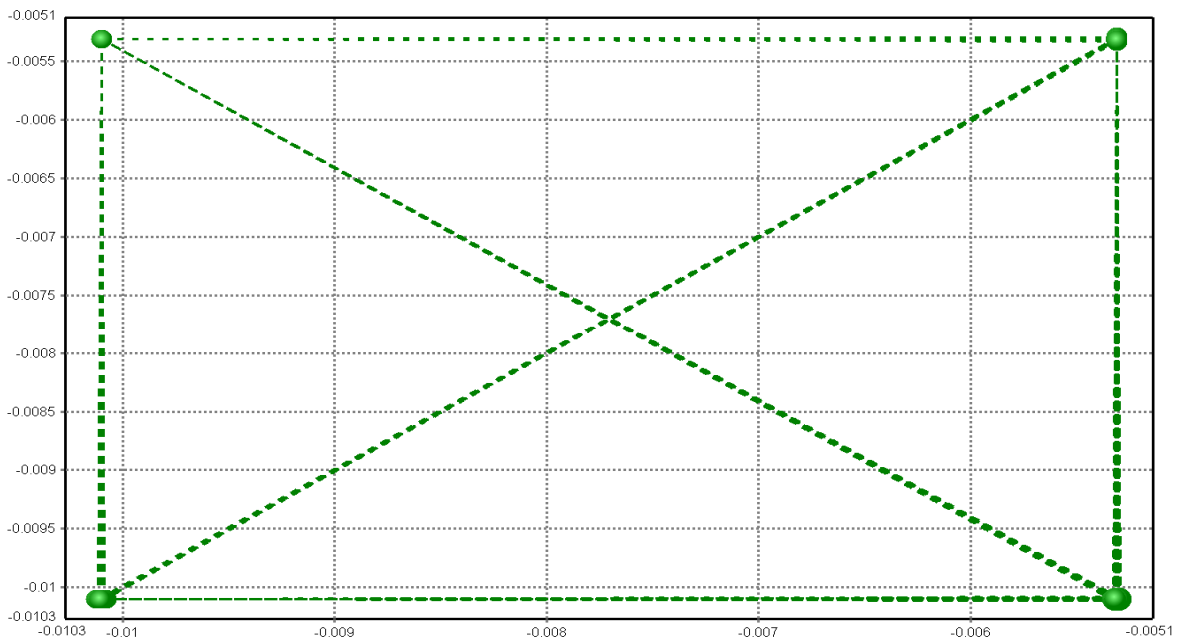
Εικόνα 4.47: Tandem-QPSK Transmitter για την παραγωγή σήματος 16 Square QAM στο πρόγραμμα VPI

Οι τιμές των γενικών παραμέτρων που αφορούν το ρυθμό μετάδοσης, τη συχνότητα λειτουργίας, το ρυθμό δειγματοληψίας, το χρονικό μέγεθος του παραθύρου απεικόνισης στον VPI analyzer και άλλες παράμετρος της διαδικασίας προσομοίωσης παραμένουν ακριβώς οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του Multi-Parallel Transmitter. Παραθέτουμε παρακάτω τα διαγράμματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξής μας στον VPI analyzer. Στην έξοδο του πρώτου IQ διαμορφωτή το φάσμα του οπτικού παλμού με εύρος 160 GHz, όσο και το SampleRateDefault με κεντρική συχνότητα τα 193.1 THz :



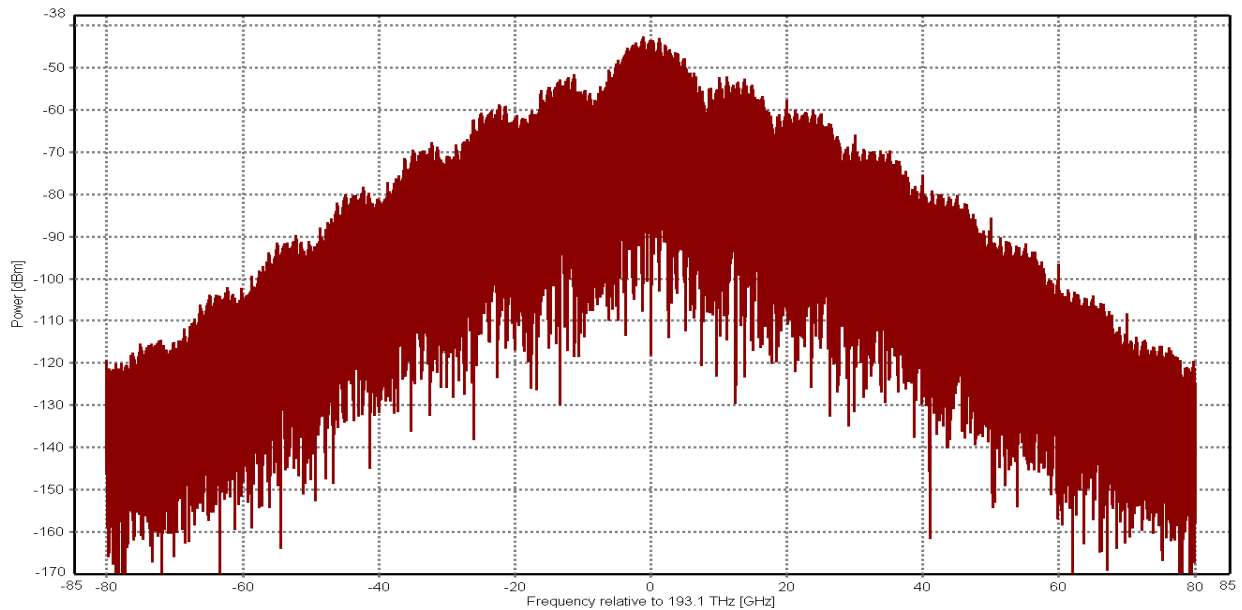
Εικόνα 4.48: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου από τον 1^ο IQ διαμορφωτή

Στην συγκεκριμένη εικόνα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι αρμονικές κάθε 10GHz δεν είναι καταπιεσμένες όπως στην εικόνα 4.6 λόγω του πλάτους διαμόρφωσης. Στην περίπτωση που εξετάζουμε ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης όπως στην παρούσα διπλωματική, αναλύθηκε εκτενώς παραπάνω ότι για QPSK διαμόρφωση τα διαγράμματα αστερισμού είναι συμμετρικά όσον αφορά τη φάση και το πλάτος του σήματος με αποτέλεσμα να έχουμε καταπίεση των αρμονικών στο φάσμα του οπτικού σήματος. Όμως σε αυτή την περίπτωση όλα τα σύμβολα είναι σε ένα τεταρτημόριο, οπότε δεν υπάρχει καθόλου συμμετρία με αποτέλεσμα οι αρμονικές να μην καταπιέζονται.

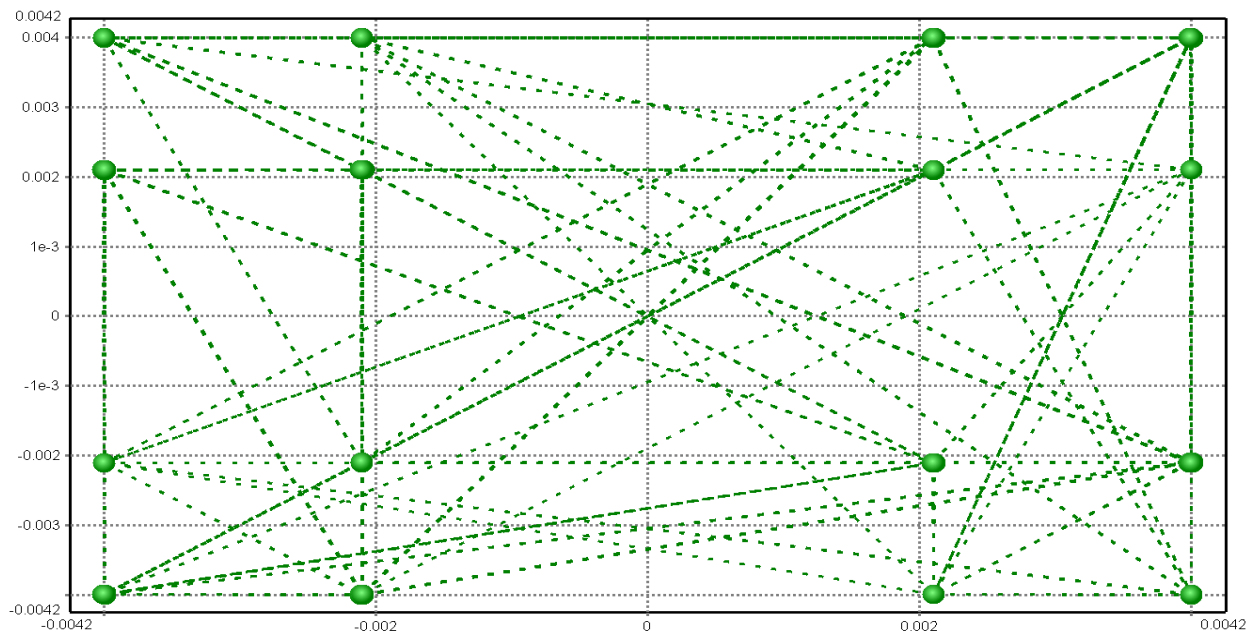


Εικόνα 4.49: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του 1^{ου} IQ διαμορφωτή

Το σήμα αυτό εισέρχεται όπως προαναφέραμε, στο δεύτερο σε σειρά IQ διαμορφωτή, ο οποίος λειτουργεί σαν QPSK διαμορφωτής προκειμένου να ολοκληρωθεί η τελική 16 Square QAM διαμόρφωση. Τα δύο αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες 4.50 και 4.51. Στην εικόνα 4.50 διακρίνεται καθαρά το οπτικό φάσμα της 16 square QAM διαμόρφωσης με πλήρη καταπίεση των αρμονικών μιάς και το συγκεκριμένο οπτικά διαμορφωμένο σήμα πλέον έχει αποκτήσει συμμετρία τόσο στη φάση όσο και στο πλάτος. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από την εικόνα 4.51 όπου παρουσιάζεται το διάγραμμα αστερισμού της 16 square QAM διαμόρφωσης.

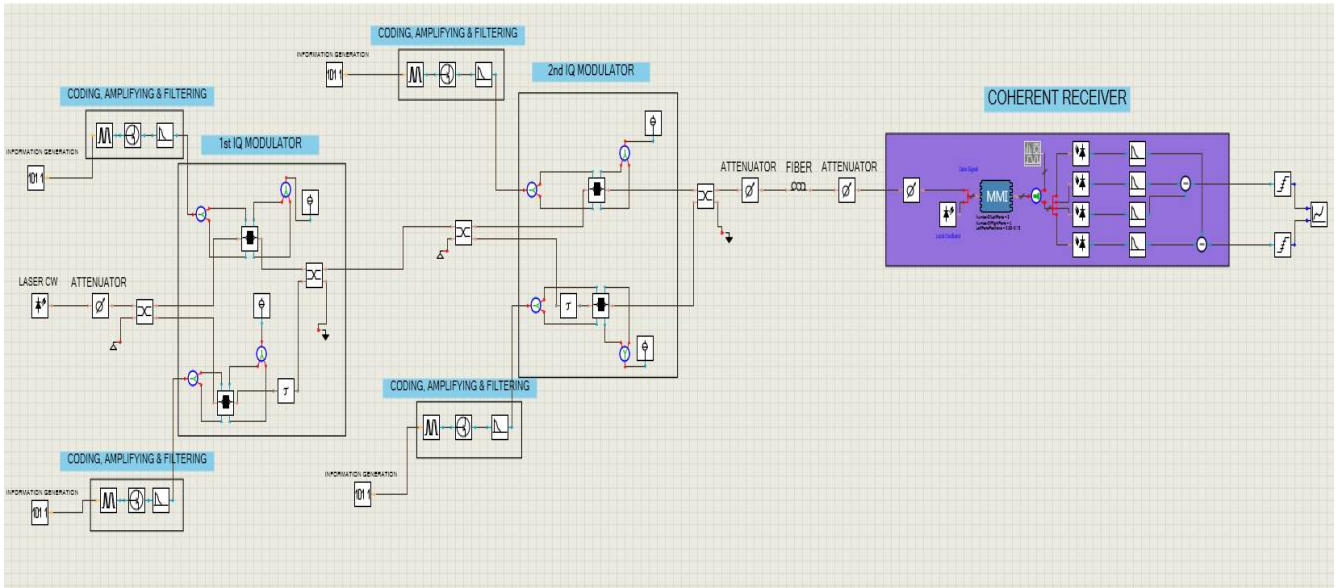


Εικόνα 4.50: Οπτικό φάσμα σήματος εξόδου



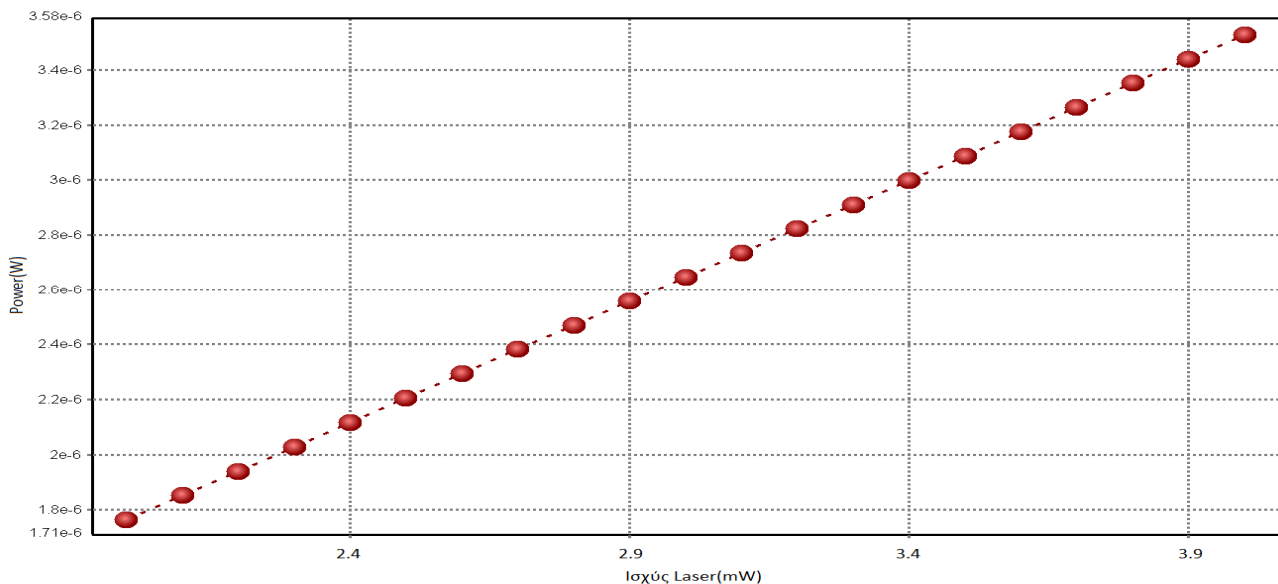
Εικόνα 4.51: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του πομπού

Η συνολική διάταξη του κυκλώματος όπως ακριβώς την προσομοιώσαμε στο VPI παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



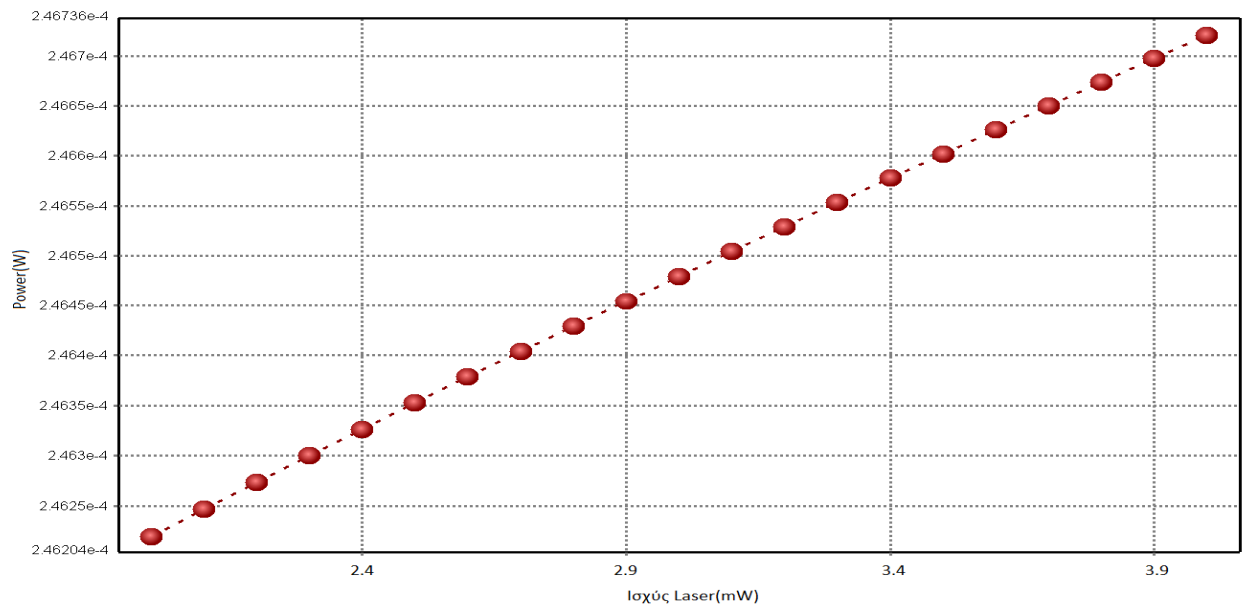
Εικόνα 4.52: Προσομοίωση της εκπομπής από Tandem-QPSK Transmitter και λήψης από σύμφωνο δέκτη μετά από διάδοση σε οπτική ίνα σήματος 16 Square QAM

Ο δέκτης είναι ο σύμφωνος δέκτης που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 3 και που αντίστοιχα χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη Multi-Parallel Transmitter στην προηγούμενη προσομοίωση. Τα χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας και των εξασθενητών παραμένουν ακριβώς τα ίδια όπως και στο υποκεφάλαιο 4.1. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της εξέλιξης της οπτικής ισχύος που φτάνει στην είσοδο του δέκτη όταν μεταβάλλεται η οπτική ισχύς του laser συνεχούς κύματος από τα 2 mW έως τα 4 mW με βήμα 0,1 mW.



Εικόνα 4.53: Ισχύς στην είσοδο του δέκτη αυξάνοντας την ισχύ του laser κατά 0.1mW ανά βήμα

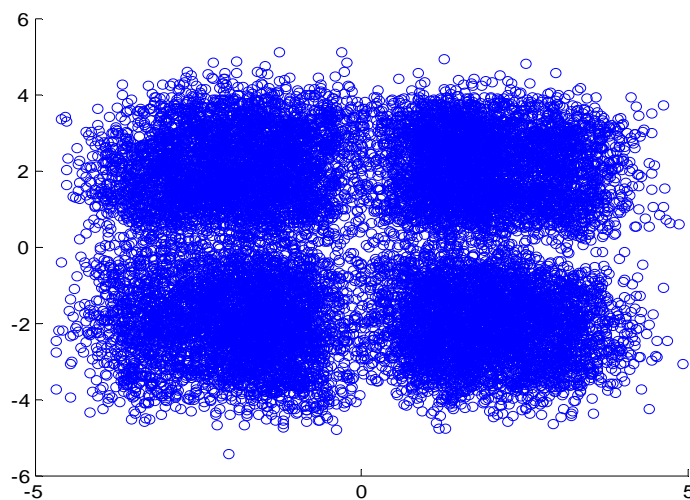
Και παρομοίως το διάγραμμα της εξέλιξης της οπτικής ισχύος που φτάνει στις φωτοδιόδους όταν μεταβάλλεται η οπτική ισχύς του Laser CW από τα 2 mW έως τα 4 mW με βήμα 0,1 mW.



Εικόνα 4.54: Ισχύς στην είσοδο των φωτοδίοδων αυξάνοντας την ισχύ του laser κατά 0.1mW ανά βήμα

Τέλος, εξάγουμε με το πρόγραμμα Matlab το διάγραμμα αστερισμού του σήματος που λαμβάνει ο σύμφωνος δέκτης χωρίς να παρεμβάλλεται οπτική ίνα. Στη προκειμένη όμως περίπτωση η αρχική μέτρηση που πραγματοποιήθηκε αφορούσε την οπτική ισχύ 2,7mW στην παράμετρο PowerAverage του laser συνεχούς κύματος προκειμένου να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των δύο οπτικών διατάξεων.

- PowerAverage : 2,7 mW
Length :0m



Εικόνα 4.55: Διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του δέκτη

Το διάγραμμα αστερισμού που προκύπτει είναι πολύ χαμηλής ποιότητας και θυμίζει περισσότερο QPSK παρά 16 Square QAM σήμα. Η πολύ μικρή απόσταση που χωρίζει τα σύμβολα στο διάγραμμα αστερισμού στην έξοδο του πομπού καθώς και η εισερχόμενη στο δέκτη οπτική ισχύς η οποία είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη από ότι στην παράλληλη τοπολογία, οδηγούν στην επικράτηση του θορύβου έναντι του σήματος πληροφορίας με αποτέλεσμα την αδυναμία του σύμφωνου δέκτη να αναπαράγει και να αποκωδικοποιήσει σωστά την εισερχόμενη οπτική πληροφορία. Για να επιτευχθεί η ποιότητα του σήματος που θα επιτρέψει την σωστή αναπαραγωγή του εκπεμπόμενου σήματος θα πρέπει να αυξήσουμε κατά πολύ την οπτική ισχύ του laser συνεχούς κύματος που βρίσκεται στον οπτικό πομπό της διάταξης. Εκτός του ότι η αύξηση αυτής της εκπεμπόμενης ισχύος έχει καθορισμένα όρια αποτελεί μια κοστοβόρα και τεχνικοοικονομικά απρόσιτη λύση βγαίνοντας εκτός των πλασίων της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Για το λόγο αυτό δε θα συνεχιστεί η μελέτη της λειτουργίας της σειριακής τοπολογίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο σχεδιασμός και η προσομοίωση της λειτουργίας δύο τοπολογιών ενεργού οπτικού καλωδίου διαμόρφωσης, μετάδοσης και αποδιαμόρφωσης οπτικού 16 Square QAM σήματος για τη διασύνδεση στοιχείων και διατάξεων εντός ενός υπολογιστικού κέντρου δεδομένων. Η τοπολογία Tandem-QPSK Transmitter, η οποία συνίσταται από δύο IQ διαμορφωτές συνδεδεμένους σε σειρά αποδείχθηκε ανεπαρκής για το σκοπό που μελετούμε, για τη χρήση δηλαδή του ενεργού οπτικού καλωδίου εντός ενός υπολογιστικού κέντρου δεδομένων όπου χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένες διατάξεις και laser χαμηλής οπτικής ισχύος. Η αποτυχία της συγκεκριμένης τοπολογίας οφείλεται στην αδυναμία του σύμφωνου δέκτη να αναπαράγει σωστά την In-Phase και την Quadrature συνιστώσα του οπτικού σήματος καθώς η ισχύς εξόδου του πομπού και κατ'επέκταση η ισχύς εισόδου στον δέκτη είναι πολύ χαμηλή σε συνδυασμό με την πολύ μικρή απόσταση που διαχωρίζει τα σύμβολα στο διάγραμμα αστερισμού του οπτικού σήματος στην έξοδο του οπτικού πομπού. Αντιθέτως, πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα προέκυψαν από την προσομοίωση λειτουργίας της τοπολογίας Multi-Parallel Transmitter, η οποία βασίζεται στην παράλληλη σύνδεση των δύο IQ διαμορφωτών. Με αυτή την διάταξη επιτεύχθηκε η διαμόρφωση του οπτικού σήματος με βάση το σχήμα διαμόρφωσης 16 Square QAM και η αποδιαμόρφωση του από ένα σύμφωνο δέκτη. Με αρκετά χαμηλές τιμές οπτικής ισχύος εξόδου στο laser συνεχούς κύματος της τάξεως λίγων mW καταγράφηκαν ρυθμοί ανάλυσης λαθών της τάξεως του $1e-6$ και $1e-5$. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προέκυψαν μετά από διαδικασία ψηφιακής επεξεργασίας του σήματος με αλγόριθμο μέτρησης λαθών σε οπτικά σημάτα στο πρόγραμμα Matlab και φαντάζουν ιδανικά στην περίπτωση της πραγματικής κατασκευής ενός ενεργού οπτικού καλωδίου για υπολογιστικά κέντρα. Από τους πίνακες μετρήσεων και τα σχετικά διαγράμματα που παρατέθηκαν προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- (i) Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε laser συνεχούς κύματος χαμηλότερης οπτικής ισχύος για λόγους οικονομίας και μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας με παράλληλη αύξηση φυσικά του ρυθμού των λαθών.
- (ii) Μπορούμε να αυξήσουμε το μήκος της οπτικής ίνας διατηρώντας σταθερή την ισχύ του laser πάλι με την παραδοχή ενός υψηλότερου ρυθμού λαθών .
- (iii) Αποφεύχθηκε η χρήση οπτικού ενισχυτή μεταξύ του οπτικού πομπού και δέκτη πράγμα που θα καθιστούσε την υπό μελέτη διάταξη ακατάλληλη για εφαρμογές

ενεργών οπτικών καλωδίων καθώς και θα ανέβαζε τόσο το κόστος όσο και την ενεργειακή κατανάλωση της συνολικής διάταξης.

- (iv) Η ποιότητα της ζεύξης για μήκη ίνας από λίγα μέτρα έως ένα χιλιόμετρο παραμένει σχεδόν η ίδια. Επομένως μπορούμε να μεταβάλλουμε την οπτική ισχύ εξόδου του laser συνεχούς κύματος ανάλογα με την απόσταση την οποία θέλουμε να καλύψουμε και την επιθυμητή ποιότητα ζεύξης κάθε φορά προκειμένου να καλύψουμε όλες τις ανάγκες μετάδοσης πληροφορίας εντός ενός υπολογιστικού κέντρου δεδομένων.

Βιβλιογραφία

- [1] Διαφάνειες του μαθήματος "Φωτονική Τεχνολογία στις Τηλεπικοινωνίες" του 7ου Εξαμήνου της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών κ' Μηχανικών Υπολογιστών διαθέσιμες στη διεύθυνση <http://photonics.ntua.gr/announcements.html>
- [2] Διαφάνειες του μαθήματος "Συστήματα Μετάδοσης και Δίκτυα Οπτικών Ινών" του 8ου Εξαμήνου της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών κ' Μηχανικών Υπολογιστών διαθέσιμες στη διεύθυνση <http://photonics.ntua.gr/announcements.html>
- [3] "ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ Θεωρία-Εφαρμογές-Πειράματα-Προσομοιώσεις," ΤΖΙΟΛΑ, 2010
- [4] "ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ", Παναγιώτης Γ. Κωττής
- [5] "High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission", Matthias Seimetz, Springer 2009
- [6] "Optical Networks - A practical Perspective Third Edition", Rajiv Ramaswami – Kumar N.Sivarajan – Galen H.Sasaki , Morgan Kaufmann
- [7] "Optical Interconnects for High Performance Computing" , Mark A. Taubenblatt
- [9] "Datasheet SHF 806 E", SHF Communication Technologies AG
- [10] "Optical Interconnects", David A. B. Miller, Stanford University
<http://ee.stanford.edu/~dabm>
- [11] "40-Gbaud 16-QAM transmitter using tandem IQ modulators with binary driving electronic signals", Guo-Wei Lu, Mats Sköld, Pontus Johannisson, Jian Zhao, Martin Sjödin, Henrik Sunnerud, Mathias Westlund, Andrew Ellis, and Peter A. Andrekson
- [12] "Performance Analysis of LMMSE Receivers for M-ary QAM in Rayleigh Faded CDMA Channels" ,Kegen Yu, Jamie S. Evans, Member, IEEE, and Iain B. Collings, Senior Member, IEEE
- [13] "PHOTODIODE CHARACTERISTICS", UDT Sensors Inc., <http://www.udt.com>
- [14] "ADVANCED MODULATION FORMATS FOR HIGH-BIT-RATE OPTICAL NETWORKS", Muhammad Haris
- [15] "MITIGATION OF NONLINEAR IMPAIRMENTS FOR ADVANCED OPTICAL MODULATION FORMATS", Carsten Behrens

[16]<http://www.vpiphotonics.com>

[17]<http://tech.in.gr>

[18]<http://www.techrepublic.com>

[19] Wikipedia, the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page