



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Επικοινωνίες και Δίκτυα Δεδομένων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση
στοιχείων CFBG**

**Νικόλαος Ι. Τσανάκας
Α.Μ. 18**

Εισηγητής: Δρ Ηρακλής Σίμος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση
στοιχείων CFBG

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και
βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Σίμος Ηρακλής Αναπληρωτής Καθηγητής	Σταθόπουλος Νικόλαος Καθηγητής	Σαββαΐδης Στυλιανός Καθηγητής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση
στοιχείων CFBG**

**Νικόλαος Ι. Τσανάκας
Α.Μ. 18**

Εισηγητής:

Δρ. Ηρακλής Σίμος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. Νικόλαος Α. Σταθόπουλος, Καθηγητής

Δρ. Στυλιανός Σαββαΐδης, Καθηγητής

Δρ. Ηρακλής Σίμος, Αναπληρωτής, Καθηγητής

Ημερομηνία εξέτασης 10/7/2023

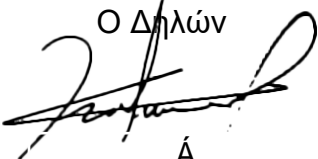
Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση
στοιχείων CFBG

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος Τσανάκας Νικόλαος του Ιωάννου, με αριθμό μητρώου 18 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Επικοινωνίες και Δίκτυα Δεδομένων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Α

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση
στοιχείων CFBG

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών με τίτλο «Επικοινωνίες και Δίκτυα Δεδομένων». Για την ολοκλήρωση της καταβλήθηκε σημαντικός χρόνος και κόπος. Θα αποτελούσε, ωστόσο, μέγιστη παράλειψη η απουσία ευχαριστήριας αναφοράς στα πρόσωπα τα οποία είτε έμμεσα είτε άμεσα ενίσχυσαν με καθοριστικό τρόπο αυτή την προσπάθεια.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Επιβλέποντες Καθηγητές μου, Καθηγητή Δρ Νικόλαο Α. Σταθόπουλο και Αναπληρωτή Καθηγητή Δρ Ηρακλή Σίμο για την αδιάλειπτη στήριξη και καθοδήγησή τους κατά την διάρκεια του εγχειρήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως η συνεισφορά τους συνοδεύτηκε από το θερμό ενδιαφέρον, την προσοχή άλλα και το ήθος τους, στοιχεία τα οποία προσωπικά εκτίμησα ιδιαίτερα.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τόσο τους γονείς μου για την οικονομική στήριξη που μου παρείχαν όσο και τους αγαπητούς συναδέλφους μου Χαράλαμπο Μερενίδη και Ελευθερία Τάτση που με κατανόηση και υπομονή μου συμπαραστάθηκαν το διάστημα αυτό.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να κλείσω τον ευχαριστήριο λόγο μου, χωρίς να αναφερθώ στην σύζυγό μου Ελευθερία Ακριτίδου και στα τέσσερα παιδιά μου. Παραμένω ευγνώμων για την αδιάλειπτη στήριξη, κατανόηση και ενθάρρυνση που μου πρόσφεραν απλόχερα καθ' όλη την διάρκεια των δύο τελευταίων ετών.

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση
στοιχείων CFBG

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που περιορίζει τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών υψηλής ταχύτητας, καθώς υποβαθμίζει την ποιότητα και το εύρος ζώνης των μεταδιδόμενων σημάτων, είναι η χρωματική διασπορά. Διαφορετικά μήκη κύματος φωτός ταξιδεύουν μέσω της οπτικής ίνας, αναπτύσσοντας διαφορετικές ταχύτητες με αποτέλεσμα στο δέκτη να παρατηρούμε την διεύρυνση των παλμών και συνεπώς την παρεμβολή μεταξύ των λαμβανόμενων συμβόλων. Αυτό οδηγεί στον περιορισμό των επιτεύξιμων ρυθμών δεδομένων και της απόστασης μετάδοσης.

Για τον περιορισμό της χρωματικής διασποράς, γίνεται χρήση μεταξύ διαφόρων διατάξεων και των ινών Chirped Fiber Bragg Gratings (CFBGs). Αυτή η εργασία εστιάζει στην εφαρμογή των CFBGs για την αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς, δημιουργώντας ένα μοντέλο προσομοίωσης στον προσομοιωτή Optisystem. Τα CFBGs είναι οπτικές ίνες που παρουσιάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ανάκλασης εξαρτώμενα από το μήκος κύματος και επιτρέπουν την αντιστάθμιση σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος.

Εισάγεται η έννοια της χρωματικής διασποράς, κάνοντας αναφορά στις αιτίες και τις συνέπειές της στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας. Στη συνέχεια αναφέρεται η σημασία των τεχνικών αντιστάθμισης διασποράς για τον μετριασμό των επιπτώσεων της χρωματικής διασποράς και εξηγείται η αρχή λειτουργίας των CFBGs. Ερευνάται η διακύμανση του δείκτη διάθλασης καθώς και η δομή του πλέγματος και πώς αυτό επιτρέπει την καταστολή της ομαδικής διασποράς ταχύτητας (GVD) που εμφανίζεται από διαφορετικά μήκη κύματος φωτός. Αναλύονται οι τεχνικές κατασκευής και οι προκλήσεις που σχετίζονται με τα CFBGs περιγράφοντας διάφορες μεθόδους κατασκευής, αναλύοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου CFBG, επισημαίνοντας τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους.

ABSTRACT

One major factor that limits the high-speed fiber optics communication systems, by reducing the quality and bandwidth of the transmitted signal, is the chromatic dispersion. The different wavelengths that travel through the fiber optic cable with different speeds respectively, result in the observation of a divergence of pulses in the receptor and consequently in the observation of interference amongst the symbols received. This contributes to the limitation of the achievable rhythm of data and their distance of transmission.

In order to control the chromatic dispersion, the Chirped Fiber Bragg Gratings (CFBGs) is utilized which focuses on the application of the GFBCs to counterbalance the chromatic dispersion via a simulation model in the Optisystem simulator. The GFBCs comprise fibre optics with specific reflection characteristics that depend on the wavelength, allowing the counterbalance within a wide range of wavelengths.

The chromatic dispersion concept is initially introduced, by way of reference to the causes and consequences of pertaining to the fibre optic communication systems. Additionally, the reference of the counterbalance measures of the dispersion, for the control of the chromatic dispersion effects is mentioned and the principles of the GFBCs function are explained.

The fluctuation of the reflection index, as well as the structure of the web and how this allows the compression of the group velocity divergence (GVD) that appears in the different wavelengths of light, remains subject to further study. The analysis pertains to the build methods and the challenges in relation to the GFBCs respectively, the GCFBs simulation model results for the counterbalance of the chromatic dispersion, with an emphasis on the advantages and limits.

Λέξεις Κλειδιά: Διπλωματική εργασία, Λείζερ, Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία, Φράγμα Bragg, Εναπόθεση Ατμών, Πυρήνας, Αντιστάθμιση διασποράς, Χρωματική διασπορά, Οπτική επικοινωνία, Μήκος Κύματος, Ομαδική διασπορά ταχύτητας, Δίκτυα οπτικών ινών, Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος, Διασπορά Κυματοδηγού, Διαχείριση Διασποράς, Διασπορά του Κυματοδηγού, Οπτικά φίλτρα, Ανακλαστικότητα, Ενεργός Δείκτης, Φράγματα ινών Bragg, Q Factor

Keywords: Final project, Laser, Electromagnetic Radiation, MCVD, Core, Chirped Fiber Bragg Grating, Dispersion compensation, Chromatic dispersion, Wave Length, Optical communication, Group velocity dispersion (GVD), Wavelength-division multiplexing (WDM), Waveguide Dispersion, Dispersion management, Optical filters, Waveguide Dispersion, Reflectivity, Effective Index, Fiber Bragg gratings, Q Factor

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	18
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	18
1.1 Ιστορικά.....	19
1.2 Χαρακτηριστικά Οπτικής Ίνας.....	20
1.2.1 Γενικές πληροφορίες.....	20
1.2.2 Τα είδη των Οπτικών Ινών.....	21
1.2.3 Κατασκευή οπτικής ίνας.....	24
1.2.3.1 Πυρήνας	24
1.2.3.2 Επίστρωση και Εξωτερικό περίβλημα.....	26
1.3 Χαρακτηριστικά διάδοσης	27
1.3.1 Βασικές έννοιες Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	27
1.3.2 Εξισώσεις Maxwell	28
1.4 Διασπορά.....	31
1.4.1 Διατροπική διασπορά (multimode dispersion).....	32
1.4.2 Χρωματική διασπορά-διασπορά Υλικού (chromatic or material dispersion).....	32
1.4.3 Ομαδική διασπορά ταχύτητας (GVD)	33
1.4.4 Διασπορά υλικού.....	35
1.4.5 Διασπορά κυματοδηγού	36
1.4.6 Διασπορά τρόπου πόλωσης (PMD).....	38
1.5 Αντιμετώπιση της διασπορας	38
1.6 Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM)	39
1.6.1 Βασικά στοιχεία του WDM - Οπτικά φίλτρα.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο – FBG.....	44
2.1 Γενικά.....	44
2.2 Φράγματα Bragg – Γενικά χαρακτηριστικά.....	44
2.3 Κατασκευή Φραγμάτων Bragg	46
2.3.1 Κατασκευή με Συμβολομετρική Μέθοδο	47
2.3.2 Κατασκευή με την μέθοδο μάσκα φάσης.....	48
2.3.3 Μέθοδος σημείο προς σημείο	49

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG

2.3.4 Έλεγχος της ανακλαστικότητας FBG.....	50
2.4 Αντιμετώπιση της Χρωματικής Διασποράς με χρήση FBG	50
2.4.1 Μηχανισμός FBG - CFBG	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	54
3. Προσομοίωση – Αντιστάθμιση χρωματικής διασποράς με χρήση CFBG	54
3.1 Παραγωγή μοντέλου αντιστάθμιση χρωματικής διασποράς με χρήση CFBG.....	54
3.2.1 Πομπός	55
3.2.2 Γεννήτρια ψευδο-τυχαίας ακολουθίας δυαδικών ψηφίων (PRBS)	55
3.2.3 Γεννήτρια παλμών NRZ (Non-Return-to-Zero).....	56
3.2.4 Διαμορφωτής Mach-Zehnder.....	58
3.2.5 Laser CW (συνεχούς κύματος)	59
3.3 Οπική ίνα (Optical Fiber)	60
3.4 CFBG (Chirped Fiber Bragg Grating)	61
3.4.1 Frequency in CFBG.....	61
3.4.2 Effective index in CFBG.....	62
3.4.3 Length.....	62
3.4.4 Apodization in CFBG	63
3.4.5 Modulation AC.....	67
3.4.6. Modulation DC	67
3.4.7 Chirp in CFBG.....	68
3.4.8 Calculation	70
3.4.9 «Number of segments» - Αριθμός Τμημάτων.....	70
3.4.10 Max. number of special points - Μέγιστος αριθμός ειδικών σημείων	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	72
4.1 Simulation – Προσομοίωση.....	72
4.2 Noise – Θόρυβος	72
4.2.1 Noise threshold - Κατώφλι θορύβου	72
4.2.2 Noise dynamic - Δυναμική θορύβου	73
4.2.3 Noise calculation bandwidth - Εύρος ζώνης υπολογισμού θορύβου	73
4.3 Δέκτης.....	73
4.3.1 Photodetector PIN.....	73

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG

4.3.2 Low Pass Bessel Filter	74
4.4 Τελική διάταξη στοιχείων.....	75
4.5 Όργανα μέτρησης.....	75
4.5.1 Optical Time Domain Visualizer (OTDV).....	75
4.5.2 Optical Spectrum Analyzer (OSA).....	75
4.5.3 Oscilloscope Visualizer - Παλμογράφος	76
4.5.4 BER Analyzer – Διάγραμμα οφθαλμού	76
4.6 Εκτέλεση Προσομοίωσης	76
4.6.1 Τελική διάταξη.....	76
4.6.2 Επιρροή του Effective index value στην αντιμετώπιση διασποράς.....	78
4.6.3 Επιρροή του Linear parameter στην αντιμετώπιση της διασποράς.....	79
4.6.4 Επιρροή του «Number of segments» - Αριθμός Τμημάτων στην αντιμετώπιση της διασποράς	81
4.7 Μετρήσεις	81
4.7.1 Μετρήσεις Εξόδου Πομπού	81
4.7.2 Μετρήσεις Εξόδου Οπτικής Ίνας	83
4.7.3 Μετρήσεις Εξόδου CFBG Ίνας	83
4.7.4 Μετρήσεις Τελικού Σήματος	85
4.7.6 Διάγραμμα οφθαλμού Q factor / BER.....	85
4.8 Αλλαγές παραμέτρων.....	87
4.8.1 Αλλαγή των τύπων CFBG.....	87
4.8.2 Gaussian Προφίλ Apodization	89
4.8.3 Αλλαγή μήκους CFBG	93
4.8.4 Προσθήκη βαθμίδας CFBG.....	95
4.8.5 Μεταβολή του bit rate και αντιμετώπιση χρωματικής διασποράς.....	96
4.9 Συζήτηση & Συμπεράσματα	98
Βιβλιογραφία.....	100

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Απεικόνιση ηλεκτρομαγνητικού κύματος [6]	21
Σχήμα 2 Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικού Κύματος.....	28
Σχήμα 3 Διεύρυνση του παλμού εντός της οπτικής ίνας λόγω διασποράς.....	31
Σχήμα 4 Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης των n (δείκτης διάθλασης) και n_g (δείκτης ομάδας) για ανάλογα μήκη κύματος στην περιοχή 0,5–1,6 μm για πυρήνα από τηγμένο πυρίτιο [11].	36
Σχήμα 5 Απεικόνιση τιμών των δυο παραγώγων και του b για κάθε διαφορετική τιμή παραμέτρου V [15].....	37
Σχήμα 6 Απεικόνιση της διασποράς D_M , D_w , D για διαφορετικά μήκη κύματος.	37
Σχήμα 7 Διαμόρφωση παλμού NRZ ανάλογα με την εισερχόμενη πληροφορία.....	57
Σχήμα 8 Αποτύπωση μεταβολής εύρους ζώνης σε σχέση με το μήκος της CFBG.....	63
Σχήμα 9 Αποτύπωση CFBG με apodization προφίλ Gaussian.....	65
Σχήμα 10 Αποτύπωση CFBG με apodization προφίλ tanh.	66
Σχήμα 11 Αποτύπωση των διαφορετικών συναρτήσεων Apodization σε διαφορετικά μήκη ίνας CFBG.....	66
Σχήμα 12 Αποτύπωση αλλαγής της κλίσης του group delay και της φασματικής απόκρισης με αλλαγή της τιμής του προφίλ apodization.....	67
Σχήμα 13 Αλλαγή Max. Q Factor σε σχέση με τις τιμές Effective index.....	79
Σχήμα 14 Μεταβολή του Q καθώς αλλάζει η παράμετρος της γραμμικής συνάρτησης Chirp.	80
Σχήμα 15 Οπτικό σήμα στην έξοδο του πομπού.	82
Σχήμα 16 Φάσμα οπτικού σήματος στην έξοδο του πομπού.....	82
Σχήμα 17 Οπτικό σήμα στην έξοδο της οπτικής ίνας.....	83
Σχήμα 18 Οπτικό σήμα στην έξοδο της CFBG οπτικής ίνας δε διόρθωση στην χρωματική διασπορά.....	83
Σχήμα 19 Τελικός λαμβανόμενος παλμός αφού έχει διέλθει και μέσω χαμηλοπερατού φίλτρου Bessel.	85
Σχήμα 20 Γραφική αποτύπωση αποτελεσματικότερου τύπου CFBG.....	89
Σχήμα 21 Αποτύπωση πλεονεκτήματος Tahn προφίλ Apodization.....	92
Σχήμα 22 Αποτύπωση Q συνάρτηση του μήκους της ίνας SMF.	93
Σχήμα 23 Γραφική απεικόνιση σχέσης Q ανά βαθμίδες CFBG.....	96

Σχήμα 24 Μείωση του Q όσο αυξάνεται το Bit rate. 98

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Παράμετροι ίνας SMF.	78
Πίνακας 2 Παράμετροι ίνας CFBG (Linear).	78
Πίνακας 3 Σχέση Q με Effective Index.	79
Πίνακας 4 Σχέση Q με Linear Parameter.	80
Πίνακας 5 Σχέση Number of segments με Q.	81
Πίνακας 6 Ανάλυση οφθαλμικού διαγράμματος για Tahn και Gauss – CFBG.	92
Πίνακας 7 Αλλαγή παραμέτρων Q και BER συνάρτηση του μήκους της ίνας SMF.	93
Πίνακας 8 Αποτελέσματα Q, BER αλλάζοντας μόνο το μήκος της CFBG.	94
Πίνακας 9 Αποτελέσματα Q, BER αλλάζοντας επιπροσθέτως του μήκους της CFBG και το Linear Parameter της CFBG.	94
Πίνακας 10 Αποτελέσματα Q, BER προσθέτοντας και οπτικό ενισχυτή EDFA.	95
Πίνακας 11 Αποτελέσματα Q, BER χωρίς CFBG, με μια ή περισσότερες βαθμίδες CFBG's.	95
Πίνακας 12 Σχέση Q και Bitrate.	97

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

MCVD Modified Chemical Vapor Deposition

PCVD Plasma Chemical Vapor Deposition

GVD Group Velocity Dispersion

Dw Dispersion Waveguide

PMD Polarization Mode Dispersion

WDM Wavelength Division Multiplexing

FDM Frequency Division Multiplexing

FB Fabry Perot

FBG Fiber Bragg Gratings

UV Ultraviolet

DCF Dispersion Compensating Fiber

CFBG Chirped Fiber Bragg Grating

NRZ Non Return To Zero

PRBS Pseudo-Random Bit Sequence Generator

CW Continuous Wave

SMF Single Mode Optical Fiber

SNR Signal To Noise Ratio

OTDV Optical Time Domain Visualizer

OTDR Optical Time Domain Reflectometer

OSA Optical Spectrum Analyzer

BER Bit Error Rate

ISI Intersymbol Interference

ASE Amplified Spontaneous Emission

FEC Forward Error Correction

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανέκαθεν ο άνθρωπος είχε την ανάγκη της επικοινωνίας προκειμένου να μεταδίδει ιδέες, ανάγκες και επιθυμίες στους άλλους. Αυτό σε συνδυασμό με την επινοητικότητα και την εφευρετικότητά του οδήγησε στην ανάπτυξη νέων τεχνικών και τεχνολογιών. Μέχρι 2 αιώνες πριν, οι επικοινωνίες στηρίζονταν μόνο σε οπτικά ή ακουστικά μέσα με πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ένα σύστημα φωτιάς επινοημένο από τους Έλληνες τον 8ο αιώνα π.Χ. , το οποίο πολλές φορές αντικαταστάθηκε με την αποστολή μηνυμάτων μέσω του οδικού δικτύου όπου ήταν ταχύτερη, αποτελεσματικότερη και πιο αξιόπιστη. Μόλις το 1794 εφευρέθηκε ο μηχανικός τηλεγράφος, ενώ το 1837 ανακαλύπτεται ο ηλεκτρικός τηλεγράφος και το 1896 από τον Marconi το ασύρματο τηλέφωνο. Η χρήση της οπτικής ίνας για τις τηλεπικοινωνίες ξεκίνησε μόλις το 1973 [1]. Αυτό ήταν απαιτητό χάριν πιστότητας του δικτύου, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη χωρητικότητα μετάδοσης για την αποστολή περισσότερων πληροφοριών, αύξηση της απόστασης μετάδοσης ανάμεσα στον αποστολέα και τον λήπτη και όλα αυτά, με τα λιγότερα σφάλματα στο λαμβανόμενο μήνυμα.

Οι ικανότητες μετάδοσής στα συστήματα επικοινωνίας που βασίζονται τόσο στη χρήση ηλεκτρικών καλωδίων, όσο και στον ελεύθερο χώρο - ασύρματες-, παρατηρήθηκε ότι έχει ένα ανώτατο όριο. Κανάλι επικοινωνίας ορίζεται η ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη για την ανταλλαγή πληροφοριών. Ο τύπος του καναλιού καθορίζει τα χαρακτηριστικά της απόδοσης. Σε κάθε κανάλι είτε αυτό είναι χαλκός, ασύρματο, δορυφορικό, μικροκυματικό ή οπτικό εισάγονται παρεμβολές με την μορφή θορύβου. Έτσι η πιστότητα του σήματος υποβαθμίζεται με αποτέλεσμα στον λήπτη να υπάρχει αλλοίωση – παρερμηνευση του λαμβανόμενου σήματος. Η ανάγκη χρήσης δικτύου οπτικών ινών στα συστήματα επικοινωνίας, γεννήθηκε λόγω των φυσικών χαρακτηριστικών του φωτός που πλεονεκτεί σε όλους σχεδόν τους τομείς, ταχύτητα, χωρητικότητα, πιστότητα, ανάμεσα στα ηλεκτρικά κανάλια και τα οπτικά.

Ωστόσο όπως όλα τα δίκτυα επικοινωνιών έτσι και το δίκτυο οπτικών ινών εμφανίζει αλλοιώσεις στο μεταδιδόμενο σήμα εξαιτίας διαφόρων παραγόντων που εμφανίζονται με την μορφή «θορύβου». Οι αλλοιώσεις του σήματος οφείλονται κυρίως στην εξασθένηση και στην διασπορά. Η μείωση της ισχύος του σήματος είναι αυτό που ονομάζουμε εξασθένηση και οφείλεται βασικά, στην σκέδαση και στην απορρόφηση. Ενώ το φαινόμενο της διεύρυνσης του παλμού οδηγεί στην παραμόρφωση του σήματος και είναι αυτό που ονομάζουμε διασπορά. Η αντιμετώπιση της διασποράς σε πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, σε συνδυασμό με πολύ μεγάλο μήκος οπτικών ινών είναι αρκετά σύνθετο πρόβλημα και είναι το αντικείμενο που θα μας απασχολήσει σε αυτήν την εργασία.

1.1 Ιστορικά

Δυο συσκευές ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους κάνοντας χρήση ενός συστήματος επικοινωνίας. Στις οπτικές επικοινωνίες η μετάδοση των πληροφοριών γίνεται μέσω ενός καναλιού με χρήση οπτικού σήματος. Αυτή η ιδέα έχει ρίζες από την αρχαιότητα, ωστόσο μόλις το 1792 η ιδέα αυτή επεκτάθηκε από τον Claude Chappe με την εφεύρεση των σημαφόρων. Στη συνέχεια η ανακάλυψη του τηλεγράφου τη δεκαετία του 1830 έδωσε το έναυσμα για τις ηλεκτρικές επικοινωνίες καθώς αντικατέστησε τη χρήση του φωτός. Παράλληλα με την χρήση των ηλεκτρικών επικοινωνιών ο Alexander Graham Bell και ο βοηθός του Charles Sumner Tainter το 1880 εφηύραν τον πρόδρομο των οπτικών επικοινωνιών, το Photophone. Συγκεκριμένα με την χρήση μιας οπτικής δέσμης και σε απόσταση 213 μέτρων επιτεύχθηκε μετάδοση ήχου μέσω ασύρματης τηλεφωνικής μετάδοσης. Καθώς το κανάλι επικοινωνίας αποτελούταν από ατμοσφαιρικό μέσω μετάδοσης, αυτό καθιστούσε την εφεύρεση μη υλοποιήσιμη λόγω των πολλών απωλειών που εισάγονταν από το κανάλι μετάδοσης [2].

Οι ηλεκτρικές επικοινωνίες υπερερούσαν κατά πολύ έναντι του παλιότερου τρόπου επικοινωνιών, και η ανάγκη για επέκταση των δικτύων ανά την υφήλιο οδήγησε σε αλματώδη πρόοδο στον τομέα των ηλεκτρονικών που σχετίζονται με τις επικοινωνίες. Αρχικά το κανάλι επικοινωνίας αποτελούταν από ζεύγη καλωδίων χαλκού, το οποίο όμως είχε αρκετούς περιορισμούς, κυρίως στην χωρητικότητα του δικτύου. Η ανακάλυψη του ομοαξονικού καλωδίου και η πρώτη του εφαρμογή το 1940 έθεσε νέες προοπτικές καθώς πρώτη φορά έγινε εφαρμογή ενός συστήματος εύρους ζώνης 3MHz με δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης 300 καναλιών φωνής. Παρατηρήθηκε όμως ότι τα καλώδια εισήγαγαν απώλειες, ειδικά σε υψηλότερες συχνότητες και έτσι άρχισε να αναπτύσσεται το δίκτυο ασύρματων επικοινωνιών με το πρώτο μικροκυματικό να κάνει την εμφάνισή του το 1948.

Αρκετά σύντομα η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση δημιουργούσε ανάγκες για πολύ μεγάλες ταχύτητες και χωρητικότητα στα δίκτυα επικοινωνιών. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη για εναλλακτικά κανάλια επικοινωνίας. Τα οπτικά κύματα ήταν κάτι που θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τα ηλεκτρικά και τα ηλεκτρομαγνητικά με επιτυχία, όμως δεν υπήρχαν ούτε κατάλληλα μέσα μετάδοσης ούτε πηγή φωτός που θα μπορούσε να δημιουργήσει τα οπτικά κύματα. Το 1960 εφευρέθηκε η πηγή λέιζερ, [3] ενώ η χρήση μιας ακολουθίας φακών αερίου ήταν η πρώτη απόπειρα για κατευθυνόμενη μετάδοση του φωτός χωρίς τις τεράστιες απώλειες που είχε ο ατμοσφαιρικός αέρας [4]. Έτσι άρχισε πλέον να γίνεται υλοποιήσιμη η ιδέα των οπτικών επικοινωνιών χωρίς όμως να είναι εφαρμόσιμη λόγω πολύ μεγάλης εξασθένησης, ώσπου το 1970 όπου οι Robert Maurer, Donald Keck και Peter Schultz της η Corning Glass Works ανέπτυξαν μια οπτική ίνα με τηγμένο πυρίτιο με πολύ χαμηλή εξασθένηση (20dB/Km). Παράλληλα η ανακάλυψη λέιζερ ημιαγωγών GaAs έδωσε την δυνατότητα να μεταδοθεί το φως μέσα στην οπτική ίνα και έτσι να

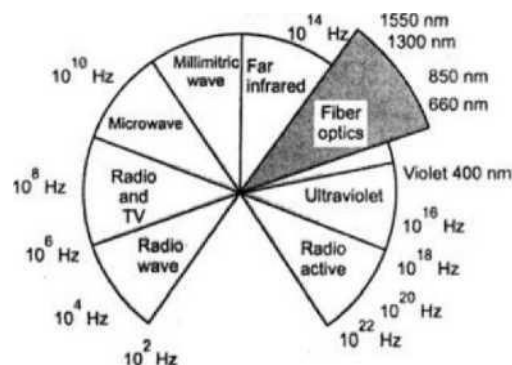
πραγματοποιηθούν οι πρώτες συνδέσεις και να επιτευχθούν ταχύτητες 45Mbit/s μεταξύ πομπού και δέκτη σε απόσταση 10 Km [2].

Αυτή ήταν η αρχή για μια φρενίτιδα εξελίξεων, όπου ανά δεκαετία υπήρξαν αλματώδεις πρόοδοι στις οπτικές επικοινωνίες. Από το σύστημα πρώτης γενιάς με λειτουργία μήκους κύματος στα 0,8nm και ρυθμό μετάδοσης 45 Mbit/s, φτάσαμε στην λειτουργία ενός εύρους μήκος κύματος από 1460-1565nm (ευρέως χρησιμοποιούμενο εύρος μήκος κύματος) και ταχύτητες 1,84 Pbit/s (τον Οκτώβριο του 2022 στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Δανίας) [5]. Έτσι τα δίκτυα επικοινωνιών ανά τον κόσμο όλο, τείνουν να αντικατασταθούν ολοκληρωτικά πλέον από δίκτυα οπτικών ινών και να καταργηθεί η ηλεκτρική μετάδοση.

1.2 Χαρακτηριστικά Οπτικής Ίνας

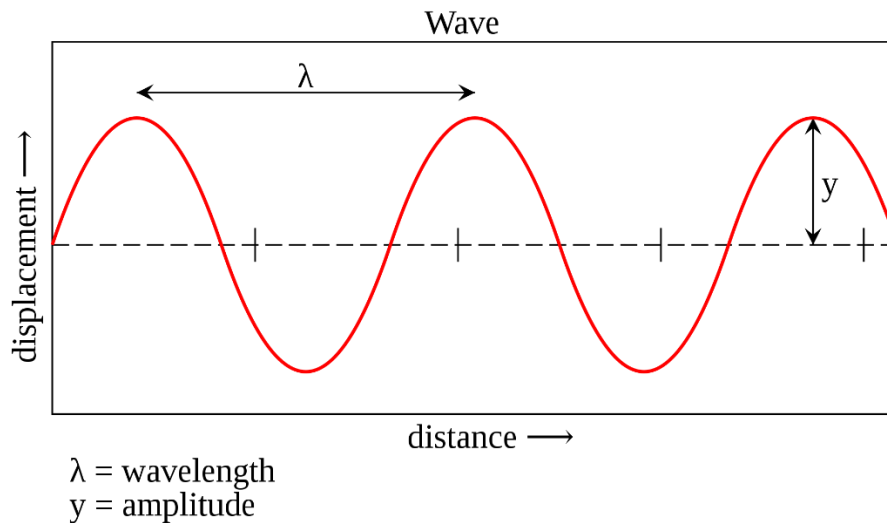
1.2.1 Γενικές πληροφορίες

Για να κατανοήσουμε τα χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας θα πρέπει να κατανοήσουμε ότι μέσω της ίνας θα διέλθει μια πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, το φως. Το φως είναι μια από τις πολλές μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο και αποτελείται από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο. Άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι τα ραδιοκύματα, μικροκύματα, ακτίνες Χ, κ.α. .



Εικόνα 1 Απεικόνιση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [2]

Όλες οι μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος και την συχνότητα. Το μήκος κύματος (λ) αναφέρεται στην απόσταση ανάμεσα από δυο διαδοχικές κορυφές του κύματος και σε συγκεκριμένη συχνότητα (f). Η συχνότητα ορίζεται ως ο ρυθμός εναλλαγής πολικότητας ανά δευτερόλεπτο. Αυτές οι δύο έννοιες είναι αντίστροφος ανάλογες μεταξύ τους, ενώ το γινόμενό τους ισούται πάντα με την ταχύτητα στον ελεύθερο χώρο $u \cong 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$. $f = \frac{u}{\lambda} \text{ Hz}$

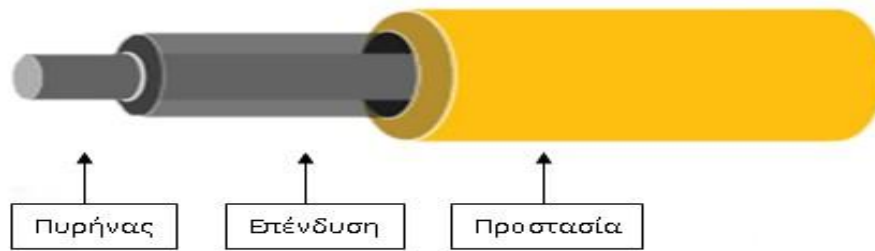


Σχήμα 1 Απεικόνιση ηλεκτρομαγνητικού κύματος [6]

Ενώ όταν αναφερόμαστε γενικά στις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες χρησιμοποιούμε τον όρο συχνότητα, στις οπτικές επικοινωνίες, αναφερόμαστε με τον όρο μήκος κύματος του φωτός με μονάδες μέτρησης τα μικρόμετρα (μm) $1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ και τα νανόμετρα (nm) $1\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$. Στις οπτικές ίνες γίνεται χρήση κυρίως του υπέρυθρου φωτός καθώς έχει ένα αρκετά μεγάλο εύρος μήκους κύματος, ενώ πολύ σπανιότερα θα γίνει χρήση του ορατού φωτός. Η διάδοσης του φωτός μέσα στην οπτική ίνα βασίζεται σε μια βασική αρχή, την αρχή της ολικής ανάκλασης, η οποία μας εξασφαλίζει ότι όταν ένα οπτικό σήμα υποστεί ολική ανάκλαση σε ένα κλειστό χώρο, τότε μπορεί να διατρέξει πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς να χάσει την ισχύ του. Η αρχή της ολικής ανάκλασης ορίζει ότι έχουμε το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης όταν η γωνία πρόσπτωσης ξεπεράσει την οριακή τιμή κατά την οποία η γωνία ανάκλασης είναι 90 μοίρες. Έτσι στην οπτική ίνα πετυχαίνουμε σχεδόν ολική ανάκλαση προσαρμόζοντας τους δείκτες διάθλασης του πυρήνα και της επένδυσης με τιμές που διαφέρουν ελάχιστα. Για τιμές της επένδυσης $n^1 = 1.47$ και του πυρήνα $n^2 = 1.46$ έχουμε κρίσιμη γωνία $\theta = 83.8^\circ$.

1.2.2 Τα είδη των Οπτικών Ινών

Για να αντιληφθούμε καλύτερα την οπτική ίνα, θα βοηθούσε να παρατηρήσουμε την τομή της.



Εικόνα 2 Βασικά μέρη της οπτικής ίνας

Η οπτική ίνα έχει 3 βασικά μέρη, τον πυρήνα, την επένδυση και την εξωτερική προστασία.

Όταν η πηγή φωτός εκπέμπει μια δέσμη στην οπτική ίνα, τότε η ακτίνα αυτή ταξιδεύει μέσα στην οπτική ίνα με δεδομένο ότι η γωνία πρόσπτωσης και ανάκλασης, είναι ίσες. Έτσι το φως μην έχοντας άλλη διέξοδο, διατρέχει τον πυρήνα της οπτικής ίνας σχηματίζοντας επαναλαμβανόμενες δέσμες σε μορφή ζικ ζακ. Έτσι έχουμε μια κρίσιμη γωνία μεταξύ πρόσπτωσης και ανάκλασης.

Οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τις πολύτροπες ίνες και τις μονότροπες ίνες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους και των αριθμό των τρόπων. Επίσης υπάρχουν δυο πολύ βασικές παράμετροι καθορίζουν την οπτική ίνα. Αυτές είναι η σχετική διαφορά Δ των δεικτών διάθλασης μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης, με $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ όπου n_1 , n_2 είναι οι δείκτες διάθλασης του πυρήνα και της επένδυσης. Ενώ υπάρχει και η παράμετρος V που προσδιορίζει το πλήθος των τρόπων που μπορούν να διαδοθούν στην οπτική ίνα και ονομάζεται αλλιώς κανονικοποιημένη συχνότητα ή συχνότητα αποκοπής.

Με τον όρο «τρόπο», εννοείται μία τοπολογία στάσιμων κυμάτων που σχηματίζει η διαμόρφωση του πεδίου στη διατομή της ίνας και διαδίδεται κατά μήκος του αυτής. Εάν υπάρχουν πολλές ημιπερίοδοι τέτοιων στάσιμων κυμάτων κατά μήκος της διαμέτρου του πυρήνα της ίνας, τότε η ίνα είναι πολύτροπη, ενώ αν υπάρχει μόνο μία η ίνα είναι μονότροπη. Το πλήθος των τρόπων σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος που λέγεται συχνότητα αποκοπής (cut off frequency) και δίδεται από τον εξής τύπο:

$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sqrt{n_{core}^2 - n_{cladding}^2}, \quad (1.1)$$

$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot NA, \quad (1.2)$$

d : διάμετρος πυρήνα

λ : μήκος κύματος

n : δείκτης διάθλασης

NA : αριθμητικό άνοιγμα

Αν $V \leq 2,405$, τότε η ίνα θα είναι μονότροπη [6].

Οι πολύτροπες ίνες έχουν το βασικό χαρακτηριστικό ότι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα μειώνεται όσο αρχίζουμε να απομακρυνόμαστε από

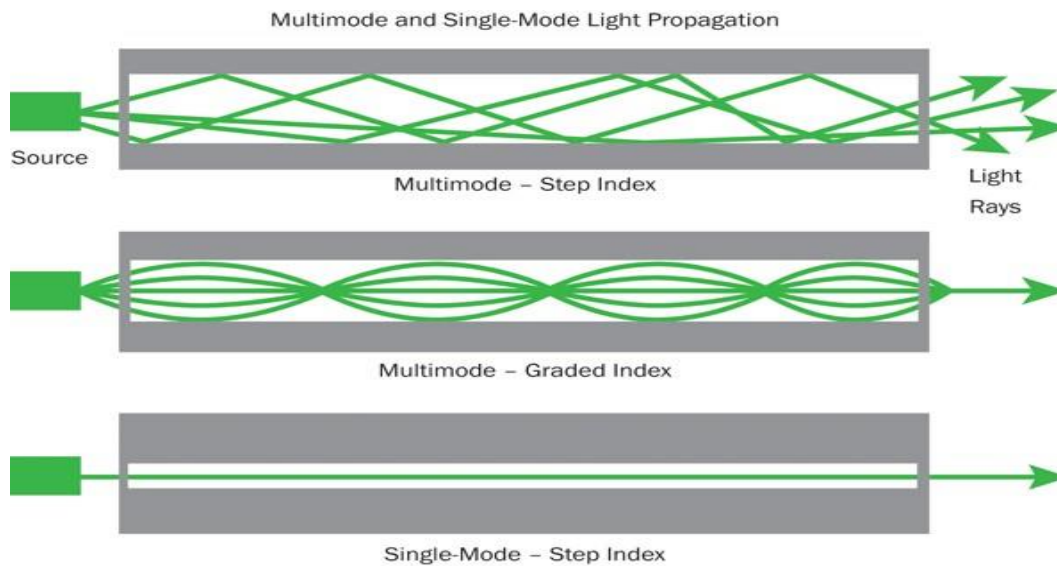
το κέντρο του. Αυτό έχει ως συνέπεια η ταχύτητα διάδοσης του φωτός να είναι μεγαλύτερη στην άκρη του πυρήνα. Έτσι μπορούμε να εισάγουμε δέσμες φωτός με πολλές διαφορετικές γωνίες εισόδου και να ταξιδεύει μέσω διαφορετικής διαδρομής μέσα στην οπτική ίνα. Αυτό όμως θα αρχίσει να δημιουργεί αλληλοεπικαλύψεις στους παλμούς καθώς οι παλμοί θα αρχίζουν να εξαπλώνονται αφού οι διαφορετικοί τρόποι διάδοσης θα έχουν και διαφορετικές ταχύτητες. Συνεπώς στις πολύτροπες ίνες έχουμε περιορισμό στην απόσταση που θα τις χρησιμοποιήσουμε. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διαχωρίζονται και αυτές σε δυο κατηγορίες: τις step index (διακριτού βήματος) και τις graded index (βαθμιαίου βήματος).

Οι step index χαρακτηρίζονται από το γεγονός της βίαιης ανάκλασης στην άκρη του πυρήνα και της επένδυσης, όπως αυτή περιεγράφηκε παραπάνω με συνέπεια την εξάπλωση του παλμού και εν τέλη τον περιορισμό του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

Ως αντιστάθμιση του παραπάνω προβλήματος δημιουργήθηκαν οι graded Index οπτικές ίνες όπου ο δείκτης διάθλασης αλλάζει βαθμοτά από το κέντρο του πυρήνα προς την επένδυση, με αποτέλεσμα να εξισώνει την ταχύτητα διαδρομής των διαφορετικών δεσμών φωτός που εισάγονται στην οπτική ίνα. Έτσι με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε τουλάχιστον 100 φορές μικρότερη εξάπλωση του παλμού σε σχέση με την step index οπτική ίνα. Το μέγεθος του πυρήνα είναι 50μm για τις πολύτροπες ίνες που αφορούν τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές [7].

Τα παραπάνω προβλήματα, έρχονται να λύσουν οι μονότροπες ίνες, όπου το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η μείωση της διαμέτρου του πυρήνα, τόσο ώστε να προσεγγίζει το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Στις μονότροπες ίνες πετυχαίνουμε μονορυθμική διάδοση επιλέγοντας συχνότητα αποκοπής μικρότερη από την διατομή του πυρήνα της ίνας $V \leq 2,405$. Αυτό σημαίνει ότι καθώς επιλέγουμε μικρό μέγεθος πυρήνα αναιρείται η χρονική διασπορά λόγω πολλαπλών τρόπων διάδοσης. Το παραπάνω σε συνδυασμό με την μείωση της διαφοράς του δείκτη διάθλασης μεταξύ πυρήνα και επένδυσης κεντρικής ίνας είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου το επίπεδο του μήκους κύματος, οδηγεί στον αξονικό τρόπο μετάδοσης του σήματος. Έτσι πετυχαίνουμε μηδενική εξάπλωση του σήματος. Χαρακτηριστικό είναι το μέγεθος του πυρήνα που κυμαίνεται από 8 έως 10μm [7]. Βέβαια μέχρι την δεκαετία του 1980 δεν υπήρχε πηγή φωτός που να μπορεί να παράξει δέσμη με επαρκεί οπτική ισχύς για έναν τόσο μικρό πυρήνα διαμέτρου 8μm. Για τον λόγο αυτό ήταν περισσότερο διαδεδομένες οι πολύτροπες ίνες που χρησιμοποιούσαν πηγές LED ή laser στα 850nm. Αυτό είχε πολλούς περιορισμούς και απαιτούσε την χρήση επαναληπτών ανά λίγα Km. Μια δεκαετία αργότερα αυτό άλλαξε και πλέον γίνεται χρήση μονότροπης ίνας όπου λειτουργεί από 1480 έως 1600nm και έχει την λιγότερη εξασθένηση και παραμόρφωση το μεταδιδόμενο οπτικό σήμα. Στην εικόνα 4 μπορούμε να διακρίνουμε τις παραπάνω κατηγορίες σχηματικά.

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG



Εικόνα 3 Απεικόνιση των βασικών κατηγοριών οπτικών ινών [9].

1.2.3 Κατασκευή οπτικής ίνας

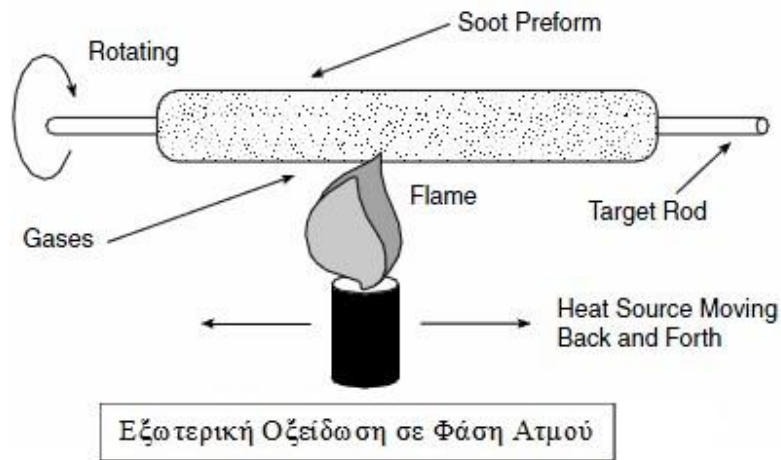
1.2.3.1 Πυρήνας

Όλα τα είδη οπτικών ινών κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο. Ο πυρήνας είναι συνήθως κατασκευασμένος από γυαλί ή πλαστικό και αποτελεί το βασικό τμήμα που μεταφέρει το φως την ίνα. Ο πυρήνας περιβάλλεται από την επένδυση η οποία είναι από υλικό με αρκετά χαμηλότερο δείκτη διάθλασης, συγκρινόμενο με του πυρήνα. Κατά τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε να μην υπάρχει διαφυγή του φωτός από τις πλευρές της ίνας. Το κοινό του πυρήνα με την επένδυση είναι ότι χρησιμοποιούν ως βασικό υλικό το πυρίτιο (SiO_2) σε πολύ υψηλή καθαρότητα. Έτσι για να επιτευχθεί η διαφορετική τιμή στον δείκτη διάθλασης γίνονται προσμίξεις με αλογονίδια μέταλλα όπως είναι το SiCl_4 και το GeCl_4 για τον πυρήνα, ενώ για την κατασκευή της επένδυσης, απαιτείται μείωση του δείκτη διάθλασης του πυριτίου και έτσι γίνονται αντίστοιχα προσμίξεις με φθόριο (F) ή με οξείδιο του βόρειο (B_2O_3).

Για την δημιουργία του πυρήνα κατασκευάζεται μια γυάλινη ράβδος πάνω στην οποία δημιουργούνται επικαθήσεις αιθάλης η οποία παράχθηκε με την μέθοδο της οξειδωσης σε φάση ατμού. Ουσιαστικά η αιθάλη δημιουργείται σε περιβάλλον πολύ υψηλής θερμικής επεξεργασίας όπου καθαροί ατμοί από τα αλογονίδια μέταλλα που αναφέραμε παραπάνω αντιδρούν με το οξυγόνο. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί σωματίδια με την μορφή λευκής σκόνης την οποία και ονομάζουμε αιθάλη. Υπάρχουν τρεις τρόποι για να επιτευχθεί η διαδικασία της επικάθησης των σωματιδίων [8].

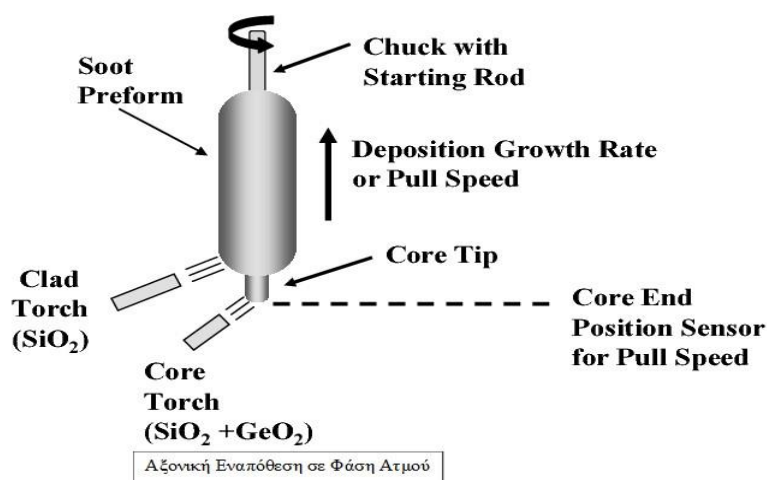
Η εξωτερική οξειδωση σε φάση ατμού (Outside Vapor Phase Oxidation). Στην διαδικασία αυτή έχουμε την δημιουργία προπλάσματος όπου η αιθάλη προσκολλάται με την βοήθεια καυστήρα με θέρμανση σε μια περιστρεφόμενη ράβδο. Κατά την διαδικασία αυτή ελέγχεται η ποσότητα των

επικαθήσεων που καθορίζουν τον δείκτη διάθλασης καθώς και η διάσταση
του πυρήνα [8].



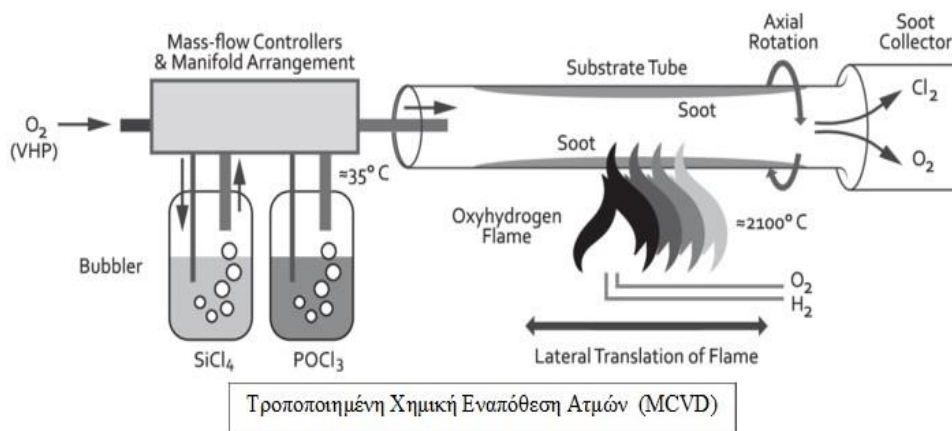
Εικόνα 4 Κατασκευής του πυρήνα της ίνας με εξωτερική οξείδωση σε φάση
ατμού [9].

Η αξονική εναπόθεση σε φάση ατμού (Vapor Phase Axial Deposition). Στην διαδικασία αυτή έχουμε την δημιουργία σωματιδίων αιθάλης με τον ίδιο τρόπο όπως και στην προηγούμενη. Αυτό που αλλάζει, είναι ο τρόπος που ενσωματώνονται στην γυάλινη ράβδο. Στην περίπτωση αυτή τα σωματίδια εναποτίθενται στην αρχή της γυάλινης ράβδου και καθώς αυτή μετακινείται με αξονική κατεύθυνση προς τα πάνω και έτσι τα σωματίδια αιθάλης προσκολλώνται σε όλο το μήκος της. Κατά τον ίδιο τρόπο, σε αυτήν την φάση καθορίζεται ο δείκτης διάθλασης της οπτικής ίνας από τον έλεγχο των επικαθήσεων αιθάλης όπως και το μέγεθος του πυρήνα. [10]



Εικόνα 5 Κατασκευής του πυρήνα της ίνας με αξονική εναπόθεση σε φάση
ατμού [11].

Τέλος η 3^η και αρκετά ποιο διαδεδομένη μέθοδος αφού χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή υψηλής ποιότητας οπτικών ινών, είναι η διαδικασία χημικής εναπόθεσης ατμού που γίνεται και αυτή με δυο τρόπους. Ο ένας ονομάζεται διαδικασία τροποποιημένης χημικής εναπόθεσης ατμών (MCVD). Σε αυτήν την διαδικασία τα αέρια αλογονιδίων όπως αναφέραμε και στην αρχή, SiCl_4 ή GeCl_4 ρέουν μαζί με O_2 που έχει τον ρόλο του φέροντος αερίου εντός του περιστρεφόμενου πορώδους σωλήνα πυριτίου και αντιδρούν μεταξύ τους παράγοντας γυαλί και υψηλή θερμοκρασία εντός του σωλήνα. Βασική χημική αντίδραση για την παραγωγή του γυαλιού ($\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 = \text{SiO}_2 + 2\text{Cl}_2$). Κατά την διαδικασία αυτή σχηματίζονται σωματίδια που επικάθονται και συντήκονται με την βοήθεια καυστήρα που κινείται εμπρός πίσω στα εσωτερικά τοιχώματα μιας γυάλινης διαυγής ράβδου. Ο δεύτερος τρόπος για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας είναι με την χρήση πλάσματος. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται εναπόθεση χημικών ατμών ενεργοποιούμενη με πλάσμα (PCVD). Σε αυτήν την μέθοδο η διαδικασία είναι ίδια με την MCVD με την διαφορά ότι για την χημική αντίδραση εντός του σωλήνα χρησιμοποιείται πλάσμα μικροκυμάτων σε χαμηλή πίεση. Έτσι γίνεται απευθείας εναπόθεση γυάλινου υλικού στα τοιχώματα του πορώδους σωλήνα πυριτίου, χωρίς να χρειάζεται να περάσει από το στάδιο εναπόθεσης σωματιδίων αιθάλης [8], [12].



Εικόνα 6 Κατασκευής του πυρήνα της ίνας με χημική εναπόθεση ατμών.

1.2.3.2 Επίστρωση και Εξωτερικό περίβλημα

Η επένδυση είναι όπως φαίνεται και στην εικόνα 3 είναι το περίβλημα – προστασία της οπτικής ίνας. Αυτό αποτελείται από δέσμες συνθετικών ινών, οι οποίες παίζουν τον ρόλο της προστασίας της ίνας από εξωγενείς παράγοντες που θα έχουν ως συνέπεια τραυματισμό ή σπάσιμο του πυρήνα, όπως τραβήγματα της οπτικής ίνας.

Τέλος ο πυρήνας και η επένδυση εσωκλείονται σε πλαστικό περίβλημα που μοιάζει πολύ με αυτό των καλωδίων χαλκού. Αυτό ανάλογα την εφαρμογή της οπτικής ίνας, υπόγεια, υποβρύχια κ.λ.π. αποτελείται από ειδικά υλικά που προστατεύουν την επένδυση και τον πυρήνα από επιπλέον καταπονήσεις, στρεβλώσεις κ.α.

Η κατασκευή των οπτικών ινών αποτελεί πλέον μια βιομηχανοποιημένη διαδικασία με πολύ μεγάλη ακρίβεια στις απαιτούμενες προδιαγραφές.

1.3 Χαρακτηριστικά διάδοσης

Μέχρι τώρα έχουμε μελετήσει την ανάγκη δημιουργίας δικτύου οπτικών ινών καθώς και τον τρόπο κατασκευής τους. Ωστόσο για να εισαχθούμε βαθύτερα στην έννοια των οπτικών επικοινωνιών και να κατανοήσουμε τα χαρακτηριστικά διάδοσης των οπτικών ινών, θα πρέπει πρώτα να δούμε πως μέσα σε ένα άπειρο διηλεκτρικό μέσω διαδίδεται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

1.3.1 Βασικές έννοιες Ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Ο πρώτος που ανέπτυξε μαθηματικά και εξήγησε την συμπεριφορά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ήταν ο Άγγλος Maxwell, από τους μεγαλύτερους ίσως θεωρητικούς φυσικούς του 19^{ου} αιώνα.

Εάν δημιουργηθεί ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, τότε θα προκληθεί ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που προκαλεί ένα ηλεκτρικό πεδίο και πάλι από την αρχή η όλη διαδικασία. Αυτές οι ταλαντώσεις είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και αποτελούνται από συνεχώς μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που ταλαντώνονται περιοδικά, οι διαταραχές αυτές είναι κύματα ταξιδεύουν στον ελεύθερο χώρο. Οι ηλεκτρικές και μαγνητικές συνιστώσες είναι κάθετες μεταξύ τους και κάθετες προς την διεύθυνση διάδοσης. Η ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε κενό χώρο δίνεται από την σχέση:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad (1.3)$$

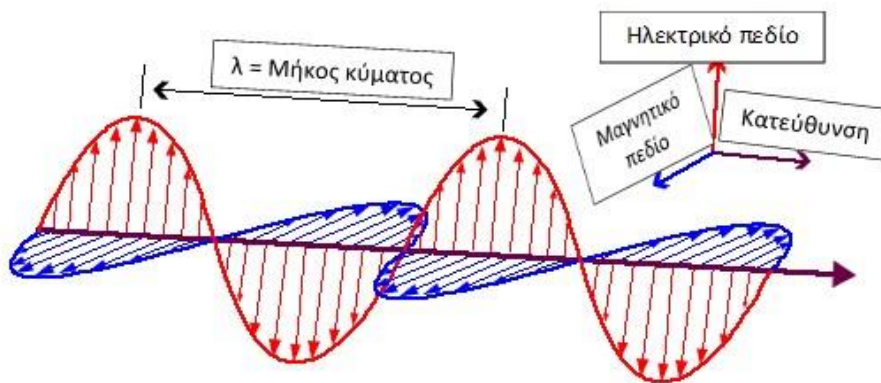
Όπου,

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}, \quad (1.4)$$

και

$$\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \text{ H/m}, \quad (1.5)$$

είναι η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.



Σχήμα 2 Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικού Κύματος.

Στις εξισώσεις Maxwell θα συναντήσουμε δυο πολύ βασικά μεγέθη. Το ηλεκτρικό πεδίο E το οποίο μας υποδεικνύει την ηλεκτρική δύναμη που θα ενεργούσε σε ένα μικρό φορτίο όταν τοποθετηθεί σε απόσταση r από το φορτίο της πηγής. Το φυσικό μέγεθος B που περιγράφει την ισχύ του μαγνητικού πεδίου το οποίο οδηγεί στην εκτροπή των κινούμενων φορτίων. Έτσι έχουμε τα δυο διανυσματικά πεδία, το ηλεκτρικό πεδίο E και το μαγνητικό πεδίο B , όπου σε κάθε θέση (x,y,z) στο χώρο, μπορούμε να αντιστοιχίσουμε ένα διάνυσμα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου το οποίο υποδεικνύει τόσο το μέγεθος όσο και την κατεύθυνση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.

Υπάρχουν συνολικά 4 διαφορετικές εξισώσεις Maxwell οι οποίες μπορούν να αναπαριστούν είτε με την λεγόμενη ολοκληρωτική μορφή όπου εκφράζονται με την μορφή ολοκληρωμάτων, είτε με διαφορική μορφή όπου εκφράζονται με παραγώγους. Είναι εξίσου σημαντικές και οι δυο μορφές έκφρασης, καθώς η διαφορική μορφή απαιτείται για τον υπολογισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίου σε ένα μόνο σημείο του χώρου, ενώ η έκφραση με ολοκληρώματα μας υπολογίζει τα πεδία σε μια ολόκληρη περιοχή, όπως ο υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου μιας φορτισμένης σφαίρας, ή ενός φορτισμένου επιπέδου. Συνεπώς για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων γίνεται χρήση των διαφορικών εξισώσεων. Έτσι και στην περίπτωση των οπτικών ινών έχουμε οπτικά πεδία που αποτελούνται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα και διέπονται επομένως από τις εξισώσεις Maxwell.

1.3.2 Εξισώσεις Maxwell

Μέχρι την ανακάλυψη και εφαρμογή των εξισώσεων του Maxwell, η επιστημονικές κοινότητες πίστευαν ότι η δύναμη του ηλεκτρισμού και τα μαγνητισμού ήταν δυο εντελώς διαφορετικές δυνάμεις. Έτσι οι νόμοι που συναντάμε στον ηλεκτρομαγνητισμό, του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο και μαγνητικό πεδίο, ο νόμος της επαγωγής του Faraday-Henry και ο νόμος του Ampere, συμπυκνώνονται στις εξισώσεις του Maxwell. Έτσι με τις εξισώσεις

του Maxwell, έχουμε μια πλήρη περιγραφή με μαθηματικούς τύπους την κυματοδότηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέσα σε μία οπτική ίνα η οποία έχει βηματικό δείκτη διάθλασης, step index fiber.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (1.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1.9)$$

Το \mathbf{E} και το \mathbf{H} είναι το διάνυσμα του ηλεκτρικού και το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα και οι σχέσεις 1.6 και 1.7 μας εκφράζουν την σύζευξη του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Στις παραπάνω σχέσεις έχουμε τις ηλεκτρικές \mathbf{D} και μαγνητικές \mathbf{B} πυκνότητες ροής όπου σχετίζονται με τα διανύσματα πεδίου ως εξής:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (1.10)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}, \quad (1.11)$$

Όπου \mathbf{P} είναι η επαγόμενη ηλεκτρική πόλωση φορτίων ενός υλικού όταν αυτό διαρρέεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο και η μονάδα μέτρησης της πόλωσης είναι $\frac{C}{m^2}$. \mathbf{M} είναι η επαγόμενη μαγνητική πόλωση δηλαδή η μαγνήτιση του υλικού και η μονάδα μέτρησης είναι $1 \frac{C}{sec \cdot m}$. Στις οπτικές ίνες λόγω του ότι είναι κατασκευασμένες από γυαλί και πλαστικό η επαγόμενη μαγνητική πόλωση είναι 0, έτσι $\mathbf{M} = 0$. Τα ε_0 και μ_0 είναι η ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Παρατηρώντας τις σχέσεις 1.6 και 1.7 γνωρίζοντας τα \mathbf{D} και \mathbf{B} αντιλαμβανόμαστε ότι η χρονική μεταβολή ενός μαγνητικού πεδίου που εξαρτάται από τον χρόνο, επάγει ηλεκτρικό πεδίο και το αντίστροφο.

Παρακάτω θα εξετάσουμε πώς στις οπτικές επικοινωνίες η εξίσωση κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχει άμεση εξάρτηση από τον δείκτη διάθλασης, τον συντελεστή απορρόφησης και άλλα μη γραμμικά φαινόμενα που δημιουργούνται κατά την διάδοση του φωτός μέσω του κυματοδηγού του που στην περίπτωση μας είναι η οπτική ίνα, κάτι το οποίο επηρεάζει αρνητικά την διάδοση του κύματος.

Στις οπτικές ίνες και για περιοχή μήκους κύματος από 0,5-2 μm όπου είναι το εύρος χαμηλών απωλειών η επαγόμενη ηλεκτρική πόλωση \mathbf{P} αξιολογείται σοβαρά όταν είναι κοντά σε ένα μέσο συντονισμό. Έτσι σε αυτήν την περίπτωση έχουμε μια σχέση μεταξύ της επαγόμενης ηλεκτρικής πόλωσης \mathbf{P} και του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} ως εξής:

$$\mathbf{P}(r, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \chi(r, t - t') \mathbf{E}(r, t') dt', \quad (1.12)$$

Σημαντικές επιπτώσεις στις επικοινωνίες μέσω οπτικών ινών υπάρχουν λόγω της χρωματικής διασποράς. Ως αποτέλεσμα της χρωματικής διασποράς είναι η καθυστερημένη χρονική απόκριση, τιμή την οποία εξετάζει η παραπάνω εξίσωση. Πρακτικά για να μπορέσουμε να λάβουμε την εξίσωση κύματος και να μπορέσουμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα μας εξυπηρετεί να χρησιμοποιήσουμε το στροβιλισμό curl της εξίσωσης 1.16 και κάνοντας χρήση της εξίσωσης 1.7 και αντικαθιστώντας με την ηλεκτρική και μαγνητική πυκνότητα ροής όπως δίνονται από τις σχέσεις 1.10, 1.11 έχουμε την εξίσωση κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην οπτική ίνα.

$$\nabla \times \nabla \times E = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (1.13)$$

Η εξίσωση κύματος μπορεί να εκφραστεί και συνάρτηση της συχνότητας. Για να μεταβούμε από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων και κάνοντας και χρήση της 1.13 πρέπει να λάβουμε υπόψιν τον μετασχηματισμό Fourier του $\mathbf{E}(r, t)$:

$$\tilde{E}(r, \omega) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} E(r, t) \exp(j\omega t) dt, \quad (1.14)$$

Ομοίως και για το διάνυσμα της επαγόμενης ηλεκτρικής πόλωσης $P(r, t)$ μετασχηματισμό Fourier για μετάβαση στο πεδίο συχνοτήτων. Συνεπώς έχουμε έκφραση της εξίσωση κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην οπτική ίνα στο πεδίο συχνοτήτων με χρήση της 1.13, $\tilde{E}(r, \omega)$ και $\tilde{P}(r, \omega)$:

$$\nabla \times \nabla \times \tilde{E} = -\varepsilon(r, \omega) \left(\frac{\omega^2}{c^2}\right) \tilde{E}, \quad (1.15)$$

Όπου η διηλεκτρική σταθερά $\varepsilon(r, \omega)$ εξαρτώμενη από την συχνότητα (ω) δίνεται ως εξής:

$$\varepsilon(r, \omega) = 1 + \tilde{\chi}(r, \omega), \quad (1.16)$$

Με το $\varepsilon(r, \omega)$ να αποτελείται από φανταστικό και πραγματικό μέρος τα οποία σχετίζονται άμεσα με τον δείκτη διάθλασης (n) και τον συντελεστή απορρόφησης (a), αυτό που θέλαμε να αποδείξουμε στην αρχή.

$$\varepsilon = \left(n + \frac{iac}{2\omega}\right)^2, \quad (1.17)$$

Όπου το n και το a είναι αυτά που εμπεριέχουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος και συνδέονται με το χ της εξίσωσης 1.16, ως εξής:

$$n = (1 + Re \tilde{\chi})^{1/2}, \quad (1.18)$$

$$a = \left(\frac{\omega}{nc}\right) Im \tilde{\chi}, \quad (1.19)$$

Παρατηρούμε ότι και οι δύο συντελεστές n και a εξαρτώνται από την συχνότητα και συγκεκριμένα ο συντελεστής n (δείκτης διάθλασης) είναι εξαρτώμενος από την συχνότητα ω . Σε αυτήν την εξάρτηση οφείλεται η διασπορά του υλικού ή χρωματική διασπορά και έτσι εύκολα εξάγουμε το

συμπέρασμα ότι έχουμε διαφορετική ταχύτητα διάδοσης μέσα στην οπτική ίνα για κάθε διαφορετική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, κάτι για το οποίο θα ασχοληθούμε και περαιτέρω στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας [9].

Συνεπώς μέχρι τώρα έχουμε αναπτύξει την εξίσωση κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην οπτική ίνα στο πεδίο συχνοτήτων. Τώρα θα δούμε μαθηματικά την έκφραση της διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον πύρινα και την επένδυση της οπτικής ίνας. Από τους συντελεστές της 1.15 θα θεωρήσουμε ότι $\epsilon = n^2$ καθώς οι απώλειες θεωρούνται αμελητέες. Τέλος θα θεωρήσουμε ότι για κάθε μία περιοχή, πυρήνα και επένδυση, δείκτη διάθλασης ανεξάρτητο του διανύσματος θέσης r , καθώς πυρήνας και επένδυση είναι ομογενή μέσα. Έτσι έχουμε:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \cdot \vec{E} = -\nabla^2 \cdot \vec{E}, \quad (1.20)$$

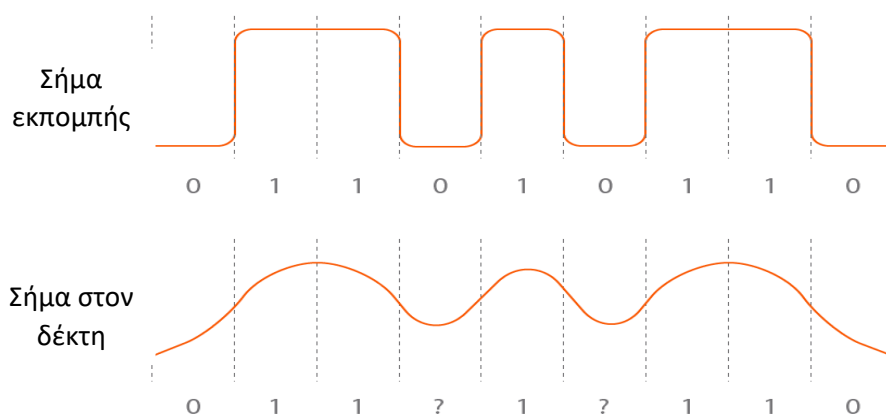
Κάνοντας αντικατάσταση της 3ης εξίσωσης του Maxwell όπως την είδαμε και στην αρχή $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$ όπου \mathbf{D} είναι $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$ παίρνουμε την σχέση $\nabla \cdot \vec{E} = 0$. Έτσι με τις απλοποιήσεις αυτές χρησιμοποιώντας την εξίσωση 1.20 και 1.15 καταλήγουμε:

$$\nabla \cdot E + n^2(\omega)k_0^2 E = 0, \quad (1.21)$$

Όπου είναι η μαθηματική έκφραση της διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον πύρινα και την επένδυση της οπτικής ίνας, με $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$

1.4 Διασπορά

Το φαινόμενο της διασποράς στις οπτικές ίνες, είναι πολύ διαδεδομένο και αποτελεί το κύριο πρόβλημα που καλούνται οι μηχανικοί τηλεπικοινωνιών να αντιμετωπίσουν. Ουσιαστικά προκαλεί την παραμόρφωση του μεταδιδόμενου οπτικού σήματος εντός της οπτικής ίνας. Πρακτικά προκαλείται διεύρυνση του παλμού καθώς αυτός μεταδίδεται κατά μήκος της οπτικής ίνας που λειτουργεί ως κυματοδηγός. Η διεύρυνση του παλμού εντός της οπτικής ίνας προκαλεί επικαλύψεις σε γειτονικούς παλμούς, που αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση του τελικού σήματος και έτσι το τελικό σήμα που φτάνει στον δέκτη είναι αλλοιωμένο όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3 Διεύρυνση του παλμού εντός της οπτικής ίνας λόγω διασποράς

Επομένως η χρονική διεύρυνση του παλμού εντός της οπτικής ίνας καλείται ως διασπορά και εξαρτάται άμεσα από το μήκος της οπτικής ίνας, καθώς αυτό συνεπάγεται ότι όσο μεγαλύτερη απόσταση ταξιδέψει ο παλμός μέσα στην οπτική ίνα, τόσο περισσότερο θα απλωθεί ο παλμός. Η χρονική διεύρυνση του παλμού ανά μονάδα μήκους της οπτικής ίνας, είναι η μέτρηση της διασποράς σε συγκεκριμένο τύπο ίνας. Κατά αυτόν τον τρόπο είναι εφικτό να υπολογίσουμε τα σημεία επαναληπτών σε ένα δίκτυο οπτικών ινών, ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την διασπορά.

Η διασπορά είναι ένα γραμμικό φαινόμενο και δεν επηρεάζει την φασματική κατανομή του σήματος, αντιθέτως διευρύνει τον παλμό χρονικά κατά Δt και είναι διαφορετικό για κάθε τύπο οπτικής ίνας. Γραμμικά φαινόμενα εννοούμε τα φαινόμενα που είναι ανεξάρτητα από την ένταση ενώ μη γραμμικά, εξαρτόμενα από την ένταση.

Υπάρχουν τρία βασικά είδη διασποράς, η διατροπική διασπορά (multimode dispersion), η διασπορά του υλικού ή αλλιώς χρωματική διασπορά (material or chromatic dispersion) και τέλος η διασπορά κυματοδηγού (waveguide dispersion).

1.4.1 Διατροπική διασπορά (multimode dispersion)

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο με τον όρο «τρόπο», εννοείται μία τοπολογία στάσιμων κυμάτων που σχηματίζει η διαμόρφωση του πεδίου στη διατομή της ίνας και διαδίδεται κατά μήκος του αυτής. Έτσι λοιπόν στην διατροπική διασπορά έχουμε την τροπική περιγραφή η οποία σχετίζεται με τους διαφορετικούς δείκτες τρόπων. Δηλαδή πολλοί τρόποι του ίδιου οπτικού σήματος διαδίδονται κατά μήκος της οπτικής ίνας με διαφορετικές ταχύτητες φάσης. Την διατροπική διασπορά την συναντάμε στις πολύτροπες ίνες και η αύξηση της διασποράς είναι συνδεδεμένη με την αύξηση του μήκους της οπτικής ίνας. Η διατροπική διασπορά απουσιάζει στις μονότροπες ίνες καθώς η ενέργεια του μεταδιδόμενου παλμού μεταφέρεται μόνο με έναν τρόπο.

1.4.2 Χρωματική διασπορά-διασπορά Υλικού (chromatic or material dispersion)

Όπως προ είπαμε στις μονότροπες ίνες δεν εμφανίζεται η διατροπική διασπορά, ωστόσο η διεύρυνση του παλμού δεν εξαφανίζεται εντελώς. Η ομαδική ταχύτητα που σχετίζεται με τον βασικό τρόπο λειτουργίας – μετάδοσης, εξαρτάται άμεσα από την συχνότητα εξαιτίας της χρωματικής διασποράς. Ως συνέπεια αυτών, διαφορετικά φασματικά στοιχεία του παλμού -φασματικές συνιστώσες- ταξιδεύουν με ελαφρώς διαφορετικές ταχύτητες ομάδας. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως διασπορά ομαδικής ταχύτητας (GVD), ενδοτροπική διασπορά ή χρωματική διασπορά. Κάθε μεταδιδόμενο οπτικό σήμα έχει εκτός από την κύρια καθορισμένη από την σχεδίαση συχνότητα, έχει ένα εύρος συχνοτήτων, όπου για κάθε συχνότητα υπάρχει διαφορετική καθυστέρηση διάδοσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια γενικευμένη διεύρυνση του κάθε τρόπου. Έτσι οι καθυστερήσεις αυτές οφείλονται εκτός από την χρωματική διασπορά ή διασπορά του υλικού και

στην διασπορά της κυματοδηγησης, δηλαδή τις επιπτώσεις που έχει η διάδοση μέσα στον κυματοδηγό που είναι η οπτική ίνα.

1.4.3 Ομαδική διασπορά ταχύτητας (GVD)

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η παραπάνω έννοια ας πάρουμε μια μονότροπη οπτική ίνα μήκους L . Μετά από κάποιο χρόνο θα φτάσει το μεταδιδόμενο σήμα στην έξοδο της οπτικής ίνας μια συγκεκριμένη φασματική συνιστώσα με συχνότητα ω και εισάγοντας μια χρονική καθυστέρηση $T = \frac{L}{u_g}$. Ο όρος u_g είναι η ταχύτητα ομάδας και δίνεται από την εξίσωση:

$$u_g = \left(\frac{dB}{d\omega} \right)^{-1}, \quad (1.22)$$

Για να βρούμε την σχέση που συνδέει την ταχύτητα ομάδας και τον δείκτη διάθλασης ομάδας \bar{n}_g χρησιμοποιούμε το $\beta = \bar{n}k_0 = \bar{n} \omega/c$ στην εξίσωση 1.22 αποδεικνύουμε ότι:

$$u_g = (c/\bar{n}_g), \quad (1.23)$$

Όπου

$$\bar{n}_g = \bar{n} + \omega \left(\frac{d\bar{n}}{d\omega} \right), \quad (1.24)$$

Η ταχύτητα της ομάδας u_g εξαρτάται από την συχνότητα, η εξάρτηση αυτή οδηγεί σε διεύρυνση του παλμού για τον λόγο ότι οι διαφορετικές φασματικές συνιστώσες που υπάρχουν στον μεταδιδόμενο παλμό, διασκορπίζονται εντός της οπτικής ίνας κατά την μετάδοση του παλμού και φτάνουν σε διαφορετικό χρόνο η κάθε μία στην έξοδο της οπτικής ίνας. Έστω ότι $\Delta\omega$ είναι το φασματικό εύρος του μεταδιδόμενου παλμού και για συγκεκριμένο μήκος οπτικής ίνας L αναζητούμε πόσο θα διευρυνθεί ο παλμός. Το πόσο πολύ θα διευρυνθεί δίνεται από την παρακάτω σχέση και με την βοήθεια της 1.22 :

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{u_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega, \quad (1.25)$$

Όπου η παράμετρος $\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$ είναι η παράμετρος διασπορά ομαδικής ταχύτητας (GVD). Αυτή μας καθορίζει το πόσο πολύ θα διευρυνθεί ο παλμός κατά την μετάδοση του μέσα στην οπτική ίνα.

Σε κάποια οπτικά συστήματα η διασπορά συχνότητας $\Delta\omega$ καθορίζεται από το εύρος των μηκών κύματος $\Delta\lambda$ που εκπέμπεται από την πηγή. Έτσι είναι σύνηθες να χρησιμοποιούμε το $\Delta\lambda$ σε αντικατάσταση του $\Delta\omega$. Κάνοντας χρήση του $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ και του $\Delta\omega = \left(-\frac{2\pi c}{\lambda^2} \right) \Delta\lambda$ η εξίσωση 1.25 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{u_g} \right) \Delta\lambda = DL\Delta\lambda, \quad (1.26)$$

όπου

$$D = d/d\lambda (1/u_g) = -2\pi c/\lambda^2 \beta_2 , \quad (1.27)$$

Το D το ονομάζουμε παράμετρο διασποράς και έχει μονάδες ps/(km-nm). Έτσι χρησιμοποιώντας το ΔΤ από την εξίσωση 1.26 και με το κριτήριο $B\Delta T < 1$ μπορούμε να εκτιμήσουμε την επίδραση της διασποράς στον ρυθμό μετάδοσης (bit rate B) με την συνθήκη:

$$BL|D|\Delta\lambda < 1 , \quad (1.28)$$

Η παραπάνω εξίσωση μας δίνει μια εκτίμηση τάξης μεγέθους του BL που χαρακτηρίζει τις μονότροπες ίνες. Η παράμετρος της διασποράς D που αναλύσαμε παραπάνω μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά όταν μεταβάλλεται το μήκος κύματος λειτουργίας. Για να το αντιληφθούμε καλύτερα για οπτικές ίνες πυριτίου η παράμετρος της διασποράς είναι σχετικά μικρή στην περιοχή μήκους κύματος των 1.3 μm με το $D \sim 1$ ps/(km-nm). Αυτό σημαίνει ότι κάνοντας χρήση Laser ημιαγωγών με το φασματικό πλάτος να είναι $\Delta\lambda \sim 2-4$ nm, τότε το BL υπερβαίνει τα 100 Gb/s. Ωστόσο η παράμετρος D ποικίλλει αρκετά για μετατόπιση του μήκους κύματος λειτουργίας εκτός των 1.3nm. Η εξάρτηση του μήκους κύματος του D ρυθμίζεται από την εξάρτηση της συχνότητας του δείκτη τρόπου λειτουργίας \bar{n} . Με χρήση της εξίσωσης 1.27 και με την βοήθεια της $\bar{n}_g = \bar{n} + \omega(d\bar{n}/d\omega)$ η παράμετρος της διασποράς D γράφεται:

$$D = 2\pi c/\lambda^2 d/d\omega (1/u_g) = -2\pi c/\lambda^2 (2 d\bar{n}/d\omega + \omega d^2\bar{n}/d\omega^2) , \quad (1.29)$$

Αν αντικαταστήσουμε το $\bar{n} = n_2 + b(n_1 - n_2) \approx n_2(1 + b\Delta)$ και με την βοήθεια μιας παραμέτρου που παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό στη συνθήκη αποκοπής και ονομάζεται κανονικοποιημένη συχνότητα $V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx (2\pi/\lambda) a n_1 \sqrt{2\Delta}$, τότε το D μπορεί να γραφεί ως άθροισμα δυο όρων:

$$D = D_M + D_w , \quad (1.30)$$

Όπου D_M είναι η διασπορά υλικού και D_w είναι η διασπορά κυματοδηγού. Οι διασπορές δίνονται από τις εξισώσεις :

$$D_M = -2\pi/\lambda^2 dn_{2g}/d\omega = 1/c dn_{2g}/d\lambda , \quad (1.31)$$

$$D_w = -2\pi\Delta/\lambda^2 \left[n_{2g}^2/n_2 V d^2(Vb)/dV^2 + dn_{2g}/d\omega d(Vb)/dV \right] , \quad (1.32)$$

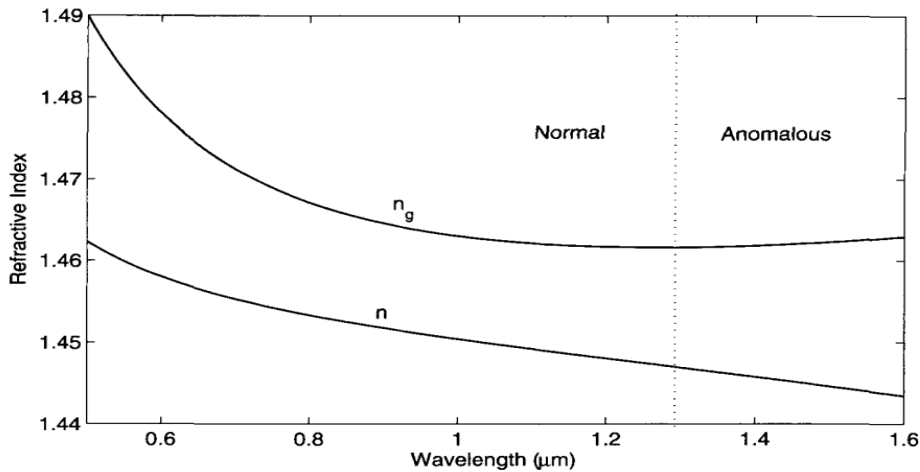
Ο δείκτης n_{2g} είναι ο δείκτης ομάδας υλικού της επένδυσης, ενώ οι παράμετροι V και b δίνονται από τις σχέσεις $V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx (2\pi/\lambda) a n_1 \sqrt{2\Delta}$, και $b = \frac{\beta/k_0 - n_2}{n_1 - n_2} = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2}$, ενώ το Δ θεωρήθηκε ανεξάρτητο της συχνότητας [9].

1.4.4 Διασπορά υλικού

Είχαμε αναφέρει και σε προηγούμενη παράγραφο ότι ανάλογα με την οπτική συχνότητα ω που έχουμε εντός της οπτικής ίνας, επηρεάζεται και ο δείκτης διάθλασης του υλικού του πυρήνα, εν προκειμένω του πυριτίου, αυτό ονομάζεται διασπορά υλικού. Η διασπορά του υλικού έχει άμεση σχέση με τις χαρακτηριστικές συχνότητες συντονισμού όπου το υλικό απορροφά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ο δείκτης διάθλασης $n(\omega)$ δίνεται με πολύ καλή προσέγγιση από την εξίσωση Sellmeier που είναι της μορφής:

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^M \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2}, \quad (1.33)$$

Όπου B_j είναι η ισχύς του ταλαντωτή και ω_j είναι η συχνότητα συντονισμού, το n θα μπορούσε να είναι το n_1 ή n_2 όπως τα είδαμε και νωρίτερα, δηλαδή εξαρτάται από το τι λαμβάνουμε υπόψιν, την διασπορά του πυρήνα, ή της επένδυσης αντίστοιχα. Το \sum αφορά όλους τους συντονισμούς του υλικού που συμβάλουν σε όλο το εύρος συχνότητας λειτουργίας. Συγκεκριμένα για τις οπτικές ίνες αρκεί να λάβουμε τρεις μετρούμενες καμπύλες διασποράς ($M=3$) για την εξαγωγή ενός ακριβούς προσεγγιστικού αποτελέσματος. Τέλος η διασπορά έχει γραμμική φύση και δεν επιδρά στην φασματική κατανομή του καθώς επίσης δεν έχει και καμία εξάρτησης από την ισχύ του σήματος [11] [9],.



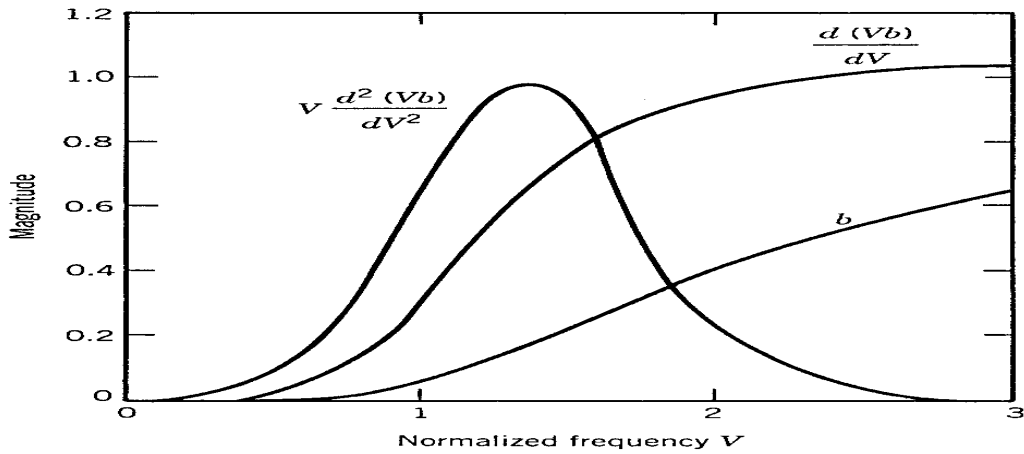
Σχήμα 4 Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης των n (δείκτης διάθλασης) και n_g (δείκτης ομάδας) για ανάλογα μήκη κύματος στην περιοχή 0,5–1,6 μm για πυρήνα από τηγμένο πυρίτιο [9].

Αυτό που παρατηρούμε είναι η εξάρτηση – συσχέτιση της διασποράς του υλικού D_M από την κλήση της καμπύλης του δείκτη ομάδας n_g , όπως αποτυπώνεται και στην σχέση 1.31. Ο λόγος $dn_g/d\lambda$ μηδενίζεται για $\lambda = 1,276\mu\text{m}$. Αυτή η συχνότητα ονομάζεται και συχνότητα μηδενικής διασποράς λ_{ZD} (Zero Dispersion). Συνεπώς για μήκος κύματος $\lambda = \lambda_{ZD}$ έχουμε μηδενική διασπορά υλικού $D_M = 0$. Βάζοντας όριο την συχνότητα λ_{ZD} οι τιμές κάτω από το λ_{ZD} επιδρούν αρνητικά την διασπορά (αρνητικό πρόσημο) ενώ για τιμές πάνω από το λ_{ZD} επιδρούν θετικά την διασπορά (θετικό πρόσημο). Μια άλλη παράμετρος που εξετάζουμε στις οπτικές ίνες για το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς είναι η ακτίνα του πυρήνα της οπτικής ίνας (a) και το βήμα δείκτη Δ μέσω της συμβολής του κυματοδηγού όπως θα δούμε παρακάτω.

1.4.5 Διασπορά κυματοδηγού

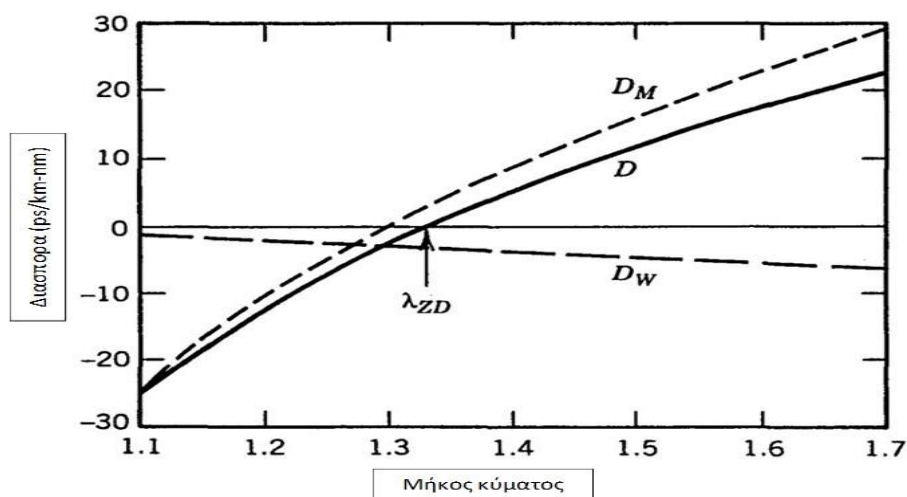
Η διασπορά του κυματοδηγού D_w δίνεται από την σχέση 1.32 όπως την αναπτύξαμε παραπάνω και συμβάλει στην παράμετρο διασποράς D μέσω της σχέσης 1.30. Στην σχέση 1.32 παρατηρούμε ότι η συμβολή της διασποράς του κυματοδηγού εξαρτάται από την παράμετρο V , την σταθερά διάδοσης b και από τις τιμές δυο παραγώγων. Η παράμετρος V είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ακτίνα του πυρήνα της ίνας καθώς και με την διαφορά του δείκτη Δ . Οι τιμές των παραγώγων $V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$ και $\frac{d(Vb)}{dV}$ όπως και του b έχουν διαφορετικές τιμές για κάθε τιμή της παραμέτρου V και όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα οι δυο παράγοντες έχουν θετικές τιμές σε όλο το εύρος μήκους κύματος. Γενικά μια οπτική ίνα εμφανίζει διασπορά κυματοδηγού όταν $d^2\beta/d\lambda^2 \neq 0$. Αυτό συμβαίνει για συγκεκριμένο τρόπο

διάδοσης και σταθερά διάδοσης β . Η διασπορά του κυματοδηγού σχετίζεται
άμεσα με την μεταβολή ταχύτητας της ομάδας (GVD)



Σχήμα 5 Απεικόνιση τιμών των δυο παραγώγων και του b για κάθε
διαφορετική τιμή παραμέτρου V [15].

Η διασπορά υλικού D_M όπως μελετήσαμε έχει αρνητικές τιμές για
συχνότητες κάτω από την λ_{ZD} συνεπώς από τα παραπάνω
αντιλαμβανόμαστε ότι μπορούμε να σχεδιάσουμε οπτικές ίνες όπου να
βελτιστοποιήσουμε και να μετατοπίσουμε την διασπορά στον κυματοδηγό D_w
ώστε η συνολική διασπορά D να είναι σχετικά μικρή σε ένα ευρύ φάσμα
μήκους κύματος. Επίσης να σχεδιάζονται ίνες όπου με την συμβολή τους
λόγο της διασποράς του κυματοδηγού, μετατοπίζεται η συχνότητα μηδενικής
διασποράς λ_{ZD} σε μεγαλύτερη συχνότητα, όπως φαίνεται και στην
παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 6 Απεικόνιση της διασποράς D_M , D_w , D για διαφορετικά μήκη
κύματος.

1.4.6 Διασπορά τρόπου πόλωσης (PMD)

Η διασπορά τρόπου πόλωσης μας απασχολεί κυρίως σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα που έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης bit. Οι αποκλίσεις από την τέλεια κυλινδρική συμμετρία του πυρήνα των οπτικών ινών, οδηγεί σε διπλή διάθλαση λόγω διαφορετικού δείκτη τρόπου μετάδοσης. Πρακτικά ο παλμός εισόδου διεγείρει τα δυο στοιχεία πόλωσης και έτσι αρχίζει να διευρύνεται κατά μήκος της οπτικής ίνας λόγω των διαφορετικών ομάδων ταχύτητας. Η διεύρυνση του παλμού μπορεί να υπολογιστεί κατ' εκτίμηση υπολογίζοντας την χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δυο συνιστωσών πόλωσης (ΔT). Έτσι από την παρακάτω σχέση για ίνα μήκους L μπορούμε να υπολογίσουμε το ΔT με τον εξής τύπο:

$$\Delta T = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| = L |\beta_{1x} - \beta_{1y}| = L(\Delta\beta_1), \quad (1.34)$$

Οι δείκτες x, y χαρακτηρίζουν τους δυο πολωμένους τρόπους και το $\Delta\beta_1$ είναι η διαφορά στις ταχύτητες ομάδας κατά μήκος των δυο κύριων καταστάσεων πόλωσης. Γενικά στις συμβατικές ίνες η διπλοθλαστικότητα ποικίλλει κατά μήκος της οπτικής ίνας με τυχαίο τρόπο. Είναι σαφές ότι για διαφορετικές φασματικές συνιστώσες του παλμού η πόλωση θα είναι διαφορετική. Οι ανιχνευτές των οπτικών δεκτών δεν επηρεάζονται από την κατάσταση πόλωσης, αλλά αυτό που μας απασχολεί είναι η διεύρυνση του παλμού που προκαλείται λόγω των τυχαίων αλλαγών στη διπλή διάθλαση.

1.5 Αντιμετώπιση της διασποράς

Στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών αυτό που παρατηρούμε είναι ότι αυτό που μας περιορίζει και αποτελεί πρόβλημα, είναι η διασπορά και τα μη γραμμικά φαινόμενα ειδικά σε ταχύτητες πάνω από 40Gb/s. Το πρόβλημα είναι ότι καθώς καθίσταται αναγκαία η χρήση οπτικών ενισχυτών για την ενίσχυση του σήματος κατά την μετάδοση του στα οπτικές ίνες, αυτό εν τέλει δημιουργεί υποβάθμιση του σήματος λόγω της διασποράς. Παλιότερα με τους ηλεκτρονικούς ενισχυτές αυτό δεν αποτελούσε πρόβλημα, καθώς οι ενισχυτές αυτοί επανάφεραν το σήμα στην αρχική τους κατάσταση, κάτι που δεν ισχύει πλέον με τους οπτικούς ενισχυτές. Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι το υπάρχον δίκτυο οπτικής ίνας ανά τον κόσμο αριθμεί σε αρκετά εκατομμύρια χιλιόμετρα μονότροπης ίνας με μήκος κύματος μηδενικής διασποράς στα 1.31 μ m.

Έτσι για τον σχεδιασμό συστημάτων οπτικών επικοινωνιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης είναι απαραίτητο να γίνεται ορθή μελέτη για την αντιμετώπιση της διασποράς ώστε να περιορίσουμε σημαντικά την διεύρυνση του παλμού. Ουσιαστικά μας ενδιαφέρει να περιορίσουμε με κάθε τρόπο την διασπορά ομαδικής ταχύτητας (GVD). Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που εφαρμόζονται τόσο σε επίπεδο δέκτη όσο και επίπεδο πομπού ή χρησιμοποιούνται τεχνικά μέσα όπως είναι οι ίνες αντιστάθμισης. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται σε πομπό, δέκτη αλλά και κατά μήκος του συνδέσμου της

Οπτικής ίνας βασίζεται στην εξίσωση διάδοσης του παλμού που γράφεται και ως εξής:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = 0, \quad (1.35)$$

Όπου A είναι το πλάτος του περιβάλλοντος παλμού και το β_3 μπορεί να αγνοηθεί για $|\beta_2|$ κοντά στο $0.1\text{ps}^2/\text{km}$. Έτσι έχουμε:

$$A(z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}(0, \omega) \exp\left(\frac{i}{2} \beta_2 z \omega^2 - i\omega t\right) d\omega, \quad (1.36)$$

Στην εξίσωση 1.36 παρατηρούμε ότι η υποβάθμιση του οπτικού σήματος εξαιτίας της διασποράς προκαλείται από τον παράγοντα φάσης $\exp\left(\frac{i}{2} \beta_2 z \omega^2\right)$ που εμφανίζεται από τις φασματικές συνιστώσες του παλμού κατά την διάδοσή του στην οπτική ίνα. Επομένως αν καταφέρουμε να ακυρώσουμε αυτόν τον παράγοντα φάσης τότε το εισερχόμενο σήμα θα επανέλθει στην αρχική του κατάσταση χωρίς την εισαγωγή της διασποράς.

1.6 Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM)

Η τεχνολογία κατά την οποία μια πηγή Laser στέλνει ταυτόχρονα σε μια οπτική ίνα πολλά και διαφορετικά μήκη κύματος καλείται πολυπλεξία διαίρεση μήκους κύματος. Γενικά τον όρο πολυπλεξία τον έχουμε συναντήσει στις ραδιοσυχνότητες, μόνο που εκεί είναι γνωστός για την διαμόρφωση συχνότητας και είναι γνωστός ως FDM δηλαδή πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας. Στις οπτικές επικοινωνίες έχουμε πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται έτσι καθώς μπορούμε να συνδυάσουμε έναν αριθμό πολλών οπτικών σημάτων σε μία ενιαία οπτική ίνα χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος. Κάθε μια από αυτές τις ακτίνες μεταφέρει διαφορετική ροή δεδομένων και η πολυπλεξία τους οδηγεί σε πολλαπλάσιο εύρος ζώνης μετατρέποντας έτσι την οπτική ίνα σε «εικονικά» πολλές ίνες, που κάθε μια λειτουργεί σε διαφορετικό μήκος κύματος. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ χρηστών. Τα συστήματα WDM στηρίχτηκαν πάνω στο γεγονός ότι σε κάθε οπτική ίνα κάθε οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα. Έτσι είναι δυνατόν χρησιμοποιώντας την ίδια οπτική ίνα να περάσουν περισσότερα από ένα διαφορετικά οπτικά σήματα. Μια εξίσου σημαντική παράμετρος είναι ότι κάθε οπτικό κανάλι μπορεί να μεταφέρει οποιαδήποτε μορφή μετάδοσης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μπορούν να μεταφερθούν όλων των ειδών τα σήματα χωρίς την ανάγκη δημιουργίας κοινής δομής. Το WDM έχει την δυνατότητα να εκμεταλλεύεται σχεδόν όλο το προσφερόμενο από την οπτική ίνα εύρος ζώνης. Με τον τρόπο αυτό σήμερα μπορούν να μεταδοθούν πάνω από 200 σήματα με $\Delta f = 30\text{GHz}$ σε μια μόνο οπτική ίνα [13]. Έτσι με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να αυξήσουμε τον συνολικό ρυθμό μετάδοσης bit.

Το WDM αρχικά χρησιμοποιήθηκε για να αναβαθμίσει την χωρητικότητα των ήδη εγκατεστημένων ζεύξεων οπτικών ινών. Πλέον με την

χρήση σύγχρονων πηγών laser επιτυγχάνονται πολύ στενά πλάτη φασματικής εκπομπής της τάξης μερικών nm. Αυτό που χρειάζεται προσοχή και σωστό σχεδιασμό είναι η διασφάλιση της απόστασης μεταξύ των κορυφών των μηκών κύματος, έτσι ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ των φασματικών εκτάσεων. Ένας άλλος παράγοντας που θα ήταν καταστρεπτικός στο λαμβανόμενο οπτικό σήμα, θα ήταν η μετατόπιση των μηκών κύματος εντός της φασματικής περιοχής. Αυτό θα έδινε έναν αλλοιωμένο τελικό παλμό, καθώς θα ήταν αδύνατον να προσδιοριστούν οι αρχικοί παλμοί. Έτσι πρέπει να διασφαλιστεί ένα σταθερό μήκος κύματος. Για τον λόγο αυτό όπως και στις άλλες διαμορφώσεις υπάρχει μια ζώνη ασφαλείας μεταξύ των καναλιών. Αυτό περιορίζει κάπως την χωρητικότητα, όμως είναι αναγκαίο για την αποφυγή των προαναφερθέντων προβλημάτων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα πολυπλεγμένο σήμα το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο πολυπλεγμένων φέρουσων συχνοτήτων. Έτσι το συνολικό άθροισμα ρυθμού-απόστασης bit , BL, αποτελείται από τα N κανάλια με ρυθμούς bit B₁, B₂, B₃,B_N για καθορισμένο L μήκος οπτικής ίνας, ως εξής:

$$BL = (B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_N)L, \quad (1.37)$$

Αν θέλουμε να υπολογίσουμε ουσιαστικά την χωρητικότητα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι για ίσους αριθμούς bit έχουμε αύξηση της χωρητικότητας κατά N φορές, όσες δηλαδή και η φέρουσες συχνότητες που θα αποτελείται ένα πολυπλεγμένο οπτικό σήμα. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι υπάρχει ένα όριο στα κανάλια που μπορεί να φέρει ένα μήκος κύματος και αυτό το καθορίζει η απόσταση ασφαλείας που πρέπει να υπάρχει μεταξύ των φέρουσων συχνοτήτων. Γενικά η απόσταση των καναλιών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη τουλάχιστον από το διπλάσιο ρυθμό μετάδοσης Bit B. Για να αντιληφθούμε πλέον την συμβολή της WDM στις οπτικές επικοινωνίες αρκεί να σκεφτούμε ότι μπορούν να περάσουν 750 κανάλια μέσα από ένα εύρος ζώνης 300nm με ταχύτητες 30 Tb/s και με κατάλληλους οπτικούς ενισχυτές όπως και σωστή διαχείριση της διασποράς μπορεί να μεταδοθεί σε απόσταση 1000km [9].

1.6.1 Βασικά στοιχεία του WDM - Οπτικά φίλτρα

Μέχρι τώρα αναλύσαμε την συμβολή της WDM στον τομέα των οπτικών ινών και στο πώς αυξάνει εκθετικά την χωρητικότητα στο υπάρχον δίκτυο οπτικών ινών. Ωστόσο για την αποπολυπλεξία του οπτικού σήματος και στην επιλογή του επιθυμητού καναλιού ενδιαφέροντος χρησιμοποιούνται ειδικά οπτικά φίλτρα. Εδώ υπάρχει μια τεχνική απαίτηση. Τα φίλτρα αυτά θα πρέπει να είναι έχουν ένα αρκετά μεγάλο εύρος ζώνης από την μια, αλλά θα πρέπει να είναι και ταυτόχρονα πολύ περιορισμένο για να εξαλείψει τα γειτονικά κανάλια.

Η λειτουργία των φίλτρων είναι βασισμένη σε δυο φυσικούς μηχανισμούς, την οπτική περίθλαση και την οπτική παρεμβολή. Βασικές ιδιότητες είναι, μεγάλο εύρος συντονισμού, ταχύτητα συντονισμού, μηχανισμός αποφυγής παρεμβολών, ελαχιστοποίηση απωλειών κατά την είσοδο του οπτικού σήματος, μη ύπαρξη ευαισθησίας σε φαινόμενα

πόλωσης, να μην επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς παράγοντες και φυσικά να μην έχουν υψηλό κόστος κατασκευής. Τα βασικότερα τέτοια φίλτρα που θα συναντήσουμε είναι, το φίλτρο Fabry Perot , το φίλτρο Mach – Zehnder, και τέλος το φίλτρο Michelson.

Το φίλτρο Fabry Perot αποτελείται από μια κοιλότητα που σχηματίζεται από δυο κάτοπτρα όπου το μήκος ελέγχεται ηλεκτρονικά. Στην οπτική κοιλότητα ουσιαστικά συντηρούνται τρόποι ταλάντωσης μόνο των μηκών κύματος που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή πετυχαίνουμε την κατανομή των συχνοτήτων που απαιτούμε να διέλθουν από το φίλτρο Fabry Perot. Αυτό γίνεται ρυθμίζοντας ηλεκτρικά την απόσταση L μεταξύ των δυο οπτικών κοιλοτήτων του φίλτρου. Η φασματική περιοχή λειτουργίας του φίλτρου εξαρτώμενη από την απόσταση των οπτικών κοιλοτήτων δίνεται από την σχέση:

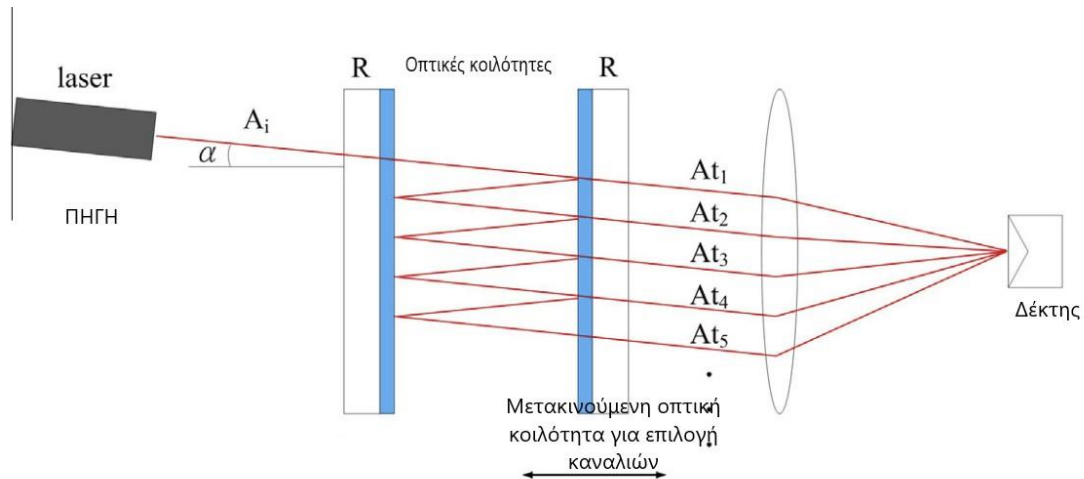
$$\Delta F_{fsr} = c/(2n_g L), \quad (1.38)$$

ΔF_{fsr} αποτελεί το «παράθυρο» των μετρήσεων του φίλτρου και επιλέγοντας κατάλληλο L επιλέγουμε και τις συχνότητες που θέλουμε να περάσουν. Το n_g αποτελεί τον δείκτη ομάδας του υλικού της κοιλότητας του φίλτρου. Τέλος ένα ακόμα χαρακτηριστικό είναι η λεπτότητα του φίλτρου, της οποίας βασικός παράγοντας είναι η ανακλαστικότητα R των κοιλοτήτων η οποία προσδιορίζει το πλήθος των ακτινών που υπάρχουν σε αυτήν. Έτσι αν αγνοήσουμε τις απώλειες η λεπτότητα του φίλτρου καθορίζεται αποκλειστικά από την ανακλαστικότητα των κοιλοτήτων, και δίνεται από τον τύπο:

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}, \quad (1.39)$$

Έτσι το φίλτρο πρακτικά αποτελείται από έναν πιεζοηλεκτρικό θάλαμο ο οποίος ελέγχει ηλεκτρονικά το μήκος του διακένου ώστε να συντονιστεί το φίλτρο για την επιλογή συγκεκριμένου καναλιού. Το βασικό πλεονέκτημα των φίλτρων αυτών είναι ότι μπορούν να ενσωματωθούν στο σύστημα χωρίς να υπάρχουν απώλειες σύζευξης. Τέλος να αναφέρουμε ότι τα φίλτρα FB τυπικά περιορίζονται σε έναν συγκεκριμένο αριθμό καναλιών, ο οποίος μπορεί να αυξηθεί, χρησιμοποιώντας δυο ή και περισσότερα φίλτρα.

Μια απεικόνιση ενός τέτοιου φίλτρου μπορούμε να δούμε παρακάτω:



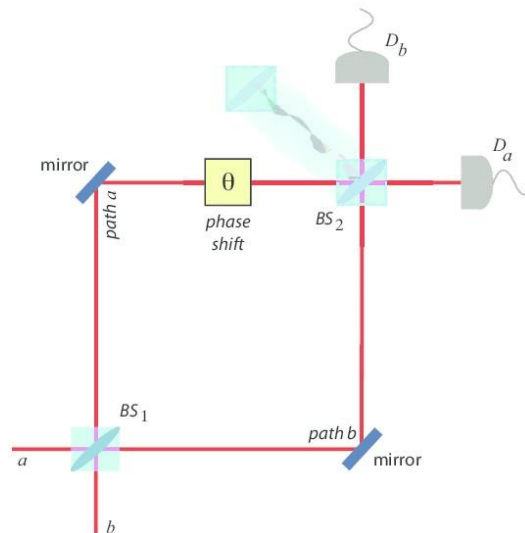
Εικόνα 7 Απεικόνιση φίλτρου Fabry Perot.

Το φίλτρο Mach – Zehnder είναι ένα ακόμα φίλτρο που χρησιμοποιείται. Το φίλτρο αυτό είναι σχετικά απλό στην λειτουργία του καθώς πρακτικά χρησιμοποιεί κάτοπτρα σε αντικριστές διατάξεις όπου εισάγουν μια μετατόπιση φάσης. Αυτό βασίζεται σε μια βασική αρχή της φυσικής ότι κατά τη μετάδοση ένα κύμα δεν λαμβάνει μετατόπιση φάσης, όμως κατά την ανάκλαση λαμβάνει μετατόπιση φάσης π. Συγκεκριμένα μια δέσμη φωτός εισέρχεται από την πηγή Laser η οποία χωρίζεται σε δυο μέρη μέσω ενός διαχωριστή δέσμης. Οι δυο πλέον δέσμες ακολουθούν μια διαδρομή μέσα από ένα κυματοδηγό και ανασυντίθεται στο τέλος από ένα συζευκτήρα. Κάθε δέσμη αποκτά διαφορετική μετατόπιση φάσης, αυτό εξαρτάται βασικά από το μήκος των κατόπτρων του πρώτου φίλτρου που διαχωρίζει την οπτική δέσμη, πριν φτάσουν στον τελικό συζευκτήρα. Ανάλογα με την σχετική φάση που αποκτά κάθε δέσμη κατά μήκος των δυο διαφορετικών διαδρομών που διατρέχουν, αλλάζει και ο τελικός βαθμός ανάκλασης. Έτσι όταν το σήμα ανασυνδεθεί μπορεί να ακολουθήσει οποιαδήποτε από τις δυο θύρες εξόδου του συζευκτήρα, ανάλογα με την συχνότητα του και την μετατόπιση φάσης που έχει προκληθεί από το μήκος του κατόπτρου του συζευκτήρα. Έτσι το τελικό σήμα που θα λάβουμε εμπεριέχει μια επιπλέον καθυστέρηση τ από τον μεγαλύτερο βραχίονα του κατόπτρου του φίλτρου Mach – Zehnder :

$$H_{MZ}(\omega) = \frac{1}{2} [1 + \exp(i\omega\tau)] , \quad (1.40)$$

Γενικά ένα φίλτρο Mach – Zehnder αποτελείται από πολλές μικρές τέτοιες συστοιχίες κατόπτρων όπου στο σύνολό τους συμβάλουν εξαιρετικά στην εξισορρόπηση της διασποράς. Η καθυστέρηση που εισάγεται σε σήματα χαμηλότερης συχνότητας και ακολουθούν εν τέλη την συντομότερη διαδρομή μέσα στο φίλτρο, δημιουργεί την πλήρη εξισορρόπηση από τις καθυστερήσεις που εισάγονται από την διαδρομή τους μέσα από μια οπτική ίνα. Με την βοήθεια της 1.40 μπορούμε να σχεδιάσουμε φίλτρα Mach – Zehnder τα οποία να βελτιστοποιήσουν την απόδοσή τους προς το προσδοκώμενο αποτέλεσμα και έτσι να μεγιστοποιήσουμε την απόδοση της συσκευής. [14], [15]

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG



Εικόνα 8 Τρόπος λειτουργίας του φίλτρου Mach – Zehnder.

Αντίστοιχα περίπου είναι και τα φίλτρα Michelson που χρησιμοποιούν αντίστοιχα τεχνάσματα για την εξάλειψη του φαινομένου της διασποράς που προκαλείται από την χρονική καθυστέρηση. Βασικό μειονέκτημα αυτών των φίλτρων είναι το στενό εύρος ζώνης στην είσοδο του σήματος, αφού η μετατόπιση φάσης που προκαλούν, εξαρτάται από αυτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – FBG

2.1 Γενικά

FBG (Fiber Bragg Gratings) , με λίγα λόγια φράγματα Bragg στην οπτική ίνα. Τα FBG θα τα συναντήσουμε κυρίως ως αισθητήρες στις οπτικές ίνες. Αν θέλουμε να δώσουμε μια σύντομη εξήγηση στο τι είναι φράγμα Bragg θα λέγαμε ότι είναι κάθε περιοδική διαταραχή στον κυματοδηγό μας, που αποτελεί το μέσο διάδοσης, ονομάζεται φράγμα Bragg. Στο ερώτημα πως προκαλείται μια περιοδική διαταραχή στην οπτική ίνα που αποτελεί και το μέσω διάδοσης, η απάντηση βρίσκεται στο ότι αυτό γίνεται με μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Ο δείκτης διάθλασης ενός μέσου είναι ένας συντελεστής που μας προσδιορίζει το πόσο εύκολα διατρέχει το φως μέσα στο μέσο, εν προκειμένω την οπτική ίνα. Υπολογίζεται πάντα σε συνάρτηση της ταχύτητας του φωτός στο κενό και συγκεκριμένα από τον τύπο $n = \frac{c}{u}$ όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό και u η ταχύτητα του φωτός στο μέσο διάδοσης. Για να εμβαθύνουμε στην λειτουργία των αισθητήρων φραγμάτων Bragg πρέπει να δούμε λίγο τα γενικά χαρακτηριστικά αυτών.

2.2 Φράγματα Bragg – Γενικά χαρακτηριστικά

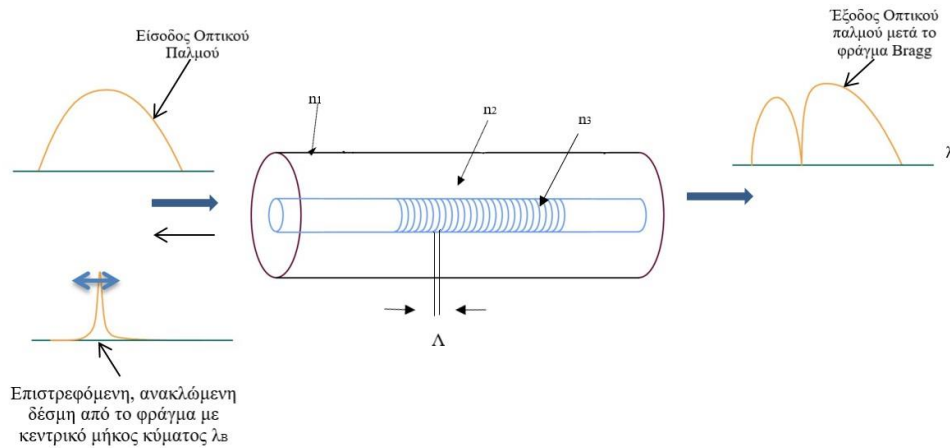
Το φράγμα Bragg στις οπτικές ίνες λειτουργεί ως ένα οπτικό φίλτρο λόγω του ότι παρεμβάλλει το οπτικό σήμα μέσα στην ίνα αλλάζοντας τον δείκτη διάθλασης και έτσι δημιουργείται μια ζώνη διακοπής «φράγμα» στην οποία μεγάλο μέρος του προσπίπτοντος φωτός ανακλάται προς τα πίσω. Η λειτουργία του είναι βασισμένη στο γεγονός ότι το φως κατά την διάδοσή του μπορεί να ανακλάται και να διαθλάται στον ίδιο χρόνο μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων δείκτη διάθλασης, γνωστή και ως ανάκλαση Fresnel. Έτσι κατά την πρόσπτωση του φωτός πάνω στην ζώνη διακοπής το φως σκεδάζεται «διασκορπίζεται» και έτσι η ανακλώμενη δέσμη αποκτά συγκεκριμένο μήκος κύματος χαρακτηριστικό του φράγματος και κινείται προς την αντίθετη φορά από την κατεύθυνση της διάδοσης του οπτικού σήματος. Το μέγιστο μήκος κύματος της φασματικής συνιστώσας στενής ζώνης που ανακλάται από το FBG, ονομάζεται μήκος κύματος Bragg δίνεται από την σχέση [16]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}A, \quad 2.1$$

Έτσι το λ_B όπως είπαμε είναι το μήκος κύματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας διαμέσο του φράγματος Bragg, το n_{eff} σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να το συναντήσουμε και ως \bar{n} , είναι ο μέσος «αποτελεσματικός ενεργός» δείκτης διάθλασης του πυρήνα και εξαρτάται από την σταθερά διάχυσης β και το k συνδεόμενα με την σχέση:

$$n_{eff} = \beta/k \text{ όπου } k = 2\pi/\lambda, \quad 2.2$$

Γενικά η τιμή του n_{eff} εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους τις οποίες θα αναλύσουμε στο κεφάλαιο 3. Τέλος το Λ είναι η περίοδος του φράγματος, που ουσιαστικά προκύπτει από την απόσταση μεταξύ των ζωνών διακοπής. Στο σημείο αυτό να πούμε ότι στις CFBG ίνες το Λ αντικαθίσταται με $\Lambda(z)$ όπου είναι η περίοδος grating κατά μήκος του άξονα διάδοσης (z) της ίνας CFBG και επηρεάζεται άμεσα από την συνάρτηση Chirp όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο. Για να γίνει περισσότερο κατανοητό αρκεί να ρίξουμε μια ματιά στο παρακάτω σχέδιο.



Εικόνα 9 Αποτέλεσμα εισόδου οπτικού παλμού διαμέσου του φράγματος Bragg.

Υπάρχει μια σύνδεση μεταξύ των κυμάτων που διαδίδονται προς τα πίσω και αυτών που συνεχίζουν την διάδοση του οπτικού κύματος, προς τα εμπρός σε μήκη κύματος κοντά στο λ_B και αυτή η σύνδεση προκύπτει από την περιοδική φύση της μεταβολής του δείκτη. Αυτή η μεταβολή του δείκτη, έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η ανακλαστικότητα η οποία εξαρτάται από την συχνότητα του προσπίπτοντος οπτικού σήματος σε ένα εύρος ζώνης καθοριζόμενο από την ισχύς του πλέγματος Bragg. Όπως φαίνεται στην εικόνα 9, έχουμε το φάσμα του οπτικού σήματος το οποίο διέρχεται από ένα φράγμα Bragg. Μετά την πρόσπτωσή του στο φράγμα, προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του μήκους κύματος του ανακλώμενου φάσματος είναι η ίδια από την ελάχιστη τιμή του μήκους κύματος του φάσματος που συνεχίζει την διάδοση. Έτσι αν στο τέλος αθροίσουμε τα δυο φάσματα προκύπτει το φάσμα της αρχικής μετάδοσης. Επομένως η χρήση FBG ως αισθητήριο, βασίζεται στο γεγονός ότι καθώς αυτό καταπονείται από διάφορους παράγοντες, όπως σύνθλιψη, θερμοκρασία υγρασία κ.α., αλλάζει την περίοδο πλέγματος Λ . Καθώς έχουμε αλλαγή του Λ έχουμε και μετατόπιση του μήκους κύματος Bragg λ_B .

2.3 Κατασκευή Φραγμάτων Bragg

Οι ιδιότητες του φράγματος Bragg το καθιστούν ουσιαστικά ένα ζωνοπερατό φίλτρο το οποίο με την χρήση των φραγμάτων και ορισμένο δείκτη διάθλασης αντανakλά ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, ενώ επιτρέπει στα υπόλοιπα την διάδοσή τους. Για την κατασκευή των φραγμάτων Bragg χρησιμοποιείται μια δέσμη Laser UV, η οποία "φωτίζει" συγκεκριμένο σημείο της οπτικής ίνας. Η κατασκευή τους μέχρι το 1978 ήταν αδύνατη καθώς χρειαζόνταν πολύ μεγάλη ακρίβεια για την στοχευμένη αλλαγή του δείκτη διάθλασης σε σημείο της ίνας. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα της προσπίπτουσας υπεριώδους ακτινοβολίας, αυξάνεται και ο δείκτης διάθλασης επομένως και η ανακλαστικότητα, αλλά μέχρι ένα όριο πάνω από το οποίο ξεκινά η ανακλαστικότητα να μειώνεται ξανά. Αυτό οφείλεται λόγω της αύξησης της πυκνότητας του υλικού το οποίο θα συνεισφέρει πλέον αρνητικά. Για να γίνει αντιληπτό θα αναφέρουμε ότι η δέσμη laser UV που χρησιμοποιείται για την μεταβολή του δείκτη διάθλασης σε συγκεκριμένο σημείο της ίνας πρακτικά «εκμεταλλεύεται» τα ποσοστά συγκέντρωσης αλογονιδίων μετάλλων όπως είναι το SiCl_4 και το GeCl_4 στον πυρήνα όπου παρουσιάζουν αυξημένη φωτοευαισθησία και έτσι μεταβάλλεται και ο δείκτης διάθλασης με τον «φωτισμό», μεταβάλλοντας την πυκνότητα των εν λόγω μετάλλων στον πυρήνα της οπτικής ίνας. Για την κατασκευή FBG υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις, όπως ίνες με ελάχιστη συγκέντρωση άνω του 5% σε GeO που παρουσιάζουν αρκετή φωτοευαισθησία ώστε να εξυπηρετούν την κατασκευή FBG. Το χαρακτηριστικό αυτών των ινών είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις απομακρυσμένες εφαρμογές και για αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων ίνας, χωρίς να εισάγουν απώλειες. Άλλα FBG μπορούν να κατασκευαστούν με πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία, με μειονέκτημα την εισαγωγή πολλών απωλειών σε μεγάλες αποστάσεις. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες με πυρήνα που περιέχει το GeO και αρκετή προσθήκη βορίου. Τέλος ένας άλλο τρόπος για την κατασκευή ινών FBG είναι με την διάχυση υδρογόνου στον πυρήνα της ίνας. Με αυτό τον μηχανισμό αυξάνεται η φωτοευαισθησία στον πυρήνα της ίνας και αυτό οφείλεται στην αντίδραση του H_2 με το GeO . Σε ίνες υψηλής πρόσμιξης υπάρχει σημαντική συγκέντρωση δεσμών Ge-O-Ge . Έτσι το H_2 αντιδρά με αποτέλεσμα το σχηματισμό δεσμών Ge-OH , το οποίο απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία. Η προσθήκη υδρογόνου υπό πίεση επιτυγχάνεται τοποθετώντας την ίνα σε ένα περιβλήμα με υδρογόνο σε υψηλή πίεση περίπου 150 atm που κατά περίπτωση μπορούν να φτάσουν έως και 750 atm. Τέλος για την προσθήκη υδρογόνου εφαρμόζεται μια τεχνική παρόμοια με την οξειδωτική σε φάση ατμού για την κατασκευή της οπτικής ίνας. Έτσι θερμαίνεται ο πυρήνας με φλόγα υδρογόνου – οξυγόνου για 20 λεπτά στους 1700 βαθμούς Κελσίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η περίσσεια του υδρογόνου στο μείγμα να διαχέεται στην ίνα. Η συνεισφορά αυτής της τεχνικής είναι ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις συμβατικές τηλεπικοινωνιακές ίνες που έχουν χαμηλές προσμίξεις, της τάξης του 3.5% σε GeO , και να αποκτήσουν ικανή φωτοευαισθησία ώστε με την δέσμη laser να τροποποιηθεί ο δείκτης

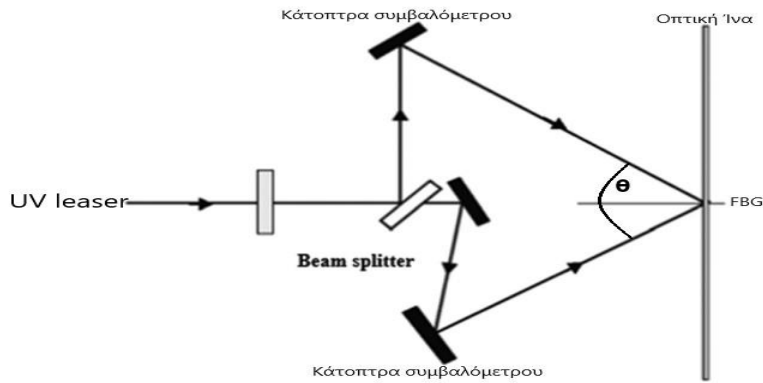
διάθλασης του πυρήνα, απαραίτητο για την κατασκευή FBG [17]. Υπάρχουν 3 βασικές μέθοδοι για την κατασκευή τους, με την συμβαλομετρική μέθοδος, με την μέθοδο μάσκας φάσης και η τελευταία ονομάζεται μέθοδος σημείο προς σημείο. Πρακτικά γίνεται μια φωτοαποτύπωση του πλέγματος μέσα στον πυρήνα της οπτικής ίνας στο στάδιο της κατασκευής της. Με την τεχνική αυτή είναι δυνατόν να μπορέσουμε να τοποθετήσουμε σε προκαθορισμένες θέσεις, μεγάλο αριθμό φραγμάτων Bragg με πολύ χαμηλό κόστος και ευκολιά. Όλα αυτά καθιστούν τα φράγματα Bragg βασικό παράγοντα στις τηλεπικοινωνίες για την αντιστάθμιση της διασποράς και τη διαμόρφωση παλμών, επίσης χρησιμοποιούνται και ως αισθητήρες μετρώντας δυναμικές καταπονήσεις, χρήση σε ιατρικές εφαρμογές που χρειάζεται απόλυτη ακρίβεια και αμεσότητα, καθώς και σε αεροδιαστημικές ενώ πλέον είναι απαραίτητη η χρήση τους για βελτιστοποίηση λειτουργίας των laser κ.α.

2.3.1 Κατασκευή με Συμβαλομετρική Μέθοδο

Όπως αναφέρεται στον τίτλο της μεθόδου, χρησιμοποιείται το συμβαλόμετρο ως τρόπος για να αλλάξουμε την γωνία φωτισμού της οπτικής ίνας από το laser και έτσι να επιλέξουμε το λ_B . Το συμβαλόμετρο είναι μια κοινή διάταξη που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό δέσμης, οπότε μια πηγή φωτός χωρίζεται σε δύο δέσμες. Έτσι μια δέσμη UV laser διαμέσου του συμβαλόμετρου χωρίζεται σε δυο δέσμες και στην συνέχεια κατευθύνεται για να σχεδιάσει ένα σχέδιο παρεμβολής στην οπτική ίνα. Η παρεμβολή αυτή θα προκαλέσει την δημιουργία του δείκτη διάθλασης \bar{n} του πυρήνα της ίνας καθώς και την διαμόρφωση της περιόδου πλέγματος Λ , η οποία θα έχει την ίδια χωρική περιοδικότητα με το σχέδιο παρεμβολής. Όσο έχουμε πιο σταθερό και υψηλότερης αντίθεσης σχέδιο παρεμβολής, τόσο αυξάνεται και η μεταβολή του δείκτη διάθλασης σε υψηλότερη τάξη. Η περίοδος πλέγματος Λ έχει άμεση εξάρτηση από το μήκος κύματος του σχεδίου παρεμβολής, δηλαδή της δέσμης laser UV που 'φωτίζει' την οπτική ίνα και δίνεται από την εξίσωση:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{\text{Laser } uv}}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}, \quad 2.3$$

Όπου $\lambda_{\text{Laser } uv}$ είναι το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης δέσμης laser, ενώ η γωνία θ είναι η γωνία τομής που σχηματίζουν οι δυο δέσμες μεταξύ τους, αφού διέλθουν από το συμβαλόμετρο. Με τον τρόπο αυτό αντιλαμβανόμαστε την κρισιμότητα της γωνία θ , καθώς οι δυο δέσμες έχουν το μήκος κύματος $\lambda_{\text{Laser } uv}$, μπορούμε μεταβάλλοντας την γωνία θ να επιλέξουμε το κατάλληλο μήκος κύματος λειτουργίας το φράγματος Bragg (λ_B) [18].

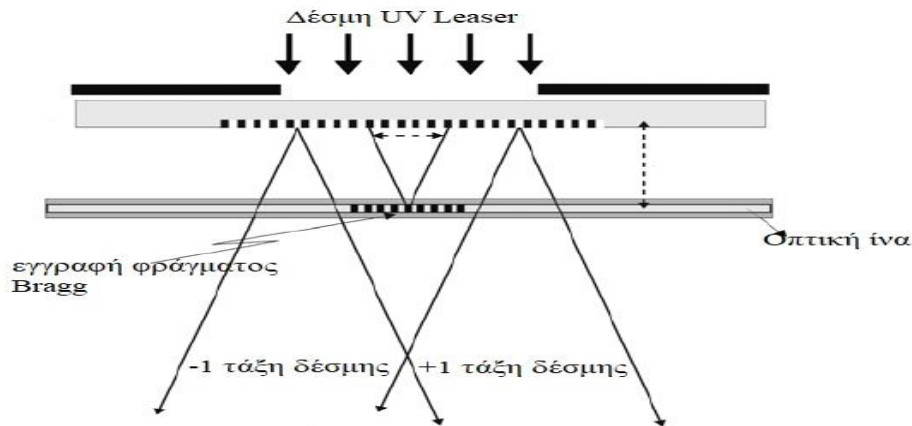


Εικόνα 10 Απεικόνιση του τρόπου κατασκευής FBG ίνας με συμβαλομετρική μέθοδο.

2.3.2 Κατασκευή με την μέθοδο μάσκα φάσης

Στην κατασκευή FBG ίνας με την μέθοδο του συμβαλόμετρου είναι δύσκολη η ακριβής ευθυγράμμιση των ακτίνων UV Leaser καθώς και η επίτευξη χωρικής συνοχής στο λείζερ με ακρίβεια. Αυτά συντελούν στο ότι η ίνα FBG δεν είναι υψηλής ποιότητας. Όπως αναφέραμε και παραπάνω το μήκος κύματος Bragg λ_B εξαρτάται ουσιαστικά από το μήκος κύματος του UV Leaser και από τη γωνία θ τομής στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η μέθοδος του συμβαλόμετρου. Στην μέθοδο μάσκα φάσης το μήκος κύματος Bragg λ_B εξαρτάται από την περιοδικότητα της μάσκας φάσης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε ένα διαθλαστικό οπτικό στοιχείο (μάσκα φάσης) που διαμορφώνει χωρικά τη δέσμη UV με περίοδο Λ_{pm} . Η αποτύπωση αυτών των μασκών φάσης δημιουργούνται σε ένα υπόστρωμα τηγμένου πυριτίου με την μέθοδο δέσμης ηλεκτρονίων. Η μέθοδος δέσμης ηλεκτρονίων χρησιμοποιείται για κατασκευές νανοδομών με διαστάσεις 1 έως 2 μm και σε περίπτωση χρήσης Xray οι διαστάσεις κυμαίνονται από 0,25 έως 0,1 μm . Μετά την κατασκευή της μάσκας φάσης και την χάραξη του μοτίβου, μια δέσμη Leaser UV προσπίπτει σε αυτήν και περιθλάται σε πολλές τάξεις περίθλασης και από αυτές ένα μέρος καταστέλλεται ενώ δυο τάξεις υπερισχύουν. Οι δυο αυτές τάξεις (-1 και +1) είναι αποκλίνουσες και σε κοντινό σημείο από την μάσκα, αυτές οι δυο τάξεις δεσμών διασταυρώνονται και δημιουργούν ένα μοτίβο παρεμβολής. Έτσι η οπτική ίνα στην οποία θέλουμε να χαραχούμε το φράγμα Bragg τοποθετείται στο σημείο που παράγεται το σχέδιο παρεμβολής. Σε περίπτωση που απαιτηθεί να αυξηθεί η πυκνότητα ισχύος τοποθετείτε ένα κάτοπτρο σε παράλληλη θέση με την οπτική ίνα, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη οπτική συγκέντρωση της δέσμης. Η περίοδος πλέγματος Λ εξαρτώμενη από την περίοδο φάσης Λ_{pm} δίνεται από τον τύπο:

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{pm}}{2}, \quad 2.4$$



Εικόνα 11 Απεικόνιση του τρόπου κατασκευής FBG ίνας με την μέθοδο μάσκα φάσης.

Η μάσκα φάσης έχει το μειονέκτημα ότι καθώς είναι ένα οπτικό μέσο υπόκειται σε καταπονήσεις όπως ότι μπορεί να γρατζουνιστεί. Επίσης είναι σημαντική η ακριβής απόσταση του την οπτική ίνα για να υπάρξει το μοτίβο παρεμβολής από τις διασταυρούμενες δέσμες. Αυτό κάποιες φορές δεν είναι απόλυτο με αποτέλεσμα εάν υπάρξει αύξηση της απόστασης τότε η δέσμη παρεμβολής θα είναι στενότερη με αποτέλεσμα στενότερα φράγματα Bragg. Μια τεχνική που χρησιμοποιείται ώστε να μπορούμε να ρυθμίζουμε το μήκος κύματος Bragg από την γωνία προσβολής της δέσμης, όπως γινόταν στην μέθοδο της συμβαλομετρίας, είναι με την χρήση κατόπτρων. Η μάσκα φάσης τοποθετείται σε ικανή απόσταση από την οπτική ίνα και ενδιάμεσως τοποθετούνται δυο κάτοπτρα που ουσιαστικά ανακατευθύνουν προς την οπτική ίνα με ελεγχόμενη γωνία τις δυο διαθλασμένες δέσμες (-1, +1). Έτσι το μήκος κύματος καθορίζεται από την γωνία θ όπως και στην μέθοδο της συμβαλομετρίας.

2.3.3 Μέθοδος σημείο προς σημείο

Για την δημιουργία FBG με αυτήν την μέθοδο, χρησιμοποιείται ένα παλμικό Laser UV ακριβείας το οποίο εγγράφει απευθείας στην πυρήνα της οπτικής ίνας αλλάζοντας τον δείκτη διάθλασης του πυρήνα. Η αλλαγή αυτή πραγματοποιείται βήμα προς βήμα πάνω στον πυρήνα.

Πρακτικά ένα παλμός Laser UV διέρχεται μέσα από μια μάσκα και αποτυπώνει πάνω στην οπτική ίνα μια τομή όπου φωτίζοντάς το τοπικά μεταβάλλει τον δείκτη διάθλασης του αντίστοιχου τμήματος. Εν συνεχεία η δέσμη Laser μετακινείται με κατεύθυνση παράλληλη με την οπτική ίνα τόσο ώστε να σχηματιστεί η επιδιωκόμενη δομή πλέγματος στην ίνα που καθορίζει και την περίοδο πλέγματος Λ . Η τεχνική αυτή προτιμάται κυρίως όταν θέλουμε να εγγράψουμε πολλούς φραγμούς Bragg σε μια οπτική ίνα.

2.3.4 Έλεγχος της ανακλαστικότητας FBG

Μέχρι τώρα αναλύσαμε ότι καθοριστικοί παράγοντες για την κατασκευή μιας FBG ίνας και τον καθορισμό του μήκους κύματος Bragg είναι η περίοδος πλέγματος Λ που ευθύνεται για την μετατόπιση του μήκους κύματος φράγματος Bragg, το μήκος κύματος του UV Laser που θα εγγράψει τα φράγματα Bragg και στην μέθοδο της συμβαλομετρίας η γωνία θ . Μια άλλη βασική παράμετρος που πρέπει να λάβουμε υπόψιν στην κατασκευή των FBG, είναι και ο βαθμός ανακλαστικότητας. Η ανακλαστικότητα εξαρτάται από την ισχύ της δέσμης Laser UV που δίνεται σε J/m^2 , της ποσότητας πρόσμιξης σε GeO και της ποσότητας διάχυση του υδρογόνου. Το πλάτος της γραμμής ενός λείζερ ή αλλιώς το στενό εύρος ζώνης, είναι το πλήρες πλάτος του οπτικού φάσματος στο μισό μέγιστο (FWHM). Η ποσότητα της UV Laser ακτινοβολίας επηρεάζει το λ_B ως εξής:

$$FWHM = \lambda_B \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{eff}}\right)^2 + \frac{1^2}{N}}, \quad 2.5$$

Όπου $\Delta n = 2 \times \Delta n_{AC}$, όπου το Δn_{AC} είναι η μισή ποσότητα της συνολικής διακύμανσης RI στην FBG. RI ονομάζεται η κατανομή των δεικτών διάθλασης των υλικών μέσα σε μια οπτική ίνα και δίνεται σε μορφή πίνακα που προκύπτει από ένα ημιτονοειδές σχέδιο περίθλασης και περιγράφει την διακύμανση του δείκτη διάθλασης του πυρήνα της ίνας κατά μήκος της ίνας. λ_B είναι το μήκος κύματος Bragg, το s εξαρτάται από το πόσο ισχυρή είναι η ανάκλαση και παίρνει τιμές 1 για ανάκλαση 100% ή 0,5 για ασθενείς ανακλάσεις, ενώ N είναι ο αριθμός των φραγμάτων και δίνεται από τον τύπο μήκος FBG προς περίοδο πλέγματος Λ :

$$N = L_{FBG}/\Lambda, \quad 2.6$$

Έτσι κατά την κατασκευή της FBG θα επιλύσουμε την εξίσωση 2.5 ως προς το λ_B για να δούμε την μετατόπιση του μήκους κύματος FBG που θα προκύψει κατά την κατασκευή του σε σχέση με το επιθυμητό λ_B . Αυτό θα μας δώσει την δυνατότητα να ρυθμίσουμε τα κάτοπτρα αντίστοιχα, ώστε να λάβουμε τελικά το επιθυμητό μήκος κύματος Bragg [18].

2.4 Αντιμετώπιση της Χρωματικής Διασποράς με χρήση FBG

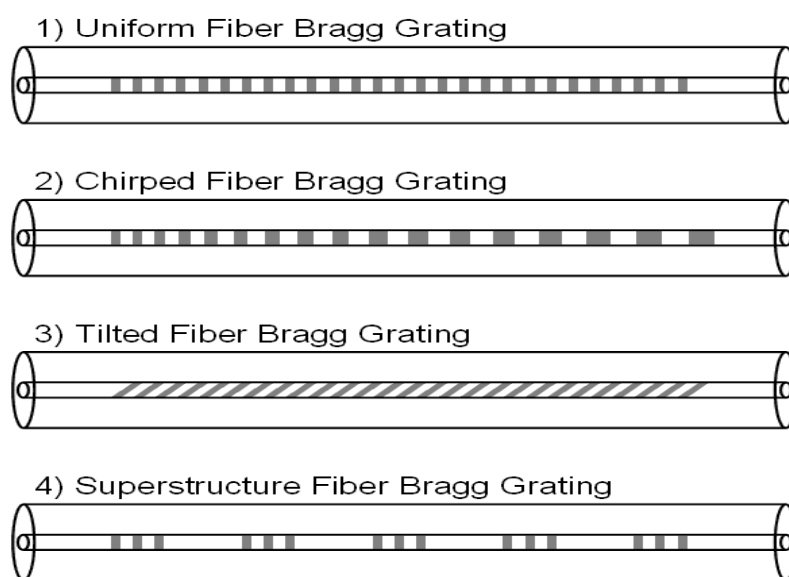
Καθώς η οπτική δέσμη διατρέχει την οπτική ίνα, λόγω των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών, του σχεδιασμού της ίνας και της απόστασης που έχει να διανύσει, η οπτική δέσμη υπόκειται σε διασπορά. Μια συνήθης οπτική ίνα έχει τιμή διασποράς από 15–20 ps/nm/km και αυξάνεται σε μεγάλες αποστάσεις ειδικά όταν υπάρχουν υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης. Με σκοπό την αντιμετώπιση του προβλήματος που προκαλεί η διασπορά σε μια ίνα, αναζητήθηκαν λύσεις, όπως η ενσωμάτωση - σχεδιασμός ινών χαμηλής διασποράς, τις ίνες αντιστάθμισης ή αλλιώς μετατοπισμένες ίνες, την ψηφιακή

αναγέννηση του σήματος και τέλος τη χρήση FBG. Για την αντιστάθμιση της διασποράς οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι η ίνα αντιστάθμισης διασποράς (DCF) και το FBG. Η χρήση της ίνα αντιστάθμισης διασποράς (DCF) για συστήματα οπτικών επικοινωνιών, ειδικά μεγάλων αποστάσεων αποφεύγεται καθώς παρουσιάζει μη γραμμικά αποτελέσματα. Έτσι για την υλοποίηση σύγχρονων μορφών οπτικών επικοινωνιών έχει επικρατήσει η χρήση FBG για την αντιστάθμιση της διασποράς.

2.4.1 Μηχανισμός FBG - CFBG

Για την αντιμετώπιση της διασποράς χρησιμοποιούνται φράγματα Bragg, στα οποία το διάστημα μεταξύ των φραγμάτων δηλαδή η τιμή Λ της περιόδου του φράγματος δεν είναι σταθερά. Αυτό το είδος φράγματος Bragg ονομάζεται Chirped Fiber Bragg Grating. Γενικά όπως είδαμε και στο κεφάλαιο που περιγράφεται η κατασκευή των φραγμάτων Bragg, μπορούν να κατασκευαστούν διαφορετικά φράγματα Bragg αλλάζοντας την περίοδο Λ του φράγματος. Έτσι τα βασικότερα είδη φραγμάτων Bragg ξεχωρίζουν ως εξής:

- Το κάθε κάτοπτρο διαμορφωμένου δείκτη διάθλασης, κάθετο προς τον πυρήνα της ίνας και με σταθερή την απόσταση μεταξύ τους Λ , Uniform Bragg grating
- Το κάθε κάτοπτρο διαμορφωμένου δείκτη διάθλασης, κάθετο προς τον πυρήνα της ίνας και με μεταβαλλόμενη περίοδο Λ , δηλαδή την μεταξύ τους απόσταση Chirped Bragg grating
- Το κάθε κάτοπτρο διαμορφωμένου δείκτη διάθλασης, υπό γωνία μικρότερη των 90° προς τον πυρήνα της ίνας και με σταθερή την απόσταση μεταξύ τους Λ , Tilted Bragg grating
- Το κάθε κάτοπτρο διαμορφωμένου δείκτη διάθλασης, κάθετο προς τον πυρήνα της ίνας και με ομαδοποιημένη, περιοδική τοποθέτησή του στον πυρήνα. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι ανακλά προς την πηγή ένα σύνολο συγκεκριμένων μηκών κύματος. Superstructure Bragg grating.



Εικόνα 12 Απεικόνιση ειδών Φραγμάτων Bragg.

Στην περίπτωση της αντιμετώπισης της διασποράς γίνεται χρήση CFBG καθώς δημιουργείται μια γραμμική απόκλιση στην περίοδο του φράγματος που ονομάζεται $chirp$. Έτσι το μήκος κύματος που ανακλάται, αλλάζει με την περίοδο του φράγματος Bragg και έτσι το αποτέλεσμα είναι να πλαταίνει το ανακλώμενο φάσμα. Με τον μηχανισμό αυτό προσθέτει διασπορά αφού τα διαφορετικά ανακλώμενα μήκη κύματος από το φράγμα υπόκεινται σε διαφορετικές καθυστερήσεις και αυτό συμβαίνει διότι αποκτούν διαφορετικές ταχύτητες, λόγω διαφορετικού δείκτη διάθλασης εξαιτίας διαφορετικού Λ . Αυτό στο τέλος δίνει την δυνατότητα να υπολογιστεί η καθυστέρηση και να αντισταθμιστεί. Σύμφωνα με τη θεωρία των CFBG, η διασπορά εν τέλη μπορεί να αντισταθμιστεί αυξάνοντας τον αριθμό της αλληλουχίας των ενδιάμεσων κατόπτρων του φράγματος Bragg. Επομένως, διαφορετικά ανακλώμενα μήκη κύματος από διαφορετικό τμήμα πλέγματος καθυστερούν κατά διαφορετικό χρόνο για κάθε μήκος κύματος.

Γενικά μπορούμε να έχουμε είτε αρνητική διασπορά, είτε θετική διασπορά. Με μήκος κύματος λειτουργίας τα 1550nm έχουμε αρνητική διασπορά. Έτσι η CFBG λόγω της αρχιτεκτονικής της, που έχει μεταβαλλόμενη περίοδο Λ στα κάτοπτρα της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εισάγει καθυστέρηση σε μικρότερα μήκη κύματος σε σχέση με μεγαλύτερα μήκη κύματος ακολουθώντας τον κανόνα $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \lambda_4 \dots$. Η διασπορά του CFBG δίνεται από τον τύπο:

$$D_g = 2 \frac{n}{c \Delta \lambda chirp}, \quad 2.7$$

Υπάρχει μια σχέση που συνδέει όλες τις ανακλώμενες δέσμες στο σύνολό τους. Το εύρος όλων των ανακλώμενων δεσμών μήκους κύματος $\Delta \lambda_{chirp}$ δίνεται [22]:

$$\Delta \lambda_{chirp} = 2n_{eff} \cdot (\Lambda_{long} - \Lambda_{short}), \quad 2.8$$

Όπου Λ_{long} είναι το μεγαλύτερο μήκος κύματος ενώ το Λ_{short} είναι το μικρότερο μήκος κύματος αντίστοιχα.

Για κάθε μήκος κύματος του CFBG μπορεί να υπολογιστεί μια χρονική καθυστέρηση $\tau(\lambda)$. Η χρονική καθυστέρηση $\tau(\lambda)$ των CFBGs είναι συνάρτηση του μήκους κύματος:

$$\tau(\lambda) = (\lambda_B - \lambda) \frac{2n_{eff}}{\Delta \lambda c} \cdot L_g, \quad 2.9$$

L_g το μήκος της CFBG και c η ταχύτητα του φωτός.

Μια γενικότερη έκφραση της χρονικής καθυστέρησης $\tau(\lambda)$ μπορούμε να έχουμε, εκμεταλλευόμενοι τα Λ_{long} και Λ_{short} από την σχέση [23]:

$$\tau(\lambda) = \frac{(\Lambda_{Board} - \Lambda_B)}{(\Lambda_{long} - \Lambda_{short})} \cdot \frac{2n_{eff} L_g}{c}, \quad 2.10$$

Λ_{Board} το μήκος κύματος παλμού εισόδου, Λ_B είναι το μήκος κύματος Bragg όπου δίνεται από την σχέση $\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$ και ισχύει $\Lambda_{long} \leq \lambda \leq \Lambda_{short}$.

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG

Μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε την διασπορά του CFBG από τον μαθηματικό τύπο [24]:

$$D(\lambda) = \frac{d\tau(\lambda)}{d(\lambda)} = \frac{1}{(\Lambda_{long} - \Lambda_{short})} \cdot \frac{2n_{eff} Lg}{c}, \quad 2.11$$

Συμπερασματικά με την τεχνική αντιστάθμιση της διασποράς με χρήση CFBG λειτουργεί ένας μηχανισμός ο οποίος εισάγει μεγαλύτερη καθυστέρηση σε γρήγορα κινούμενα μήκη κύματος και μικρότερη καθυστέρηση σε αργά κινούμενα μήκη κύματος και έτσι στο τέλος εμφανίζονται στον δέκτη στην ίδια χρονική θέση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. Προσομοίωση – Αντιστάθμιση χρωματικής διασποράς με χρήση CFBG

Καθώς η τεχνολογία των οπτικών ινών διαφαίνονταν ότι θα κυριαρχήσει στον τομέα των επικοινωνιών και της τεχνολογίας αναδείχθηκε η ανάγκη χρήσης Η/Υ για να μπορέσουν οι μηχανικοί να προσομοιάσουν τα μοντέλα των οπτικών ινών, πριν αυτά τεθούν σε εφαρμογή. Για τον λόγο αυτό αρκετές εταιρίες δραστηριοποιήθηκαν στον τομέα αυτό με την Optiwave Systems Inc. να ξεχωρίζει. Έτσι η εταιρία αυτή με έδρα στον Καναδά από το 1994 προσφέρει προγράμματα προσομοίωσης σε μηχανικούς και εταιρίες προς τον σκοπό αυτόν. Ένα από αυτά είναι το Optisystem.

Το OptiSystem είναι ένα εργαλείο λογισμικού που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την προσομοίωση συστημάτων οπτικών επικοινωνιών. Είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την προσομοίωση διαφορετικών συστημάτων οπτικής επικοινωνίας, όπως η επικοινωνία οπτικών ινών και τα συστήματα πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM). Με το OptiSystem, οι χρήστες μπορούν να σχεδιάσουν και να προσομοιώσουν διαφορετικά στοιχεία ενός συστήματος οπτικής επικοινωνίας, όπως καλώδια οπτικών ινών, οπτικούς ενισχυτές, οπτικά φίλτρα και οπτικούς διαμορφωτές, μεταξύ άλλων. Το λογισμικό μπορεί επίσης να προσομοιώσει εφέ οπτικής διάδοσης όπως διασπορά, εξασθένιση και μη γραμμικά εφέ. Συνολικά, το OptiSystem είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για μηχανικούς και ερευνητές που εργάζονται στον τομέα της οπτικής επικοινωνίας.

Με την χρήση αυτού του προγράμματος μπορούμε να υλοποιήσουμε οποιοδήποτε μοντέλο οπτικών επικοινωνιών θέλουμε και να παρέμβουμε ενδιάμεσως με αισθητήρες, μετρικά όργανα καθώς και να ενσωματώσουμε τροποποιήσεις στην υφιστάμενη υλοποίηση, αλλάζοντας τις τιμές, το μήκος των οπτικών ινών καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Υπάρχει πληθώρα στοιχείων στις βιβλιοθήκες του προγράμματος και έτσι μπορούμε να υλοποιήσουμε και να μετρήσουμε με πολύ μεγάλη ακρίβεια οποιοδήποτε σύστημα οπτικών επικοινωνιών με συνέπεια την εξοικονόμηση ακριβού εργαστηριακού εξοπλισμού και φυσικά χρόνου υλοποίησης. Τέλος η απουσία χρήσης προγραμματιστικού κώδικα, όπως συνηθίζεται στις περισσότερες εφαρμογές, κάνει την χρήση του ακόμα πιο φιλική και εύκολη καθώς το πρόγραμμα αρκείται στην χρήση έτοιμων εικονιδίων και τέλος την διασύνδεσή τους.

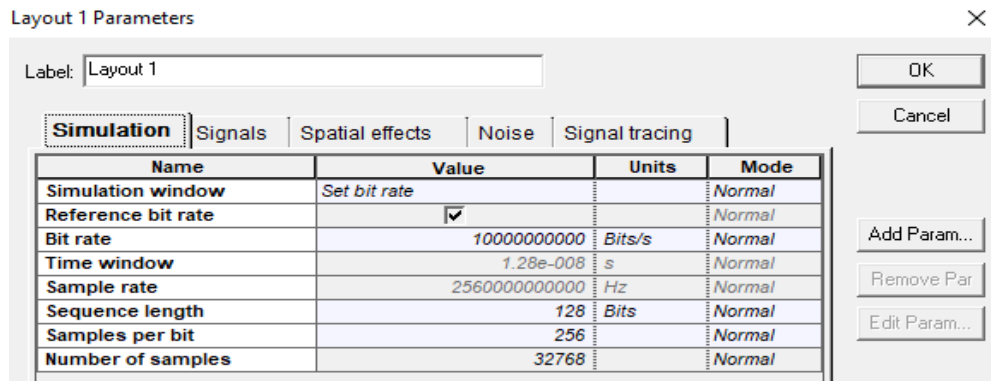
3.1 Παραγωγή μοντέλου αντιστάθμιση χρωματικής διασποράς με χρήση CFBG

Για υλοποίηση της προσομοίωσης θα χρειαστεί να δομήσουμε ένα σύστημα οπτικών επικοινωνιών το οποίο θα αποτελείται βασικά από τον πομπό, την οπτική ίνα, την CFBG ίνα για την αντιμετώπιση της διασποράς και τέλος τον δέκτη. Πάνω σε αυτή την διάταξη θα εργαστούμε προσαρμόζοντας κατάλληλα όργανα για τις μετρήσεις και την ορθή παραμετροποίησή του, ώστε στο τέλος να λάβουμε το εκπεμπόμενο σήμα

χωρίς κανένα σφάλμα. Η παραπάνω διάταξη αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα.

3.2.1 Πομπός

Ο Πομπός του συστήματός μας θα αποτελείται από τέσσερα στοιχεία, την γεννήτρια ψευδο-τυχαίας ακολουθίας δυαδικών ψηφίων συνδεδεμένη με μία γεννήτρια παλμών NRZ στην συνέχεια της οποίας θα βρίσκεται μια διάταξη ενός διαμορφωτής Mach-Zehnder του οποίου το φέρον οπτικό σήμα θα δίνεται από ένα λέιζερ συνεχούς κύματος. Τέλος το τελικό οπτικό σήμα θα κατευθύνεται στην οπτική ίνα όπου αποτελεί και τον κυματοδηγό μας. Για την σωστή παραγωγή και εκπομπή της μεταδιδόμενης πληροφορίας, πρέπει να εισάγουμε τις βασικές παραμέτρους στο πρόγραμμα, όπως φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 13 Βασικές παράμετροι του προγράμματος.

3.2.2 Γεννήτρια ψευδο-τυχαίας ακολουθίας δυαδικών ψηφίων (PRBS)

Η γεννήτρια ψευδο-τυχαίας ακολουθίας δυαδικών ψηφίων 0 και 1 “Pseudo-Random Bit Sequence Generator” (PRBS) είναι ένας μαθηματικός αλγόριθμος ή ένα κύκλωμα που δημιουργεί μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων που εμφανίζονται τυχαία αλλά στην πραγματικότητα είναι ντετερμινιστικά. Οι γεννήτριες PRBS χρησιμοποιούνται ευρέως σε ψηφιακές επικοινωνίες και συστήματα αποθήκευσης δεδομένων για διάφορους σκοπούς, όπως η δοκιμή της απόδοσης των καναλιών επικοινωνίας, η επαλήθευση της λειτουργικότητας των συσκευών αποθήκευσης δεδομένων και η δημιουργία κλειδιών κρυπτογράφησης [19]. Μια γεννήτρια PRBS ξεκινά τυπικά με μια αρχική τιμή και δημιουργεί μια ακολουθία bits βασισμένη σε έναν προκαθορισμένο αλγόριθμο. Η παραγόμενη ακολουθία δυαδικών ψηφίων έχει στατιστικά τυχαία εμφάνιση. Οι γεννήτριες PRBS χρησιμοποιούνται συχνά σε ζεύγη, με τη μία γεννήτρια στο άκρο εκπομπής και την άλλη στο άκρο λήψης, για τη δοκιμή της απόδοσης ενός καναλιού επικοινωνίας. Οι γεννήτριες PRBS συνήθως μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας μαθηματικούς αλγόριθμους ή πίνακες αναζήτησης. Διαφορετικοί αλγόριθμοι PRBS παράγουν ακολουθίες διαφορετικών μηκών και στατιστικών ιδιοτήτων

και η επιλογή του αλγορίθμου εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά απόδοσης [20].

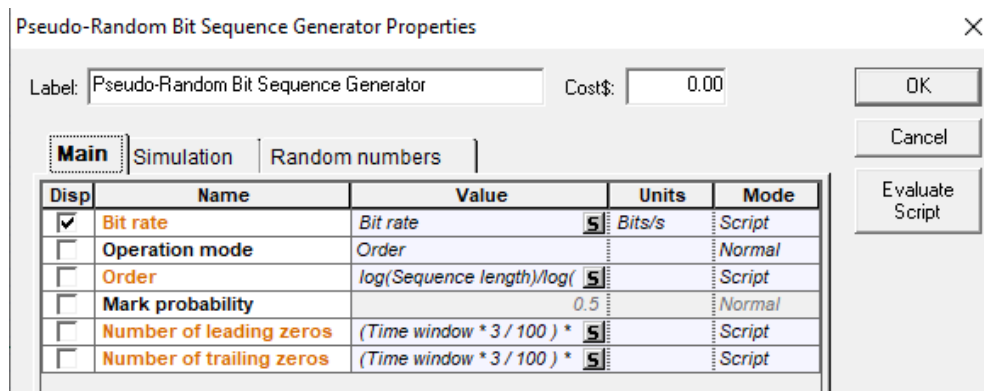
Βασικές ρυθμίσεις μιας γεννήτριας PRBS είναι:

Επιλέγουμε το μήκος της ακολουθίας που καθορίζει τον αριθμό των bit στην ακολουθία πριν αυτή επαναληφθεί. Το μήκος μπορεί να είναι 2^{n-1} , όπου n είναι ένας ακέραιος αριθμός από το 2 έως το 31.

Επιλέγουμε ένα πολυώνυμο ανάδρασης το οποίο καθορίζει τη δημιουργία της ακολουθίας PRBS αφού η τιμή του πολυωνύμου υπολογίζεται από προηγούμενες τιμές του πολυωνύμου. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή του πολυωνύμου σε ένα σημείο εξαρτάται από τις τιμές του πολυωνύμου σε προηγούμενα σημεία. Διαφορετικά πολυώνυμα ανάδρασης παράγουν διαφορετικές αλληλουχίες PRBS. Το πολυώνυμο εκφράζεται συνήθως με δεκαεξαδικό συμβολισμό και μπορεί να οριστεί από την σχέση:

$$f(n) = 2f(n - 1) + 3f(n - 2), \quad (3.1)$$

Αρχικοποίηση του καταχωρητή shift (register shift). Ο καταχωρητής shift είναι ένα είδος καταχωρητή μετατόπισης στον οποίο οι τιμές των bit των καταχωρητών μετακινούνται κατά έναν ορισμένο αριθμό θέσεων (shift distance) προς τα αριστερά ή προς τα δεξιά και αρχικοποιείται με μη μηδενική τιμή. Μια κοινή τιμή αρχικοποίησης είναι όλα τα 1 ή όλα τα 0.

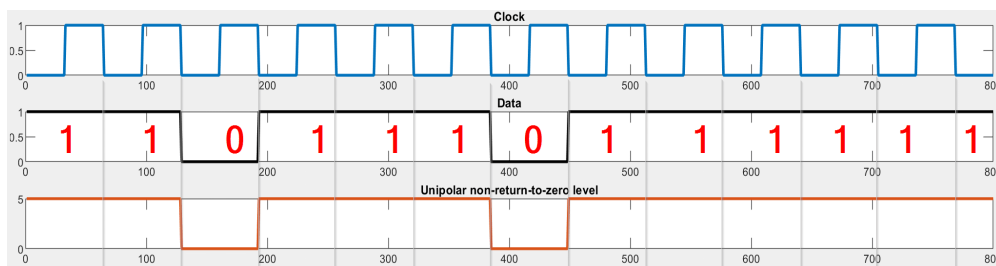


Εικόνα 14 Βασικές ρυθμίσεις μιας γεννήτριας PRBS.

3.2.3 Γεννήτρια παλμών NRZ (Non-Return-to-Zero)

Η γεννήτρια παλμών NRZ (Non-Return-to-Zero) είναι μια συσκευή που παράγει ψηφιακούς παλμούς με τη μορφή δυαδικού σήματος, όπου το πλάτος του παλμού είναι σταθερό για καθορισμένη χρονική διάρκεια. Ο όρος "non-return-to-zero" αναφέρεται στο γεγονός ότι το σήμα δεν επιστρέφει στο μηδέν μεταξύ διαδοχικών παλμών. Οι γεννήτριες παλμών NRZ χρησιμοποιούνται σε συστήματα ψηφιακών επικοινωνιών για την κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση ψηφιακών δεδομένων. Χρησιμοποιούνται επίσης στην επεξεργασία ψηφιακών σημάτων, στη διαμόρφωση παλμών και σε άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται σταθερή, και καλά καθορισμένη κυματομορφή παλμού. Η γεννήτρια παλμών NRZ παράγει

μια ψηφιακή κυματομορφή με σταθερό πλάτος που αντιπροσωπεύει μια δυαδική τιμή είτε 0 είτε 1, όπου στην περίπτωση μας η τιμή καθορίζεται από την γεννήτρια ψευδο-τυχαίας ακολουθίας που περιγράψαμε. Το πλάτος παλμού και ο χρόνος των παλμών καθορίζονται από τη ροή δεδομένων εισόδου. Η γεννήτρια μπορεί να σχεδιαστεί για να παράγει ποικίλα σχήματα και πλάτη παλμών, ανάλογα με την εφαρμογή. Συνολικά, μια γεννήτρια παλμών NRZ είναι ένα ουσιαστικό στοιχείο στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας, όπου διαδραματίζει βασικό ρόλο στη διασφάλιση της ακρίβειας και της ακεραιότητας της ψηφιακής μετάδοσης δεδομένων. Στην παρακάτω εικόνα 19 μπορούμε να κατανοήσουμε σαφέστερα έναν παλμό NRZ (Non-Return-to-Zero) πώς διαμορφώνεται ανάλογα με την εισερχόμενη πληροφορία Bit [21], [9].



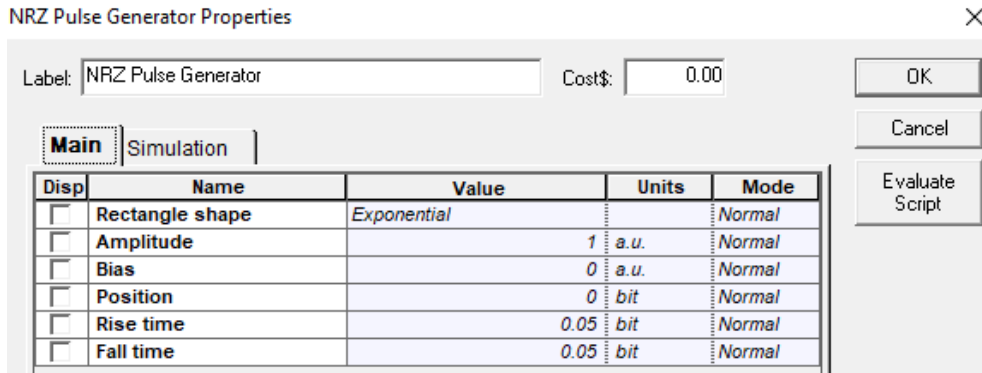
Σχήμα 7 Διαμόρφωση παλμού NRZ ανάλογα με την εισερχόμενη πληροφορία.

Για να ρυθμιστεί η γεννήτρια παλμών NRZ απαιτεί τις εξής βασικές παραμέτρους. Να καθοριστεί το πλάτος του παλμού, να οριστεί ο ρυθμός δειγματοληψίας, ο οποίος πρέπει να είναι αρκετά υψηλός λόγω του ότι έχουμε υψηλές συχνότητες και θέλουμε ακριβή πιστότητα στην ανακατασκευή του ψηφιακού σήματος και να επιλέξουμε το «σχήμα του ορθογωνίου» του παλμού. Γενικά ένας ορθογώνιος παλμός είναι μια κυματομορφή που έχει ένα επίπεδο, σταθερό πλάτος σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα, και ακολουθεί μια απότομη μετάβαση στο μηδενικό πλάτος. Η ορθογώνια συνάρτηση του ορθογώνιου παλμού ορίζεται ως:

$$rec\left(\frac{t}{T}\right) = 1, \text{ για } |t| < T/2, \quad (3.2)$$

$$rec\left(\frac{t}{T}\right) = 0, \text{ για } |t| < T/2, \quad (3.3)$$

όπου $rec\left(\frac{t}{T}\right)$ είναι η ορθογώνια συνάρτηση, t είναι ο χρόνος και T είναι το πλάτος του παλμού. Η ορθογώνια συνάρτηση έχει τιμή 1 για τιμές t μεταξύ $-T/2$ και $T/2$, και τιμή 0 αλλού. Για τον ορισμό τιμών του ορθογώνιου σχήματος παλμού θα χρησιμοποιήσουμε εκθετική συνάρτηση (Exponential). Εκθετική συνάρτηση είναι μια μαθηματική συνάρτηση που έχει τη μορφή $f(x) = a^x$, όπου το "α" είναι μια σταθερά και το "x" η μεταβλητή. Γενικά οι εκθετικές συναρτήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση διαφόρων σημάτων που αυξάνονται ή μειώνονται γρήγορα με την πάροδο του χρόνου.



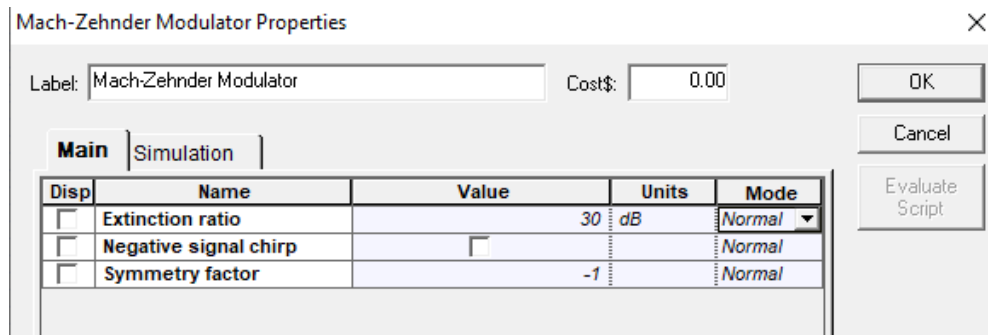
Εικόνα 15 Βασικές ρυθμίσεις γεννήτριας παλμών NRZ.

3.2.4 Διαμορφωτής Mach-Zehnder

Το συμβολόμετρο ή διαμορφωτής Mach-Zehnder έχει αναπτυχθεί αρκετά στο κεφάλαιο 1.6.1 . Ωστόσο υπενθυμίζουμε ότι πήρε το όνομά του από τους εφευρέτες του, Ludwig Mach και Ludwig Zehnder, οι οποίοι περιέγραψαν για πρώτη φορά τη συσκευή στα τέλη του 1800. Έκτοτε έχει γίνει ένα βασικό εργαλείο στον τομέα των οπτικών επικοινωνιών. Είναι μια οπτική συσκευή που χρησιμοποιείται σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών για τη διαμόρφωση (δηλαδή, τη μεταβολή) του πλάτους, της φάσης ή της πόλωσης μιας δέσμης λέιζερ για την κωδικοποίηση ψηφιακών πληροφοριών σε ένα οπτικό σήμα φορέα. Ο διαμορφωτής αποτελείται από δύο “διαδρομές” οπτικών ινών με έναν διαχωριστή δέσμης στην είσοδο και έναν συνδυαστή δέσμης στην έξοδο. Όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό σήμα σε έναν από τους βραχίονες του διαμορφωτή Mach-Zehnder, μεταβάλλει τον δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού, με αποτέλεσμα τα κύματα φωτός που διέρχονται από αυτόν τον βραχίονα να υποστούν μια μετατόπιση φάσης σε σχέση με τα κύματα που διέρχονται από τον άλλο βραχίονα. Η προκύπτουσα παρεμβολή μεταξύ των δύο κυμάτων στην έξοδο κάνει την ένταση του φωτός εξόδου να ποικίλλει ανάλογα με το ηλεκτρικό σήμα. Οι διαμορφωτές Mach-Zehnder χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών για μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετατροπή ηλεκτρικών σημάτων σε οπτικά σήματα και αντίστροφα. Χρησιμοποιούνται επίσης σε διάφορες άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της οπτικής μεταγωγής, της ανίχνευσης και της μέτρησης [15], [22].

Υπάρχουν κάποιες παράμετροι που καθορίζουν την λειτουργία του διαμορφωτή Mach-Zehnder. Μια βασική είναι ο λόγος απόσβεσης «extinction ratio» και αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης στάθμης ισχύος εξόδου του διαμορφωτή και είναι ένα μέτρο της ποιότητας της διαμόρφωσης. Ο λόγος απόσβεσης είναι μια σημαντική παράμετρος γιατί επηρεάζει την απόδοση του συστήματος οπτικής επικοινωνίας. Έτσι ένας χαμηλός λόγος εξάλειψης μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στα

μεταδιδόμενα δεδομένα και να μειώσει τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος. Έτσι ορίζουμε τα 30db που είναι πολύ ψηλός λόγος απόδοσης και δεν θα οδηγήσει σε σφάλματα.

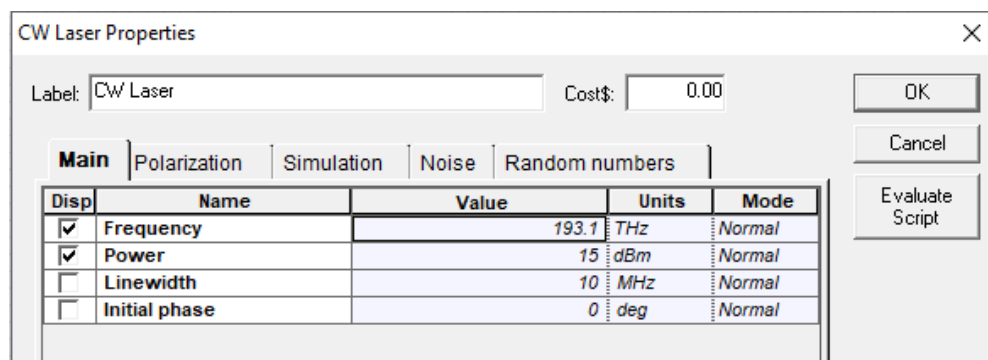


Εικόνα 16 Βασικές ρυθμίσεις διαμορφωτή Mach-Zehnder.

3.2.5 Laser CW (συνεχούς κύματος)

Το λέιζερ συνεχούς κύματος (CW) είναι ένας τύπος λέιζερ που εκπέμπει συνεχή έξοδο φωτός με σταθερή ένταση και μήκος κύματος. Τα Laser αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως στις τηλεπικοινωνίες, την επεξεργασία υλικών, τις ιατρικές διαδικασίες, την επιστημονική έρευνα και άλλα. Τα Laser συνεχούς κύματος μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα εύρος μηκών κύματος, ανάλογα με τον τύπο του Laser και την εφαρμογή. Μερικοί συνήθεις τύποι Laser συνεχούς κύματος περιλαμβάνουν Laser δίοδου, Laser ηλίου-νέον και Laser ιόντων αργού.

Κάποιες παράμετροι που μπορούμε να ρυθμίσουμε για το λέιζερ CW, είναι το κεντρικό μήκος κύματος, η ισχύ εξόδου, το φασματικό πλάτος και η μορφή διαμόρφωσης. Μπορούμε επίσης να επιλέξουμε τον τύπο λέιζερ. Για την προσομοίωση μας το κεντρικό μήκος κύματος είναι 193.1 THz ή 1553nm και ισχύεις 15 dBm.



Εικόνα 17 Βασικές ρυθμίσεις λέιζερ συνεχούς κύματος (CW).

3.3 Οπτική ίνα (Optical Fiber)

Οι οπτικές ίνες στο OptiSystem έχουν προκαθορισμένες τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους με βάση τις πραγματικές οπτικές ίνες. Έτσι επιλέγουμε από μια σειρά προκαθορισμένων μοντέλων οπτικών ινών. Αυτό που καθορίζουμε είναι το μήκος της που στην περίπτωση μας θα είναι 100Km. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά είναι τα ίδια με τις πραγματικές συνθήκες. Προσέχουμε το μήκος κύματος αναφοράς (reference wavelength) της οπτικής ίνας να είναι στο μήκος κύματος όπου η διασπορά της ίνας να είναι μηδέν. Θυμίζουμε ότι το μήκος κύματος αναφοράς είναι το μήκος κύματος στο οποίο η ομαδική ταχύτητα του οπτικού σήματος είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα ή το μήκος κύματός του και εξαρτάται από το προφίλ του δείκτη διάθλασης και τα χαρακτηριστικά διασποράς τους. Για μια τυπική οπτική ίνα απλής λειτουργίας (SMF) το μήκος κύματος αναφοράς είναι περίπου 1550nm. Στις ρυθμίσεις της οπτικής ίνας βάζουμε τιμή κύματος αναφοράς το μήκος κύματος του φέροντος δηλαδή 193.1 THz ή αλλιώς 1552.52nm. Η εξασθένηση είναι 0.2 dB/km.

Optical Fiber Properties

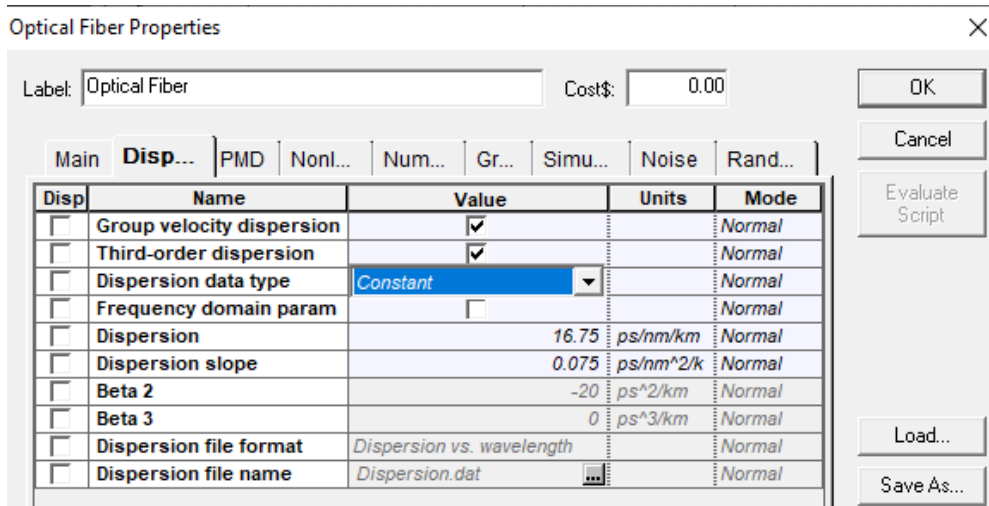
Label: Cost\$:

Main | Disp... | PMD | Nonl... | Num... | Gr... | Simu... | Noise | Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	User defined reference w	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Reference wavelength	193.1	THz	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	100	km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation	0.2	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat	...	Normal

Εικόνα 18 Βασικές ρυθμίσεις παραμέτρων οπτικών ινών στο OptiSystem

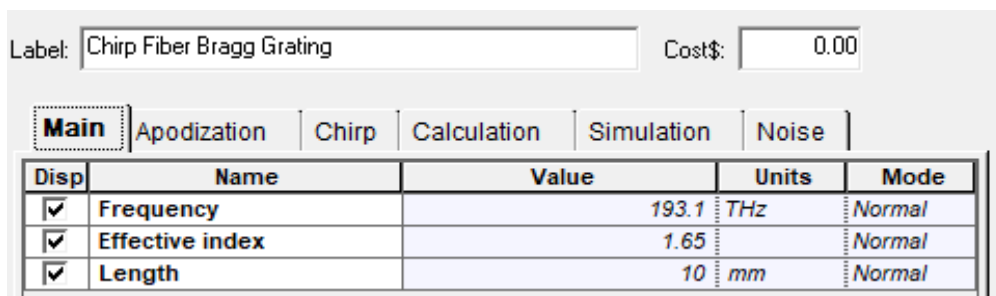
Η χρωματική διασπορά αντίστοιχα θα είναι 16.75 ps/nm/km ενώ η κλίση της διασποράς ορίζεται στα 0.075 ps/nm²/km. Η κλίση διασποράς είναι μια παράμετρος που χαρακτηρίζει τη χρωματική διασπορά μιας οπτικής ίνας σε ένα εύρος μηκών κύματος. Η κλίση διασποράς ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής της χρωματικής διασποράς σε σχέση με το μήκος κύματος. Μετρά δηλαδή πόσο αλλάζει η χρωματική διασπορά καθώς αλλάζει το μήκος κύματος του φωτός. Η κλίση διασποράς είναι σημαντική για συστήματα μετάδοσης υψηλής ταχύτητας που απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης και χαμηλή παραμόρφωση. Έτσι βελτιστοποιούμε την απόδοση του συστήματος ελαχιστοποιώντας τη διεύρυνση και την παραμόρφωση του παλμού και μεγιστοποιώντας την ικανότητα μετάδοσης δεδομένων.



Εικόνα 19 Βασικές ρυθμίσεις παραμέτρων διασποράς οπτικών ινών στο OptiSystem.

3.4 CFBG (Chirped Fiber Bragg Grating)

Στο κεφάλαιο 2.4 έχει γίνει εκτενή αναφορά στον τρόπο λειτουργίας της CFBG και πώς αυτή συμβάλει στην αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς. Στο σημείο αυτό πρέπει να ρυθμιστεί σωστά η CFBG ώστε να μπορέσουμε να αντιμετωπίσουμε την χρωματική διασπορά που εισάχθηκε λόγω του κυματοδηγού(οπτική ίνα) μήκους 100km. Στο σημείο αυτό θα πάμε βήμα βήμα σε όλους τις παραμέτρους του CFBG ώστε να καταχωρήσουμε τις σωστές τιμές και να εξάγουμε ορθά αποτελέσματα. Ξεκινώντας από τις ιδιότητες της CFBG στην πρώτη κάρτα «main» βλέπουμε:



Εικόνα 20 Βασικές ρυθμίσεις παραμέτρων CFBG ινών στο OptiSystem

Υπάρχουν οι επιλογές Frequency, Effective index, Length.

3.4.1 Frequency in CFBG

Η κεντρική συχνότητα ή κεντρικό μήκος κύματος της ζώνης ανάκλασης πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο με την συχνότητα του φέροντος. Θυμίζουμε ότι το κεντρικό μήκος κύματος της ζώνης ανάκλασης ενός CFBG προσδιορίζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του πλέγματος, όπως η

περιοδικότητά του και ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα της ίνας και των υλικών επένδυσης. Το εύρος ζώνης της ζώνης ανάκλασης μπορεί να ελεγχθεί από τον ρυθμό chirp. Έτσι Frequency = 193.1THz.

3.4.2 Effective index in CFBG

Στο πεδίο "Effective index", μπορούμε να ορίσουμε το προφίλ ενεργού δείκτη καθορίζοντας τις τιμές του δείκτη διάθλασης σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος του μήκους του πλέγματος. Το Effective index ή «αποτελεσματικός δείκτης» είναι μια σημαντική παράμετρος στα CFBG, καθώς καθορίζει το μήκος κύματος συντονισμού του πλέγματος $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ όπου n_{eff} είναι ο μέσος «ενεργός» δείκτης διάθλασης του πυρήνα της CFBG. Είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος των δεικτών διάθλασης του στρώματος του πυρήνα n_{core} και του στρώματος της επένδυσης $n_{cladding}$ και εξαρτάται από τις διαστάσεις και τη σύνθεση της ίνας όπως επίσης και από την περίοδο, τον ρυθμό chirp και το μήκος του πλέγματος. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται αναλυτικές ή αριθμητικές μέθοδοι, όπως η θεωρία του συζευγμένου τρόπου ή η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Τέλος να θυμίσουμε όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.7 από τον ενεργό δείκτη διάθλασης εξαρτάται και η χρονική καθυστέρηση $\tau(\lambda)$ των CFBGs που είναι συνάρτηση του μήκους κύματος, εξίσωση (2.9). Σε κάθε περίπτωση μπορούμε να καθορίσουμε την τιμή του κάνοντας πειραματικές μετρήσεις για να προσδιορίσουμε τον αποτελεσματικό δείκτη ενός CFBG. Έτσι πειραματικά παρατηρώντας το Max. Q Factor, πετυχαίνουμε τον αποτελεσματικότερο δείκτη, μεγιστοποιώντας το Max. Q Factor.

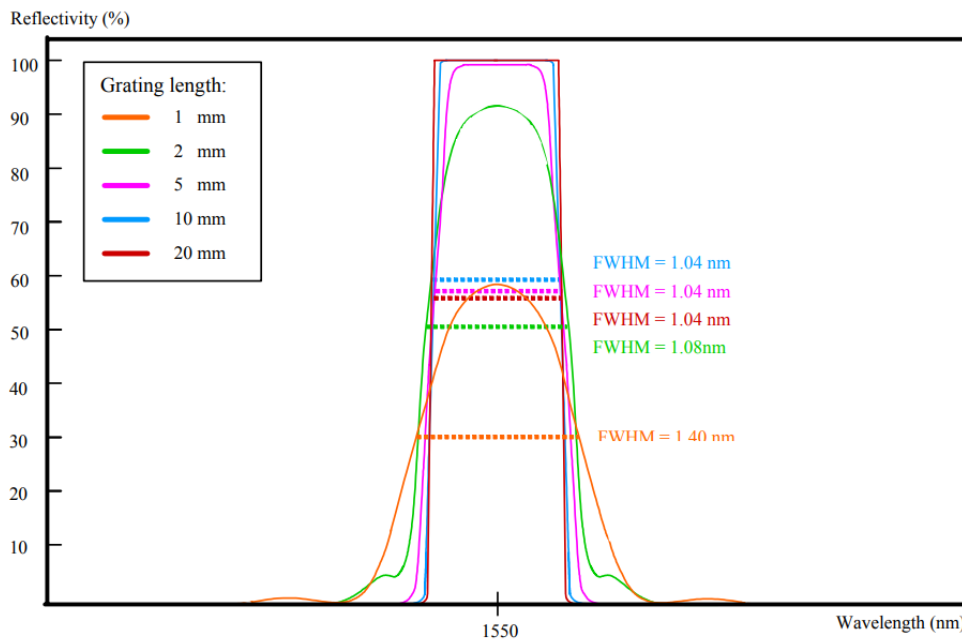
Εδώ μια σύντομη αναφορά υπενθύμισης σχετικά με το Max. Q Factor, θα διευκόλυνε την ακριβή αιτιολόγηση της επιλογής τιμής Effective index. Ο παράγοντας Q είναι το μέτρο της ποιότητας του λαμβανόμενου οπτικού σήματος δηλαδή ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου όπου χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης του ρυθμού σφάλματος bit (BER) του συστήματος. Ο υψηλότερος παράγοντας Q υποδηλώνει καλύτερη ποιότητα σήματος και χαμηλότερο ποσοστό σφάλματος BER.

Όπως περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.6.2 παρατηρήσαμε ότι όσο αυξάνουμε την τιμή του δείκτη διάθλασης της CFBG έχουμε αποτελεσματικότερο Q κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς πλησιάζουμε σε ολική ανάκλαση του οπτικού παλμού. Ωστόσο στην πράξη δεν μπορεί να επιτευχθεί τόσο μεγάλη τιμή και έτσι παίρνουμε μια τιμή για Effective index, 1.47 που είναι πρακτικά υλοποιήσιμο.

3.4.3 Length

Το μήκος της CFBG είναι καθοριστικός παράγοντας για την τιμή της χρονικής καθυστέρησης $\tau(\lambda)$ που θα εισαχθεί σε κάθε μήκος κύματος του CFBG. Ωστόσο είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψιν ότι η διεύρυνση του εύρους ζώνης θα μειώσει σημαντικά την απόδοση του WDM. Για τον λόγο αυτό χρειαζόμαστε ένα στενό – σταθερό εύρος ζώνης. Έχει αποδειχθεί

θεωρητικά και πειραματικά ότι για κεντρικό μήκος κύματος 1550nm το εύρος ζώνης μετρούμενο στο 50% της ανακλαστικότητας (στο μήκος κύματος Bragg, καθώς τα μήκη κύματος εκτός του κεντρικού μήκους κύματος Bragg μεταδίδονται κανονικά και δεν τα εξετάζουμε) έχουμε διεύρυνση του εύρους ζώνης για μικρότερα μήκη ίνας CFBG, ενώ πάνω από τα 10mm το εύρος ζώνης παραμένει σταθερό [23]. Για τον λόγο αυτό το μήκος της CFBG θα είναι 10mm και θα παραμετροποιήσουμε τις λοιπές παραμέτρους ώστε να πετύχουμε την αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς.



Σχήμα 8 Αποτύπωση μεταβολής εύρους ζώνης σε σχέση με το μήκος της CFBG.

3.4.4 Apodization in CFBG

Με τον όρο grading με βαρύτητες (apodization) σε μια ίνα FBG, αναφερόμαστε στη μεταβολή της διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης κατά το μήκος (z) του πλέγματος (grading). Οι τεχνικές apodization χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση της φασματικής απόκρισης και την τροποποίηση του προφίλ ανακλαστικότητας του FBG. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για:

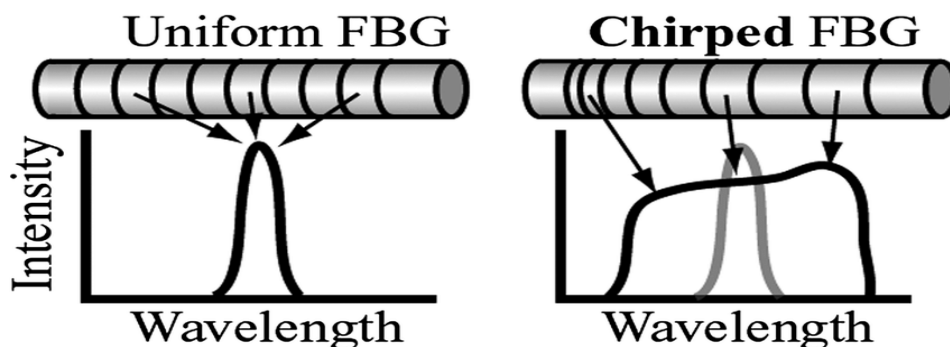
Τη μείωση των πλευρικών λοβών που μπορεί να προκαλέσουν παραμορφώσεις στο σήμα. Οι πλευρικοί λοβοί μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητα φαινόμενα διασποράς και παραμορφώσεις σήματος.

Την καταστολή κυματισμών καθυστέρησης ομάδας. Οι κυματισμοί καθυστέρησης ομάδας μπορεί να εμφανιστούν στα CFBG λόγω της περιοδικής δομής του πλέγματος. Αυτοί οι κυματισμοί μπορούν να δημιουργήσουν πρόσθετη διασπορά.

Την διεύρυνση του εύρους ζώνης. Το Apodization μπορεί να βοηθήσει στη διεύρυνση του εύρους ζώνης του CFBG. Ένα ευρύτερο εύρος ζώνης

επιτρέπει την αντιστάθμιση ενός ευρύτερου φάσματος οπτικών σημάτων με διαφορετικά μήκη κύματος και χαρακτηριστικά διασποράς [24].

Αυτό γίνεται μεταβάλλοντας την περίοδο πλέγματος ή το πλάτος διαμόρφωσης του δείκτη κατά μήκος του πλέγματος. Συνεπώς η διαμόρφωση του προφίλ του δείκτη διάθλασης του FBG γίνεται για την επίτευξη συγκεκριμένων φασματικών χαρακτηριστικών, όπως πιο έντονες ή πιο επίπεδες κορυφές ανάκλασης. Κατά τον τρόπο αυτόν μπορούμε να υλοποιήσουμε μια πεπλατυσμένη ζώνη διέλευσης με μειωμένα επίπεδα πλευρικού λοβού ή βελτιωμένες ιδιότητες διασποράς σε σύγκριση με ένα ομοιόμορφο πλέγμα (uniform). Με την χρήση άλλων προφίλ εκτός του uniform, έχουμε την Chirp FBG, τα οφέλη της οποίας είναι η αυξημένη επιλεκτικότητα του μήκους κύματος, η βελτιωμένη καταστολή παρεμβολής άλλων διπλανών καναλιών και η μειωμένη διεύρυνση παλμού που προκαλείται από τη διασπορά. Οι μέθοδοι για την επίτευξη της CFBG ποικίλουν και συγκεκριμένα το προφίλ grading με βαρύτητες (apodization), μπορεί να είναι η υπερβολική εφαπτομένη συνάρτηση (tanh), Gaussian, Raised Cosine, Hamming ή άλλες συναρτήσεις, ανάλογα με τις ανάγκες της υλοποίησης. Συγκεκριμένα στο Optisystem έχουμε την δυνατότητα να προσομοιάσουμε τα προφίλ υπερβολικής εφαπτομένης συνάρτησης (tanh) και Gaussian, ενώ μας παρέχει την δυνατότητα άλλων υλοποιήσεων με την προσθήκη των αντίστοιχων συναρτήσεων. Το ομοιόμορφο προφίλ (uniform) καθιστά την ίνα μας απλή FBG ίνα.



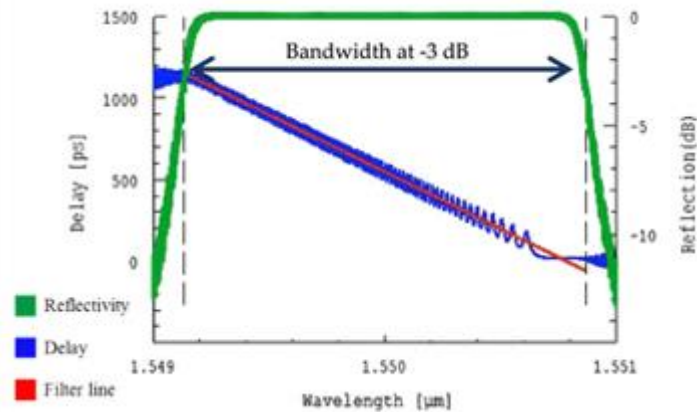
Εικόνα 21 Αποτύπωση διαφοράς της FBG και CFBG

Έτσι η απλούστερη μορφή προφίλ είναι το ομοιόμορφο προφίλ (uniform), όπου το πλάτος της διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης διαμορφώνεται έτσι ώστε να μειώνεται γραμμικά από το κέντρο του πλέγματος προς τις άκρες, με αποτέλεσμα ένα τριγωνικό προφίλ. Αυτό σημαίνει ότι η διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης είναι υψηλότερη στο κέντρο του πλέγματος και σταδιακά μειώνεται προς τις άκρες. Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη καθώς είναι εύκολη στην κατασκευή και παρέχει καλή απόδοση φίλτρου με χαμηλούς πλευρικούς λοβούς [24].

Η μέθοδος Gaussian. Μια συνάρτηση Gaussian είναι μια μαθηματική συνάρτηση που περιγράφει μια καμπύλη σε σχήμα καμπάνας, όπου το πλάτος της καμπύλης είναι υψηλότερη στο κέντρο και σταδιακά μειώνεται προς τα άκρα. Η συγκεκριμένη μέθοδος (apodization) περιλαμβάνει τη

διαμόρφωση του προφίλ πλάτους του CFBG σύμφωνα με μια Gaussian συνάρτηση έτσι η διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης ακολουθεί μια Gaussian κατανομή κατά μήκος του πλέγματος. Με αυτήν την μέθοδο, τα ανακλώμενα μεταδιδόμενα σήματα ελέγχονται καλύτερα, καθώς δημιουργούνται ομαλές και συμμετρικές φασματικές αποκρίσεις με μειωμένους πλευρικούς λοβούς. Η μαθηματική έκφραση της Gaussian είναι, [25]:

$$A(z) = \exp\left(-G\left(\frac{z}{L_g}\right)^2\right), \quad (3.4)$$



Σχήμα 9 Αποτύπωση CFBG με apodization προφίλ Gaussian

Με την παράμετρο G να είναι “Gauss Parameter” όπως αναγράφεται και και έχουμε δυνατότητα μεταβολής της τιμής στο πρόγραμμα OptiSystem.

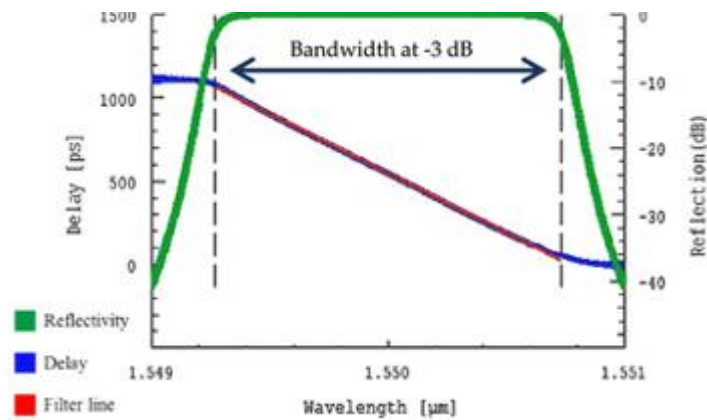
Η υπερβολική εφαπτομένη συνάρτηση (tanh) είναι μια μαθηματική συνάρτηση που έχει σιγμοειδές σχήμα, παρόμοιο με το σχήμα μιας συνάρτησης Gauss. Το προφίλ υπερβολικής εφαπτομένης μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας την μαθηματική έκφραση [25] :

$$A(z) = 1 + \tanh\left(T\left(1 - 2\left(\frac{z}{L_g}\right)^2\right)\right), \quad (3.5)$$

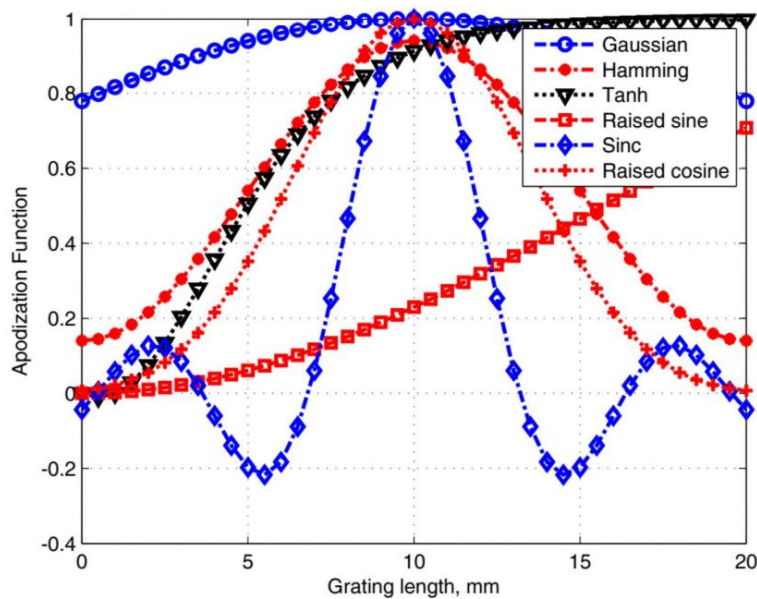
Όπου η παράμετρος T είναι “Tanh Parameter”, «αλλάζει τα φασματικά χαρακτηριστικά» όπως αναγράφεται και έχουμε δυνατότητα μεταβολής της τιμής στο πρόγραμμα OptiSystem, L_g το μήκος της CFBG και z είναι η θέση κατά μήκος των φραγμάτων δηλαδή η απόσταση (σε οποιοδήποτε σημείο του πυρήνα της ίνας). Έτσι η ανάκλαση διαφόρων μηκών κύματος γίνεται από άλλες θέσεις κατά μήκος του πυρήνα, όπου τα μικρά μήκη κύματος ανακλώνται από το κοντινό άκρο και τα μεγάλα μήκη κύματος από το μακρινό άκρο. Έτσι πετυχαίνουμε ελαχιστοποίηση ανεπιθύμητων κυματισμών χρονικής καθυστέρησης ΔT στην απόκριση φάσης καθώς και τις επιδράσεις αυτών [26].

Η συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης χρησιμοποιείται για την βελτίωση των φασματικών χαρακτηριστικών της CFBG, όπως η καταστολή

του πλευρικού λοβού, η ανακλαστικότητα και το εύρος ζώνης επειδή παρέχει μια ομαλή μετάβαση από την περιοχή του πλέγματος στην περιβάλλουσα ίνα.



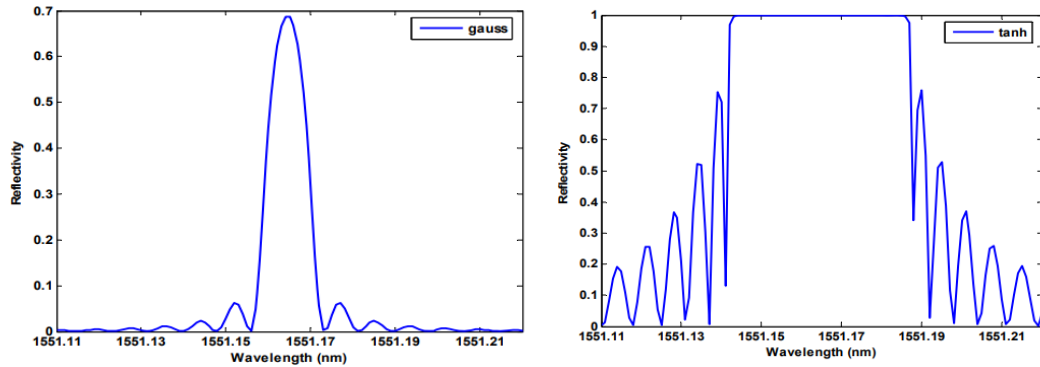
Σχήμα 10 Αποτύπωση CFBG με apodization προφίλ tanh.



Σχήμα 11 Αποτύπωση των διαφορετικών συναρτήσεων Apodization σε διαφορετικά μήκη ίνας CFBG.

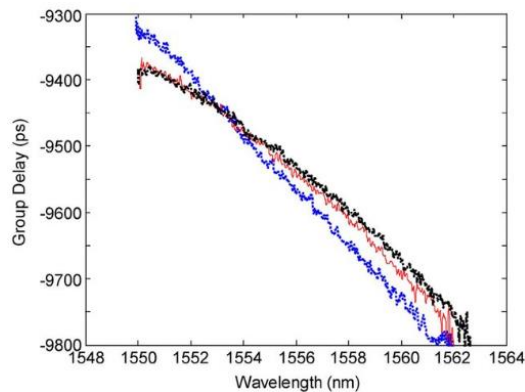
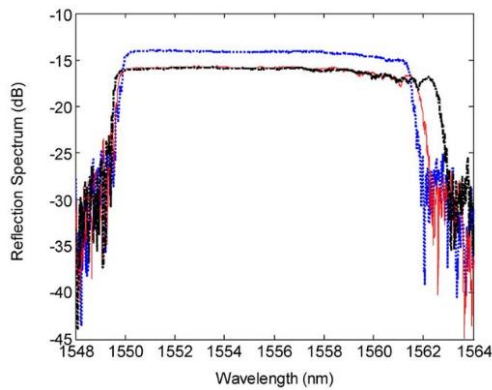
Έτσι και στα δυο προφίλ apodization προσαρμόζοντας τις τιμές σύμφωνα με τις απαιτήσεις της υλοποίησης καθορίζουμε την κλίση της. Οι υψηλότερες τιμές οδηγούν σε πιο απότομες κλίσεις, οδηγώντας σε ισχυρότερα φαινόμενα grading με βαρύτερες και στενότερες φασματικές αποκρίσεις [27].

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG



Φάσμα ανάκλασης προφίλ Gauss.

Φάσμα ανάκλασης προφίλ Tanh.



Σχήμα 12 Αποτύπωση αλλαγής της κλίσης του group delay και της φασματικής απόκρισης με αλλαγή της τιμής του προφίλ apodization.

Τέλος να αναφέρουμε ότι έχει επικρατήσει το προφίλ της υπερβολικής εφαπτομένης συνάρτησης (tanh) καθώς παρέχει την συνολικά ανώτερη απόδοση στην αντιστάθμιση της διασποράς [28].

3.4.5 Modulation AC

Για τον καθορισμό του πλάτους της διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης στο κέντρο του πλέγματος χρησιμοποιείται η παράμετρος AC διαμόρφωσης στη συνάρτηση της (apodization). Γενικά μπορεί να πάρει τιμές από 0.0001 έως 0.0005, υλοποιούμε την προσομοίωση ρυθμίζοντάς το στο 0.0001.

3.4.6. Modulation DC

Η παράμετρος DC ελέγχει το συνολικό επίπεδο της διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης και καθορίζεται ως ποσοστό του πλάτους διαμόρφωσης κορυφής. Η παράμετρος DC στο CFBG αναφέρεται στη διαδικασία διαμόρφωσης των χαρακτηριστικών του πλέγματος ινών με τρόπο που επηρεάζει τη μετάδοση του φωτός μέσω της ίνας. Η διαμόρφωση επιτυγχάνεται τυπικά με την εφαρμογή τάσης συνεχούς ρεύματος (DC) στο CFBG. Αυτή η τάση συνεχούς ρεύματος μπορεί να αλλάξει τον δείκτη διάθλασης της ίνας, μεταβάλλοντας έτσι τις οπτικές ιδιότητες του πλέγματος.

Η τιμή DC εξαρτάται από τις απαιτήσεις της αντιστάθμισης του οπτικού σήματος. Έτσι μια υψηλή τιμή DC θα έχει ως αποτέλεσμα μια ισχυρότερη διαμόρφωση δείκτη διάθλασης και υψηλότερο εύρος ζώνης ανάκλασης, ενώ μια χαμηλότερη τιμή DC θα έχει ως αποτέλεσμα ένα στενότερο εύρος ζώνης ανάκλασης και μια ασθενέστερη διαμόρφωση δείκτη διάθλασης.

3.4.7 Chirp in CFBG

Στο σημείο αυτό πρέπει να σταθούμε καθώς είναι ένα από τα βασικότερα στοιχεία της ίνας CFBG. Υπάρχουν διαφορετικές συναρτήσεις ανάλογα με το είδος των φραγμάτων Chirp, που εκφράζουν το $\Lambda(z)$ όπου είναι η περίοδος grating σε θέση (z) κατά μήκος των φραγμάτων δηλαδή σε οποιοδήποτε σημείο (z) του πυρήνα της ίνας. Έτσι έχουμε το γραμμικό chirp (linear chirp), το τετραγωνικό chirp (Quadratic chirp), τη συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας (Square root) και η συνάρτηση κυβικής ρίζας (Cubic root).

Η συνάρτηση γραμμικού Chirp (linear chirp function) είναι η απλούστερη και αποτελείται από μια γραμμική μεταβολή της περιόδου τριβής ή του δείκτη διάθλασης κατά μήκος του πλέγματος. Έχει μια γραμμικά διαφορετική απόσταση μεταξύ των φραγμάτων. Η μαθηματική έκφραση του δίνεται από τον τύπο:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 - \frac{z - L/2}{L} \Delta, \quad (3.6)$$

Η συνάρτηση τετραγωνικού chirp (Quadratic chirp) έχει παραβολική παραλλαγή και η απόσταση μεταξύ των δομών των φραγμάτων ορίζεται με τετραγωνική συνάρτηση στον πυρήνα της CFBG και εκφράζεται μαθηματικά:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 - \left[\left(\frac{z}{L} \right)^2 - \frac{1}{4} \right] \Delta, \quad (3.7)$$

Η συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας Chirp (Square root) παρέχει μια ομαλή μεταβολή στην περίοδο του πλέγματος, που οδηγεί σε μια γραμμική διακύμανση στο μήκος κύματος Bragg. Αυτός ο τύπος προφίλ chirp μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές αντιστάθμισης διασποράς ή διαμόρφωσης διασποράς, όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος των χαρακτηριστικών διασποράς. Ομοίως και εδώ έχουμε μια συνεχή δομή φραγμάτων στον πυρήνα με την απόσταση μεταξύ των φραγμάτων ίση με την συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας.

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 - \left[\sqrt{\frac{z}{L} - \frac{1}{\sqrt{2}}} \right] \Delta, \quad (3.8)$$

Τέλος η συνάρτηση κυβικής ρίζας (Cubic root) μειώνει την απώλεια εισαγωγής και επιτρέπει μεγάλη κλίση διασποράς. Έχει συνεχή δομή φραγμάτων με απόσταση μεταξύ τους σύμφωνα με την συνάρτηση κυβικής ρίζας [29].

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 - \left[\sqrt[3]{\frac{z}{L}} - \frac{1}{\sqrt[3]{2}} \right] \Delta, \quad (3.9)$$

$\Lambda(z)$ είναι η περίοδος grating, Λ_0 είναι η αρχική περίοδος στο σημείο εκκίνησης του grating, Δ είναι η παράμετρος chirp, που αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της περιόδου ανά μονάδα μήκους (συνήθως σε μονάδες nm/mm ή nm/m) και z είναι η θέση κατά μήκος των φραγμάτων δηλαδή η απόσταση (σε οποιοδήποτε σημείο του πυρήνα της ίνας) [30].

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι η περίοδος grating $\Lambda(z)$ είναι πολύ βασική γιατί αυτή θα καθορίσει το μήκος κύματος Bragg για οποιοδήποτε σημείο πάνω στον άξονα z της ίνας CFBG.

Η παράμετρος Chirp $-\Delta$ - αναφέρεται ως ένα βασικό χαρακτηριστικό που ποσοτικοποιεί τον ρυθμό μεταβολής της διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης κατά μήκος του πλέγματος. Καθορίζει την κλίση ή τον ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης εντός της δομής του πλέγματος. Το πλάτος της διακύμανσης του δείκτη διάθλασης στο πλέγμα της CFBG αντιπροσωπεύεται από το Δn .

Ένας θετικός ρυθμός Chirp χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της διασποράς στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας, ενώ ένας αρνητικός ρυθμός Chirp χρησιμοποιείται για την πρόκληση διασποράς. Ένας θετικός ρυθμός Chirp σημαίνει ότι ο δείκτης διάθλασης αυξάνεται κατά μήκος του πλέγματος, ενώ ένας αρνητικός ρυθμός Chirp σημαίνει ότι ο δείκτης διάθλασης του φράγματος μειώνεται κατά τη διάρκεια του CFBG.

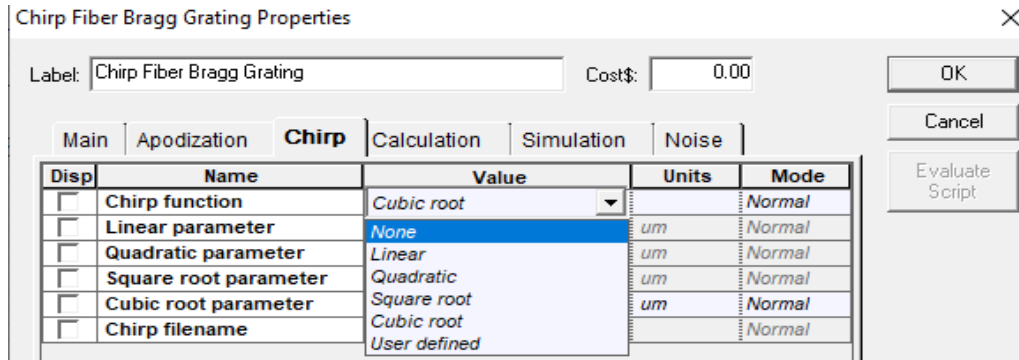
Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης για οποιοδήποτε σημείο στον άξονα z κατά μήκος του πλέγματος στον πυρήνα της CFBG, $n(z)$, εκφράζεται σύμφωνα με την σχέση, [31]:

$$n(z)^2 = \Delta n^2 \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda(z)} + \varphi(z)\right) + n_{core}^2, \quad (3.8)$$

Όπου το n_{core} είναι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα, ενώ $\Lambda(z)$ είναι η περίοδος grating του πλέγματος.

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι η παράμετρος Chirp μέσω της συνάρτησης ανάλογα με το είδος των φραγμάτων Chirp, που εκφράζουν το $\Lambda(z)$ καθορίζουν το δείκτη διάθλασης κατά μήκος του πλέγματος μια CFBG ίνας [32], [33].

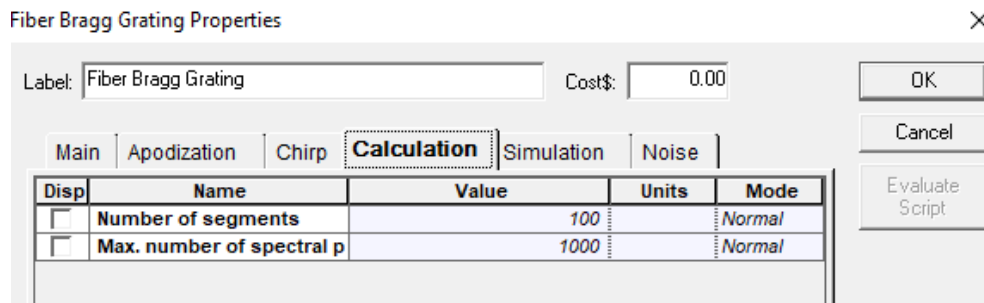
Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG



Εικόνα 22 Ρυθμίσεις παραμέτρων Chirp FBG.

3.4.8 Calculation

Στο πεδίο αυτό υπάρχουν δυο επιλογές, το «Number of segments» και το «Max. number of special points».



Εικόνα 23 Ρυθμίσεις παραμέτρων υπολογισμού CFBG.

3.4.9 «Number of segments» - Αριθμός Τμημάτων

Ο αριθμός των τμημάτων σε ένα πλέγμα Bragg μια οπτικής ίνας CFBG, είναι ο αριθμός των διακριτών τμημάτων που συνθέτουν τη δομή του πλέγματος. Κάθε τμήμα εφόσον στην παρούσα εργασία δεν εξετάζουμε uniform FBG ίνα, θα έχει μια ελαφρώς διαφορετική περίοδο ή ρυθμό chirp, που οδηγεί σε μια χωρικά μεταβαλλόμενη διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης κατά μήκος του πλέγματος. Γενικά δεν υπάρχει κάποιος συνδυασμός του μήκους κάθε τμήματος που να χαρακτηρίζεται βέλτιστος. Η αύξηση του αριθμού των τμημάτων μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερο έλεγχο της φασματικής απόκρισης του πλέγματος, από την άλλη πλευρά όμως, αυξάνει την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και της κατασκευής [34]. Γενικά η κατανομή της CFBG σε τμήματα βοηθάει στον υπολογισμό του CFBG καθώς με την βοήθεια της μεθόδου πινάκων μπορεί κάποιος να υπολογίσει πολύ πιο εύκολα ένα Chirp FBG. Επίσης συμβάλει και στην ευκολία της κατασκευής του CFBG. Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα μιας έρευνας [35] για τον βέλτιστο δυνατό αριθμό τμημάτων σε ένα πλέγμα Bragg μιας οπτικής ίνας CFBG, διαπιστώνουμε ότι ένας μέτριος αριθμός τμημάτων κοντά στο 100

θα μπορούσε να διατηρήσει μια καλή ισορροπία μεταξύ της φασματικής απόκρισης και της πολυπλοκότητας κατασκευής.

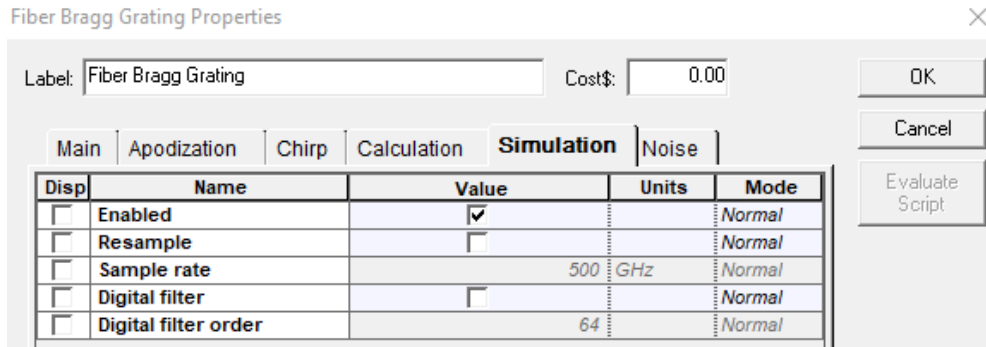
3.4.10 Max. number of special points - Μέγιστος αριθμός ειδικών σημείων

Ο μέγιστος αριθμός ειδικών σημείων σε ένα CFBG εξαρτάται από παράγοντες όπως: το λογισμικό προσομοίωσης, τις συγκεκριμένες παραμέτρους σχεδιασμού του πλέγματος και της υπολογιστικής ισχύος. Ένας μεγαλύτερος αριθμός ειδικών σημείων συνήθως μας προσδίδει πιο ακριβείς προσομοιώσεις των φασματικών ιδιοτήτων του πλέγματος, αλλά από την άλλη πλευρά αυξάνει πολύ τον υπολογιστικό χρόνο. Επομένως μια προτεινόμενη τιμή από το πρόγραμμα είναι το 1000, τιμή που και κρατήσαμε [36].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1 Simulation – Προσομοίωση

Στο πεδίο αυτό υπάρχουν παράμετροι για την προσομοίωση, τιμές οι οποίες δεν θα μας απασχολήσουν καθώς δεν επηρεάζουν την λειτουργία της οπτικής ίνας CFBG και κατά συνέπεια την αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς.



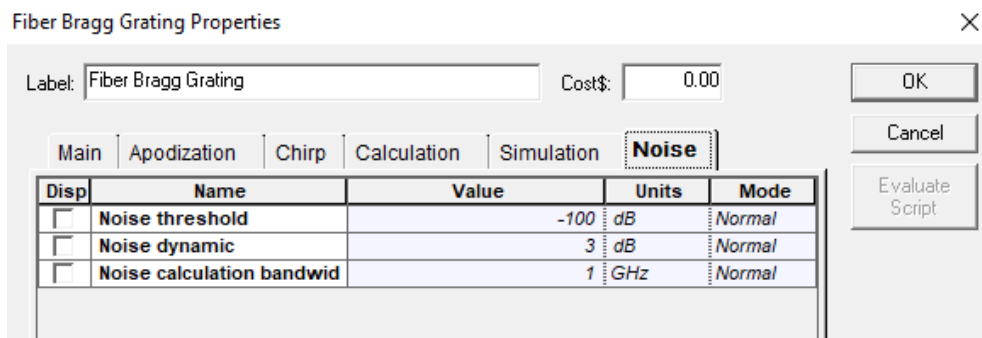
Εικόνα 24 Ρυθμίσεις παραμέτρων προσομοίωσης CFBG.

4.2 Noise – Θόρυβος

4.2.1 Noise threshold - Κατώφλι θορύβου

Το κατώφλι θορύβου σε ένα πλέγμα Bragg με Chirped Fiber Bragg (CFBG) αναφέρεται στο επίπεδο θορύβου ή διαταραχών που μπορούν να γίνουν ανεκτά πριν υποβαθμιστούν σημαντικά οι φασματικές ιδιότητες του πλέγματος. Γενικά, τα CFBG είναι σχεδιασμένα να έχουν υψηλή ανοχή σε θόρυβο και περιβαλλοντικές διαταραχές, καθώς χρησιμοποιούνται συχνά σε απαιτητικές εφαρμογές όπως η οπτική ανίχνευση, το φιλτράρισμα και η αντιστάθμιση διασποράς. Στην περίπτωση μας που εξετάζουμε την αντιμετώπιση της διασποράς, πηγές θορύβου και παραμόρφωσης μπορεί να είναι τα αποτελέσματα της χρωματικής διασποράς, τις μη γραμμικότητας και της διασποράς τρόπου πόλωσης. Άλλες πηγές θορύβου προέρχονται από τους παραμέτρους σχεδιασμού του πλέγματος, την ποιότητα των ινών και των επιστρώσεων που χρησιμοποιούνται καθώς και ο τύπος και το επίπεδο διαταραχών στις οποίες εκτίθεται το πλέγμα [37].

Προτεινόμενη τιμή είναι το -100Db όπου και θα κρατήσουμε.



Εικόνα 25 Ρυθμίσεις παραμέτρων θορύβου CFBG.

4.2.2 Noise dynamic - Δυναμική θορύβου

Η δυναμική θορύβου στα CFBG αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο ο θόρυβος στο σήμα εισόδου αλληλεπιδρά με το πλέγμα Bragg και παράγονται εν τέλη πολύπλοκα φάσματα στην έξοδο. Η δυναμική του θορύβου στα CFBG μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, όπως ο ρυθμός chirp, το μήκος του πλέγματος και οι φασματικές ιδιότητες του σήματος εισόδου. Προτεινόμενη τιμή είναι το 3dB όπου και θα κρατήσουμε.

4.2.3 Noise calculation bandwidth - Εύρος ζώνης υπολογισμού θορύβου

Γενικά η ισχύς θορύβου είναι μια σημαντική παράμετρος στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών, καθώς καθορίζει την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) και την ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος. Η τιμή του εύρους ζώνης υπολογισμού θορύβου εξαρτάται από τον τύπο του θορύβου που θέλουμε να εξετάσουμε και τυπικά προσδιορίζεται σε μονάδες Hertz (Hz). Γενικά, το εύρος ζώνης υπολογισμού θορύβου επιλέγεται να είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του οπτικού σήματος που μεταδίδεται, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι πηγές θορύβου που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα του σήματος [38]. Έτσι μια τιμή 1 GHz είναι τιμή πολύ μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης του σήματός μας που είναι 20MHz.

4.3 Δέκτης

4.3.1 Photodetector PIN

Τα photodetector PIN ή αλλιώς φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούνται σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών, όπως τα δίκτυα οπτικών ινών, επειδή μπορούν να ανιχνεύσουν ασθενή οπτικά σήματα με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία. Αυτά χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά σήματα. Ένας φωτοανιχνευτής PIN λειτουργεί με βάση την αρχή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Αποτελείται από ένα στρώμα ημιαγωγού τύπου p, ένα ενδογενές στρώμα ημιαγωγών και ένα στρώμα ημιαγωγού

τύπου n . Όταν το φως προσπίπτει στο εγγενές στρώμα του φωτοανιχνευτή, δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Αυτά τα ηλεκτρόνια και οι οπές παρασύρονται προς τα στρώματα τύπου n και τύπου p αντίστοιχα, δημιουργώντας ένα ρεύμα. Το μέγεθος του ρεύματος είναι ευθέως ανάλογο με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός και μπορεί να μετρηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως σήμα εξόδου [39], [40].

4.3.2 Low Pass Bessel Filter

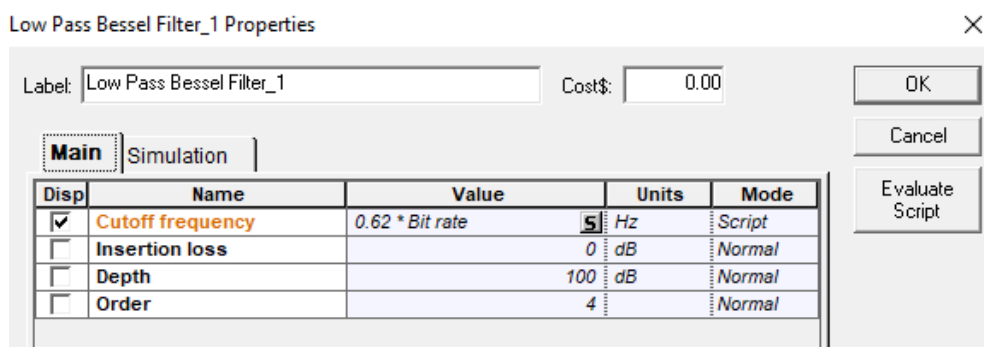
Το φίλτρο Bessel είναι ένα χαμηλοπερατό ηλεκτρονικό φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση σημάτων χαμηλής συχνότητας ενώ εξασθενεί τα σήματα υψηλής συχνότητας. Το φίλτρο Bessel έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει τη διέλευση σημάτων χαμηλής συχνότητας με ελάχιστη παραμόρφωση, ενώ εξασθενεί τα σήματα υψηλότερης συχνότητας. Τα πλεονεκτήματα ενός φίλτρου Bessel χαμηλής διέλευσης περιλαμβάνουν τη μέγιστη επίπεδη απόκριση συχνότητας στη ζώνη διέλευσης, πράγμα που σημαίνει ότι δεν εισάγει καμία παραμόρφωση φάσης. Η λειτουργία ενός φίλτρου Bessel μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους κυκλωμάτων, όπως ενεργά φίλτρα, παθητικά φίλτρα ή ψηφιακά φίλτρα. Η υλοποίηση ενός φίλτρου Bessel εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής και τους διαθέσιμους πόρους.

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός χαμηλοπερατού φίλτρου Bessel είναι μια συνάρτηση μεταβλητής συχνότητας, που συμβολίζεται ως "s". Η συνάρτηση μεταφοράς δίνεται από:

$$H(s) = \frac{k}{(s-s_0)(s-s_1)(s-s_2)(s-s_{N-1})}, \quad (4.1)$$

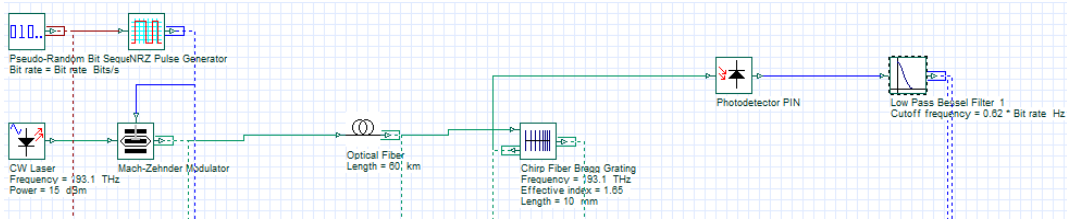
όπου k είναι το κέρδος του φίλτρου και s_0, s_1, \dots, s_{N-1} είναι οι μιγαδικοί πόλοι του φίλτρου, οι οποίοι καθορίζονται από τη σειρά του φίλτρου και τη συχνότητα αποκοπής [41], [42].

Η παραμετροποίηση - σχεδιασμός ενός φίλτρου Bessel χαμηλής διέλευσης περιλαμβάνει την επιλογή της σειράς φίλτρου, η οποία καθορίζει την κλίση της απόκρισης του φίλτρου, και της συχνότητας αποκοπής, η οποία καθορίζει τη συχνότητα με την οποία το φίλτρο αρχίζει να εξασθενεί το σήμα.



Εικόνα 26 Ρυθμίσεις παραμέτρων Φίλτρου Low Pass Bessel.

4.4 Τελική διάταξη στοιχείων



Εικόνα 27 Διάταξη κυκλώματος χωρίς την χρήση οργάνων μέτρησης.

4.5 Όργανα μέτρησης

Για την αποτύπωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης θα χρησιμοποιήσουμε τα εξής όργανα μέτρησης. (Optical Time Domain Visualizer), (Optical Spectrum Analyzer), (Oscilloscope Visualizer), (BER Analyzer).

4.5.1 Optical Time Domain Visualizer (OTDV)

Το Optical Time Domain Visualizer (OTDV) είναι μια πιο προηγμένη έκδοση ενός Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) που παρέχει τόσο χωρικές όσο και χρονικές πληροφορίες σχετικά με την οπτική ίνα. Το Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) δηλαδή ο ανακλαστικός μετρητής οπτικού πεδίου χρόνου (OTDR) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της εξασθένησης και της διασποράς των οπτικών ινών. Έτσι με την βοήθεια του οργάνου αυτού παρατηρούμε την εξασθένηση και την διασπορά που προκαλείται μέσα στο υλοποιημένο δίκτυο ινών που θα προσομοιάσουμε.

4.5.2 Optical Spectrum Analyzer (OSA)

Το Optical Spectrum Analyzer (OSA) είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση και την ανάλυση του οπτικού φάσματος φωτός. Λειτουργεί διαχωρίζοντας τα διαφορετικά μήκη κύματος φωτός στο οπτικό σήμα και μετρώντας τα αντίστοιχα επίπεδα ισχύος τους. Μπορεί να μετρήσει την κατανομή ισχύος σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος, παρέχοντας πληροφορίες για τη φασματική σύνθεση μιας φωτεινής πηγής, π.χ. πηγή laser. Για την ανάλυση του φάσματος χρησιμοποιεί ένα συμβολόμετρο Fabry-Pérot για να διαχωρίσει την οπτική δέσμη στα φασματικά της συστατικά, τα οποία ανιχνεύονται και μετρούνται από φωτοανιχνευτές. Από αυτή την μέτρηση προκύπτει ένα φάσμα ισχύος το οποίο εμφανίζεται ως γράφημα, που δείχνει την ισχύ του φωτός σε διαφορετικά μήκη κύματος. Χρησιμοποιείται για την ανάλυση φασματικών χαρακτηριστικών οπτικών σημάτων, όπως τα σήματα πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM), τα οποία μεταφέρουν πολλαπλά κανάλια

πληροφοριών σε διαφορετικά μήκη κύματος, σε εφαρμογές οπτικής ανίχνευσης, όπως οι ίνες Bragg (FBG), όπου οι αλλαγές στο οπτικό φάσμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση αλλαγών στη θερμοκρασία, την καταπόνηση και την αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς, κάτι το οποίο εξετάζουμε στην παρούσα εργασία [43] [44].

4.5.3 Oscilloscope Visualizer - Παλμογράφος

Ο παλμογράφος εμφανίζει την κυματομορφή ενός σήματος σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στον χρήστη να αναλύσει και να μετρήσει διάφορες πτυχές του σήματος, όπως το πλάτος, τη συχνότητα και το χρονισμό του. Επί της ουσίας μας οπτικοποιεί το ηλεκτρικό σήμα σε εικονικό περιβάλλον. Με την βοήθεια του παλμογράφου θα συγκρίνουμε το αρχικό σήμα με το τελικό για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

4.5.4 BER Analyzer – Διάγραμμα οφθαλμού

Ο αναλυτής BER (bit error rate) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ρυθμού σφαλμάτων σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζουμε την ποιότητα των ψηφιακών συνδέσεων επικοινωνίας αναλύοντας τον αριθμό των σφαλμάτων σε μια ροή δεδομένων. Ο αναλυτής BER συγκρίνει τα μεταδιδόμενα και τα λαμβανόμενα σήματα και παρέχει μια στατιστική ανάλυση του σφάλματος δεδομένων. Ουσιαστικά εκφράζει την αναλογία του αριθμού των ληφθέντων bit που περιέχουν σφάλματα προς τον συνολικό αριθμό των bit που μεταδίδονται παρέχοντας έτσι ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας και της αξιοπιστίας της ζεύξης επικοινωνίας. Με το εργαλείο αυτό θα εξετάσουμε ουσιαστικά την συμβολή της ίνας CFBG στην αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς.

4.6 Εκτέλεση Προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό θεωρούμε ότι έχει ολοκληρωθεί πολύ αναλυτικά το θεωρητικό τμήμα της εν θέματι εργασίας. Έχουμε δομήσει το μοντέλο προσομοίωσης και έχουμε εξηγήσει αναλυτικά τα τμήματα που έχουμε χρησιμοποιήσει για την διεξαγωγή της προσομοίωσης, με έμφαση στην ίνα CFBG που αποτελεί και το κύριο αντικείμενο της μελέτης μας. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε την τελική δομή τοποθετώντας στα κατάλληλα σημεία τα όργανα μέτρησης και θα τροποποιήσουμε βασικές παραμέτρους προκειμένου να λάβουμε το παραχθέν σήμα στον δέκτη.

4.6.1 Τελική διάταξη

Η τελική διάταξη για την μελέτη λειτουργίας μια ίνας CFBG, όπως περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω αποτελείται από:

Πομπό

- Γεννήτρια ψευδο-τυχαίας ακολουθίας δυαδικών ψηφίων γεννήτρια NRZ
- Γεννήτρια παλμών NRZ
- Λέιζερ συνεχούς κύματος (φέρων)
- Διαμορφωτής Mach-Zehnder
 - Οπτικός αναλυτής φάσματος
 - Όργανο μέτρησης οπτικών παλμών

Κυματοδηγός

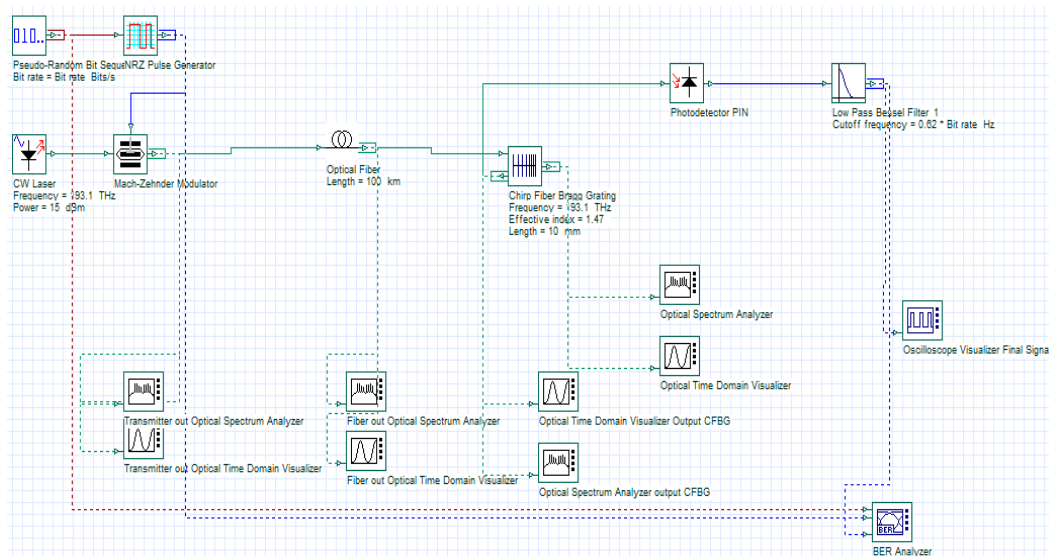
- Οπτική ίνα 100km
 - Οπτικός αναλυτής φάσματος
 - Όργανο μέτρησης οπτικών παλμών

Αντιμετώπιση της Χρωματικής Διασποράς

- CFBG
 - Οπτικός αναλυτής φάσματος
 - Όργανο μέτρησης οπτικών παλμών

Δέκτης

- Photodetector PIN – Φωτοανιχνευτές
- Χαμηλοπερατό ηλεκτρονικό φίλτρο - φίλτρο Bessel
 - Παλμογράφος
 - BER Analyzer – Διάγραμμα οφθαλμού



Εικόνα 28 Τελική διάταξη με την χρήση οργάνων μέτρησης.

Πίνακας 1 Παράμετροι ίνας SMF.

Παράμετροι	Τιμή
Διασπορά σε ίνα (ps/nm/km)	16.75
Κλίση διασποράς (ps/nm ² /km)	0.075
Ισχύς λέιζερ CW (dBm)	15
Εξασθένηση σε ίνα (dB/km)	0.2
Μήκος οπτικών ινών (km)	100
Bit rate (Gbps)	10

Πίνακας 2 Παράμετροι ίνας CFBG (Linear).

Παράμετροι	Τιμή
Συχνότητα (THz)	131.1
Effective index	1.47
Μήκος (mm)	10
Apodization	Tanh
Chirp function	Linear (parameter = 0.0001 μm)

Για την υλοποίηση της CFBG θα επιλέξουμε apodization profile Tanh καθώς από την βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι παρέχει την συνολικά ανώτερη απόδοση στην αντιστάθμιση της διασποράς, ενώ θα παρατηρήσουμε και τα αποτελέσματα με την χρήση Gaussian apodization profile.

Τέλος θα ξεκινήσουμε τις μετρήσεις με τύπο CFBG Linear και θα παρατηρήσουμε την αντιμετώπιση της διασποράς με τροποποίηση της κλίσης του group delay αλλάζοντας την τιμή Linear Parameter της συνάρτησης γραμμικής μεταβολής της περιόδου grating. Η ίδια διαδικασία θα ακολουθηθεί και για τους υπόλοιπους τύπους CFBG, με χρήση συναρτήσεων τετράγωνου (Quadratic chirp), τετραγωνικής ρίζας (Square root) και κυβικής ρίζας (Cubic root).

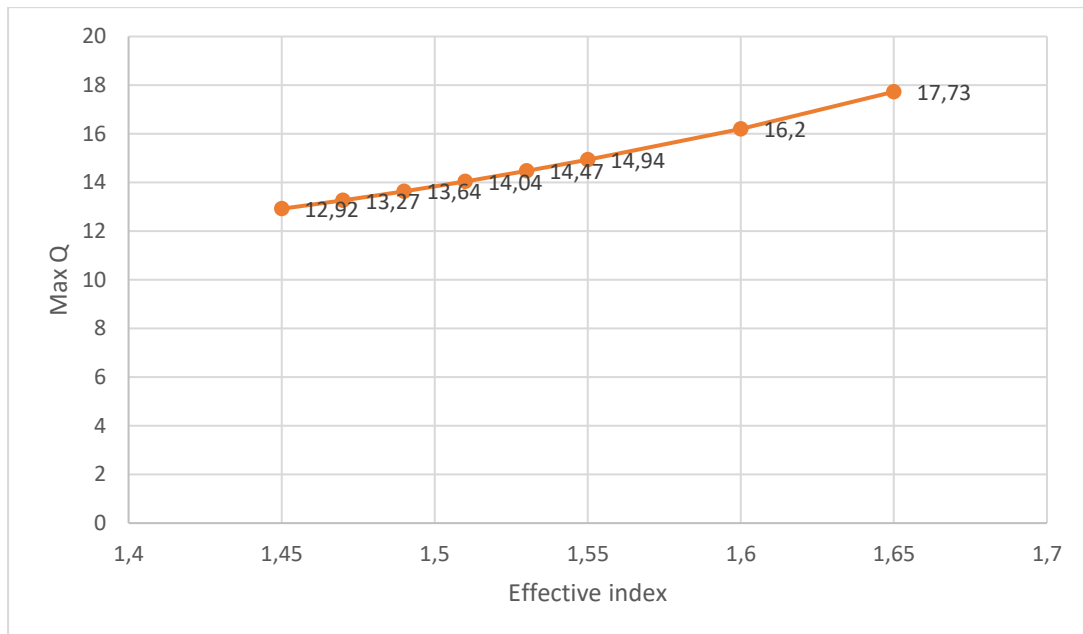
4.6.2 Επιρροή του Effective index value στην αντιμετώπιση διασποράς

Για οπτικές ίνες με βάση το πυρίτιο, ο ενεργός δείκτης μπορεί να κυμαίνεται από περίπου 1,44 για τον βασικό τρόπο λειτουργίας έως υψηλότερες τιμές για λειτουργίες υψηλότερης τάξης. Για πολυμερείς ίνες (κυματοδηγούς) ο αποτελεσματικός δείκτης μπορεί να κυμαίνεται από περίπου 1,4 έως 1,7, ανάλογα με το συγκεκριμένο πολυμερές υλικό και τις διαστάσεις του κυματοδηγού. Ελέγχοντας το λαμβανόμενο σήμα μέσω του

συντελεστή Q Factor προέκυψε ότι όσο αυξάνουμε τον ενεργό δείκτη τόσο καλύτερο Q λαμβάνουμε κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς βελτιστοποιούμε τον κυματοδηγό μας. Ωστόσο πρακτικά στο εμπόριο οι διαθέσιμες οπτικές ίνες έχουν τιμές κοντά στο 1.47. Έτσι θα κρατήσουμε την τιμή αυτή.

Πίνακας 3 Σχέση Q με Effective Index.

Effective index	Max. Q Factor dB
1.45	12.92
1.47	13.27
1.49	13.64
1.51	14.04
1.53	14.47
1.55	14.94
1.60	16.2
1.65	17.73



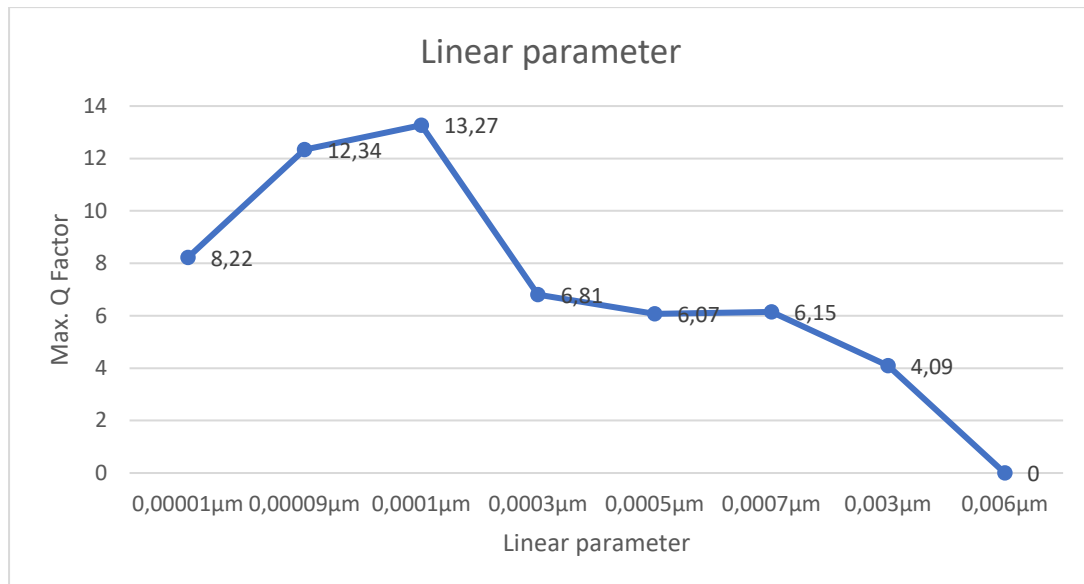
Σχήμα 13 Αλλαγή Max. Q Factor σε σχέση με τις τιμές Effective index.

4.6.3 Επιρροή του Linear parameter στην αντιμετώπιση της διασποράς

Είπαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι η παράμετρος Chirp μπορεί να χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της διασποράς στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας. Στο συγκεκριμένο πείραμα παίρνοντας μετρήσεις παρατηρούμε την αλλαγή αντιμετώπισης της διασποράς ανάλογα με την επιρροή του αποτελέσματος της συνάρτησης, εν προκειμένω της γραμμικής.

Πίνακας 4 Σχέση Q με Linear Parameter.

Linear parameter	Max. Q Factor dB
0,00001 μm	8,22
0,00009 μm	12,34
0,0001 μm	13,27
0,0003 μm	6,81
0,0005 μm	6,07
0,0007 μm	6,15
0,003 μm	4,09
0,006 μm	0



Σχήμα 14 Μεταβολή του Q καθώς αλλάζει η παράμετρος της γραμμικής συνάρτησης Chirp.

Γίνεται αντιληπτό ότι με την αλλαγή της τιμής της συνάρτησης έχουμε διαφορετική περίοδο φράγματος (grating) και αυτό μεταβάλλει την αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς. Αυτό συμβαίνει γιατί αλλάζοντας την τιμή Δ (παράμετρος Chirp) επηρεάζεται η εξίσωση 3.6 και αυτή με την σειρά της αλλάζει την τιμή του δείκτη διάθλασης όπως περιεγράφηκε στο 3.4.7. Η παράμετρος Chirp είναι που καθορίζει το πλέγμα το οποίο δεν έχει ίδια απόσταση καθώς δεν είναι ομοιόμορφο (uniform). Αυτός ο παράγοντας θα επηρεάσει με την σειρά του το μήκος κύματος Bragg αφού επηρεάζεται από την κατανομή του ενεργού δείκτη διάθλασης και της περιόδου του πλέγματος Λ .

4.6.4 Επιρροή του «Number of segments» - Αριθμός Τμημάτων στην αντιμετώπιση της διασποράς

Αναφερθήκαμε στην αριθμό των τμημάτων σε ένα πλέγμα Bragg μια οπτικής ίνας CFBG, ότι είναι ο αριθμός των διακριτών τμημάτων που συνθέτουν τη δομή του πλέγματος. Κάθε τμήμα έχει μια ελαφρώς διαφορετική περίοδο ή ρυθμό chirp, που οδηγεί σε μια χωρικά μεταβαλλόμενη διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης κατά μήκος του πλέγματος.

Πειραματικά διαπιστώσαμε και εμείς ότι ένας μέτριος αριθμός τμημάτων κοντά στο 100 θα μπορούσε να διατηρήσει μια καλή ισορροπία μεταξύ της φασματικής απόκρισης και της πολυπλοκότητας κατασκευής. Επίσης διαπιστώθηκε ότι επηρεάζοντας των αριθμό τμημάτων σε ένα πλέγμα Bragg δεν τροποποιήθηκε το διάγραμμα οφθαλμού ούτε ο δείκτης Max. Q Factor. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις σχετικές μετρήσεις.

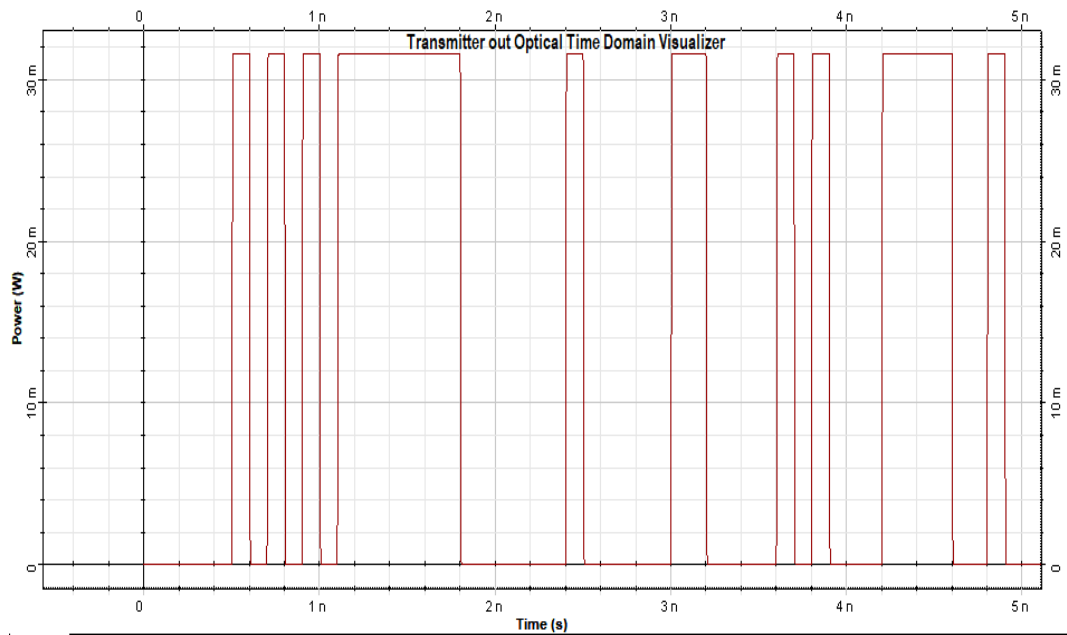
Πίνακας 5 Σχηση Number of segments με Q.

Number of segments	Max. Q Factor dB	Χρονος απόκρισης Optisystem
0	7,8	17'
5	13,27	17'
10	13,27	17'
100	13,27	18'
500	13,27	23'
1000	13,27	31'

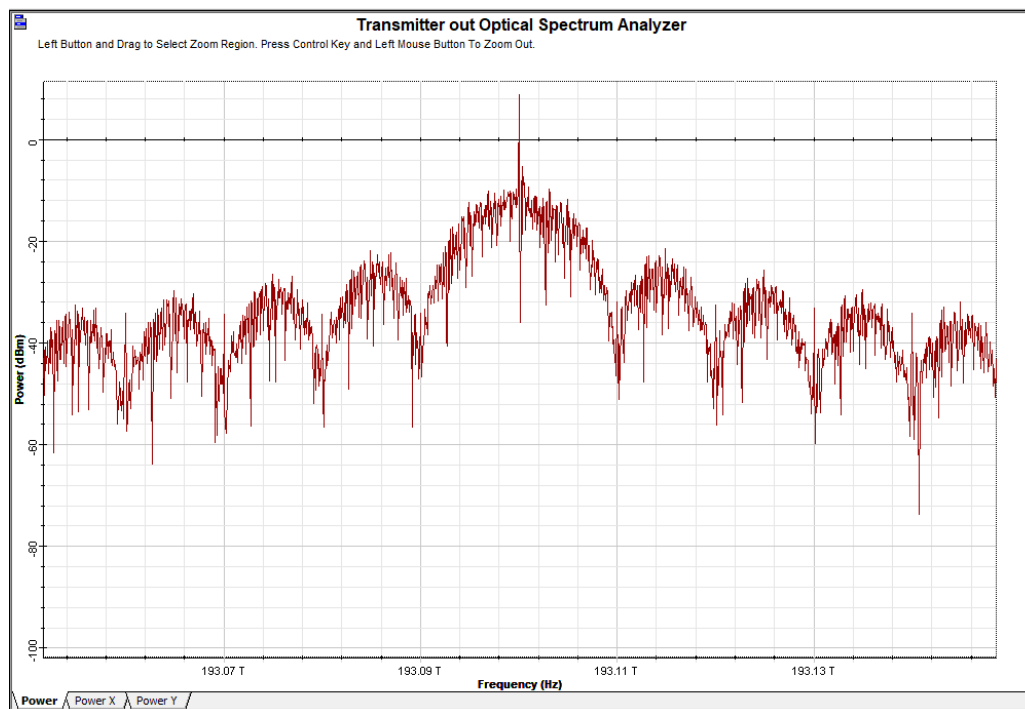
4.7 Μετρήσεις

4.7.1 Μετρήσεις Εξόδου Πομπού

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG

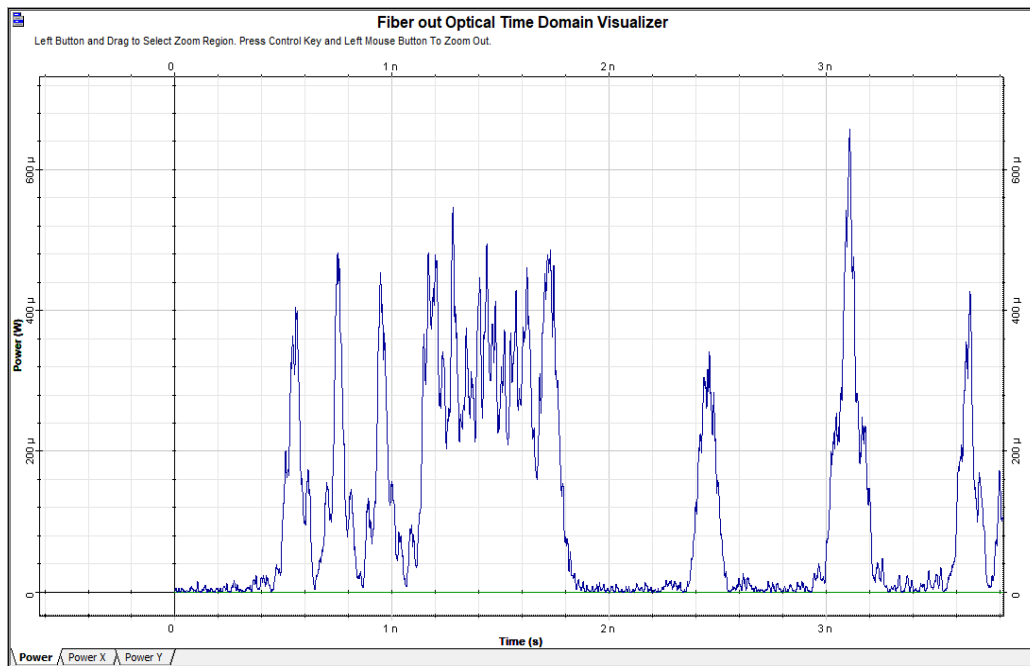


Σχήμα 15 Οπτικό σήμα στην έξοδο του πομπού.



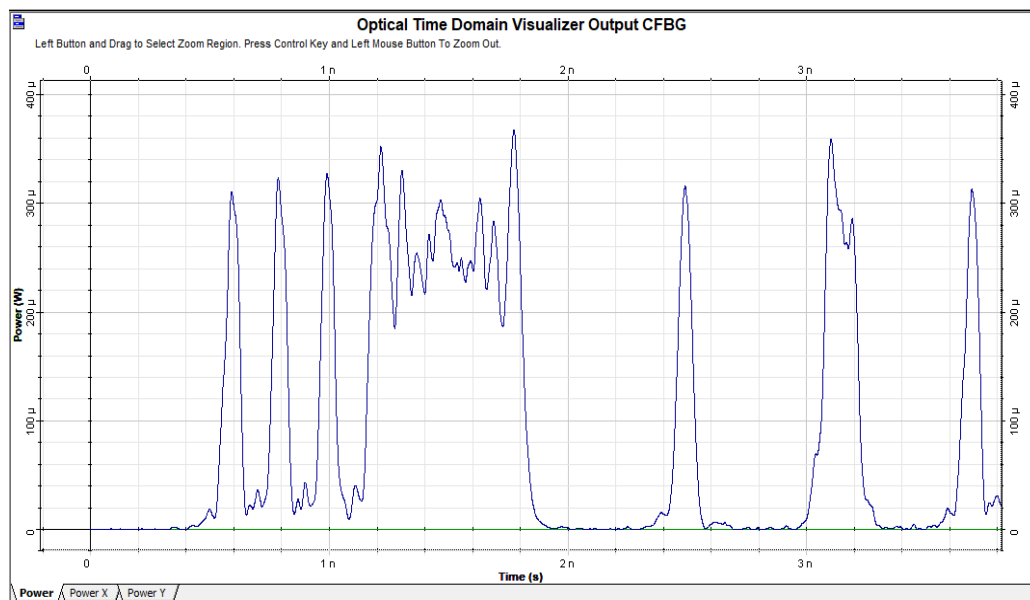
Σχήμα 16 Φάσμα οπτικού σήματος στην έξοδο του πομπού.

4.7.2 Μετρήσεις Εξόδου Οπτικής Ίνας



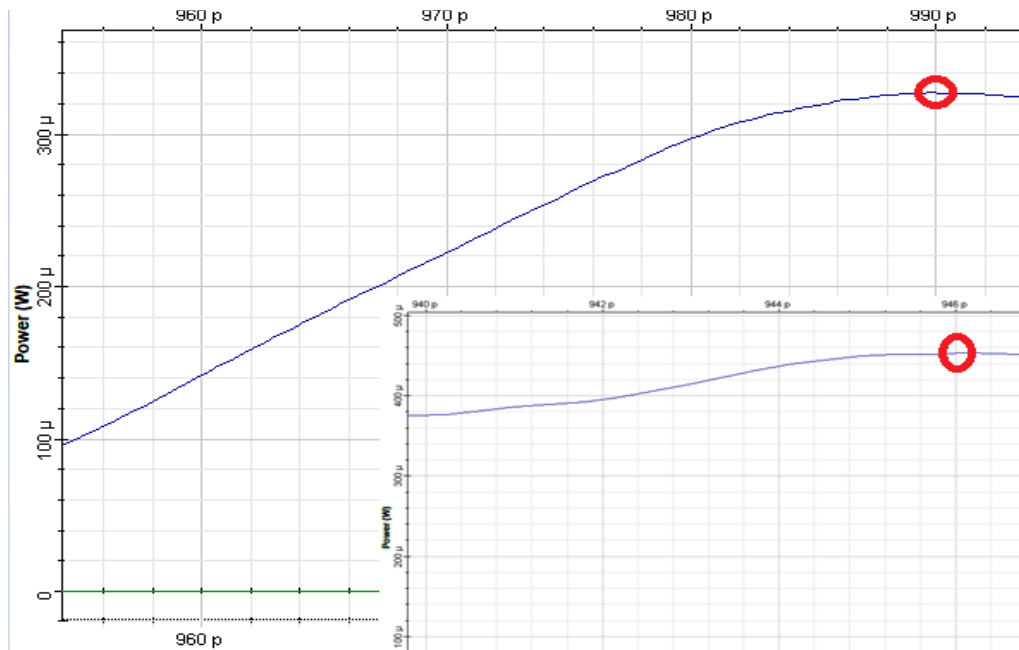
Σχήμα 17 Οπτικό σήμα στην έξοδο της οπτικής ίνας.

4.7.3 Μετρήσεις Εξόδου CFBG Ίνας



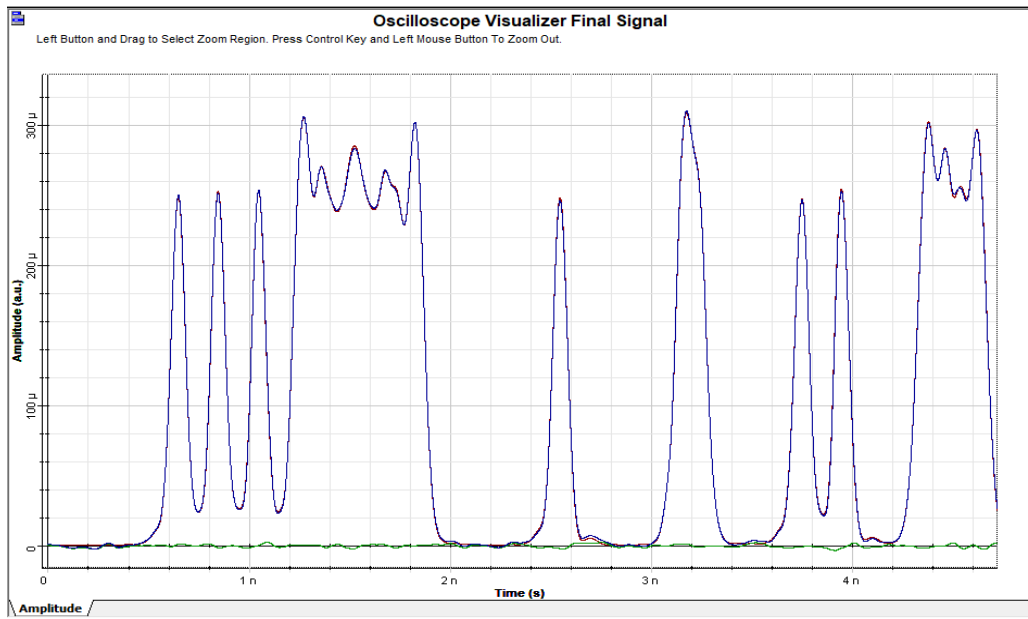
Σχήμα 18 Οπτικό σήμα στην έξοδο της CFBG οπτικής ίνας δε διόρθωση
στην χρωματική διασπορά.

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε ότι παρατηρούμε μια μικρή χρονική καθυστέρηση στον παλμό της τάξης των 46ps. Αυτό είναι απολύτως δικαιολογημένο καθώς εισάγονται μικροκαθυστερήσεις λόγω των διατάξεων του κυκλώματος. Όπως επίσης και ελάττωση της ισχύος καθώς διέρχόμενο από την CFBG υπόκειται σε περαιτέρω εξασθένηση κάτι το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί με προσθήκη ενισχυτή ερβίου EDFA.



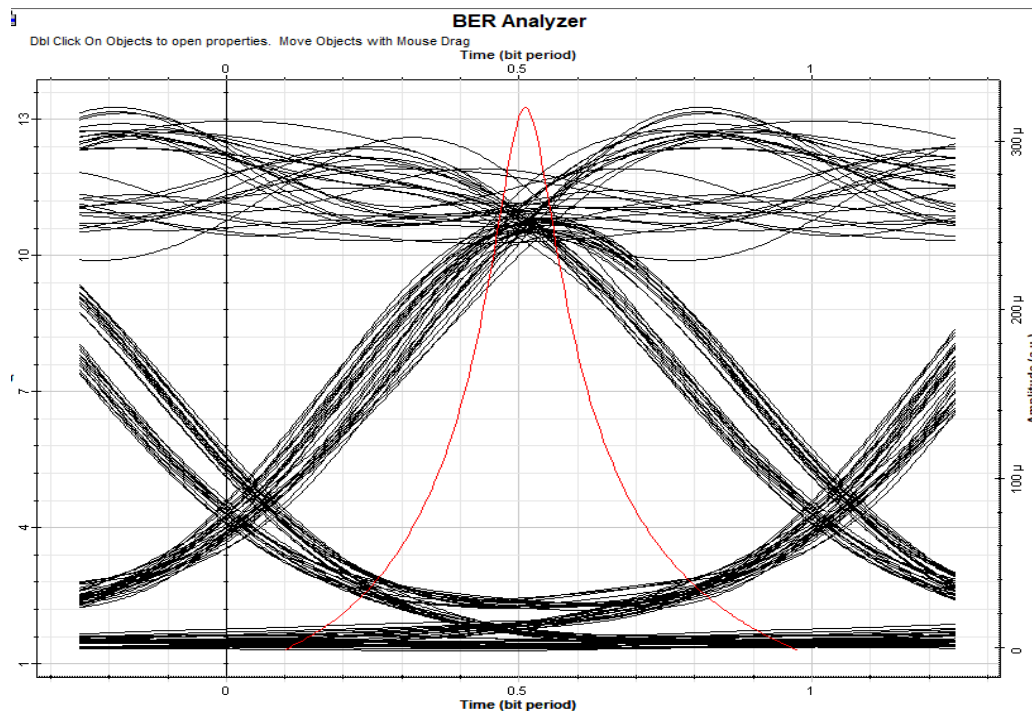
Εικόνα 29 Απεικόνιση χρονικής καθυστέρησης λόγω διάταξης.

4.7.4 Μετρήσεις Τελικού Σήματος



Σχήμα 19 Τελικός λαμβανόμενος παλμός αφού έχει διέλθει και μέσω χαμηλοπερατού φίλτρου Bessel.

4.7.6 Διάγραμμα οφθαλμού Q factor / BER



Εικόνα 30 Διάγραμμα οφθαλμού με διορθωμένη την χρωματική διασπορά.

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG

Για την διερεύνηση της συμβολής στην αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς με την χρήση ίνας CFBG στο εν λόγω σύστημα θα αφαιρέσουμε την CFBG ίνα και θα παρατηρήσουμε το διάγραμμα οφθαλμού καθώς και τον παλμό στην έξοδο σε σύγκριση με τις αρχικές μετρήσεις.

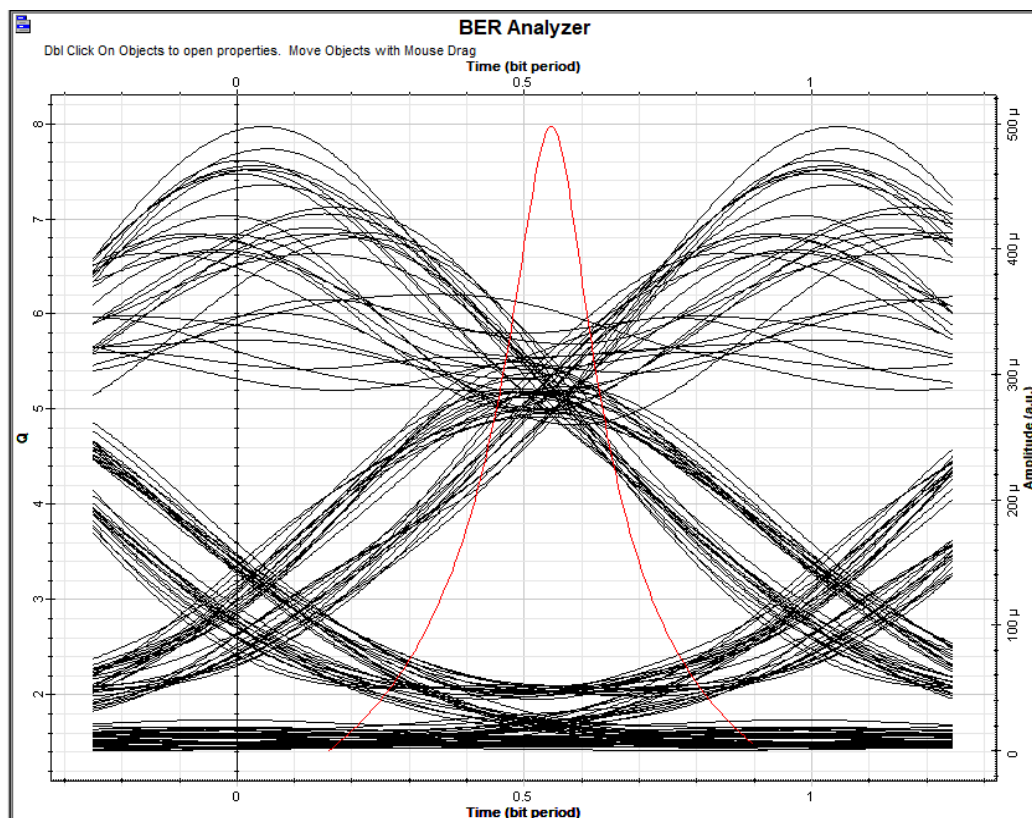
ΧΩΡΙΣ CFBG

Max. Q Factor	7.9679
Min. BER	8.00457e-016
Eye Height	0.000166221
Threshold	0.000144712
Decision Inst.	0.546875

ΜΕ CFBG

Max. Q Factor	13.2617
Min. BER	1.92988e-040
Eye Height	0.000187267
Threshold	0.000133552
Decision Inst.	0.511719

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΦΘΑΛΜΟΥ ΧΩΡΙΣ CFBG

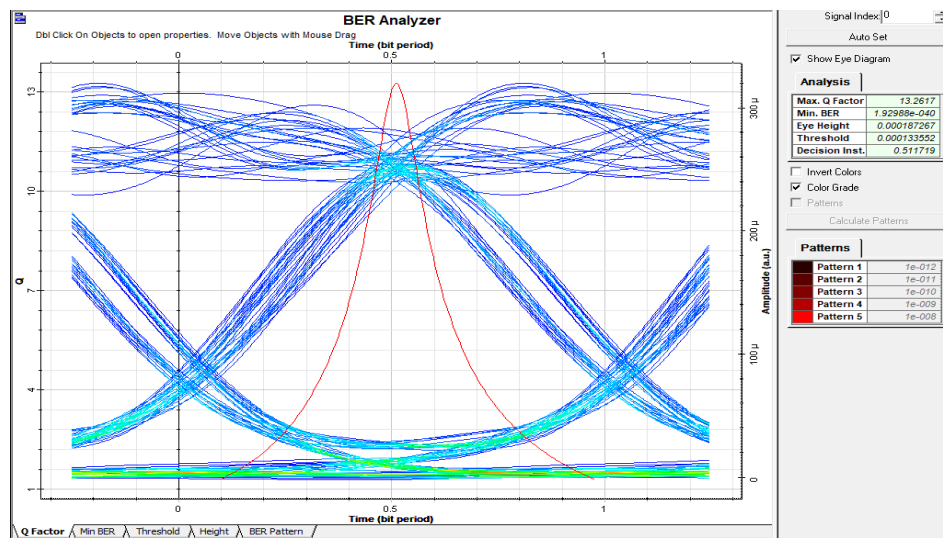


Εικόνα 31 Απεικόνιση διαγράμματος οφθαλμού χωρίς την συμβολή της CFBG.

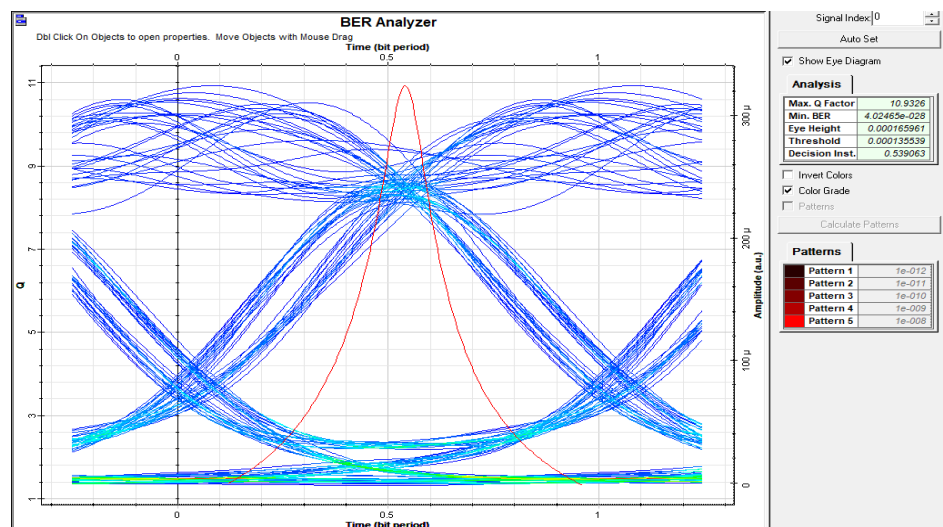
4.8 Αλλαγές παραμέτρων

4.8.1 Αλλαγή είδος φραγμάτων Chirp CFBG

Στην ενότητα αυτή θα παρατηρήσουμε τις αλλαγές που εμφανίζονται στην αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς με αλλαγή του είδος των φραγμάτων Chirp CFBG. Αναφερθήκαμε στο 3.4.7. ότι ο ενεργός δείκτης διάθλασης $n_{\text{eff}}(z)$ επηρεάζεται από το είδος των φραγμάτων Chirp. Έτσι έχουμε το γραμμικό chirp (linear chirp), το τετραγωνικό chirp (Quadratic chirp), τη συνάρτηση τετραγωνικής ρίζας (Square root) και η συνάρτηση κυβικής ρίζας (Cubic root). Το πώς επηρεάζουν στην πράξη την αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς φαίνεται παρακάτω.

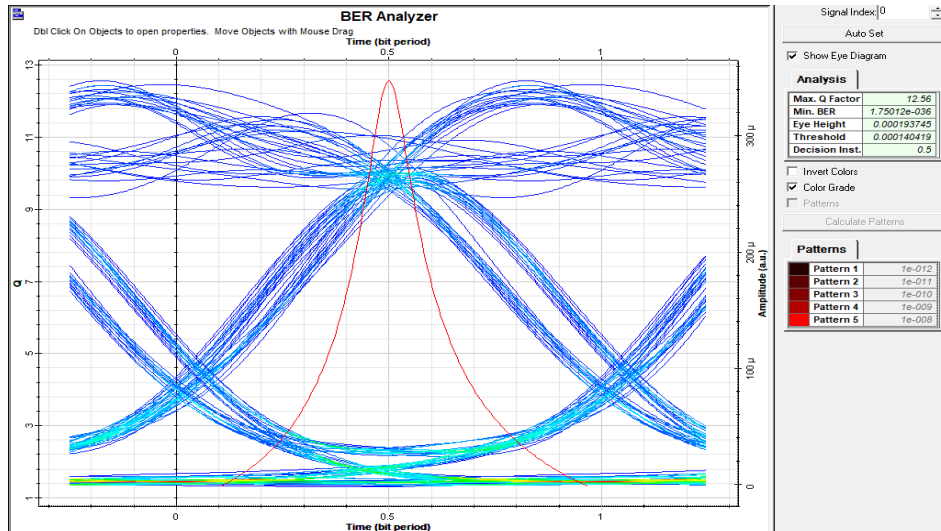


(α)

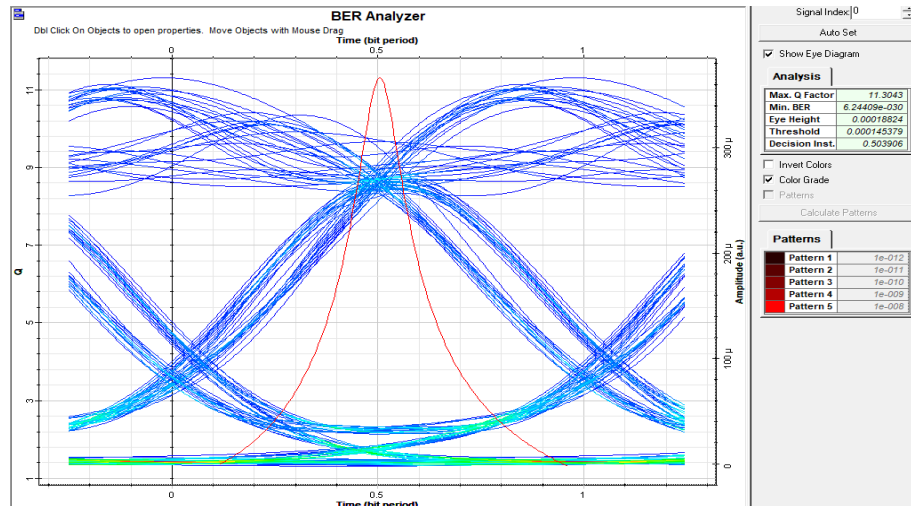


(β)

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG



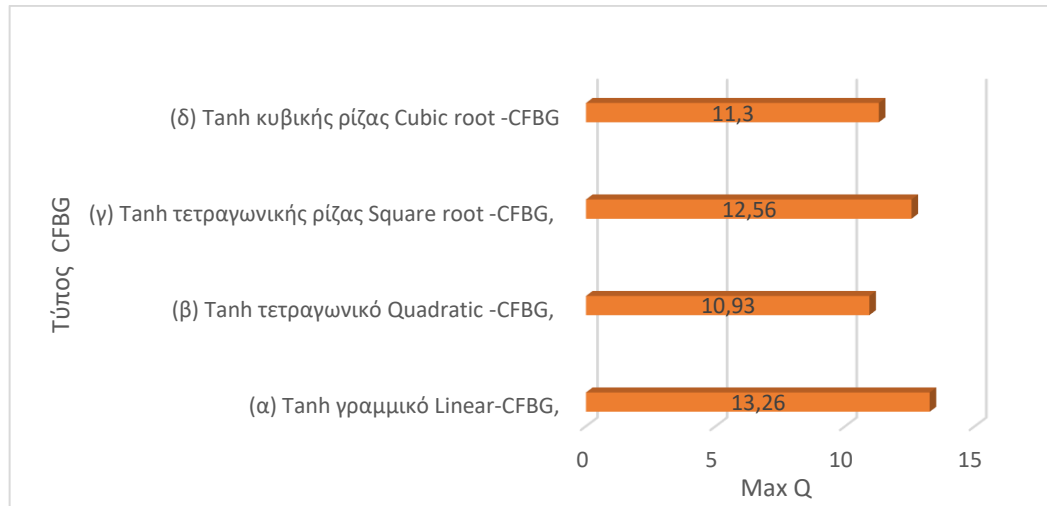
(γ)



(δ)

Εικόνα 32 (α) Tanh γραμμικό Linear-CFBG, (β) Tanh τετραγωνικό Quadratic -CFBG, (γ) Tanh τετραγωνικής ρίζας Square root -CFBG, (δ) Tanh κυβικής ρίζας Cubic root -CFBG.

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG



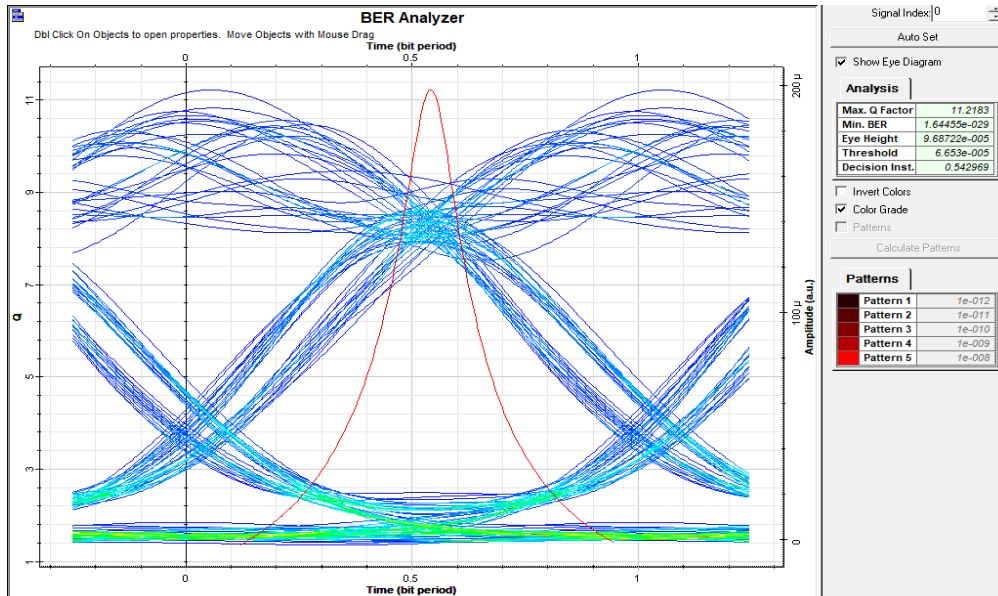
Σχήμα 20 Γραφική αποτύπωση αποτελεσματικότερου τύπου CFBG.

Διαπιστώθηκε ότι ο συντελεστής ποιότητας σήματος του Tanh Linear-CFBG είναι 13.26 dB και είναι το καλύτερο από τους άλλους 3 τύπους CFBG, ενώ το τετραγωνικό Quadratic-CFBG έλαβε τη χειρότερη τιμή του παράγοντα Q σε σύγκριση με άλλους τύπους CFBG. Αυτό καθιστά σαφές ότι για την παρούσα υλοποίηση με συγκεκριμένες απαιτήσεις εφαρμογής και επιθυμητή λειτουργικότητα η γραμμική CFBG αποδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα. Τα γραμμικά-CFBG μπορούν να παρέχουν αποτελεσματική αντιστάθμιση διασποράς ευρυζωνικότητας σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Το γραμμικό προφίλ chirp επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο και τον χειρισμό των χαρακτηριστικών διασποράς. Έχουν απλή σχεδίαση και κατασκευή και δεν εμφανίζουν γραμμικά εφέ. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου CFBG εξαρτάται από παράγοντες όπως τα επιθυμητά χαρακτηριστικά διασποράς, οι απαιτήσεις εύρους ζώνης, οι περιορισμοί κατασκευής και οι συγκεκριμένες ανάγκες του συστήματος.

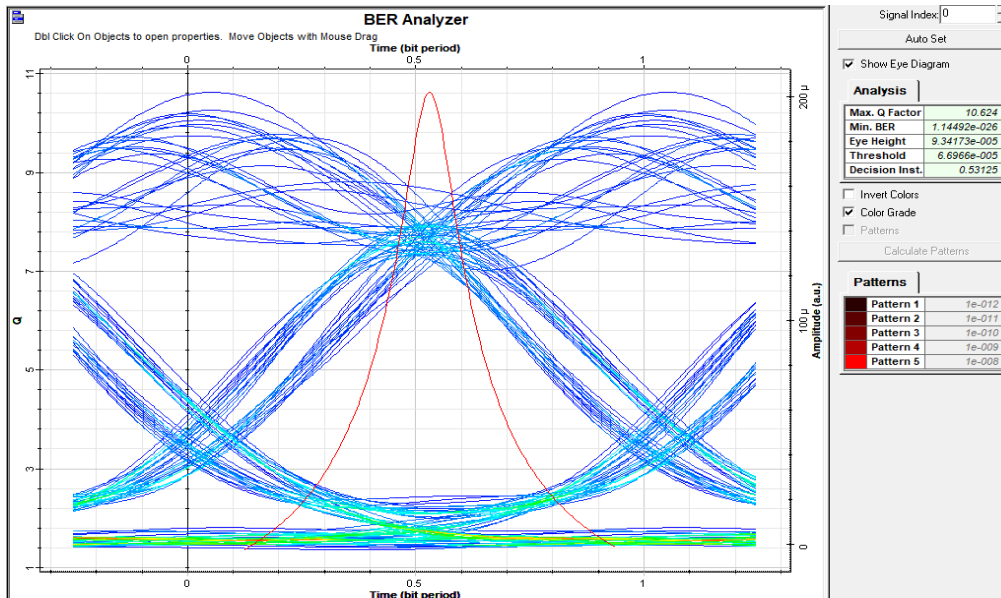
4.8.2 Gaussian Προφίλ Apodization

Στο 4.8.1 εξετάσαμε πως συμπεριφέρεται το προφίλ Tanh σε διαφορετικούς τύπους CFBG. Στην ενότητα αυτήν παρουσιάζουμε την αντίστοιχη έρευνα για διαφορετικό προφίλ και τύπο CFBG και τα συγκρίνουμε με τα αποτελέσματα του 4.8.1.

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG

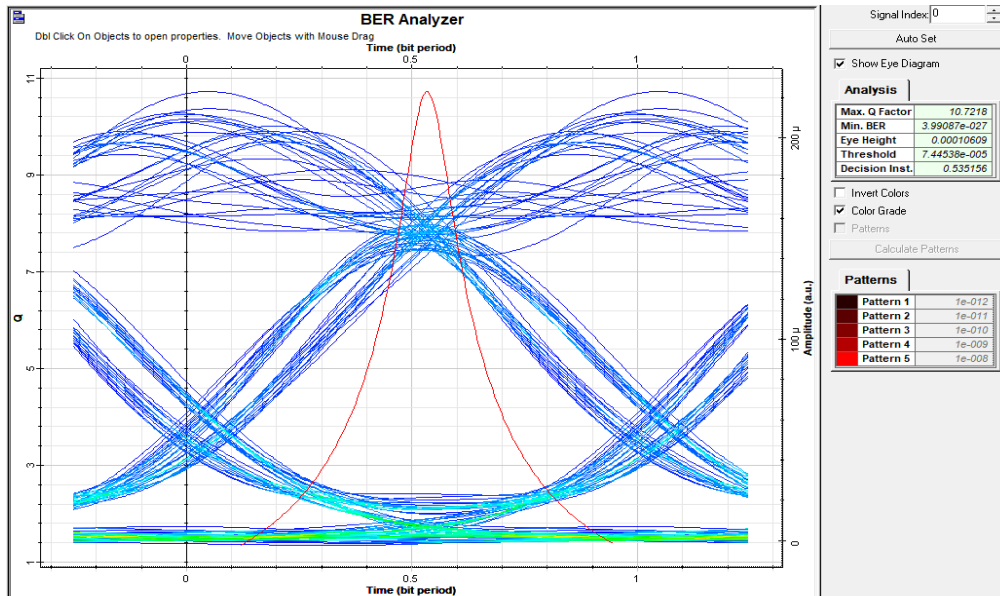


(α)

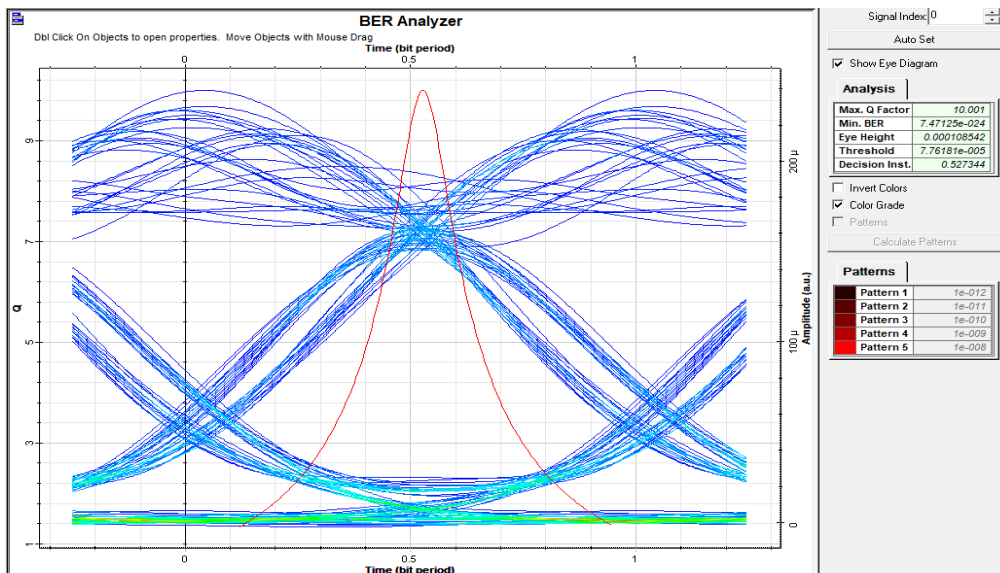


(β)

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG



(γ)



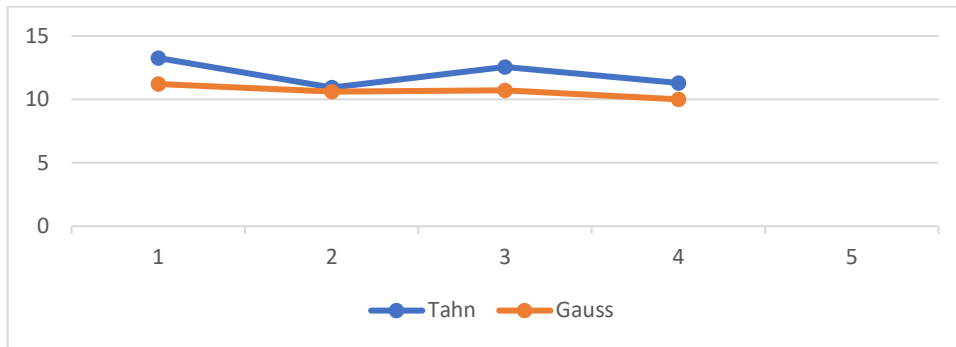
(δ)

Εικόνα 33 (α) Gauss γραμμικό Linear-CFBG, (β) Gauss τετραγωνικό Quadratic -CFBG, (γ) Gauss τετραγωνικής ρίζας Square root -CFBG, (δ) Gauss κυβικής ρίζας Cubic root -CFBG.

Από την μελέτη των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ο εξής πίνακας συγκρινόμενος πάντα με το Than προφίλ Arodization.

Πίνακας 6 Ανάλυση οφθαλμικού διαγράμματος για Tahn και Gauss – CFBG.

CFBG	Max. Q		Min. BER	
	Tahn	Gauss	Tahn	Gauss
Γραμμικό Linear-CFBG	13,26	11,21	1,92 e-40	1,64e-29
Τετραγωνικό Quadratic	10,93	10,62	4,02 e-28	1,14e-26
Τετραγωνική ρίζα Square root - CFBG	12,56	10,72	1,75 e-36	3,99 e-27
Κυβικής ρίζας Cubic root -CFBG	11,30	10,00	6,24 e-30	7,47 e-24



Σχήμα 21 Αποτύπωση πλεονεκτήματος Tahn προφίλ Apodization.

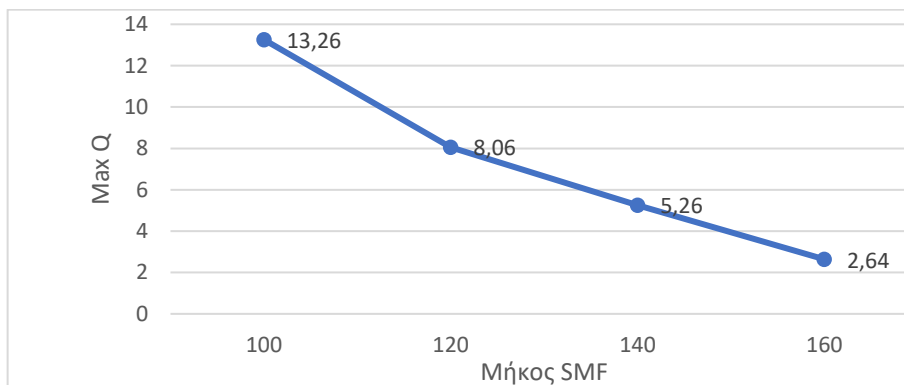
Παρατηρούμε ότι σε όλους τους τύπους CFBG και με το Tahn προφίλ πετυχαίνουμε καλύτερες τιμές Q. Καταρχήν η επιλογή μεταξύ ενός προφίλ apodiaztion υπερβολικής εφαπτομένης (Tanh) και ενός προφίλ Gaussian σε CFBG εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και τους στόχους της εφαρμογής. Από εκεί και πέρα το προφίλ Tahn γενικά προσφέρει καλύτερη καταστολή πλευρικού λοβού σε σύγκριση με το προφίλ Gauss και μειωμένη απώλεια εισαγωγής. Το προφίλ Tahn μπορεί να παρέχει μικρότερη απώλεια εισαγωγής σε σύγκριση με το προφίλ Gaussian. Η απώλεια εισαγωγής αναφέρεται στην απώλεια ισχύος που υφίσταται το σήμα καθώς διέρχεται από το FBG. Το προφίλ Tahn μπορεί να επιτύχει χαμηλότερη απώλεια εισαγωγής λόγω της ομαλότερης μετάβασής του στη διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης, με αποτέλεσμα να έχει βελτιωμένη απόδοση μετάδοσης σήματος. Συμπερασματικά το προφίλ εξαρτάται από παράγοντες όπως η επιθυμητή φασματική απόκριση, οι απαιτήσεις καταστολής των πλευρικών λοβών, οι εκτιμήσεις κατασκευής και οι στόχοι διαχείρισης διασποράς.

4.8.3 Αλλαγή μήκους CFBG

Από τις λαμβανόμενες μετρήσεις καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι για την παρούσα διάταξη το Than apodization προφίλ με χρήση Linear τύπου CFBG επιτυγχάνει τις χαμηλότερες απώλειες ενώ εμφανίζει υψηλότερο Q και χαμηλότερο BER. Έτσι με αυτές τις ρυθμίσεις στην ίνα αντιστάθμιση της διασποράς CFBG θα μεταβάλουμε τόσο το μήκος της οπτικής ίνας SMF όσο και το μήκος της CFBG ίνας προς μελέτη των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 7 Αλλαγή παραμέτρων Q και BER συνάρτηση του μήκους της ίνας SMF.

Μήκος SMF (Km)	Μήκος CFBG (mm)	Max. Q	Min. BER
100	10	13,26	1,92 e-40
120	10	8,06	3,70 e-18
140	10	5,26	8,28 e -08
160	10	2,64	0,0039



Σχήμα 22 Αποτύπωση Q συνάρτηση του μήκους της ίνας SMF.

Αποτύπωση δεδομένων σε γράφημα που υποδηλώνει ότι η αύξηση του μήκους της οπτικής ίνα χωρίς παραμετροποίηση της CFBG εισάγει επιπλέον χρωματική καθυστέρηση και ως αποτέλεσμα έχουμε αλλοίωση του Q (λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου) άρα και χαμηλότερο ποσοστό σφάλματος BER.

Αυξάνοντας το μήκος της CFBG και παραμετροποιώντας ελαφρώς την παράμετρο Chirp θα περιμένουμε να δούμε βελτίωση του Q αφού θα αντιμετωπιστεί μερικώς η χρωματική διασπορά καθώς θα εισάγουμε περισσότερα ms καθυστέρηση με την αύξηση του μήκους CFBG. Επίσης θα αλλάξουμε την παράμετρο Chirp που καθορίζει το πλέγμα το οποίο δεν έχει ομοιόμορφη απόσταση καθώς έχουμε επιλέξει Than προφίλ apodization και όχι Uniform. Αυτός ο παράγοντας θα επηρεάσει με την σειρά του το μήκος

κύματος Bragg αφού επηρεάζεται από την κατανομή του ενεργού δείκτη διάθλασης όπως αναλύσαμε στην ενότητα 3.4.7.

Πίνακας 8 Αποτελέσματα Q, BER αλλάζοντας μόνο το μήκος της CFBG.

	Μήκος SMF (Km)	Μήκος CFBG (mm)	Max. Q	Min. BER
Πριν την παραμετροποίηση	140	10	5,26	8,28 e -08
Μετά την παραμετροποίηση	140	15	8,25	7,19 e -17

Παρατηρούμε μια βελτίωση της τάξης του 56% περίπου, ωστόσο πρέπει να πετύχουμε έναν λόγω ισχύος σήματος προς ισχύ θορύβου πάνω από 10 ώστε να έχουμε ένα αποδεκτό αποτέλεσμα. Έτσι μειώνουμε την παράμετρο chirp ώστε να αλλάξουμε το λ_{Bragg} αφού την αύξηση του μήκους της SMF έχουμε αύξηση της χρωματικής διασποράς. Έτσι για τιμή Linear Parameter από $0,0001\mu\text{m}$ μειώνουμε στα $8 \times 10^{-5} \mu\text{m}$.

Πίνακας 9 Αποτελέσματα Q, BER αλλάζοντας επιπροσθέτως του μήκους της CFBG και το Linear Parameter της CFBG.

Linear Param.	Μήκος SMF (Km)	Μήκος CFBG (mm)	Max. Q	Min. BER
$8 \times 10^{-5} \mu\text{m}$	140	15	9,41	2.25 e -21

Τέλος η εισαγωγή 40Km οπτικής ίνας SMF εισάγει επιπλέον εξασθένιση και αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη και να διορθωθεί με την προσθήκη οπτικού ενισχυτή, όπως τον οπτικό ενισχυτή ερβίου.

Οι οπτικοί ενισχυτές ερβίου (EDFA) βασίζονται στην αρχή της διεγερμένης εκπομπής. Τα ιόντα ερβίου που είναι ενσωματωμένα στην ίνα διεγείρονται σε κατάσταση υψηλότερης ενέργειας χρησιμοποιώντας ένα λέιζερ αντλίας, που συνήθως λειτουργεί σε μήκος κύματος περίπου 980 nm ή 1480 nm. Όταν ένα οπτικό σήμα σε διαφορετικό μήκος κύματος, εντός του εύρους ενίσχυσης του ερβίου (συνήθως στην περιοχή των 1550 nm για τηλεπικοινωνίες), διέρχεται από την ίνα με πρόσμιξη ερβίου, τα διεγερμένα ιόντα ερβίου απελευθερώνουν ενέργεια με τη μορφή πρόσθετων φωτονίων που είναι συνεκτικά και σε φάση με το σήμα πρόσπτωσης. Αυτή η διαδικασία ενισχύει το οπτικό σήμα χωρίς την ανάγκη μετατροπής σε ηλεκτρικό σήμα. Τα EDFA προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών όπως το υψηλό κέρδος, ευρύ εύρος ενίσχυσης που καλύπτουν φάσμα των ζωνών C και L του οπτικού φάσματος. Έχουν χαμηλό θόρυβο, δηλαδή εισάγουν ελάχιστο πρόσθετο θόρυβο κατά τη διαδικασία ενίσχυσης, ενώ είναι πλήρως συμβατοί με πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM), επιτρέποντας την ταυτόχρονη ενίσχυση πολλαπλών οπτικών

σημάτων σε διαφορετικά μήκη κύματος [45], [46]. Έτσι στο τελικό αποτέλεσμα πετυχαίνουμε Max Q 11,77dBm από 5,26dBm βελτίωση σε ποσοστό 126%.

Πίνακας 10 Αποτελέσματα Q, BER προσθέτοντας και οπτικό ενισχυτή
EDFA.

Linear Param.	Μήκος SMF (Km)	Μήκος CFBG (mm)	Max. Q	Min. BER
$8 \times 10^{-5} \mu\text{m}$	140	15	11,77	2.65 e -29

4.8.4 Προσθήκη βαθμίδας CFBG

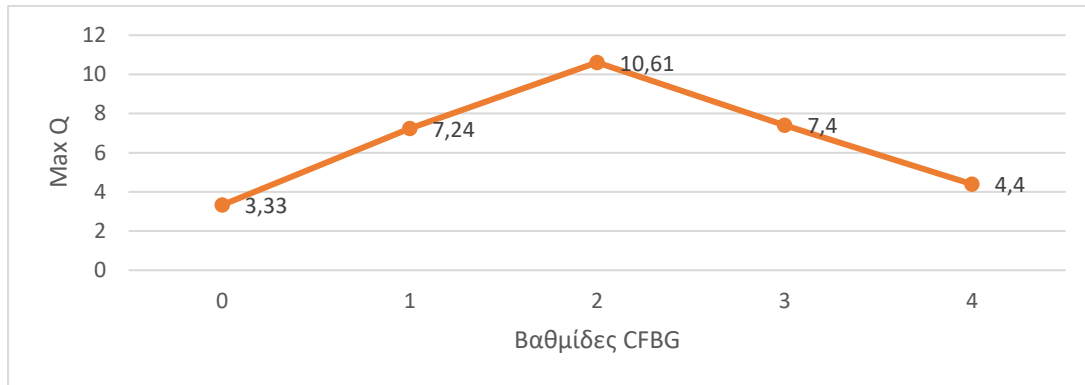
Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης της χρωματικής διασποράς ειδικά σε συστήματα οπτικών ινών μεγάλων αποστάσεων είναι η προσθήκη βαθμίδων CFBG ινών. Έτσι είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια μονάδα αντιστάθμισης διασποράς που μπορεί να ακυρώσει αποτελεσματικά την χρωματική διασπορά. Κάθε CFBG έχει σχεδιαστεί για να αντανakλά ένα συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος φωτός και να αντισταθμίζει τη διασπορά του συγκεκριμένου εύρους. Επομένως, χρησιμοποιώντας πολλές βαθμίδες CFBG με διαφορετικές ιδιότητες ανακλαστικότητας, η συνολική μονάδα αντιστάθμισης διασποράς μπορεί να αντιμετωπίσει ένα ευρύτερο εύρος μηκών κύματος, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική αντιστάθμιση διασποράς σε μεγαλύτερη φασματική περιοχή. Αυτή η τεχνική μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα και την εμβέλεια των συστημάτων οπτικής επικοινωνίας.

Στην παρούσα διάταξη θα προσπαθήσουμε να αντιμετωπίσουμε την διασπορά με χρήση και δεύτερης βαθμίδας εξετάζοντας τα αποτελέσματα. Για να είναι απόλυτα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα θα αυξήσουμε την ισχύ του παραγόμενου Laser από 15 dBm σε 18 dBm για την αντιμετώπιση της εξασθένησης του οπτικού σήματος λόγω αύξησης του μήκους της ίνας SMF.

Πίνακας 11 Αποτελέσματα Q, BER χωρίς CFBG, με μια ή περισσότερες
βαθμίδες CFBG's.

Βαθμίδες CFBG	Μήκος SMF (Km)	Μήκος CFBG (mm)	Max. Q	Min. BER
0	140	0	3,33	0,00031
1	140	10	7,24	1,87 e-13
2	140	10	10,61	1,11 e-26
3	140	10	7,40	5,37 e-14
4	140	10	4,40	4,60 e-06

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG



Σχήμα 23 Γραφική απεικόνιση σχέσης Q ανά βαθμίδες CFBG.

Συμπερασματικά παρατηρούμε ότι μέχρι και την προσθήκη δεύτερης βαθμίδας CFBG έχουμε διόρθωση της χρωματικής διασποράς. Από εκεί και πέρα όμως εισάγεται μεγαλύτερη καθυστέρηση από αυτήν που χρειάζεται για την αντιστάθμιση της διασποράς, με αποτέλεσμα από την τρίτη βαθμίδα CFBG και μετά να μειώνεται το Q καθώς προσθέτουμε επιπλέον καθυστέρηση χωρίς αυτή να αντισταθμίζεται. Ο αριθμός των CFBG που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία οπτική σύνδεση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:

Το διαθέσιμο οπτικό εύρος ζώνης. Κάθε FBG αντανακλά ένα στενό εύρος ζώνης φωτός που επικεντρώνεται γύρω από ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Εάν ο απαιτούμενος αριθμός FBG υπερβαίνει το διαθέσιμο οπτικό εύρος ζώνης, ενδέχεται να μην είναι εφικτή η χρήση όλων αυτών σε μια ενιαία οπτική σύνδεση.

Τα διάστημα καναλιών. Η απόσταση των καναλιών καθορίζει τον διαχωρισμό μεταξύ γειτονικών μηκών κύματος. Στα WDM, όπου πολλαπλά οπτικά κανάλια μεταδίδονται ταυτόχρονα σε μία μόνο οπτική ίνα, ο αριθμός των CFBG's που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από την απόσταση καναλιών και τον επιθυμητό αριθμό διαφορετικών καναλιών στο σύστημα.

Τέλος η ποιότητα σήματος. Καθώς ο αριθμός των CFBG's αυξάνεται σε μια οπτική σύνδεση, μπορεί να προκαλέσει πρόσθετες απώλειες, παρεμβολές ή φαινόμενα διασποράς. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική ποιότητα του σήματος.

4.8.5 Μεταβολή του bit rate και αντιμετώπιση χρωματικής διασποράς

Γενικά σε όλα τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών, ο ρυθμός μετάδοσης bit αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία μεταδίδονται τα δεδομένα ανά δευτερόλεπτο (bps). Η αύξηση του ρυθμού bit μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος, όπως αυτή μπορούμε να την μετρήσουμε από τον παράγοντα Q. Η σχέση μεταξύ του ρυθμού bit και του παράγοντα Q επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως ο θόρυβος,

η διασπορά και η μη γραμμικότητα. Για να γίνει σαφέστερο αυτό, θα εξηγήσουμε ότι:

Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός bit, τα φαινόμενα διασποράς γίνονται πιο έντονα. Η διασπορά προκαλεί εξάπλωση του οπτικού σήματος, οδηγώντας σε παρεμβολές μεταξύ συμβόλων (ISI) και υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος. Έτσι μειώνεται ο παράγοντας Q καθώς οι μεγαλύτεροι ρυθμοί bit επιδεινώνουν την επίδραση της διασποράς.

Οι μη γραμμικότητες στην ίνα, όπως η διαμόρφωση αυτοφάσης και η ανάμειξη τεσσάρων κυμάτων, γίνονται πιο σημαντικές σε υψηλότερους ρυθμούς bit. Αυτά τα φαινόμενα μπορεί να προκαλέσουν παραμόρφωση και υποβάθμιση του σήματος, μειώνοντας τον παράγοντα Q [47].

Σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης bit, η επίδραση του θορύβου, όπως ο θόρυβος ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής (ASE) και ο θερμικός θόρυβος, γίνονται πιο έντονες. Αυτός ο θόρυβος μπορεί να υποβαθμίσει την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) και να μειώσει τον παράγοντα Q.

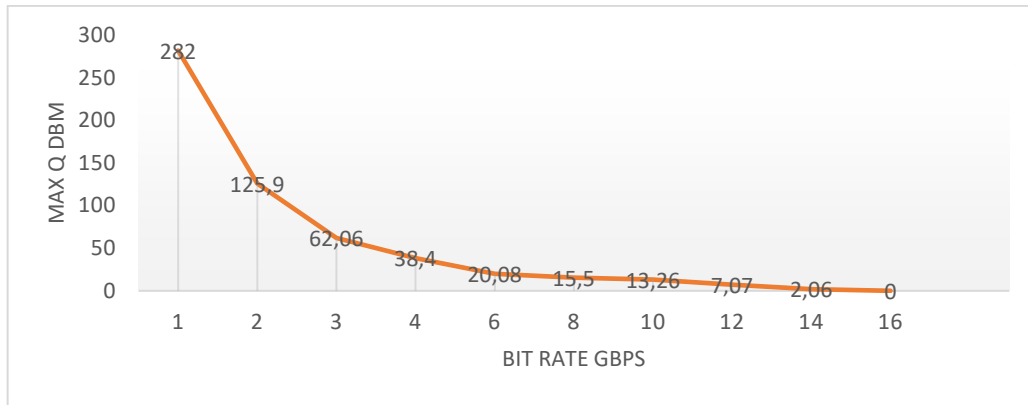
Τέλος οι υψηλότεροι ρυθμοί bit απαιτούν πιο προηγμένους και ευαίσθητους δέκτες για την ακριβή ανίχνευση των σημάτων. Η απόδοση του δέκτη, συμπεριλαμβανομένου του θορύβου και της ευαισθησίας ανίχνευσης, μπορεί να επηρεάσει τον παράγοντα Q [48].

Αναλύοντας τα παραπάνω θα πρέπει να παρατηρήσουμε μια μείωση του παράγοντα Q όσο αυξάνεται το bitrate. Στην προσομοίωση μας έχουμε χρησιμοποιήσει ρυθμό 10 Gbps. Θα ξεκινήσουμε από 1 Gbps ώστε να παρατηρήσουμε την μεταβολή αυτή.

Πίνακας 12 Σχέση Q και Bitrate.

Bit rate Gbps	Μήκος SMF (Km)	Μήκος CFBG (mm)	Max. Q	Min. BER
1	100	10	282	0
2	100	10	125,9	0
3	100	10	62,06	0
4	100	10	38,4	4,9 e-323
6	100	10	20,08	4,3 e-90
8	100	10	15,5	4,56 e-55
10	100	10	13,26	1,92 e-40
12	100	10	7,07	7,13 e-13
14	100	10	2,06	0,0045
16	100	10	0	0

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση στοιχείων CFBG



Σχήμα 24 Μείωση του Q όσο αυξάνεται το Bit rate.

Όπως περιεγράφηκε και παραπάνω για τους λόγους που αναφέρθηκαν η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης συντέλεσε καταστροφικά στην τιμή του Q σε σημείο που στα 16Gbps η τιμή του Q=0dBm. Αυτό ήταν αναμενόμενο με την αύξηση του ρυθμού. Στο σημείο αυτό είναι σημαντική η συμβολή μιας επιπλέον βαθμίδας CFBG όπου θα μας δώσει ένα θετικό αποτέλεσμα Q=3,57dBm. Από εκεί και πέρα για την επίτευξη τιμής Q άνω του 10 dBm θα πρέπει να προστεθούν και άλλες διατάξεις όπως οπτικός ενισχυτής ερβίου, κωδικοποιητής FEC (Forward Error Correction) για να βελτιωθεί η ικανότητα του συστήματος να ανιχνεύει και να διορθώνει σφάλματα καθώς και άλλες τεχνικές αναγέννησης οπτικού σήματος στο σύστημα για να βελτιωθεί η ποιότητα του οπτικού σήματος.

4.9 Συζήτηση & Συμπεράσματα

Με την χρήση οπτικών ινών επιτυγχάνουμε την μετάδοση του οπτικού σήματος σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και με μεγάλες ταχύτητες. Η χρωματική διασπορά που εισάγεται στο σύστημα, αντιμετωπίζεται πλέον ικανοποιητικά με την χρήση των ινών CFBG. Σε αυτή την εργασία διαπιστώσαμε ότι συγκεκριμένες παράμετροι καθορίζουν το πως η CFBG ίνα θα συμβάλει στην αντιμετώπιση ή μη της χρωματικής διασποράς. Ως σημείο αναφοράς ήταν ο παράγοντας Q καθώς ένας υψηλός παράγοντας Q σημαίνει μειωμένο BER κάτι το οποίο μας προσδιορίζει την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος.

Ο ενεργός δείκτης διάθλασης είναι μια τιμή που όσο αυξάνεται βελτιώνει την διάδοση του οπτικού κύματος στον κυματοδηγό, όμως μπορεί να πάρει τιμή από 1.4 έως 1.7 καθώς υπάρχουν κατασκευαστικοί περιορισμοί. Η περίοδος φράγματος ή αλλιώς περίοδος πλέγματος (grating) καθορίζει την απόσταση μεταξύ των φραγμάτων καθώς η ίνα CFBG δεν είναι ομοιόμορφη. Για τιμή 0.0001μm έχουμε μεγιστοποίηση του Q=13.27 dB, ενώ για λοιπές τιμές έχουμε καταστροφική συμβολή στην αντιμετώπιση της διασποράς αφού θέλουμε το grating να είναι ρυθμισμένο για συγκεκριμένο μήκος κύματος. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου CFBG είναι σημαντική και εξαρτάται από τα δεδομένα του συστήματος. Μελετώντας τα δεδομένα που έχουμε καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής ποιότητας σήματος

του Tanh Linear-CFBG είναι 13.26 dB με τιμή ανώτερη των άλλων τριών τύπων. Εκτός του τύπου της CFBG αναλύθηκε και το προφίλ Arodization για κάθε τύπο CFBG με ικανότερο για την αντιμετώπιση της διασποράς το Tanh με τιμή $Q=13.26$ dB έναντι 11,21dB για προφίλ Gauss και ίδιο τύπο Linear.

Διατηρώντας σταθερές τις παραπάνω παραμέτρους και αλλάζοντας τις τιμές τους, αντιμετωπίσαμε την χρωματική διασπορά σε μια ενδεχόμενη αύξηση της οπτικής ίνα από τα 100Km στα 140Km. Για την ίδιο σκοπό έγινε προσθήκη περισσοτέρων βαθμίδων CFBG όπου διαπιστώθηκε ότι 2 βαθμίδες CFBG είχαν καλύτερο $Q=10.61$ dB από την μία βαθμίδα $Q=7.24$ dB. Παρατηρήθηκε ότι για περισσότερες των τριών βαθμίδων το Q για τρεις βαθμίδες ήταν 7,7dB και για τέσσερις 4,4dB. Γενικά η χρήση πολλαπλών CFBG σε σειρά, το καθένα με διαφορετική περίοδο πλέγματος, είναι δυνατό να παράγει αντιστάθμιση διασποράς που μπορεί να αντισταθμίσει αποτελεσματικά τη διασπορά σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Όμως η διάταξη αυτή θέλει μελέτη καθώς ο αυξημένος αριθμός βαθμίδων μπορεί να οδηγήσει σε εισαγωγή επιπλέον καθυστέρησης. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως αντιστάθμιση διασποράς με χρήση CFBG (DC-CFBG).

Τέλος από την μελέτη της λειτουργίας των ινών CFBG και των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η χρήση CFBG ινών συμβάλουν αποτελεσματικά στην αντιμετώπιση της διασποράς, όμως πρέπει να είμαστε ακριβείς με τις τιμές των παραμέτρων καθώς υπάρχει ένα ανώτερο όριο όπου από εκεί και πάνω η συμβολή της CFBG είναι καταστροφική, καθώς εισάγει επιπλέον χρωματική διασπορά στο σύστημα και αποτέλεσμα αύξηση του BER και συνεπώς παραμόρφωση του λαμβανόμενου οπτικού σήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] A. A. Huurdeman, *The Worldwide History of Telecommunications*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [2] A. Patibandla, A. M. Guptha και m. Nagma, «FIBER OPTICAL COMMUNICATIONS,» Telangana State, India, Govt. of India, 2019.
- [3] T. H. MAIMAN, «Stimulated Optical Radiation in Ruby.,» *Nature* 187, p. 493–494, 06 August 1960.
- [4] S. E. Miller, «Communication by Laser,» *Scientific American*, τόμ. 214, αρ. 1, pp. 19-27, January 1966.
- [5] A. A. Jørgensen, Kong και Henriksen, «Petabit-per-second data transmission using a chip-scale microcomb ring resonator source.,» *Nature Communications*, τόμ. 16, p. 798–802, 20 October 2022.
- [6] Ν. Σταθόπουλος και Η. Σίμος, «Βοήθημα Εργαστηρίου Οπτικών Επικοινωνιών,» σε *Εργαστήριο Οπτικών Επικοινωνιών*, Αθήνα, 2020.
- [7] Wright, G. Logan , M. Zachary , P. M. Lushnikov, Z. Zhu, A. Eftekhar, M. Demetrios, Christodoulides και F. W. Wise, «Multimode nonlinear fiber optics: massively parallel numerical solver, tutorial, and outlook,» *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 24, τόμ. 24, αρ. 3, pp. 1-16, 2017.
- [8] G. Keiser, *Optical Communications Essentials*, United States of America: McGraw-Hill, 2003.
- [9] G. P. AGRAWAL, *Fiber-Optic Communication Systems*, Third επιμ., N.Y.: John Wiley & Sons, 2002.
- [10] Nagurka, E. Hodge και J. a. M. L, «AXIAL DEPOSITION CONTROL IN VAPOR-PHASE AXIAL DEPOSITION,» σε *2008 International Symposium on Flexible Automation*, Atlanta, 2008.
- [11] J. Harrington, *Infrared Fibers and Their Applications*, Bellingham, WA: SPIE Press, 2003, p. 312.
- [12] R. Cavalcante, P. J. Duda, A. Carvalho, W. Rossi και C. Costa Motta, «Numerical simulation on modified chemical vapor,» σε *2022 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*, 2022.
- [13] F. & E.-B. T. S. Effenberger, «Optical Switching and Networking,» *Passive optical networks (PONs)*, pp. 143-150, 2009.
- [14] S. F. A. a. K P Zetie, «How does a Mach–Zehnder,» σε *Physics Department*, London, SW1 3PB: Westminster School, 1999.

- [15] K. P. Zetie, S. F. Adams και R. M. Tocknell, «How does a Mach-Zehnder interferometer work,» *Physics Education*, τόμ. 35, αρ. 1, 2000.
- [16] A. D. Kersey, M. A. Davis, P. J. Heather, M. LeBlanc, P. K. Koo, G. C. Askins, M. A. Putnam και J. E. Friebele, «Fiber Grating Sensors,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, τόμ. 8, αρ. 15, pp. 1442-1463, 1997.
- [17] P. J. Lemaire και M. a. E. T. Hill, «Hydrogen-enhanced UV photosensitivity of optical fibers: Mechanisms and reliability,» *Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Glass Waveguides Fundamentals and Applications*, τόμ. 22, pp. 78-81, 9 September 1995.
- [18] M. M. Werneck, R. C. S. B. C. S. B. Allil και R. a. F. A. Bessie, *A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors*, Rio de Janeiro: Christian Cuadrado-Laborde, 2013.
- [19] L. Christen, O. Yilmaz, S. Nuccio και W. a. A. E. X. Willner, «Optical pseudo-random bit sequence generator using a dual-drive Mach-Zehnder modulator as a linear feedback shift register,» Newport Beach, 2008.
- [20] Y. Mao και C. a. W. L. Liu, «Design and FPGA Implementation of a Pseudo-Random Bit Sequence Generator Using Spatiotemporal Chaos,» σε *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, Guilin, 2006.
- [21] A. Rashed, Daher, S. Ahammad, P. Montalbo, V. Sorathiya, S. Asaduzzaman, H. Rehana και A. Zuhayer, «Non return to zero line coding with suppressed carrier in FSO transceiver systems under light rain conditions,» *Journal of Optical Communications.*, 2022.
- [22] Saghaei, Hamed, P. Elyasi και R. Karimzadeh, «Design, fabrication, and characterization of Mach-Zehnder interferometers,» *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, αρ. 37, 1 DEC 2019.
- [23] H. S. Phing, A. Jalil, R. Abdul Rahman και B. Ahmed Tahir, «Fiber Bragg grating modeling, simulation and characteristics,» *Journal of Fundamental Sciences*, pp. 167-175, 10 July 2007.
- [24] J. PALANLATPAN, *The use of a CFBG sensor for detecting damage in composite laminates and adhesively bonded joints*, University of Surrey, January 2008.
- [25] I. Nsengiyumva, M. Elijah και G. Kamuch, «Performance Analysis of a Linear Gaussian- and tanh-Apodized FBG and Dispersion Compensating Fiber Design for Chromatic Dispersion Compensation in Long-haul Optical Communication Networks,» *Hindawi International Journal of Optics*, 3 July 2022.
- [26] T. Saktioto, K. Ramadhan, Y. Soerbakti και D. Irawan, «Integration of Chirping and Apodization of TOPAS Materials for Improving the Performance of Fiber Bragg Grating Sensors,» *Journal of Physics: Conference Series*, 2021.

- [27] M. Hassan, «OPTIMIZATION OF HYPERBOLIC TANGENT APODIZED CHIRPED FIBER BRAGG GRATINGS (CFBG) FOR DISPERSION COMPENSATION IN OPTICAL FIBER COMMUNICATION,» pp. 158-171, 2008.
- [28] K. Ennsner, M. N. Zervas και R. I. Laming, «Optimization of Apodized Linearly Chirped Fiber Gratings for Optical Communications,» *IEEE Journal of Quantum electronic*, τόμ. 34, αρ. 5, pp. 770-778, MAY 1998.
- [29] D. J. D. a. J. T. Sheridan, «Chirped Fiber Bragg Gratings,» *Encyclopedia of Modern Optics*, αρ. 1, pp. 421-428, 2018.
- [30] D. Irawan, K. Ramadhan , S. Saktioto και A. Marwin, «Performance comparison of TOPAS chirped fiber Bragg grating sensor with Tanh and Gaussian apodization,» *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, τόμ. 3, αρ. 23, June 2022.
- [31] N. A. STATHOPOULOS, S. P. SAVAIDIS, H. SIMOS, E. RIGAS, R. CORREIA, S. W. JAMES και R. P. TATAM, «A Transmission Line Method for the Simulation of fiber Bragg gratings,» *Applied Optics*, pp. 353-360, 10 January 2019.
- [32] M. Servín, J. A. Quiroga και M. Padilla, *Fringe Pattern Analysis for Optical Metrology*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014.
- [33] Pedrotti, Frank L., Pedrotti, Leno S., Pedrott και L. M., *Introduction to Optics*, Philadelphia, 2017.
- [34] N. A. STATHOPOULOS και H. SIMOS, «Modelling of non-uniform and fs-Laser inscribed fibre Bragg gratings,» *Optical Fiber Technology*, May 2022.
- [35] C.-L. al και H. et, «Optimization of chirped fiber Bragg grating design parameters for optical filter applications,» *Optics Express*, τόμ. 23, αρ. 22, pp. 29002-29013, 2014.
- [36] OptiSystem, «Εγχειρίδιο χρήση OptiSystem».
- [37] X. Brown και Z. a. T. G., «Optical fiber Bragg grating sensors: A review,» *Journal of Lightwave Technology*, τόμ. 34, αρ. 2, pp. 383-414, 2016.
- [38] M. F. Rocha, M. J. Pontes και a. M. R. N. Ribeiro, «Noise Characteristics of Fiber Bragg Gratings for Use in Optical Communication Systems,» *Journal of Lightwave Technology*, τόμ. 27, αρ. 19, pp. 4317-4326, 10 2009.
- [39] Ghatak, A. K. και T. K., *Introduction to Fiber Optics (2nd ed.)*, Cambridge University Press, 2013.
- [40] Saleh, B. EA και M. C. Teich, *Fundamentals of photonics*, John Wiley & sons, 2007.
- [41] Abbasi και N. M, *Butterworth low pass analog filter design*, 2010.
- [42] J. G. Proakis και D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*, New Jersey, 1996.

- [43] Binh και L. T., «Optical spectrum analyzers: a review.,» *Journal of Science and Technology*, τόμ. 48, αρ. 3, pp. 162-176.
- [44] Thorlabs, «Optical Spectrum Analyzer,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2615.
- [45] Marcuse και D., «Erbium-doped fiber amplifiers,» *Journal of Lightwave Technology*, τόμ. 9, αρ. 2, pp. 198-202, Feb 1991.
- [46] Agrawal και G. P., *Fiber-Optic Communication Systems*, John Wiley & Sons, 2010.
- [47] Agrawal και G. P., «Nonlinear Schrödinger Equation,» σε *Nonlinear Fiber Optics*, San Diego: Academic Press, 2001.
- [48] J. M. Senior και M. Y. Jamro, σε *Optical Fiber Communications*, 2009.
- [49] Βικιπαιδεια, 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AE%CE%BA%CE%BF%CF%82_%CE%BA%CF%8D%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82#:~:text=%CE%A9%CF%82%20%CE%BC%CE%AE%CE%BA%CE%BF%CF%82%20%CE%BA%CF%8D%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82%20\(%CE%BB\)%20CF%87%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AE%CE%BA%CE%BF%CF%82_%CE%BA%CF%8D%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82#:~:text=%CE%A9%CF%82%20%CE%BC%CE%AE%CE%BA%CE%BF%CF%82%20%CE%BA%CF%8D%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82%20(%CE%BB)%20CF%87%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE).
- [50] F. O. Network, «FiberOpticshare,» 30 August 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.fiberopticsshare.com/single-mode-fiber-vs-multimode-fiber-choose-2.html/single-mode-fiber-multimode-fiber-2>.
- [51] «FOSCO,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95051590-optical-fiber-manufacturing>.
- [52] A. K. M. M. Rahman, «A study on some physical parameters related to image quality and radiation safety in diagnostic radiology,» *Journal of Bangladesh Academy of Sciences*, αρ. 35, pp. 7-17, 01 2011.
- [53] M. L. a. J. Y. H. Shahoei, «Continuously tunable time delay using an optically pumped linear chirped fiber Bragg grating,» *Journal of Lightwave Technology*, τόμ. 29, αρ. 10, pp. 1465-1472, 2011.
- [54] M. S. a. M. H. A. N. A. Mohammed, «Design and performance evaluation of a dispersion compensation unit using several chirping functions in a tanh apodized FBG and comparison with dispersion compensation fiber,» *Applied Optics*, τόμ. 53, αρ. 29, pp. 239-247, 2014.
- [55] A. M. F. K. A. Sayed, «An enhanced WDM optical communication system using a cascaded fiber Bragg grating,» *Opt Quant Electron*, 2020.
- [56] M. Meena και R. K. Gupta, «Design and comparative performance evaluation of chirped FBG dispersion compensation with DCF technique for DWDM optical transmission systems,» *Optik*, αρ. 188, pp. 212-224, july 2019.

Αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς ζεύξεων οπτικών με χρήση
στοιχείων CFBG