



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

**Μελέτη και προσομοίωση οπτικού πομπού με κυκλώματα
οπτικού προ-αντισταθμιστή, για χρήση σε οπτικά δίκτυα
πρόσβασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευφροσύνη Ι. Αθανάσουλα

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμοπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024



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

**Μελέτη και προσομοίωση οπτικού πομπού με κυκλώματα
οπτικού προ-αντισταθμιστή, για χρήση σε οπτικά δίκτυα
πρόσβασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευφροσύνη Ι. Αθανάσουλα

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Σεπτεμβρίου 2024.

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Ματσόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

.....
Ευφροσύνη Ι. Αθανάσουλα

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

Copyright © Ευφροσύνη Αθανάσουλα, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις για μεγάλο εύρος ζώνης και υψηλές ταχύτητες λόγω του 5G και της αυξημένης κίνησης στο διαδίκτυο, τα Κέντρα Δεδομένων δέχονται μεγάλη επιβάρυνση. Συνεπώς η εισαγωγή PON (Passive Optical Network) στη σχεδίαση αυτών, ώστε να υποστηρίξουν τις αυξανόμενες ανάγκες, είναι κοινά αποδεκτή. Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά και αναλύει δύο διαφορετικές διατάξεις οπτικών πομπών, με γνώμονα αξιολόγησης τη δυνατότητα που παρέχουν σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων και αντιστάθμισης του Chirp, υπό το πρίσμα των δικτύων πέμπτης γενεάς (5G). Στην πρώτη διάταξη μελετάμε την λειτουργία ενός EAM (Electro-Absorption Modulator) ενώ στην δεύτερη μιας δομής συμβολόμετρων Mach-Zehnder (MZI) με χρήση δύο EAM. Σκοπός μας είναι να διακρίνουμε καλύτερη απόδοση στην διάταξη του EAM-MZM, καθώς η δομή του προσφέρει αντιστάθμιση του Chirp. Για να αντιμετωπιστεί η υποβάθμιση και οι αλλοιώσεις που εισάγονται στο σήμα κατά την μετάδοση του χρησιμοποιείται ψηφιακή επεξεργασία σήματος στην πλευρά του δέκτη (Rx). Πειραματικά, χρησιμοποιήθηκαν σχήματα διαμόρφωσης NRZ και PAM4 με ρυθμό συμβόλων 50 GBaud. Σε κάθε περίπτωση, το Symbol Error Ratio (SER) παρέμεινε χαμηλότερο από 10^{-3} επιβεβαιώνοντας την άρτια λειτουργία των εν λόγω πειραματικών διατάξεων. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και αξιολογείται η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών διατάξεων.

Λέξεις Κλειδιά

Κέντρα Δεδομένων, Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, Φωτονική Ολοκλήρωση, Σχήματα Διαμόρφωσης, PAM4, NRZ, Διαμορφωτής Ηλεκτρο Απορρόφησης, Διαμορφωτής ηλεκτρο-απορρόφησης Mach-Zehnder, Πομπός, Ισοσταθμιστής, SER

Abstract

As the demand for large bandwidth and high speeds increases due to 5G and the growing internet traffic, Data Centers are experiencing significant strain. Consequently, the introduction of Passive Optical Network (PON) in their design to support these increasing needs is widely accepted. This thesis studies and analyzes two different PON configurations, evaluating their capability to support high-speed applications and chirp compensation in the context of fifth-generation (5G) networks.

In the first configuration, we examine the operation of an Electro-Absorption Modulator (EAM), while in the second, we investigate a Mach-Zehnder Interferometer (MZI) structure using two EAMs. Our aim is to distinguish better performance in the EAM-MZM configuration, as its structure offers chirp compensation.

To address the degradation and distortions introduced to the signal during transmission, digital signal processing is used on the receiver side (Rx). Experimentally, NRZ and PAM4 modulation schemes with a symbol rate of 50 Gbaud were used. In each case, the Symbol Error Ratio (SER) remained below 10^{-3} , confirming the proper operation of the experimental setups. Finally, the simulation results are presented, and the effectiveness of the different configurations is evaluated.

Keywords

Data Centers, PON (Passive Optical Network), Photonic Integration, PAM4, NRZ, EAM, EAM-MZM, Transmitter (Tx), Equalizer, SER

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επικεφαλή του εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου Κο Ηρακλή Αβραμόπουλο, που μου έδωσε την ευκαιρία εκπόνησης της διπλωματικής αυτής. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους Δρ. Ιωάννη Κανάκη, Δρ. Μαρία Σπυροπούλου και τον ερευνητή Γιώργο Μπρέστα για την πολύτιμη καθοδήγηση τους και την αμέριστη συμπαράσταση κατά τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, τον Γιάννη, την Γεωργία, τον Γιώργο και την Χριστίνα για την απεριόριστη στήριξη τους με κάθε δυνατό τρόπο, όλα τα χρόνια της φοιτητικής μου πορείας. Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον σύντροφο μου, Αλέξανδρο Σαμπάνη, τους συμφοιτητές και πλέον φίλους μου, Αναστασία Κουταλιανού και Ευστάθιο Ανδριανόπουλο για την ανιδιοτελή βοήθεια και τις όμορφες στιγμές που μου προσέφεραν κατά την φοίτηση μας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Περιεχόμενα.....	8
Κατάλογος Εικόνων.....	10
Κατάλογος Πινάκων.....	12
1 Κεφάλαιο 1.....	13
Εισαγωγή.....	13
1.1 Η Εξέλιξη των Παθητικών Οπτικών Δικτύων.....	13
1.1.1 Ανάγκες Δικτύου και Απαιτήσεις Χρηστών.....	13
1.1.2 Φωτονική Ολοκλήρωση.....	15
1.1.3 Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON).....	17
1.1.4 Κέντρα Δεδομένων και Διασυνδέσεις (DCI).....	17
1.1.5 PONs και Κέντρα Δεδομένων.....	19
1.1.6 Αρχιτεκτονική και Προσεγγίσεις.....	19
1.1.7 Διαφορετικά Πρότυπα.....	21
1.1.8 Power Budget Problem.....	22
1.1.9 Το μέλλον στα PON και σύγχρονες προκλήσεις.....	23
1.2 Μελλοντικά 5G/6G δίκτυα και σύνδεση με τεχνολογίες που επαφίενται σε PON...24	
2 Κεφάλαιο 2.....	25
Διαμόρφωση Οπτικού Σήματος.....	25
2.1 Λόγοι που οδηγούν σε Απώλειες και Παραμόρφωση Σήματος.....	25
2.1.1 Χρωματική διασπορά Chromatic Dispersion (CD).....	25
2.1.2 Chirp.....	25
2.2 Διαμόρφωση οπτικού σήματος.....	27
2.2.1 Σχήματα Διαμόρφωσης.....	29
2.2.2 High-speed Optical Modulators.....	30
2.2.2.1 Electro-Absorption Modulator (EAM).....	31
2.2.2.2 Electro-Absorption Mach-Zehnder Modulator (EAMZM).....	32
3 Κεφάλαιο 3.....	34
DSP - Equalizer.....	34
3.1 Equalizer.....	34
3.1.1 Ψηφιακοί Ισοσταθμιστές - FFE/DFE.....	34
3.2 Optical Pre-Equalizer.....	36
4 Κεφάλαιο 4.....	38
Πειραματικό Μέρος.....	38
4.1 Απαραίτητη Θεωρία.....	38
4.1.1 BER – Bit Error Rate.....	38
4.1.2 OSNR.....	38
4.2 Παρουσίαση Προσομοιώσεων.....	39
4.2.1 Πειραματική διάταξη – Set Up.....	39
5 Κεφάλαιο 5.....	42
Μεθοδολογία & Αποτελέσματα.....	42
5.1 Single EAM.....	42
5.1.1 Single EAM- NRZ.....	42
5.1.2 Single EAM- PAM4.....	49
5.2 EAM – MZM.....	55

5.2.1 EAM- MZM - NRZ.....	56
5.2.2 EAM-MZM – PAM4.....	62
6 Κεφάλαιο 6.....	71
Σύνοψη και Μελλοντική Εργασία.....	71
Βιβλιογραφία.....	72

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Παγκόσμια ανάπτυξη χρηστών Διαδικτύου [1].....	13
Εικόνα 2: Παγκόσμια ανάπτυξη συσκευών και συνδέσεων [1].....	14
Εικόνα 3: Moore’s law in photonics/ Νόμος του Moore στα Φωτονικά κυκλώματα[2].....	16
Εικόνα 4: Αρχιτεκτονική ενός συστήματος PON [5].....	20
Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση της Απευθείας Διαμόρφωσης (Direct Modulation) και της Εξωτερικής Διαμόρφωσης (External Modulation).....	28
Εικόνα 6: Οπτική αναπαράσταση του NRZ. NRZ Eye Diagram [11].....	29
Εικόνα 7: Οπτική αναπαράσταση του PAM4. PAM4 Eye Diagram [11].....	29
Εικόνα 8: EAM με κυματοδηγό [7].....	31
Εικόνα 9: Electro-absorption Mach Zehnder Modulator.....	33
Εικόνα 10: Το Block Diagram ενός FFE [15].....	35
Εικόνα 11: Το Block Diagram ενός DFE [15].....	36
Εικόνα 12: Εικόνα ενός Optical Equalizer PIC με 8 ίνες εισόδου/εξόδου και ηλεκτρικά καλώδια για τον έλεγχο των 26 μετατροπέων φάσης του [14].....	37
Εικόνα 13: Set Up 1: 50GBaud Single EAM with Equalizer.....	40
Εικόνα 14: Set Up 2: 50GBaud EAM-MZM with Equalizer.....	40
Εικόνα 15: Διάγραμμα SER vs Fiber Length για Single EAM και NRZ σχήμα διαμόρφωσης.....	43
Εικόνα 16: Διάγραμμα SER vs Received Optical Power για Single EAM και NRZ σχήμα διαμόρφωσης.....	45
Εικόνα 17: Eye Diagram του παλμού για Single EAM, NRZ σχήμα διαμόρφωσης.....	46
Εικόνα 18: Eye Diagram του σήματος μετά τον EAM για Single EAM, NRZ.....	46
Εικόνα 19: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 5 taps, για Single EAM, NRZ.....	47
Εικόνα 20: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 17 taps, για Single EAM, NRZ.....	47
Εικόνα 21: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 53 taps, για Single EAM, NRZ.....	47
Εικόνα 22: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 5/3 taps, για Single EAM, NRZ.....	48
Εικόνα 23: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 15/5 taps, για Single EAM, NRZ.....	48
Εικόνα 24: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 57/13 taps, για Single EAM, NRZ.....	48
Εικόνα 25: Διάγραμμα SER vs Fiber Length για Single EAM και PAM4 σχήμα διαμόρφωσης.....	50
Εικόνα 26: Διάγραμμα SER vs Received Optical Power για Single EAM και PAM4 σχήμα διαμόρφωσης.....	52
Εικόνα 27: Eye Diagram του παλμού για Single EAM, PAM4.....	52
Εικόνα 28: Eye Diagram του σήματος μετά τον EAM για Single EAM, PAM4.....	52
Εικόνα 29: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 5 taps, για Single EAM, PAM4.....	53
Εικόνα 30: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 17 taps, για Single EAM, PAM4.....	53
Εικόνα 31: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 53 taps, για Single EAM, PAM4.....	53
Εικόνα 32: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 5/3 taps, για Single EAM, PAM4.....	54

Εικόνα 33: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 15/5 taps, για Single EAM, PAM4.....	54
Εικόνα 34: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 57/13 taps, για Single EAM, PAM4.....	54
Εικόνα 35: Διάγραμμα SER vs Fiber Length για EAM-MZM και NRZ σχήμα διαμόρφωση	56
Εικόνα 36: Διάγραμμα SER vs Received Optical Power για EAM-MZM και NRZ σχήμα διαμόρφωση.....	57
Εικόνα 37: Eye Diagram του παλμού για EAM-MZM, NRZ σχήμα διαμόρφωσης.....	59
Εικόνα 38: Eye Diagram του σήματος μετά τον EAM για EAM-MZM, NRZ.....	59
Εικόνα 39: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 5 taps, για EAM-MZM, NRZ.....	60
Εικόνα 40: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 17 taps, για EAM-MZM, NRZ.....	60
Εικόνα 41: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 53 taps, για EAM-MZM, NRZ.....	60
Εικόνα 42: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 5/3 taps, για EAM-MZM, NRZ.....	61
Εικόνα 43: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 15/5 taps, για EAM-MZM, NRZ.....	61
Εικόνα 44: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 57/13 taps, για EAM-MZM, NRZ.....	61
Εικόνα 45: Διάγραμμα SER vs Fiber Length για EAM-MZM και PAM4 σχήμα διαμόρφωση.....	63
Εικόνα 46: Διάγραμμα SER vs Received Optical Power για EAM-MZM και PAM4 σχήμα διαμόρφωση.....	64
Εικόνα 47: Eye Diagram του παλμού για EAM-MZM, PAM4.....	65
Εικόνα 48: Eye Diagram του σήματος μετά τον EAM για EAM-MZM, PAM4.....	65
Εικόνα 49: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 5 taps, για EAM-MZM, PAM4.....	66
Εικόνα 50: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 17 taps, για EAM-MZM, PAM4.....	66
Εικόνα 51: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 53 taps, για EAM-MZM, PAM4.....	66
Εικόνα 52: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 5/3 taps, για EAM-MZM, PAM4.....	67
Εικόνα 53: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 15/5 taps, για EAM-MZM, PAM4.....	67
Εικόνα 54: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 57/13 taps, για EAM-MZM, PAM4.....	67
Εικόνα 55: Eye Diagram for 12 km fiber length, FFE 53 taps, single EAM, PAM4.....	69
Εικόνα 56: Eye Diagram for 12 km fiber length, FFE 53 taps, EAM-MZM, PAM4.....	69
Εικόνα 57: Eye Diagram for 12 km fiber length , DFE 5/3 taps, single EAM, PAM4.....	69
Εικόνα 58: Eye Diagram for 12 km fiber length , DFE 5/3 taps, EAM-MZM, PAM4.....	69

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Single EAM- NRZ. Οι τιμές της ισχύος του σήματος σε διάφορα σημεία της διάταξης.....	42
Πίνακας 2: Οι τιμές του SER για τα φίλτρα του Equalizer για 19 έως 22 km και τα αντίστοιχα ROP, στην περίπτωση του single EAM για NRZ σχήμα διαμόρφωσης.....	44
Πίνακας 3: Single EAM- PAM4. Οι τιμές της ισχύος του σήματος σε διάφορα σημεία της διάταξης.....	49
Πίνακας 4: Οι τιμές του SER για τα φίλτρα του Equalizer για 10 έως 13 km και τα αντίστοιχα ROP, στην περίπτωση του single EAM για PAM4 σχήμα διαμόρφωσης.....	51
Πίνακας 5: Τιμές του SER για FFE 5 taps και DFE 5/3 taps, για NRZ και PAM4 διαμόρφωση.....	51
Πίνακας 6: Πίνακας με τις τιμές του Optical Modulation Amplitude outer για single EAM και PAM4 διαμόρφωση στα 12 km.....	55
Πίνακας 7: EAM - MZM , NRZ. Οι τιμές της ισχύος του σήματος σε διάφορα σημεία της διάταξης.....	56
Πίνακας 8: Οι τιμές του SER για τα φίλτρα του Equalizer για 19 έως 22 km και τα αντίστοιχα ROP, στην περίπτωση του EAM-MZM για NRZ σχήμα διαμόρφωσης.....	58
Πίνακας 9: EAM - MZM , PAM4. Οι τιμές της ισχύος του σήματος σε διάφορα σημεία της διάταξης.....	62
Πίνακας 10: Οι τιμές του SER για τα φίλτρα του Equalizer για 10 έως 13 km και τα αντίστοιχα ROP, στην περίπτωση του EAM-MZM για PAM4 σχήμα διαμόρφωσης.....	65
Πίνακας 11: Πίνακας με τις τιμές του Optical Modulation Amplitude outer για EAM-MZM και PAM4 διαμόρφωση στα 16 km και στα 12 km, και single EAM PAM4 και 12 km.....	68
Πίνακας 12: Οι τιμές του Chirp για κάθε διάταξη και σχήμα διαμόρφωσης.....	69

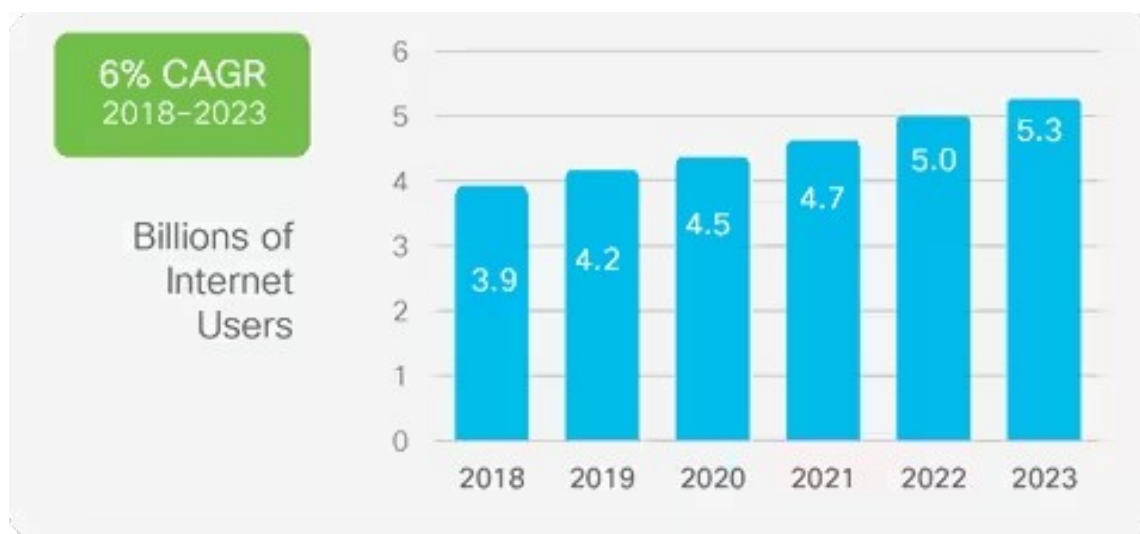
1 Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Η Εξέλιξη των Παθητικών Οπτικών Δικτύων

1.1.1 Ανάγκες Δικτύου και Απαιτήσεις Χρηστών

Τα τελευταία 50 χρόνια, κάθε δεκαετία εισήγαγε μια νέα τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας με καινοτομίες αιχμής. Οι απαιτήσεις εύρους ζώνης για κινητά έχουν εξελιχθεί από φωνητικές κλήσεις και γραπτά μηνύματα σε βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας (UHD) και μια ποικιλία εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας/εικονικής πραγματικότητας (AR/VR). Οι καταναλωτές και οι επιχειρηματικοί χρήστες παγκοσμίως συνεχίζουν να δημιουργούν νέες απαιτήσεις και προσδοκίες για τη δικτύωση κινητής τηλεφωνίας. Αυτή η συνεχιζόμενη τάση αναδεικνύεται ξεκάθαρα από την χρήση εφαρμογών για κινητά. Η κοινωνική δικτύωση (facebook, instagram,..), οι πλατφόρμες για video streaming και οι λήψεις, η παραγωγικότητα των επιχειρήσεων, το ηλεκτρονικό εμπόριο και τα παιχνίδια θα οδηγήσουν στη συνεχή ανάπτυξη των εφαρμογών για κινητά με σχεδόν 300 δισεκατομμύρια λήψεις μέχρι το 2023. Σύμφωνα με τη Cisco, σε παγκόσμιο επίπεδο, ο συνολικός αριθμός των χρηστών του Διαδικτύου προβλέπεται να αυξηθεί από 4 δισεκατομμύρια το 2018 σε περισσότερα από 5 δισεκατομμύρια έως το 2023 με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (GAGR) 6 τοις εκατό. Όσον αφορά τον πληθυσμό, αυτό αντιπροσωπεύει την διείσδυση του Διαδικτύου στο 51 τοις εκατό του παγκόσμιου πληθυσμού το 2018 και στο 66 τοις εκατό του παγκόσμιου πληθυσμού έως το 2023 (Εικόνα 1).[1]

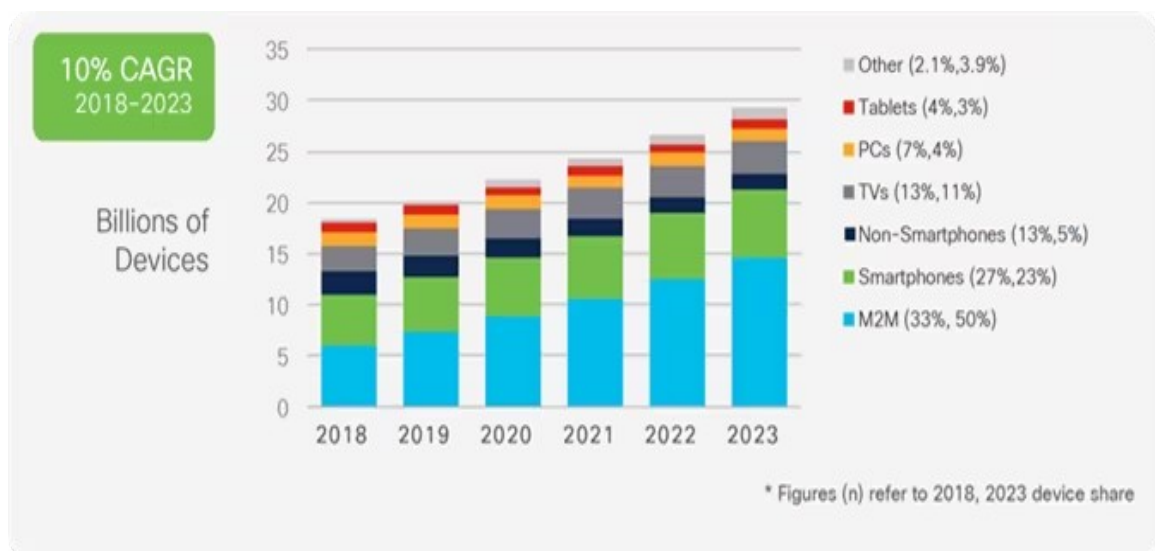


Εικόνα 1: Παγκόσμια ανάπτυξη χρηστών Διαδικτύου [1]

Όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 2, οι συσκευές και οι συνδέσεις αναπτύσσονται ταχύτερα (10 τοις εκατό CAGR) τόσο από τον πληθυσμό (1 τοις εκατό CAGR) όσο και από τους χρήστες του Διαδικτύου (6 τοις εκατό CAGR). Αυτή η τάση επιταχύνει την αύξηση του μέσου αριθμού συσκευών και συνδέσεων ανά νοικοκυριό και κατά κεφαλήν. Κάθε χρόνο, εισάγονται και υιοθετούνται στην αγορά διάφορες νέες συσκευές σε διαφορετικούς

παράγοντες μορφής με αυξημένες δυνατότητες και ευφυΐα. Ένας αυξανόμενος αριθμός εφαρμογών M2M (machine to machine), όπως οι έξυπνοι μετρητές, η παρακολούθηση βίντεο, η παρακολούθηση της υγειονομικής περίθαλψης, η μεταφορά και η παρακολούθηση πακέτων ή περιουσιακών στοιχείων, συμβάλλουν σημαντικά στην ανάπτυξη συσκευών και συνδέσεων συνεπώς και των αναγκών του δικτύου. Μέχρι το 2023, οι συνδέσεις M2M θα είναι το μισό του συνόλου των συσκευών και των συνδέσεων. Οι συνδέσεις M2M θα είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη κατηγορία συσκευών και συνδέσεων, αυξάνοντας σχεδόν 2.4 φορές κατά την περίοδο πρόβλεψης (19 τοις εκατό CAGR) σε 14.7 δισεκατομμύρια συνδέσεις έως το 2023.

Οι φορητές συσκευές εξελίσσονται από συνδεσιμότητα δικτύου χαμηλότερης γενιάς (2G) σε συνδεσιμότητα δικτύου υψηλότερης γενιάς (3G, 3.5G, 4G ή LTE και τώρα επίσης 5G). Ο συνδυασμός δυνατοτήτων συσκευών με ταχύτερο, υψηλότερο εύρος ζώνης και πιο έξυπνα δίκτυα θα διευκολύνει τον ευρύ πειραματισμό και την υιοθέτηση προηγμένων εφαρμογών πολυμέσων που συμβάλλουν στην αύξηση της κυκλοφορίας κινητών και Wi-Fi. Δεύτερα σε σειρά ανάπτυξης έρχονται τα smartphone με CAGR 7 τοις εκατό (αυξάνεται κατά 1.4). Η έκρηξη των εφαρμογών για κινητά και η διευρυμένη εμβέλεια της συνδεσιμότητας κινητής τηλεφωνίας σε έναν αυξανόμενο αριθμό τελικών χρηστών έχει προκαλέσει την ανάγκη για βελτιστοποιημένη διαχείριση εύρους ζώνης από το δίκτυο. Σε μια άκρως ανταγωνιστική αγορά κινητής τηλεφωνίας, έχουμε δει την ανάπτυξη των παγκόσμιων αναπτύξεων 4G καθώς και των εφαρμογών 5G σε πρώιμο στάδιο. Οι συνδεδεμένες τηλεοράσεις (οι οποίες περιλαμβάνουν τηλεοράσεις με επίπεδη οθόνη, αποκωδικοποιητές, προσαρμογείς ψηφιακών μέσων [DMAs], συσκευές αναπαραγωγής δίσκων Blu-ray και κονσόλες παιχνιδιών) θα αυξηθούν αμέσως πιο γρήγορα (σε λίγο λιγότερο από 6 τοις εκατό CAGR), σε 3.2 δισεκατομμύρια έως το 2023.



Εικόνα 2: Παγκόσμια ανάπτυξη συσκευών και συνδέσεων [1]

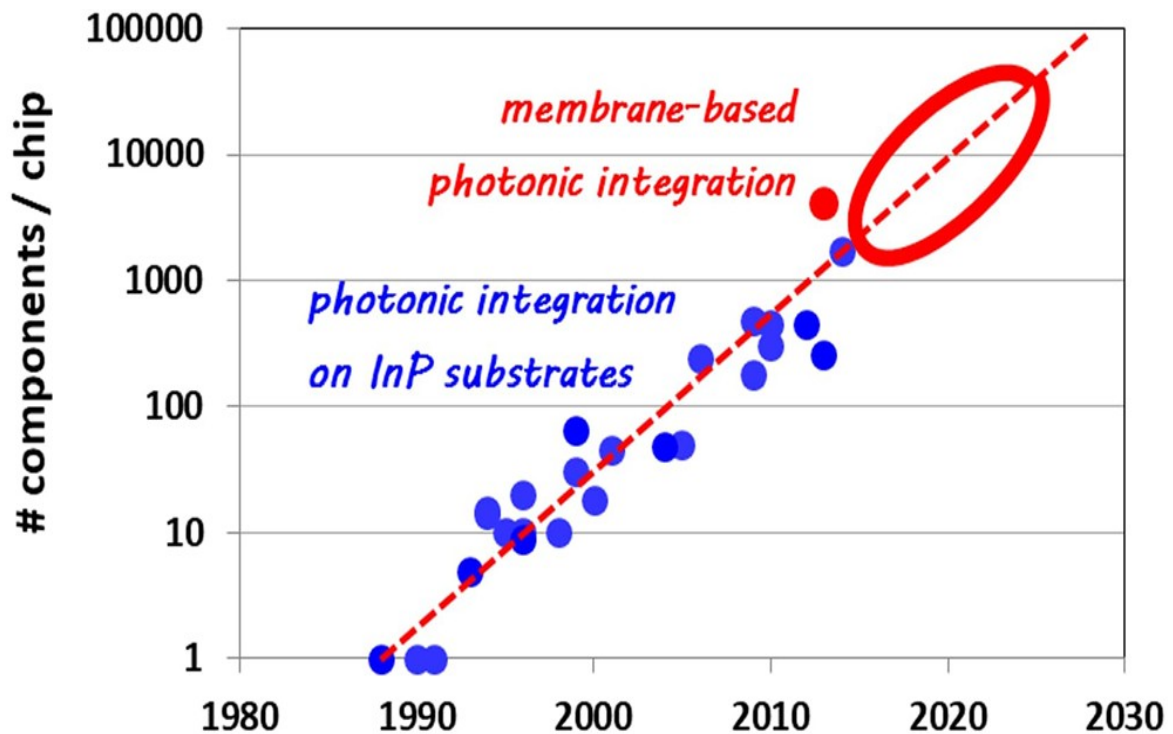
Οι υπολογιστές θα συνεχίσουν να μειώνονται (μείωση 2.3 τοις εκατό) κατά την περίοδο πρόβλεψης. Ωστόσο, θα υπάρξουν περισσότεροι υπολογιστές από tablet καθ' όλη την

περίοδο πρόβλεψης και μέχρι το τέλος του 2023 (1.2 δισεκατομμύρια υπολογιστές έναντι 840 εκατομμύρια tablet). Μέχρι το 2023, το μερίδιο των καταναλωτών στο σύνολο των συσκευών, συμπεριλαμβανομένων τόσο των σταθερών όσο και των κινητών συσκευών, θα είναι 74%, με τις επιχειρήσεις να διεκδικούν το υπόλοιπο 26%. Είναι σημαντικό να παρακολουθείται ο μεταβαλλόμενος συνδυασμός συσκευών και συνδέσεων και η αύξηση των συσκευών, καθώς επηρεάζει την παγκόσμια IP κίνηση. Οι συσκευές βίντεο, ειδικότερα, μπορούν να έχουν πολλαπλασιαστικό αποτέλεσμα στην κυκλοφορία. Μια τηλεόραση HD με δυνατότητα σύνδεσης στο Διαδίκτυο που αντλεί δύο - τρεις ώρες περιεχομένου την ημέρα από το Διαδίκτυο θα παρήγαγε τόση κίνηση στο Διαδίκτυο όσο ένα ολόκληρο νοικοκυριό σήμερα, κατά μέσο όρο. Η επίδραση βίντεο των συσκευών στην IP κίνηση είναι πιο έντονη λόγω της εισαγωγής της ροής βίντεο Ultra-High-Definition (UHD) ή 4K.

Ενώ παραδοσιακά η κίνηση από τις συνδέσεις M2M ήταν μικρότερη από αυτή των συσκευών χρήστη όπως smartphone, τηλεοράσεις και υπολογιστές, εκτιμούμε ότι η κυκλοφορία αυξάνεται ταχύτερα από τον αριθμό των συνδέσεων λόγω της αύξησης της ανάπτυξης εφαρμογών βίντεο στις συνδέσεις M2M και στην αυξημένη χρήση εφαρμογών, όπως η τηλεϊατρική και τα έξυπνα συστήματα πλοήγησης αυτοκινήτων, που απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης και χαμηλότερη καθυστέρηση (latency) για την έγκυρη και ορθή λειτουργία τους.

1.1.2 Φωτονική Ολοκλήρωση

Το πεδίο εφαρμογής των Φωτονικά Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων (Photonic Integrated Circuits (PICs)) αναπτύσσεται ραγδαία. Η φωτονική ολοκλήρωση είναι η κυρίαρχη τεχνολογία στις τηλεπικοινωνίες υψηλού εύρους ζώνης και τείνει να γίνει κυρίαρχη και σε άλλα πεδία της φωτονικής, όπως αντίστοιχα η μικροηλεκτρονική στο πεδίο των ηλεκτρονικών. Τα PIC προσφέρουν εντυπωσιακά πλεονεκτήματα στην απόδοση όσον αφορά την ακρίβεια, το εύρος ζώνης και την ενεργειακή απόδοση. Για να καταστεί δυνατή η χρήση τους σε νέους τομείς, η διαθεσιμότητα τεχνολογιών πλατφορμών φωτονικής ολοκλήρωσης (photonic integration platform technologies) με τυποποιημένες διαδικασίες είναι καίριας σημασίας, καθώς μειώνουν τα εμπόδια για νέες εξελίξεις. Οι κύριες τεχνολογίες πλατφόρμας σήμερα είναι η Μονολιθική Ολοκλήρωση με βάση το Φωσφίδιο του Ινδίου (Indium Phosphide based monolithic integration-InP) και τα Φωτονικά Πυριτίου (Silicon Photonics). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπάρχουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ της πορείας της εξέλιξης της Φωτονικής Ολοκλήρωσης και της Μικροηλεκτρονικής Ολοκλήρωσης. Στην εικόνα 3 βλέπουμε ότι η πολυπλοκότητα των φωτονικών τσιπ έχει εκθετική αύξηση, όσο αναφορά των αριθμό των ενσωματωμένων στοιχείων σε ένα τσιπ, αντίστοιχη με αυτής του νόμου Moore στα ηλεκτρονικά.



Εικόνα 3: Moore's law in photonics/ Νόμος του Moore στα Φωτονικά κυκλώματα[2]

Οι πρώτες έρευνες και η ανάπτυξη είχαν επικεντρωθεί στην δημιουργία δομικών στοιχείων, απαραίτητα για κυκλώματα ανώτερων λειτουργιών. Το AWG (arrayed waveguide grating) είναι ένα σημαντικό παράδειγμα στοιχείου κυκλώματος που επιτρέπει μεγαλύτερης κλίμακας ολοκλήρωσης. Αυτή η συσκευή απο/πολυπλεξίας έδωσε την δυνατότητα να συνδυαστούν παράλληλα στοιχεία κυκλωμάτων, όπως λέιζερ και διαμορφωτές, για να δημιουργήσουν κυκλώματα πολυπλεξίας μήκους κύματος, τεχνολογία στην οποία στηρίζεται το σύγχρονο Internet. Στην αρχή της χιλιετίας δεκάδες ήταν τα στοιχεία που ήταν εφικτό να ολοκληρωθούν, με τον αριθμό αυτόν πλέον να φτάνει τις εκατοντάδες αφού η ολοκλήρωση με λέιζερ και διαμορφωτές έχει εξελιχθεί. Τα πιο εκλεπτυσμένα κυκλώματα, συμπεριλαμβανομένων λέιζερ, διαμορφωτών, ανιχνευτών και πολυπλεκτών, έχουν περισσότερα από 1000 στοιχεία σε ένα τσιπ. Με την συμβατική τεχνολογία ολοκλήρωσης με βάση το Φωσφίδιο του Ινδίου (InP) θα είναι δύσκολο να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα ολοκλήρωσης. Ωστόσο, σε PIC όπου το φως περιορίζεται σε μια λεπτή μεμβράνη, όπως στα φωτονικά πυριτίου, τα παθητικά στοιχεία μπορούν να γίνουν μικρότερα και υψηλότερα επίπεδα ολοκλήρωσης είναι δυνατά. Ο αριθμός των στοιχείων ανα τσιπ περιορίζεται επιπλέον από την ηλεκτρική συνδεσιμότητα και τη θερμική διαχείριση. Οι τεχνολογίες μεμβρανών προσφέρουν μείωση του μεγέθους και της ενέργειας που απαιτούνται για ενσωμάτωση υψηλότερου επιπέδου και για ενσωμάτωση με ηλεκτρονικά, γεγονός που θα λύσει το πρόβλημα της διασύνδεσης. Στη φωτονική, δεν προβλέπονται επίπεδα ολοκλήρωσης όπως επιτυγχάνονται επί του παρόντος στην ψηφιακή μικροηλεκτρονική. Οι φυσικές διαστάσεις και η απαγωγή θερμότητας των φωτονικών κυκλωμάτων είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από εκείνες των τρανζίστορ. Από αυτή την άποψη, η φωτονική μοιάζει με την αναλογική και την RF ηλεκτρονική, όπου οι κλίμακες ολοκλήρωσης είναι επίσης σημαντικά χαμηλότερες από ό,τι στα ψηφιακά ηλεκτρονικά. Ωστόσο, όταν επιλυθούν τα σημερινά εμπόδια στη διαχείριση θερμότητας και την αποτελεσματική

ενσωμάτωση φωτονικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, αναμένουμε ότι θα υπάρξει εκθετική ανάπτυξη για τουλάχιστον δύο δεκαετίες. Συνεπώς, τα πλεονεκτήματα της φωτονικής ολοκλήρωσης, όπως η μείωση των απωλειών και το μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ταχυτήτων που παρέχει, επιτρέπουν να λύσουμε κάποια από τα προβλήματα που δημιουργεί η αυξημένη κίνηση δεδομένων στο δίκτυο και να έχουμε βελτιωμένη απόδοση.

1.1.3 Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON)

Η οικονομικά αποδοτική παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών οδήγησε την αγορά σε αυξημένες προσφορές υπηρεσιών δεδομένων υψηλής ταχύτητας με ταχύτητες πολλαπλών Gbps. Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο (PON) που βασίζεται στον διαχωρισμό ισχύος, είναι μια σημαντική αρχιτεκτονική δικτύου που παρέχει στον χρήστη πρόσβαση σε ίνες υψηλής ταχύτητας δεδομένων (high data-rate fibers) με οικονομικό τρόπο. Η ζήτηση για υπηρεσίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας συνεχίζει να αυξάνεται και καθώς αυξάνονται και οι εφαρμογές των 10G-PON, οι πάροχοι ευρυζωνικών υπηρεσιών διερευνούν τις δυνατότητες της αγοράς και τις τεχνολογικές επιλογές για PON υψηλής ταχύτητας πέραν των 10G. Παθητικό οπτικό Δίκτυο (PON: Passive Optical Network) είναι ένα δίκτυο οπτικών ινών που χρησιμοποιεί μία τοπολογία point-to-multipoint και οπτικούς διαχωριστές (optical splitters) για την μεταφορά δεδομένων από μία πηγή δεδομένων σε πολλαπλά τελικά σημεία χρηστών. [3] Το παθητικό αναφέρεται στο γεγονός ότι οι οπτικές ίνες καθώς και τα εξαρτήματα σύνδεσης και οι διαχωριστές που χρησιμοποιούνται είναι μη τροφοδοτούμενα, συνεπώς ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται μόνο στα σημεία αποστολής και λήψης, άρα οδηγεί σε χαμηλότερο συνολικό κόστος. Στα PONs που χρησιμοποιείται οπτική τεχνολογία η μεταφορά δεδομένων γίνεται πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με την χρήση ηλεκτρικής τεχνολογίας. Η βασική διαφορά τους είναι στον τρόπο και το μέσο με το οποίο μεταφέρεται η πληροφορία, σε μορφή φωτονίων μέσω οπτικών ινών και ηλεκτρικών σημάτων μέσω καλωδίων αντίστοιχα. Για τον λόγο αυτό ηλεκτρική τεχνολογία χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου δεν είναι δυνατή η χρήση οπτικών ινών. Κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι αποτρέπει τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και τις ζημιές από κεραυνούς που δημιουργούνται από ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, μειώνει το ποσοστό αστοχίας γραμμών και συσκευών, απλοποιεί τη διαμόρφωση του τροφοδοτικού και την τοπολογία δικτύου, βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς εξοικονομεί κόστος συντήρησης. Θεωρητικά, ένα δίκτυο PON μπορεί να μεταδώσει σήματα οποιασδήποτε μορφής με οποιοδήποτε ρυθμό. Τα PONs στα δίκτυα πρόσβασης (Access Networks) είναι μία υποσχόμενη τεχνολογία ικανή να υποστηρίξει όχι μόνο τις παρούσες ανάγκες σε ρυθμό μετάδοσης αλλά και τις απαιτητικές εφαρμογές που μπορεί να προκύψουν στο μέλλον, για αυτό έχει υιοθετηθεί από τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών δικτύων ώστε να υποστηρίξουν τους συνδρομητές με υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

1.1.4 Κέντρα Δεδομένων και Διασυνδέσεις (DCI)

Η ολοένα αυξανόμενη κίνηση στο διαδίκτυο που είδαμε παραπάνω επιβαρύνει τις και τις δομές των Data Center, οι οποίες καλούνται να ανταπεξέλθουν τόσο στην υψηλή χωρητικότητα (capacity) όσο και στην χαμηλή καθυστέρηση (latency) που απαιτούνται. Ένα Υπολογιστικό Κέντρο Δεδομένων, γνωστό και ως Data Center, είναι μία φυσική

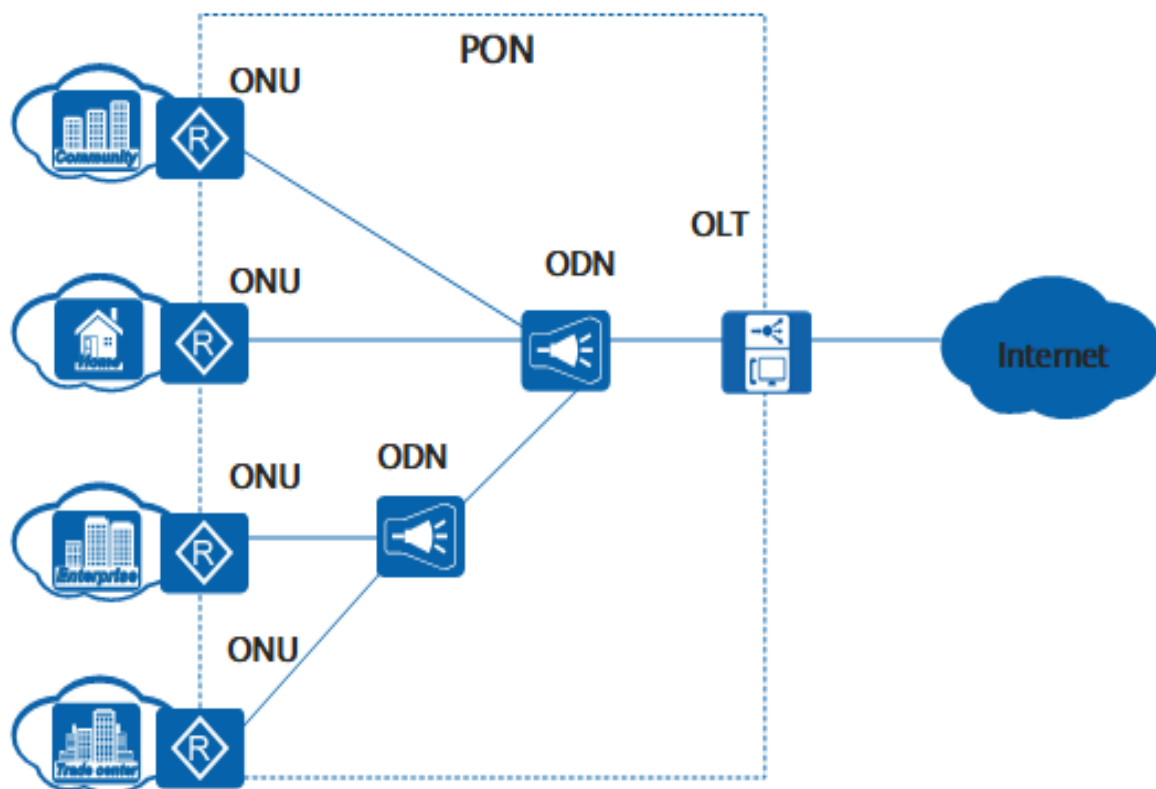
εγκατάσταση που αποτελείται από υπολογιστές, συστήματα αποθήκευσης και υπολογιστική υποδομή που χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση, την επεξεργασία, την αποθήκευση και την διάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων μεταξύ τους, καθώς και με εξωτερικούς υπολογιστές-χρήστες μέσω διαδικτύου. Έχει τη δυνατότητα να εξασφαλίζει την καλή λειτουργία του. Φροντίζει για τα αντίγραφα ασφαλείας των δεδομένων που φιλοξενεί αλλά και την αποτροπή καταστροφής από φωτιά, υπερθέρμανση των μηχανημάτων, πλημμύρα ή διακοπή ρεύματος, παρέχοντας τα απαραίτητα συστήματα προστασίας. Άλλη μία προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία ενός Data Center είναι η αδιάκοπη σύνδεση του με γρήγορες ταχύτητες πρόσβασης στο Διαδίκτυο. [4] Τα κυριότερα στοιχεία του είναι διακομιστές (servers), αποθηκευτικά συστήματα (storage subsystems), διακόπτες (switches), δρομολογητές (routers), τείχη προστασίας (firewalls), καλωδίωση και applications delivery controllers (ADC). Αναλόγως τις ανάγκες και το είδος ενός κέντρου δεδομένων, το μέγεθος, η δομή, η τοποθεσία και η χωρητικότητα του ποικίλουν. Τα σύγχρονα κέντρα δεδομένων έχουν εξελιχθεί, από παραδοσιακούς φυσικούς διακομιστές εσωτερικής εγκατάστασης (on-premises physical servers) σε εικονικά δίκτυα (virtual networks), που υποστηρίζουν εφαρμογές και αναλαμβάνουν φόρτους εργασίας (workload) σε ομαδοποιήσεις φυσικών υποδομών (pools of physical infrastructure) και σε περιβάλλον πολλαπλού νέφους (multicloud environment). Τα δεδομένα υπάρχουν και συνδέονται με πολλαπλά κέντρα δεδομένων, το edge του δικτύου, τα δημόσια και ιδιωτικά νέφη (clouds). Νέφος (cloud) είναι μία συλλογή από κέντρα δεδομένων. Το κέντρο δεδομένων πρέπει να μπορεί να επικοινωνεί με όλα αυτά τα πολλαπλά επίπεδα, τόσο εντός των εγκαταστάσεων όσο και στο cloud. Όταν οι εφαρμογές φιλοξενούνται στο cloud, χρησιμοποιούν πόρους του κέντρου δεδομένων από τον πάροχο cloud. Η Διασύνδεση του Κέντρου Δεδομένων (Data center interconnect (DCI)) έχει αναδειχθεί ως η κύρια κινητήρια δύναμη για καινοτομία στην βιομηχανία οπτικών δικτύων. Σε ευρεία έννοια, υπάρχουν δύο βασικοί τύποι Data Center: ιδιωτικά, εταιρικά, εταιρικά κέντρα δεδομένων και εξωτερικές εγκαταστάσεις που ανήκουν σε παρόχους κέντρων δεδομένων. Οι ανάγκες των κέντρων δεδομένων διασύνδεσης είναι σαφώς διαφορετικές από εκείνες του παραδοσιακού δικτύου υποδομής οπτικών μεταφορών που ανήκουν σε χειριστή δικτύου. Οι διαφορετικοί τύποι κέντρων δεδομένων και οι διαφορετικές τους εργασίες επιβάλλουν νέες απαιτήσεις στο οπτικό κέντρο δεδομένων (optical Data Center). Το DCI μπορεί να πετύχει μια ποικιλία σε αποστάσεις μετάδοσης, από μικρές έως εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης, όπως η υποθαλάσσια, η οποία παρέχει διάφορες επιλογές για τις επιχειρήσεις. Γενικά, υπάρχουν δύο είδη διασύνδεσης κέντρων δεδομένων: διασύνδεση εντός του κέντρου δεδομένων (intra-data center interconnect) και διασύνδεση μεταξύ κέντρων δεδομένων (inter-data center interconnect). Το πρώτο αναφέρεται σε διασυνδέσεις εντός του κέντρου δεδομένων που ξεκινάνε από μερικά μέτρα και φτάνουν συνήθως τα 10 km, ενώ το δεύτερο αναφέρεται στη διασύνδεση μεταξύ κέντρων δεδομένων με απόσταση μετάδοσης από 10 km έως 80 km ή πάνω από 80 km. Το DCI δείχνει τα πλεονεκτήματά του με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, το DCI επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων υψηλής ασφάλειας ενώ υποστηρίζει επίσης πολλούς τύπους σύνδεσης, γεγονός που παρέχει στις επιχειρήσεις μεγάλη ευελιξία. Τώρα, καθώς η επισκεψιμότητα στο Διαδίκτυο αυξάνεται, το DCI γίνεται όλο και πιο σημαντικό για τις αναβαθμίσεις των επιχειρήσεων και την επέκταση της υποδομής. Η εκπληκτική αύξηση της κίνησης στο Διαδίκτυο και η έντονη μετάβαση σε υπηρεσίες που βασίζονται σε cloud τα τελευταία χρόνια συνδυάζονται για να αναγκάσουν μια δραματική επανεξέταση του τρόπου σύνδεσης των κέντρων δεδομένων.

1.1.5 PONs και Κέντρα Δεδομένων

Η εξέλιξη στην αρχιτεκτονική των κέντρων δεδομένων οφείλεται κυρίως στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης, την υψηλή κατανάλωση ενέργειας και το κόστος όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Έχοντας όλα αυτά κατά νου, μια σημαντική δυνατότητα βελτίωσης της χωρητικότητας εύρους ζώνης και μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή PON στο σχεδιασμό των υποδομών δικτύωσης στα κέντρα δεδομένων, καθώς είναι μια αρχιτεκτονική που εξοικονομεί πόρους σε σχέση με point-to-point αρχιτεκτονικές.

1.1.6 Αρχιτεκτονική και Προσεγγίσεις

Ένα σύστημα PON, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4, αποτελείται από τερματικό οπτικής γραμμής (optical line terminal (OLT)), οπτικό δίκτυο διανομής (Optical Distribution Network (ODN)) και μονάδες οπτικού δικτύου (optical network units (ONUs)) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με οπτικές ίνες. Το OLT είναι μια συσκευή συγκέντρωσης πακέτων που χρησιμεύει ως τελικό σημείο του δικτύου από την πλευρά του παρόχου, και είναι υπεύθυνο για την διανομή και τον έλεγχο του οπτικού δικτύου διανομής. Το ODN είναι μια παθητική συσκευή που συνδέει τα ONU σε ένα OLT και είναι υπεύθυνο για την μετάδοση οπτικών σημάτων μεταξύ τους. Έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει την αποτελεσματική και οικονομικά αποδοτική διανομή αυτών των σημάτων, ελαχιστοποιώντας την ποσότητα των ενεργών στοιχείων του εξοπλισμού, αυξάνοντας την χρήση των παθητικών στοιχείων, όπως διαχωριστές. Το ONU είναι μια συσκευή από την πλευρά του χρήστη που προσφέρει συνδεσιμότητα με το υπόλοιπο δίκτυο καθώς και διάφορες παροχές, όπως ασφάλεια στα δεδομένα των χρηστών. Με τον όρο downstream αναφερόμαστε σε μετάδοση δεδομένων από OLT σε ONU και upstream για μετάδοση από ένα ONU σε OLT. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Downstream: Ένα OLT εκπέμπει πακέτα IP υπηρεσιών δεδομένων, φωνής και βίντεο σε όλα τα ONU μέσω ODN 1:N. Αφού ένα ONU λάβει ένα πλαίσιο δεδομένων, ελέγχει το λογικό αναγνωριστικό του πλαισίου δεδομένων στο φυσικό επίπεδο. Εάν το λογικό αναγνωριστικό είναι το ίδιο με το τοπικό αναγνωριστικό που εκχωρείται από το OLT, το ONU αποδέχεται το πλαίσιο δεδομένων. Εάν όχι, το ONU απορρίπτει το πλαίσιο δεδομένων. Upstream: Ένα ODN 1:N χρησιμοποιεί τη λειτουργία πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (TDMA) για τη σύζευξη σημάτων διαφόρων υπηρεσιών από πολλαπλές ONU σε μία οπτική ίνα και στέλνει τα σήματα στο OLT. Τα σήματα διαφορετικών υπηρεσιών δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους κατά τη μετάδοση. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας, τη βελτιωμένη επεκτασιμότητα και την ευελιξία στην παροχή διαφόρων υπηρεσιών μέσω δικτύων οπτικών ινών.



Εικόνα 4: Αρχιτεκτονική ενός συστήματος PON [5]

Υπάρχουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές και προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στα PON. Κάθε τεχνολογία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά, καλύπτοντας διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης και σενάρια δικτύου. Μερικά σενάρια με διαφορετικές αρχιτεκτονικές PON είναι:

Point-to-Point PON – Από Σημείο σε Σημείο (P2P PON): Σε ένα P2P PON, κάθε μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) έχει μια αποκλειστική σύνδεση ίνας με το τερματικό οπτικής γραμμής (OLT). Αυτή η αρχιτεκτονική παρέχει υψηλή ασφάλεια και ατομική κατανομή εύρους ζώνης σε κάθε ONU, αλλά απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό ινών.

Point-to-Multipoint PON – Από Σημείο σε πολλαπλό Σημείο (P2MP PON): Η πιο κοινή αρχιτεκτονική PON είναι η P2MP, όπου πολλαπλά ONU συνδέονται σε ένα μόνο OLT μέσω ενός παθητικού οπτικού διαχωριστή. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την οικονομική ανάπτυξη με την κοινή χρήση ινών μεταξύ πολλών ONU, αλλά το εύρος ζώνης μοιράζεται μεταξύ των συνδεδεμένων ONU.

Tree PON (T-PON): Το T-PON είναι μια επέκταση της αρχιτεκτονικής P2MP PON όπου ο παθητικός διαχωριστής αντικαθίσταται με έναν ενεργό οπτικό διακόπτη. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση της τοπολογίας του δικτύου και παρέχει πιο αποτελεσματική κατανομή εύρους ζώνης.

Υπάρχουν αρκετές αρχιτεκτονικές και προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό και την υλοποίηση των PONs (Δικτύων Παθητικών Οπτικών). Εδώ είναι μερικές κοινές:

Οι κύριοι τύποι με βάση την πολυπλεξία της πληροφορίας είναι :

Time Division Multiplexing PON – Πολυπλεξία με διαίρεση Χρόνου (TDM-PON): Το TDM-PON είναι μια προσέγγιση όπου για upstream και downstream μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιούνται διαφορετικές χρονικές θυρίδες. Κατανέμει συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα για κάθε ONU για αποστολή και λήψη δεδομένων, διασφαλίζοντας αποτελεσματική κοινή χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Τα επι του παρόντος ανεπτυγμένα συστήματα PON είναι TDM-PON. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα ATM PON (APON), Broadband PON (BPON), Ethernet PON (EPON), Gigabit PON (GPON), 10G EPON και Next-generation PON (NG-PON) που παρέχουν διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων.

Wavelength Division Multiplexing PON- Πολυπλεξία με διαίρεση Μήκος Κύματος (WDM-PON): Το WDM-PON χρησιμοποιεί πολλαπλά μήκη κύματος φωτός για να δημιουργήσει ανεξάρτητα κανάλια επικοινωνίας. Κάθε μήκος κύματος μπορεί να εκχωρηθεί σε ένα συγκεκριμένο ONU, επιτρέποντας ταυτόχρονη και αποκλειστική μετάδοση δεδομένων για κάθε χρήστη. Επιτρέπει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και υποστηρίζει πολλαπλά PON που λειτουργούν παράλληλα, το καθένα με το δικό του μήκος κύματος.

Time and Wavelength Division Multiplexing PON – Πολυπλεξία με διαίρεση Χρόνου και Μήκος Κύματος (TWDM-PON): Το TWDM-PON συνδυάζει την πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου και διαίρεσης μήκους κύματος. Επιτρέπει πολλαπλά μήκη κύματος και χρονοθυρίδες, επιτρέποντας μεγαλύτερη χωρητικότητα και ευελιξία για την υποδοχή περισσότερων ONU και την παροχή αυξημένου εύρους ζώνης.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON - Πολυπλεξία με Ορθογώνια διαίρεση Συχνότητας (OFDM-PON): Το OFDM-PON χρησιμοποιεί πολυπλεξία ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας, η οποία διαιρεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλαπλούς υποφορείς. Επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων σε διαφορετικούς υποφορείς, βελτιώνοντας τη φασματική απόδοση και μετριάζοντας τις επιπτώσεις των βλαβών του σήματος. Εξαιτίας του υψηλού εύρους ζώνης που παρέχει, λαμβάνει ιδιαίτερη ερευνητική προσοχή τα τελευταία χρόνια και μαζί με τα WDM PON θεωρούνται μελλοντικές τεχνολογίες PON.

1.1.7 Διαφορετικά Πρότυπα

Υπάρχουν διαφορετικά πρότυπα (standard) που έχουν αναπτυχθεί για ίδιες αρχιτεκτονικές PON. Για παράδειγμα στην P2MP αρχιτεκτονική κάποια κύρια μοντέλα που ακολουθούν διαφορετικά πρότυπα είναι:

Ethernet PON (EPON): Το EPON ενσωματώνει τις τεχνολογίες Ethernet και PON και ακολουθεί το πρότυπο IEEE 802.3. Χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική από σημείο σε πολλαπλό σημείο, όπου πολλαπλές μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) συνδέονται σε ένα τερματικό οπτικής γραμμής (OLT) μέσω ενός παθητικού διαχωριστή. Το EPON υποστηρίζει τόσο TDM (Time Division Multiplexing) όσο και WDM (Wavelength Division Multiplexing) για upstream και downstream μετάδοση δεδομένων και παρέχει 1.25 Gbit/s συμμετρικό ρυθμό μετάδοσης.

Gigabit PON (GPON): Το GPON είναι μια από τις πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες PON. Χρησιμοποιεί ένα πρότυπο ITU-T G.984 που έχει οριστεί από το International Telecommunication Union (ITU) και το Full Service Access Networks (FSAN). Χρησιμοποιεί Generic Framing Procedure (GFP) που ενθυλακώνει Ethernet, time division multiplexing (TDM) και Asynchronous Transfer Mode (ATM) πακέτα στο Επίπεδο 2

(Layer 2). Το GPON χρησιμοποιεί επίσης μια αρχιτεκτονική από σημείο σε πολλαπλά σημεία με ένα OLT και πολλαπλά ONU συνδεδεμένα μέσω ενός παθητικού διαχωριστή. Υποστηρίζει TDM για upstream δεδομένων με ρυθμό μετάδοσης 155 Mbit/s, 622 Mbit/s, 1.25 Gbit/s, ή 2.5 Gbit/s και WDM για downstream δεδομένων με ρυθμό μετάδοσης 1.25 Gbit/s or 2.5 Gbit/s. Προσφέρει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης και υποστηρίζει περισσότερες υπηρεσίες σε σύγκριση με το EPON, ωστόσο είναι πιο περίπλοκη, ακριβή και όχι τόσο ώριμη σαν τεχνολογία.

XG-PON: Το XG-PON (γνωστό και ως 10G-PON) παρέχει αυξημένο εύρος ζώνης σε σύγκριση με το GPON. Βασίζεται στο πρότυπο ITU-T G.987 και υποστηρίζει συμμετρικούς ρυθμούς δεδομένων 10 Gbps. Όπως το GPON, το XG-PON χρησιμοποιεί επίσης μια αρχιτεκτονική από σημείο σε πολλαπλά σημεία με OLT και ONU συνδεδεμένα μέσω ενός παθητικού διαχωριστή.

NG-PON2: Το NG-PON2 (Next-Generation PON 2) είναι μια προηγμένη τεχνολογία PON ικανή να παρέχει ακόμη υψηλότερο εύρος ζώνης. Υποστηρίζει πολλαπλά μήκη κύματος και χρησιμοποιεί μια προσέγγιση πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου και μήκους κύματος (TWDM: Time and Wavelength Division Multiplexing). Το NG-PON2 μπορεί να συνυπάρχει με υπάρχοντα συστήματα GPON ή XG-PON στην ίδια υποδομή οπτικών ινών.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης δεδομένων προέρχεται και καταλήγει σε πλαίσια Ethernet, η χρήση ενός EPON μπορεί να μειώσει την προσαρμογή που απαιτείται κατά την μετακίνηση δεδομένων μεταξύ του LAN και του σημείου πρόσβασης δικτύου. Επιπλέον, το ATM δημιουργεί προβλήματα απόδοσης στην μετάδοση δεδομένων ως αποτέλεσμα της απαίτησης για κερματισμό και επανασυναρμολόγησης των πακέτων στο τελικό σημείο του δικτύου. Αυτό οδηγεί και σε μεγαλύτερες καθυστερήσεις, καθώς μειώνει και την αποτελεσματικότητα των τεχνικών ανάκτησης σφαλμάτων. Για τους λόγους αυτούς, τα EPONs εμφανίζονται να είναι πιο ελπιδοφόρα από τα APONs. Από την άλλη πλευρά, τα GPONs, χρησιμοποιώντας GEM αντί για ATM, αποφεύγουν την αναποτελεσματικότητα του κερματισμού και της επανασυναρμολόγησης των πακέτων.

1.1.8 Power Budget Problem

Στα Συστήματα οπτικών τηλεπικοινωνιών, το πρόβλημα του προϋπολογισμού της ισχύος (Power Budget) αναφέρεται στην ισορροπία μεταξύ της οπτικής ισχύος και την διατήρηση της επιθυμητής ποιότητας του σήματος που διοχετεύεται σε μια οπτική ίνα από τον πομπό και της οπτικής ισχύος που λαμβάνεται στο άλλο άκρο της ζεύξης. Ο προϋπολογισμός οπτικής ισχύος είναι ένα κρίσιμο στοιχείο για τη διασφάλιση αξιόπιστης και αποτελεσματικής μετάδοσης δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις και είναι ένα από τα κύρια προβλήματα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε. Αυτό προϋποθέτει τη μείωση της απώλειας σήματος κατά μήκος του δικτύου, καθώς επίσης και τη διασφάλιση επαρκούς ισχύος στους διάφορους κόμβους του δικτύου για να διατηρηθεί η σταθερή λειτουργία. Power Budget είναι ουσιαστικά η διαφορά μεταξύ του OLT και της ευαισθησίας του δέκτη ONU, ο αριθμός αυτός καθορίζει την μέγιστη απώλεια του σήματος που μπορεί να υπάρξει στο δίκτυο χωρίς να επηρεαστεί η ποιότητά του και λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό. Στα PONs που θα μας απασχολήσουν ορίζεται στα 29dB. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η ισχύς του σήματος είναι αρκετή για να καλύψει την απώλεια που

οφείλεται σε διάφορους παράγοντες μέσα στο δίκτυο, όπως η εξασθένηση κατά τη μεταφορά μέσα στην οπτική ίνα ή την διασπορά.

1.1.9 Το μέλλον στα PON και σύγχρονες προκλήσεις

Η επόμενη φάση για το PON θα είναι η διευκόλυνση ενός νέου κύματος καινοτόμων εφαρμογών όπως την παροχή συμμετρικού εύρους ζώνης, όπου οι ρυθμοί δεδομένων downstream και upstream είναι ίσοι. Αυτό επιτρέπει πιο αποτελεσματική αμφίδρομη επικοινωνία και υποστηρίζει εφαρμογές που απαιτούν ταυτόχρονη μεταφόρτωση και λήψη υψηλής ταχύτητας, όπως τηλεδιάσκεψη, αποθήκευση cloud και συνδεσιμότητα IoT. Τα PON εξελίσσονται και ενσωματώνουν προηγμένες δυνατότητες διαχείρισης και ελέγχου δικτύου, αξιοποιώντας τεχνολογίες όπως δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN) και εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV). Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την αυτοματοποίηση δικτύου, τη δυναμική κατανομή πόρων και την έξυπνη παροχή υπηρεσιών, οδηγώντας σε πιο αποτελεσματικές λειτουργίες δικτύου και βελτιωμένες εμπειρίες χρήστη. Επιπλέον, οι μελλοντικές τεχνολογίες PON θα επικεντρωθούν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τεχνικές όπως η λειτουργία αναστολής λειτουργίας, η δυναμική κατανομή εύρους ζώνης και οι μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας θα βελτιστοποιηθούν περαιτέρω για την επίτευξη πιο πράσινων και βιώσιμων αναπτύξεων PON.

Το Gigabit Passive Optical Network (GPON) θεωρείται μια παλαιού τύπου τεχνολογία που με τα εως τώρα πρότυπα δεν επιτρέπει περαιτέρω αύξηση του αριθμού των χρηστών ή της χωρητικότητας για την επίτευξη των απαιτήσεων του εύρους ζώνης. Το επόμενο βήμα λοιπόν είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα και να γίνουν συμμετρικά ως προς το downstream και upstream. Για αυτό και αντικαθίσταται από 10 Gigabit Symmetrical PON (XGS-PON) σε ορισμένες περιοχές. Το XGS-PON θα διαδραματίσει ακόμη μεγαλύτερο ρόλο καθώς οι απαιτήσεις χωρητικότητας δικτύου αυξάνονται εκθετικά. Ως εκ τούτου, ο κλάδος θα δει μεγάλη υποστήριξη της παγκόσμιας στροφής από το GPON στο XGS-PON, λόγω των αυξημένων επενδύσεων στη XGS-PON τεχνολογία. Η ταχύτητα της ανάπτυξης του XGS-PON φάνηκε αρχικά σε νέες εκδόσεις οπτικών ινών, όπου ήταν λογικό να αναπτυχθούν τεχνολογίες PON που θα ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των καταναλωτών για ευρυζωνικότητα για τα επόμενα 5 έως 10 χρόνια. Επιπλέον, το XGS-PON αναπτύσσεται όλο και περισσότερο για να συνυπάρχει με τις ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες GPON. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές, καθώς και στην κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για επιχειρηματικές υπηρεσίες με επιπλέον gigabit σε όλο το δίκτυο. Όπως συμβαίνει με όλη την τεχνολογία, είναι πολύ απίθανο να σταματήσουμε στο XGS-PON. Τα επόμενα χρόνια, θα υπάρξει μια προβλεπόμενη στροφή προς την τεχνολογία PON ακόμη μεγαλύτερης χωρητικότητας όπως το 25G/50G EPON. Ως έχει, το 10G-PON θα εξακολουθεί να είναι το πρότυπο για οικιακή συνδεσιμότητα οπτικών ινών στο σπίτι για την επόμενη δεκαετία, με το 25G ή το 50G PON να χρησιμοποιείται ευρέως για επιχειρήσεις με υψηλότερες απαιτήσεις εύρους ζώνης. Για αυτό άλλωστε η ανάγκη για μελλοντική συνύπαρξη προδιαγραφών είναι φλέγον ζήτημα και πρόκειται να γίνει ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για τη μελλοντική εξέλιξη της τεχνολογίας PON, βοηθώντας στη διευκόλυνση της ανάπτυξης μελλοντικών προτύπων. Ουσιαστικά οι φορείς των τηλεπικοινωνιών θα πρέπει να σχεδιάσουν οποιασδήποτε ευρυζωνικής υπηρεσίας οπτικών ινών και το φυσικό δίκτυο διανομής έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συμβατότητα, όποιες και αν είναι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή ή πρόκειται να αναπτυχθούν.

1.2 Μελλοντικά 5G/6G δίκτυα και σύνδεση με τεχνολογίες που επαφίενται σε PON

Η πολυπλοκότητα των PICs (photonic integrated circuits) θέτουν προκλήσεις απέναντι στα σενάρια των δικτύων. Ο κύριος οδηγός για οπτικά δίκτυα είναι xhaul (midhaul or the fronthaul) για 5G και μελλοντικά 6G vRAN δίκτυα. Αυτές οι λύσεις για οπτικές μεταφορές εισάγονται για την πρόσβαση σε time-division-multiplexed passive optical network (TDM-PON), wavelength-division-multiplexed PON (WDM-PON) διασυνδέσεις μέτρο και κέντρων δεδομένων. Τα PON αναμένεται να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην υποστήριξη της ανάπτυξης δικτύων 5G. Τα PON μπορούν να παρέχουν τις συνδέσεις backhaul και fronthaul υψηλής χωρητικότητας που απαιτούνται για την υποδομή 5G, διευκολύνοντας την απρόσκοπτη ενοποίηση σταθερών και κινητών δικτύων και επιτρέποντας την παροχή υπηρεσιών υψηλού εύρους ζώνης στους τελικούς χρήστες. Το PON και το 5G/6G μπορούν να συγκλίνουν για να επιτρέψουν μια ενοποιημένη και συγκλίνουσα υποδομή δικτύου πρόσβασης. Αυτή η σύγκλιση επιτρέπει την ενσωμάτωση σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης και ασύρματης συνδεσιμότητας, απλοποιώντας τη διαχείριση του δικτύου και παρέχοντας συνεπείς εμπειρίες χρήστη σε διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης. Επιπλέον υποστηρίζει την παροχή βελτιωμένων ευρυζωνικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας (eMBB), οι οποίες απαιτούν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και χαμηλό λανθάνοντα χρόνο. Παρέχοντας συνδέσεις backhaul υψηλής ταχύτητας, το PON επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων από σταθμούς βάσης που υποστηρίζουν 5G και 6G στο κεντρικό δίκτυο, διευκολύνοντας την ομαλή παράδοση περιεχομένου και εφαρμογών υψηλού εύρους ζώνης σε κινητές συσκευές. Η ικανότητα του PON να υποστηρίζει μαζική συνδεσιμότητα συσκευών και αποτελεσματική κατανομή πόρων το καθιστά κατάλληλο για χειρισμό του αυξανόμενου αριθμού συσκευών IoT, επιτρέποντας εφαρμογές έξυπνων πόλεων, βιομηχανικούς αυτοματισμούς και άλλες περιπτώσεις χρήσης IoT. Τέλος, ο συνδυασμός PON, 5G και 6G μπορεί να επιτρέψει τον τεμαχισμό δικτύου, επιτρέποντας τη δημιουργία εικονικών δικτύων με αποκλειστικούς πόρους και χαρακτηριστικά υπηρεσιών. Αυτό επιτρέπει τη διαφοροποίηση των υπηρεσιών και τις εξατομικευμένες εμπειρίες για συγκεκριμένες εφαρμογές ή ομάδες χρηστών, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη ποιότητα υπηρεσιών και ικανοποιώντας τις διαφορετικές απαιτήσεις διαφορετικών περιπτώσεων χρήσης. Για όλους τους παραπάνω λόγους μαζί με την ανάπτυξη των 5G και 6G δικτύων έρχεται και η εξέλιξη των PON ώστε να τα υποστηρίξουν.

2 Κεφάλαιο 2

Διαμόρφωση Οπτικού Σήματος

2.1 Λόγοι που οδηγούν σε Απώλειες και Παραμόρφωση Σήματος

2.1.1 Χρωματική διασπορά Chromatic Dispersion (CD)

Διασπορά είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο ο παλμός του φωτός διαστέλλεται, καθώς ταξιδεύει μέσα στην οπτική ίνα. Αυτή η διεύρυνση του παλμού έχει καταστροφική επίδραση στους διαδοχικούς παλμούς και προκαλεί διαστολή στο διάστημα μεταξύ συμβόλων (ISI) στο ληφθέν σήμα, πράγμα που δυσκολεύει την επαναφορά του ρολογιού και την ανάκτηση δεδομένων σε υψηλές συχνότητες, οδηγώντας σε υψηλότερο BER. Σε υψηλότερες συχνότητες, λόγω της χρωματικής διασποράς τα σήματα παραμορφώνονται σημαντικά.

Το σχέδιο ελέγχου της διασποράς προσπαθεί να λύσει το πρόβλημα της χρωματικής διασποράς κατά το μήκος μονόδρομης ίνας ενός μόνο καναλιού (SMF). Η βασική ιδέα πίσω από μία τέτοια διαχείριση μπορεί να κατανοηθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση παλμού-εξάπλωσης:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

όπου A είναι το πλάτος του παλμού περίπλεξης, α είναι ο συντελεστής απώλειας της ίνας και γ είναι η μη-γραμμική παράμετρος της ίνας. Οι β_2, β_3 είναι οι συντελεστές διασποράς δεύτερης και τρίτης τάξης αντίστοιχα. Ο β_3 μπορεί να παραληφθεί όταν το $|\beta_2|$ υπερβαίνει τα 0.1 ps²/km. Η εξίσωση (1) μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Fourier. Στην ειδική περίπτωση όπου $\beta_3=0$, η λύση γίνεται:

$$A(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}(0, \omega) \exp\left(\frac{i}{2}\beta_2 z \omega^2 - i\omega t\right) d\omega \quad (2)$$

Η υποβάθμιση του οπτικού σήματος που προκύπτει από τη διασπορά, οφείλεται στον συντελεστή φάσης $\exp(i\beta_2 z \omega^2/2)$, που αποκτάται από τις φασματικές συνιστώσες του παλμού κατά τη διάδοσή του στην ίνα. Όλοι οι έλεγχοι της διασποράς προσπαθούν να ακυρώσουν αυτόν τον συντελεστή φάσης, ώστε το σήμα εισόδου να μπορεί να αποκατασταθεί. Η πραγματική υλοποίηση μπορεί να γίνει στον πομπό, στον δέκτη ή κατά μήκος του οπτικού συνδέσμου.

2.1.2 Chirp

Chirp μπορεί να οριστεί ως ένα σήμα στο οποίο η συχνότητα αυξάνεται (up-chirp) ή μειώνεται (downchirp) με την πάροδο του χρόνου. Αυτό ενισχύει τις επιδράσεις της χρωματικής διασποράς κατά τη διάδοση στην ίνα και συνήθως περιορίζει σε μικρά μήκη

την απόσταση της ίνας και το εύρος συχνότητας εφαρμογής όταν χρησιμοποιούνται laser άμεσης διαμόρφωσης (directly modulated laser). Το chirp του EAM εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού. Σύμφωνα με τις σχέσεις Kramers-Kronig, η μεταβολή του φανταστικού μέρους του δείκτη ανάκλασης (δλδ το μέρος απορρόφησης), οδηγεί σε μια μεταβολή του πραγματικού μέρους, εισάγοντας έτσι chirp. Υποθέτοντας έναν πολύπλοκο δείκτη διάθλασης $n = n_r + jn_i$ και λαμβάνοντας υπόψη την πολύπλοκη σταθερά διάδοσης του οπτικού κύματος

$$\gamma_o = \bar{\alpha}_o + j\beta_o = \frac{2\pi}{\lambda_o} n_i + j \frac{2\pi}{\lambda_o} n_r \quad (3)$$

$$n_i = \bar{\alpha}_o \left(\frac{2\pi}{\lambda_o} \right)^{-1} = n_i = \alpha \left(\frac{2\pi}{\lambda_o} \right)^{-1} \quad (4)$$

Όπου $\bar{\alpha}_o$ είναι η οπτική απόσβεση του πεδίου και α η απορρόφηση. Η παράμετρος chirp α_H μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\alpha_H = \frac{\Delta n_r}{\Delta n_i} = \frac{4\pi}{\lambda_o} \frac{\Delta n_r}{\Delta \alpha} \quad (5)$$

Η έξοδος του οπτικού πεδίου και ισχύς μπορούν τώρα να γραφτούν αντίστοιχα ως:

$$E_{out} = E_o e^{-j \frac{2\pi}{\lambda_o} \Delta n_r(t) L} e^{-\Delta \bar{\alpha}_o(t) L} \quad (6)$$

$$\text{και } P_{out} = P_o e^{-\Delta \alpha(t) L} \quad (7)$$

όπου E_o είναι το πεδίο σε απουσία μεταβολής του δείκτη διάθλασης και P_o είναι η σχετική ισχύς. Αλλάζοντας το πεδίο της φάσης $\varphi = -2\pi \Delta n_r(t) L / \lambda_o$ και την ισχύ εξόδου ως προς το χρόνο, παίρνουμε:

$$\Delta_f = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{-\Delta n_r(t) L}{\Delta t \lambda_o}, \quad (8)$$

$$\rightarrow \frac{\Delta n_r}{\Delta t} = \frac{-\lambda_o \Delta_f}{L} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta P_{out}}{\Delta t} = \frac{-\Delta \alpha}{\Delta t} L P_{out} \quad (10)$$

$$\rightarrow \frac{\Delta \alpha}{\Delta t} = \frac{-\Delta P_{out}}{\Delta t} \frac{1}{L P_{out}} \quad (11)$$

Αντικαθιστώντας στην εξ. (5), έχουμε:

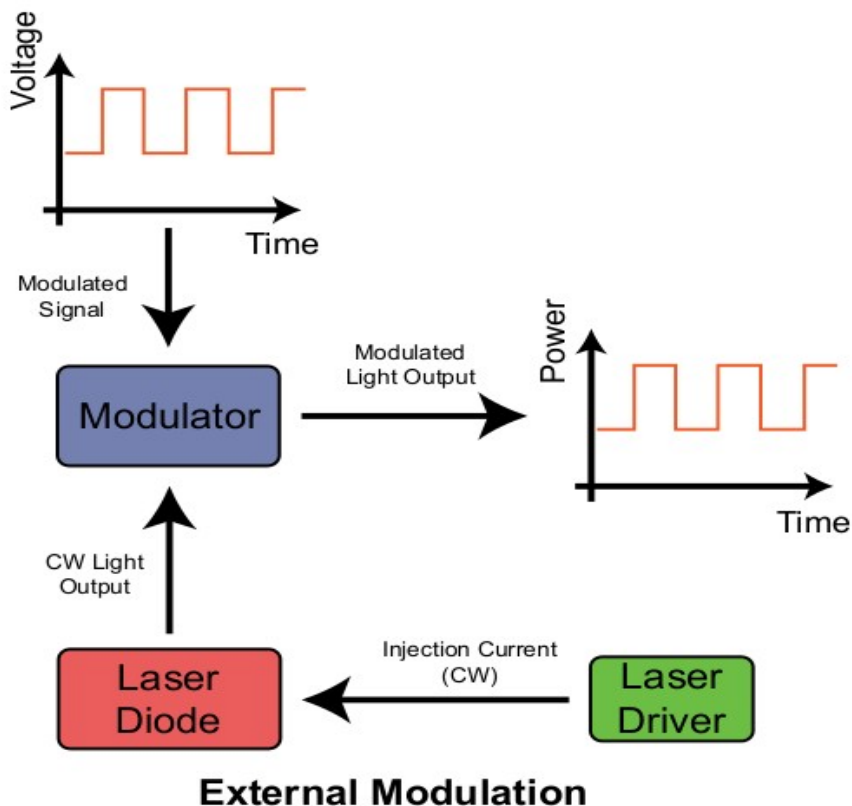
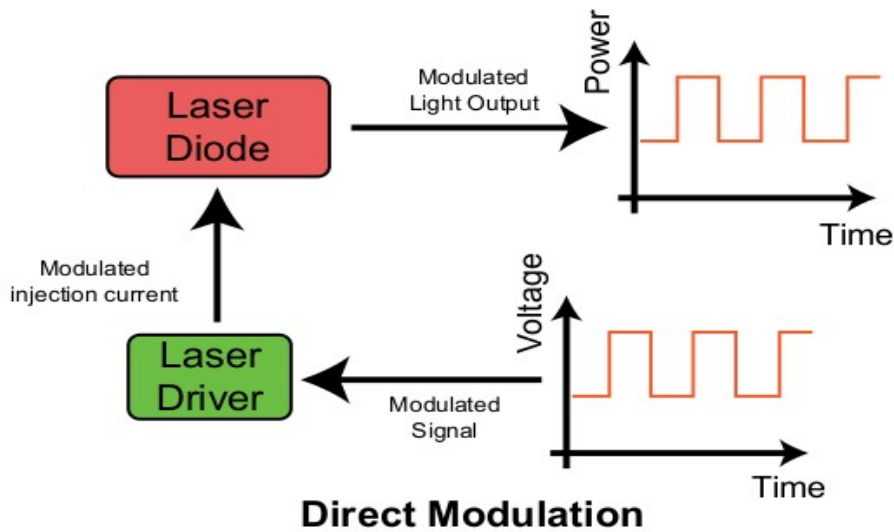
$$\alpha_H = \frac{4\pi}{\lambda_o} \frac{\Delta n_r}{\Delta \alpha} = \frac{4\pi}{\lambda_o} \frac{\Delta n_r / \Delta t}{\Delta \alpha / \Delta t} \quad (12)$$

$$\alpha_H = \frac{4\pi}{\lambda_o} \frac{\lambda_o \Delta f}{L} \times \frac{1}{\frac{1}{LP_{out}} \frac{\Delta P_{out}}{\Delta t}} \approx \frac{4\pi \Delta f}{\frac{1}{P_{out}} \frac{dP_{out}}{dt}} \quad (13)$$

το οποίο αντιστοιχεί στον ορισμό του α_H . Η παράμετρος Henry σχετίζεται συνεπώς με τα χαρακτηριστικά του υλικού και εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση και την ενέργεια απόκλισης. Συμπεραίνουμε ότι το chirp σε EAM μπορεί να είναι σημαντικά καλύτερο από ότι σε laser με άμεση διαμόρφωση.

2.2 Διαμόρφωση οπτικού σήματος

Για να μεταδοθεί η πληροφορία σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης θα πρέπει να διαμορφωθεί η έξοδος μιας οπτικής πηγής, σύμφωνα με το ηλεκτρικό σήμα των δεδομένων. Η διαμόρφωση της ισχύος εξόδου μιας διόδου λέιζερ μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, είτε αλλάζοντας την είσοδο του σήματος, “ρεύμα οδήγησης” (driving current) ή αλλάζοντας την έξοδο συνεχούς κύματος μετά την δημιουργία του φωτός. Στη διαμόρφωση του λέιζερ, το ρεύμα ή η τάση μεταβάλλεται με τον χρόνο για να διαμορφωθεί το σήμα εξόδου από την δίοδο λέιζερ. Απευθείας Διαμόρφωση (Direct Modulation) είναι όταν το ρεύμα, πριν φτάσει στην δίοδο, τροποποιείται με το επιθυμητό σήμα. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται ένας γεννήτορας συναρτήσεων ώστε να παραχθεί το σήμα διαμόρφωσης και ένας οδηγός διόδου λέιζερ για την εφαρμογή του σήματος στο ρεύμα οδήγησης για το λέιζερ. Εξωτερική Διαμόρφωση (External Modulation) είναι όταν η διαμόρφωση επιβάλλεται στο σήμα λέιζερ αφού έχει δημιουργηθεί το φως. Τα δύο είδη διαμόρφωσης φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση της Απευθείας Διαμόρφωσης (Direct Modulation) και της Εξωτερικής Διαμόρφωσης (External Modulation)

Το οπτικό (ηλεκτρομαγνητικό) σήμα μετά τη διαμόρφωση θα είναι της μορφής:

$$E(t) = A(t) \cdot \cos[\omega(t)t + \varphi(t)]$$

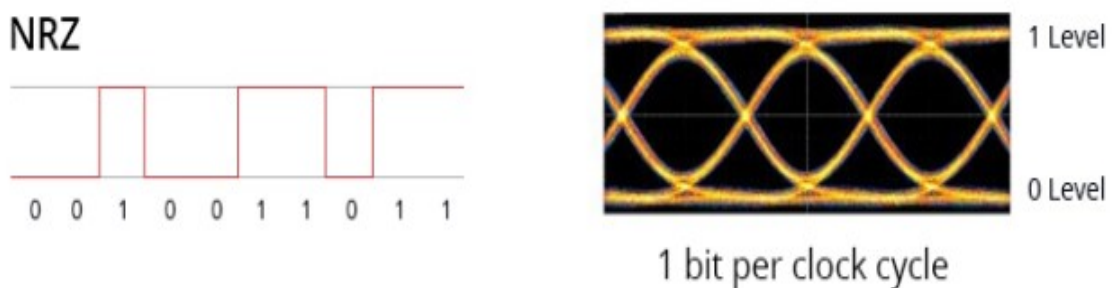
Η πληροφορία μπορεί να κωδικοποιηθεί σε πλάτος $A(t)$, σε φάση $\varphi(t)$, σε μήκος κύματος (wavelength), σε πόλωση, είτε σε σπάνιες περιπτώσεις στη συχνότητα $\omega(t)$, ώστε να επιτευχθεί μετάδοση υψηλής χωρητικότητας. Συνεπώς οι βασικές κατηγορίες διαμόρφωσης είναι η διαμόρφωση πλάτους (ASK), φάσης (PSK) ή συχνότητας (FSK) για κάθε μία από τις οποίες υπάρχουν διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης. Όλες οι κατηγορίες διαμόρφωσης μπορούν να υλοποιηθούν με τη μέθοδο της απευθείας διαμόρφωσης ωστόσο για λόγους που αναφέρονται στη συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε εξωτερική διαμόρφωση. Η εξωτερική

διαμόρφωση βασίζεται περισσότερο σε αμιγώς οπτικά φαινόμενα και επομένως είναι κατάλληλη για διαμόρφωση σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, χρησιμοποιείται για διαμόρφωση πλάτους και φάσης.

2.2.1 Σχήματα Διαμόρφωσης

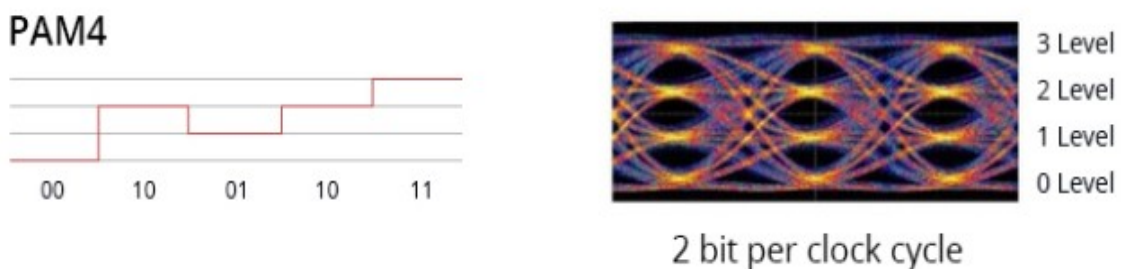
Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται δύο βασικά σχήματα διαμόρφωσης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο Πειραματικό Μέρος.

NRZ (Non-Return-to-Zero) είναι μια βασική τεχνική διαμόρφωσης ψηφιακών σημάτων που χρησιμοποιείται ευρέως, κατά την οποία, όπως λέει και η ονομασία της, το σήμα διατηρεί το επίπεδο της τάσης του καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος ενός bit και δεν επιστρέφει σε ένα μηδενικό επίπεδο μεταξύ των bits. Στο NRZ κάθε bit αντιστοιχεί σε μετάδοση ενός συμβόλου (0,1).



Εικόνα 6: Οπτική αναπαράσταση του NRZ. NRZ Eye Diagram [11]

PAM4 (Pulse Amplitude Modulation with 4 Levels) είναι μία τεχνική διαμόρφωσης στην οποία υπάρχουν τέσσερα διακριτά επίπεδα πλάτους του σήματος (στάθμες), κάθε ένα από τα οποία αναπαρίσταται από δύο bits δεδομένων (00,01,10,11). Αυτό σημαίνει ότι για κάθε σύμβολο που μεταδίδεται, το PAM4 μεταφέρει 2 bits πληροφορίας.



Εικόνα 7: Οπτική αναπαράσταση του PAM4. PAM4 Eye Diagram [11]

Σε NRZ διαμόρφωση το Baud Rate (Symbol Rate) και το Bit Rate είναι ίδιο αφού κάθε σύμβολο αποτελείται από ένα bit. Σε PAM4 διαμόρφωση το Bit Rate είναι διπλάσιο του

Baud Rate αφού κάθε σύμβολο αποτυπώνεται από δύο Bits. Έτσι βελτιώνει την απόδοση των οπτικών μεταδόσεων σε υψηλή ταχύτητα διπλασιάζοντας το bit rate για έναν δεδομένο baud rate σε σύγκριση με το NRZ. Επιπλέον, η απώλεια σήματος που προκαλείται από το κανάλι μετάδοσης στη περίπτωση του PAM4 μειώνεται σημαντικά καθώς επιτυγχάνεται και μικρότερη εξασθένιση αφού δεν χρειάζεται να αυξηθεί το baud rate που οδηγεί συνήθως σε μεγαλύτερες απώλειες λόγω διασποράς και άλλων φαινομένων. Λόγω των τεσσάρων σταθμών, τα επίπεδα σήματος του PAM4 είναι πιο κοντά το ένα στο άλλο, κάνοντας το σύστημα πιο ευάλωτο στον θόρυβο και στις παρεμβολές κατα προέκταση απαιτούνται πιο προηγμένες τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων σε σχέση με το NRZ.

Χρησιμοποιώντας διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης μπορούμε να αυξήσουμε το Bit rate χωρίς να χρειαστεί να αυξηθεί το Baud rate και να εκμεταλλευτούμε έτσι καλύτερα το φάσμα.

2.2.2 High-speed Optical Modulators

Οι οπτικοί διαμορφωτές αποτυπώνουν ένα ηλεκτρικό σήμα σε ένα οπτικό κύμα, που ονομάζεται οπτικός φορέας (optical carrier). Το πλάτος, η φάση, η συχνότητα και η πόλωση του οπτικού αυτού φορέα καθώς και οποιοσδήποτε συνδυασμός τους μπορούν να αξιοποιηθούν για την κωδικοποίηση των πληροφοριών. Στους οπτικούς πομπούς, η διαμόρφωση γίνεται συνήθως είτε με άμεση διαμόρφωση του laser, θέτοντας το σε λειτουργία on-off εναλλαξ, είτε διαμορφώνοντας το φως έξω από το λείζερ, χρησιμοποιώντας έναν εξωτερικό διαμορφωτή. Η απευθείας διαμόρφωση μπορεί να είναι απλούστερη και πιο οικονομική. Η εξωτερική διαμόρφωση ωστόσο επιτυγχάνει μεγαλύτερες ταχύτητες, έχει μεγαλύτερο εύρος διαμόρφωσης και εισάγει λιγότερες απώλειες. Στην άμεση διαμόρφωση η παραμορφώσεις του σήματος οφείλονται κυρίως στο chirp, το οποίο στην εξωτερική διαμόρφωση μπορεί να αφαιρεθεί ή ακόμα και να αντιστραφεί για ανοχή στη διασπορά. Επιπλέον, η εξωτερική διαμόρφωση επιτρέπει και άλλες μορφές διαμόρφωσης όπως QPSK (quadrature phase shift keying). Για τους παραπάνω λόγους οι υλοποιήσεις που θα γίνουν θα βασιστούν σε σχήματα με εξωτερική διαμόρφωση. Οι διαμορφωτές που χρησιμοποιούνται βασίζονται σε ένα από τα δύο φαινόμενα:

Ηλεκτρο-απορρόφησης φαινόμενο: Απορρόφηση του οπτικού πεδίου από ένα υλικό συναρτήσει της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής τάσης.

Ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο: Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση.

Όταν ένα οπτικό πεδίο διαδίδεται κατά μήκος ενός κυματοδηγού μήκους L η φάση φ που συσσωρεύει είναι:

$$\varphi = k \cdot L = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda} \cdot L$$

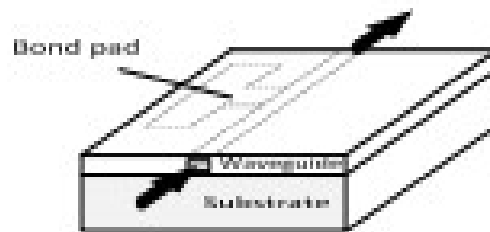
Αν υπάρξει μια διαφοροποίηση του δείκτη διάθλασης Δn τότε η διαφοροποίηση της φάσης είναι:

$$\Delta\varphi = \Delta k \cdot L = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta n}{\lambda} \cdot L$$

Σε ηλεκτρο-οπτικά υλικά η διαφοροποίηση Δn μπορεί να προέλθει με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου E σε κατάλληλη διεύθυνση: $\Delta n \propto E$, όπου r : ηλεκτροοπτικός συντελεστής. Για τη μετατροπή της διαφοράς φάσης σε διαμόρφωση πλάτους απαιτείται η χρήση συμβολομετρικής διάταξης, και συνήθως χρησιμοποιείται το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI).

2.2.2.1 Electro-Absorption Modulator (EAM)

Διαμορφωτές Ηλεκτρο Απορρόφησης (Electroabsorption Modulators - EAMs) είναι ημιαγωγικές συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση της έντασης μιας δέσμης laser μέσω μιας ηλεκτρικής τάσης. Είναι δομές τύπου PIN, των οποίων η ενεργειακή ανομοιογένεια μπορεί να διαμορφωθεί εφαρμόζοντας εξωτερική τάση, αλλάζοντας έτσι τις ηλεκτρικές - απορροφητικές ιδιότητες της συσκευής (μονωτής/ ημιαγωγός/ αγωγός). Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται ένας διαμορφωτής Ηλεκτρο Απορρόφησης.



Εικόνα 8: EAM με κυματοδηγό [7]

Το ποσοστό ισχύος που μεταδίδεται μέσα από ένα υλικό είναι:

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp(-\alpha L)$$

Ο EAM βασίζεται στην εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης α συγκεκριμένων υλικών από την εφαρμοζόμενη τάση. Γενικά, όσο μεγαλύτερη η εφαρμοζόμενη τάση τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση και επομένως τόσο μικρότερη η μετάδοση. Με τον τρόπο αυτό μεταφέρεται η ψηφιακή πληροφορία πάνω στο οπτικό φέρον.

Αποτελείται από έναν μονό κυματοδηγό ο οποίος περιέχει μία επικείμενη PIN δομή. Ο πλευρικός οπτικός περιορισμός συνήθως επιτυγχάνεται με τη χάραξη ενός deep-ridge

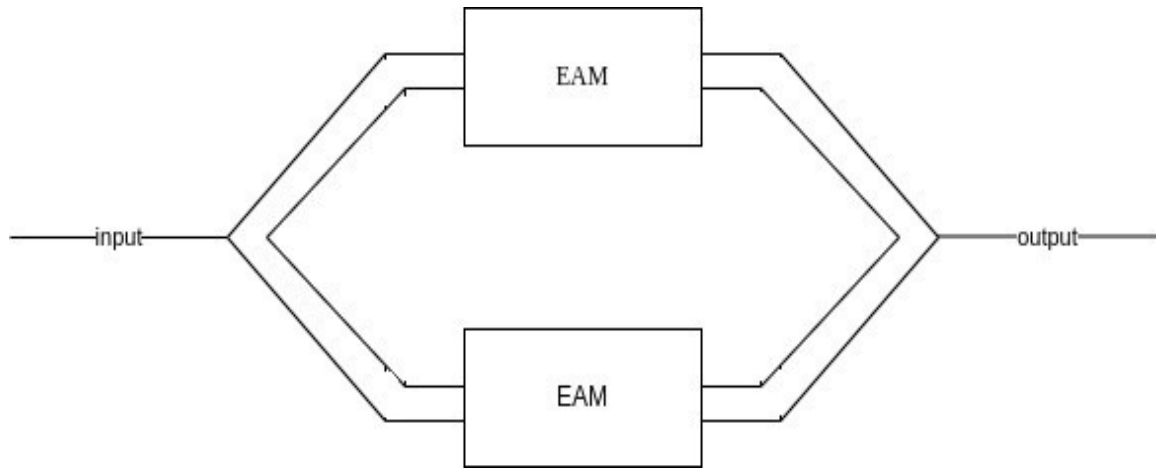
κυματοδηγού, που μπορεί να επιπεδωθεί είτε με επανάληψη του InP είτε με χρήση πολυμιδίου. Αυτή η εγκοπή επιτρέπει τον περιορισμό της διάδοσης του φωτός σε μια περιορισμένη περιοχή, βελτιώνοντας έτσι την οπτική απόδοση του κυματοδηγού και μειώνοντας τις απώλειες σήματος. Οι ίνες συνδέονται με την οπτική είσοδο και έξοδο του μικροσίπ του EAM, που τυπικά έχει μήκος μεταξύ 80 και 350μm. Η οπτική απώλεια εισαγωγής, που αντιπροσωπεύει τη μείωση της ισχύος του οπτικού σήματος καθώς διασχίζει τη συσκευή, είναι συνήθως χαμηλή, δεδομένου ότι η απορρόφηση του υλικού είναι αμελητέα. Η μικρή οπτική απώλεια εισαγωγής είναι σημαντική για την απόδοση των οπτικών συσκευών και των οπτικών δικτύων, καθώς υψηλή απώλεια μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του σήματος και την απόδοση της επικοινωνίας. Οι EAM είναι υποψήφιοι για χρήση σε εξωτερικούς διαμορφωτές συνδέσεων στις τηλεπικοινωνίες. Μπορούν να λειτουργούν σε πολύ υψηλές ταχύτητες, επιτυγχάνοντας μια ταχύτητα διαμόρφωσης των δεκάδων GHz. Ένα πρακτικό χαρακτηριστικό είναι ότι ένα EAM μπορεί να ενσωματωθεί με ένα διαμορφωμένο laser διαμορφωτή διάδοσης σε ένα μόνο τσιπ για να σχηματίσει έναν πομπό δεδομένων σε μορφή φωτονικού ενσωματωμένου κυκλώματος. Σε σύγκριση με την άμεση διαμόρφωση του διαμορφωμένου laser, μπορεί να επιτευχθεί μια υψηλότερη ζώνη διαμόρφωσης και μειωμένος χειροτραυματισμός.

2.2.2.2 Electro-Absorption Mach-Zehnder Modulator (EAMZM)

Ο ηλεκτρο-απορρόφησης Mach-Zehnder διαμορφωτής (EAMZM) συνδυάζει τις αρχές και των ηλεκτρο-απορρόφησης διαμορφωτών (EAMs) και των διαμορφωτών Mach-Zehnder (MZMs) για να επιτύχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά διαμόρφωσης. Αποτελείται συνήθως από μία δομή ανακλαστήρα Mach-Zehnder (MZI), όπου ο ένας ή και οι δύο βραχίονες περιέχουν έναν διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης. Εφαρμόζοντας τάση στο τμήμα του EAM, μπορούν να διαμορφωθούν τα χαρακτηριστικά απορρόφησης του υλικού, οδηγώντας σε αλλαγές στην οπτική φάση ή ένταση εντός του ανακλαστήρα MZI. Αυτό επιτρέπει τη διαμόρφωση του σήματος εξόδου με έναν τρόπο παρόμοιο με αυτόν που γίνεται στους EAMs και MZMs. Ο EAMMZM χρησιμοποιώντας την MZI δομή μπορεί να ακυρώσει το chirp. Το σήμα διαχωρίζεται σε δύο μονοπάτια, εισάγοντας ίσο και αντίθετο chirp σε κάθε διαδρομή και στη συνέχεια επανασυνδέοντας τα σήματα επιτυγχάνεται ακύρωση του chirp κατά συνέπεια κάνει τον διαμορφωτή πιο ανθεκτικό στη χρωματική διασπορά. Αυτό είναι και το χαρακτηριστικό του EAM MZM που έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον σε εφαρμογές που απαιτούν διαχείριση διασποράς και ακριβή μετάδοση σήματος.

Οι EAMZMs προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως δυνατότητα διαμόρφωσης σε υψηλή ταχύτητα, βελτιωμένο εύρος ζώνης, και αυξημένη απόδοση σε σύγκριση με παραδοσιακούς διαμορφωτές MZMs και EAMs αντίστοιχα. Καταναλώνουν συνήθως περισσότερη ενέργεια και έχουν μεγαλύτερο αποτύπωμα (footprint). Το μήκος τους είναι κάποια χιλιοστά και το πλάτος τους μπορεί να φτάσει τα εκατοντάδες μικρόμετρα. Ευτυχώς, αυτές οι συσκευές είναι πιο εύκολο να δοκιμαστούν, και επειδή είναι πιο ανθεκτικές στις αλλαγές θερμοκρασίας, η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας δεν είναι τόσο κρίσιμη. Επομένως, έχει γίνει τεράστια έρευνα σχετικά με τους διαμορφωτές Mach-Zehnder για βελτίωση του εύρους ζώνης και τον σχεδιασμό για καλύτερη απόδοση και μικρότερες οπτικές απώλειες. Προτιμούνται λόγω της απλότητας, της ανθεκτικότητας και της υψηλής λειτουργίας του εύρους ζώνης τους. Οι διαμορφωτές Mach-Zehnder βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορα συστήματα οπτικών επικοινωνιών, επεξεργασία σήματος και εφαρμογές οπτικής ανίχνευσης

που απαιτούν ακρίβεια και υψηλής ταχύτητας διαμόρφωση οι πομποί σε κέντρα δεδομένων. Παρακάτω βλέπουμε μια δομή MZI όπου σε κάθε βραχίονα έχει έναν EAM.



Εικόνα 9: Electro-absorption Mach Zehnder Modulator

3 Κεφάλαιο 3

DSP - Equalizer

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε την ψηφιακή ισοστάθμιση και πως επιτυγχάνεται. Οι διάφοροι περιορισμοί εύρους ζώνης και οι μη ομοιόμορφες αποκρίσεις συχνότητας στις Οπτοηλεκτρονικές ζεύξεις οδηγούν σε διασυμβολικές παρεμβολές (ISI), συνολική υποβάθμιση του σήματος και υψηλότερο BER. Η ψηφιακή ισοστάθμιση είναι μια μορφή ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) σε πραγματικό χρόνο που αντιστρέφει κυρίως τη συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού, ένας ευρέως αποδεκτός τρόπος για την αντιμετώπιση φαινομένων υποβάθμισης του σήματος. Χρησιμοποιείται τόσο στην πλευρά του πομπού Tx (Pre-equalizer, προ ισοστάθμιση), όσο και στην πλευρά του δέκτη Rx για την αποκατάσταση του σήματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η προηγμένη ισοστάθμιση θα μπορούσε και να περιορίσει την ανάγκη για χρήση πιο ακριβών εξαρτημάτων στο σύστημα για την εξασφάλιση της ακεραιότητας του σήματος. Για αυτό άλλωστε είναι μία μέθοδος που έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον την τελευταία δεκαετία, καθώς επιδιώκεται μετάδοση όλο και περισσότερων Gb/s μέσω περιορισμένων σε εύρος ζώνης οπτοηλεκτρονικών εξαρτημάτων [13].

3.1 Equalizer

Οι ισοσταθμιστές στην πλευρά του δέκτη χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίσουν τις αλλοιώσεις που προκαλούνται κατά την μετάδοση των σημάτων μέσω ενός καναλιού. Παραλαμβάνει το παραμορφωμένο σήμα και εφαρμόζοντας αλγόριθμους προσπαθεί να μειώσει τις αλλοιώσεις.

3.1.1 Ψηφιακοί Ισοσταθμιστές - FFE/DFE

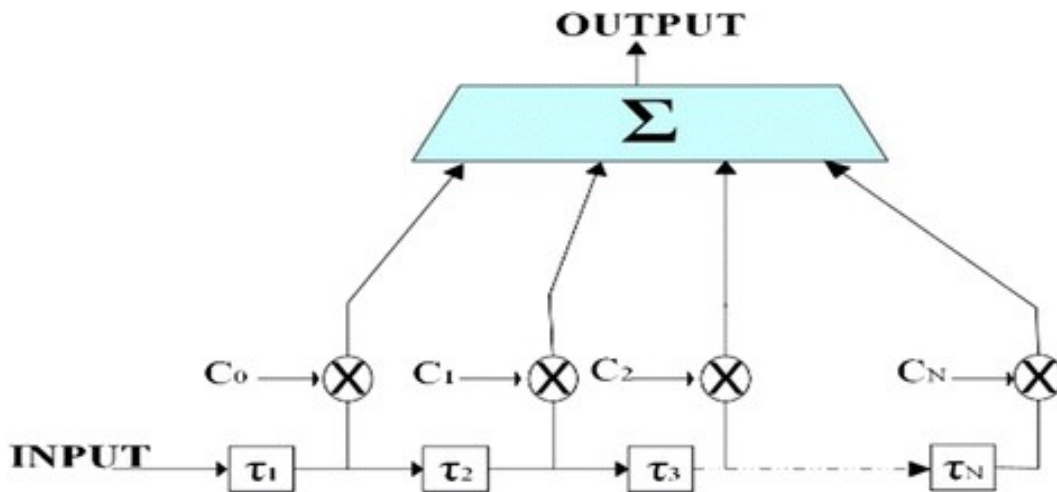
Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ψηφιακών ισοσταθμιστών που χρησιμοποιούνται σε οπτικούς συνδέσμους οπτικής εμβέλειας είναι ο ισοσταθμιστής προώθησης, Feed-Forward Equalizer (FFE), και ο ισοσταθμιστής ανάδρασης απόφασης, Decision-Feedback Equalizer (DFE).

Ο FFE υλοποιείται με φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης N-βημάτων (FIR), του οποίου η συχνότητα απόκρισης είναι το αντίστροφο της απόκρισης του καναλιού μετάδοσης. Η υλοποίηση του υλικού είναι πιο απλή σε σύγκριση με άλλες δομές ισοσταθμιστών, ωστόσο, η ενίσχυση του θορύβου και η απαιτούμενη διαδικασία προσαρμογής για τον καθορισμό των βαρών του FIR είναι οι κύριες ανησυχίες. Αυτή η διαδικασία προσαρμογής για την εκτίμηση και τελικά την αντιστροφή της απόκρισης του καναλιού πραγματοποιείται συνήθως είτε με τη χρήση του αλγορίθμου Ελάχιστων Μέσων Τετραγώνων (LMS) είτε του αλγορίθμου Αναδρομικών Ελάχιστων Τετραγώνων (RLS), ελαχιστοποιώντας τη σχετική συνάρτηση κόστους του εκτιμώμενου σφάλματος.

Ο DFE περιλαμβάνει έναν FFE, αλλά χρησιμοποιεί επίσης ένα επιπλέον μονοπάτι ανάδρασης. Στην απλούστερη μορφή, δύο φίλτρα FIR, ένα τοποθετημένο άμεσα και ένα κατά μήκος του μονοπατιού ανάδρασης, και ένας διαμορφωτής απόφασης χρησιμοποιούνται. Η προσαρμογή των συντελεστών του FIR πραγματοποιείται με παρόμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση του FFE. Παρόλο που η απόδοση του DFE είναι θεωρητικά βελτιωμένη σε σύγκριση με τον FFE, ειδικά στην ακύρωση της παρεμβολής μεταξύ συμβόλων (ISI), η παρουσία του βρόχου ανάδρασης αυξάνει σημαντικά την

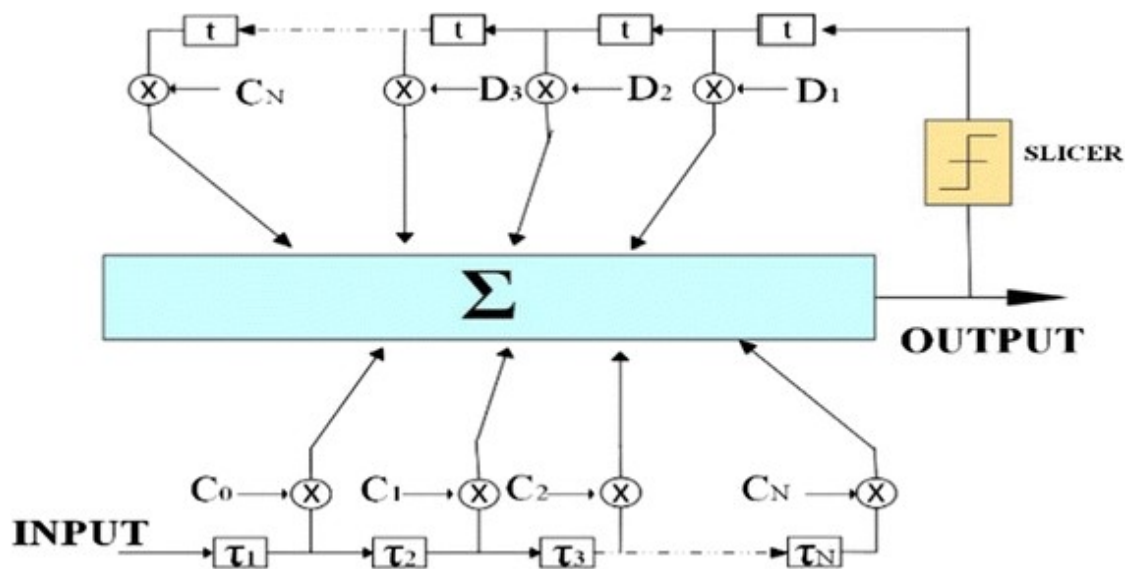
πολυπλοκότητα υλοποίησης. Για να απλοποιηθεί η δομή και να μειωθεί η καθυστέρηση του μονοπατιού ανάδρασης, συχνά ακολουθείται η προσέγγιση της αναδίπλωσης βρόχου. Ωστόσο, για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων ακόμη και μια περιορισμένη υλοποίηση DFE προκαλεί προκλήσεις σχεδίασης, επειδή η αναδίπλωση βρόχου αυξάνει εκθετικά τον αριθμό των διαμορφωτών απόφασης που χρησιμοποιούνται.

Η αύξηση του αριθμού των βημάτων του φίλτρου μπορεί να επιτρέψει πιο ακριβή αντιστάθμιση της συχνότητας απόκρισης του καναλιού, ειδικά αν αυτή περιέχει έντονους κυματισμούς, επιτυγχάνοντας έτσι ισχυρότερη βελτίωση στην ποιότητα του σήματος και στο BER. Παρακάτω βλέπουμε τα block diagrams ενός FFE και DFE αντίστοιχα.



Εικόνα 10: Το Block Diagram ενός FFE [15]

Στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής επιλέγουμε σαν φίλτρα του Equalizer την FFE και την DFE προσέγγιση για διαφορετικά βήματα (taps).

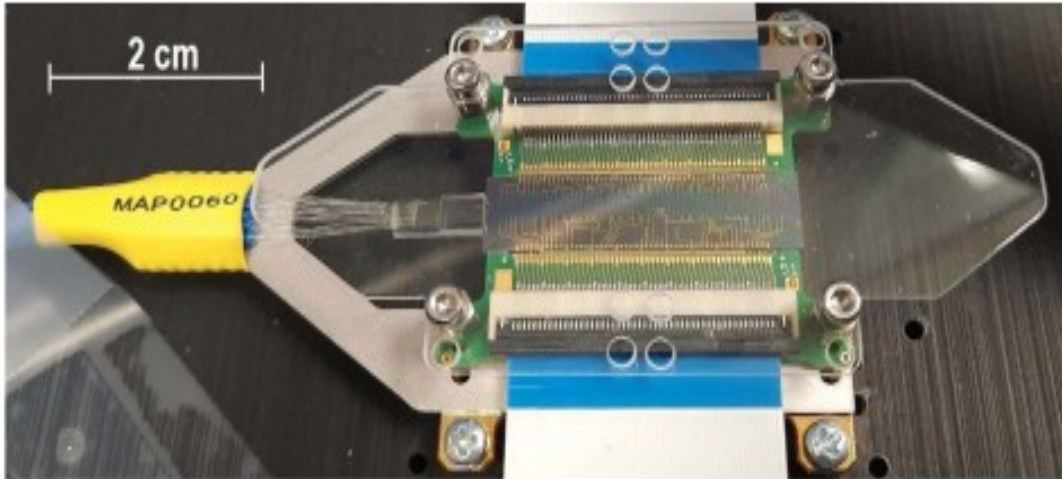


Εικόνα 11: Το Block Diagram ενός DFE [15]

3.2 Optical Pre-Equalizer

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης των χρηστών έχουν οδηγήσει στην ταχεία ανάπτυξη των παθητικών οπτικών δικτύων (PON) τα τελευταία χρόνια. Τα πακέτα δεδομένων από διαφορετικές μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) διέρχονται από διαφορετικές οπτικές διαδρομές και παρουσιάζουν άνισες οπτικές απώλειες. Επομένως, μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις στην οπτική ισχύ όταν φτάσουν στο άκρο του δέκτη στο τερματικό της οπτικής γραμμής (OLT), το οποίο προκαλεί σοβαρά προβλήματα στο δέκτη με περιορισμένο δυναμικό εύρος. Το δυναμικό εύρος καθορίζει τη διαφορά μεταξύ της χαμηλότερης και της υψηλότερης έντασης φωτός που μπορεί να ανιχνεύσει ο δέκτης χωρίς να χαθεί πληροφορία και μετριέται σε dB. Για να αντεπεξέλθουμε σε όλα τα πιθανά επίπεδα εισερχόμενης ισχύος, πρέπει να αναπτυχθεί ένας γρήγορος και ακριβής δέκτης με μεγάλο δυναμικό εύρος ισχύος εισόδου, που επιφέρει υπερβολική πολυπλοκότητα και υψηλό κόστος στο τέλος του δέκτη. Εάν χρησιμοποιηθεί τεχνική εξισορρόπησης οπτικής ισχύος πριν από τη διαδικασία ανίχνευσης, τότε οι αυστηρές απαιτήσεις στο άκρο του δέκτη μπορούν να χαλαρώσουν και ο δέκτης μπορεί να γίνει λιγότερο περίπλοκος με μικρότερες απαιτήσεις δυναμικού εύρους.[9] Αυτό επιτυγχάνεται με έναν All-optical Pre-Equalizer, που είναι μία συσκευή που χρησιμοποιείται στα οπτικά δίκτυα για την βελτίωση της ποιότητας του σήματος πριν αυτό μεταδοθεί μέσω ενός οπτικού καναλιού (οπτική ίνα). Η ισοστάθμιση γίνεται εξ ολοκλήρου στο οπτικό πεδίο χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικών επεξεργαστών, σε αυτό βασίζονται και τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής. Ωστόσο είναι μία περίπλοκη τεχνική για αυτόν τον λόγο στο πειραματικό μέρος θα χρησιμοποιήσουμε Equalizer στην πλευρά του δέκτη. Στην παρακάτω εικόνα είναι ένας optical equalizer που αναπτύχθηκε για χρήση σε ευρυζωνικές οπτικές επικοινωνίες, και συνδυάζει την

συμπύκνωση της τεχνολογίας PIC με την δυνατότητα για λειτουργία σε πολλαπλές ταχύτητες σε ένα ευρύ φάσμα Baud Rate [14].



Εικόνα 12: Εικόνα ενός Optical Equalizer PIC με 8 ίνες εισόδου/εξόδου και ηλεκτρικά καλώδια για τον έλεγχο των 26 μετατροπέων φάσης του [14]

4 Κεφάλαιο 4

Πειραματικό Μέρος

4.1 Απαραίτητη Θεωρία

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε κάποιες έννοιες που θα συναντήσουμε αργότερα στο πειραματικό σκέλος της διπλωματικής.

4.1.1 BER – Bit Error Rate

Ο ρυθμός λήψης λαθών (BER) ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο αναγνωρίζονται λανθασμένα τα λαμβανόμενα δυφία (bits) από τον δέκτη

$$BER = n_0 p(0|1) + n_1 p(1|0)$$

Όπου n_0 και n_1 είναι το ποσοστό των '0' και '1' που έχουν μεταδοθεί. Αντίστοιχα $p(0|1)$ και $p(1|0)$ είναι οι δεσμευμένες πιθανότητες να αναγνωρίσει ο δέκτης '0' (ή '1') ενώ έχει μεταδοθεί '1' (ή '0').

Αν σταλούν ίσοι αριθμοί '1' και '0', δηλ. $n_1 = n_0 = 1/2$, τότε

$$BER = \frac{1}{2} [p(0|1) + p(1|0)]$$

Στα σημερινά συστήματα μετάδοσης απαιτείται BER της τάξης $\sim 10^{-12}$

Τα σφάλματα στα bits είναι αποτέλεσμα λανθασμένων αποφάσεων του δέκτη για το αν το bit είναι '0' ή '1'. Forward Error Correction (FEC) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας για να αυξηθεί η αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων. Η βασική ιδέα του FEC είναι να προσθέτει πλεονασματικά δεδομένα στα μεταδιδόμενα δεδομένα πριν από τη μετάδοση, έτσι ώστε να μπορούν να ανιχνευθούν και να διορθωθούν σφάλματα, που προκαλούνται από θόρυβο ή παρεμβολές, στον παραλήπτη, χωρίς την ανάγκη επαναμετάδοσης. Η αποτελεσματικότητα του FEC καθορίζεται από τη δυνατότητά του να διορθώνει σφάλματα έως ένα συγκεκριμένο κατώτατο όριο BER.

Ο ρυθμός λήψης λανθασμένων συμβόλων SER (Symbol Error Rate) είναι ο ρυθμός με τον οποίο αναγνωρίζονται τα λανθασμένα σύμβολα που λαμβάνει ο δέκτης. Λόγω των διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης το BER μπορεί να διαφέρει από το SER, μιας και ο αριθμός των bit που αναπαριστούν τα σύμβολα για διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης διαφέρει.

4.1.2 OSNR

OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) είναι μέγεθος, με μονάδα μέτρησης dB, που ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του σήματος ως προς την ισχύ του θορύβου σε ένα οπτικό κανάλι. [12]

$$OSNR = 10 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) ,$$

όπου S είναι η οπτική ισχύς του σήματος και N η οπτική ισχύς θορύβου.

Είναι σημαντική παράμετρος καθώς υποδηλώνει τον βαθμό των αλλοιώσεων όταν το οπτικό σήμα μεταφέρεται μέσω ενός οπτικού συστήματος με οπτικούς ενισχυτές (SOA). Ένα υψηλό OSNR είναι ενδεικτικό της καλής ποιότητας του σήματος και της αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων, υποδηλώνει ότι το σήμα είναι ισχυρότερο σε σχέση με τον θόρυβο, δηλαδή το σήμα είναι καθαρό και λιγότερο επηρεασμένο από θορύβους. Αντιθέτως, ένα χαμηλό OSNR υποδηλώνει ότι το σήμα είναι πιο εξασθενημένο από τον θόρυβο, πράγμα που σημαίνει ότι το σήμα είναι πιο επιρρεπές σε αλλοιώσεις και σφάλματα.

Η σχέση που συνδέει μαθηματικά το OSNR με το BER είναι η παρακάτω:

$$\log_{10}(BER) = 10.7 - 1.45(OSNR)$$

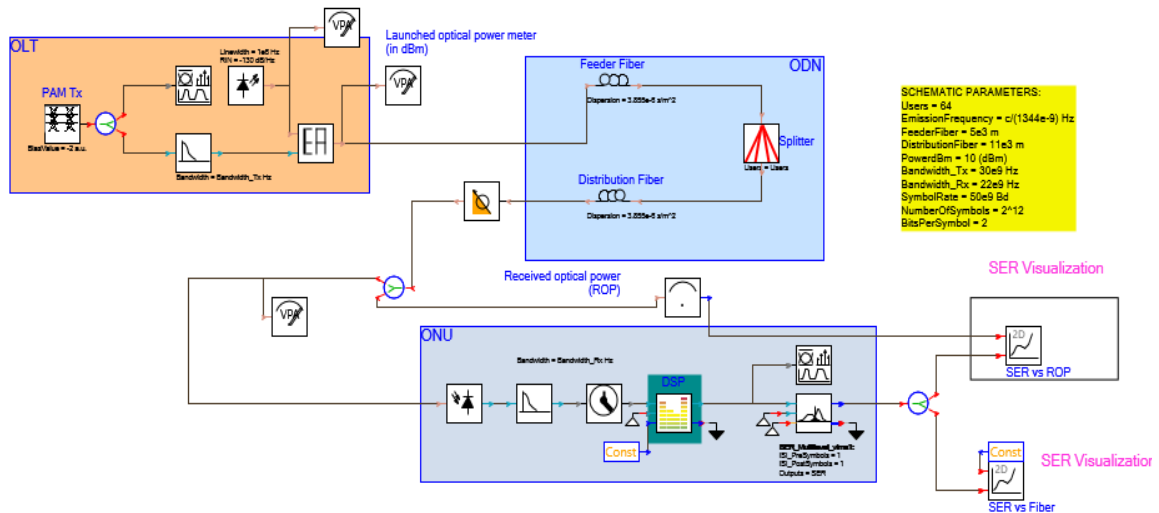
4.2 Παρουσίαση Προσομοιώσεων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την διαδικασία των προσομοιώσεων, οι οποίες έγιναν στο περιβάλλον του προγράμματος VPI photonics Design Suite 11.4. Οι προσομοιώσεις έγιναν όσο το δυνατόν πιο πιστές σε πραγματικές συνθήκες ώστε να μπορέσουμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα όσον αφορά την λειτουργία ενός EAM και EAM-MZM διαμορφωτή στον οπτικό πομπό. Ουσιαστικά προσομοιώσαμε έναν πομπό που λειτουργεί στα 50Gbaud για NRZ και PAM4 διαμόρφωση με την χρήση single EAM καθώς και μία διάταξη EAM – MZM.

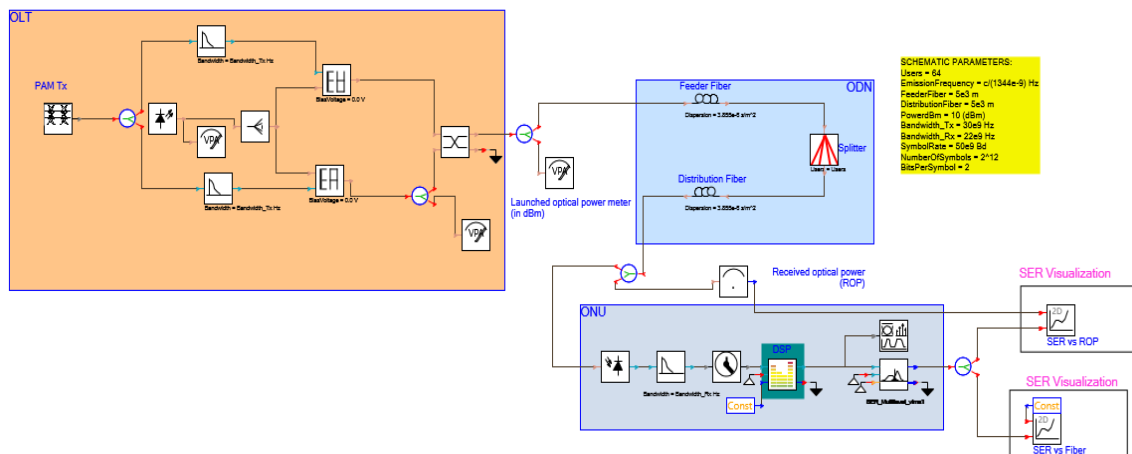
4.2.1 Πειραματική διάταξη – Set Up

Για να συγκρίνουμε την λειτουργία τους δημιουργήθηκαν τα παρακάτω Set up. Στην πρώτη φάση μελετήσαμε την λειτουργία και επίδοση ενός EAM διαμορφωτή για τα δύο σχήματα διαμόρφωσης. Στο Set up 1 το πορτοκαλί πλαίσιο είναι το OLT. Μία γεννήτρια παλμών παράγει παλμούς δύο και τεσσάρων στάθμεων για NRZ και PAM4 σχήματα διαμόρφωσης αντίστοιχα. Έπειτα ο παλμός περνάει από ένα βαθυπερατό φίλτρο και μπαίνει σαν είσοδο στον EAM. Η δεύτερη είσοδος του EAM είναι το οπτικό φέρον που παράγει το laser. Αφού διαμορφωθεί το σήμα και μετατραπεί σε οπτικό, μεταφέρεται μέσω οπτικής ίνας (ODN, μπλε πλαίσιο) στο ONU. Στο ODN κομμάτι του συστήματος υπάρχει ένας splitter ο οποίος μοιράζει το σήμα σε 64 χρήστες, για να προσεγγίσουμε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο σε σχέση με τις αλλοιώσεις και τον θόρυβο που εισάγεται στο σήμα κατά την μετάδοση του. Το γκρι πλαίσιο είναι το ONU κομμάτι. Το σήμα μετά τη φωτοδίοδο στη μερία του δέκτη, μετατρέπεται πάλι σε ηλεκτρικό και περνάει από το βαθυπερατό φίλτρο του Rx αυτή την φορά. Το clock recovery αποκαθιστά τον χρονισμό από το ληφθέν σήμα και στη συνέχεια αυτό εισέρχεται στον equalizer. Ο equalizer με τους ψηφιακούς ισοσταθμιστές που του ορίζουμε αντισταθμίζει το σήμα που λαμβάνει και διορθώνει λάθη που έχουν προκύψει κατά την μετάδοση του. Τέλος παίρνουμε τα διαγράμματα SER vs Fiber Length και SER vs Received Optical Power που αναπαρίστανται με το 2-D signal analyzer. Σαν εισόδους παίρνει το BER_Multilevel, το οποίο υπολογίζει την πιθανότητα μετάδοσης λάθους συμβόλου, το μήκος της οπτικής ίνας και την ισχύ του οπτικού σήματος αντίστοιχα. Από τα

διαγράμματα SER μπορούμε να δούμε τα όρια της διάταξης καθώς τα χιλιόμετρα και τα φίλτρα του equalizer για τα οποία λειτουργεί βέλτιστα.



Εικόνα 13: Set Up 1: 50GBaud Single EAM with Equalizer



Εικόνα 14: Set Up 2: 50GBaud EAM-MZM with Equalizer

Στην δεύτερη φάση που μελετήσαμε τον EAM-MZM, χρησιμοποιήσαμε το Set up 2, το οποίο αντί για έναν EAM στο OLT, έχει δύο EAM, με ίδια συνάρτηση μεταφοράς, σε MZI διάταξη. Ένας splitter μετά το laser “σπάει” το σήμα στους δύο EAMs και ένας coupler ενώνει πάλι το σήμα ώστε να πάει στο ODN, όπως βλέπουμε και στο πορτοκαλί πλαίσιο του Set up 2. Με αυτόν τον τρόπο το chirp στους δύο βραχίονες του EAM-MZM έχουν αντίθετο πρόσημο, άρα κατά την ένωση των δύο σημάτων αντισταθμίζεται. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι με αυτή τη διάταξη το σήμα έχει μεγαλύτερη αντοχή στην χρωματική διασπορά,

πράγμα που περιμένουμε να δούμε και αριθμητικά στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τα υπόλοιπα modules στο Set up 2 παραμένουν ίδια με του 1.

Τα πειράματα επαναλήφθηκαν δύο φορές για τον κάθε διαμορφωτή, μία για NRZ σχήμα διαμόρφωσης και μία για PAM4. Η αλλαγή στο σχήμα διαμόρφωσης γίνεται ορίζοντας την μεταβλητή Bits Per Symbol της διάταξης σε 1 και 2. Στην NZR διαμόρφωση το κάθε σύμβολο που μεταδίδεται αναπαριστάται από ένα bit, δύο ενεργειακές στάθμες, ενώ στην PAM4 με δύο bits, 4 ενεργειακές στάθμες.

Το BaudRate ή αλλιώς Symbol Rate είναι ο αριθμός των συμβόλων που μεταδίδεται ανα δευτερόλεπτο και το ορίζουμε στα 50GBaud. Έτσι ενώ έχουμε ίδιο BaudRate και στις δύο περιπτώσεις, το Bit Rate στην PAM4 διαμόρφωση είναι διπλάσιο αφού κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε δύο bits.

Σκοπός μας είναι να μεταδώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερα bits χωρίς να αυξήσουμε το εύρος ζώνης. Για αυτόν τον λόγο βάζουμε βαθυπερατά φίλτρα (low pass filter) στην πλευρά του πομπού (Tx) και του δέκτη (Rx) ώστε να περιορίσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο το εύρος ζώνης στην διάταξη μας και να δούμε τα όρια της. Το φίλτρο του Tx έχει εύρος ζώνης 30GHz ενώ του Rx 22 GHz.

Το Emission frequency ορίζεται στην τιμή $\frac{c}{1344 \cdot 10^{-9}} Hz$, δηλαδή το μήκος του κύματος

είναι στα 1344 nm. Είναι κοντά στα 1310nm και ιδανικό για μεταφορά δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, αφού κύματα με μήκος κύματος γύρω από αυτή την περιοχή παρουσιάζουν χαμηλή χρωματική διασπορά και απορρόφηση. Επιπλέον είναι μία περιοχή που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές για αύξηση χωρητικότητας.

Ο equalizer είναι απαραίτητος, όπως αποδείχθηκε στα πειράματα, αφού χωρίς DSP το μήκος της οπτικής ίνας για το οποίο το SER ήταν εντός ορίου FEC δεν ήταν πάνω από κάποια λίγα χιλιόμετρα. Το FEC είναι 10^{-3} , οπότε SER μεγαλύτερα από αυτή την τιμή δεν γίνονται αποδεκτά. Για αυτό άλλωστε δεν συμπεριλάβαμε την περίπτωση χωρίς ψηφιακή επεξεργασία σήματος (no DSP) στα διαγράμματα. Τα φίλτρα του Equalizer που εν τέλει επιλέξαμε για τις προσομοιώσεις είναι τρία διαφορετικά FFE με 5, 17 και 53 βήματα (taps), καθώς και τρία DFE με 5/3, 15/5 και 57/13 βήματα αντίστοιχα. Το καθένα από τα οποία αντιμετωπίζει διαφορετικές πτυχές της υποβάθμισης του σήματος.

5 Κεφάλαιο 5

Μεθοδολογία & Αποτελέσματα

Θέλουμε να συγκρίνουμε την απόδοση των δύο διατάξεων, για αυτό προχωρήσαμε στις προσομοιώσεις που έγιναν σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση προσομοιώσαμε τον single EAM για NRZ και PAM4 σχήματα διαμόρφωσης του σήματος στη δεύτερη φάση την δομή του EAM-MZM αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο.

5.1 Single EAM

Η διαδικασία των πειραμάτων ήταν η εξής. Ορίζουμε στις επιθυμητές τιμές τις μεταβλητές της διάταξης και μεταβάλλοντας το μήκος της οπτικής ίνας (Distribution Fiber) βρίσκουμε τα χιλιόμετρα συνολικής οπτικής ίνας (Feeder Fiber + Distribution Fiber) για τα οποία το SER είναι πάνω από το όριο του FEC. Αυτό γίνεται και για τα έξι φίλτρα του equalizer. Στον single EAM η μεταβλητή Average Power του laser στον Tx ορίζεται στα 0.01 Watt.

5.1.1 Single EAM- NRZ

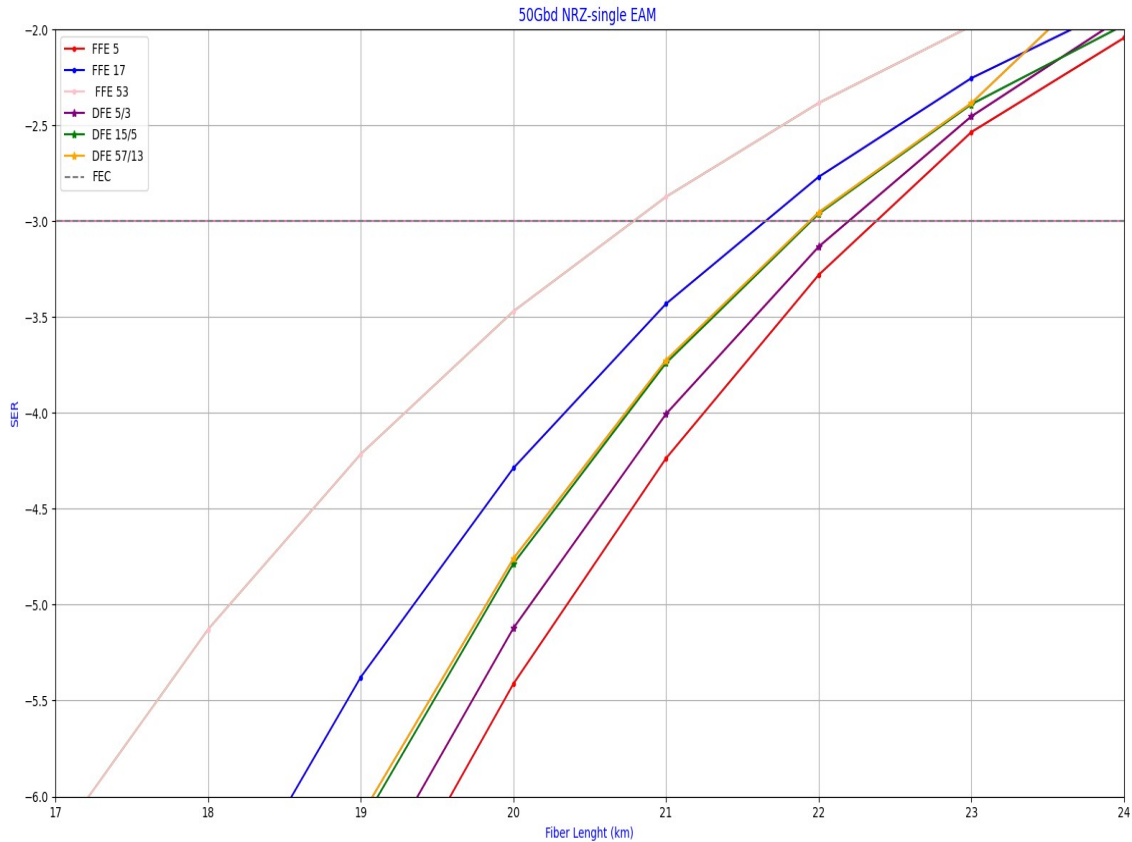
Για σχήμα διαμόρφωσης NRZ η μεταβλητή BitsPerSymbol είναι {1}, στον Equalizer το κατώφλι (Threshold) {0.5} και οι στάθμες (Levels) {0 1}.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της ισχύος του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει στην διάταξη.

Modulation	Laser's Average Power (Watt)	Power After Laser (dBm)	Power After EAM / Launched Power (dBm)
NRZ	0.01	9.99	5.1

Πίνακας 1: Single EAM- NRZ. Οι τιμές της ισχύος του σήματος σε διάφορα σημεία της διάταξης

Μέσω των modules matplotlib και panda της Python έγινε η επεξεργασία των δεδομένων από το VPI και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα SER. Ακολουθεί το διάγραμμα SER vs Fiber Length για τα διαφορετικά φίλτρα του equalizer. Οι τιμές του SER είναι σε λογαριθμική κλίμακα (LOG10(SER)).



Εικόνα 15: Διάγραμμα SER vs Fiber Length για Single EAM και NRZ σχήμα διαμόρφωσης

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι για τα 21 Km οπτικής ίνας το SER βρίσκεται κάτω από το όριο FEC για τα περισσότερα φίλτρα του equalizer. Αξίζει λοιπόν να δούμε το διάγραμμα SER vs Received Optical Power (ROP) για τα 21 Km. Θα δούμε την μεταβολή της ισχύος του σήματος από την στιγμή που μεταδόθηκε μέχρι να ληφθεί από τον δέκτη, και αν είναι εντός Power Budget.

Για Launched Power, που είναι η ισχύς του σήματος μετά τον EAM, στα 5.1 dBm παίρνουμε τις τιμές SER που παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί.

Fiber Length(km)	19	20	21	22
ROP (dBm)	-18.66	-18.96	-19.26	-19.56
FFE 5 taps	1.47 E-07	3.87 E-06	5.8 E-05	5.26 E-04
FFE 17 taps	4.19 E-06	5.16 E-05	3.71 E-04	1.7 E-03
FFE 53 taps	6.1 E-05	3.39 E-04	1.34 E-03	4.14 E-03
DFE 5/3 taps	3.01 E-07	7.55 E-06	9.89 E-05	7.37 E-04
DFE 15/5 taps	7.03 E-07	1.64 E-05	1.82 E-04	1.09 E-03

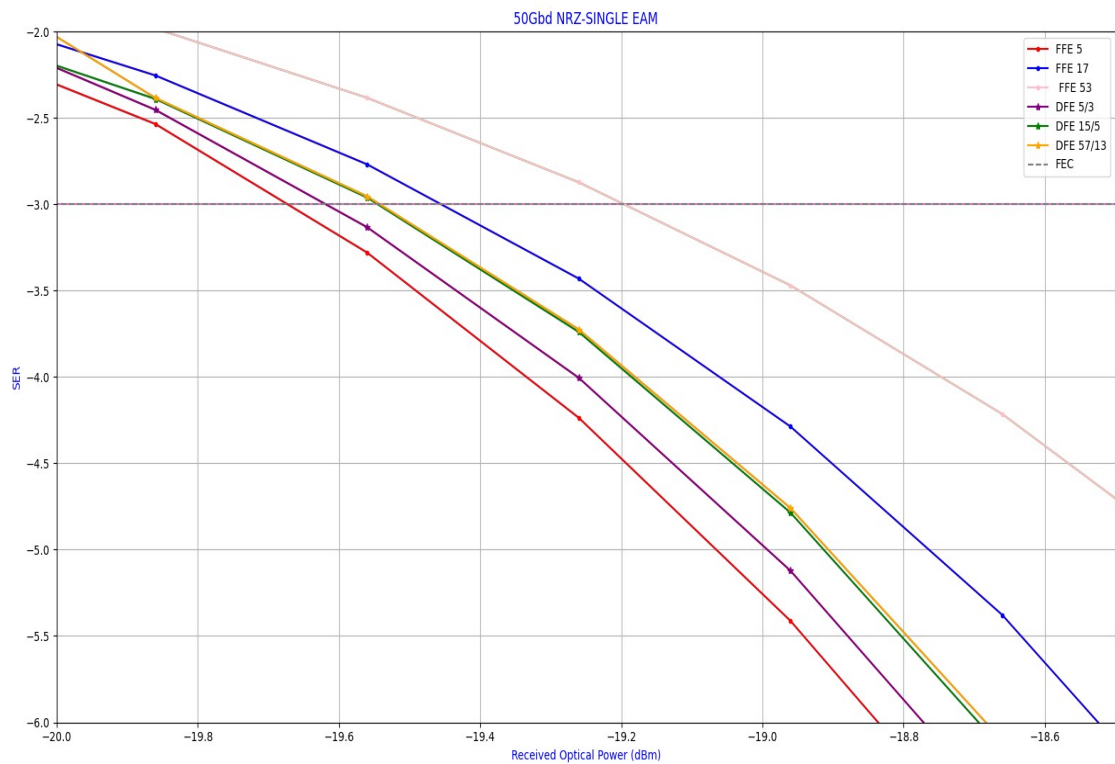
DFE 57/13 taps	7.86 E-07	1.74 E-05	1.88 E-04	1.11 E-03
----------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Πίνακας 2: Οι τιμές του SER για τα φίλτρα του Equalizer για 19 έως 22 km και τα αντίστοιχα ROP, στην περίπτωση του single EAM για NRZ σχήμα διαμόρφωσης

Για κάθε επιπλέον χιλιόμετρο οπτικής ίνας στη διάταξη η ισχύς του σήματος πέφτει κατά 0.3 dBm. Η ισχύ στα 21 km οπτικής ίνας είναι -19.26 dBm. Η μεταβολή της ισχύος του σήματος από το OLT στο ONU είναι $5.1 \text{ dBm} - (-19.26 \text{ dBm}) = 24.36 \text{ dBm}$, εντός Power Budget. Παρατηρούμε ότι τα φίλτρα FFE με 5 taps και DFE με 5/3 taps έχουν μικρότερο SER για τα ίδια χιλιόμετρα οπτικής ίνας και οπτική ισχύ σήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα φίλτρα, αποδίδουν λοιπόν καλύτερα στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει.

- Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι όσον αναφορά τα φίλτρα του Equalizer, ο FFE και DFE με τα λιγότερα taps λόγω της μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας και καθυστέρησης τους αποδίδουν καλύτερα από αυτούς με περισσότερα taps. Αυτό ίσως συμβαίνει επειδή η διάταξη μπορεί να μην εισάγει έντονες παραμορφώσεις στο σήμα για να χρειάζεται πιο περίπλοκα φίλτρα με περισσότερα taps και υψηλότερη ικανότητα διόρθωσης. Βέβαια τα φίλτρα DFE έχουν ελαφρώς καλύτερη απόδοση από τα FFE, που υποδηλώνει ότι η ανατροφοδότηση του DFE βοηθάει στην καλύτερη απόδοση και διόρθωση των σφαλμάτων.

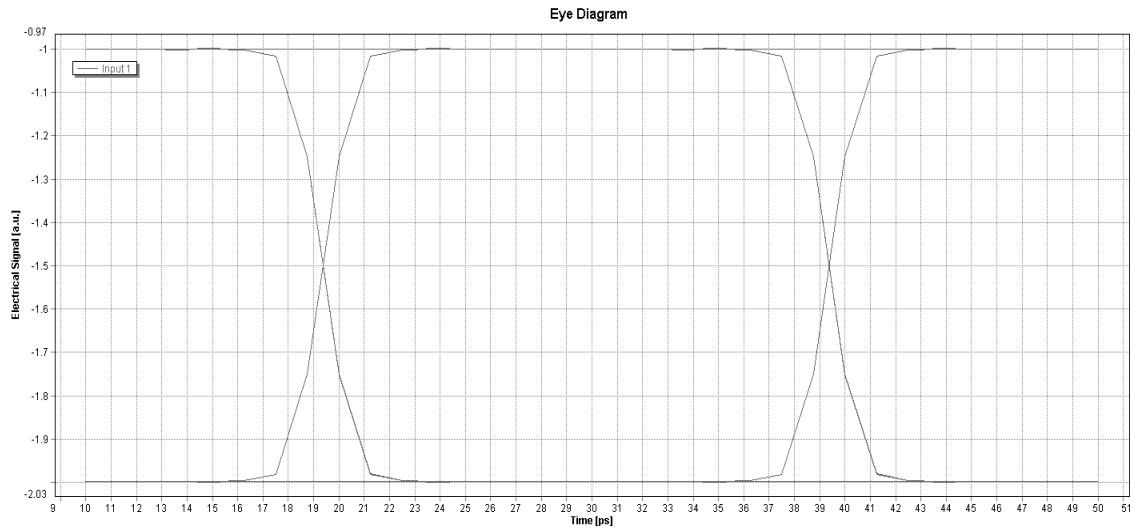
Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το διάγραμμα SER vs Received Optical Power γύρω από τα 21 km οπτικής ίνας. Όσο μειώνεται η ισχύς του σήματος τόσο αυξάνεται ο ρυθμός των λανθασμένων συμβόλων. Μέχρι και τα -19.40 dBm το SER είναι κάτω από το όριο του FEC, τιμή ισχύος που αντιστοιχεί στα 21 km οπτικής ίνας.



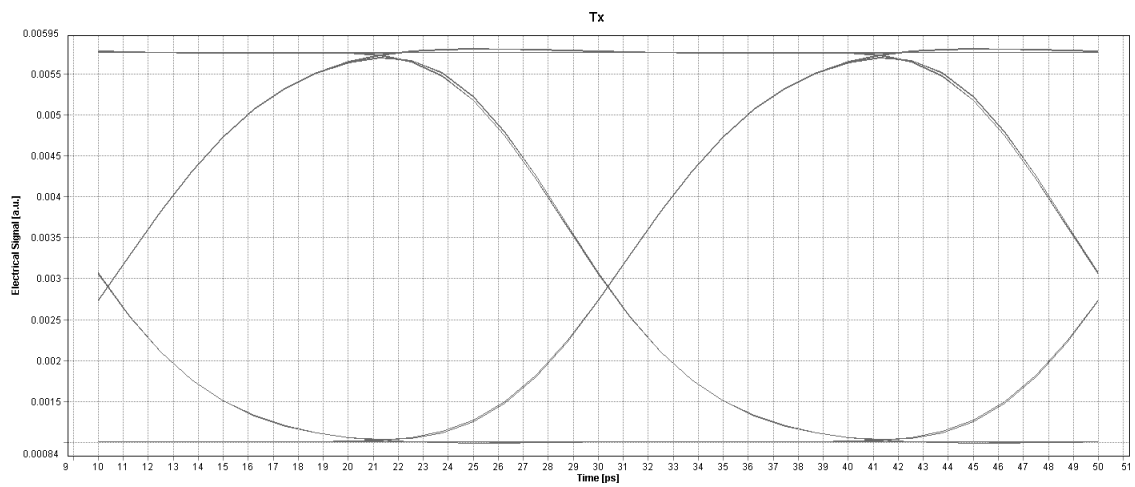
Εικόνα 16: Διάγραμμα SER vs Received Optical Power για Single EAM και NRZ σχήμα διαμόρφωσης

Το διάγραμμα ματιού είναι η οπτική απεικόνιση ψηφιακού σήματος σε παλμογράφο, που δειγματοληπτείται επαναληπτικά για να επιτευχθεί μια καλή αναπαράσταση της συμπεριφοράς του. Είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ποιοτική ανάλυση αυτού και μας παρέχει μια άμεση αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος και μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για τη φύση των ατελειών του καναλιού [16].

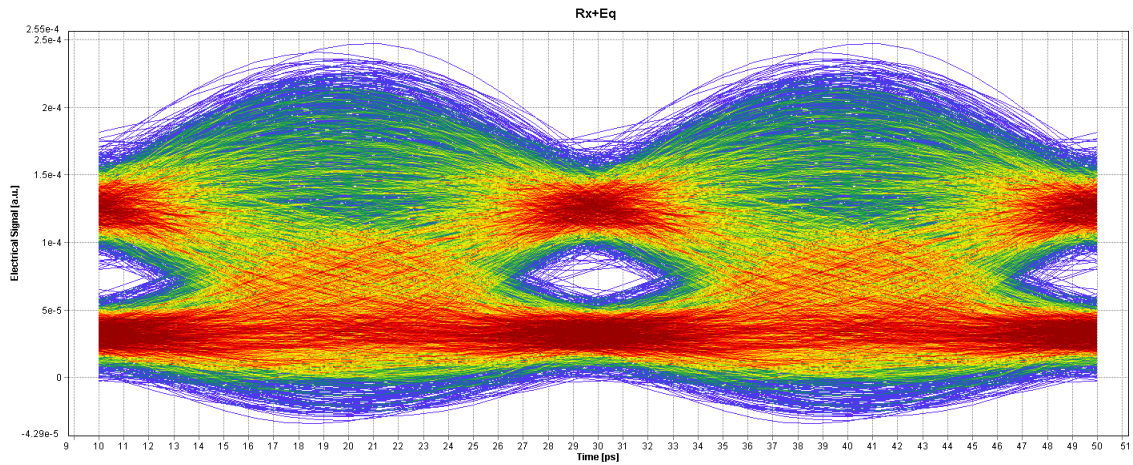
Τα eye diagrams του σήματος για τα διαφορετικά φίλτρα του equalizer για 21 km οπτικής ίνας παρατίθενται παρακάτω. Τα πρώτα δύο eye diagrams είναι ο παλμός που παράγει το PAM M και το σήμα αφού βγει από τον EAM.



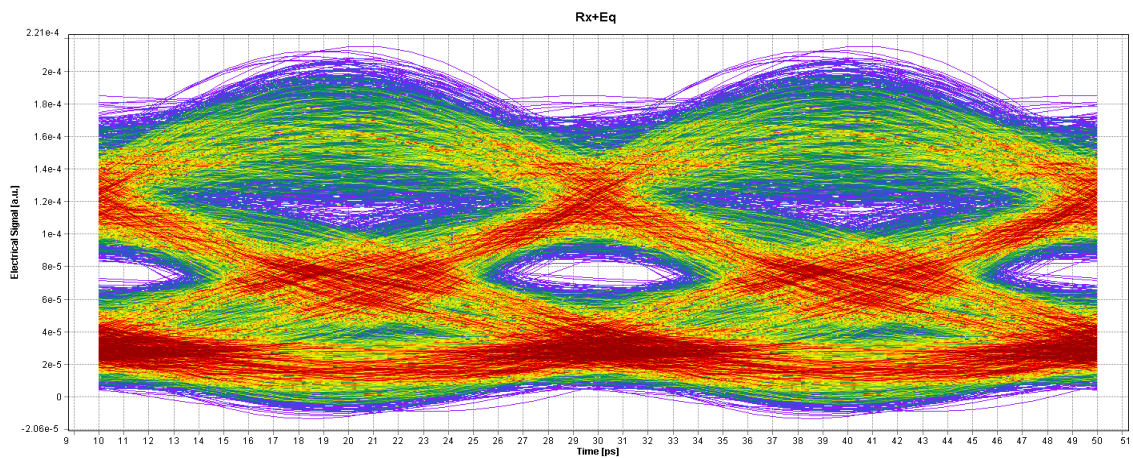
Εικόνα 17: Eye Diagram του παλμού για Single EAM, NRZ σχήμα διαμόρφωσης



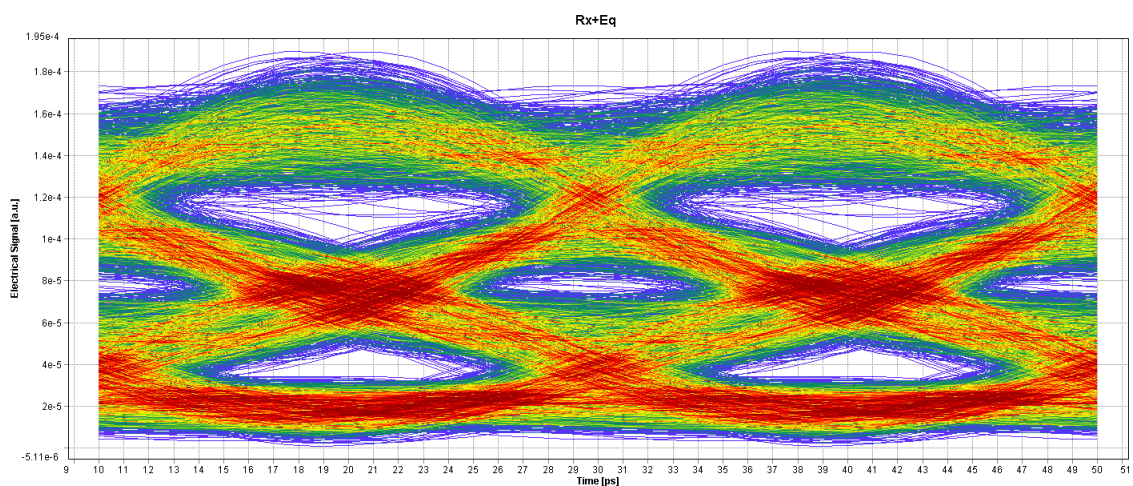
Εικόνα 18: Eye Diagram του σήματος μετά τον EAM για Single EAM, NRZ



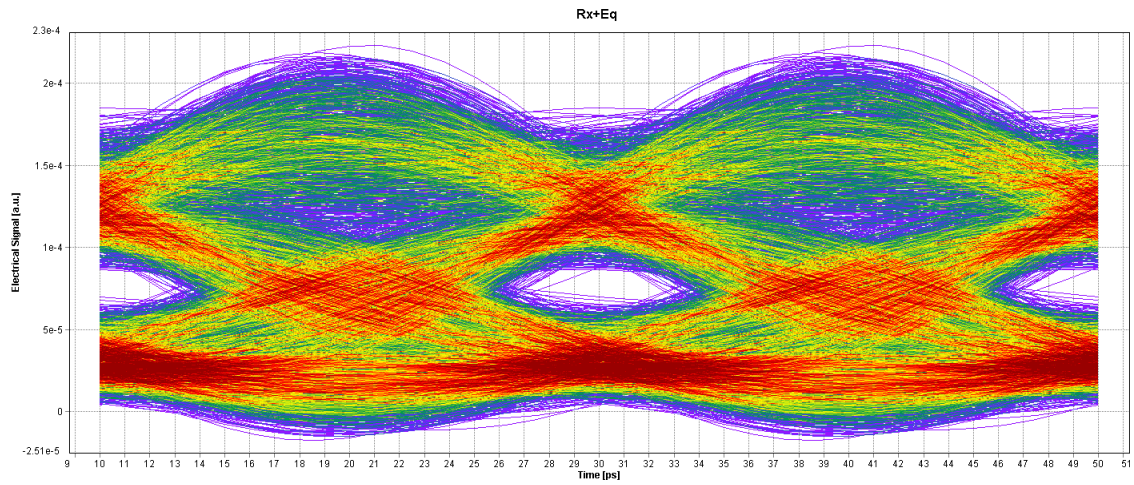
Εικόνα 19: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 5 taps, για Single EAM, NRZ



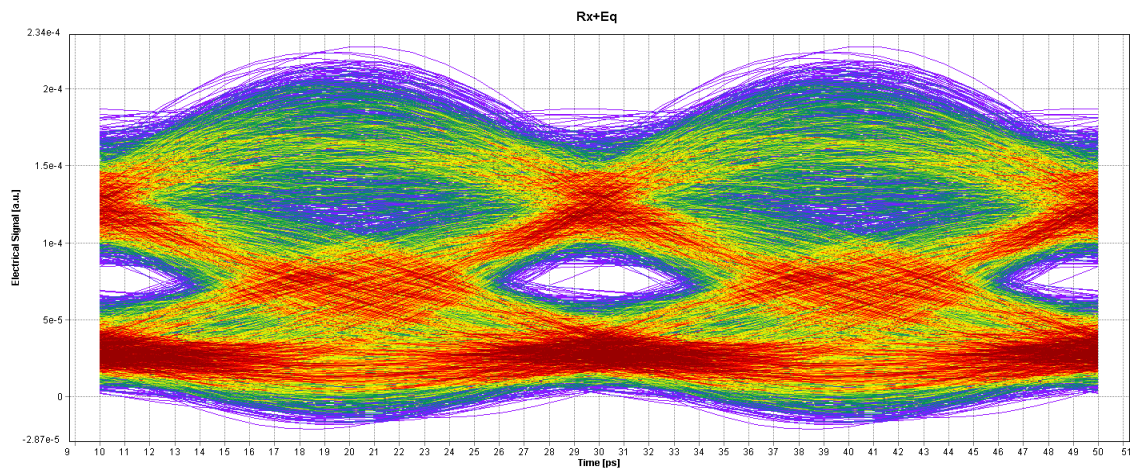
Εικόνα 20: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 17 taps, για Single EAM, NRZ



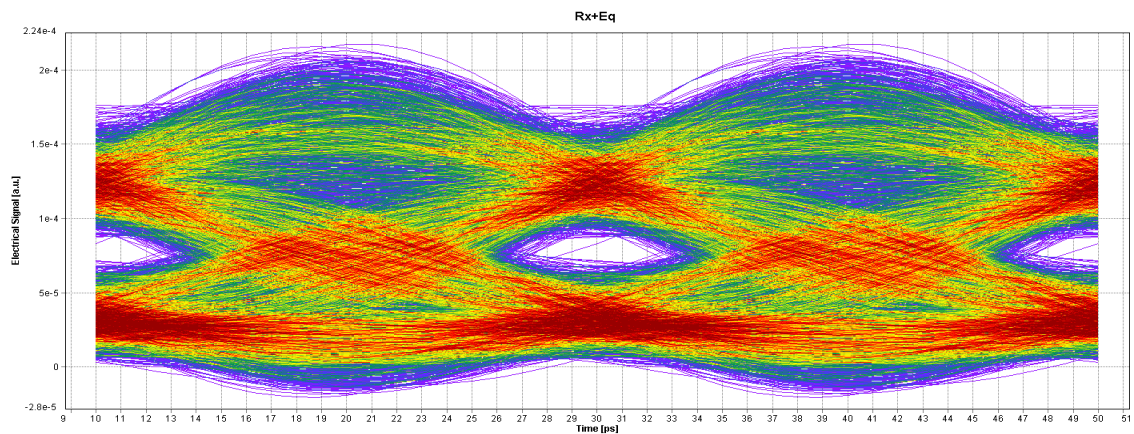
Εικόνα 21: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 53 taps, για Single EAM, NRZ



Εικόνα 22: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 5/3 taps, για Single EAM, NRZ



Εικόνα 23: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 15/5 taps, για Single EAM, NRZ



Εικόνα 24: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 57/13 taps, για Single EAM, NRZ

5.1.2 Single EAM- PAM4

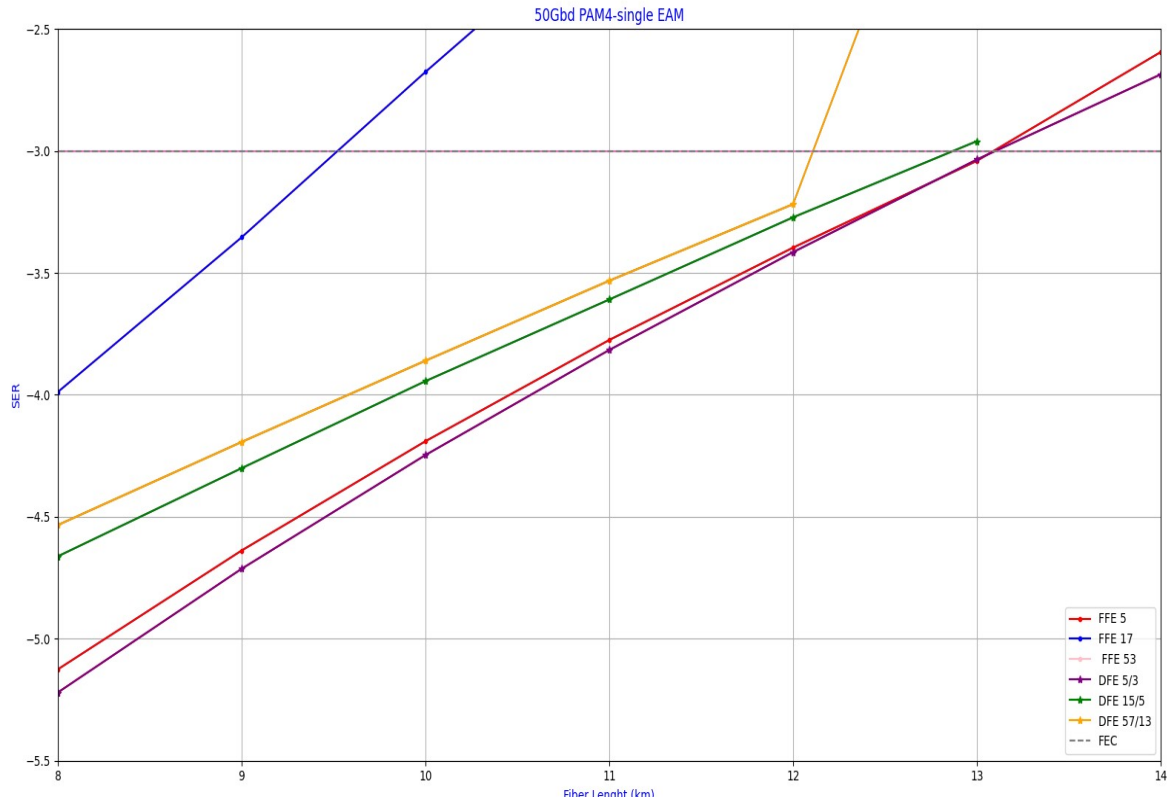
Επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία για την διάταξη του single EAM, αυτή την φορά για PAM4 σχήμα διαμόρφωσης. Το κάθε σύμβολο τώρα αναπαριστάται από δύο bits. Μεταβάλλουμε και τις στάθμες του equalizer, αφού έχουμε PAM4 διαμόρφωση το κατώφλι (Thresholds) αλλάζει από {0.5} σε {0.5 1.5 2.5} και οι στάθμες (Levels) από {0 1} σε {0 1 2 3}. Για τα έξι φίλτρα του Equalizer αλλάζουμε τα μήκη της οπτικής ίνας ώστε να δούμε την μεταβολή του SER. Έτσι προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα SER vs Fiber Length.

Στον πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε τις διαφορετικές τιμές της ισχύος του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει στην διάταξη.

Modulation	Laser's Average Power (Watt)	Power After Laser (dBm)	Power After EAM / Launched Power (dBm)
PAM4	0.01	9.99	4.93

Πίνακας 3: Single EAM- PAM4. Οι τιμές της ισχύος του σήματος σε διάφορα σημεία της διάταξης

Βλέπουμε ότι η ισχύς μετά τον EAM στην PAM4 διαμόρφωση είναι ελαφρώς μικρότερη από την περίπτωση του NRZ σχήματος διαμόρφωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο PAM4 σχήμα διαμόρφωσης η ισχύς του σήματος πρέπει να κατανέμεται σε τέσσερα επίπεδα αντί για δύο. Συνεπώς, μειώνεται η μέση ισχύς του σήματος για κάθε επίπεδο καθιστώντας το έτσι πιο ευαίσθητο σε απώλειες ισχύος.



Εικόνα 25: Διάγραμμα SER vs Fiber Length για Single EAM και PAM4 σχήμα διαμόρφωσης

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι για τα 12 Km οπτικής ίνας το SER βρίσκεται κάτω από το όριο FEC για τα περισσότερα φίλτρα του equalizer. Οι FFE με 17 και 53 taps δεν είναι καθόλου αποτελεσματικοί σε αυτή την περίπτωση. Αξίζει λοιπόν να δούμε το διάγραμμα SER vs Received Optical Power (ROP) για τα 12 Km. Θα δούμε την μεταβολή της ισχύος του σήματος από την στιγμή που μεταδόθηκε μέχρι να ληφθεί από τον δέκτη, και αν είναι εντός Power Budget.

Για Launched Power στα 4.93 dBm παίρνουμε τις τιμές SER που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Fiber Length(km)	10	11	12	13
ROP (dBm)	-16.13	-16.43	-16.73	-17.03
FFE 5 taps	6.45 E-05	1.68 E-04	4.01 E-04	9.1 E-05
FFE 17 taps	2.11 E-03	9.54 E-03	3.39 E-02	-
FFE 53 taps	-	-	-	-
DFE 5/3 taps	5.66 E-05	1.53 E-04	3.84 E-04	9.22 E-04
DFE 15/5 taps	1.14 E-04	2.46 E-04	5.34 E-04	1.1 E-03

DFE 57/13 taps	1.38 E-04	2.93 E-04	6.05 E-04	6.14 E-02
----------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Πίνακας 4: Οι τιμές του SER για τα φίλτρα του Equalizer για 10 έως 13 km και τα αντίστοιχα ROP, στην περίπτωση του single EAM για PAM4 σχήμα διαμόρφωσης

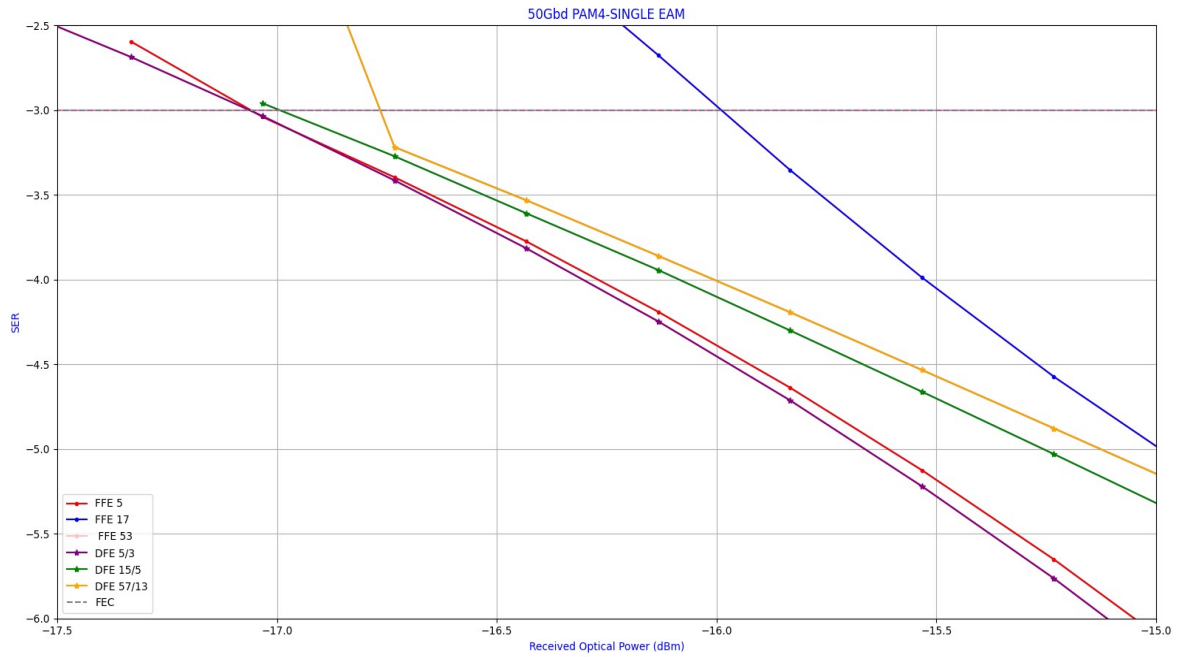
Η ισχύ στα 12 km οπτικής ίνας είναι -16.73 dBm . Η μεταβολή της ισχύος του σήματος από το OLT στο ONU είναι $4.93 \text{ dBm} - (-16.73 \text{ dBm}) = 21.66 \text{ dBm}$, εντός Power Budget. Παρατηρούμε ότι τα φίλτρα FFE με 5 taps και DFE με 5/3 taps έχουν πάλι μικρότερο SER για τα ίδια χιλιόμετρα οπτικής ίνας και οπτική ισχύ σήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα φίλτρα, αποδίδουν λοιπόν καλύτερα και σε αυτή την περίπτωση.

Παρατηρούμε ότι σε σχέση με το NRZ σχήμα διαμόρφωσης, τα χιλιόμετρα της οπτικής ίνας για τα οποία το SER είναι αποδεκτό είναι αρκετά λιγότερα, σχεδόν υποδιπλάσια. Αυτό οφείλεται στην διαφορά των στάθμεων μεταξύ των δύο σχημάτων διαμόρφωσης. Η NRZ διαμόρφωση είναι πιο ανθεκτική στον θόρυβο και την παραμόρφωση, καθώς η απόσταση μεταξύ των στάθμεων του σήματος είναι μεγαλύτερη. Η σαφής διαφορά που υπάρχει μεταξύ των στάθμεων διευκολύνει την ανίχνευση και μειώνει την πιθανότητα σφαλμάτων. Για αυτό άλλωστε βλέπουμε μεγάλη διαφορά στις τιμές του SER για τα ίδια χιλιόμετρα οπτικής ίνας και ισχύς του οπτικού σήματος στις δύο διαμόρφωσης. Στον Πίνακα 5 φαίνονται οι τιμές του SER για τα φίλτρα του equalizer που αποδίδουν καλύτερα, ώστε να γίνει η σύγκριση.

KM	10	11	12	13
FFE 5 taps NRZ	3.37 E-34	8.2 E-30	7.74 E-26	3.03 E-22
FFE 5 taps PAM4	6.45 E-05	1.68 E-04	4.01 E-04	9.1 E-05
DFE 5/3 taps NRZ	9.66 E-34	2.28 E-29	2.09 E-25	7.88 E-22
DFE 5/3 taps PAM4	5.66 E-05	1.53 E-04	3.84 E-04	9.22 E-04

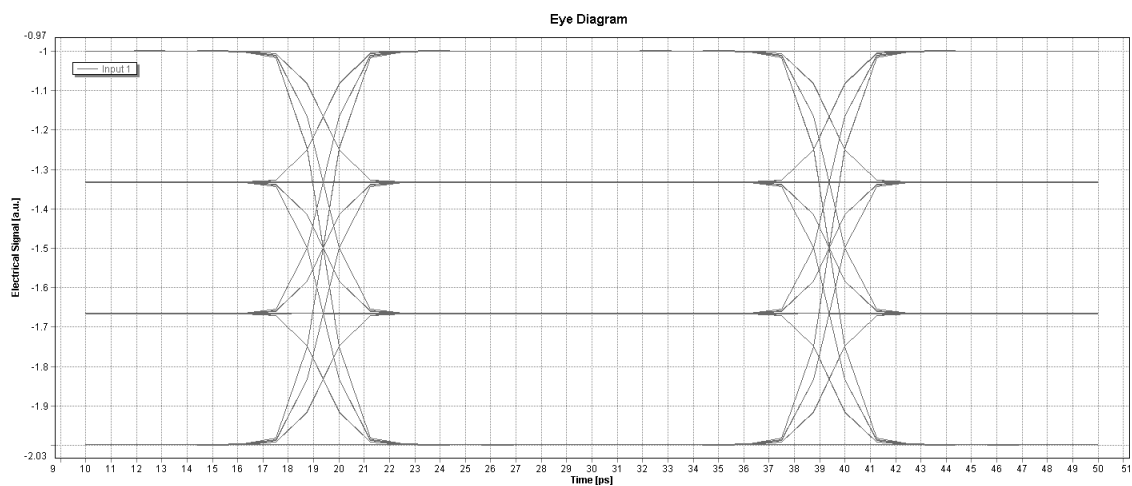
Πίνακας 5: Τιμές του SER για FFE 5 taps και DFE 5/3 taps, για NRZ και PAM4 διαμόρφωση

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το διάγραμμα SER vs Received Optical Power γύρω από τα 12 km οπτικής ίνας. Όσο μειώνεται η ισχύς του σήματος τόσο αυξάνεται ο ρυθμός των λανθασμένων συμβόλων. Μέχρι και τα -17.0 dBm το SER για τους πιο αποτελεσματικούς FFE και DFE είναι κάτω από το όριο του FEC, τιμή ισχύος που αντιστοιχεί στα 13 km οπτικής ίνας.

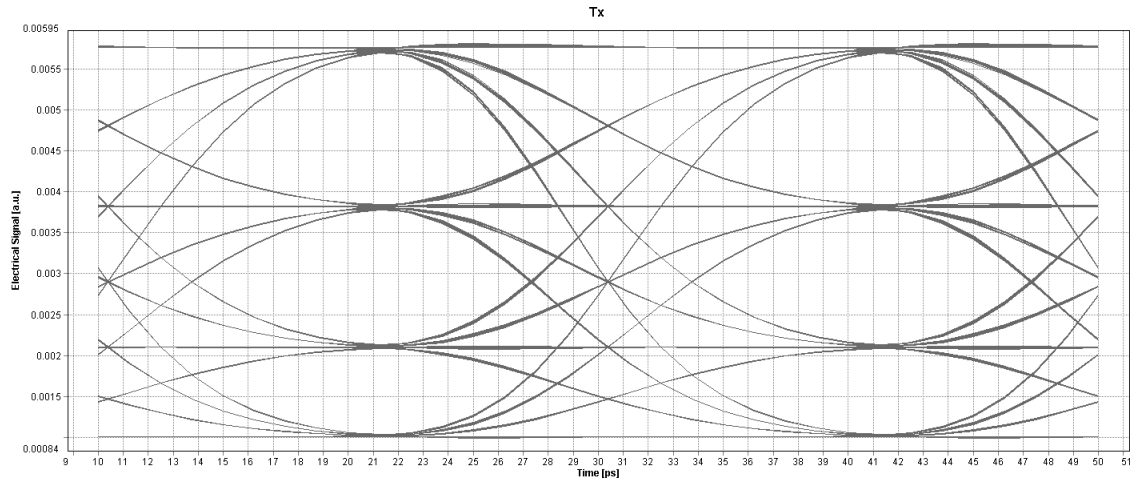


Εικόνα 26: Διάγραμμα SER vs Received Optical Power για Single EAM και PAM4 σχήμα διαμόρφωσης

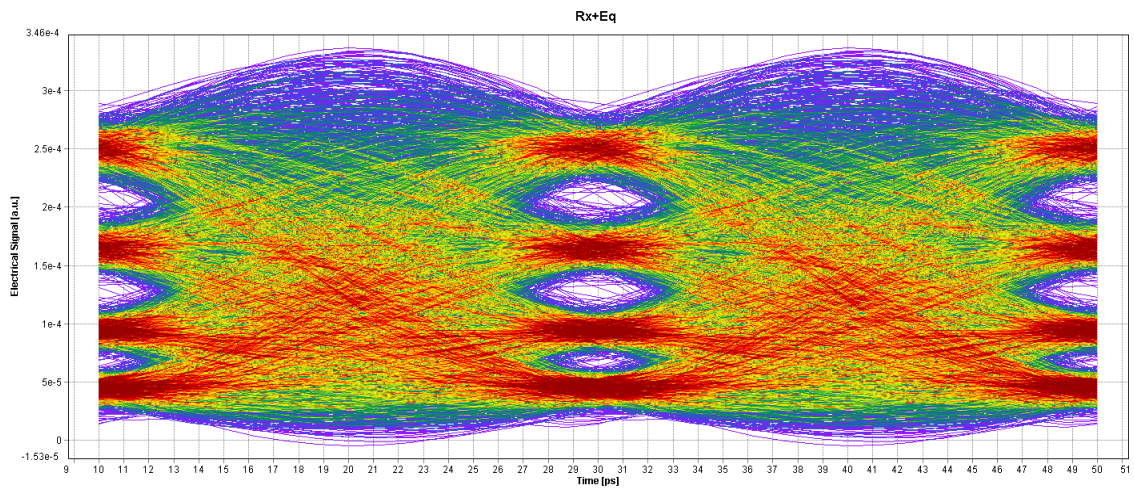
Τα eye diagrams του σήματος για τα διαφορετικά φίλτρα του equalizer παρατίθενται παρακάτω. Τα πρώτα δύο eye diagrams είναι ο παλμός που παράγει το PAM M και το σήμα αφού βγει από τον EAM.



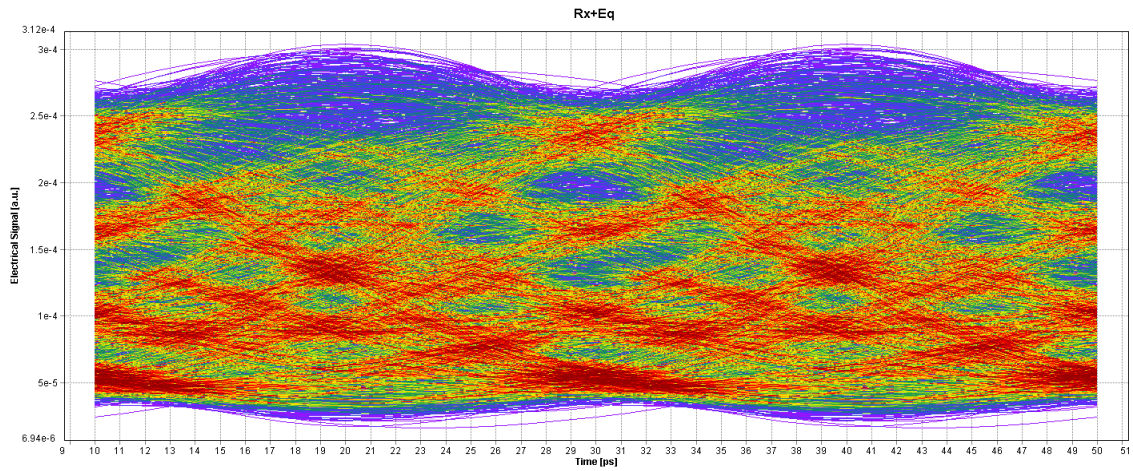
Εικόνα 27: Eye Diagram του παλμού για Single EAM, PAM4



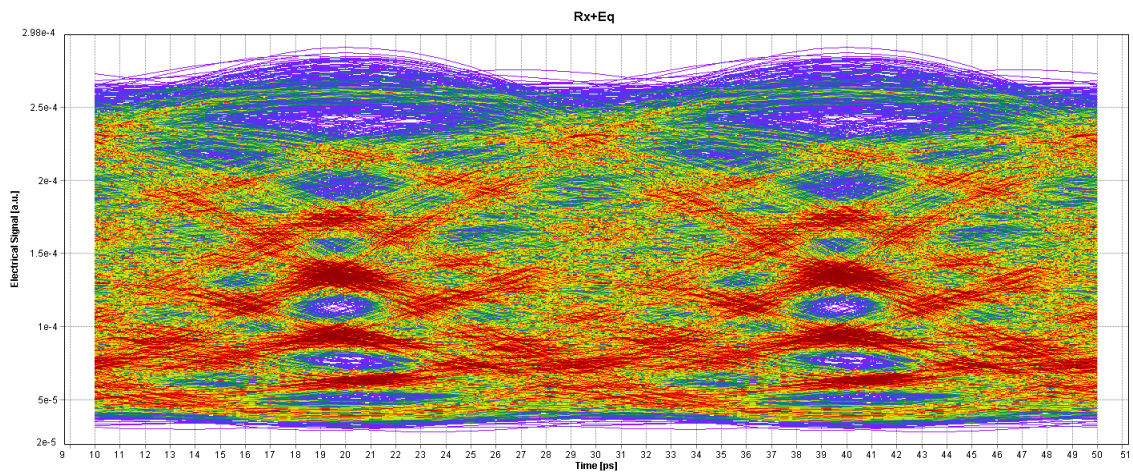
Εικόνα 28: Eye Diagram του σήματος μετά τον EAM για Single EAM, PAM4



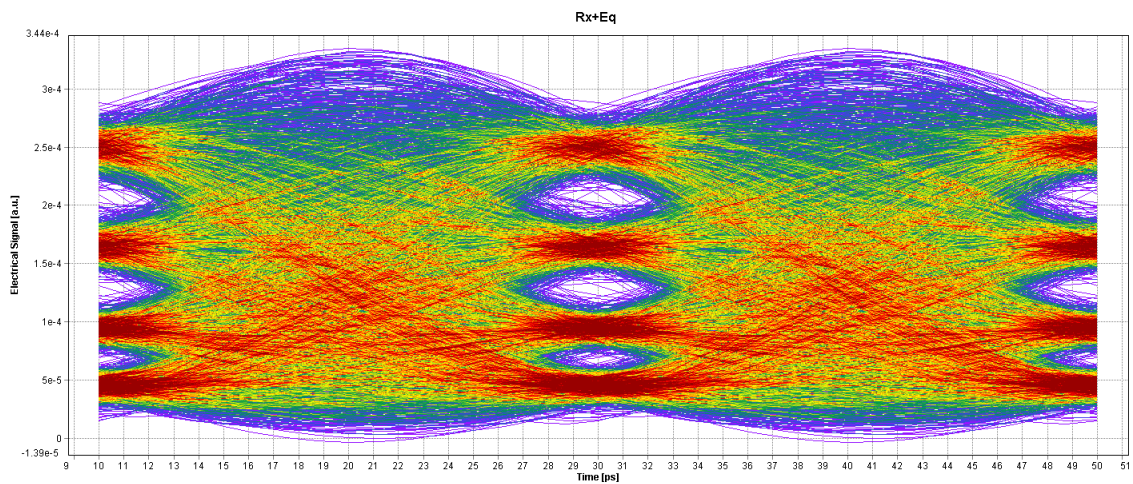
Εικόνα 29: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 5 taps, για Single EAM, PAM4



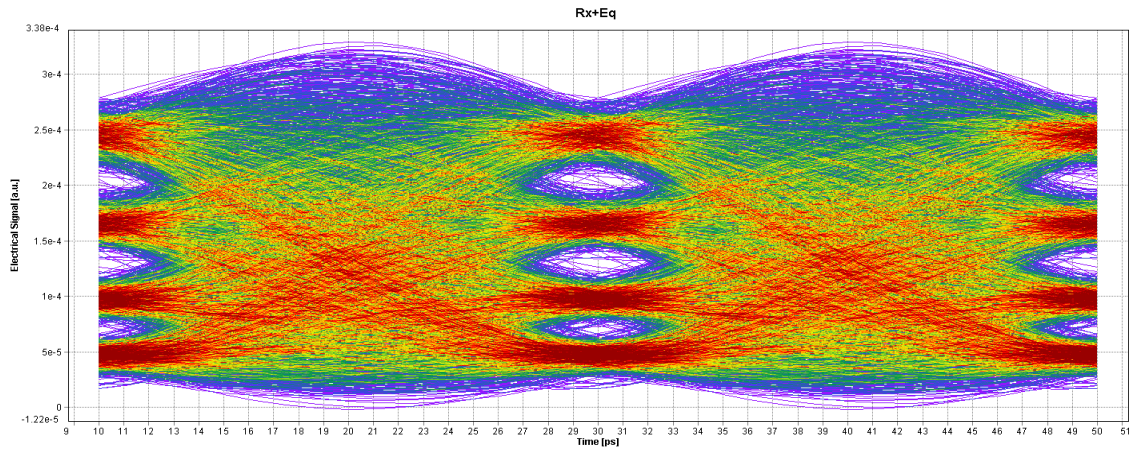
Εικόνα 30: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 17 taps, για Single EAM, PAM4



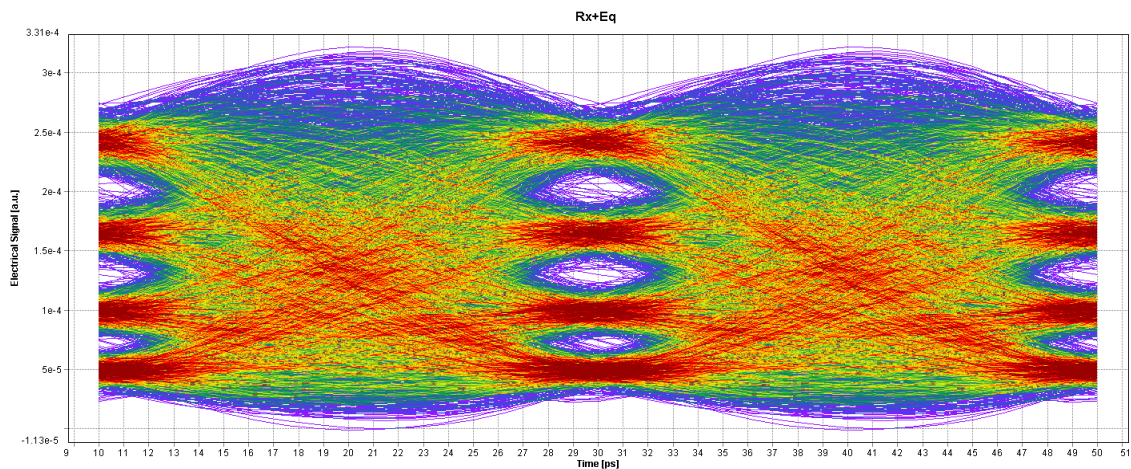
Εικόνα 31: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 53 taps, για Single EAM, PAM4



Εικόνα 32: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 5/3 taps, για Single EAM, PAM4



Εικόνα 33: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 15/5 taps, για Single EAM, PAM4



Εικόνα 34: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 57/13 taps, για Single EAM, PAM4

OMA_{outer} (Optical Modulation Amplitude outer) είναι παράμετρος που περιγράφει την ποιότητα του σήματος σε ένα eye diagram για PAM4 σχήματα διαμόρφωσης. Προκύπτει από την διαφορά της τιμής του μέσου όρου της υψηλότερης ισχύος με την μικρότερη των ενεργειακών στάθμεων (0 1 2 3). Όσο πιο υψηλή είναι η τιμή του OMA_{outer} τόσο καλύτερη είναι η διαφοροποίηση μεταξύ των ενεργειακών σταθμών, συνεπώς υποδηλώνει καλύτερη ποιότητα του σήματος.

Ακολουθεί ο Πίνακας με τις τιμές του OMA_{outer} για τα διαφορετικά φίλτρα του equalizer στα 12 km οπτικής ίνας.

Eye Diagram	OMA _{outer}
PAM M	0.1
PAM Tx	0.01

FFE 5 taps	2.06 E-04
FFE 17 taps	1.77 E-04
FFE 53 taps	1.6 E-04
DFE 5/3 taps	2.05 E-04
DFE 15/5 taps	1.98 E-04
DFE 57/13 taps	1.93 E-04

Πίνακας 6: Πίνακας με τις τιμές του *Optical Modulation Amplitude outer* για *single EAM* και *PAM4* διαμόρφωση στα 12 km

Από τα eye diagrams αλλά και από το *OMA_{outer}* επιβεβαιώνονται τα όσα είπαμε παραπάνω για τα φίλτρα του Equalizer. Οι FFE 5 taps και DFE 5/3 taps ισοσταθμίζουν πιο αποτελεσματικά το σήμα. Ωστόσο το σήμα μετά από τα DFE φίλτρα είναι ποιοτικά καλύτερα. Στα eye diagrams διακρίνονται ευκολότερα οι διαφορετικές στάθμες του σήματος.

5.2 EAM – MZM

Στη δεύτερη φάση έγιναν τα πειράματα στην διάταξη του EAM – MZM. Για να μπορέσουμε να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα μεταξύ των διατάξεων θέλουμε η ισχύς του σήματος μετά την δομή του EAM – MZM να είναι ίδια με αυτή στον single EAM. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να αυξήσουμε την ισχύ στο Laser κατά 3 dBm, δηλαδή το Average Power του laser να είναι στα 1.99 E-02 Watt. Η συνάρτηση μεταφοράς των EAM είναι η ίδια.

5.2.1 EAM- MZM - NRZ

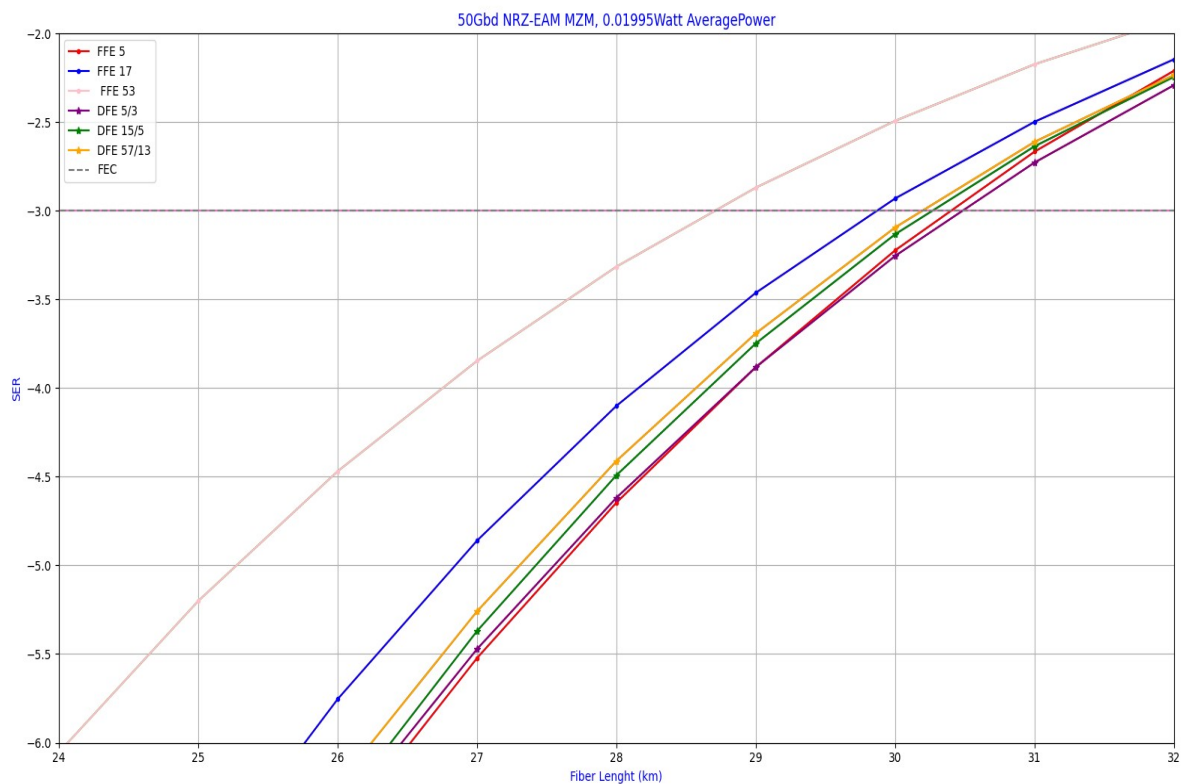
Προσαρμόζουμε ξανά τις στάθμες του equalizer για την NRZ διαμόρφωση και την μεταβλητή BitsPerSymbol στην τιμή 1. Μεταβάλλοντας το μήκος της οπτικής ίνας εξετάζουμε το SER για τα διαφορετικά φίλτρα του equalizer.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της ισχύς του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει στην διάταξη.

Modulation	Laser's Average Power (Watt)	Power After Laser (dBm)	Power After EAM / Launched Power (dBm)
NRZ	1.99 E-02	12.99	5.09

Πίνακας 7: EAM - MZM , NRZ. Οι τιμές της ισχύος του σήματος σε διάφορα σημεία της διάταξης

Ακολουθεί το διάγραμμα SER vs Fiber Length για τα διαφορετικά φίλτρα του equalizer. Οι τιμές του SER είναι σε λογαριθμική κλίμακα.



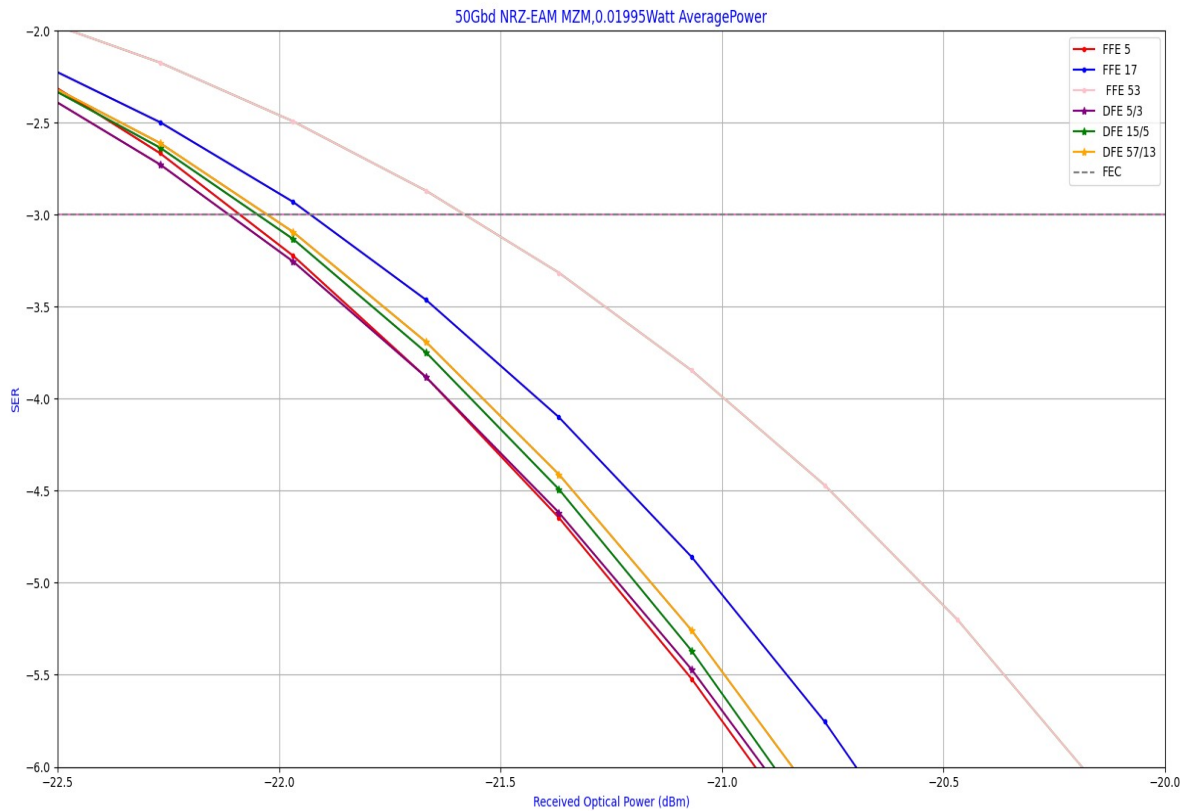
Εικόνα 35: Διάγραμμα SER vs Fiber Length για EAM-MZM και NRZ σχήμα διαμόρφωση

Από το παραπάνω διάγραμμα SER vs Fiber Length παρατηρούμε ότι για τα 29 Km οπτικής ίνας το SER βρίσκεται κάτω από το όριο FEC για τα περισσότερα φίλτρα του ισοσταθμιστή.

Η ισχύ στα 29 km οπτικής ίνας είναι -21.6687 dBm. Η μεταβολή της ισχύος του σήματος από το OLT στο ONU είναι 5.09 dBm $- (-21.66$ dBm) $= 26.76$ dBm , εντός Power Budget. Παρατηρούμε ότι τα φίλτρα FFE με 5 taps και DFE με 5/3 taps έχουν πάλι μικρότερο SER για τα ίδια χιλιόμετρα οπτικής ίνας και οπτική ισχύ σήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα φίλτρα, αποδίδουν λοιπόν καλύτερα και σε αυτή την περίπτωση.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το διάγραμμα SER vs Received Optical Power γύρω από τα 29 km οπτικής ίνας. Όσο μειώνεται η ισχύς του σήματος τόσο αυξάνεται ο ρυθμός των

λανθασμένων συμβόλων. Μέχρι και τα -22.0 dBm το SER είναι κάτω από το όριο του FEC, τιμή ισχύος που αντιστοιχεί στα 31 km οπτικής ίνας.



Εικόνα 36: Διάγραμμα SER vs Received Optical Power για EAM-MZM και NRZ σχήμα διαμόρφωση

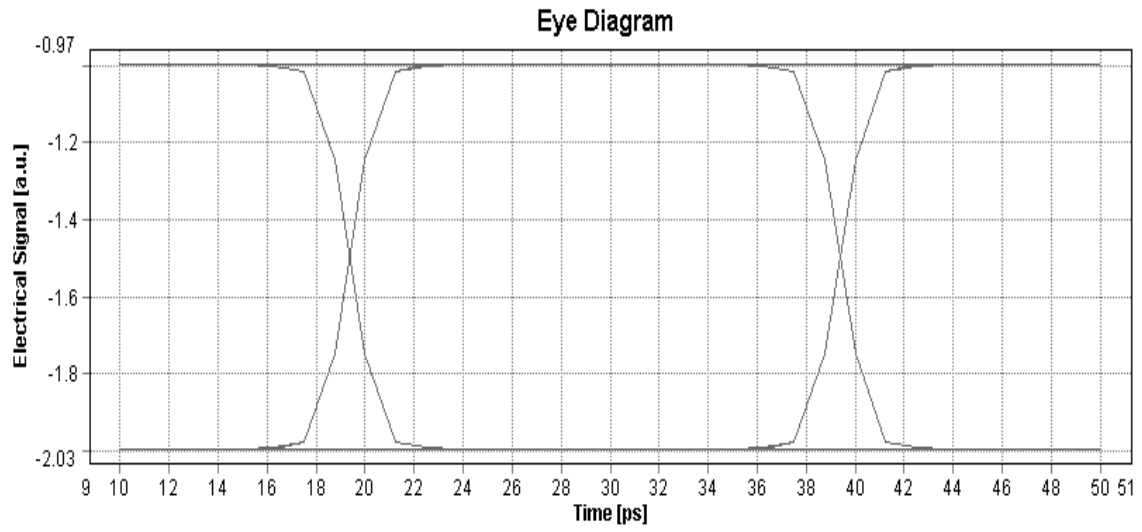
Στον παρακάτω Πίνακα μπορούμε να δούμε τις τιμές του SER για τα 19 έως 22 km οπτικής ίνας στην διάταξη του EAM-MZM. Το Launched Power είναι στα 5.09 dBm, σχεδόν ίση με την αντίστοιχη του single EAM.

Fiber Length(km)	19	20	21	22
ROP (dBm)	-18.66	-18.96	-19.26	-19.56
FFE 5 taps	1.02 E-18	1.58 E-16	1.55 E-14	9.79 E-13
FFE 17 taps	1.87 E-17	2.5 E-15	2.13 E-13	1.17 E-11
FFE 53 taps	1.84 E-13	9.62 E-12	3.11 E-10	6.42 E-09
DFE 5/3 taps	1.68 E-18	2.54 E-16	2.4 E-14	1.45 E-12
DFE 15/5 taps	9.22 E-19	1.46 E-16	1.5 E-14	1 E-12
DFE 57/13 taps	4.97 E-18	5.87 E-16	4.62 E-14	2.48 E-12

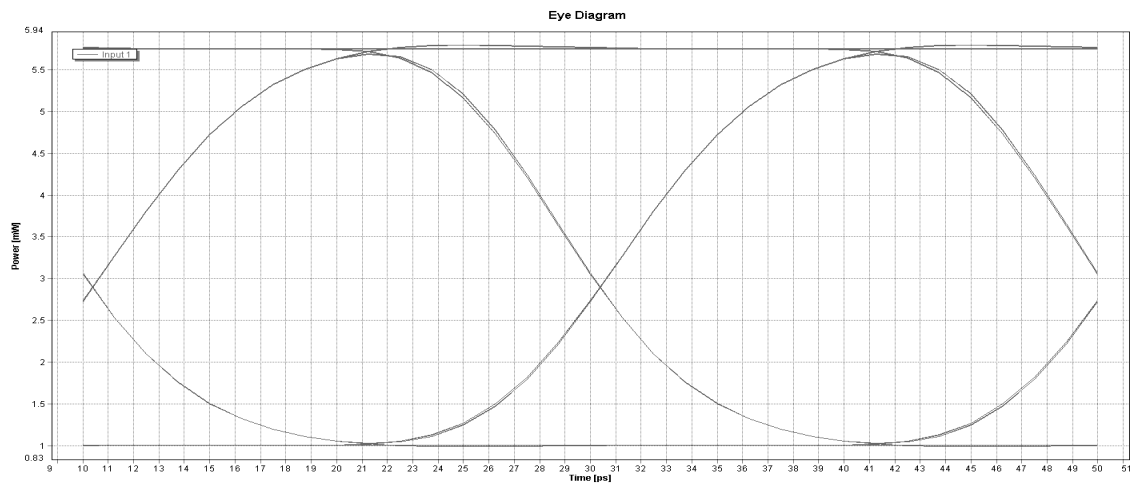
Πίνακας 8: Οι τιμές του SER για τα φίλτρα του Equalizer για 19 έως 22 km και τα αντίστοιχα ROP, στην περίπτωση του EAM-MZM για NRZ σχήμα διαμόρφωσης

- Συγκρίνοντας τα διάγραμμα SER vs Fiber Length του single EAM και του EAM-MZM, για το ίδιο σχήμα διαμόρφωσης NRZ, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του single EAM τα όρια του μήκους της οπτικής ίνας για το οποίο η διάταξη μπορεί να μεταδώσει σωστά ένα σήμα είναι μικρότερα. Η διάταξη του single EAM δηλαδή δεν μπορεί να εξυπηρετήσει εφαρμογές για μήκος οπτικής ίνας μεγαλύτερο από 22 km. Αντίθετα η διάταξη του EAM-MZM μπορεί να εξυπηρετήσει έως και 30 km οπτικής ίνας, διατηρώντας την ποιότητα του σήματος. Αυτό φαίνεται και από τους Πίνακες 2 και 8. Πράγματι αυτό περιμέναμε σαν αποτέλεσμα αφού η δομή EAM - MZM αντισταθμίζει το chirp που εισάγεται στο σήμα. Συνεπώς το σήμα έχει μεγαλύτερη αντοχή σε φαινόμενα χρωματικής διασποράς κατά την μετάδοση του και μειώνεται η πιθανότητα συμβολικής παρεμβολής. Εξασφαλίζεται λοιπόν η ακριβειότητα του σήματος, όπως φαίνεται κιόλας εκ του αποτελέσματος.

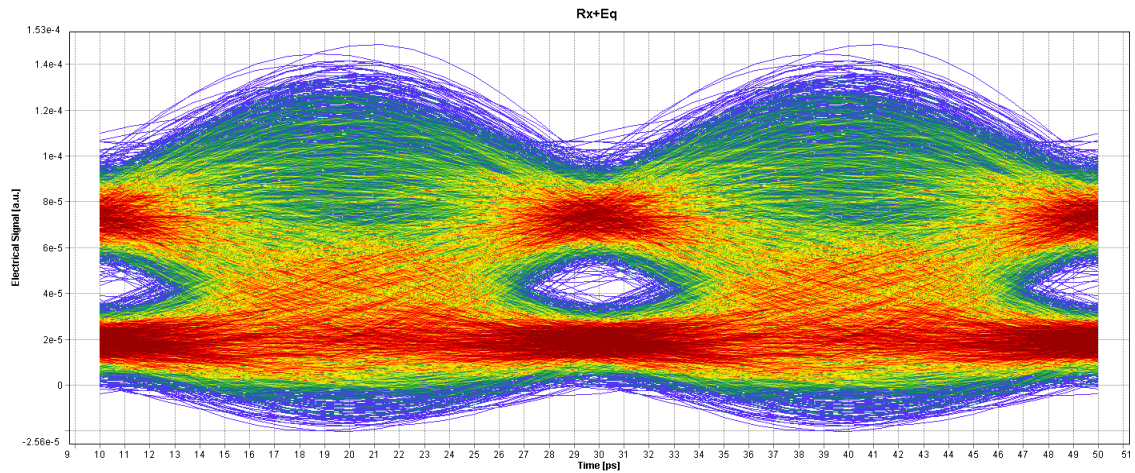
Τα eye diagrams του σήματος μετά την διάταξη του EAM-MZM και για διαφορετικά φίλτρα του equalizer στα 29 km οπτικής ίνας παρατίθενται παρακάτω.



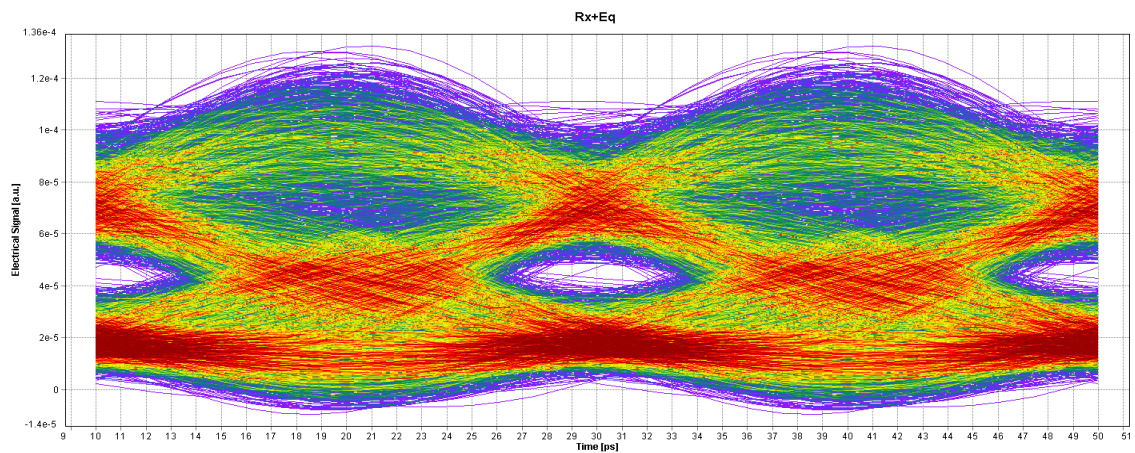
Εικόνα 37: Eye Diagram του παλμού για EAM-MZM, NRZ σχήμα διαμόρφωσης



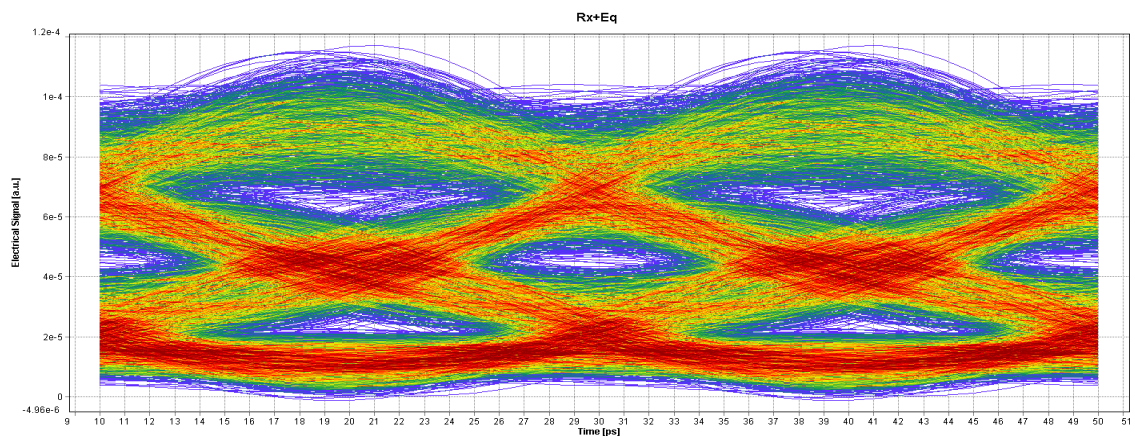
Εικόνα 38: Eye Diagram του σήματος μετά τον EAM για EAM-MZM, NRZ



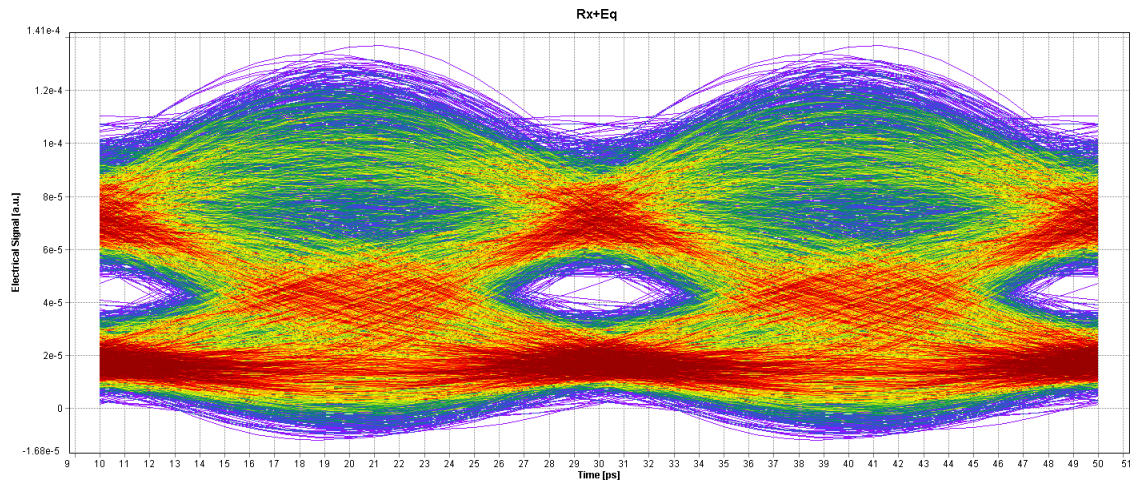
Εικόνα 39: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 5 taps, για EAM-MZM, NRZ



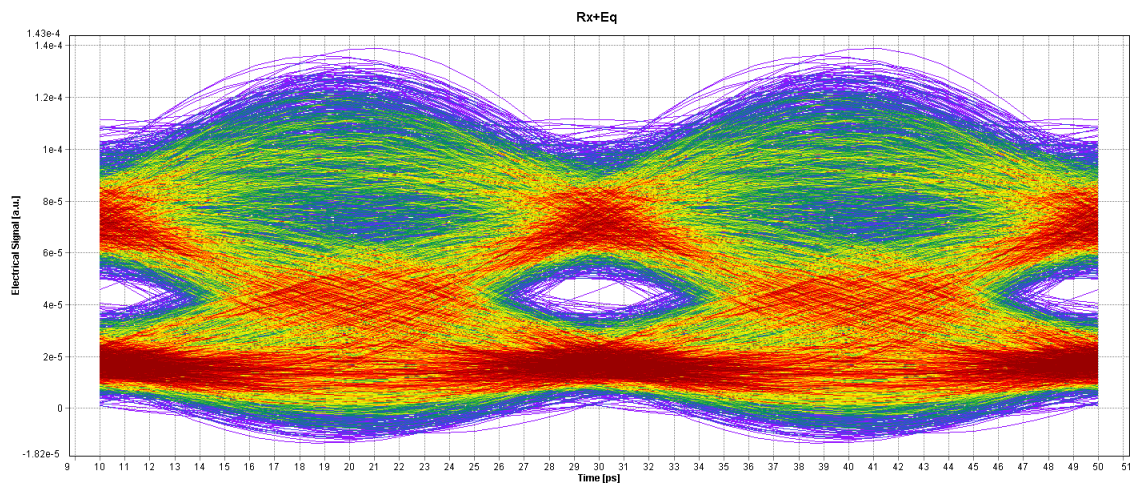
Εικόνα 40: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 17 taps, για EAM-MZM, NRZ



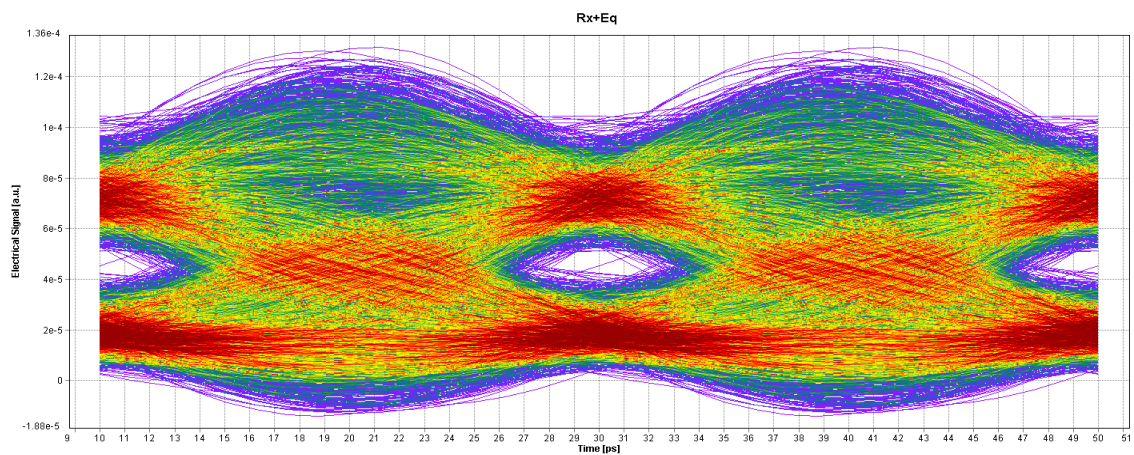
Εικόνα 41: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 53 taps, για EAM-MZM, NRZ



Εικόνα 42: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 5/3 taps, για EAM-MZM, NRZ



Εικόνα 43: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 15/5 taps, για EAM-MZM, NRZ



Εικόνα 44: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 57/13 taps, για EAM-MZM, NRZ

Από τα eye diagrams παρατηρούμε ότι ο FFE με τα περισσότερα taps (57 taps) διατηρεί την ποιότητα του σήματος και διακρίνεται οπτικά καλύτερα το σήμα.

5.2.2 EAM-MZM – PAM4

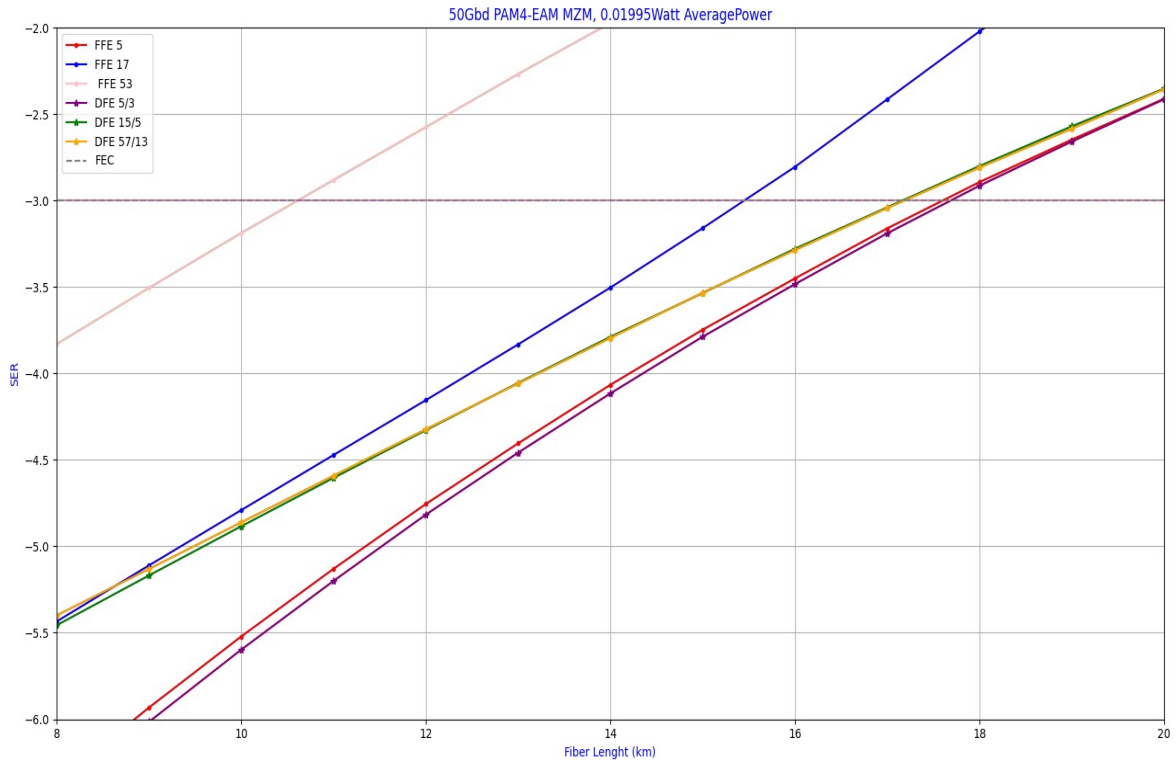
Τέλος επαναλάβουμε τα πειράματα στην διάταξη του EAM – MZM για PAM4 σχήμα διαμόρφωσης. Ο equalizer παραμετροποιήθηκε για την περίπτωση του PAM4, αλλάζοντας τις στάθμες και το κατώφλι, όπως και η μεταβλητή συστήματος Bits Per Symbol σε 2. Η διαδικασία είναι πάλι η ίδια.

Στον παρακάτω πίνακα είναι οι τιμές της ισχύος του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει στην διάταξη. Η ισχύς μετά την διάταξη του EAM-MZM είναι μικρότερη από ότι στην NRZ διαμόρφωση για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο του single EAM. Σε σχέση με τον single EAM με PAM4 διαμόρφωση το Launched Power είναι μικρότερο κατά 8 E-03 dBm περίπου, όπου το θεωρούμε ίδιο.

Modulation	Laser's Average Power (Watt)	Power After Laser (dBm)	Power After EAM / Launched Power (dBm)
PAM4	1.99 E-02	12.99	4.92

Πίνακας 9: EAM - MZM , PAM4. Οι τιμές της ισχύος του σήματος σε διάφορα σημεία της διάταξης

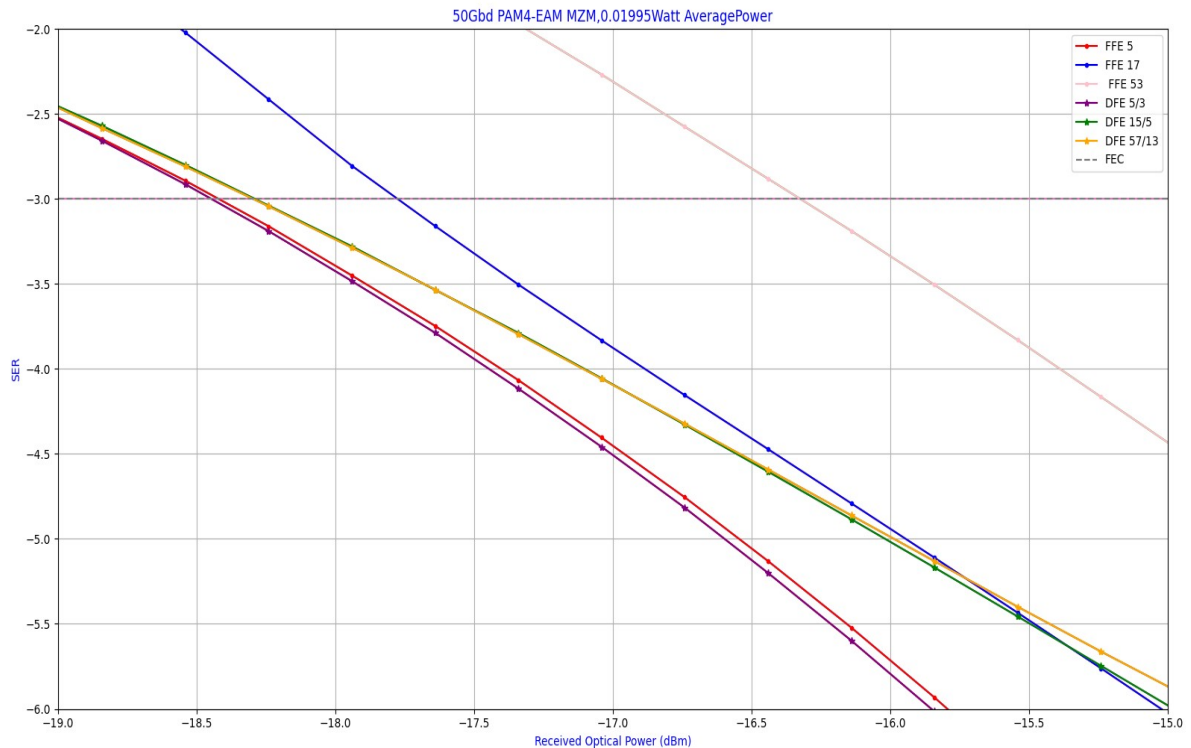
Για κάθε φίλτρο του equalizer μεταβάλλουμε το μήκος της οπτικής ίνας. Λαμβάνοντας το SER σε κάθε βήμα βρήκαμε τα μήκη της οπτικής ίνας για τα οποία το SER βρίσκεται κάτω από το όριο του FEC. Το διάγραμμα SER vs Fiber Length που προέκυψε είναι στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 45: Διάγραμμα SER vs Fiber Length για EAM-MZM και PAM4 σχήμα διαμόρφωση

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι για τα 16 Km οπτικής ίνας το SER βρίσκεται κάτω από το όριο FEC για τα περισσότερα φίλτρα του equalizer. Αξίζει λοιπόν να δούμε το διάγραμμα SER vs Received Optical Power (ROP) για τα 16 Km. Θα δούμε την μεταβολή της ισχύος του σήματος από την στιγμή που μεταδόθηκε μέχρι να ληφθεί από τον δέκτη, και αν είναι εντός Power Budget.

Η ισχύ στα 16 km οπτικής ίνας είναι 17.94 dBm. Η μεταβολή της ισχύος του σήματος από το OLT στο ONU είναι $4.92 \text{ dBm} - (-17.94 \text{ dBm}) = 22.86 \text{ dBm}$, εντός Power Budget. Παρατηρούμε ότι τα φίλτρα FFE με 5 taps και DFE με 5/3 taps έχουν πάλι μικρότερο SER για τα ίδια χιλιόμετρα οπτικής ίνας και οπτική ισχύ σήματος σε σχέση με τα υπόλοιπα φίλτρα, αποδίδουν λοιπόν καλύτερα και σε αυτή την περίπτωση. Σε σχέση με την NRZ διαμόρφωση οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με την περίπτωση του single EAM.



Εικόνα 46: Διάγραμμα SER vs Received Optical Power για EAM-MZM και PAM4 σχήμα διαμόρφωση

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε το διάγραμμα SER vs Received Optical Power γύρω από τα 16 km οπτικής ίνας. Όσο μειώνεται η ισχύς του σήματος τόσο αυξάνεται ο ρυθμός των λανθασμένων συμβόλων. Μέχρι και τα -18.50 dBm το SER για τους πιο αποτελεσματικούς FFE και DFE είναι κάτω από το όριο του FEC, τιμή ισχύος που αντιστοιχεί στα 18 km οπτικής ίνας.

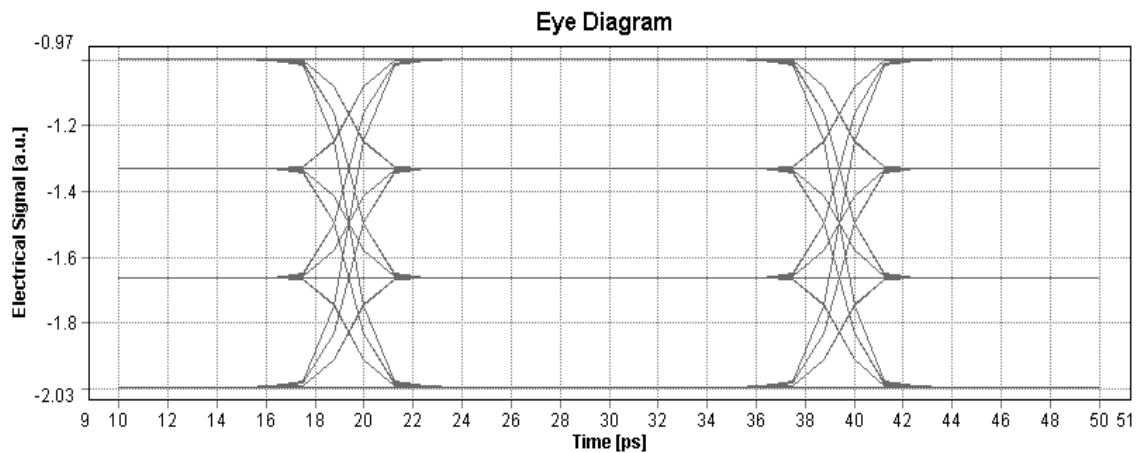
Για Launched Power στα 4.92 dBm παίρνουμε τις τιμές SER που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 10.

Fiber Length(km)	10	11	12	13
ROP (dBm)	-16.14	-16.44	-16.74	-17.04
FFE 5 taps	3.01 E-06	7.41 E-06	1.76 E-05	3.94 E-05
FFE 17 taps	1.62 E-05	3.37 E-05	7.01 E-05	1.47 E-04
FFE 53 taps	6.49 E-04	1.32 E-03	2.66 E-03	5.4 E-03
DFE 5/3 taps	2.52 E-06	6.31 E-06	1.52 E-05	3.48 E-05
DFE 15/5 taps	1.31 E-05	2.49 E-05	4.7 E-05	8.81 E-05
DFE 57/13 taps	1.38 E-05	2.56 E-05	4.76 E-05	8.75 E-05

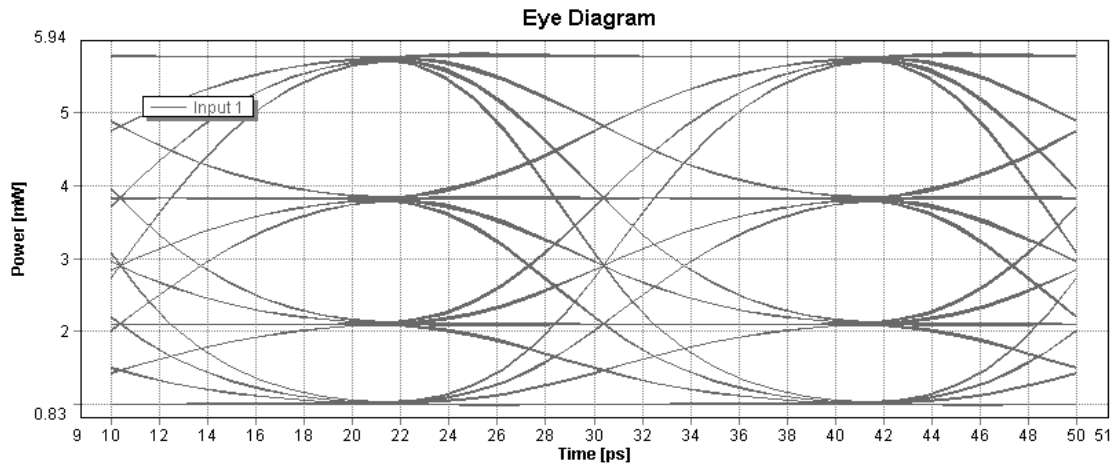
Πίνακας 10: Οι τιμές του SER για τα φίλτρα του Equalizer για 10 έως 13 km και τα αντίστοιχα ROP, στην περίπτωση του EAM-MZM για PAM4 σχήμα διαμόρφωσης

- Από τους Πίνακες 4 και 10, παρατηρούμε ότι οι τιμές του SER για τον single EAM είναι μεγαλύτερες σε σχέση με του EAM – MZM όπως και για το NRZ σχήμα διαμόρφωσης. Η διάταξη του single EAM εισάγει περισσότερες παραμορφώσεις στο σήμα που όπως δείχνουν οι μετρήσεις δεν μπορούν να διορθωθούν στον βαθμό που διορθώνονται από τον equalizer στην περίπτωση της διάταξης του EAM-MZM.

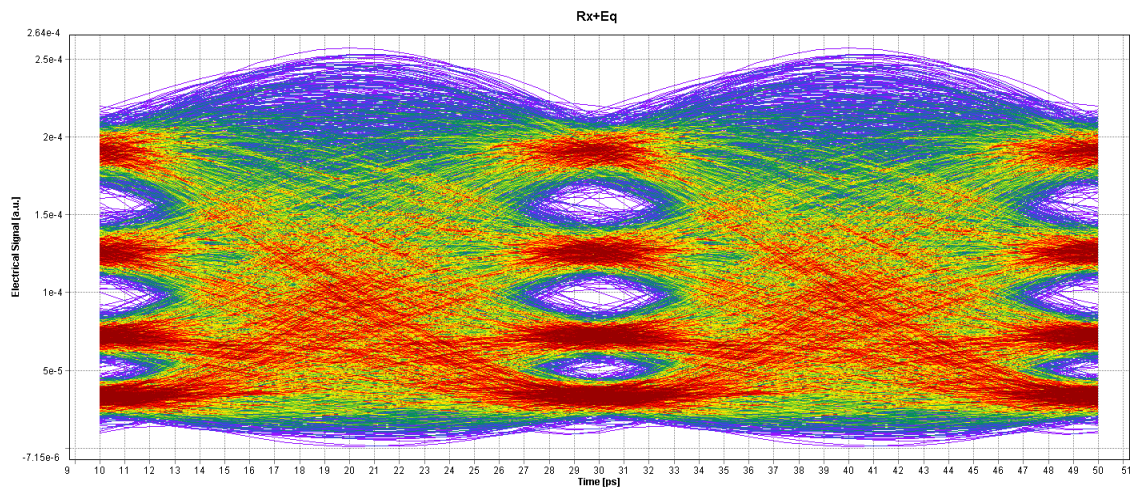
Τα eye diagrams του σήματος για τον EAM-MZM με PAM4 και 16 km μήκος οπτικής ίνας παρατίθενται παρακάτω. Στο eye diagram για τον FFE 53 taps δεν είναι διακριτές οι στάθμες του σήματος. Ο θόρυβος που έχει εισαχθεί στο σήμα είναι μεγάλος.



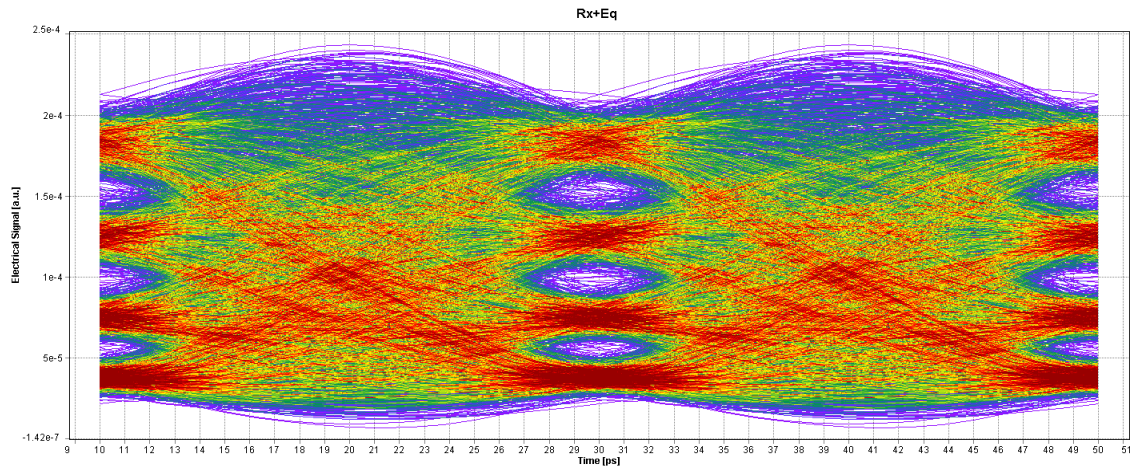
Εικόνα 47: Eye Diagram του παλμού για EAM-MZM, PAM4



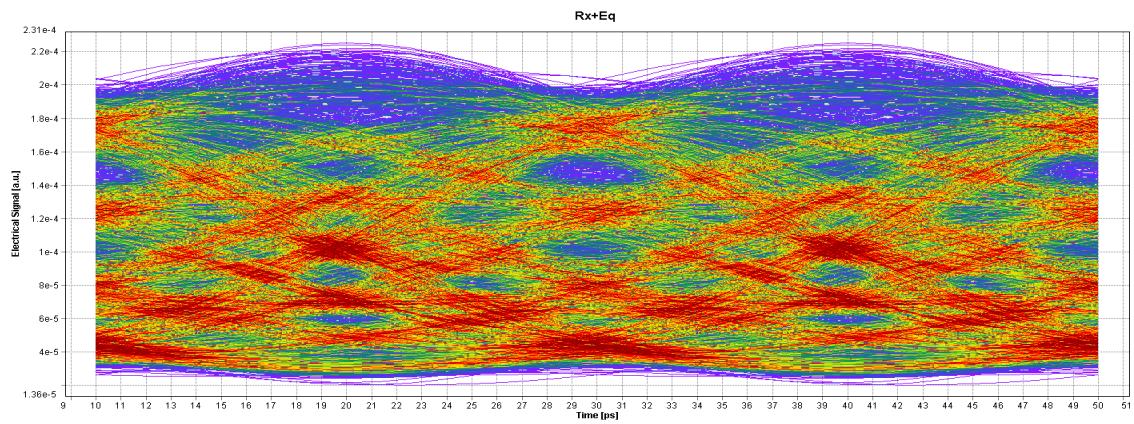
Εικόνα 48: Eye Diagram του σήματος μετά τον EAM για EAM-MZM, PAM4



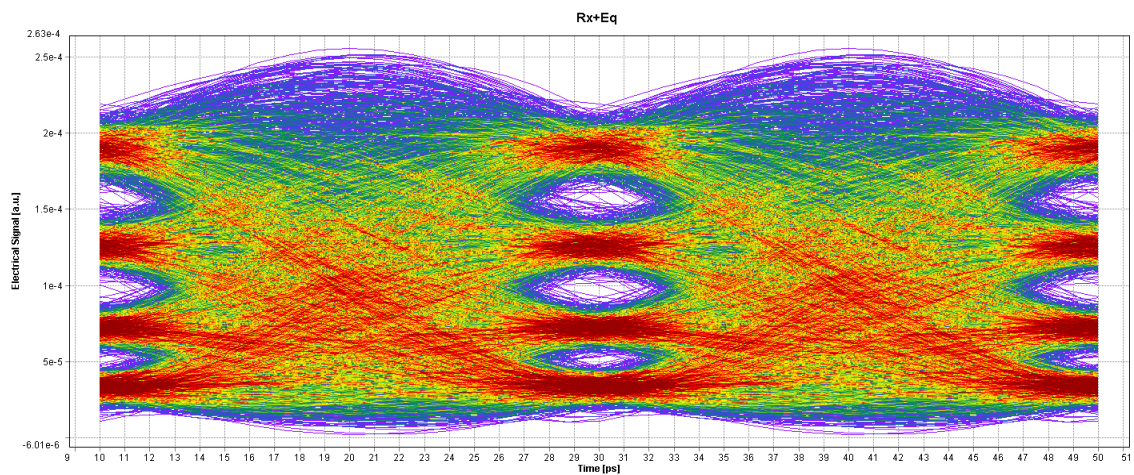
Εικόνα 49: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 5 taps, για EAM-MZM, PAM4



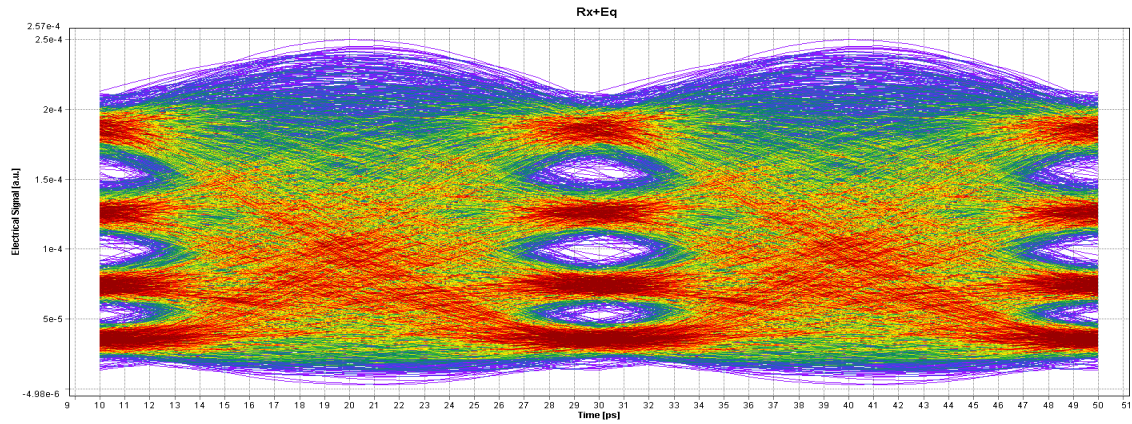
Εικόνα 50: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 17 taps, για EAM-MZM, PAM4



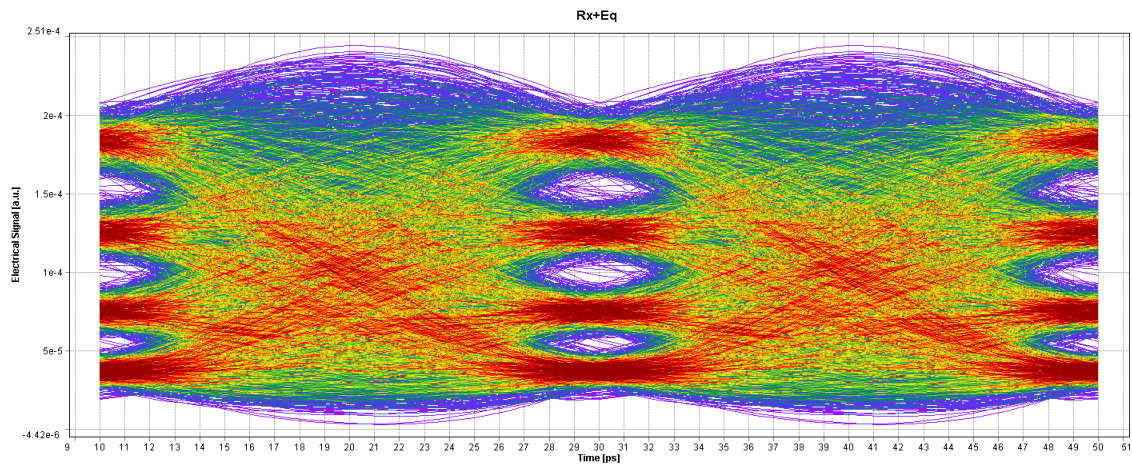
Εικόνα 51: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με FFE 53 taps, για EAM-MZM, PAM4



Εικόνα 52: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 5/3 taps, για EAM-MZM, PAM4



Εικόνα 53: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 15/5 taps, για EAM-MZM, PAM4



Εικόνα 54: Eye Diagram του σήματος μετά τον equalizer με DFE 57/13 taps, για EAM-MZM, PAM4

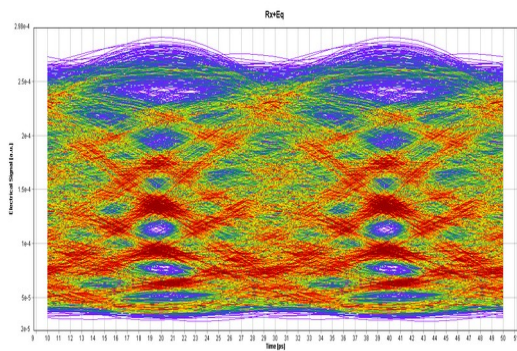
Ακολουθεί ο Πίνακας με τις τιμές του OMA_{outer} για τα διαφορετικά φίλτρα του equalizer στα 16 km οπτικής ίνας καθώς και για τα 12 km ώστε να μπορέσουμε να συγκρίνουμε την ποιότητα του σήματος μεταξύ του EAM-MZM και single EAM.

Eye Diagram	OMA_{outer} EAM-MZM/ 16km	OMA_{outer} EAM-MZM/ 12 km	OMA_{outer} singleEAM/ 12 km
PAM M	0.99		0.99
PAM Tx	4.6 E-03		4.6 E-03
FFE 5 taps	1.58 E-04	2.1 E-04	2.06 E-04
FFE 17 taps	1.44 E-04	1.95 E-04	1.77 E-04
FFE 53 taps	1.27 E-04	1.77 E-04	1.6 E-04
DFE 5/3 taps	1.57 E-04	2.08 E-04	2.05 E-04
DFE 15/5 taps	1.51 E-04	1.99 E-04	1.98 E-04

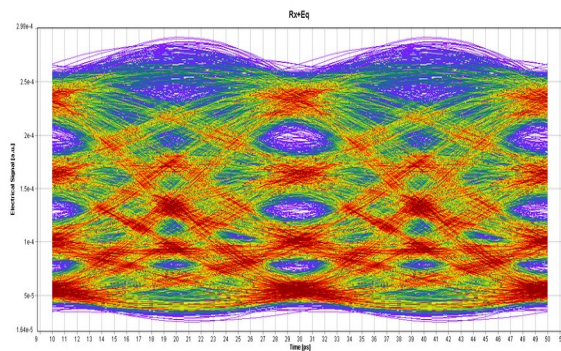
DFE 57/13 taps	1.46 E-04	1.91 E-04	1.93 E-04
----------------	-----------	-----------	-----------

Πίνακας 11: Πίνακας με τις τιμές του Optical Modulation Amplitude outer για EAM-MZM και PAM4 διαμόρφωση στα 16 km και στα 12 km, και single EAM PAM4 και 12 km.

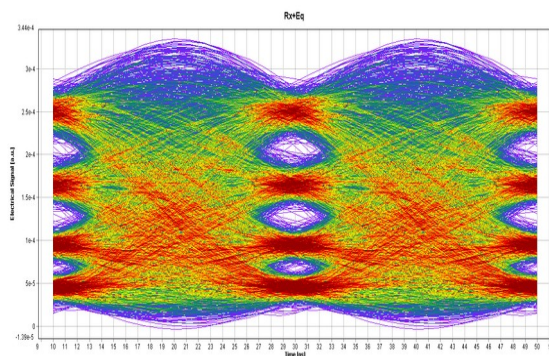
Η μεταβλητή OMA_{outer} είναι ενδεικτική της ποιότητας του σήματος. Συγκρίνοντας τις τιμές της για τις περιπτώσεις του EAM-MZM και του single EAM για το ίδιο μήκος οπτικής ίνας βλέπουμε ότι στην πρώτη περίπτωση είναι μεγαλύτερες. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα στην διάταξη του EAM-MZM διατηρεί την ποιότητα του, κατά συνέπεια η συμβολική παρεμβολή άρα και τα λάθη κατά την μετάδοση είναι λιγότερα. Για αυτό άλλωστε το SER είναι μικρότερο σε αυτή την περίπτωση. Αυτό μπορούμε να το δούμε και οπτικά από τα eye diagrams των δύο περιπτώσεων για το ίδιο μήκος οπτικής ίνας. Τα 12 km οπτικής ίνας είναι το όριο του single EAM. Παρακάτω παρατίθενται τα eye diagrams του EAM-MZM και του single EAM για FFE 53 taps και DFE 5/3 taps.



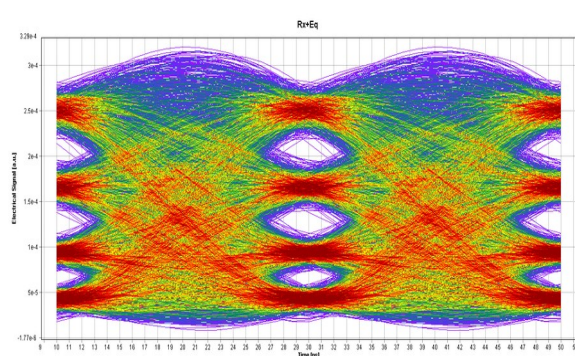
Εικόνα 55: Eye Diagram for 12 km fiber length, FFE 53 taps, single EAM, PAM4



Εικόνα 56: Eye Diagram for 12 km fiber length, FFE 53 taps, EAM-MZM, PAM4



Εικόνα 57: Eye Diagram for 12 km fiber length, DFE 5/3 taps, single EAM, PAM4



Εικόνα 58: Eye Diagram for 12 km fiber length, DFE 5/3 taps, EAM-MZM, PAM4

Στον Πίνακα που ακολουθεί είναι οι τιμές του chirp για τις δύο διατάξεις και τα δύο σχήματα διαμόρφωσης.

SET UP	CHIRP
Single EAM - NRZ	315.7
EAM MZM – NRZ	-32.2
Single EAM - PAM4	4.1
EAM MZM - PAM4	-16.17

Πίνακας 12: Οι τιμές του Chirp για κάθε διάταξη και σχήμα διαμόρφωσης

Η παράμετρος διασποράς της ίνας στις προσομοιώσεις είναι θετικού προσήμου. Η επίδραση του Chirp στον παλμό εξαρτάται από τα πρόσημα της παραμέτρου διασποράς και του Chirp. Αν οι δύο αυτές παράμετροι έχουν αντίθετο πρόσημο, ο παλμός αρχικά θα συμπυκνωθεί μέχρι ένα σημείο και έπειτα θα ξεκινήσει η διεύρυνσή του. Αντίθετα, αν έχουν ίδιο πρόσημο ο παλμός διευρύνεται περισσότερο και όχι απλά χρονικά. Αντίθετο πρόσημο έχουν στην περίπτωση του EAM-MZM, για αυτό άλλωστε το σήμα φτάνει στον δέκτη με καλύτερη ποιότητα.

Η αντιστάθμιση του chirp είναι κρίσιμη στα σύγχρονα συστήματα οπτικής επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα του σήματος, κατά συνέπεια να επεκταθούν οι αποστάσεις μετάδοσης και να υποστηριχθούν υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων.

6 Κεφάλαιο 6

Σύνοψη και Μελλοντική Εργασία

Χρησιμοποιώντας θεωρητική ανάλυση και προσομοιωτική μελέτη έγινε σύγκριση δύο διαφορετικών διατάξεων οπτικού πομπού με χρήση διαμορφωτών Ηλεκτροαπορρόφησης και ψηφιακή επεξεργασία σήματος για την διόρθωση λαθών κατά την μετάδοση, με τεχνολογία IM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection). Έγινε ανάλυση των δυνατοτήτων που παρέχει η κάθε μία. Πιο αναλυτικά, τα όρια της καθεμιάς ως προς το μήκος της οπτικής ίνας της διάταξης αλλά και ως προς το εύρος ζώνης μέσα στο οποίο λειτουργεί σωστά. Παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των δύο διατάξεων για διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης του σήματος αλλά και διαφορετικά φίλτρα του Equalizer. Από τις τιμές του λόγου των εσφαλμένων συμβόλων SER μπορέσαμε να συγκρίνουμε την απόδοση της κάθε περίπτωσης και να οδηγηθούμε σε συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα που μας έδωσαν προσομοιώσεις, που έγιναν στο περιβάλλον του VPI photonics, επιβεβαίωσαν την θεωρία και την αρχική μας θέση. Ο διαμορφωτής EAM-MZM εξαιτίας της αντιστάθμισης του Chirp που προσφέρει εξασφαλίζει καλύτερη ποιότητα σήματος.

Ένα επόμενο βήμα προς την εξέλιξη αυτής της διπλωματικής, θα ήταν η μελέτη των ίδιων διατάξεων σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης, πάνω από 50 GHz, συχνότητα η οποία ανήκει στη high band του 5G αλλά θεωρείται και κομμάτι των μελλοντικών 6G δικτύων. Στα 100GHz (100G PON), για παράδειγμα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και IM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection) και συνεκτικές τεχνολογίες (coherent). Οι δύο αυτές τεχνολογίες έχουν διαφορετικές προσεγγίσεις κατά την μετάδοση και την ανίχνευση του σήματος. Οι coherent τεχνολογίες προσφέρουν διαμόρφωση του σήματος σε πολλαπλές παραμέτρους πέρα από την ένταση του σήματος, όπως στη φάση και στην συχνότητα. Προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και καλύτερη απόδοση, ωστόσο λόγω της πολυπλοκότητας των modules που απαιτούν το κόστος είναι υψηλότερο σε σχέση με IM/DD προσεγγίσεις. Θα είχε ενδιαφέρον λοιπόν να δούμε την συμπεριφορά των δύο αυτών τεχνολογιών σε PON που υποστηρίζουν υψηλότερες ταχύτητες. Ένα πρώτο βήμα θα ήταν να αυξηθεί το εύρος ζώνης στο οποίο θα γίνουν οι προσομοιώσεις με τεχνολογίες IM/DD και σχήματα διαμόρφωσης τα ίδια που εξετάσαμε σε αυτή την διπλωματική. Στη συνέχεια για το ίδιο εύρος ζώνης να γίνει η μελέτη σε coherent τεχνολογίες.

Επίσης αξίζει να μελετήσουμε την αντικατάσταση του equalizer στην πλευρά του δέκτη στην υπάρχουσα διάταξη, με έναν all optical equalizer. Ο all optical equalizer υπόσχεται βελτίωση της ποιότητας του σήματος και καλύτερη διόρθωση του λόγου των εσφαλμένων συμβόλων SER. Αν και κάτι τέτοιο αυξάνει την πολυπλοκότητα της διάταξης, τα οφέλη ως προς την απόδοση και την αξιοπιστία είναι πολλά. Με αυτόν τον τρόπο ανοίγουν δρόμοι προς την μετάδοση δεδομένων σε ακόμα πιο υψηλές ταχύτητες με αξιοπιστία και χαμηλό, συγκριτικά με την απόδοση, κόστος.

Βιβλιογραφία

- [1] Cisco, “Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper,” Cisco, Mar. 09, 2020. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [2] M. Smit, K. Williams, and J. van der Tol, “Past, present, and future of InP-based photonic integration,” *APL Photonics*, vol. 4, no. 5, p. 050901, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5087862>.
- [3] “Passive Optical Network (PON) | VIAVI Solutions Inc. | VIAVI Solutions Inc.,” www.viavisolutions.com. Available: <https://www.viavisolutions.com/en-us/passive-optical-network-pon>
- [4] TechTarget, “Data Center Definition,” SearchDataCenter. [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/definition/data-center>.
- [5] Huawei Technologies Co., Ltd., “NetEngine AR V300R019 CLI-based Configuration Guide - Interface Management,” 2019. [Online]. Available: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100112349?section=j0bd>.
- [6] PCRL Ntua, “D2.1-PICaboo’s use cases, network scenarios and KPIs.pdf”
- [7] Y. Khan and R. Datta, “A Performance-Based Comparative Analysis of High-Speed Electro-Absorption and Mach-Zehnder Modulators to Mitigate Chromatic Dispersion at 140 GHz Millimeter Wave,” ResearchGate, 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Dryousaf-Khan/publication/231096727_A_Performance_Based_Comparative_Analysis_of_High_Speed_Electro_Absorption_and_Mach-Zehnder_Modulators_to_Mitigate_Chromatic_Dispersion_at_140_GHz_Millimeter_Wave/links/55816de908ae47061e60c9bb/A-Performance-Based-Comparative-Analysis-of-High-Speed-Electro-Absorption-and-Mach-Zehnder-Modulators-to-Mitigate-Chromatic-Dispersion-at-140-GHz-Millimeter-Wave.pdf.
- [8] David Patel, “Design, Analysis, and Performance of a Silicon Photonic Traveling Wave Mach-Zehnder Modulator”, Department of Electrical & Computer Engineering, McGill University, Montreal, Canada, December 2014
- [9] Lirong Huang, Wei Hong, and Guiying Jiang “All-optical power equalization based on a two-section reflective semiconductor optical amplifier ” 2013 Optical Society of America, 25 February 2013, Vol. 21, No. 4, OPTICS EXPRESS 4611
- [10] Wavelength Electronics, “Modulation Basics”, Application Note AN-LD19 Rev. A, June, 2021
- [11] “NRZ Vs. PAM4 Modulation Techniques | FS Community,” Knowledge, Apr. 02, 2022. [Online]. Available: <https://community.fs.com/article/nrz-vs-pam4-modulation-techniques.html>
- [12] Trimita Chakma, “Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)”, International University Bremen, Spring 2005
- [13] K. Maragos, C. Spatharakis, G. Lentaris, P. Kontzilas, S. Dris, P. Bakopoulos, H. Avramopoulos, D. Soudris, “A Flexible, High-Performance FPGA Implementation of a Feed-Forward Equalizer for Optical Interconnects up to 112 Gb/s”, *Journal of Signal Processing Systems*, vol. 88, no. 2, pp. 107–125, Published online: 26 November 2016
- [14] C Kouloumentas, C Tsokos ,P Groumas,L Gounaridis, A Raptakis, E Mylonas, E Andrianopoulos, K Wörhoff, K Ławniczuk, A Leinse & H Avramopoulos, “Multi-Rate and Multi-Channel Optical Equalizer Based on Photonic Integration” for *EEE Photonics Technology Letters*, December 2020
- [15] Dr RAKESH KUMAR JHA, Aasif Bashir Dar “Chromatic dispersion compensation techniques and characterization of fiber Bragg grating for dispersion compensation”, February 2017, *Optical and Quantum Electronics*

[16] G. Breed and Director, "Analyzing Signals Using the Eye Diagram." Accessed: Jul. 17, 2024. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=e57030c7746f3559bf971094347c5da86387b2dd>