



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

Μελέτη και Βελτιστοποίηση της Απόδοσης Οπτικών Συστημάτων Υψηλών Ταχυτήτων μέσω Τεχνικών Μηχανικής Μάθησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυριακή Δαμανίδου

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2025



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

Μελέτη και Βελτιστοποίηση της Απόδοσης Οπτικών Συστημάτων Υψηλών Ταχυτήτων μέσω Τεχνικών Μηχανικής Μάθησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυριακή Δαμιανίδου

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20η Οκτωβρίου 2025.

.....

Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Αθανάσιος Παναγόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Δήμητρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2025

.....
Κυριακή Δαμιανίδου

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

Copyright © Κυριακή Δαμιανίδου, 2025.

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

Τα οπτικά συστήματα επικοινωνιών αποτελούν θεμέλιο των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών, καθώς καλούνται να υποστηρίξουν συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε απόσταση, ταχύτητα και αξιοπιστία. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, η μετάδοση σημάτων υψηλών ταχυτήτων επηρεάζεται από φαινόμενα όπως η χρωματική διασπορά και οι περιορισμοί εύρους ζώνης τα οποία υποβαθμίζουν την ποιότητα του σήματος και οδηγούν σε αυξημένο αριθμό λαθών κατά την ανίχνευση. Η ισοστάθμιση αποτελεί βασικό εργαλείο αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων, με τεχνικές όπως ο ισοσταθμιστής εμπρόσθιας τροφοδότησης (FFE) να αποτελούν κλασικές λύσεις.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται και υλοποιείται η βελτίωση της μετάδοσης σήματος με διαμόρφωση PAM4, αξιοποιώντας τόσο κλασικές μεθόδους ισοστάθμισης όσο και προσεγγίσεις μηχανικής μάθησης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο των βασικών μεθόδων ισοστάθμισης, από τις κλασικές προσεγγίσεις έως τις σύγχρονες τεχνικές μηχανικής μάθησης. Στη συνέχεια προτείνεται η χρήση ισοσταθμιστή βασισμένου σε βαθύ νευρωνικό δίκτυο (DNN), ο οποίος υλοποιείται και αξιολογείται μέσω προσομοιώσεων στο περιβάλλον VPIphotonics. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα που προκύπτουν από τις παραδοσιακές μεθόδους, δείχνοντας την υπεροχή του DNN ισοσταθμιστή ως προς τη μείωση του ρυθμού σφαλμάτων.

Η συγκριτική αυτή μελέτη καταδεικνύει ότι οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη σε οπτικά συστήματα υψηλών ταχυτήτων, ανοίγοντας τον δρόμο για μελλοντική έρευνα και πρακτικές εφαρμογές σε δίκτυα νέας γενιάς.

Λέξεις κλειδιά

Μηχανική Μάθηση, Ισοστάθμιση, PAM4 Διαμόρφωση, Χρωματική Διασπορά, Οπτικά Συστήματα, BER, Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα

Abstract

Optical communication systems constitute the foundation of modern telecommunication infrastructures, as they are required to support continuously increasing demands in distance, speed, and reliability. Despite their advantages, high-speed signal transmission is affected by phenomena such as chromatic dispersion, bandwidth limitations, and noise, which degrade the signal quality and lead to a higher bit error rate (BER). Equalization is a key tool to mitigate these impairments, with techniques such as the Feed-Forward Equalizer (FFE) representing classical solutions.

In this thesis, the improvement of signal transmission using PAM4 modulation is investigated, evaluated through the BER metric, by employing both conventional equalization methods and machine learning approaches. Initially, the theoretical background of the main equalization techniques is presented, ranging from traditional approaches to modern deep learning methods. Subsequently, a Deep Neural Network (DNN)-based equalizer is proposed, implemented, and evaluated through simulations in the VPIphotonics environment. The results are compared with those obtained using conventional methods, demonstrating the superiority of the DNN equalizer in reducing the BER and enhancing overall system performance.

This comparative study highlights the potential of machine learning techniques to provide significant benefits in high-speed optical systems, paving the way for future research and practical applications in next-generation networks.

Keywords

Machine Learning, Equalization, PAM4 Modulation, Chromatic Dispersion, Optical Systems, BER, Deep Neural Networks (DNN)

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο, που μου έδωσε την ευκαιρία εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής και ενασχόλησης με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο. Ευχαριστώ θερμά τον διδακτορικό ερευνητή Γιώργο Μπρέστα για την πολύτιμη καθοδήγηση και τον χρόνο που αφιέρωσε για την διπλωματική μου εργασία καθώς και τους Παναγιώτη Τουμάση και Ευρυδίκη Κυριαζή για τη βοήθειά τους.

Τη διπλωματική και το πτυχίο μου αφιερώνω στην οικογένειά μου, στους αγαπημένους μου παππούδες και γιαγιάδες, στους γονείς μου και στην αδερφή μου. Τους ευχαριστώ για όσα μου έχουν μάθει, όλη τους την αγάπη και τη στήριξη.

Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς εκείνους κι εκείνες που νοηματοδότησαν και ομόρφυναν όλα αυτά τα φοιτητικά χρόνια. Εκείνους κι εκείνες που μοιραστήκαμε σκέψεις και ανησυχίες, συναντηθήκαμε σε αμφιθέατρα και δρόμους και βαδίσαμε μαζί, ο ένας πλάι στον άλλον. Εκείνους κι εκείνες με τους οποίους γελάσαμε, ονειρευτήκαμε και μάθαμε να μην το βάζουμε κάτω γιατί πιστέψαμε σε έναν καλύτερο κόσμο – που θα χτίσουμε μαζί.

Δαμιανίδου Κυριακή
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2025

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	15
1.1	Ο ρόλος των οπτικών δικτύων	15
1.2	Εξέλιξη και προκλήσεις των σύγχρονων οπτικών δικτύων	15
1.3	Διασυνδέσεις Κέντρων Δεδομένων	19
1.4	Παθητικά Οπτικά Δίκτυα	20
2	Βασικό κύκλωμα οπτικής διασύνδεσης & Συστήματα IM/DD Υψηλών Ταχυτήτων	24
2.1	Βασική διάταξη οπτικής διασύνδεσης υψηλών ταχυτήτων	24
2.2	Κύρια στοιχεία IM/DD συστημάτων	24
2.2.1	Οπτικός πομπός	24
2.2.2	Οπτικός δέκτης	25
2.2.3	Ενισχυτές	26
2.2.4	Τεχνικές πολυπλεξίας	29
2.3	Απώλειες και παραμορφώσεις λόγω αύξησης ρυθμού μετάδοσης	31
2.3.1	Χρωματική διασπορά	31
2.3.2	Περιορισμοί εύρους ζώνης στοιχείων	33
3	Τεχνικές ισοστάθμισης φαινομένων υποβάθμισης	35
3.1	Οπτικές τεχνικές ισοστάθμισης	35
3.1.1	Αντιστάθμιση χρωματικής διασποράς με χρήση ινών Fiber Dispersion Compensating Fiber (DCF)	35
3.1.2	Αντιστάθμιση διασποράς με πλέγματα Bragg Fiber Bragg Grating (FBG)	35
3.2	Ψηφιακές τεχνικές ισοστάθμισης	36
3.2.1	Αντιστάθμιση Διασποράς με Ηλεκτρονικό Φιλτράρισμα (EDC)	36
3.2.2	Ισοστάθμιση Εμπρόσθιας Τροφοδότησης Feed-Forward Equalizer (FFE)	36
3.2.3	Ισοστάθμιση Ανάδρασης Απόφασης Decision-Feedback Equalizer (DFE)	37
3.2.4	Προηγμένες DSP μέθοδοι & μηχανική μάθηση	38
3.2.4.1	Νευρωνικά δίκτυα και εκπαίδευση	39
3.2.4.2	Βαθιά Μάθηση και αρχιτεκτονικές	41
3.2.4.3	Εφαρμογές ML σε οπτικά συστήματα	43
3.2.4.4	Προηγμένες μέθοδοι DSP	44
4	Προτεινόμενος DNN ισοσταθμιστής & Αποτελέσματα	46
4.1	Δομή του DNN ισοσταθμιστή	46
4.2	Το υπό μελέτη σύστημα	47
4.3	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	50
4.4	Σύγκριση με κλασικές μεθόδους	57

5	Προτάσεις για μελλοντική εργασία	59
6	Βιβλιογραφία	60
	Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια	65

Κατάλογος Εικόνων

<u>Εικόνα 1-1</u> : Απεικόνιση δομής Intra DCI	18
<u>Εικόνα 1-2</u> : Αρχιτεκτονική PON	19
<u>Εικόνα 1-3</u> : Συνύπαρξη GPON & XG-PON	20
<u>Εικόνα 1-4</u> : Γενιές PON	20
<u>Εικόνα 2-1</u> : Βασική διάταξη οπτικής διασύνδεσης υψηλών ταχυτήτων	22
<u>Εικόνα 2-2</u> : 3 τύποι οπτικών ενισχυτών	24
<u>Εικόνα 2-3</u> : παράδειγμα ενισχυτή EDFA	25
<u>Εικόνα 2-4</u> : ενισχυτής Raman	26
<u>Εικόνα 2-5</u> : ενισχυτής SOA	26
<u>Εικόνα 2-6</u> : Πίνακας σύγκρισης μεγεθών/ιδιοτήτων ενισχυτών EDFA, Raman, SOA	27
<u>Εικόνα 2-7</u> : Μετάδοση με TDM πολυπλεξία	28
<u>Εικόνα 2-8</u> : Διάταξη WDM συστήματος	28
<u>Εικόνα 2-9</u> : Χρονική διαπλάτυνση παλμού λόγω διασποράς	29
<u>Εικόνα 2-10</u> : Επίδραση διασποράς σε παλμό σε πεδίου χρόνου και συχνότητας	30
<u>Εικόνα 2-11</u> : Λάθος απόφαση δέκτη λόγω ISI	31
<u>Εικόνα 3-1</u> : Εφαρμογή FFE σε πομπό	35
<u>Εικόνα 3-2</u> : Εφαρμογή DFE σε δέκτη,	35
<u>Εικόνα 3-3</u> : 3-tap FFE, 5-tap DFE	36
<u>Εικόνα 3-4</u> : Παράδειγμα FFNN	37
<u>Εικόνα 3-5</u> : Στάδια εκπαίδευσης ενός νευρωνικού	38
<u>Εικόνα 3-6</u> : (a) Deep Neural Network, (b) Recurrent Neural Network, (c) δομή Convolutional Neural Network	39
<u>Εικόνα 4-1</u> : Διάταξη του υπό-μελέτη συστήματος	48
<u>Εικόνα 4-2</u> : Διάταξη πομπού	48
<u>Εικόνα 4-3</u> : (a) γεννήτρια PAM_M, (b) φίλτρο, (c) λέιζερ, (d) διαμορφωτής Mach-Zehnder	49
<u>Εικόνα 4-4</u> : διάταξη του δέκτη του συστήματος	49
<u>Εικόνα 4-5</u> : Διάταξη υπο-συστημάτων για τον υπολογισμό του BER	50
<u>Εικόνα 4-6</u> : Eye diagrams σήματος χωρίς DSP για μήκη οπτικής ίνας (a) 8km, (b)12km, (c)14km, (d) 16 km, (e) 18km.	50
<u>Εικόνα 4-7</u> : Καμπύλη BER για το σήμα χωρίς DSP	51
<u>Εικόνα 4-8</u> : Eye diagrams μετά την εφαρμογή FFE για μήκη οπτικής ίνας (a) 8km, (b)12km, (c) 14km, (d) 16km, (e) 18km.	52
<u>Εικόνα 4-9</u> : Καμπύλη BER με την εφαρμογή FFE equalizer	52
<u>Εικόνα 4-10</u> : Καμπύλες απωλειών στις οποίες παρατηρείται (α) απόλυτη σύγκλιση, (b)-(c) overfitting, (d) underfitting	53
<u>Εικόνα 4-11</u> : Καμπύλες BER για διαφορετικές αρχιτεκτονικές του DNN equalizer για μήκη ίνας (α) 8km, (b) 12km, (c) 14km,(d) 16km και (e) 18km.	56
<u>Εικόνα 4-12</u> : Καμπύλες BER αρχιτεκτονικών DNN equalizer και του FFE equalizer για μήκη ίνας (α) 8km, (b) 12km, (c) 14km,(d) 16km και (e) 18km	58

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4-1 : Συνδυασμοί αριθμού επιπέδων και νευρώνων για τον DNN ισοσταθμιστή	43
Πίνακας 4-2 : Σύγκριση τιμών BER FFE και DNN	54

1 Εισαγωγή

1.1 Ο ρόλος των οπτικών δικτύων

Τα οπτικά δίκτυα αποτελούν κρίσιμη τεχνολογία για τη μετάδοση δεδομένων σε σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά και πληροφοριακά συστήματα. Ο ρόλος των οπτικών δικτύων είναι να μεταδίδουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων γρήγορα, αξιόπιστα και σε μεγάλες αποστάσεις. Χρησιμοποιούν το φως για τη μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικών ινών. Η διαδικασία λειτουργίας τους ξεκινά με τη μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων (δηλαδή των δεδομένων) σε οπτικά σήματα, χρησιμοποιώντας συσκευές όπως λέιζερ ή LED. Στη συνέχεια, αυτά τα φωτεινά σήματα μεταδίδονται μέσω των οπτικών ινών. Το φως παραμένει εγκλωβισμένο μέσα στην ίνα, ακόμα και όταν αυτή κάμπτεται, επιτρέποντας τη μετάδοση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες σήματος. Όταν το φωτεινό σήμα φτάσει στον προορισμό του, μετατρέπεται ξανά σε ηλεκτρικό σήμα, ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί από τις ηλεκτρονικές συσκευές του τελικού χρήστη.

Οι οπτικές ίνες προσφέρουν **υψηλότερες ταχύτητες** μετάδοσης δεδομένων από τα καλώδια χαλκού, υποστηρίζοντας επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο και εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης. Παρέχουν την υποδομή πάνω στην οποία μεταφέρονται ποικίλες υπηρεσίες, προσφέροντας ταυτόχρονα **τεράστια χωρητικότητα και ευελιξία** στην κατανομή του εύρους ζώνης, όταν και όπου χρειάζεται. Διαθέτουν μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς δεδομένων με **χαμηλότερες απώλειες** σήματος, επιτρέποντας τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς ενίσχυση. Παράλληλα, είναι πιο **ασφαλείς**, καθώς τα οπτικά σήματα είναι δύσκολο να υποκλαπούν. Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και, τέλος, είναι πιο ελαφριές και ανθεκτικές, διευκολύνοντας την εγκατάσταση και τη συντήρηση. [\[1\]](#)

1.2 Εξέλιξη και προκλήσεις των σύγχρονων οπτικών δικτύων

Η ιστορία των οπτικών δικτύων ξεκινά τη δεκαετία του 1970, όταν αναπτύχθηκε η πρώτη πρακτική χρήση των οπτικών ινών. Πριν από αυτό, χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά χάλκινα καλώδια για τηλεφωνία και μετάδοση δεδομένων, τα οποία όμως είχαν περιορισμούς στην ταχύτητα και στη χωρητικότητα. Κατά τη δεκαετία του 1960 και 1970, ξεκίνησαν οι πρώτες έρευνες για τη χρήση του φωτός στην επικοινωνία, οδηγώντας στην ανάπτυξη των οπτικών ινών. Το 1970, οι Maurer, Schultz και Keck κατασκεύασαν το

πρώτο καλώδιο οπτικής ίνας με χαμηλές απώλειες, καθιστώντας δυνατή τη μετάδοση φωτός σε μεγάλες αποστάσεις και ανοίγοντας τον δρόμο για αξιόπιστες και αποδοτικές τηλεπικοινωνίες.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 δημιουργήθηκαν τα πρώτα πειραματικά οπτικά δίκτυα. Χρησιμοποιήθηκαν για τηλεφωνικές επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, προσφέροντας πιο αποδοτική και αξιόπιστη λύση από τα χάλκινα συστήματα.

Ταυτόχρονα, η τεχνολογία των οπτικών ινών άρχισε να κεντρίζει το ενδιαφέρον των τηλεπικοινωνιακών εταιρειών και των ερευνητικών ιδρυμάτων. Μηχανικοί εργάζονταν πάνω στη βελτίωση της απόδοσης των οπτικών δικτύων, αυξάνοντας τη χωρητικότητα και μειώνοντας τις απώλειες σήματος. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνικής πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος (WDM) στα τέλη της δεκαετίας, η οποία επέτρεπε τη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων μέσα από μία ίνα, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος (ή "χρώματα") φωτός.

Αυτή η περίοδος - τέλη 1970 με 1980 - είναι γνωστή ως πρώτη γενιά **1G** όπου οι οπτικές τεχνολογίες χρησιμοποιούνταν ουσιαστικά μόνο για μετάδοση και για την παροχή χωρητικότητας (π.χ. δίκτυα SONET και SDH).

Τη δεκαετία του 1990, η δεύτερη γενιά **2G** οπτικών δικτύων ενσωματώνει τη **δρομολόγηση, τη μεταγωγή και την ευφυΐα στο οπτικό επίπεδο**. Τα δίκτυα "Οπτική Ίνα μέχρι το σπίτι" (Fiber-to-the-home FTTH) και "Επιχειρηματική Οπτική Ίνα" (Fiber-to-the-business) άρχισαν να επεκτείνονται, προσφέροντας γρηγορότερες υπηρεσίες διαδικτύου και τηλεφωνίας σε κατοικίες και επιχειρήσεις.

Η εφεύρεση της τεχνικής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Πυκνού Μήκους Κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing - DWDM) αύξησε ακόμη περισσότερο τη χωρητικότητα των οπτικών δικτύων. Η πολυπλεξία διαίρεσης πυκνού μήκους κύματος επέτρεψε τη μετάδοση πολλαπλών μηκών κύματος φωτός ταυτόχρονα μέσα από μία μόνο ίνα, πολλαπλασιάζοντας την ικανότητα μεταφοράς δεδομένων χωρίς να απαιτείται νέα εγκατάσταση ινών.

Η ραγδαία εξάπλωση του διαδικτύου την ίδια περίοδο οδήγησε σε τεράστια αύξηση της ζήτησης για υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων. Τα οπτικά δίκτυα έγιναν η καταλληλότερη υποδομή για τη ραχοκοκαλιά του Ίντερνετ, υποστηρίζοντας μεγάλης κλίμακας μεταφορά δεδομένων και παγκόσμια διασύνδεση.

Στις αρχές του 2000, εμφανίστηκαν τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας **3G και 4G**, αυξάνοντας την ανάγκη για ταχύτατη μετάδοση δεδομένων. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για τη διασύνδεση κεραιών κινητής τηλεφωνίας και κέντρων δεδομένων, προσφέροντας την απαιτούμενη υψηλή χωρητικότητα.

Στον επιχειρηματικό τομέα, τα κέντρα δεδομένων άρχισαν να βασίζονται έντονα σε οπτικά δίκτυα για τη διαχείριση του όγκου των δεδομένων που επεξεργάζονταν και αποθήκευαν. Αυτή η μετάβαση βοήθησε την ανάπτυξη του υπολογιστικού νέφους (cloud

computing) και των μεγάλων δεδομένων (Big Data), που απαιτούν αποδοτική και ταχύτατη επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Τη δεκαετία του 2010 εμφανίστηκαν τα οπτικά δίκτυα **100G**, με ταχύτητες 100 gigabits ανά δευτερόλεπτο – **δέκα φορές ταχύτερα από τις προηγούμενες τεχνολογίες**. Η ανάγκη για περισσότερο εύρος ζώνης αυξανόταν διαρκώς λόγω της εξάπλωσης υπηρεσιών πολυμέσων ροής (streaming), εφαρμογών νέφους, διαδικτυακών παιχνιδιών (online gaming) και κοινωνικών δικτύων.

Την ίδια περίοδο αναδύθηκαν οι τεχνολογίες δικτυώσεων που καθορίζονται από λογισμικό (SDN - Software Defined Networking) και εικονοποίησης λειτουργιών δικτύου (NFV - Network Function Virtualization), επιτρέποντας στους παρόχους να διαχειρίζονται τα οπτικά δίκτυα με πιο αποδοτικό και ευέλικτο τρόπο.

Επιπλέον, αναπτύχθηκαν νέες τεχνολογίες όπως η συνεκτική οπτική (coherent optics) και η πολυπλεξία πόλωσης με QAM (PM-QAM), αυξάνοντας ακόμα περισσότερο την αποδοτικότητα και ικανότητα μετάδοσης των οπτικών δικτύων. Οι τεχνολογίες συνεκτικής οπτικής επιτρέπουν την αποδοτική μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες. [2] Παράλληλα, η ανάπτυξη της ενσωματωμένης φωτονικής (integrated photonics) και των συνεπακεταρισμένων οπτικών (co-packaged optics CPO) προωθεί την κατασκευή μικρότερων, ταχύτερων και πιο αποδοτικών συσκευών.

Τα τελευταία χρόνια, τα οπτικά δίκτυα συνεχίζουν να εξελίσσονται με επίκεντρο την υψηλότερη ταχύτητα, τη μεγαλύτερη χωρητικότητα και τη βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση. Σημαντική είναι η ανάπτυξη των **δικτύων 400G**, με ταχύτητες 400 gigabits ανά δευτερόλεπτο για να καλυφθούν οι απαιτήσεις των δικτύων **5G**, του Διαδικτύου πραγμάτων (Internet of Things - IoT) και της αυξανόμενης εξάρτησης από το νέφος (cloud) και εφαρμογές μεγάλης έντασης δεδομένων.[3]

Οι πρόσφατες καινοτομίες στη συνεκτική οπτική τεχνολογία και τις οπτικές ίνες επιτρέπουν την **υποστήριξη ρυθμών μετάδοσης δεδομένων άνω των 800G**, ανταποκρινόμενες στις αυξανόμενες ανάγκες των σύγχρονων δικτύων.[4] Η βελτίωση της φασματικής απόδοσης μέσω προηγμένων σχημάτων διαμόρφωσης, όπως το 64QAM, σε συνδυασμό με την ευέλικτη χρήση του φάσματος μέσω της τεχνολογίας ευέλικτου πλέγματος (flex-grid), συμβάλλουν στην πιο αποδοτική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Παράλληλα, οι συνεκτικές οπτικές τεχνολογίες επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική υποβάθμιση του σήματος, ενισχύοντας την αξιοπιστία σε πολύ υψηλές ταχύτητες.

Σημαντικές εξελίξεις έχουν σημειωθεί και στην ίδια τη φυσική υποδομή των οπτικών ινών. Οι ίνες υπερβολικά χαμηλών απωλειών (ULL) μειώνουν την εξασθένηση του σήματος και επιτρέπουν μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς την ανάγκη συχνών ενισχυτών. Οι ίνες με μεγάλο ενεργό εμβαδόν (Aeff) βοηθούν στην αντιμετώπιση μη γραμμικών αλλοιώσεων, όπως η αυτοδιαμόρφωση φάσης, επιτρέποντας υψηλότερα επίπεδα ισχύος

μετάδοσης. Η τεχνολογία χωρικής πολυπλεξίας (SDM), με τη χρήση πολυπύρηνων και πολυτροπικών ινών, αυξάνει σημαντικά τη συνολική χωρητικότητα ανά ίνα, ενσωματώνοντας πολλαπλά κανάλια μέσα στο ίδιο φυσικό μέσο. [5]

Καθώς οι απαιτήσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες και χωρητικότητα συνεχώς αυξάνονται, τα οπτικά δίκτυα αντιμετωπίζουν σημαντικές τεχνικές προκλήσεις προκειμένου να ανταποκριθούν στις ανάγκες αυτές. Μία από τις βασικές προκλήσεις είναι η χωρητικότητα, καθώς τα οπτικά δίκτυα πρέπει να υποστηρίζουν πάνω από 100 Tbit/s ανά ίνα. Αυτό απαιτεί αύξηση της φασματικής απόδοσης (από 2,67 σε 4 bits/s/Hz), επέκταση των ζωνών συχνοτήτων από Super C+L (10 THz) σε C+L+S+U/E (>24 THz) και βελτίωση της ποιότητας του σήματος. Στενά συνδεδεμένη με αυτή την απαίτηση είναι και η επέκταση του φάσματος, καθώς η εξερεύνηση ζωνών συχνοτήτων πέρα από τη ζώνη C, όπως η ζώνη S, προϋποθέτει την ανάπτυξη νέων ενισχυτών οπτικών ινών και υλικών, όπως οι ίνες με πρόσμιξη σπάνιων γαιών και οι οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών.

Παράλληλα, κρίσιμη θεωρείται η ανάπτυξη οπτικών ινών επόμενης γενιάς, καθώς οι τρέχοντες τύποι (G.652, G.655, G.653, G.654) παρουσιάζουν περιορισμούς όπως απώλειες, μη γραμμικότητα και παρεμβολές τρόπου λειτουργίας. Οι μελλοντικές οπτικές ίνες θα πρέπει να εξασφαλίζουν χαμηλές απώλειες, ανθεκτικότητα στα μη γραμμικά φαινόμενα, ευρυζωνική χωρητικότητα και οικονομικά αποδοτική κατασκευή, με τις έρευνες να επικεντρώνονται σε ίνες με κοίλο πυρήνα και στην πολυπλεξία χωρικής διαίρεσης. Ωστόσο, καθώς αυξάνονται οι ρυθμοί μετάδοσης, η μη γραμμική παραμόρφωση του σήματος εντείνεται, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη εξελιγμένων και αποδοτικών αλγορίθμων μη γραμμικής αντιστάθμισης, με στόχο τη βελτίωση της χωρητικότητας με χαμηλή ισχύ και πολυπλοκότητα.

Εξίσου σημαντική πρόκληση αποτελεί ο σχεδιασμός δικτύων μεγάλης κλίμακας, καθώς τα υπερμεγέθη οπτικά δίκτυα με χιλιάδες κόμβους είναι εξαιρετικά περίπλοκα. Όσο αυξάνεται η κλίμακα, τόσο πιο σύνθετα γίνονται τα προβλήματα που σχετίζονται με τη δρομολόγηση, την ανάθεση μήκους κύματος και την προστασία από σφάλματα, τα οποία απαιτούν έξυπνους αλγόριθμους και καινοτόμες μεθοδολογίες για να επιλυθούν. Στο ίδιο πλαίσιο, οι οπτικές διασυνδέσεις (OXC/WSS) αποτελούν κρίσιμο σημείο, καθώς οι απαιτήσεις για μεγάλο εύρος ζώνης, μικρή καθυστέρηση και δυναμική δρομολόγηση οδηγούν στην ανάγκη για υψηλής απόδοσης οπτικούς διακόπτες (switches), όπως τα WSS 128D+.

Η πρόκληση επεκτείνεται και στα δίκτυα πρόσβασης, όπου τα υπάρχοντα PON συστήματα δεν επαρκούν για τις απαιτήσεις υψηλού εύρους ζώνης, χαμηλής καθυστέρησης και απομόνωσης. Αυτό καθιστά αναγκαίες τις εξελίξεις στην ισχύ του πομπού, στις νέες αρχιτεκτονικές σημείου-σε-πολλαπλά σημεία (P2MP), στους τρόπους διαμόρφωσης, καθώς και στα οπτικά εξαρτήματα και αλγορίθμους. Επιπλέον, νέα πεδία εφαρμογών, όπως τα οπτικά δίκτυα δορυφόρων, δημιουργούν πρόσθετες απαιτήσεις. Η ανάπτυξη οπτικών επικοινωνιών μεταξύ δορυφόρων προϋποθέτει ταχύτητες έως 400 Gbit/s, μικρό βάρος, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και προηγμένη διαχείριση δικτύου για τους αστερισμούς δορυφόρων LEO.

Τέλος, καθοριστικής σημασίας είναι η ολοκλήρωση των οπτικοηλεκτρονικών στοιχείων. Τα σημερινά DWDM στοιχεία (modules) είναι περιορισμένα σε εύρος και απαιτούν πολύ χώρο, ενώ οι μελλοντικές λύσεις πρέπει να περιλαμβάνουν πολυκαναλικά πρότυπα με ενσωματωμένη πολυπλεξία. Με τον τρόπο αυτό θα μειώνεται το κόστος και η πολυπλοκότητα, δίνοντας έμφαση στην τεχνολογία των οπτικών χτενιών συχνοτήτων (optical frequency combs) και σε φωτονικές και ηλεκτρονικές τεχνολογίες συνσυσκευασίας (photonic-electronic co-packaging).[\[6\]](#)

1.3 Διασυνδέσεις Κέντρων Δεδομένων

Οι διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων (Data Center Interconnects - DCIs) αναφέρονται στις τεχνολογίες και λύσεις δικτύωσης που επιτρέπουν την αδιάλειπτη επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ γεωγραφικά διασκορπισμένων κέντρων δεδομένων. Πρόκειται για μια υποδομή δικτύωσης που συνδέει πολλά κέντρα δεδομένων, επιτρέποντάς τους να λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύστημα. Οι διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων επιτρέπουν στους οργανισμούς να κατανέμουν φόρτους εργασίας, να αναπαράγουν δεδομένα και να παρέχουν δυνατότητες αποκατάστασης από καταστροφές σε πολλαπλές τοποθεσίες. Η σημασία των διασυνδέσεων κέντρων δεδομένων έγκειται στην ικανότητά τους να παρέχουν μια κλιμακούμενη, αξιόπιστη και υψηλής απόδοσης υποδομή για σύγχρονες εφαρμογές και υπηρεσίες.

Οι διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων (DCIs) προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα πλεονεκτημάτων. Παρέχουν βελτιωμένη επεκτασιμότητα, επιτρέποντας στις επιχειρήσεις να επεκτείνουν την υποδομή τους με ευκολία, ώστε να ανταποκρίνονται στην αυξανόμενη ζήτηση και να υποστηρίζουν νέες εφαρμογές. Η ενισχυμένη αξιοπιστία τους διασφαλίζει μεγαλύτερη ανοχή σε σφάλματα, διατηρώντας τις υπηρεσίες διαθέσιμες ακόμη και σε περιπτώσεις βλαβών ή καταστροφών, ενώ ενισχύουν παράλληλα τις δυνατότητες ανάκαμψης από καταστροφές, μειώνοντας τον χρόνο εκτός λειτουργίας και την απώλεια δεδομένων.

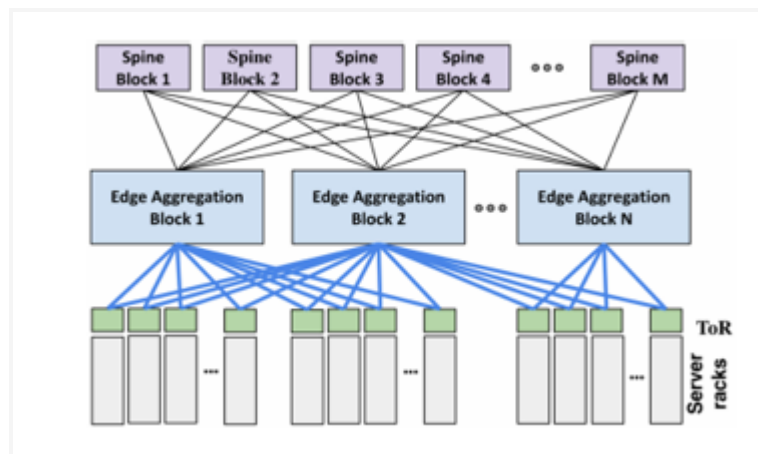
Επίσης, προσφέρουν αυξημένη ευελιξία, καθώς δίνουν τη δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών και υπηρεσιών σε πολλαπλές τοποθεσίες, ώστε να καλύπτονται συγκεκριμένες επιχειρησιακές ανάγκες και να βελτιώνεται η συνολική απόδοση.

Οι οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται στις διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ κέντρων δεδομένων μέσω σημάτων φωτός σε οπτικές ίνες. Αυτό επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας σε μεγάλες αποστάσεις, καθιστώντας τις οπτικές επικοινωνίες ιδανική λύση για τις ανάγκες των διασυνδέσεων κέντρων δεδομένων. [\[7\]](#)

Με βάση την έκτασή τους, οι διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Διασυνδέσεις εντός του κέντρου δεδομένων - Intra-data center interconnects (< 2km)
- Διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων σε επίπεδο πανεπιστημιούπολης - Campus data center interconnects (<10km)
- Διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων μητροπολιτικής εμβέλειας - Metro data center interconnects (<100km)

Οι διασυνδέσεις εντός του κέντρου δεδομένων (Intra-data center interconnects) λειτουργούν εντός μιας ενιαίας εγκατάστασης κέντρου δεδομένων. Αυτές οι διασυνδέσεις έχουν σχεδιαστεί για επικοινωνία μικρής απόστασης εντός του ίδιου κτιρίου ή συγκροτήματος κέντρου δεδομένων. Οι διασυνδέσεις εντός του κέντρου δεδομένων είναι βελτιστοποιημένες για συνδέσεις υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ διακομιστών, συστημάτων αποθήκευσης και συσκευών δικτύωσης εντός ενός ενιαίου κέντρου δεδομένων. [8]



Εικόνα 1-1 : Απεικόνιση δομής Intra DCI

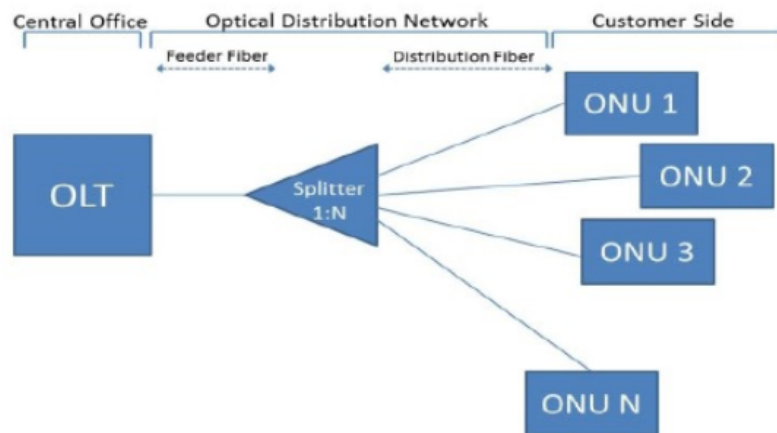
1.4 Παθητικά Οπτικά Δίκτυα

Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο (Passive Optical Network - PON) είναι ένα είδος δικτύου οπτικών ινών με τη μορφή τοπολογίας σημείου προς πολλαπλά σημεία, που χρησιμοποιεί οπτικούς διαχωριστές για την παροχή δεδομένων από ένα μόνο σημείο μετάδοσης σε πολλαπλά τελικά σημεία χρήστη. Προσφέρουν τεράστια πλεονεκτήματα όταν αναπτύσσονται σε σενάρια οπτικής ίνας προς το σπίτι (FTTH). Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν μια αρχιτεκτονική από σημείο σε σημείο, δυνατότητες υψηλής ποιότητας τριπλής υπηρεσίας για δεδομένα, φωνή και βίντεο, πρόσβαση στο διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας και άλλες υπηρεσίες με οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

Οι τέσσερις κύριες παραλλαγές παθητικών οπτικών δικτύων που αναπτύχθηκαν από την ITU και το IEEE μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες. Το πρώτο είδος αρχιτεκτονικής βασίζεται στην Ασύγχρονη Λειτουργία Μεταφοράς (ATM) και

περιλαμβάνει το ATM PON (APON), το Broadband PON (BPON) και το Gigabit PON (GPON) και η δεύτερη ομάδα αποτελείται από το Ethernet PON (EPON). Το EPON και το GPON είναι οι πιο δημοφιλείς παραλλαγές PON που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Ένα σύστημα παθητικού οπτικού δικτύου αποτελείται από ένα τερματικό οπτικής γραμμής (OLT) στο κεντρικό γραφείο του παρόχου υπηρεσιών και έναν αριθμό μονάδων οπτικού δικτύου (ONU) ή τερματικών οπτικού δικτύου (ONT) κοντά στους τελικούς χρήστες, με ένα δίκτυο οπτικής διανομής (ODN) μεταξύ του OLT και των ONU/ONT. [9]



Εικόνα 1- 2: Αρχιτεκτονική PON, πηγή: [9]

Οι τεχνολογίες των παθητικών οπτικών δικτύων είναι οι εξής: APON, BPON, GPON, EPON, XG-PON, 10G-EPON και NG-PON2.

Η **APON** (Asynchronous Transfer Mode PON – Παθητικό Οπτικό Δίκτυο Βασισμένο σε ATM) είναι το πρώτο σύστημα PON που πέτυχε σημαντική εμπορική διάδοση, με το electrical layer βασισμένο στο ATM.

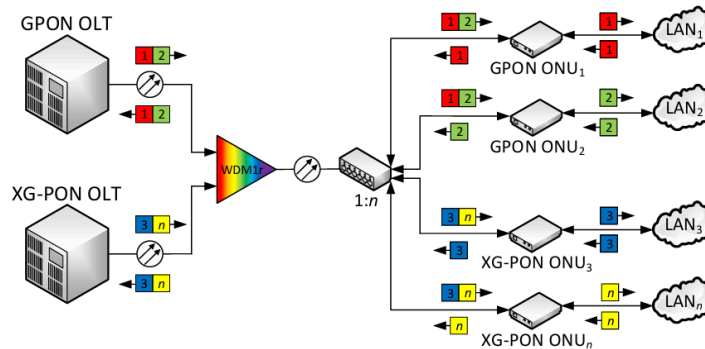
Η **BPON** (Broadband PON) είναι η εξελιγμένη έκδοση της APON και χρησιμοποιεί πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (WDM) για την μετάδοση δεδομένων προς τον χρήστη (downstream). Προσφέρει δυναμική κατανομή εύρους ζώνης, μηχανισμούς προστασίας και άλλες βελτιωμένες λειτουργίες. Η BPON είναι πλέον πιο διαδεδομένη από την APON και παρέχει υπηρεσίες όπως πρόσβαση Ethernet, μετάδοση βίντεο και μισθωμένες γραμμές υψηλής ταχύτητας.

Η **GPON** (Gigabit PON) βασίζεται στο πρότυπο ITU-T για τις νέες γενιές ευρυζωνικής παθητικής οπτικής πρόσβασης. Προσφέροντας υψηλό ρυθμό καθοδικής μετάδοσης έως και 2.5 Gbps, τα ασύμμετρα χαρακτηριστικά της GPON καλύπτουν τις απαιτήσεις της αγοράς για ευρυζωνικές υπηρεσίες δεδομένων.

Η **EPON** (Ethernet PON) χρησιμοποιεί πακέτα Ethernet αντί για ATM κυψέλες και έχει αναπτυχθεί ώστε να είναι συμβατή με συσκευές Ethernet. Βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.3, και δεν απαιτεί πρόσθετη ενθυλάκωση ή μετατροπές για σύνδεση με δίκτυα

βασισμένα σε Ethernet. Η συμβατική EPON υποστηρίζει συμμετρικές ταχύτητες έως 1.25 Gbps καθοδικά και ανοδικά.

Η 10G έκδοση της GPON είναι γνωστή ως **XG-PON**, η οποία υποστηρίζει 10 Gbps καθοδικά και 2.5 Gbps ανοδικά. Παρόλο που το φυσικό οπτικό μέσο και η μορφοποίηση των δεδομένων παραμένουν όμοια με την αρχική GPON, τα μήκη κύματος έχουν τροποποιηθεί – παρόμοια με την 10G-EPON (1577 nm καθοδικά και 1270 nm ανοδικά) – επιτρέποντας την ταυτόχρονη συνύπαρξη GPON και XG-PON στο ίδιο δίκτυο.



Εικόνα 1-3: Συνύπαρξη GPON & XG-PON, πηγή: [10]

Η βελτιωμένη έκδοση **10G-EPON** αυξάνει τις ταχύτητες σε 10 Gbps τόσο καθοδικά όσο και ανοδικά. Χρησιμοποιεί διαφορετικά μήκη κύματος σε σχέση με την κλασική EPON (1577 nm καθοδικά, 1270 nm ανοδικά), επιτρέποντας την ταυτόχρονη λειτουργία EPON και 10G-EPON στο ίδιο PON.

Η **NG-PON2** (Next Generation PON 2 ή Beyond XG(S)) χρησιμοποιεί πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (WDM) με πολλαπλά μήκη κύματος των 10 Gbps για να προσφέρει υπηρεσίες 40 Gbps ανοδικά και καθοδικά. Όπως και οι άλλες τεχνολογίες, τα διαφορετικά μήκη κύματος επιτρέπουν τη συνύπαρξη στο ίδιο δίκτυο PON. [10] Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για διάφορες τεχνολογίες NG-PON2 που προσφέρουν ταχύτητες έως και 100 Gbps όπως TDM-PON, WDM-PON, OCDM-PON, OFDM-PON καθώς και υβριδικές τεχνολογίες. [9]

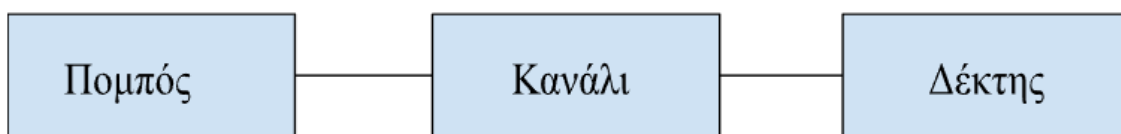


Εικόνα 1-4: Γενιές PON, πηγή: [9]

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON) προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, απλοποιημένη εγκατάσταση χωρίς ανάγκη για ενδιάμεσες ενεργές συσκευές, εύκολη συντήρηση και ευκολία στις αναβαθμίσεις, καθώς απαιτούνται αλλαγές μόνο στις άκρες του δικτύου. Επιπλέον, το κόστος υλοποίησης και λειτουργίας είναι αισθητά χαμηλότερο λόγω της χρήσης παθητικών στοιχείων. Ωστόσο, παρουσιάζουν και κάποιους περιορισμούς, όπως το περιορισμένο μήκος μετάδοσης (20–40 χλμ.) και την αυξημένη εξάρτηση από κεντρικά σημεία του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι μια βλάβη σε ένα κεντρικό καλώδιο ή στον βασικό εξοπλισμό μπορεί να επηρεάσει πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. [11]

2 Βασικό κύκλωμα οπτικής διασύνδεσης & Συστήματα IM/DD Υψηλών Ταχυτήτων

2.1 Βασική διάταξη οπτικής διασύνδεσης υψηλών ταχυτήτων



Εικόνα 2-1 : Βασική διάταξη οπτικής διασύνδεσης υψηλών ταχυτήτων

Η βασική διάταξη για τη μετάδοση πληροφορίας σε ένα σύστημα μετάδοσης υψηλών ταχυτήτων αποτελείται από τον πομπό, το κανάλι και τον δέκτη. Ο πομπός (transmitter) μετατρέπει το σήμα από ηλεκτρικό σε οπτικό. Ο πομπός περιλαμβάνει οδηγό LD (LD driver), οπτική πηγή LED, laser συνεχούς κύματος (CW) ή παλμικό laser (π.χ. Mode-locked laser – MLL) και διάταξη διαμόρφωσης (απ' ευθείας διαμόρφωση ή χρήση εξωτερικού διαμορφωτή). Τα εισερχόμενα ηλεκτρικά σήματα τάσης μετατρέπονται σε σήματα ρεύματος από τον οδηγό διόδου λέιζερ (LD driver) και στη συνέχεια σε οπτικά σήματα μέσω του λέιζερ. Ο οδηγός διόδου λέιζερ πρέπει να παρέχει επαρκές συνεχές ρεύμα πόλωσης και ρεύματα διαμόρφωσης υψηλής ταχύτητας στο λέιζερ, απαραίτητα για τη σωστή οπτική μετάδοση. [\[12\]](#) Το κανάλι μετάδοσης μεταδίδει το οπτικό σήμα από τον πομπό στον δέκτη χρησιμοποιώντας ως μέσο μετάδοσης την οπτική ίνα. Ο δέκτης (receiver) ανιχνεύει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα και ανακτά το ηλεκτρικό σήμα που είναι κωδικοποιημένο στον οπτικό φορέα (carrier). Ο οπτικός δέκτης αποτελείται από φωτοδίοδο (PIN ή APD) που μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, ενισχυτή TIA, κυκλώματα ισοστάθμισης (equalizer) και ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP) για αποκατάσταση και επεξεργασία του σήματος.

2.2 Κύρια στοιχεία IM/DD συστημάτων

2.2.1 Οπτικός Πομπός

Η οπτική πηγή φωτός αποτελεί βασική διάταξη των οπτικών πομπών. Ως οπτική πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μια δίοδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode LED) είτε ένα λέιζερ ημιαγωγού. Σήμερα, χρησιμοποιούνται πιο εξελιγμένες πηγές, όπως τα λέιζερ μονού τρόπου με κατανεμημένη ανάδραση (DFB) και τα λέιζερ εξωτερικής

κοιλότητας (ECL), τα οποία προσφέρουν φασματικό εύρος στην περιοχή των υπο-MHz, κατάλληλο για υψηλής ποιότητας μεταδόσεις.

Η διαμόρφωση του λέιζερ μπορεί να γίνει είτε άμεσα, μέσω του ρεύματος οδήγησης, είτε εξωτερικά. Η άμεση διαμόρφωση προκαλεί ανεπιθύμητη διεύρυνση του φάσματος (γνωστή ως chirping), ενώ η εξωτερική διαμόρφωση, που θεωρείται πιο κατάλληλη, επιτρέπει στο λέιζερ να λειτουργεί ως συνεχής πηγή φωτός (CW).

Παρά τα πλεονεκτήματα, τα λέιζερ παρουσιάζουν θόρυβο φάσης και πλάτους, ο οποίος οφείλεται κυρίως στην αυθόρμητη εκπομπή φωτονίων. Αυτός ο θόρυβος προκαλεί τυχαίες διακυμάνσεις στην ένταση και τη φάση του σήματος. Ιδιαίτερα η φάση εξελίσσεται με τη μορφή τυχαίου περιπάτου, γεγονός που επηρεάζει τη σταθερότητα και την ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος. [\[13\]](#)

Στα συστήματα οπτικής μετάδοσης, οι διαμορφωτές (modulators) είναι βασικά στοιχεία των οπτικών πομπών, καθώς επιτρέπουν την κωδικοποίηση του ηλεκτρικού σήματος πληροφορίας πάνω στο φως που παράγεται από το λέιζερ. Η διαμόρφωση μπορεί να είναι είτε άμεση είτε εξωτερική. Χρησιμοποιείται πιο συχνά η εξωτερική διαμόρφωση γιατί προσφέρει μεγαλύτερο έλεγχο, μειώνει τα προβλήματα φασματικής διεύρυνσης (chirp) και είναι απαραίτητη για υψηλών ταχυτήτων και πολυσύνθετα σχήματα διαμόρφωσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι διαμορφωτών όπως οι διαμορφωτές φάσης, οι διαμορφωτές έντασης (amplitude modulators), οι διαμορφωτές πόλωσης και οι διαμορφωτές IQ (IQ modulators). Συχνά στην εξωτερική διαμόρφωση, χρησιμοποιείται ο **διαμορφωτής Mach-Zehnder (MZM)**, ο οποίος λειτουργεί διαχωρίζοντας το φως σε δύο μονοπάτια. Καθώς το φως περνάει από αυτούς, εφαρμόζεται ηλεκτρικό σήμα που αλλάζει τη φάση του φωτός στο κάθε μονοπάτι. Στο τέλος, τα δύο μονοπάτια ενώνονται ξανά και το φως που προκύπτει ενισχύεται ή ακυρώνεται, ανάλογα με τη διαφορά φάσης. Έτσι ελέγχεται η τελική ένταση του φωτός που εκπέμπεται. Άλλος τύπος είναι ο διαμορφωτής ηλεκτροαπορρόφησης (Electro-Absorption Modulator- EAM), ο οποίος αλλάζει την απορρόφηση του υλικού με την εφαρμογή τάσης, ρυθμίζοντας έτσι την ένταση του διερχόμενου φωτός. [\[13\]](#)

2.2.2. Οπτικός Δέκτης

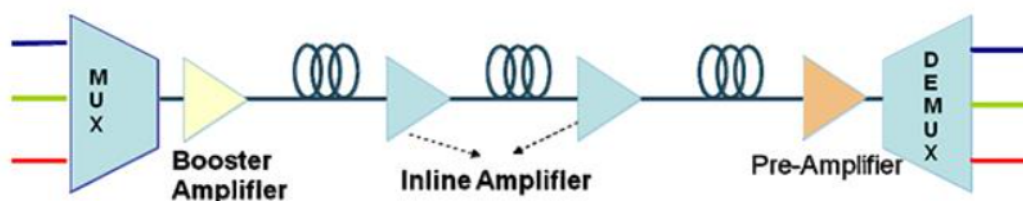
Η λειτουργία του δέκτη είναι να εξάγει το εξασθενημένο και παραμορφωμένο σήμα από το κανάλι, να το ενισχύει και να το αποκαθιστά όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχική του κωδικοποιημένη μορφή, πριν το αποκωδικοποιήσει και το προωθήσει στον τελικό προορισμό του μηνύματος. Ένας οπτικός δέκτης αποτελείται από έναν φωτοανιχνευτή και ηλεκτρονικά κυκλώματα για την ενίσχυση και επεξεργασία του σήματος. Ο φωτοανιχνευτής (συνήθως φωτοδίοδο τύπου PIN ή avalanche photodiode – APD) μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ρεύμα και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ενίσχυσης και επεξεργασίας ενισχύουν το ασθενές σήμα και το καθαρίζουν από θόρυβο και παραμορφώσεις. Κατά τη διαδικασία μετατροπής της οπτικής ισχύος του σήματος, η

οποία εξέρχεται από το άκρο μιας οπτικής ίνας, σε ηλεκτρικό σήμα, εισάγονται αναπόφευκτα διάφοροι θόρυβοι και παραμορφώσεις λόγω ατελούς απόκρισης των επιμέρους εξαρτημάτων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα κατά την ερμηνεία του ληφθέντος σήματος. Σημαντικά κριτήρια απόδοσης ενός οπτικού δέκτη είναι η πιθανότητα σφάλματος και ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR). Οι οπτικοί δέκτες μπορεί να είναι απλοί, για βασικές εφαρμογές, ή πολύπλοκοι, ειδικά σε συνεκτικά συστήματα ή συστήματα υψηλού ρυθμού μετάδοσης, όπου απαιτείται λεπτομερής ανάλυση φάσης, πόλωσης ή πλάτους του σήματος. [14]

2.2.3. Ενισχυτές

Ο βασικός τρόπος για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της εξασθένησης κατά τη διάδοση ενός σήματος είναι μέσω των οπτικών ενισχυτών. Οι περισσότεροι οπτικοί ενισχυτές ενισχύουν το προσπίπτον σήμα μέσω της διαδικασίας της διεγερμένης εκπομπής, όπως και το λέιζερ χωρίς όμως την ύπαρξη μηχανισμού ανατροφοδότησης. Η οπτική ενίσχυση προκύπτει κυρίως από την οπτική απολαβή (optical gain) που επιτυγχάνεται μέσω της άντλησης (pumping). Οι ενισχυτές μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες: τους επωθητικούς ενισχυτές (power amplifiers), τους ενισχυτές γραμμής (line amplifiers) και τους προ-ενισχυτές (preamplifiers). [15]

- Οι επωθητικοί ενισχυτές τοποθετούνται μετά τον οπτικό πομπό ώστε να ενισχυθεί η ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος.
- Οι ενισχυτές γραμμής τοποθετούνται κατά μήκος της οπτικής ζεύξης ώστε να αντισταθμίσουν τις απώλειες που προκύπτουν κατά τη μετάδοση στην ίνα.
- Οι προ-ενισχυτές τοποθετούνται στο άκρο της ζεύξης που βρίσκεται ο δέκτης για να ενισχύσουν την ευαισθησία του.

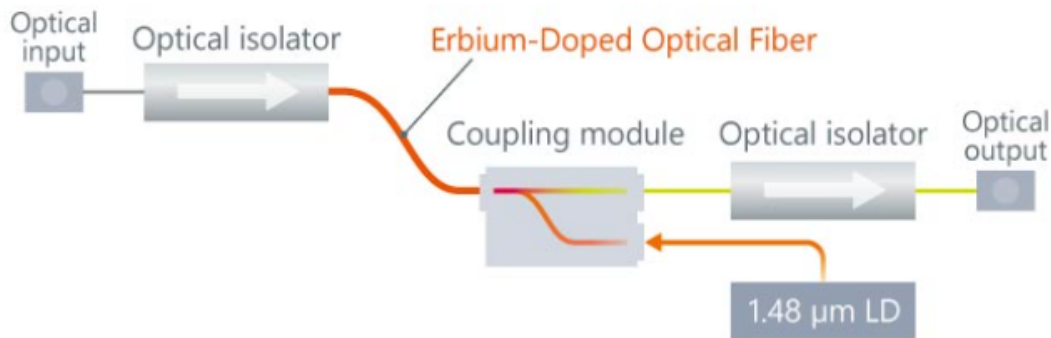


Εικόνα 2-2 : 3 τύποι οπτικών ενισχυτών, πηγή: [16]

Ενισχυτής EDFA

Ο **EDFA** (Erbium-Doped Fiber Amplifier) είναι ένας οπτικός ενισχυτής που χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Η οπτική ίνα (συνήθως μια μονόπλευρη ίνα) στον πυρήνα είναι εφοδιασμένη με στοιχείο σπάνιας γης έρβιο (erbium) για να απορροφήσει το φως σε μία συχνότητα και να εκπέμπει φως σε άλλη συχνότητα.

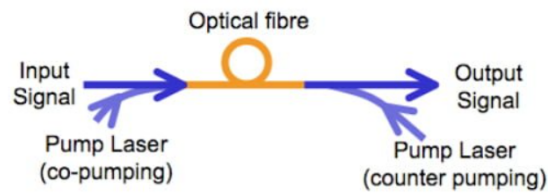
Το φως αντλείται από διόδους λέιζερ με μήκος κύματος περίπου 980 nm και μερικές φορές περίπου 1480 nm. Μέσω της διεγερμένης εκπομπής, το σήμα ενισχύεται απευθείας στο οπτικό πεδίο, χωρίς να μετατρέπεται σε ηλεκτρικό. Ο EDFA προσφέρει υψηλό κέρδος (έως 45 dB), χαμηλό λόγο θορύβου (~4–6 dB) και ευρύ φάσμα ενίσχυσης (~1530–1565 nm), καθιστώντας τον ιδανικό για WDM εφαρμογές και ενίσχυση σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις (π.χ. υποθαλάσσια καλώδια).[\[17\]](#) Παρ' όλα αυτά, περιορίζεται φασματικά και μπορεί να παράγει θόρυβο ASE ή να εμφανίσει μη γραμμικά φαινόμενα σε υψηλές ισχύες.[\[15\]](#)



Εικόνα 2-3 : παράδειγμα ενισχυτή EDFA, πηγή : [\[18\]](#)

Ενισχυτής Raman

Ο ενισχυτής Raman βασίζεται στο φαινόμενο σκέδασης Raman για την ενίσχυση του σήματος. Η λειτουργία του βασίζεται στην εισαγωγή ενός ισχυρού λέιζερ άντλησης (pump laser, συνήθως στα 1420–1480 nm) μέσα στην ίδια την οπτική ίνα που μεταδίδει το σήμα. Καθώς το φως διαδίδεται μαζί ή αντίθετα με το σήμα μεταφέρει ενέργεια στο σήμα μέσω διεγερμένης σκέδασης Raman, με αποτέλεσμα την ενίσχυσή του. Ο Raman ενισχυτής λειτουργεί σε ευρύτερη φασματική ζώνη σε σχέση με τον EDFA και μπορεί να ενισχύσει σήματα σε διάφορα μήκη κύματος, ανάλογα με την αντλία. Το κύριο πλεονέκτημά του είναι η διανεμημένη ενίσχυση κατά μήκος του καναλιού, που μειώνει την επίδραση του θορύβου και των μη γραμμικών φαινομένων. Μειονεκτήματα είναι η απαιτούμενη υψηλή ισχύς της αντλίας, το πολύπλοκο σύστημα σχεδίασης, καθώς και η ενδεχόμενη παραγωγή θορύβου μέσω ASE ή double Rayleigh scattering. Ο Raman χρησιμοποιείται κυρίως σε υποθαλάσσια καλώδια, μακρινές ζεύξεις και συστήματα WDM υψηλών ταχυτήτων όπου απαιτείται μεγάλη απόσταση χωρίς ηλεκτρονική αναγέννηση.[\[15\]](#) [\[17\]](#)



Εικόνα 2-4 : ενισχυτής Raman, πηγή: [17]

Οπτικός ενισχυτής ημιαγωγών (SOA)

Ο Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγών (SOA) είναι ένας τύπος ενισχυτή που βασίζεται σε ημιαγώγιμο υλικό και λειτουργεί παρόμοια με μια δίοδο laser, αλλά χωρίς ανατροφοδότηση. Το σήμα εισέρχεται στον ενεργό ημιαγώγιμο οδηγό, όπου μέσω ηλεκτρικής αντλίας (injection current) δημιουργείται αντιστροφή πληθυσμού και επιτυγχάνεται ενίσχυση με διεγερμένη εκπομπή. Το SOA συνδέεται συνήθως με την έξοδο των πομποδεκτών 1310nm για να ενισχύσει το επίπεδο σήματος πριν εισέλθει σε οπτικές ίνες. Υποστηρίζει όλα τα σήματα μήκους κύματος 1310nm και είναι συμβατό με όλες τις ταχύτητες δεδομένων. Ωστόσο, μειονεκτεί σε σχέση με EDFA και Raman ως προς το υψηλότερο επίπεδο θορύβου (ASE), την περιορισμένη ισχύ εξόδου, και τα ισχυρά μη γραμμικά φαινόμενα όπως διασταυρούμενη απορρόφηση και αλλαγές φάσης. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα μεταγωγής πακέτων (packet switching), ενεργές οπτικές διατάξεις, οπτικούς μεταγωγείς και ενισχυτές γραμμών μικρών αποστάσεων. [15] [17]



Εικόνα 2-5 : ενισχυτής SOA, πηγή [18]

Property	EDFA	Raman	SOA
Gain (dB)	> 40	> 25	>30
Wavelength (nm)	1530-1560	1280-1650	1280-1650
Bandwidth (3dB)	30-60	Pump dependent	60
Max. Saturation (dBm)	22	$0.75 \times \text{pump}$	18
Polarization Sensitivity	No	No	Yes
Noise Figure (dB)	5	5	8
Pump Power	25 dBm	>30 dBm	< 400 mW
Time Constant	10^{-2} s	10^{-15} s	2×10^{-9}
Size	Rack mounted	Bulk module	Compact
Switchable	No	No	Yes
Cost Factor	Medium	High	Low

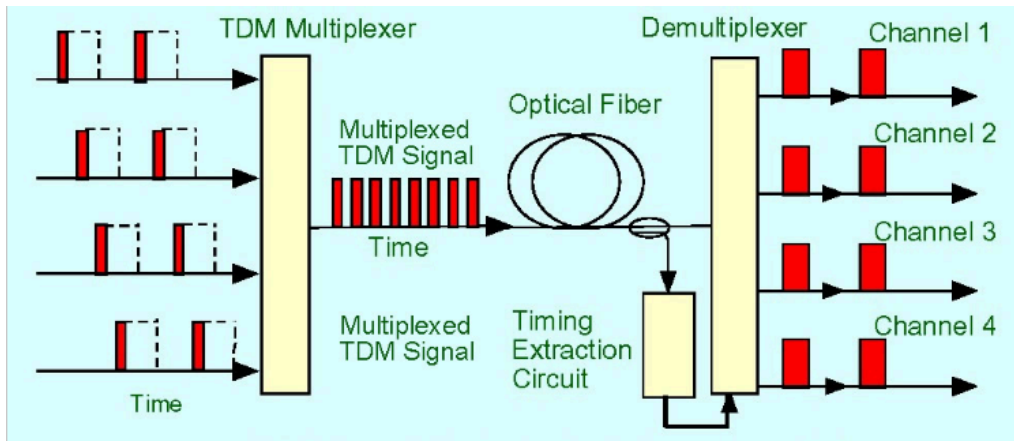
Εικόνα 2-6 : Πίνακας σύγκρισης μεγεθών/ιδιοτήτων ενισχυτών EDFA, Raman, SOA, πηγή: [\[17\]](#)

2.2.4. Τεχνικές πολυπλεξίας

Στις σύγχρονες οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές πολυπλεξίας με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας μετάδοσης και την αποτελεσματική αξιοποίηση των ινών. Οι βασικότερες μορφές είναι η Ηλεκτρονική Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (ETDM – Electrical Time Division Multiplexing), η Οπτική Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (OTDM – Optical Time Division Multiplexing) και η Οπτική Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM – Wavelength Division Multiplexing).

Στην **Ηλεκτρονική Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου**, πολλαπλές ροές δεδομένων χαμηλότερου ρυθμού (π.χ. 10 Gbps) συνδυάζονται σε ένα ταχύτερο ηλεκτρικό σήμα (π.χ. 40 Gbps). Αυτό το σύνθετο σήμα χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει ένα οπτικό φέρον, το οποίο μεταδίδεται μέσω της ίνας. Η πολυπλεξία γίνεται στο ηλεκτρονικό επίπεδο, και χρησιμοποιούνται ταχύτατοι διαμορφωτές και κυκλώματα ρολογιού για να διαχειριστούν τη σωστή χρονική ευθυγράμμιση των bits.

Η **Οπτική Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου** είναι η αντίστοιχη τεχνική στο οπτικό επίπεδο. Εδώ, πολλαπλά οπτικά παλμοσειριακά σήματα εισάγονται με χρονική μετατόπιση (time slots) και συνδυάζονται σε μία ενιαία οπτική ροή υψηλής ταχύτητας. Απαιτεί εξαιρετικά ακριβή χρονικό συγχρονισμό και οπτικά στοιχεία πολύ υψηλής ταχύτητας, όπως οπτικούς διαμορφωτές.

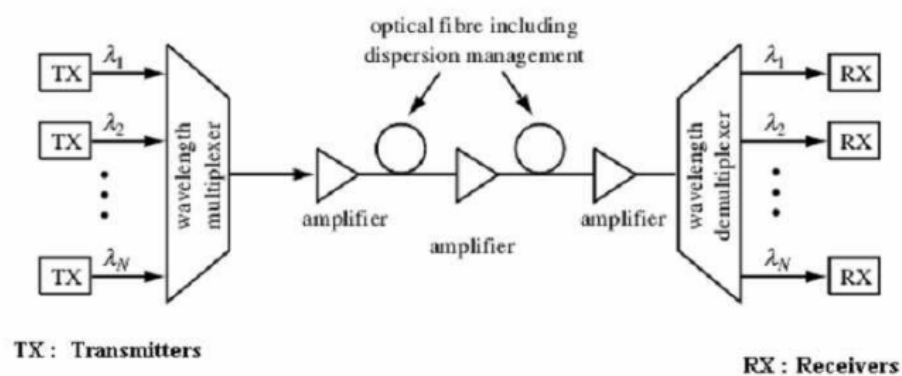


Εικόνα 2-7: Μετάδοση με TDM πολυπλεξία, πηγή : [\[20\]](#)

Η **Οπτική Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος** βασίζεται στην ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών οπτικών σημάτων, καθένα σε διαφορετικό μήκος κύματος. Όλα αυτά τα σήματα μεταδίδονται παράλληλα μέσα από την ίδια ίνα.

Υπάρχουν δύο βασικές μορφές:

- Πολυπλεξία Διαίρεσης για μεγάλο μήκος κύματος (CWDM - Coarse WDM): με πιο αραιά κατανομημένα κανάλια, φθηνότερη αλλά μικρότερης χωρητικότητας.
- Πολυπλεξία Διαίρεσης Πυκνού μήκους κύματος (DWDM - Dense WDM): με πολύ πυκνά κανάλια, κατάλληλη για μεγάλες αποστάσεις και τεράστιους όγκους δεδομένων (π.χ. 80 ή και 160 κανάλια στα 100 Gbps).

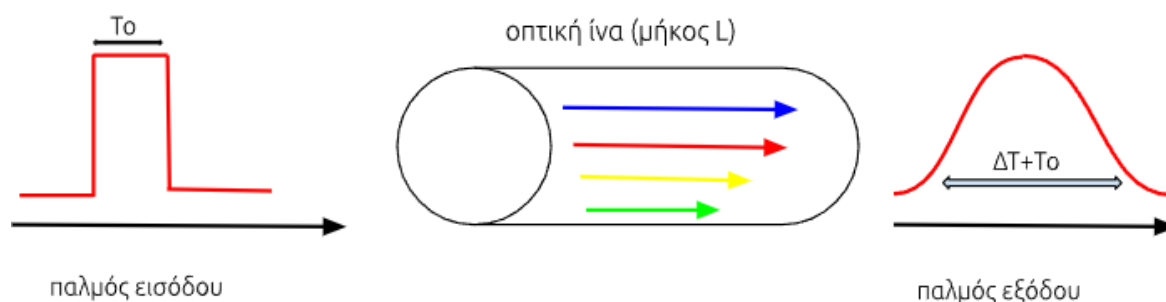


Εικόνα 2-8: Διάταξη WDM συστήματος, πηγή: [\[19\]](#)

2.3 Απώλειες και παραμορφώσεις λόγω αύξησης ρυθμού μετάδοσης

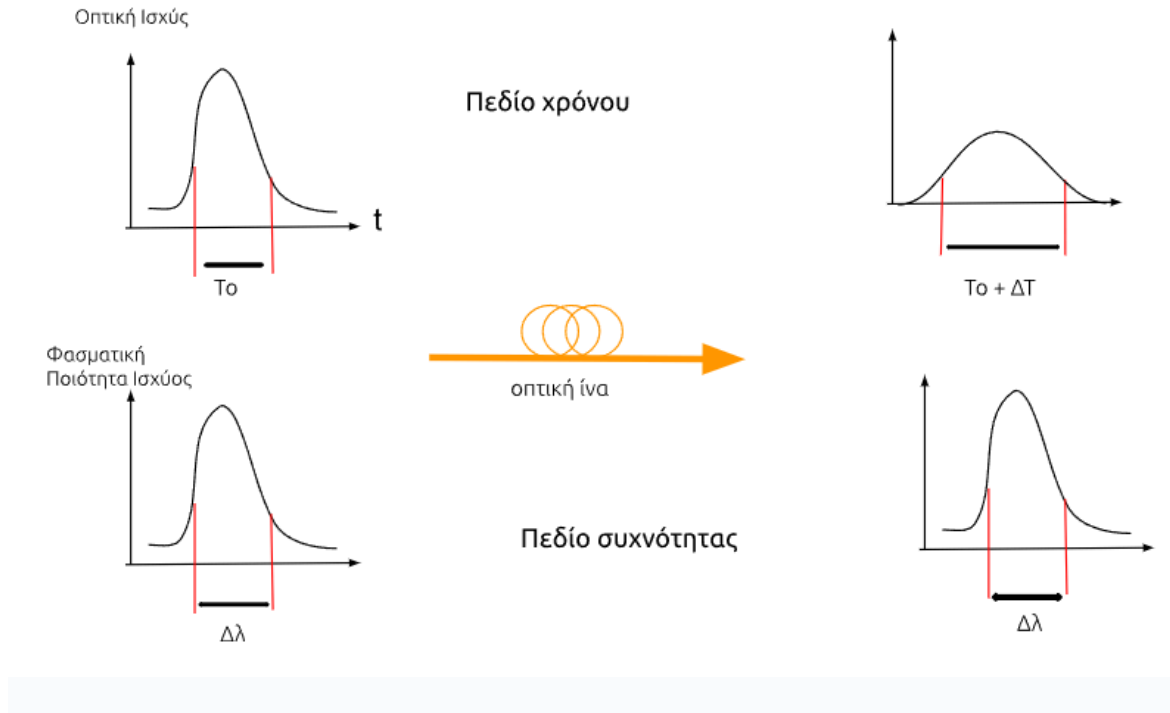
2.3.1. Χρωματική διασπορά

Η χρωματική ή ενδοτροπική διασπορά είναι ένα φαινόμενο που περιγράφει την τάση διαφορετικών χρωμάτων ή μηκών κύματος διάδοσης του φωτός να μεταδίδονται σε διαφορετικές ταχύτητες. Όταν το φως εισέρχεται στην οπτική ίνα, η ταχύτητα μετάδοσης είναι μικρότερη σε σχέση με την ταχύτητα μετάδοσης στο κενό και καθορίζεται από το δείκτη διάθλασης του μέσου. Ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από το μήκος κύματος που μεταδίδεται με αποτέλεσμα διαφορετικά μήκη κύματος να ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα μέσα στην ίνα και να προκαλείται διαχωρισμός του φωτός σε συνιστώσες με διαφορετικά μήκη κύματος. [21] Κατά συνέπεια, η χρωματική διασπορά οδηγεί στη χρονική διεύρυνση των παλμών, λόγω της εξάρτησης των παραμέτρων της διάδοσης από τη συχνότητα των μεταδιδόμενων κυμάτων η οποία μειώνει το δυνατό ρυθμό μετάδοσης ή/και την εμβέλεια. [22]



Εικόνα 2-9 : Χρονική διαπλάτυνση παλμού λόγω διασποράς

Η γραμμική φύση της διασποράς δεν εξαρτάται από την ισχύ του σήματος και όταν δεν συνυπάρχει με κάποιο άλλο φαινόμενο, συνήθως δεν προκαλεί καμία μεταβολή στη φασματική κατανομή του σήματος. [22]



Εικόνα 2-10 : Επίδραση διασποράς σε παλμό σε πεδίου χρόνου και συχνότητας

Η χρωματική διασπορά περιλαμβάνει δύο κατηγορίες: τη διασπορά υλικού, που οφείλεται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του υλικού από τη συχνότητα και τη διασπορά κυματοδηγού που οφείλεται στην εξάρτηση από τη συχνότητα των παραμέτρων της διάδοσης λόγω του σχήματος του κυματοδηγού. [23]

Στην έξοδο μιας μονότροπης ίνας μήκους L , θα φτάσει μια φασματική συνιστώσα ω με χρονική καθυστέρηση:

$$T = L/u_g \quad (2.1)$$

$$\text{όπου } u_g: \text{ταχύτητα ομάδας και ορίζεται ως: } u_g = (d\beta/d\omega)^{-1} \quad (2.2)$$

$$\text{Ο δείκτης διάθλασης είναι συνάρτηση συχνότητας: } \bar{n}_g = \bar{n} + \omega(d\bar{n}/d\omega) \quad (2.3)$$

$$\text{και αποδεικνύεται ότι: } u_g = c/n_g \quad (2.4)$$

Μετά τη μετάδοση ενός παλμού μέσω οπτικής ίνας μήκους L , με φασματικό εύρος $\Delta\omega$, η χρονική διεύρυνση του παλμού υπολογίζεται ως:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{u_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = L\beta_2 \Delta\omega \quad (2.5)$$

όπου $\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$ η παράμετρος GVD (Group Velocity Dispersion) που καθορίζει το πόσο θα διευρυνθεί ο παλμός.

Αντίστοιχα, αν αντί για το φασματικό εύρος $\Delta\omega$ χρησιμοποιήσουμε την περιοχή των μήκων κύματος $\Delta\lambda$, η εξίσωση (2.5) γράφεται ως εξής:

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{u_g} \right) \Delta\lambda = DL\Delta\lambda \quad (2.6)$$

$$\text{όπου } D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{u_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2, \text{ η παράμετρος διασποράς} \quad (2.7)$$

Στις μονορυθμικές ίνες, κυριαρχεί η διασπορά υλικού και λιγότερο η διασπορά κυματοδηγού. Η διασπορά υλικού και κυματοδηγού έχουν αντίθετα πρόσημα και μπορούν να αλληλοαναιρεθούν.

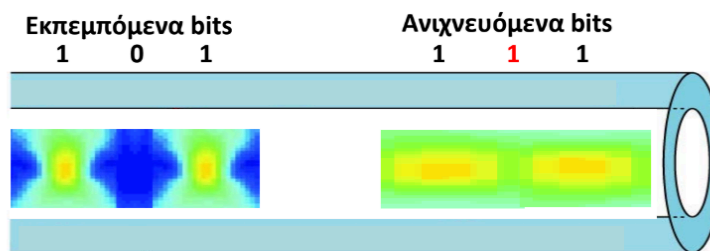
Η συνολική διασπορά είναι:

$$D = D_m + D_w \quad (2.8)$$

όπου D_m : διασπορά υλικού

και D_w : διασπορά κυματοδηγού [\[24\]](#)

Το ποσοστό διεύρυνσης του παλμού εξαρτάται από την απόσταση μετάδοσης της ίνας και από την παράμετρο της διασποράς D . Μια υπερβολική διεύρυνση του παλμού μπορεί να οδηγήσει γειτονικά bit να διαφύγουν της χρονικής θυρίδας και να προκύψει επικάλυψη, οδηγώντας τελικά σε διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference, ISI). Εξαιτίας αυτής, ο ρυθμός εμφάνισης λαθώς (Bit Error Rate-BER) αυξάνεται αφού ο δέκτης δυσκολεύεται να αντιστοιχίσει σωστά τα γειτονικά bit.



Εικόνα 2-11 : Λάθος απόφαση δέκτη λόγω ISI, πηγή [\[22\]](#)

2.3.2. Περιορισμοί εύρους ζώνης στοιχείων

Σε ένα σύστημα επικοινωνίας μέσω οπτικών ινών, όχι μόνο η ίδια η ίνα αλλά και τα ηλεκτρικά στοιχεία του συστήματος που διαθέτει ο πομπός και ο δέκτης ασκούν

καθοριστική επιρροή στην απόδοση του συστήματος. Καθοριστικό ρόλο στη μετάδοση του σήματος έχουν οι περιορισμοί εύρους ζώνης που εισάγουν τα ηλεκτρικά στοιχεία για ένα συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης.

Σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, το φασματικό περιεχόμενο του σήματος παραμένει συγκεντρωμένο στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων. Έτσι, το εγγενές εύρος ζώνης των στοιχείων του πομπού και του δέκτη, όπως είναι οι διαμορφωτές, οι φωτοδίοδοι και οι ενισχυτές, είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με το φάσμα του σήματος. Ως αποτέλεσμα, οι συσκευές μπορούν να ακολουθούν τις μεταβολές του σήματος χωρίς σημαντική παραμόρφωση, και η μετάδοση πραγματοποιείται αξιόπιστα.

Όταν ο **ρυθμός συμβόλων (symbol rate)** αυξάνεται, η κατάσταση αλλάζει. Οι ταχύτερες μεταβάσεις μεταξύ των συμβόλων οδηγούν σε ευρύτερο φάσμα σήματος· το απαιτούμενο εύρος ζώνης του σήματος μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$B_{signal} = \frac{R_s}{2} \quad (2.9)$$

όπου R_s είναι ο ρυθμός συμβόλων.

Αυτό σημαίνει ότι, όσο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης, είναι απαραίτητες υψηλότερες συχνοτικές συνιστώσες ώστε να διατηρηθεί η ευκρίνεια των μεταβάσεων του σήματος.

Ωστόσο, κάθε στοιχείο στο σύστημα χαρακτηρίζεται από ένα πεπερασμένο εγγενές εύρος ζώνης, το οποίο συνήθως εκφράζεται ως εύρος ζώνης 3 dB και αντανάκλα το μέγιστο φασματικό εύρος στο οποίο μπορούν να λειτουργούν χωρίς σημαντική εξασθένηση. Το εύρος αυτό καθορίζεται από φυσικούς παράγοντες, όπως οι σταθερές χρόνου RC, οι ιδιότητες των υλικών και η γεωμετρία της διάταξης. Όταν το απαιτούμενο εύρος ζώνης του σήματος παραμένει χαμηλότερο από αυτήν την τιμή, το σύστημα λειτουργεί σωστά. Μόλις όμως ο ρυθμός μετάδοσης αυξηθεί σε σημείο όπου το B_{signal} πλησιάζει ή υπερβαίνει το εύρος ζώνης του στοιχείου $B_{component}$, οι συσκευές δεν μπορούν πλέον να ανταποκριθούν με ακρίβεια στις ταχείες μεταβολές του σήματος.

Σε αυτήν την περίπτωση, τα μέρη με τις υψηλότερες συχνότητες του σήματος αποκόπτονται, οι ανιούσες και κατιούσες ακμές των παλμών γίνονται πιο αργές, και τα γειτονικά σύμβολα αρχίζουν να επικαλύπτονται. Το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται ως **παρεμβολή μεταξύ συμβόλων (Inter-Symbol Interference, ISI)**, **μείωση του ανοίγματος του διαγράμματος οφθαλμού (eye diagram)**, και τελικά **αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων bit (Bit Error Rate, BER)**.

Συνεπώς, ο **περιορισμός εύρους ζώνης του πομπού και του δέκτη** προκύπτει από το γεγονός ότι, πέρα από έναν συγκεκριμένο ρυθμό, τα στοιχεία δεν μπορούν να ακολουθήσουν τις γρήγορες μεταβάσεις των συμβόλων. Αυτό καθιστά το εύρος ζώνης των στοιχείων καθοριστικό παράγοντα στον προσδιορισμό του μέγιστου επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης του συστήματος. [\[25\]](#)

3 Τεχνικές ισοστάθμισης φαινομένων υποβάθμισης

3.1 Οπτικές Τεχνικές Αντιστάθμισης

3.1.1 Αντιστάθμιση χρωματικής διασποράς με χρήση ινών (Dispersion Compensation Fiber - DCF)

Μια ίνα με σημαντική αρνητική διασπορά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μια τυπική ίνα. Υιοθετώντας μια ίνα αντιστάθμισης με πολύ μεγάλη τιμή διασποράς αντίθετου προσήμου σε σχέση με αυτή της συμβατικής ίνας, η διασπορά που προκαλείται από τη συνηθισμένη ίνα μπορεί να μειωθεί ή και να εκμηδενιστεί. Για πρακτικές εφαρμογές, οι DCF συσκευάζονται σε μονάδες που είναι γνωστές ως μονάδες αντιστάθμισης διασποράς (Dispersion Compensating Modules – DCMs). Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές αντιστάθμισης διασποράς, όπως τα φωτονικά πλέγματα τύπου Bragg (fiber Bragg gratings), το βασικό πλεονέκτημα της DCF είναι ότι διαθέτει ευρύ φασματικό εύρος λειτουργίας, χαρακτηριστικό κρίσιμο για εφαρμογές πολλαπλού μήκους κύματος (WDM), καθώς και υψηλή αξιοπιστία και αμελητέα κυμάτωση διασποράς (dispersion ripple) εντός του φάσματος λειτουργίας. Επιπλέον, μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να αντισταθμίζει όχι μόνο τη διασπορά, αλλά και την κλίση της χρωματικής διασποράς, καθιστώντας την ιδανική για WDM εφαρμογές με ευρεία φασματικά παράθυρα.

Ωστόσο, λόγω της περιορισμένης τιμής διασποράς ανά μονάδα μήκους, η DCF εμφανίζει συνήθως υψηλότερη εξασθένηση (attenuation) σε σύγκριση με τα φωτονικά πλέγματα (fiber gratings), ιδίως όταν απαιτείται υψηλή συνολική αντιστάθμιση διασποράς. [\[26\]](#)

3.1.2 Αντιστάθμιση Διασποράς με Πλέγματα Bragg (Fiber Bragg Grating -FBG)

Ένα πλέγμα καταγράφει το μήκος μιας οπτικής ίνας αλλάζοντας περιοδικά το διαθλαστικό δείκτη της ίνας. Το φως μέσα στην ίνα ανακλάται με ένα μήκος κύματος διπλάσιο της περιόδου του πλέγματος. Σε έναν αντισταθμιστή διασποράς η περίοδος του πλέγματος μειώνεται γραμμικά κατά το μήκος της συσκευής. Επομένως το μπλε φως ανακλάται σε ένα σημείο πιο μέσα στη συσκευή από το κόκκινο φως και έτσι καθυστερείται σε σχέση με το κόκκινο φως. Οι FBGs είναι παθητικά οπτικά στοιχεία συμβατά με ίνες, έχουν χαμηλές απώλειες εισαγωγής και είναι οικονομικά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες, σταθεροποιητές μήκους κύματος για αντλίες λέιζερ, φίλτρα προσθήκης-αφαίρεσης WDM στενού εύρους ζώνης, καθώς και φίλτρα για αποζημίωση

διασποράς. Το μειονέκτημά τους είναι ότι το αντισταθμισμένο σήμα έχει μεγάλη πίσω κάμψη και έτσι ένας οπτικός κυκλοφορητής πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει την είσοδο από την έξοδο. Έχουν ακόμα περιορισμένο εύρος ζώνης λειτουργίας και αντίθετα με άλλες συμβολομετρικές συσκευές η διασπορά δεν έχει μια χρήσιμη περιοδικότητα. [\[26\]\[27\]\[28\]](#)

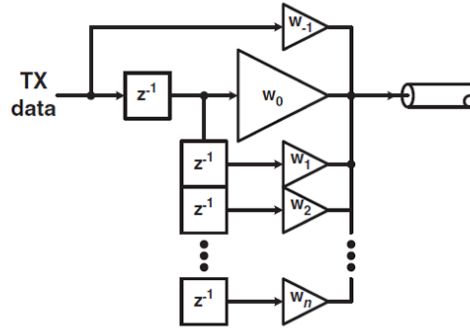
3.2 Ψηφιακές Τεχνικές Αντιστάθμισης

3.2.1 Αντιστάθμιση Διασποράς με Ηλεκτρονικό Φιλτράρισμα (Electronic Dispersion Compensation - EDC)

Το ηλεκτρονικό φιλτράρισμα, γνωστό και ως ισοστάθμιση (equalization), είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να αντιμετωπίσει τη διασπορά σε ένα οπτικό δίκτυο επικοινωνιών. Ένα κανάλι επικοινωνίας μπορεί να χρησιμοποιεί φιλτράρισμα για να αντισταθμίσει την υποβάθμιση του σήματος που προκαλείται από το μέσο μετάδοσης. Συνήθως, για την EDC χρησιμοποιείται ένα φίλτρο μεταβίβασης (transversal filter), του οποίου η έξοδος είναι το σταθμισμένο άθροισμα πολλαπλών εισόδων με χρονική καθυστέρηση. Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως προσαρμογή (adaption), επιτρέπει στο σύστημα EDC να τροποποιεί αυτόματα τα βάρη του φίλτρου ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου σήματος. Η EDC είναι συμβατή τόσο με συστήματα μονοτροπικής ίνας (single-mode) όσο και με πολυτροπικής ίνας (multimode). [\[26\]](#)

3.2.2 Ισοστάθμιση Εμπρόσθιας Τροφοδότησης (Feed Forward Equalization - FFE)

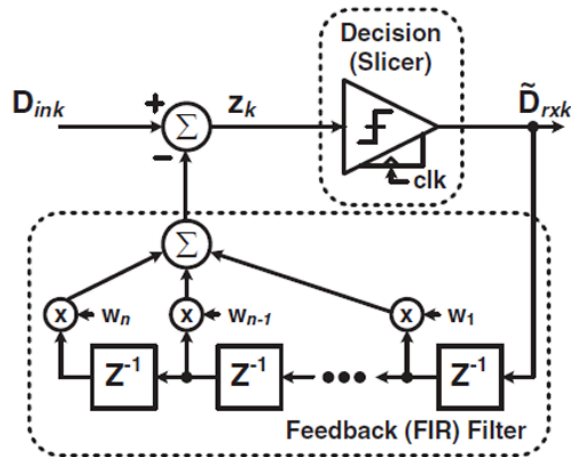
Η μέθοδος FFE υλοποιείται με τη χρήση ενός φίλτρου πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR) με συντελεστές (taps), όπου το σήμα εισόδου διέρχεται από πολλαπλές καθυστερημένες εκδοχές του εαυτού του, οι οποίες πολλαπλασιάζονται με σταθμισμένους συντελεστές και αθροίζονται. Τα pre-taps (precursors) διορθώνουν την παραμόρφωση πριν από το κύριο παλμό (cursor), ενώ τα post-taps (post-cursors) διορθώνουν τις καθυστερημένες παραμορφώσεις. Ο FFE μπορεί να αντισταθμίσει φαινόμενα όπως διασπορά, εξασθένηση και διαφωνία (crosstalk), χωρίς να ενισχύει το θόρυβο, και είναι προσαρμοστική, δηλαδή τα βάρη της μπορούν να αλλάζουν δυναμικά. Ωστόσο, δεν μπορεί να διορθώσει πλήρως την παρεμβολή μεταξύ συμβόλων (ISI) και μπορεί να απαιτεί υψηλή κατανάλωση ισχύος, ενώ ενδέχεται να ενισχύσει υψηλές συχνότητες προκαλώντας ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI). [\[29\]\[30\]](#)



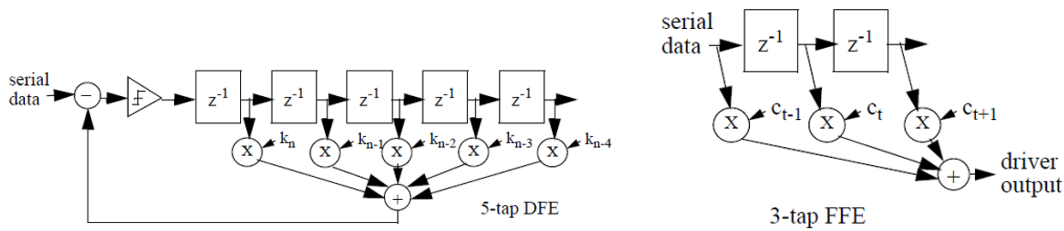
Εικόνα 3-1 : Εφαρμογή FFE σε πομπό, πηγή: [29]

3.2.3 Ισοστάθμιση Ανάδρασης Απόφασης (Decision Feedback Equalization-DFE)

Ο DFE είναι μια τεχνική μη γραμμικής ισοστάθμισης που χρησιμοποιείται κυρίως στην πλευρά του δέκτη για την αντιστάθμιση της παρεμβολής μεταξύ συμβόλων (ISI). Λειτουργεί χρησιμοποιώντας τις αποφάσεις προηγούμενων bits για να διορθώσει τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από τα προηγούμενα σύμβολα (post-cursor ISI), χωρίς να ενισχύει τον θόρυβο ή τη διαφωνία (crosstalk), όπως κάνει ένας γραμμικός ισοσταθμιστής. Αποτελείται από ένα FIR φίλτρο προώθησης και μια μονάδα ανάδρασης, της οποίας οι συντελεστές μπορούν να ρυθμίζονται δυναμικά. Αν και προσφέρει υψηλή απόδοση στην καταστολή της διασυμβολικής παρεμβολής, παρουσιάζει κίνδυνο διάδοσης σφαλμάτων και απαιτεί ακριβή χρονισμό στην ανάδραση. [29][30]



Εικόνα 3-2 : Εφαρμογή DFE σε δέκτη, πηγή: [29]



Εικόνα 3-3 : 3-tap FFE, 5-tap DFE, πηγή: [31]

Ο FFE συχνά ενισχύει τον θόρυβο λόγω της γραμμικής του λειτουργίας, σε αντίθεση με τον DFE που ακυρώνει τη διασυμβολική παρεμβολή χωρίς να ενισχύει τον θόρυβο, καθιστώντας τον πιο αποτελεσματικό σε θορυβώδεις συνθήκες. Σχετικά με τη διάδοση σφαλμάτων, ο FFE δεν επηρεάζεται, αφού ένα σφάλμα δεν μεταφέρεται στα επόμενα σύμβολα, ενώ ο DFE είναι επιρρεπής στη διάδοση σφαλμάτων, αφού μια λανθασμένη απόφαση στην ανατροφοδότηση μπορεί να οδηγήσει σε επόμενα λάθη. Τέλος, ο FFE μπορεί να διορθώσει παρεμβολές που εμφανίζονται τόσο πριν όσο και μετά από το τρέχον σύμβολο. Αντίθετα, ο DFE μπορεί να ακυρώνει τις παρεμβολές που εμφανίζονται μετά το τρέχον σύμβολο (post-cursor ISI), αλλά δεν μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά εκείνες που εμφανίζονται πριν (pre-cursor ISI).

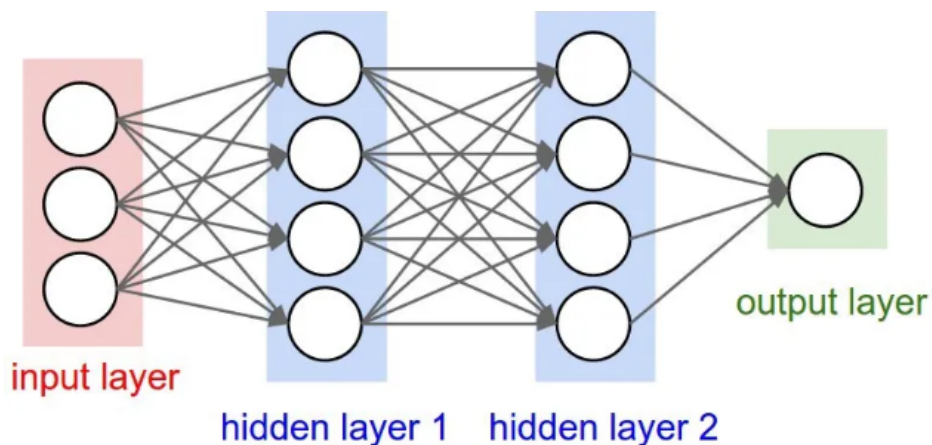
Συχνά σε συστήματα μικρής ή μεσαίας απόστασης, προτιμάται ο FFE επειδή είναι πιο απλός και οικονομικός στην υλοποίηση. Επιπλέον, δεν απαιτεί περίπλοκη ανάδραση, άρα έχει λιγότερο κίνδυνο σφαλμάτων. Αντιμετωπίζει ικανοποιητικά τη διασυμβολική παρεμβολή χωρίς την πολυπλοκότητα και τα μειονεκτήματα του DFE, η απώλεια απόδοσης είναι περιορισμένη και η συμπεριφορά του είναι πιο προβλέψιμη. Ο DFE είναι χρήσιμος κυρίως σε πιο απαιτητικά κανάλια ή μεγάλες αποστάσεις, αλλά συνοδεύεται από μεγαλύτερο κόστος, πολυπλοκότητα και ευαισθησία στον θόρυβο. Αν όμως η διασυμβολική παρεμβολή είναι σοβαρή ή αν το κανάλι είναι πολύ επιβαρυνόμενο, τότε μπορεί να χρειαστεί και συνδυασμός FFE + DFE. [32]

3.2.4 Προηγμένες DSP μέθοδοι & μηχανική μάθηση

Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης (ML) έχουν αναδειχθεί ως ισχυρό εργαλείο για την αντιμετώπιση προκλήσεων όπως οι γραμμικές και μη γραμμικές παραμορφώσεις, η ισοστάθμιση καναλιών και η πρόβλεψη της ποιότητας σήματος. Χάρη στην ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε περίπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα, τα αλγοριθμικά μοντέλα μηχανικής μάθησης βρίσκουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές σε σύγχρονα οπτικά δίκτυα, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα των συστημάτων μετάδοσης.

3.2.4.1 Νευρωνικά δίκτυα και εκπαίδευση

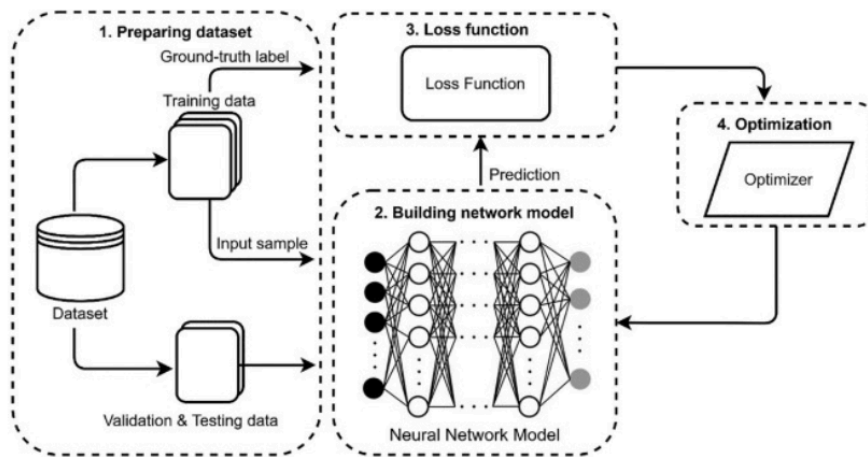
Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών των μεθόδων είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN), με συνηθέστερη δομή το νευρωνικό δίκτυο τροφοδοσίας προς τα εμπρός (Feedforward Neural Network - FFNN). Αυτό το νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από τρεις στρώσεις, που ονομάζονται είσοδος (input layer), κρυφό επίπεδο (hidden layer) και έξοδος (output layer). Κάθε στρώση περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους κόμβους (nodes). Οι γραμμές μεταξύ των κόμβων δείχνουν τη ροή της πληροφορίας από τον έναν κόμβο στον επόμενο. Σε αυτόν τον τύπο νευρωνικού δικτύου, η πληροφορία ρέει μόνο από την είσοδο προς την έξοδο. [\[33\]](#)



Εικόνα 3-4 : Παράδειγμα FFNN, πηγή : [\[34\]](#)

Υπάρχουν διάφορα είδη Νευρωνικών Δικτύων όπως τα επαναλαμβανόμενα (RNN) για χρονοσειρές, τα γραφικά (GNN) για δομές γράφων και τα ανταγωνιστικά (GAN) για παραγωγή δεδομένων.

Η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου είναι η διαδικασία αξιοποίησης δεδομένων εκπαίδευσης (training data) για να βρεθούν τα κατάλληλα βάρη του δικτύου προκειμένου να δημιουργηθεί μια καλή αντιστοίχιση εισόδων και εξόδων. Αποτελείται από τέσσερα μέρη: προετοιμασία του συνόλου δεδομένων, κατασκευή ενός μοντέλου δικτύου, συνάρτηση απώλειας και βελτιστοποίηση.



Εικόνα 3-5 : Στάδια εκπαίδευσης ενός νευρωνικού πηγή: [35]

Για την εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων το σύνολο δεδομένων χωρίζεται σε τρία μέρη: δεδομένα εκπαίδευσης (training data), που χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή των βαρών, δεδομένα επικύρωσης (validation data), που βοηθούν στη ρύθμιση των υπερπαραμέτρων, και δεδομένα ελέγχου (test data), τα οποία αξιολογούν την τελική απόδοση του μοντέλου. [36]

Για την εκπαίδευση και τη σωστή λειτουργία ενός νευρωνικού δικτύου, καθοριστικό ρόλο παίζουν τρία βασικά στοιχεία: **η συνάρτηση ενεργοποίησης, η συνάρτηση απώλειας και ο βελτιστοποιητής.**

Η συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) προσδίδει μη γραμμικότητα στο νευρωνικό δίκτυο, επιτρέποντάς του να μάθει πολύπλοκα μοτίβα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η **ReLU** (Rectified Linear Unit) η οποία απενεργοποιεί νευρώνες με αρνητικές τιμές επιταχύνοντας τη σύγκλιση της μεθόδου καθοδικής κλίσης (gradient descent). [35] [36]

Η συνάρτηση απώλειας (loss function) υπολογίζει το σφάλμα μεταξύ της προβλεπόμενης τιμής του μοντέλου και της αναμενόμενης εξόδου. Οι πιο κοινές συναρτήσεις απώλειας για μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης είναι οι **MSE** (Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα) – Mean Squared Error και **MAE** (Μέσο Απόλυτο Σφάλμα) – Mean Absolute Error που υπολογίζουν τον μέσο όρο του τετραγώνου ή της απόλυτης τιμής της διαφοράς μεταξύ της προβλεπόμενης τιμής και της αναμενόμενης εξόδου.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - \hat{y}_i^2}{N} \quad (3.1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - \hat{y}_i}{N} \quad (3.2)$$

όπου

y: η αναμενόμενη έξοδος (πραγματική τιμή)

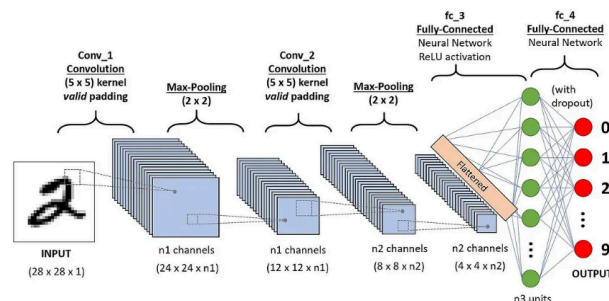
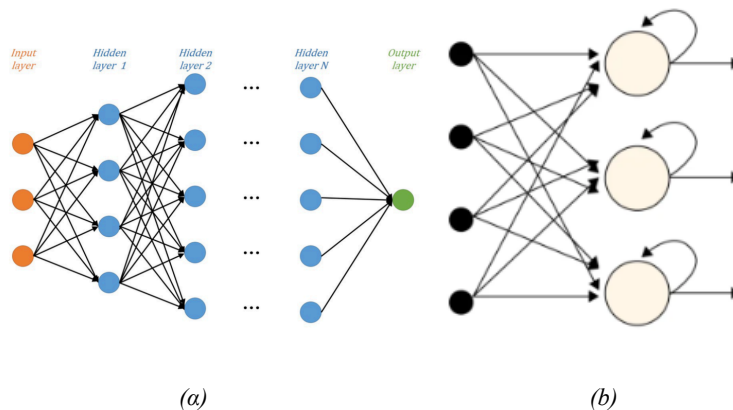
$\hat{y}$: η προβλεπόμενη τιμή από το νευρωνικό δίκτυο

N: το πλήθος των δεδομένων στο batch

Ο βελτιστοποιητής είναι μια συνάρτηση ή αλγόριθμος που τροποποιεί τα χαρακτηριστικά ενός νευρωνικού δικτύου, όπως τα βάρη και τον ρυθμό εκμάθησης (learning rate). Στοχεύει στη μείωση της συνολικής απώλειας (loss) και στη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου, ενώ μπορεί επίσης να μειώσει σημαντικά τον χρόνο εκπαίδευσης. Ένας από τους πιο δημοφιλείς είναι ο **Adam** (Adaptive Moment Estimation) ο οποίος είναι υπολογιστικά αποδοτικός και ιδανικός για μεγάλα ή θορυβώδη σύνολα δεδομένων. [37]

3.2.4.2 Βαθιά μάθηση & αρχιτεκτονικές

Η βαθιά μάθηση (Deep Learning) επεκτείνει την κλασική λογική των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα με πολλαπλά κρυφά επίπεδα, επιτρέποντας την αναπαράσταση σύνθετων μοτίβων. Σε αυτή, συναντάμε συχνά το Βαθύ Νευρωνικό Δίκτυο (DNN), το Αναδρομικό Νευρωνικό Δίκτυο (RNN) και το Συνελκτικό Νευρωνικό Δίκτυο (CNN).



(c)

Εικόνα 3-6 : (a) Deep Neural Network, πηγή: [38], (b) Recurrent Neural Network, πηγή: [39], (c) δομή Convolutional Neural Network, πηγή: [40]

3.2.4.3 Εφαρμογές ML σε οπτικά συστήματα

Η εφαρμογή της μηχανικής μάθησης σε οπτικά συστήματα επικοινωνίας καλύπτει τρεις κύριους τομείς: **την αντιμετώπιση μη γραμμικότητας, την παρακολούθηση απόδοσης και την έξυπνη λήψη αποφάσεων**. Στην αντιμετώπιση μη γραμμικότητας, τεχνικές όπως στοχαστική οπισθοδιάδοση (Stochastic Backpropagation - SBP), οι Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης (SVMs), Κ-Πλησιέστεροι Γείτονες (K-Nearest Neighbors -KNN) και Ενισχυτική Μάθηση (Reinforcement Learning - RL-SARSA) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία βελτιστοποιημένων μοντέλων πρόβλεψης και αντιστάθμισης παραμορφώσεων. Για την παρακολούθηση απόδοσης, εφαρμόζονται Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANNs), Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα (DNNs), SVMs και Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis -PCA), που επιτρέπουν την αυτόματη ανίχνευση και διάγνωση προβλημάτων. Στην έξυπνη λήψη αποφάσεων, συνδυάζονται τεχνικές όπως η Διπλή Εκθετική Εξομάλυνση (Double Exponential Smoothing - DES) με SVMs για την πρόβλεψη βλαβών και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. [\[41\]](#) [\[42\]](#)

Επίσης, η εφαρμογή της μηχανικής μάθησης (ML) σε *οπτικά συστήματα μικρής εμβέλειας*, όπως τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON), έχει κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις βασικούς τομείς: **πρόβλεψη και διαχείριση εύρους ζώνης, κατανομή υποφορέα, ισοστάθμιση και ανίχνευση σφαλμάτων**. Για την πρόβλεψη εύρους ζώνης, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι όπως τα ANNs και το Xgboost, ενώ για τη δυναμική κατανομή υποφορέα εφαρμόζεται βαθιά ενισχυτική μάθηση. Όσον αφορά στην ανίχνευση σφαλμάτων, αλγόριθμοι όπως τα Random Forests και τα Bayesian δίκτυα χρησιμοποιούνται για την προληπτική διάγνωση βλαβών, βελτιώνοντας την αξιοπιστία του δικτύου. Τέλος, στην ισοστάθμιση, για την αντιμετώπιση παραμορφώσεων όπως η χρωματική διασπορά, στην περίπτωση των IM/DD και συνεκτικά PONs, έχουν εφαρμοστεί νευρωνικά δίκτυα μικρού βάθους που παρουσιάζουν επιδόσεις συγκρίσιμες με πιο πολύπλοκες μεθόδους όπως τα Volterra φίλτρα. Παράλληλα, για την αποφόρτιση των δεκτών, προτείνονται τεχνικές προ-ισοστάθμισης στον πομπό, είτε με μοντέλα πολωνυμικής μνήμης είτε με εκπαιδευμένα νευρωνικά δίκτυα. [\[43\]](#)

Σε πολλές έρευνες έχει αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα των νευρωνικών δικτύων ιδιαίτερα σε συστήματα μετάδοσης PAM4. Για παράδειγμα, σε σύστημα SSB-PAM4 στα 112 Gb/s μετάδοσης μέσω 80 km SSMF, η χρήση ANN ισοσταθμιστή οδήγησε σε σημαντική βελτίωση του BER σε σύγκριση με συμβατικούς ισοσταθμιστές. [\[44\]](#) Αντίστοιχα, σε ρυθμούς 20 Gb/s PAM4 με χρήση DML και απόσταση 18 km SMF-28e, ένας ANN μη γραμμικός ισοσταθμιστής (NLE) αύξησε την χωρητικότητα του καναλιού και μείωσε τις μη γραμμικές απώλειες. [\[45\]](#) Σε σύστημα 56 Gbaud PAM-4 υπό την επίδραση χρωματικής διασποράς (± 60 ps/nm), ένας ANN μη γραμμικός ισοσταθμιστής (NLE) βελτίωσε την ευαισθησία του δέκτη κατά ~ 1 dB στο όριο διόρθωσης λαθών KP-4 (FEC) έναντι του FFE-15 [\[46\]](#) Επιπλέον, σε πειράματα μετάδοσης PAM-4 έως 137 Gb/s μέσω οπτικής πλάτης 40 cm, μέθοδος ισοστάθμισης με νευρωνικά δίκτυα ξεπέρασε τις τεχνικές MLSE και DFE, προσφέροντας μια σχεδιαστική λύση για κέντρα δεδομένων

(data centers).[\[47\]](#) Μάλιστα, έχει αποδειχθεί ότι ποικίλες αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων (F-NN, RBF-NN, AR-RNN, L-RNN) μπορούν να ισοσταθμίσουν μη γραμμικά φαινόμενα σε συστήματα PAM4 πετυχαίνοντας BER κάτω από το όριο FEC [\[48\]](#) Επίσης, για μετάδοση 168 Gb/s PAM-4 μέσω 1,5 km SMF, ισοσταθμιστής βασισμένος σε FNN μείωσε το BER κατά δέκα φορές έναντι του FFE [\[49\]](#), ενώ σε σύνδεση 64 Gb/s PAM4 με MMF 4 km και VCSEL 850 nm, ισοσταθμιστής βασισμένος σε FNN ξεπέρασε την απόδοση ενός ισοσταθμιστή Volterra 3ης τάξης. [\[49\]](#) Σε μετάδοση 50 Gb/s μέσω 20 km SMF με συσκευές 10 GHz, ο FNN ισοσταθμιστής αντισταθμίζει επιτυχώς τις παραμορφώσεις με εύρος ζώνης μόνο 3,6 GHz ενώ σε μετάδοση 20 Gb/s PAM4 μέσω 18 km O-band, FNN ισοσταθμιστής αυξάνει τη χωρητικότητα του καναλιού και μειώνει δραστικά τις μη γραμμικές απώλειες. [\[49\]](#)

Ένας τύπος νευρωνικού δικτύου που έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην ισοστάθμιση οπτικών συστημάτων είναι τα Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks – CNNs). Για παράδειγμα, ένας ισοσταθμιστής βασισμένος σε CNN επιτυγχάνει μετάδοση PAM4 στα 56 Gbps με τεχνολογία IM/DD, χρησιμοποιώντας συσκευές 10G και επιδεικνύοντας αξιοσημείωτη απόδοση τόσο σε συνθήκες back-to-back όσο και μετά από 25 km SSMF, με ευαισθησία δέκτη -19,2 dBm και περιθώριο απώλειας ζεύξης 29 dB, ξεπερνώντας σημαντικά τους παραδοσιακούς ισοσταθμιστές FFE και Volterra. [\[50\]](#) Ακόμα, ένας μη γραμμικός ισοσταθμιστής CNN επιτυγχάνει BER της τάξης του $3,50 \times 10^{-6}$ για μετάδοση 112 Gbps PAM4 μέσω 40 km SMF υπερτερώντας των παραδοσιακών μη γραμμικών ισοσταθμιστών τύπου Volterra. [\[51\]](#)

Επιπλέον, πέραν των Τεχνητών Νευρωνικών δικτύων, πολλές είναι οι εφαρμογές μεθόδων βαθιάς μηχανικής μάθησης για προβλήματα ισοστάθμισης. Οι αλγόριθμοι DNN είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για ισοστάθμιση σε οπτικά συστήματα επικοινωνίας λόγω της ικανότητάς τους να μαθαίνουν πολύπλοκες σχέσεις. Για παράδειγμα, για μετάδοση PAM-4 μεγάλης εμβέλειας τόσο στα 28GBd όσο και στα 56GBd, μια αρχιτεκτονική παράλληλου ισοσταθμιστή DNN με 3 επίπεδα μπορεί να προσφέρει επίπεδο απόδοσης BER συγκρίσιμο με τον παραδοσιακό ισοσταθμιστή 2-tap DFE σε συνδυασμό με 15-tap FFE, με ταχύτερη διαδικασία εκπαίδευσης. Για μετάδοση PAM-4 μεγάλης εμβέλειας τόσο στα 28GBd όσο και στα 56GBd, ένας βελτιστοποιημένος ισοσταθμιστής DNN με 3 επίπεδα μπορεί να προσφέρει επίπεδο απόδοσης BER συγκρίσιμο με τον παραδοσιακό ισοσταθμιστή 2-tap DFE σε συνδυασμό με 15-tap FFE, με ταχύτερη διαδικασία εκπαίδευσης. [\[52\]](#) Ακόμα, βαθύ νευρωνικό δίκτυο (DNN) με 64 Gbps PAM4 μέσω πολυτροπικής οπτικής ίνας (MMF) μήκους 4 km, χρησιμοποιώντας VCSEL στα 850 nm επιτυγχάνει ρυθμό σφάλματος bit (BER) ίσο με $4,41 \times 10^{-5}$. Το γινόμενο ταχύτητας μετάδοσης-απόστασης (data-rate-distance product) φτάνει σε τιμή-ρεκόρ 256 Gbps·km για εφαρμογές μεταξύ κέντρων δεδομένων (Inter-data center).[\[53\]](#) Πρόσφατα, σχεδιάστηκε σύστημα IM/DD ως ένα πλήρες end-to-end βαθύ νευρωνικό δίκτυο με μετάδοση 42 Gb/s σε αποστάσεις άνω των 40 km με BER κάτω από το όριο 6.7% του HD-FEC. Το προτεινόμενο σύστημα υπερτερεί των λύσεων IM/DD που βασίζονται σε διαμόρφωση PAM2/PAM4 και της συμβατικής ισοστάθμισης στον δέκτη για μια σειρά αποστάσεων μετάδοσης. [\[54\]](#) Η ισοστάθμιση στις οπτικές επικοινωνίες μπορεί επιτευχθεί

και με χρήση Αναδρομικών Νευρωνικών δικτύων (RNNs). Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι σε συστήματα μετάδοσης PAM-4 56 Gbps τα RNNs μπορούν να πετύχουν την ίδια απόδοση BER με τα ANNs, προσφέροντας παράλληλα μείωση 70% στην υπολογιστική πολυπλοκότητα. [55] Ακόμα, σε σύνδεση 160 Gb/s PAM4 και ζεύξη 1 χλμ, χρησιμοποιώντας μικροδακτυλιοειδή διαμορφωτή από πυρίτιο (Si-MRM) και ισοσταθμιστή βασισμένο σε LSTM, έναν ειδικό τύπο RNN, η μη-γραμμικότητα που προκαλείται από τον διαμορφωτή μειώνεται σημαντικά [49]

3.2.4.4 Προηγμένες DSP μέθοδοι

Εκτός από τις τεχνικές μηχανικής μάθησης, η ισοστάθμιση μπορεί να επιτευχθεί και μέσω προηγμένων μεθόδων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP). Μία τέτοια μέθοδος είναι η ID-FFE/ID-DFE. Πρόκειται για έναν απλό ισοσταθμιστή έντασης (intensity directed equalizer), βασισμένο στους FFE και DFE, για την αντιμετώπιση των παραμορφώσεων που προκαλούνται από τη μεταβολή της συχνότητας του παλμού (chirp). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος πρώτα διαιρεί το σύμβολο σε διαφορετικά σύνολα ανάλογα με το επίπεδο έντασής του. Έπειτα, εφαρμόζονται οι συντελεστές των αντίστοιχων ομάδων. Τέσσερα σύνολα συντελεστών για σύμβολα PAM4 επιλέγονται σύμφωνα με τρία κατώφλια για το ID-FFE και τέσσερα επίπεδα για το ID-DFE. Μετά την ταξινόμηση, χρησιμοποιούνται οι επιθυμητοί συντελεστές βαθμίδων (tap coefficients) από διαφορετικά σύνολα και οι υπόλοιπες διαδικασίες είναι ίδιες με αυτές του παραδοσιακού FFE/DFE.

Μία άλλη μέθοδος είναι η DD-FTN, στην οποία το σήμα μετά τον συγχρονισμό ισοσταθμίζεται μέσω ενός FFE, προσαρμοσμένο από τον αλγόριθμο LMS. Έπειτα, τοποθετείται ένα ισορροπημένο ψηφιακό φίλτρο για να αντιμετωπίσει τον ενισχυμένο θόρυβο εντός ζώνης (in-band noise) που προκαλεί ο ισοσταθμιστής. Τέλος, εφαρμόζεται η εκτίμηση ακολουθίας μέγιστης πιθανοφάνειας (MLSE) για την εξάλειψη της έντονης παρεμβολής μεταξύ συμβόλων (ISI) που προκαλεί το ισορροπημένο φίλτρο.

Ακόμα, η μέθοδος CR-FFE αποτελεί έναν αλγόριθμο ανάκτησης χρονισμού και ισοσταθμιστή προώθησης (feed-forward equalization), ο οποίος εκτιμά το σφάλμα χρονισμού με βάση τη διαφορά μεταξύ δύο συντελεστών (taps) ενός FFE με απόσταση $T/2$. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να εξαλείψει την παρεμβολή μεταξύ συμβόλων (ISI) που προκαλείται από γραμμικές παραμορφώσεις και ταυτόχρονα να παρακολουθεί μεγάλες αποκλίσεις του ρολογιού δειγματοληψίας (sampling clock offset - SCO).

Και οι 3 αυτές μέθοδοι εμφανίζουν παρόμοια ή ελαφρώς αυξημένη πολυπλοκότητα σε σχέση με τους συμβατικούς ισοσταθμιστές ενώ μπορούν να αντισταθμίσουν τις αδυναμίες των συμβατικών γραμμικών ισοσταθμιστών και να επιτύχουν καλύτερη απόδοση σε συγκεκριμένα σενάρια. Παραδείγματα εφαρμογών:

- μετάδοση σήματος PAM4 140 Gbit/s στα 20 km και ευαισθησία δέκτη -5.5 dBm με χρήση DD-FTN.
- σύστημα C-band 56 Gbit/s PAM4 με μετάδοση 43 km και χρήση των ID-FFE/ID-DFE

- αντιμετώπιση SCO έως και 1000 ppm από CR-FFE μετά από μετάδοση 40 km σε σύστημα 50 Gbit PAM4 βασισμένο σε DML 10 GHz. [\[56\]](#)

4 Προτεινόμενος DNN ισοσταθμιστής & Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχεδίαση, η υλοποίηση και η αξιολόγηση ενός προτεινόμενου ισοσταθμιστή βασισμένου σε βαθύ νευρωνικό δίκτυο (Deep Neural Network - DNN). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το σύστημα που μελετήθηκε, αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και γίνεται σύγκριση του DNN με τον ισοσταθμιστή FFE. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση του VPIphotonics Design Suite 11.6, το οποίο παρέχει ολοκληρωμένα εργαλεία για τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση οπτικών συστημάτων.

4.1 Δομή του DNN ισοσταθμιστή

Ο προτεινόμενος DNN ισοσταθμιστής υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Machine Learning Framework του λογισμικού VPIphotonics Design Suite 11.6**, με επιλογή τύπου μοντέλου DNN_Signal, δηλαδή πρόκειται για ένα βαθύ νευρωνικό δίκτυο. Όσον αφορά τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου, για τη συλλογή αποτελεσμάτων της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συνδυασμοί παραμέτρων:

Αριθμός Νευρώνων	Αριθμός Επιπέδων
4	4
8	8
16	16
32	32

Πίνακας 4-1 : Συνδυασμοί αριθμού επιπέδων και νευρώνων για τον DNN ισοσταθμιστή

Οι διαφορετικοί αυτοί συνδυασμοί χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εξεταστεί πώς επηρεάζεται το BER από τη διαφορετική δομή του DNN equalizer.

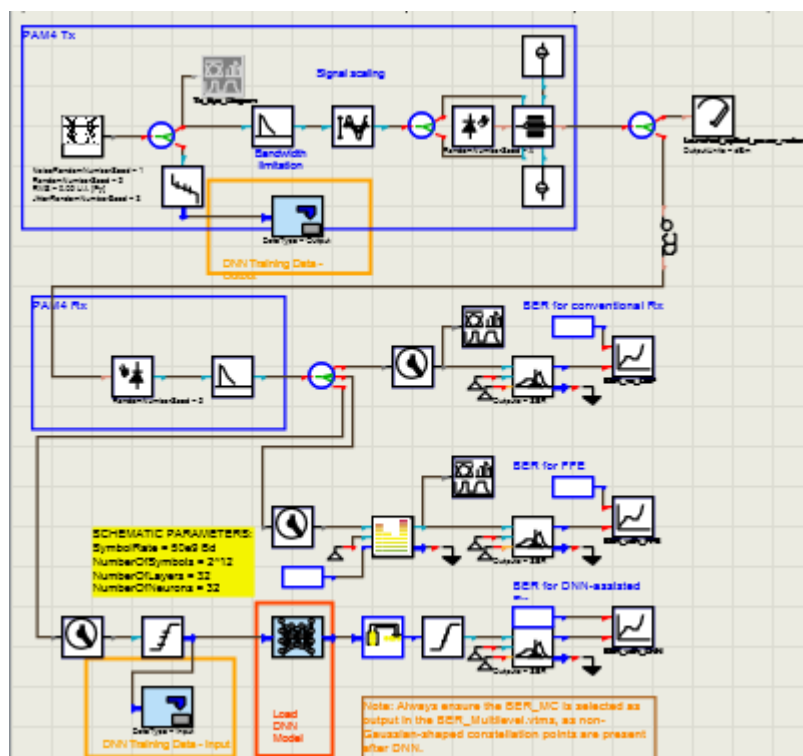
Η διαδικασία εκπαίδευσης του DNN equalizer ξεκινά με το στοιχείο SaveData, το οποίο αποθηκεύει τα δεδομένα εκπαίδευσης σε αρχείο HDF5 (training_data.hdf5). Για κάθε διαφορετικό μήκος ίνας δημιουργείται και ένα ξεχωριστό αρχείο. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης και αποτελούν το σύνολο δεδομένων (dataset) που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του DNN. Πριν τροφοδοτηθούν τα

δείγματα στο νευρωνικό δίκτυο εφαρμόζεται στάδιο προεπεξεργασίας. Για κάθε κεντρικό δείγμα-στόχο περιλαμβάνονται δεκαέξι προηγούμενα δείγματα (prewindow) στο διάνυσμα εισόδου, ενώ περιλαμβάνονται και δεκαέξι επόμενα δείγματα (postwindow). Συνεπώς, το συνολικό μήκος του διανύσματος εισόδου είναι τριάντα τρία δείγματα ($16 + 1 + 16$). Το παράθυρο εισόδου μετακινείται με βήμα ενός δείγματος κάθε φορά (stride), ώστε να χρησιμοποιείται κάθε σύμβολο για εκπαίδευση. Όλα τα διανύσματα εισόδου κανονικοποιούνται, γεγονός που συμβάλλει στη βελτίωση της σταθερότητας και της σύγκλισης κατά την εκπαίδευση. Σε όλους τους συνδυασμούς επιπέδων και νευρώνων χρησιμοποιήθηκε η ίδια **συνάρτηση ενεργοποίησης ReLu** (Rectified Linear Unit).

Το σύνολο δεδομένων χωρίστηκε σε ποσοστό **75% για εκπαίδευση και 25% για έλεγχο/επικύρωση**. Ως βελτιστοποιητής (optimizer) χρησιμοποιήθηκε ο **Adam** με ρυθμό εκμάθησης 0.001, ενώ η συνάρτηση απώλειας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **MSE**. Το μέγεθος παρτίδας (batch size) ήταν 32, οπότε τα δεδομένα εκπαίδευσης επεξεργάζονται σε μικρές παρτίδες των τριάντα δύο δειγμάτων ανά βήμα ενημέρωσης. Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε για τριάντα πλήρεις επαναλήψεις (αριθμός εποχών) του συνόλου εκπαίδευσης. Τέλος, η τεχνική “πρόωρο σταμάτημα” (early stopping) δεν ενεργοποιήθηκε, με αποτέλεσμα η εκπαίδευση να συνεχίζεται για όλες τις εποχές χωρίς πρόωρη διακοπή βάσει της επίδοσης στην επικύρωση.

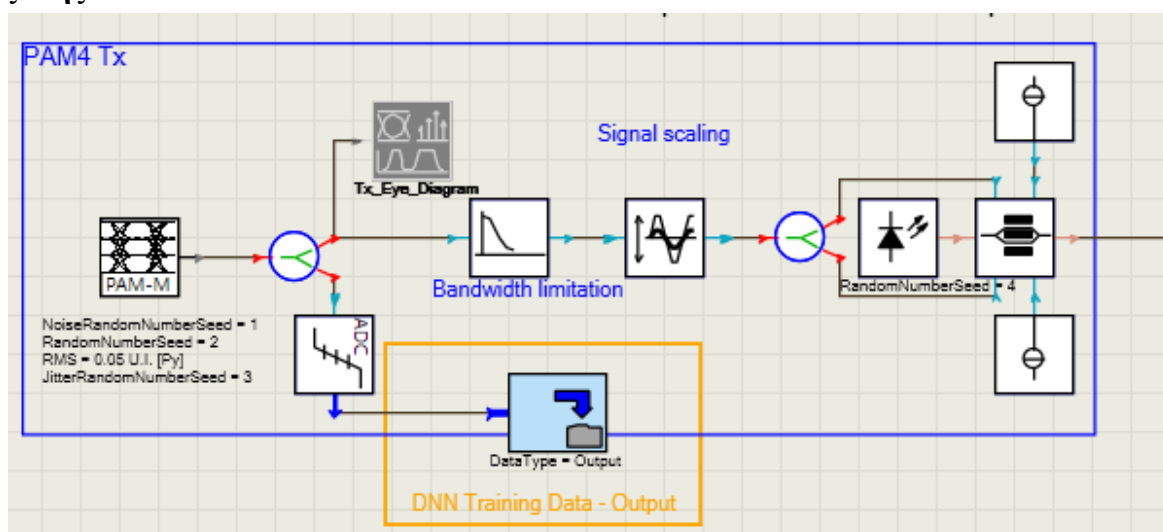
4.2 Το υπό μελέτη σύστημα

Το σύστημα που μελετήθηκε αποτελεί μια οπτική ζεύξη επικοινωνίας **PAM4** με ρυθμό συμβόλων (symbol rate) **50 Gbaud**, κεντρική συχνότητα λειτουργίας **193.1 THz** (μήκος κύματος περίπου 1550 nm) και μήκος οπτικής ίνας που κυμαίνεται από **8 km έως 18 km**. Στόχος της προσομοίωσης είναι η αξιολόγηση της απόδοσης του BER (Bit Error Rate) του συστήματος για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, υπολογίζεται το BER πάνω στο λαμβανόμενο σήμα, χωρίς τη χρήση κάποιου ισοσταθμιστή. Στη δεύτερη περίπτωση, το BER υπολογίζεται εφόσον έχει εφαρμοστεί η τεχνική ισοστάθμισης με χρήση γραμμικού ισοσταθμιστή FFE, ενώ στην τρίτη περίπτωση αξιοποιείται ένας DNN ισοσταθμιστής. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση της αποδοτικότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές DSP.

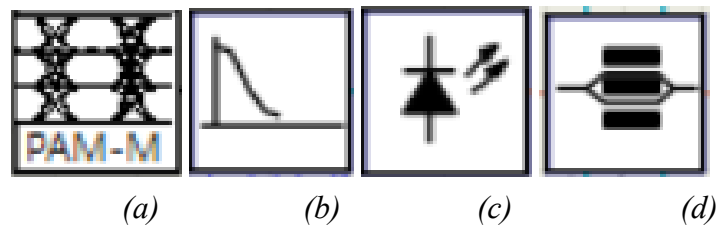


Εικόνα 4-1: Διάταξη του υπό-μελέτη συστήματος

Ξεκινώντας από τον πομπό, από τον οποίο προκύπτει η παραγωγή σήματος και των δεδομένων που θα αξιοποιηθούν για την εκπαίδευση του DNN ισοσταθμιστή, ο οπτικός πομπός του συστήματος δημιουργεί μια **ηλεκτρική κυματομορφή PAM4 συμβόλων**. Το σήμα αυτό διαβιβάζεται σε έναν **Mach-Zehnder διαμορφωτή**, ο οποίος εφαρμόζει τη διαμόρφωση πάνω στο συνεχές κύμα ενός **λέιζερ με ισχύ 10mW**, το οποίο μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε οπτικό. Για την προσομοίωση των περιορισμών εύρους ζώνης ενός ρεαλιστικού πομπού χρησιμοποιήθηκε **βαθυπερατό φίλτρο Bessel 4ης τάξης με εύρος ζώνης 30 GHz**.

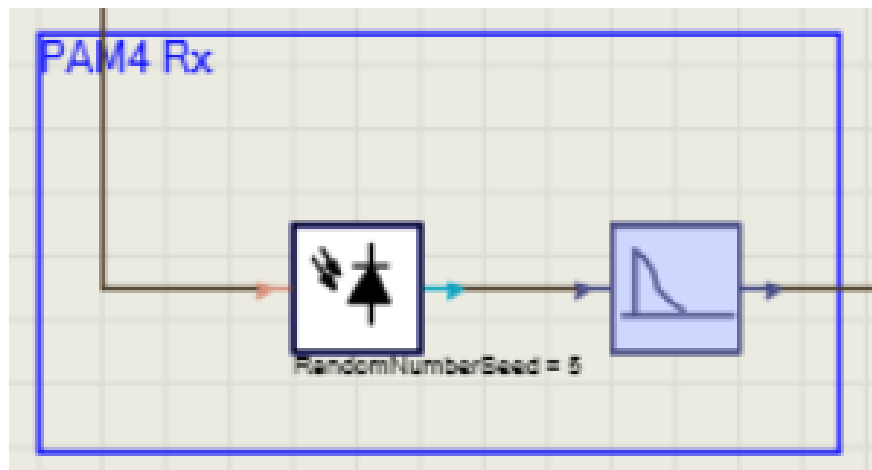


Εικόνα 4-2 : Διάταξη πομπού



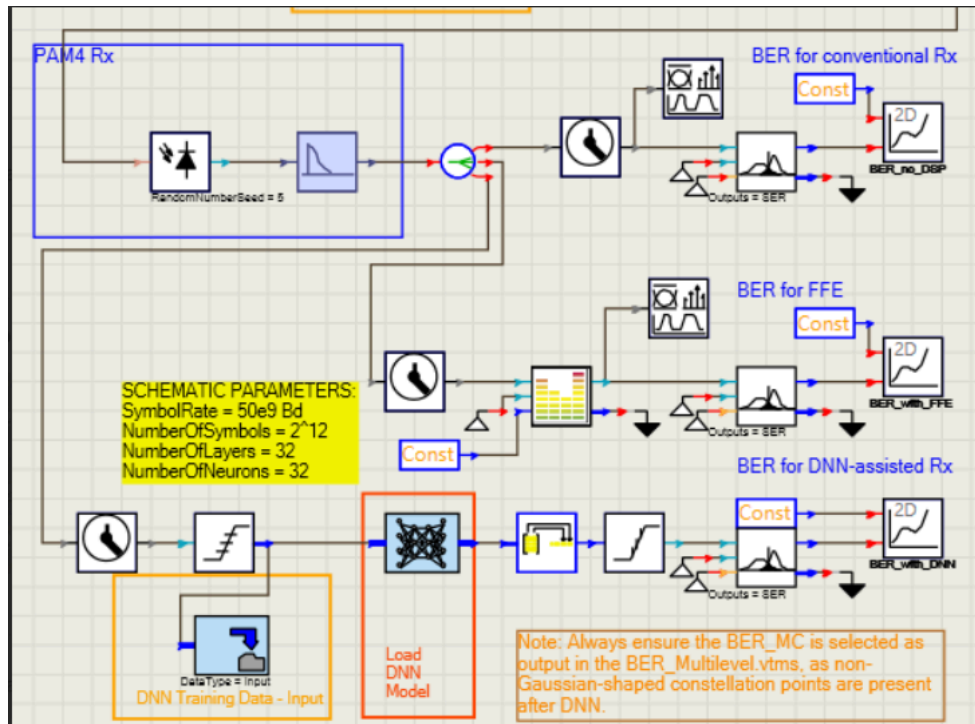
Εικόνα 4-3 : (a) γεννήτρια PAM_M, (b) φίλτρο, (c) λέιζερ, (d) διαμορφωτής Mach-Zender

Το κανάλι μετάδοσης περιλαμβάνει τη μετάδοση του σήματος μέσω μιας **οπτικής ίνας τύπου SSMF**, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες υποβάθμισης, όπως διασπορά και θόρυβος. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, εξετάστηκαν διαφορετικά μήκη ίνας από 8 km έως 18 km.



Εικόνα 4-4 : διάταξη του δέκτη του συστήματος

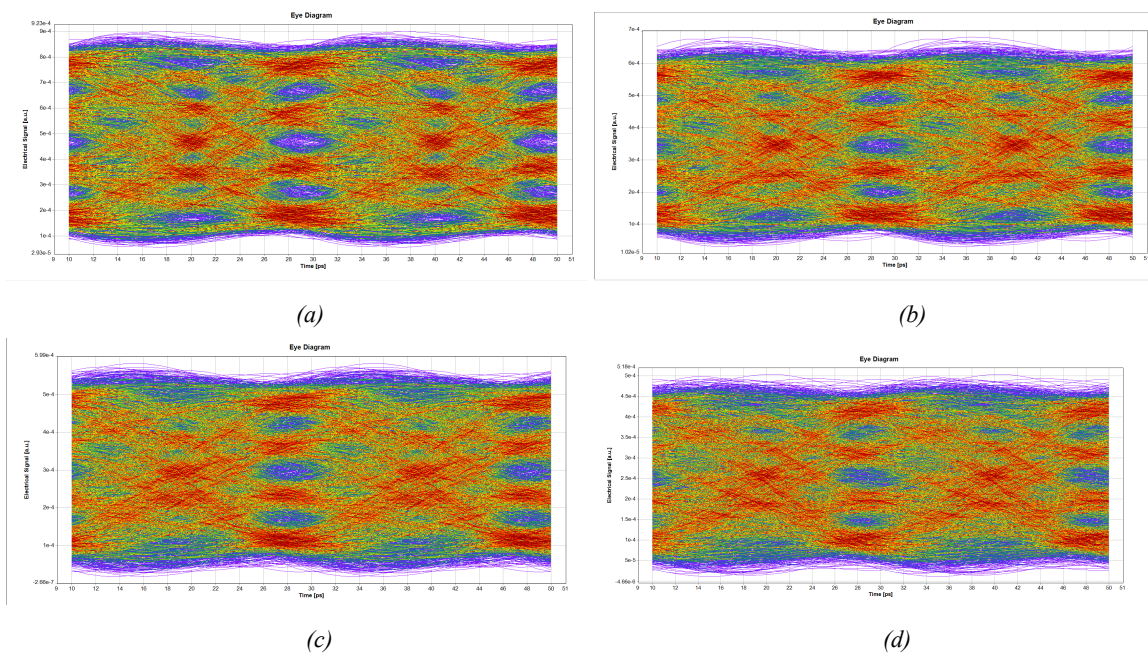
Έτσι, μετά τη μετάδοση στην ίνα το σήμα φτάνει στον δέκτη όπου πρώτα μετατρέπεται από οπτικό σε ηλεκτρικό μέσω μιας **φωτοδιόδου** με ευαισθησία (responsivity) 0.7 A/W και θερμικό θόρυβο (thermal noise) $100e-12$ A/Hz ($^{1/2}$) ενώ οι περιορισμοί εύρους ζώνης του δέκτη προσομοιώνονται μέσω ενός **βαθυπερατού φίλτρου με εύρος ζώνης 30 GHz**. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του BER με τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις (χωρίς ψηφιακή επεξεργασία, με FFE equalizer και με DNN equalizer), ενώ τα αποτελέσματα συγκρίνονται προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση κάθε τεχνικής.

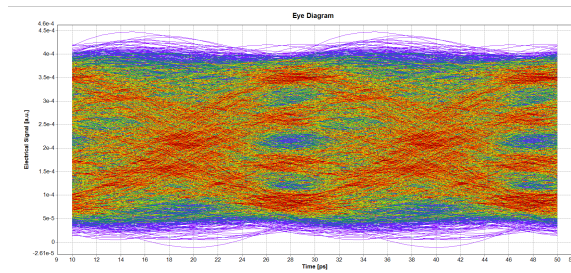


Εικόνα 4-5 : Διάταξη υπο-συστημάτων για τον υπολογισμό του BER

4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

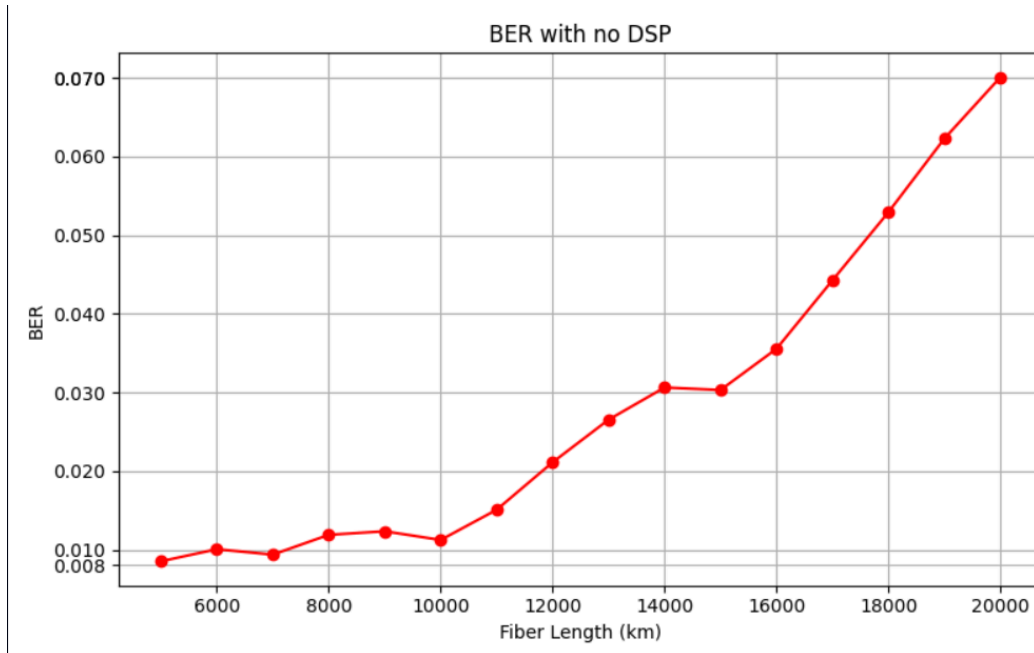
Στην πειραματική μελέτη που διεξήχθη, συγκρίθηκαν 3 διαφορετικές περιπτώσεις. Αρχικά, γίνεται υπολογισμός του BER χωρίς καμία τεχνική ψηφιακής επεξεργασίας. Στο σχήμα 4-6 τα διαγράμματα οφθαλμού (eye diagrams) δείχνουν έντονο κλείσιμο ακόμη και σε σχετικά μικρές αποστάσεις. Η χρωματική διασπορά δεν αντισταθμίζεται, καθιστώντας το σήμα μη αξιόπιστο αφού οι τιμές του BER κυμαίνονται από 0.008 έως 0.07 [σχ. 4-7] (για 5km έως 20km).





(e)

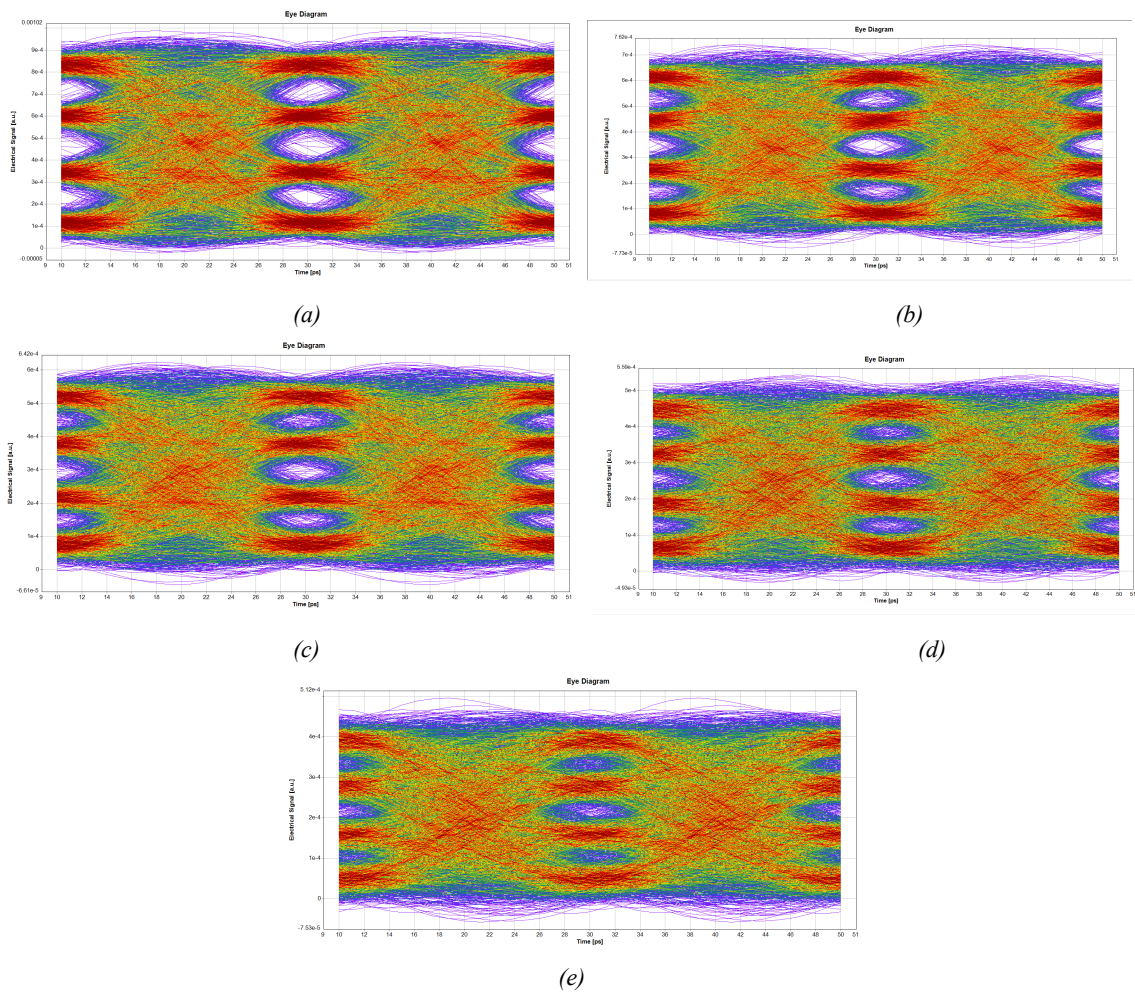
Εικόνα 4-6 : Eye diagrams σήματος χωρίς DSP για μήκη οπτικής ίνας (a) 8km, (b)12km, (c)14km, (d) 16 km, (e) 18km.



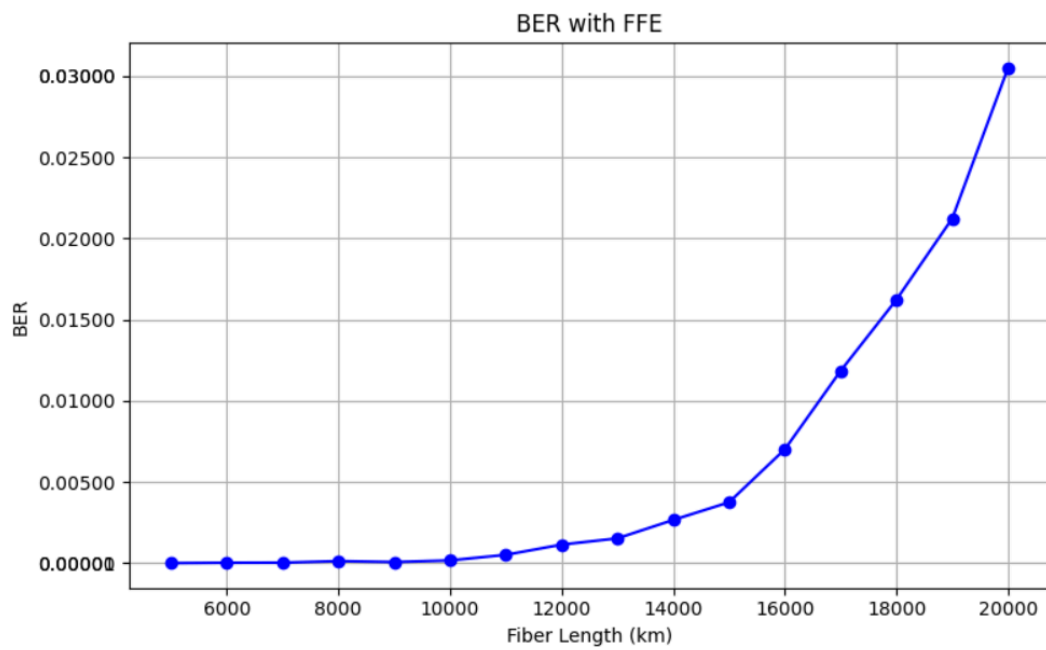
Εικόνα 4-7 : Καμπύλη BER για το σήμα χωρίς DSP

Η χρήση του FFE σηματοδοτεί μια ουσιαστική βελτίωση του BER. Στο σχήμα [4-8](#) παρουσιάζει μια σειρά διαγραμμάτων οφθαλμού για μήκη ίνας 8 km, 12 km, 14 km, 16 km και 18 km μετά την εφαρμογή εξισορρόπησης FFE. Στα 8 km φαίνεται ότι ο FFE αντισταθμίζει αποτελεσματικά τις παραμορφώσεις του καναλιού. Στα 12 km και 14 km, τα 4 επίπεδα παραμένουν διακριτά όμως το διάγραμμα αρχίζει να κλείνει δείχνοντας ότι ο FFE δυσκολεύεται να ισοσταθμίσει πλήρως τις παραμορφώσεις. Στα 16 km και 18 km, το διάγραμμα οφθαλμού είναι σχεδόν τελείως κλειστό, με απώλεια σαφή διαχωρισμού επιπέδων. Η υποβάθμιση αυτή υποδηλώνει απότομη αύξηση του BER.

Η καμπύλη BER [σχ. [4-9](#)] για τον FFE παρουσιάζει χαρακτηριστική και ταχεία γραμμική αύξηση με το μήκος της ίνας. Ο FFE επιτρέπει αξιόπιστη επικοινωνία μέχρι 12 km ενώ μετά οι τιμές αυξάνονται μέχρι και 0.03 για 20km .



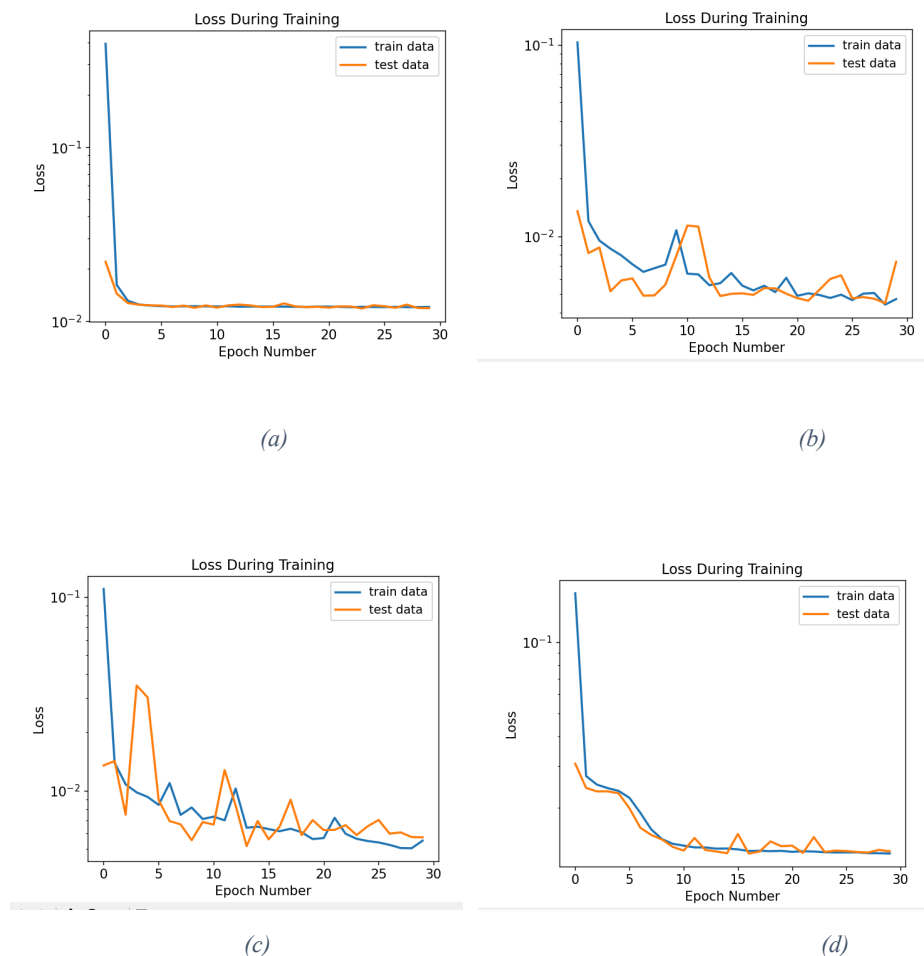
Εικόνα 4-8 : Eye diagrams μετά την εφαρμογή FFE για μήκη οπτικής ίνας (a) 8km, (b) 12km, (c) 14km, (d) 16km, (e) 18km.



Εικόνα 4-9 : Καμπύλη BER με την εφαρμογή FFE equalizer

Για την περίπτωση του DNN equalizer, ξεκινώντας από τη διαδικασία της εκπαίδευσης, χρησιμοποιήθηκαν για κάθε προσομοίωση 91.456 σύνολο δεδομένων (dataset), όπου 75% -training data και 25% validation/test data, 2858 βήματα ανά εποχή και μέγεθος παρτίδας (batch size) 32. Ενδεικτικά, για την περίπτωση μήκους ίνας 8 χλμ, με 32 νευρώνες και 32 επίπεδα, ο χρόνος εκπαίδευσης είναι 2 λεπτά και 34 δευτερόλεπτα και η συνολική απώλεια για τα δεδομένα ελέγχου 0.015.

Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας εκπαίδευσης για κάθε αρχιτεκτονική DNN φαίνεται και στις καμπύλες της συνάρτησης απώλειας (loss function), οι οποίες παρουσιάζονται ενδεικτικά στο σχήμα 4-10. Η τιμή της συνάρτησης απώλειας, που αντιπροσωπεύει το σφάλμα του μοντέλου, παρακολουθήθηκε τόσο στο εκπαιδευτικό σύνολο δεδομένων όσο και σε ένα ξεχωριστό σύνολο δεδομένων επικύρωσης (δοκιμής) μετά από κάθε εποχή εκπαίδευσης. Και οι τέσσερις αρχιτεκτονικές—(4,4), (8,8), (16,16) και (32,32)—παρουσίασαν έντονη καθοδική πορεία στην απώλεια, επιβεβαιώνοντας την επιτυχή σύγκλιση και την ικανότητά τους να μάθουν το έργο της εξισορρόπησης καναλιού. Παρά την επιτυχή συνολική σύγκλιση, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου το μήκος της ίνας αυξανόταν και η αρχιτεκτονική του DNN ισοσταθμιστή γίνονταν πιο πολύπλοκη παρατηρήθηκαν σημάδια υπερπροσαρμογής (overfitting) και υποπροσαρμογής (underfitting).

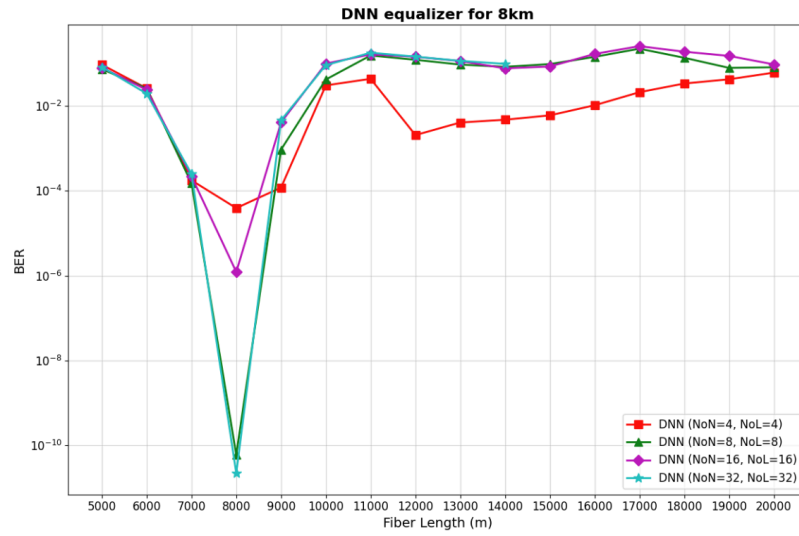


Εικόνα 4-10 : Καμπύλες απωλειών στις οποίες παρατηρείται (a) απόλυτη σύγκλιση, (b)-(c) overfitting, (d) underfitting.

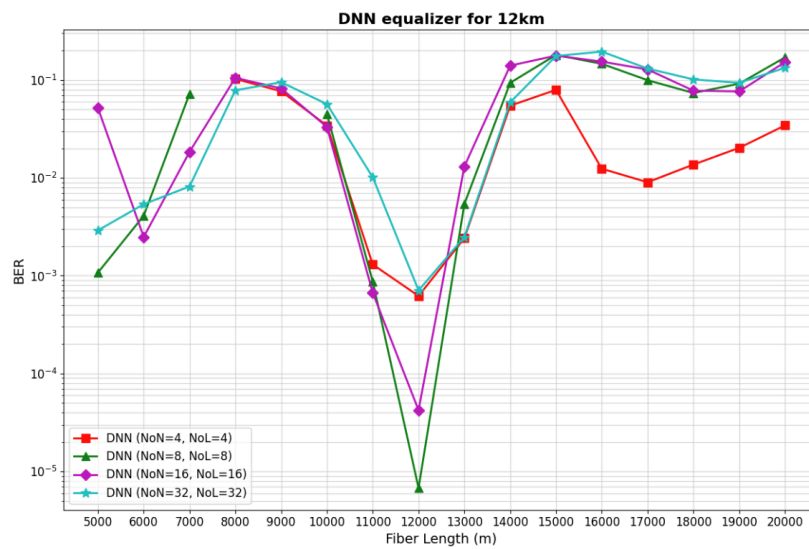
Όλες οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές για όλα τα μήκη ίνας για τα οποία έγινε η εκπαίδευση πέτυχαν χαμηλές τιμές BER, αποδεικνύοντας την ικανότητα του μοντέλου για ισοστάθμιση οπτικών καναλιών. Παρατηρώντας τα διαγράμματα BER (σχήμα 4-11) προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση του μεγέθους (αριθμός νευρώνων και επιπέδων) της αρχιτεκτονικής DNN στην απόδοση της ισοστάθμισης. Στα 8 km, όλες οι διαμορφώσεις DNN επιτυγχάνουν εξαιρετική απόδοση (BER έως 10^{-10}). Η αύξηση της πολυπλοκότητας του DNN οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας (8 km), αφού πιο σύνθετες αρχιτεκτονικές (NoN=32, NoL=32) παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση στην περιοχή των 8 km, ωστόσο το όφελος αυτό μειώνεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Παρατηρούνται όμως, σημαντικά χαμηλότερες τιμές σε μια περιοχή κοντά στο μήκος ίνας για το οποίο γίνεται η εκπαίδευση δηλαδή στα 8 km, συγκεκριμένα από 7 έως 9 km. Στα 12-14 km, τα αποτελέσματα είναι σχεδόν παρόμοια και για τα 2 μήκη ίνας, όπου πάλι όλες οι αρχιτεκτονικές φέρουν αποδεκτές τιμές BER (από 10^{-5} έως 10^{-3}). Και στις 2 περιπτώσεις καλύτερη απόδοση φέρει η αρχιτεκτονική με 8 νευρώνες και 8 επίπεδα, δείχνοντας ότι η αύξηση της πολυπλοκότητας του DNN δεν οδηγεί μονοτονικά σε καλύτερο BER, αφού η αρχιτεκτονική των 8 νευρώνων & 8 επιπέδων επιτυγχάνει χαμηλότερο BER σε σχέση με αυτή των 16 νευρώνων & 16 επιπέδων και των 32 νευρώνων & 32 επιπέδων. Στα 16 km, όλες οι αρχιτεκτονικές πετυχαίνουν παρόμοιες τιμές BER μεταξύ 0.0001 έως 0.00001. Στα 18 km, μόνο οι αρχιτεκτονικές των 4 νευρώνων & 4 επιπέδων και 16 νευρώνων & 16 επιπέδων επιτυγχάνουν BER περίπου με 0.001, ενώ οι υπόλοιπες φέρουν μεγαλύτερες τιμές BER. Ακόμα, φαίνεται ότι στα μεγαλύτερα μήκη ίνας το εύρος γύρω από το μήκος που γίνεται η εκπαίδευση στο οποίο επιτυγχάνονται καλύτερες τιμές BER μειώνεται. Για μικρότερα μήκη ίνας (πχ 8 χλμ) το εύρος αυτό είναι 2 χλμ (από 7 έως 9 χλμ) ενώ για μεγαλύτερα μήκη (πχ 16 χλμ) το εύρος αυτό είναι 1 χλμ (από 15,5 χλμ έως 16,5 χλμ).

Τα αποτελέσματα BER σε διαφορετικά μήκη οπτικής ίνας δείχνουν ότι καμία αρχιτεκτονική DNN δεν υπερέχει σταθερά έναντι των υπολοίπων σε όλο το εύρος των δοκιμασμένων μηκών. Η απόδοση του DNN εξαρτάται έντονα από την πολυπλοκότητα της αρχιτεκτονικής του, καθώς μπορεί να ερμηνευτεί βάσει των εννοιών bias και variance. Γενικά, αν ένα δίκτυο είναι σχετικά απλό, έχει υψηλή μεροληψία (bias), δεν μπορεί να μάθει την πολυπλοκότητα του καναλιού κι έτσι εμφανίζει χειρότερες τιμές του BER. Αν ένα δίκτυο είναι πιο περίπλοκο έχει υψηλή διακύμανση (variance), υπερπροσαρμόζεται στα δεδομένα εκπαίδευσης και δεν γενικεύει σωστά οδηγώντας πάλι σε χειρότερες τιμές BER. Στην προκειμένη, το μικρότερο μοντέλο (4,4) πιθανότατα υποπροσαρμόζεται (underfitting), καθώς διαθέτει ανεπαρκή χωρητικότητα για να αποτυπώσει την πολυπλοκότητα του καναλιού. Αντιθέτως, το μεγαλύτερο μοντέλο (32,32) πιθανότατα υπερπροσαρμόζεται (overfitting)· απομνημονεύει τα δεδομένα εκπαίδευσης και αποτυγχάνει να γενικεύσει αποτελεσματικά στο σύνολο επικύρωσης, οδηγώντας σε υποδεέστερη απόδοση BER. Στα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρείται ότι τις περισσότερες φορές η αρχιτεκτονική 8 νευρώνων & 8 επιπέδων επιτυγχάνει την καλύτερη ισορροπία μεταξύ bias και variance, πετυχαίνοντας τις καλύτερες τιμές του BER. Η αρχιτεκτονική αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως βέλτιστο σημείο ισορροπίας για το σύστημα, αφού επιτυγχάνεται η εύρεση της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ

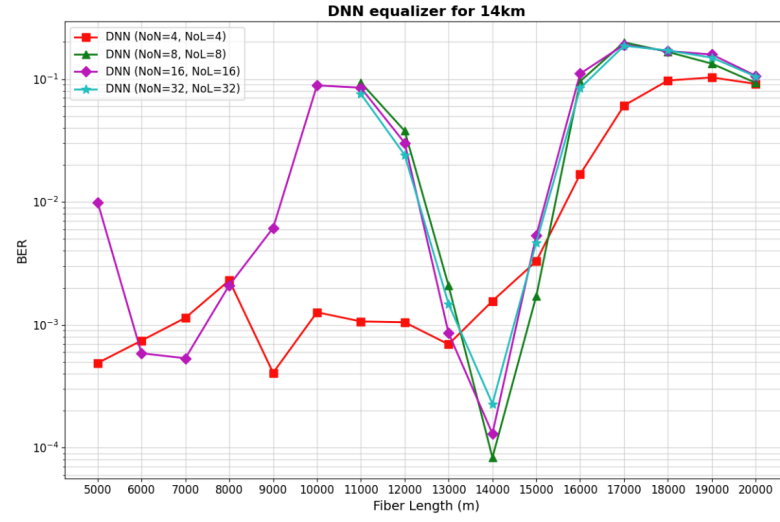
πολυπλοκότητας μοντέλου και απόδοσης γενίκευσης για αποφυγή υποπροσαρμογής (underfitting) και υπερπροσαρμογής (overfitting).



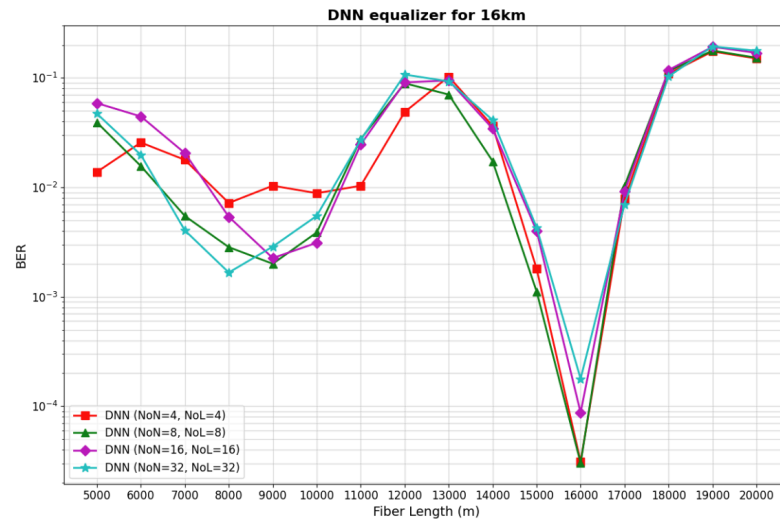
(α)



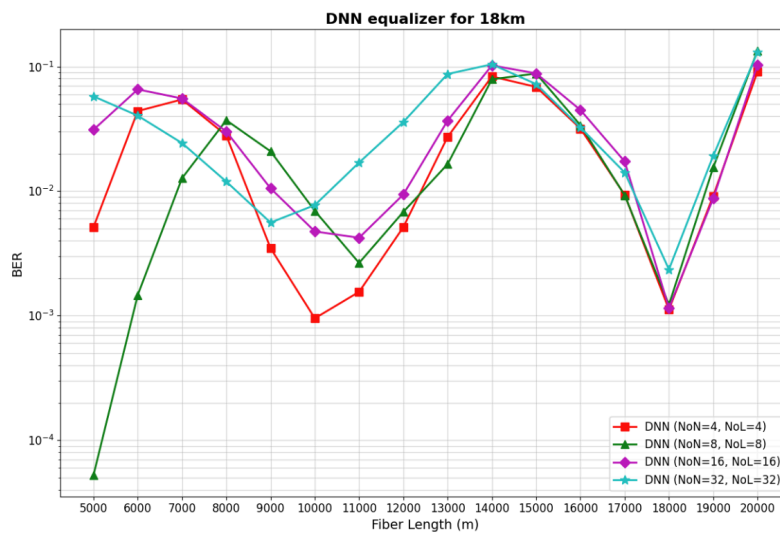
(b)



(c)



(d)



(e)

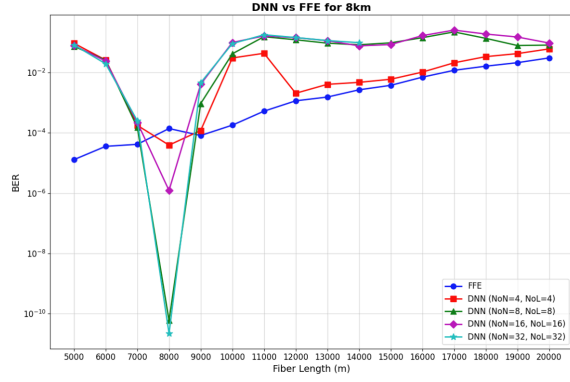
Εικόνα 4-11: Καμπύλες BER για διαφορετικές αρχιτεκτονικές του DNN equalizer για μήκη ίνας (α) 8km, (b) 12km, (c) 14km, (d) 16km και (e) 18km.

4.4 Σύγκριση με κλασικές μεθόδους

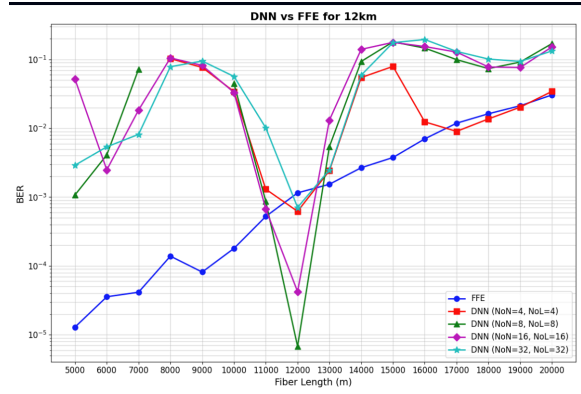
Συγκρίνοντας τις τιμές BER (πίνακας 4-2) και παρατηρώντας τα διαγράμματα (σχήμα 4-12) είναι εμφανές ότι ο DNN ισοσταθμιστής παρουσιάζει σημαντική βελτίωση έναντι ενός κλασικού ισοσταθμιστή FFE με 5 taps. Η απόδοση του FFE είναι αξιόπιστη μέχρι τα 12 km. Αντίθετα, ο ισοσταθμιστής DNN διατηρεί εξαιρετικά χαμηλά BER έως και τα 18 km, επεκτείνοντας ουσιαστικά το μήκος μετάδοσης του συστήματος κατά τουλάχιστον 4–6 km. Αναλυτικότερα, στην περιοχή των 8km (από 7 έως 9 km), όλες οι αρχιτεκτονικές του DNN ισοσταθμιστή επιτυγχάνουν καλύτερα αποτελέσματα από τον FFE. Στην περιοχή των 12km (11-13km), η απόδοση του FFE υποβαθμίζεται με το BER να υπολογίζεται γύρω στο 0.001 ενώ οι αρχιτεκτονικές DNN υπερτερούν σημαντικά. Στα 14km, ο FFE πλέον αποτυγχάνει ενώ όλες οι αρχιτεκτονικές DNN πετυχαίνουν αποδεκτές τιμές BER. Για τα μήκη ίνας 16km και 18km, ο FFE εμφανίζει υψηλές τιμές BER ενώ ο DNN εξακολουθεί να πετυχαίνει χαμηλότερες και αποδεκτές τιμές. Επομένως, ο DNN ισοσταθμιστής αναδεικνύεται ως μια ιδιαίτερα αποδοτική λύση, καθώς όχι μόνο μειώνει σημαντικά το BER αλλά και επιμηκύνει τη μέγιστη απόσταση μετάδοσης, υπερβαίνοντας σαφώς τις δυνατότητες ενός συμβατικού FFE.

Μήκος Ίνας	BER (FFE)	BER (DNN)	Βελτίωση Απόδοσης
8km	1.38E-4	2.20E-11	$\sim \chi 10^7$
12km	1.15E-3	6.76E-06	$\sim \chi 1000$
14km	2.66E-3	8.33E-05	$\sim \chi 100$
16km	7E-3	3.03E-05	$\sim \chi 100$
18km	1.62E-2	0.00111926	$\sim \chi 10$

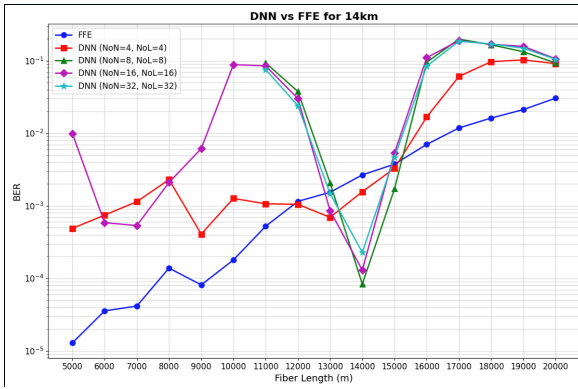
Πίνακας 4-2 : Σύγκριση τιμών BER FFE και DNN



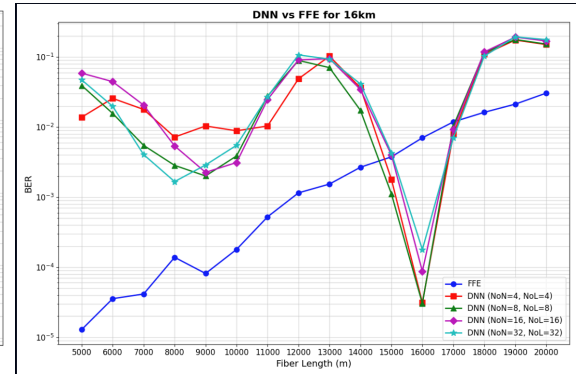
(a)



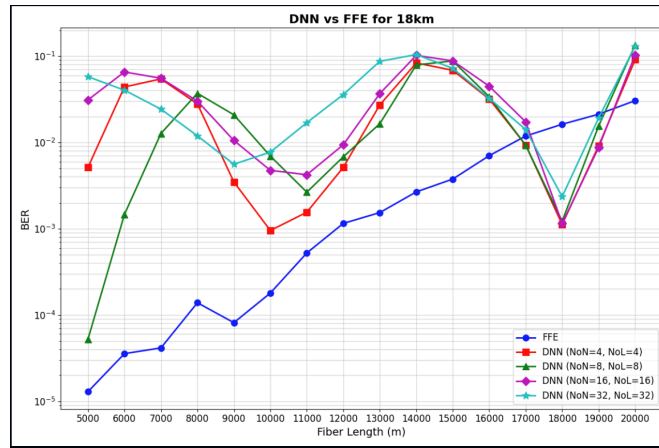
(b)



(c)



(d)



(e)

Εικόνα 4-12 : Καμπύλες BER αρχιτεκτονικών DNN equalizer και του FFE equalizer για μήκη ίνας (a) 8km, (b) 12km, (c) 14km, (d) 16km και (e) 18km.

5 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Η σύγκριση μεταξύ ενός παραδοσιακού FFE και ενός DNN ισοσταθμιστή έδειξε ένα σαφές πλεονέκτημα απόδοσης υπέρ των νευρωνικών δικτύων. Κρίσιμο πεδίο αποτελεί η βελτίωση της ικανότητας γενίκευσης των μοντέλων. Η μεταβλητότητα στην απόδοση των αρχιτεκτονικών (4,4) έως (32,32) σε διαφορετικά μήκη ινών υποδεικνύει μια τάση υπερπροσαρμογής σε συγκεκριμένες συνθήκες καναλιού. Για παράδειγμα, η αξιοποίηση συνόλων εκπαίδευσης που συγκεντρώνουν δεδομένα από ένα συνεχές εύρος μηκών (π.χ. 0 km έως 20 km) αντί σε ένα μόνο συγκεκριμένο μήκος και η τεχνητή προσθήκη ελεγχόμενων ποσοτήτων θορύβου, διακύμανσης (jitter) και άλλων βλαβών στα δεδομένα εκπαίδευσης θα βοηθούσε στη δημιουργία ενός ενιαίου, ανθεκτικού μοντέλου με σταθερή απόδοση σε ολόκληρο το εύρος λειτουργίας.

Ακόμα, πέρα από τα απλά πολυεπίπεδα νευρωνικά μοντέλα perceptrons (Multi-Layer Perceptrons), για το πρόβλημα της εξισορρόπησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες τεχνικές μηχανικής μάθησης, όπως Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (CNNs) ή τα Αναδρομικά Νευρωνικά Δίκτυα (RNNs) (π.χ. LSTMs, GRUs) και μετασχηματιστές (transformers). Αυτές οι αρχιτεκτονικές έχουν σχεδιαστεί εγγενώς για τη μοντελοποίηση μακροπρόθεσμων εξαρτήσεων και χρονικών ακολουθιών, γεγονός που θα μπορούσε να τις καταστήσει εξαιρετικά κατάλληλες για την αντιστάθμιση της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI) σε μεγάλες αποστάσεις. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι NAS (Neural Architecture Search) ώστε να βρουν αυτόματα τη βέλτιστη αρχιτεκτονική για το δεδομένο σύστημα.

Επιπλέον, η διερεύνηση ενός υβριδικού ισοσταθμιστή FFE-DNN, όπου το FFE διαχειρίζεται τη γραμμική αντιστάθμιση και ένα συμπαγές DNN διορθώνει τις υπολειπόμενες μη γραμμικότητες, πιθανόν να προσφέρει μια καλύτερη ισορροπία μεταξύ απόδοσης και πολυπλοκότητας.

Μία άλλη υποσχόμενη προσέγγιση είναι η ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση άκρου-σε-άκρο, όπου ένα ενιαίο νευρωνικό δίκτυο βελτιστοποιεί ταυτόχρονα τόσο τη διαμόρφωση του πομπού όσο και την αντιστάθμιση μη γραμμικοτήτων στον δέκτη. Τέλος, μια ακόμα προέκταση είναι η αντίστοιχη μελέτη σε συνεκτικά συστήματα επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων όπου θα μπορούσαν να αναπτυχθούν μοντέλα μηχανικής μάθησης για την αντιμετώπιση πολύπλοκων μη γραμμικών φαινομένων, όπως το φαινόμενο Kerr.

6 Βιβλιογραφία

- [1] Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition
- [2] Ciena - Τι είναι η συνεκτική οπτική; - Σιένα
- [3] The Evolution of Optical Networks: From Early Beginnings to the Future of Connectivity
- [4] Intro to 800G Optical Transceiver Technologies | FiberMall
- [5] Understanding Optical Networks: Definition, Benefits, and Applications - fibermall.com
- [6] Nine Key Challenges Facing Optical Communications in the Next 10 Years - Huawei
- [7] Datacenter Interconnects 101
- [8] 03-An-Intro-to-Data-Center-Interconnects-20240117.pdf
- [9] (PDF) The next generation of passive optical networks: A review
- [10] Passive Optical Networks Progress: A Tutorial
- [11] Passive Optical Network Tutorial
- [12] Optical Transmitter - Computer Science
- [13] “High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission”, January 2009,
DOI:10.1007/978-3-540-93771-5, Publisher: Springer Berlin Heidelberg, Editor: Rhodes, W.T. and Adibi, A. and Asakura, T. and Hansch, T.W. and Kamiya, T. and Krausz, F. and Monemar, B. and Venghaus, H. and Weber, H. and Weinfurter, H. ISBN: 9783540937708
- [14] “Optical Fiber Communication”, Gerd Keizer
- [15] Optical Amplifiers in Fiber Optic Communication Systems – Fosco Connect

- [16] Τι είναι ο οπτικός ενισχυτής και πόσοι τύποι οπτικών ενισχυτών; - Γνώση - Shenzhen HTFuture Co, Ltd
- [17] Different Types of Optical Amplifiers
- [18] Various Optical Amplifiers (EDFA, FRA, and SOA) | Anritsu Asia Pacific
- [19] Schematic representation of the wavelength division multiplexing system. | Download Scientific Diagram
- [20] Time Division Multiplexing (TDM) versus Wavelength Division Multiplexing (WDM)
- [21] “Chromatic Dispersion Compensation in Optical Fiber Communication System and its Simulation R. Udayakumar^{1*}, V. Khan² and T. Saravanan”
- [22] “Συστήματα Μετάδοσης Οπτικών Ινών”, Ηρακλής Αβραμόπουλος
- [23] “ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ”, Αλέξανδρος Αλέξανδρος, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 1η Έκδοση, ISBN: 978-960-418-238-1
- [24] “ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ”, Agrawal G., Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 4η Έκδοση, ISBN: 978-960-418-336-4
- [25] Understanding Baud Rate, Bit Rate and Spectral Width in Optical Fiber Communications – MapYourTech
- [26] Dispersion Compensation in Optical Fiber: A Review, December 2023 DOI:[10.46610/JTC.2023.v08i03.001](https://doi.org/10.46610/JTC.2023.v08i03.001) Authors: Kazi Sultanabanu, Sayyad Liyakat
- [27] Ηρακλής Αβραμόπουλος, “Συστήματα Μετάδοσης Οπτικών Ινών”
- [28] “Optical Communication Essentials”, Gerd Keiser, ISBN: 9780071412049 Publication Date & Copyright: 2003 The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [29] “Feed Forward Equalization Simulation Model for High-Speed Channel”, Rebeca Castro Artavia Cartago
- [30] Evolution Of Equalization Techniques In High-Speed SerDes For Extended Reaches

- [31] “High Speed Serdes Devices and Applications”, Springer 2008, D. R. Stauffer et al.
- [32] “Electrical Equalization Analysis of PAM-4 Transmission in Short-Reach Optical Systems”, Dana Arie and Gilad Katz
- [33] “The scientist’s and engineer’s guide to digital signal processing” , Second edition by Steven W. Smith,
- [34] Deep Learning: Feed Forward Neural Networks (FFNNs) | by Mohammed Terry-Jack | Medium
- [35] Neural Network Training - an overview | ScienceDirect Topics
- [36] Activation functions, Loss functions & Optimizers | by Deeksha Gopani | Medium
- [37] Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow, 2nd Edition, Aurélien Géron
- [38] Construction of the deep neural network (DNN) model. | Download Scientific Diagram
- [39] What is Recurrent Neural Network (RNN)?
- [40] ANN vs. CNN vs. RNN vs. LSTM: Understanding the Differences in Neural Networks | by Hassaan Idrees | Medium
- [41] “(PDF) Machine learning methods for optical communications”, Muhammad Usman Hadi
- [42] “Machine Learning Methods for Optical Communication Systems”, Faisal Nadeem Khan, Chao Lu and Alan Pak Tao Lau
- [43] “Machine Learning in Short-Reach Optical Systems: A Comprehensive Survey”, Chen Shao 1,* , Elias Giacomidis 2 , Syed Moktaci Billah 1, Shi Li 2 , Jialei Li 2, Prashasti Sahu 3, André Richter 2 , Michael Faerber 1 and Tobias Kaefer 1
- [44] Nonlinear equalization based on pruned artificial neural networks for 112-Gb/s SSB-PAM4 transmission over 80-km SSMF

- [45] Nonlinear Equalizer Based on Neural Networks for PAM-4 Signal Transmission Using DML | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore
- [46] “High-speed PAM4 transmission using directly modulated laser and artificial neural network nonlinear equaliser - ScienceDirect” Nguyen T. Hung, Scott Stainton, Son T. Le, Paul A. Haigh, Ho P. Tien, Nguyen D.N. Vien, Nguyen V. Tuan
- [47] “137 Gb/s PAM-4 Transmissions at 850 nm over 40 cm Optical Backplane with 25 G Devices with Improved Neural Network-Based Equalization” by Qianwu Zhang, Yuntong Jiang, Hai Zhou, Chuanlu Deng, Shuaihang Duan, Zicong Wang, Yingchun Li, Yingxiong Song, Jian Chen, Junjie Zhang, Yating Wu, Tingyun Wang and Min Wang
- [48] “Computational complexity comparison of feedforward/radial basis function/recurrent neural network-based equalizer for a 50-Gb/s PAM4 direct-detection optical link”, Zhaopeng Xu, Chuanbowen Sun, Tonghui Ji, Jonathan H. Manton, and William Shieh,
- [49] “Advanced Neural Network-Based Equalization in Intensity-Modulated Direct-Detection Optical Systems: Current Status and Future Trends”, Zhaopeng Xu 1, Tonghui Ji 1, Qi Wu 1,2, Chen Cheng 1, Weiqi Lu 3, Honglin Ji 1, Yu Yang 1, Gang Qiao 1, Jianwei Tang 1, , Lulu Liu 1, Shangcheng Wang 1, Junpeng Liang 1, Zhongliang Sun 1, Linsheng Fan 1, Jinlong Wei 1 and William Shieh 3,*
- [50] 56 Gbps IMDD PON based on 10G-Class Optical Devices with 29 dB Loss Budget Enabled by Machine Learning.pdf
- [51] Convolutional Neural Network based Nonlinear Classifier for 112-Gbps High Speed Optical Link
- [52] “Adaptive parallel decision deep neural network for high-speed equalization”, Luo Zhang, Jian Jie and Lai Mingche
- [53] Employing Deep Neural Network for High Speed 4-PAM Optical Interconnect | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore
- [54] “End-to-End Deep Learning of Optical Fiber Communications” Boris Karanov, Mathieu Chagnon, Félix Thouin, Tobias A. Eriksson, Henning Bülow, Domaniç Lavery

[55] “Low computationally complex recurrent neural network for high speed optical fiber transmission” Qingyi Zhoua, Chuanchuan Yanga,*, Anzhong Lianga, Xiaolong Zhenga, Zhangyuan Chen (PDF)

[56] “Recent Advances in Equalization Technologies for Short-Reach Optical Links Based on PAM4 Modulation: A Review” Honghang Zhou, Yan Li *, Yuyang Liu, Lei Yue, Chao Gao, Wei Li, Jifang Qiu, Hongxiang Guo, Xiaobin Hong, Yong Zuo and Jian Wu *

Συντομογραφίες-Αρκτικόλεξα- Ακρωνύμια

10G-EPON – 10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network

1G - first generation

2G - second generation

3G- third generation

4G - fourth generation

5G – Fifth Generation

6G – Sixth Generation

Adam – Adaptive Moment Estimation

Aeff – Effective Area (of an optical fiber)

ANN – Artificial Neural Network

APD – Avalanche Photodiode

APON – ATM Passive Optical Network

ATM – Asynchronous Transfer Mode

BER – Bit-Error Rate

BPON – Broadband Passive Optical Network

CNN – Convolutional Neural Network

CPO – Co-Packaged Optics

CW – Continuous Wave

dB – Decibel

DC – Direct Current

DCF – Dispersion Compensation Fiber

DCI – Data Center Interconnects

DES - Double Exponential Smoothing

DFB – Distributed-Feedback Laser

DFE – Deep Forward Equalizer

DL - Deep Learning

DNN – Deep Neural Network

DSP – Digital Signal Processing

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing

EAM – Electro-Absorption Modulator

ECL – External Cavity Laser

EDC – Electronic Dispersion Compensation

EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier

EM - Expectation Maximization

ELM - Extreme Learning Machines

EPON – Ethernet Passive Optical Network

ETDM – Electrical Time Division Multiplexing

EVM – Error Vector Magnitude

FBG – Fiber Bragg Grating

FFE – Feed Forward Equalizer

FFNN – Feedforward Neural Network

FPM – Four-Photon Mixing
FTTH – Fiber To The Home
FWM – Four-Wave Mixing
GAN – Generative Adversarial Network
GNN – Graph Neural Network
GPON – Gigabit Passive Optical Network
ICI – Interchannel Interference
IMDD – Intensity-Modulation Direct-Detection
IoT – Internet of Things
ISI – Intersymbol Interference
ITU – International Telecommunication Union
KNN - K-Nearest Neighbors
LD drive – Laser Diode Driver
LED – Light-Emitting Diode
MAE – Mean Absolute Error
ML – Machine Learning
MLP – Multilayer Perceptron
MSE – Mean Squared Error
MZM – Mach-Zehnder Modulator
NG-PON2 – Next-Generation Passive Optical Network Stage 2
NN – Neural Network
NoL – Number of Layers
NoN – Number of Neurons
OCDM-PON – Optical Code Division Multiplexing Passive Optical Network
ODN – Optical Distribution Network
OLT – Optical Line Terminal
ONU – Optical Network Unit
ONT – Optical Network Terminal
OFDM-PON – Orthogonal Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network
OTDM – Optical Time Division Multiplexing
PAM4 - Pulse Amplitude Modulation with 4 levels
PIN – Positive-Intrinsic-Negative Photodiode
PON – Passive Optical Network
RDL - Reinforcement Deep Learning
ReLU – Rectified Linear Unit
RL – Reinforcement Learning
RL-SARSA – Reinforcement Learning – State-Action-Reward-State-Action
RMSProp – Root Mean Square Propagation
RNN – Recurrent Neural Network (or Recursive Neural Network, depending on context)
SBP - Stochastic Backpropagation
SDM – Space Division Multiplexing
SDN – Software Defined Networking
SGD – Stochastic Gradient Descent
SMF – Single Mode Fiber

SNR – Signal-to-Noise Ratio
SOA – Semiconductor Optical Amplifier
SPM – Self-Phase Modulation
SRS – Stimulated Raman Scattering
SVM – Support Vector Machine
TDM-PON – Time Division Multiplexing Passive Optical Network
ULL – Ultra-Low Latency
WDM – Wavelength Division Multiplexing
WDM-PON – Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network
XG-PON – 10 Gigabit-Capable Passive Optical Network