



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

**Οπτικές Τεχνικές Αντιστάθμισης της Διασποράς σε  
Συστήματα Μετάδοσης Οπτικών Σημάτων Διαμόρφωσης  
Έντασης για Εφαρμογές Διασύνδεσης Υπολογιστικών  
Κέντρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστασία Τρεκλή

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2024





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

**Οπτικές Τεχνικές Αντιστάθμισης της Διασποράς σε  
Συστήματα Μετάδοσης Οπτικών Σημάτων Διαμόρφωσης  
Έντασης για Εφαρμογές Διασύνδεσης Υπολογιστικών  
Κέντρων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
Αναστασία Τρεκλή

**Επιβλέπων :** Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20/06/2024.

.....

Ηρακλής Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Αθανάσιος Παναγόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Ματσόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2024

Αναστασία Τρεκλή

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

Copyright © Αναστασία Τρεκλή, 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 δίκτυα 5<sup>ης</sup> Γενιάς και έπειτα έχουν υποστεί τεράστιες αλλαγές στην αρχιτεκτονική τους ώστε να καταφέρουν να ανταπεξέλθουν στις ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών. Καθώς η επικοινωνία μεγάλης κλίμακας μεταξύ των μηχανών, η έλευση τεχνολογιών όπως είναι τα self-driving cars, η τεχνητή νοημοσύνη και η επαυξημένη πραγματικότητα έχουν εισέλθει για τα καλά στη ζωή μας, τα δίκτυα οπτικών επικοινωνιών πρέπει να εξελιχθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να παρέχουν μεγάλες ποσότητες πληροφοριών και σε πολύ μικρό χρόνο. Για το λόγο αυτό υπάρχει η ανάγκη για την δημιουργία νέων τεχνολογιών που μπορεί να μειώσουν το κόστος για την ανάπτυξη και την λειτουργία των δικτύων.

Στα πλαίσια αυτά δίνεται έμφαση στην ανάπτυξη και την δημιουργία καινούργιων οπτικών πομποδεκτών οι οποίοι θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις των δικτύων όπως αυτές τις περιγράψαμε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, τα οικονομικά αποδοτικά Electro-absorption Modulated Lasers (EMLs) και Directly Modulated Lasers (DMLs), εμφανίζονται ως ελκυστική λύση για τη διασύνδεση των οπτικών δικτύων σε συνδυασμό με τις εξελίξεις των εξαιρετικά γραμμικών φωτοδεκτών. Ενώ αυτά τα οπτοηλεκτρονικά εξαρτήματα PIC έχουν αποδειχθεί ως πρακτικές λύσεις για τη δημιουργία και την ανίχνευση των σημάτων, η επιλογή των λύσεων που βασίζονται σε PIC για την αντιμετώπιση των ατελειών της μετάδοσης έχει μείνει πίσω και πρέπει επίσης να επανεξεταστεί.

Σε αυτήν την διπλωματική παρουσιάζουμε μια νέα τεχνική για την αντιστάθμιση διασποράς που εμφανίζεται στη μετάδοση οπτικού σήματος ανάμεσα στα κέντρα δεδομένων με την εκμετάλλευση των ιδιοτήτων φιλτραρίσματος ενός πλήρως συντονιζόμενου μικροδακτυλίου (Micro Ring Resonators MRR) που είναι βασισμένο στην τεχνολογία δακτυλίων πυριτίου (SOI Ring). Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται διεξοδικά το θεωρητικό πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου μας, και τεκμηριώνεται και από πειράματα προσομοίωσης που επικυρώνουν τα θεωρητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης τεχνικής.

## Λέξεις Κλειδιά

**Δίκτυα 5<sup>ης</sup> Γενιάς, Δίκτυα 6<sup>ης</sup> Γενιάς, Οπτικοί Δακτύλιοι, Αντιμετώπιση Διασποράς, Ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα, Οπτικά Δίκτυα, Διαμόρφωση κατά Πλάτος**



# Abstract

5G networks and beyond have undergone massive changes in their architecture to cope with the ever-increasing needs of users. As large-scale communication between machines becomes more prevalent, technologies such as self-driving cars, artificial intelligence, and augmented reality have become integral parts of our lives. Consequently, optical communication networks must evolve to efficiently deliver vast amounts of information in minimal time. Therefore, there is a pressing need to develop new technologies that can reduce the costs associated with building and operating networks.

In this context, emphasis is placed on the development and creation of new optical transceivers that will satisfy the requirements of the networks as described above. More specifically, the cost-effective Electro-absorption Modulated Lasers (EMLs) and Directly Modulated Lasers (DMLs), appear as an attractive solution for the interconnection of optical networks in combination with the developments of highly linear photoreceptors. While these PIC optoelectronic components have proven to be practical solutions for signal generation and detection, the choice of PIC-based solutions to deal with transmission imperfections has lagged behind and also needs to be reconsidered.

In this diploma thesis we present a new technique for compensating dispersion occurring in optical signal transmission between data centers by exploiting the filtering properties of a fully tunable micro ring (Micro Ring Resonators MRR) based on silicon ring (SOI Ring) technology. More specifically, the theoretical framework of our proposed method is thoroughly presented, and it is also documented by simulation experiments that validate the theoretical results of the proposed technique.

## Keywords

**5G Networks, 6G Networks, Optical Rings, Dispersion Compensation, Photonic Integrated Circuits, Optical Networks, Pulse Amplitude Modulation (PAM 4)**





# Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να υλοποιήσω την παρούσα εργασία στο εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών και να ασχοληθώ με ένα επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους υποψήφιους διδάκτορες Κωνσταντίνα Καντά και Παναγιώτη Τουμάση, για την άριστη και καθοριστική συνεργασία που είχαμε, την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχαν, καθώς και τον χρόνο που διέθεσαν με πραγματικό ενδιαφέρον.

Μιας και αυτή η εργασία σηματοδοτεί το τέλος των σπουδών μου δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υπομονή τους και τη χωρίς όρους στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια σε οτιδήποτε και αν κάνω, καθώς και την αδερφή μου για τη βοήθεια της στα γραφιστικά αλλά και γιατί ξέρω ότι θα είναι δίπλα μου ότι και αν χρειαστώ. Ευχαριστώ τον Παναγιώτη που είναι πάντα δίπλα μου, με κατανόηση και υπομονή, για όλες τις όμορφες στιγμές που έχουμε περάσει μαζί και την Κατερίνα για όλες τις τομές που έχουμε κάνει μαζί και που ανέχεται όλες τις παραξενιές μου τόσα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να πω ένα ξεχωριστό ευχαριστώ σε αυτούς που επηρέασαν καθοριστικά τα φοιτητικά μου χρόνια, τους ΑΝεξάρτητους Αριστερούς Φοιτητές Ηλεκτρολόγους αλλά και όλους τους συντρόφους και τις συντρόφισσες μου που έχουμε συναντηθεί στους ίδιους δρόμους, στα ίδια αμφιθέατρα, στους ίδιους αγώνες. Τους ευχαριστώ γιατί μαζί τους έμαθα τη συντροφικότητα και την αλληλεγγύη, γιατί μου έμαθαν τι σημαίνει να αγωνίζεσαι για έναν καλύτερο κόσμο, για την ελπίδα που μου δίνουν κάθε φορά που δεν κάνουν ούτε βήμα πίσω, για όλα αυτά που ζήσαμε τόσα χρόνια αλλά κυρίως για το ότι μαζί τους έμαθα έναν καινούριο τρόπο να βλέπω τα πράγματα. *Στους αγώνες που δώσαμε μαζί και όλους αυτούς που θα δώσουμε από εδώ και πέρα...*



# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	11
Ευρετήριο Εικόνων .....	13
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή.....	17
1.1 Εξέλιξη και προκλήσεις των σύγχρονων οπτικών δικτύων .....	18
1.2 Ο ρόλος των οπτικών δικτύων .....	19
1.3 Εξέλιξη των σύγχρονων data centers .....	22
1.4 Αντικείμενο της διπλωματικής .....	25
Κεφάλαιο 2 – Διασύνδεση οπτικών δικτύων .....	27
2.1 Intra-Inter Data Center Interconnects (DCIs).....	27
2.2 Θεμελιώδεις διατάξεις μίας οπτικής διασύνδεσης.....	29
2.3 Διαμόρφωση σήματος κατά πλάτος.....	36
2.3.1 Διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους (amplitude shift keying - ASK) .....	36
2.3.2 Διαμόρφωση πλάτους πολλαπλών σταθμών (PAM4-PAM8).....	38
2.4 Φαινόμενο Χρωματικής Διασποράς .....	41
2.5 Αντιμετώπιση της Χρωματικής Διασποράς στις Οπτικές Ίνες .....	45
2.5.1 Ίνα Αντιστάθμισης Διασποράς (DCF) .....	46
2.5.2 Fiber Bragg Grating (FBG).....	47
2.5.3 Ηλεκτρονική Αντιστάθμιση Διασποράς (EDC) .....	50
2.5.4 Τεχνικές Οπτικής Σύζευξης της Φάσης (OPC) .....	51
2.4.5 Ψηφιακά Φίλτρα.....	53
Κεφάλαιο 3 – Προτεινόμενος τρόπος αντιμετώπισης διασποράς.....	55
3.1- Θεωρητικό υπόβαθρο της προτεινόμενης λύσης .....	55
3.1.1 - Εξασθένιση ισχύος που προκαλείται από διασπορά.....	55
3.1.2 Δομές Δακτυλίων .....	56
3.1.3 Αρχή λειτουργίας του Μηχανισμού Αντιστάθμισης της διασποράς.....	67
3.2 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης προσομοίωσης .....	69
3.2.1 Περιγραφή οπτικού πομποδέκτη για Inter DCIs.....	70
Κεφάλαιο 4 - Εξεταζόμενα Σενάρια και Αποτελέσματα .....	75

4.1 Αναγνώριση του προβλήματος της διασποράς.....	75
4.2 Χρήση ήδη γνωστών οπτικών φίλτρων για την αντιμετώπιση της διασποράς.....	77
4.3 Χρήση προτεινόμενων φίλτρων για την αντιμετώπιση της διασποράς.....	91
Κεφάλαιο 5 – Επίλογος και προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	97
Κεφάλαιο 6 – Βιβλιογραφία .....	99

# Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1 Ρυθμός αύξησης των απαιτήσεων σε οπτική χωρητικότητα δεδομένων .....	18
Εικόνα 2 Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων και η αντίστοιχη φασματική απόδοση .....	19
Εικόνα 3 Αύξηση της συνολικής IP κίνησης .....	20
Εικόνα 4 Ρυθμός αύξησης συνδεδεμένων συσκευών .....	21
Εικόνα 5 Data Center Traffic βάσει προορισμού.....	23
Εικόνα 6 Διάγραμμα κίνησης δεδομένων σε Data Centers. ....	23
Εικόνα 7 Διασύνδεση rack-to-rack με τη χρήση διακοπών (switches) και AOCs. ....	24
Εικόνα 8 Block diagram ενός coherent-detection transceiver (A) και ενός direct-detection (B).....	29
Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση μίας περιοχής εκπομπής ενός ημιαγωγού laser .....	30
Εικόνα 10 Τυπική διάταξη εξωτερικής διαμόρφωσης.....	32
Εικόνα 11 Ενσωμάτωση InP laser σε υπόστρωμα πυριτίου. ....	33
Εικόνα 12 Απόκριση EAM. ....	34
Εικόνα 13 Ποιοτική αναπαράσταση μεταξύ εφαρμοζόμενης τάσης-Ισχύος εξόδου .....	34
Εικόνα 14 Μπλοκ διάγραμμα απεικόνισης ενός οπτικού πομπού για μετάδοση NRZ οπτικού σήματος .	37
Εικόνα 15 (α) Απεικόνιση της κυματομορφής του πλάτους του σήματος σε μετάδοση με σχήμα διαμόρφωσης NRZ και (β) το διάγραμμα αστερισμού για ένα σήμα με διαμόρφωση OOK.....	38
Εικόνα 16 Αναπαράσταση ενός PAM4 οπτικού σήματος στο πεδίο του χρόνου, όπου T είναι η παράμετρος της περιόδου του συμβόλου .....	40
Εικόνα 17 Διάγραμμα οφθαλμού σήματος με σχήμα διαμόρφωσης PAM4.....	40
Εικόνα 18 α) Μεταβολή του δείκτη διάθλασης $n$ και του δείκτη ομάδας $ng$ ως προς το μήκος κύματος, (β) Μεταβολή της σταθεράς $\beta^2$ ως προς το μήκος κύματος.....	42
Εικόνα 19 Μεταβολή της παραμέτρου διασποράς D σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για μονότροπη οπτική ίνα.....	44
Εικόνα 20 Μετάδοση διαφορετικών φασματικών συνιστωσών μέσω οπτικής ίνας με μη-μηδενική διασπορά και χρονική διεύρυνση του παλμού στην έξοδο αυτής.....	45
Εικόνα 21 Η χρωματική διασπορά της ίνας SSMF ως προς το μήκος κύματος .....	46
Εικόνα 22 Οπτική απεικόνιση της αντιστάθμισης της διασποράς με χρήση ινών SC-DCF οι οποίες έχουν τοποθετηθεί σε ομοιόμορφα διαστήματα στην ίνα διάδοσης και αντισταθμίζουν τη συσσωρευμένη χρωματική διασπορά.....	46
Εικόνα 23 Διάγραμμα ματιού πριν την αντιστάθμιση.....	48
Εικόνα 24 Διάγραμμα ματιού μετά την αντιστάθμιση .....	49
Εικόνα 25 Σχηματικό Διάγραμμα EDC.....	50
Εικόνα 26 Διάγραμμα οφθαλμού πριν και μετά τη διόρθωση του σήματος.....	51
Εικόνα 27 Σχηματική διάταξη η οποία συνδυάζει έναν πομπό, μια ίνα που αποτελείται από δύο κόμβους, έναν συζεύκτη φάσης και έναν δέκτη. ....	52
Εικόνα 28 Οπτική Διάταξη με ψηφιακά φίλτρα.....	53
Εικόνα 29 (α) all-pass δομή δακτυλίου (APF) και (β) add-drop δομή δακτυλίου (ADRR) .....	56

Εικόνα 30 Δομή racetrack ring resonator .....	57
Εικόνα 31 Πεδία και συντελεστές σύζευξης σε μια δομή APF .....	58
Εικόνα 32 Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην έξοδο ενός all-pass filter .....	60
Εικόνα 33 Ένα ADRR επιλογής καναλιού. Μέσω της add εξόδου μπορούμε να βγάλουμε στην through έξοδο τα κανάλια/μήκη κύματος που θέλουμε ενώ μέσω της drop εξόδου μπορούμε να απαλλάξουμε το σήμα εισόδου από συγκεκριμένα μήκη κύματος. ....	61
Εικόνα 34 (α) Σχηματική αναπαράσταση ενός add-drop φίλτρου και (β) οι πορείες των πεδίων μέσα στο φίλτρο .....	62
Εικόνα 35 Πεδία και συντελεστές σύζευξης σε μια δομή ADRR.....	63
Εικόνα 36 Η ένταση του πεδίου εξόδου στην through έξοδο (συνεχόμενη γραμμή) και στην drop έξοδο (διακεκομμένη γραμμή).....	64
Εικόνα 37 Προφίλ ισχύος και επαγόμενη καθυστέρηση ομάδας .....	67
Εικόνα 38 Φωτονικό κύκλωμα πυριτίου .....	68
Εικόνα 39 Οπτική διάταξη προσομοίωσης ενός πομποδέκτη.....	70
Εικόνα 40 Διάταξη προσομοίωσης του ηλεκτρικού πομπού.....	71
Εικόνα 41 Οπτική διάταξη προσομοίωσης ενός πομποδέκτη.....	73
Εικόνα 42 Οπτική διάταξη προσομοίωσης ενός πομποδέκτη.....	75
Εικόνα 43 Διάγραμμα μέγιστης απόστασης διασποράς χωρίς διόρθωση της διασποράς .....	76
Εικόνα 44 Οπτική διάταξη προσομοίωσης με φίλτρο για την αντιστάθμιση της διασποράς.....	77
Εικόνα 45 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου BESSEL, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος.....	78
Εικόνα 46 Απόκριση πλάτους φίλτρου Butterworth .....	79
Εικόνα 47 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου BUTTERWORTH, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος.....	80
Εικόνα 48 Απόκριση πλάτους φίλτρου Chebyshev I.....	81
Εικόνα 49 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου CHEBYCHEV I, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος.....	82
Εικόνα 50 Απόκριση πλάτους φίλτρου Chebyshev II.....	82
Εικόνα 51 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου CHEBYCHEV II, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος.....	83
Εικόνα 52 Απόκριση πλάτους φίλτρου Elliptic.....	84
Εικόνα 53 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου ELLIPTIC, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος.....	85
Εικόνα 54 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου GAUSSIAN, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος.....	86







# Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

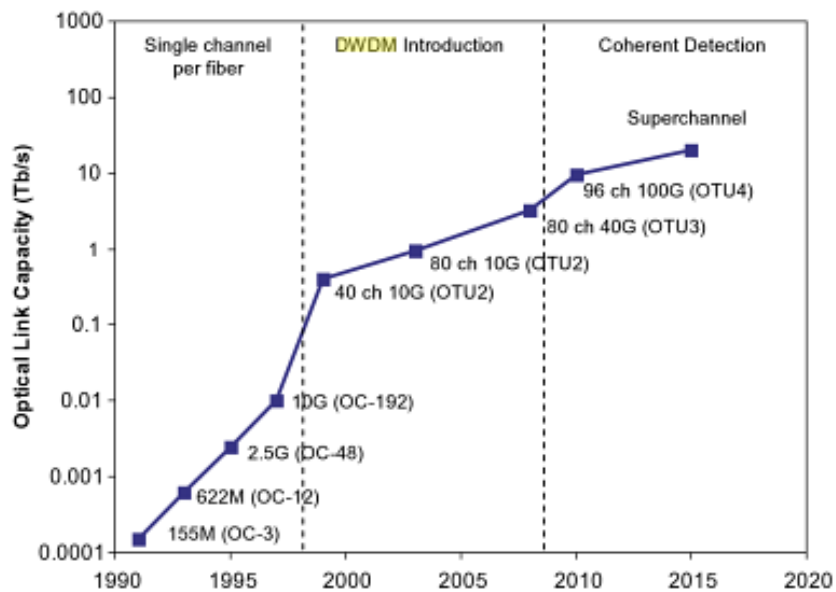
Αυτό το εισαγωγικό κεφάλαιο έχει σκοπό να τοποθετήσει την παρούσα διπλωματική εργασία σε ένα ευρύτερο ερευνητικό πλαίσιο. Η πρώτη ενότητα παρουσιάζει την εξέλιξη των σύγχρονων οπτικών δικτύων, εστιάζοντας σε ιστορικούς και τεχνολογικούς παράγοντες που οδήγησαν στην εποχή της ψηφιακής επικοινωνίας. Σημαντικές εξελίξεις στον τομέα των οπτικών επικοινωνιών αποτέλεσαν τον καταλύτη για την ανάπτυξη πολλαπλών πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών δικτύων, οι οποίες έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι επικοινωνούν και ανταλλάσσουν πληροφορίες.

Η δεύτερη ενότητα επικεντρώνεται στον ρόλο των σύγχρονων οπτικών δικτύων, εξετάζοντας τη σημασία τους στη σύγχρονη κοινωνία. Αναλύονται οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι υπάρχουσες υποδομές, όπως η αυξανόμενη ζήτηση για υψηλής ταχύτητας μεταφορά δεδομένων. Ακόμα αναδεικνύεται η σημασία της ανάπτυξης νέων προσεγγίσεων ή τεχνολογιών στον τομέα των οπτικών δικτύων και των κέντρων δεδομένων.

Τέλος, η τρίτη ενότητα αναλύει τον στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Περιγράφεται ο επιδιωκόμενος σκοπός της έρευνας, οι βασικές ερωτήσεις που απασχολούν τον τομέα και οι προκλήσεις που απαιτεί να αντιμετωπίσει η εργασία. Επιπλέον, αναφέρονται οι προσδοκίες από την ανάλυση των αποτελεσμάτων και πώς αυτά μπορούν να συνεισφέρουν στην περαιτέρω εξέλιξη και βελτίωση των συστημάτων οπτικών δικτύων.

## 1.1 Εξέλιξη και προκλήσεις των σύγχρονων οπτικών δικτύων

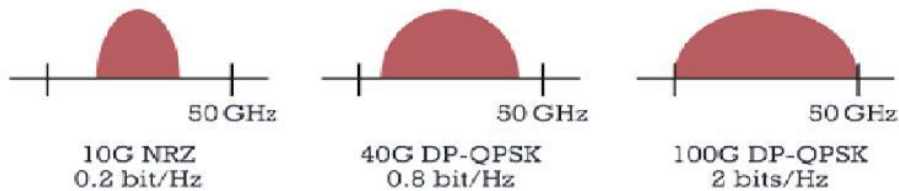
Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, τα οπτικά δίκτυα είχαν μια χωρητικότητα μερικών εκατοντάδων Mbrps και χρησιμοποιούσαν μόνο ένα κανάλι ανά οπτική ίνα. Η επικράτηση του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου ως νέου μέσου επικοινωνίας μέσα στη δεκαετία άνοιξε τον δρόμο για την αύξηση της χωρητικότητας στο επίπεδο των Gbrps, ακολουθώντας την αυξανόμενη ζήτηση για υπηρεσίες web. Προς το τέλος της δεκαετίας, η εξέλιξη συνεχίστηκε με την εισαγωγή της πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM), επιτρέποντας την μετάδοση περισσότερων καναλιών με διαφορετικά μήκη κύματος μέσω μιας μόνο οπτικής ίνας.



Εικόνα 1 Ρυθμός αύξησης των απαιτήσεων σε οπτική χωρητικότητα δεδομένων

Στις αρχές του 2000, η ευρεία χρήση του Διαδικτύου οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας "πυκνού" WDM (Dense Wavelength Division Multiplexing - DWDM), επιτρέποντας στις ίνες να υποστηρίζουν 40, 80 ή περισσότερα μήκη κύματος και χωρητικότητες κοντά στα Tb/s. Στο τέλος της δεκαετίας, η εμφάνιση καναλιών με χωρητικότητα 40 Gbrps έδωσε νέα ώθηση στην ανάπτυξη των οπτικών δικτύων επικοινωνιών.

Μέχρι το 2010, οι δημοφιλείς υπηρεσίες όπως το YouTube και το Video on Demand (VoD) εξάντλησαν τις δυνατότητες της υπάρχουσας χωρητικότητας, με την αύξηση της χωρητικότητας στα 10 Tb/s ανά ίνα και τη χρήση τεχνικών σύμφωνης αποδιαμόρφωσης (Coherent Detection) να προσφέρουν προσωρινή λύση. Ωστόσο, η εισαγωγή νέων υπηρεσιών, όπως το Cloud Computing, επανάφερε την ανάγκη για ακόμα μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Σήμερα, χρησιμοποιούνται 96 κανάλια πυκνού WDM που συμμορφώνονται με το πρότυπο ITU-T G.694, επιτρέποντας τη μετάδοση σε ρυθμούς ανεξάρτητους από την απόσταση που διανύουν. Το πρότυπο αυτό διαιρεί το οπτικό εύρος ζώνης (C-band) σε κανάλια των 50 GHz.

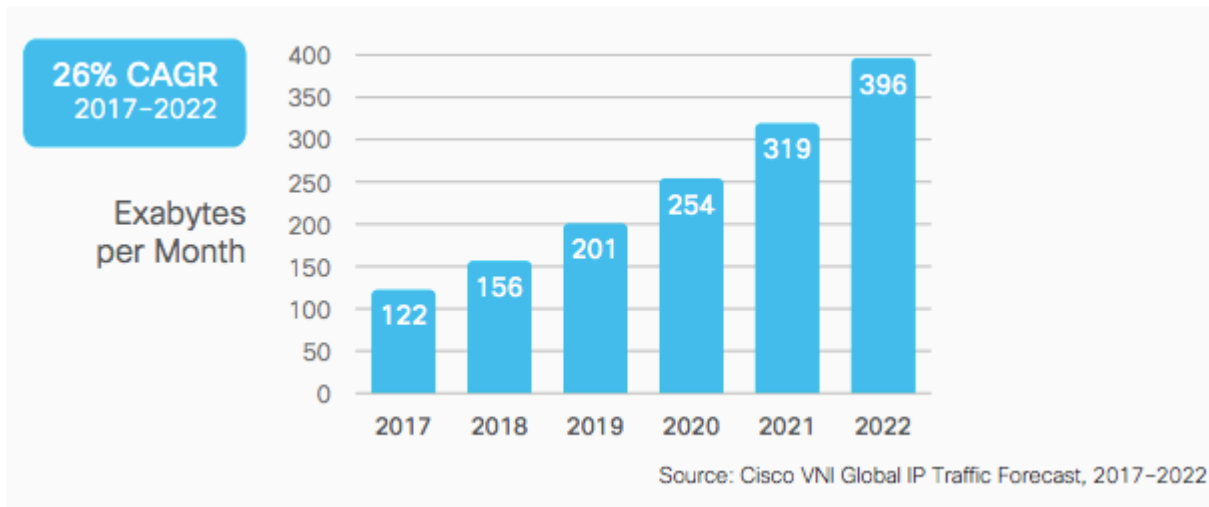


Εικόνα 2 Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων και η αντίστοιχη φασματική απόδοση

## 1.2 Ο ρόλος των οπτικών δικτύων

Η συνεχής άνοδος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης στις σημερινές μέρες οφείλεται κυρίως στην ανεξέλεγκτη εξάπλωση του διαδικτύου, τόσο ως προς τον αριθμό των χρηστών, όσο και όσον αφορά την πληθώρα και την πολυπλοκότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, η παγκόσμια διακίνηση δεδομένων μέσω IP (συμπεριλαμβανομένων των σταθερών και κινητών συσκευών) αναμένεται να φθάσει τον ετήσιο ρυθμό της τάξης του 4 Zettabyte ανά έτος (περισσότερα από ένα τρισεκατομμύριο Gbyte ανά έτος) έως το 2023. Επιπλέον, κάθε χρόνο, καταφθάνουν στην αγορά νέα προϊόντα με αυξημένες δυνατότητες και ευφυΐα.

Το "Διαδίκτυο των Πραγμάτων" (Internet of Things - IoT), όπως είναι γνωστό, προωθεί τη σύνδεση οποιασδήποτε συσκευής με το Διαδίκτυο με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών. Σύμφωνα με μελέτες, μέχρι το 2025, ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών αναμένεται να φθάσει τα 70 δισεκατομμύρια. Αυτή η αναμενόμενη αύξηση στον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών δημιουργεί νέες προκλήσεις για τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, προωθώντας την ανάγκη



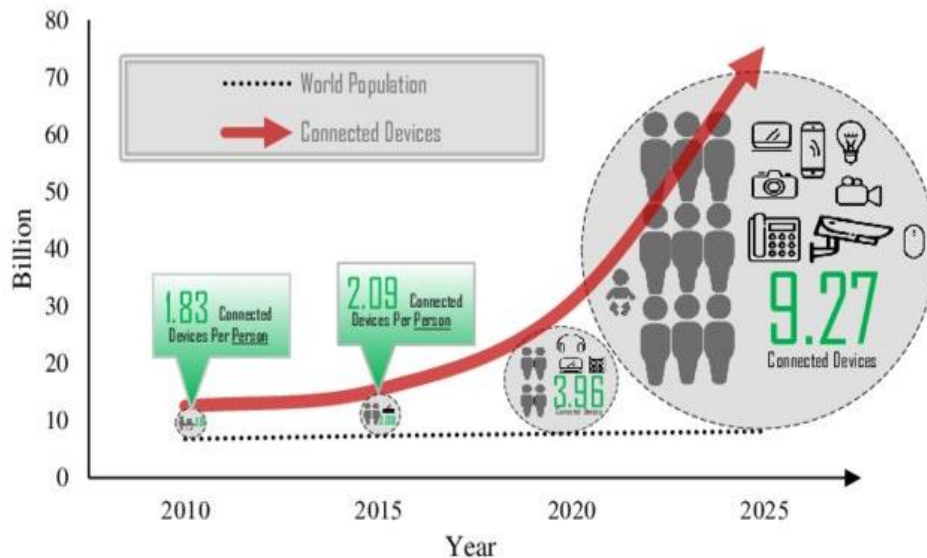
Εικόνα 3 Αύξηση της συνολικής IP κίνησης

για περαιτέρω τεχνολογική ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της υποδομής προκειμένου να ανταπεξέλθουν στις αυξημένες απαιτήσεις χωρητικότητας και ταχύτητας.

Τα οπτικά δίκτυα υψηλής χωρητικότητας αναδεικνύονται ως η βέλτιστη επιλογή για την ανάπτυξη ευρυζωνικών υποδομών, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας ως φυσικού μέσου μετάδοσης πληροφορίας. Αυτά περιλαμβάνουν το μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης (~25 THz στη φασματική περιοχή γύρω από τα 1550 nm), τις χαμηλές απώλειες διάδοσης (~0.25 dB/km στην ίδια φασματική περιοχή) και την απουσία διαφυγόντος πεδίου, που συνεπάγεται ασφάλεια στη μετάδοση των δεδομένων και ανοχή σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κατά τη φυσική διάδοση των σημάτων.

Παρατηρείται ότι σήμερα, η κίνηση IP εστιάζεται κυρίως σε λίγους στόχους, όπως τα υπολογιστικά κέντρα (data centers) των μεγάλων παρόχων υπηρεσιών (Service Providers - SP) όπως η Google, η Facebook και το YouTube. Αυτά τα υπολογιστικά κέντρα επιτρέπουν στις πύλες δικτύου (gateways) τη διασύνδεση μεταξύ τους και τη συνεργασία τους για την αποθήκευση και την επεξεργασία των δεδομένων. Οι διασυνδέσεις μεταξύ των υπολογιστικών κέντρων πραγματοποιούνται μέσω οπτικών δικτύων λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών.

Για το σκοπό αυτό, οι κάρτες δικτύου που χρησιμοποιούνται υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 100 Gbps, οι οποίοι επιτυγχάνονται μέσω της τεχνολογίας διπολικής πολλαπλασιασμένης φάσης τετραγωνικής ολίσθησης (Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying - DP-QPSK).



Εικόνα 4 Ρυθμός αύξησης συνδεδεμένων συσκευών

Καθώς η κίνηση των δεδομένων συνεχώς αυξάνεται, αναδύεται η ανάγκη για την αντικατάσταση των υπάρχοντων καρτών δικτύου με νέες, οι οποίες θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν ρυθμούς μετάδοσης στην τάξη των 400 Gbps και 1 Tbps, που επιτυγχάνονται, αντίστοιχα, μέσω της πιο προηγμένης διαμόρφωσης τετραγωνικής διαμόρφωσης πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation - QAM).

Ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας που απαιτεί την εξέλιξη των οπτικών δικτύων είναι η ευελιξία στη διαχείριση του εύρους ζώνης, λόγω της δυναμικής φύσης της κίνησης του διαδικτύου. Στην προσπάθειά τους να ανταποκριθούν με νέες οικονομικά ανταγωνιστικές λύσεις για την κλιμάκωση των δικτύων, η έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη νέων προτύπων οπτικών δικτύων, γνωστών ως ευέλικτα οπτικά δίκτυα (Elastic Optical Networking - EON).

Στα EON, το εύρος ζώνης για κάθε υπηρεσία δεσμεύεται δυναμικά βάσει των απαιτήσεων της κίνησης και των συνθηκών που επικρατούν στο δίκτυο σε συγκεκριμένη στιγμή. Η δίκαιη κατανομή των κατάλληλων πόρων σε διαφορετικές υπηρεσίες αποτελεί ευθύνη του δικτύου, ειδικότερα του στρώματος ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η αποτελεσματική διαχείριση του φάσματος, το οποίο αποτελεί τον πιο ακριβό πόρο του συστήματος.

Τα ευέλικτα οπτικά δίκτυα (Elastic Optical Networks - EON) χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα στοιχεία που τους επιτρέπουν να προσαρμόζονται ευέλικτα στις απαιτήσεις της σύγχρονης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Αυτά τα βασικά στοιχεία περιλαμβάνουν:

- **Ευέλικτο πλέγμα συχνοτήτων (Flexible frequency grid):** Το ευέλικτο πλέγμα συχνοτήτων επιτρέπει την ευέλικτη εκχώρηση των συχνοτήτων στις διάφορες υπηρεσίες, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη χρήση του φάσματος και την προσαρμογή στις απαιτήσεις του δικτύου.
- **Αρχιτεκτονική βασισμένη σε επαναπρογραμματιζόμενους οπτικούς πολυπλέκτες προσθήκης-αφαίρεσης (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer - ROADM):** Οι ROADM επιτρέπουν την ευέλικτη δρομολόγηση του φωτός στο δίκτυο, επιτρέποντας την απομακρυσμένη αλλαγή των συνδέσεων και των μονοπατιών χωρίς την ανάγκη για φυσική παρέμβαση.
- **Ευέλικτους πομποδέκτες Sliceable Bandwidth Variable Transponder (S-BVT):** Οι ευέλικτοι πομποδέκτες S-BVT επιτρέπουν την προσαρμογή του εύρους ζώνης μετάδοσης ανάλογα με τις απαιτήσεις της κίνησης, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου.

Αυτά τα στοιχεία αποτελούν τον πυρήνα των ευέλικτων οπτικών δικτύων, τα οποία επιτρέπουν την αποδοτική και ευέλικτη μεταφορά τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, προσαρμόζοντας δυναμικά τους πόρους ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου.

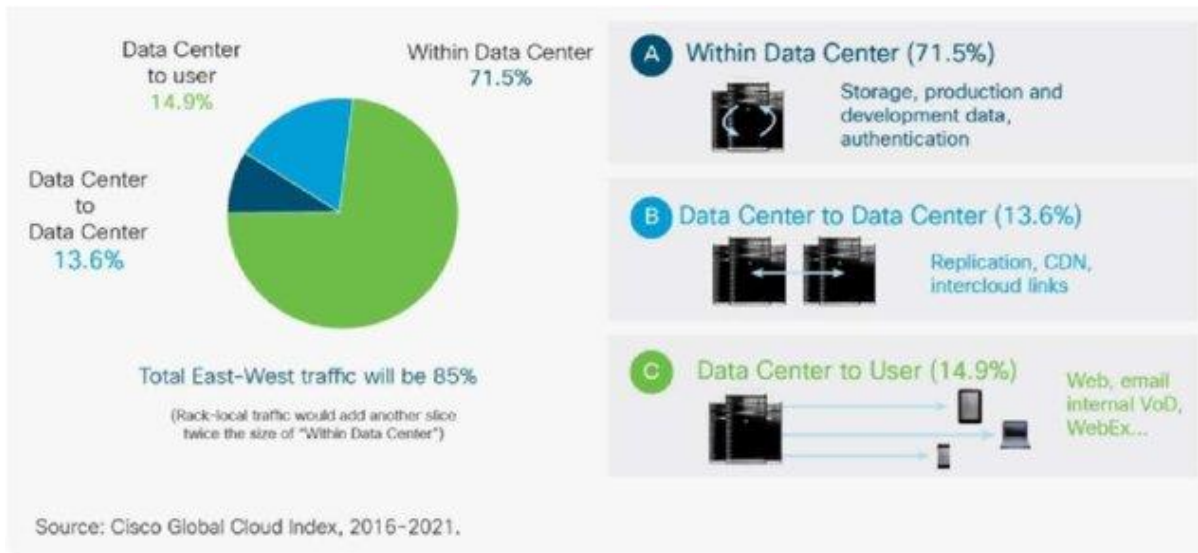
## 1.3 Εξέλιξη των σύγχρονων data centers

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η τεράστια εξάπλωση της κοινωνικής δικτύωσης και η ολοένα και αυξανόμενη ανταλλαγή δεδομένων μέσω του cloud και των έξυπνων φορητών συσκευών έχουν δημιουργήσει ένα νέο παγκόσμιο πλαίσιο για τη ροή πληροφοριών. Παράλληλα, έχει επιφέρει μια αξιοσημείωτη αύξηση της κίνησης σε επίπεδο IP, ενισχύοντας έτσι τη σημασία των κέντρων δεδομένων.

Η απότομη αύξηση της κίνησης δεδομένων αναδεικνύει την κρίσιμη σημασία της αποδοτικής λειτουργίας των κέντρων δεδομένων, που αποτελούν την κινητήρια δύναμη πίσω από την ομαλή παροχή υπηρεσιών στους χρήστες. Είναι προφανές ότι η βιωσιμότητα των υπηρεσιών cloud είναι στενά συνδεδεμένη με την ικανότητα των κέντρων δεδομένων να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις αυτής της αυξανόμενης κίνησης.

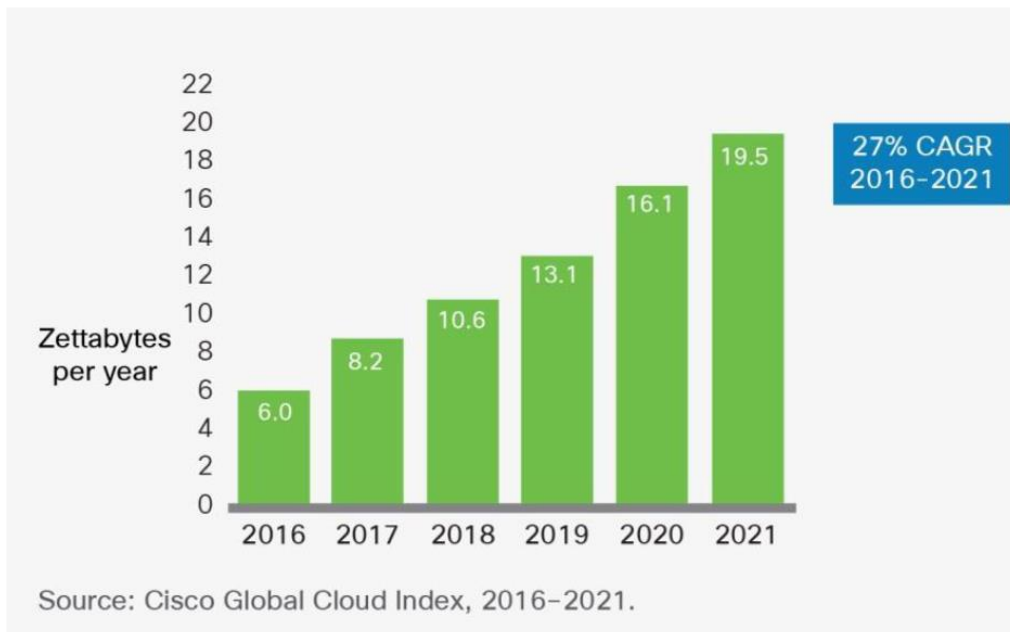
Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η πλειονότητα, περίπου 71.5%, της συνολικής κίνησης παραμένει εντός των Κέντρων Δεδομένων. Αυτό υπογραμμίζει τη σπουδαιότητα της εσωτερικής επικοινωνίας μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων του κέντρου δεδομένων, γνωστή και ως "east-west traffic". Επιπλέον, η εισερχόμενη και εξερχόμενη κίνηση δεδομένων από τα κέντρα δεδομένων προς τους χρήστες (ή "users"), γνωστή και ως "North-South traffic", αποτελεί το 14.9% της συνολικής κίνησης. Τέλος, η κίνηση μεταξύ διαφορετικών κέντρων δεδομένων (Inter-DC

traffic) αποτελεί περίπου το 13.6% της συνολικής κίνησης, αναδεικνύοντας την ανάγκη για αποτελεσματικά μέσα επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών κέντρων δεδομένων.



Εικόνα 5 Data Center Traffic βάσει προορισμού

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επιφέρει αναπάντεχες απαιτήσεις για περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση των διασυνδέσεων εντός και μεταξύ των κέντρων δεδομένων. Ενώ κάποτε οι συνδέσεις



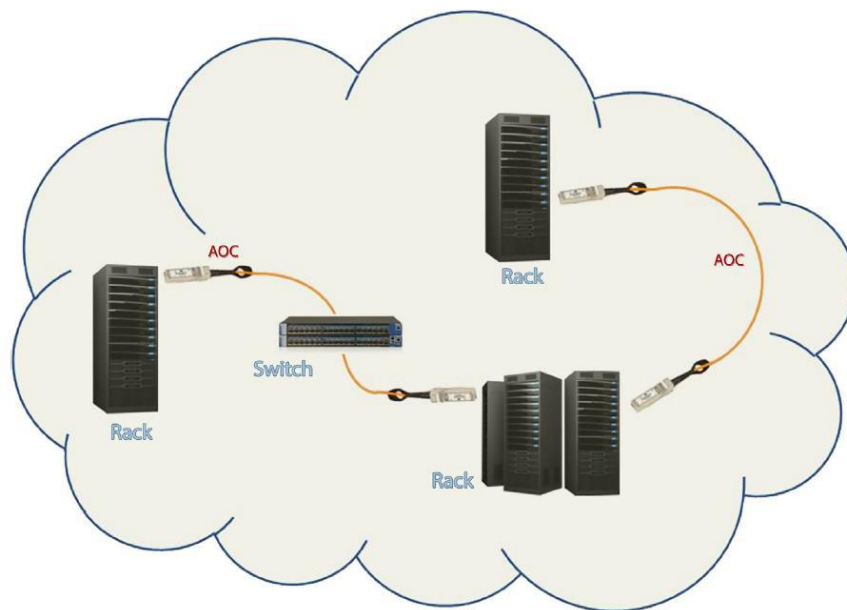
Εικόνα 6 Διάγραμμα κίνησης δεδομένων σε Data Centers.

στα κέντρα δεδομένων υλοποιούνται κυρίως μέσω καλωδίων χαλκού, η τελευταία δεκαετία έχει σηματοδοτήσει μια μετάβαση προς τις οπτικές ίνες, δημιουργώντας ένα νέο επίπεδο ταχύτητας και αξιοπιστίας στις διασυνδέσεις των κέντρων δεδομένων.

Οι οπτικές διασυνδέσεις προσφέρουν πλειάδα πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με τα καλώδια χαλκού. Αυτά περιλαμβάνουν την ανοσία τους σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, την πολύ μικρότερη διάμετρο, τις υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, τα μεγάλα εύρη ζώνης, και τη δυνατότητα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις.

Εντός των κέντρων δεδομένων, τα είδη διασυνδέσεων περιλαμβάνουν τις συνδέσεις εντός των επιμέρους server boards, τις διασυνδέσεις μεταξύ των server boards, και τις διασυνδέσεις μεταξύ των διαφορετικών racks. Οι οπτικές διασυνδέσεις επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας ενσωματωμένες οπτικές μονάδες (Embedded Optic Modules, EOM), οι οποίες επιτρέπουν την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων μεταξύ των εσωτερικών συστημάτων. Αυτή η τεχνολογική εξέλιξη εξασφαλίζει όχι μόνο την αποτελεσματική λειτουργία των κέντρων δεδομένων, αλλά και την ανάπτυξη προηγμένων υπηρεσιών που ικανοποιούν τις αυξανόμενες ανάγκες της ψηφιακής κοινωνίας.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει εκείνες τις διασυνδέσεις όπου τα δεδομένα μεταφέρονται από ένα board σε ένα άλλο, το οποίο ανήκει στο ίδιο back-plane.



Εικόνα 7 Διασύνδεση rack-to-rack με τη χρήση διακοπών (switches) και AOCs.



Στην τρίτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι διασυνδέσεις μεταξύ των Top-of-Rack (TOR) Switches μεταξύ διαφορετικών Racks, οι οποίες υλοποιούνται τόσο με τη χρήση ενδιάμεσων switches, όσο και με τη χρήση Active Optical Cables (AOCs).

Τα AOCs έχουν αντικαταστήσει τα τελευταία χρόνια τα «παραδοσιακά» χάλκινα καλώδια που χρησιμοποιούνταν κατά κύριο λόγο -και εν μέρει εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται – σε τέτοιες διασυνδέσεις, παρουσιάζοντας σαφή πλεονεκτήματα έναντι των τελευταίων. Πρόκειται για καλώδια οπτικών ινών, που καταλήγουν σε διεπαφές υψηλών προδιαγραφών, παρέχοντας τη δυνατότητα «στέγασης» τόσο του transmitter όσο και του receiver στο ίδιο συμπαγές εξάρτημα, το οποίο πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει τα standards των Ethernet, Fibre Channel, InfiniBand, SONET/SDH.

Σήμερα, οι τρόποι οπτικών διασυνδέσεων σε συνδυασμό με τα οπτικά καλώδια που χρησιμοποιούνται, μπορούν να υποστηρίξουν εφαρμογές με τα εξής χαρακτηριστικά: 100G Ethernet, Fibre Channel>32G, InfiniBand>40G.

## 1.4 Αντικείμενο της διπλωματικής

Η προηγούμενη ενότητα κάνει εμφανή τον σημαντικό ρόλο των ευέλικτων πομποδεκτών, ως βασικό στοιχείο των EON, στην υλοποίηση ρυθμών δεδομένων άνω των 400 Gb/s με πολλούς παράγοντες ελευθερίας, όπως ο ρυθμός μετάδοσης, το σχήμα διαμόρφωσης, η απόσταση διάδοσης καθώς και ο αριθμός των οπτικών ροών που μπορεί να υποστηρίξει.

Ο μετασχηματισμός των αρχιτεκτονικών δικτύων για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των κάθετων αγορών στα πλαίσια του 5G οικοσυστήματος καθώς και η μακροπρόθεσμη εξέλιξη του υπογραμμίζει την ανάγκη για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που μπορεί να μειώσουν το κόστος για την ανάπτυξη και την λειτουργία των δικτύων. Πρέπει λοιπόν να αναπτυχθούν λύσεις που θα χρησιμοποιούν μια νέας γενιάς οπτικά στοιχεία χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης και μικρού αποτυπώματος για την υποστήριξη των ολοένα και αυξανόμενων αναγκών των δικτύων.

Σε αυτό το πλαίσιο, η διαθεσιμότητα οπτικών πομποδεκτών που ικανοποιούν τις παραπάνω απαιτήσεις, έχει φέρει επανάσταση στην υλοποίηση απλών αναλογικών πομποδεκτών σε κλίμακα chip. Πιο συγκεκριμένα, τα οικονομικά αποδοτικά Electro-absorption Modulated Lasers (EMLs) και Directly Modulated Lasers (DMLs), εμφανίζονται ως ελκυστική λύση για τη διασύνδεση των οπτικών δικτύων σε συνδυασμό με τις εξελίξεις των εξαιρετικά γραμμικών φωτοδεκτών. Ενώ αυτά τα οπτοηλεκτρονικά εξαρτήματα PIC έχουν αποδειχθεί ως πρακτικές λύσεις για τη δημιουργία και την ανίχνευση των σημάτων, η επιλογή των λύσεων που βασίζονται σε PIC για την αντιμετώπιση των ατελειών της μετάδοσης έχει μείνει πίσω και πρέπει επίσης να επανεξεταστεί.

Σε αυτήν την διπλωματική παρουσιάζουμε μια νέα τεχνική για την αντιστάθμιση διασποράς που εμφανίζεται στη μετάδοση οπτικού σήματος ανάμεσα στα κέντρα δεδομένων με την εκμετάλλευση των ιδιοτήτων φιλτραρίσματος ενός πλήρως συντονιζόμενου μικροδακτυλίου (Micro Ring Resonators MRR) που είναι βασισμένο στην τεχνολογία δακτυλίων πυριτίου (SOI Ring). Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται διεξοδικά το θεωρητικό πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου μας, και τεκμηριώνεται και από πειράματα προσομοίωσης που επικυρώνουν τα θεωρητικά αποτελέσματα της προτεινόμενης τεχνικής.

# Κεφάλαιο 2 – Διασύνδεση οπτικών δικτύων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή ορισμένων ηλεκτρικών και οπτικών διατάξεων που συναντώνται σε μία τυπική διασύνδεση σε Data Center, οι οποίες αποτελούν τα δομικά στοιχεία για την κατασκευή των πομποδεκτών (transceivers). Ακόμη παρουσιάζονται τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η μετάδοση σε μια ίνα καθώς και οι τρόποι που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση τους μέχρι σήμερα.

## 2.1 Intra-Inter Data Center Interconnects (DCIs)

### **Intra Data Center Interconnects**

Οι εσωτερικές συνδέσεις που υλοποιούνται εντός ενός συγκεκριμένου Κέντρου Δεδομένων καλύπτουν την επικοινωνία είτε εντός του ίδιου κτηρίου, είτε μεταξύ διαφορετικών κτηρίων που ανήκουν στο ίδιο Κέντρο Δεδομένων. Αυτές οι συνδέσεις μπορεί να εκτείνονται από μερικά μέτρα έως δέκα χιλιόμετρα.

### **Inter Data Center Interconnects**

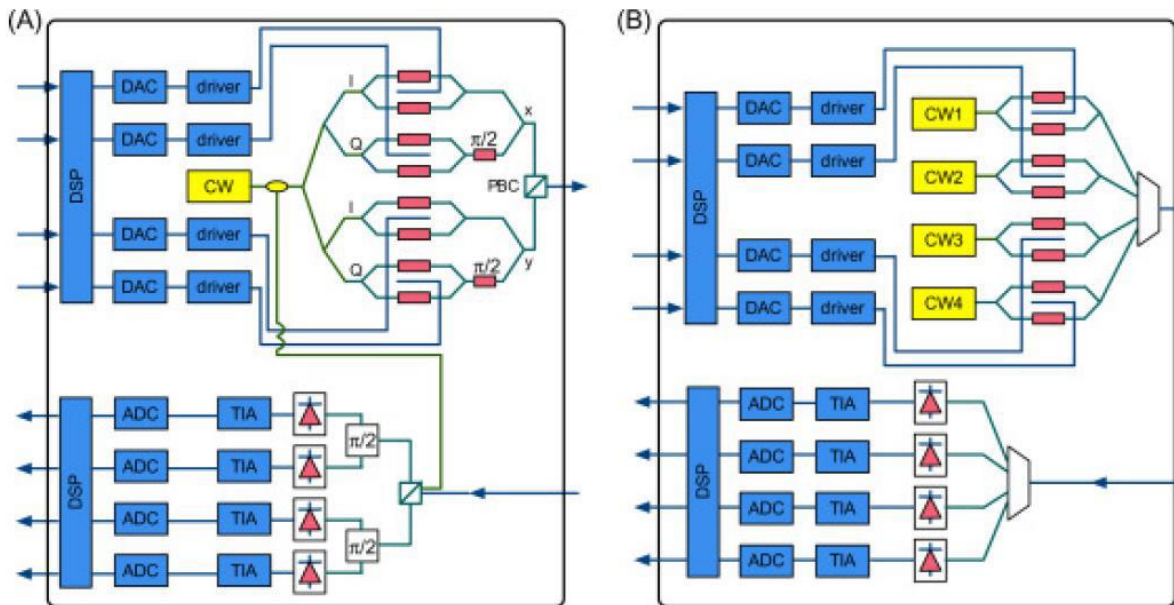
Περιλαμβάνουν τις διασυνδέσεις μεταξύ διαφορετικών Κέντρων Δεδομένων και αφορούν αποστάσεις μεγαλύτερες των δέκα χιλιομέτρων, οι οποίες εκτείνονται έως και τα εκατό

χιλιόμετρα. Διασυνδέσεις μεγαλύτερων αποστάσεων εμπίπτουν στις κατηγορίες των metro ή long-haul και δεν θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία.

Τόσο για τα intra όσο και για τα inter DCIs, η αρχιτεκτονική της Intensity Modulation and Direct Detection (IM/DD) προτιμάται ευρέως έναντι της coherent communication. Η αρχιτεκτονική της coherent detection σημείωσε τα τελευταία χρόνια μεγάλη επιτυχία σε ότι αφορά τα οπτικά δίκτυα, κυρίως λόγω του εγγενούς πλεονεκτήματος που παρουσιάζει και αφορά στην αύξηση της φασματικής απόδοσης (spectral efficiency), μέσω της κωδικοποίησης περισσότερων ψηφίων σε κάθε σύμβολο, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί τόσο τη φάση όσο και το πλάτος αλλά και την πόλωση του οπτικού φέροντος για να μεταφέρει την πληροφορία. Παρόλα αυτά, η τεχνική της IM/DD χρήζει πλέον ευρύτερης αποδοχής, λόγω ορισμένων βασικών πλεονεκτημάτων που εμφανίζει όπως είναι το χαμηλότερο κόστος, η μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση και το μικρότερο footprint.

Προκειμένου όχι μόνο να ανταποκριθούν τα συστήματα αυτά στις σύγχρονες αυξημένες απαιτήσεις αλλά και να αποτελούν cost-effective επιλογές, χρησιμοποιούν εξελιγμένα σχήματα διαμόρφωσης (modulation formats), όπως το Pulse Amplitude Modulation (PAM), carrier-less amplitude phase (CAP), discrete multi-tone (DMT), σε συνδυασμό με integrated lasers και modulators, αυξάνοντας βέβαια την πολυπλοκότητα και το κόστος των IM/DD συστημάτων.

Στην *Εικόνα 8* παρουσιάζονται τα block diagrams για τις δύο αυτές τεχνικές, δηλαδή ενός σύμφωνου πομποδέκτη ανίχνευσης υψηλής ταχύτητας (high-speed coherent detection) και ενός πομποδέκτη IM/DD, εφαρμόζοντας DSP (Digital Signal Processing), μία τεχνική που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα. Από το σχήμα φαίνεται ότι η πολυπλοκότητα των δύο πομποδεκτών είναι παρόμοια, με τη διαφορά ότι ο coherent transceiver περιλαμβάνει ορισμένα phase requirements, ενώ ο IM/DD transceiver χρησιμοποιεί πολυπλέκτη (multiplexer) και αποπολυπλέκτη (demultiplexer) μήκους κύματος. Μία άλλη ουσιώδης διαφορά είναι ότι ο IM/DD transceiver χρησιμοποιεί τόσες οπτικές πηγές (CW) όσες και οι γραμμές, εν αντιθέσει με τον coherent που χρησιμοποιεί μόνο μία.



Εικόνα 8 Block diagram ενός coherent-detection transceiver (A) και ενός direct-detection (B)

## 2.2 Θεμελιώδεις διατάξεις μίας οπτικής διασύνδεσης

### Οπτικός πομπός

Ο ρόλος των οπτικών πομπών είναι να μετατρέπουν ένα ηλεκτρικό σήμα εισόδου σε αντίστοιχο οπτικό σήμα και κατόπιν να το εκτοξεύουν στο εσωτερικό της οπτικής ίνας, η οποία χρησιμεύει σαν κανάλι επικοινωνίας.

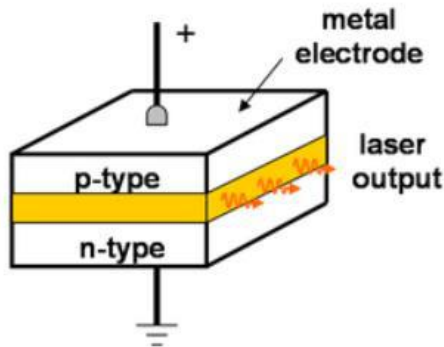
### Οπτική πηγή

Η κυριότερη συνιστώσα των οπτικών πομπών είναι η οπτική πηγή. Τα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών χρησιμοποιούν ως οπτικές πηγές ημιαγωγούς, όπως φωτοδιόδους LED ή laser ημιαγωγού (γνωστά και ως δίοδοι laser ή laser έκχυσης). Η επιλογή τους επιδρά στην συνολική απόδοση του συστήματος και καθορίζεται από παράγοντες όπως το μήκος κύματος εκπομπής, η διασπορά, η σχέση ισχύος-απόστασης μετάδοσης, η ζεύξη πηγής-οπτικής ίνας, η οπτοηλεκτρονική ολοκλήρωση, το κόστος και διάφοροι άλλοι.

Στα περισσότερα οπτικά συστήματα επικοινωνιών, όπως και στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται laser ημιαγωγού, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν :

1. Στενό φασματικό εύρος και άρα πολύ καλής χρονικής συμφωνίας.
2. Ευκολία σύζευξης του παραγόμενου οπτικού φωτός σε οπτικές ίνες.
3. Μικρό μέγεθος, αξιοπιστία και υψηλή απόδοση.

Η διάταξη των ημιαγωγών περιλαμβάνει την κατασκευή τριών στρωμάτων, p-n στρωμάτων και του κεντρικού πυρήνα, ο οποίος πιέζεται μεταξύ αυτών, όπως απεικονίζεται στην *Εικόνα 9*. Ο κεντρικός πυρήνας στρώματος είναι φτιαγμένος από τον ημιαγωγό που εκπέμπει φως και ονομάζεται ενεργό στρώμα. Το στρώμα αυτό έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από ότι τα τριγύρω στρώματα και λειτουργεί σαν κυματοδηγός. Συνήθως, είναι κατασκευασμένο από κάποια ένωση των III-V υλικών (Φωσφίδιο Ινδίου-InP, Αρσενικό Γάλλιο-GaAs), όπως για παράδειγμα το InGaAsP. Ορισμένες υποκατηγορίες των laser ημιαγωγού είναι τα laser κατανεμημένης



*Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση μίας περιοχής εκπομπής ενός ημιαγωγού laser*

ανάδρασης (DFB), τα laser κατανεμημένου ανακλαστήρα (DBR), τα laser ημιαγωγών συζευγμένης κοιλότητας, και τα laser εκπομπής-επιφάνειας κατακόρυφης-κοιλότητας (VCSEL).

Όσον αφορά τον τρόπο εκπομπής των laser, αυτός δύναται να είναι είτε παλμικός είτε συνεχής. Στην πρώτη περίπτωση, η οπτική ισχύς εμφανίζεται σε παλμούς με συγκεκριμένο ρυθμό και στη δεύτερη, που θα αναπτυχθεί και στα πλαίσια της εργασίας, το laser εκπέμπει συνεχώς και με σταθερή ένταση (Continuous Wave-CW), παράγοντας το οπτικό φέρον.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των laser ημιαγωγών συνεχόμενου κύματος περιγράφονται πολύ καλά από ένα σύνολο εξισώσεων ρυθμού που διέπουν την αλληλεπίδραση φωτονίων και ηλεκτρονίων μέσα στην ενεργό περιοχή. Αυτές οι εξισώσεις ρυθμού πηγάζουν από τις εξισώσεις Maxwell, και έχουν την εξής μορφή για μονότροπο laser:

$$\frac{dP}{dt} = GP + R_{sp} - \frac{P}{\tau_p} \quad (2.1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{q} - \frac{dN}{\tau_c} - GP \quad (2.2)$$

, όπου

$$G = \Gamma v_g g = G_N (N - N_0) \quad (2.3)$$

Το πεδίο που δημιουργείται από μία τέτοια ιδανική οπτική πηγή, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_{cw} = \sqrt{P_s} \exp(j(\omega_s + \varphi_s)) e_s \quad (2.4)$$

, όπου  $\sqrt{P_s}$  το πλάτος του πεδίου,  $\omega_s$  η συχνότητα,  $\varphi_s$  η φάση και  $e_s$  η πόλωση του οπτικού πεδίου του φέροντος.

## Οπτικοί διαμορφωτές

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:

$$E(t) = A(t) * \cos [\omega(t)t + \varphi(t)] \quad (2.5)$$

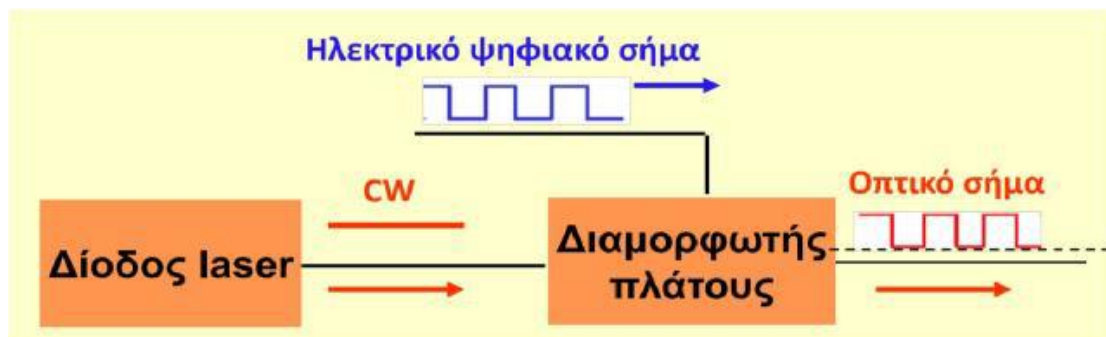
Η πληροφορία μπορεί να βρίσκεται είτε στο πλάτος  $A(t)$  είτε στη φάση  $\varphi(t)$  είτε σπανίως στη συχνότητα  $\omega(t)$ . Σε κάθε περίπτωση, η ισχύς του οπτικού σήματος ισούται με:

$$\frac{A^2(t)}{2} \quad (2.6)$$

Η μετατροπή αυτή, μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικές τεχνικές:

1. Απευθείας διαμόρφωση
2. Εξωτερική διαμόρφωση

Στο σύστημα που προσομοιώνει η παρούσα εργασία έχει επιλεχθεί η τεχνική της εξωτερικής διαμόρφωσης, κάνοντας χρήση διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (Electro-Absorption Modulator, EAM). Η επιλογή αυτή έγινε όχι μόνο για να αποφευχθούν τα εγγενή μειονεκτήματα που εμφανίζονται στην απευθείας διαμόρφωση, όπως είναι η ολίσθηση συχνότητας (chirp) και οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης αλλά και για να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα της εξωτερικής διαμόρφωσης. Η τελευταία βασίζεται περισσότερο σε αμιγώς οπτικά φαινόμενα και επομένως είναι κατάλληλη για διαμόρφωση σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Συνεπώς, εκτός από σήματα ASK και PSK μπορούν να διαμορφώσουν και σήματα ανώτερης τάξης. Μία τυπική δομή εξωτερικής διαμόρφωσης περιλαμβάνει μία οπτική πηγή, πολωμένη με ένα σταθερό ρεύμα που παρέχεται από την έξοδο CW και έναν οπτικό διαμορφωτή οποίος δέχεται ως εισόδους το CW και το ηλεκτρικό ψηφιακό σήμα (που περιέχει την πληροφορία) και παράγει ως έξοδο το οπτικά διαμορφωμένο σήμα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 10*.



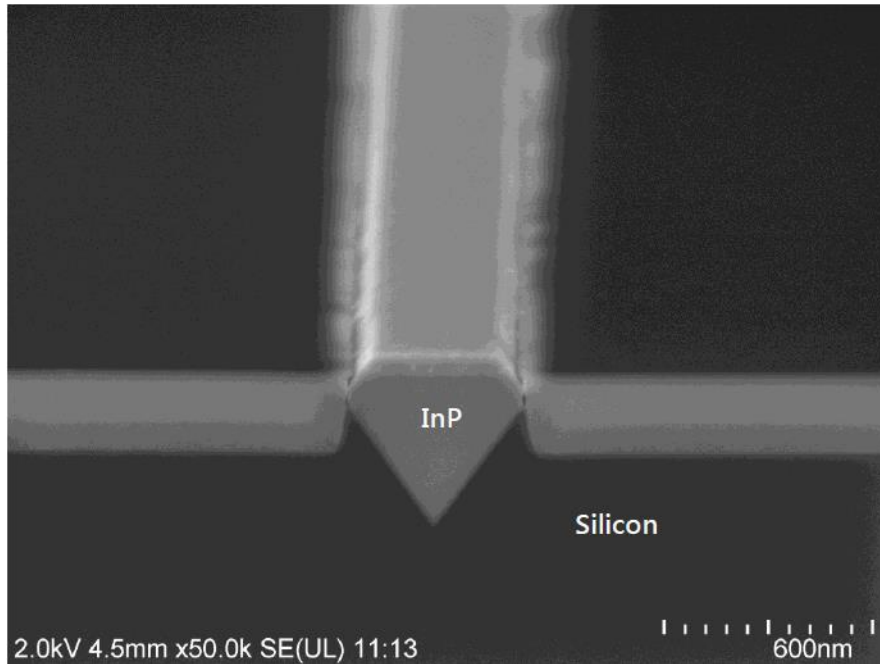
*Εικόνα 10* Τυπική διάταξη εξωτερικής διαμόρφωσης

Οι διαμορφωτές αυτοί βασίζονται σε ένα από τα δύο φαινόμενα:

1. Ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο
2. Φαινόμενο Ηλεκτρο-απορρόφησης



Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι διαμορφωτές που κάνουν χρήση των ηλεκτρο-οπτικών αποτελεσμάτων μέσα σε ένα κυματοδηγό κατασκευασμένο από LiNbO<sub>3</sub> (Νιοβικό του λιθίου), έτσι ώστε η αποτελεσματική λειτουργία του δείκτη διάθλασης να αλλάζει σε μια εφαρμοσμένη



Εικόνα 11 Ενσωμάτωση InP laser σε υπόστρωμα πυριτίου.

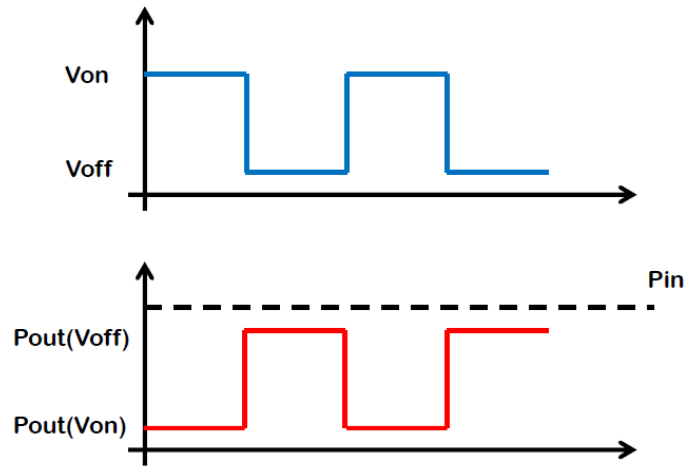
τάση. Μια τέτοια συσκευή ρυθμίζει τη φάση του φωτός που διέρχεται και είναι χρήσιμη ως διαμορφωτής φάσης. Για την κατασκευή ενός διαμορφωτή έντασης, η φάση διαμόρφωσης μετατρέπεται σε διαμόρφωση πλάτους με τη βοήθεια ενός Mach-Zehnder (MZ) υμβολόμετρου. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης είναι η εισαγωγή σημαντικών απωλειών που εμφανίζονται όταν το CW φως από την πηγή laser έχει συζευχθεί στον κυματοδηγό LiNbO<sub>3</sub>. Ο διαμορφωτής ηλεκτρο-απορρόφησης (EAM) λύνει το πρόβλημα αυτό, διότι είναι κατασκευασμένος με το ίδιο υλικό InP που χρησιμοποιείται για την πηγή laser, έτσι ώστε και οι δύο να μπορούν να ενσωματωθούν στο ίδιο υπόστρωμα InP, και κατ' επέκταση στο ίδιο chip (monolithically integrated), μειώνοντας έτσι το κόστος και το αποτύπωμα (footprint) του οπτικού πομπού.

Το ποσοστό ισχύος που μεταδίδεται μέσα από ένα υλικό είναι:

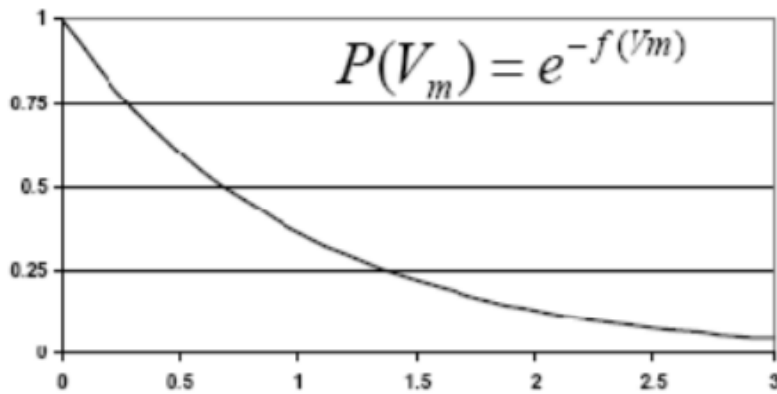
$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp(-\alpha L) \quad (2.6)$$

, όπου  $\alpha$  ο δείκτης απορρόφησης και  $L$  η απόσταση μετάδοσης.

Ένας ΕΑΜ κάνει χρήση των Franz-Keldysh αποτελεσμάτων, σύμφωνα με τα οποία το διάκενο ζώνης ενός ημιαγωγού μειώνεται όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται σε αυτό. Έτσι, ένα διαφανές στρώμα ημιαγωγών αρχίζει να απορροφά το φως όταν το κενό ζώνης του μειώνεται, εφαρμόζοντας μία εξωτερική τάση. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η εφαρμοζόμενη τάση, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απορρόφηση και επομένως τόσο μικρότερη η μετάδοση.



Εικόνα 12 Απόκριση ΕΑΜ.



Εικόνα 13 Ποιοτική αναπαράσταση μεταξύ εφαρμοζόμενης τάσης-Ισχύος εξόδου

$$I_{pin} = \eta \frac{\lambda q}{hc} P = R * P \quad (2.7)$$

## Οπτικός δέκτης

Ο ρόλος του οπτικού δέκτη είναι να μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και να ανακτά τις πληροφορίες που έχουν μεταδοθεί μέσω ενός οπτικού συστήματος.

## Φωτοανιχνευτής

Το βασικό εξάρτημα ενός οπτικού δέκτη είναι ο φωτοανιχνευτής, ο οποίος μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό παλμό μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Οι προδιαγραφές του προσδιορίζονται βάσει των απαιτήσεων σε θέματα όπως η μεγάλη ευαισθησία, η γρήγορη απόκριση, ο χαμηλός θόρυβος, το χαμηλό κόστος και η μεγάλη αξιοπιστία. Οι προδιαγραφές αυτές καλύπτονται ιδανικά με τη χρήση φωτοανιχνευτών, κατασκευασμένων από υλικά ημιαγωγών. Οι φωτοανιχνευτές αυτοί περιλαμβάνουν ανάστροφα πολωμένες επιφάνειες p-n, καθώς και τροποποιήσεις αυτών όπως οι p-i-n ή οι φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας, καθώς επίσης και φωτοανιχνευτές μετάλλου-ημιαγωγού-μετάλλου (MSM). Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθεί μία φωτοδίοδος, η οποία βασίζεται στη λειτουργία μίας p-i-n φωτοδίοδου με τη δυνατότητα επιλεκτικής χρήσης ηλεκτρονίων ως ενεργών φορέων.

Η σχέση ρεύματος και οπτικής ισχύος, σε μία τυπική δομή p-i-n, δίνεται από τη σχέση:

$$I_{pin} = \frac{\eta \lambda q P}{hc} = R \times P \quad (2.7)$$

, όπου  $R$  η αποκρισιμότητα του φωτοανιχνευτή,  $\lambda h$  η ενέργεια φωτονίου,  $q$  το φορτίο ηλεκτρονίου και  $h$  η αποδοτικότητα (το ποσοστό των φωτονίων που μετατρέπονται σε ηλεκτρόνια).

Το σήμα στην έξοδο της φωτοδίοδου είναι ανάλογο του τετραγώνου του πλάτους του σήματος εισόδου στη φωτοδίοδο, όπως προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$I = P \propto |E \exp[j(\omega t + \varphi)]|^2 \quad (2.8)$$

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χάνεται η πληροφορία της φάσης, εάν υπάρχει (εάν δηλαδή η πληροφορία είχε διαμορφωθεί και/ή κατά φάση), με αποτέλεσμα να καθίσταται αναγκαία η χρήση σύνθετων τεχνικών και σχημάτων αποδιαμόρφωσης, προκειμένου να γίνει η πλήρης ανάκτηση της πληροφορίας. Στην παρούσα εργασία αυτό δεν θα μας απασχολήσει, διότι έχουμε διαμορφώσει την πληροφορία μόνο κατά πλάτος (intense modulation), όπως θα αναλύσουμε περισσότερο στην επόμενη ενότητα.

## 2.3 Διαμόρφωση σήματος κατά πλάτος

### 2.3.1 Διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους (amplitude shift keying - ASK)

Η απλούστερη και συνηθέστερη μορφή διαμόρφωσης στις οπτικές επικοινωνίες είναι η διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους (Amplitude Shift Keying – ASK), στην οποία η πληροφορία εγγράφεται σε διάφορα επίπεδα οπτικής έντασης. Η ηλεκτρο-οπτική μετατροπή (electrical-to-optical conversion) μιας ακολουθίας από bits απαιτεί την διαμόρφωση ενός οπτικού φορέα (optical carrier). Ο οπτικός φορέας που θα διαμορφωθεί οπτικά προέρχεται από μια πηγή συνεχούς φωτός (continuous wave - CW) του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να εκφραστεί με τον ακόλουθο τύπο:

$$E(t) = Re [A_0(t) \exp(j\phi_0) \exp(-j\omega_0 t)] \quad (2.9)$$

όπου η παράμετρος  $E$  εκφράζει το ηλεκτρικό πεδίο του οπτικού φορέα, το  $A_0$  το πλάτος του ενώ οι παράμετροι  $\omega_0$  και  $\phi_0$  εκφράζουν την συχνότητα και την φάση αντίστοιχα του οπτικού φορέα.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι στο σχήμα διαμόρφωσης ASK διαμορφώνεται το πλάτος  $A_0$  του οπτικού φορέα, η παράμετρος  $A_0(t)$  μεταβάλλεται στον χρόνο ανάλογα με την μεταβολή της ηλεκτρικής ροής δεδομένων που θα διαμορφώσουν τον οπτικό φορέα.

Η μεταβολή αυτή του πλάτους μπορεί να εκφραστεί ως:

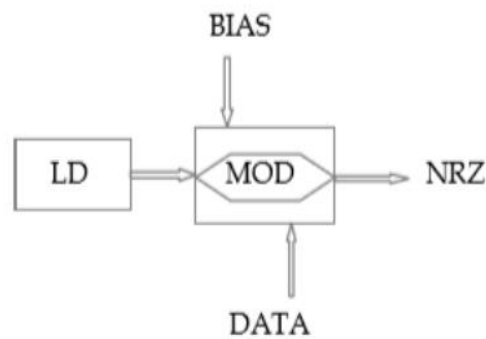
$$A_0(t) = \sqrt{P_0} \sum_n b_n f_p(t - nT_b) \quad (2.10)$$

όπου η παράμετρος  $P_0$  εκφράζει την μέγιστη ισχύ (peak power), η  $f_p(t)$  αναπαριστά την οπτική περιβάλλουσα του παλμού, η παράμετρος  $T_b = 1/B$  εκφράζει την διάρκεια του bit (bit slot) για έναν δεδομένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $B$  ενώ η μεταβλητή  $b_n$  λαμβάνει τιμές της λογικής στάθμης 0 και 1 ανάλογα με το αν το  $n$  bit του οπτικού σήματος λαμβάνει την τιμή της λογικής στάθμης 0 ή 1. Σε πιο πρακτικές υλοποιήσεις η παράμετρος του πλάτους  $A_0$  λαμβάνει την τιμή μηδέν κατά την διάρκεια της μετάδοσης δυαδικών ψηφίων που έχουν την τιμή της στάθμης 0. Το σχήμα διαμόρφωσης ASK είναι επιπλέον ευρέως γνωστό και ως on-off keying (OOK) αποτελώντας από τα πιο ευρέως διαδεδομένα σχήματα διαμόρφωσης σε εμπορικά διαθέσιμα συστήματα μετάδοσης

οπτικών επικοινωνιών εξαιτίας της απλότητας που προσφέρει στον σχεδιασμό του οπτικού πομπού και δέκτη αντίστοιχα.

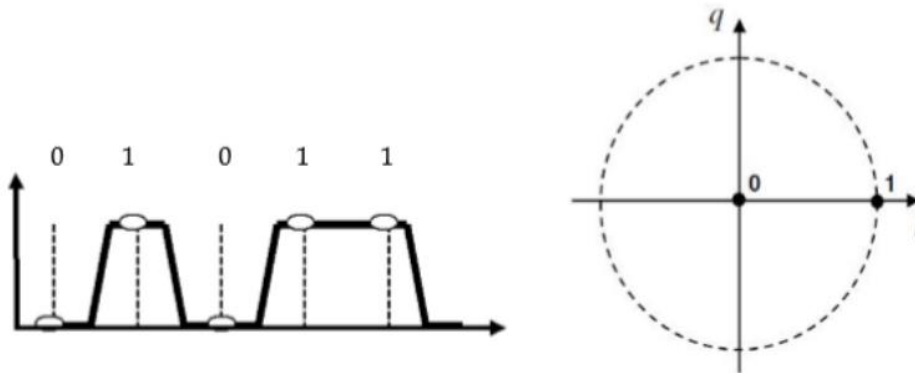
Κατά την υλοποίηση του σχήματος διαμόρφωσης OOK σε έναν οπτικό πομπό το πλάτος (ή η ισχύς) ενός οπτικού φορέα ενεργοποιείται και απενεργοποιείται ως αποτέλεσμα της μορφής μιας ηλεκτρικής ακολουθίας δυαδικών ψηφίων. Πιο συγκεκριμένα, η λογική στάθμη 1 κωδικοποιείται με την ύπαρξη οπτικής ισχύος συγκεκριμένης τιμής ενώ η λογική στάθμη 0 με την ύπαρξη οπτικής ισχύος χαμηλότερης ή μηδενικής τιμής. Για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη διαμόρφωση μπορεί είτε να διαμορφωθεί απευθείας η οπτική πηγή, μέσω της τεχνικής της άμεσης διαμόρφωσης (direct modulation) κατά την οποία διαμορφώνεται το ρεύμα οδήγησης της οπτικής πηγής ανάλογα με τη λογική πληροφορία είτε χρησιμοποιώντας έναν εξωτερικό οπτικό διαμορφωτή. Η δεύτερη αυτή περίπτωση προτιμάται σε οπτικά συστήματα υψηλών ταχυτήτων και μεγάλων αποστάσεων καθώς προσδίδει λιγότερο chirp στο διαμορφωμένο σήμα και κατ'επέκταση μεγαλύτερη ανοχή στα φαινόμενα της διασποράς.

Το σχηματικό διάγραμμα ενός NRZ-OOK πομπού φαίνεται στην *Εικόνα 14*. Ο οπτικός διαμορφωτής που χρησιμοποιείται μπορεί κυρίως είναι τύπου MachZehnder (MZM) και πολώνεται (biased) στο μέσο τετραγωνικό σημείο (quadraturepoint) της συνάρτησης μεταφοράς του ώστε να οδηγηθεί εκμεταλλευόμενοι όλη την έκταση της συνάρτησης μεταφοράς του από το ελάχιστο ως το μέγιστο σημείο μετάδοσης. Για την ανίχνευση ενός οπτικού σήματος με NRZ διαμόρφωση χρησιμοποιείται μια απλή φωτοδίοδος ως οπτικός δέκτης.



*Εικόνα 14 Μπλοκ διάγραμμα απεικόνισης ενός οπτικού πομπού για μετάδοση NRZ οπτικού σήματος*

Στην *Εικόνα 15(α)* παρουσιάζεται η κυματομορφή του πλάτους του σήματος σε μετάδοση με σχήμα διαμόρφωσης NRZ ενώ η *Εικόνα 15(β)* απεικονίζεται το παραγόμενο διάγραμμα αστερισμού με την λογική πληροφορία της χαμηλής και υψηλής στάθμης (0 και 1 δυαδική πληροφορία).



*Εικόνα 15 (α) Απεικόνιση της κυματομορφής του πλάτους του σήματος σε μετάδοση με σχήμα διαμόρφωσης NRZ και (β) το διάγραμμα αστερισμού για ένα σήμα με διαμόρφωση OOK*

### 2.3.2 Διαμόρφωση πλάτους πολλαπλών σταθμών (PAM4-PAM8)

Τα συμβατικά συστήματα οπτικών ινών μετάδοσης πληροφορίας ρυθμού 10Gb/s χρησιμοποιούν σχήματα διαμόρφωσης πλάτους OOK που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, στα οποία το δυαδικό πλάτος σήματος του σήματος παίρνει τιμές δύο σταθμών "0" (φωτός απενεργοποιημένο) ή "1" (φωτισμός) για τη μετάδοση πληροφοριών. Ωστόσο, καθώς η κίνηση στο Διαδίκτυο συνεχίζει να αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης ~ 25%, απαιτούνται συστήματα οπτικών πομποδεκτών που να υποστηρίζουν μετάδοση πληροφορίας 100G και 400G. Για την εξυπηρέτηση των προαναφερθέντων υψηλών ταχυτήτων το διαθέσιμο εύρος ζώνης των δυαδικών οπτικών πομποδεκτών δεν αρκεί πλέον για να καλύψει τις ανάγκες με αποτέλεσμα εδώ και μια δεκαετία να καταφεύγουμε όλο και περισσότερο σε τεχνικές σύμφωνης μετάδοσης και λήψης της

πληροφορίας για συστήματα μακρινών αποστάσεων. Επιπρόσθετα για συστήματα επικοινωνίας μικρών αποστάσεων καθώς και για διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων απαιτούνται οπτικοί πομποδέκτες με πολύ χαμηλότερο κόστος και κατανάλωση ισχύος από εκείνους που παρέχονται στα σύμφωνα οπτικά συστήματα.

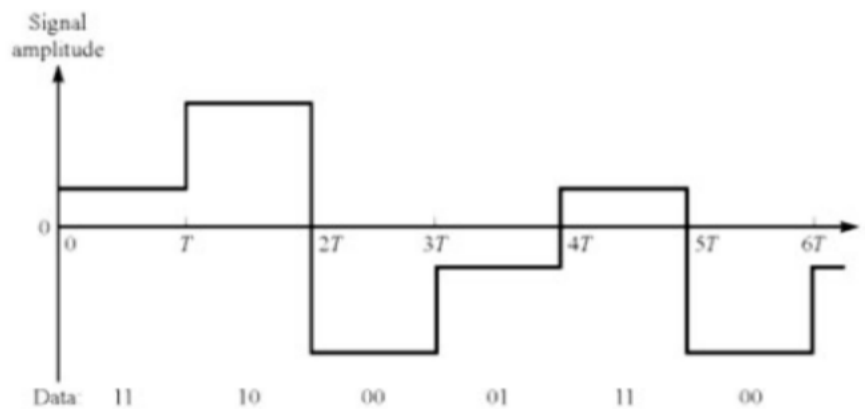
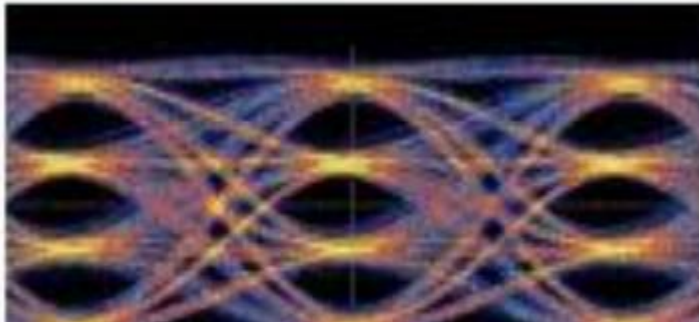
Ως αποτέλεσμα όλων των παραπάνω διαπιστώσεων, έχει προταθεί ένα απλό σχήμα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης βασισμένο σε διαμόρφωση εύρους παλμών με τέσσερα επίπεδα πλάτους (Pulse Amplitude Modulation - PAM-4) με ευρεία χρήση εντός και μεταξύ υπολογιστικών κέντρων (intra- inter- datacenter). Το σχήμα διαμόρφωσης εύρους παλμών τεσσάρων σταθμών PAM-4 είναι μια τεχνική διαμόρφωσης όπου χρησιμοποιούνται 4 διαφορετικά πλάτη παλμού για τη μετάδοση των πληροφοριών. Τα επίπεδα πλάτους 1, 2, 3 και 4 αντιπροσωπεύονται από δύο δυαδικά ψηφία 00, 01, 11 και 10 αντίστοιχα *Εικόνα 17*. Κάθε ζεύγος δυαδικών ψηφίων ονομάζεται "σύμβολο" (symbol). Όταν ένα από τα τέσσερα πλάτη μεταδίδεται σε μια περίοδο συμβόλων, υπάρχουν δύο δυαδικά ψηφία που μεταδίδονται παράλληλα, επομένως ο ρυθμός δεδομένων διπλασιάζεται. Με άλλα λόγια, η διαμόρφωση PAM-4 είναι διπλάσια από την συμβατική δυαδική διαμόρφωση ΟΟΚ. Η μαθηματική έκφραση που αποδίδει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (bitrate) σε ένα οπτικό σύστημα επικοινωνιών είναι η ακόλουθη:

$$\text{Bit rate} = \text{Baud (or symbol)rate} \times \text{Number of bits per symbol}$$

Καθοριστική παράμετρος για συστήματα μετάδοσης πληροφορίας με σχήματα διαμόρφωσης PAM-4 αποτελεί ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (symbol or baud rate) ο οποίος αναφέρεται στον ρυθμό αλλαγής σταθμών που λαμβάνει χώρα σε ένα διάστημα μετάδοσης. Ο ρυθμός μετάδοσης ψηφίων (bitrate) μπορεί να είναι ο ίδιος ή μεγαλύτερος από τον ρυθμό μετάδοσης συμβόλων ανάλογα με τον αριθμό των ψηφίων που αποτελούν ένα σύμβολο όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση. Για μετάδοση με σχήματα διαμόρφωσης ΟΟΚ το σήμα λαμβάνει δύο τιμές λογικής στάθμης 0 ή 1 για ένα παράθυρο μετάδοσης δημιουργώντας ένα σύστημα μετάδοσης δύο σταθμών όπου κάθε στάθμη χαρακτηρίζεται από ένα δυαδικό ψηφίο. Για το σχήμα διαμόρφωσης NRZ ο ρυθμός μετάδοσης ψηφίων είναι ίσος με τον ρυθμό μετάδοσης συμβόλων μιας και κάθε σύμβολο που μεταδίδεται αποτελείται από ένα δυαδικό ψηφίο. Από την άλλη πλευρά, κατά την χρήση σχημάτων διαμόρφωσης εύρους παλμού PAM-4 διπλασιάζεται ο ρυθμός μετάδοσης ψηφίων (bitrate) για τον ίδιο ρυθμό συμβόλων (symbolrate) με δεδομένο ότι κάθε σύμβολο αυτή την φορά χαρακτηρίζεται από 2 δυαδικά ψηφία. Τα δύο δυαδικά ψηφία ανά σύμβολο που μπορούν να μεταδοθούν όπως έχει ήδη αναφερθεί μπορεί να είναι τα ακόλουθα: 00, 11, 01, 10 δημιουργώντας ένα σύστημα μετάδοσης τεσσάρων σταθμών ώστε να αναπαρασταθούν τα τέσσερα διαφορετικά μοτίβα (pattern) ψηφίων πληροφορίας. Επιπλέον παρατίθεται στην *Εικόνα*

16 ένα τυπικό διάγραμμα οφθαλμού το οποίο αντιστοιχεί στην λήψη ενός οπτικού σήματος διαμόρφωσης PAM-4.

Στην περίπτωση όπως αναφέρθηκε της ύπαρξης σταθερού εύρους ζώνης, η μετάδοση πληροφορίας με σχήμα διαμόρφωσης PAM-4 επιτρέπει διπλάσια χωρητικότητα μετάδοσης σε σύγκριση με τη δυαδική διαμόρφωση OOK, πληρώνοντας ταυτόχρονα το κόστος της ανάγκης ύπαρξης υψηλότερου απαιτούμενου λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα επιπρόσθετα επίπεδα σταθμών για την διαμόρφωση PAM-4 μειώνουν την απόσταση μεταξύ των σταθμών και επομένως το σήμα με σχήμα διαμόρφωσης PAM-4 είναι πιο ευαίσθητο σε θόρυβο από ένα δυαδικό ψηφιακό σήμα. Επομένως είναι σαφές, ότι η διαμόρφωση PAM-4 είναι αποδοτικότερη και χρησιμοποιείται συνήθως για οπτικά συστήματα κοντινών αποστάσεων όπου μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερο SNR. Αυτός είναι επίσης ο λόγος για τον οποίο μια διαμόρφωση υψηλότερης τάξης, όπως αυτή του PAM8, που χαρακτηρίζεται από  $2^3$  επίπεδα λογικών σταθμών και μπορεί να τριπλασιάσει θεωρητικά την μεταδιδόμενο ρυθμό πληροφορίας, είναι δυσκολότερο να χρησιμοποιηθεί ακόμη και σε ένα σύστημα κοντινών αποστάσεων.



Εικόνα 16 Αναπαράσταση ενός PAM4 οπτικού σήματος στο πεδίο του χρόνου, όπου  $T$  είναι η παράμετρος της περιόδου του συμβόλου



## 2.4 Φαινόμενο Χρωματικής Διασποράς

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της χρωματικής διασποράς (chromatic dispersion) ενός υλικού σε Η/Μ κύμα που κυματοδηγείται μέσα από αυτό, θα θεωρήσουμε την ιδανική περίπτωση ενός ομογενούς, συμπαγούς και με άπειρες διαστάσεις υλικού. Με τον τρόπο αυτό δεν θα συνυπολογιστούν φαινόμενα κυματοδήγησης που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτού. Θεωρώντας ότι το Η/Μ κύμα έχει διαμορφωθεί γύρω από μία φέρουσα  $\omega_0$ , με τη μορφή γκαουσιανού παλμού, μπορεί να γραφεί στο πεδίο του χρόνου ως εξής:

$$E(0, \omega) = E_0 \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{t^2}{T^2}\right] \exp(j\omega_0 t) \quad (2.11)$$

, και στο πεδίο των συχνοτήτων ως:

$$E(0, \omega) = \frac{E_0}{\sqrt{2\pi}\Delta\omega} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\omega - \omega_0)^2}{\Delta\omega^2}\right] \quad (2.12)$$

, όπου  $\Delta\omega$ : το ημίσειο εύρος ζώνης παλμού στο σημείο όπου η ισχύς του είναι ίση με το 1/e' της αρχικής.

Έχοντας ο παλμός διανύσει απόσταση ίση με  $z$ , η κυματομορφή του μπορεί να γραφεί στο πεδίο του χρόνου ως εξής:

$$E(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(0, \omega) \exp j(\omega t - \beta(\omega)z) d\omega \quad (2.13)$$

, όπου  $\beta(\omega)$ : η σταθερά διάδοσης που εκφράζει την επίδραση του μέσου στο κυματοδηγούμενο πεδίο και είναι ανάλογη του δείκτη διάθλασης, ήτοι:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} \quad (2.14)$$

Η σταθερά διάδοσης, προκειμένου να μελετηθεί, μπορεί να αναπτυχθεί ως άθροισμα σειράς Taylor, γύρω από τη φέρουσα  $\omega_0$ , ως εξής:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2.15)$$

, όπου:

$$\beta_m = \left[ \frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right]_{\omega=\omega_0} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.16)$$

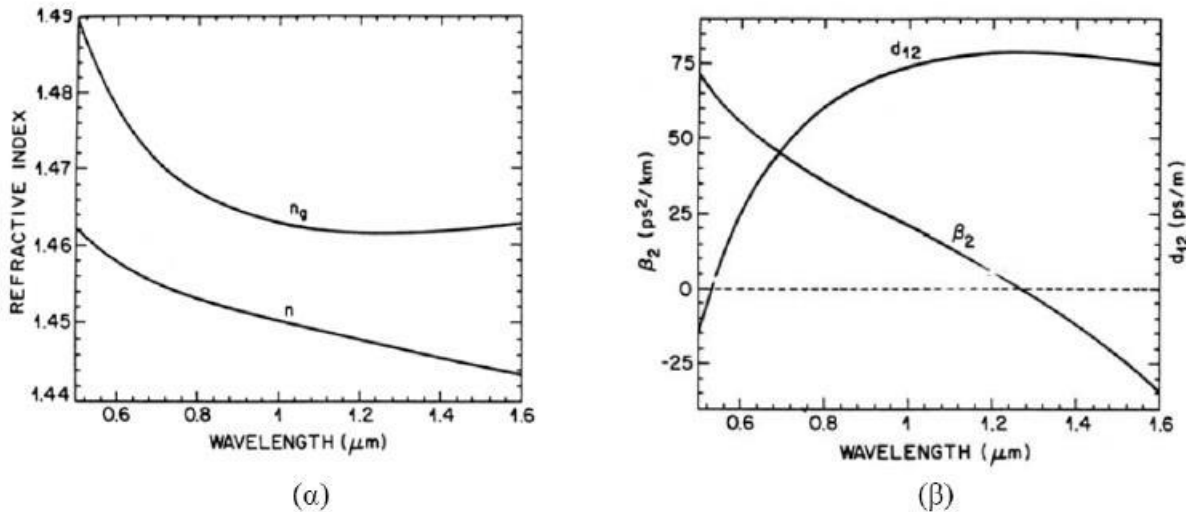
Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι ο όρος  $\beta_1$  είναι αντιστρόφως ανάλογος της ταχύτητας ομάδας, δηλαδή της ταχύτητας με την οποία ταξιδεύει ο παλμός μέσα στην ίνα, ενώ ο όρος  $\beta_2$  επιδρά στη διεύρυνση του παλμού. Οι δύο αυτοί όροι προσδιορίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\beta_1 = \frac{1}{c} \left[ n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right] = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{v_g} \quad (2.17)$$

και

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left[ n + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right] = \frac{\omega d^2 n}{c d\omega^2} = \frac{\lambda^3 d^2 n}{2\pi c^2 d\lambda^2} \quad (2.18)$$

, όπου  $n_g$  σταθερά που καλείται δείκτης ομάδας.



Εικόνα 18 α) Μεταβολή του δείκτη διάθλασης  $n$  και του δείκτη ομάδας  $n_g$  ως προς το μήκος κύματος, β) Μεταβολή της σταθεράς  $\beta_2$  ως προς το μήκος κύματος.

Στην *Εικόνα 18* φαίνεται η μεταβολή των  $n$ ,  $n_g$ ,  $\beta_2$  συναρτήσεων του μήκους κύματος. Παρατηρούμε ότι στην τιμή  $1.27\mu\text{m}$  μηδενίζεται ο όρος  $\beta_2$ , ο οποίος για μεγαλύτερα μήκη κύματος γίνεται αρνητικός. Το εν λόγω σημείο καλείται μήκος κύματος μηδενικής διασποράς  $\lambda_D$ . Στο σημείο αυτό, η ύπαρξη φαινομένων διασποράς οφείλεται εξ' ολοκλήρου σε όρους τρίτης τάξεως. Το σημείο αυτό αποτελεί και σημείο καμπής για την καμπύλη του δείκτη ομάδας. Έτσι, για μήκη κύματος μικρότερα του  $\lambda_D$  παρατηρούμε μείωση του δείκτη ομάδας. Αυτό σημαίνει ότι οι φασματικές συνιστώσες μεγαλύτερων μηκών κύματος έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτές των μικρότερων. Η περιοχή αυτή καλείται περιοχή ομαλής διασποράς. Για μήκη κύματος μεγαλύτερα του  $\lambda_D$  συμβαίνει το αντίθετο, και η αντίστοιχη περιοχή καλείται περιοχή ανώμαλης διασποράς.

Για τον υπολογισμό της παλμικής διεύρυνσης θα γίνει χρήση του ολοκληρώματος της σχέσης (2.13), με αντικατάσταση της σχέσης (2.15) σε αυτή. Το αποτέλεσμα αυτών είναι:

$$E(z, t) = \frac{E_0 [1 - j(\frac{\Delta\tau}{T})]^{1/2}}{[1 + (\frac{\Delta\tau}{T})^2]^{1/2}} \exp\left[\frac{-[t - (z/v_g)]^2}{2[T^2 + (\Delta\tau)^2]}\right] \exp\left[\frac{j(\Delta\tau/T)[t - (z/v_g)]^2}{2[T^2 + (\Delta\tau)^2]}\right] \exp[j(\omega_0 t - \beta_0 z)] \quad (2.19)$$

, όπου  $\Delta\tau = \beta_2 z / T$ .

Εξετάζοντας τον πρώτο παράγοντα της άνωθεν σχέσης προκύπτει ότι υπάρχει μείωση του πλάτους του οπτικού παλμού, λόγω της διασποράς. Εξετάζοντας τον δεύτερο παράγοντα, ο οποίος προσδιορίζει την περιβάλλουσα του οπτικού σήματος, προκύπτουν δύο συμπεράσματα. Πρώτον, το μέγιστο του παλμού διανύει απόσταση  $z$  μετά από χρόνο  $\tau_{g0} = \beta_1 z$ , που αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση της φασματικής συνιστώσας  $\omega_0$  να κυματοδηγηθεί στο ίδιο διάστημα. Δεύτερον, το ημίσειο εύρος του παλμού που αντιστοιχεί στο σημείο  $1/e$  έχει πλέον αυξηθεί στην τιμή:

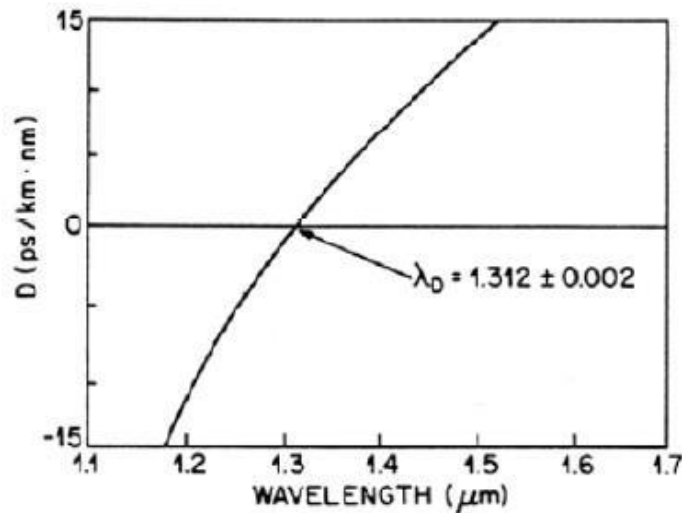
$$T' = (T^2 + (\Delta\tau)^2)^{1/2} \quad (2.20)$$

Ο τρίτος όρος της άνωθεν σχέσης φανερώνει μία διαμόρφωση συχνότητας, την οποία υφίσταται ο παλμός κατά την κυματοδηγήσή του λόγω διασποράς. Το φαινόμενο αυτό καλείται chirping.

Για τον υπολογισμό της διασποράς χρησιμοποιείται η παράμετρος διασποράς (dispersion parameter), η οποία μας δίνει τη μεταβολή της ταχύτητας ομάδας, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος, ως εξής:

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \approx \frac{-\lambda d^2 n}{e d \lambda^2} \quad (2.21)$$

Η παράμετρος αυτή χαρακτηρίζει την οπτική ίνα ως προς τις ιδιότητες της διασποράς της. Το πρόσημό της είναι αντίθετο από αυτό της παραμέτρου  $\beta_2$ , δηλαδή για την περιοχή ομαλής διασποράς ισχύει  $D < 0$ , ενώ για την περιοχή ανώμαλης διασποράς ισχύει  $D > 0$ , όπως απεικονίζεται σχηματικά παρακάτω:



Εικόνα 19 Μεταβολή της παραμέτρου διασποράς  $D$  σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για μονότροπη οπτική ίνα.

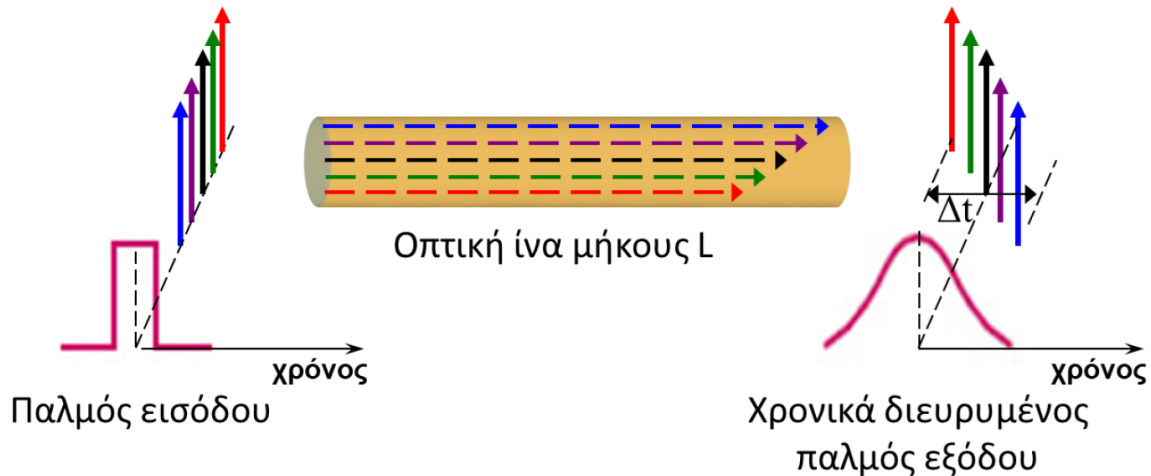
Τέλος, αξίζει να γίνουν δύο σημαντικές παρατηρήσεις. Πρώτον, η διασπορά δεν προκαλεί μόνο διεύρυνση του παλμού, αλλά και συμπίεση. Αυτό επιτυγχάνεται με κυματοδήγηση του παλμού στην περιοχή ομαλής διασποράς, όπου οι «χαμηλές» συχνότητες ταξιδεύουν πιο γρήγορα από τις «υψηλές».

Δεύτερον, μεταβάλλοντας κάποιες παραμέτρους όπως τη σχετική διαφορά  $\Delta$  των δεικτών διάθλασης του πυρήνα και του μανδύα, καθώς και τη διάμετρο του πυρήνα, δύναται να μετατοπιστεί το σημείο μηδενισμού του παράγοντα  $D$  (ή  $\beta_2$ ).

Με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, καθίσταται εμφανές ότι η χρωματική διασπορά επιφέρει χρονική διαπλάτυνση του παλμού *Εικόνα 20* με αποτέλεσμα την εμφάνιση διασυμβολικής παρεμβολής, κατά την οποία γειτονικά σύμβολα αλληλοκαλύπτονται χρονικά,

επιφέροντας αύξηση της πιθανότητας λάθους κατά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης στην πλευρά του δέκτη.

Οι πλέον σύγχρονες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του φαινομένου αυτού, επικεντρώνονται στην αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς εξ ολοκλήρου στον ηλεκτρικό τομέα (electrical domain) ως ψηφιακό φίλτρο του τμήματος Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος (Digital Signal Processing, DSP).



Εικόνα 20 Μετάδοση διαφορετικών φασματικών συνιστωσών μέσω οπτικής ίνας με μη-μηδενική διασπορά και χρονική διεύρυνση του παλμού στην έξοδο αυτής.

## 2.5 Αντιμετώπιση της Χρωματικής Διασποράς στις Οπτικές Ύνες

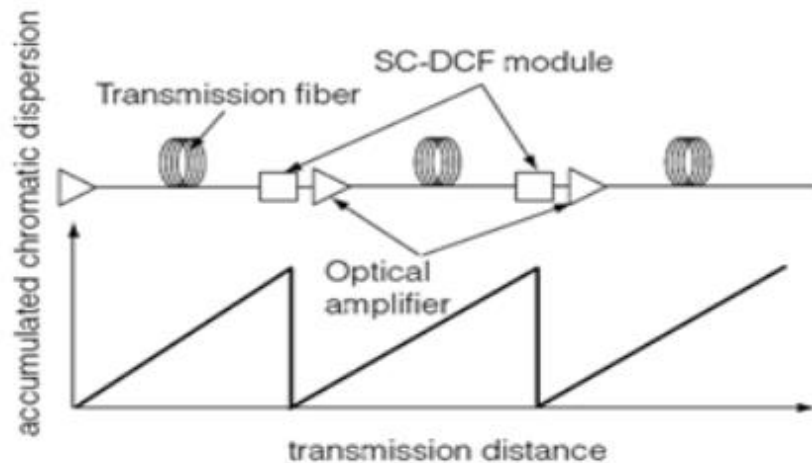
Όπως λοιπόν είδαμε και στο παραπάνω κεφάλαιο η αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς είναι από τα πιο σημαντικά προβλήματα που καλούμαστε να επιλύσουμε προκειμένου να καταφέρουμε την επιτυχή διάδοση της πληροφορίας μέσω οπτικής ίνας στις αποστάσεις που επιθυμούμε κάθε φορά. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε ορισμένους μόνο από τους πιο διαδεδομένους τρόπους που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου.

## 2.5.1 Ίνα Αντιστάθμισης Διασποράς (DCF)

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος είναι η αντιστάθμιση της διασπορά με ίνα DCF. Πιο συγκεκριμένα, η ίνα SC-DCF έχει αρνητική διασπορά και κλίση έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η χρωματική διασπορά της SSMF σε ένα ευρύ φάσμα μήκους κύματος, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, και εισάγεται είτε στην αρχή είτε στο τέλος του οπτικού κυκλώματος που σχεδιάζουμε κάθε φορά.

Έχει όμως κάποια σημαντικά μειονεκτήματα όπως είναι οι μεγάλες απώλειες εισόδου.

Καθώς το εύρος ζώνης της μετάδοσης είναι σταθερό, οι τιμές διασποράς της ίνας είναι αντιστρόφως ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας μετάδοσης και επομένως όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης των bit, τόσο πιο σημαντική είναι η αντιστάθμιση της συσσωρευμένης χρωματικής διασποράς του εύρους ζώνης που μεταδίδουμε. Στην περίπτωση που έχουμε μέθοδο non-return-to-zero η διασπορά είναι περίπου 100 ps/nm για ένα σήμα με συνολικό bandwidth 40Gbit/s.



Εικόνα 22 Οπτική απεικόνιση της αντιστάθμισης της διασποράς με χρήση ινών SC-DCF οι οποίες έχουν τοποθετηθεί σε ομοιόμορφα διαστήματα στην ίνα διάδοσης και αντισταθμίζουν τη συσσωρευμένη χρωματική διασπορά.

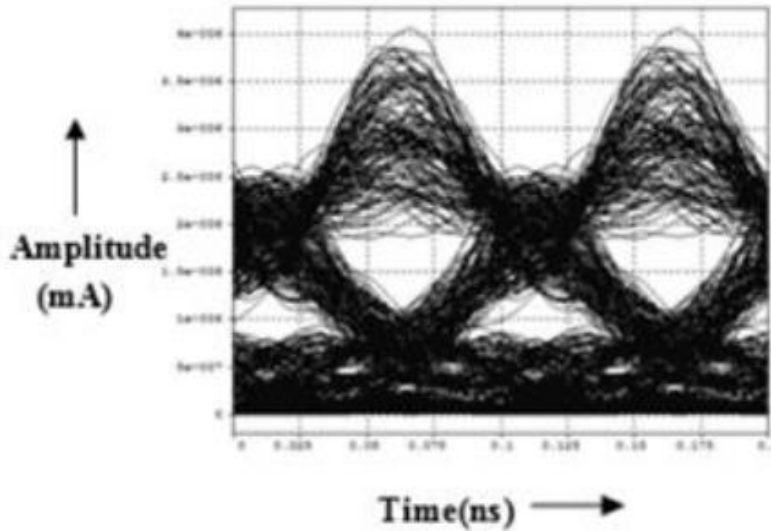
Η παραπάνω εικόνα δείχνει με ποιο τρόπο γίνεται η αντιστάθμιση της διασποράς. Ίνες SC-DCF έχουν τοποθετηθεί σε ομοιόμορφα διαστήματα στην ίνα διάδοσης και αντισταθμίζουν τη συσσωρευμένη χρωματική διασπορά. Έτσι η οπτική διασπορά που προκύπτει ανά διαστήματα μηδενίζεται και άρα δεν έχουμε παραμόρφωση στο σήμα εν τέλει.

Υπάρχουν δυο προϋποθέσεις για να βελτιωθεί η απόδοση των SC-DCF ινών. Η πρώτη είναι η μείωση των απωλειών εισόδου της SC-DCF ίνας σε οπτικά συστήματα μετάδοσης. Οι SC-DCF ίνες χαμηλών απωλειών συνεισφέρουν στη χαλάρωση των απαιτήσεων του οπτικού κέρδους για οπτικούς ενισχυτές και βελτιώνουν τον θόρυβο που προκαλούν αυτοί όπως και τη συνολική απόδοση των οπτικών συστημάτων μετάδοσης. Η άλλη προϋπόθεση είναι η σμίκρυνση των SC-DCF. Τα συστήματα DWDM αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων, και άρα η μείωση του μεγέθους του κάθε στοιχείου είναι μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις. Παρόλα αυτά είναι δύσκολο να επιτευχθούν και οι δύο προϋποθέσεις ταυτόχρονα.

## 2.5.2 Fiber Bragg Grating (FBG)

Η χρήση ινών FBG αποτελεί μια καλή λύση για την αντιστάθμιση της διασποράς που προκύπτει σε επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Πιο συγκεκριμένα σε αυτές της εφαρμογές προτιμάται η χρήση Chirped Fiber Grating (CFG). Οι CFG ίνες είναι ίνες με μικρές απώλειες εισόδου που είναι συμβατές κάθε φορά με το σύστημα μετάδοσης και οι απώλειες της μπορούν εύκολα να αποσοβηθούν. Οι ίνες CFG πρέπει να τοποθετούνται σε σειρά για καλύτερα αποτελέσματα. Αυτή η τεχνική προτιμάται επειδή ανάμεσα στα πλεονεκτήματα της είναι το μικρό αποτύπωμα, οι μικρές απώλειες εισόδου, η μεγάλη δυνατότητα για αντιστάθμιση διασποράς και τα αμελητέα μη γραμμικά φαινόμενα. Παρόλα αυτά η αρχιτεκτονική της τεχνικής της είναι πολύ σύνθετη.

Πιο συγκεκριμένα οι ίνες FBG έχουν μια περιοδική διαταραχή του δείκτη διάθλασης κατά μήκος του μήκους της ίνας που σχηματίζεται από την έκθεση του πυρήνα σε ένα έντονο μοτίβο οπτικής παρεμβολής. Εκτοξεύοντας έντονη ακτινοβολία ιόντων αργού σε μια ίνα νοθευμένη με γερμάνιο, παρατηρούμε ότι μετά από αρκετά λεπτά σημειώθηκε μια αύξηση στην ένταση του ανακλώμενου φωτός, η οποία αυξήθηκε έως ότου να αντανακλάται σχεδόν όλο το φως από την ίνα. Οι μετρήσεις του φάσματος, επιβεβαίωσαν ότι ένα πολύ στενής ζώνης φίλτρο πλέγματος Bragg είχε σχηματιστεί σε ολόκληρο το μήκος της ίνας. Αυτό το επίτευγμα, ονομάστηκε στη συνέχεια «Hill gratings».

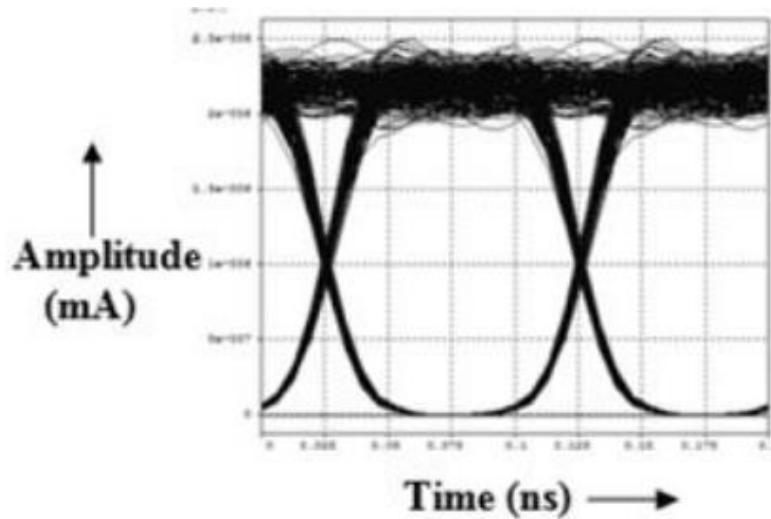


Εικόνα 23 Διάγραμμα ματιού πριν την αντιστάθμιση

Πιο συγκεκριμένα, για ένα μήκος κύματος εισόδου ίσο με το μισό της περιόδου επανάληψης  $\Lambda$ , τα κύματα που ανακλώνται σε κάθε περιοδική αλλαγή του δείκτη διάθλασης αθροίζονται σε φάση. Το πλέγμα λειτουργεί ως ανακλαστήρας καθώς όλες οι ανακλώμενες δέσμες αθροίζονται σε φάση μεταξύ τους. Το ανακλώμενο μήκος κύματος υπακούει στο νόμο του Bragg,  $\Lambda = \lambda/2$ , όπου το  $\lambda$  μετριέται στον πυρήνα της ίνας.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα διαγράμματα ματιού πριν και μετά την αντιστάθμιση.





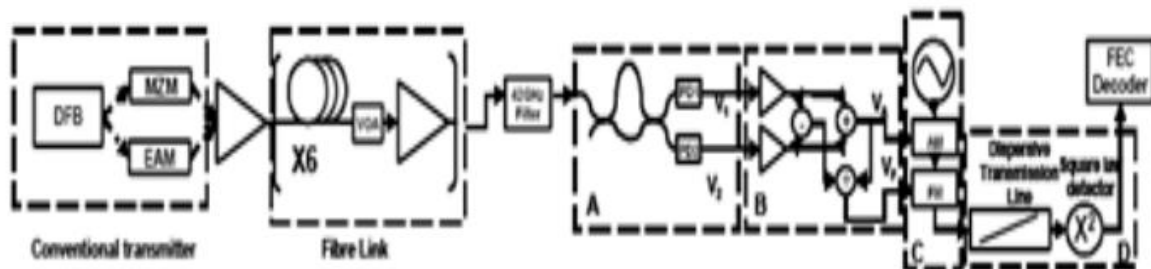
Εικόνα 24 Διάγραμμα ματιού μετά την αντιστάθμιση

Ο τρόπος της πέρα της τα πλεονεκτήματα που αναφέραμε παραπάνω, έχει αρκετά μειονεκτήματα. Μερικά της αυτά είναι τα εξής:

- **Κόστος:** Η κατασκευή και η εγκατάσταση των FBG συστημάτων μπορεί να είναι σχετικά ακριβή, ειδικά για μεγάλα συστήματα ή όταν απαιτούνται πολλοί αισθητήρες.
- **Ευαισθησία στη Θερμοκρασία:** Παρά το γεγονός ότι οι FBG είναι ανθεκτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να υπάρξουν προκλήσεις στην ακρίβεια λόγω των διακυμάνσεων θερμοκρασίας.
- **Περιορισμένη Διαθεσιμότητα Συχνοτήτων:** Σε ορισμένες περιπτώσεις, η διαθεσιμότητα συγκεκριμένων συχνοτήτων για της FBG ενδέχεται να είναι περιορισμένη.
- **Ευαισθησία σε Μηχανικούς Κραδασμούς:** Οι FBG είναι ευαίσθητοι σε ορισμένους μηχανικούς κραδασμούς, που μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές ή απώλεια ακρίβειας.

### 2.5.3 Ηλεκτρονική Αντιστάθμιση Διασποράς (EDC)

Σε αυτή τη μέθοδο, όπως φαίνεται και στο όνομά της, χρησιμοποιούνται τεχνικές ηλεκτρονικής αντιστάθμισης της διασποράς. Δεδομένου ότι ο δέκτης μπορεί να ανιχνεύσει άμεσα γραμμικές παραμορφώσεις της είναι η χρωματική διασπορά, αυτές μεταφράζονται σε μη γραμμικές παραμορφώσεις όταν το σήμα μετατρέπεται από οπτικό σε ηλεκτρικό. Για αυτό το λόγο μπορεί να εφαρμοστεί η έννοια της μη γραμμικής ακύρωσης και η μη γραμμική μοντελοποίηση καναλιών. Έτσι χρησιμοποιούνται δομές όπως feed forward equalizer (FFE) και decision feedback equalizers (DFE). Η ηλεκτρονική αντιστάθμιση διασποράς της είναι μια μέθοδος η οποία επιβραδύνει την ταχύτητα της επικοινωνίας καθώς επιβραδύνεται από τη μετατροπή του ψηφιακού σε αναλογικό σήμα.



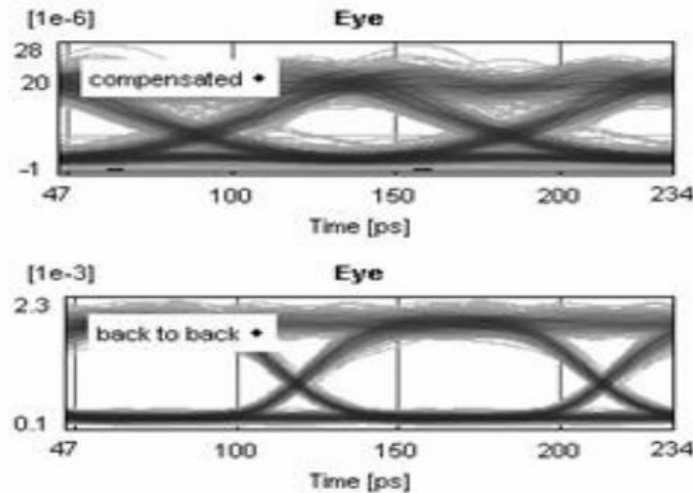
**Figure. VII. Schematic diagram of EDC**

*Εικόνα 25 Σχηματικό Διάγραμμα EDC*

Πιο συγκεκριμένα, παραπάνω παρουσιάζεται ενδεικτικά μια διάταξη στην οποία χρησιμοποιείται ο τρόπος αντιμετώπισης της διασποράς που παρουσιάσαμε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ένα διάγραμμα της EDC δέκτη. Χρησιμοποιείται ένα διαμορφωτής Mach – Zehnder, που οδηγείται στο βέλτιστο σημείο του για να μη προκαλεί μη γραμμικότητες. Της ο διαμορφωτής έχει καθυστέρηση 5 ps και λειτουργεί ως περιοδικό φίλτρο 200 GHz, το οποίο είναι συμβατό με το πλέγμα συχνοτήτων ITU. Το σήμα λαμβάνεται από δύο φωτοδιόδους με bandwidth 12GHz, και παράγονται δυο διαφορετικά ηλεκτρικά σήματα  $V_1$  και  $V_2$ , τα οποία εξαρτώνται από τη στιγμιαία συχνότητα ( $\Delta\omega$ ) και το πλάτος ( $A$ ) του οπτικού πεδίου που λαμβάνουμε. Τα μπλοκ B, C και D μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας είτε αναλογικά είτε ψηφιακά ηλεκτρονικά. Το μπλοκ B παράγει δυο ηλεκτρικά σήματα  $V_A = V_1 + V_2$  και  $V_F = (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2)$ , τα οποία είναι ανάλογα με την ισχύ και τη στιγμιαία συχνότητα του λαμβανόμενου οπτικού πεδίου. Στο μπλοκ C, της τοπικός ταλαντωτής διαμορφώνεται σε ισχύ και συχνότητα χρησιμοποιώντας τα  $V_A$  και  $V_F$  αντίστοιχα για να δώσει ένα αντίγραφο του λαμβανόμενου σήματος. Τέλος, μια γραμμή μετάδοσης διασποράς εξισώνει την καθυστέρηση ομάδας. Αυτό ακολουθείται από αποκωδικοποίηση EFEC που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση του πρωτότυπου σήματος από το ηλεκτρονικό αντίγραφο του.

Κατά την είσοδο στον δέκτη, το σήμα προενισχύθηκε και πέρασε από ένα οπτικό φίλτρο Gaussian τρίτης τάξης εύρους ζώνης 42 GHz. Το ενισχυμένο σήμα πέρασε από το οπτικό τμήμα του δέκτη και στα μπλοκ A και B παράγονται οι δύο τάσεις VA και VF.

Το μπλοκ C περιλαμβάνει έναν ταλαντωτή υψηλής συχνότητας εντός του εύρους ζώνης προσομοίωσης και ιδανικούς διαμορφωτές ισχύος και συχνότητας για τη δημιουργία του σήματος με μετατόπιση της τα κάτω. Η γραμμική διασπορά και η συνολική απόκριση συχνότητας κυκλώματος εφαρμόστηκαν στο Block D με συνολικό εύρος ζώνης μονής όψης 8 GHz.

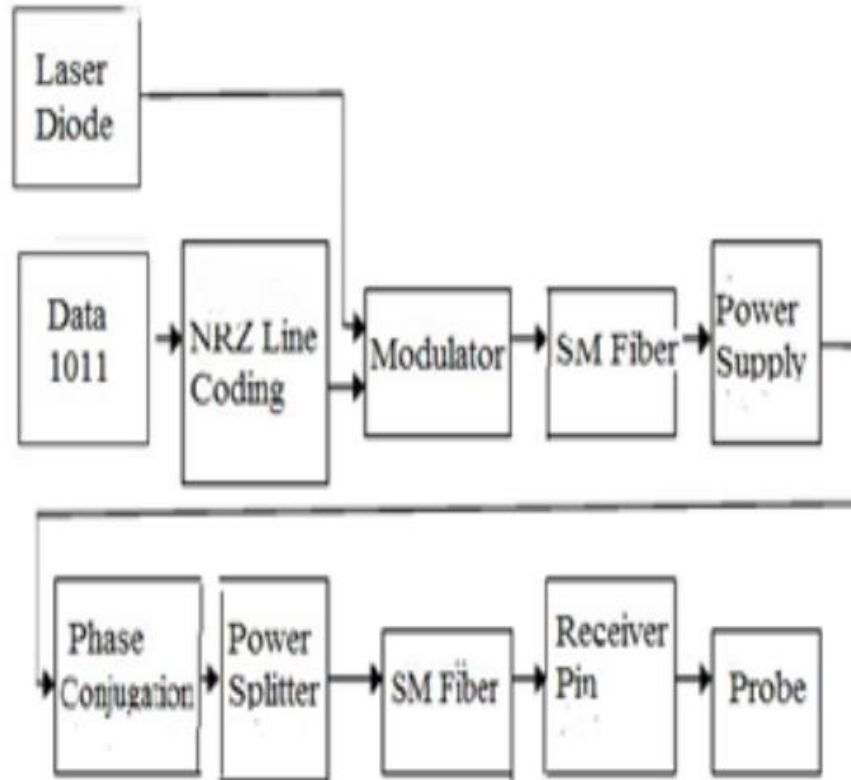


Εικόνα 26 Διάγραμμα οφθαλμού πριν και μετά τη διόρθωση του σήματος.

## 2.5.4 Τεχνικές Οπτικής Σύζευξης της Φάσης (OPC)

Ένας άλλος τρόπος που χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της διασποράς είναι οι τεχνικές οπτικής σύζευξης φάσης. Πιο συγκεκριμένα, η σύζευξη φάσης είναι ένα φαινόμενο το οποίο παρουσιάζει πολύ ασυνήθιστα χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Για να επιτευχθεί η αποτελεσματική αντιστάθμιση της παραμόρφωσης της κυματομορφής λόγω της χρωματικής διασποράς σε μια μονοτροπική ίνα, χρησιμοποιείται ένα κύμα συζυγούς οπτικής φάσης (OPC) που δημιουργήθηκε από το φαινόμενο του four wave mixing σε μια μονοτροπική ίνα μηδενικής διασποράς.

Η επιτυχής μετάδοση 5Gb/s και 6Gb/s σήματος συνεχούς φάσης FSK (CPFSK) μέσω μιας single mode ίνας, και συνεπώς η πλήρης αντιστάθμιση της διασποράς επαληθεύεται και με τον υπολογισμό του bit error rate.



Εικόνα 27 Σχηματική διάταξη η οποία συνδυάζει έναν πομπό, μια ίνα που αποτελείται από δύο κόμβους, έναν συζεύκτη φάσης και έναν δέκτη.

Παραπάνω παρουσιάζεται μια σχηματική διάταξη η οποία συνδυάζει έναν πομπό, μια ίνα που αποτελείται από δύο κόμβους, έναν συζεύκτη φάσης και έναν δέκτη. Μέσα από αυτή τη διάταξη μια σειρά δεδομένων NRZ 10 Gb/s, αποστέλλεται μέσω του πρώτου κόμβου χωρίς απώλειες. Για τις ίνες αυτές η διασπορά ορίζεται σε  $D = 16 \text{ ps/nm/km}$  ενώ η μέγιστη ισχύς ορίζεται σε  $-3 \text{ dBm}$ . Ωστόσο, μετά από 1000 χιλιόμετρα, το διάγραμμα ματιού δείχνει ένα εντελώς κλειστό μάτι, λόγω της συσσωρευμένης χρωματικής διασποράς.

Για να διορθωθεί αυτό το φαινόμενο, το σήμα περνάει από ένα σύστημα OPC και ίνα μήκους 1000χλμ. Με αυτό το τρόπο παρατηρούμε πως, στην έξοδο της δεύτερης ίνας το μάτι είναι πλήρως ανοιχτό. Έτσι επιβεβαιώνετε αυτό που είναι ήδη γνωστό από τη θεωρία, πως δηλαδή αν τοποθετήσουμε ένα OPC ανάμεσα σε δυο παρόμοιες ίνες μπορεί να αντισταθμιστεί η διασπορά μετά τη δεύτερη ίνα.

Παρόλα όμως τα θετικά που έχει αυτός ο τρόπος αντιμετώπισης της διασποράς, δε μπορούμε παρά να αναφέρουμε πως έχει και κάποια αρνητικά τα οποία περιορίζουν την χρήση του. Μερικά από αυτά είναι:

**1) Πολυπλοκότητα του Συστήματος:** Η υλοποίηση της τεχνικής OPC απαιτεί συνήθως πολύπλοκα οπτικά συστήματα και συγκεκριμένο εξοπλισμό. Αυτό καθιστά τα συστήματα που χρησιμοποιούν OPC ακριβά και δύσκολα στη συντήρηση.

**2) Ευαισθησία στη Σταθερότητα:** Η επίδοση της OPC μπορεί να είναι ευαίσθητη σε διάφορες παραμέτρους όπως η σταθερότητα του φωτός και η σταθερότητα του συστήματος. Αυτό μπορεί να καθιστά δύσκολη την εφαρμογή της σε πραγματικές συνθήκες.

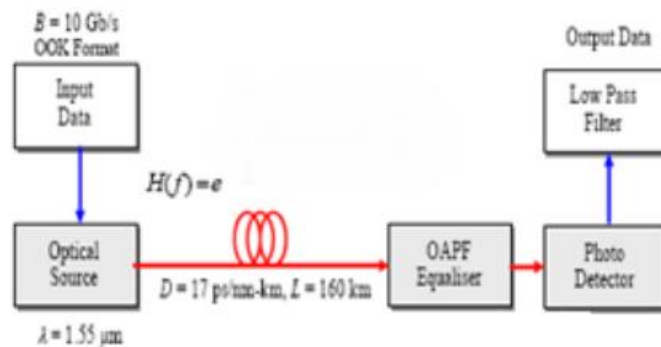
**3) Απώλειες Φωτός:** Κατά τη διαδικασία της οπτικής φάσης συζεύξης, μπορεί να παρουσιαστούν απώλειες φωτός, καθώς υπάρχουν πολλά οπτικά στάδια και στοιχεία που επηρεάζουν την απόδοση.

**4) Περιορισμένο Εύρος Κύματος:** Η αποτελεσματικότητα της OPC μπορεί να είναι περιορισμένη σε συγκεκριμένα εύρη κύματος. Αυτό σημαίνει ότι η τεχνική μπορεί να μην είναι ιδανική για όλα τα οπτικά φάσματα.

**5) Περιορισμένη Εφαρμογή:** Η OPC συνήθως χρησιμοποιείται για συγκεκριμένες εφαρμογές και δεν είναι πάντα η καλύτερη λύση για όλα τα οπτικά προβλήματα, ειδικά όταν λαμβάνονται υπόψη οι ανωμαλίες που μπορεί να προκύψουν σε πολύπλοκα οπτικά περιβάλλοντα.

## 2.4.5 Ψηφιακά Φίλτρα

Τέλος ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους για την αντιμετώπιση της διασποράς είναι η χρήση ψηφιακών φίλτρων, η χρήση δηλαδή τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP). Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζονται τα φαινόμενα της διασποράς σε ένα μεγάλο φάσμα των συχνοτήτων που χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε συστήματα στα οποία πολυπλέκονται πολλά μήκη κύματος. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι all-pass οπτικά φίλτρα, τα οποία μπορούν να προσεγγίσουν την επιθυμητή απόκριση φάσης ενώ διατηρούν μια σταθερή απόκριση πλάτους. Άλλα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι ζωνοπερατά φίλτρα, Gaussian, Super Gaussian, Butterworth και μικροκυματικά φωτονικά φίλτρα.



Εικόνα 28 Οπτική Διάταξη με ψηφιακά φίλτρα

Η παραπάνω διάταξη περιγράφει ένα σενάριο στο οποίο αντισταθμίζουμε τη χρωματική διασπορά της ίνας με τη χρήση φίλτρων. Όπως βλέπουμε στην εικόνα, έχουμε έναν παλμό non return to zero (NRZ) on off keying (OOK) 10GB/s, μήκος κύματος 1.55μm, μήκος της ίνας ίσο με 160Km με διασπορά  $D = 17 \text{ ps/nm-km}$ , μία φωτοδίοδο και ένα βαθυπερατό φίλτρο Butterworth δεύτερης τάξης.

Ένα φίλτρο All pass (APF) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξισορροπηθεί η φάση ενός σήματος χωρίς να παραμορφωθεί το πλάτος. Από τη συνάρτηση μεταφοράς ενός οπτικού APF (OAPF), η απόκριση φάσης μπορεί να οριστεί αυθαίρετα σε κοντά σε όποια τιμή θέλουμε. Αν σχεδιαστούν σωστά, υπάρχει η δυνατότητα να είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στα συστήματα μετάδοσης αφού μπορούν να αντισταθμίσουν οποιαδήποτε διασπορά με μικρές απώλειες έχοντας ταυτόχρονα πολύ μικρό μέγεθος.

Δεδομένου ότι η απόκριση OAPF είναι περιοδική, η ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) του OAPF μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε η απόκριση OAPF να συμπίπτει με κάθε ζώνη διέλευσης καναλιού παρέχοντας αντιστάθμιση διασποράς για πολλαπλά κανάλια σε ένα σύστημα WDM.

Τα OAPF έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν την εξαιρετικά σταθερή αντιστάθμιση διασποράς τρίτης τάξης σε συστήματα μετάδοσης οπτικών ινών. Ωστόσο, υπάρχει a tradeoff μεταξύ της μέγιστης καθυστέρησης ομάδας και του εύρους ζώνης καθώς και του FSR.

Η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας τον αριθμό των σταδίων ή σχεδιάζοντας τους πόλους και τα μηδενικά του OAPF πιο κοντά στον κύκλο της μονάδας, ωστόσο αυτό δημιουργεί πρακτικό πρόβλημα όπως αυξημένη πολυπλοκότητα ινών, μεγάλες απώλειες και μεγάλο κυματισμός GVD που παράγουν τα OAPF.

Στην πράξη ακόμα θα υπάρξει απώλεια που σχετίζεται με το OAPF με τη μορφή απωλειών σύζευξης, ωστόσο εάν η απώλεια είναι μικρή σε σχέση με το εύρος ζώνης, τότε η μείωση της απόδοσης θα είναι ελάχιστη. Τα OAPF είναι γραμμικά συστήματα που έχουν μοναδιαία απόκριση μεγέθους σε όλες τις συχνότητες ενώ η απόκριση φάσης των OAPF ποικίλλει ανάλογα με τη συχνότητα.

Πάνω σε αυτές τις ιδιότητες των φίλτρων βασίστηκε και η δικιά μας πρόταση που παρουσιάζεται σε αυτή τη διπλωματική. Την λογική της πρότασης αυτής θα την παρουσιάσουμε στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

# Κεφάλαιο 3 – Προτεινόμενος τρόπος αντιμετώπισης διασποράς

## 3.1- Θεωρητικό υπόβαθρο της προτεινόμενης λύσης

### 3.1.1 - Εξασθένιση ισχύος που προκαλείται από διασπορά

Σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης, με οπτική ίνα μήκους  $L$ , και σήμα εισόδου  $x(t)$  στο πεδίο του χρόνου, το οπτικό σήμα στην έξοδο  $y_{out}(t)$  προκύπτει από τη συνέλιξη του σήματος εισόδου με τη συνάρτηση μεταφοράς στο πεδίο του χρόνου. Η διασπορά που υπάρχει στην ίνα οδηγεί σε εξασθένιση της ισχύος, εξαιτίας της διαφοράς φάσης ανάμεσα στις άνω και κάτω πλευρικές ζώνες (LSB/USB). Μετά την ανίχνευση, αυτή η μετατόπιση φάσης μετατρέπεται σε μείωση ισχύος του σήματος εξόδου και ως εκ τούτου μείωση της αναλογίας σήματος προς θόρυβο (SNR). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η ισχύς στην έξοδο προκύπτει από τη σχέση:

$$P_{if} \propto \cos^2 \left[ \frac{\pi L D \lambda^2 f_{rf}^2}{c \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \arctan(a_{Mod}) \right]} \right] \quad (3.1)$$

, όπου  $L$  είναι το μήκος της ίνας,  $D$  ο συντελεστής διασποράς,  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $c$  η ταχύτητα του φωτός, και  $f_{rf}$ , η ραδιοσυχνότητα του φέροντος.

Επομένως με σταθερή τη συχνότητα  $f_{rf}$  και το μήκος της ίνας, έχουμε σαν αποτέλεσμα το φαινόμενο της περιοδικής ακύρωσης της ισχύος.

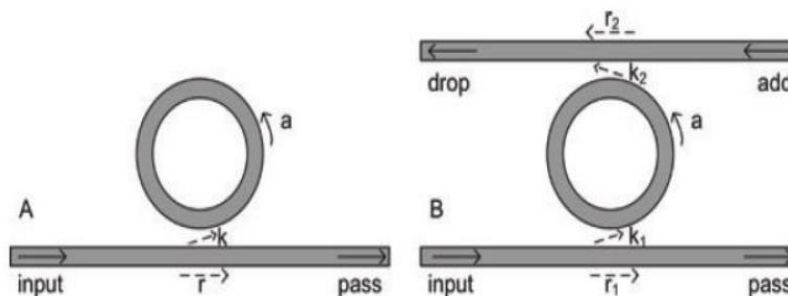
### 3.1.2 Δομές Δακτυλίων

Για να αντισταθμιστεί η εξασθένηση ισχύος που προκαλείται από τη διασπορά, προτείνουμε μια μέθοδο που βασίζεται στη χρήση ενός φωτονικού στοιχείου φιλτραρίσματος. Πιο συγκεκριμένα, εκμεταλλευόμαστε τόσο την απόκριση πλάτους του οπτικού φίλτρου για να καταστείουμε μία από τις δύο πλευρικές ζώνες όσο και τη μη γραμμική απόκριση φάσης για να μεγιστοποιήσουμε τη λαμβανόμενη Ισχύ Ραδιοσυχνότητας (RF) ελέγχοντας την καθυστέρηση ομάδας μεταξύ των μεταδιδόμενων πλευρικών ζωνών.

Η μέθοδος αυτή επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας πλήρως διαμορφώσιμα στοιχεία φιλτραρίσματος και πιο συγκεκριμένα δακτύλιους SOI. Το πλεονέκτημα αυτού του είδους στοιχείων φιλτραρίσματος συνδέεται με την βελτιωμένη ευελιξία τους όσον αφορά το εύρος ζώνης και το μήκος κύματος συντονισμού.

#### 3.1.2.1 Βασικές Δομές Δακτυλίων

Μια ολοκληρωμένη δομή δακτυλίου αποτελείται από έναν κυματοδηγό ο οποίος αποτελεί την κοιλότητα (cavity) του δακτυλίου, συνήθως κυκλικής μορφής, και έναν μηχανισμό σύζευξης της κοιλότητας αυτής με τον βασικό κυματοδηγό (bus waveguide). Όταν ο διαδιδόμενος ρυθμός εντός της κοιλότητας αποκτά τιμή φάσης ίση με το ακέραιο πολλαπλάσιο του  $2\pi$  τότε έχουμε θετική



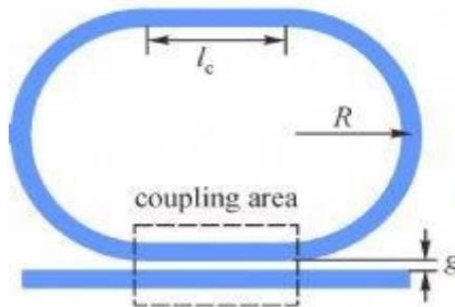
Εικόνα 29 (α) all-pass δομή δακτυλίου (APF) και (β) add-drop δομή δακτυλίου (ADRR)



συμβολή μεταξύ τους, και η κοιλότητα βρίσκεται σε κατάσταση συντονισμού. Αυτή η αρχή λειτουργίας θα αξιοποιηθεί και θα μελετηθεί, με σκοπό την μελέτη μιας σειράς δομών δακτυλίων ξεκινώντας από τις δύο βασικές υλοποιήσεις τέτοιων δομών, all-pass δομές δακτυλίων (All-Pass Filter, APF, *Εικόνα 29(α)*) και Add-Drop δομές δακτυλίων (Add-Drop Ring Resonator, ADRR, *Εικόνα 29(β)*).

## All-Pass δομές δακτυλίων

Στην πιο απλή μορφή του, ένα APF δημιουργείται όταν συνδέουμε την έξοδο ενός κατευθυντικού συζεύκτη (directional coupler) στην είσοδο του. Ουσιαστικά πρόκειται για μια κυκλική δομή δακτυλιδιού, πολλές φορές όμως το δακτυλίδι αποκτά ένα πιο πεπλατυσμένο σχήμα, όταν χρησιμοποιούμε ένα ευθύγραμμο τμήμα κυματοδηγού στην περιοχή σύζευξης, ώστε να γίνεται αυτή πιο αποτελεσματικά, αλλά και παρέχοντας τη δυνατότητα καλύτερου ελέγχου του συντελεστή σύζευξης. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται ο όρος racetrack ring resonator *Εικόνα 30*.



*Εικόνα 30* Δομή racetrack ring resonator

Οι βασικές ιδιότητες των δομών δακτυλίων είναι παρόμοιες ανεξαρτήτου σχήματος, μιας και καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των κυματοδηγών και κυρίως από το συνολικό μήκος της κοιλότητας, οπότε στην συνέχεια αυτής της ενότητας θα συζητήσουμε για δομές all-pass ring resonators. Θα υπολογίσουμε τις βασικές φασματικές ιδιότητες ενός τέτοιου φίλτρου υποθέτοντας λειτουργία συνεχούς κύματος (continuous wave, CW). Υποθέτοντας αμελητέες ανακλάσεις και

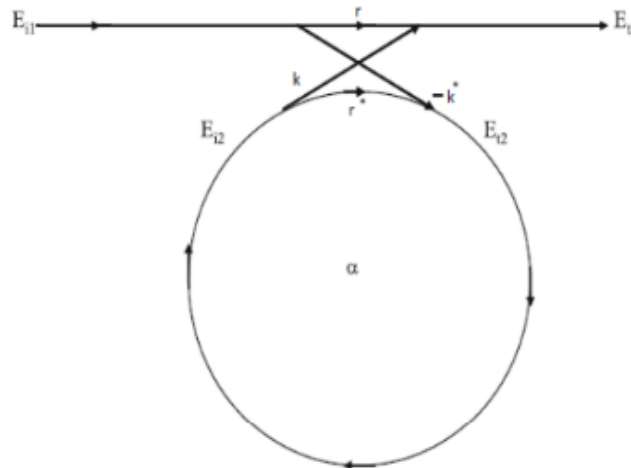
$$\frac{E_{\text{εξόδου}}}{E_{\text{εισόδου}}} = \exp(j(\pi + \varphi)) \frac{\alpha - r \exp(ij\varphi)}{1 - r\alpha \exp(j\varphi)} \quad (3.2)$$

οπισθοσκεδάσεις στον κύριο κυματοδηγό (κάτι που όμως πρακτικά δεν ισχύει πάντα), η τιμή του λόγου του ηλεκτρικού πεδίου στην είσοδο προς την έξοδο του φίλτρου θα είναι:

όπου  $\varphi = \beta L$  είναι η συσσώρευση φάσης,  $L$  το μήκος της κοιλότητας του δακτυλίου, και  $\beta$  η σταθερά διάδοσης του ρυθμού κυματοδήγησης εντός της δομής. Ως  $a$  ορίζουμε την τιμή απωλειών μετάδοσης, μέγεθος που συμπεριλαμβάνει τις απώλειες διάδοσης στο δακτύλιο αλλά και τις απώλειες σύζευξης με τον κύριο κυματοδηγό. Συνδυάζεται με τον συντελεστή απώλειας ισχύος  $\alpha$  (power attenuation coefficient) σύμφωνα με την σχέση  $\alpha^2 = e^{-2aL}$ . Αντίστοιχα, ο συντελεστής μετάδοσης  $T_n$  (intensity transmission coefficient) ισούται με:

$$T_n = \frac{a^2 - 2r \cos \varphi + r^2}{1 - 2r \cos \varphi + (ra)^2} \quad (3.3)$$

, όπου  $r$  είναι ο συντελεστής αυτοσύζευξης (self-coupling coefficient). Θα ορίσουμε παράλληλα τον συντελεστή ετεροσύζευξης ( $k$  - cross-coupling coefficient), έτσι ώστε  $r^2$  και  $k^2$  να είναι οι λόγοι διαμοιρασμού ισχύος του οπτικού συζεύκτη (Σχήμα 2-10). Θεωρούμε παράλληλα ότι δεν έχουμε απώλειες σύζευξης, ώστε  $r^2 + k^2 = 1$ . Η θεώρηση αυτή θα απλοποιήσει τους υπολογισμούς μας, εισάγοντας όμως σφάλματα στους συντελεστές μετάδοσης.



Εικόνα 31 Πεδία και συντελεστές σύζευξης σε μια δομή APF

Βρίσκουμε ότι η δομή δακτυλίου λειτουργεί υπό συντονισμό όταν η φάση  $\varphi$  είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του  $2\pi$  ή όταν το μήκος κύματος του φωτός "χωράει" ακέραιο αριθμό φορών μέσα στο οπτικό μήκος του δακτυλίου. Οπότε:

$$\lambda_{res} = \frac{n_{eff}L}{m}, \text{ όπου } m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.4)$$

Αν υποθέσουμε μηδενικές απώλειες στην δομή, δηλαδή  $\alpha \approx 1$ , ο συντελεστής διάδοσης είναι 1 για κάθε τιμή της φάσης  $\varphi$ . Όταν ικανοποιείται η συνθήκη του critical coupling, δηλαδή όταν η ενέργεια που περνά στο δακτυλίδι ισούται με τον συντελεστή απώλειας ενέργειας σε αυτό ( $r = a$ ),

$$\varphi_1 = \pi + \varphi + \arctan \frac{r \sin \varphi}{\alpha - r \cos \varphi} + \arctan \frac{r \sin \varphi}{1 - r \cos \varphi} \quad (3.5)$$

ο συντελεστής διάδοσης είναι 0 στον συντονισμό. Αυτό οφείλεται στην αναιρετική συμβολή των ηλεκτρικών πεδίων που διαδίδονται εντός της δομής. Η φάση αλλάζει ανάλογα με την συχνότητα του κύματος. Καθυστερούν δηλαδή τα ερχόμενα σήματα, αποθηκεύοντας την οπτική ενέργεια τους προσωρινά, εντός της κοιλότητας. Από την πρώτη εξίσωση μπορούμε να υπολογίσουμε την μετατόπιση φάσης  $\varphi_1$  λόγω του δακτυλιδιού:

Πιο συγκεκριμένα, αν υποθέσουμε ότι έχουμε μονορρυθμική μετάδοση, μηδενικές απώλειες στην σύζευξη, μετάδοση μόνο μιας πολωτικής κατάστασης, και ότι όλες οι απώλειες κατά την διάδοση του κύματος μέσα στην δομή ενσωματώνονται στον συντελεστή απώλειας  $\alpha$ , τότε μπορούμε να εξάγουμε τις τιμές των ηλεκτρικών πεδίων με την βοήθεια της εξής σχέσης:

$$\begin{pmatrix} E_{t1} \\ E_{t2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & k \\ -k^* & r^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Επειδή δεν έχουμε απώλειες σύζευξης γνωρίζουμε ότι  $|r|^2 + |k|^2 = 1$ . Για να απλοποιήσουμε παραπάνω την ανάλυση, θα θεωρήσουμε ότι  $E_{i1} = 1$ , οπότε μετά την διάδοση μέσα στην κοιλότητα

$$E_{t1} = \frac{-a + r \exp(-j\theta)}{-ar^* + \exp(-j\theta)} \quad (3.7)$$

$$E_{i2} = \frac{-ak^*}{-ar^* + \exp(-j\theta)} \quad (3.8)$$

$$E_{t2} = \frac{-k^*}{1 - ar^* \exp(j\theta)} \quad (3.9)$$

θα ισχύει  $E_{i2} = a \exp(j\theta E t 2)$ , όπου  $a$  οι απώλειες του δακτυλιδιού και  $\theta = \omega L/c$ , όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός μέσα στο υλικό ( $c = c_0/n_{eff}$ ), και  $\omega = kc_0$  η γωνιακή συχνότητα. Για τον κυματαριθμό  $k$  ισχύει  $k = 2\pi/\lambda$ . Για τα επιμέρους πλάτη των πεδίων μέσα στην δομή λοιπόν έχουμε:

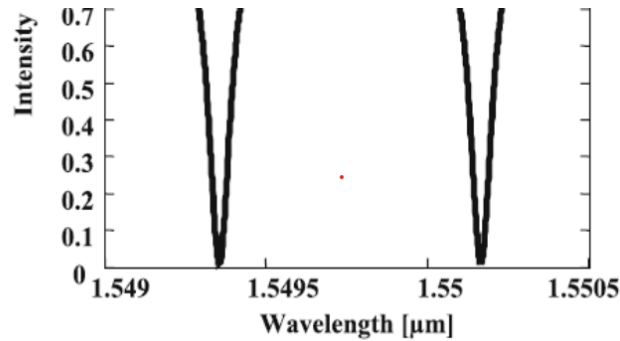
Έτσι λοιπόν προσδιορίζουμε την ισχύ εξόδου  $P_{t1}$  στον κυματοδηγό, που ισούται με:

$$P_{t1} = |E_{t1}|^2 = \frac{a^2 + |r|^2 - 2a|r|\cos(\theta + \varphi_t)}{1 + a^2|r|^2 - 2a|r|\cos(\theta + \varphi_t)} \quad (3.10)$$

Όταν παρουσιάζεται συντονισμός, δηλαδή  $(\theta + \varphi_t) = 2\pi m$ , όπου  $m$  ακέραιος, για τις παραπάνω τιμές ισχύος έχουμε:

$$P_{t1} = |E_{t1}|^2 = \frac{(a - |r|)^2}{(1 - a|r|)^2} \quad (3.11)$$

$$P_{i2} = |E_{i2}|^2 = \frac{a^2(1 - |r|)^2}{(1 - a|r|)^2} \quad (3.12)$$

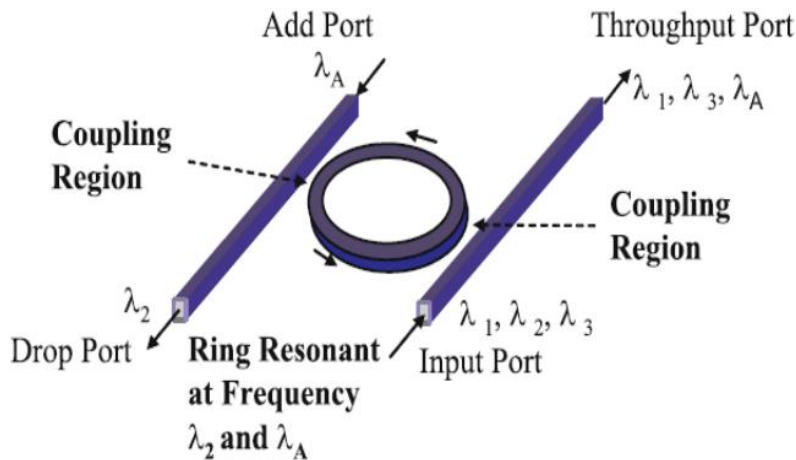


Εικόνα 32 Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην έξοδο ενός all-pass filter

Στην Εικόνα 32 παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφεται, συναρτήσει του μήκους κύματος λειτουργίας, για ικανοποίηση της συνθήκης του critical coupling και τιμή της ακτίνας της κοιλότητας δακτυλίου ίση με 148μm.

## Add-Drop δομές δακτυλίων

Όταν έχουμε σύζευξη του δακτυλίου με 2 κυματοδηγούς, έναν στο πάνω μέρος του και έναν στο κάτω μέρος του, τότε σχηματίζεται μια add-drop δομή δακτυλίου (Add-Drop Ring Resonator, ADRR). Σε αυτήν την περίπτωση μέρος του πεδίου κατευθύνεται προς στην drop έξοδο και το υπόλοιπο στην through (ή pass) έξοδο, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 33*.



*Εικόνα 33 Ένα ADRR επιλογής καναλιού. Μέσω της add εξόδου μπορούμε να βγάλουμε στην through έξοδο τα κανάλια/μήκη κύματος που θέλουμε ενώ μέσω της drop εξόδου μπορούμε να απαλλάξουμε το σήμα εισόδου από συγκεκριμένα μήκη κύματος.*

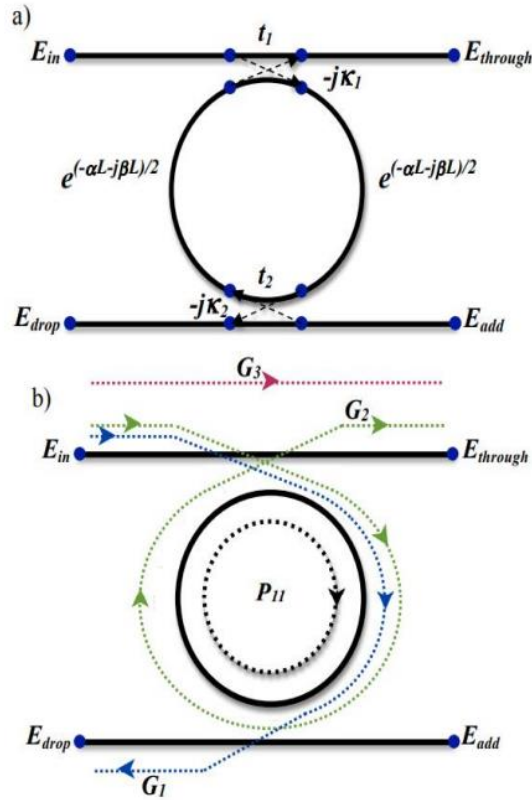
Οι συντελεστές μετάδοσης στις εξόδους through και drop είναι:

$$T_{through} = \frac{I_{εξόδου}}{I_{εισόδου}} = \frac{r_2^2 a^2 - 2r_1 r_2 a \cos\phi + r_1^2}{1 - 2r_1 r_2 a \cos\phi + (r_1 r_2 a)^2} \quad (3.13)$$

$$T_{drop} = \frac{I_{drop}}{I_{εισόδου}} = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)a}{1 - 2r_1 r_2 a \cos\phi + (r_1 r_2 a)^2} \quad (3.14)$$

Αν θεωρήσουμε αμελητέες απώλειες ( $\alpha \approx 1$ ) τότε έχουμε critical coupling όταν  $k_1 = k_2$ , δηλαδή όταν το ποσοστό της ενέργειας που πηγαίνει από τον κυματοδηγό εισόδου στον δακτύλιο ισούται με το ποσοστό της ενέργειας που πηγαίνει από τον δακτύλιο στον κυματοδηγό εξόδου (*Εικόνα*

34). Αν θεωρήσουμε μη αμελητέες απώλειες, δηλαδή  $\alpha < 1$ , τότε για να ικανοποιηθεί η συνθήκη του critical coupling, απαιτείται να ικανοποιείται η σχέση  $r_2 a = r_1$  σχετικά με την τιμή απωλειών.



Εικόνα 34 (α) Σχηματική αναπαράσταση ενός add-drop φίλτρου και (β) οι πορείες των πεδίων μέσα στο φίλτρο

Θα μελετήσουμε τώρα τη διάδοση των ηλεκτρικών πεδίων εντός της δομής Add-Drop Ring Resonator. Το πλάτος του πεδίου στην έξοδο through της δομής θα ισούται με:

$$E_{t1} = \frac{r_1 - r_2^* a \exp(j\theta)}{1 - r_1^* r_2^* a \exp(j\theta)} \quad (3.15)$$

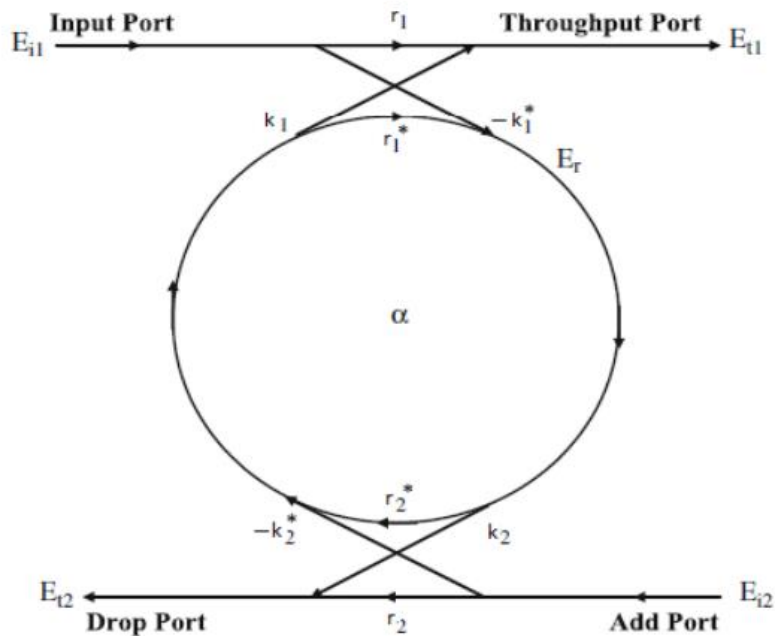
Ενώ στην έξοδο drop έχουμε:

$$E_{t2} = \frac{-k_1 k_2^* a_{1/2} \exp(j\theta_{1/2})}{1 - r_1^* r_2^* a \exp(j\theta)} \quad (3.16)$$

Όπου  $a_{1/2}$  και  $\theta_{1/2}$  αναπαριστούν την απώλεια και την φάση του ημικυκλίου μόνο. Ισχύει ότι  $a = a_{1/2} \times 2$  και  $\theta = \theta_{1/2} \times 2$ .

Στον συντονισμό επομένως, η ισχύς εξόδου στην έξοδο drop θα ισούται με:

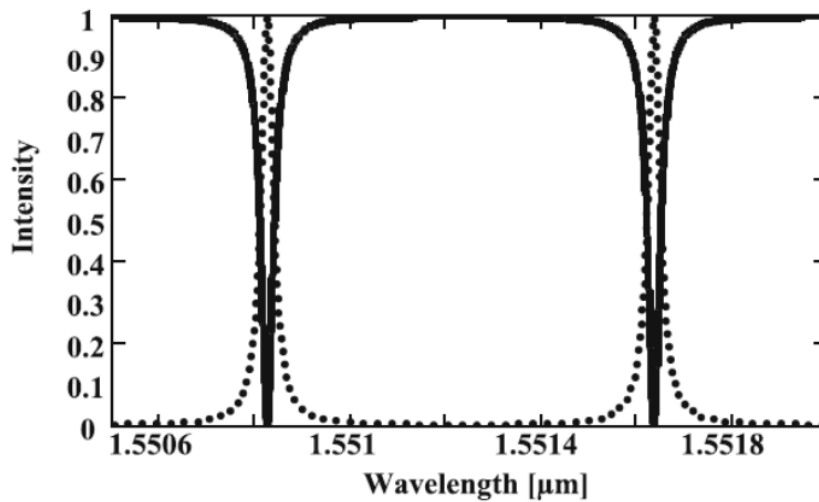
$$P_{t2} = |E_{t2}|^2 = \frac{(1 - |r_1|^2)(1 - |r_2|^2)a}{(1 - a|r_1 r_2|)^2} \quad (3.17)$$



Εικόνα 35 Πεδία και συντελεστές σύζευξης σε μια δομή ADRR

Το πεδίο στην έξοδο through θα είναι 0 στον συντονισμό, αν έχουμε ίδιους συντελεστές σύζευξης  $r_1 = r_2$  και αν  $a = 1$ , οπότε το μήκος κύματος στον συντονισμό απορροφάται πλήρως από το δακτυλίδι και την έξοδο drop. Ένας άλλος τρόπος να εξασφαλίσουμε πλάτος εξόδου 0 στην έξοδο through κατά τον συντονισμό είναι να ορίσουμε τους συντελεστές σύζευξης  $r_1, r_2$  έτσι ώστε:

Στην *Εικόνα 36* παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφεται, συναρτήσει του μήκους κύματος λειτουργίας, για ικανοποίηση της συνθήκης του critical coupling και τιμή της ακτίνας της κοιλότητας δακτυλίου ίση με 148  $\mu\text{m}$ .



*Εικόνα 36 Η ένταση του πεδίου εξόδου στην through έξοδο (συνεχόμενη γραμμή) και στην drop έξοδο (διακεκομμένη γραμμή).*

$$a = \left| \frac{r_1}{r_2} \right| \quad (3.18)$$

### Φασματικά χαρακτηριστικά δομών δακτυλίων

Οι φασματικές ιδιότητες μιας δομής δακτυλίου εξαρτώνται από τους συντελεστές απωλειών ισχύος και τους συντελεστές σύζευξης με τον/τους κυματοδηγούς, και μπορούν να υπολογιστούν με την βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων. Για παράδειγμα, το εύρος ζώνης ημίσεας ισχύος (Full Width at Half Maximum - FWHM), στην περιοχή συντονισμού ενός all-pass filter ισούται με:



$$FWHM = \frac{(1-ra)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{ra}} \quad (3.19)$$

Ενώ σε ένα add-drop ring resonator ισούται με:

$$FWHM = \frac{(1-r_1 r_2 a)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 a}} \quad (3.20)$$

Αν λάβουμε υπόψη μόνο την διασπορά πρώτης τάξης, η ελεύθερη φασματική περιοχή (Free Spectral Range - FSR), δηλαδή η φασματική απόσταση μεταξύ 2 μεγίστων η δύο συντονισμών ισούται με:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L} \quad (3.21)$$

Όπου  $L$  η περίμετρος του δακτυλιδιού και  $n_g$  ο δείκτης ομάδας. Η πλατφόρμα ολοκλήρωσης SOI (Silicon-on-insulator) δίνει την δυνατότητα κατασκευής κυματοδηγών με πολύ μικρές τιμές κάμψης (bend radius  $\geq 3\mu\text{m}$ ), χαρακτηριζόμενων από χαμηλό αριθμό απωλειών. Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας δύναται η δυνατότητα κατασκευής δομών δακτυλίων με υψηλότερη τιμή FSR, σε σύγκριση με οπτικά φίλτρα ολοκληρωμένα σε άλλες πλατφόρμες ολοκλήρωσης. Ο λόγος που στον παρονομαστή του FWHM και του FSR βρίσκουμε τον δείκτη ομάδας  $n_g$  και όχι τον ενεργό δείκτη διάθλασης  $n_{eff}$  είναι επειδή θέλουμε να συνυπολογίσουμε και την διασπορά που εισάγει ο κυματοδηγός. Ο  $n_g$  ορίζεται ως:

$$n_g = n_{eff} - \lambda_0 \frac{dn_{eff}}{d\lambda} \quad (3.22)$$

Ο δείκτης ομάδας, όπως και η ταχύτητα ομάδας  $v_g = c/n_g$ , περιγράφει την ταχύτητα με την οποία η περιβάλλουσα του διαδιδόμενου παλμού ταξιδεύει και εξαρτάται από το μέσο μετάδοσης (π.χ. το υλικό του κυματοδηγού). Ο παράγοντας ποιότητας της όπως αυτός μετριέται στην πόρτα εξόδου ισούται με  $T_i/R_{min}$ . Αν θεωρήσουμε all-pass δομή δακτυλίου, τα παραπάνω μεγέθη ισούνται με:

$$T_t = \frac{(r+a)^2}{(1+r a)^2} \quad (3.23)$$

$$R_{min} = \frac{(r-a)^2}{(1-r a)^2} \quad (3.24)$$

$$T_t = \frac{(r_2 a + r_1)^2}{(1+r_1 r_2 a)^2} \quad (3.25)$$

$$R_{min} = \frac{r_2^2 a^2 - 2r_1 r_2 a + r_1^2}{(1-r_1 r_2 a)^2} \quad (3.26)$$

$$T_{max} = \frac{(1-r_1^2)(1-r_2^2)a}{(1-r_1 r_2 a)^2} \quad (3.27)$$

$$T_d = \frac{(1-r_1^2)(1-r_2^2)a}{(1+r_1 r_2 a)^2} \quad (3.28)$$

Αν θεωρήσουμε add-drop δομή, τότε ορίζουμε τον λόγο απόσβεσης (Extinction Ratio - ER) ως  $T_{max}/T_d$  για την έξοδο drop. Όταν έχουμε συντονισμό, η τιμή του ER μεταξύ της εξόδου through και της εξόδου drop σε ένα ADRR, δίνεται από τον τύπο  $T_{max} / R_{min}$ . Τα παραπάνω μεγέθη ορίζονται ως:

Ένα άλλο μέγεθος που θα ορίσουμε είναι η λεπτότητα (Finesse – F), η οποία μας βοηθάει να εκτιμήσουμε πόσο μεγάλες είναι οι περιοχές συντονισμού σε σχέση με την μεταξύ τους απόσταση, και είναι ένδειξη της επιλεξιμότητας του φίλτρου. Επομένως:

$$Finesse = \frac{FSR}{FWHM} \quad (3.29)$$

Σημαντικό μέγεθος είναι και ο παράγοντας ποιότητας (Quality Factor - Q) που μας υποδεικνύει πόσο στενή είναι η περιοχή συντονισμού σε σχέση με την κεντρική του συχνότητα, δηλαδή:

$$Q = \frac{\lambda_{res}}{FWHM} \quad (3.30)$$

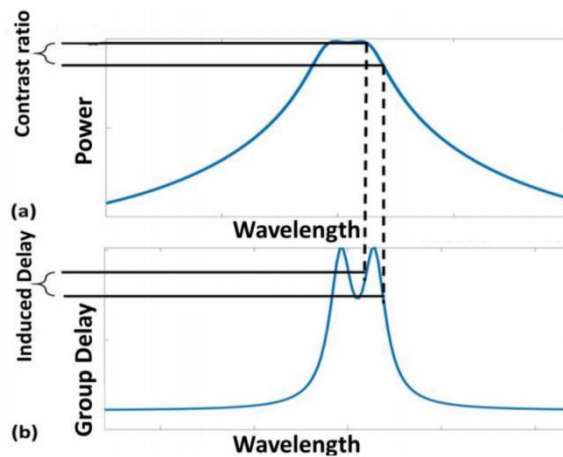
Τα μεγέθη  $Q$  και  $F$ , υποδεικνύουν τον αριθμό των φορών που το ηλεκτρικό πεδίο διαδίδεται εντός της κοιλότητας της δομής δακτυλίου πριν ουσιαστικά αποσβέσει, λόγω απωλειών και της

σύζευξης με τους κυματοδηγούς. Η λεπτότητα  $F$  αναπαριστά πόσες περιφορές πραγματοποιεί η ακτινοβολία στο δακτυλίδι πριν η ενέργεια της μειωθεί στο  $1/e$  της αρχικής της αξίας. Το  $Q$  αναπαριστά τον αριθμό των ταλαντώσεων του πεδίου προτού η ενέργεια του μειωθεί στο  $1/e$  της αρχικής. Για να υπολογίσουμε το  $Q$ , διεγείρουμε τη δομή δακτυλίου μέχρι ενός βαθμού και υπολογίζουμε την απώλεια ενέργειας. Με βάση τα προηγούμενα καταλαβαίνουμε ότι μία all-pass δομή θα παρουσιάσει καλύτερο  $Q$  από μία add-drop δομή, καθώς στην πρώτη περίπτωση έχουμε μικρότερες απώλειες λόγω coupling με έναν μόνο κυματοδηγό. Ο αριθμός των κυματοδηγών με τον οποίους είναι συζευγμένος ο δακτύλιος επηρεάζει την τιμή της ποσότητας  $Q$ , καθώς στην περίπτωση σύζευξης με πολλούς κυματοδηγούς, το  $Q$  μειώνεται λόγω αυξημένων απωλειών.

### 3.1.3 Αρχή λειτουργίας του Μηχανισμού Αντιστάθμισης της διασποράς

Όπως εξηγήσαμε παραπάνω, ο μηχανισμός συντονισμού εύρους ζώνης που βασίζεται σε μεταβλητούς συζεύκτες που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας MZI συνδυάζεται με συμβατικούς μετατοπιστές φάσης εντός κοιλότητας που επιτρέπουν συντονισμό μήκους κύματος, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 38α*, ενώ το κατασκευασμένο φωτονικό κύκλωμα πυριτίου φαίνεται στην *Εικόνα 38β*, με διαστάσεις  $128\mu\text{m} \times 102\mu\text{m}$ .

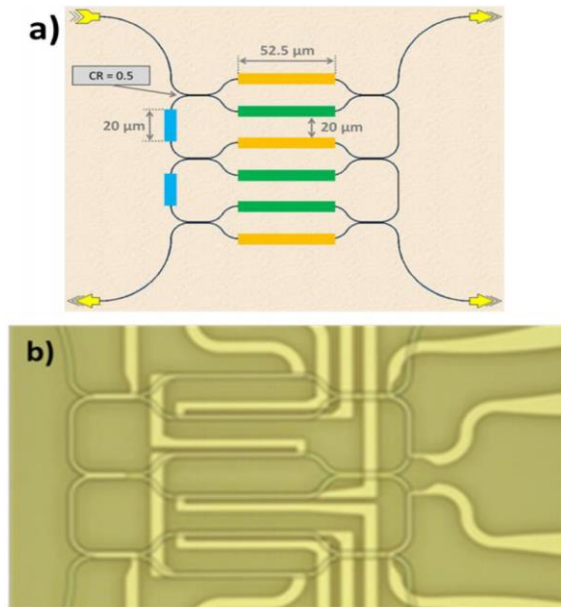
Η ευελιξία που παρέχουν αυτές οι δομές δίνει τη δυνατότητα στη ρύθμιση της διαφοράς πλάτους και φάσης μεταξύ USB και LSB με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η ισχύς του σήματος μετά τον φωτοανιχνευτή. Το μήκος κύματος συντονισμού μπορεί να μετατοπιστεί εντός του εύρους συντονισμού μέσα στα πλαίσια ολόκληρου του FSR που στη περίπτωσή μας είναι τα  $1,73\text{ nm}$ . Οι συγκεκριμένες δομές έχουν απόδοση  $0,297\text{mW/GHz}$ , ενώ το εύρος ζώνης μπορεί να ρυθμίζεται



Εικόνα 37 Προφίλ ισχύος και επαγόμενη καθυστέρηση ομάδας

συνεχώς και να παίρνει τιμές μέσα σε ένα μεγάλο εύρος, από τη στενή κατάσταση των 9 GHz μέχρι ευρεία κατάσταση των 103 GHz.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η απώλεια αντηχείου δακτυλίου στο τσιπ, εξαιρουμένης της απώλειας διεπαφής ινών, κυμαίνεται μεταξύ 1,2 dB (στενό σχήμα φίλτρου – 9 GHz) και 2,8 dB (ευρύ σχήμα φίλτρου – 103 GHz).



Εικόνα 38 Φωτονικό κύκλωμα πυριτίου

Όπως είπαμε παραπάνω, η απόκριση του φίλτρου μπορεί εύκολα να ελεγχθεί θερμοοπτικά μέσω ενός συνόλου ηλεκτροδίων, επιτρέποντας χαμηλή πολυπλοκότητα ελέγχου και υψηλή απόδοση θερμοοπτικού συντονισμού. Επιπλέον, ένα σύνολο τριών μεμονωμένα ελεγχόμενων ηλεκτροδίων, επιτρέπει την κατάλληλη αρχική πόλωση των δομών MZI. Είναι σημαντικό ακόμα να αναφέρουμε πως η προτεινόμενη δομή MRR έχει πολύ χαμηλό κόστος και ταυτόχρονα πολύ υψηλή αντοχής στην κατασκευή. Αυτός ο απλός και χαμηλής πολυπλοκότητας θερμοοπτικός έλεγχος των στοιχείων φιλτραρίσματος, μπορεί να αξιοποιηθεί για να επιτρέψει τη δυναμική λειτουργία μέσω προσαρμογής σε πραγματικό χρόνο τόσο της έντασης όσο και του προφίλ καθυστέρησης ομάδας.

Στην Εικόνα 37 φαίνεται το προφίλ ισχύος και η επαγόμενη καθυστέρηση ομάδας αντίστοιχα ενός φίλτρου βασισμένου σε MRR σε πλατφόρμα πυριτίου. Μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου φιλτραρίσματος στο σήμα, η λαμβανόμενη ηλεκτρική ισχύς μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης (3.31), η οποία προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά καθυστέρησης ομάδας

$$P_{if} \propto (a_1 + a_2)^2 * \cos^2 \left[ \frac{\pi LD}{c} \lambda^2 f_{rf}^2 + 2 f_{if} \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \right] \quad (3.31)$$

που συνδέεται με τη μη γραμμική απόκριση του φίλτρου ( $d\phi(\omega)/d\omega$ ) και οι κορυφές πλάτους των πλευρικών ζωνών  $\alpha_1, \alpha_2$ .

Υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ του επιπέδου ισχύος δύο πλευρικών ζωνών, της καθυστέρησης ομάδας και της απόκρισης πλάτους.

Πιο συγκεκριμένα, για αυτόν τον τύπο φίλτρου που προτείνεται εδώ, όσο υψηλότερη είναι η διαφορά καθυστέρησης ομάδας, τόσο υψηλότερος γίνεται ο λόγος αντίθεσης που προκύπτει μεταξύ των δύο πλευρικών ζωνών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση της ισχύος στην έξοδο του συστήματος λόγω της εξάντλησης της ισχύος μιας πλευρικής ζώνης.

## 3.2 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης προσομοίωσης

Βασιζόμενοι στην παραπάνω θεωρητική προσέγγιση, στο πλαίσιο της προτεινόμενης θεωρητικής προσέγγισης, εξετάζουμε τρόπους αντιμετώπισης της διασποράς σε συστήματα που χρησιμοποιούν και μεταδίδουν baseband πληροφορία, ειδικότερα σε περιβάλλοντα όπως η διασύνδεση κέντρων δεδομένων (inter-data center). Στο πλαίσιο αυτό, όπου η μετάδοση μεγάλου όγκου πληροφοριών απαιτεί τη χρήση PAM-M τρόπων διαμόρφωσης του σήματος επιχειρούμε την αντιστάθμιση της διασποράς. Η μέθοδος που προτείνουμε στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιεί πλήρως διαμορφώσιμα στοιχεία φιλτραρίσματος και πιο συγκεκριμένα δακτυλίους SOI. Το πλεονέκτημα αυτού του είδους στοιχείων φιλτραρίσματος συνδέεται με την βελτιωμένη ευελιξία τους όσον αφορά το εύρος ζώνης και το μήκος κύματος συντονισμού.

Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή την ενότητα, θα διεξαχθεί μια λεπτομερής ανάλυση της προσομοίωσης που έγινε. Για τη προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό VPI Transmission Maker Optical Systems. Καταφέραμε έτσι με μελετήσουμε τη συμπεριφορά των διάφορων στοιχείων που απαρτίζουν ενός οπτικού πομποδέκτη τον οποίο σχεδιάσαμε κατάλληλα ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες οπτικής διασύνδεσης μεταξύ των Κέντρων Δεδομένων (Inter Data Centers). Θα παρουσιάσουμε τα επιμέρους στοιχεία που συνθέτουν το σύστημα εκπομπής-λήψης, εξετάζοντας παράλληλα τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν τη λειτουργία και την απόδοση του συνολικού συστήματος.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που θα προκύψουν, θα πραγματοποιηθεί αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος με βάση κριτήρια όπως το διάγραμμα οφθαλμού (eye diagram) και ο λόγος εσφαλμένων συμβόλων (Symbol Error Ratio, SER).

Για την μελέτη της διασύνδεσης μεταξύ των Κέντρων Δεδομένων (Inter DCI), επιλέχθηκαν οπτικά, οπτοηλεκτρονικά και ηλεκτροοπτικά στοιχεία που λειτουργούν στην περιοχή των C-band συχνοτήτων, δηλαδή μεταξύ 1530 και 1565 nm. Η επιλογή αυτή οφείλεται στα ιδιαίτερα

χαρακτηριστικά αυτής της ζώνης συχνοτήτων, τα οποία αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα για τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις, όπως αυτές που εξετάζονται και υπερβαίνουν τα 10 χιλιόμετρα. Αυτά περιλαμβάνουν τις χαμηλές απώλειες και τη μειωμένη επίδραση των μη γραμμικοτήτων, όπως η Μίξη Τεσσάρων Φωτονίων (Four Wave Mixing, FWM). Παράλληλα, ωστόσο, παρατηρείται και ένα εγγενές μειονέκτημα, το οποίο δε μπορούμε να μην αναφέρουμε και αυτό είναι η αυξημένη διασπορά την οποία και προσπαθούμε να αντιμετωπίσουμε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

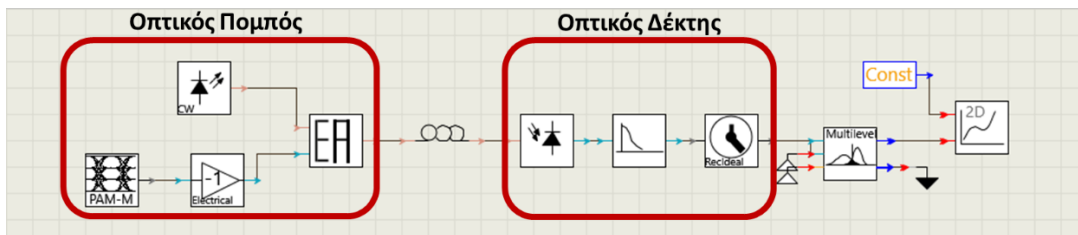
### 3.2.1 Περιγραφή οπτικού πομποδέκτη για Inter DCIs

Στην παρούσα παράγραφο θα αναπτυχθούν λεπτομερώς οι διατάξεις που χρησιμοποιήσαμε καθώς επίσης και παραμετροποιήσεις αυτών, που συναποτελούν τον οπτικό πομποδέκτη.

Θα περιγράψουμε τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση. Το κύκλωμα αποτελείται από έναν πομπό, που δημιουργεί και εκπέμπει το σήμα, μια οπτική ίνα που γίνεται η μετάδοση, έναν δέκτη και κάποια στοιχεία που χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε το BER (Bit Error Rate).

#### 3.2.1.1 Διάταξη Πομπού

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο πομπός και ο δέκτης που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση μας.



Εικόνα 39 Οπτική διάταξη προσομοίωσης ενός πομποδέκτη.

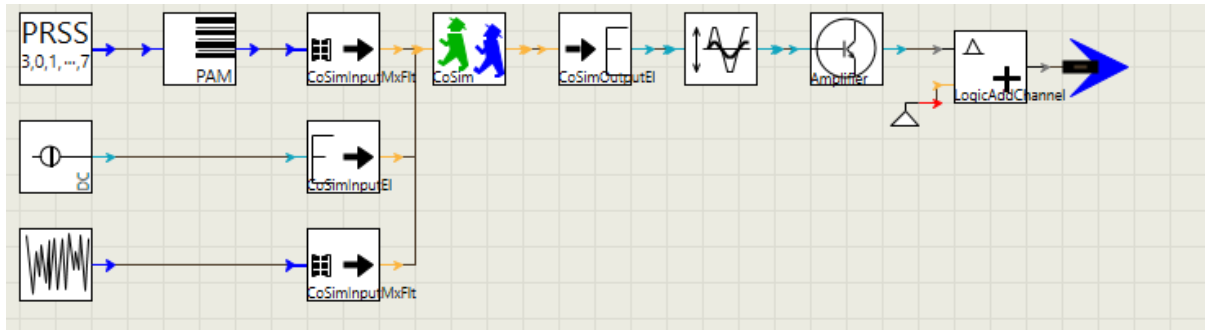
Ο πομπός αποτελείται ονομαστικά από τα εξής στοιχεία:

- **Tx\_EI\_PAM\_M** --> Παράγει ηλεκτρικά PAM M σήματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οπτική διαμόρφωση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα σήματα που παράγουμε είναι PAM4 με κανονικοποιημένες στάθμες 0, 0.5, 0.8 και 1.
- **LaserCW** --> Ένα laser που λειτουργεί στα 1550 nm
- **ModulatorEA**--> Αυτό το στοιχείο είναι ένας διαμορφωτής ηλεκτροαπορρόφησης (EAM). Έτσι προκύπτει το τελικό σήμα που μεταδίδεται από την οπτική ίνα.

Παρακάτω θα εξηγήσουμε τι είναι κάθε στοιχείο από αυτά.

### Tx\_EI\_PAM\_M

Για να υλοποιήσουμε το παρακάτω στοιχείο έχουμε κατασκευάσει στο VPI την διάταξη που απεικονίζεται στην *Εικόνα 40*.



*Εικόνα 40* Διάταξη προσομοίωσης του ηλεκτρικού πομπού

Καταρχήν χρησιμοποιούμε μια γεννήτρια που παράγει τυχαίες ακολουθίες από bit. Αυτές οι ακολουθίες κωδικοποιούνται σε σύμβολα (module Mapper\_PAM-M) και για αυτό το λόγο μετατρέπονται σε μια ακολουθία συμβόλων. Κατόπιν η ακολουθία αυτή μετατρέπεται σε ένα συνεχές ηλεκτρικό σήμα το οποίο όμως έχεις πολλές στάθμες. Το ηλεκτρικό αυτό σήμα φιλτράρετε ώστε να εισαχθεί μια παραμόρφωση με σκοπό να προσομοιώνει την απόκριση που θα είχε μια πραγματική γεννήτρια ηλεκτρικών σημάτων. Τέλος προσθέτουμε στη δομή αυτή έναν ηλεκτρικό ενισχυτή με σκοπό να αυξάνουμε ή να μειώνουμε κατά βούληση την ένταση του εξαχθέντος ηλεκτρικού σήματος (module AmpSysEI).

### LaserCW

Η συγκεκριμένη οπτική πηγή φωτός αποτελεί βασική διάταξη των οπτικών πομπών. Σε ένα πραγματικό σύστημα, ως οπτική πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μια δίοδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode - LED) είτε ένα laser ημιαγωγού. Όσον αφορά τα οπτικά συστήματα

επικοινωνιών χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά laser ημιαγωγού εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν, τα οποία περιλαμβάνουν:

- Το στενό φασματικό εύρος, που έχει σαν αποτέλεσμα πολύ καλή χρονική συμφωνία
- Χωρική συμφωνία και ευκολία σύζευξης του παραγόμενου φωτός σε οπτικές ίνες
- Μικρό μέγεθος, αξιοπιστία και υψηλή απόδοση

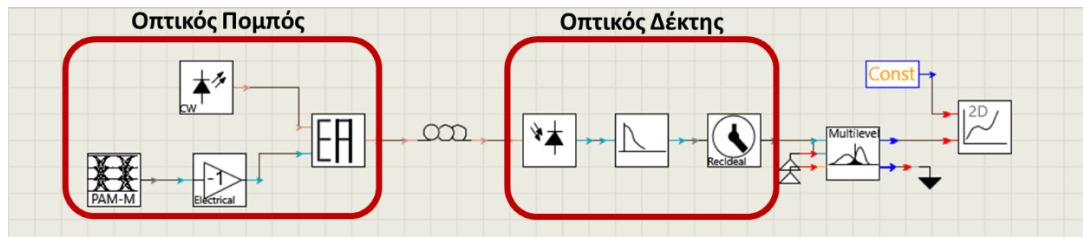
Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα lasers κατανεμημένης ανάδρασης (distributed feedback - DFB), στα οποία τα κάτοπτρα που οδηγούν την οπτική δέσμη σε πολλαπλές διαδρομές υλοποιούνται με τη βοήθεια φραγμάτων περίθλασης. Τα laser δρουν ως πηγές συνεχών κυμάτων (Continuous Wave – CW) δημιουργώντας οπτικά κύματα με σταθερή ένταση, σταθερή φάση και σταθερή πόλωση.

### **ModulatorEA**

Το στοιχείο αυτό προσομοιώνει έναν διαμορφωτή ηλεκτροαπορρόφησης με συνάρτηση μετάδοσης που εξαρτάται από την τάση, από τη μετατόπιση φάσης και από το παράγοντα άλφα. Πιο συγκεκριμένα ένας διαμορφωτής ηλεκτροαπορρόφησης (EAM) είναι ένα στοιχείο που αποτελείται από ημιαγωγούς και χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της έντασης μιας δέσμης λέιζερ μέσω ηλεκτρικής τάσης. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο φαινόμενο Franz–Keldysh, δηλαδή μια αλλαγή στο φάσμα απορρόφησης που προκαλείται από ένα εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο αλλάζει την ενέργεια του διάκενου ζώνης αλλά συνήθως δεν περιλαμβάνει τη διέγερση των φορέων από το ηλεκτρικό πεδίο. Χρησιμοποιείται ευρέως σαν διαμορφωτής στις τηλεπικοινωνίες, καθώς έχει μικρό μέγεθος και απαιτεί και χαμηλές τάσεις διαμόρφωσης. Οι περισσότεροι EAM διαμορφωτές κατασκευάζονται με τη μορφή κυματοδηγού με ηλεκτρόδια για την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου σε κατεύθυνση κάθετη στη διαμορφωμένη δέσμη φωτός. Για την επίτευξη ενός υψηλού ποσοστού εξάλειψης, συνήθως εκμεταλλεύεται κανείς το φαινόμενο Κβαντικού περιορισμένου Stark (QCSE) σε μια δομή κβαντικού φρεατίου. Σε σύγκριση με έναν ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή (EOM), ένα στοιχείο EAM μπορεί να λειτουργήσει με πολύ χαμηλότερες τάσεις (λίγα βολτ αντί για δέκα βολτ ή περισσότερο). Μπορούν ακόμα να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλή ταχύτητα ενώ μπορεί να επιτευχθεί ένα εύρος ζώνης διαμόρφωσης δεκάδων gigahertz. Τέλος ένα ακόμα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό είναι ότι οι διαμορφωτές EAM μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν ολοκληρωμένα κυκλώματα λέιζερ σε ένα μόνο τσιπ σχηματίζοντας έτσι έναν ολοκληρωμένο πομπό δεδομένων με τη μορφή ενός φωτονικού ολοκληρωμένου κυκλώματος.



### 3.2.1.2 Διάταξη Δέκτη



Εικόνα 41 Οπτική διάταξη προσομοίωσης ενός πομποδέκτη

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ο δέκτης αποτελείται ονομαστικά από τα εξής στοιχεία:

- **Photodiode** --> Αποτελεί τον φωτοανιχνευτή, ο οποίος μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό παλμό.
- **FilterE1** --> Χρησιμοποιούμε ένα βαθυπερατό φίλτρο, ώστε να κόψουμε τις ανεπιθύμητες συχνότητες που γεννιούνται
- **ClockRecoveryIdeal** --> Συγχρονίζει το εισερχόμενο σήμα με το αρχικώς εκπεμπόμενο σήμα. Παρακάτω θα εξηγήσουμε τι είναι κάθε στοιχείο από αυτά.

#### Φωτοδίοδος

Η φωτοδίοδος είναι μια διάταξη ημιαγωγών που μετατρέπει το φως σε ρεύμα. Το ρεύμα παράγεται όταν τα φωτόνια απορροφούνται στην φωτοδίοδο. Μια μικρή ποσότητα του ρεύματος παράγεται επίσης όταν δεν υπάρχει φως. Οι φωτοδιόδοι μπορεί να περιέχουν οπτικά φίλτρα, ενσωματωμένους φακούς και μπορεί να έχουν μικρές ή μεγάλες επιφάνειες. Οι φωτοδιόδοι έχουν συνήθως πιο αργό χρόνο απόκρισης όσο αυξάνεται η επιφάνεια τους.

#### ClockRecoveryIdeal

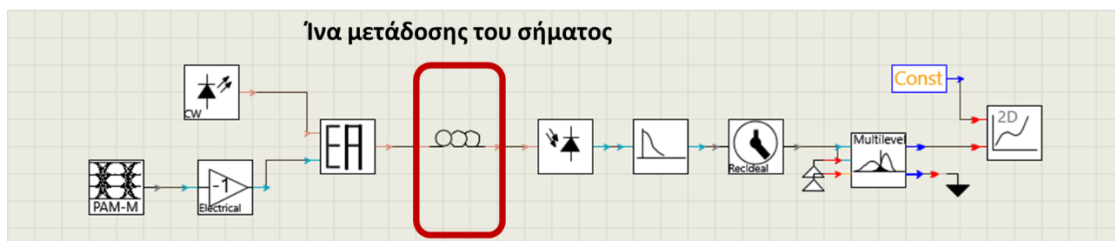
Το αρχικό σήμα αναδημιουργείται από το καθορισμένο κανάλι λογικής πληροφορίας (logical information channel) που είναι συνδεδεμένο στο φυσικό σήμα. Από «λογικές» πληροφορίες, όπως η ψηφιακή ροή bit, το σχήμα παλμού, ο τύπος κωδικοποίησης, το σχήμα διαμόρφωσης, και ο ρυθμός bit, δημιουργείται ένα αντίγραφο του αρχικά αποσταλμένου σήματος. Η χρονική καθυστέρηση υπολογίζεται από τη διασταυρούμενη συσχέτιση (cross-correlation) του εισερχόμενου σήματος και του εσωτερικά αναγεννημένου αρχικού σήματος. Στη συνέχεια, το εισερχόμενο σήμα μετατοπίζεται στο χρόνο για να συγχρονιστεί ξανά με την αρχική ακολουθία ψηφίων.

Τέλος η διάταξη αποτελείται και από κάποια μετρητικά στοιχεία της πλατφόρμας με την βοήθεια των οποίων υπολογίζουμε το συνολικό BER της διάταξης ώστε να ποσοτικοποιήσουμε με κάποια μετρικά την απόδοσή του. Στο παρακάτω κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε αναλυτικά την απόδοση του συστήματος αυτού για διαφορετικές περιπτώσεις που έχουν δοκιμαστεί.

# Κεφάλαιο 4 - Εξεταζόμενα Σενάρια και Αποτελέσματα

## 4.1 Αναγνώριση του προβλήματος της διασποράς

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε τη πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων μας. Το πρώτο και βασικότερο βήμα ήταν να βεβαιωθούμε ότι λειτουργεί κανονικά η διάταξη που έχουμε φτιάξει στο VPI. Για τις παρακάτω μετρήσεις χρησιμοποιήσαμε σήμα με εύρος ζώνης τα 10 GHz. Σήματα αυτού του εύρους ζώνης χρησιμοποιούνται κατά κόρον για τη διασύνδεση των κέντρων δεδομένων, καθώς έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν μεγάλο όγκο πληροφορίας. Αφού λοιπόν ορίσαμε το μήκος της ίνας να είναι 1 km, μήκος στο οποίο όπως γνωρίζουμε ήδη από τη θεωρία το σήμα δε παραμορφώνεται

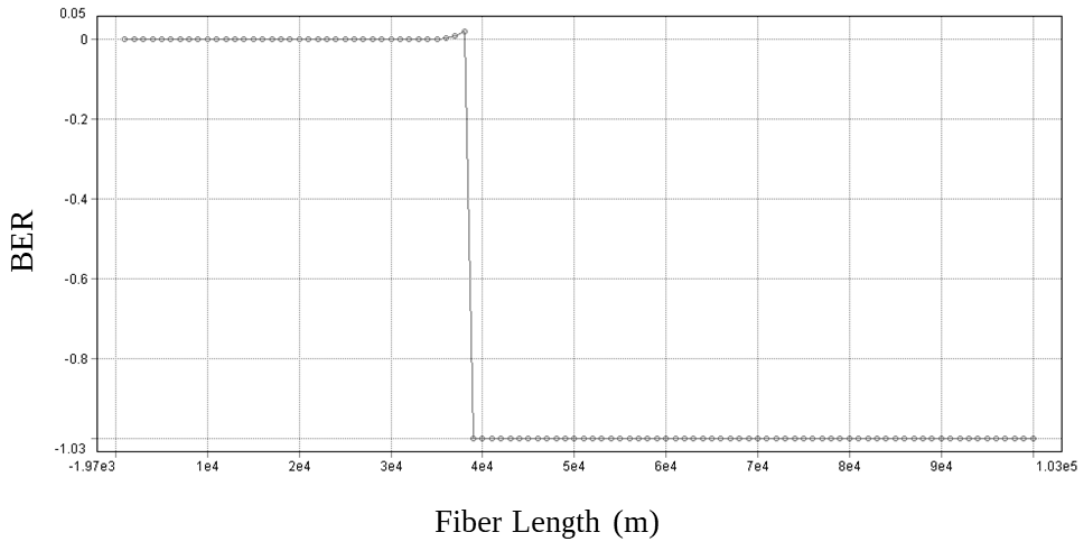


Εικόνα 42 Οπτική διάταξη προσομοίωσης ενός πομποδέκτη

από τη διασπορά τρέξαμε τη προσομοίωση και παρατηρήσαμε ότι είχαμε τα αναμενόμενα, βέλτιστα αποτελέσματα, καθώς το BER που μετρήσαμε ήταν αμελητέο, της τάξης του  $10^{-19}$ .

Όπως γνωρίζουμε ήδη από τη θεωρία, την οποία παρουσιάσαμε αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια η διασπορά συσσωρεύεται όσο το σήμα ταξιδεύει μέσα στην ίνα προκαλώντας έτσι την παραμόρφωσή του. Θέλοντας να εντοπίσουμε ακριβώς τα χιλιόμετρα μετάδοσης στα οποία η διασπορά έχει αποκτήσει καταστροφικές συνέπειες για το σήμα, τρέξαμε τη παραπάνω προσομοίωση κρατώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές πέρα από τη μήκος της ίνας. Από την προσομοίωση αυτή προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα.

### Μέγιστη απόσταση διάδοσης χωρίς διόρθωση της διασποράς



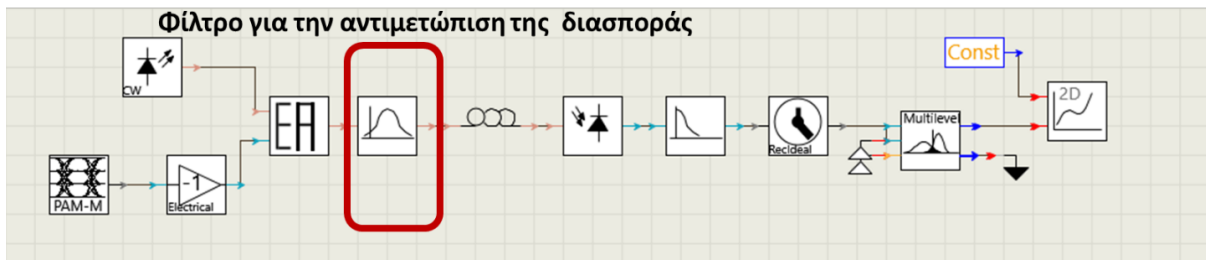
Εικόνα 43 Διάγραμμα μέγιστης απόστασης διασποράς χωρίς διόρθωση της διασποράς

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε πως η διασπορά που συσσωρεύεται μετά από 40 km μετάδοσης του σήματος καταστρέφει τελείως την ποιότητα του με αποτέλεσμα να μη μπορεί να αποκωδικοποιήσει ο δέκτης και να μην μπορεί να αναγνωρίσει τα σύμβολα τα οποία στείλαμε. Για το λόγο αυτό υπάρχει και τόσο μεγάλο ποσοστό εσφαλμένων συμβόλων (BER).

Για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις θα θεωρήσουμε ότι το μήκος της ζεύξης είναι τα 40 km και θα ψάξουμε τρόπους για να αντιμετωπίσουμε τη διασπορά. Θα ψάξουμε δηλαδή τρόπους με τους οποίους θα προσπαθήσουμε να αιρέσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τη διασπορά που έχει συσσωρευτεί με αποτέλεσμα την όλο και πιο μακρινή μετάδοση του σήματος.

## 4.2 Χρήση ήδη γνωστών οπτικών φίλτρων για την αντιμετώπιση της διασποράς

Για αρχή αυτό που κάναμε ήταν να εισάγουμε στη διάταξη πολλά διαφορετικά φίλτρα για να δούμε την επίδραση που θα έχουν στο BER το οποίο μετράμε. Συνεπώς η διάταξη μας παίρνει την παρακάτω μορφή.



Εικόνα 44 Οπτική διάταξη προσομοίωσης με φίλτρο για την αντιστάθμιση της διασποράς

Ονομαστικά τα φίλτρα τα οποία χρησιμοποιήσαμε είναι τα εξής: Είναι το φίλτρο Bessel, το φίλτρο Butterworth, το φίλτρο Chebyshev I και II, το ελλειπτικό, το γκαουσιανό, το τετραγωνικό και το τραπεζοειδές. Για κάθε φίλτρο από αυτά, δοκιμάσαμε διαφορετικά bandwidth και συγκεκριμένα 20, 30 και 40 GHz ώστε να εντοπίσουμε τη συνθήκη στην οποία τα φίλτρα αυτά έχουν τη βέλτιστη απόκριση στο σήμα. Ακόμα τα φίλτρα αυτά τα κεντράραμε γύρω από ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων με κέντρο τα 1550nm με σκοπό να πετύχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα.

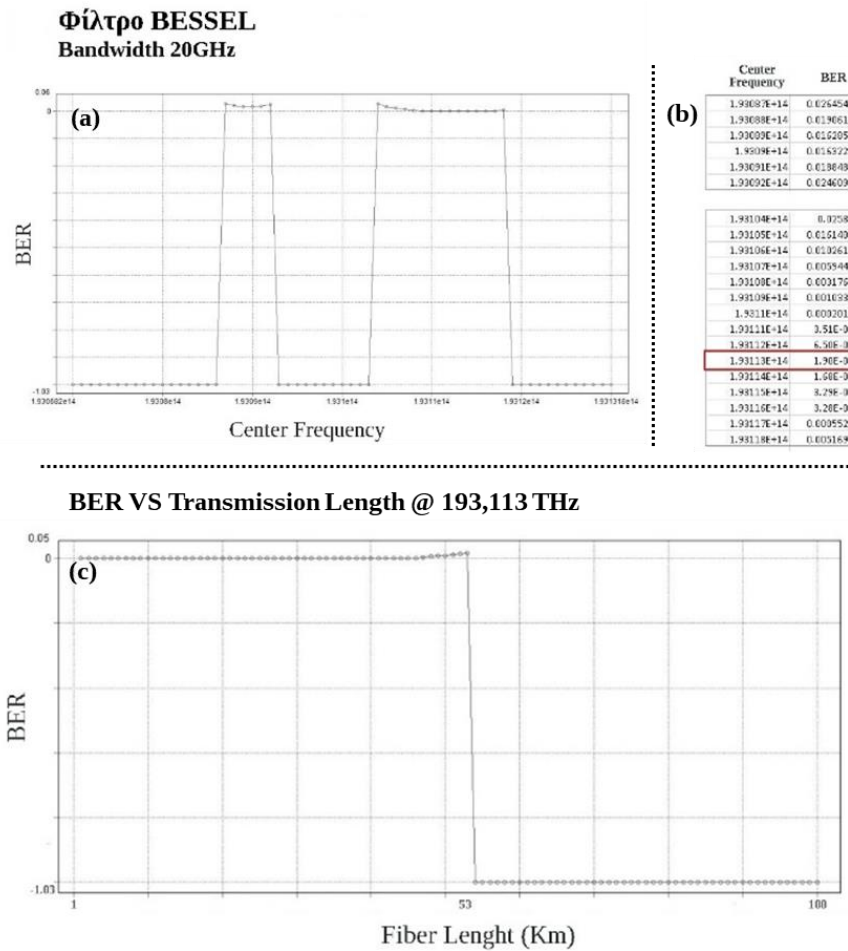
Στη συνέχεια κρατήσαμε σταθερό το μήκος της ίνας στα 40km και με κάθε φίλτρο ψάξαμε να βρούμε τη κεντρική συχνότητα που μας δίνει το καλύτερο BER, ώστε στη συνέχεια με αυτή τη συχνότητα να δούμε ποια είναι η μέγιστη απόσταση στην οποία δε μπορούμε να ανακτήσουμε το σήμα. Μετατοπίσαμε το κέντρο του φίλτρου κατά 60 GHz με κεντρική συχνότητα την 193,1 THz και τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα παρακάτω. Στη συνέχεια για τη συχνότητα που μας δίνει το καλύτερο BER για κάθε φίλτρο, δοκιμάσαμε να υπολογίσουμε το BER για μήκος ίνας από 10 έως 100 χιλιόμετρα.

Παρακάτω θα περιγράψουμε τι είναι κάθε ένα από τα φίλτρα αυτά.

- **Bessel**

Ένα φίλτρο Bessel είναι ένας τύπος αναλογικού γραμμικού φίλτρου με μέγιστη επίπεδη ομάδα καθυστέρησης (δηλαδή, μέγιστη γραμμική φάση), το οποίο διατηρεί το σχήμα του σήματος στην περιοχή διέλευσης. Το φίλτρο Bessel βασίζεται στη μαθηματική συνάρτηση Bessel.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των φίλτρων Bessel είναι η γραμμική τους φάση. Αυτό σημαίνει ότι η φάση του φίλτρου αλλάζει γραμμικά με τη συχνότητα, χωρίς απότομες αλλαγές.



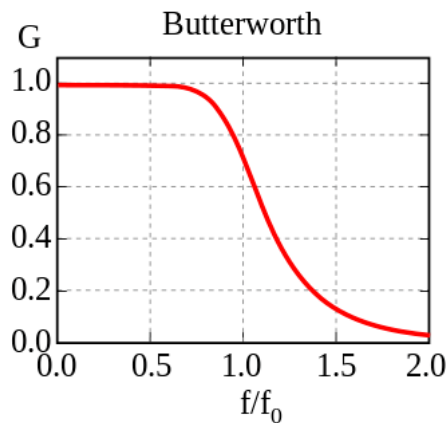
Εικόνα 45 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου BESSEL, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

Αυτή η ιδιότητα καθιστά τα φίλτρα Bessel κατάλληλα για εφαρμογές όπου η διατήρηση του χρόνου φάσης είναι σημαντική.

Το φίλτρο Bessel είναι πολύ παρόμοιο με το φίλτρο Gaussian και τείνει προς το ίδιο σχήμα με την αύξηση τάξης του φίλτρου. Ενώ η χρονική απόκριση του φίλτρου Gaussian έχει μηδενικό overshoot, το φίλτρο Bessel έχει ένα μικρό overshoot αλλά πολύ μικρότερο από άλλα συνηθισμένα φίλτρα στο πεδίο συχνοτήτων, όπως τα φίλτρα Butterworth.

Σε σύγκριση με το Gaussian φίλτρο, το φίλτρο Bessel έχει καλύτερο παράγοντα διαμόρφωσης, πιο επίπεδη καθυστέρηση φάσης και πιο επίπεδο group delay από ένα Gaussian της ίδιας τάξης, αν και το Gaussian έχει μικρότερη χρονική καθυστέρηση και μηδενικό overshoot.

Στο διάγραμμα παραπάνω βλέπουμε πως η καλύτερη συχνότητα για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,113 THz. Δεδομένου πως το οπτικό φέρον είναι στα 193,1 THz συμπεραίνουμε πως το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά 13 GHz. Μάλιστα στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 55 km.

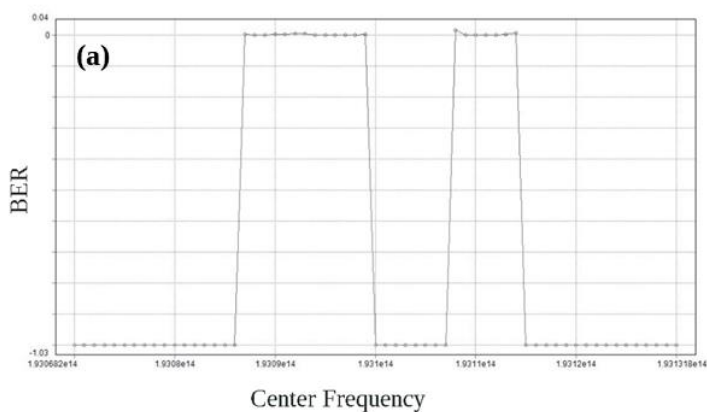


Εικόνα 46 Απόκριση πλάτους φίλτρου Butterworth

- Butterworth

Τα φίλτρα Butterworth έχουν το πλεονέκτημα της επίπεδης απόκρισης στη ζώνη διέλευσης (maximally flat filters), όμως έχουν το μειονέκτημα της αργής μετάβασης στη ζώνη αποκοπής. Στα φίλτρα Butterworth, η απόκριση συχνότητας είναι ενιαία και επίπεδη χωρίς κορεσμούς. Η φάση του σήματος παραμένει γραμμική, χωρίς απότομες αλλαγές. Τα φίλτρα Butterworth έχουν

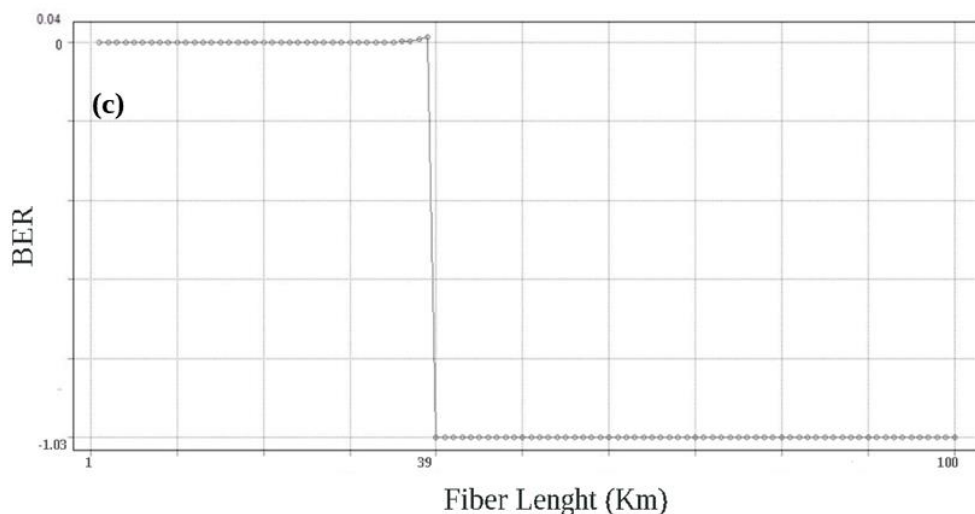
## Φίλτρο BUTTERWORTH Bandwidth 20GHz



(b)

Center Frequency	BER
1.93087E+14	0.001653
1.93088E+14	0.000224
1.93089E+14	0.000152
1.9309E+14	0.00047
1.93091E+14	0.002267
1.93092E+14	0.003773
1.93093E+14	0.002792
1.93094E+14	5.35E-05
1.93095E+14	3.00E-07
1.93096E+14	4.20E-06
1.93097E+14	6.00E-07
1.93098E+14	3.80E-05
1.93099E+14	0.002363
1.93108E+14	0.014243
1.93109E+14	0.000144
1.9311E+14	2.00E-07
1.93111E+14	1.70E-06
1.93112E+14	2.59E-05
1.93113E+14	0.00069
1.93114E+14	0.005151

## BER VS Transmission Length @ 193,110 THz



Εικόνα 47 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου BUTTERWORTH, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (γ) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

μια στενή ζώνη μετάβασης, η οποία είναι πιο επιθυμητή σε ορισμένες εφαρμογές, ενώ έχουν υψηλή απόκριση στα χαμηλά σήματα.

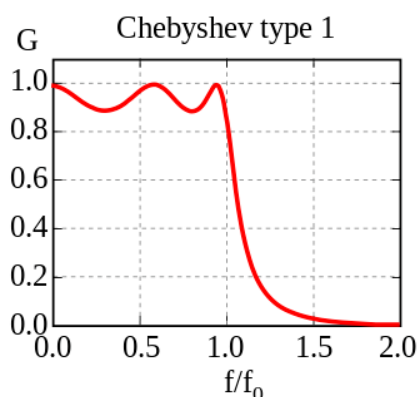
Σε σύγκριση με ένα φίλτρο Chebyshev I ή Chebyshev II ή ένα ελλειπτικό φίλτρο, το φίλτρο Butterworth έχει πιο αργό roll-off και επομένως απαιτείται φίλτρο υψηλότερης τάξης για την εφαρμογή μιας συγκεκριμένης ζώνης αποκοπής, αλλά τα φίλτρα Butterworth έχουν μια πιο γραμμική απόκριση φάσης στο ζώνη διέλευσης από αυτή που μπορούν να επιτύχουν τα Chebyshev I/ II και τα ελλειπτικά φίλτρα.



Εδώ βλέπουμε πως η καλύτερη συχνότητα για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,1 THz. Δεδομένου πως το οπτικό φέρον είναι στα 193,1 THz συμπεραίνουμε πως το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση σε αυτή τη συχνότητα. Στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 40 km.

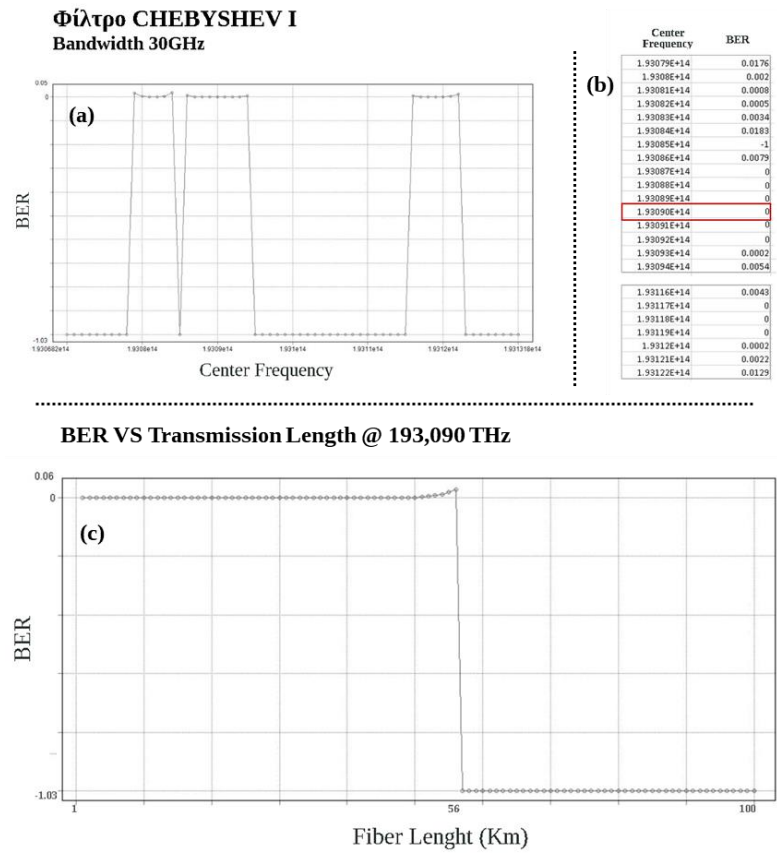
- Chebyshev I

Τα φίλτρα Chebyshev τύπου I διακρίνονται από το ότι επιτρέπουν κορεσμούς στην περιοχή διέλευσης του φίλτρου, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ρυθμιζόμενη κλίση στη ζώνη διέλευσης σε σχέση με τα φίλτρα Butterworth. Τα φίλτρα Chebyshev έχουν πιο απότομη κλίση από τα φίλτρα Butterworth και έχουν κυματισμό ζώνης διέλευσης, σε αντίθεση με τα φίλτρα Chebyshev τύπου II που εμφανίζουν κυματισμό ζώνης αποκοπής. Τα φίλτρα Chebyshev έχουν την ιδιότητα να ελαχιστοποιούν το σφάλμα μεταξύ των χαρακτηριστικών του πραγματικού φίλτρου και του θεωρητικού φίλτρου στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του, αλλά αυτό το επιτυγχάνουν με κυματισμούς στη ζώνη διέλευσης.

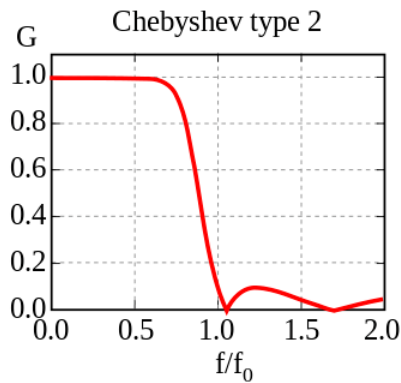


Εικόνα 48 Απόκριση πλάτους φίλτρου Chebyshev I

Στο διάγραμμα παρακάτω βλέπουμε πως η συχνότητα στην οποία προκύπτει το καλύτερο BER για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,090 THz. Άρα το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά -10 GHz. Μάλιστα στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 57 km.



Εικόνα 49 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου CHEBYSHEV I, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (γ) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

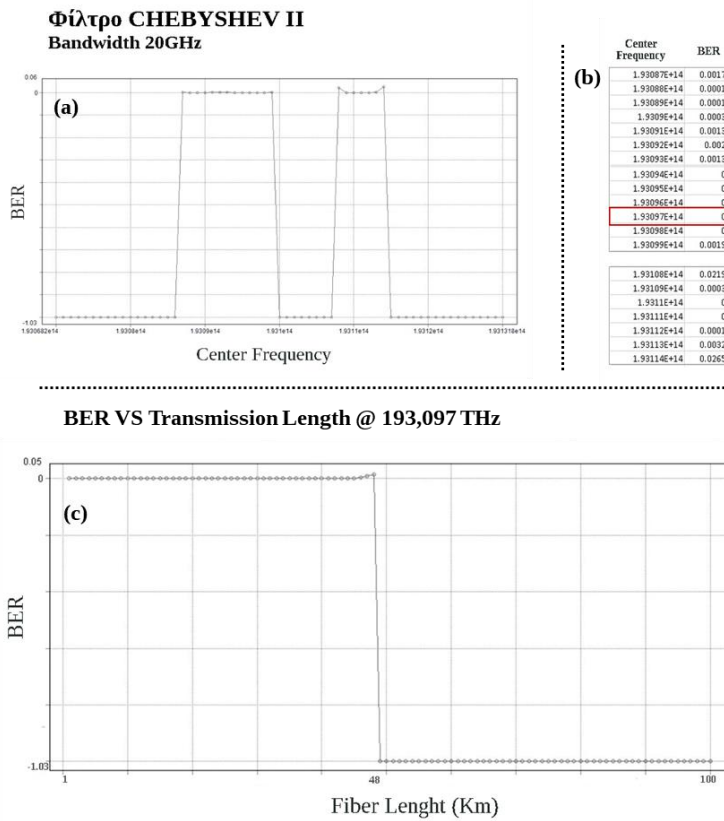


Εικόνα 50 Απόκριση πλάτους φίλτρου Chebyshev II

- Chebyshev II

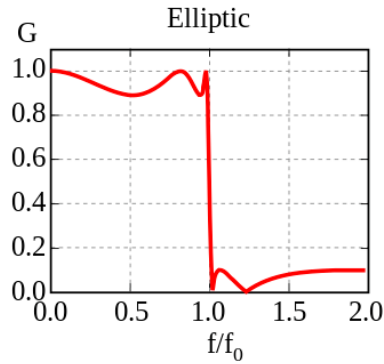
Τα φίλτρα Chebyshev τύπου II ανήκουν στην ομάδα των φίλτρων Chebyshev, και σε αντίθεση με τα φίλτρα Chebyshev τύπου I, διακρίνονται από το ότι επιτρέπουν κορεσμούς στην περιοχή εκφορτισμού του φίλτρου, ενώ διατηρούν επίπεδη απόκριση στη ζώνη διέλευσης.

Στο διάγραμμα παραπάνω βλέπουμε πως η συχνότητα στην οποία προκύπτει το καλύτερο BER για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,097 THz. Άρα το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά -3 GHz. Στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 48 km.



Εικόνα 51 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου CHEBYSHEV II, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

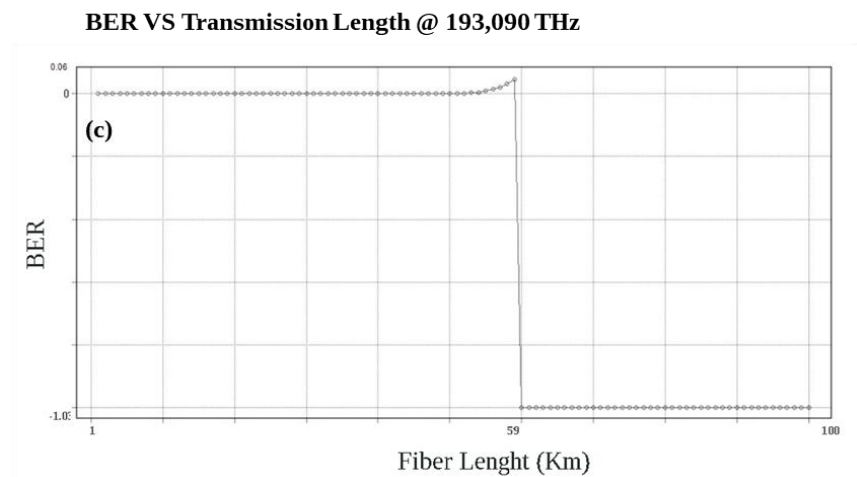
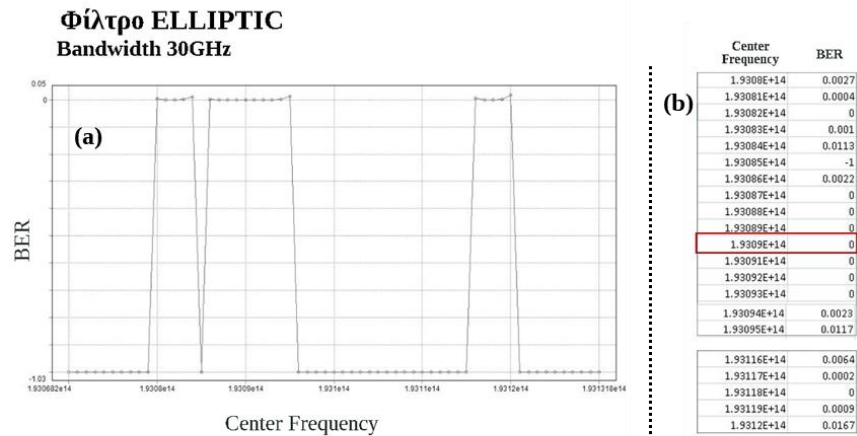
- Elliptic



Εικόνα 52 Απόκριση πλάτους φίλτρου Elliptic

Ένα ελλειπτικό φίλτρο είναι ένα φίλτρο επεξεργασίας σήματος με συμπεριφορά εξισορρόπησης κυματισμού (equiripple) τόσο στη ζώνη διέλευσης όσο και στη ζώνη αποκοπής. Η ποσότητα του κυματισμού σε κάθε ζώνη ρυθμίζεται ανεξάρτητα και κανένα άλλο φίλτρο ίσης τάξης δεν μπορεί να έχει ταχύτερη μετάβαση στο κέρδος μεταξύ της ζώνης διέλευσης και της ζώνης διακοπής, για τις δεδομένες τιμές κυματισμού (είτε ο κυματισμός εξισώνεται είτε όχι).

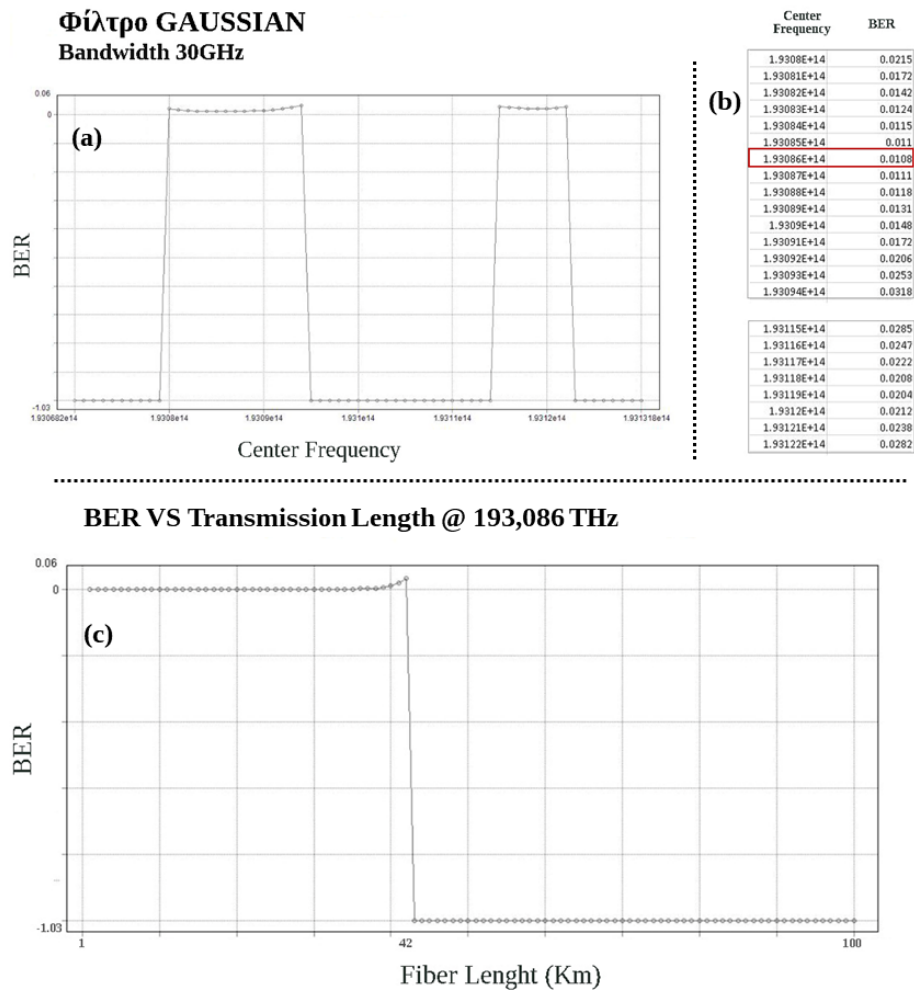
Καθώς ο κυματισμός στη ζώνη διακοπής πλησιάζει το μηδέν, το φίλτρο γίνεται φίλτρο Chebyshev τύπου I. Καθώς ο κυματισμός στη ζώνη διέλευσης πλησιάζει το μηδέν, το φίλτρο γίνεται φίλτρο Chebyshev τύπου II και τελικά, καθώς και οι δύο τιμές κυματισμού πλησιάζουν το μηδέν, το φίλτρο γίνεται φίλτρο Butterworth.



Εικόνα 53 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου ELLIPTIC, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

Χρησιμοποιώντας ένα ελλειπτικό φίλτρο βλέπουμε πως η συχνότητα στην οποία προκύπτει το καλύτερο BER για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,090 THz. Άρα το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά -10 GHz. Στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 60 km.

- Gaussian

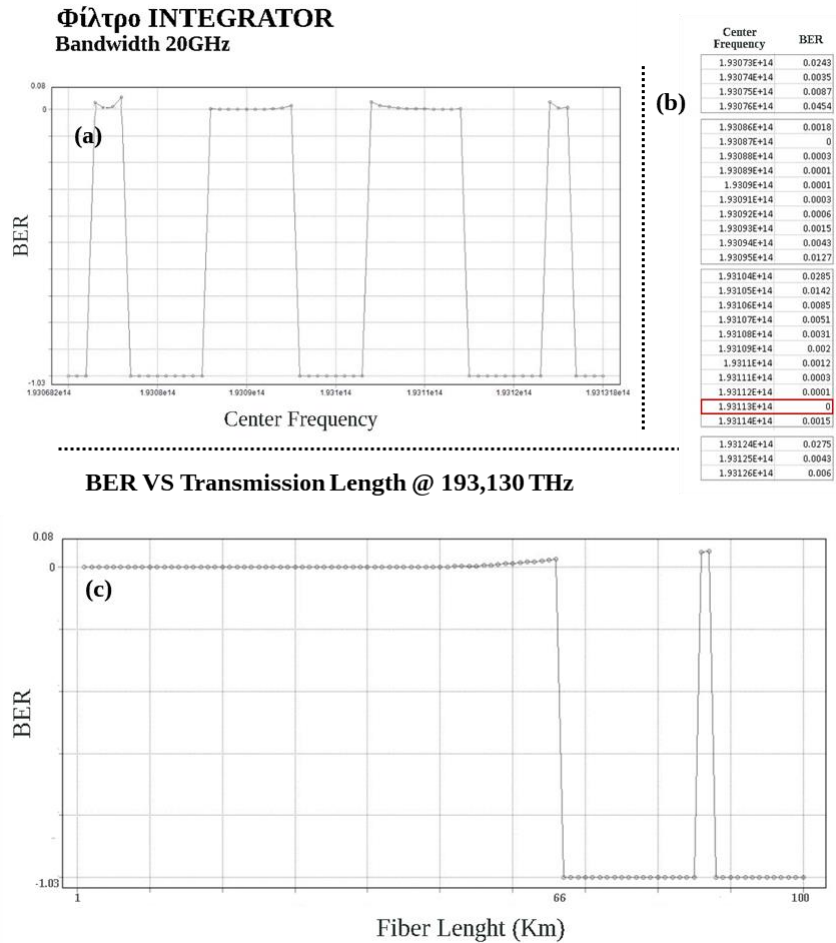


Εικόνα 54 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου GAUSSIAN, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (γ) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

Τα φίλτρα Gauss είναι φίλτρα των οποίων η παλμική απόκριση είναι μια Gaussian συνάρτηση (ή μια προσέγγιση σε αυτήν, αφού μια αληθινή Gaussian απόκριση θα είχε άπειρη παλμική απόκριση). Τα φίλτρα Gauss έχουν την ιδιότητα να ελαχιστοποιούν τον χρόνο ανόδου και πτώσης. Αυτή η συμπεριφορά συνδέεται στενά με το γεγονός ότι το φίλτρο Gaussian έχει την ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση ομάδας. Ένα φίλτρο Gauss θα έχει τον καλύτερο συνδυασμό καταστολής υψηλών συχνοτήτων, ενώ παράλληλα θα ελαχιστοποιεί τη χωρική εξάπλωση.

Χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο Gaussian βλέπουμε πως η συχνότητα στην οποία προκύπτει το καλύτερο BER για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,087 THz. Άρα το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά -13 GHz. Στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 43 km.

- Integator



Εικόνα 55 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου INTERGATOR, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

Το φίλτρο Integrator είναι ένας ολοκληρωτής, δηλαδή το σήμα εξόδου είναι το ολοκλήρωμα χρόνου του σήματος εισόδου του. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου integrator στο πεδίο των συχνοτήτων είναι υπό τη μορφή  $H(j\omega) = 1/j\omega$ , όπου  $j$  είναι η φανταστική μονάδα, και  $\omega$  είναι η συχνότητα.

Με τη χρήση ενός φίλτρου Integrator η συχνότητα στην οποία προκύπτει το καλύτερο BER για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,113 THz. Άρα το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά 13 GHz. Στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 66 km.

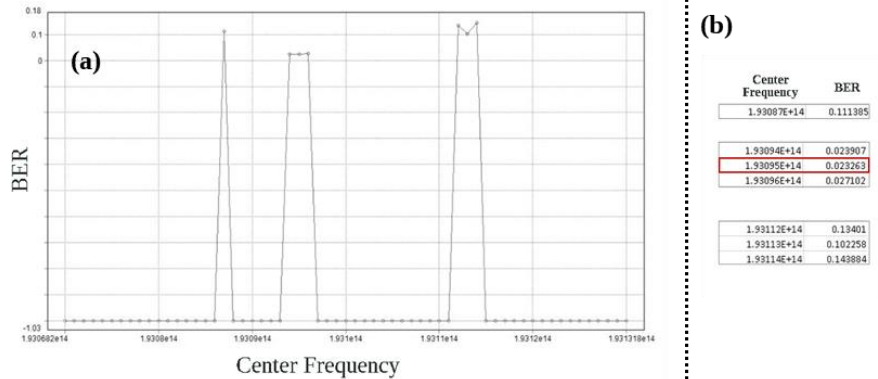
- Rectangular

Το τετραγωνικό φίλτρο είναι το πιο απλό γραμμικό φίλτρο, ένας τετραγωνικός παλμός στο πεδίο της συχνότητας. Το τετραγωνικό φίλτρο επιτρέπει όλες τις συχνότητες μέχρι ένα καθορισμένο όριο, πέρα από το οποίο αποκόπτει τις συχνότητες. Έτσι, η απόκριση του τετραγωνικού φίλτρου είναι μια οριζόντια γραμμή για τις επιτρεπόμενες συχνότητες και μηδενική για τις αποκομμένες συχνότητες. Το τετραγωνικό φίλτρο παρέχει υψηλή απόκριση στις υψηλές συχνότητες, δηλαδή αναγνωρίζει ή προβάλλει γρήγορες αλλαγές στα σήματα.

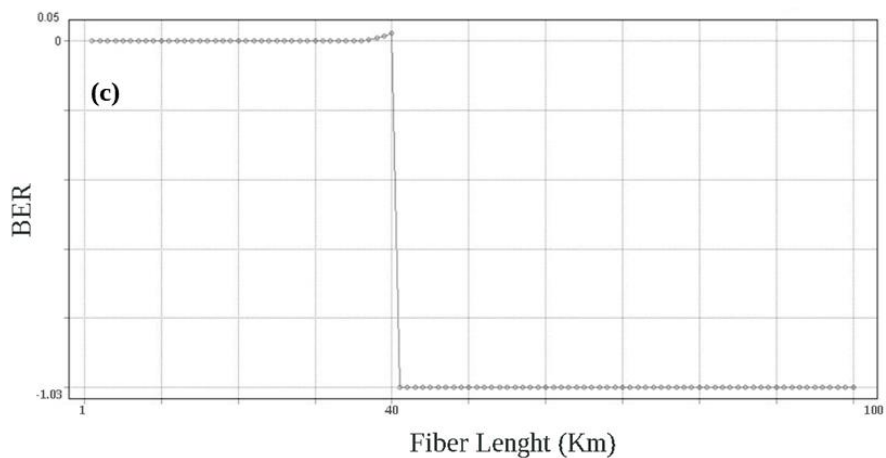
Χρησιμοποιώντας ένα τετραγωνικό φίλτρο βλέπουμε πως η συχνότητα στην οποία προκύπτει το καλύτερο BER για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,095 THz. Άρα το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά -5 GHz. Στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 41 km.



**Φίλτρο RECTANGULAR**  
Bandwidth 30GHz



**BER VS Transmission Length @ 193,095 THz**

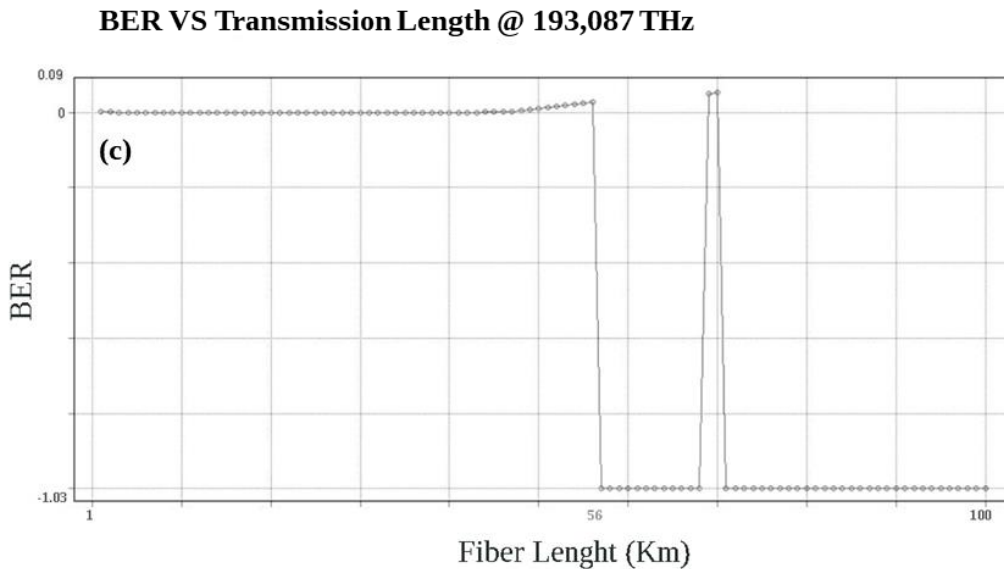
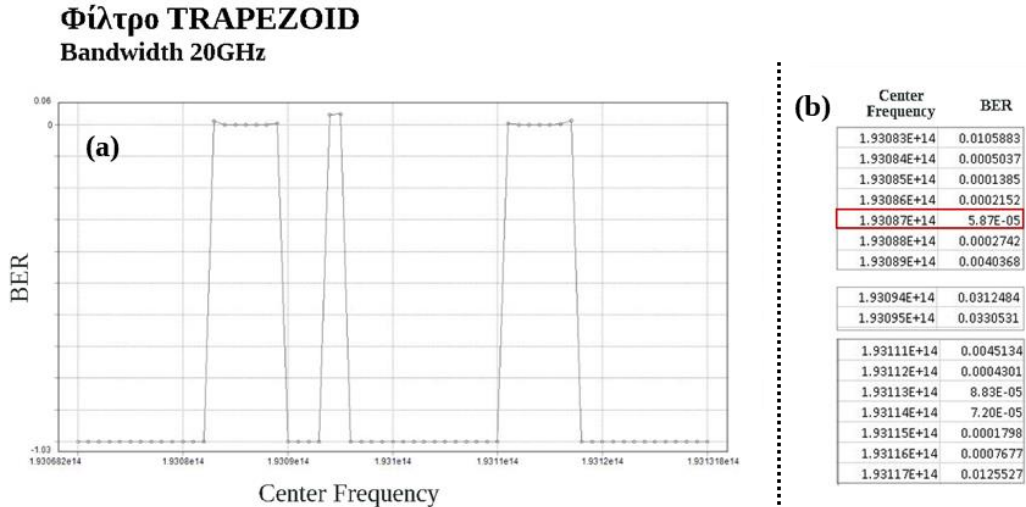


Εικόνα 56 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου RECTANGULAR, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (γ) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

- Trapezoid

Ένα τραπεζοειδές φίλτρο, είναι ένα φίλτρο που παρουσιάζει μια απόκριση συχνότητας σε σχήμα τραπεζίου. Το εύρος συχνοτήτων του τραπεζοειδούς φίλτρου καθορίζεται από τις δύο συχνότητες  $f_1$  και  $f_2$ , όπου η απόκριση στη συχνότητα είναι διαφορετική. Το τραπεζοειδές φίλτρο εμφανίζει ένα κορυφαίο επίπεδο στο κέντρο του τραπεζιού, όπου η απόκριση είναι μέγιστη. Στις πλευρές του τραπεζιού, η απόκριση μεταβάλλεται μεταξύ του κορυφαίου επιπέδου και του μηδενικού

επιπέδου. Αυτό σημαίνει ότι η κλίση του φίλτρου μειώνεται καθώς μετακινείται από το κέντρο του τραπεζιού προς τις άκρες. Η μετάβαση μεταξύ του κορυφαιού επιπέδου και του μηδενικού επιπέδου είναι συνεχής και ομαλή, χωρίς απότομες αλλαγές.



Εικόνα 57 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου TRAPEZOID, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

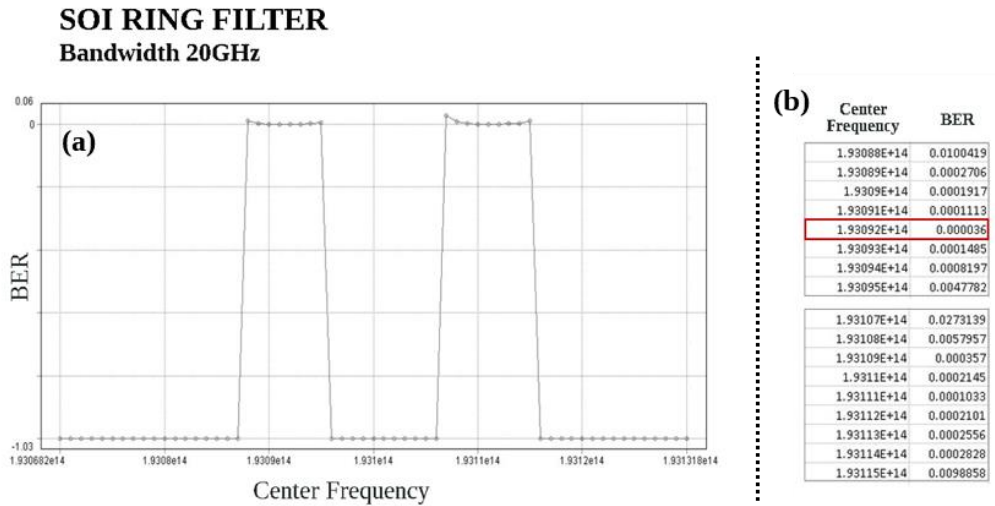
Χρησιμοποιώντας ένα τραπεζοειδές φίλτρο βλέπουμε πως η συχνότητα στην οποία προκύπτει το καλύτερο BER για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,085 THz. Άρα το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά -15 GHz. Στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 56 km.

### 4.3 Χρήση προτεινόμενων φίλτρων για την αντιμετώπιση της διασποράς

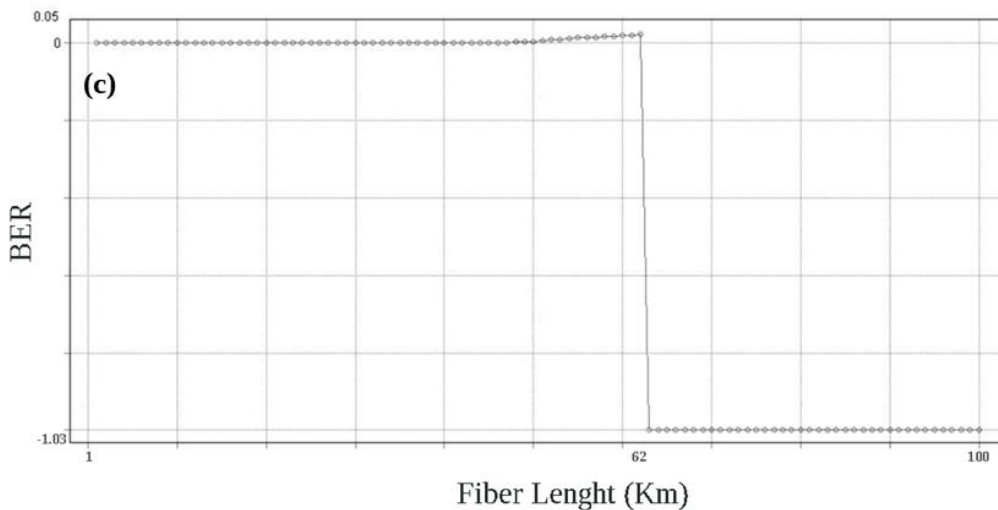
Αφού μελετήσαμε αναλυτικά τι συμβαίνει στη διάταξη μας χρησιμοποιώντας τα ήδη έτοιμα, αλλά παραμετροποιήσιμα φίλτρα του VPI, θα τα αντικαταστήσουμε με τα φίλτρα τα οποία προτείνουμε εμείς στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Χρησιμοποιώντας δηλαδή το πρόγραμμα προσομοίωσης ολοκληρωμένων φωτονικών κυκλωμάτων ASPIC κατασκευάσαμε δομές δακτυλίων πυριτίου τις οποίες θα περιγράψουμε αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

Θα ξεκινήσουμε αναφέροντας πως τα συγκεκριμένα φίλτρα τα οποία σχεδιάσαμε έχουν την μοναδική ικανότητα να χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευελιξία τόσο ως προς το εύρος ζώνης που έχουν, αλλά και ως προς το συντονισμό της κεντρικής τους συχνότητας. Για να επιτευχθεί αυτή η ευελιξία βασιζόμαστε σε ευέλικτους συζεύκτες που έχουν κατασκευαστεί με τη χρήση συμβολόμετρων Mach – Zehnder ενώ οι διαστάσεις τους είναι πολύ μικρές τις τάξης των  $128 \mu\text{m} \times 102 \mu\text{m}$ . Στην δικιά μας προσέγγιση αξιοποιούμε το πλεονέκτημα αυτών των φίλτρων αφού αφενός μετατοπίζουμε τη κεντρική τους συχνότητα εκατέρωθεν από την συχνότητα του λείζερ κατά 1,73 nm και αφετέρου κατασκευάζουμε φίλτρα με πολλά διαφορετικά bandwidth. Συγκεκριμένα δοκιμάσαμε φίλτρα με εύρος ζώνης 10 GHz, μέχρι φίλτρα που έχουν εύρος ζώνης 40 GHz, ώστε να δούμε σε ποιες συνθήκες έχουμε τη σημαντικότερη βελτίωση του σήματος. Ο κατάλληλος συντονισμός αυτών των φίλτρων είναι κάτι που μπορεί να επιτευχθεί εύκολα και οικονομικά σε πραγματικές συνθήκες αφού καταναλώνουμε μόνο 0,297 Mw/GHz για να τον επιτύχουμε. Η συνάρτηση μεταφοράς καθώς και η μάσκα των φίλτρων που σχεδιάσαμε φαίνονται στη παρακάτω εικόνα.

Το πρώτο φίλτρο που δοκιμάσαμε είχε εύρος ζώνης 10 GHz. Στο διάγραμμα παραπάνω βλέπουμε πως η καλύτερη συχνότητα για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,095 THz. Δεδομένου πως το οπτικό φέρον είναι στα 193,1 THz συμπεραίνουμε πως το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά -5 GHz. Μάλιστα στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 95 km.

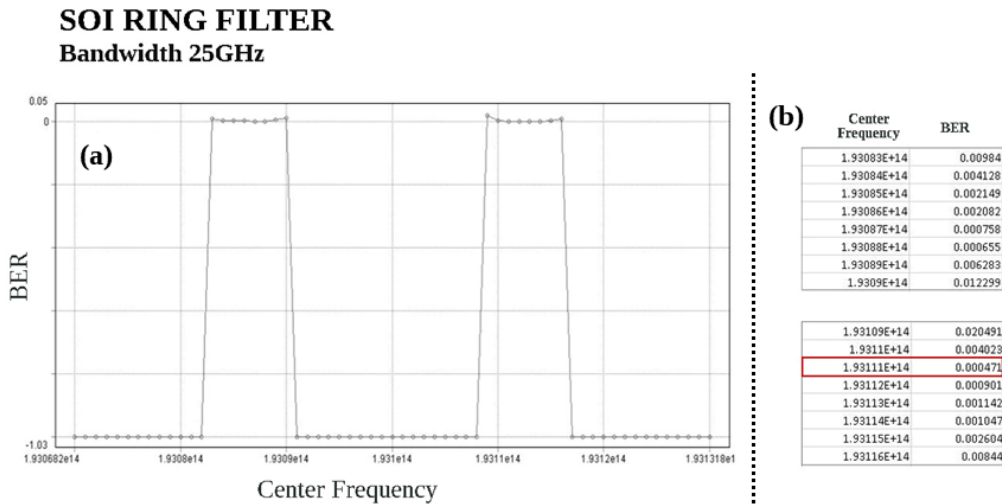


**BER VS Transmission Length @ 193,092 THz**

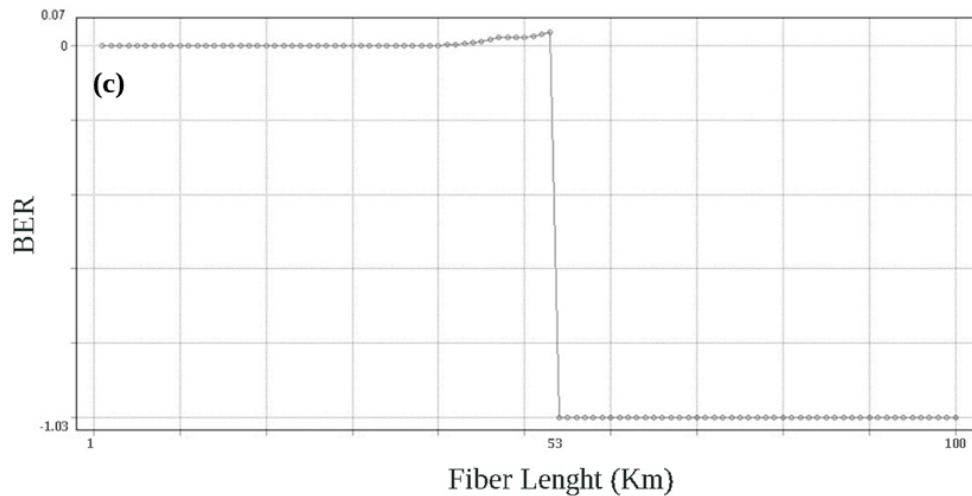


Εικόνα 59 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου SOI RING 20GHz, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (γ) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

Στη συνέχεια το φίλτρο που δοκιμάσαμε είχε εύρος ζώνης 20 GHz. Στο διάγραμμα παραπάνω βλέπουμε πως η καλύτερη συχνότητα για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,092 THz. Δεδομένου πως το οπτικό φέρον είναι στα 193,1 THz συμπεραίνουμε πως το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά -8 GHz. Μάλιστα στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 62 km.



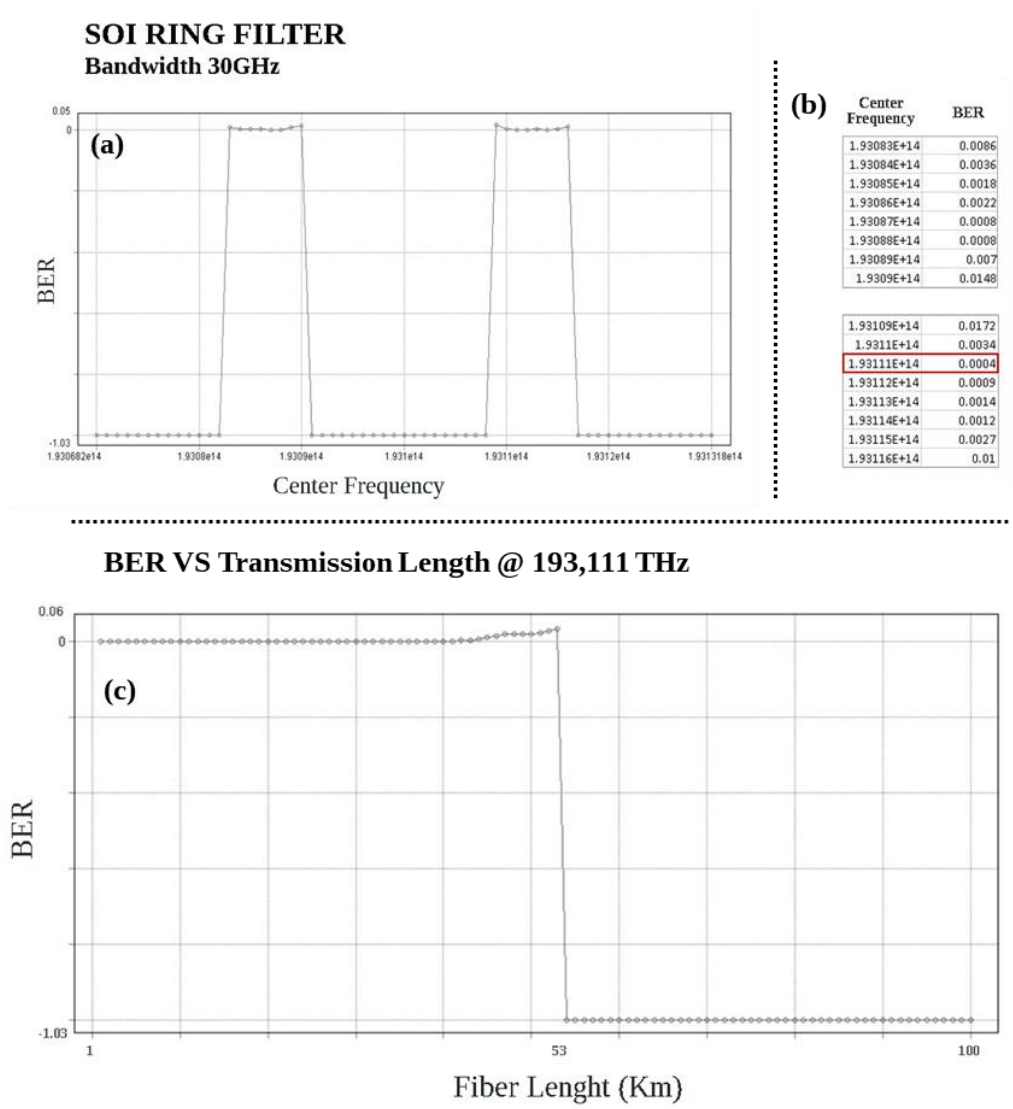
**BER VS Transmission Length @ 193,111 THz**



Εικόνα 60 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου SOI RING 25GHz, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

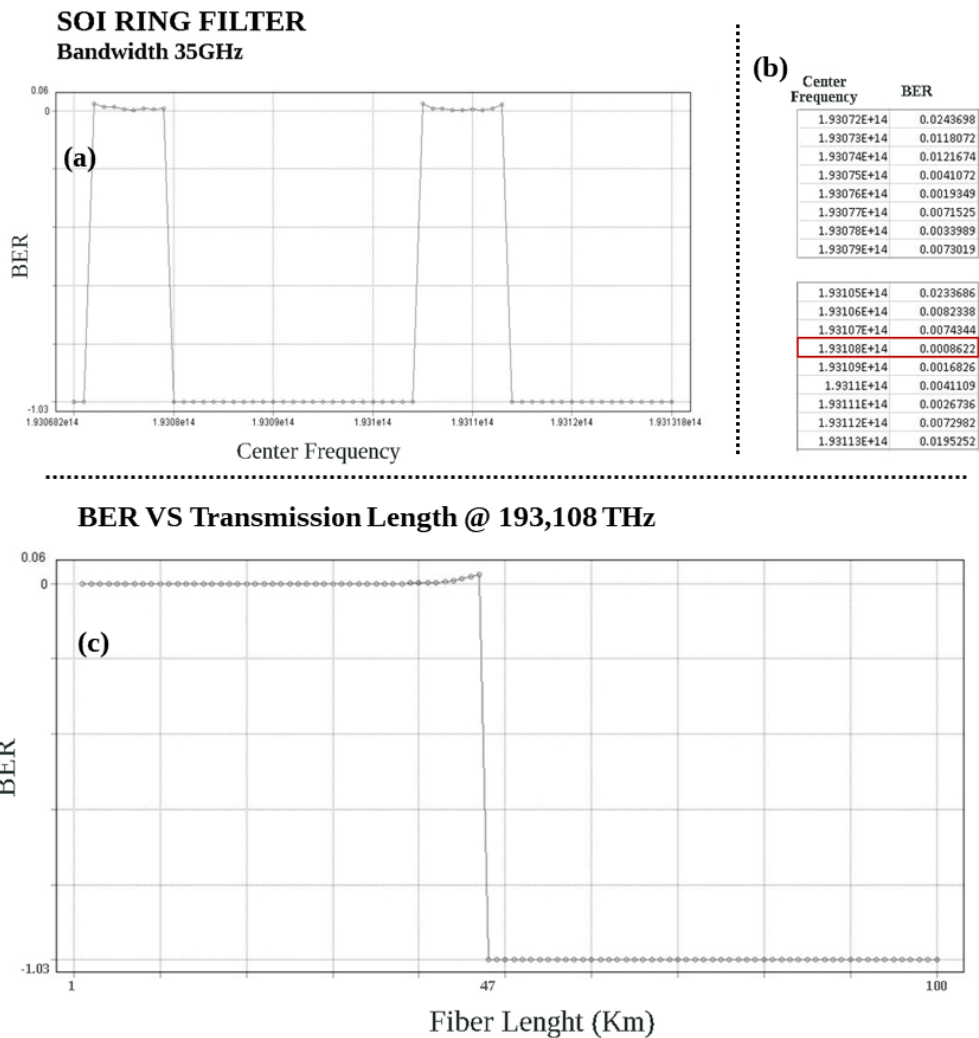
Το επόμενο φίλτρο που δοκιμάσαμε είχε εύρος ζώνης 25 GHz. Στο διάγραμμα παραπάνω βλέπουμε πως η καλύτερη συχνότητα για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,111 THz. Δεδομένου πως το οπτικό φέρον είναι στα 193,1 THz συμπεραίνουμε πως το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά 11 GHz. Μάλιστα στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 55 km.

Το επόμενο φίλτρο που δοκιμάσαμε είχε εύρος ζώνης 30 GHz. Στο διάγραμμα παραπάνω βλέπουμε πως η καλύτερη συχνότητα για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,111 THz. Δεδομένου πως το οπτικό φέρον



Εικόνα 61 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου SOI RING 30GHz, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (γ) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

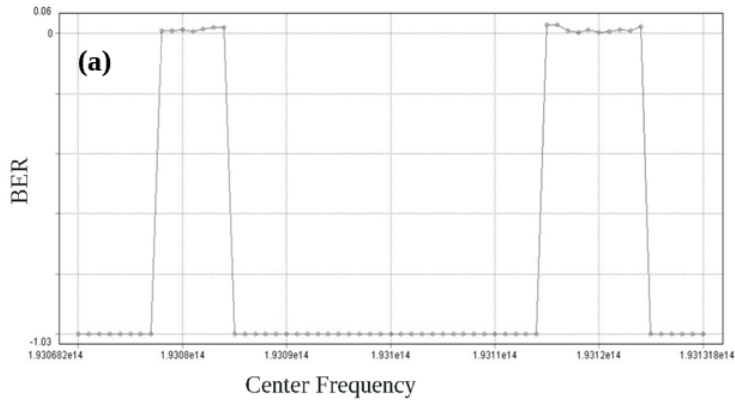
είναι στα 193,1 THz συμπεραίνουμε πως το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά 11 GHz. Μάλιστα στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 55 km.



Εικόνα 62 (α) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου SOI RING 35GHz, (β) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (γ) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

Επίσης δοκιμάσαμε φίλτρο με εύρος ζώνης 35 GHz. Στο διάγραμμα παραπάνω βλέπουμε πως η καλύτερη συχνότητα για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,108 THz. Δεδομένου πως το οπτικό φέρον είναι στα

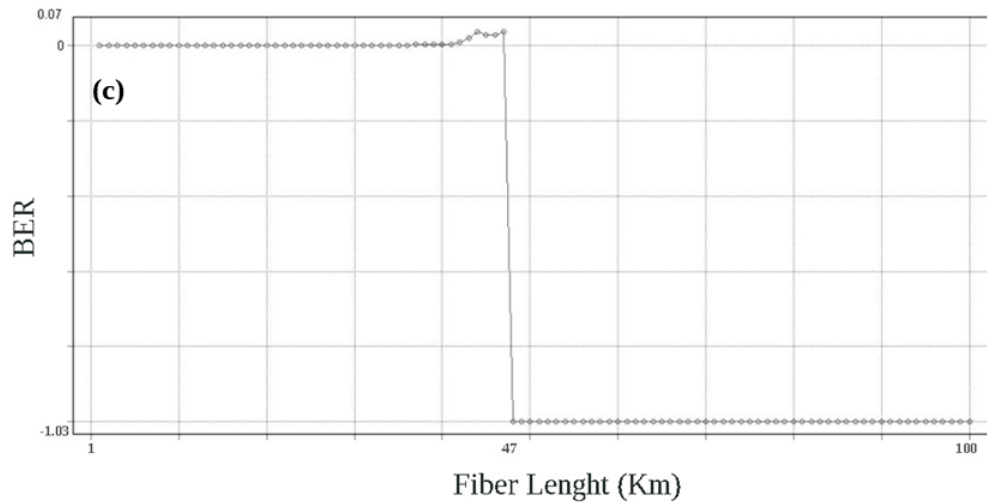
**SOI RING FILTER**  
Bandwidth 40GHz



(b)

Center Frequency	BER
1.93078E+14	0.00941431
1.93079E+14	0.00978981
1.9308E+14	0.01199774
1.93081E+14	0.00538931
1.93082E+14	0.01314941
1.93083E+14	0.01810898
1.93084E+14	0.0192884
1.93115E+14	0.02670493
1.93116E+14	0.02865495
1.93117E+14	0.0079191
1.93118E+14	0.00345336
1.93119E+14	0.01026486
1.9312E+14	0.00247245
1.93121E+14	0.00525098
1.93122E+14	0.01033454
1.93123E+14	0.00912242
1.93124E+14	0.02344452

**BER VS Transmission Length @ 193,120 THz**



Εικόνα 63 ((a) BER σήματος σε συνάρτηση με την κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου SOI RING 40GHz, (b) Εύρεση καλύτερου δυνατού BER σε συνάρτηση με τη κεντρική συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, (c) Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με το μήκος μετάδοσης του σήματος

193,1 THz συμπεραίνουμε πως το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά 8 GHz. Μάλιστα στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 48 km.

Τέλος δοκιμάσαμε φίλτρο με εύρος ζώνης 40 GHz. Στο διάγραμμα παραπάνω βλέπουμε πως η καλύτερη συχνότητα για να κεντράρουμε το φίλτρο είναι τα 193,120 THz. Δεδομένου πως το οπτικό φέρον είναι στα 193,1 THz συμπεραίνουμε πως το φίλτρο έχει τη καλύτερη απόδοση όταν είναι μετατοπισμένο κατά 20 GHz. Μάλιστα στη περίπτωση αυτή το σήμα μπορεί να μεταδοθεί επιτυχώς, δηλαδή χωρίς καμία ουσιαστική παραμόρφωση, μέχρι τα 48 km.



# Κεφάλαιο 5 – Επίλογος και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Συμπερασματικά στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής δόθηκε μεγάλη έμφαση στην προώθηση της ανάπτυξης και του σχεδιασμού νέων οπτικών πομποδεκτών για την κάλυψη των εξελισσόμενων απαιτήσεων των υποδομών δικτύων. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε σε επίπεδο προσομοιώσεων ένα σύστημα το οποίο είχε όλα τα χαρακτηριστικά των συστημάτων που χρησιμοποιούνται στα νέα δίκτυα 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> γενιάς. Ποιο συγκεκριμένα στο σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκαν πομποδέκτες που είχαν σαν βάση EMLs και DMLs, τα οποία είναι γνωστά τόσο για την αποδοτικότητά τους όσο και για την οικονομική μαζική παραγωγή τους. Οι πομποδέκτες αυτοί είναι σχεδιασμένοι ώστε να τυπώνονται σε ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα ούτως ώστε να είναι πολύ πιο αποτελεσματικοί και οικονομικοί.

Ωστόσο το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τέτοια οπτικά δίκτυα είναι το πρόβλημα της διασποράς. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου εμείς προτείναμε μια λύση η οποία βασίζεται σε οπτικούς μικροδακτυλίους και οι οποίοι μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στα υπάρχοντα ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα. Παρουσιάζοντας διεξοδικά το θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο στηρίζεται η προτεινόμενη μέθοδος, προτείνουμε μια λύση η οποία υποστηρίζεται και από πειράματα προσομοίωσης που επιβεβαιώνουν τα θεωρητικά ευρήματα, επικυρώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης τεχνικής μας.

Πιο συγκεκριμένα εμείς χρησιμοποιήσαμε πολλά οπτικά φίλτρα των οποίων η συνάρτηση μεταφοράς δινόταν μέσα στο πρόγραμμα προσομοίωσης (VPI). Τα φίλτρα αυτά εισήγαγαν μια φάση στο σήμα με αποτέλεσμα να αντισταθμίζουν τη φάση η οποία εισάγεται λόγω του φαινομένου της διασποράς. Τα αποτελέσματα βέβαια βελτιώθηκαν εντυπωσιακά όταν αντί για τα έτοιμα φίλτρα χρησιμοποιήσαμε την συνάρτηση μεταφοράς ενός φωτονικού μικροδακτυλίου

πυριτίου το οποίο έχουμε σχεδιάσει εμείς. Αυτή η λύση που προτείνουμε, πέρα από το γεγονός ότι παρουσιάζει εντυπωσιακή απόδοση, έχει και το πλεονέκτημα ότι μπορεί να ενσωματωθεί σε ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα.

Σαν επόμενο βήμα λοιπόν, εμείς προτείνουμε ο συγκεκριμένος δακτύλιος να τυπωθεί ώστε να μπορούμε να τον δοκιμάσουμε υπό κανονικές εργαστηριακές συνθήκες. Αν τα καλά αυτά αποτελέσματα που πήραμε στις προσομοιώσεις επιβεβαιωθούν και από το πείραμα, τότε ανοίγει ο δρόμος για την χρήση αυτών των δομών σε ποικίλες εφαρμογές. Θα μπορούσαν δηλαδή για παράδειγμα να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή ολοκληρωμένων οπτικών μεταγωγέων οι οποίοι θα στέλνουν την πληροφορία σε διαφορετικό σημείο του δικτύου και ως εκ τούτου το σήμα θα υποστεί και διαφορετική διασπορά την οποία θα αντιμετωπίζουν οι μικροδακτύλιοι με κατάλληλη ρύθμιση αλλάζοντας την θερμοκρασία τους.

# Κεφάλαιο 6 – Βιβλιογραφία

- [1] "What is the Meaning of 100G Channels Networks to Service Providers", April 23, 2014. [Online]. Available: <http://www.fiber-optic-components.com/what-is-the-meaning-of-100g-channels-networks-to-service-providers.html>
- [2] Διαφάνειες του μαθήματος "Φωτονική Τεχνολογία στις Τηλεπικοινωνίες" του 7<sup>ου</sup> Εξαμήνου της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών κ' Μηχανικών Υπολογιστών διαθέσιμες στη διεύθυνση <http://photonics.ntua.gr/announcements.html>
- [3] Διαφάνειες του μαθήματος "Συστήματα Μετάδοσης και Δίκτυα Οπτικών Ινών" του 8<sup>ου</sup> Εξαμήνου της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών κ' Μηχανικών Υπολογιστών διαθέσιμες στη διεύθυνση <http://photonics.ntua.gr/announcements.html>
- [4] Σημειώσεις από το μάθημα "Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες".
- [5] "ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ Θεωρία-Εφαρμογές-Πειράματα- Προσομοιώσεις," ΤΖΙΟΛΑ, 2010
- [6] "Βασικές αρχές Σημάτων & Συστημάτων", Γεώργιος Καραγιάννης, Πέτρος Α.
- [7] Συστήματα Επικοινωνίας, Simon Haykin, Michael Moher
- [8] "ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ", Παναγιώτης Γ. Κωττής
- [9] "High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission", Matthias Seimetz, Springer 2009
- [10] Optical Networks - A practical Perspective Third Edition", Rajiv Ramaswami – Kumar N.Sivarajan – Galen H.Sasaki , Morgan Kaufmann
- [11] "Optical Interconnects for High Performance Computing" , Mark A. Taubenblatt
- [12] High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission, Matthias Seimetz
- [13] Next Generation Sliceable Bandwidth Variable Transponders Nicola Sambo, Piero Castoldi, Antonio D'Errico, Emilio Riccardi, Annachiara Pagano, Michela Svaluto Moreolo, Josep M. Fàbrega, Danish Rafique, Antonio Napoli, Silvano Frigerio, Emilio Hugues Salas, Georgios Zervas, Markus Nölle, Johannes K. Fischer, Andrew Lord and Juan P.F.-P Gimenez
- [14] G. Kalfas et al., "Next generation fiber-wireless fronthaul for 5G mm- Wave networks," IEEE Commun. Mag., vol. 57, no. 3, pp. 138–144, Mar. 2019.
- [15] N. Argyris et al., "A 5G mmWave fiber-wireless IFoF analog mobile fronthaul link with up to 24Gb/s multi-band wireless capacity," IEEE J. Lightw. Technol., vol. 37, no. 12, pp. 2883–2891, Jun. 2019.
- [16] J. Lai, C. Liao, J. Jou, T. Shih, and P. Chiang, "Design of high-speed optical receiver module for 160 Gb/s NRZ and 200 Gb/s PAM4 transmissions," in Proc IEEE Int. Symp. Circuits Syst., Sapporo, Japan, 2019, pp. 1–4.

- [17] G. H. Smith, D. Novak, and Z. Ahmed, "Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 45, no. 8, pp. 1410–1415, Aug. 1997.
- [18] D. Hervé et al., "Techniques for the compensation for chromatic dispersion effects in fiber-wireless systems," *URSI Radio Sci. Bull.*, vol. 2004, no. 309, pp. 26–37, Jun. 2004.
- [19] H. Chen, N. Kaneda, J. Lee, J. Chen, and Y. Chen, "Optical filter requirements in an EML-based single-sideband PAM4 intensity modulation and direct-detection transmission system," *Opt. Express*, vol. 25, pp. 5852–5860 2017.
- [20] S. Devra and G. Kaur, "Dispersion compensation using raised cosine filter in optical fibers," in *Proc. Opt. Fibers Int. J. Inf. Electron. Eng.*, vol. 1, pp. 47–51, 2011.
- [21] K. Kaur and B. Kaur, "Dispersion compensation techniques : A review," *Resh. Cell: An Int. J. Eng. Sci.*, Special Issue, vol. 20, Nov. 2016.
- [22] Y. Ding et al., "Bandwidth and wavelength-tunable optical bandpass filter based on silicon microring-MZI structure," *Opt. Express*, vol. 19, no. 7, pp. 6462–6470, 2011.
- [23] X. Han et al., "A tunable optical waveguide ring resonator for microwave photonic filtering," in *Proc. IEEE Int. Topical Meeting Microw. Photon. (MWP)*, Alexandria, VA, 2013, pp. 88–91.
- [24] S. Song et al., "Optical single-sideband modulation based on silicon-on-insulator coupled-resonator optical waveguides," *Opt. Eng.*, vol. 55, no. 3, Oct. 2015, Art. no. 031114.
- [25] G. Pouloupoulos et al., "Flexible filtering element on SOI with wide bandwidth tunability and full FSR tuning," *J. Lightw. Technol.*, vol. 37, no. 2, pp. 300–306, Jan. 2019.
- [26] Ket et al., "SOI-ring based analog phase processing for chromatic dispersion compensation in A-IFoF fronthaul," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.*, 2019, Paper W3I.4.
- [27] G. Giannoulis et al., "Analog radio-over-fiber solutions for 5G communications in the beyond-CPRI era," in *Proc. ICTON*, vol. 6, Jul. 2018, pp. 1–5.
- [28] R. Munoz et al., "SDN/NFV 5G fronthaul networks integrating analog/ digital RoF, optical beamforming, power over fiber and optical SDM technologies," in *Proc. EuCNC*, Jun. 2019, pp. 18–21.
- [29] Bidkar et al., "First demonstration of an ultra-low-latency fronthaul transport over a commercial TDM-PON platform," in *Proc. OFC*, Mar. 2018, pp. 11–15.
- [30] Meijerink et al., "Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas – part I: Design and performance analysis," *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 3–18 2010.
- [31] Panagiotis Toumasis, Giannis Giannoulis, Giannis Pouloupoulos, Konstantina Kanta, Dimitrios Apostolopoulos, and Hercules Avramopoulos, "On the Ring Resonator-Based Dispersion Compensation Method for Analog 5G/B5G Mobile Fronthauling," *J. Lightwave Technol.* 39, 1662-1671 (2021)
- [32] Raikar, Amit & Jirage, Amol & Narake, Ashwini. (2021). A SURVEY: DISPERSION COMPENSATION TECHNIQUES FOR OPTICAL FIBER COMMUNICATION.