



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

**Μελέτη ενός οπτικού πομποδέκτη χαμηλού κόστους και  
κατανάλωσης με εφαρμογή σε μητροπολιτικά δίκτυα μικρής  
απόστασης.**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ιόλη Γιαννακοπούλου

**Επιβλέπων :** Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024





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

**Μελέτη ενός οπτικού πομποδέκτη χαμηλού κόστους και  
κατανάλωσης με εφαρμογή σε μητροπολιτικά δίκτυα μικρής  
απόστασης.**

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιόλη Γιαννακοπούλου

**Επιβλέπων :** Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2024.

.....

Ηρακλής Αβραμόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Αθανάσιος Παναγόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Γεώργιος Ματσόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Ιόλη Γιαννακοπούλου

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

Copyright © Ιόλη Γιαννακοπούλου, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

# Περίληψη

Τα οπτικά συστήματα επικοινωνιών παίζουν καθοριστικό ρόλο στις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές υποδομές, καθώς οι απαιτήσεις για υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και μεγάλες αποστάσεις συνεχώς αυξάνονται. Η χρήση τεχνικών όπως η διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης (SSB) και η duobinary διαμόρφωση έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές για τη βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητας στη χρωματική διασπορά. Η τεχνική διαμόρφωσης SSB επιτρέπει τη μετάδοση μόνο της μίας πλευρικής ζώνης ενός σήματος, μειώνοντας τις απαιτήσεις εύρους ζώνης και περιορίζοντας τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη διασπορά, ενώ η duobinary διαμόρφωση εισάγει ελεγχόμενες παρεμβολές μεταξύ συμβόλων, εξοικονομώντας εύρος ζώνης και βελτιώνοντας την ανθεκτικότητα του σήματος.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, μελετάται και υλοποιείται η χρήση μετασχηματισμού Hilbert για την εφαρμογή οπτικής διαμόρφωσης SSB, καθώς και η ανάλυση και προσομοίωση συστημάτων διαμόρφωσης duobinary σε περιβάλλον Matlab και VPI. Παρουσιάζονται οι θεωρητικές βάσεις των τεχνικών αυτών και αξιολογείται η απόδοσή τους σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών υψηλών ταχυτήτων και μεγάλων αποστάσεων. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι τα συστήματα SSB και duobinary προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη διαμόρφωση NRZ, ειδικά σε περιβάλλοντα με υψηλή χρωματική διασπορά.

## Λέξεις κλειδιά

Οπτική Διαμόρφωση, Μονή Πλευρική Ζώνη, Duobinary Διαμόρφωση, Φίλτρα Hilbert, Χρωματική Διασπορά, Οπτικά Συστήματα, BER

# Abstract

Optical communication systems play a crucial role in modern telecommunication infrastructures as the demand for high-speed transmission and long-distance communication continues to grow. Techniques such as Single Sideband (SSB) modulation and duobinary modulation have been proven effective in enhancing spectral efficiency and resilience to chromatic dispersion. The SSB modulation technique allows the transmission of only one sideband of a signal, reducing bandwidth requirements and minimizing dispersion-induced distortions, while duobinary modulation introduces controlled inter-symbol interference (ISI), conserving bandwidth and improving signal robustness.

In this thesis, the use of Hilbert transformation for the implementation of optical SSB modulation is studied and implemented, alongside the analysis and simulation of duobinary modulation systems in Matlab and VPI environments. The theoretical foundations of these techniques are presented, and their performance is evaluated in high-speed and long-distance optical communication systems. The simulations demonstrate that SSB and duobinary systems offer significant advantages over NRZ modulation, especially in environments with high chromatic dispersion.

## Keywords

Optical Modulation, Single Sideband, Duobinary Modulation, Hilbert Filters, Chromatic Dispersion, Optical Systems, BER



# Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επικεφαλή του εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Κο Ηρακλή Αβραμόπουλο, που μου έδωσε την ευκαιρία εκπόνησης αυτής της διπλωματικής και να συνεργαστώ με όμορφους ανθρώπους. Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τη Δρ. Κωνσταντίνα Καντά καθώς και την ερευνήτρια Ευρυδίκη Κυριαζή για την πολύτιμη καθοδήγηση τους και την συμπαράσταση κατά τη εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και τους φίλους μου για την συνεχόμενη υποστήριξή τους.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>14</b>
1.1	<i>Απαιτήσεις των σύγχρονων οπτικών δικτύων επικοινωνίας .....</i>	<i>14</i>
1.2	<i>Η ανάπτυξη στα κέντρα δεδομένων και ο ρόλος των οπτικών δικτύων.....</i>	<i>16</i>
1.2.1	<i>Είδη οπτικών διασυνδέσεων με βάση την απόσταση .....</i>	<i>18</i>
1.2.2	<i>Τεχνολογίες για τα κέντρα δεδομένων μικρών αποστάσεων (intra-datacenters) .....</i>	<i>19</i>
1.3	<i>Σύγκριση τεχνολογιών συνδέσεων intra- και inter- κέντρων δεδομένων .....</i>	<i>20</i>
1.4	<i>Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....</i>	<i>21</i>
<b>2</b>	<b>Διασύνδεση οπτικών δικτύων .....</b>	<b>23</b>
2.1	<i>Δομικά στοιχεία διαμόρφωσης έντασης και άμεσης ανίχνευσης .....</i>	<i>23</i>
2.1.1	<i>Σχήματα Διαμόρφωσης σε οπτική διαμόρφωση IM/DD .....</i>	<i>29</i>
2.2	<i>Βασικοί περιορισμοί των οπτικών επικοινωνιών και παραμόρφωσης σήματος</i>	<i>31</i>
2.2.1	<i>Υποβάθμιση συστήματος λόγω χρωματικής διασποράς .....</i>	<i>31</i>
2.2.2	<i>Μέθοδοι αντιστάθμισης χρωματικής διασποράς.....</i>	<i>34</i>
2.2.3	<i>Σχήματα αυτό-συνεκτικών (self-coherent) τεχνολογιών.....</i>	<i>35</i>
<b>3</b>	<b>Πειραματικό μέρος .....</b>	<b>38</b>
3.1	<i>Θεωρητικό υπόβαθρο .....</i>	<i>38</i>
3.1.1	<i>Υπολογιστικά εργαλεία για την μέτρηση λαθών .....</i>	<i>38</i>
3.1.2	<i>Δείκτες αξιολόγησης ποιότητας οπτικού σήματος.....</i>	<i>39</i>
3.2	<i>Μελέτη τεχνικών διαμορφώσεων με χρήση Matlab .....</i>	<i>41</i>
3.2.1	<i>Μελέτη και υλοποίηση οπτικής διαμόρφωσης SSB με φίλτρο Hilbert.....</i>	<i>42</i>
3.2.2	<i>Μελέτη και υλοποίηση οπτικής διαμόρφωσης για duobinary σήματα .....</i>	<i>46</i>
3.3	<i>Υλοποίηση του συστήματος σε προσομοιωτικό περιβάλλον VPI Transmission Maker 50</i>	
3.3.1	<i>Πειραματικές διατάξεις.....</i>	<i>51</i>
<b>4</b>	<b>Μεθοδολογία και αποτελέσματα .....</b>	<b>55</b>
4.1	<i>Διαφορετική φασματική απόδοση του κάθε εξεταζόμενου σχήματος .....</i>	<i>55</i>
4.2	<i>Επιρροή της χρωματικής διασποράς στα εξεταζόμενα σενάρια .....</i>	<i>56</i>
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα.....</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>67</b>

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....69

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1: Συνδεδεμένοι χρήστες στο Διαδίκτυο από το 2015 έως το 2029 [2].	15
Εικόνα 1-2:Πρόσφατη επίσημη μελέτη για την παγκόσμια αύξηση της χρήσης των συσκευών του διαδικτύου.	16
Εικόνα 1-3: Κατηγορίες οπτικών διασυνδέσεων με βάση την απόσταση και είδη τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται.[8]	18
Εικόνα 1-4:Παραδείγματα δικτύου οπτικής τοπολογίας και απόστασης για συνδέσεις εντός κέντρων δεδομένων, δίκτυα πρόσβασης, μέτρο και μεγάλων αποστάσεων.	19
Εικόνα 2-1: Σύστημα διαμόρφωσης έντασης/άμεσης ανίχνευσης.	24
Εικόνα 2-2: Αναπαράσταση απευθείας διαμόρφωσης (Direct modulation) και εξωτερικής διαμόρφωσης (external modulation).	25
Εικόνα 2-3: Εξωτερική διαμόρφωση με τη χρήση DML διαμορφωτή.	26
Εικόνα 2-4: Διαμόρφωση με τη χρήση EML διαμορφωτή.	27
Εικόνα 2-5: Διαμορφωτής Mach Zehnder (MZM).	28
Εικόνα 2-6: Γραμμική περιοχή λειτουργίας οπτικών στοιχείων	28
Εικόνα 2-7:Αναπαράσταση NRZ και PAM4 modulation.	30
Εικόνα 2-8: Αλλοίωση σχήματος παλμού εξαιτίας της χρωματικής διασποράς.	31
Εικόνα 2-9: Χρωματική διασπορά εξαρτώμενη από το μήκος κύματος.	33
Εικόνα 2-10:Δομή ενός τυπικού αυτοσυνεκτικού πομπού.	36
Εικόνα 3-1: Γραφική αναπαράσταση ενός διαγράμματος οφθαλμού δείχνοντας δύο επίπεδα ισχύος σε NRZ διαμόρφωση σχήματος.	41
Εικόνα 3-2: Δημιουργία SSB σημάτων.	44
Εικόνα 3-3: Παράδειγμα μετασχηματισμού Hilbert.	45
Εικόνα 3-4: Παράδειγμα σχεδιασμού ενός φίλτρου με 5 taps για τον μετασχηματισμό Hilbert.	46
Εικόνα 3-5: Differential encoder για μία πύλη XOR.	48
Εικόνα 3-6: Αποσπασματικός κώδικας Matlab για την υλοποίηση με encoder XOR και 1-bit delay.	48
Εικόνα 3-7: Επίδραση της διασποράς στο σχήμα NRZ σε σύγκριση με την duobinary διαμόρφωση.	49
Εικόνα 3-8: Ολοκληρωμένος duobinary πομπός.	50
Εικόνα 3-9:NRZ σχήμα μετάδοσης με MZM διαμορφωτή.	51
Εικόνα 3-10:Duobinary σχήμα μετάδοσης με διαμορφωτή MZM.	52
Εικόνα 3-11: SSB-NRZ με n-taps Hilbert φίλτρο μετασχηματισμού.	52
Εικόνα 3-12: Σχηματική διάταξη που εμπεριέχει την ίνα SMF.	53
Εικόνα 3-13: Οπτικός δέκτης για κάθε σχήμα μετάδοσης καθώς επίσης ο τρόπος δημιουργίας του διαγράμματος BER με βάση την αλλαγή μήκους της ίνας.	53
Εικόνα 4-1: Διαφορετική εξάπλωση στο φάσμα του NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σχήματος διαμόρφωσης.	56
Εικόνα 4-2: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 10GBd NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοσης σε 20km ίνα μετάδοσης.	57
Εικόνα 4-3: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 25GBd NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοσης σε 20km ίνα μετάδοσης.	57

Εικόνα 4-4: : Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 35GBd NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοση σε 20km ίνα μετάδοσης. ....	58
Εικόνα 4-5: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 40GBd NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοση σε 20km ίνα μετάδοσης. ....	58
Εικόνα 4-6: Διάγραμμα BER vs Baud Rate για NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σχήματος διαμόρφωσης για μετάδοση 20km ίνας. Επίσης μεγεθυμένο το ίδιο διάγραμμα (δεξιά) αναπαριστώντας το ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε σχήμα διαμόρφωσης στα 20km ίνας. ....	59
Εικόνα 4-7: Διαγράμματα οφθαλμού και τιμές BER για την duobinary και SSB διαμόρφωση σε απόσταση 20km για 50GBd και 56GBd ρυθμό μετάδοσης. ....	60
Εικόνα 4-8: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 25GBd NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοση σε 40km ίνα μετάδοσης. ....	61
Εικόνα 4-9: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 35GBd NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοση σε 40km ίνα μετάδοσης. ....	61
Εικόνα 4-10: Διάγραμμα BER vs Baud Rate για NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σχήματος διαμόρφωσης για μετάδοση 40km ίνας. Επίσης μεγεθυμένο το ίδιο διάγραμμα (δεξιά) αναπαριστώντας το ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε σχήμα διαμόρφωσης στα 40km ίνας. ....	62
Εικόνα 4-11: Διαγράμματα οφθαλμού για μετάδοση 40GBd duobinary και SSB-NRZ σήματος σε 40km ίνας και οι αντίστοιχες τιμές BER. ....	62
Εικόνα 4-12: Σύγκριση BER με βάση την απόσταση του μήκους ίνας (km) για 25GB ρυθμού μετάδοσης για τα NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σήματα διαμόρφωσης. ....	63
Εικόνα 4-13: Σύγκριση BER με την απόσταση του μήκους ίνας (km) για 35GBd ρυθμού μετάδοσης για τα NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σήματα διαμόρφωσης. ....	63
Εικόνα 4-14: Σύγκριση BER με την απόσταση του μήκους ίνας (km) για 45GBd ρυθμού μετάδοσης για τα NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σήματα διαμόρφωσης. ....	64

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1: Παράδειγμα πίνακα δεδομένων βασισμένο στην duobinary μετάδοση. ....	50
--	----



# 1 Εισαγωγή

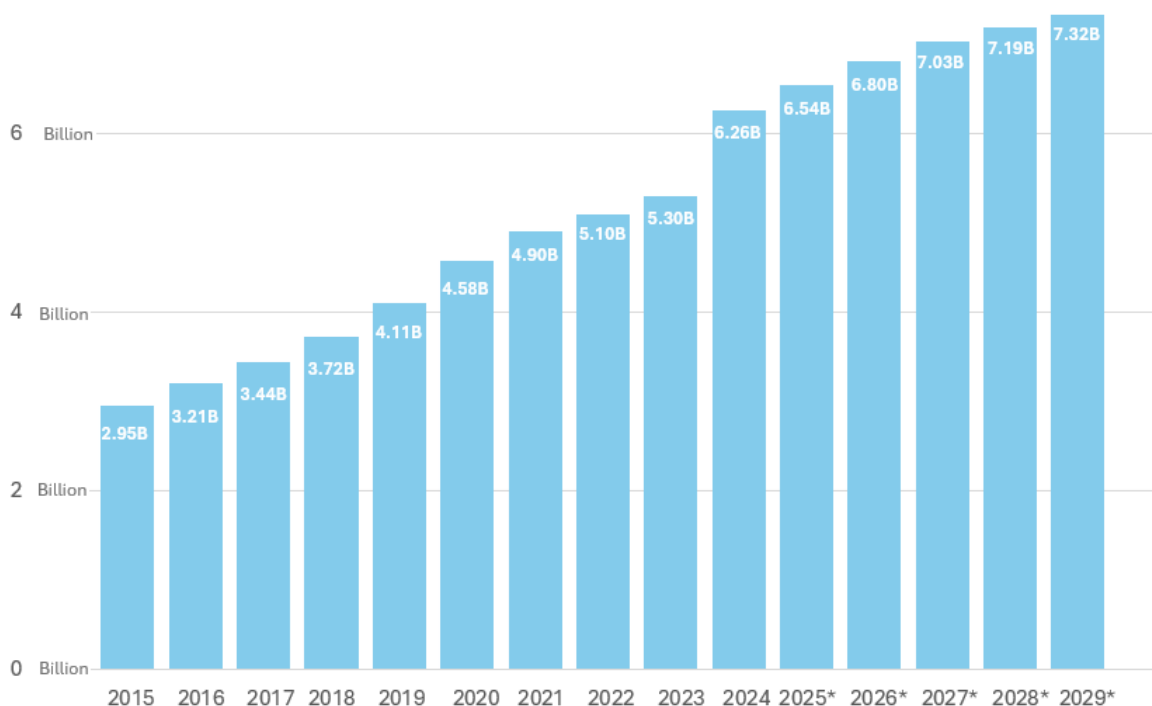
Το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο έχει ως στόχο να τοποθετήσει την παρούσα διπλωματική εργασία σε ένα γενικότερο ερευνητικό πλαίσιο και χωρισμένο σε τρεις ενότητες. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζεται η εξέλιξη και οι απαιτήσεις που υπάρχουν στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα επικοινωνίας. Συγκεκριμένα περιγράφεται σύντομα η σύγχρονη εξέλιξη της τεχνολογίας η οποία τίθεται ολοένα να συμβαδίζει με τις ανάγκες των χρηστών και των εφαρμογών. Η τεράστια αυτή κίνηση δεδομένων καθιέρωσε τα οπτικά δίκτυα αναγκαία για την διασύνδεση των κέντρων δεδομένων.

Η δεύτερη ενότητα δίνει έμφαση στο ρόλο και στον τρόπο διασύνδεσης των κέντρων δεδομένων με την χρήση οπτικών δικτύων επικοινωνίας, αναλύοντας βασικές προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπιστούν, καθώς επικεντρώνεται στα είδη και τρόπο μετάδοσης πληροφορίας στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα τόσο εντός – και εκτός – των κέντρων δεδομένων.

Τέλος, η τελευταία ενότητα αναφέρεται στον σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Γενικότερα, τοποθετεί την παρούσα εργασία στο πεδίο της έρευνας και αναλύει τους στόχους που καλείται να παρουσιάσει.

## 1.1 Απαιτήσεις των σύγχρονων οπτικών δικτύων επικοινωνίας

Η χωρητικότητα των σύγχρονων δικτύων επικοινωνίας καλείται να συμβαδίσει με την αυξανόμενη ζήτηση της χρήσης του διαδικτύου, καθώς όλο και περισσότεροι χρήστες συνδέονται καθημερινά. Η ραγδαία αυτή αύξηση οδηγεί την τεχνολογία να εξελίσσεται με ταχείς ρυθμούς, κυρίως λόγω των πολλαπλών εφαρμογών και συσκευών που συνδέονται στο διαδίκτυο, καταναλώνοντας συνεχώς περισσότερο εύρος ζώνης. Υπηρεσίες όπως το βίντεο streaming και η υπολογιστική νέφους (cloud computing) – είτε για αποθήκευση είτε για επεξεργασία δεδομένων – αποτελούν κύριους λόγους για την αύξηση της χωρητικότητας ανά χρήστη. Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη ετήσια έκθεση διαδικτύου της Cisco Systems© [1], σε παγκόσμιο επίπεδο, ο συνολικός αριθμός των χρηστών του διαδικτύου αναμενόταν να αυξηθεί από 3,9 δισεκατομμύρια το 2018 σε 5,3 δισεκατομμύρια έως το 2023 με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 6 τοις εκατό. Αυτό αντιπροσώπευε το 51% του παγκόσμιου πληθυσμού το 2018 και προβλεπόταν να φτάσει το 66% έως το 2023. Επιπλέον, έως το τέλος του 2024 προβλέπεται ότι οι χρήστες διαδικτύου θα φτάσουν τα 6,26 δισεκατομμύρια (Εικόνα 1-1), και αναμένεται να ξεπεράσουν τα 7,32 δισεκατομμύρια μέχρι το 2029 [2].



Εικόνα 1-1: Συνδεδεμένοι χρήστες στο Διαδίκτυο από το 2015 έως το 2029 [2].

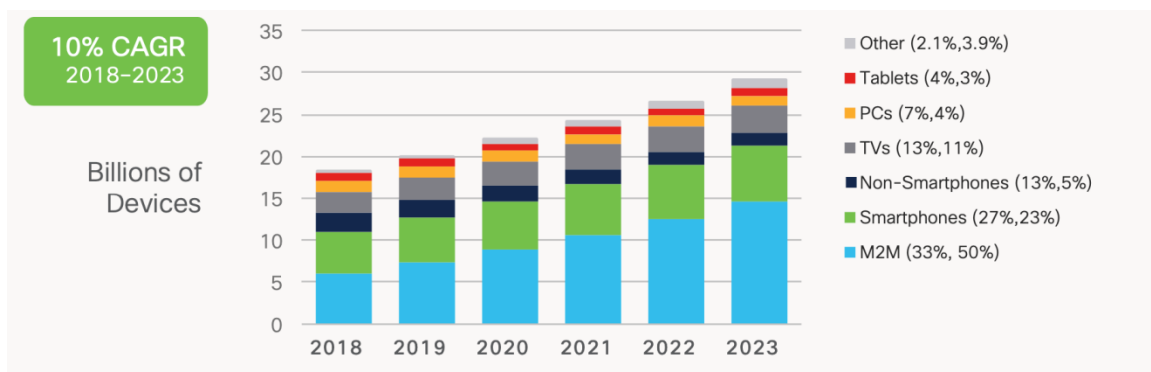
Τα οπτικά δίκτυα στα κέντρα δεδομένων αποτελούν κρίσιμο παράγοντα στην εξέλιξη τέτοιων υποδομών, εξαιτίας της εκθετικής αύξησης των δεδομένων που παράγονται και διακινούνται μέσω των διαδικτυακών υπηρεσιών, όπως το streaming βίντεο, τα κοινωνικά δίκτυα και οι εφαρμογές υπολογιστικού νέφους. Σύμφωνα με τις προηγούμενες μελέτες [1],[3], τα κέντρα δεδομένων παίζουν σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη αυτών των αυξημένων απαιτήσεων, φιλοξενώντας τεράστιο αριθμό διακομιστών που λειτουργούν σαν υπερυπολογιστές για να διαχειριστούν τις αυξανόμενες ανάγκες τόσο εντός (intra-data center) όσο και εκτός (inter-data center) των κέντρων δεδομένων. Αυτή η τεράστια κίνηση δεδομένων καθιστά τις οπτικές συνδέσεις και τις τεχνολογίες υψηλής ταχύτητας αναπόσπαστο μέρος αυτής της εξέλιξης. Επίσης με δεδομένο ότι η ζήτηση στις υπηρεσίες του διαδικτύου αυξάνεται συνεχώς, τα κέντρα δεδομένων θα συνεχίσουν να αποτελούν τον πυρήνα του διαδικτύου και θα προωθήσουν περαιτέρω την ανάγκη για πιο εξελιγμένες οπτικές λύσεις και τεχνολογίες δικτύωσης [4].

Ουσιαστικά, ένα κέντρο δεδομένων είναι ένα φυσικό ή εικονικό περιβάλλον που φιλοξενεί υπολογιστικούς πόρους, όπως σέρβερ, αποθήκευση δεδομένων και δίκτυα με σκοπό να παρέχει αξιόπιστη, ασφαλή και αποδοτική υποδομή για τη φιλοξενία και διαχείριση δεδομένων [5]. Σύμφωνα με [1] το 2021, 93.9% της συνολικής IP κίνησης του Διαδικτύου αφορούσε συνδέσεις τελικών χρηστών (end users) και κέντρων δεδομένων. Επιπλέον, η κίνηση αυτή αντιπροσώπευε μόνο το 14,9% της συνολικής κίνησης που σχετιζόταν με το κέντρο δεδομένων, ενώ το υπόλοιπο ήταν μεταξύ κέντρων δεδομένων (13,6%) και εντός κάθε κέντρου δεδομένων (71,5%). Σήμερα, η χρήση ασύρματων δικτύων και πομποδεκτών, καθώς και οπτικών τεχνολογιών έχει στόχο την κάλυψη των τεχνολογικών αναγκών για μεγάλη ταχύτητα

δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλής κατανάλωσης δίκτυα σε πολλές εφαρμογές. Τα κέντρα δεδομένων είναι το πιο κυρίαρχο παράδειγμα, αφού στεγάζουν σήμερα δεκάδες χιλιάδες διακομιστές (servers) και μεταγωγείς (switches), οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσμους επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας [6]. Επομένως, απαιτούνται πιο εξελιγμένες αρχιτεκτονικές, μορφές διαμόρφωσης και επεξεργασία σήματος για να αντιμετωπιστεί αυτή η αύξηση της κίνησης.

## 1.2 Η ανάπτυξη στα κέντρα δεδομένων και ο ρόλος των οπτικών δικτύων

Όπως αναφέρθηκε, ως ένας από τους κορυφαίους παρόχους τεχνολογιών δικτύωσης και επικοινωνιών, η αμερικανική εταιρεία Cisco Systems© δημοσιεύει προβλέψεις για την εξέλιξη της παγκόσμιας κίνησης IP, παρακολουθώντας και προβλέποντας τις τάσεις της παγκόσμιας κίνησης και εξετάζοντας τις επιπτώσεις της ανάπτυξής της για τους παρόχους υπηρεσιών μέσω του δείκτη Visual Networking Index (VNI). Σύμφωνα με την έκθεση του 2018, η ετήσια παγκόσμια κίνηση IP έφτασε τα 2 zettabytes ετησίως μέχρι το 2019, ενώ έφτασε τα 4,1 zettabytes έως το 2023. Επιπλέον, μέχρι το 2022, το 81,5% της συνολικής παγκόσμιας κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας προβλεπόταν να οφείλεται στη ροή βίντεο. Η ταχεία ανάπτυξη των μητροπολιτικών δικτύων οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, στον αυξανόμενο ρόλο των δικτύων διανομής περιεχομένου, τα οποία παρακάμπτουν τις συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων και διοχετεύουν την κίνηση σε τοπικά και περιφερειακά δίκτυα κορμού μέσω των τοπικών σημείων τους. Επιπλέον, με την εξέλιξη του «Διαδικτύου των Πραγμάτων» (Internet of things - IoT), της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI) και των εφαρμογών νέφους, αναμένεται περαιτέρω εκρηκτική αύξηση στη διακίνηση δεδομένων κάθε χρόνο (Εικόνα 1-2) [1]



Εικόνα 1-2: Πρόσφατη επίσημη μελέτη για την παγκόσμια αύξηση της χρήσης των συσκευών του διαδικτύου.

Με αυτές τις αυξανόμενες απαιτήσεις για μεγάλο εύρος ζώνης, γρήγορη και υψηλή ποιότητα συνδεσιμότητας, τα κέντρα δεδομένων χρειάζονται διασυνδέσεις που θα επιτρέπουν την



ανταλλαγή πληροφορίας σε πολύ υψηλές ταχύτητες (στην περιοχή των Tb/s), ενώ παράλληλα θα είναι χαμηλού κόστους και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Σε αυτό το πλαίσιο, η φωτονική-οπτική τεχνολογία αναδεικνύεται ως η πλέον αξιόπιστη λύση, προσφέροντας σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παλαιότερες τεχνολογίες, όπως τα καλώδια χαλκού. Οι οπτικές διασυνδέσεις, αξιοποιώντας τις τεράστιες δυνατότητες των οπτικών ινών και της φωτονικής ολοκλήρωσης, κυριαρχούν στη διασύνδεση κέντρων δεδομένων, τόσο για intra-data center όσο και inter-data center διασυνδέσεις.

Στο παρελθόν τα κέντρα δεδομένων αποτελούσαν φυσικές υποδομές οι οποίες ελέγχονταν σε ένα ανώτερο επίπεδο από το δίκτυο, παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια αυτό έχει αλλάξει κατά πολύ. Η παραδοσιακή φυσική υποδομή in-house διακομιστών έχει αντικατασταθεί από εικονικά δίκτυα (virtual networks) που υποστηρίζουν εφαρμογές και διαχειρίζονται τον υπολογιστικό φόρτο (workload) μέσω ομαδοποιήσεων φυσικών υποδομών (pools of physical infrastructure) σε περιβάλλον πολλαπλού νέφους (multicloud) [7]. Τα δεδομένα πλέον διασυνδέονται μεταξύ πολλαπλών κέντρων δεδομένων, τοπικών δικτύων άκρων (edge networks), δημόσιων και ιδιωτικών νεφών. Αυτή η αποκέντρωση στον τρόπο με τον οποίο διανέμονται τα δεδομένα απαιτεί κέντρα δεδομένων ικανά να επικοινωνούν με όλα τα επίπεδα της οργάνωσης. Ακόμα και μια δημόσια υπηρεσία νέφους είναι, ουσιαστικά, μια συλλογή από κέντρα δεδομένων.

Με την ταχεία ανάπτυξη των κέντρων δεδομένων, οι τεχνικές και φυσικές προκλήσεις που ανακύπτουν είναι πολλαπλές και περιλαμβάνουν τα εξής:

- **Περιορισμοί χωρητικότητας και επεκτασιμότητας:** Η ποσότητα των δεδομένων που διακινούνται προς και από τα κέντρα δεδομένων μπορεί να φτάσει σε επίπεδα terabytes, απαιτώντας εξοπλισμό δικτύου υψηλής χωρητικότητας και ευελιξία για αναβάθμιση όταν χρειάζεται.
- **Περιορισμοί απόστασης:** Οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων δεδομένων μπορεί να ποικίλλουν από λίγα χιλιόμετρα έως εκατοντάδες ή και δια-ωκεάνιες αποστάσεις, γεγονός που αυξάνει το κόστος ανά bit (cost/bit) λόγω των απαιτήσεων ενίσχυσης και αναγέννησης σήματος.
- **Οικονομικό και ενεργειακό κόστος:** Η κίνηση μεταξύ των κέντρων δεδομένων αυξάνεται κατά περίπου 30% ετησίως, αυξάνοντας το κόστος ανάπτυξης και συντήρησης του δικτύου, καθώς και την κατανάλωση ενέργειας και τις ανάγκες ψύξης.
- **Ασφάλεια:** Τα δεδομένα που αποθηκεύονται σε κέντρα δεδομένων είναι συχνά ευαίσθητα, όπως οικονομικές συναλλαγές και προσωπικά αρχεία, απαιτώντας αξιόπιστες και ασφαλείς διασυνδέσεις.

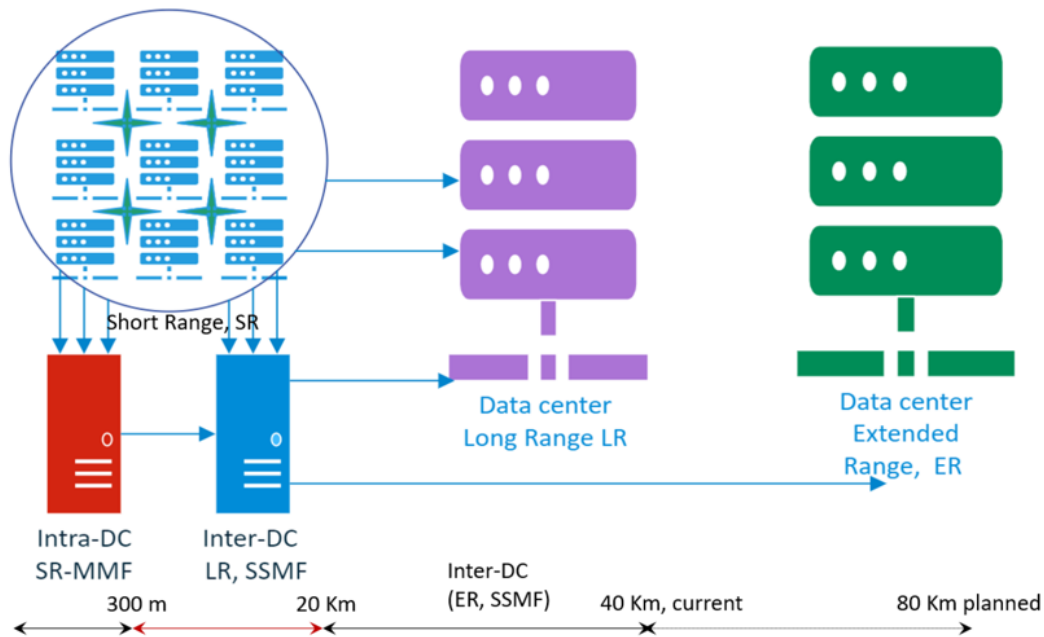
Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η χρήση οπτικών διασυνδέσεων έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική, προσφέροντας υψηλές ταχύτητες, αποδοτικότητα και χαμηλό κόστος συντήρησης. Με άλλα λόγια, η φωτονική τεχνολογία, μέσω των οπτικών

διασυνδέσεων, προσφέρει λύσεις που εξασφαλίζουν γρήγορη και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων, καθιστώντας τα κέντρα δεδομένων πιο αποδοτικά.

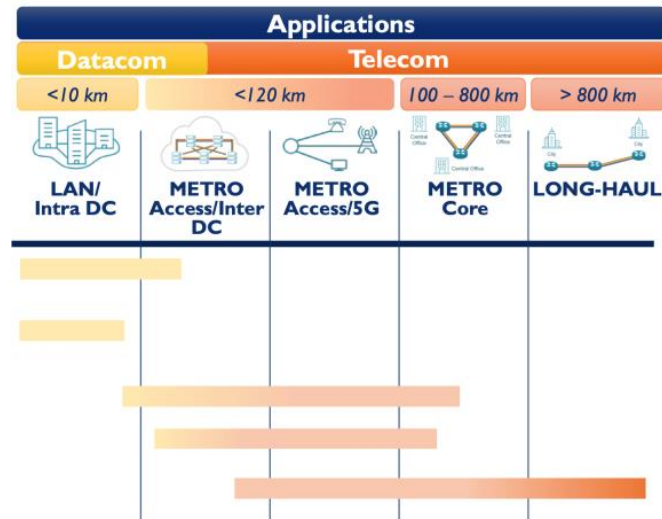
### 1.2.1 Είδη οπτικών διασυνδέσεων με βάση την απόσταση

Οι διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων περιλαμβάνουν διασυνδέσεις τόσο εντός υπολογιστικού κέντρου (intra – datacenter) όσο και μεταξύ (inter – datacenter) των κέντρων επιβάλλοντας τη χρήση διαφορετικών τεχνολογιών (Εικόνα 1-3). Ο κύριος λόγος της διάκρισης αυτής είναι το γεγονός ότι αναλόγως με το μήκος της ζεύξης υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται.

Η διαφοροποίηση αυτή είναι κρίσιμη, καθώς οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται άμεσα από το μήκος της ζεύξης και τις απαιτήσεις σε ταχύτητα και απόδοση. Για παράδειγμα, οι intra-data center διασυνδέσεις τείνουν να χρησιμοποιούν υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης τεχνολογίες, όπως οπτικά καλώδια μικρών αποστάσεων, δεδομένου ότι οι αποστάσεις που καλύπτονται είναι συνήθως μικρές (μέσα σε μερικές εκατοντάδες μέτρα).



Εικόνα 1-3: Κατηγορίες οπτικών διασυνδέσεων με βάση την απόσταση και είδη τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται. [8]



Εικόνα 1-4: Παραδείγματα δικτύου οπτικής τοπολογίας και απόστασης για συνδέσεις εντός κέντρων δεδομένων, δίκτυα πρόσβασης, μέτρο και μεγάλων αποστάσεων.

Οι διασυνδέσεις inter-datacenter αφορούν μεγάλες αποστάσεις, καθώς απαιτούν αυστηρότερα πρότυπα όσον αφορά την καθυστέρηση, το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, σε αυτό το πλαίσιο, δεν υπάρχουν σαφώς καθορισμένα πρότυπα, γεγονός που παρέχει μεν μεγαλύτερη ευελιξία στους σχεδιαστές συστημάτων, αλλά ταυτόχρονα καθιστά δυσκολότερη την ανάκτηση των τεχνικών προδιαγραφών για τα σύγχρονα intra-datacenter συστήματα.

Σε επίπεδο τεχνολογίας, παρά τις προσπάθειες για τη χρήση σχημάτων απευθείας διαμόρφωσης σήματος σε διασυνδέσεις μέχρι 40 km, η κυρίαρχη τεχνολογία για μεγαλύτερες αποστάσεις είναι τα coherent οπτικά δίκτυα λόγω της ανθεκτικότητάς τους και της ικανότητάς τους να διαχειρίζονται μεγαλύτερες αποστάσεις με υψηλή απόδοση και χαμηλή καθυστέρηση. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις intra-datacenter συνδέσεις, οι οποίες καλύπτουν μικρότερες αποστάσεις, θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

## 1.2.2 Τεχνολογίες για τα κέντρα δεδομένων μικρών αποστάσεων (intra-datacenters)

Μια σημαντική διάκριση γίνεται στις αποστάσεις όπου οι ζεύξεις μικρότερες από 40 km μπορούν να θεωρηθούν ως "μεγάλες" ζεύξεις intra-datacenter, καθώς μπορούν να χρησιμοποιούν τις ίδιες αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες διαμόρφωσης [9]. Όταν οι αποστάσεις ξεπερνούν αυτό το όριο, το κόστος και η πολυπλοκότητα της ζεύξης αυξάνονται, απαιτώντας οπτική ενίσχυση και τη χρήση μηκών κύματος στη ζώνη C. Σε αυτές τις περιπτώσεις, απαιτείται αντιστάθμιση διασποράς και η χρήση οπτικών ενισχυτών προσθέτει θόρυβο, αλλάζοντας τις απαιτήσεις απόδοσης [10]. Έτσι, οι ζεύξεις αυτές μοιάζουν περισσότερο με συστήματα μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων.

Ειδικότερα, οι συνδέσεις εντός των κέντρων δεδομένων χαρακτηρίζονται από μικρή εμβέλεια και υψηλό όγκο δεδομένων, γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη διαφορετικών τεχνολογιών σε

σύγκριση με τα δίκτυα μεγάλων αποστάσεων, τα δίκτυα μετρό και τα δίκτυα πρόσβασης (Εικόνα 1-4). Οι περισσότερες intra-datacenter συνδέσεις κυμαίνονται από λίγα μέτρα έως μερικές εκατοντάδες μέτρα, με ένα σημαντικό ποσοστό αυτών να είναι μικρότερο από 100 μέτρα. Υπάρχουν, επίσης, συνδέσεις μεταξύ διαφορετικών κτιρίων μέσα σε πανεπιστημιούπολη, όπου οι μεγαλύτερες ζεύξεις περιορίζονται στα 2 χιλιόμετρα, ενώ ζεύξεις εντός του ίδιου campus μπορεί να κυμαίνονται από λίγα μέτρα έως 10 χιλιόμετρα. Για παράδειγμα, όταν πρέπει να διασυνδεθούν δύο διπλανά κτίρια με απόσταση 200 μέτρων, η ίνα ενδέχεται να περάσει από έναν κόμβο (hub) που απέχει περισσότερο από 1 χιλιόμετρο, αυξάνοντας έτσι την πραγματική απόσταση της ζεύξης. Λόγω αυτών των απαιτήσεων, οι διασυνδέσεις εντός των κέντρων δεδομένων μπορούν να φτάσουν έως τα 10 χιλιόμετρα. Ένας σχετικά καινούριος όρος έχει καθιερωθεί για συνδέσεις από >20 χιλιόμετρα αλλά μικρότερες από 40 χιλιόμετρα, γνωστές ως mid-haul, τοποθετώντας αυτές τις συνδέσεις στις κοντινές αποστάσεις.

Το κόστος εύρους ζώνης αποτελεί την κύρια απαίτηση για τις συνδέσεις εντός των κέντρων δεδομένων. Κατά τον υπολογισμό του κόστους, πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο οι οπτικοί πομποδέκτες όσο και οι οπτικές ίνες. Σε αυτές τις αποστάσεις, λόγω της διασποράς στις οπτικές ίνες, χρησιμοποιούνται μονορυθμικές ίνες (single-mode fibers). Οι σημερινές τεχνολογίες για την επίτευξη ταχυτήτων άνω των 100G, όπως τα 400G ή το 1T, χρησιμοποιούν τεχνικές διαμόρφωσης υψηλής απόδοσης, όπως η PAM4 (Pulse Amplitude Modulation 4 επιπέδων). Η PAM4 διαμόρφωση έχει επικρατήσει έναντι της NRZ (Non-Return to Zero), καθώς αυξάνει τη χωρητικότητα της ζεύξης κωδικοποιώντας 2 bit ανά σύμβολο, χωρίς να απαιτεί πιο περίπλοκο ηλεκτρονικό εξοπλισμό για την αποδιαμόρφωσή της.

### **1.3 Σύγκριση τεχνολογιών συνδέσεων intra- και inter- κέντρων δεδομένων**

Οι διασυνδέσεις εντός (intra-) και μεταξύ (inter-) κέντρων δεδομένων αποτελούν έναν σημαντικό τομέα έρευνας στις οπτικές επικοινωνίες, με πλήθος προκλήσεων αλλά και επιλογών για τις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες. Η κύρια σύγκριση επικεντρώνεται ανάμεσα στις συνεκτικές (coherent) τεχνολογίες και τις τεχνολογίες άμεσης διαμόρφωσης και άμεσης ανίχνευσης (Intensity Modulation-Direct Detection, IM-DD).

Η συνεκτική τεχνολογία βασίζεται σε προχωρημένες τεχνικές ανίχνευσης που επιτρέπουν την ανάκτηση της πλήρους πληροφορίας του σήματος, συμπεριλαμβανομένης της φάσης και της έντασης. Αυτό την καθιστά ιδιαίτερα ανθεκτική στη χρωματική διασπορά και τα μη γραμμικά φαινόμενα, καθιστώντας την ιδανική για μεγάλες αποστάσεις, όπως στις διασυνδέσεις μεταξύ κέντρων δεδομένων (inter-datacenter). Παρά τα πλεονεκτήματά της, η συνεκτική τεχνολογία είναι πιο περίπλοκη και ακριβή, απαιτώντας μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και υψηλότερο κόστος εξοπλισμού, καθιστώντας την λιγότερο κατάλληλη για μικρές αποστάσεις.

Αντίθετα, η τεχνολογία IM-DD αποτελεί μια απλούστερη και πιο οικονομική λύση, χρησιμοποιώντας τη διαμόρφωση της έντασης του φωτός για τη μεταφορά δεδομένων χωρίς

την ανάγκη πολύπλοκων συστημάτων ανίχνευσης φάσης. Αυτό την καθιστά ιδανική για συνδέσεις μικρής απόστασης εντός των κέντρων δεδομένων (intra-datacenter), όπου το κόστος και η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελούν κρίσιμους παράγοντες. Ωστόσο, η IM-DD έχει περιορισμούς όσον αφορά την απόδοση σε μεγάλες αποστάσεις λόγω της ευαισθησίας της στη χρωματική διασπορά και την εξασθένηση του σήματος.

Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική προσέγγιση είναι η self-coherent τεχνολογία, η οποία προσφέρει έναν ενδιάμεσο δρόμο μεταξύ της πλήρως συνεκτικής και της IM-DD ανίχνευσης. Η self-coherent τεχνολογία επιτρέπει την ανίχνευση χωρίς την ανάγκη εξωτερικού τοπικού ταλαντωτή (local oscillator), μειώνοντας την πολυπλοκότητα και το κόστος, ενώ διατηρεί υψηλή απόδοση για μικρές αποστάσεις, όπως στα intra-datacenter δίκτυα. Παρέχει καλύτερη απόδοση από την IM-DD σε ό,τι αφορά την ευαισθησία, διατηρώντας χαμηλό ενεργειακό κόστος.

Η εξέλιξη των οπτικών συστημάτων συνεχίζεται με έμφαση σε νέες τεχνικές διαμόρφωσης όπως το PAM4, duobinary και discrete multi-tone (DMT), οι οποίες προσφέρουν βελτιωμένη φασματική απόδοση και είναι κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας σε μικρές αποστάσεις. Η φωτονική ολοκλήρωση (integrated photonics) επιτρέπει την ενσωμάτωση των φωτονικών κυκλωμάτων σε συμπαγείς μορφές, μειώνοντας περαιτέρω την ενεργειακή κατανάλωση και αυξάνοντας την πυκνότητα των διασυνδέσεων.

Παρά την επιτυχία των συνεκτικών συστημάτων σε μεγάλες αποστάσεις, οι τεχνολογίες άμεσης ανίχνευσης (IM-DD) παραμένουν προτιμητέες για εφαρμογές μικρής εμβέλειας λόγω του χαμηλού κόστους και της απλότητας στην υλοποίηση. Τα μελλοντικά συστήματα οπτικών επικοινωνιών θα συνεχίσουν να εξελίσσονται, συνδυάζοντας πλεονεκτήματα από διαφορετικές τεχνολογίες για την ικανοποίηση των αυξανόμενων απαιτήσεων σε ταχύτητα και εύρος ζώνης.

## **1.4 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Η προηγούμενη ενότητα αφορά την εξέλιξη των οπτικών κέντρων δεδομένων και των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις αποστάσεις μετάδοσης. Διαφορετικοί ρυθμοί δεδομένων, σχήματα διαμόρφωσης και αποστάσεις διάδοσης καθορίζονται από το είδος της οπτικής σύνδεσης και τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Με την αύξηση της ζήτησης για υψηλότερο εύρος ζώνης και χαμηλότερο κόστος, έχει γίνει επιτακτική η ανάπτυξη νέων, πιο αποδοτικών και οικονομικών τεχνολογιών που μπορούν να καλύψουν αυτές τις ανάγκες.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση και μελέτη ενός οικονομικά αποδοτικού σχήματος διαμόρφωσης, το οποίο ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των σύγχρονων οπτικών δικτύων. Συγκεκριμένα, εξετάζει τις κρίσιμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση οπτικών δικτύων στα κέντρα δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις διαφορετικών αποστάσεων μετάδοσης επικεντρώνοντας τη μελέτη κυρίως μεταξύ 20km μέχρι 40km, αφού η ερευνητική κοινότητα εξετάζει εναλλακτικές σε αυτές τις αποστάσεις. Η επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών διαμόρφωσης και ανίχνευσης είναι κρίσιμη, καθώς εξαρτάται άμεσα από την απόσταση και τις απαιτήσεις για απόδοση, αξιοπιστία και κόστος.

Σε αυτό το πλαίσιο, η έρευνα επικεντρώνεται στις εναλλακτικές τεχνολογίες διαμόρφωσης, όπως η Single-Sideband (SSB) και η duobinary διαμόρφωση. Αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούν απλούς και οικονομικούς οπτικούς διαμορφωτές, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για εφαρμογές μικρών και μεσαίων αποστάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση μετάδοσης με μειωμένη πολυπλοκότητα και χαμηλότερο κόστος, καθιστώντας τις συγκεκριμένες τεχνολογίες εξαιρετικά ελκυστικές για χρήση σε οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς.

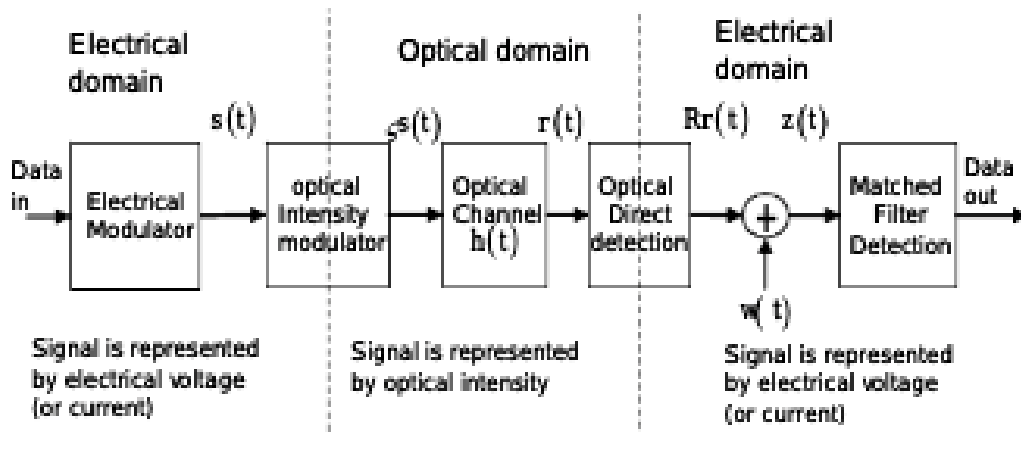
## 2 Διασύνδεση οπτικών δικτύων

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση οπτικών δικτύων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές κέντρων δεδομένων (Data Centers) και άλλων συστημάτων επικοινωνίας. Εξετάζονται τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία των πομποδεκτών (transceivers), καθώς και οι διαδικασίες διαμόρφωσης έντασης και άμεσης ανίχνευσης (IM/DD), που αποτελούν τις κύριες τεχνολογίες μετάδοσης. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις τεχνικές άμεσης (DML) και εξωτερικής διαμόρφωσης (EML), καθώς και στις μεθόδους αντιμετώπισης της χρωματικής διασποράς (CD). Επιπλέον, δίνεται αναφορά στα σχήματα αυτοσυνεκτικής ανίχνευσης (Self-coherent), που προσφέρονται ως ενδιάμεσες λύσεις για εφαρμογές μεσαίων αποστάσεων, παρέχοντας γραμμικοποίηση του καναλιού χωρίς τη χρήση τοπικού ταλαντωτή (LO), μειώνοντας έτσι το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος σε σύγκριση με τις συνεκτικές μεθόδους ανίχνευσης.

### 2.1 Δομικά στοιχεία διαμόρφωσης έντασης και άμεσης ανίχνευσης

Η διαμόρφωση αποτελεί τη διαδικασία με την οποία η συνεχής εκπομπή φωτός από το λέιζερ μπορεί και «μεταφράζεται» σε σήματα που μπορούν να μεταφέρουν την πληροφορία μέσω του οπτικού δικτύου. Στα οπτικά δίκτυα, η πληροφορία αντιπροσωπεύεται με δυαδικά ψηφία, δηλαδή 1 και 0. Έτσι, η συνεχής ροή φωτός από το λέιζερ πρέπει να "διακοπεί" και να διαμορφωθεί, ώστε να δημιουργήσει διακριτές παλμούς φωτός που αντιστοιχούν στα ψηφία της πληροφορίας. Στα ηλεκτρικά δίκτυα, τα ψηφία 1 και 0 μπορούν να αντιπροσωπευτούν με διαφορετικές τάσεις ή ρεύματα. Στα οπτικά δίκτυα, η εκπομπή φωτός από το λέιζερ αντιπροσωπεύει την πληροφορία. Για να δημιουργηθούν οι ψηφιακοί παλμοί, απαιτείται ένας μηχανισμός που να εναλλάσσει την ένταση του φωτός, ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας το λέιζερ, ώστε να παράγει "παλμούς" που αντιστοιχούν σε ψηφία 1 και σκοτεινά διαστήματα για τα ψηφία 0. Αυτή η διαδικασία, δηλαδή η μετατροπή του συνεχούς φωτός σε ψηφιακά σήματα, είναι ο βασικός ρόλος της διαμόρφωσης στα οπτικά δίκτυα.

Η διαμόρφωση έντασης (Intensity Modulation - IM) είναι μια μορφή διαμόρφωσης κατά την οποία η οπτική ισχύς εξόδου μιας πηγής μεταβάλλεται σύμφωνα με κάποιο χαρακτηριστικό του σήματος διαμόρφωσης. Η περιβάλλουσα του διαμορφωμένου οπτικού σήματος αποτελεί ανάλογο του σήματος διαμόρφωσης, με την έννοια ότι η στιγμιαία ισχύς της περιβάλλουσας είναι ανάλογη με το χαρακτηριστικό του σήματος διαμόρφωσης. Η ανάκτηση του σήματος διαμόρφωσης γίνεται συνήθως μέσω άμεσης ανίχνευσης (direct detection), και όχι μέσω ετεροδύνησης (heterodyning) ανίχνευσης.



Εικόνα 2-1: Σύστημα διαμόρφωσης έντασης/άμεσης ανίχνευσης.

Η Εικόνα 2-1 δείχνει το διάγραμμα του συστήματος οπτικής επικοινωνίας με διαμόρφωση έντασης και άμεση ανίχνευση (IM/DD). Τα δεδομένα διαμορφώνονται πάνω σε ένα ηλεκτρικό σήμα,  $s(t)$ . Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού συστήματος, το  $s(t)$  μπορεί να αναπαρασταθεί ως τάση, με την ηλεκτρική ισχύ να είναι ανάλογη του  $s^2(t)$ . Ο οπτικός διαμορφωτής έντασης παράγει ένα οπτικό σήμα με ένταση (όχι πλάτος) ανάλογη του  $s(t)$ . Αυτό σημαίνει ότι η οπτική ισχύς είναι ανάλογη του  $s(t)$ . (και όχι του  $s^2(t)$ ). Επίσης, προκύπτει ότι το  $s(t)$  μπορεί να λάβει μόνο θετικές τιμές, επομένως οι τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται συνήθως στις ραδιοεπικοινωνίες δεν μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς τροποποίηση. Το σήμα περνάει μέσω ενός οπτικού καναλιού με απόκριση παλμού  $h(t)$ .

Το λαμβανόμενο σήμα είναι το εξής:

$$r(t) = h(t) * s(t), \text{ όπου } * \text{ υποδηλώνει τη συνέλιξη.}$$

Το σήμα λαμβάνεται από έναν δέκτη άμεσης ανίχνευσης που μετατρέπει το σήμα οπτικής έντασης ξανά σε ηλεκτρικό σήμα (τάση ή ρεύμα),  $R[r(t)]$ . Το μοντέλο του συστήματος δείχνει ότι προστίθεται θόρυβος AWGN στον ηλεκτρικό τομέα.

Το λαμβανόμενο θορυβώδες σήμα είναι:

$$z(t) = R[r(t)] + w(t)$$

όπου  $w(t)$  είναι ο προστιθέμενος θόρυβος AWGN. Τα δεδομένα ανακτώνται από το  $z(t)$  χρησιμοποιώντας ένα προσαρμοσμένο φίλτρο.

### **Βασικά στοιχεία πομποδέκτη**

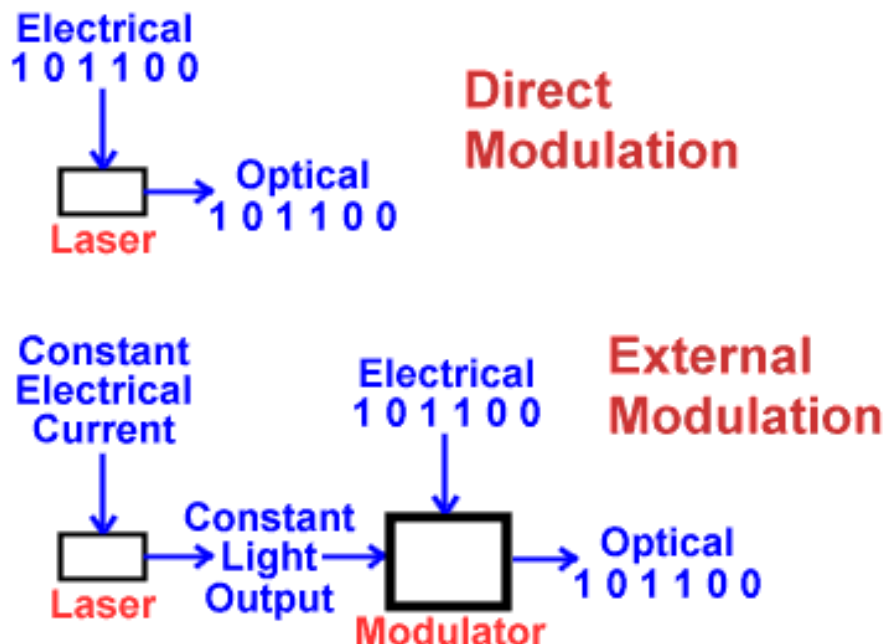
Ο οπτικός πομπός είναι ένα βασικό στοιχείο κάθε συστήματος οπτικών επικοινωνιών, καθώς μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα εισόδου σε οπτικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταδίδεται μέσω της οπτικής ίνας που λειτουργεί ως το μέσο μεταφοράς των πληροφοριών. Βασικό



στοιχείο του οπτικού πομπού είναι η οπτική πηγή, η οποία είναι υπεύθυνη για την παραγωγή του φωτός που θα μεταφέρει το σήμα. Οι πιο συνηθισμένες πηγές φωτός είναι οι ημιαγωγοί, όπως οι φωτοδιόδοι LED και τα λέιζερ ημιαγωγού, γνωστά και ως διόδοι λέιζερ. Τα λέιζερ ημιαγωγού προτιμώνται στα οπτικά συστήματα λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους, που περιλαμβάνουν το στενό φασματικό εύρος, την ευκολία σύζευξης με οπτικές ίνες, το μικρό τους μέγεθος, την αξιοπιστία και την υψηλή απόδοση, καθιστώντας τα ιδανικά για αποδοτικές και αξιόπιστες μεταδόσεις οπτικών σημάτων[11][12].

Τα συστήματα μετάδοσης οπτικών σημάτων βασίζονται στην διαμόρφωση του παραγόμενου φωτός από την οπτική πηγή, ώστε να μεταδοθεί η πληροφορία. Αυτή η διαδικασία διαμόρφωσης μπορεί να επιτευχθεί με δύο βασικές τεχνικές (Εικόνα 2-2):

1. **Απευθείας διαμόρφωση (Direct Modulation):** Στην τεχνική αυτή, το ίδιο το λέιζερ ενεργοποιείται και απενεργοποιείται για να παραχθεί η πληροφορία. Αυτή η μέθοδος είναι απλή αλλά περιορίζεται από φαινόμενα όπως η ολίσθηση συχνότητας (chirp), η οποία επηρεάζει την απόδοση σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων.
2. **Εξωτερική διαμόρφωση (External Modulation):** Η εξωτερική διαμόρφωση χρησιμοποιεί οπτικούς διαμορφωτές, όπως τον διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (Electro-Absorption Modulator, EAM). Αυτή η μέθοδος είναι πιο επωφελής για την αποφυγή των περιορισμών της άμεσης διαμόρφωσης και την υποστήριξη υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης.



Εικόνα 2-2: Αναπαράσταση απευθείας διαμόρφωσης (Direct modulation) και εξωτερικής διαμόρφωσης (external modulation).

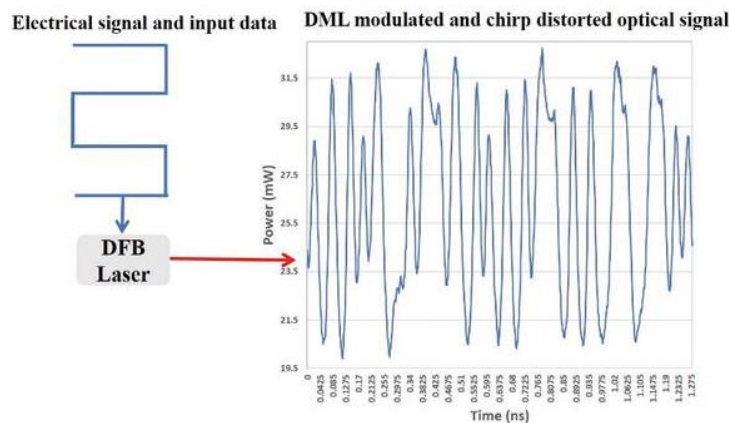
Προκειμένου να μεταδοθεί η πληροφορία σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης θα πρέπει να διαμορφωθεί το φως που παράγει η οπτική πηγή. Δηλαδή, θα πρέπει να «γραφτεί» η πληροφορία του ηλεκτρικού σήματος στο οπτικό φέρον. Το σήμα που προκύπτει από τη μετατροπή αυτή, που καλείται ηλεκτρο-οπτική διαμόρφωση, θα είναι της μορφής:

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

Η πληροφορία μπορεί να βρίσκεται είτε στο πλάτος  $A(t)$  είτε στη φάση  $\varphi(t)$  είτε σπανίως στη συχνότητα  $\omega(t)$ . Σε κάθε περίπτωση, η ισχύς του οπτικού σήματος ισούται με:

$$\frac{A^2(t)}{2}$$

Όπως αναφέρθηκε, οι διαμορφωτές βασίζονται σε δύο οπτικά φαινόμενα: το ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο και το φαινόμενο ηλεκτρο-απορρόφησης. Στην άμεση διαμόρφωση (Direct Modulated Laser - DML), το ηλεκτρικό σήμα εισέρχεται απευθείας στην κοιλότητα του λέιζερ, εσωκλείωντας τη διεγερμένη εκπομπή του φωτός. Με αυτόν τον τρόπο, ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα υψηλής συχνότητας που περιέχει πληροφορίες μπορεί να διαμορφωθεί και να σταλεί μέσω ενός οπτικού καναλιού. Η διαμόρφωση επιτρέπει την εισαγωγή της πληροφορίας στο φως που εκπέμπει το λέιζερ, το οποίο στη συνέχεια ταξιδεύει μέσω της οπτικής ίνας. Στην περίπτωση της άμεσης διαμόρφωσης (DML), το ηλεκτρικό σήμα εφαρμόζεται απευθείας στο λέιζερ, προκαλώντας την εκπομπή φωτός ανάλογα με την ένταση του σήματος. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία προκαλεί την εμφάνιση του φαινομένου chirp, το οποίο οδηγεί σε διεύρυνση του φάσματος και υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος. Το Εικόνα 2-3 που ακολουθεί παρουσιάζει αυτή την προσέγγιση της άμεσης διαμόρφωσης και τα αποτελέσματα του chirp, που επηρεάζουν την απόδοση της μετάδοσης.

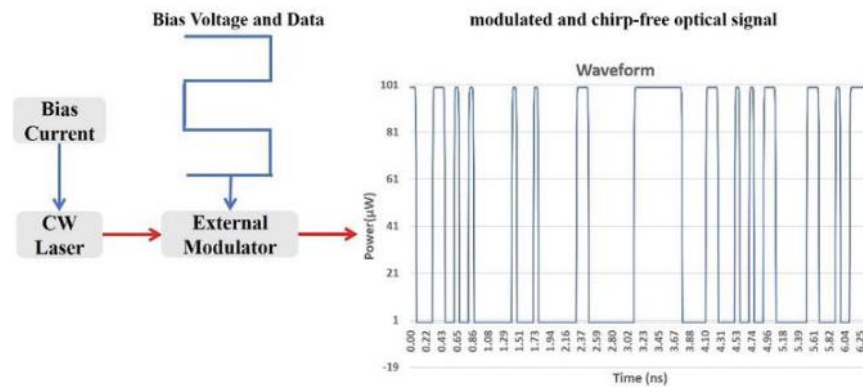


Εικόνα 2-3: Εξωτερική διαμόρφωση με τη χρήση DML διαμορφωτή.

Αυτή η προσέγγιση διαμόρφωσης είναι απλή και αποδοτική από πλευράς κόστους, ωστόσο περιορίζεται από το φαινόμενο του chirp, που προκαλεί φασματική διεύρυνση και μειώνει την

ποιότητα του σήματος και την εμβέλεια μετάδοσης. Στην εξωτερική διαμόρφωση (External Modulated Laser - EML), χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός διαμορφωτής για τη διαμόρφωση του συνεχούς κύματος (Continuous Wave - CW) φωτός που παράγεται από ένα λέιζερ. Αυτή η προσέγγιση εξαλείφει το πρόβλημα του chirp και είναι πιο κατάλληλη για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

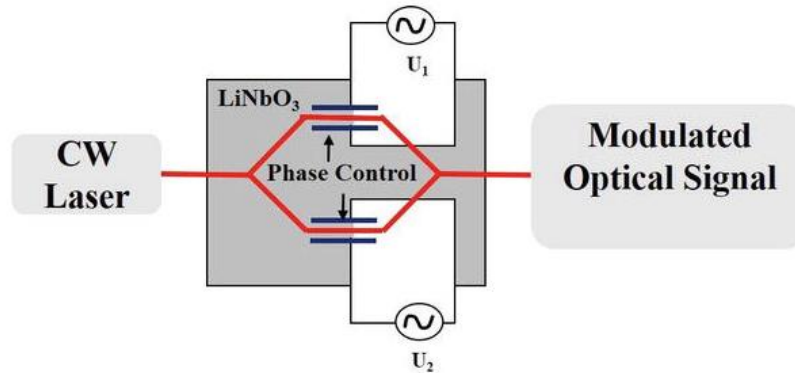
Η παραγωγή σήματος μέσω EML διαμορφωτή ως εναλλακτική λύση για την DML μπορεί να εξαλείψει σημαντικά το φαινόμενο του chirp συχνότητας που σχετίζεται με το σχήμα άμεσης διαμόρφωσης. Η διαδικασία απαιτεί ένα λέιζερ συνεχούς κύματος (CW) που παρέχει σταθερό οπτικό σήμα στον εξωτερικό διαμορφωτή και ένα εξωτερικό ηλεκτρικό σήμα εφαρμόζεται για να χειριστεί οποιαδήποτε από τις επιθυμητές ιδιότητες (ένταση, φάση και συχνότητα) του φωτός. Ένας τυπικός τρόπος λειτουργίας EML απεικονίζεται στο Εικόνα 2-4 που περιλαμβάνει το λέιζερ CW, τον εξωτερικό διαμορφωτή και την εξωτερική ηλεκτρική τάση οδήγησης.



Εικόνα 2-4: Διαμόρφωση με τη χρήση EML διαμορφωτή.

Ο διαμορφωτής EML είναι μια δίοδος λέιζερ με έναν ηλεκτρο-απορροφητικό διαμορφωτή (Electro-Absorption Modulator) ενσωματωμένο σε ένα μόνο τσιπ και παρουσιάζει μικρότερη διασπορά μήκους κύματος καθώς και σταθερό μήκος κύματος σε λειτουργία υψηλής ταχύτητας. Η απόκριση της συχνότητας του EML εξαρτάται από την χωρητικότητα του τμήματος του EAM και μπορεί να επιτύχει υψηλές ταχύτητες λειτουργίας.

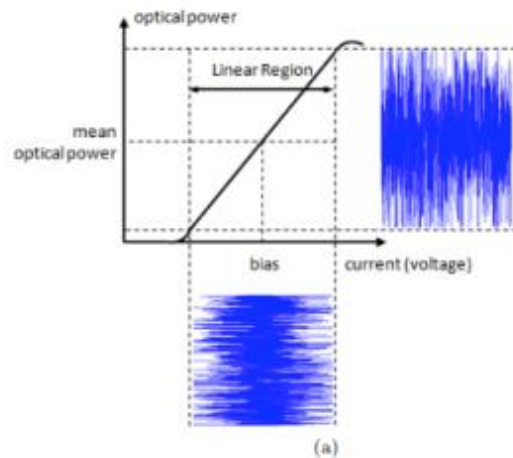
Ακόμα η εξωτερική διαμόρφωση μπορεί να γίνει είτε μέσω ηλεκτρο-διαθλαστικής με τη χρήση του συμβολόμετρου Mach Zehnder interferometric (MZI) είτε μέσω ηλεκτρο-απορρόφησης με τη χρήση ενός διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (Electro -Absorption Modulation). Οι εξωτερικοί διαμορφωτές, όπως ο διαμορφωτής Mach-Zehnder (MZM), βασίζονται στο ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο, χρησιμοποιώντας υλικά όπως το νιοβικό λίθιο (LiNbO3) (Εικόνα 2-5). Με αυτό το υλικό, η αλλαγή του δείκτη διάθλασης ελέγχεται από μια εφαρμοσμένη τάση, επιτρέποντας τη ρύθμιση της φάσης του φωτός. Όταν η φάση του φωτός διαμορφώνεται με το διαμορφωτή MZM, μπορεί να μετατραπεί σε διαμόρφωση πλάτους, καθιστώντας τον κατάλληλο για χρήση σε συστήματα υψηλών ταχυτήτων.



Εικόνα 2-5: Διαμορφωτής Mach Zehnder (MZM).

Ωστόσο, ο διαμορφωτής LiNbO<sub>3</sub> έχει το μειονέκτημα των σημαντικών απωλειών κατά τη σύζευξη του φωτός από την πηγή λέιζερ στον κυματοδηγό. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, ο διαμορφωτής ηλεκτρο-απορρόφησης (EAM) προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη λύση. Κατασκευασμένος από το ίδιο υλικό (InP) με το λέιζερ, ο EAM μπορεί να ενσωματωθεί μονολιθικά στο ίδιο υπόστρωμα με το λέιζερ. Αυτό μειώνει τις απώλειες, το κόστος και το φυσικό αποτύπωμα του πομπού, καθιστώντας τον ιδανικό για εφαρμογές υψηλών επιδόσεων σε οπτικά δίκτυα.

Θα πρέπει βέβαια να αναφερθεί ένα μειονέκτημα των οπτικών στοιχείων. Όπως φαίνεται και στο Εικόνα 2-6 η γραμμική περιοχή λειτουργίας αυτών των διαμορφωτών είναι περιορισμένη. Η ανάγκη για χαμηλή ισχύ εισόδου, ώστε να μην υπερβούν τα όρια της γραμμικής λειτουργίας, συνεπάγεται κόστος όσον αφορά την υποβάθμιση του δυναμικού εύρους του σήματος (Dynamic Range, DR). Η τάση που ρυθμίζει το σημείο πόλωσης του πομπού έχει καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της γραμμικότητας του συστήματος, επηρεάζοντας άμεσα το σφάλμα μετάδοσης. Αυτά τα φαινόμενα παρουσιάζονται λόγω θορύβου και προϊόντων παραμόρφωσης, τα οποία θα αναλυθούν πιο διεξοδικά στη συνέχεια [13].



Εικόνα 2-6: Γραμμική περιοχή λειτουργίας οπτικών στοιχείων

Αφού αναλύθηκαν τα είδη των οπτικών διαμορφωτών που βοηθούν στην ηλεκτρο-οπτική μετατροπή του σήματος, στην πλευρά του πομπού δομικό στοιχείο αποτελεί ο οπτικός δέκτης. Ως βασικό ρόλο έχει τη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό, προκειμένου να ανακτηθούν οι πληροφορίες που έχουν μεταδοθεί μέσω του οπτικού συστήματος. Ο κεντρικός του μηχανισμός είναι ο φωτο-ανιχνευτής, ο οποίος λειτουργεί με βάση το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, μετατρέποντας το φως σε ηλεκτρικό παλμό. Οι απαιτήσεις που καλείται να καλύψει ο φωτο-ανιχνευτής περιλαμβάνουν υψηλή ευαισθησία, γρήγορη απόκριση, χαμηλό θόρυβο, χαμηλό κόστος και μεγάλη αξιοπιστία. Για τον σκοπό αυτό, οι φωτο-ανιχνευτές κατασκευάζονται από υλικά ημιαγωγών και περιλαμβάνουν p-n διατάξεις, καθώς και τροποποιήσεις όπως οι p-i-n φωτοдиодοι και οι φωτοдиодοι χιονοστιβάδας (APDs). Το σήμα που παράγεται στην έξοδο της φωτοдиодου είναι ανάλογο του τετραγώνου του πλάτους του εισερχόμενου οπτικού σήματος. Η παρακάτω εξίσωση υποδηλώνει ότι οποιαδήποτε πληροφορία που έχει διαμορφωθεί κατά φάση χάνεται, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση πιο σύνθετων τεχνικών αποδιαμόρφωσης για την ανάκτηση της πληροφορίας σε συστήματα που χρησιμοποιούν διαμόρφωση φάσης.

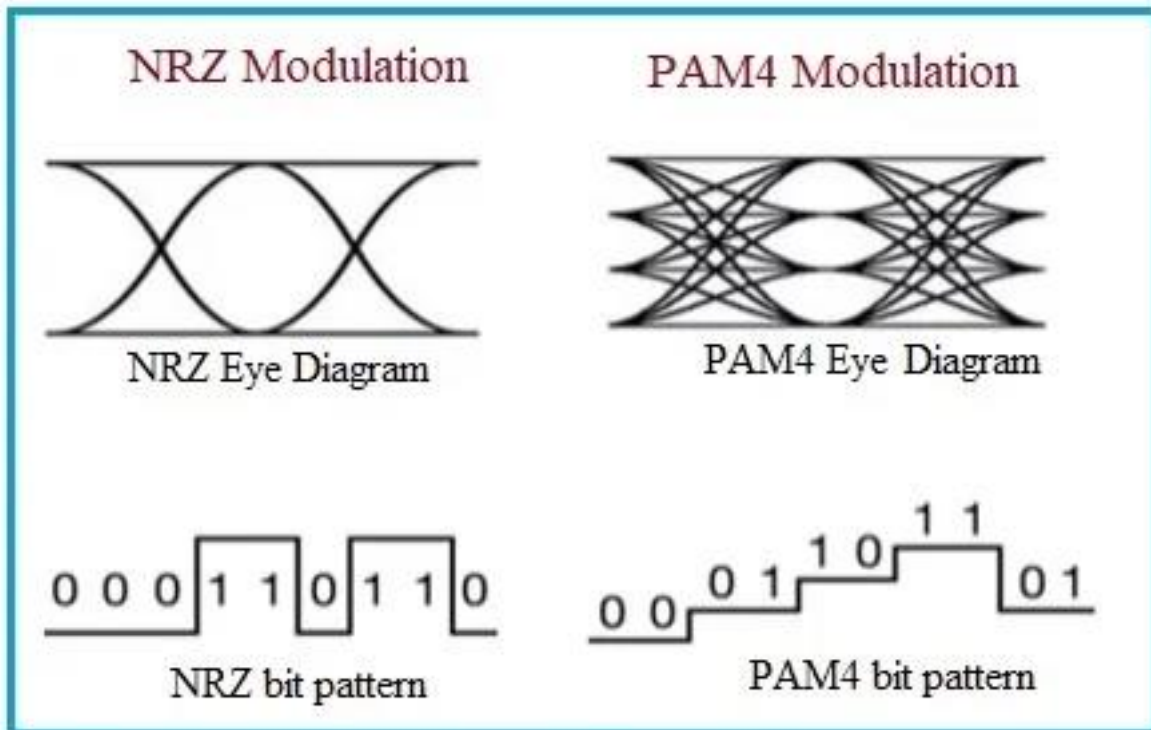
$$I = P \propto |E \exp[j(\omega t + \varphi)]|^2$$

### 2.1.1 Σχήματα Διαμόρφωσης σε οπτική διαμόρφωση IM/DD

Σε εφαρμογές που η πληροφορία διαμορφώνεται μόνο κατά πλάτος, όπως η διαμόρφωση NRZ (Non-Return-to-Zero) και η διαμόρφωση PAM4 (Pulse Amplitude Modulation 4 επιπέδων), η ανάκτηση του σήματος είναι πιο απλή και αποτελεσματική και χρησιμοποιείται ευρέως σε τέτοια IM/DD συστήματα.

Η διαμόρφωση NRZ είναι μια από τις πιο βασικές και διαδεδομένες τεχνικές διαμόρφωσης ψηφιακών σημάτων. Στην τεχνική αυτή, το σήμα διατηρεί την τάση ή το επίπεδο φωτός του καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος ενός bit και δεν επιστρέφει στο μηδενικό επίπεδο μεταξύ των bits. Κάθε bit αντιστοιχεί σε ένα σύμβολο, το οποίο μπορεί να είναι είτε 0 είτε 1. Έτσι, σε μια σειρά από bits, το σήμα μεταβαίνει μεταξύ δύο σταθερών επιπέδων τάσης ή φωτεινότητας, χωρίς επαναφορά στο μηδέν μέχρι το τέλος του bit.

Αντίθετα, στη διαμόρφωση RZ (Return-to-Zero), το σήμα επιστρέφει πάντα στο μηδενικό επίπεδο μεταξύ κάθε bit, ακόμα και όταν υπάρχει μια ακολουθία από συνεχόμενα 1. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα επιστρέφει στο μηδέν για κάθε bit, ανεξάρτητα από το αν είναι 1 ή 0, προσδίδοντας ένα διαφορετικό χρονικό προφίλ μετάδοσης σε σύγκριση με το NRZ [14]. Σχεδόν σε όλα τα οπτικά δίκτυα που υπάρχουν σήμερα, η NRZ είναι η μορφή διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, κυρίως λόγω της απλότητας και της ευκολίας υλοποίησής της. Η RZ εξετάζεται όλο και περισσότερο για πιο σύγχρονα σχέδια δικτύων, καθώς μπορεί να παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα, ιδίως σε μεγάλες αποστάσεις, όπου είναι λιγότερο ευαίσθητη στη χρωματική διασπορά και στη διασπορά τρόπου πόλωσης (PMD).



Εικόνα 2-7: Αναπαράσταση NRZ και PAM4 modulation.

Η διαμόρφωση PAM4 όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-7 είναι μια πιο προχωρημένη τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα οπτικών και ηλεκτρονικών επικοινωνιών, ειδικά όταν απαιτείται υψηλή απόδοση. Σε αυτή την τεχνική, το σήμα μπορεί να πάρει τέσσερα διακριτά επίπεδα πλάτους (ή στάθμες), τα οποία αντιστοιχούν σε δύο bits πληροφορίας (00, 01, 10, 11) για κάθε σύμβολο που μεταδίδεται. Αυτό σημαίνει ότι κάθε σύμβολο PAM4 μεταφέρει δύο bits πληροφοριών, επιτρέποντας τη μετάδοση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων σε σύγκριση με τεχνικές όπως το NRZ.

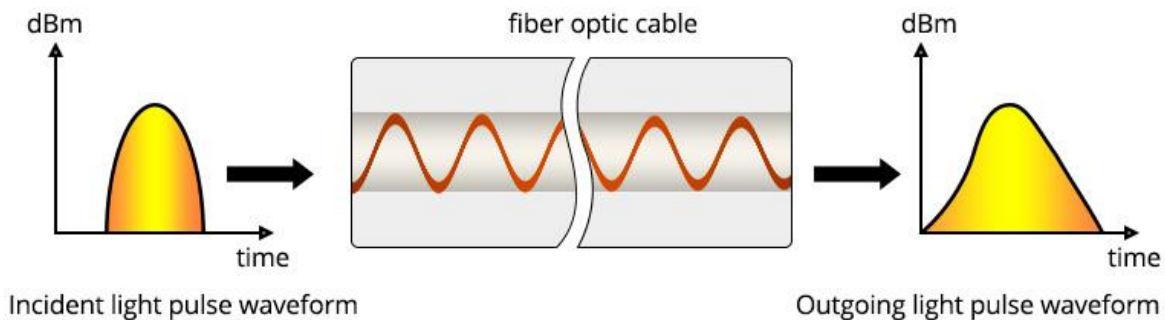
Ωστόσο, η χρήση πολλαπλών επιπέδων πλάτους αυξάνει τις απαιτήσεις στον σχεδιασμό των πομποδεκτών και της απόκρισης των συστημάτων, καθώς τα διαφορετικά επίπεδα πρέπει να διακρίνονται με ακρίβεια. Αυτό κάνει το PAM4 πιο ευάλωτο στον θόρυβο και στις παραμορφώσεις σήματος σε σχέση με το NRZ, κάτι που μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της μετάδοσης. Παρά τις προκλήσεις αυτές, το PAM4 χρησιμοποιείται συχνά λόγω της ικανότητάς του να διπλασιάζει τη χωρητικότητα μετάδοσης, κάτι που είναι κρίσιμο για σύγχρονα συστήματα υψηλών ταχυτήτων. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης, όπως το PAM4 ή άλλες πιο σύνθετες τεχνικές διαμόρφωσης, μπορούμε να αυξήσουμε το bit rate χωρίς να χρειάζεται να αυξηθεί το baud rate. Αυτό επιτρέπει τη βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος, καθώς κάθε σύμβολο μεταφέρει περισσότερες πληροφορίες. Για παράδειγμα, το PAM4 μεταφέρει 2 bits ανά σύμβολο, διπλασιάζοντας έτσι την πληροφορία που μεταφέρεται σε σύγκριση με τη διαμόρφωση NRZ, η οποία μεταφέρει μόνο 1 bit ανά σύμβολο. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα σημαντική στα σύγχρονα δίκτυα οπτικών ινών και στις επικοινωνίες υψηλών ταχυτήτων, όπου η αύξηση του bit rate χωρίς να αυξηθεί το baud rate

συμβάλλει στη μείωση των απαιτήσεων για εύρος ζώνης και κατανάλωση ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα την απόδοση σε υψηλά επίπεδα.

## 2.2 Βασικοί περιορισμοί των οπτικών επικοινωνιών και παραμόρφωσης σήματος

### 2.2.1 Υποβάθμιση συστήματος λόγω χρωματικής διασποράς

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της οπτικής ίνας είναι η χρωματική διασπορά. Η χρωματική διασπορά στα οπτικά συστήματα προκαλείται από μια μεταβολή της συνολικής ταχύτητας σε μια ίνα με αλλαγές στην οπτική συχνότητα. Αφού μπορεί να προκαλέσει διαπλάτυνση του παλμού σε ένα οπτικό σήμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-8, η χρωματική διασπορά μπορεί να χειροτερέψει την απόδοση του συστήματος. Η χρωματική διασπορά προκύπτει από την εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης του φωτός από το μήκος κύματος. Σε ένα πολυχρωματικό σήμα, διαφορετικά μήκη κύματος κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες μέσω της οπτικής ίνας, προκαλώντας τη σταδιακή εξάπλωση του παλμού με την απόσταση. Αυτό οδηγεί σε επικάλυψη των διαδοχικών παλμών και δυσκολία διάκρισης μεταξύ των bit, ιδίως σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Η χρωματική διασπορά αποτελεί έναν από τους κύριους περιορισμούς για την επίτευξη μεγάλων αποστάσεων στις οπτικές επικοινωνίες.



Εικόνα 2-8: Αλλοίωση σχήματος παλμού εξαιτίας της χρωματικής διασποράς

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της χρωματικής διασποράς σε ένα ηλεκτρομαγνητικό (H/M) κύμα που κυματοδηγείται μέσω ενός υλικού, θα υποθέσουμε ένα ιδανικό σενάριο όπου το υλικό είναι ομοιογενές, συμπαγές και με άπειρες διαστάσεις. Με αυτόν τον τρόπο, δεν θα συνυπολογιστούν φαινόμενα που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυματοδηγού. Το H/M κύμα, διαμορφωμένο γύρω από μια φέρουσα συχνότητα  $\omega_0$ , έχει τη

μορφή γκαουσιανού παλμού, ο οποίος μπορεί να περιγραφεί τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων.

Καθώς ο παλμός διαδίδεται κατά μήκος μιας απόστασης  $z$ , η κυματομορφή του αλλάζει, με τη σταθερά διάδοσης  $\beta(\omega)$  να εκφράζει την επίδραση του μέσου στο κυματοδηγούμενο πεδίο.

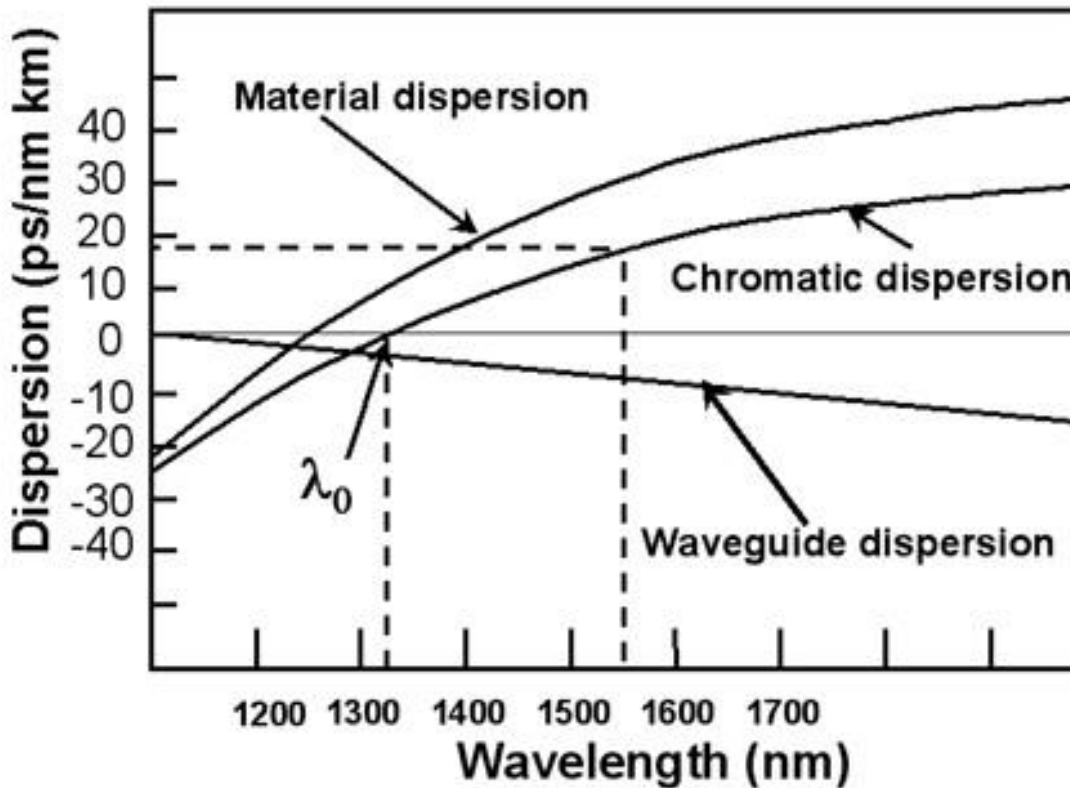
$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c}$$

Η  $\beta(\omega)$  είναι ανάλογη του δείκτη διάθλασης του υλικού και μπορεί να αναπτυχθεί σε σειρά Taylor γύρω από τη φέρουσα συχνότητα  $\omega_0$ , με τους αντίστοιχους παράγοντες. Ο όρος  $\beta_1$  είναι αντιστρόφως ανάλογος της ταχύτητας ομάδας του παλμού, ενώ ο όρος  $\beta_2$  σχετίζεται με τη διεύρυνση του παλμού λόγω χρωματικής διασποράς.

Το σημείο στο οποίο η χρωματική διασπορά μηδενίζεται καλείται μήκος κύματος μηδενικής διασποράς  $\lambda_D$ . Σε αυτό το σημείο, η διασπορά οφείλεται σε φαινόμενα τρίτης τάξης, ενώ για μήκη κύματος μικρότερα ή μεγαλύτερα του  $\lambda_D$  παρατηρούνται διαφορετικά είδη διασποράς (ομαλή και ανώμαλη). Η χρωματική διασπορά επηρεάζει άμεσα τη διεύρυνση του οπτικού παλμού και προκαλεί φαινόμενα όπως το chirping, δηλαδή τη διαμόρφωση συχνότητας του παλμού λόγω διασποράς. Γενικότερα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-9 η χρωματική διασπορά είναι εξαρτώμενη από το μήκος κύματος.

Για τον υπολογισμό της διασποράς χρησιμοποιείται η παράμετρος διασποράς (dispersion parameter), η οποία εκφράζει τη μεταβολή της ταχύτητας ομάδας σε συνάρτηση με το μήκος κύματος.





Εικόνα 2-9: Χρωματική διασπορά εξαρτώμενη από το μήκος κύματος.

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \approx \frac{-\lambda d^2 n}{e d \lambda^2}$$

Το πρόσημο της παραμέτρου διασποράς είναι αντίθετο από αυτό της παραμέτρου  $\beta_2$ , η οποία περιγράφει την καμπυλότητα της σταθεράς διάδοσης γύρω από τη φέρουσα συχνότητα.

Στην περιοχή ομαλής διασποράς, δηλαδή για μήκη κύματος μικρότερα του μήκους κύματος μηδενικής διασποράς, η παράμετρος  $D$  είναι αρνητική ( $D < 0$ ), υποδηλώνοντας ότι οι φασματικές συνιστώσες μεγαλύτερων μηκών κύματος κινούνται πιο γρήγορα από εκείνες των μικρότερων μηκών κύματος. Αντίθετα, στην περιοχή ανώμαλης διασποράς, όπου το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο από το  $\lambda_D$  η παράμετρος  $D$  είναι θετική ( $D > 0$ ), και οι φασματικές συνιστώσες των μικρότερων μηκών κύματος κινούνται ταχύτερα από τις μεγαλύτερες. Αυτό το χαρακτηριστικό της διασποράς επηρεάζει άμεσα την ποιότητα της μετάδοσης οπτικών σημάτων, καθώς οδηγεί σε φαινόμενα διεύρυνσης των παλμών, τα οποία μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας υψηλών ταχυτήτων.

## 2.2.2 Μέθοδοι αντιστάθμισης χρωματικής διασποράς

Η CD προκαλεί παραμόρφωση του σήματος, περιορίζοντας τις αποστάσεις και τους ρυθμούς μετάδοσης. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αντιμετώπισης της χρωματικής διασποράς, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Οι βασικές μέθοδοι είναι οι εξής:

1. **Ίνα Αντιστάθμισης Διασποράς (Dispersion Compensation Fiber, DCF):** Η DCF είναι μια ειδική οπτική ίνα με αρνητική χρωματική διασπορά, η οποία εισάγεται σε ένα σύστημα οπτικών ινών για να αντισταθμίσει τη συσσωρευμένη θετική διασπορά της κύριας ίνας. Οι DCF ίνες τοποθετούνται συνήθως είτε στην αρχή είτε στο τέλος της ίνας μετάδοσης.
  - a. **Πλεονεκτήματα:** Αποτελεσματική αντιστάθμιση σε ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Μειώνει τις επιπτώσεις της CD σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.
  - b. **Περιορισμοί:** Οι ίνες DCF παρουσιάζουν υψηλές απώλειες εισόδου και αυξάνουν τις απαιτήσεις ενίσχυσης. Επίσης, καταλαμβάνουν πολύ χώρο και αυξάνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος.
2. **Fiber Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG):** Η χρήση ινών FBG είναι οπτικές ίνες που έχουν περιοδικές αλλαγές στο δείκτη διάθλασης κατά μήκος του μήκους τους, οι οποίες ανακλούν συγκεκριμένα μήκη κύματος φωτός. Η συγκεκριμένη τεχνολογία επιτρέπει την αντιστάθμιση της διασποράς σε επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων.
  - a. **Πλεονεκτήματα:** Οι ίνες Bragg (ιδιαίτερα οι CFG, Chirped Fiber Gratings) προσφέρουν ακριβή αντιστάθμιση διασποράς, χαμηλές απώλειες εισόδου και μικρό αποτύπωμα. Έχουν υψηλή απόδοση σε εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων.
  - b. **Περιορισμοί:** Το κόστος εγκατάστασης είναι υψηλό, ενώ η ευαισθησία στη θερμοκρασία και οι περιορισμοί στις διαθέσιμες συχνότητες αποτελούν προβλήματα.
3. **Ηλεκτρονική Αντιστάθμιση Διασποράς (Electronic Dispersion Compensation, EDC):** Η EDC χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά κυκλώματα για να αντισταθμίσει τις γραμμικές και μη γραμμικές παραμορφώσεις που προκύπτουν από τη χρωματική διασπορά μετά τη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό. Συνήθως χρησιμοποιούνται ισοσταθμιστές όπως οι feed-forward equalizer (FFE) και decision feedback equalizer (DFE).
  - a. **Πλεονεκτήματα:** Μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στο δέκτη και να βελτιώσει την ποιότητα του σήματος χωρίς να χρειάζεται επεμβάσεις στις ίνες ή τον πομπό.

- b. **Περιορισμοί:** Αυξάνει την πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών και μπορεί να επιβραδύνει την ταχύτητα της επικοινωνίας, καθώς εξαρτάται από την ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP).
- 4. **Οπτική Σύζευξη Φάσης (Optical Phase Conjugation, OPC):** Η OPC είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί το φαινόμενο της σύζευξης της φάσης για την αντιστάθμιση της παραμόρφωσης του σήματος που προκαλεί η χρωματική διασπορά. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας ενός συζυγούς κύματος φάσης, το οποίο αντισταθμίζει τις παραμορφώσεις του αρχικού σήματος κατά τη διάρκεια της διάδοσής του μέσα στην οπτική ίνα.
  - a. **Πλεονεκτήματα:** Η OPC μπορεί να αντισταθμίσει τη CD σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε συστήματα μεγάλων αποστάσεων.
  - b. **Περιορισμοί:** Απαιτεί σύνθετα και ακριβά οπτικά συστήματα, ενώ παρουσιάζει ευαισθησία στις παραμέτρους λειτουργίας, όπως η σταθερότητα της φωτεινής πηγής.
- 5. **Ψηφιακά Φίλτρα (Digital Signal Processing Filters, DSP):** Η χρήση ψηφιακών φίλτρων μέσω τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) παρέχει μια λύση για την αντιστάθμιση της διασποράς στα οπτικά δίκτυα. Φίλτρα όπως τα all-pass, ζωνοπερατά, Gaussian και Butterworth μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντισταθμίσουν τις επιπτώσεις της CD.
  - a. **Πλεονεκτήματα:** Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος μπορεί να αντιμετωπίσει τη CD σε πολυπλεξικά συστήματα WDM (Wavelength Division Multiplexing), εξασφαλίζοντας ακριβή αντιστάθμιση με μικρότερες φυσικές απαιτήσεις.
  - b. **Περιορισμοί:** Παρουσιάζει μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και μπορεί να επιβαρύνει το σύστημα με καθυστερήσεις.

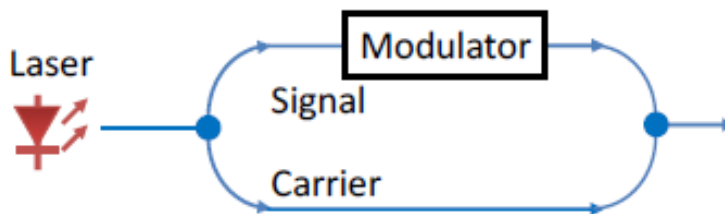
### 2.2.3 Σχήματα αυτό-συνεκτικών (self-coherent) τεχνολογιών

Η χρήση self-coherent σχημάτων (αυτό-συνεκτικών) αποτελεί μια ενδιάμεση λύση για εφαρμογές μεσαίων αποστάσεων, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ της άμεσης ανίχνευσης (Direct Detection, DD) και της πλήρους συνεκτικής ανίχνευσης (Coherent Detection). Στα συστήματα self-coherent, το σήμα και το φέρον μεταδίδονται μαζί από τον πομπό, επιτρέποντας την ανάκτηση του σήματος στον δέκτη χωρίς την ανάγκη τοπικού ταλαντωτή (Local Oscillator, LO), όπως συμβαίνει στα παραδοσιακά συνεκτικά συστήματα. Με τον τρόπο αυτό, τα self-coherent σχήματα επιτυγχάνουν μια μορφή γραμμικοποίησης του καναλιού, με τη δυνατότητα εξισορρόπησης καναλιού μέσω ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (Digital Signal Processing, DSP), χωρίς την πολυπλοκότητα της πλήρους συνεκτικής ανίχνευσης [15].

## Λειτουργία Self-coherent Συστημάτων

Στην ανίχνευση coherent, η ανάκτηση του σήματος βασίζεται στη σύγκριση του λαμβανόμενου σήματος με το οπτικό φέρον από τον τοπικό ταλαντωτή (LO). Το σήμα που προκύπτει από τον συνεκτικό δέκτη είναι το γινόμενο του σήματος και του συζυγούς του φέροντος, επιτρέποντας την αποδιαμόρφωση του σήματος με υψηλή φασματική απόδοση. Αντίθετα, στα συστήματα DD, το φέρον λείπει και ο δέκτης ανακτά μόνο την ένταση του σήματος, γεγονός που περιορίζει τις δυνατότητες της γραμμικής ανάκτησης του σήματος. Στα self-coherent συστήματα, η μετάδοση του φέροντος και του σήματος πραγματοποιείται ταυτόχρονα, και η φωτο-ανίχνευση στον δέκτη εκτελεί μια τετραγωνική συνάρτηση για την αποδιαμόρφωση του σήματος. Ουσιαστικά, το self-coherent σύστημα δημιουργεί ένα "συνεκτικό" φέρον που ανακτά το σήμα στο πεδίο και όχι μόνο στην ένταση, όπως γίνεται στο DD. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη γραμμική ανάκτηση του σήματος και απλοποιεί το DSP, καθώς δεν απαιτείται η ανάκτηση του φέροντος στο δέκτη μέσω σύνθετων αλγορίθμων DSP.

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των self-coherent συστημάτων είναι η δυνατότητά τους να αποφεύγουν την πολυπλοκότητα και το κόστος των πλήρως συνεκτικών συστημάτων, διατηρώντας παράλληλα πολλά από τα πλεονεκτήματά τους. Τα self-coherent συστήματα επιτρέπουν τη χρήση διαμόρφωσης πεδίου αντί για διαμόρφωση έντασης, παρέχοντας έτσι καλύτερη αντίσταση στη χρωματική διασπορά (CD) [15]. Επιπλέον, χρησιμοποιούν τον ίδιο λέιζερ για την παραγωγή τόσο του σήματος όσο και του φέροντος όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-10, ακυρώνοντας τον θόρυβο φάσης του λέιζερ, γεγονός που απλοποιεί περαιτέρω το DSP.



Εικόνα 2-10: Δομή ενός τυπικού αυτοσυνεκτικού πομπού.

Ωστόσο, τα self-coherent σχήματα έχουν και περιορισμούς. Ένας από τους κύριους περιορισμούς είναι ότι μπορούν να ανακτήσουν μόνο το συμφασικό (in-phase) μέρος του σήματος, μειώνοντας τη φασματική απόδοση. Αυτό σημαίνει ότι είναι λιγότερο αποδοτικά σε σύγκριση με τα συνεκτικά συστήματα όσον αφορά τη μετάδοση υψηλής χωρητικότητας. Επιπλέον, η ανάμιξη του γραμμικού σήματος με έναν όρο δεύτερης τάξης ( $|S|^2$ ) δημιουργεί θόρυβο παλμού σήματος προς σήμα (Signal-Signal Beat Noise, SSBN), ο οποίος μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος.

Η χρήση self-coherent σχημάτων σε συνδυασμό με τεχνικές όπως η διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης (Single-Sideband Modulation, SSB) και η τεχνική του δέκτη Kramers-Kronig (KK) [16] φαίνεται να είναι ιδιαίτερα υποσχόμενη για εφαρμογές μεσαίων αποστάσεων. Η δυνατότητα ανακατασκευής του πλήρους οπτικού πεδίου μέσω DSP χωρίς την ανάγκη LO κάνει το self-coherent σχήμα μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική για συστήματα που απαιτούν καλύτερη φασματική αποδοτικότητα και χαμηλό κόστος.

Συνολικά, τα self-coherent σχήματα αποτελούν μια αποτελεσματική λύση για την αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς και της μη γραμμικότητας καναλιού σε εφαρμογές μεσαίων αποστάσεων, προσφέροντας έναν συνδυασμό απλότητας, χαμηλού κόστους και καλής απόδοσης.

## 3 Πειραματικό μέρος

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τόσο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την ανάλυση και αξιολόγηση ενός συστήματος χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και χαμηλού κόστους, όσο και βασικά μετρικά στοιχεία για την αξιολόγηση της ποιότητας του σήματος. Επιπλέον, παρουσιάζονται συγκεκριμένες υπολογιστικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της ανάπτυξης της διαμόρφωσης duobinary σήματος, καθώς και ο θεωρητικός υπολογισμός για τη μελέτη της διαμόρφωσης μονής πλευρικής ζώνης (Single SideBand – SSB). Η ανάλυση αυτή αποτελεί τη βάση για την κατανόηση των τεχνικών διαμόρφωσης που επιλέγονται με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε οπτικά συστήματα επικοινωνίας, διατηρώντας παράλληλα χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα και κόστος υλοποίησης.

### 3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Προτού παρουσιαστεί η υλοποίηση του συστήματος που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική θα αναφερθούν βασικά μετρικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας του σήματος.

#### 3.1.1 Υπολογιστικά εργαλεία για την μέτρηση λαθών

Το πιο σύνηθες και αξιόπιστο υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση λαθών άρα και αξιοπιστίας του συστήματος επικοινωνίας είναι ο ρυθμός μετάδοσης εσφαλμένων bit (Bit Error Rate). Το BER εκφράζει τον λόγο των εσφαλμένων bits που έχουν ληφθεί προς τον συνολικό αριθμό των μεταδιδόμενων bits κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η ποιότητα της μετάδοσης δεδομένων, καθώς και η αποτελεσματικότητα της αποκατάστασης της πληροφορίας στον δέκτη.

Η σχέση για τον υπολογισμό του BER ορίζεται ως ο λόγος των λαμβανομένων λανθασμένων bit προς τον συνολικό αριθμό bits που μεταδόθηκαν:

$$BER = \frac{\text{Number of bits in error (at receiver)}}{\text{Total number of bits transmitted}}$$

Εάν, για παράδειγμα, ο αριθμός των εκπεμπόμενων bits είναι 10 και από αυτά τα 3 έχουν ληφθεί λανθασμένα (0 αντί για 1 ή 1 αντί για 0), τότε  $BER = \frac{3}{10} = 0.3$  ή 30%. Σε εφαρμογές επικοινωνίας, ο στόχος είναι το BER να διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα (συνήθως  $10^{-9}$  ή  $10^{-12}$ ), ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις των σφαλμάτων στη μετάδοση δεδομένων.

Αντίστοιχα, το SER (Symbol Error Rate) είναι ο ρυθμός με τον οποίο αναγνωρίζονται λανθασμένα τα σύμβολα που λαμβάνει ο δέκτης. Το SER διαφέρει από το BER, καθώς εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Σε συστήματα που χρησιμοποιούν πολυεπίπεδα σχήματα διαμόρφωσης, όπως PAM, κάθε σύμβολο μπορεί να αναπαριστά περισσότερα από ένα bit (π.χ., 2, 4 ή 8 bits ανά σύμβολο). Έτσι, ένα λάθος στο σύμβολο μπορεί να οδηγήσει σε λάθη σε περισσότερα από ένα bits, πράγμα που σημαίνει ότι το BER μπορεί να είναι χαμηλότερο ή υψηλότερο από το SER, ανάλογα με τον αριθμό των bits που αναπαριστά κάθε σύμβολο. Για παράδειγμα, σε PAM4 διαμόρφωση, κάθε σύμβολο αναπαριστά 2 bits. Αν υπάρχει σφάλμα σε ένα σύμβολο, μπορεί να επηρεάσει δύο bits.

### Παράγοντες που επηρεάζουν το BER:

1. **Θόρυβος:** Ο θόρυβος στον δίαυλο επικοινωνίας (π.χ., προστιθέμενος θόρυβος Gaussian - AWGN) μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια με την οποία ανιχνεύεται και αποδιαμορφώνεται το σήμα.
2. **Χρωματική διασπορά και διασπορά τρόπου πόλωσης:** Αυτά τα φαινόμενα προκαλούν χρονική εξάπλωση και παραμόρφωση του σήματος, δυσκολεύοντας τη σωστή ανίχνευση των bits.
3. **Συνθήκες του καναλιού μετάδοσης:** Εξασθένηση του σήματος, φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών, ή μη γραμμικά φαινόμενα μπορούν να επιδεινώσουν το BER.
4. **Αλγόριθμοι διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης:** Το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται επηρεάζει την απόδοση του συστήματος, με πιο πολύπλοκα σχήματα να απαιτούν περισσότερο εύρος ζώνης αλλά να είναι πιο ευάλωτα σε θόρυβο.
5. **Κωδικοποίηση:** Τεχνικές κωδικοποίησης και διόρθωσης σφαλμάτων (Error Correction Coding, ECC) μπορούν να μειώσουν το BER μέσω διορθωτικών μηχανισμών.

### 3.1.2 Δείκτες αξιολόγησης ποιότητας οπτικού σήματος

Παρακάτω αναφέρονται βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας του οπτικού σήματος τόσο πειραματικές όσο και σε προμοιωτικές μελέτες.

- **Σηματοθορυβικός λόγος (OSNR, Optical Signal-to-Noise Ratio):** είναι ένας από τους πιο σημαντικούς δείκτες για την αξιολόγηση της ποιότητας των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας. Εκφράζει τη σχέση μεταξύ της ισχύος του οπτικού σήματος και της ισχύος του θορύβου μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Στην ουσία, το OSNR καθορίζει το πόσο "καθαρό" είναι το οπτικό σήμα που φτάνει στον δέκτη σε σχέση με τον θόρυβο που έχει προστεθεί κατά τη μετάδοση.

$$OSNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

Όπου  $P_{signal}$  είναι η ισχύς του οπτικού σήματος και  $P_{noise}$  είναι η ισχύς του θορύβου, συνήθως μετρημένη σε ένα καθορισμένο εύρος ζώνης (συνήθως 0.1 nm). Το OSNR συνήθως εκφράζεται σε dB, κάτι που σημαίνει ότι χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα για την αναπαράσταση της αναλογίας σήματος προς θόρυβο:

$$OSNR (dB) = 10 \cdot \log_{10}(P_{noise}/P_{signal})$$

Το χαμηλό OSNR μπορεί να αυξήσει το BER, καθώς ο θόρυβος μπορεί να προκαλέσει εσφαλμένη λήψη των bits. Επιπλέον, παράγοντες όπως η χρωματική διασπορά και οι μη γραμμικότητες στο οπτικό σύστημα μπορούν να αλλοιώσουν το σήμα κατά τη μετάδοση, προκαλώντας σφάλματα στην αναγνώριση των bits από τον δέκτη. Επίσης, η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης επηρεάζει το BER, καθώς πιο σύνθετες διαμορφώσεις, όπως το PAM4, μπορεί να είναι πιο ευαίσθητες στον θόρυβο και τις παραμορφώσεις σε σχέση με απλούστερα σχήματα όπως το NRZ. Όταν το OSNR είναι υψηλό, το οπτικό σήμα υπερισχύει του θορύβου, εξασφαλίζοντας ότι το σήμα που φτάνει στον δέκτη είναι καθαρό και χωρίς παραμορφώσεις, κάτι που οδηγεί σε χαμηλό BER. Αντίθετα, ένα χαμηλό OSNR σημαίνει ότι ο θόρυβος κυριαρχεί σε σχέση με το σήμα, οδηγώντας σε υποβάθμιση της ποιότητας της μετάδοσης και αυξημένο BER. Οι βασικές επιπτώσεις ενός χαμηλού OSNR περιλαμβάνουν την παραμόρφωση του σήματος, δυσκολία στη σωστή ανίχνευση των bits, και τελικά, περιορισμό της απόστασης μετάδοσης χωρίς την ανάγκη αναγέννησης του σήματος. Επιπλέον, το χαμηλό OSNR μπορεί να προκληθεί από την ενίσχυση του θορύβου από οπτικούς ενισχυτές, όπως οι EDFA, από τη διασπορά και τα μη γραμμικά φαινόμενα στις οπτικές ίνες, καθώς και από τη χρήση κακής ποιότητας συσκευών πομπού-δέκτη. Ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, οι απαιτήσεις για το OSNR μπορεί να διαφέρουν, με πιο σύνθετα σχήματα να απαιτούν υψηλότερο OSNR για τη διατήρηση της ποιότητας του σήματος και την επίτευξη χαμηλού BER.

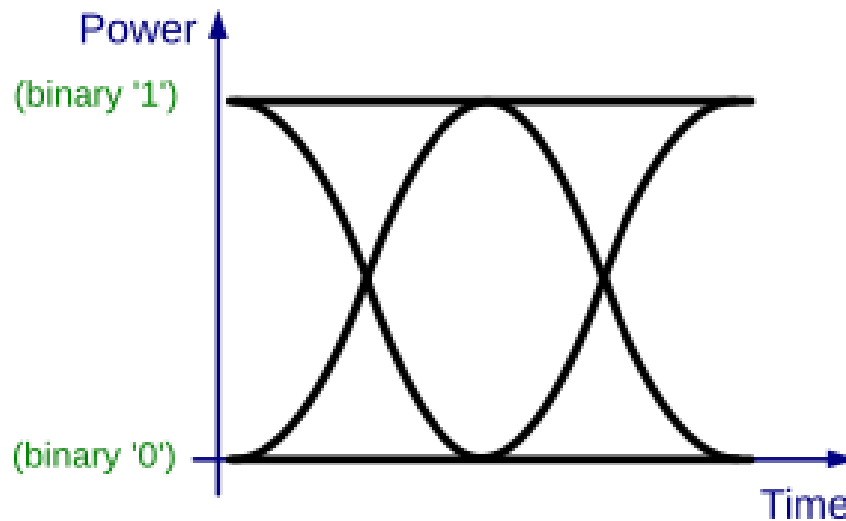
Η σχέση που συνδέει μαθηματικά το OSNR με το BER είναι η παρακάτω:

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

- **Διάγραμμα ματιού ή οφθαλμού (Eye Diagram):** Το eye diagram είναι ένα ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας ενός σήματος σε συστήματα ψηφιακών επικοινωνιών. Το διάγραμμα ματιού προκύπτει από την υπέρθεση πολλών διαδοχικών παλμών του σήματος, επιτρέποντας την οπτική αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Παίρνει το όνομά του από την χαρακτηριστική του εμφάνιση, που μοιάζει με ένα ανοικτό μάτι, όπως παρατηρείται στην Εικόνα 3-1. Από μαθηματική άποψη, το οφθαλμικό διάγραμμα είναι μια



γραφική απεικόνιση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function - PDF) του σήματος, επαναλαμβανόμενο ανά μονάδα χρόνου (Unit Interval - UI). Δηλαδή, δείχνει την πιθανότητα το σήμα να βρίσκεται σε κάθε συγκεκριμένη τάση ή επίπεδο ισχύος κατά τη διάρκεια της διεπαφής χρήστη. Αυτό βοηθά στην κατανόηση του πώς το σήμα συμπεριφέρεται και πώς επηρεάζεται από τον θόρυβο και άλλες παραμορφώσεις στο σύστημα. να καλά ανοιχτό "μάτι" υποδηλώνει ότι το σύστημα έχει χαμηλή δια-συμβολική παρεμβολή και θόρυβο, ενώ ένα στενό ή παραμορφωμένο μάτι υποδηλώνει υποβάθμιση του σήματος. Παράγοντες όπως η αστάθεια χρονισμού (jitter) ή η χρωματική διασπορά μπορούν να μειώσουν το άνοιγμα του ματιού, δυσκολεύοντας την αναγνώριση των bits και αυξάνοντας το BER.



Εικόνα 3-1: Γραφική αναπαράσταση ενός διαγράμματος οφθαλμού δείχνοντας δύο επίπεδα ισχύος σε NRZ διαμόρφωση σήματος.

Τέλος, το οφθαλμικό διάγραμμα παρέχει μια άμεση οπτική αξιολόγηση της ποιότητας του σήματος και των επιπτώσεων που μπορεί να προκαλέσουν θόρυβος, διασπορά και παρεμβολές. Για το λόγο αυτό, το διάγραμμα χρησιμοποιείται εκτενώς σε σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα για την αξιολόγηση της ποιότητας της μετάδοσης, τον εντοπισμό προβλημάτων και τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του συστήματος.

## 3.2 Μελέτη τεχνικών διαμορφώσεων με χρήση Matlab

Στο παρόν υποκεφάλαιο, θα παρουσιαστεί η ανάλυση των σχημάτων διαμόρφωσης μονής πλευρικής ζώνης (SSB) και duobinary διαμόρφωσης, τα οποία στη συνέχεια υλοποιήθηκαν σε

περιβάλλον Matlab για την καλύτερη κατανόηση και μελέτη της λειτουργίας τους μέσω προσομοιώσεων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την λεπτομερή ανάλυση των χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς των δύο τεχνικών διαμόρφωσης, συμβάλλοντας στην κατανόηση της πρακτικής τους εφαρμογής σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών.

- Η *διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης* χρησιμοποιείται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες για να μειώσει το απαιτούμενο εύρος ζώνης και να περιορίσει τα φαινόμενα διασποράς, επιτρέποντας τη μετάδοση μόνο της θετικής ή της αρνητικής πλευρικής ζώνης ενός σήματος, χωρίς την ανάγκη μετάδοσης του φορέα (carrier). Αυτό οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση εύρους ζώνης και ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις της χρωματικής διασποράς (chromatic dispersion) που παρατηρείται στις οπτικές ίνες. Η υλοποίηση του SSB σε Matlab επικεντρώνεται στη δημιουργία ενός αποδοτικού φίλτρου που καταστέλλει την ανεπιθύμητη πλευρική ζώνη, διατηρώντας μόνο το χρήσιμο φάσμα του σήματος.
- Η *duobinary διαμόρφωση*, από την άλλη, ανήκει στα σχήματα μερικής απόκρισης (partial response signaling), όπου το σήμα επηρεάζεται από παρεμβολή διασυμβόλων (Inter-Symbol Interference - ISI) με έναν ελεγχόμενο και προβλέψιμο τρόπο. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί κωδικοποίηση που εκμεταλλεύεται την παρεμβολή από τα προηγούμενα σύμβολα, προσφέροντας καλύτερη φασματική απόδοση σε σχέση με τη διαμόρφωση NRZ. Η duobinary διαμόρφωση μπορεί να θεωρηθεί ως μια μορφή εξομάλυνσης του σήματος, καθιστώντας το λιγότερο ευαίσθητο σε φαινόμενα διασποράς και θορύβου, ειδικά σε περιβάλλοντα υψηλών ταχυτήτων και μεγάλων αποστάσεων. Η ανάλυση και υλοποίηση της duobinary διαμόρφωσης σε Matlab επιτρέπει την ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς της σε διάφορες συνθήκες καναλιού και την αξιολόγηση της απόδοσης του σχήματος [17].

### 3.2.1 Μελέτη και υλοποίηση οπτικής διαμόρφωσης SSB με φίλτρο Hilbert

Όπως αναφέρθηκε, η τεχνική SSB επιτρέπει τη μετάδοση μόνο της μίας πλευρικής ζώνης ενός φάσματος σήματος, καταστέλλοντας την άλλη πλευρική ζώνη, εξοικονομώντας έτσι εύρος ζώνης και περιορίζοντας τις επιπτώσεις της χρωματικής διασποράς σε οπτικά συστήματα. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετάται η υλοποίηση ενός οπτικού πομπού μονής πλευρικής ζώνης (SSB) με έναν εξαιρετικά οικονομικό και αποδοτικό τρόπο, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της διπλής διαμόρφωσης. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στη χρήση δύο τύπων διαμορφωτών: ενός διαμορφωτή MZM και ενός διαμορφωτή φάσης (Phase Modulator - PM). Το σχέδιο διπλής διαμόρφωσης περιλαμβάνει την εφαρμογή δύο διαφορετικών τεχνικών διαμόρφωσης στο οπτικό σήμα. Πρώτα, το φως από το λέιζερ εισέρχεται στον διαμορφωτή MZM ο οποίος μεταβάλλει την ένταση του φωτός, προσθέτοντας διαμόρφωση έντασης στο σήμα και στη συνέχεια τον PM διαμορφωτή, ο οποίος προκαλεί μεταβολή στη φάση του σήματος ανάλογα με το ηλεκτρικό σήμα εισόδου. Αυτή η διπλή προσέγγιση είναι ιδανική για την υλοποίηση ενός συστήματος SSB, καθώς ο διαμορφωτής φάσης μεταβάλλει τη φάση του

σήματος, ενώ ο MZM ελέγχει την ένταση, δημιουργώντας έτσι ένα οπτικό σήμα SSB. Στη συνέχεια αναλύεται η σχέση της παρούσας διάταξης.

Ας υποθέσουμε ένα οπτικό φέρον  $E_{in}(t) = A_c e^{j\omega_c t}$  και  $M(t) = V_{in} \cos(\omega_d t)$  το ηλεκτρικό σήμα διαμόρφωσης, όπου  $\omega_c$  και  $\omega_d$  είναι οι συχνότητες του οπτικού φορέα και του ηλεκτρικού σήματος αντίστοιχα, και  $A_c$  το πλάτος του οπτικού φορέα, ενώ  $V_{in}$  είναι το πλάτος τάσης του εφαρμοζόμενου σήματος διαμόρφωσης [13],[18]. Η γενική έκφραση για το εξερχόμενο ηλεκτρικό πεδίο από τον διαμορφωτή MZM μονής εισόδου μπορεί να δοθεί ως:

$$E_{out1}(t) = \frac{A_c}{2} \left[ \exp\left(\frac{j\pi M(t)}{V_\pi}\right) + \exp\left(\frac{j\pi V_b}{V_\pi}\right) \right]$$

Όπου  $V_\pi$  είναι η τάση ημίσεως κύματος του διαμορφωτή και  $V_b$  είναι η συνεχής τάση πόλωσης (DC bias voltage) που εφαρμόζεται στον διαμορφωτή. Αν θεωρήσουμε  $m = \pi \frac{|M(t)|}{V_\pi}$  και  $c = \pi \frac{V_b}{V_\pi}$  τότε η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως εξής κρατώντας την κύρια συχνότητα δηλαδή το φέρον κύμα χωρίς πλευρικές ζώνες,  $J_0(m)$ , και  $J_1(m)$ , που αντιπροσωπεύει τις πλευρικές ζώνες πρώτης τάξης, δηλαδή τη συχνότητα που είναι είτε πάνω είτε κάτω από το φέρον κύμα κατά την πρώτη αρμονική. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως:

$$E_{out1}(t) = A_c \{ e^{j\omega_c t} [p + q(e^{j\omega_d t} + e^{-j\omega_d t})] \}$$

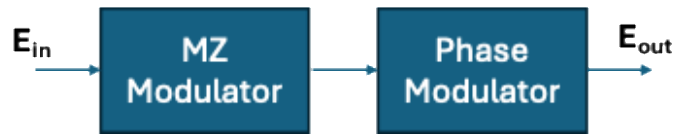
Η εξίσωση αυτή δείχνει τι με τη χρήση ενός μόνο MZM, μπορούν να δημιουργηθούν τα σχήματα διπλής πλευρικής ζώνης (DSB) και κατασταλαμμένης φέρουσας διπλής πλευρικής ζώνης (CS-DSB).

Προχωρώντας στη χρήση ενός PM διαμορφωτή υποθέτουμε ότι το σήμα οδήγησης είναι  $\sin(\omega_d t)$  το εξερχόμενο πεδίο από τον PM γράφεται ως:

$$E_{out2}(t) = e^{j[\varphi \sin(\omega_d t)]}$$

Όπου,  $\varphi$  είναι ο δείκτης διαμόρφωσης του PM σε ακτίνια. Άρα η εξίσωση μόνο με τις πρώτες πλευρικές ζώνες και θέτοντας  $p = A_c \cdot \cos(c) \cdot J_0(m)$ ,  $q = A_c \cdot \sin(c) \cdot J_1(m)$  είναι η εξής:

$$E_{out2}(t) = e^{j\omega_c t} J_0(\varphi) + J_1(\varphi) (e^{j\omega_d t} - e^{-j\omega_d t})$$



Εικόνα 3-2: Δημιουργία SSB σημάτων.

Βασισμένη σε αυτές τις εξισώσεις καθώς και όπως προκύπτει από την γραφική αναπαράσταση Εικόνα 3-1, συνδυάζοντας τους διαμορφωτές MZM και PM, το εξερχόμενο ηλεκτρικό πεδίο ορίζεται ως:

$$E_{out}(t) = E_{out1}(t)E_{out2}(t)$$

Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις πρώτες τάξης πλευρικές ζώνες και παραλείποντας τους όρους υψηλότερων συχνοτήτων, η εξίσωση απλοποιείται ως:

$$E_{out}(t) = p \cdot J_0(\varphi)e^{j\omega_c t} + (q \cdot J_0(\varphi) + p \cdot J_1(\varphi))e^{j(\omega_c + \omega_d)t} + (q \cdot J_0(\varphi) - p \cdot J_1(\varphi))e^{j(\omega_c - \omega_d)t}$$

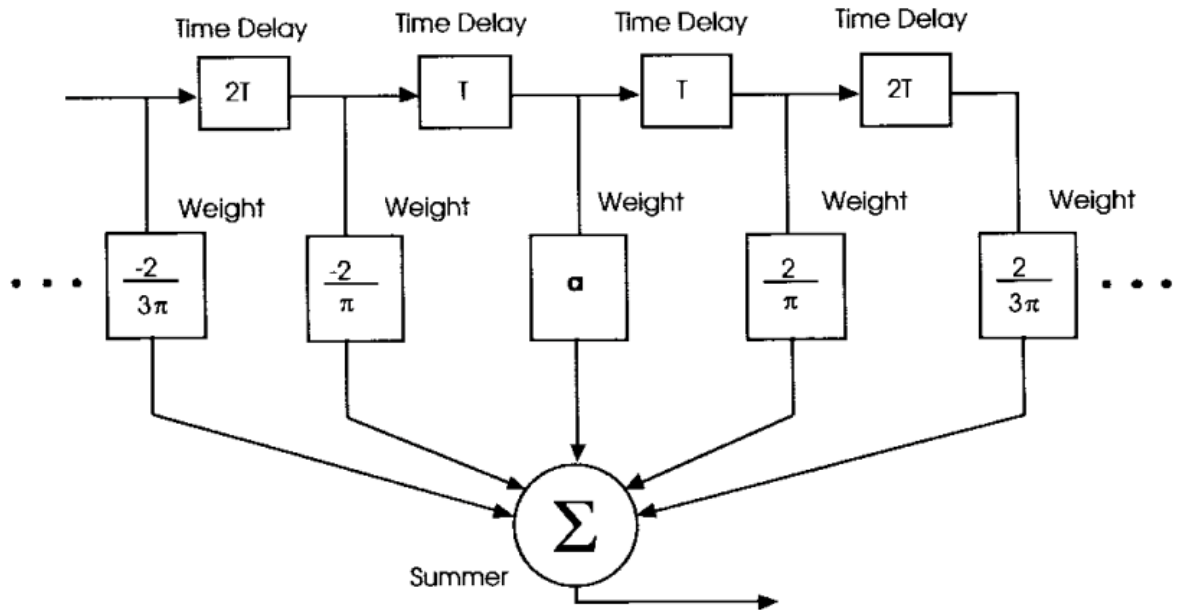
Αν ρυθμιστεί το πλάτος του φορέα και της πλευρικής ζώνης έτσι ώστε να ισχύει  $p J_0(\varphi) = q J_1(\varphi)$ , τότε το σχήμα SSB μπορεί να παραχθεί ως εξής:

$$E_{out}(t) = p \cdot J_0(\varphi)e^{j\omega_c t} + 2p \cdot J_1(\varphi)e^{j(\omega_c + \omega_d)t}$$

Η εξίσωση αυτή δείχνει τη δημιουργία του σχήματος μονής πλευρικής ζώνης (SSB) με την ανώτερη πλευρική ζώνη (USB). Στην περίπτωση που  $p J_0(\varphi) = -q J_1(\varphi)$ , μπορεί να παραχθεί το σχήμα SSB με την κατώτερη πλευρική ζώνη (LSB). Επιπλέον, με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων των διαμορφωτών, μπορεί να παραχθεί και το σχήμα VSB (vestigial sideband). Με τη διάταξη MZM-PM, μπορούν να παραχθούν όλα τα σχήματα διαμόρφωσης πλευρικών ζωνών.

Στην παρούσα διπλωματική η είσοδος του ηλεκτρικού πεδίου στον PM διαμορφωτή προκύπτει από το ότι το ηλεκτρικό σήμα του PM είναι το σήμα μετασχηματισμού Hilbert  $\hat{m}(t)$ . Το σήμα μετασχηματισμού Hilbert για τα σήματα οδήγησης του διαμορφωτή μπορεί να αποκτηθεί χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο καθυστερήσεων με taps, το οποίο προκύπτει από την απόκριση

συχνότητας της συνάρτησης μετασχηματισμού Hilbert. Ένα τροποποιημένο φίλτρο καθυστερήσεων με taps παρουσιάζεται στο Εικόνα 3-3, το οποίο μπορεί να παρέχει μια συνάρτηση μετασχηματισμού Hilbert ή κάποια παραλλαγή αυτής. Το σήμα μετασχηματισμού Hilbert για τη διάταξη μπορεί να δημιουργηθεί με το φίλτρο καθυστερήσεων με taps που φαίνεται στο Εικόνα 3-3 με τη ρύθμιση της παραμέτρου σε 0 καθώς επίσης παρουσιάζεται και ένας ενδεικτικός κώδικας Εικόνα 3-4.



Εικόνα 3-3: Παράδειγμα μετασχηματισμού Hilbert.

Εναλλακτικά, τα σήματα διαμόρφωσης για τη MZM-PM μπορούν να δημιουργηθούν ρυθμίζοντας την παράμετρο στο Σχήμα 3 σε 1 και -1, αντίστοιχα. Το φίλτρο καθυστερήσεων με taps μπορεί να κατασκευαστεί σε πειραματική μορφή χρησιμοποιώντας αντιστατικά διαιρέτες και εξασθενητές.

```

delay = (N_taps-1)/2; % Delay of the filter (2 in this case)

% Create the filter coefficients for Hilbert transform with 5 taps
h = zeros(1, N_taps);
for n = 1:N_taps
    if mod(n,2) == 0
        h(n) = 0; % Even-indexed taps are zero
    else
        h(n) = 2 / (pi * (n - delay - 1)); % Odd-indexed taps follow the
        Hilbert transform formula
    end
end
end

```

Εικόνα 3-4: Παράδειγμα σχεδιασμού ενός φίλτρου με 5 taps για τον μετασχηματισμό Hilbert.

### 3.2.2 Μελέτη και υλοποίηση οπτικής διαμόρφωσης για duobinary σήματα

Η διαμόρφωση duobinary είναι μια τεχνική που επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων με χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων, μειώνοντας την απαίτηση εύρους ζώνης του συστήματος κατά το ήμισυ, σε σύγκριση με τη διαμόρφωση NRZ (Non-Return-to-Zero). Αυτή η τεχνική είναι ιδανική για μη αντισταθμισμένα οπτικά συστήματα, καθώς είναι πιο ανθεκτική στη διασπορά, ενώ είναι σχετικά απλή στην υλοποίησή της. Επιτρέπει τη μετάδοση  $R$  bits/sec χρησιμοποιώντας λιγότερο από  $R/2$  Hz εύρος ζώνης, όπου  $R$  το εύρος ζώνης του σήματος. Το σημαντικό με τη διαμόρφωση duobinary είναι ότι εισάγει ελεγχόμενες παρεμβολές μεταξύ συμβόλων (ISI – Intersymbol Interference). Αν και οι παρεμβολές συνήθως μειώνουν την ποιότητα ενός σήματος, εδώ αυτές οι παρεμβολές δημιουργούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να αντισταθμιστούν στον δέκτη, επιτρέποντας την ανάκτηση των αρχικών δεδομένων. Το διαδιδόμενο σήμα έχει την εξής μορφή:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k q(t - kT) \text{ όπου } d_k = 0,1$$

Όπου  $d_k$  είναι τα δυαδικά δεδομένα,  $q(t)$  είναι ο παλμός που μεταδίδεται και  $T = 1/R$  είναι η περίοδος του bit. Το σήμα που μεταδίδεται σε σχήμα duobinary είναι τριών επιπέδων, το οποίο προκύπτει από τη χρήση ενός FIR φίλτρου δύο taps με ίσα βάρη, και μετά από χαμηλοπερατό φίλτρο, για να προκύψει το τελικό αναλογικό σήμα. Ένα από τα χαρακτηριστικά

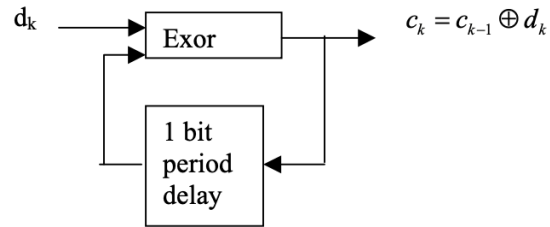
της διαμόρφωσης duobinary είναι ότι τα διαδοχικά δυαδικά bits αντιστοιχούν σε τιμές -1, 0 ή 1 στο πεδίο της ισχύος, δημιουργώντας ένα σήμα τριών επιπέδων, το οποίο περιορίζει την εμφάνιση ορισμένων αλληλουχιών, όπως για παράδειγμα τη διαδοχική εμφάνιση των +1 και -1, γεγονός που περιορίζει τα φαινόμενα διάδοσης λόγω διασποράς [19].

Ένα σήμα NRZ το οποίο έχει αναλυθεί στη βιβλιογραφία και απαιτεί R εύρος ζώνης για να μεταδώσει R bits/sec (αφού είναι διπλάσιο απλό το Nyquist R/2 Hz). Επομένως, η πιο απλή μορφή μετάδοσης παλμών με ISI είναι:

$$q(kT) = \begin{cases} 1, & k = 0,1 \\ 0, & otherwise \end{cases}$$

Φαίνεται ότι ο δέκτης δεν ανακτά το bit δεδομένων  $d_k$ , αλλά  $(d_{k-1} + d_k)$ . Ωστόσο, αυτό το σχήμα επιτρέπει παλμούς με μικρότερο εύρος ζώνης. Επιτρέποντας κάποια ISI, ο μεταδιδόμενος παλμός  $q(t)$  μπορεί να γίνει μακρύτερος στο πεδίο του χρόνου, και ως εκ τούτου το φάσμα του γίνεται στενότερο στο πεδίο της συχνότητας [20]. Με ένα στενότερο φάσμα, οι επιδράσεις παραμόρφωσης του καναλιού είναι επίσης λιγότερες. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους η duobinary διαμόρφωση είναι ανθεκτική στη διασπορά. Επιπλέον, ένα από τα χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης duobinary είναι ότι τα διαδοχικά δυαδικά bits αντιστοιχούν σε τιμές -1, 0 ή 1 στο πεδίο της ισχύος, δημιουργώντας ένα σήμα τριών επιπέδων, το οποίο περιορίζει την εμφάνιση ορισμένων αλληλουχιών, όπως για παράδειγμα τη διαδοχική εμφάνιση των +1 και -1, γεγονός που περιορίζει τα φαινόμενα διάδοσης λόγω διασποράς. Μια σημαντική ιδιότητα της ακολουθίας τριών τιμών στην έξοδο του φίλτρου FIR είναι ότι πρόκειται για ένα συσχετισμένο σήμα και επομένως δεν μπορούν να εμφανιστούν όλες οι πιθανές ακολουθίες των τριών τιμών. Για παράδειγμα, η ακολουθία εξόδου του φίλτρου FIR δεν μπορεί να περιέχει ένα 1 ακολουθούμενο από ένα -1 ή ένα -1 ακολουθούμενο από ένα 1. Ένα 1 και ένα -1 θα έχουν πάντα ένα 0 ανάμεσά τους. Ομοίως, οι συνδυασμοί {1 0 1} και {-1 0 -1} επίσης δεν μπορούν ποτέ να εμφανιστούν στην έξοδο του φίλτρου FIR- μόνο ένα {-1 0 1} ή ένα {1 0 -1} μπορεί να εμφανιστεί. Όπως θα εξηγηθεί αργότερα, αυτή η ακολουθία είναι ένας άλλος λόγος για τον οποίο η δυαδική διαμόρφωση είναι ανθεκτική στη διασπορά.

Για την εξάλειψη των σφαλμάτων που προκαλεί η παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων, η διαμόρφωση duobinary χρησιμοποιεί τεχνικές differential encoding και που θα χρησιμοποιήσει και η παρούσα διπλωματική. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με XOR λογικές πύλες (ενδεικτικό παράδειγμα στην Εικόνα 3-5 και ο αντίστοιχος κώδικας Εικόνα 3-6), αλλά και με άλλες μεθόδους όπως τη χρήση ενός divide-by-2 counter. Το κύκλωμα differential encoder διασφαλίζει ότι οποιοδήποτε σφάλμα κατά την αποκωδικοποίηση δεν διαδίδεται σε μελλοντικά δεδομένα, προστατεύοντας έτσι το σύστημα από καταστροφικά σφάλματα.



Εικόνα 3-5: Differential encoder για μία πόλη XOR.

Στην Εικόνα 3-6 φαίνεται ένα απόσπασμα από τον κώδικα σε Matlab που σχεδιάστηκε με encoder XOR για την duobinary τεχνική διαμόρφωσης.

```

for i= 1 :length(nrz_sig)
    if i == 1
        dk(i) = 1;
        dk_prev_1(i+1) = dk(i);
        ak(i) = dk(i) ;
    else
        dk(i) = nrz_sig(bk(i),dk_prev_1(i));
        dk_prev_1(i+1) = dk(i);
        ak(i) = dk(i);
        ak_prev_1(i) = ak(i-1);
        ck(i) = ak(i) + ak_prev_1(i);
    end
end

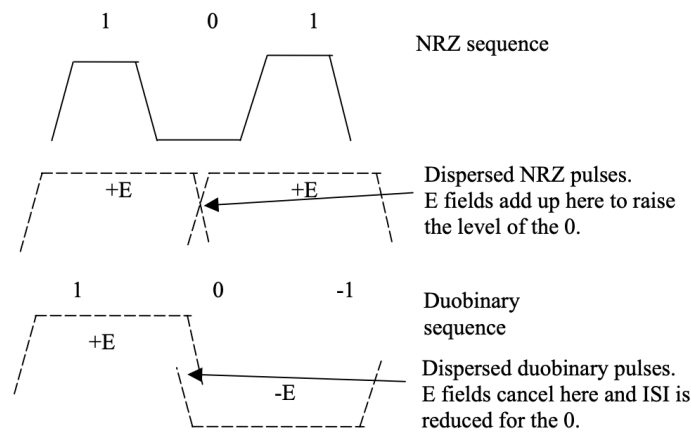
```

Εικόνα 3-6: Αποσπασματικός κώδικας Matlab για την υλοποίηση με encoder XOR και 1-bit delay.

Στα οπτικά συστήματα, η διαμόρφωση duobinary μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός διαμορφωτή Mach-Zehnder, ο οποίος τοποθετείται σε σημείο μηδενικής ισχύος (null point),

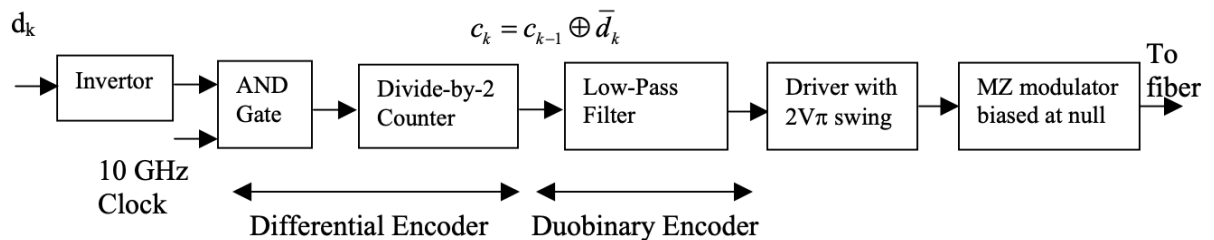


ώστε να παράγει τριών επιπέδων σήματα. Το σήμα +1 και -1 παράγονται από τα αντίστοιχα ηλεκτρικά πεδία +E και -E, ενώ το 0 αντιστοιχεί σε μηδενική οπτική ισχύ. Η τριών επιπέδων φύση του duobinary σήματος μειώνει την ευαισθησία στις διασπορές που προκύπτουν κατά τη διάδοση του φωτός μέσω της οπτικής ίνας, καθώς οι παλμοί που διαδίδονται ακυρώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνονται τα φαινόμενα ISI. Ο συνδυασμός του κωδικοποιητή συμβάλλει στην περαιτέρω μείωση των επιπτώσεων της διασποράς στην ίνα. Καθώς οι παλμοί ταξιδεύουν κατά μήκος της ίνας, διασπείρονται χρονικά λόγω της διασποράς. Σε ένα σχήμα NRZ, μια ακολουθία δεδομένων {1 0 1} απεικονίζεται στο οπτικό πεδίο ως {+E 0 +E}.



Εικόνα 3-7: Επίδραση της διασποράς στο σχήμα NRZ σε σύγκριση με την duobinary διαμόρφωση.

Στην κωδικοποιημένη δυαδική ακολουθία, δεν μπορεί να εμφανιστεί μια ακολουθία {1 0 1}, αλλά εμφανίζεται μια {1 0 -1}, η οποία απεικονίζεται σε {+E 0 -E} στο οπτικό πεδίο. Η επίδραση της διασποράς στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζεται στο Εικόνα 3-7, το οποίο απεικονίζει γιατί η προκύπτουσα διασπορά είναι μικρότερη στην περίπτωση της δυαδικής διαμόρφωσης.



Εικόνα 3-8: Ολοκληρωμένος duobinary πομπός.

Πίνακας 3-1: Παράδειγμα πίνακα δεδομένων βασισμένο στην duobinary μετάδοση.

$d_k$	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
$\overline{d_k}$	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
<i>Diff. encoder</i>	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
<i>Bit to voltage mapper</i>	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
<i>Duobinary encoder</i>	0	1	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	-1	0	1	0	-1	0
<i>Electric field</i>	0	+E	0	-E	-E	-E	-E	0	0	0	0	-E	0	+E	0	-E	0
<i>Optical power</i>	0	$E^2$	0	$E^2$	$E^2$	$E^2$	$E^2$	0	0	0	0	$E^2$	0	$E^2$	0	$E^2$	0
<i>Receive bits</i>	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0

Παραπάνω παρουσιάζεται ένας ολοκληρωμένος duobinary πομπός στην Εικόνα 3-8, καθώς στον αντίστοιχο Πίνακα 3-1 περιγράφεται και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η κωδικοποίηση.

### 3.3 Υλοποίηση του συστήματος σε προσομοιωτικό περιβάλλον VPI Transmission Maker

Βασισμένοι στην προηγούμενη ανάλυση και μελέτη για την κατανόηση της SSB καθώς και duobinary τεχνικής μετάδοσης, σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι προσομοιώσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής.

Ως προσομοιωτικό περιβάλλον εκτός από το Matlab το οποίο παρατίθεται στο Παράρτημα, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον VPI photonics Design Suite 11.4, το οποίο βοηθά στο σχεδιασμό οπτικών πειραματικών διατάξεων. Προκειμένου να συγκριθούν και να μελετηθούν ξεχωριστά τα οφέλη των παραπάνω τρόπων μετάδοσης, στην αρχή μελετήθηκε ένα απλό κλασικό σχήμα NRZ ως βάση σύγκρισης. Ειδικότερα, για λόγους πολυπλοκότητας της διπλωματικής δεν αναλύθηκε η επίδοση των συστημάτων σε PAM-M σχήματα, όμως θα μπορούσε κανείς εύκολα να μελετήσει την παρούσα αρχιτεκτονική και σε ανώτερα σχήματα εκτός του NRZ.

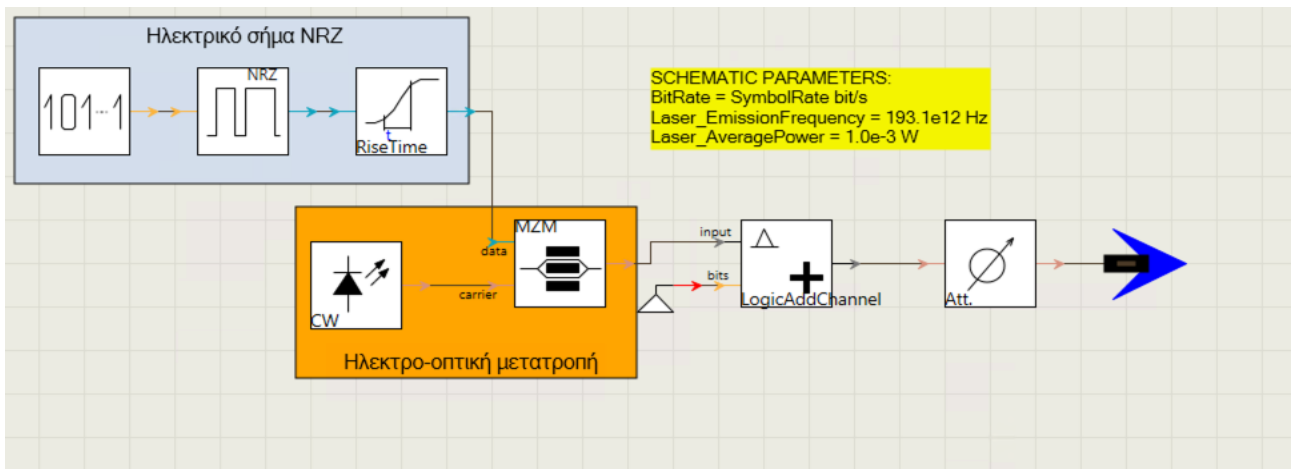
Ουσιαστικά, προσομοιώθηκαν η κλασική NRZ μετάδοση, η SSB-NRZ και duobinary τεχνική διαμόρφωσης μέσω των οποίων έγινε δυνατό να μελετηθεί η συμπεριφορά των διαφορετικών τεχνικών μετάδοσης ή πομπών.

### 3.3.1 Πειραματικές διατάξεις

Δεδομένου ότι η συνολική πειραματική διάταξη είναι αρκετά μεγάλη, οι πειραματικές διατάξεις χωρίστηκαν με βάση τους οπτικούς πομπούς που μελετήθηκαν, το μέσο που ήταν η ίνα standard single mode fiber (S-SMF).

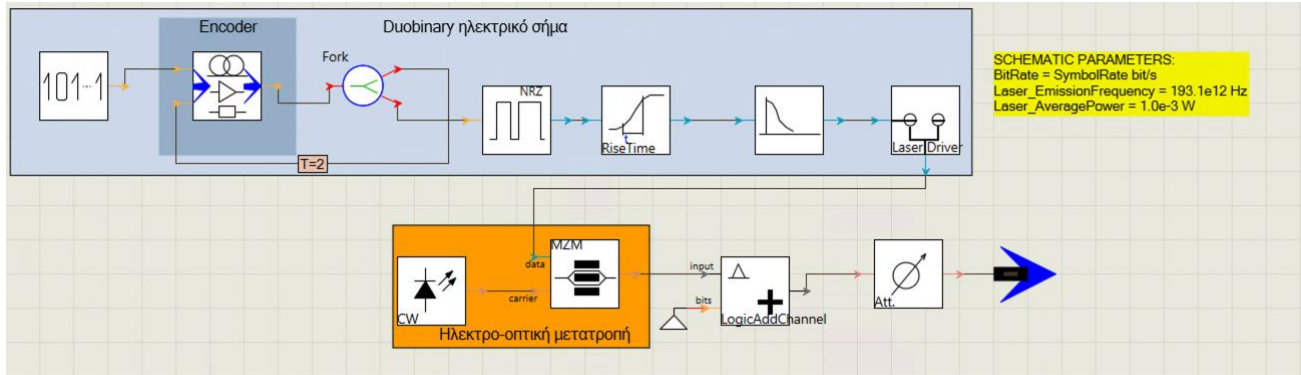
#### Οπτικοί πομποί

- **Κλασικό σχήμα διαμόρφωσης NRZ:**



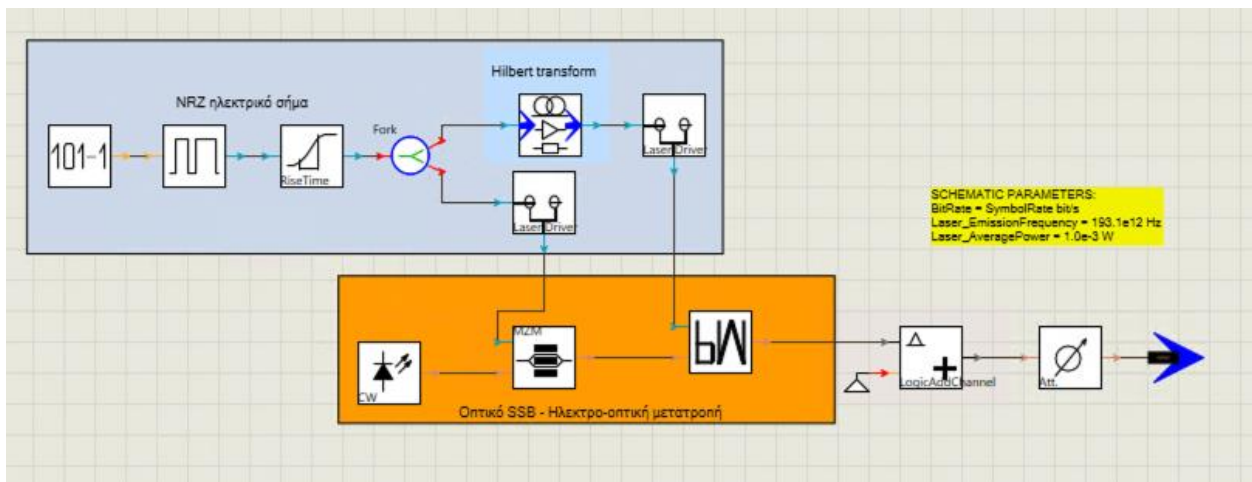
Εικόνα 3-9: NRZ σχήμα μετάδοσης με MZM διαμορφωτή.

○ **Duobinary σχήμα διαμόρφωσης**



Εικόνα 3-10: Duobinary σχήμα μετάδοσης με διαμορφωτή MZM..

○ **SSB-NRZ σχήμα μετάδοσης**

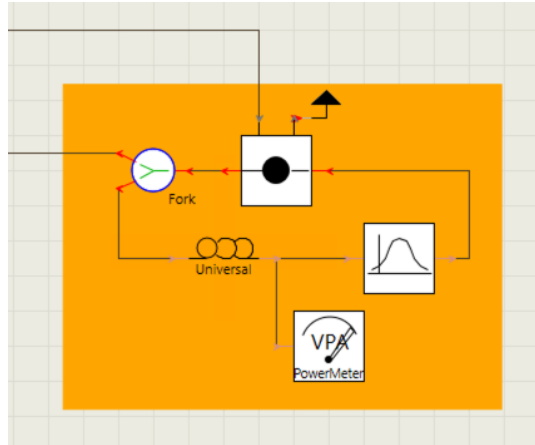


Εικόνα 3-11: SSB-NRZ με  $n$ -taps Hilbert φίλτρο μετασχηματισμού..

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μπλε πλαίσιο υποδηλώνει την παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων και των τριών εναλλακτικών λύσεων. Μία γεννήτρια παλμών παράγει δύο στάθμες για το κλασικό σχήμα μετάδοσης NRZ (Εικόνα 3-9) και το SSB-NRZ (Εικόνα 3-11), ενώ όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα προκύπτουν τρεις στάθμες κατά την duobinary διαμόρφωση. Στην περίπτωση του duobinary ένας encoder με καθυστέρηση 2 bits βοηθά έτσι ώστε το σήμα να μπορεί να μεταδοθεί χωρίς να είναι επιρρεπής σε λάθη. Τέλος, για την παραγωγή SSB ένα φίλτρο Hilbert εξετάστηκε στα πλαίσια του οποίου χρησιμοποιήθηκε με ένα FIR φίλτρο 4-7 taps. Κατά την ηλεκτρο-οπτική μετατροπή ο MZM και ο PM χρησιμοποιήθηκαν στα αντίστοιχα σχήματα κάτω από ιδανικές συνθήκες. Το οπτικό φέρον ορίστηκε στα 1550nm για την C-Band.

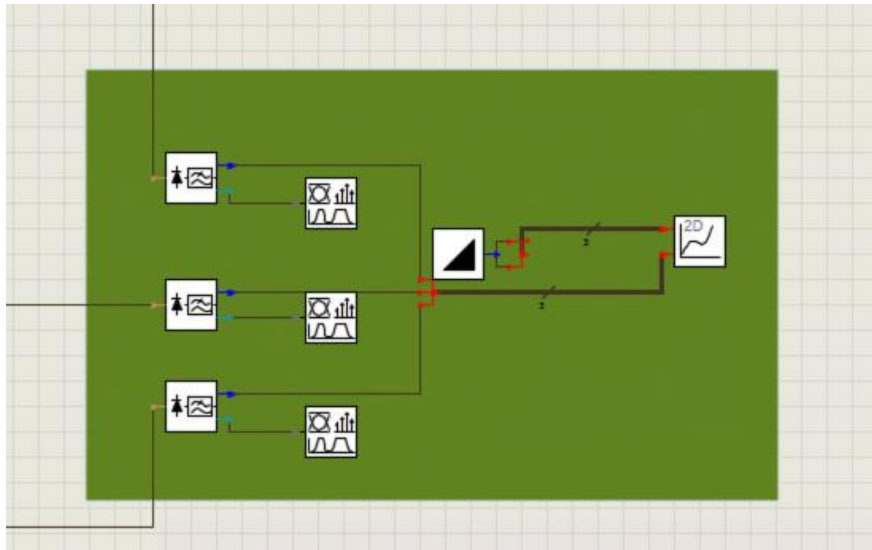
## Μέσο μετάδοσης

Ως μέσο μετάδοσης (Εικόνα 3-12) χρησιμοποιήθηκε η κλασική ίνα S-SMF όπου ανάλογα με το μήκος κύματος αλλάζουν και κάποιες χαρακτηριστικές παράμετροι. Συγκεκριμένα, στα 1550nm ορίστηκε η χρωματική διασπορά  $16e - 6 \frac{s}{m^2}$  και εξασθένιση ως  $0.2dB/km$ .



Εικόνα 3-12: Σχηματική διάταξη που εμπεριέχει την ίνα SMF.

## Οπτικός δέκτης



Εικόνα 3-13: Οπτικός δέκτης για κάθε σχήμα μετάδοσης καθώς επίσης ο τρόπος δημιουργίας του διαγράμματος BER με βάση την αλλαγή μήκους της ίνας.

Συγκεκριμένα για το οπτικό δέκτη (Εικόνα 3-13) που παρέχεται από την πλατφόρμα προσομοίωσης μπορεί να εκτιμήσει το BER ή αλλιώς τον ρυθμό σφάλματος bit και τον συντελεστή ποιότητας για συστήματα οπτικής μετάδοσης με διαμόρφωση έντασης και άμεση ανίχνευση. Υπολογίζει την αύξηση του επιπέδου σήματος (σε dB) που απαιτείται για να επιτευχθεί ένας καθορισμένος ρυθμός σφάλματος bit. Ακόμα ενσωματώνει ένα πλήρες μοντέλο δέκτη με έναν πολωτή, έναν PIN, ένα αυθαίρετο χαμηλοπερατό φίλτρο μετά την ανίχνευση και ανάκτηση του συγχρονισμού. Η παρεμβολή μεταξύ συμβόλων (ISI) έχει ληφθεί υπόψη.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι κανένας αντισταθμιστής (equalizer) δεν χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να γίνει πιο απλοϊκός και στοχευμένος ο τρόπος μελέτης.

## 4 Μεθοδολογία και αποτελέσματα

Η μεθοδολογία αρχικά ξεκίνησε με την ανάπτυξη των τριών σχημάτων διαμόρφωσης (NRZ, duobinary, SSB-NRZ) σε περιβάλλον Matlab, όπως παρουσιάζεται στο παράρτημα στο τέλος της παρούσας διπλωματικής. Το παράρτημα περιέχει τον πλήρη κώδικα Matlab, ο οποίος αναπτύχθηκε για την παραγωγή των σημάτων και την προσομοίωση των διαμορφώσεων, καθιστώντας τη μετάβαση σε προσομοιωτικό περιβάλλον πιο εύκολη και ευέλικτη.

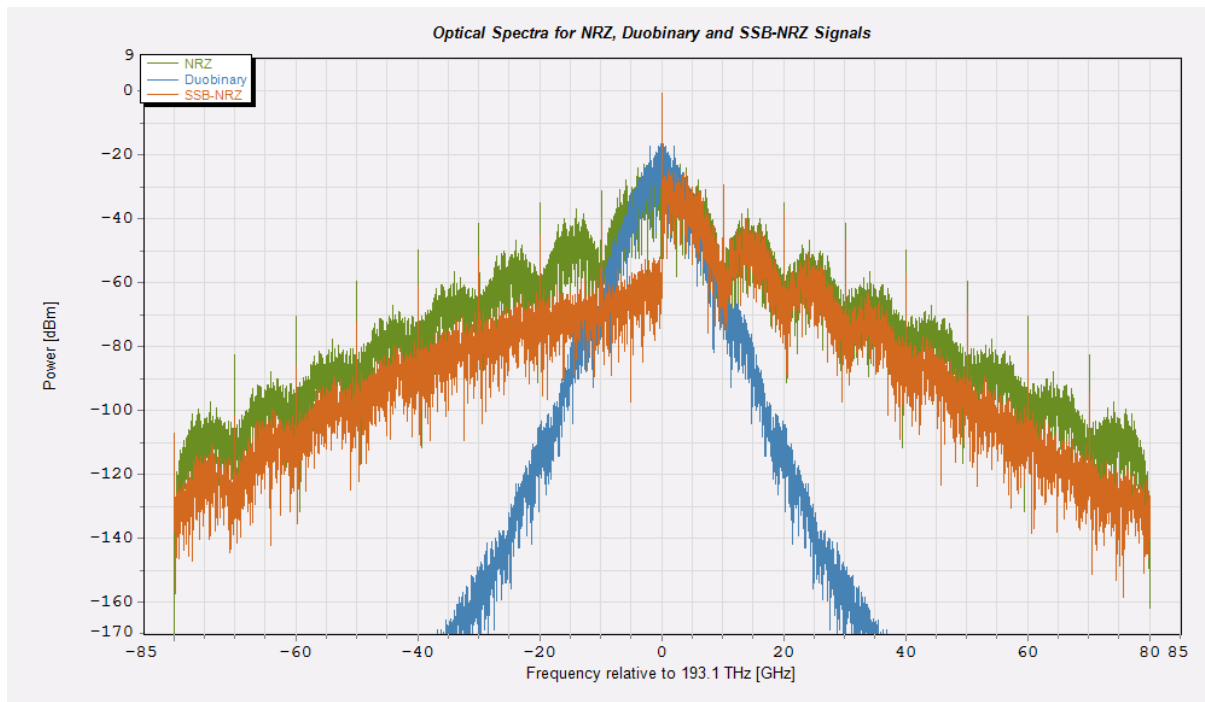
Στη διαδικασία προσομοίωσης παρουσιάζονται τις τρεις οπτικές διατάξεις υπό διαφορετικές συνθήκες, εξετάζοντας παραμέτρους όπως ο ρυθμός μετάδοσης του σήματος, το μήκος της οπτικής ίνας, καθώς και το πεδίο εφαρμογής στην C-Band. Επιπλέον, ενσωματώθηκαν διαφορετικές τιμές σηματοθορυβικού λόγου (SNR), ώστε να μελετηθεί η ανεκτικότητα του κάθε σχήματος διαμόρφωσης στις συνθήκες μετάδοσης. Οι τιμές BER και η φασματική απόδοση μελετήθηκαν για διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης (Baud Rate- Bd Rate) και μήκη ίνας, προσφέροντας μια πλήρη εικόνα της απόδοσης των σχημάτων διαμόρφωσης.

### 4.1 Διαφορετική φασματική απόδοση του κάθε εξεταζόμενου σχήματος

Στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζεται το φάσμα των σχημάτων διαμόρφωσης (NRZ, Duobinary και SSB-NRZ). Ο κάθε τύπος διαμόρφωσης έχει διαφορετική εξάπλωση στο φάσμα, και η σύγκριση των φασμάτων αυτών παρέχει πληροφορίες για την αποδοτικότητα της χρήσης εύρους ζώνης.

- **NRZ:** Η πράσινη καμπύλη δείχνει το φάσμα του σχήματος NRZ, το οποίο εμφανίζει μεγαλύτερη εξάπλωση στο φάσμα σε σχέση με τα άλλα σχήματα.
- **Duobinary σχήμα:** Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στη διαμόρφωση duobinary, η οποία έχει την πιο περιορισμένη φασματική εξάπλωση, κάτι που δείχνει την υψηλή φασματική της απόδοση.
- **SSB-NRZ:** Η πορτοκαλί καμπύλη αντιστοιχεί στη διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης (SSB-NRZ), η οποία φαίνεται να έχει μικρότερη φασματική εξάπλωση σε σχέση με το NRZ.

Η εξάπλωση του φάσματος για κάθε σχήμα επηρεάζει την απόδοση του καναλιού μετάδοσης, με την duobinary και SSB-NRZ να είναι πιο αποδοτική στη χρήση φάσματος, ενώ η NRZ καταλαμβάνει μεγαλύτερο φασματικό εύρος, οδηγώντας σε μικρότερη αποδοτικότητα



Εικόνα 4-1: Διαφορετική εξάπλωση στο φάσμα του NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σχήματος διαμόρφωσης.

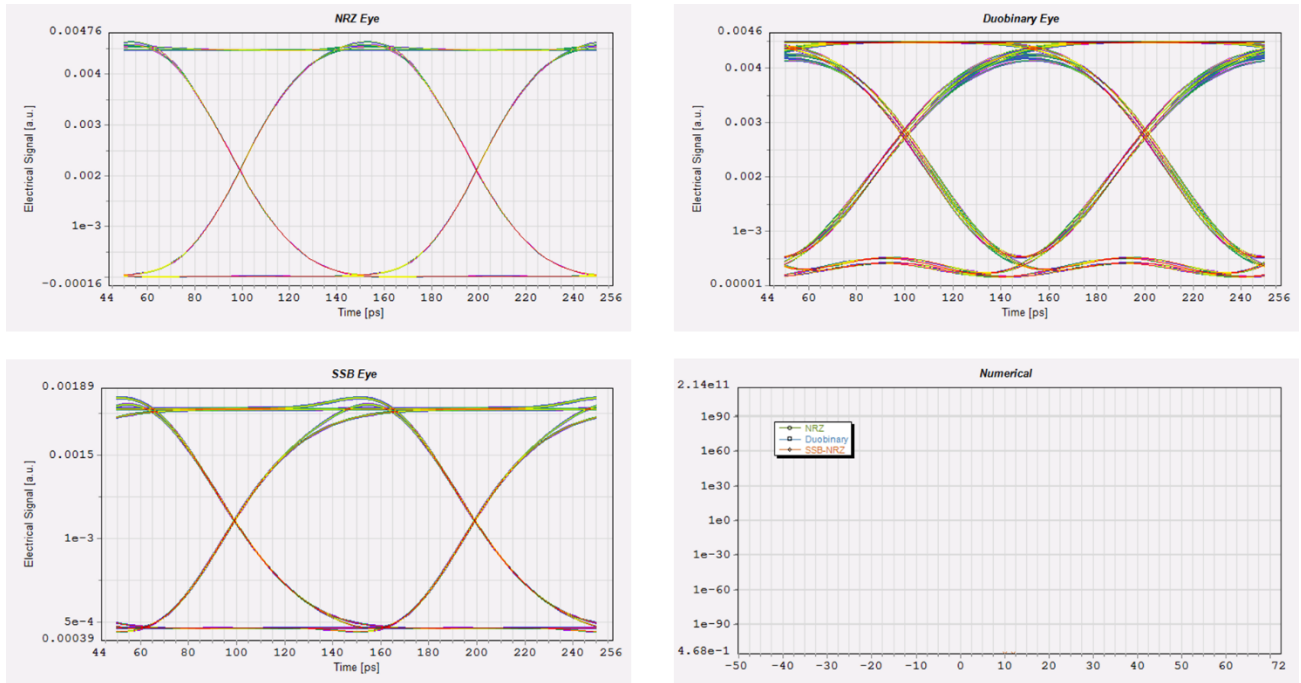
## 4.2 Επιρροή της χρωματικής διασποράς στα εξεταζόμενα σενάρια

Στην συνέχεια θα εξεταστεί η επίδοση των σχημάτων μετάδοσης αλλάζοντας το ρυθμό μετάδοσης του σχήματος διατηρώντας σταθερό το SNR και το μήκος της ίνας στα 20 km και 40 km, αφού σε αυτές τις αποστάσεις πλέον έχει στραφεί το επιστημονικό ενδιαφέρον.

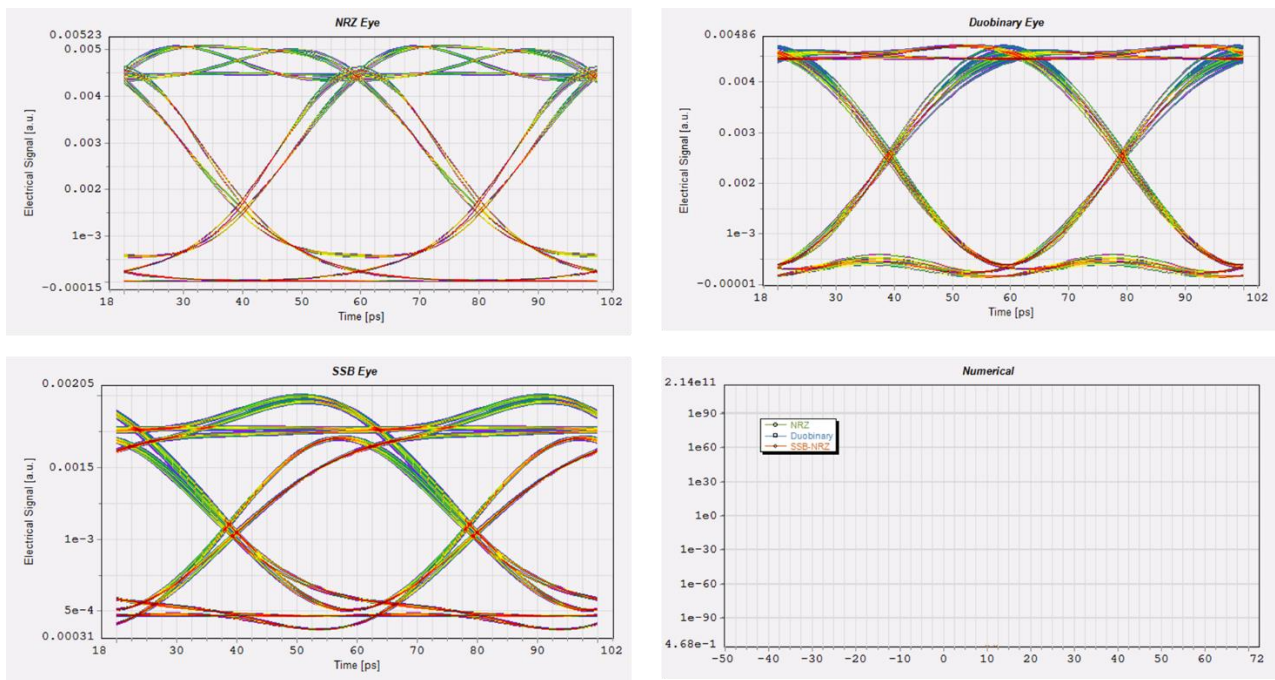
Θεωρώντας ότι κατά μέσο όρο σε αυτές τις προσομοιώσεις η ισχύς του λέιζερ είναι 0.01W και η οπτική ισχύς αμέσως μετά τους MZM υπολογίστηκε για το απλό NRZ 7 dBm, για το duobinary σχήμα 7.45dBm και για το SSB-NRZ σχήμα 3 dBm. Ξεκινώντας την ανάλυση παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα οφθαλμού στα 20km και 40km ενδεικτικά για από 10GBaud μέχρι 50GBaud.

Για τα 20km μήκους ίνας προέκυψαν τα εξής διαγράμματα οφθαλμού:

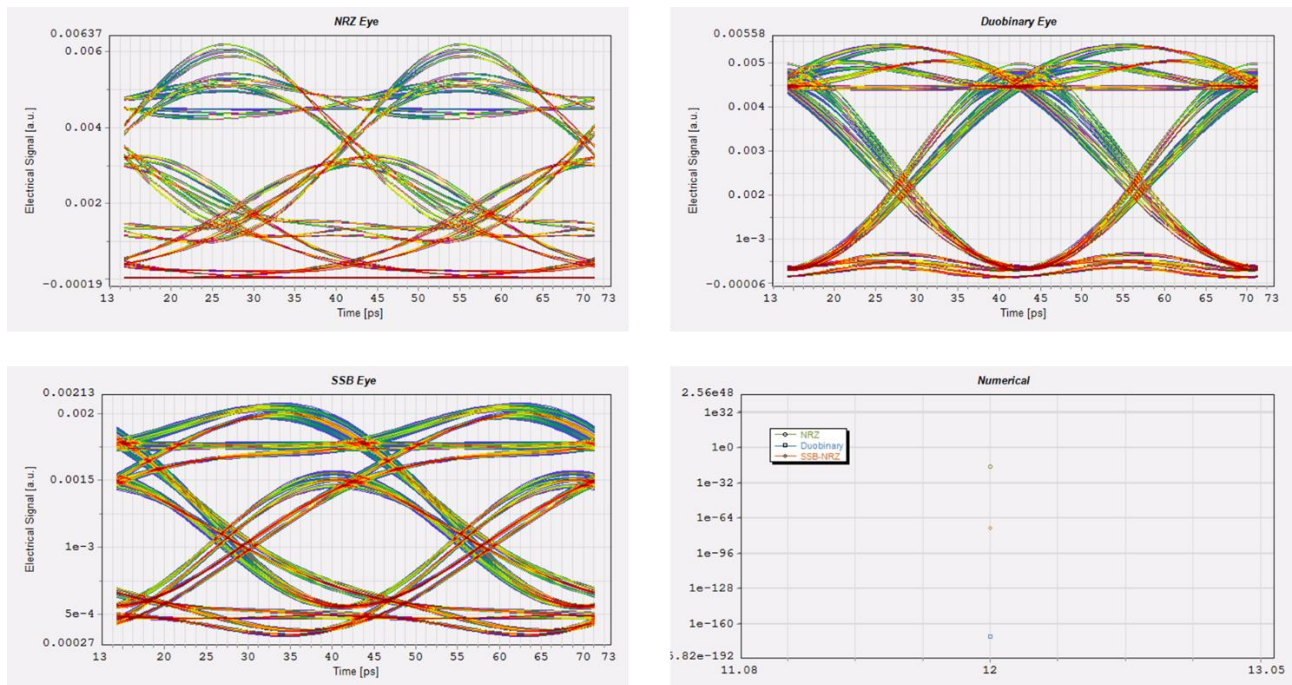




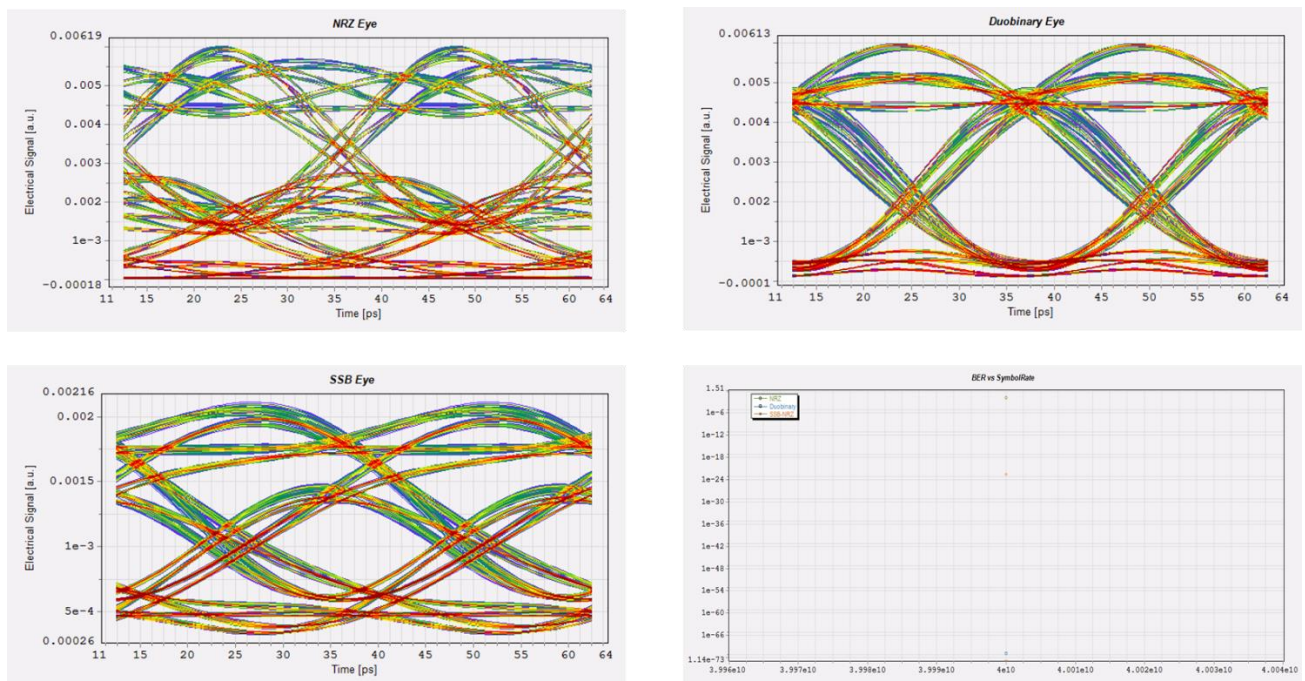
Εικόνα 4-2: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 10Gb/s NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοσης σε 20km ίνα μετάδοσης.



Εικόνα 4-3: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 25Gb/s NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοσης σε 20km ίνα μετάδοσης.

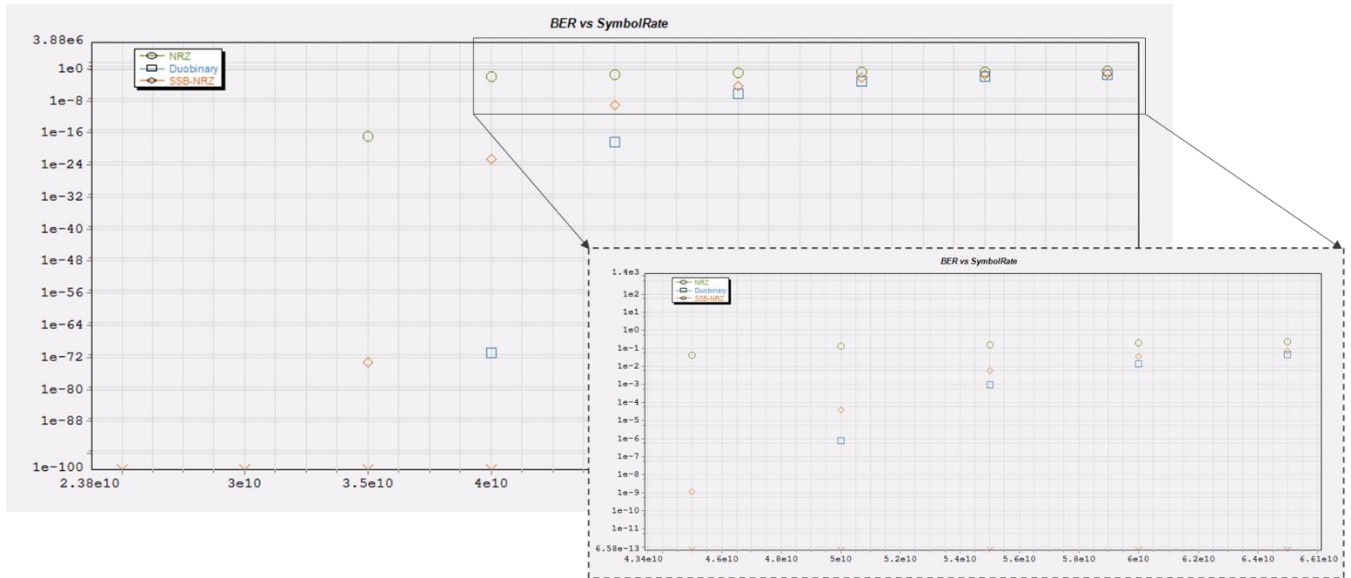


Εικόνα 4-4: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 35Gb/s NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοσης σε 20km ίνα μετάδοσης.



Εικόνα 4-5: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 40Gb/s NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοσης σε 20km ίνα μετάδοσης.

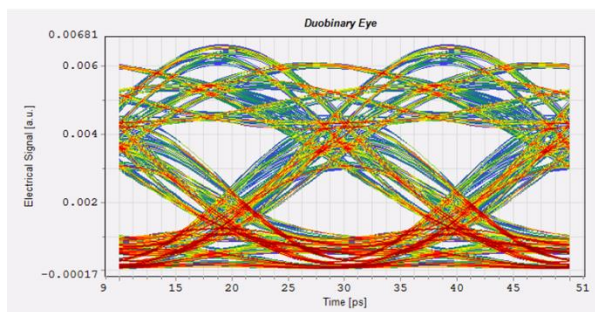
Παρατηρείται ότι τα διαγράμματα οφθαλμού -Εικόνα 4-2-Εικόνα 4-5- για τα σχήματα SSB και duobinary διαμόρφωσης είναι ανοιχτά ώστε να επιβεβαιώνουν μετάδοση χωρίς λάθη τόσο για 10GBaud,25GBaud και 40GBaud. Παρόλα αυτά η κλασική μετάδοση NRZ αποτυγχάνει να φτάσει τα 20km με ρυθμό μετάδοσης 40GBaud. Στην Εικόνα 4-6 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα που απεικονίζει τον ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να λάβει ο δέκτης με ένα ανεκτό όριο  $BER < 10^{-3}$ .



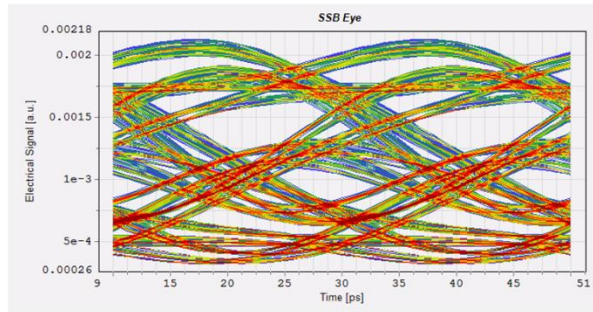
Εικόνα 4-6: Διάγραμμα BER vs Baud Rate για NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σχήματος διαμόρφωσης για μετάδοση 20km ίνας. Επίσης μεγεθυμένο το ίδιο διάγραμμα (δεξιά) αναπαριστώντας το ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε σχήμα διαμόρφωσης στα 20km ίνας.

Ουσιαστικά το NRZ σχήμα δεν είναι τόσο ανθεκτικό στα σφάλματα σε σύγκριση με τα άλλα σχήματα διαμόρφωσης, αφού η τιμή  $BER 10^{-2}$  μετά τα 40GBaud ξεπερνάει το κατώφλι για μετάδοση χωρίς λάθη. Αντίθετα το SSB-NRZ παρέχει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με το NRZ, ειδικά σε υψηλούς ρυθμούς, και έχει χαμηλότερα BER σε όλο το εύρος των ρυθμών όπως φαίνεται Εικόνα 4-6. Μετά τα 52GBd αυτό το σχήμα απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία για αποτελεσματική μετάδοση. Τέλος, το duobinary σχήμα φαίνεται να είναι το πιο αποδοτικό από τα τρία σχήματα, με χαμηλά BER σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας αφού φτάνει στο επιτρεπτό όριο BER στα 56GBaud. Για την περαιτέρω εξερεύνηση αυτού του ρυθμού μετάδοσης απεικονίζεται στην Εικόνα 4-7 ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που είναι εφικτό να υποστηρίξει τόσο το duobinary όσο και το SSB-NRZ σχήμα διαμόρφωσης για 20km απόσταση ίνας. Για λόγους πληρότητας εκτός από τον ποιοτικό έλεγχο του σήματος μέσω των διαγραμμάτων αναφέρονται και οι αντίστοιχες τιμές BER.

### 50 GBd σε 20km απόσταση ίνας

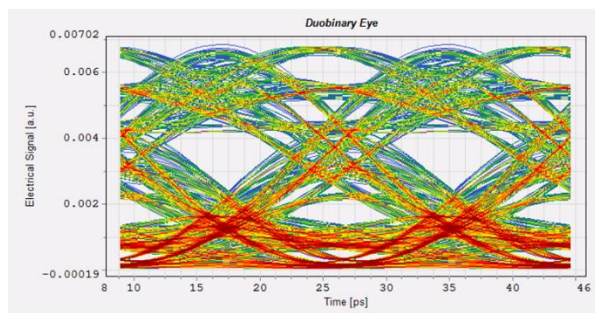


BER = 7,55E-7

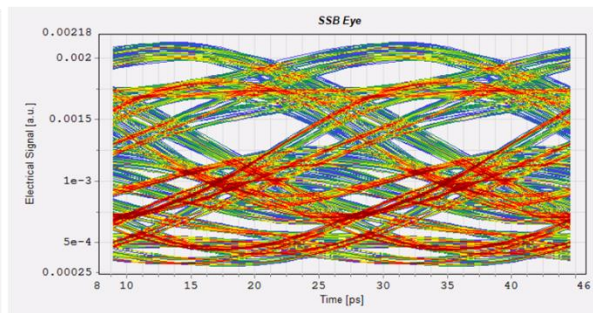


BER = 3,9E-5

### 56 GBd σε 20km απόσταση ίνας



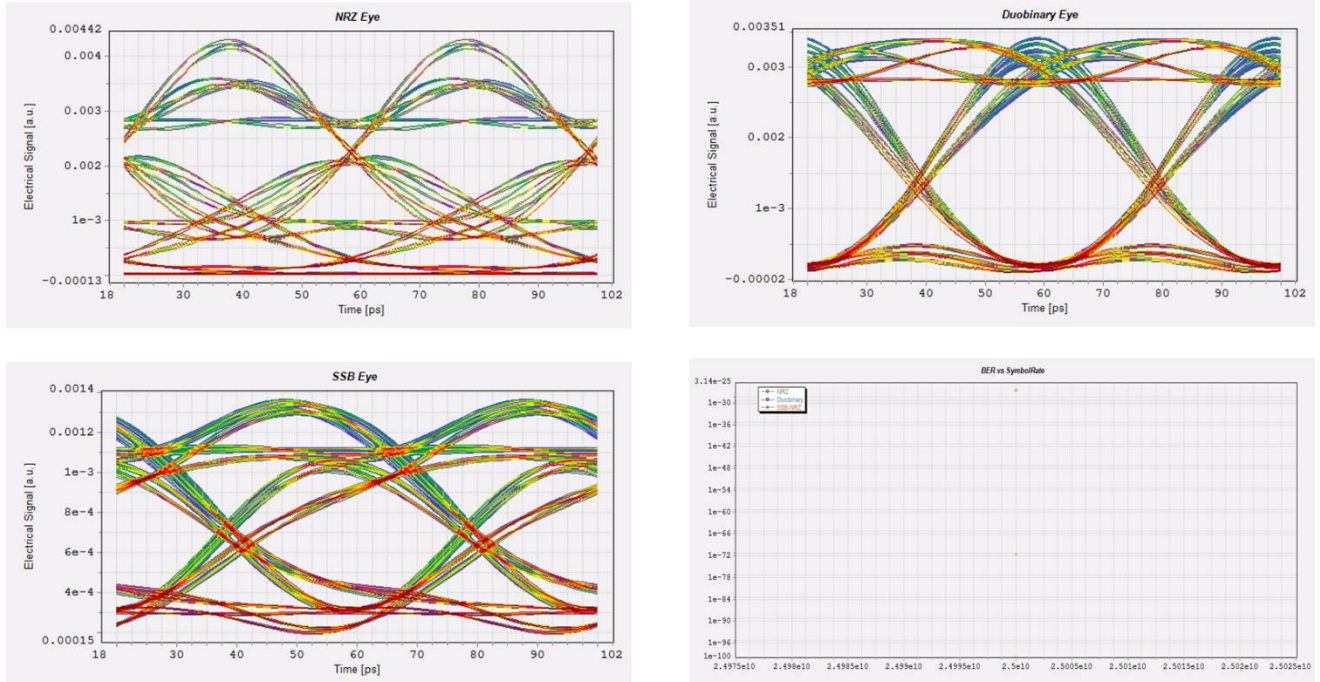
BER = 2E-3



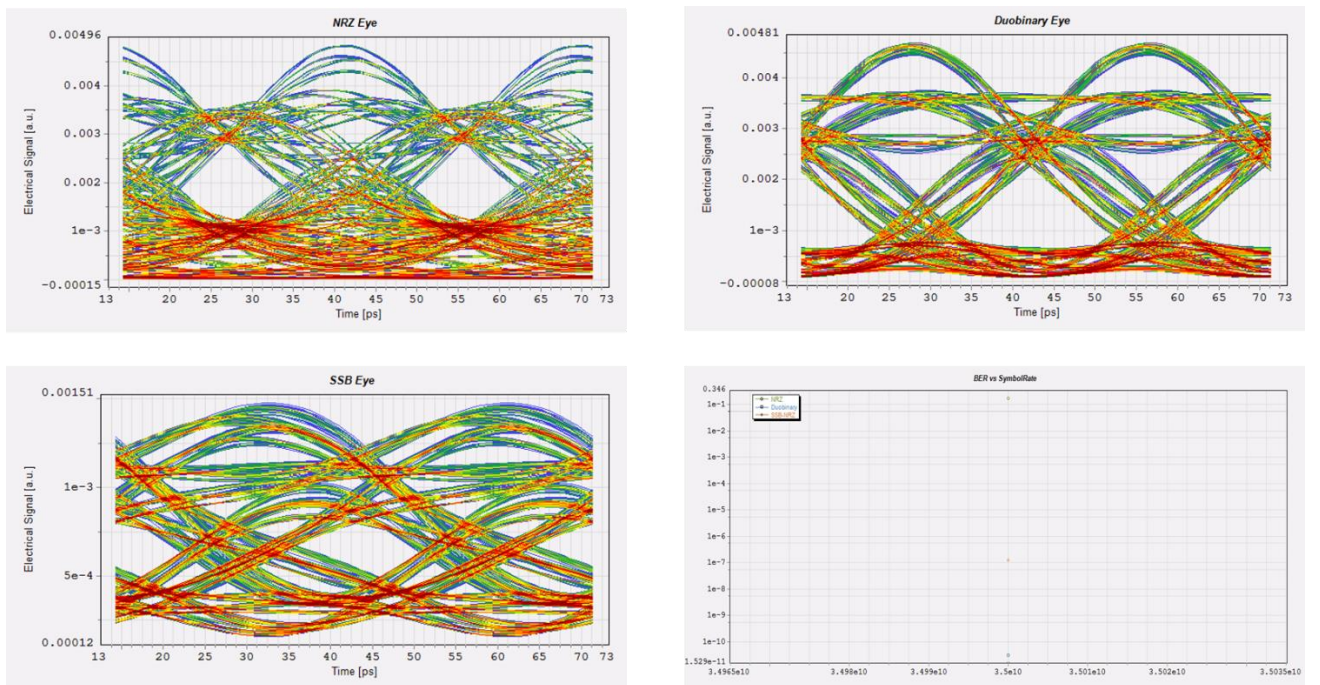
BER = 9E-3

Εικόνα 4-7: Διαγράμματα οφθαλμού και τιμές BER για την duobinary και SSB διαμόρφωση σε απόσταση 20km για 50GBd και 56GBd ρυθμό μετάδοσης.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για 40km, ξεκινώντας το τα 25G,35G,40G και 50G. Παρατηρείται ότι η μετάδοση για το 25GBaud είναι αρκετά αποδοτική χωρίς να χρειάζεται κανένα επιπλέον εργαλείο DSP για τη βελτίωση της ποιότητας του σήματος. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις Εικόνα 4-8 και Εικόνα 4-9, η ποιότητα του 35GBaud σήματος χειροτερεύει με πιο γρήγορους ρυθμούς αφού το κλασικό σήμα μετάδοσης NRZ υπολογίστηκε με μη αποδεκτό BER. Το SSB-NRZ σχήμα διαμόρφωση παραμένει παραπάνω από αποτελεσματικό αφού ο ρυθμός σφάλματος είναι της τάξης  $10^{-7}$ . Το πιο αποτελεσματικό σήμα διαμόρφωσης δεν είναι άλλο από την τεχνική duobinary αφού το BER είναι αντίστοιχα της τάξης  $10^{-11}$ .



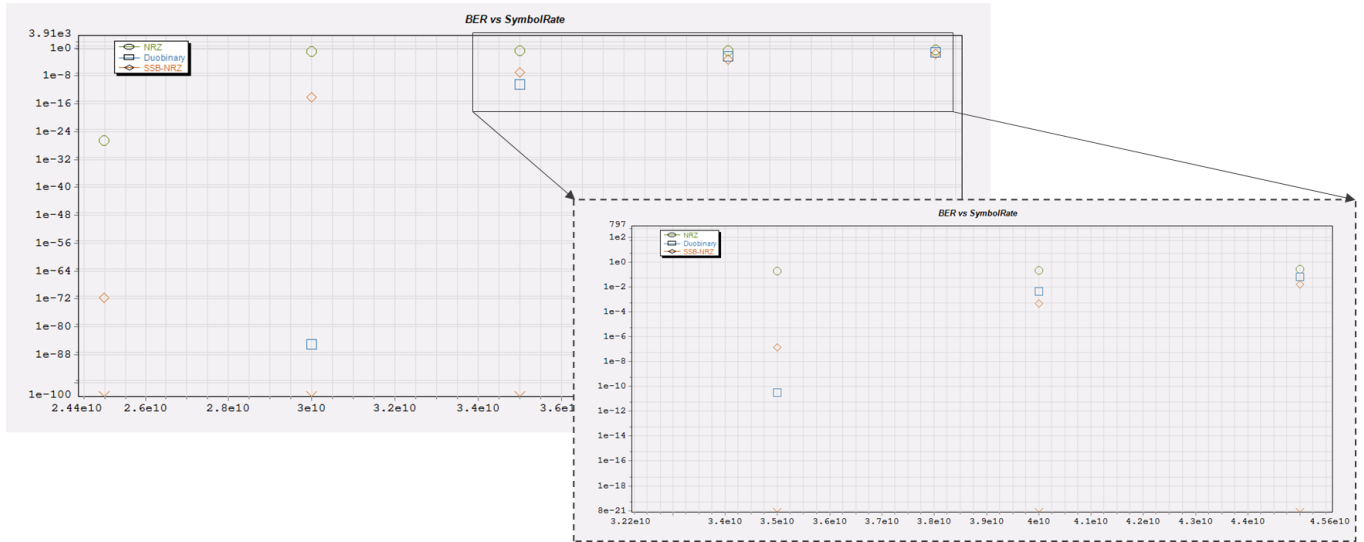
Εικόνα 4-8: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 25Gb/s NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοσης σε 40km ίνα μετάδοσης.



Εικόνα 4-9: Eye diagrams και το διάγραμμα BER (δεξιά κάτω) για 35Gb/s NRZ, duobinary και SSB-NRZ σχήματα μετάδοσης σε 40km ίνα μετάδοσης.

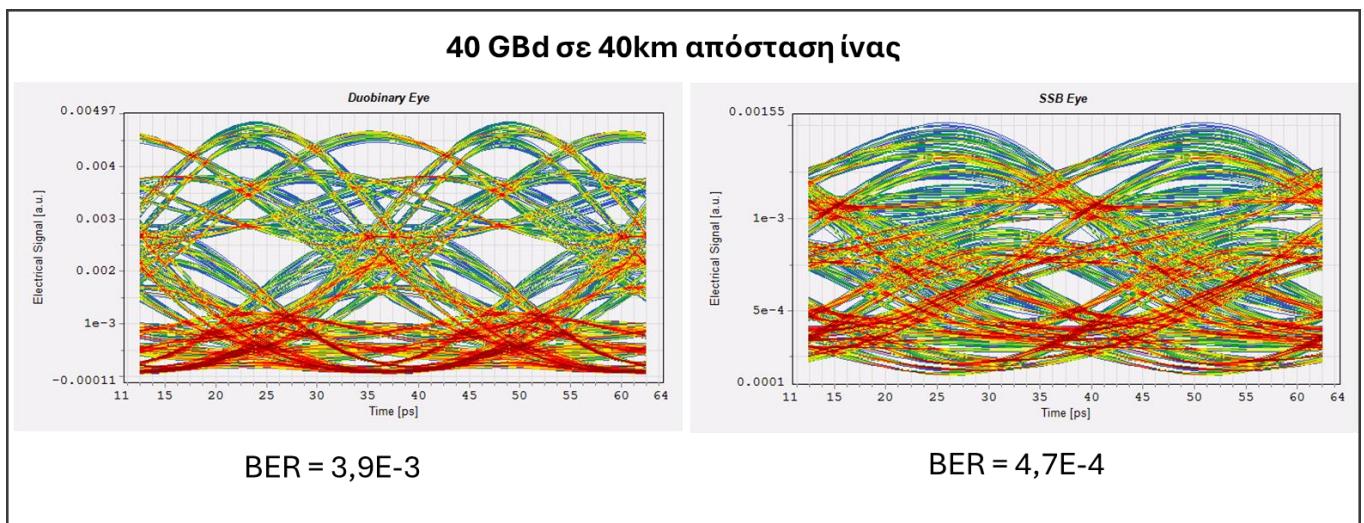
Όπως και στην προηγούμενη ανάλυση παρουσιάζεται το διάγραμμα BER σε σύγκριση με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (Εικόνα 4-10) που μπορεί να υποστηριχθεί χωρίς τεχνικές

αντιστάθμισης στην εξεταζόμενη 40km απόσταση ίνας. Συγκεκριμένα, σε αυτήν την περίπτωση το σχήμα μετάδοσης SSB-NRZ καθώς και το duobinary σχήμα είναι ικανά να υποστηρίξουν μετάδοση σε 40km για ρυθμούς πάνω από 40GBaud με BER αρκετά κοντά στο επιτρεπτό όριο μετάδοσης.



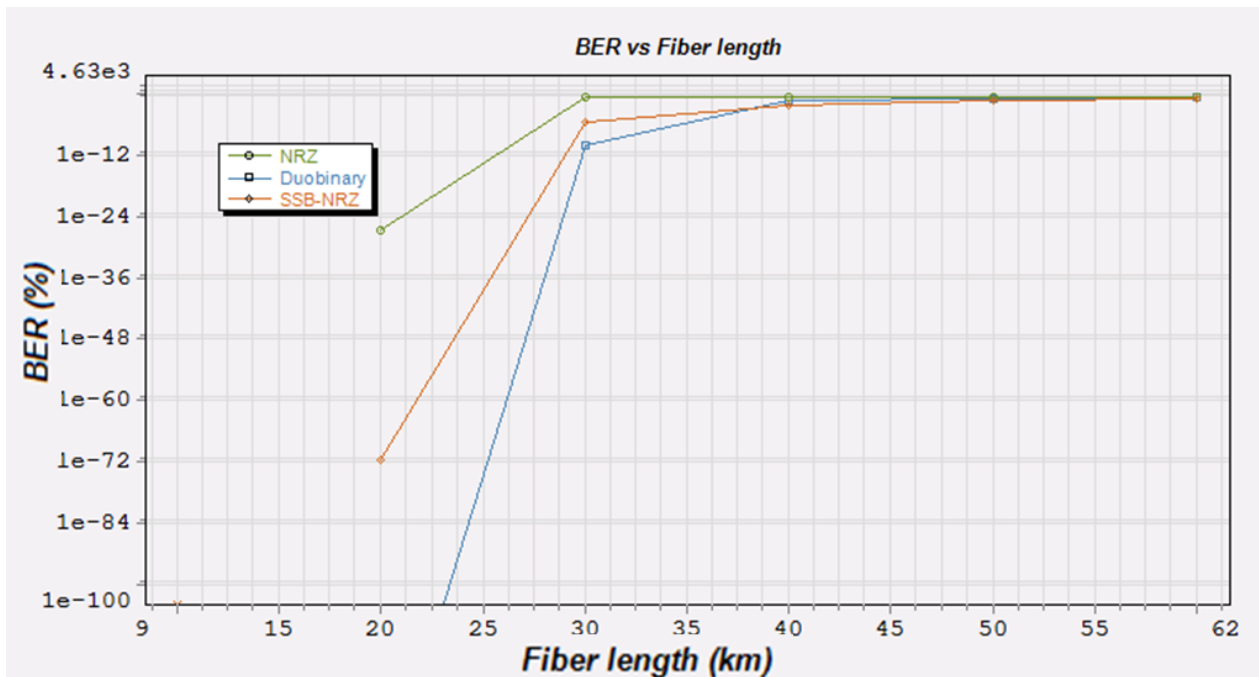
Εικόνα 4-10: Διάγραμμα BER vs Baud Rate για NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σχήματος διαμόρφωσης για μετάδοση 40km ίνας. Επίσης μεγεθυμένο το ίδιο διάγραμμα (δεξιά) αναπαριστώντας το ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να εξηγηθεί κάθε σχήμα διαμόρφωσης στα 40km ίνας.

Για λόγους πληρότητας απεικονίζονται τα αντίστοιχα eye diagrams για σήματα με ρυθμό μετάδοσης 40GBaud (Εικόνα 4-11).

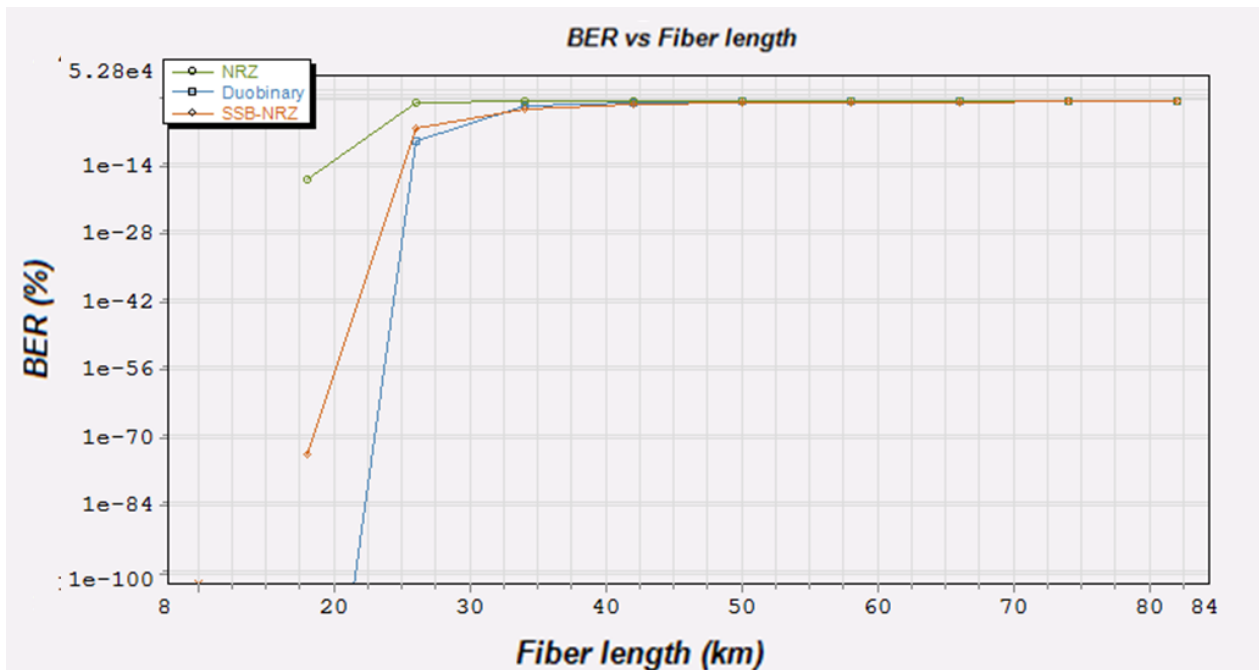


Εικόνα 4-11: Διαγράμματα οφθαλμού για μετάδοση 40GBd duobinary και SSB-NRZ σήματος σε 40km ίνας και οι αντίστοιχες τιμές BER.

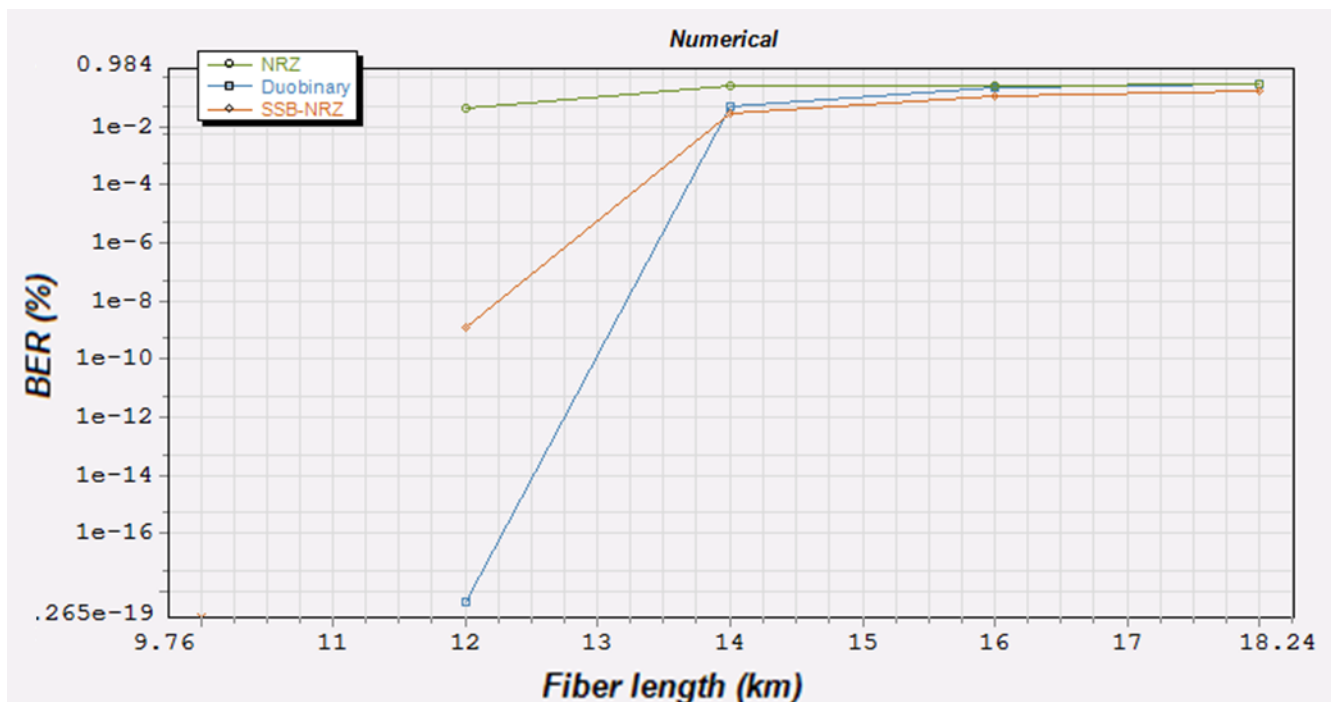
Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα καθώς μεταβάλλεται η απόσταση στην ίνα για ρυθμούς 25GBaud, 35GBaud και 45GBaud.



Εικόνα 4-12: Σύγκριση BER με βάση την απόσταση του μήκους ίνας (km) για 25GB ρυθμού μετάδοσης για τα NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σήματα διαμόρφωσης.



Εικόνα 4-13: Σύγκριση BER με την απόσταση του μήκους ίνας (km) για 35GBd ρυθμού μετάδοσης για τα NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σήματα διαμόρφωσης.



Εικόνα 4-14: Σύγκριση BER με την απόσταση του μήκους ίνας (km) για 45GBd ρυθμού μετάδοσης για τα NRZ (πράσινο), duobinary (μπλε) και SSB-NRZ (πορτοκαλί) σήματα διαμόρφωσης.

Τα διαγράμματα (Εικόνα 4-12-Εικόνα 4-14) απεικονίζουν ότι για τα 25G ρυθμό μετάδοσης, το σχήμα διαμόρφωσης SSB-NRZ εμφανίζει γρήγορη αύξηση του BER όταν ξεπερνάει τα 30 km, ενώ το duobinary παρουσιάζει πολύ καλύτερη συμπεριφορά έως τα 30 km. Αντίθετα το NRZ παρουσιάζει την χειρότερη απόδοση. Στα 35GBd ρυθμό μετάδοσης, το σχήμα SSB-NRZ εμφανίζει παρόμοια τάση με το αντίστοιχο για ρυθμούς 25GBd, παρουσιάζοντας απότομη αύξηση του BER καθώς αυξάνεται η απόσταση, ενώ το duobinary έχει καλύτερη απόδοση σε αποστάσεις έως 30 km. Το NRZ εμφανίζει τη χαμηλότερη ανθεκτικότητα σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ωστόσο και τα τρία σχήματα φαίνονται πιο ευάλωτα στα 35G από ό,τι στα 25G, όπως αναμενόταν. Κατά τη μετάδοση 45GBd σήματος, παρατηρείται ότι το BER αυξάνεται καθώς το μήκος της ίνας μεγαλώνει και φαίνεται η μεγάλη επιρροή της χρωματικής διασποράς. Το σχήμα duobinary δείχνει συνολικά καλύτερη απόδοση με χαμηλότερο BER για τα εξεταζόμενα μήκη ίνας.



## 5 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξέτασε την υλοποίηση και αξιολόγηση διαφορετικών τεχνικών διαμόρφωσης οπτικών συστημάτων επικοινωνίας, εστιάζοντας κυρίως στις διαμορφώσεις NRZ, duobinary και SSB-NRZ. Μέσω προσομοιώσεων σε περιβάλλοντα Matlab και VPI Transmission Maker, έγινε κατανοητή η φασματική απόδοση, η ανθεκτικότητα στη χρωματική διασπορά και η συνολική ποιότητα της μετάδοσης των τριών σχημάτων σε διάφορες συνθήκες και σενάρια. Οι προσομοιώσεις παρείχαν μια ολοκληρωμένη εικόνα των χαρακτηριστικών των διαφόρων σχημάτων διαμόρφωσης, επιτρέποντας την ανάλυση της απόδοσής τους τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, καθώς και σε διάφορες αποστάσεις.

Η διαμόρφωση duobinary αποδείχθηκε εξαιρετικά αποδοτική, ειδικά για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων και μεγάλων αποστάσεων. Παρουσίασε χαμηλό BER σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για απαιτητικές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, όπου η ποιότητα και η αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων είναι κρίσιμες. Η χρήση ελεγχόμενης παρεμβολής συμβόλων (ISI) σε αυτήν την τεχνική μείωσε τις απαιτήσεις εύρους ζώνης και βελτίωσε την ανθεκτικότητα στη χρωματική διασπορά, καθιστώντας την μια από τις πιο ελκυστικές επιλογές για μη αντισταθμισμένα οπτικά συστήματα. Η φασματική της απόδοση την καθιστά ιδανική για περιβάλλοντα όπου η χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης πρέπει να μεγιστοποιηθεί, ενώ η σταθερότητα που προσφέρει σε σήματα υψηλών ταχυτήτων είναι κρίσιμη για σύγχρονες εφαρμογές οπτικών επικοινωνιών, όπως στα 5G δίκτυα και στις διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων (datacenters).

Η διαμόρφωση SSB-NRZ επίσης έδειξε σημαντική βελτίωση στην αποδοτικότητα του φάσματος σε σχέση με την κλασική NRZ τεχνική διαμόρφωσης, καθώς και καλύτερη ανθεκτικότητα σε θόρυβο και φαινόμενα διασποράς, ειδικά σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Παρά τη σημαντική βελτίωση στον τομέα της φασματικής χρήσης, η SSB-NRZ αντιμετώπισε δυσκολίες σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 30 km, παρουσιάζοντας αυξημένο BER λόγω των επιπτώσεων της χρωματικής διασποράς. Παρ' όλα αυτά, παραμένει ιδιαίτερα αποδοτική για συνδέσεις μέσης απόστασης, όπου το εύρος ζώνης πρέπει να χρησιμοποιηθεί με αποδοτικό τρόπο και η πολυπλοκότητα της διαμόρφωσης παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.

Η κλασική NRZ διαμόρφωση παρουσίασε τη χαμηλότερη φασματική αποδοτικότητα από τα τρία εξεταζόμενα σχήματα και ήταν η πιο ευαίσθητη στη χρωματική διασπορά, ιδιαίτερα σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι για μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης ακόμα και μεγαλύτερους από 25GBaud, η NRZ δυσκολεύεται να διατηρήσει ένα αποδεκτό επίπεδο BER, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή της σε περιβάλλοντα όπου η ταχύτητα είναι υψηλή και οι απαιτήσεις για ποιότητα μετάδοσης αυξάνονται χωρίς τη χρήση

αντισταθμιστή. Εντούτοις, η NRZ εξακολουθεί να είναι κατάλληλη για εφαρμογές χαμηλότερης πολυπλοκότητας και μικρότερης εμβέλειας, λόγω της απλότητας υλοποίησης και του χαμηλού κόστους που προσφέρει.

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, είναι εμφανές ότι η έρευνα μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω μέσω της ενσωμάτωσης πιο σύνθετων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP), οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των συστημάτων και να μειώσουν τις επιπτώσεις της χρωματικής διασποράς και του θορύβου. Επιπλέον, η χρήση τεχνικών κωδικοποίησης προόδου (forward error correction, FEC) μπορεί να προσφέρει περαιτέρω βελτιώσεις στην ακρίβεια της μετάδοσης και να συμβάλει στη μείωση του BER. Οι μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να επικεντρωθούν επίσης στην εξέταση πιο πολύπλοκων τεχνικών διαμόρφωσης, όπως τα σχήματα PAM-M, τα οποία επιτρέπουν τη μετάδοση περισσότερων bits ανά σύμβολο, βελτιώνοντας έτσι την ακόμα περισσότερο τη φασματική απόδοση. Η ενσωμάτωση των τεχνικών αυτών με τις υπάρχουσες NRZ, duobinary και SSB τεχνικές θα μπορούσε να προσφέρει καλύτερη απόδοση για συστήματα οπτικών επικοινωνιών υψηλών ταχυτήτων.

Τέλος, η ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών αντιστάθμισης διασποράς και η χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing, WDM) αποτελούν κρίσιμους τομείς για μελλοντική έρευνα, προσφέροντας την ευκαιρία για βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των οπτικών δικτύων. Ταυτόχρονα, οι εξελίξεις στην τεχνολογία των οπτικών πομποδεκτών (transceivers) θα πρέπει να επικεντρωθούν στη μείωση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας, χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα της μετάδοσης. Συνολικά, η παρούσα εργασία έδειξε ότι οι τεχνικές duobinary και SSB-NRZ είναι εξαιρετικά υποσχόμενες για μελλοντικές εφαρμογές σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων και μεγάλων αποστάσεων, ενώ η κλασική NRZ διαμόρφωση, παρά τις αδυναμίες της, μπορεί να συνεχίσει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές χαμηλότερων απαιτήσεων.

## 6 Βιβλιογραφία

- [1] “Cisco 2023 Annual Report”.
- [2] R. Shewale, “How Many Use The Internet in 2024 (Global Data),” DemandSage. Accessed: Sep. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.demandsage.com/internet-user-statistics/>
- [3] “ericsson-mobility-report-q2-2024-update.pdf.” Accessed: Sep. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/4a4b71/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2024/ericsson-mobility-report-q2-2024-update.pdf>
- [4] “Optical Interconnect Market Size And Share Report, 2030.” Accessed: Sep. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/optical-interconnect-market-report>
- [5] M. Noormohammadpour and C. Raghavendra, “Datacenter Traffic Control: Understanding Techniques and Trade-offs,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, pp. 1492–1525, May 2018, doi: 10.1109/COMST.2017.2782753.
- [6] J. Alqahtani, S. Alanazi, and B. Hamdaoui, “Traffic Behavior in Cloud Data Centers: A Survey,” Oct. 01, 2020, *arXiv*: arXiv:2010.00713. Accessed: Sep. 21, 2024. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2010.00713>
- [7] R. Lin, Y. Cheng, M. D. Andrade, L. Wosinska, and J. Chen, “Disaggregated Data Centers: Challenges and Trade-offs,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 2, pp. 20–26, Feb. 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.1900612.
- [8] A. S. Karar, A. R. E. Falou, J. M. H. Barakat, Z. N. Gürkan, and K. Zhong, “Recent Advances in Coherent Optical Communications for Short-Reach: Phase Retrieval Methods,” *Photonics*, vol. 10, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/photonics10030308.
- [9] X. Pang, A. Udalcovs, R. Schatz, S. Popov, and O. Ozolins, “High-Speed Short Reach Optical Communications: Technological Options and Challenges,” in *Asia Communications and Photonics Conference/International Conference on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC)*, Beijing: Optica Publishing Group, 2020, p. S3H.5. doi: 10.1364/ACPC.2020.S3H.5.
- [10] R. BORKOWSKI *et al.*, “200G IM/DD Time-and-Polarization-Division-Multiplexed PON with >29dB Power Budget Using Boosted EML and APDs,” Jan. 2024, p. Th1E.5. doi: 10.1364/OFC.2024.Th1E.5.

- [11] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, "Silicon optical modulators," *Nature Photon*, vol. 4, no. 8, pp. 518–526, Aug. 2010, doi: 10.1038/nphoton.2010.179.
- [12] G. Reed *et al.*, "3 - Optical modulators," in *Integrated Photonics for Data Communication Applications*, M. Glick, L. Liao, and K. Schmidtke, Eds., in *Integrated Photonics Apps Specific Design & Manufacturing.*, Elsevier, 2023, pp. 69–121. doi: 10.1016/B978-0-323-91224-2.00011-4.
- [13] T. Bo, B. Kim, Y. Yu, D. Kim, and H. Kim, "Generation of Broadband Optical SSB Signal Using Dual Modulation of DML and EAM," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 10, pp. 3064–3071, Feb. 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3058161.
- [14] T. Salgals, I. Kurbatska, S. Spolitis, V. Bobrovs, and G. Ivanovs, "Research of M-PAM and Duobinary Modulation Formats for Use in High-Speed WDM-PON Systems," 2019. doi: 10.5772/intechopen.84600.
- [15] X. Chen, S. Chandrasekhar, and P. Winzer, "Self-Coherent Systems for Short Reach Transmission," in *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Sep. 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/ECOC.2018.8535234.
- [16] Y. Dong *et al.*, "Comparison of DC-Value Method and Kramers-Kronig Receiver in Optical OFDM SSB-DD Transmission," *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, pp. 1–8, Aug. 2022, doi: 10.1109/JPHOT.2022.3192263.
- [17] K. Tsuzuki *et al.*, "10-Gbit/s, 200 km duobinary SMF transmission using a full C-band tunable DFB laser array co-packaged with InP Mach-Zehnder modulator," in *2008 IEEE 21st International Semiconductor Laser Conference*, Sep. 2008, pp. 17–18. doi: 10.1109/ISLC.2008.4635987.
- [18] M. Sieben, J. Conradi, and D. E. Dodds, "Optical single sideband transmission at 10 Gb/s using only electrical dispersion compensation," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 10, pp. 1742–1749, Jul. 1999, doi: 10.1109/50.793744.
- [19] J. Lee, M.-S. Chen, and H.-D. Wang, "Design and Comparison of Three 20-Gb/s Backplane Transceivers for Duobinary, PAM4, and NRZ Data," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 43, pp. 2120–2133, Oct. 2008, doi: 10.1109/JSSC.2008.2001934.
- [20] P. Šalík, F. Čertík, and R. Róka, "Duobinary Modulation Format in Optical Communication Systems," *Advances in Signal Processing (CEASE PUBLICATION)*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, Feb. 2015, doi: 10.13189/asp.2015.010101.

## 7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω θα παρουσιαστεί ένα παράρτημα με αποσπασματικό κώδικα σε Matlab, το οποίο εξετάστηκε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση διαφόρων σχημάτων διαμόρφωσης (NRZ, duobinary, SSB) και υπολογισμό των παραμέτρων απόδοσης όπως το BER και το διάγραμμα οφθαλμού.

Ο παρακάτω κώδικας υλοποιεί βασικά σχήματα διαμόρφωσης σε Matlab. Συμπεριλαμβάνει την προσομοίωση της μετάδοσης και τη δημιουργία των διαγραμμάτων οφθαλμού και φάσματος για την ανάλυση του σήματος.

```
clc;
clear;
close all;

% Ορισμός παραμέτρων συστήματος
bit_rate = 10e9; % Ρυθμός bit σε bits/sec (10 Gbps)
symbol_rate = bit_rate; % Ισοδύναμο για NRZ
T = 1/bit_rate; % Χρονική διάρκεια συμβόλου
num_bits = 1e5; % Αριθμός bits προς προσομοίωση
fiber_length = 20e3; % Μήκος ίνας σε μέτρα (20 km)
lambda = 1550e-9; % Μήκος κύματος σε μέτρα (1550 nm)
c = 3e8; % Ταχύτητα του φωτός
Fs = 100e9; % Συχνότητα δειγματοληψίας (100 GHz)
noise_power = 30; % Ισχύς θορύβου σε dBm

% Υπολογισμός της χρωματικής διασποράς (CD)
D = 16e-6; % Παράγοντας διασποράς σε s/m^2 (1550 nm)
beta2 = -D * (lambda^2 / (2 * pi * c)); % Παράμετρος διασποράς
```

```

% Διάρκεια προσομοίωσης
time = 0:T:(num_bits-1)*T;
signal_length = length(time);
% Δημιουργία τυχαίας ακολουθίας bit
bits = randi([0 1], 1, num_bits);

% Μετατροπή των bits σε NRZ σήμα
nrz_signal = 2*bits - 1; % Χαρτογράφηση 0 -> -1, 1 -> +1

% Δειγματοληψία σήματος
nrz_sampled = repelem(nrz_signal, Fs/bit_rate);

% Προσθήκη θορύβου στο NRZ σήμα
nrz_noisy = awgn(nrz_sampled, noise_power, 'measured');

% Δημιουργία διαγράμματος οφθαλμού για NRZ
figure;
eyediagram(nrz_noisy, 2*Fs/bit_rate);
title('NRZ Eye Diagram');

% Δημιουργία φίλτρου για duobinary διαμόρφωση
h = [1 1]; % Απλό FIR φίλτρο για την ISI
duobinary_signal = filter(h, 1, nrz_signal); % Εφαρμογή του φίλτρου

% Δειγματοληψία του duobinary σήματος
duobinary_sampled = repelem(duobinary_signal, Fs/bit_rate);

% Προσθήκη θορύβου στο duobinary σήμα

```

```

duobinary_noisy = awgn(duobinary_sampled, noise_power, 'measured');

% Δημιουργία διαγράμματος οφθαλμού για duobinary
figure;
eyediagram(duobinary_noisy, 2*Fs/bit_rate);
title('Duobinary Eye Diagram');

% Υπολογισμός μετασχηματισμού Hilbert για SSB
hilbert_signal = imag(hilbert(nrz_signal));

% Δημιουργία του SSB σήματος
ssb_signal = nrz_signal + hilbert_signal;

% Δειγματοληψία SSB σήματος
ssb_sampled = repelem(ssb_signal, Fs/bit_rate);

% Προσθήκη θορύβου στο SSB σήμα
ssb_noisy = awgn(ssb_sampled, noise_power, 'measured');

% Δημιουργία διαγράμματος οφθαλμού για SSB
figure;
eyediagram(ssb_noisy, 2*Fs/bit_rate);
title('SSB Eye Diagram');

% Δημιουργία λήψης σήματος με θόρυβο
nrz_rx = nrz_noisy(1:Fs/bit_rate:end); % Αποδειγματοληψία
nrz_decoded = nrz_rx > 0; % Απόφαση με κατώφλι στο 0
ber_nrz = sum(bits ~= nrz_decoded) / num_bits; % Υπολογισμός BER

```

```

duobinary_rx = duobinary_noisy(1:Fs/bit_rate:end);
duobinary_decoded = duobinary_rx > 0;
ber_duobinary = sum(bits ~= duobinary_decoded) / num_bits;

ssb_rx = ssb_noisy(1:Fs/bit_rate:end);
ssb_decoded = ssb_rx > 0;
ber_ssb = sum(bits ~= ssb_decoded) / num_bits;

% Εμφάνιση αποτελεσμάτων BER
fprintf('BER NRZ: %e\n', ber_nrz);
fprintf('BER Duobinary: %e\n', ber_duobinary);
fprintf('BER SSB: %e\n', ber_ssb);

% Υπολογισμός του φάσματος για κάθε σχήμα
nrz_spectrum = fftshift(fft(nrz_sampled));
duobinary_spectrum = fftshift(fft(duobinary_sampled));
ssb_spectrum = fftshift(fft(ssb_sampled));

f = (-Fs/2:Fs/length(nrz_spectrum):Fs/2-Fs/length(nrz_spectrum))/1e9; % Συχνότητα σε GHz

figure;
plot(f, 20*log10(abs(nrz_spectrum)/length(nrz_sampled)));
hold on;
plot(f, 20*log10(abs(duobinary_spectrum)/length(duobinary_sampled)));
plot(f, 20*log10(abs(ssb_spectrum)/length(ssb_sampled)));
title('Signal Spectrum');
xlabel('Frequency (GHz)');

```



```
ylabel('Power (dB)');  
legend('NRZ', 'Duobinary', 'SSB');
```

Ο παραπάνω κώδικας μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω για να περιλαμβάνει και άλλες παραμέτρους, όπως την επίδραση της διασποράς στη μετάδοση οπτικών σημάτων ή την προσομοίωση πιο σύνθετων σχημάτων διαμόρφωσης όπως PAM4. Αλλάζοντας τις παραμέτρους (bit rate, noise power, fiber length) εξετάζονται διαφορετικά σενάρια και συνθήκες επικοινωνίας.