



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

**Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών
Συστημάτων**

**Μελέτη Αντιστάθμισης των Γραμμικών και Μη Γραμμικών
Φαινομένων σε Οπτικά Συστήματα Επικοινωνίας, με χρήση
Νευρωνικών Δικτύων Μνήμης.**

**(Compensation of Optical Impairments in Optical Systems Leveraging
Memory Neural Networks)**

Η Διπλωματική Εργασία
παρουσιάστηκε ενώπιον
του Διδακτικού Προσωπικού
του Πανεπιστημίου Αιγαίου

Σε Μερική Εκπλήρωση
των Απαιτήσεων για το Δίπλωμα του
Μηχανικού Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων
της
Μαρία Μπρούμπα
ΜΑΙΟΣ 2021



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη Αντιστάθμισης των Γραμμικών και Μη Γραμμικών Φαινομένων σε Οπτικά Συστήματα Επικοινωνίας, με χρήση Νευρωνικών Δικτύων Μνήμης.

Μαρία Μπούμπα - icsd13129

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ ΕΠΙΚΥΡΩΝΕΙ ΤΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΑΡΙΑ ΜΠΡΟΥΜΠΑ



Περίληψη

Με την εκτενή χρήση του διαδικτύου και των ασύρματων δικτύων, οι οπτικές επικοινωνίες αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι της επικοινωνίας στην σημερινή εποχή. Ωστόσο ο μεγάλος όγκος δεδομένων και οι συνεχόμενες απαιτήσεις για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, περιορίζουν το εύρος ζώνης προκαλώντας μια επικείμενη έκρηξη χωρητικότητας. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την χωρητικότητα και την ποιότητα του σήματος είναι τα γραμμικά και μη γραμμικά φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά την μετάδοση. Στην παρούσα εργασία γίνεται μια ανάλυση αυτών των φαινομένων και παρουσιάζονται μερικές τεχνικές για την αντιμετώπισή τους .

Αρχικά περιγράφεται ένα βασικό οπτικό σύστημα επικοινωνίας. Αναλύονται τα υποσυστήματά του και ο τρόπος λειτουργίας του και γίνεται μια αναφορά στις τελευταίες εξελίξεις των οπτικών επικοινωνιών. Έπειτα αναλύονται όλα τα φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά την μετάδοση και περιορίζουν την περαιτέρω ανάπτυξη των οπτικών συστημάτων. Για την καλύτερη κατανόηση των προβλημάτων παρουσιάζονται αποτελέσματα και εκδίδονται συμπεράσματα μέσα από μια οπτική ζεύξη που έχει δημιουργηθεί σε κώδικα Matlab. Τέλος παραθέτονται πιθανές λύσεις που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για την αντιμετώπιση των φαινομένων με εστίαση στην χρήση νευρωνικών δικτύων μνήμης και εκδίδονται βασικά συμπεράσματα για μια μελλοντική χρήση τους.



Abstract

Nowadays with the widespread use of the internet and wireless networks, optical communications are an integral part of communication. However, the increased data traffic and the continuous demands for high transmission rates, limit the bandwidth causing an impending explosion of capacity. The main factors that affect signal's capacity and quality are the linear and non-linear effects that are developing during the optical transmission. In this context, it is made an analysis of these effects and some techniques are presented as solutions to these problems.

Initially is made a description about a simple optical system, what subsystems it consists of and how it works and then are referred the latest developments in optical communications systems. In addition, all the effects that have developed during the transmission and limit the further optical evolution, are analyzed. For a better understanding of these optical impairments, a transmission link was created in Matlab code and some results and conclusions are presented. Finally, possible solutions that could be applied to compensate these effects with a focus on the use of memory neural networks are suggested and basic conclusions are issued for a future use.



Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, κ. Χάρη Μεσαριτάκη όχι μόνο για τις γνώσεις και την καθοδήγηση που μου παρείχε, αλλά και για την μεγάλη υπομονή, την κατανόηση και την συνεχή ενθάρρυνση που μου έδωσε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Μενέλαο Σκοντράνη για τον χρόνο και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια υλοποίησης της.



Κατάλογος Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....	16
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	16
1.2. ΈΝΑ ΒΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ.....	17
1.2.1. Οπτικός Πομπός	18
1.2.2. Οπτικές Ίνες.....	23
1.2.3 Οπτικός Δέκτης	26
1.2.4. Ενισχυτές.....	28
1.2.5. Πολυπλεξία	28
1.3 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΤΗΝ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΔΕΚΑΕΤΙΑ	29
1.4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΟΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 -ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ.....	33
2.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ	33
2.2 ΔΙΑΣΠΟΡΑ	36
2.2.1. Διασπορά στις Πολύτροπες Ίνες	36
2.2.2 Διασπορά στις Μονότροπες ίνες	37
2.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.....	41
2.3.1. Φαινόμενα Kerr	41
2.3.2 Εξαναγκασμένη Σκέδαση.....	44
2.4 ΠΗΓΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ	46
2.4.1. Θόρυβος στον Πομπό.....	46



2.4.2. Θόρυβος στο Δέκτη.....	47
2.4.3. Θόρυβος Ενισχυτή	48
2.4.4. Επιπλέον Πηγές Καταστολής Ισχύος	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 -ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ	51
3.1. ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΟΣ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ.....	51
3.2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΉΞΟΔΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	61
4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΔΙΟΡΘΩΝΟΥΝ ΤΟ ΣΗΜΑ.....	61
4.1.1. ΊΝΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ.....	61
4.1.2 OPTICAL PHASE CONJUGATION (OPC).....	61
4.1.3. DIGITAL BACK PROPAGATION (DBP)	61
4.1.4. EQUALIZERS	62
4.1.5.FORWARD ERROR CORRECTION (FEC)	62
4.2. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ – (ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS-ANNs)	63
4.2.1. FEED-FORWARD NETWORKS (FNN).....	65
4.2.2.RECURRENT NEURAL NETWORKS (RNN)	66
4.2.3. DEEP NEURAL NETWORKS (DNN)	67
4.3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΤΕΣ ΕΚΜΑΘΗΣΗΣ.....	68
4.3.1. SUPERVISED LEARNING	68
4.3.2. UNSUPERVISED LEARNING	70
4.3.3. SEMI-SUPERVISED LEARNING	70
4.3.4. REINFORCEMENT LEARNING	71
4.3.5. BACK PROPAGATION	71
4.4. ΤΥΠΟΙ RNN.....	72
4.4.1. LONG SHORT-TERM MEMORY NETWORKS -LSTM	72



4.4.2. BI-LSTM	73
4.4.3. GATED RECURRENT UNITS-GRU	74
4.4.4. RESERVOIR COMPUTING -RC	75
4.5 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΤΟΥ LINEAR REGRESSION	78
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	80
5.1 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ.....	81
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	82



Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 – Οπτικό σύστημα.....	17
Εικόνα 2 – Διαμορφώσεις ASK, FSK, PSK.....	22
Εικόνα 3- Η διατομή μιας οπτικής ίνας πυριτίου	23
Εικόνα 4 – Πολυπλεξία WDM.....	29
Εικόνα 5 -FFTH	31
Εικόνα 6 – Οπτικές Απώλειες	36
Εικόνα 7-Διασπορά	36
Εικόνα 8 Perceptron	64
Εικόνα 9-FNN	65
Εικόνα 10 -RNN.....	66
Εικόνα 11 - Reservoir.....	75



Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - Διαφορές SBS, SRS.....	46
Πίνακας 2- Είσοδος του συστήματος.....	51
Πίνακας 3 -Έξοδος του συστήματος.....	53
Πίνακας 4 -Αποτελέσματα OSNR.....	55
Πίνακας 5 - Αποτελέσματα OSNR με κέρδος ενισχυτή $G=5\text{dB}$	56
Πίνακας 6 Αποτελέσματα OSNR με κέρδος ενισχυτή $G=20\text{dB}$	56
Πίνακας 7 -Έξοδοι συστήματος πριν και μετά το Linear Regression.....	79
Πίνακας 8 - BER μετά την χρήση του linear regression.....	79



Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1- Είσοδος συστήματος 4PAM.....	53
Γράφημα 2 -Έξοδος συστήματος 4PAM.....	53
Γράφημα 3 BER-SNR	54
Γράφημα 4 - Είσοδος συστήματος 64PAM.....	54
Γράφημα 5 Έξοδος συστήματος 64PAM	54
Γράφημα 6 OSNR - Απόσταση	55
Γράφημα 7 Σήμα με μηδενικό γραμμικό συντελεστή	57
Γράφημα 8 -Σήμα με γραμμικό συντελεστή	57
Γράφημα 9 - Είσοδος συστήματος- 4PAM	57
Γράφημα 10 Έξοδος συστήματος με ισχύ 0.74mW.	57
Γράφημα 11 Έξοδος συστήματος με ισχύ 2.96mW	57
Γράφημα 12 Έξοδος συστήματος με ισχύ 5.92mW	58
Γράφημα 13 Έξοδος συστήματος με ισχύ 7.4mW	57
Γράφημα 14 Έξοδος συστήματος με ισχύ 14.8mW	58
Γράφημα 15 Είσοδος συστήματος- 64PAM.....	58
Γράφημα 16 Έξοδος συστήματος με ισχύ 0.74mW	58
Γράφημα 17 Έξοδος συστήματος με ισχύ 2.96mW	58
Γράφημα 18 Έξοδος συστήματος με ισχύ 5.92mW	59
Γράφημα 19 Έξοδος συστήματος με ισχύ 7.4mW	58
Γράφημα 20 Έξοδος συστήματος με ισχύ 14.8mW	59
Γράφημα 21 Είσοδος συστήματος.....	60
Γράφημα 22 Έξοδος συστήματος χωρίς διασπορά	60
Γράφημα 23 Έξοδος συστήματος με διασπορά.....	60
Γράφημα 24 Αύξηση του BER συναρτήσει της απόστασης με σταθερό SNR=10dB	60
Γράφημα 25 Σύγκριση BER.....	80



Κατάλογος ακρωνυμίων:

ANN	Artificial Neural Network
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ASK	Amplitude Shift keying Modulation
BER	Bit Error Rate
Bi-LSTM	Bidirectional Long Short-Term Memory network
Bi-GRU	Bidirectional Gated Recurrent Unit
BL	Β ο ρυθμός μετάδοσης των bit * L την απόσταση
BPTT	Back Propagation Through Time
CPM	Cross-Phase Modulation
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DBP	Digital Back Propagation
DNN	Deep Neural Network
DSF	Dispersion Shifted Fiber
DPSK	Differential Phase Shifting Key
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
FDM	Frequency Division Multiplexing
FEQ	Forward Error Correction
FNN	Feed-Forward Network
FSK	Frequency Shift keying Modulation



FTTx	Fiber to the x
FWM	Four Wave Modulation
GRU	Gated Recurrent Unit
HD-FEC	Hard Decision Forward Error Correction
LED	Light Emitting Diode
LR	Linear Regression
LSTM	Long Short-Term Memory network
MSE	Mean Squared Error
NZ	Non-Return to Zero
OPC	Optical Phase Conjugation
PCS	Plastic Cladding Silica
PMD	Polarized Mode Dispersion
PolSK	Polarization Shift Keying Modulation
PSK	Phase Shift keying Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying Modulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RC	Reservoir Computing
RZ	Return to Zero
RNN	Recurrent Neural Network
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SD-FEC	Soft Decision Forward Error Correction
SNR	Signal to Noise Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SPM	Self-Phase Modulation



SRS	Stimulated Raman Scattering
TDM	Time Division Multiplexing
V-NLE	Volterra Non-Linear Equalizer
WDM	Wavelength Division Multiplexing



Σκοπός της Εργασίας

Το βασικότερο πρόβλημα στην εξέλιξη των οπτικών επικοινωνιών είναι ο περιορισμός της χωρητικότητας εξαιτίας του τεράστιου όγκου των δεδομένων. Ο περιορισμός δημιουργείται όταν για να αυξηθεί το εύρος ζώνης, αυξάνεται η μεταδιδόμενη ισχύς η οποία όμως ξεπερνά το μη γραμμικό όριο Shannon και ενισχύει τα μη γραμμικά φαινόμενα. Τα γραμμικά και τα μη γραμμικά φαινόμενα επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα του σήματος. Τεχνικές όπως η OPC, η DBP και οι equalizers μπορούν να λύσουν το πρόβλημα αλλά περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό από αρκετά προβλήματα συμβατότητας, πολυπλοκότητας ή θορύβου. Έτσι λοιπόν, μέσα από την εργασία προτείνεται πως η καλύτερη λύση στο πρόβλημα είναι η χρήση αναδρομικών νευρωνικών δικτύων. Μέσω της μηχανικής μάθησης τα δίκτυα μπορούν να εκπαιδευτούν ώστε να μάθουν να διορθώνουν το σήμα, στοχεύοντας με αυτό τον τρόπο στην μείωση του BER και συνεπώς στην αύξηση του SNR και της χωρητικότητας.

Δομή Εργασίας

Η εργασία αποτελείται από 4 κεφάλαια τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

- **Κεφάλαιο 1:** Ιστορική αναδρομή, περιγραφή, ανάλυση ενός βασικού οπτικού συστήματος και αναφορά στην εξέλιξη των οπτικών επικοινωνιών.
- **Κεφάλαιο 2:** Προβλήματα που δημιουργούνται κατά την οπτική μετάδοση. (Γραμμικά, Μη Γραμμικά Φαινόμενα, Θόρυβος)
- **Κεφάλαιο 3:** Παρουσίαση των προβλημάτων μέσα από ένα οπτικό σύστημα σε κώδικα Matlab.
- **Κεφάλαιο 4:** Αναλύονται τεχνικές επίλυσης (OPC, DBP, Equalizers). Εστίαση στα νευρωνικά δίκτυα και μεθόδους μηχανικής μάθησης. (ANN, FNN, RNN, LSTM, Reservoir). Εφαρμογή Linear Regression για την διόρθωση του σήματος.



Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στις Οπτικές Επικοινωνίες

1.1 Ιστορική Αναδρομή των τηλεπικοινωνιών και των οπτικών ινών

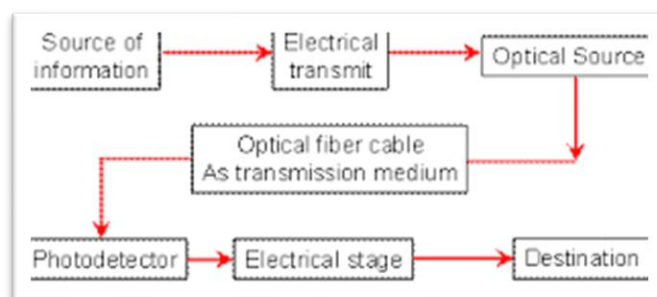
Αν και η οπτική επικοινωνία θέτει τις ρίζες της από την αρχαιότητα μέσω σημάτων φωτιάς και καπνού, η βασική ιδέα για τη μετάδοση μηχανικών κωδικοποιημένων μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις (~100 Km) προήλθε από τον Claude Chappe το 1792. Θεωρείτε ο εφευρέτης του πρώτου οπτικού τηλεγράφου που τέθηκε σε λειτουργία με ρυθμό μετάδοσης μικρότερο του 1b/s. Το σύστημα του οπτικού τηλεγράφου χρησιμοποιήθηκε μέχρι το 1846, και στην συνέχεια αντικαταστάθηκε από το σύστημα του ηλεκτρικού τηλεγράφου το οποίο εξασφάλιζε μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης (~10b/s) σε μεγαλύτερες αποστάσεις (1000km). Με τη εφεύρεση του τηλεφώνου το 1876 και μετά, τα ηλεκτρικά σήματα ξεκίνησαν να μεταδίδονται με αναλογικό τρόπο. Σιγά σιγά όλα τα ζεύγη συρμάτων αντικαταστάθηκαν με ομοαξονικά καλώδια κερδίζοντας με αυτόν τον τρόπο την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Το 1940 δημιουργείται το πρώτο σύστημα ομοαξονικών καλωδίων το οποίο μπορούσε να μεταδώσει ένα απλό τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Παρόλα αυτά, οι μεγάλες απώλειες που παραγότουσαν στα καλώδια, οδήγησαν στην ανάπτυξη των μικροκυματικών συστημάτων. Τα μικροκυματικά συστήματα λειτουργούσαν χρησιμοποιώντας ένα σήμα υψηλής συχνότητας ονόματι φέρον, το οποίο με την κατάλληλη τεχνικής διαμόρφωσης μετέδιδε τα επιθυμητά σήματα. Στα μέσα του 20ού αιώνα ο ρυθμός αξιολόγησης BL (B ο ρυθμός μετάδοσης των bit * L την απόσταση του επαναλήπτη) έφτανε περίπου στα 100 Mb/s. Εξαιτίας του αυξημένου κόστους των ομοαξονικών συστημάτων που λειτουργούσαν σε μικρές αποστάσεις και τον περιορισμό του αριθμού μετάδοσης από τη συχνότητα του φέροντος στα μικροκυματικά συστήματα, συνειδητοποιήσαν ότι το BL μπορεί να αυξηθεί αρκετές τάξεις αν ως φέρον χρησιμοποιηθεί ένα οπτικό κύμα. Τα δύο κύρια προβλήματα που παρουσιάστηκαν το 1950 πάνω σε αυτήν την τεχνική ήταν ότι δεν υπήρχε σύμφωνη οπτική πηγή, ούτε κατάλληλο μέσο μετάδοσης. Μέσα σε μια δεκαετία, τα δύο αυτά προβλήματα λύθηκαν καθώς εφευρέθηκαν τα πρώτα λείζερ ημιαγωγών θερμοκρασίας και διαπιστώθηκε επίσης πως οι οπτικές ίνες από γυαλί ήταν οι καταλληλότεροι κυματοδηγοί φωτεινής ακτινοβολίας. Έτσι μετά από μια περίοδο έρευνας που ξεκίνησε από το 1975, αναπτύχθηκε το πρώτο εμπορικό σύστημα επικοινωνιών οπτικών ινών που λειτουργούσε σε μήκος κύματος περίπου 0,8μm και χρησιμοποίησε λείζερ ημιαγωγών GaAs. Αυτό το σύστημα πρώτης γενιάς λειτούργησε με ρυθμό bit 45 Mbit/s με απόσταση επαναλήπτη έως 10 Km. Μέσα σε λίγο καιρό ακολούθησε το σύστημα δεύτερης γενιάς με χρήση μονότροπης ίνας εξαιτίας χαμηλότερων διασπορών και ρυθμό bit 1,7 Gbit/s με απόσταση επαναλήπτη έως 50 Km. Εκτός από την αύξηση του ρυθμού δεδομένων ανά κανάλι, ο αριθμός καναλιών ανά ίνα άρχισε να αυξάνεται μέσω διαίρεσης-πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) και σε



συνδυασμό με την εμφάνιση των οπτικών ενισχυτών, σιγά σιγά δημιουργήθηκε το 2003 το πρώτο υποθαλάσσιο σύστημα μετάδοσης για διηπειρωτικές επικοινωνίες.

Τα τελευταία χρόνια, τα συστήματα μετάδοσης οπτικών ινών έχουν σημειώσει μεγάλη πρόοδο στην εξέλιξη τους, ιδιαίτερα στο κομμάτι του διαδικτύου και των ασύρματων επικοινωνιών. Νέες τεχνικές στη διαμόρφωση, την πολυπλεξία, το υλικό, την ζώνη λειτουργίας αλλά και την διόρθωση των προβλημάτων σε κάθε ζεύξη, καθιστούν τις οπτικές επικοινωνίες ένα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. Ο τυπικός ρυθμός δεδομένων ενός καναλιού μετάδοσης οπτικών ινών έχει αυξηθεί από 2,5 Gb/s περίπου το 1989 σε 400 Gb/s το 2019, ενώ η τυπική χωρητικότητα μετάδοσης μονής ίνας έχει αυξηθεί σημαντικά από 2,5 Gb/s το 1989 σε 32 Tb/s το 2019. [1]

1.2. Ένα Βασικό Σύστημα Οπτικής Επικοινωνίας



Εικόνα 1 – Οπτικό σύστημα

Ένα ψηφιακό σύστημα οπτικής μετάδοσης μπορεί να χωριστεί σε τρία κύρια υποσυστήματα:

1. Οπτικό πομπό,
2. Κανάλι οπτικών ινών
3. Οπτικό δέκτη,

[2] [3] [4] [5]. Το πρώτο βασικό εξάρτημα είναι ο οπτικός πομπός. Η κύρια λειτουργία ενός οπτικού πομπού είναι να μετατρέψει την αρχικά ηλεκτρική πληροφορία, σε οπτική. Το σήμα μετατρέπεται σε οπτικό και οδηγείται μέσω του καναλιού οπτικών ινών. Όταν το οπτικό σήμα φτάσει στο τελευταίο υποσύστημα που είναι ο οπτικός δέκτης, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό όπου ενισχύεται και ανακτάται.



1.2.1. Οπτικός Πομπός

Η κύρια λειτουργία ενός οπτικού πομπού είναι να παράγει κύματα φωτός που φέρουν μια συγκεκριμένη μορφή διαμόρφωσης. Η βασική συνιστώσα του οπτικού πομπού είναι η οπτική πηγή. Η επιλογή μιας οπτικής πηγής για μια συγκεκριμένη εφαρμογή καθορίζεται από τις απαιτήσεις που πρέπει να πληροί.

- Σωστή περιοχή μηκών κύματος χαμηλής απώλειας.
- Το φασματικό εύρος της πηγής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, συνήθως $<1 \text{ nm}$. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος της ίνας και το εύρος της πηγής τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διασπορά που θα δημιουργηθεί με αποτέλεσμα να υπάρχει αλλοίωση του σήματος.
- Η διαμόρφωση της πηγής θα πρέπει να είναι δυνατή σε ταχύτητες άνω των αρκετών Gb / s.

1.2.1.1. Οπτικοί Ημιαγωγοί

Τα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών συνήθως χρησιμοποιούν οπτικές πηγές ημιαγωγούς όπως δίοδοι εκπομπής φωτός (LEDs) και δίοδοι λέιζερ. Το μικρό μέγεθος, η υψηλή απόδοση, η σωστή περιοχή μηκών κύματος και η δυνατότητα άμεσης διαμόρφωσης, είναι κάποια από τα κριτήρια επιλογής των ημιαγωγών.

- LED

Τα LED παράγουν οπτική ισχύ περίπου ανάλογη με το θετικό ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει μέσα τους. Ουσιαστικά είναι μια επαφή p-n, ορθά πολωμένη και βασίζεται στην αυθόρμητη εκπομπή φωτός. Το φως που παράγουν διαθέτει σχετικά μεγάλο εύρος αλλά εμφανίζει αρκετό θόρυβο φάσης που το οπτικό σήμα δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ημιτονοειδής φορέας. Επομένως, μόνο η ένταση του φωτός μπορεί να διαμορφωθεί σε σχετικά χαμηλούς ρυθμούς. Τα LED είναι χρήσιμα συνήθως σε απλές εφαρμογές και συνδυάζονται επίσης με τις πλαστικές οπτικές ίνες για την μείωση του κόστους.

- Lasers

Σχεδόν οι περισσότερες απαιτήσεις πληρούνται ιδανικά από δίοδους λέιζερ ημιαγωγών. Τα λέιζερ εξαιτίας της εξαναγκασμένης εκπομπής φωτονίων, έχουν υψηλή ισχύ εξόδου άρα είναι πιο ισχυρά και λειτουργούν σε γρηγορότερες ταχύτητες σε σχέση με τα LEDs. Επίσης μπορούν να μεταδίδουν το φως πιο μακριά, με μεγαλύτερη ανοχή θορύβου και λιγότερα σφάλματα. Τα λέιζερ ημιαγωγών ταξινομούνται κυρίως από τη δομή τους. Μερικοί συνηθισμένοι τύποι λέιζερ ημιαγωγών, που διατίθενται στο εμπόριο, είναι τα λέιζερ FP, τα λέιζερ DFB, τα λέιζερ καταναμημένων ανακλαστών Bragg (DBR), τα λέιζερ ενός κβαντικού φρεατίου (SQW), ένα πολυκβαντικό πηγάδι Λείζερ (MQW), λέιζερ περιορισμένης μέσης και λέιζερ ετεροδομής (BH). Το αρνητικό των λέιζερ είναι το κόστος. Τα



λείζερ ανάλογα με τις απαιτήσεις τους και την ισχύ που παράγουν είναι πολύ πιο ακριβά σε σχέση με τα LED. [6]

Παρόλο που η οπτική πηγή αποτελεί σημαντικό εξάρτημα των πομπών, δεν είναι και το μοναδικό. Άλλα εξαρτήματα είναι το ηλεκτρικό κύκλωμα οδήγησης για την παροχή ρεύματος στην οπτική πηγή, ο διαμορφωτής για την μετατροπή των ηλεκτρικών δεδομένων σε οπτική μορφή και ο συζεύκτης για την εκτόξευση του οπτικού σήματος στο εσωτερικό της ίνας. Η βασική παράμετρος σχεδίασης στο πομπό είναι η εκπεμπόμενη ισχύς. Ο βασικός ορισμός της ισχύς σε dBm δίνεται από την σχέση:

$$P(\text{dBm}) = 10 \log_{10} \left(\frac{P(\text{mW})}{1\text{mW}} \right)$$

1.2.1.2. Διαμόρφωση

Για να μπορέσει το σήμα να μεταδοθεί μέσω της οπτικής ίνας, πρέπει να μετατραπεί σε μια σειρά οπτικών bit. Η ενσωμάτωση της πληροφορίας στο οπτικό σήμα γίνεται με την βοήθεια οπτικού φέροντος. Το οπτικό φέρον πριν τη διαμόρφωση έχει την μορφή:

$$E(t) = \hat{e}A \cos(\omega_0 t - \varphi)$$

Όπου E είναι το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου, e το μονοδιαίο διάνυσμα πόλωσης, A το πλάτος, ω η γωνιακή συχνότητα του φέροντος και φ η φάση. Η διαμόρφωση του φορέα κύματος φωτός μπορεί να γίνει με βάσει αυτούς του τέσσερις παράγοντες: το πλάτος, τη συχνότητα, τη φάση ή την πόλωση.

Η έξοδος ενός ημιαγωγικού λείζερ, διαμορφώνεται εφαρμόζοντας το ηλεκτρικό σήμα είτε κατευθείαν, είτε σε ένα ξεχωριστό διαμορφωτή χωρίς να ανοιγοκλείνει το λείζερ. Δύο τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαράγουν την οπτική ροή bit.

Άμεση διαμόρφωση

Στην περίπτωση της απευθείας διαμόρφωσης, το λείζερ πολώνεται στο επίπεδο του κατωφλιού και διαμορφώνεται αρκετά πάνω από αυτό ώστε να δημιουργούνται παλμοί που αναπαριστούν τα ψηφιακά bit. Στην άμεση διαμόρφωση παρατηρείται συχνά το φαινόμενο του Τετερίσματος (chirping) [7]. Αυτό συμβαίνει γιατί τα λείζερ ημιαγωγών για να διαμορφώσουν την ένταση τους χρησιμοποιούν διαμόρφωση φάσης. Αλλάζοντας την φάση, αλλάζει το οπτικό κέρδος του υλικού και γίνεται μεταβολή του δείκτη διάθλασης μέσα στην κοιλότητα λείζερ. Η τελευταία αλλαγή προκαλεί μετατόπιση στη συχνότητας του λείζερ με αποτέλεσμα σιγά σιγά ο παλμός να αρχίζει να απλώνεται.



Εξωτερικός διαμορφωτής

Για ρυθμούς bit μεγαλύτερους από 5Gb/s, η άμεση διαμόρφωση αρχίζει να μην χρησιμοποιείται εξαιτίας του μεγάλου τετερίσματος. Ο οπτικός διαμορφωτής τοποθετείται δίπλα στο λέιζερ και μετατρέπει το φως σε ένα συνεχές κύμα κωδικοποιημένων δεδομένων. Οι δύο τύποι διαμορφωτών είναι οι ηλεκτρο-οπτικοί διαμορφωτές νιοβικού λιθίου LiNbO₃ σε τοπολογία συμβολόμετρου Mach-Zehnder και οι διαμορφωτές ημιαγωγών με βάση την ηλεκτροαπορρόφηση.

- Διαμορφωτής νιοβικού λιθίου LiNbO₃ σε τοπολογία συμβολόμετρου Mach-Zehnder

Ο κυματοδηγός εισόδου χωρίζεται σε δύο βραχίονες. Εφαρμόζοντας τάση μόνο στον ένα βραχίονα γίνεται διαμόρφωση φάσης. Εφαρμόζοντας τάση και στους δύο βραχίονες γίνεται διαμόρφωση πλάτους. Το βασικό πλεονέκτημα των εξωτερικών διαμορφωτών LiNbO₃ με το συμβολόμετρο Mach-Zehnder είναι στην ικανότητά τους να παράγουν σχεδόν τέλειες κυματομορφές διαμορφωμένες σε ένταση χωρίς καμία υπερβολική διαμόρφωση φάσης ή τετέρισμα. Σε μια τυπική εφαρμογή low-chirp, ο βραχίονας του συμβολόμετρου οδηγείται σε αυξημένο δείκτη ενώ ο άλλος βραχίονας οδηγείται σε χαμηλότερο δείκτη. Το μειονέκτημα είναι ότι οι συγκεκριμένοι διαμορφωτές έχουν σχετικά υψηλό κόστος υλοποίησης και διαθέτουν αρκετά μεγάλο μήκος.

1.2.1.3. Είδη Διαμόρφωσης

Η επιλογή του κατάλληλου είδους διαμόρφωσης γίνεται συνήθως ανάλογα με το εύρος ζώνης, την απόσταση, το μέσω μετάδοσης, τις πηγές καταστολής ισχύος και το κόστος [8] [9].

Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude Shift keying, ASK)

Στην περίπτωση της ASK διαμόρφωσης, το πλάτος A διαμορφώνεται και παίρνει συνήθως την τιμή $A > 0$ όταν ανιχνεύει το σύμβολο "1" και την τιμή 0 για το σύμβολο "0". Οι υπόλοιπες μεταβλητές μένουν σταθερές. Αυτός ο τύπος διαμόρφωσης ονομάζεται συχνά και on-off keying (OOK) και περιλαμβάνει τις τεχνικές:

- Διαμόρφωση με επιστροφή στο 0 - Return-to-zero (RZ) format

Κάθε οπτικός παλμός που αναπαριστά το bit "1" είναι βραχύτερος από την περίοδο του bit και το πλάτος του επιστρέφει στο 0 πριν τελειώσει η διαδικασία του bit.

- Διαμόρφωση χωρίς επιστροφή στο 0 -Nonreturn-to-zero (NRZ) format

Ο οπτικός παλμός παραμένει σε όλη τη διάρκεια του bit και το πλάτος δεν πέφτει στο 0 σε διαδοχικά "1"



Το διαμορφωμένο σήμα κατά RZ σε σύγκριση με το NRZ είναι αρκετά επιρρεπές σε βλάβες που εξαρτώνται από το εύρος ζώνης όπως το φαινόμενο της διασποράς γιατί απαιτεί ένα ευρύ φάσμα καθώς το πλάτος παλμού καταλαμβάνει μισό bit. Παρόλα αυτά για τα ίδια δεδομένα, οι διαμορφωμένοι παλμοί του RZ έχουν μεγαλύτερη μέση ισχύ από του NRZ.

Η χρήση ASK σε άμεση ή σε εξωτερική διαμόρφωση.

Η άμεση διαμόρφωση ASK συνοδεύεται από το chirping. Παρόλα αυτά για οπτικά συστήματα γύρω στα 1.55μm, έχουν βρεθεί αρκετές μέθοδοι για τον περιορισμό της συχνότητας τετερίσματος.

Η υλοποίηση της ASK στα σύμφωνα συστήματα τα οποία χρειάζονται τη φάση του φέροντος στον δέκτη, απαιτούν η φάση να είναι σταθερή. Όταν το πλάτος A ή η ισχύς μεταβάλλονται καθώς διαμορφώνεται το ρεύμα που παράγεται τον ημιαγωγό, δημιουργούνται μεταβολές στην φάση με αποτέλεσμα η πληροφορία που θα φτάσει στον δέκτη να έχει αλλοιωθεί. Γι' αυτό κυρίως στα σύμφωνα συστήματα, γίνεται χρήση εξωτερικού διαμορφωτή, κρατώντας έτσι σταθερό το ρεύμα του ημιαγωγού.

Διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Shift keying, FSK)

Στη FSK, η τιμή ω παίρνει την τιμή ω_1 για το δυαδικό σύμβολο "1" και ω_2 για το δυαδικό σύμβολο "0". Οι υπόλοιπες μεταβλητές μένουν σταθερές. Στην FSK συνήθως γίνεται χρήση της άμεσης διαμόρφωσης. Η μεταβολή της συχνότητας που προκύπτει εξαιτίας του τετερίσματος που προκαλείται στον παλμό, σε αυτή την περίπτωση μπορεί να τη χρησιμοποιήσει προς όφελος της. Στην ουσία, το chirping χρησιμοποιείται για να παρέχει την κωδικοποίηση χωρίς την υπερβολική εξάπλωση του παλμού. Το λείζερ ημιαγωγών μονής συχνότητας παράγει μια οπτική συχνότητα που αντιπροσωπεύει τα ψηφιακά "0" και προστίθεται μια μικρότερη αύξηση για να ενισχύσει τη συχνότητα ώστε να αντιπροσωπεύει τα "1" [10].

Διαμόρφωση φάσης (Phase Shift keying, PSK)

Στη PSK, διαμορφώνεται η γωνία φάσης ϕ . Η οπτική ένταση παραμένει σταθερή και το σήμα εμφανίζεται ως ένα συνεχές κύμα. Στην PSK είναι απαραίτητο η φάση του οπτικού φέροντος να διατηρείται σταθερή έτσι ώστε η πληροφορία να φτάσει αναλλοίωτη στο δέκτη. Γι' αυτό συνήθως γίνεται χρήση εξωτερικού διαμορφωτή. Ένας διαμορφωτής LiNbO_3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτόν τον σκοπό, παρόλα αυτά είναι δύσκολο στην πράξη διότι απαιτείται η φάση του σήματος να παραμένει σταθερή κατά τη μετάδοση.

- DPSK (Differential Phase Shifting Key)

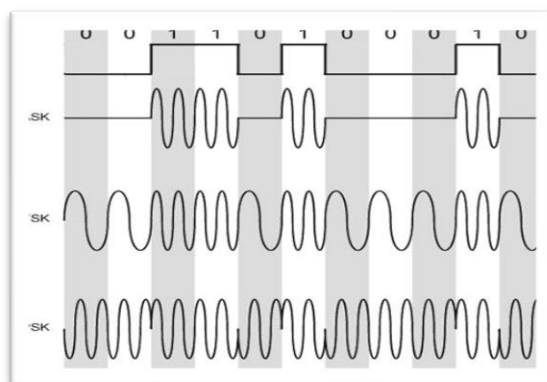
Η DPSK κατηγοριοποιείται ως μια εναλλακτική και πιο συμβατή προσέγγιση της PSK επειδή δεν απαιτεί αναφορά στη φάση του λαμβανόμενου σήματος. Η



πληροφορία κωδικοποιείται μέσω της διαφοράς φάσης δύο γειτονικών bit. Το πλεονέκτημα της είναι ότι το σήμα μπορεί να αποδιαμορφωθεί με επιτυχία αρκεί η φέρουσα φάση να είναι σταθερή μεταξύ δυο bit. Το συγκεκριμένο είδος διαμόρφωσης δουλεύει πολύ καλύτερα σε μεγάλο ρυθμό γιατί στενεύουν οι παλμοί. Έτσι σε μικρότερο χρόνο αποκλείεται να προλάβει να γίνει η εναλλαγή της φάσης με αποτέλεσμα να γίνεται πιο ανεκτικό στο θόρυβο φάσης.

- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

Στην QPSK η οπτική φάση παίρνει τέσσερις πιθανές τιμές (Γωνία ανά 45° προς τους δύο άξονες). Ο διαμορφωτής φάσης παράγει σύμβολα που αντιστοιχούν σε δύο bit. Τα δύο bit μεταφέρονται σε κάθε χρονική περίοδο με αποτέλεσμα το σήμα να χρειάζεται το μισό εύρος ζώνης και να χρησιμοποιεί το μισό ρυθμό μετάδοσης. Παρόλα αυτά η QPSK διαμόρφωση είναι επιρρεπής σε αστάθειες της φάσης γιατί παρουσιάζει μεγάλα άλματα 180° στο διαμορφωμένο σήμα.



Εικόνα 2 – Διαμορφώσεις ASK, FSK, PSK

Διαμόρφωση πόλωσης (Polarization Shift keying, PolSK)

Η πληροφορία κωδικοποιείται στην πολωτική κατάσταση $\hat{e}$ του κάθε bit. Γι' αυτό όταν στρίβει το σήμα είναι κυκλικά, ελλειπτικά πολωμένο ή απόλωτο. Η PolSK συνήθως χρησιμοποιείται για την οπτική μετάδοση μεγάλων αποστάσεων. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση δεν είναι πολύ βολική στην πράξη εξαιτίας των αρκετών παρεμβολών που δημιουργούνται, του μεγάλου κόστους και της πολυπλοκότητας που απαιτείται. Παρόλα αυτά χρησιμοποιείται πολύ σε polarized φίλτρα τα οποία κρατάνε την γραμμικότητα.

Ορθογώνια Διαμόρφωση Πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)

Είναι μια από τις πιο σύγχρονες μεθόδους διαμόρφωσης καθώς συνδυάζει την PSK και την ASK. Το QAM χρησιμοποιείται σε μεγάλο ποσοστό στα συστήματα οπτικών

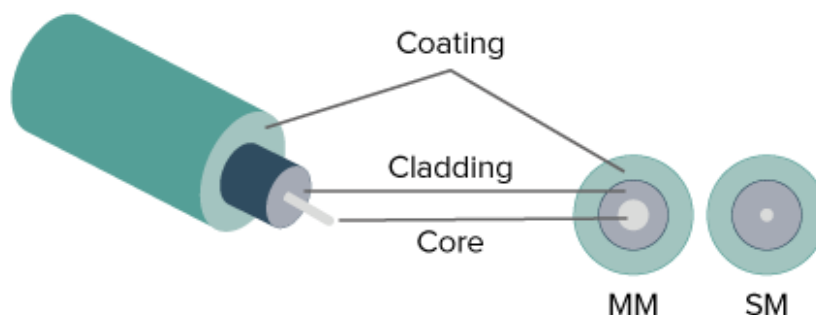


ινών καθώς αυξάνει τους ρυθμούς μετάδοσης και παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή στη μη γραμμικότητα.

1.2.2. Οπτικές Ίνες

1.2.2.1. Γεωμετρική Περιγραφή Ίνας Πυριτίου

Η οπτική ίνα μεταβιβάζει το οπτικό σήμα από τον πομπό στον δέκτη και είναι το καλύτερο μέσω διάδοσης αφού πετυχαίνει χαμηλή εξασθένηση του σήματος σε μεγάλο εύρος ζώνης [11]. Το εσωτερικό μιας απλής οπτικής ίνας αποτελείται από δύο ομόκεντρους διηλεκτρικούς κυλίνδρους. Ο εσωτερικός κύλινδρος ή αλλιώς πυρήνας (core) ο οποίος μεταδίδει ένα οπτικό σήμα, έχει δείκτη διάθλασης $n(r)$ και ακτίνα a . Ο εξωτερικός κύλινδρος, ο μανδύας (cladding) περιορίζει το οπτικό σήμα εντός πυρήνα, έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης n_2 και μεγαλύτερη εξωτερική ακτίνα. Τόσο ο πυρήνας όσο και ο μανδύας είναι συνήθως φτιαγμένοι από γυαλί υψηλής καθαρότητας. Έξω από τον μανδύα είναι το περίβλημα (coating) το οποίο προστατεύει τους εσωτερικούς κυλίνδρους είτε από σπάσιμο του γυαλιού είτε από διάφορους εξωτερικούς παράγοντες [12].



Εικόνα 3- Η διατομή μιας οπτικής ίνας πυριτίου

Αριθμητικό Άνοιγμα

Ένα μέρος της ακτίνας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια ανακλάται πίσω και ένα μέρος διαθλάται στο μέσο. Άρα ο δείκτης διάθλασης είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τη διάδοση του φωτός μέσα σε ένα μέσο [13]. Ο αέρας με την ίνα παρουσιάζουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης καθώς έχουν διαφορετική πυκνότητα. Καθώς το φως εισέρχεται στην ίνα, για να κυματοδηγηθεί στον πυρήνα με ολική εσωτερική ανάκλαση σύμφωνα με το νόμο του Snell πρέπει να ισχύει:

$$n_0 \sin \theta_0 \leq n_1 \sin \theta_r$$

Όπου n_0 και n_1 οι δείκτες διάθλασης του αέρα και της ίνας αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας ξανά τον νόμο του Snell για αέρα-πυρήνα και πυρήνα-μανδύα, η συνολική εσωτερική ανάκλαση μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εάν:



$$n_1 \sin \theta_r = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

Η διαθλώμενη ακτίνα γίνεται παράλληλη με τη διαχωριστική επιφάνεια $\theta_t=90^\circ$. Αυτή η γωνία είναι η μέγιστη γωνία που σχηματίζεται, για μπορεί η ακτίνα φωτός να περιοριστεί μέσα στην ίνα και ονομάζεται κρίσιμη γωνία θ_c .

$$NA = (\sin \theta_0)_{max} = n_1 \cos \theta_c$$

Άρα το αριθμητικό άνοιγμα (NA) δίνεται από τις σχέσεις:

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$NA = n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}}$$

Όπου Δ είναι η διαφορά του δείκτη διάθλασης μεταξύ της επιφάνειας του πυρήνα και του μανδύα.

1.2.2.2. Τύποι Οπτικών Ινών

Ανάλογα με το μέγεθος του πυρήνα οι ίνες χωρίζονται σε μονότροπες και πολύτροπες.

Πολύτροπες Ίνες -Multimode Fibers

Μία πολύτροπη ίνα υποστηρίζει εκατοντάδες διαφορετικούς τρόπους σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Έχουν μεγάλη διάμετρο πυρήνα για να μπορεί το φως να ταξιδεύει με πολλαπλές διαδρομές (Εικόνα 3. MM). Οι ανακλάσεις φωτός που δημιουργούνται καθώς το φως περνά μέσα από τον πυρήνα αυξάνονται, δημιουργώντας τη δυνατότητα να περάσουν περισσότερα δεδομένα σε μια δεδομένη στιγμή.

Όταν το φως ταξιδεύει στις πολύτροπες ίνες, περιορίζεται σε ένα αριθμό πιθανών διαδρομών που ονομάζονται τρόποι. Κάθε τρόπος διάδοσης στην ίνα χαρακτηρίζεται από μια σταθερά διάδοσης β που καθορίζει την αλλαγή του πλάτους και της φάσης του κύματος κατά την διάδοση και έναν ενεργό δείκτη διάθλασης. Αν ο ενεργός δείκτης διάθλασης είναι μεγαλύτερος από το δείκτη διάθλασης του μανδύα τότε ο τρόπος διάδοσης παύει να κυματοδηγείται και έχει φτάσει στο σημείο αποκοπής. Η συχνότητα αποκοπής δίνεται από την σχέση:

$$V \approx \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot a n_1 \cdot \sqrt{2\Delta}$$



Όσο αυξάνεται η συχνότητα αποκοπής τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των τρόπων μετάδοσης. Ο αριθμός των τρόπων μετάδοσης στις πολύτροπες ίνες, είναι περίπου $\frac{V^2}{2}$.

Ανάλογα με την κατανομή του δείκτη διάθλασης, οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης και σε ίνες με βαθμιαίου δείκτη διάθλασης.

- Ίνες Βαθμιαίου δείκτη διάθλασης (Graded index fibers).

Ο δείκτης διάθλασης αλλάζει σταδιακά από την μέγιστη τιμή n_1 προς το κέντρο του πυρήνα, έως την ελάχιστη τιμή του n_2 στην επιφάνεια επαφής πυρήνα-μανδύα. Εξαιτίας της σταδιακής αλλαγής του δείκτη διάθλασης αλλάζει και η ταχύτητα της κάθε ακτίνας μέσα στην ίνα. Η ακτίνα που ταξιδεύει στο κέντρο της ίνας κάνει την πιο μικρή διαδρομή αλλά λόγω του μεγάλου δείκτη διάθλασης μειώνεται η ταχύτητα της και πάει πιο αργά. Από την άλλη μεριά, οι ακτίνες που ταξιδεύουν στα πλάγια της ίνας, διανύουν μεγαλύτερη διαδρομή αλλά πηγαίνουν γρηγορότερα αφού εκεί ο δείκτης διάθλασης είναι μικρότερος. Οι ίνες βαθμιαίου δείκτη παρουσιάζουν καλύτερο BL σε μικρές αποστάσεις.

$$BL < \frac{8c}{n_1 \Delta^2}$$

- Ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης (Step index fibers)

Ο δείκτης διάθλασης είναι σταθερός και αλλάζει απότομα στην επιφάνεια επαφής του πυρήνα και του μανδύα. Στις ίνες κλιμακωτού δείκτη, οι ακτίνες μετακινούνται με διαφορετικές διαδρομές. Η συντομότερη διαδρομή εμφανίζεται για $\theta_0 = 0$ και η μακρύτερη για NA με αποτέλεσμα να προκαλείται συχνά το φαινόμενο της διασποράς που θα αναλυθεί στο παρακάτω κεφάλαιο.

$$BL < \frac{1}{2} \frac{n_2}{n_1^2} \frac{c}{\Delta}$$

Μονότροπες Ίνες -Single Mode Fibers

Οι μονότροπες ίνες επιτρέπουν μόνο έναν τρόπο διάδοσης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλες αποστάσεις για ένα μεγάλο εύρος ζώνης [14] [15]. Είναι συνήθως ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης αλλά έχουν πολύ μικρότερη διάμετρο πυρήνα από τις πολύτροπες. Ο μικρότερος πυρήνας αποτρέπει την ανάπτυξη

Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων



πολλαπλών τρόπων διάδοσης γι' αυτό και πρέπει να ισχύει: $0 < V < 2,405$. (Εικόνα 3. SM) Άρα για μονότροπη ίνα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$V = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot a n_1 \cdot \sqrt{2\Delta} < 2.405$$

Διαφορετικά όταν το V ξεπεράσει το όριο, αυξάνονται οι τρόποι άρα υποστηρίζει πολύτροπη ίνα.

Ίνες Διαφορετικού Υλικού

Η τρέχουσα εργασία αναφέρεται κυρίως στις ίνες που είναι φτιαγμένες από γυαλί πυριτίου. Υπερτερούν σε σχέση με τις υπόλοιπες γιατί είναι ιδανικές σε τεράστιες αποστάσεις, ανεκτικές σε πολύ υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες και παρουσιάζουν τις λιγότερες απώλειες. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και άλλοι τύποι οπτικών ινών.

- Πλαστικές Ίνες

Οι πλαστικές οπτικές ίνες είναι φτιαγμένες από πλαστικό στην περιοχή του πυρήνα και του μανδύα. Έχουν μεγαλύτερη διάμετρο πυρήνα από τις ίνες πυριτίου, που τους επιτρέπει να μεταδίδουν περισσότερα δεδομένα με λιγότερο κόστος. Παρόλα αυτά ο μεγάλος πυρήνας επιφέρει μεγάλες απώλειες γι' αυτό και χρησιμοποιούνται σε μικρές αποστάσεις και για μικρές ταχύτητες.

- Ίνες με πλαστικό μανδύα (PCS- Plastic Cladding Silica)

Αυτού του τύπου οι ίνες έχουν πυρήνα κατασκευασμένο από γυαλί και πλαστικό μανδύα. Χρησιμοποιείται το λιγότερο σε σχέση με τα άλλα δύο είδη γιατί παρουσιάζουν χαμηλότερα χαρακτηριστικά απόδοσης σε σχέση με τις ίνες πυριτίου, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη απώλεια και χαμηλότερο εύρος ζώνης. Διαθέτουν μεγάλη διάμετρο πυρήνα και χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές.

1.2.3 Οπτικός Δέκτης

Στον δέκτη το οπτικό σήμα μετατρέπεται και πάλι σε ηλεκτρικό. Το σήμα βγαίνοντας από την ίνα, με την βοήθεια ενός συζεύκτη εκτοξεύεται στον φωτοανιχνευτή. Ο δέκτης συνήθως σχεδιαστικά χωρίζεται σε τρία στάδια: το front end, το γραμμικό και της ανάκτησης [16]. Το στάδιο front-end αποτελείται από έναν φωτοανιχνευτή και έναν προενισχυτή για να αυξήσουν την ισχύ του παραγόμενου σήματος. Ο φωτοανιχνευτής είναι το κύριο εξάρτημα του δέκτη και συνήθως είναι αρκετά τυποποιημένος. Είναι φτιαγμένος από ημιαγωγικά υλικά και ο βασικός του ρόλος είναι η απορρόφηση των φωτονίων και η μετατροπή τους σε ηλεκτρόνια. Η

Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων



διαδικασία μετατροπής είναι η αντίθετη από αυτήν που γίνεται στα λέιζερ ημιαγωγών. Οι πιο κοινές μορφές φωτοανιχνευτών είναι οι φωτοδίοδοι p-n, οι p-i-n, η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (APD) και οι φωτοδίοδοι μετάλλου – ημιαγωγού-μετάλλου (MSM). Στην συνέχεια το γραμμικό στάδιο αποτελείται από έναν κύριο ενισχυτή και ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων. Στόχος του φίλτρου είναι να μειώσει το θόρυβο χωρίς να αναπτυχθεί παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων και να οδηγήσει σε υψηλότερη ευαισθησία του δέκτη. Τέλος στο τμήμα της ανάκτησης, υπάρχει ένα κύκλωμα απόφασης και ένα κύκλωμα ανάκτησης παλμών χρονισμού. Το κύκλωμα ανάκτησης παλμών είναι να παρέχει χρονισμό για το κύκλωμα απόφασης, απομονώνοντας μία φασματική συνιστώσα από το λαμβανόμενο σήμα. Ενώ το κύκλωμα απόφασης παρέχει τη δυαδική ακολουθία που μεταδίδεται, συγκρίνοντας την συνιστώσα του σήματος με ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Αν το δείγμα χρονισμού είναι μεγαλύτερο από το κατώφλι τότε το bit = 1 , αλλιώς το bit= 0.

Συνεκτική Ανίχνευση

Το σήμα πριν πέσει στον φωτοανιχνευτή συνήθως συνδυάζεται συνεκτικά με ένα συνεχόμενο κύμα. Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε περιορισμό του θερμικού θορύβου και του θορύβου βολής αλλά και είναι ένας τρόπος κωδικοποίησης πληροφορίας στην οπτική φάση. Το συνεκτικό πεδίο δημιουργείται με την χρήση ενός λέιζερ με στενό πλάτος στο δέκτη το οποίο ονομάζεται τοπικός ταλαντωτής. Υπάρχουν δύο είδη συνεκτικής ανίχνευσης: η ομόδυνη και η ετερόδυνη. Στην ομόδυνη η συχνότητα του φέροντος του σήματος, συμπίπτει με την συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή. Τα θετικά της ομόδυνης ανίχνευσης είναι ότι βελτιώνει το λόγο του σήματος προς τον θόρυβο(SNR) κατά μεγάλο παράγοντα και μπορεί να γίνει ανάκτηση των δεδομένων μέσα από την φάση του φέροντος. Παρόλα αυτά, το αρνητικό της είναι ότι ενισχύει την ευαισθησία της φάσης. Από την άλλη πλευρά η ετερόδυνη ανίχνευση χρησιμοποιεί μια ενδιάμεση συχνότητα καθώς η συχνότητα του φέροντος και του τοπικού ταλαντωτή διαφέρουν. Έχει μικρότερη βελτίωση SNR από την ομόδυνη αλλά είναι αρκετά βολική και πρακτική καθώς διαθέτει εύκολο σχεδιασμό.

1.2.3.1. Μετάδοση

Η πιο βασική παράμετρος που χαρακτηρίζει τον δέκτη είναι ποιότητα μετάδοσης, δηλαδή ο λόγος του σήματος προς τον θόρυβο(Optical Signal to Noise Ratio -OSNR) σε ένα οπτικό κανάλι.

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

Το OSNR σχετίζεται άμεσα με την ευαισθησία του δέκτη. Όλοι οι δέκτες απαιτούν μια ελάχιστη ισχύ για να μπορέσουν να λειτουργήσουν αξιόπιστα. Το κριτήριο της απόδοσης τους είναι ο ρυθμός εσφαλμένων bit (Bit Error Rate-BER). Οι μηχανισμοί



που υποβαθμίζουν την ευαισθησία του δέκτη είναι οι θόρυβοι, οι απώλειες, η διασπορά και τα μη γραμμικά φαινόμενα που θα αναλυθούν καλύτερα στο επόμενο κεφάλαιο.

1.2.4. Ενισχυτές

Σε ένα οπτικό σύστημα επικοινωνίας η ισχύς του σήματος μειώνεται συνεχώς από διάφορες απώλειες που σχηματίζονται κατά την μετάδοση. Γι' αυτό οι ενισχυτές αποτελούν ένα βασικό κομμάτι του οπτικού συστήματος καθώς μπορούν να ενισχύσουν το σήμα και να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε στάδιο του συστήματος [17]. Στο στάδιο του πομπού ένας ενισχυτής έχει στόχο να σχηματίσει ένα πομπό υψηλής ισχύος. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε WDM συστήματα καθώς μπορεί να βοηθήσει στην αντιστάθμιση της απώλειας διαχωρισμού των σημάτων. Έπειτα κατά μήκος των οπτικών ινών, πολλοί ενισχυτές μπορούν να τοποθετηθούν στην σειρά για την ενίσχυση του σήματος και την αντιστάθμιση των απωλειών. Τέλος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προενισχυτές στον δέκτη. Ωστόσο κατά την διαδικασία της ενίσχυσης εξαιτίας της αυθόρμητης εκπομπής, ακολουθείται και θόρυβος. Έτσι λοιπόν η διαδικασία της ενίσχυσης υποβαθμίζει το SNR λόγω του θορύβου ASE που προστέθηκε στο σήμα σε κάθε στάδιο ενισχυτή. Στον δέκτη, η ευαισθησία ενός προ-ενισχυμένου οπτικού δέκτη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χαρακτηριστικό θορύβου του προενισχυτή.

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι οπτικών ενισχυτών είναι οπτικοί ημιαγωγοί ενισχυτές (SOA), οι EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) και οι ενισχυτές Raman. Οι SOA παρέχουν μια πολύ γρήγορη δυναμική κέρδους που καθορίζεται από τη σύντομη διάρκεια ζωής του φορέα γι' αυτό και ενισχύουν παραπάνω το φαινόμενο της παρεμβολής. Συνήθως αποτελούν την βάση των λέιζερ. Οι EDFA και οι ενισχυτές Raman, έχουν πολύ καλύτερη απόδοση. Οι EDFA είναι εντοπισμένοι ενισχυτές και χρησιμοποιούνται πιο συχνά καθώς παρέχουν μια χαμηλή εικόνα θορύβου. Από την άλλη μεριά οι Raman ενισχυτές, ενισχύουν την οπτική ίνα μέσω της εξαναγκασμένης σκέδασης Raman και χρησιμοποιούνται πολύ σε μεγάλες αποστάσεις.

Εξαιτίας του θορύβου που ενισχύεται, σε μεγάλες αποστάσεις εκτός από τους ενισχυτές που ουσιαστικά αυξάνουν το κέρδος απολαβής, χρησιμοποιούνται και οι αναγεννητές (repeaters). Οι αναγεννητές μπορούν να επαναφέρουν και να αναδημιουργήσουν το οπτικό σήμα. Ωστόσο τα αρνητικά τους είναι το υψηλό κόστος και η απαίτηση για μετατροπή του σήματος σε ηλεκτρική μορφή.

1.2.5. Πολυπλεξία

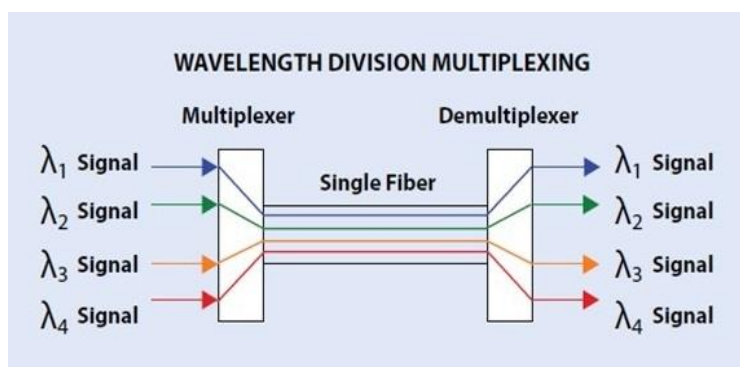
Τα περισσότερα οπτικά συστήματα, χρησιμοποιούν μεθόδους πολυπλεξίας για την καλύτερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης αλλά και για τον περιορισμό διαφόρων



φαινομένων που αλλοιώνουν την ποιότητα της ζεύξης. Οι πιο βασικές μορφές πολυπλεξίας γίνονται στην περιοχή του χρόνου (TDM) ή της συχνότητας (FDM).

Διαίρεσης μήκους κύματος (WDM)

Με την πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος, πολλά οπτικά κανάλια μπορούν ταυτόχρονα να μεταδίδουν κωδικοποιημένα δεδομένα σε διαφορετικά μήκη κύματος, μέσα σε μια μονότροπη ίνα. Χρησιμοποιεί κυρίως EDFA ενισχυτές και η απόσταση τους μπορεί να φτάσει αρκετά χιλιόμετρα. Τα WDM πλέον κατασκευάζονται όλο και πιο στενά, χωρίς να προκαλούν μεταξύ τους διασυμβολικές παρεμβολές, αξιοποιώντας όλο και περισσότερο το συνολικό εύρος ζώνης [18].



Εικόνα 4 – Πολυπλεξία WDM

Πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (SDM)

Η SDM χρησιμοποιεί τη χωρική διάσταση για την μετάδοση ταυτόχρονων διαφορετικών ροών δεδομένων δημιουργώντας παράλληλα κανάλια. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται συνήθως σε σύστημα MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση, συνήθως σε μεγάλες αποστάσεις γίνεται συνδυασμός και των δύο τεχνικών.

1.3 Η εξέλιξη των οπτικών επικοινωνιών την τελευταία δεκαετία

Το διαδίκτυο, το ηλεκτρονικό εμπόριο, τα πολυμέσα και τα δίκτυα υπολογιστών έχουν γίνει ένα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα να υπάρχει διαρκώς η ανάγκη για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και μεγαλύτερο εύρος ζώνης [19] [20] [21].

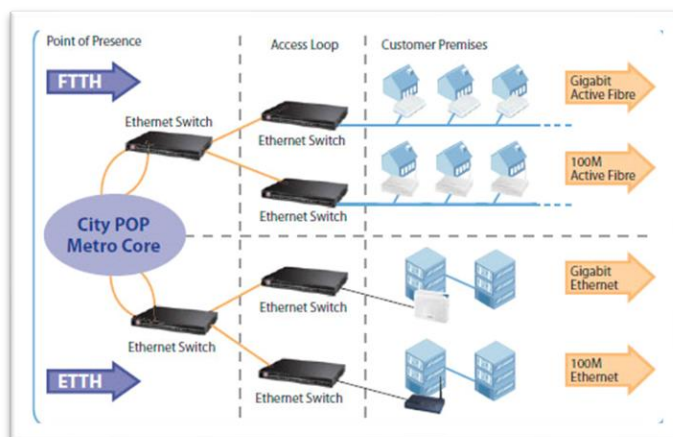
Ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο απαρτίζεται από τρεις βασικές μονάδες: Το δίκτυο κορμού (core), το δίκτυο διανομής (metro) και το δίκτυο πρόσβασης. (access). Με την ανάπτυξη των οπτικών επικοινωνιών, ολοένα και περισσότερο αυξάνεται η χρήση της οπτικής ίνας και στις τρεις αυτές βασικές μονάδες του δικτύου. Καθώς η οπτική ίνα μπορεί να διαχειριστεί μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης, έχουν δημιουργηθεί πλέον δίκτυα οπτικών ινών [22]. Τα δίκτυα κορμού συνδέουν τεράστιες αποστάσεις όπως πόλεις, χώρες, ακόμα και ηπείρους. Αποτελούνται από



κόμβους που συνδέονται μεταξύ τους με οπτικές ίνες και συγκεντρώνουν όλες τις πληροφορίες από το δίκτυο πρόσβασης. Ένα παράδειγμα δικτύου core είναι τα υποβρύχια καλώδια τα οποία πλέον αποτελούν το βασικότερο κομμάτι του διαδικτύου. Υπάρχουν περίπου 350 υποβρύχια καλώδια που εκτείνονται σε 1,2 εκατομμύρια χιλιόμετρα που συνδέουν 100 χώρες και θα συνεχίσουν να αυξάνονται για το 2019-21. Η μετάδοση σε ένα core δίκτυο βασίζεται κυρίως σε DWDM συστήματα πολυπλεξίας τα οποία μπορούν να χειριστούν χωρητικότητα μετάδοσης αρκετών Tbit/s. Το DWDM είναι ένα πυκνό WDM σύστημα το οποίο μπορεί να διαχειριστεί περισσότερα από 8 ενεργά μήκη κύματος ανά ίνα. Απαραίτητη προϋπόθεση στο core είναι ένας καλός και συνεπώς ακριβός εξοπλισμός για την επίτευξη της υψηλής χωρητικότητας σε μεγάλες αποστάσεις.

Τα δίκτυα διανομής ενώνουν μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές, μικρότερες των 1000km. Αποτελούνται από κόμβους που συνδέονται με το core αλλά και το access και γι' αυτό χρειάζονται αρκετή ευελιξία ως προς το εύρος ζώνης και τις συνδέσεις των οπτικών ινών. Ένα από τα σύγχρονα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα δίκτυα core/metro έχει να κάνει με τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις που εμποδίζουν τις διαδικασίες αναβάθμισης είτε λόγω αυξημένου κόστους, είτε λόγω περιορισμένης προσαρμοστικότητας.

Τέλος το δίκτυο πρόσβασης είναι αυτό που συνδέει το δίκτυο metro με τους τελικούς χρήστες. Στους κόμβους του δικτύου διανομής μπορεί να διαχωριστεί το σήμα, τοποθετώντας ενεργό(AON) ή παθητικό εξοπλισμό(PON). Χρησιμοποιώντας AON εξοπλισμό, δημιουργείται ένα δίκτυο με κόμβους που απαιτούν ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχει λιγότερη εξασθένιση του σήματος σε σχέση με τα PON δίκτυα αλλά αποθηκεύεται επιπλέον ενέργεια. Βασικό στοιχείο των AON δικτύων είναι η μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό και αντίστροφα. Από την άλλη πλευρά στα PON δίκτυα δεν γίνεται η μετατροπή του σήματος. Εκμεταλλεύονται θετικά την WDM πολυπλεξία και χρησιμοποιούν κυρίως οπτικούς διαχωριστές (optical splitters) οι οποίοι διαχωρίζουν το σήμα σε πολλά σήματα με μικρότερη ισχύ. Με την χρήση PON δικτύων, σιγά σιγά όλο και περισσότερα καλώδια χαλκού αντικαθίστανται από οπτικές ίνες, οδηγώντας στην ανάπτυξη του FTTH.



Εικόνα 5 -FTTH

Το FTTH προέρχεται από μια γενικευμένη έννοια το FTTx (Fiber To The x) όπου περιλαμβάνονται αρκετές διαμορφώσεις ανάπτυξης ινών, οι οποίες είναι διατεταγμένες σε δύο ομάδες: FTTC/N (Όταν οι οπτικές ίνες τοποθετούνται στο ντουλάπι ή στον κόμβο και με καλώδια χαλκού ολοκληρώνουν τη σύνδεση. Εδώ χρησιμοποιείται κυρίως AON εξοπλισμός) και FTTP/FTTH/ FTTB (Όταν η οπτική ίνα τοποθετείται μέχρι τις εγκαταστάσεις, το σπίτι ή το κτίριο). Το FTTH έχει αρχίσει να γίνεται αρκετά διαδεδομένο τα τελευταία δύο χρόνια στην Ελλάδα. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Cosmote, μέχρι το 2022 η κάλυψη του προβλέπεται να φτάσει σε εκατομμύρια νοικοκυριά και επιχειρήσεις, προσφέροντας ταχύτητες μέχρι και 1Gbit/s.

- Multicore Fiber

Καθώς χρειαζόμαστε όλο και μεγαλύτερη χωρητικότητα, τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτυχθεί η πολυπύρηνη ίνα(multicore fiber- MCF) [23]. Μια MCF ίνα διαθέτει ένα κοινό μανδύα αλλά παραπάνω από έναν πυρήνα. Ο σχεδιασμός των συγκεκριμένων ινών και αριθμός των πυρήνων, μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την κάθε εφαρμογή, παρόλα αυτά θα μπορούσαν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι η uncoupled MCF, όπου κάθε πυρήνας αποτελεί και έναν κυματοδηγό. Ένα σημαντικό πρόβλημα αυτής της ίνας είναι όταν η ισχύς από τον πυρήνα, συνδέεται με τους υπόλοιπους και προκαλεί παρεμβολή. Η δεύτερη κατηγορία είναι η coupled MCF, όπου γίνεται συνήθως τυχαία σύζευξη μεταξύ των πυρήνων. Η συγκεκριμένη κατηγορία μειώνει κατά πολύ το φαινόμενο της διασποράς των τρόπων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες αποστάσεις. Η MCF ίνες μαζί με τις πολύτροπες χρησιμοποιούνται κυρίως στην SDM πολυπλεξία η οποία τείνει να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο μελλοντικά.



- Νέες μορφές Διαμόρφωσης και Διαμόρφωση πολλαπλών επιπέδων - Multilevel Modulation

Με τον ερχομό των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G), οι οπτικές επικοινωνίες αποτελούν το βασικό κομμάτι τους για την μετάδοση μεγάλου όγκου πληροφοριών. Η διαμόρφωση πολλαπλών επιπέδων συμβάλλει στην μετάδοση ενός πλήθους M συμβόλων. Η κύρια διαμόρφωση που χρησιμοποιείται συνήθως είναι η MQAM. Το M συνδέεται με τον k αριθμό bit που κωδικοποιούνται ανά σύμβολο μέσω της σχέσης $M=2^k$. Έτσι καθώς αυξάνεται το M , μεταδίδεται όλο και περισσότερη πληροφορία. Επιπλέον εξετάζονται νέες μορφές διαμόρφωσης όπως είναι η FQAM η οποία είναι ο συνδυασμός της FSK και της QAM αλλά και η διαμόρφωση FTN (Faster than Nyquist) [24]. Σύμφωνα με τα βασικά κριτήρια του Nyquist, δίνεται έμφαση στην ορθογωνικότητα των παλμών καθώς με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται η παρεμβολή μεταξύ τους. Παρόλα αυτά χάνεται η απόδοση του εύρους ζώνης. Με την FTN διαμόρφωση, οι παλμοί παύουν να είναι ορθογωνικοί γιατί αποστέλλονται γρηγορότερα άρα συνεπώς στέλνεται παραπάνω πληροφορία, στο ίδιο εύρος ζώνης, με την ίδια ενέργεια και το ίδιο ποσοστό σφάλματος [25].

1.4. Προβλήματα που περιορίζουν την ανάπτυξη των οπτικών επικοινωνιών

Τα τελευταία χρόνια έχει πραγματοποιηθεί τεράστια εξέλιξη στο κομμάτι των οπτικών επικοινωνιών και αυτό συμβάλλει στην ανάπτυξη όλων των επικοινωνιών, καθώς όπως έχει αναφερθεί οι οπτικές επικοινωνίες αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι της σημερινής κοινωνίας. Ωστόσο, το βασικότερο και συνεχόμενο πρόβλημα που εμποδίζει διαρκώς την εξέλιξή τους, είναι το κομμάτι της χωρητικότητας [26]. Ο μεγάλος όγκος δεδομένων που έχει δημιουργηθεί στην σημερινή εποχή με την χρήση του Διαδικτύου των πραγμάτων (IOT), αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό από έτος σε έτος, προκαλώντας μια επικείμενη έκρηξη χωρητικότητας [27].

Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα, θα μπορούσε να αυξηθεί η συχνότητα του φέροντος έτσι ώστε στο ίδιο μήκος κύματος να μεταδίδεται περισσότερη πληροφορία. Αυτό είναι αδύνατο καθώς οι σύγχρονες οπτικές επικοινωνίες με ίνες πυριτίου, λειτουργούν περίπου στην περιοχή του ορατού φωτός στα 200 THz και γύρω στα 1550 nm. Αυξάνοντας λοιπόν την συχνότητα, υπάρχει κίνδυνος να πέσουμε στις ακτίνες x και γάμμα οι οποίες είναι επιβλαβείς και εκεί δεν μπορεί να υπάρξει μέσω μετάδοσης.

Επιπλέον περιορισμοί δημιουργούνται στην αύξηση της χωρητικότητας της οπτικής ίνας. Υπάρχει δυσκολία στην αύξηση του εύρους ζώνης καθώς οι ίνες πυριτίου λειτουργούν κυρίως στις περιοχές με την λιγότερη διασπορά και εξασθένηση (C, L bands). Ωστόσο το μεγαλύτερο πρόβλημα αποδίδεται κυρίως στην αύξηση της ισχύος



η οποία υπερβαίνει το μη γραμμικό όριο Shannon και απελευθερώνει τα μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία αλλοιώνουν το σήμα και στην ουσία περιορίζουν την απόσταση μετάδοσης. Προβλήματα στην αύξηση της χωρητικότητας αντιμετωπίζονται και στο κομμάτι της πολυπλεξίας. Στη WDM πολυπλεξία, δημιουργώντας περισσότερα μήκη κύματος, χρειάζονται περισσότεροι ενισχυτές οι οποίοι εκτός ότι προσθέτουν κόστος δημιουργούν και επιπλέον θόρυβο που υποβαθμίζει το OSNR. Ακόμη και αν γίνει αλλαγή των EDFA ενισχυτών που χρησιμοποιούνται συνήθως με διαφορετικούς ενισχυτές, θα δημιουργηθούν νέα φαινόμενα θορύβου. Από την άλλη πλευρά, αν και η SDM πολυπλεξία είναι μια πιθανή λύση για ενίσχυση της χωρητικότητας, κάνοντας χρήση MCF και MMF ίνες, απαιτεί την αλλαγή όλου του παγκόσμιου οπτικού δικτύου.

Κεφάλαιο 2 -Παράγοντες απωλειών και περιορισμού του εύρους ζώνης

Στο παρακάτω κεφάλαιο θα αναλυθούν όλα τα φαινόμενα τα οποία αναπτύσσονται σε ένα βασικό οπτικό σύστημα και αποτρέπουν τον δέκτη από τη λήψη ενός “τέλειου” σήματος. [28] Τα φαινόμενα αυτά είναι είτε γραμμικά γιατί δρουν ανεξάρτητα από το σήμα, είτε μη γραμμικά. Στα γραμμικά φαινόμενα εντάσσονται οι απώλειες που δημιουργούνται από την απορρόφηση του υλικού της ίνας, την σκέδαση Rayleigh, τις ατέλειες του κυματοδηγού αλλά και την πάροδο του χρόνου. Το βασικότερο γραμμικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο της διασποράς όπου εξαιτίας του δείκτη διάθλασης, ο παλμός απλώνεται στο χρόνο με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει αλλοιωμένο στο δέκτη. Επιπλέον αναλύονται τα μη γραμμικά εφέ που εξαρτώνται από την αύξηση της ισχύς του σήματος και είναι ο βασικός λόγος περιορισμού της χωρητικότητας. Αποτελούνται από τα φαινόμενα Kerr και την εξαναγκασμένη σκέδαση και σε συνδυασμό με τον θόρυβο των ενισχυτών επηρεάζουν κατά πολύ το μεταδιδόμενο σήμα. Τέλος αναλύονται και όλες οι υπόλοιπες πηγές θορύβου που μπορούν να αναπτυχθούν σε μία οπτική ζεύξη.

2.1 Απώλειες

Η απώλεια μειώνει την οπτική ισχύ που φτάνει στο δέκτη γι' αυτό και παίζει βασικό ρόλο στη διάδοση του σήματος. Η φασματική απώλεια της οπτικής ίνας εκφράζεται ως:

$$a(dB / km) = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{p_{out}}{P_{in}} \right) \approx 4.343\alpha$$



Όπου P_{in} , P_{out} είναι η ισχύς στην είσοδο και στην έξοδο της ίνας, L το μήκος της ίνας και α είναι όλες οι πηγές εξασθένισης και μπορεί να εκφραστεί ως

$$\alpha = \alpha_R + \alpha_m + \alpha_W$$

όπου α_R είναι η απώλεια Rayleigh, α_m οι απώλειες των υλικών και α_W οι απώλειες κυματοδηγού.

2.1.1. Απορρόφηση Υλικού

Στις οπτικές ίνες απορρόφηση πραγματοποιείται όταν σωματίδια που υπάρχουν στο γυαλί της ίνας, απορροφούν ένα μέρος της μεταδιδόμενης οπτικής ισχύος και παράγεται θερμότητα. Η απορρόφηση υλικού μπορεί να διαιρεθεί σε δυο κατηγορίες. Η εγγενής απορρόφηση υλικού που αντιστοιχεί στην απώλεια από το καθαρό πυρίτιο και πραγματοποιείται στην περιοχή του υπέρυθρου ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$) και η εξωγενής απορρόφηση που σχετίζεται με την απώλεια που προκαλείται από προσμίξεις στην περιοχή του υπεριώδους ($\lambda > 1.7 \mu\text{m}$). Η κύρια πηγή εξωγενούς απορρόφησης είναι η παρουσία υδρογόνου. Τα ιόντα OH^- , ευθύνονται για τις μεγάλες απώλειες των οπτικών ινών. Το υδρογόνο μπορεί να διεισδύσει στις ίνες και να προκαλέσει τις δικές του απώλειες κοντά στα $1,2 \mu\text{m}$ και $1,6 \mu\text{m}$. Οι ίνες μπορούν να έρθουν σε επαφή με υδρογόνο το οποίο παράγεται από διάβρωση των μελών του καλωδίου ή από ορισμένα βακτήρια. Το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί προσθέτοντας αδιαπέραστη κάλυψη υδρογόνου στην ίνα

2.1.2. Σκέδαση Rayleigh

Η σκέδαση Rayleigh είναι ο κύριος τύπος γραμμικής σκέδασης. Προκύπτει όταν οι ακτίνες προσκρούουν στις μικρές διακυμάνσεις στην πυκνότητα της ίνας και αποκτούν τυχαίο δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα να διασκορπίζονται σε κλίμακα μικρότερη του μήκους κύματος λ [29]. Η ενεργός διατομή μεταβάλλεται με ρυθμό λ^{-4} .

$$a_R = \frac{C}{\lambda^4}$$

a_R εγγενής απώλεια λόγω σκέδασης Rayleigh, C σταθερά υλικού εντός της περιοχής των $0,7$ έως $0,8$ και λ μήκος κύματος.

2.1.3. Ατέλειες Κυματοδηγού

Η πρώτη βασική απώλεια είναι το λύγισμα της ίνας. Οι ακτίνες για να υποστούν ολική ανάκλαση και να διαδοθούν στην ίνα, σχηματίζουν γωνία που είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία. ($\theta_r > \theta_c$). Με το λύγισμα της ίνας, αλλάζει η φάση στη διάδοση του φωτός και σιγά σιγά η γωνία της ακτίνας μικραίνει. Για μικρές στροφές η απώλεια είναι αμελητέα αλλά σε έντονα λυγίσματα η γωνία της ακτίνας πλησιάζει



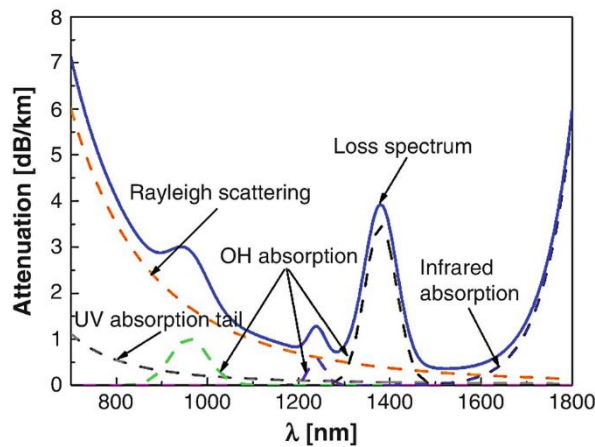
την κρίσιμη και συνεχίζει να μικραίνει με αποτέλεσμα οι ακτίνες να φύγουν από την περιοχή του πυρήνα και του περιβλήματος και να διαχέονται προς τα έξω. Η απώλεια λυγίσματος για μια ακτίνα με καμπύλη R σε μία κλασική ίνα, δίνεται από την σχέση:

$$L_B = -10 \log \left(1 - 890 \frac{r_0^6}{\lambda^4 R^2} \right)$$

Εκτός από το λύγισμα της ίνας, το υπερβολικό τέντωμα της μπορεί να επιφέρει μορφές σκέδασης. Επίσης όσον αφορά την αρχική κατασκευή της ίνας, κάποιες ατέλειες μπορούν να δημιουργήσουν απώλεια. Συγκεκριμένα, μια ιδανική ίνα κυματοδηγεί το φως χωρίς κάποια διαρροή ενέργειας. Στην πράξη αυτό διαφέρει γιατί η περιοχή μεταξύ του πυρήνα και του μανδύα εμφανίζει ατέλειες και εξαιτίας της σκέδασης Mie δημιουργούνται απώλειες. Η σκέδαση Mie πραγματοποιείται εξαιτίας του διαφορετικού δείκτη διάθλασης σε κλίμακα μεγαλύτερου μεγέθους με το μήκος κύματος. Επιπλέον, κατά την διάρκεια της καλωδίωσης όταν η ίνα πιέζεται σε επιφάνεια που δεν είναι απόλυτα λεία, δημιουργούνται τυχαίες αξονικές παραμορφώσεις. Οι μικροκαμπές αυτές φέρνουν σημαντικές απώλειες της τάξης των 100 dB / km, τόσο στις μονότροπες όσο και στις πολύτροπες ίνες. Μερικοί τρόποι περιορισμού των απωλειών στις μονότροπες ίνες είναι η συχνότητα αποκοπής να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο 2.405 και στις πολύτροπες ίνες είναι μια μικρή αύξηση στο αριθμητικό άνοιγμα. Τέλος στο κομμάτι της καλωδίωσης, σημαντική απώλεια μπορεί να επιφέρει και η ένωση δύο ινών. Είναι δεδομένο ότι τις τεράστιες αποστάσεις δεν μπορεί να τις καλύψει μία ίνα. Η απώλεια δημιουργείται καθώς γίνεται ένωση των ινών και προκύπτει εσφαλμένη ευθυγράμμιση των πυρήνων.

2.1.4. Απώλειες κατά την πάροδο του χρόνου

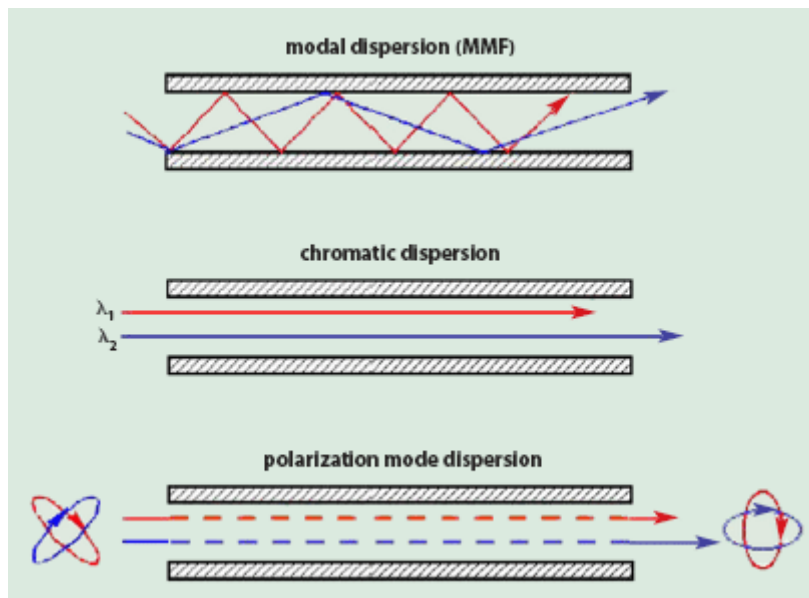
Με την πάροδο του χρόνου, οι ίνες μπορεί να επιφέρουν μεγάλη εξασθένηση. Ορισμένα πολυμερή υλικά έχουν την τάση να γίνονται κίτρινα με την πάροδο του χρόνου, ειδικά όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες όπως για παράδειγμα σε υπεριώδη ακτινοβολία. Ακόμη υψηλότερη απώλεια μπορεί να επιφέρει ο συνδυασμός υψηλής θερμοκρασίας και η απορρόφηση υγρασίας. Η επίδραση των απωλειών αντιμετωπίζεται κυρίως με την εισαγωγή ενισχυτών και αναγεννητών ανά χιλιάδες χιλιόμετρα.



Εικόνα 6 – Οπτικές Απώλειες

2.2 Διασπορά

Η διασπορά είναι ένα γραμμικό φαινόμενο το οποίο κάνει έναν οπτικό παλμό να απλώνεται στο πεδίο του χρόνου. Καθώς οι παλμοί απλώνονται σταδιακά πέφτουν ο ένας στον άλλον με αποτέλεσμα να προκαλείται διασυμβολική παρεμβολή και στην έξοδο του καναλιού να υπάρχει αλλοίωση του σήματος. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση της εμβέλειας και του ρυθμού μετάδοσης.



Εικόνα 7-Διασπορά

2.2.1. Διασπορά στις Πολύτροπες Ίνες

2.2.1.1. Διασπορά των Τρόπων (Modal Dispersion)

Η διασπορά των τρόπων εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες. Αν υποθέσουμε ότι κάθε ρυθμός είναι μια ακτίνα, τότε η κάθε ακτίνα μέσα στην ίνα, αναπτύσσει την δικιά της



ταχύτητα και φτάνει στο δικό της χρόνο. Συνεπώς το σήμα στην έξοδο της ίνας θα είναι ένα μετατοπισμένο χρονικά αντίγραφο της αρχικής κυματομορφής που θα οδηγήσει σε παραμόρφωση. Η ακτίνα που ταξιδεύει παράλληλα στο κέντρο της ίνας ακολουθεί την γρηγορότερη διαδρομή ενώ η ακτίνα που θα αναπτύσσει μέγιστη γωνία ίσα με την κρίσιμη ($\theta_i = \theta_c$), θα είναι η πιο αργή. Η καθυστέρηση της γρηγορότερης διαδρομής είναι:

$$T_{min} = \frac{L \cdot n_1}{c}$$

Όπου L η απόσταση, n_1 ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Η καθυστέρηση της αργότερης διαδρομής είναι:

$$T_{max} = \frac{L \cdot n_1^2}{c \cdot n_2}$$

Όπου L η απόσταση, n_1 ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα, n_2 ο δείκτης διάθλασης του μανδύα και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Η διαφορά των δύο αυτών διαδρομών:

$$\delta T = T_{max} - T_{min} = \frac{L n_1^2}{c n_2} \Delta$$

Το όριο ανοχής της διασποράς είναι:

$$\delta T < \frac{1}{2\beta}$$

Όπου β είναι η μέγιστη ανοχή συμβόλου. Όσο μεγαλώνει το δT , τόσο πρέπει να ρίχνουμε το ρυθμό μετάδοσης γιατί αλλιώς οι παλμοί θα πέφτουν ο ένας στον άλλον.

Για τη βέλτιστη τιμή ο περιορισμός της διασποράς γίνεται:

$$BL < \frac{1}{2} \cdot \frac{n_2}{n_1^2} \cdot \frac{C}{\Delta}$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το BL, τόσο καλύτερη είναι η ζεύξη μας. Όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης, εξαιτίας της δομής τους, είναι λιγότερο επιρρεπείς στο φαινόμενο της διασποράς των τρόπων απ' ό,τι οι πολύτροπες ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης.

2.2.2 Διασπορά στις Μονότροπες ίνες

Ένας παλμός φωτός που εισάγεται από τον πομπό στο ένα άκρο μιας μονότροπης ίνας απλώνεται καθώς εξάγεται από το άλλο άκρο. Αυτό συμβαίνει επειδή η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση από μια πηγή LED/λείζερ σε ένα μήκος κύματος



δημιουργεί μεγάλο αριθμό αρμονικών κυμάτων, τα οποία ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες και φθάνουν σε διαφορετικούς χρόνους.

2.2.2.1. Χρωματική Διασπορά (Chromatic Dispersion)

Στις μονότροπες ίνες δεν υπάρχει διασπορά των τρόπων διάδοσης αλλά επικρατεί κυρίως η χρωματική διασπορά, όπου η ταχύτητα ομάδας που σχετίζεται με τον τρόπο διάδοσης, εξαρτάται από την συχνότητα [30]. Η εξάρτηση από το μήκος κύματος της ταχύτητας διάδοσης προκύπτει από ένα συνδυασμό της διασποράς κυματοδηγού και της διασποράς υλικού. Η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης n από τη συχνότητα:

$$n = n(\omega)$$

Ο χρόνος που θα κάνει ο παλμός να φτάσει στην έξοδο της ίνας δίνεται από την σχέση:

$$T = \frac{L}{V_g}$$

Όπου L είναι η απόσταση και V_g είναι η ταχύτητα ομάδας η οποία εξαρτάται από την συχνότητα.

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

Η εξάρτηση της V_g προκαλεί το άπλωμα του παλμού επειδή η διαφορετικές συνιστώσες του παλμού διασκορπίζονται κατά την διάδοση. Η έκταση που θα πάρει ο παλμός καθώς θα απλωθεί δίνεται από τις σχέσεις:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{dL}{d\omega V_g} \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = L\beta_2 \Delta\omega$$

$$\Delta T = \frac{dL}{d\lambda V_g} \Delta\lambda = DL\Delta\lambda$$

Όπου $\Delta\omega$ το φασματικό εύρος του παλμού, $\Delta\lambda$ η περιοχή του μήκους κύματος και β είναι η σταθερά διάδοσης του ρυθμού στη μονότροπη ίνα:

$$\beta(\omega) = \frac{\bar{n}(\omega)\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots + \beta_m(\omega - \omega_0)^m$$

Η ανάπτυξη του β σε σειρά Taylor γύρω από το φορέα:

$$\beta_m = \left. \frac{d^m\beta}{d\omega^m} \right|_{\omega=\omega_0} \text{ για } m = 1, 2, 3, \dots$$



Η παράμετρος β_2 ονομάζεται παράμετρος διασποράς ταχύτητας ομάδας και καθορίζει το πόσο θα απλωθεί ο παλμός.

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$$

Η παράμετρος D στην δεύτερη εξίσωση είναι η παράμετρος της χρωματικής διασποράς. Η διασπορά αυξάνεται τόσο με το μήκος των ινών όσο και με το φασματικό πλάτος της οπτικής πηγής που χρησιμοποιείται και μετρείται σε «picoseconds ανά nanometer km» (ps / nm/km)

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{V_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$$

$$D = D_{\text{υλικού}} + D_{\text{κυματοδηγού}}$$

Η διασπορά σχετίζεται με την κλίση του δείκτη διάθλασης της ομάδας. Για τις κλασικές μονότροπες ίνες πυριτίου, υπάρχει ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος περίπου στη περιοχή 1300-1700nm που η διασπορά μηδενίζει. Εξαιτίας των χαμηλών απωλειών στην περιοχή των 1550 nm όπου λειτουργούν και οι EDFA ενισχυτές, πολλές μονότροπες ίνες έχουν σχεδιαστεί με μήκος κύματος μηδενικής διασποράς περίπου στα 1550 nm. Τέτοιες ίνες έχουν γίνει εξαιρετικά δημοφιλείς και αναφέρονται γενικά ως ίνες μετατόπισης διασποράς (DSF).

Επίσης ανάλογα με τον πόλωση του δείκτη διάθλασης, ένας παλμός διαδίδεται με θετική ή αρνητική διασπορά. Με θετική διασπορά, τα κύματα χαμηλής συχνότητας ταξιδεύουν πιο γρήγορα από τα υψηλής συχνότητας. ($\Delta > 0$ & $\beta_2 < 0$). Αντίθετα, με την αρνητική διασπορά τα κύματα χαμηλής συχνότητας ταξιδεύουν πιο αργά από τα υψηλής συχνότητας. ($\Delta < 0$ & $\beta_2 > 0$). Η διασπορά αυξάνεται με το μήκος κύματος και στις περισσότερες ίνες τηλεπικοινωνιών αλλάζει από αρνητικό σε θετικό μεταξύ των παραθύρων μετάδοσης 1300nm και 1550nm.

Διασπορά υλικού

Οφείλεται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης της ίνας από τη συχνότητα. Συγκεκριμένα ο δείκτης διάθλασης του πυριτίου από το οποίο είναι φτιαγμένη η ίνα, αντιδρά με την οπτική συχνότητα ω , καθώς το υλικό απορροφά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η διασπορά του υλικού είναι αρνητική μέχρι να φτάσει στο μήκος κύματος που μηδενίζει και στην συνέχεια γίνεται θετική πάνω από αυτό.

$$D_{\text{υλικού}} = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \frac{dn_{2g}}{d\omega} = \frac{1}{c} \frac{dn_{2g}}{d\lambda}$$



Όπου n_{2g} είναι ο δείκτης διάθλασης ομάδας του υλικού του μανδύα.

Διασπορά Κυματοδηγού

Οφείλεται στο ότι ένα μέρος του φωτός κυματοδηγείται στον πυρήνα και ένα στον μανδύα. Με αποτέλεσμα η ταχύτητα να εξαρτάται από το λόγο της ισχύς εντός και εκτός πυρήνα. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του κύματος, τόσο περισσότερη ισχύς κυματοδηγείται στον πυρήνα. Η διασπορά του κυματοδηγού είναι αρνητική σε όλο το μήκος κύματος:

$$D_{\text{κυματοδηγού}} = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[\frac{n_{2g}^2}{n_{2\omega}} \frac{V}{dV^2} \frac{d^2(Vb)}{dV^2} + \frac{dn_{2g}}{d\omega} \frac{d(Vb)}{dV} \right]$$

Όπου V η συχνότητα αποκοπής και b η σταθερά διάδοσης.

2.2.2.2. Διασπορά Ανώτερης Τάξης

Η επίδραση της διασποράς στο ρυθμό μετάδοσης υπολογίζεται με την σχέση:

$$BL|D|\Delta\lambda < 1$$

Το BL της οπτικής ίνας μπορεί να επεκταθεί στο άπειρο αν το σύστημα λειτουργεί στο μήκος κύματος που η συνολική διασπορά είναι μηδέν. Ωστόσο, η διασπορά δεν εξαφανίζεται εντελώς στο συγκεκριμένο μήκος κύματος. Οι οπτικοί παλμοί εξακολουθούν να διευρύνονται λόγω της διασποράς υψηλότερης τάξης. Ο συνολικός συντελεστής διασποράς δεν μπορεί είναι μηδέν σε κάθε μήκος κύματος στο οπτικό φάσμα.

$$S = \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2} \right)^2 \beta_3 + \left(\frac{4\pi c}{\lambda^3} \right) \beta_2$$

Όπου S η παράμετρος διασποράς δεύτερης τάξης, $\beta_2 = 0$, $\beta_3 = 2\beta_2/d\omega$. Οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων μέσω μιας οπτικής ίνας μπορούν να αυξηθούν μέσω της πολυπλεξίας WDM. Παρόλα αυτά η κλίση της διασποράς επιφέρει διαφορετικές τιμές διασποράς για κάθε κανάλι οπότε και είναι δύσκολη η αντιστάθμιση του φαινομένου.

2.2.2.3. Διασπορά τρόπου πόλωσης (Polarization Dispersion)

Σε μια ιδανική κυκλικά συμμετρική ίνα, οι δύο ορθογώνιες συνιστώσες πόλωσης (x,y) έχουν την ίδια καθυστέρηση ομάδας. Παρόλα αυτά στην πραγματικότητα, εξαιτίας της διαδικασίας κατασκευής, ο πυρήνας της ίνας παρουσιάζει ατέλειες. Η ασυμμετρία στον πυρήνα που προκαλείται εξαιτίας των ατελειών, επιφέρει αλλαγή στους δείκτες διάθλασης των συνιστωσών, με αποτέλεσμα οι δύο συνιστώσες να



ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα κατά μήκος της ίνας και στην έξοδο να φτάσουν χρονικά μετατοπισμένες. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διασπορά τρόπου πόλωσης (PMD) και προκαλεί διαφορετικές καθυστερήσεις για διαφορετικές πολώσεις. Όταν η διαφορά στις καθυστερήσεις πλησιάζει ένα σημαντικό κλάσμα της περιόδου bit, οδηγεί σε παραμόρφωση παλμού. Η χρονική καθυστέρηση μπορεί να υπολογιστεί ως:

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

Όπου x,y οι δύο συνιστώσες.

2.3 Μη Γραμμικά Φαινόμενα

Η απώλειες και το φαινόμενο της διασποράς που συζητήθηκε παραπάνω ανήκουν στα γραμμικά φαινόμενα γιατί η επίδραση τους είναι ανεξάρτητη από το σήμα. Τα μη γραμμικά φαινόμενα είναι διαφορετικά από αυτή την άποψη, καθώς εξαρτώνται από την ισχύ του σήματος. Αυτό επηρεάζει αρκετά γιατί τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση για μετάδοση όλο και περισσότερης πληροφορίας, οδηγεί στην ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας του εύρους ζώνης. Αυξάνοντας την τάξη της διαμόρφωσης για την μετάδοση περισσότερων σύμβολων, θα μπορούσε να αποτελέσει πιθανή εναλλακτική λύση, ωστόσο, ο λόγος για τον οποίο δεν έχει υιοθετηθεί αυτή η λύση, είναι γιατί η χωρητικότητα του καναλιού περιορίζεται σημαντικά από το μη γραμμικό όριο Shannon:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right)$$

Όπου C η χωρητικότητα του καναλιού, W το εύρος ζώνης, P η εκπεμπόμενη ισχύς και N ο θόρυβος. Σε οπτικά δίκτυα μεγάλων αποστάσεων, αυτό το όριο αποδίδεται κυρίως στα μη γραμμικά φαινόμενα και την αλληλεπίδρασή τους με τον ενισχυμένο αυθόρμητο θόρυβο εκπομπής των οπτικών ενισχυτών [31]. Τα μη γραμμικά φαινόμενα εγείρονται όταν η οπτική ισχύς του σήματος είναι αρκετά μεγάλη ώστε να διαμορφώσει το δείκτη διάθλασης του μέσου. Η αλλαγή του δείκτη διάθλασης ισοδυναμεί με αλλαγή της ταχύτητας, άρα και της φάσης του σήματος με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει αλλοιωμένο στον δέκτη. Τα μη γραμμικά φαινόμενα που επιδρούν στις οπτικές ίνες συμβαίνουν για δύο λόγους: τα φαινόμενα Kerr και την εξαναγκασμένη σκέδαση [32] [33] [34].

2.3.1. Φαινόμενα Kerr

Η εξάρτηση ισχύος του δείκτη διάθλασης είναι υπεύθυνη για το αποτέλεσμα Kerr. Η μη αρμονική προέλευση ηλεκτρονίων στα οπτικά πεδία επιφέρει μια μη γραμμική ευαισθησία στο υλικό. Ο δείκτης διάθλασης στην υψηλή ισχύ μπορεί να γραφεί ως:



$$n' = n_{1,2} + \bar{n}_2 \frac{P}{A_{eff}}$$

Οπου $n_{1,2}$ ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα και του μανδύα, $\bar{n}_2$ ο συντελεστής μη γραμμικού δείκτη ($\bar{n}_2 = 2,6 * 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$), P είναι η μέση ισχύς του παλμού και A_{eff} είναι η περιοχή που επηρεάζεται στον κυματοδηγό. Ανάλογα με τον τύπο του σήματος εισόδου, η Kerr-μη γραμμικότητα εκδηλώνεται σε τρία διαφορετικά φαινόμενα:

2.3.1.1. Αυτοδιαμόρφωση Φάσης (SPM)

Η αυτοδιαμόρφωση φάσης (SPM), είναι ένα φαινόμενο που δημιουργείται με την αύξηση της ισχύς και οδηγεί σε φασματική διεύρυνση των οπτικών παλμών. Ο δείκτης διάθλασης και η σταθερά διάδοσης εξαρτώνται από την ισχύ γι' αυτό και προκαλείται αυτοεστίαση των ακτινών. Έτσι λοιπόν η μη γραμμική μετατόπιση φάσης δίνεται από τον τύπο:

$$\phi_{NL} = \int_0^L (\beta' - \beta) dz = \int_0^L P(z) dz = \gamma P_{in} L_{eff}$$

Οπου β η σταθερά διάδοσης, $P(z) = P_{in} \exp(-az)$ η απώλεια οπτικής ίνας και L_{eff} το αποτελεσματικό μήκος, το οποίο είναι μικρότερο από την κανονική απόσταση εξαιτίας των απωλειών που υπάρχουν στις ίνες. Παρατηρείται ότι η μη γραμμική μετατόπιση φάσης αυξάνεται κατά μήκος της ίνας L . Η μέγιστη μετατόπιση φάσης ϕ_{max} εμφανίζεται στην κορυφή του παλμού.

$$\phi_{max} \approx \left(\frac{M-1}{2} \right) \pi$$

Οπου M ο αριθμός των κορυφών κάθε φάσματος. Στις ίνες, μια μικρή επιβράδυνση φάσης στην κορυφή του παλμού θα οδηγήσει σε αρκετά μεγάλη διαμόρφωση της φάσης. Αυτή η επιβράδυνση φάσης ονομάζεται συχνότητα τετερίσματος και προκαλείται από την διαφορά των γωνιακών συχνοτήτων από το κέντρο ως το μήκος του παλμού. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά, τόσο μεγαλύτερο θα είναι και άπλωμα του παλμού. Η φασματική διεύρυνση του παλμού που προκαλείται από το SPM αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση. Έτσι λοιπόν δεδομένου ότι η παλμική εξάπλωση περιορίζει τον ρυθμό πληροφοριών σε ένα σύστημα μετάδοσης ινών, η αυτοδιαμόρφωση της φάσης είναι μια σημαντική μη γραμμική διαδικασία περιορισμού ισχύος στις μονότροπες ίνες.



Ωστόσο, από την άλλη πλευρά, το φαινόμενο της αυτοδιαμόρφωσης μπορεί να αξιοποιηθεί θετικά για πολλές εφαρμογές. Σε σύντομους παλμούς, δίνοντας μεγάλη ισχύ, η φασματική διεύρυνση θα είναι αρκετά ισχυρή. Αυτό το ευρύ φάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια πηγή καναλιών WDM.

- Επίδραση της διασποράς ταχύτητας ομάδας

Στους μεγάλους παλμούς, το μήκος της διασποράς είναι πολύ μεγαλύτερο σε σύγκριση με το μήκος των ινών και το μη γραμμικό μήκος. Καθώς οι παλμοί γίνονται μικρότεροι και το μήκος της διασποράς γίνεται συγκρίσιμο με το μήκος των ινών, τα φαινόμενα της διασποράς με την αυτοδιαμόρφωση φάσης συνδυάζονται και πολλές φορές μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα. Στην αρνητική περιοχή της διασποράς μιας οπτικής ίνας, τα δύο φαινόμενα μπορούν να συνεργαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε ο παλμός να διαδίδεται ως οπτικό μονότονο. Ενώ στην θετική περιοχή της διασποράς, τα συνδυασμένα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συμπίεση παλμού.

2.3.1.2. Ετεροδιαμόρφωση Φάσης(XPM)

Το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM, ή μερικές φορές, CPM) είναι παρόμοιο με το SPM, με τη διαφορά ότι, δύο κανάλια διαδίδονται ταυτόχρονα μέσα σε μια ίνα και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους μέσω της μη γραμμικότητας. Έτσι λοιπόν η μη γραμμική ολίσθηση φάσης για ένα κανάλι, δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ του αλλά και από την ισχύ των άλλων καναλιών. Η ολίσθηση φάσης για το j κανάλι, δίνεται από τον τύπο:

$$\phi_j^{NL} = \gamma L_{eff} \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right)$$

Όπου m ο συνολικός αριθμός των καναλιών και P_j η ισχύς του καναλιού για ($j=1$ μέχρι m). Από τον τύπο, παρατηρείται ότι το XPM είναι διπλάσια αποτελεσματικό από το SPM για την ίδια ποσότητα ισχύος, και γενικά το XPM δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από το σχεδιασμό του συστήματος όπως μπορεί να γίνει με το SPM. Το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης είναι αρκετά καταστροφικό σε συστήματα που χρησιμοποιούν διαμόρφωση φάσης και επιπλέον επηρεάζει αρκετά την απόδοση των WDM καναλιών καθώς δημιουργείται αλληλεπίδραση με τα γειτονικά κανάλια. Τα συστήματα αυτά επηρεάζονται επίσης και από το λεγόμενο ενδοκαναλικό XPM, που προκύπτει από την επικάλυψη γειτονικών παλμών που ανήκουν στο ίδιο κανάλι.

2.3.1.3. Μίξη τεσσάρων κυμάτων (FWM).

Η ανάμιξη τεσσάρων κυμάτων (FWM) είναι ένα φαινόμενο το οποίο εξαιτίας της μεγάλης ισχύς και της μη γραμμικότητας της τρίτης τάξης(χ^3), προκαλεί γένεση νέων



κυμάτων με νέες συχνότητες [35]. Όταν πολλά κανάλια μεταδίδονται ταυτόχρονα πάνω στην ίδια ίνα, η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ισχύ, οδηγεί σε μετατόπιση φάσης, αλλά και στην δημιουργία νέων των νέων σημάτων. Αν τρία κύματα με φέρουσες συχνότητες $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, διαδίδονται μέσα στην ίνα ταυτόχρονα. Η χ^3 δημιουργεί ένα τέταρτο σήμα με συχνότητα ω_4 το οποίο σχετίζεται με τις συχνότητες των κυμάτων με τη σχέση: $\omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3 = \omega_4$. Αν και τα τρία αρχικά κύματα έχουν την ίδια συχνότητα, τότε το παραγόμενο θα έχει την ίδια συχνότητα με τα αρχικά αλλά μπορεί να διακριθεί από την κατεύθυνση διάδοσης του. Εάν μόνο δύο από τα τρία κύματα είναι ίδια ($\omega_1 + \omega_2 = -\omega_3$), τότε η συχνότητα του παραγόμενου θα είναι χαμηλότερη από τις αρχικές συχνότητες.

Ένα απλό παράδειγμα που συμβαίνει το FWM φαινόμενο, είναι στην πολυπλεξία WDM, όπου με μόνο 10 κανάλια μπορούν να παραχθούν εκατοντάδες νέα με αυτόν τον τρόπο. Το φαινόμενο FWM είναι ένα από τα πιο κυρίαρχα μη γραμμικά εφέ σε οπτικά δίκτυα γιατί εκτός ότι προκαλεί απώλεια ισχύος για ένα κανάλι, προκαλεί και το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής καθώς η ενέργεια του καναλιού μεταφέρεται και στα γειτονικά κανάλια. Επίσης σε συστήματα μετάδοσης που χρησιμοποιούν το μήκος κύματος με μηδενική διασπορά, το FWM είναι ένα σοβαρό πρόβλημα, ενώ όταν υπάρχει υψηλή τοπική διασπορά, το FWM μπορεί να κατασταλεί αποτελεσματικά. Από την άλλη πλευρά, το φαινόμενο FWM μπορεί να αξιοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές στις οπτικές τηλεπικοινωνίες, όπως είναι η μετατροπή μήκους κύματος και η οπτική εναλλαγή.

2.3.2 Εξαναγκασμένη Σκέδαση

Στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης σκέδασης, παράγονται φωτόνια με διαφορετική συχνότητα και φάση με αποτέλεσμα την απώλεια ισχύος μέσα σε μια οπτική ίνα. Καθώς αυξάνεται η ισχύς, η εξαναγκασμένη σκέδαση μπορεί να προκαλέσει διεγερμένα αποτελέσματα, όπως εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin (SBS) και εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (SRS) [36]. Όσο η ισχύς αυξάνεται και ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου, τόσο ένταση του σκεδασμένου φωτός θα αυξάνεται εκθετικά και στις δύο περιπτώσεις,

2.3.2.1. Φυσική Εξήγηση Σκέδασης Raman (SRS)

Ένας ημιαγωγός αποτελείται από την ζώνη σθένους, την ζώνη αγωγιμότητας και τις δύο πλευρικές ζώνες. Η διαφορά μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας ονομάζεται ενέργεια διακένου (E_g). Τα φωτόνια είναι κβάντα ενέργειας, τα οποία εμφανίζονται είτε σαν σωματίδια είτε σαν κύμα. Τα φωτόνια βρίσκονται στην ζώνη σθένους και δίνουν ένα μέρος της ενέργειάς τους για να μεταπηδήσουν στην ζώνη αγωγιμότητας ώστε να παραχθεί ενέργεια ($E = h\nu_p > E_g$).



Μόλις το φωτόνιο φτάσει στην ζώνη αγωγιμότητας και μετά πέσει, θα δημιουργήσει ένα νέο φωτόνιο μειωμένης ενέργειας και διαφορετικής συχνότητας ($E=hf$). Το φωτόνιο που έπεσε θα απορροφηθεί από τα μόρια του πυριτίου και θα διαδοθεί σαν φωνόνιο. Τα μόρια του πυριτίου θα καταλήγουν σε μια κατάσταση δόνησης. Με αυτό τον τρόπο παράγεται κύμα με διαφορετική συχνότητα που ονομάζεται κύμα Stokes. Η ισχύς Stoke περιγράφεται ως:

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_R I_s$$

Οπου I_s η ένταση Stoke, το I_R είναι η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και g_R ο συντελεστής κέρδους της αυθόρμητης σκέδασης Raman. Η συχνότητα σκέδασης ορίζεται ως:

$$\omega = \omega_p - \omega_s$$

Με την μετάδοση της υψηλής ισχύς το κύμα Stokes αρχίζει και μεγαλώνει με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας να μεταδίδεται μέσα σε αυτό. Το κατώφλι Raman είναι το όριο κατά το οποίο οι απώλειες που εισάγονται στο σήμα παρουσιάζουν γραμμική αύξηση.

$$\frac{g_R P_{th} L_{eff}}{A_{eff}} \approx 16$$

Οπου P_{th} η ισχύς κατωφλίου.

Το SRS δεν είναι τόσο πιθανό να συμβεί σε ένα κανάλι ενός οπτικού συστήματος επικοινωνίας γιατί τα επίπεδα ισχύος είναι αρκετά χαμηλά. Όμως σε συστήματα πολυπλεξίας μπορεί να περιορίσει σοβαρά την απόδοσή τους, μεταφέροντας ενέργεια από ένα κανάλι στα γειτονικά κανάλια. Παρόλα αυτά, το SRS μπορεί να αξιοποιηθεί και να μετατραπεί σε ενισχυτές ευρείας ζώνης Raman και ρυθμιζόμενα λέιζερ Raman.

2.3.2.2. Σκέδαση Brillouin (SBS)

Η διεγερμένη σκέδαση Brillouin είναι μια μη γραμμική διαδικασία που μπορεί να συμβεί σε οπτικές ίνες σε επίπεδα ισχύος εισόδου πολύ χαμηλότερα από αυτά που απαιτούνται για διεγερμένη σκέδαση Raman (SRS). Όπως και στο SRS, εκδηλώνεται μέσω της δημιουργίας ενός κύματος Stokes με παρόμοιο τρόπο με την διαφορά ότι συμμετέχουν ακουστικά φωτόνια. Η ίδια διαδικασία σκέδασης μπορεί να θεωρηθεί κβαντικά μηχανικά σαν να δημιουργείται ένα φωτόνιο Stokes και ένα ακουστικό φωνόνιο. Στην SBS προκαλείται ανάκλαση προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η ισχύς Stoke περιγράφεται ως:



$$\frac{dI_s}{dz} = g_B I_R I_s$$

Οπου g_B ο συντελεστής κέρδους της αυθόρμητης σκέδασης. Το ακουστικό κύμα παράγει διαμορφώσεις πυκνότητας που με τη σειρά τους διαμορφώνουν τον δείκτη διάθλασης του μέσου. Το πόσο θα εξασθενίσουν τα ακουστικά κύματα στην ίνα, θα καθορίσουν και το εύρος ζώνης του SBS. Το κατώφλι Brillouin δίνεται από την σχέση:

$$\frac{g_B P_{th} L_{eff}}{A_{eff}} \approx 21$$

Με την μετάδοση της υψηλής ισχύς το κύμα Stokes αρχίζει και μεγαλώνει αλλά η ισχύς του διαδιδόμενου κύματος που φτάνει στο δέκτη αρχίζει να μειώνεται.

Βασικές Διαφορές

SBS	SRS
Συμμετέχουν ακουστικά φωτόνια	Συμμετέχουν οπτικά φωτόνια
Στις μονότροπες ίνες εμφανίζεται μόνο στην επιστροφή.	Στις μονότροπες ίνες κυριαρχεί στην ορθή κατεύθυνση.
Πολύ στενό φάσμα (εύρος ζώνης < 100MHz)	Το φάσμα εκτείνεται στα (20-30 THz)

Πίνακας 1 - Διαφορές SBS, SRS

2.4 Πηγές Θορύβου

2.4.1. Θόρυβος στον Πομπό

- Θόρυβος του λείζερ

Το σήμα στην έξοδο ενός λείζερ παρουσιάζει διακυμάνσεις στην φάση, την συχνότητα και την ένταση, ακόμη και αν το λείζερ είναι πολωμένο με σταθερό ρεύμα. Αυτό οφείλεται στην διαδικασία της αυθόρμητης εκπομπής καθώς τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν με αυθόρμητο τρόπο από την ζώνη αγωγιμότητας στην ζώνη σθένους και παράγουν φωτόνια με τυχαία φάση και συχνότητα. Το φάσμα σχετικής έντασης θορύβου δίνεται από την σχέση:



$$RIN(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{pp}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau$$

Όπου $C_{pp}(\tau)$ είναι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης- έντασης. Οι διακυμάνσεις στην φάση και στην ένταση του εκπεμπόμενου φωτός που δημιουργούνται εξαιτίας των νέων φωτονίων, μειώνουν το SNR.

2.4.2. Θόρυβος στο Δέκτη

Ο θόρυβος στο δέκτη προκαλεί διακυμάνσεις στο ρεύμα με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η απόδοση του. Υπάρχουν δύο είδη θορύβου: ο θόρυβος βολής και ο θερμικός θόρυβος. Και τα δύο είδη συνυπάρχουν μαζί ακόμη και με σταθερή ισχύ.

2.4.2.1. Θόρυβος Βολής

Ο θόρυβος βολής προκύπτει από την τυχαία κίνηση ηλεκτρονίων στο ρεύμα. Το ρεύμα της φωτοδιόδου δίνεται από την σχέση:

$$I(t) = I_p + i_s(t)$$

Όπου I_p είναι το μέσο ρεύμα και $i_s(t)$ η διακύμανση του ρεύματος εξαιτίας του θορύβου. Η φασματική πυκνότητα θορύβου για αρνητική και θετική πλευρά, είναι σταθερή και δίνεται από την σχέση:

$$S_s(f) = qI_p$$

Η μεταβολή του θορύβου ορίζεται ως:

$$\sigma_s^2 = (i_s^2(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_s(f) df = 2qI_p\Delta f$$

Όπου Δf το εύρος ζώνης του ενεργού θορύβου του δέκτη. Επειδή και το ρεύμα σκότους δημιουργεί θόρυβο (άρα $I_p + I_d$), ο ολικός θόρυβος βολής δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_s^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f$$

2.4.2.2. Θερμικός Θόρυβος

Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από το 0, τα ηλεκτρόνια κινούνται με τυχαίο τρόπο σε οποιοδήποτε αγωγό, ακόμη και όταν δεν υπάρχει τάση. Εφόσον ο θερμικός θόρυβος συνυπάρχει με τον θόρυβο βολής, η προηγούμενη εξίσωση του ρεύματος θα γραφεί:

$$I(t) = I_p + i_s(t) + i_T(t)$$



Με $i_T(t)$ τον θερμικό θόρυβο. Η φασματική πυκνότητα του θορύβου ορίζεται ως:

$$S_T(f) = \frac{2k_B T}{R_L}$$

Η k_B είναι η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία και R_L η αντίσταση του φορτίου. Η απόκλιση του θορύβου δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_T^2 = (i_T^2(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_T(f) df = \frac{4k_B T}{R_L} \Delta f$$

Το ολικό ρεύμα θορύβου είναι:

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f + \frac{4k_B T}{R_L} F_n \Delta f$$

Το F_n αντιπροσωπεύει τον παράγοντα με τον οποίο ο θερμικός θόρυβος αλληλοεπιδρά και με τα υπόλοιπα στοιχεία στον δέκτη.

2.4.2.3. Θόρυβος Έντασης

Ο θόρυβος έντασης οφείλεται στις διακυμάνσεις της ισχύος των πομπών που μόλις φτάνουν στο δέκτη, μετατρέπονται σε διακυμάνσεις ρεύματος. Ο θόρυβος έντασης προστίθεται στους δύο προηγούμενους θορύβους:

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 + \sigma_I^2$$

Με $\sigma_I = R_d P_{in} r_I$, R_d είναι η απόκριση του ανιχνευτή και r_I είναι ένα μέτρο της στάθμης θορύβου του σήματος, το οποίο σχετίζεται με το RIN της έντασης του πομπού.

2.4.3. Θόρυβος Ενισχυτή

Ο ενισχυμένος θόρυβος αυτόματης εκπομπής (ASE) είναι μια από τις κύριες πηγές θορύβου που περιορίζει το ενίσχυση σήματος [37]. Ο θόρυβος δημιουργείται στους ενισχυτές εξαιτίας της αυθόρμητης εκπομπής των φωτονίων. Φωτόνια μεταπηδούν από την μία ενεργειακή κατάσταση στην άλλη με αυθόρμητο τρόπο, με αποτέλεσμα να παράγουν νέα φωτόνια με τυχαία φάση, πόλωση και κατεύθυνση. Η παραγωγή τέτοιων τυχαίων φωτονίων υποβαθμίζει το SNR. Επομένως αυτό το μέτρο υποβάθμισης ορίζεται και ως δείκτης θορύβου του ενισχυτή και ορίζεται ως:

$$NF = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}}$$



Ένας ιδανικός ενισχυτής θα διατηρούσε το ίδιο SNR στην είσοδο και στην έξοδο του καναλιού αλλά πρακτικά αυτό είναι αδύνατον. Στον τύπο το SNR αναφέρεται στην ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται όταν το οπτικό σήμα μετατρέπεται ηλεκτρικό. Επίσης η NF σχετίζεται με τον θερμικό θόρυβο αλλά και την ισχύ του θορύβου ASE.

$$NF = N_{ASE} / hfBG = 2n_{sp}(G - 1) / G$$

Για τους EDFA και Raman ενισχυτές, η ισχύς του θορύβου δίνεται από την σχέση:

$$P_{ASE} = 2n_{sp}hf_c(G-1)BW = 2S_{ASE}BW$$

όπου n_{sp} ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής, G η απολαβή του ενισχυτή και BW το οπτικό εύρος ζώνης που μας ενδιαφέρει. S_{ASE} είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του ASE θορύβου. Για την διαδοχική σύνδεση ενισχυτών, ο θόρυβος ASE αυξάνεται κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης με αποτέλεσμα την υποβάθμιση του SNR. Επομένως όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των ενισχυτών τόσο μικραίνει το SNR. Η Ισχύς θορύβου πολλών ενισχυτών στη σειρά (N ενισχυτές) δίνεται από την σχέση:

$$P_{ASE} = 2N S_{ASE}BW$$

2.4.4. Επιπλέον Πηγές Καταστολής Ισχύος

2.4.4.1. Θόρυβος του τρόπου μετάδοσης

Σε μια πολύτροπη οπτική ίνα, οι παρεμβολές στους τρόπους μετάδοσης δημιουργούν μια κηλίδα στον φωτοανιχνευτή. Αυτή η κηλίδα προκαλείται από διακυμάνσεις της έντασης και συνήθως δεν επηρεάζει τον δέκτη εφόσον ο δέκτης εξαρτάται από την συνολική ισχύ. Αν αυτή η κηλίδα δημιουργήσει διακυμάνσεις στο χρόνο, τότε δημιουργείται ο λεγόμενος θόρυβος του τρόπου μετάδοσης. Αυτός ο θόρυβος εμφανίζεται κυρίως κατά την διάρκεια συντήρησης ή επισκευής των οπτικών ινών και επηρεάζει ιδιαίτερα τα λείζερ ημιαγωγών με τις πολύτροπες ίνες ενώ δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις μονότροπες ίνες.

2.4.4.2. Θόρυβος Διαμερισμού τρόπου μετάδοσης (MPN)

Στα πολύτροπα λείζερ ημιαγωγών, ο συγκεκριμένος θόρυβος εμφανίζεται εξαιτίας των διακυμάνσεων της έντασης που παρουσιάζουν οι τρόποι μετάδοσης. Υπό ιδανικές συνθήκες όλοι οι τρόποι θα παρέμειναν συγχρονισμένοι κατά την διαδικασία της μετάδοσης και οι συγκεκριμένες διακυμάνσεις δεν θα αποτελούσαν πρόβλημα αλλά εξαιτίας της διασποράς, οι τρόποι μετάδοσης εμφανίζουν διαφορετική ταχύτητα με αποτέλεσμα το σήμα στο δέκτη να φτάνει αλλοιωμένο και να υποβαθμίζει το SNR.



2.4.4.3. Τετέρισμα Συχνότητας (Chirping)

Όπως σχολιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξαιτίας της διαμόρφωσης των λείζερ ημιαγωγών, δημιουργείται μεταβολή της φάσης και του δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα την αλλαγή της συχνότητας και συνεπώς την διερεύνηση του παλμού στην έξοδο της ίνας και την υποβάθμιση του SNR. Σε ένα απλό μοντέλο η καταστολή ισχύος του τετερίσματος, δίνεται από την σχέση:

$$\delta_C = -10 \log_{10}(1 - 4BLD\Delta\lambda_C)$$

Όπου $\Delta\lambda_C$ η ολίσθηση που σχετίζεται με την συχνότητα τετερίσματος. Η διάρκεια του τετερίσματος ισχύει για $LD\Delta\lambda_C > t_C$, μέχρι να σταματήσει επειδή έχει απομακρυνθεί από το διάστημα μεταξύ των bit και να γίνει $LD\Delta\lambda_C = t_C$.

2.4.4.4. Ανάδραση Ανάκλασης

Πολλές φορές μεταξύ δύο ενώσεων, εξαιτίας της ασυνέχειας του δείκτη διάθλασης, κάποιες ακτίνες ανακλώνται προς τα πίσω με αποτέλεσμα να οδηγούν σε αύξηση του θορύβου έντασης. Τα λείζερ ημιαγωγών παρουσιάζουν αρκετή ευαισθησία πάνω στο συγκεκριμένο φαινόμενο, το οποίο μπορεί να στενέψει ή να διευρύνει το εύρος γραμμής τους με αποτέλεσμα να προκαλέσει θόρυβο στην έξοδο του δέκτη.

2.4.4.5. Τρέμουλο Χρονισμού

Οφείλεται στις διακυμάνσεις από bit σε bit του χρόνου δειγματοληψίας εξαιτίας του φυσικού θορύβου από το κύκλωμα ανάκτησης παλμών. Οι διακυμάνσεις αυτές οδηγούν μετέπειτα σε διακυμάνσεις του σήματος και μείωση του συνολικού SNR στον δέκτη.



Κεφάλαιο 3 -Προσομοίωση

3.1. Προσομοίωση και περιγραφή ενός οπτικού συστήματος μετάδοσης

Η οπτική ίνα θεωρείται ένα από τα καλύτερα μέσα μετάδοσης της επικοινωνίας εξαιτίας του τεράστιου εύρους ζώνης που διαθέτει. Παρόλα αυτά όπως αναφέρθηκε ήδη στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν αρκετά φαινόμενα που δημιουργούν αρκετούς περιορισμούς τόσο στο κομμάτι της χωρητικότητας όσο και στην ποιότητα της ζεύξης. Ιδιαίτερα σε μεγάλες αποστάσεις με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, τα γραμμικά και τα μη γραμμικά φαινόμενα αποτελούν ένα καθοριστικό περιοριστικό παράγοντα. Στα κύρια γραμμικά φαινόμενα κατατάσσονται η διασπορά, οι απώλειες και θόρυβος ASE των ενισχυτών, ενώ στα μη γραμμικά είναι τα φαινόμενα Kerr και η εξαναγκασμένη σκέδαση. Πολλές φορές όμως μια μικρή ποσότητα διασποράς ιδιαίτερα με την χρήση της πολυπλεξίας μπορεί να αποδεχθεί ωφέλιμη καθώς μπορεί να μετριάσει κάπως τα μη γραμμικά φαινόμενα Kerr. Παρόλα αυτά, τα μη γραμμικά φαινόμενα συνεχίζουν να αποτελούν πρόβλημα [38].

Για την καλύτερη κατανόηση των προβλημάτων που δημιουργούνται μέσα σε στη οπτική ζεύξη, δημιουργήθηκε ένα απλό οπτικό σύστημα μετάδοσης σε κώδικα MATLAB. Αρχικά δημιουργήθηκαν τα δεδομένα τα οποία θα λάβει ο πομπός σαν είσοδο. Παράγονται 547 σύμβολα με τυχαίο αριθμό ανάλογα με το M της διαμόρφωσης. Χρησιμοποιείται διαμόρφωση MPAM η οποία είναι διαμόρφωση πλάτους παλμών. Το διαμορφωμένο σήμα PAM μεταδίδει μια ακολουθία παλμών συνεχούς χρόνου και προκύπτει από το γινόμενο του προκαθορισμένου σήματος επί την συνάρτηση δειγματοληψίας. Αποτελείται από στενούς παλμούς με τα πλάτη των οποίων να ποικίλουν ανάλογα με τις τιμές των δειγμάτων. Στην M-αδική διαμόρφωση η πληροφορία εκφράζεται σε M σύμβολα, όπου το κάθε σύμβολο αποτελείται από μια ομάδα των k bits ($k = \log_2 M$ bits). Ως αρχική περίπτωση στο σύστημα θεωρείται M=4 με ρυθμό 25Gbaud, και ως είσοδο του συστήματος διαδίδονται τυχαία 0,1,2,3 σύμβολα.

1	1
2	0
3	3
4...	0
...547	2

Πίνακας 2- Είσοδος του συστήματος



Ως αρχική απόσταση του μέσου μετάδοσης ορίζονται τα 200km, γίνεται χρήση μονότροπης ίνας και η μετάδοση πραγματοποιείται στην ζώνη C στα 1500nm, καθώς αυτή παρουσιάζει τις λιγότερες απώλειες και προς το παρόν είναι η ζώνη μετάδοσης που χρησιμοποιείται περισσότερο. Η εξίσωση διάδοσης που δείχνει την εξέλιξη των παλμών σε μια μονότροπη ίνα ορίζεται από τον τύπο:

$$\frac{\partial E_{x,y}}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}E_x + \frac{j\beta_2}{2}\frac{\partial^2 E_{x,y}}{\partial t^2} - j\gamma\frac{8}{9}(|E_x|^2 + |E_y|^2)E_{x,y}$$

Αυτή η εξίσωση ονομάζεται διαφορετικά και μη γραμμική εξίσωση του Schrodinger (NLSE) καθώς επισυνάπτονται οι απώλειες, τα γραμμικά και τα μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν την ποιότητα του σήματος. Η παράμετρος α συμβολίζει τις απώλειες και οδηγεί στην μείωση της ισχύς του σήματος αλλά και την μείωση των μη γραμμικών φαινομένων. Στο σύστημα η παράμετρος απωλειών είναι στα 0.2 dB. Η παράμετρος β_2 αναφέρεται στην διασπορά 2^{ης} τάξης η οποία εκφράζει τη διασπορά ταχύτητας ομάδας $\beta_2 = -21,5 \text{ ps}^2/\text{km}$, ενώ $\beta_3=0$ είναι η κλίση της διασποράς. Στο σύστημα κατά την διάδοση, αναπτύσσεται μόνο η διασπορά τρόπου πόλωσης καθώς εξαιτίας του μικρού εύρους ζώνης δεν μπορεί να αναπτυχθεί η χρωματική διασπορά. Τέλος, όπου γ είναι ο συντελεστής μη γραμμικότητας ($\gamma = 1.3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$) ο οποίος δηλώνει την ύπαρξη των μη γραμμικών φαινομένων στην εξίσωση. Ο συντελεστής εξαρτάται από την μεταδιδόμενη ισχύ και δείχνει ουσιαστικά την ποσότητα της μη γραμμικής μετατόπισης φάσης ανά μήκος διάδοσης και ανά ισχύ διάδοσης.

Ανά 50km γίνεται ενίσχυση του σήματος αλλά παράγεται και θόρυβος ASE ο οποίος περιορίζει σημαντικά την ποιότητα του σήματος. Έτσι στην εξίσωση της διάδοσης για κάθε 50km προστίθενται τα 10dB της ενίσχυσης του ενισχυτή αλλά και όρος του θορύβου. Για εύκολη ανάλυση των γραμμικών και μη γραμμικών εφέ με αριθμητική προσέγγιση γίνεται επίλυση της μη γραμμικής εξίσωσης του Schrodinger, με χρήση της μεθόδου Split-Step Fourier. Η συγκεκριμένη μέθοδος, χρησιμοποιεί μικρά βήματα (steps) και με αυτό τον τρόπο τα γραμμικά και τα μη γραμμικά φαινόμενα μπορούν να χωριστούν σε ξεχωριστά βήματα. Έτσι λοιπόν στο σύστημα υπολογίζεται ο Fourier και ο μετασχηματισμός Fourier, πρώτα για το μη γραμμικό βήμα και μετά για το γραμμικό. Ο μετασχηματισμός Fourier μετατοπίζεται μπρος-πίσω ανάλογα, καθώς το γραμμικό βήμα γίνεται στο τομέα της συχνότητας, ενώ το μη γραμμικό στο τομέα του χρόνου. Μόλις το σήμα φτάσει στο δέκτη, εντοπίζεται από τον φωτοανιχνευτή και στην συνέχεια περνάει από ένα βαθυπερατό φίλτρο Butterworth με συχνότητα αποκοπής που ταιριάζει με τον ρυθμό των συμβόλων. Η ποιότητα του σήματος έχει επηρεαστεί κι άλλο στον κομμάτι του δέκτη καθώς έχει δημιουργηθεί θόρυβος βολής και θερμικός θόρυβος. Στην συνέχεια για να μπορέσουν να ανακτηθούν τα δεδομένα γίνεται αυτοσυσχέτιση, δηλαδή σύγκριση του αρχικού και



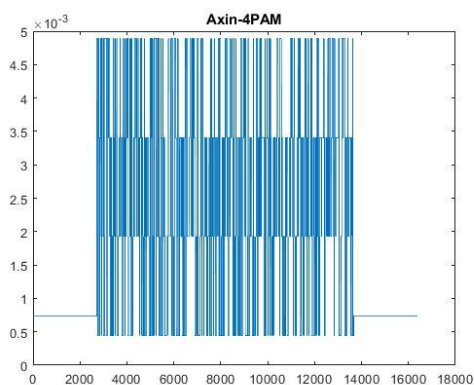
του τελικού σήματος ώστε να υπολογιστούν τα εσφαλμένα bit. Τέλος γίνεται αποδιαμόρφωση της τελικής χρονοσειράς των συμβόλων για να λάβει ο δέκτης τα τελικά δεδομένα. Η έξοδος του συστήματος με τα τυχαία σύμβολα παρουσιάζεται στον πίνακα (3.2)

1	0.68354
2	-1.0284
3	2.98029
4...	-2.2696
...547	1.9717

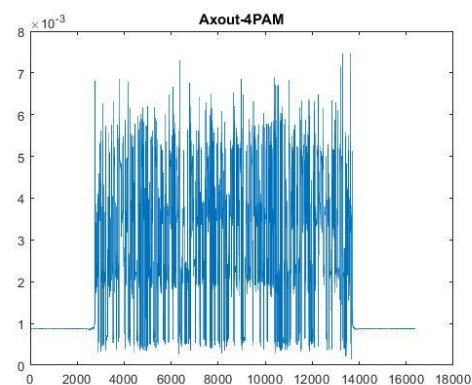
Πίνακας 3 -Έξοδος του συστήματος

3.2. Βασικά Συμπεράσματα κατά την έξοδο του συστήματος

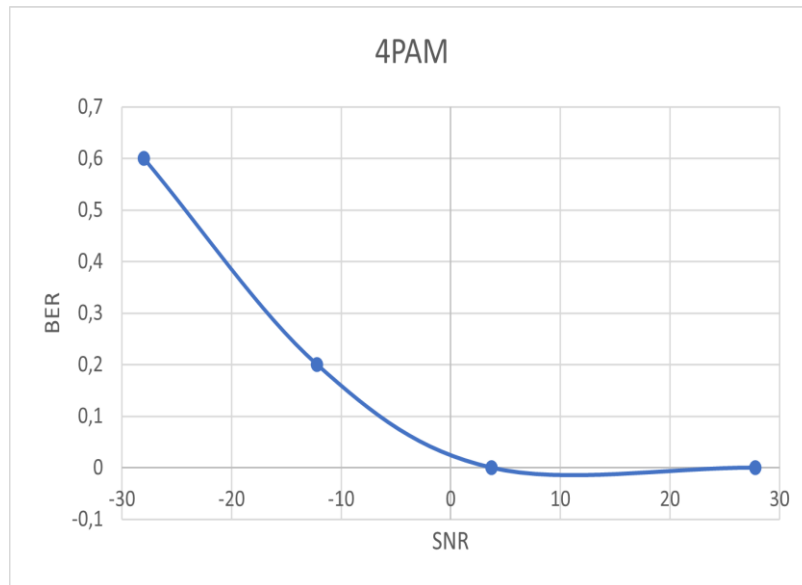
Στα γραφήματα (1,2) παρουσιάζεται αριστερά το σήμα κατά την είσοδο του στην οπτική ίνα και στην συνέχεια δεξιά το σήμα καθώς αυτό εξέρχεται από την οπτική ίνα. Παρατηρείται αλλοίωση του σήματος εξαιτίας των γραμμικών και των μη γραμμικών φαινομένων.



Γράφημα 1- Είσοδος συστήματος 4PAM

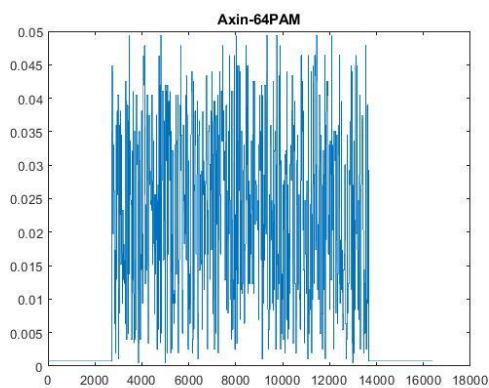


Γράφημα 2 -Έξοδος συστήματος 4PAM

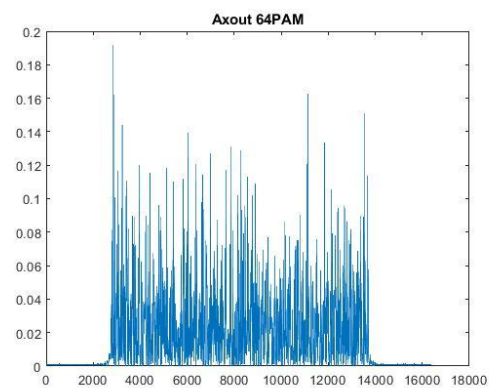


Γράφημα 3 BER-SNR

Στα γραφήματα (3) παρατηρείται ότι η τιμή του BER αυξάνεται δραματικά καθώς ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο μειώνεται, όσο αυξάνεται και απόσταση. Μεγαλύτερη αλλοίωση του σήματος παρατηρείται για 64PAM όπου γίνεται η μετάδοση περισσότερων συμβόλων και απαιτείται περισσότερη ισχύς (Γραφήματα 5,6).



Γράφημα 4 - Είσοδος συστήματος 64PAM



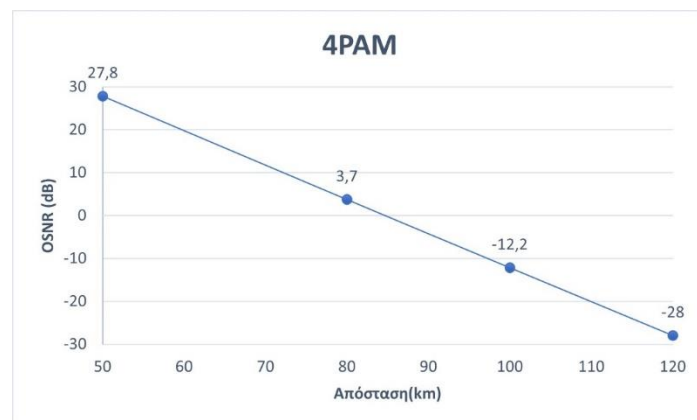
Γράφημα 5 Έξοδος συστήματος 64PAM



Κάθε 50km γίνεται ενίσχυση του σήματος κατά 10dB και το OSNR του σήματος για 4PAM πλησιάζει τα 28dB. Η χρήση πολλαπλών ενισχυτών έχει το πλεονέκτημα ότι οι μεγάλες απώλειες μπορούν να αντισταθμιστούν χωρίς να πέσει σε μεγάλο βαθμό το OSNR. Παρόλα αυτά αν αυξηθεί η απόσταση του κάθε ενισχυτή παρατηρείται πως η ποιότητα πέφτει δραματικά, με αποτέλεσμα γύρω στα 100km το σήμα να χρειάζεται αναγέννηση. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4) απεικονίζονται τα αποτελέσματα του OSNR για διαμόρφωση MPAM και διαφορετικά μήκη ενίσχυσης. Το κέρδος του ενισχυτή παραμένει στα 10dB.

Διαμόρφωση/ Απόσταση	4PAM	8PAM	16PAM	32PAM	64PAM
50km	27.8 dB	28.8 dB	31.2 dB	33.8 dB	36.6 dB
80km	3.7 dB	4.7 dB	7.1 dB	9.8 dB	12.7 dB
100km	-12.2 dB	-11.2 dB	-8.8 dB	-6.1 dB	-3.3 dB
120km	-28 dB	-27.2 dB	-24.9 dB	-22 dB	-19.3 dB
150km	-	-	-	-	-

Πίνακας 4 -Αποτελέσματα OSNR



Γράφημα 6 OSNR - Απόσταση



Φυσικά αν μειωθεί το κέρδος του ενισχυτή, το σήμα εξασθενεί σε πολύ μικρότερη απόσταση ενώ αν αυξηθεί σε μεγαλύτερη. (Πίνακας 5, 6)

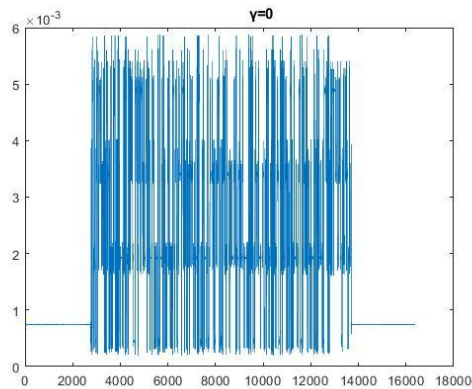
Διαμόρφωση/ Απόσταση	4PAM	8PAM	16PAM	32PAM	64PAM
50km	19.2 dB	20.4 dB	22.2 dB	25.4 dB	28.0 dB
80km	-4.7	-3.7	-1.3	1.2	4
100km	-20.9	-19.6	-17.3	-14.7	-11.9
120km	-	-	-	-	-
150km	-	-	-	-	-

Πίνακας 5 - Αποτελέσματα OSNR με κέρδος ενισχυτή $G=5dB$

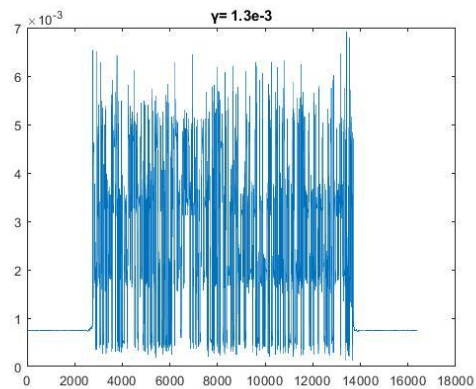
Διαμόρφωση/ Απόσταση	4PAM	8PAM	16PAM	32PAM	64PAM
50km	36.5 dB	37.8 dB	39.9 dB	42.6 dB	45.6 dB
80km	12.5	13.6	15.9	18.4	21.4
100km	-3.6	-2.3	-0.1	2.7	5.6
120km	-19.6	-18.5	-15.9	-13.4	-10.5
150km	-	-	-	-	-

Πίνακας 6 Αποτελέσματα OSNR με κέρδος ενισχυτή $G=20dB$

Ωστόσο το κέρδος των ενισχυτών μπορεί να φτάσει μέχρι ένα όριο. Έτσι λοιπόν για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις με την αύξηση της ισχύος ενισχύονται τα μη γραμμικά φαινόμενα. Στο σύστημα τα μη γραμμικά φαινόμενα επηρεάζουν αρκετά το σήμα. Παρακάτω απεικονίζεται η έξοδο του συστήματος με διαμόρφωση 4PAM, $G=10dB$ και $L=50km$. Το γράφημα 8 αφορά το σύστημα με συντελεστή μη γραμμικότητας $\gamma=0$ ενώ το γράφημα 9 για $\gamma=1.3 W^{-1}km^{-1}$.

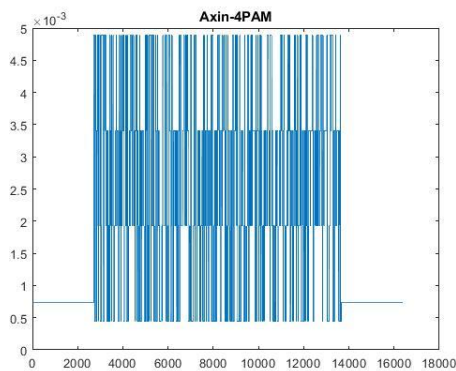


Γράφημα 7 Σήμα με μηδενικό γραμμικό συντελεστή

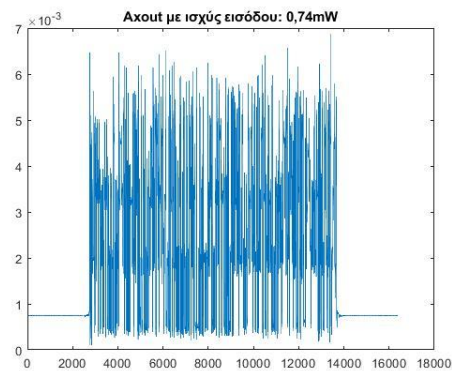


Γράφημα 8 -Σήμα με γραμμικό συντελεστή

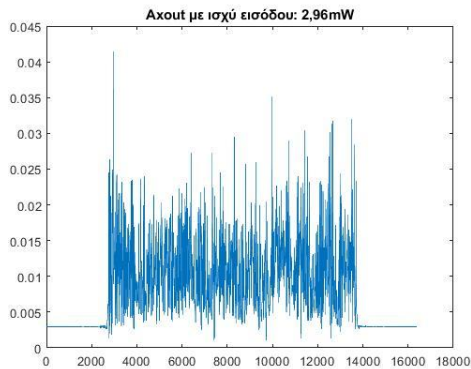
Καθώς η ενίσχυση του σήματος μπορεί να φτάσει μέχρι ένα σημείο, από εκεί και πέρα το σήμα χρειάζεται ολοκληρωτική αναγέννηση. Σε πολύ μεγάλες αποστάσεις πραγματοποιείται χρήση συνεχόμενων αναγεννητών και ενισχυτών. Παρόλα αυτά καθώς οι απαιτήσεις για μετάδοση περισσότερης πληροφορίας ολοένα και αυξάνονται, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αρχικής μεταδιδόμενη ισχύς. Όμως η αρκετά μεγάλη ισχύς εισόδου διεγείρει τα μη γραμμικά φαινόμενα με αποτέλεσμα το σήμα να αλλοιωθεί αρκετά στον δέκτη.



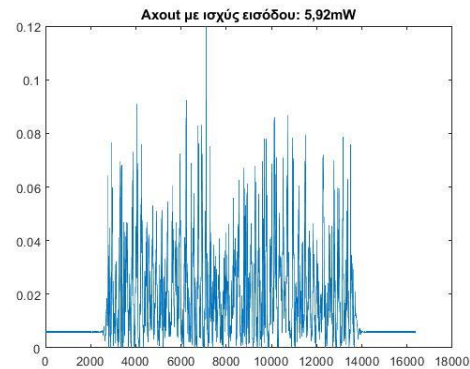
Γράφημα 9 - Είσοδος συστήματος- 4PAM



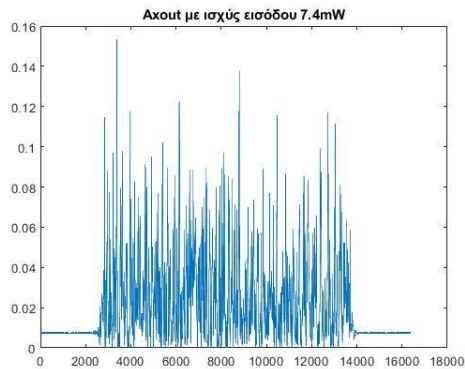
Γράφημα 10 Έξοδος συστήματος με ισχύ 0.74mW.



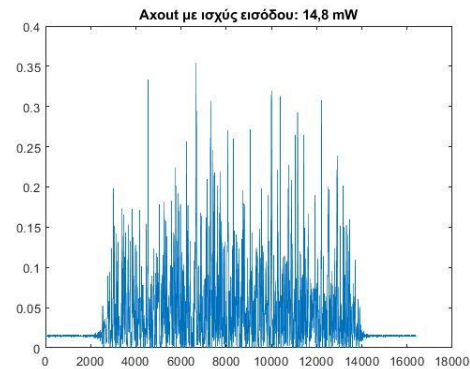
Γράφημα 11 Έξοδος συστήματος με ισχύ 2.96mW



Γράφημα 12 Έξοδος συστήματος με ισχύ 5.92mW

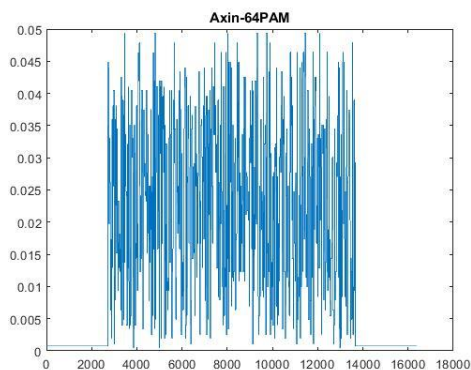


Γράφημα 13 Έξοδος συστήματος με ισχύ 7.4mW

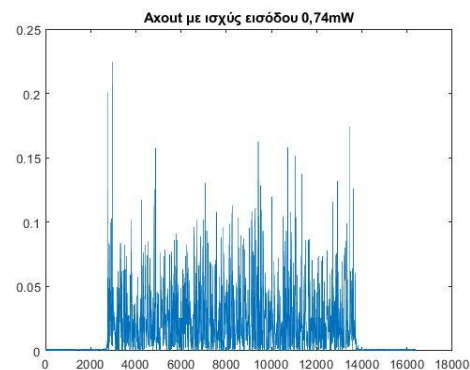


Γράφημα 14 Έξοδος συστήματος με ισχύ 14.8mW

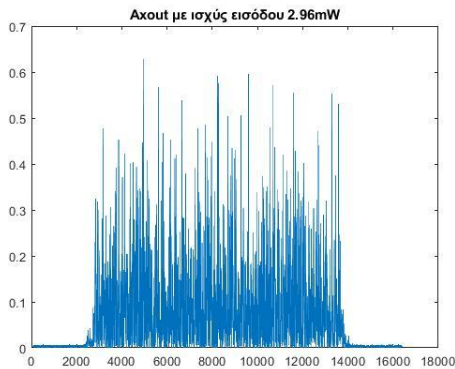
Τα γραφήματα 10,11 απεικονίζουν την είσοδο και την έξοδο του συστήματος για 4PAM και αρχική ισχύ 0.74mW ενώ τα υπόλοιπα γραφήματα (12-15) δείχνουν την αλλοίωση του σήματος κατά την έξοδο του συστήματος, όταν αυξηθεί η αρχική ισχύς. Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η αρχική ισχύς, τόσο χειροτερεύει η ποιότητα του σήματος. Για 64PAM το σήμα αλλοιώνεται αρκετά περισσότερο. (Γράφημα 16-21)



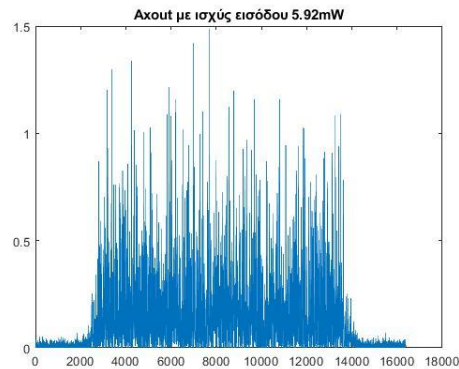
Γράφημα 15 Είσοδος συστήματος- 64PAM



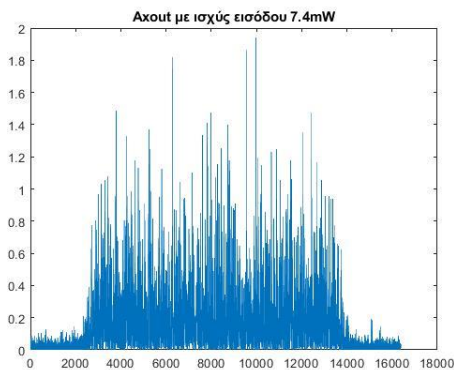
Γράφημα 16 Έξοδος συστήματος με ισχύ 0.74mW



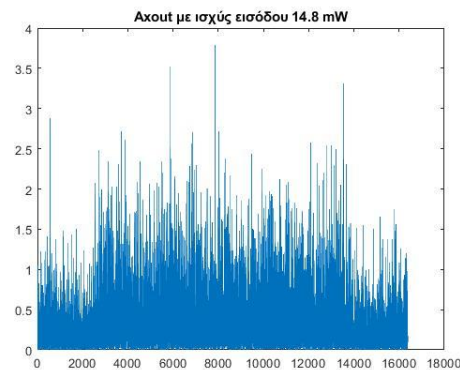
Γράφημα 17 Έξοδος συστήματος με ισχύ 2.96mW



Γράφημα 18 Έξοδος συστήματος με ισχύ 5.92mW

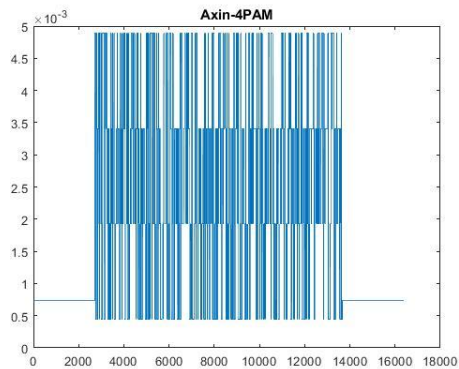


Γράφημα 19 Έξοδος συστήματος με ισχύ 7.4mW

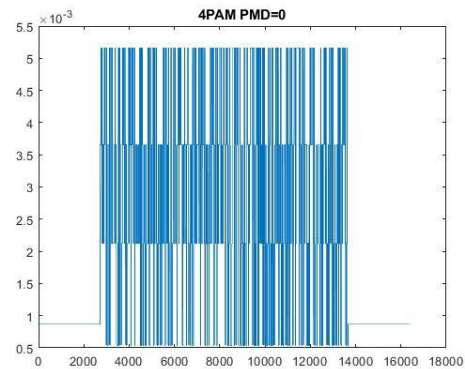


Γράφημα 20 Έξοδος συστήματος με ισχύ 14.8mW

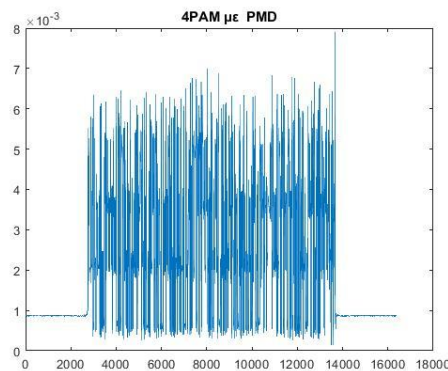
Εκτός από τα γραμμικά φαινόμενα στο σύστημα υπάρχει και η διασπορά πόλωσης που επηρεάζει την ποιότητα του σήματος και απλώνει το παλμό. Αν μηδενιστεί η διασπορά παρατηρείται ότι ο παλμός στην έξοδο του σήματος μοιάζει περισσότερο στο αρχικό σήμα. (Γράφημα 22-24).



Γράφημα 21 Είσοδος συστήματος

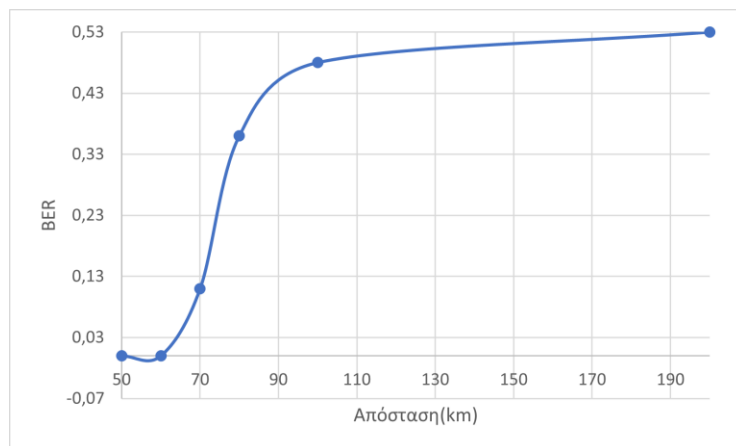


Γράφημα 22 Έξοδος συστήματος χωρίς διασπορά



Γράφημα 23 Έξοδος συστήματος με διασπορά

Επίσης διατηρώντας ένα OSNR σταθερό =10dB σε οποιαδήποτε απόσταση, παρατηρείται ότι το BER μειώνεται καθώς μεγαλώνει η απόσταση (Γράφημα 24). Αυτό οφείλεται στη συσσώρευση της διασποράς που αναπτύσσεται μεταξύ των ενισχυτών.



Γράφημα 24 Αύξηση του BER συναρτήσει της απόστασης με σταθερό SNR=10dB



Κεφάλαιο 4

4. Τεχνικές που διορθώνουν το σήμα.

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκαν οι έννοιες των γραμμικών και των μη γραμμικών φαινομένων και εκδόθηκαν βασικά συμπεράσματα για το πως αυτά επηρεάζουν την ποιότητα της ζεύξης. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες τεχνικές οι οποίες μπορούν να διορθώσουν τις οπτικές “βλάβες” του σήματος και συγκεκριμένα δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στα νευρωνικά δίκτυα και στο πως αυτά μέσω της μηχανικής μάθησης μπορούν να επιλύσουν τα προβλήματα που υποβαθμίζουν το οπτικό σήμα.

4.1.1. Ίνες Μετατοπισμένης Διασποράς

Τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί οπτικές ίνες που προσπαθούν να διορθώσουν κυρίως το πρόβλημα της χρωματικής διασποράς. Ένα τέτοιο είδος ινών είναι οι Dispersion compensating fibers (DCF), οι οποίες χρησιμοποιούν αντίθετη διασπορά για να αποκαταστήσουν το αρχικό σήμα. Επιπλέον υπάρχουν και οι Dispersion-shifted fibers (DSF), οι οποίες έχουν κατασκευαστεί με πολύ μικρό πυρήνα που καθιστά μηδενική την διασπορά στην ζώνη C. Παρόλα αυτά καθώς η διασπορά μηδενίζεται, τα μη γραμμικά φαινόμενα ενισχύονται ιδιαίτερα στα WDM συστήματα. Αυτό το πρόβλημα προσπαθούν να λύσουν οι Nonzero dispersion-shifted fibers (NZ-DSF), οι οποίες εισάγουν μια μικρή κατάλληλη ποσότητα διασποράς. Οι συγκεκριμένες ίνες μπορεί να εμφανίζουν μεγαλύτερη ανοχή στα μη γραμμικά φαινόμενα αλλά συνεχίζουν να μην τα επιλύουν.

4.1.2 Optical Phase Conjugation (OPC)

Στην συγκεκριμένη τεχνική γίνεται αντιστροφή της φάσης του σήματος στη μέση της ζεύξης έτσι ώστε τα φαινόμενα που συνέβησαν στο πρώτο μέρος να ακυρώνονται στο δεύτερο. Χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιστάθμιση του φαινομένου της χρωματικής διασποράς αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου και για την αντιμετώπιση των μη γραμμικών φαινομένων. Τα μειονεκτήματα που εμφανίζει αυτή η τεχνική έχει να κάνει με την συμβατότητα και την ευελιξία. Απαιτείται συμμετρική χρωματική διασπορά δεύτερης τάξης, εξέλιξη ισχύος αλλά και μετατροπείς μήκους κύματος ευρείας ζώνης οι οποίοι δεν είναι και τόσο συμβατοί σε ένα οπτικό δυναμικό δίκτυο δρομολόγησης. Επίσης καθώς οι μετατροπείς τοποθετούνται στην μέση του δικτύου, η προσθαφαίρεσή και η συντήρησή τους δημιουργούν δυσκολίες σε ολόκληρη την ζεύξη [39].

4.1.3. Digital Back Propagation (DBP)

Το DBP είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές τεχνικές στην επίλυση των γραμμικών και των μη γραμμικών φαινομένων. Κάνει επίλυση της μη γραμμικής εξίσωσης του

Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων



Schrodinger μέσω της μεθόδου Split-Step Fourier και με αυτό τον τρόπο προσπαθεί να προσομοιώσει το λαμβανόμενο σήμα με ανεστραμμένες παραμέτρους. Επιτρέπει την υψηλότερη ισχύ αφού μπορεί να κάνει κοινό μετριάσμό των γραμμικών και μη γραμμικών φαινομένων σε ένα κανάλι. Από την άλλη πλευρά το BP απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ για την επίλυση των προβλημάτων. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου η επαναλαμβανόμενη χρήση μετασχηματισμών Fourier οδηγεί σε μεγάλη πολυπλοκότητα. Έτσι λοιπόν συμπεραίνεται πως είναι ανέφικτο να εφαρμοστεί σε WDM κανάλια πολυπλεξίας. Επιπλέον το βασικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει είναι η δυσκολία στην εφαρμογή του καθώς αλληλοεπιδρά με τον θόρυβο και την διασπορά τρόπου πόλωσης. Η PMD εισάγει καθυστέρηση φάσης κατά μήκος των ινών με αποτέλεσμα καθώς χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη τεχνική να συσσωρεύεται η καθυστέρηση στην αντίστροφη διάδοση και να υποβαθμίζεται η ακρίβεια. Έτσι λοιπόν ο θόρυβος και η PMD προσπαθούν να αντιμετωπιστούν μετά το πέρας της DBP τεχνικής [40].

4.1.4. Equalizers

Για την αντιμετώπιση των φαινομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας equalizer ο οποίος εντοπίζει αυτόματα τις παραμορφώσεις και τις ισοσταθμίζει ώστε να διασφαλιστεί μια συγκεκριμένη ποιότητα σήματος. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι αρκετά αποτελεσματική ιδιαίτερα στα metro δίκτυα.

Υπάρχουν ηλεκτρικοί και οπτικοί equalizers [41]. Αν και οι οπτικοί είναι πιο αποτελεσματικοί γιατί μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας στο κανάλι και να χρησιμοποιήσουν τόσο την φάση όσο και το πλάτος του σήματος, οι ηλεκτρικοί χρησιμοποιούνται περισσότερο γιατί συνδυάζουν ευελιξία, σταθερότητα και χαμηλό κόστος. Παρόλα αυτά επιτυγχάνουν μέτρια απόδοση. Στα οπτικά συστήματα κυρίως χρησιμοποιείται μη γραμμικός ηλεκτρικός equalizer based on the inverse Volterra series (V-NLE). Έχει χαμηλότερη πολυπλοκότητα από την DBP τεχνική αλλά εφαρμόζεται κυρίως σε συνεκτικά συστήματα για την ακύρωση των ενδοκαναλικών μη γραμμικών φαινομένων [42].

4.1.5. Forward Error Correction (FEC)

Είναι μια από τις πιο διαδομένες τεχνικές και χρησιμοποιείται στην πλευρά του δέκτη προσθέτοντας επιπλέον bit για την διόρθωση των σφαλμάτων. Οι δύο βασικοί τύποι FEC είναι το HD-FEC και το SD-FEC. Στο HD-FEC αποφασίζει αν είναι 0 ή 1 με βάσει κάποια συγκεκριμένα όρια, ενώ το SD-FEC αποφασίζει με βάσει τις πιθανότητες να έχει συμβεί 1 ή 0. Το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζει το FEC στην ζεύξη είναι πως καθώς ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται η ικανότητα διόρθωσης όλο και υποβαθμίζεται. Ωστόσο ως τεχνική είναι αρκετά χρήσιμη γιατί μπορεί να διορθώσει τα σφάλματα χωρίς την χρήση επιπλέον κυκλωμάτων, γι αυτό και



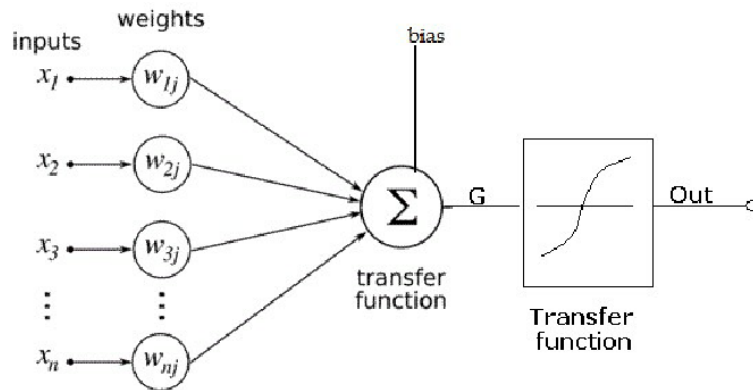
χρησιμοποιείται κυρίως ως συνδυασμός μαζί με άλλες τεχνικές(π.χ. equalizers) για καλύτερα αποτελέσματα.

4.2. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα – (Artificial Neural Networks-ANNs)

Τα ANN αποτελούν την κύρια λύση στο πρόβλημα καθώς δεν βασίζονται σε κανόνες αλλά λειτουργούν σαν το νευρικό σύστημα των ζωντανών οργανισμών. Στόχος τους είναι η λύση περίπλοκων προβλημάτων, εξερευνώντας το περιβάλλον τους και με την κατάλληλη εκπαίδευση καταλήγουν στην πλησιέστερη πιθανή λύση [43] [44]. Έτσι λοιπόν το οπτικό σήμα λαμβάνεται από τα νευρωνικά και διορθώνεται ώστε να φτάνει στο χρήστη σχεδόν τέλειο. Μέσω των νευρωνικών δικτύων θα μπορέσουν να διορθωθούν τα γραμμικά και μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία χαλάνε την ποιότητα του σήματος αλλά και να γίνει καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης αφού μπορεί να προβλεφθεί η κυκλοφορία του δικτύου.

Τα ANN πρώτο έκαναν την εμφάνισή τους το 1944, όταν προτάθηκαν από τους Warren McCullough and Walter Pitts, ενώ στις μέρες μας είναι αρκετά διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται σε πολλούς κλάδους όπως είναι η φυσική, τα οικονομικά, η ιατρική και οι τηλεπικοινωνίες.

Ένα ANN αποτελείται από κόμβους οι οποίοι μοιάζουν με τους βιολογικούς νευρώνες και εκεί γίνεται η επεξεργασία των πληροφοριών. Οι κόμβοι ή αλλιώς τεχνητοί νευρώνες, συνδέονται μεταξύ τους με links όπου το κάθε link έχει ένα δικό του βάρος. Το βάρος είναι συνήθως ένας ακέραιος αριθμός ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των νευρώνων και αντιπροσωπεύει τον τρόπο σύνδεσης τους. Μια αρκετά χαμηλή τιμή βάρους μπορεί να δηλώνει απουσία σύνδεσης μεταξύ των νευρώνων. Οι νευρώνες ομαδοποιούνται σε διάφορα επίπεδα(layers) που αντιστοιχούν στα επίπεδα εισόδου, τα κρυφά επίπεδα και τα επίπεδα εξόδου. Μεταξύ των επιπέδων και μέσω links και της εκπαίδευσης γίνεται η μεταφορά των δεδομένων [45].



Εικόνα 8 Perceptron

Το πιο απλό μοντέλο ενός τεχνητού νευρώνα είναι το λεγόμενο perceptron. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, υπάρχει μόνο ένας νευρώνας ο οποίος λαμβάνει ένα αριθμό σημάτων και παράγει μόνο μια έξοδο. Ο νευρώνας αποτελείται από:

- Links
- Αθροιστή
- Συνάρτηση Ενεργοποίησης

Το κάθε link αποτελεί ένα εισερχόμενο σήμα για το νευρώνα το παίρνει μια δυαδική τιμή συνήθως 0 ή 1. Ο αθροιστής αθροίζει τον συνολικό αριθμό των σημάτων με τα αντίστοιχα βάρη και στην συνέχεια το άθροισμα περνάει από την συνάρτηση ενεργοποίησης. Στην συνάρτηση ενεργοποίησης η τιμή συγκρίνεται την τιμή ενός κατωφλίου ώστε να αποφασιστεί η μια τελική έξοδος. Η έξοδος του νευρώνα περιγράφεται ως:

$$y = \varphi \left(\sum_{j=1}^n w_j x_j + b \right)$$

Οπου y είναι η έξοδος, φ η συνάρτηση ενεργοποίησης, w τα βάρη, x τα εισερχόμενα links και b η εξωτερική πόλωση η οποία επηρεάζει θετικά ή αρνητικά την διέγερση της συνάρτησης ενεργοποίησης.

Υπάρχουν πολλά είδη συναρτήσεων ενεργοποίησης αλλά οι πιο βασικές είναι:

- η βηματική:

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

- η γραμμική:

$$\varphi(x) = ax$$



- η σιγμοειδής συνάρτηση:

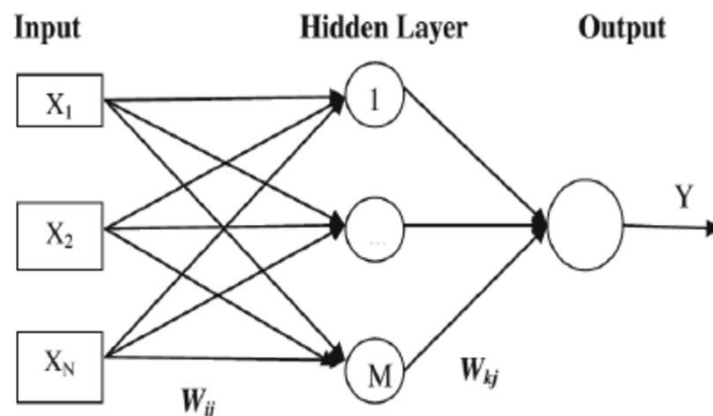
$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} = \tanh x$$

Η σιγμοειδής συνάρτηση χρησιμοποιείται περισσότερο γιατί μπορεί να γίνει διαφοροποιήσιμη, καθώς το εύρος λειτουργίας της μπορεί να γίνει από $[0,1]$ σε $[-1,1]$. Έτσι όταν δέχεται αρνητικές τιμές μπορεί να γραφεί και σαν συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης.

Αρχιτεκτονικές ANN

Για να την διαχείριση πολλών πληροφοριών, πολλαπλοί νευρώνες διασυνδέονται και απαρτίζουν ένα νευρωνικό δίκτυο [46]. Ανάλογα με τον αριθμό, το είδος και τη συνδεσμολογία αυτών των νευρώνων δημιουργείται η αρχιτεκτονική ενός δικτύου. Οι δύο βασικοί τύποι αρχιτεκτονικών δικτύων είναι τα feed-forward networks(FNN) και τα recurrent neural networks (RNN) [47].

4.2.1. Feed-Forward Networks (FNN)



Εικόνα 9-FNN

Στα feed-forward δίκτυα οι πληροφορίες προχωράνε κανονικά από το επίπεδο εισόδου στο επίπεδο εξόδου χωρίς να υπάρχει ανάδραση. Η έξοδος του κάθε επιπέδου είναι η είσοδος του επόμενου, συνεπώς και η έξοδος του κάθε νευρώνα δεν μπορεί να γίνει ξανά η είσοδος του ή η είσοδος ενός νευρώνα του ίδιου επιπέδου. Στα feed-forward δίκτυα πολλών επιπέδων, οι εξωτερικές πληροφορίες που λαμβάνονται, εισέρχονται πρώτα στους νευρώνες του επιπέδου εισόδου. Η έξοδός τους αποτελεί την είσοδο του πρώτου κρυφού επιπέδου και η έξοδος του πρώτου επιπέδου αποτελεί την είσοδο του δεύτερου κρυφού επιπέδου και ούτε καθεξής μέχρι να φτάσει στο **Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων**

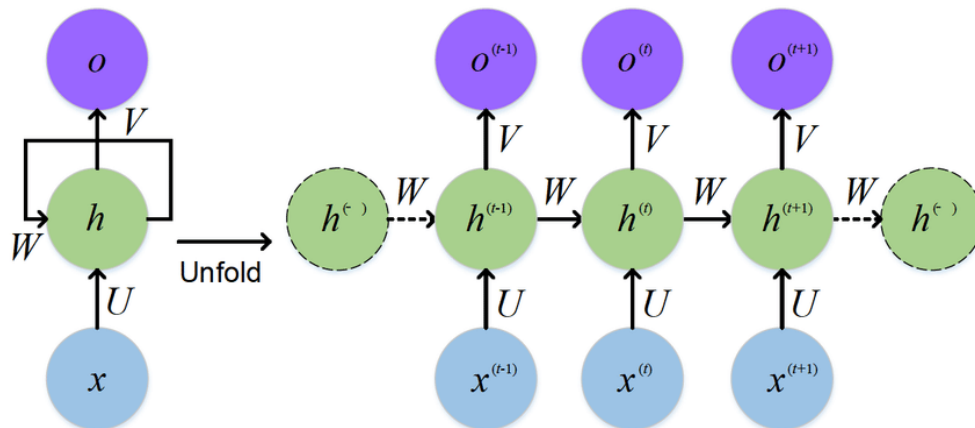


επίπεδο εξόδου. Η κύρια επεξεργασία γίνεται στα κρυφά επίπεδα όπου εκεί οι νευρώνες χρησιμοποιούν συνήθως μη γραμμικές συναρτήσεις καθώς προσφέρουν περισσότερες υπολογιστικές δυνατότητες. Στο επίπεδο εξόδου οι νευρώνες εξαρτώνται ουσιαστικά από τους νευρώνες του επιπέδου εισόδου και έτσι παράμετροι όπως είναι τα βάρη και η εξωτερική πόλωση προσαρμόζονται, ώστε να παραχθούν οι σωστές προβλέψεις. Επομένως οι συγκεκριμένοι παράμετροι αποτελούν την κύρια πηγή εκπαίδευσης του δικτύου.

Τα FNN είναι αρκετά ευέλικτα και γρήγορα αλλά κυρίως χρησιμοποιούνται για την επίλυση λειτουργικών που αφορούν την έξοδο του συστήματος όταν επηρεάζεται από έναν αριθμό εισόδων. Εφόσον δεν έχουν μνήμη, δεν μπορούν να προβλέψουν τι θα ακολουθήσει καθώς δεν θυμούνται τις προηγούμενες ενέργειες.

4.2.2.Recurrent neural networks (RNN)

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα δίκτυα, στα δίκτυα RNN υπάρχουν βρόγχοι ανάδρασης [48]. Ο επαναλαμβανόμενος νευρώνας διατηρεί μνήμη καθώς με κάθε επανάληψη δημιουργείται μια νέα χρονική στιγμή. Ο κάθε νευρώνας λαμβάνει ως είσοδο την έξοδο της προηγούμενης χρονικής στιγμής ($t-1$) και την τρέχουσα είσοδό του για χρονική στιγμή t . Επομένως ο κάθε νευρώνας έχει δύο μεταβλητές βάρους. Η αντίληψη στο χρόνο που δημιουργείται επιτρέπει τα συγκεκριμένα δίκτυα να προβλέπουν την επόμενη κατάσταση.



Εικόνα 10 -RNN

Τα δίκτυα αυτά μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν σε globally και locally RNNs. Τα globally RNNs είναι πλήρως αναδρομικά δίκτυα και αυτό επιτρέπει την έξοδο του κάθε νευρώνα να γίνεται είσοδος είτε του εαυτού του, είτε ενός νευρώνα οποιουδήποτε επιπέδου. Συνεπώς όλοι οι νευρώνες συνδέονται μεταξύ τους. Παρόλα αυτά, εξαιτίας των αναδρομικών κόμβων, η εκπαίδευση αυτών των δικτύων γίνεται πολύ δύσκολη καθώς παρουσιάζονται προβλήματα σταθερότητας επομένως



απαιτούνται περίπλοκοι και χρονοβόροι αλγόριθμοι εκπαίδευσης. Τα locally RNNs από την άλλη πλευρά, διαθέτουν βρόγχους ανάδρασης μόνο στο ίδιο επίπεδο. Αυτό τους επιτρέπει να έχουν μια πιο απλή και αποδοτική δομή.

Γενικά τα RNNs είναι σχεδιασμένα να λύνουν μια ακολουθία προβλημάτων και δεν περιορίζονται στον αριθμό των εξόδων. Ωστόσο μπορούν να διαταχθούν σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τον αριθμό των εισόδων-εξόδων:

- One to One RNN

Είναι η πιο απλή κατηγορία των RNN καθώς δέχεται ένα δεδομένο εισόδου και παράγει μια έξοδο. ($x=y=1$)

- One to Many RNN

Δέχεται ένα δεδομένο εισόδου και παράγει περισσότερες από μία εξόδους. ($x=1, y>1$)

- Many to One RNN

Όταν πολλαπλά δεδομένα εισόδου απαιτούν μια έξοδο. ($x>1, y=1$)

- Many to Many RNN

Εδώ απαιτούνται πολλά δεδομένα εισόδου και παράγονται πολλά δεδομένα εξόδου. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν δύο είδη. Είτε ο αριθμός των εισόδων θα είναι ίδιος με τον αριθμό των εξόδων ($x=y$), είτε η είσοδος και η έξοδος θα έχουν διαφορετικό αριθμό ($x \neq y$).

Στο κομμάτι των οπτικών επικοινωνιών που τα δεδομένα είναι συνεχή και εξαρτώνται από το χρόνο, τα RNNs είναι η καλύτερη λύση για την διαχείριση και επεξεργασία συνεχών πληροφοριών. Επίσης ένα ακόμη βασικό τους πλεονέκτημα έναντι των FNNs είναι ότι διαθέτουν μνήμη και αυτό τα καθιστά αρκετά ισχυρά. Παρόλα αυτά εφόσον είναι δυναμικά δίκτυα, η κατάσταση τους αλλάζει συνεχώς μέχρι να φτάσουν σε κατάσταση ισορροπίας. Με αυτό τον τρόπο όμως απαιτείται αρκετός χρόνος καθώς και η τιμή της κάθε συνάρτησης ενεργοποίησης εξαρτάται και από μια σειρά δεδομένων. Οι αρκετές επαναλήψεις επιφέρουν περιπλοκότητα και δυσκολία στην εκπαίδευση.

4.2.3. Deep Neural Networks (DNN)

Όλα τα ANN δίκτυα που έχουν παραπάνω από ένα κρυφό επίπεδο ανάμεσα στα επίπεδα εισόδου-εξόδου κατατάσσονται ως επέκταση στα DNNs. Τα DNNs εξαιτίας των πολλών επιπέδων μπορούν να διαχειρίζονται πιο περίπλοκα προβλήματα. Διαθέτουν συνήθως περισσότερη μνήμη, μεγαλύτερη χωρητικότητα και μεγάλη μη

Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων



γραμμικότητα στα δεδομένα εισόδου. Σε ένα οπτικό σύστημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο κομμάτι πομπού και του δέκτη ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Ένα απλό παράδειγμα εφαρμογής θα μπορούσε να είναι η χρήση τους σε έναν οπτικό ενισχυτή, ώστε να παράγεται περισσότερη ακρίβεια με χαμηλή καθυστέρηση και πολυπλοκότητα.. Το αρνητικό με τα DNNs είναι ότι απαιτούν περισσότερα γνωστά δεδομένα και μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ για να εκπαιδευτούν.

4.3. Διαδικασίες εκμάθησης

Για να μπορέσουν τα ANNs να βγάλουν την επιθυμητή έξοδο, χρειάζονται και την κατάλληλη εκπαίδευση. Η διαδικασία της εκπαίδευσης ξεκινάει εισάγοντας συγκεκριμένα δεδομένα με γνωστή έξοδο. Μέσα από ένα αριθμό βημάτων, τα δεδομένα αυτά επεξεργάζονται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο εκμάθησης μόνο μια φορά για κάθε βήμα. Μόλις το δίκτυο φτάσει στην επιθυμητή έξοδο, τροποποιεί με τον ίδιο τρόπο τα βάρη των νευρώνων τα οποία έχουν αρχικοποιηθεί με τε τυχαίες παραμέτρους και στην σιγά σιγά μεταβάλλονται μέχρι το τέλος της εκπαίδευσης. Ανάλογα με την κάθε περίπτωση και το είδος του δικτύου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη μέθοδος εκμάθησης [49].

4.3.1. Supervised Learning

Η supervised learning είναι μια μέθοδος εκμάθησης η οποία χρησιμοποιεί ένα σύνολο αλγορίθμων ώστε να εκπαιδεύσει το μοντέλο να παράγει την επιθυμητή έξοδο. Το μοντέλο τροφοδοτείται με γνωστά δεδομένα εισόδου που παράγουν γνωστά δεδομένα εξόδου και με αυτό τον τρόπο αναπροσαρμόζονται τα βάρη. Αρχικά η έξοδος διαφέρει αλλά σιγά σιγά το μοντέλο μαθαίνει στο χρόνο καθώς ο αλγόριθμος ψάχνει συσχέτιση μεταξύ των γνωστών εισόδων-εξόδων. Η διαφορά της επιθυμητής εξόδου με την έξοδο που παράγει, ονομάζεται σφάλμα.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \|y_p - \hat{y}_p\|^2$$

Όπου E είναι το σφάλμα, N ο αριθμός των βημάτων, y_p είναι η έξοδος και $\hat{y}_p$ είναι η επιθυμητή έξοδος. Για την ελάττωση του σφάλματος και συνεπώς την επίτευξη της ακρίβειας, γίνεται αναπρογραμματισμός στα βάρη. Αφού η εκπαίδευση ολοκληρωθεί, με τον ίδιο τρόπο θα πάρει νέα δεδομένα με άγνωστη έξοδο και θα προσπαθήσει να τα ταξινομήσει και να βγάλει το σωστό αποτέλεσμα. Για την αξιολόγηση της απόδοσης του αλγορίθμου πραγματοποιούνται δοκιμές με ξεχωριστά και συγκεκριμένα δεδομένα.



Πολλές φορές η συγκεκριμένη μέθοδος εκμάθησης γίνεται αρκετά χρονοβόρα καθώς για την επιθυμητή έξοδο απαιτούνται πάρα πολλές διορθώσεις στα βάρη. Για την διόρθωση του χρόνου αλλά και την μείωση του σφάλματος κοντά στο 0, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος gradient-descent. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος πηγαίνοντας αντίθετα στην κλίση, συγκλίνει σε ένα τοπικό ελάχιστο κοντά στην επιθυμητή έξοδο.

Η supervised learning μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες:

1. Παλινδρόμηση - Regression

Είναι μια στατιστική διαδικασία η οποία προσπαθεί να βρει την σχέση μεταξύ των εξαρτημένων και των ανεξάρτητων μεταβλητών. Εντοπίζει ένα μοτίβο και παράγει συνεχείς εξόδους. Συνήθως οι τιμές των εξόδων είναι πραγματικοί αριθμοί. Δύο βασικοί αλγόριθμοι παλινδρόμησης είναι οι παρακάτω:

- **Linear Regression**

Στη γραμμική παλινδρόμηση τα δεδομένα αναπτύσσουν μια γραμμική σχέση μεταξύ τους καθώς μια ανεξάρτητη μεταβλητή(x) προσπαθεί να μαντέψει μια εξαρτημένη μεταβλητή(y -η επιθυμητή έξοδος). Ένα γραμμικό πιθανοτικό μοντέλο είναι το παρακάτω:

$$\hat{y} = b_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n$$

Όπου $\hat{y}$ είναι η επιθυμητή έξοδος, b_0 η πόλωση, x_i τα δεδομένα εισόδου πολλαπλασιασμένα με τα αντίστοιχα βάρη.

- **Logistic regression**

Χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση λογικών προβλημάτων καθώς η εξαρτημένη μεταβλητή έχει δυαδικές εξόδους.

2. Ταξινόμηση- Classification

Στην διαδικασία εκπαίδευσης της συγκεκριμένης κατηγορίας, εισάγονται δεδομένα με τις κατηγορίες τους, ούτως ώστε όταν λαμβάνεται νέα πληροφορία να την ταξινομεί ανάλογα είτε με βάσει τις κατηγορίες είτε με βάσει κάποια άλλα κριτήρια. Κάποια παραδείγματα αλγορίθμων ταξινόμησης είναι τα παρακάτω:



- K-Nearest Neighbor

Ο αλγόριθμος αποθηκεύει συγκεκριμένες περιπτώσεις και ταξινομεί τις νέες με βάσει ένα κριτήριο ομοιότητας.

- Linear Classifier

Ο αλγόριθμος ταξινομεί με βάσει τα χαρακτηριστικά του κάθε αντικειμένου.

- Decision Trees

Τα δέντρα απόφασης είναι αρκετά διαδεδομένα και χαρακτηρίζονται για την δενδροειδής δομή τους που αποτελείται από κόμβους που έχουν χωριστεί σύμφωνα με μια συγκεκριμένη παράμετρο.

4.3.2. Unsupervised Learning

Σε αυτή την μέθοδο εκμάθησης το μοντέλο τροφοδοτείται με γνωστά δεδομένα εισόδου και μόνο, χωρίς να υπάρχει αντίστοιχη έξοδος. Ο αλγόριθμος προσπαθεί να προσδιορίσει την έξοδο ή να βρει μοτίβα, συσχετίζοντας όλα τα δεδομένα εισόδου. Έτσι δημιουργεί σιγά σιγά groups και ομαδοποιεί τα δεδομένα. Η αλλαγή στα βάρη είναι ανάλογη της συσχέτισης. Για να μπορέσει να σταματήσει ο αλγόριθμος απαιτείται ένα κριτήριο τερματισμού. Σε σχέση με την supervised learning, η συγκεκριμένη τεχνική είναι πιο αργή και χρονοβόρα αλλά λιγότερο δαπανηρή. Τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα και πιο σημαντική καθώς σε ρεαλιστικές καταστάσεις είναι αρκετά δύσκολο να ληφθούν γνωστά δεδομένα.

Οι δύο πιο βασικές τεχνικές της unsupervised μάθησης είναι:

- Ομαδοποίηση -Clustering

Ο αλγόριθμος παίρνει στοιχεία που δεν έχουν κατηγοριοποιηθεί και τα ομαδοποιεί ανάλογα με κάποια ομοιότητα. Στόχος του είναι να φτιάξει πολλές ξεχωριστές ομάδες.

- Principal Components Analysis.

Στην συγκεκριμένη τεχνική ο αλγόριθμος συγκεντρώνει τις μεταβλητές και τις σπάει σε μικρότερα κομμάτια δημιουργώντας κάποια κύρια στοιχεία. Με αυτό τον τρόπο δημιουργεί κατάλληλα μοτίβα.

4.3.3. Semi-Supervised Learning

Αυτή η τεχνική είναι ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων. Κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης εισάγεται ένα μικρό μέρος δεδομένων με γνωστή έξοδο και ένα μεγάλο μέρος με άγνωστη έξοδο. Έτσι ο αλγόριθμος μαθαίνει από ένα μικρό μέρος των δεδομένων ενώ προσπαθεί να ομαδοποιήσει και να ταξινομήσει τα υπόλοιπα.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων



4.3.4. Reinforcement Learning

Το Reinforcement Learning αφορά το κομμάτι της τεχνητής νοημοσύνης. Ο πράκτορας αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον προσπαθώντας να βρει την επιθυμητή έξοδο που είναι άγνωστη. Εδώ το νευρωνικό δίκτυο μαθαίνει από μόνο του καθώς ανταμείβεται στις σωστές απαντήσεις αλλά τιμωρείται στις λάθος.

4.3.5. Back Propagation

Το Back Propagation είναι μια από τις πιο γνωστές τεχνικές εκμάθησης των νευρωνικών δικτύων. Η εκπαίδευση ενός δικτύου χρησιμοποιώντας την συγκεκριμένη τεχνική ξεκινάει με την αναζήτηση της κατάλληλης κλίσης ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα ή αλλιώς η συνάρτηση κόστους. Στην συνέχεια μέσω ενός κλειστού κυκλώματος ελέγχου το σφάλμα πηγαίνει από το επίπεδο εξόδου και προς τα πίσω σε όλους τους κόμβους και γίνεται ρύθμιση των βαρών με βάση την κλίση. Αυτή η διαδικασία του αλγορίθμου δουλεύει για τα FNN δίκτυα αλλά στα RNN χρειάζεται τροποποίηση εξαιτίας των αναδράσεων. Για την εκπαίδευση των δικτύων RNN, σιγά σιγά γίνεται “ξετύλιγμα” του δικτύου μέσα στο χρόνο ώστε να προκύψει ένα FNN δίκτυο. Έτσι στην συνέχεια για κάθε χρονικό βήμα εφαρμόζεται η απλή τεχνική του back propagation που αναλύθηκε προηγουμένως. Η συγκεκριμένη τεχνική για τα RNN δίκτυα ονομάζεται back propagation through time (BPTT) [50].

Ένα σημαντικό πρόβλημα που δημιουργείται κατά την διαδικασία του BPTT είναι όταν χρησιμοποιείται σε μεγάλα δίκτυα. Όταν γίνεται προσπάθεια εκπαίδευσης ενός RNN πολλών επιπέδων, η ξεδίπλωσή του στο χρόνο θα επιφέρει και πάρα πολλά χρονικά επίπεδα. Τα πολλά χρονικά επίπεδα μπορούν να δημιουργήσουν αστάθεια στον υπολογισμό των βαρών. Έτσι η κλίση μπορεί να πάρει τιμές κοντά στο άπειρο ή στο μηδέν με αποτέλεσμα οι νευρώνες να μην μπορούν να εκπαιδευτούν άλλο.

Ενα βασικό πρόβλημα που παρατηρείται στα δίκτυα DNNs είναι το gradient exploding το οποίο παρουσιάζεται κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης με την χρήση του back propagation αλγορίθμου. Στα δίκτυα πολλών επιπέδων συσσωρεύονται μεγάλες κλίσεις σφαλμάτων ανάμεσα σε πολλά χρονικά βήματα όπου στην συνέχεια πραγματοποιούνται μεγάλες ενημερώσεις στα βάρη. Τα πολύ μεγάλα βάρη προκαλούν αστάθεια στο δίκτυο και αδυναμία εκπαίδευσης. Το συγκεκριμένο πρόβλημα όμως μπορεί να λυθεί είτε με την μείωση των κρυφών επιπέδων, είτε με την αρχικοποίηση των βαρών, είτε με την τεχνική gradient clipping η οποία περιορίζει το μέγεθος της κλίσης, είτε με την χρήση των LSTM δικτύων.



4.4. Τύποι RNN

Καθώς τα RNN είναι καλύτερα στην επεξεργασία πληροφοριών σε σήματα διακριτού χρόνου, τρεις ειδικοί τύποι μπορούν να δώσουν λύση στην βελτίωση της ποιότητας του σήματος [51].

4.4.1. Long Short-Term Memory Networks -LSTM

Το βασικότερο πρόβλημα των RNNs είναι οι μεγάλες καθυστερήσεις που προκαλούνται εξαιτίας της εκπαίδευσης. Αν και μπορούν να προβλέψουν την επόμενη κατάσταση, κατά την είσοδο μεγάλων ακολουθιών παρουσιάζουν πολλά σφάλματα.

Μία καλύτερη εκδοχή των δικτύων RNN είναι τα δίκτυα LSTM. τα οποία διαθέτουν περισσότερο μνήμη και μπορούν να περιορίσουν αρκετά το θέμα των καθυστερήσεων [52] [53]. Στα LSTM δίκτυα, οι νευρώνες στο κρυφό επίπεδο πλέον λέγονται μπλοκ μνήμης (memory blocks) διότι διαθέτουν παραπάνω μνήμη. Το κάθε μπλοκ αποτελείται από ένα ή περισσότερα κελιά που συνδέονται μεταξύ τους. Η είσοδος και η έξοδος των κελιών καθορίζονται από 3 πύλες;

- Forget Gate
- Input Gate
- Output Gate

Η κάθε πύλη αποτελείται από μια σιγμοειδή συνάρτηση. Όταν οι πύλες είναι κλειστές, δεν μπορούν να μουν στο κελί άσχετες πληροφορίες ή θόρυβος. Επίσης το κάθε κελί αποτελείται από την κατάσταση κελιού (cell state) η οποία είναι και η κύρια πηγή πληροφοριών, αλλά και μια κρυφή κατάσταση.

Η λειτουργία ενός απλού δικτύου LSTM ξεκινάει με την forget gate η οποία έχει στόχο να αποδεσμεύσει τις άχρηστες πληροφορίες από την μνήμη. Για την λειτουργία της, λαμβάνει την έξοδο του προηγούμενου κελιού αλλά και την τρέχουσα είσοδο. Το τί θα διαγραφεί από την έξοδο του προηγούμενου κελιού αποφασίζεται από την σιγμοειδή συνάρτηση.

$$f_t = \sigma(W_f[h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

Όπου f_t είναι η forget gate, σ η σιγμοειδής συνάρτηση, h_{t-1} είναι η προηγούμενη έξοδος, x_t η τρέχουσα είσοδο και b_f η εξωτερική πόλωση.

Έπειτα, ο ρόλος της input gate είναι να αποθηκεύει τις πληροφορίες από την νέα είσοδο στην κατάσταση κελιού και να την ενημερώνει. Αυτό γίνεται περνώντας αρχικά από μια σιγμοειδή συνάρτηση η οποία αποφασίζει ποιες πληροφορίες θα αποθηκευτούν και ποιες όχι. Στην συνέχεια με την χρήση της συνάρτησης της



υπερβολικής εφαπτομένης, οι πληροφορίες που είναι να αποθηκευτούν πολλαπλασιάζονται με τα βάρη που δίνονται αλλά και με τιμές σπουδαιότητας. Η ενημέρωση της κατάστασης γίνεται καθώς προστίθενται οι νέες πληροφορίες.

$$i_t = \sigma(W_{in}[h_{t-1}, x_t] + b_{in}), \quad (2)$$

$$N_t = \tanh(W_n[h_{t-1}, x_t] + b_n), \quad (3)$$

$$C_t = C_{t-1}f_t + N_t i_t \quad (4)$$

Όπου i_t η input gate, N_t οι πληροφορίες, W_{in} τα βάρη εισόδου και C_t η κατάσταση κελιού. Τέλος τα αποτελέσματα στην έξοδο εξαρτώνται από την output gate, η οποία μέσω από την σιγμοειδή της συνάρτηση αποφασίζεται ποιες πληροφορίες θα εξέλθουν. Για να γίνει όμως αυτό πολλαπλασιάζεται με την υπερβολική εφαπτομένη ώστε να γίνει είσοδος στην κατάσταση κελιού και να πάρει τις συγκεκριμένες πληροφορίες.

$$O_t = \sigma(W_{out}[h_{t-1}, x_t] + b_{out}), \quad (5)$$

$$h_t = O_t \tanh(C_t) \quad (6)$$

Εδώ O_t η πύλη εξόδου, W_{out} τα βάρη εξόδου της πύλης και h_t η τρέχουσα έξοδος.

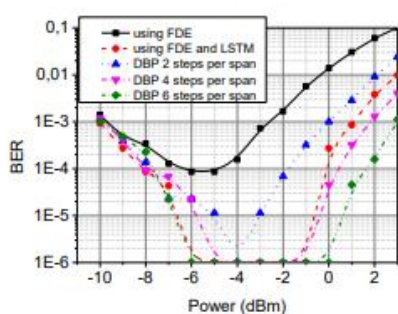
Τα LSTM δίκτυα μπορούν να θεωρηθούν μια καλή λύση στο κομμάτι των οπτικών επικοινωνιών καθώς μπορούν να επιφέρουν τα καλύτερα αποτελέσματα OSNR σε σύντομο χρόνο. Όμως το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι είναι αρκετά πολύπλοκα ώστε να μπορέσουν να εκπαιδευτούν με σωστό τρόπο.

4.4.2. Bi-LSTM

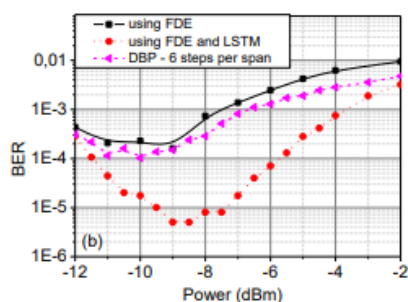
Το LSTM όπως προαναφέρθηκε είναι ένα ισχυρό μοντέλο το οποίο μέσω των κρυφών επιπέδων μπορεί να διαχειριστεί την κατάσταση της μνήμης του ώστε να εξάγει σταθερή και ακριβή πρόβλεψη στο μέλλον. Ως μια πιο εξελιγμένη έκδοση του LSTM έχει δημιουργηθεί το Bi-LSTM το οποίο είναι ένα μοντέλο διπλής κατεύθυνσης. Το απλό LSTM αποθηκεύει μόνο τις πληροφορίες που έχουν περάσει μέσω της κρυφής κατάστασης, δηλαδή τις πληροφορίες του παρελθόντος. Αντίθετα το Bi-LSTM αποθηκεύει πληροφορίες και από το παρελθόν και από το μέλλον. Αυτό το καταφέρνει συνδυάζοντας δύο κρυφά επίπεδα και τρέχοντας τα δεδομένα εισόδου από το παρελθόν προς στο μέλλον αλλά και αντίστροφα. Τα Bi-LSTM δείχνουν καλύτερα αποτελέσματα στην αντιμετώπιση κυρίως των μη γραμμικών φαινομένων σε πολυκάναλα συστήματα μετάδοσης, αλλά σε ενδοκαναλικά φαινόμενα παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια απόδοση με την μέθοδο του DBP [54]. Πιο



συγκεκριμένα, η Εικόνα 11 δείχνει την απόδοση του συστήματος για ένα μήκος κύματος διάδοσης 16QAM στην C ζώνη διάδοσης, όπου γίνεται χρήση διαφόρων τεχνικών. Παρατηρείται πως το Bi-LSTM είναι το ίδιο αποτελεσματικό όσο ένα DBP που χρησιμοποιεί 4 βήματα ανά απόσταση ενίσχυσης αλλά λιγότερο αποτελεσματικό από ένα DBP 6 βημάτων. Ωστόσο στο σύστημα πολυπλεξίας 10 WDM καναλιών όπου το κάθε κανάλι έχει τα ίδια χαρακτηριστικά, το Bi-LSTM αποδεικνύεται πως έχει αρκετά καλύτερη απόδοση (Εικόνα 12).



Εικόνα 11



Εικόνα 12

Επιπλέον έχει αποδειχθεί πως το Bi-LSTM παρουσιάζει ανθεκτικότητα στην εκπαίδευση έναντι διαφόρων αλλαγών που μπορεί να προκύψουν κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης, όπως είναι η αλλαγή της αρχικής ισχύος είτε η αλλαγή της διαμόρφωσης των γειτονικών καναλιών. Από την άλλη πλευρά, το βασικό τους μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος. Σε σύγκριση με τα LSTM επίσης, είναι αρκετά πιο περίπλοκα επομένως χρειάζονται περισσότερη υπολογιστική ισχύ για να μπορέσουν να εκπαιδευτούν. Βέβαια η περιπλοκότητα τους μπορεί να μειωθεί αρκετά όταν γίνεται διαχείριση της διασποράς. Τέλος για να μπορέσουν να κάνουν πρόβλεψη, χρειάζονται ολόκληρο το οπτικό κύμα ώστε να αποθηκεύσουν τις πληροφορίες ενώ τα LSTM κάνουν την πρόβλεψη αμέσως με τα δεδομένα που έχουν διαθέσιμα εκείνη την στιγμή.

4.4.3. Gated Recurrent Units-GRU

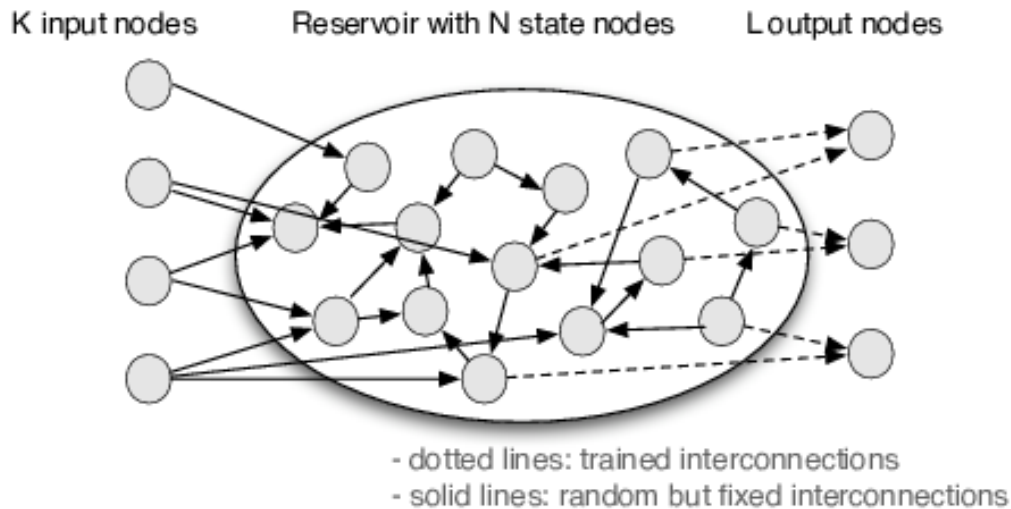
Τα GRU δίκτυα είναι παρόμοια με τα δίκτυα LSTM απλά διαθέτουν λιγότερες παραμέτρους. Δεν διαθέτουν πύλες εξόδου και με αυτό τον τρόπο εκθέτουν το περιεχόμενό τους γιατί ως έξοδος παρουσιάζεται ολόκληρη η κατάσταση του κελιού. Ένα GRU έχει 2 πύλες, μια reset gate και μια update gate. Η update gate λειτουργεί παρόμοια με την forget και την input gate του LSTM καθώς αποφασίζει ποιες πληροφορίες θα κρατήσει και ποιες όχι. Ενώ η reset gate αποφασίζει πόσα παλιά δεδομένα θα ξεχάσει. Εξαιτίας των δύο πυλών, το GRU εκπαιδεύεται λίγο γρηγορότερα σε σχέση με ένα LSTM ωστόσο και τα δύο αυτά μοντέλα είναι σχεδόν ίδια σε λειτουργία και σε απόδοση.



- Bi-GRU

Είναι ένα GRU διπλής κατεύθυνσης το οποίο είναι λίγο πιο γρήγορο αλλά σχεδόν ίδιο λειτουργικά με ένα Bi-LSTM.

4.4.4. Reservoir Computing -RC



Εικόνα 13 - Reservoir

Το κύριο πρόβλημα των RNNs είναι η δυσκολία που αντιμετωπίζουν στο κομμάτι της εκπαίδευσης. Καθώς εκπαιδεύονται, οι κυκλικές εξαρτήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα διχασμού άρα να πραγματοποιηθούν αλλαγές στα βάρη και συνεπώς το μοντέλο να αποκτήσει μια διαφορετική συμπεριφορά. Αυτό το πρόβλημα προσπαθεί να λύσει το RC [55] [56].

Ένα βασικό μοντέλο RC αποτελείται από τρία επίπεδα: το επίπεδο εισόδου, το επίπεδο του reservoir και το επίπεδο εξόδου. Η κατάσταση ενός βασικού μοντέλου reservoir θα μπορούσε να περιγραφεί ως:

$$X(n) = f(W_{in}x_{in} + W_{int}X(n-1) + b) \quad (7)$$

Με f η μη γραμμική συμπεριφορά των κόμβων, x_{in} τα δεδομένα εισόδου, W_{in} βάρη εισόδου και W_{int} τα εσωτερικά βάρη στο επίπεδο του reservoir. Όταν το reservoir δεν δέχεται δεδομένα εισόδου πλησιάζει σε μια κατάσταση ηρεμίας με αποτέλεσμα όμως να πραγματοποιείται εξασθένηση μνήμης. Σιγά σιγά τα παλιά δεδομένα ασκούν όλο και λιγότερη επιρροή στην κατάσταση του reservoir.

Όσον αφορά το κομμάτι της εκπαίδευσης, οι συνδέσεις των νευρώνων στο επίπεδο εισόδου και στο επίπεδο του reservoir είναι τυχαίες καθώς δεν συμμετέχουν στην συγκεκριμένη διαδικασία. Οι αναδράσεις που δημιουργούνται με τις τυχαίες

Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων



συνδέσεις κατατάσσουν τα RC στην κατηγορία των RNN δικτύων. Ωστόσο μόνο οι συνδέσεις μεταξύ του reservoir και του επιπέδου εξόδου είναι απαραίτητες και διαθέσιμες για εκπαίδευση. Έτσι λοιπόν θυσιάζοντας τον έλεγχο μέσα στο reservoir δηλαδή των κρυφών επιπέδων και εστιάζοντας περισσότερο στα επίπεδα εισόδου και εξόδου, μειώνεται η πολυπλοκότητα της εκπαίδευσης του δικτύου.

Κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης, τα διανύσματα εισόδου μπαίνουν στο reservoir και κάθε κατάσταση κόμβου θα αλλάξει τυχαία. Όλες οι καταστάσεις που αλλάζουν συλλέγονται διαδοχικά σε έναν πίνακα μνήμης. Ο στόχος είναι στο τέλος να επιλεγθούν όλα τα βάρη με τα οποία η πραγματική έξοδος θα πλησιάζει στα επιθυμητά αποτελέσματα. Έτσι λοιπόν μόνο οι συνδέσεις από το reservoir προς την έξοδο θα εκπαιδευτούν ώστε να προσδιορίσουν τα σωστά βάρη. Η προσαρμογή των βαρών γίνεται συνήθως μέσω της απλής λειτουργίας του linear regression. Μόλις τελειώσει η διαδικασία με τα κατάλληλα βάρη, τότε θα ξεκινήσουν οι δοκιμές με αντίστοιχα δεδομένα. Το RC επιτρέπει την επεξεργασία μια σειράς προβλημάτων σε εξαιρετική απόδοση [57].

Μεταφέροντας το RC στον τομέα της οπτικής ζεύξης, οι νευρώνες μπορούν να λειτουργήσουν ως μη γραμμικές χρονικά εξαρτώμενες καταστάσεις ενός οπτικού κύματος [58]. Αυτοί οι νευρώνες είναι συνδεδεμένοι μέσω της οπτικής ίνας και καθοδηγούνται συνήθως μέσω ενός ημιαγωγικού λείζερ. Ανάλογα με το μήκος του λείζερ συντονίζεται και το μήκος κύματος και αυτό βοηθάει στο συντονισμό του reservoir. Καθώς το RC υπόκειται στην κατηγορία των RNNs, μετατρέπει την μη γραμμικότητα σε καταστάσεις υψηλότερου επιπέδου μέσα στον οπτικό βρόγχο ανάδρασης έτσι ώστε στο επίπεδο εξόδου η εκπαίδευση να γίνεται με απλό τρόπο. Ένα φωτονικό RC λοιπόν, μπορεί να ισοσταθμίσει τις παραμορφώσεις του καναλιού όπως ένας equalizer αλλά και να εκτιμήσει άμεσα τα λαμβανόμενα σύμβολα.

Κάποιοι βασικοί τύποι reservoir που χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα είναι:

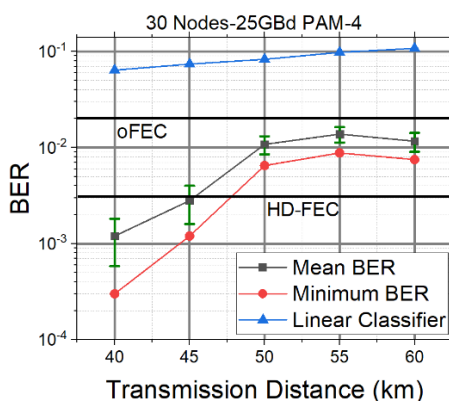
1. Fiber-based RC
2. Silicon micro-ring resonator (MRR) -based RC
3. Delay-based RC

Το Fiber-based RC χρησιμοποιεί συνήθως ένα ημιαγωγό λείζερ ή έναν οπτικό ενισχυτή. Το σήμα από το λείζερ περνάει στο reservoir. Οι νευρώνες του reservoir απαρτίζουν την μη γραμμική κατάσταση του οπτικού κύματος σε κάθε χρονικό διάστημα με την καθυστέρηση του βρόγχου ανάδρασης. Σε κάθε ανάδραση το σήμα συνδέεται και δειγματοληπτείται. Στο κάθε δείγμα αντιστοιχεί ένας νευρώνας επομένως με μια απλή διαδικασία εκμάθησης τα βάρη προσαρμόζονται αντίστοιχα ώστε να προβλεφθεί το τελικό αποτέλεσμα. Από την άλλη πλευρά, το Silicon micro-ring resonator-based RC βασίζεται σε μια φωτοδίοδο PIN με ανεστραμμένη πόλωση.



Η ανεστραμμένη τάση εισάγει ένα μη γραμμικό εφέ τύπου Kerr που χρησιμοποιείται ως νευρώνας. Ο νευρώνας απαρτίζεται από ένα δακτύλιο του πυριτίου όπου το σήμα εισέρχεται και διαδίδεται μέσα στο δακτύλιο. Η υποδοχή του σήματος μέσα στο reservoir και η εκπαίδευση γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως στο Fiber-based RC. Οι κύριες διαφορές αυτών των δύο reservoirs είναι στους διαφορετικούς ημιαγωγούς και στο ότι ο δακτύλιος λειτουργεί ως μια δεξαμενή ενός νευρώνα ενώ το Fiber-based RC μπορεί να φιλοξενήσει πολλούς νευρώνες. Το delay-based reservoir αποτελεί μια εξελιγμένη έκδοση reservoir καθώς κάνει χρήση πολυπλεξίας χρόνου με την καθυστέρηση που προκύπτει από την διάδοση σε έναν εξωτερικό βρόγχο ανάδρασης [59]. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται οι απαιτήσεις στο hardware αλλά και παράγεται υψηλότερη ταχύτητα καθώς περιορίζεται η ταχύτητα επεξεργασίας. Ουσιαστικά το σήμα εισέρχεται, δειγματοληπτείται και κρατείται κάθε τ (τ είναι η διάρκεια καθυστέρησης στον βρόγχο ανάδρασης). Κάθε δεδομένο εισόδου πολλαπλασιάζεται με μια χρονική μάσκα (σταθερή συνάρτηση με τυχαία δυαδική ακολουθία) και εισέρχεται στο reservoir. Το reservoir βλέπει την μάσκα ως βάρος του σήματος εισόδου και των εικονικών κόμβων που υπάρχουν κατά μήκος της γραμμής καθυστέρησης. Η έξοδος του είναι ακριβώς όπως ένα τυπικό RC [60].

Πρόσφατα, έχει προταθεί μια νέα τεχνική στην οποία γίνεται επέκταση του MRR σε multi-MRR [61]. Το RC χωρίζεται σε μικρότερα RC όπου το καθένα έχει ένα αριθμό MRR με την ίδια είσοδο και έξοδο στο ίδιο layer. Κάθε έξοδος του RC συνδέεται με την είσοδο του επόμενου MRR. Τα multi-MRR μετατρέπουν τις διαμορφωμένες φάσεις των σημάτων σε διαμορφωμένες εξόδους έντασης, επιφέροντας καλύτερα αποτελέσματα χωρίς να απαιτείται μεγάλη οπτική ισχύς στην είσοδο. Ιδιαίτερα έχει αποδειχθεί ότι στο κομμάτι της αντιστάθμισης της διασποράς μπορεί να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα με ελάχιστη εκπαίδευση και ελάχιστη κατανάλωση ισχύος κατά την έξοδο, από ότι τα Delay-based RC και τα HD- FEQ (Εικόνα 14).



Εικόνα 14



4.5 Διόρθωση σήματος με τον αλγόριθμο του Linear Regression

Το Linear Regression έρχεται από τον τομέα της στατιστικής και αποτελεί μια στατιστική μέθοδο που δημιουργεί ένα προγνωστικό μοντέλο μεταξύ μιας επιθυμητής εξόδου y και διάφορων ανεξάρτητων μεταβλητών x . Η μέθοδος δείχνει κατά πόσο συμβάλλουν οι ανεξάρτητες μεταβλητές στην εξαρτημένη. Στο κομμάτι της μηχανικής μάθησης αποτελεί έναν από τους “κλασικούς” και απλούς αλγορίθμους για την επίλυση προβλημάτων ταξινόμησης, παλινδρόμησης και πρόβλεψης.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέσα από ένα απλό οπτικό σύστημα μετάδοσης που δημιουργήθηκε σε κώδικα Matlab, παρατηρήθηκε και σχολιάστηκε πως τα γραμμικά και τα μη γραμμικά φαινόμενα επηρέασαν την ποιότητα του σήματος. Στο ίδιο οπτικό σύστημα λοιπόν, κάνοντας μια προσπάθεια για διόρθωση του σήματος γίνεται χρήση του συγκεκριμένου αλγορίθμου παλινδρόμησης. Ξεκινώντας, ο αλγόριθμος θα δέχεται σαν είσοδο τα “χαλασμένα” σύμβολα που λαμβάνουμε στην έξοδο του σήματος. Τα δεδομένα αυτά θα πρέπει να χωριστούν τυχαία σε δύο μέρη, ώστε το ένα μέρος να εκπαιδευτεί και να μπορέσει να προβλέψει σωστά το άλλο μέρος. Με την εκπαίδευση πραγματοποιείται αλλαγές στα βάρη και δημιουργούνται νέα σύμβολα με βάσει το απλό πιθανοτικό μοντέλο:

$$\hat{y} = b_0 + wx$$

Για 4PAM διαμόρφωση και ενίσχυση ανά 50km, στον πίνακα (7) παρουσιάζεται ένα μέρος της αρχικής εισόδου του σήματος (A_{xin}), τη έξοδό του μετά την παρουσία των φαινομένων (A_{xout}) και την έξοδο μετά την χρήση του linear regression. Από τον πίνακα παρατηρείται ότι τα σύμβολα κατά την έξοδο μετά την χρήση του αλγορίθμου έχουν διορθωθεί πλήρως.



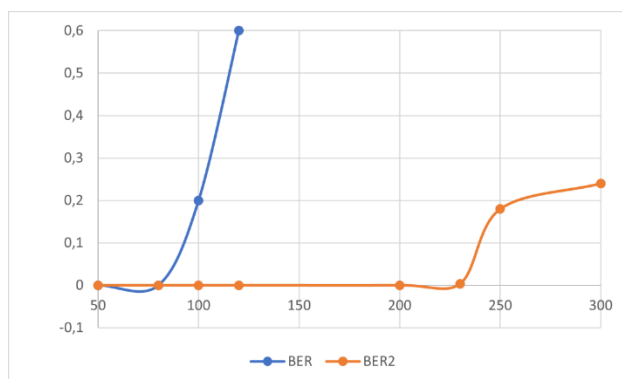
Axin	Axout	Axout -After LR
2	1,28	2
0	-3,23	0
2	1,33	2
0	-3,37	0
1	-0,74	1
2	1,18	2
1	-1,06	1
1	-0,87	1
2	1,36	2
1	-1,1	1

Πίνακας 7 -Εξοδοι συστήματος πριν και μετά το Linear Regression

Αυτό αποδεικνύεται καλύτερα με την εύρεση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) αλλά και της νέας τιμής του BER, τα οποία στην συγκεκριμένη περίπτωση και τα δυο είναι μηδενικά. Το MSE είναι η μέση τετραγωνική διαφορά μεταξύ της τιμής στόχου και της παραγόμενης τιμής. Στον πίνακα (8) παρατηρείται πως η ποιότητα του σήματος με την χρήση του linear regression αρχίζει να χαλάει μετά τα 200km ενίσχυσης. Προσφέρει την διπλάσια κάλυψη συγκριτικά με την αρχική διάδοση όπου το σήμα χάλαγε πλήρως στα 100km με BER = 0,2. (Γράφημα 25).

Απόσταση (km)	BER
50	0
100	0
200	0,00008
230	0,0036
250	0,18
300	0,24

Πίνακας 8 - BER μετά την χρήση του linear regression



Γράφημα 25 Σύγκριση BER

5. Συμπέρασμα

Η οπτική ίνα χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια στον τομέα των επικοινωνιών και στα δίκτυα. Θεωρείται το καλύτερο μέσω μετάδοσης αφού μπορεί να μεταβιβάσει το οπτικό σήμα από τον πομπό στον δέκτη πετυχαίνοντας χαμηλή εξασθένηση του σήματος σε μεγάλο εύρος ζώνης. Ωστόσο η βασική πρόκληση που αντιμετωπίζουν συνεχώς τα οπτικά δίκτυα είναι στο κομμάτι της χωρητικότητας. Διάφορες απώλειες, φαινόμενα διασποράς και θορύβου που αναπτύσσονται μέσα στο μέσο μετάδοσης εξασθενούν και παραμορφώνουν το μεταδιδόμενο σήμα, ωστόσο η επίδρασή τους είναι ανεξάρτητη από το σήμα. Από την άλλη πλευρά, τα μη γραμμικά φαινόμενα που αναπτύσσονται εξαρτώνται από την ισχύ του σήματος. Έτσι λοιπόν αυξάνοντας την οπτική ισχύ για την αύξηση του εύρους ζώνης συνεπώς και της χωρητικότητας, αυξάνονται παράλληλα και τα μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία επιφέρουν μεγάλη αλλοίωση στο τελικό σήμα. Οι OPC, DBP, Equalizers και FEQ είναι κάποιες από τις τεχνικές που μπορούν να περιορίσουν τα γραμμικά και τα μη γραμμικά φαινόμενα και να διορθώσουν την ποιότητα του σήματος. Ωστόσο παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλη έμφαση στις τεχνικές μηχανικής μάθησης και στην διόρθωση των σφαλμάτων που δημιουργούνται μέσα στην οπτική ζεύξη. Μια από τις απλές τεχνικές είναι ο αλγόριθμος του linear regression ο οποίος δοκιμάστηκε σε ένα απλό οπτικό σύστημα και διόρθωσε την ποιότητα του σήματος για κάποια επιπλέον χιλιόμετρα ενίσχυσης. Σε μεγάλα οπτικά συστήματα τα τεχνικά νευρωνικά δίκτυα, ανιχνεύουν και διορθώνουν το σήμα, καταλήγοντας έτσι σχεδόν τέλειο στο χρήστη. Τα RNNs είναι μια από τις κατηγορίες των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και είναι



αυτά που μπορούν να διαχειριστούν ένα οπτικό σήμα καλύτερα. Λόγω των κόμβων ανάδρασης που διαθέτουν διατηρείται ένα κομμάτι μνήμης με αποτέλεσμα το δίκτυο να προβλέπει τις εξόδους με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το LSTM και το Reservoir είναι βελτιωμένοι τύποι RNNs δικτύων καθώς διαθέτουν περισσότερη μνήμη και μπορούν να διαχειριστούν ένα μεγάλο όγκο οπτικών σημάτων. Κάνοντας μια σύγκριση για τα δύο αυτά μοντέλα, μπορούμε να πούμε πως το LSTM προβλέπει πολύ καλύτερα και πιο ακριβή αποτελέσματα, όμως είναι αρκετά δύσκολο στην εκπαίδευση και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Το RC προβλέπει αρκετά καλά αποτελέσματα αλλά χρειάζεται να εκπαιδευτεί μόνο ένα μικρό μέρος του δικτύου, πράγμα που το κάνει εξαιρετικά πιο ευέλικτο. Μέσα από την συγκεκριμένη εργασία προτείνεται πως το RC είναι η καλύτερη λύση για την διόρθωση των προβλημάτων μια οπτικής ζεύξης καθώς προς το παρόν μπορεί να συνδυάσει την καλύτερη σχέση ποιότητας-τιμής.

5.1 Μελλοντική Έρευνα

Τα RNNs και ιδιαίτερα το RC αποδεικνύονται ότι είναι μια ανερχόμενη τεχνική στην διόρθωση των οπτικών σημάτων που έχουν υποστεί μη γραμμικές παραμορφώσεις. Όμως με τον ερχομό του 5G αλλά και το μελλοντικού 6G, ο συνδυασμός των οπτικών συστημάτων και της μηχανικής μάθησης θα συνεχίσει να αυξάνεται καθώς το πρόβλημα της χωρητικότητας θα συνεχίζει να υπάρχει. Ως μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να οριστεί η λειτουργία και η εγκατάσταση ενός RC σε WDM συστήματα για την καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης. Ερωτήματα σχετικά με την διαχείριση της μη γραμμικότητας των γειτονικών καναλιών, την μίξη τεσσάρων κυμάτων που θα αναπτυχθεί αλλά και ο απαιτούμενος όγκος για την εκπαίδευση των δεδομένων, θα μπορούσαν να ερευνηθούν περισσότερο μελλοντικά.



Αναφορές

- [1] X. Liu, «Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era,» 2019.
- [2] G. P. AGRAWAL, Συστήματα Επικοινωνιών με Οπτικές ίνες, 4η επιμ., 2012.
- [3] L. N. Binh, Optical Fiber Communication Systems with Matlab and Simulink Models, 2nd Edition επιμ., 2014.
- [4] R. Hui, Introduction to Fiber-Optic Communications, 2020.
- [5] «Optical Transmission,» σε *Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications*, 2016.
- [6] «Difference between LED and LASER». <https://electronicscoach.com/difference-between-led-and-laser.html>.
- [7] J. F. David Large, «Linear Fiber-Optic Signal Transportation,» σε *Broadband Cable Access Networks*, 2009.
- [8] B. Sklar, Ψηφιακές Επικοινωνίες: Θεωρία και Εφαρμογές, 2η επιμ., Παπασωτηρίου.
- [9] «Modulation formats for optical communications,» σε *Introduction to Fiber-Optic Communications*, 2020.
- [10] I. Kaminow, «FSK WITH DIRECT DETECTION IN OPTICAL FDM NETWORKS».
- [11] D. K. T. Ajoy Ghatak, An Introduction to Fiber Optics, 1998.
- [12] R. I. Guillermo Huerta-Cuellar, Optical Fiber Applications, 2020.
- [13] M. B. B. L. C.-A. Bunge, «Basic principles of optical fibres,» σε *Polymer Optical Fibres*, 2017.
- [14] «Single-Mode Fibers for Communications,» σε *Specialty Optical Fibers Handbook*, 2007.
- [15] M. Singh, «Single Mode Fiber Standards: A review,» 2018.
- [16] «Optical Communication Fundamentals,» σε *OFDM for Optical Communications*, 2010.
- [17] J. M. Senior, Optical Fiber Communications Principles and Practice, 3rd επιμ., 2009.



- [18] «OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS | Wavelength Division Multiplexing,» σε *Encyclopedia of Modern Optics*, 2005.
- [19] R. K. S. Ankur Tiwari, «FUTURE TRENDS IN FIBER OPTICS,» 2020.
- [20] S. Aleksic, «Towards Fifth-Generation (5G) Optical Transport Networks,» 2015.
- [21] B. M. S. K. K. S. T. L. Ioannis Tomkos, «The Evolution of Optical Networking,» 2012.
- [22] K. N. S. a. G. H. S. Rajiv Ramaswami, *Optical Networks A Practical Perspective*, 3rd επιμ., 2010.
- [23] S. M. Kunimasa Saitoh, «Multicore Fiber Technology,» 2016.
- [24] F. R. V. O. John B. Anderson, «Faster-Than-Nyquist Signaling,» 2013.
- [25] Y. W. a. K. W. A. C. Yinglu Hu, «Optical Communications and Modulation Techniques in 5G,» σε *Smart Grids and Their Communication Systems*, 2019.
- [26] R. W. T. Rene-Jean Essiambre, «Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks,» 2012.
- [27] D. K. Mynbaev, «Fundamental and Technological Limitations of Optical Communications,» 2016.
- [28] R. a. O. M. Hui, «Optical Fiber Measurement,» σε *Fiber Optic Measurement Techniques*, 2009.
- [29] «Loss properties due to Rayleigh scattering in different types of fiber,» σε *Optics Express*, 2003.
- [30] V. Brückner, «Chromatic dispersion and field distribution in optical multi-mode and single-mode fibers,» 2014.
- [31] «Fiber Nonlinearity and Capacity: Single-Mode and Multimode,» σε *Optical Fiber Telecommunications*, 2013.
- [32] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 6th επιμ., 2019.
- [33] P. S. M. S. A. (. Christiansen, *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century*, 1st επιμ., 2000.
- [34] T. Schneider, *Nonlinear Optics in Telecommunications*, 2004.



- [35] «Four-Wave Mixing,» σε *Nonlinear Effects in Optical Fibers*, 2011.
- [36] H. Y. Robert G., «Stimulated Brillouin Scattering,» 2001.
- [37] A. S. A. Samer DARWISH, «ASE Noise in Raman Amplifiers: Pump Depletion Impact,» 2017.
- [38] M. E. M. M. A. Z. A. K. M. S. a. N. J. D. A. D. Ellis, «Performance limits in optical communications due to fiber nonlinearity,» 2017.
- [39] D. v. d. B. P. K. S. S. G.-D. K. H. d. W. S.L. Jansen, «Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation,» 2006.
- [40] J. M. K. Ezra Ip, «Compensation of Dispersion and Nonlinear Impairments Using Digital Backpropagation,» 2008.
- [41] D. G. C. R. V. P. I. H. W. X. Guo, «Optical and Electrical Equalizers for Fiber Optic Links,» 2017.
- [42] «Comparison of DSP-based nonlinear equalizers for intra-channel nonlinearity compensation in coherent optical OFDM,» *ELIAS GIACOU MIDIS, SOFIEN MHATLI, TU NGUYEN, SON T. LE, 4 IVAN ALDAYA, 5 MARY E. MCCARTHY, ANDREW D. ELLIS, BENJAMIN J. EGGLETON*, 2016.
- [43] «Artificial Neural Networks,» σε *Neuro-inspired Information Processing*, 2020.
- [44] S. Czischek, «Artificial Neural Networks,» σε *Neural-Network Simulation of Strongly Correlated Quantum Systems*, 2020.
- [45] E. Bisong, Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform:, 2019.
- [46] A. R. S. S. Oleg Sidelnikov, «Nonlinear Equalization in Long Haul Transmission Systems Using Dynamic Multi-Layer Perceptron Networks,» 2018.
- [47] M. S. P. A. A. A. D. T. PHAM, «ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS,» σε *Computational Intelligence*.
- [48] S. D. S. C. a. S. t. B. Daniel Tandler, «On Recurrent Neural Networks for Sequence-based Processing in Communications,» 2019.
- [49] M. N. S. S. Ke-Lin Du, Neural Networks and Statistical Learning, 2nd επιμ., 2014.
- [50] L. S. M. M. K. P. L.-E. Christoffer Fougstedt, «ASIC Implementation of Time-Domain



Digital Back Propagation for Coherent Receivers,» 2018.

- [51] H. B. a. A. L. Tobias A. Eriksson, «Applying Neural Networks in Optical Communication Systems: Possible Pitfalls,» 2017.
- [52] J. S. F. C. Felix A. Gers, «Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM,» 1999.
- [53] G. D. H. Robert DiPietro, «Deep learning: RNNs and LSTM,» 2019.
- [54] A. B. C. M. Y. K. Stavros Deligiannidis, «Compensation of Fiber Nonlinearities in Digital Coherent Systems Leveraging Long Short-Term Memory Neural Networks,» 2020.
- [55] H. J. Mantas Lukoševicius, «Reservoir computing approaches to recurrent neural network training,» 2009.
- [56] S. P. Shi Li, «Photonic Reservoir Computing in Optical Transmission Systems,» 2020.
- [57] S. L. Stephan Pachnicke, «Machine Learning in the Optical Domain Enabled by Reservoir Computing,» 2020.
- [58] J. B. F. APOSTOLOS ARGYRIS, «PAM-4 Transmission at 1550 nm Using Photonic Reservoir Computing Post-Processing,» 2019.
- [59] D. B. C. S. Guy Van der Sande, «Advances in photonic reservoir computing,» 2017.
- [60] J. N. K. T. a. A. U. Yoma Kuriki, «Impact of input mask signals on delay-based photonic reservoir computing with semiconductor lasers,» 2018.
- [61] K. S. D. A. B. Charis Mesaritakis, «Spatial Photonic Reservoir Computing based on Non-Linear Phase-to-Amplitude Conversion in Micro-Ring Resonators,» 2020.

