



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

Αλγοριθμικός Υπολογισμός της Ποιότητας Μετάδοσης (QoT) σε Ευέλικτα Οπτικά Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Β. Αργύρης

Επιβλέπων : Ηρακλής Β. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013



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

Αλγοριθμικός Υπολογισμός της Ποιότητας Μετάδοσης (QoT) σε Ευέλικτα Οπτικά Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Β. Αργύρης

Επιβλέπων : Ηρακλής Β. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Δεκεμβρίου 2013.

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

.....

Νικόλαος Β. Αργύρης

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

Copyright © Νικόλαος Αργύρης, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η ραγδαία αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε συνδυασμό με το γεγονός του κορεσμού της χωρητικότητας της συμβατικής οπτικής ίνας θέτει ως ζητούμενο την επίτευξη μεγάλου ποσοστού αποδοτικής χρησιμοποίησης των διαθέσιμων πόρων. Η στατική φύση των ήδη υπάρχοντων οπτικών δικτύων τα καθιστά ακατάλληλα για την ικανοποίηση των μελλοντικών απαιτήσεων και αναγκών.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχουν προταθεί αρχιτεκτονικές δυναμικών οπτικών δικτύων προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι ανεπάρκειες των στατικών. Κύριο πλεονέκτημα των δυναμικών δικτύων είναι η δυνατότητα προσαρμογής της λειτουργίας τους στη μεταβαλλόμενη κατάσταση της κίνησης και των φυσικών μηχανισμών της ζεύξης. Ο βασικός μηχανισμός με τον οποίο επιτυγχάνεται η ευελιξία αυτή είναι η Παρακολούθηση της Οπτικής Επίδοσης (Optical Performance Monitoring – OPM). Μέσω του μηχανισμού αυτού, ο ελεγκτής του δικτύου λαμβάνει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου με στόχο τη δυναμική ανάθεση των διαθέσιμων πόρων και επομένως την επίτευξη της μέγιστης αποδοτικής χρησιμοποίησής τους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η χρήση των δεδομένων της OPM καθώς και των χαρακτηριστικών ευελιξίας των σύγχρονων οπτικών πομποδεκτών για την ανάπτυξη μίας μεθόδου υπολογισμού της ποιότητα μετάδοσης (Quality of Transmission – QoT) σε μία οπτική ζεύξη και η ενημέρωση του επιπέδου ελέγχου του δικτύου με τις παραμέτρους μετάδοσης βασιζόμενοι στην παρούσα κατάσταση του δικτύου.

Λέξεις Κλειδιά

Ευέλικτα Οπτικά Δίκτυα, Ευέλικτοι Οπτικοί Πομποδέκτες, Ποιότητα Μετάδοσης, Σχήματα Διαμόρφωσης QAM, Μηχανισμοί Υποβάθμισης Οπτικού Σήματος

Abstract

The ever growing telecommunication traffic, combined with the saturation in standard mode fiber capacity, poses a challenge to achieving efficient usage of available network resources. The static nature of conventional optical networks makes them unsuitable for satisfying future consumers' needs and expectations.

Recently, new, flexible optical network architectures have been proposed to overcome the problems associated with static ones. The main advantage of these networks is the capability of adapting their operation on the links' varying existing physical and traffic conditions. The most important process that takes place in these networks is Optical Performance Monitoring (OPM) in which the network controller is provided with the essential information about the system's current state, in order to dynamically allocate the available resources and, therefore, maximize the utilization efficiency.

In this thesis we examine the use of data from OPM and exploit the flexibility of modern optical transceivers in order to develop a method to estimate the Quality of Transmission (QoT) in an optical link. In this way it is possible to provide information to the network's control plane regarding transmission parameters based on current network conditions.

Keywords

Flexible Optical Networks, Flexible Optical Transceivers, Quality of Transmission, QAM Modulation Formats, Physical Layer Impairments

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του εαρινού εξαμήνου του ακαδημαϊκού έτους 2013. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο, επικεφαλής του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών, για την ευκαιρία που μου προσέφερε να εμβαθύνω στο ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο των Οπτικών Δικτύων.

Θα ήθελα να προσφέρω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στα μέλη του Εργαστηρίου Στέφανο Δρη και στο Χρήστο Σπαθαράκη, οι οποίοι μου παρείχαν συνεχή καθοδήγηση και χρήσιμες συμβουλές καθ' όλη τη διάρκεια της πραγματοποίησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις φίλες και τους φίλους μου για την ανιδιοτελή τους υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου που μου παρείχε συνεχώς τις καλύτερες συνθήκες για την πραγματοποίηση των στόχων και των φιλοδοξιών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Λίστα Σχημάτων.....	13
1. Εισαγωγή.....	15
1.1. Η αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και τα Οπτικά Δίκτυα	15
1.2. Ευέλικτα Οπτικά Δίκτυα	16
1.3. Δομικά Στοιχεία του Ευέλικτου Δικτύου – Ευέλικτος Οπτικός Πομποδέκτης.....	18
1.4. Αντικείμενο της Εργασίας – Επισκόπηση.....	18
2. Ευέλικτοι Οπτικοί Πομποδέκτες.....	21
2.1. Ευελιξία σε σχήματα διαμόρφωσης, ρυθμούς μετάδοσης και αξιοποίηση φάσματος...	21
2.2. Πλεονεκτήματα και Εφαρμογές	25
3. Μηχανισμοί Υποβάθμισης Φυσικού Στρώματος & Παρακολούθηση Οπτικής Επίδοσης	27
3.1. Μηχανισμοί υποβάθμισης της ποιότητας μετάδοσης του οπτικού σήματος (Physical Layer Impairments)	27
3.2. Μετρικές και Μέθοδοι Παρακολούθησης Οπτικής Επίδοσης	33
4. Προτεινόμενη μέθοδος για τον υπολογισμό της Ποιότητας Μετάδοσης.....	37
4.1. Γενικά περί της μεθόδου	37
4.2. Μοντελοποίηση οπτικής ζεύξης.....	37
4.3. Προσδιορισμός του σηματοθορυβικού λόγου.....	38
4.4. Προσδιορισμός της μη γραμμικής στρόφης φάσης.....	39
4.5. Επίδραση στα χαρακτηριστικά του σήματος	40
4.6. Ανάκτηση φάσης του σήματος.....	50
5. Αποτελέσματα της μεθόδου & παραδείγματα.....	53
5.1. Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα.....	53
5.2. Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου.....	64
6. Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα	69
6.1. Σύνοψη και Συμπεράσματα.....	69
6.2. Περαιτέρω Έρευνα.....	69
Αναφορές – Βιβλιογραφία	71

Λίστα Σχημάτων

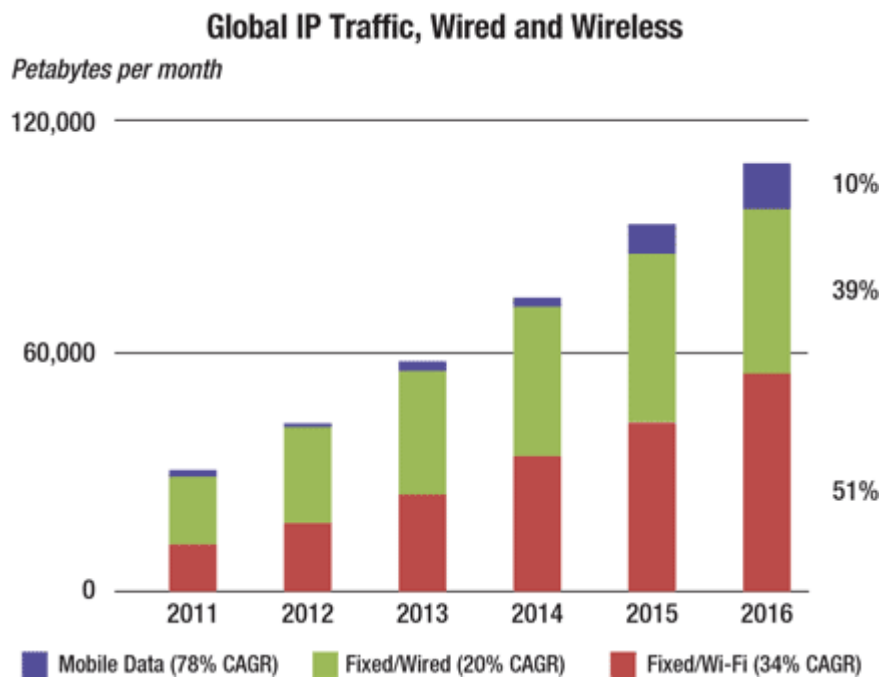
Σχήμα 1-1: Αύξηση της συνολικής IP κίνησης [1]	15
Σχήμα 1-2: Χωρητικότητα οπτικής ίνας (σχήμα από [4])	16
Σχήμα 1-3: (a) Δέσμευση πόρων σε στατικό οπτικό δίκτυο (b) Δέσμευση πόρων σε δυναμικό οπτικό δίκτυο (σχήμα από [5])	17
Σχήμα 2-1: Παράλληλος οπτικός IQ διαμορφωτής (σχήμα από [6])	21
Σχήμα 2-2: Σηματικοί αστερισμοί 36-QAM, 16-QAM και QPSK	22
Σχήμα 2-3: Τετραπλός παράλληλος οπτικός IQ διαμορφωτής (σχήμα από [6])	22
Σχήμα 2-4: Φασματική απόδοση στην περίπτωση σταθερού ρυθμού μετάδοσης και με εναλλαγή σχημάτων διαμόρφωσης (σχήμα από [6])	24
Σχήμα 2-5: Φασματική απόδοση στην περίπτωση μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης και με εναλλαγή σχημάτων διαμόρφωσης (σχήμα από [6])	25
Σχήμα 3-1: Φαινόμενα εξασθένισης του σήματος στην οπτική ίνα [10]	27
Σχήμα 3-2: Αρχή λειτουργίας της χρωματικής διασποράς [11]	28
Σχήμα 3-3: Συνολική Διασπορά μετά τη χρήση ίνας αντιστάθμισης διασποράς (DCF) [9]	29
Σχήμα 3-4: Μηχανισμός της διασποράς τρόπων πόλωσης [12]	29
Σχήμα 3-5: Μεταβολή της συχνότητας του σήματος (chirp) λόγω μη-γραμμικότητας της ίνας [9] ..	31
Σχήμα 3-6: Μεταβολή φασματικού περιεχομένου του σήματος λόγω της αυτοδιαμόρφωσης φάσης [9]	32
Σχήμα 3-8: Τεχνική υπολογισμού διανύσματος λάθους	34
Σχήμα 3-7: Καμπύλες επίδοσης BER για διάφορα σχήματα διαμόρφωσης (σχήμα από [4])	35
Σχήμα 4-1: Μοντέλο οπτικής ζεύξης	38
Σχήμα 4-2: Υποβάθμιση σηματοθορυβικού λόγου ενός σήματος QPSK συναρτήσει των τμημάτων ίνας μίας οπτικής ζεύξης	40
Σχήμα 4-3: Υποβάθμιση σηματοθορυβικού λόγου σημάτων QPSK, 16-QAM, 32-QAM και 64-QAM	41
Σχήμα 4-4: Αρχικός σηματικός αστερισμός των διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης	42
Σχήμα 4-5: Λαμβανόμενος σηματικός αστερισμός μετά από διάδοση σε ζεύξη με 4 τμήματα ίνας και αρχικό σηματοθορυβικό λόγο 40dB	42
Σχήμα 4-6: Υποβάθμιση σηματοθορυβικού λόγου ενός σήματος QPSK στην περίπτωση συστήματος WDM	43
Σχήμα 4-7: Μη γραμμική στροφή φάσης του σηματικού αστερισμού QPSK σήματος για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 1mW	44
Σχήμα 4-8: Μη γραμμική στροφή φάσης του σηματικού αστερισμού σήματος 16-QAM για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 1mW	45
Σχήμα 4-9: Μη γραμμική στροφή φάσης του σηματικού αστερισμού σήματος 32-QAM για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 1mW	46
Σχήμα 4-10: Μη γραμμική στροφή φάσης του σηματικού αστερισμού σήματος 64-QAM για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 1mW	46
Σχήμα 4-11: Μη γραμμική στροφή φάσης του σηματικού αστερισμού σήματος QPSK για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 0.5mW	47

Σχήμα 4-12: Μη γραμμική στροφή φάσης του σηματικού αστερισμού σήματος 16-QAM για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 0.5mW.....	47
Σχήμα 4-13: Μη γραμμική στροφή φάσης σηματικών αστερισμών για αρχικό σηματοθορυβικό λόγο στη ζεύξη 35dB – Ισχύς σήματος 1mW.....	48
Σχήμα 4-14: Μη γραμμική στροφή φάσης σηματικών αστερισμών για αρχικό σηματοθορυβικό λόγο στη ζεύξη 30dB – Ισχύς σήματος 1mW.....	48
Σχήμα 4-15: Μη γραμμική στροφή φάσης σηματικού αστερισμού 16-QAM σε σύστημα WDM – Ισχύς σήματος 1mW	49
Σχήμα 4-16: Μη γραμμική στροφή φάσης σηματικού αστερισμού 16-QAM σε σύστημα WDM – Ισχύς σήματος 1mW	49
Σχήμα 4-17: Ληφθέντες σηματικοί αστερισμοί πριν την ανάκτηση φάσης.....	50
Σχήμα 4-18 Ληφθέντες σηματικοί αστερισμοί μετά την ανάκτηση φάσης	51
Σχήμα 5-1: Μοντέλο οπτικής ζεύξης	53
Σχήμα 5-2: QPSK, 1 κανάλι WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	55
Σχήμα 5-3: QPSK, 2 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	55
Σχήμα 5-4: QPSK, 3 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	56
Σχήμα 5-5: QPSK, 4 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	56
Σχήμα 5-6: QPSK, SNR _{in} =35dB: BER συναρτήσει πλήθους τμημάτων ίνας και αριθμού καναλιών WDM.....	57
Σχήμα 5-7: 16-QAM, 1 κανάλι WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	58
Σχήμα 5-8: 16-QAM, 2 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	59
Σχήμα 5-9: 16-QAM, SNR _{in} =35dB: BER συναρτήσει πλήθους τμημάτων ίνας και αριθμού καναλιών WDM.....	60
Σχήμα 5-10: 32-QAM, 1 κανάλι WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	61
Σχήμα 5-11: 32-QAM, 2 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	61
Σχήμα 5-12: 32-QAM, SNR _{in} =35dB: BER συναρτήσει πλήθους τμημάτων ίνας και αριθμού καναλιών WDM.....	62
Σχήμα 5-13: 64-QAM, 1 κανάλι WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	63
Σχήμα 5-14: 64-QAM, 2 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας.....	63
Σχήμα 5-15: 64-QAM, SNR _{in} =35dB: BER συναρτήσει πλήθους τμημάτων ίνας και αριθμού καναλιών WDM.....	64
Σχήμα 5-16: Τοπολογία σεναρίου.....	65

1. Εισαγωγή

1.1. Η αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και τα Οπτικά Δίκτυα

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται σημαντική αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Η εμφάνιση νέων διαδικτυακών εφαρμογών και υπηρεσιών όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας και το on-line gaming στην καθημερινότητα των χρηστών καθώς και η διείσδυση των υπηρεσιών νέφους (cloud computing) στις εταιρίες και τις επιχειρήσεις είναι μερικά από τα παραδείγματα που δείχνουν τη σημαντική αύξηση στη διακίνηση δεδομένων μέσω του διαδικτύου. Χαρακτηριστικό είναι το ακόλουθο γράφημα που απεικονίζει την αύξηση του όγκου δεδομένων διαδικτύου (IP Traffic) στην πορεία του χρόνου, όπου προβλέπεται αύξηση σχεδόν 100% σε διάρκεια μόλις τριών χρόνων [1].



Σχήμα 1-1: Αύξηση της συνολικής IP κίνησης [1]

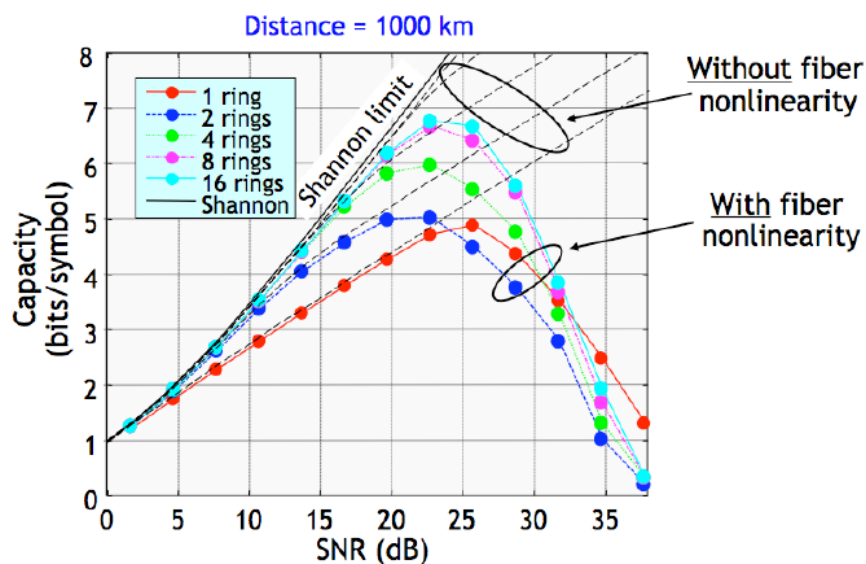
Τα οπτικά δίκτυα επικοινωνίας είναι από τους κυριότερους τρόπους με τους οποίους επιτυγχάνεται η μετάδοση αυτού του μεγάλου όγκου πληροφορίας. Η ευρεία χρήση τους οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες ως μέσα μετάδοσης σε σύγκριση με άλλες ενσύρματες και ασύρματες μεθόδους. Η χαμηλή εξασθένιση, το υψηλό εύρος ζώνης (0.2dB/km για τις συχνότητες περί τα 1550nm και για εύρος 25THz) καθώς και η υψηλότερη αντοχή σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε σύγκριση με άλλα μέσα καθιστούν δυνατή την αξιόπιστη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων σε μακρινές αποστάσεις [2].

Όμως, παρ' όλα τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών ως μέσα μετάδοσης, τα οπτικά δίκτυα επί του παρόντος χαρακτηρίζονται ως στατικά δίκτυα. Ο χαρακτηρισμός αυτός οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχουν σχεδιαστεί προκειμένου να διαχειρίζονται τη μεταβαλλόμενη με το χρόνο κίνηση δεδομένων. Επομένως, σε ένα περιβάλλον όπου οι απαιτήσεις και οι ανάγκες των χρηστών είναι διαρκώς μεταβαλλόμενες και παρουσιάζουν ανομοιομορφία ως προς τα χαρακτηριστικά τους, τα δίκτυα αυτά δεν αποτελούν την ενδεδειγμένη λύση για την αποδοτική διαχείριση και αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων (π.χ. εύρος ζώνης).

1.2. Ευέλικτα Οπτικά Δίκτυα

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν με επιτυχία οι νέες προκλήσεις της αύξησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, αρκετή έρευνα έχει γίνει και συνεχίζει να διεξάγεται σχετικά με μια νέα προσέγγιση στις αρχές λειτουργίας των οπτικών δικτύων. Η εμφάνιση της έννοιας του Ευέλικτου Δικτύου (Flexible Optical Network, Software Defined Network) δείχνει την πρόθεση από πλευράς όλων των εμπλεκόμενων μερών για την εισαγωγή προσαρμοστικότητας και ευφυΐας στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα.

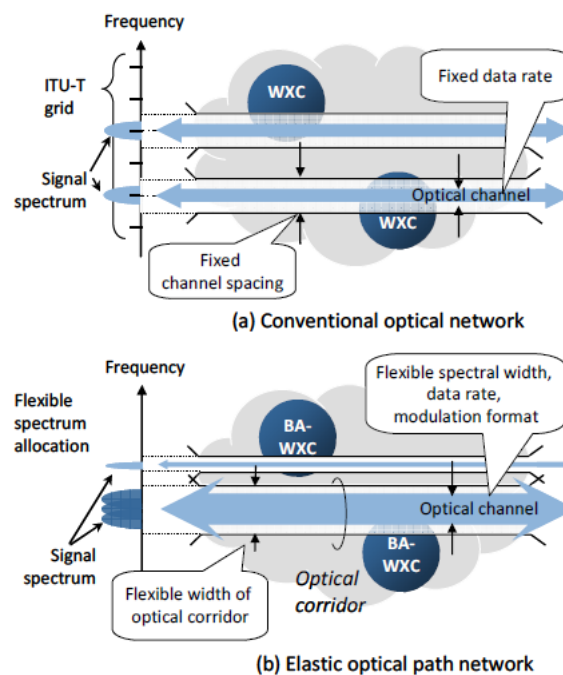
Η εισαγωγή των δύο παραπάνω χαρακτηριστικών στα υπάρχοντα δίκτυα στηρίζεται κυρίως στην ένταξη των Σύμφωνων Ψηφιακών Συστημάτων Μετάδοσης (Coherent Digital Transmission Systems) και των αρχών της Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος (Digital Signal Processing) στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας [3]. Χάρη στα παραπάνω είναι δυνατή η επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης στο ίδιο εύρος ζώνης με χρήση σχημάτων διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης για το οπτικό σήμα. Τα ανώτερα σχήματα διαμόρφωσης όπως είναι τα QPSK, 16-QAM οδηγούν στη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του καναλιού και στην προσέγγιση του ορίου του Shannon με τρόπο που παρουσιάζεται στο σχήμα 1-2 [4].



Σχήμα 1-2: Χωρητικότητα οπτικής ίνας (σχήμα από [4])

Επιπλέον, σημαντική συμβολή ως προς την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης πληροφορίας έχουν και τα εξελιγμένα από πλευράς ταχύτητας και επιδόσεων ηλεκτρονικά που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα οπτικά συστήματα. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η νέα μορφή που παίρνουν τα οπτικά συστήματα (και κατ' επέκταση και τα δίκτυα) ικανοποιεί τις τρέχουσες και μελλοντικές ανάγκες διακίνησης μεγάλου όγκου πληροφορίας οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω.

Πέραν, όμως, της εισαγωγής των τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος στα οπτικά συστήματα, η προσαρμοστικότητα των νέων δικτύων στηρίζεται και στην ευέλικτη διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων. Σύμφωνα με αυτή, το εύρος ζώνης για κάθε μετάδοση πληροφορίας διαφορετικών υπηρεσιών, δεσμεύεται δυναμικά με βάση τις απαιτήσεις της κίνησης που πρέπει να μεταφερθεί καθώς και τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο την παρούσα στιγμή. Συγκεκριμένα, κάθε διαφορετικό είδος υπηρεσίας χαρακτηρίζεται από μία ελάχιστη απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) η οποία με τη σειρά της καθορίζει το μέρος των πόρων του δικτύου που απαιτούνται για την επίτευξη της ποιότητας αυτής. Ευθύνη του δικτύου και συγκεκριμένα του στρώματος ελέγχου είναι η δίκαιη ανάθεση των κατάλληλων πόρων στις διαφορετικές υπηρεσίες. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η αποτελεσματικότερη διαχείριση του φάσματος, το οποίο αποτελεί και τον ακριβότερο πόρο του συστήματος. Η έννοια της ευελιξίας στη διαχείριση του φάσματος γίνεται αντιληπτή και μέσω του επόμενου σχήματος [5] [26] [27]:



Σχήμα 1-3: (α) Δέσμευση πόρων σε στατικό οπτικό δίκτυο (β) Δέσμευση πόρων σε δυναμικό οπτικό δίκτυο (σχήμα από [5])

1.3. Δομικά Στοιχεία του Ευέλικτου Δικτύου – Ευέλικτος Οπτικός Πομποδέκτης

Για να καταστεί δυνατή η εφαρμογή των παραπάνω ιδεών σε ένα σύγχρονο και καινοτόμο οπτικό δίκτυο θα πρέπει να είναι διαθέσιμος ο κατάλληλος εξοπλισμός που θα επιτρέψει την υλοποίηση τους. Οι οπτικές διασυνδέσεις (Optical Cross-Connects), οι επαναρρυθμιζόμενοι οπτικοί πολυπλέκτες (ROADMs) και οι οπτικοί πομποδέκτες είναι μερικές από τις κυριότερες δομές που είναι εγκατεστημένες σε ένα οπτικό δίκτυο.

Οι πομποδέκτες θεωρούνται από τα σημαντικότερα στοιχεία του δικτύου. Σε αυτούς φτάνει η προς μετάδοση πληροφορία ως ενδιάμεσος σταθμός προτού καταλήξει στον τελικό προορισμό. Μέχρι πρότινος, ένας οπτικός πομποδέκτης θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένας ενδιάμεσος κόμβος με περιορισμένες δυνατότητες και αρμοδιότητες οι οποίες αφορούσαν την αναγέννηση του οπτικού σήματος και την προώθησή του στον επόμενο κόμβο, σύμφωνα πάντα με τις εντολές που λάμβανε από το στρώμα ελέγχου του δικτύου [6] [25].

Πλέον, όμως, η ύπαρξη ενός ευέλικτου δικτύου έχει ως βασική προϋπόθεση την εξέλιξη των πομποδεκτών που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο. Τα χαρακτηριστικά τους πρέπει να μπορούν να εξυπηρετούν τις βασικές αρχές ευελιξίας που παρουσιάστηκαν παραπάνω, ώστε να εξασφαλίζεται η εύρυθμη λειτουργία του δικτύου.

Ένας ευέλικτος οπτικός πομποδέκτης για να μπορέσει να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του σύγχρονου δικτύου θα πρέπει να είναι ικανός:

- Να παρακολουθεί ή να γνωρίζει την κατάσταση των ζεύξεων του δικτύου με τις οποίες διασυνδέεται σε επίπεδο τόσο φυσικού στρώματος όσο και στρώματος δικτύου, μέσω τεχνικών Παρακολούθησης Οπτικής Επίδοσης.
- Στη συνέχεια με βάση τις πληροφορίες αυτές να είναι σε θέση να προσδιορίσει το κατά πόσο είναι εφικτή είναι η μετάδοση πληροφορίας πάνω από το συγκεκριμένο κανάλι. Αν είναι εφικτή επιπλέον να γνωρίζει και την ποιότητα της μετάδοσης που μπορεί να παρέχει.
- Τέλος, να ενημερώνει το στρώμα ελέγχου του δικτύου με τις παραπάνω πληροφορίες και να είναι σε θέση να πάρει αποφάσεις για τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης.

1.4. Αντικείμενο της Εργασίας – Επισκόπηση

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη δεύτερη ιδιότητα ενός ευέλικτου οπτικού πομποδέκτη, η οποία είναι ο προσδιορισμός της ποιότητας μετάδοσης σε μία ζεύξη δεδομένων χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μία αλγοριθμική μέθοδος η οποία με δεδομένη την κατάσταση στο φυσικό στρώμα, όπως αυτή περιγράφεται από μετρικές όπως ο σηματοθορυβικός λόγος στη ζεύξη (SNR) και μηχανισμοί υποβάθμισης του οπτικού σήματος στο φυσικό στρώμα όπως η αυτοδιαμόρφωση και η ετεροδιαμόρφωση φάσης (SPM και XPM), πραγματοποιεί μια εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης (Quality of Transmission – QoT) πάνω από τη ζεύξη αυτή.

Πριν την παρουσίαση της παραπάνω μεθόδου, γίνεται μια αναφορά στις σύγχρονες τάσεις που κυριαρχούν στην περιοχή των ευέλικτων οπτικών πομποδεκτών, όπως αυτές είναι γνωστές από

τη βιβλιογραφία (Κεφάλαιο 2). Στη συνέχεια επισημαίνονται οι μηχανισμοί υποβάθμισης του σήματος σε μία οπτική ζεύξη, οι τεχνικές παρακολούθησης της οπτικής επίδοσης που χρησιμοποιούνται καθώς και οι αντίστοιχες μετρικές (Κεφάλαιο 3). Ακολούθως, πραγματοποιείται η ανάλυση της προτεινόμενης μεθόδου (Κεφάλαιο 4) ενώ εκτίθενται, επίσης, αποτελέσματα του αλγορίθμου αυτού για διάφορα δικτυακά σενάρια (Κεφάλαιο 5). Τέλος, παρατίθεται η σύνοψη καθώς και προτάσεις για μελλοντική εργασία (Κεφάλαιο 6).

2. Ευέλικτοι Οπτικοί Πομποδέκτες

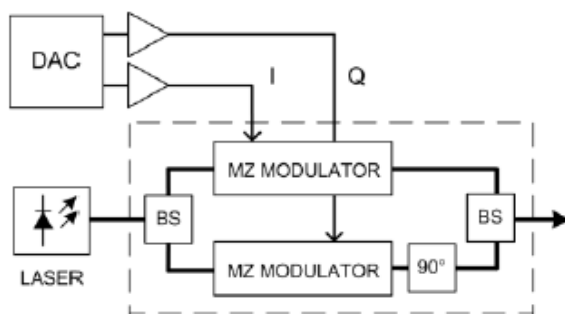
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ανάπτυξη των δομικών στοιχείων που συγκροτούν το Ευέλικτο Οπτικό Δίκτυο είναι καθοριστικής σημασίας. Συγκεκριμένα, στο πεδίο των οπτικών πομποδεκτών, οι οποίοι απασχολούν την παρούσα εργασία, έχει γίνει αρκετή έρευνα σχετικά με τους τρόπους με τους οποίους τους προσδίδεται ευφυΐα και ευελιξία ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του νέου δικτύου. Επίσης, υπάρχει πλήθος αναφορών σχετικά με τα πλεονεκτήματα που μπορούν να προσφέρουν σε διάφορες εφαρμογές.

2.1. Ευελιξία σε σχήματα διαμόρφωσης, ρυθμούς μετάδοσης και αξιοποίηση φάσματος

Προκειμένου να επιτευχθεί η δυνατότητα του Ευέλικτου Δικτύου για προσαρμογή του τρόπου μετάδοσης της πληροφορίας ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και την κατάσταση του δικτύου, έχουν προταθεί μέθοδοι που συνδυάζουν τη χρήση κατάλληλου υλικού (hardware) και λογισμικού (software) προκειμένου να καθίσταται δυνατή η επιθυμητή προσαρμογή των ρυθμών μετάδοσης πληροφορίας.

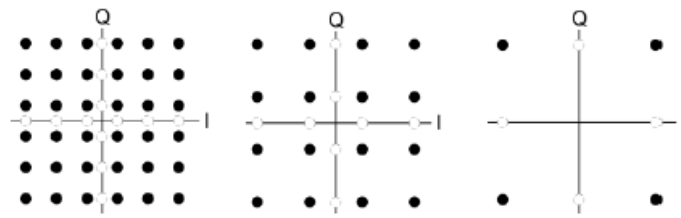
Οι μέθοδοι αυτές χαρακτηρίζονται με τον όρο Software Defined Optics. Σύμφωνα με αυτές η ευελιξία ενός οπτικού πομπού μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κοινές διατάξεις υλικού (hardware) (π.χ. χρήση FPGAs/ASICs) η λειτουργικότητα των οποίων καθορίζεται μέσω λογισμικού. Η τάση αυτή δεν είναι σε καμία περίπτωση ταυτόσημη με τον έλεγχο μέσω λογισμικού, όπου η λειτουργικότητα ενός πομπού δεν είναι δυνατόν να προσαρμοστεί χωρίς την παρέμβαση ενός εξωτερικού παράγοντα (π.χ. όπως ο χειριστής του στρώματος ελέγχου). [7] [24]

Θεμελιώδης λειτουργία ενός οπτικού πομποδέκτη είναι η διαμόρφωση του οπτικού σήματος. Τα σχήματα διαμόρφωσης QAM για το οπτικό φέρον είναι από τα πλέον καταλληλότερα για να χρησιμοποιηθούν διότι η δημιουργία τους καθίσταται εφικτή μέσω ταχέων οπτοηλεκτρονικών διατάξεων, των IQ οπτικών διαμορφωτών. Συνεπώς το πρώτο στάδιο ευελιξίας αφορά την εναλλαγή των σχημάτων διαμόρφωσης του οπτικού σήματος [6].



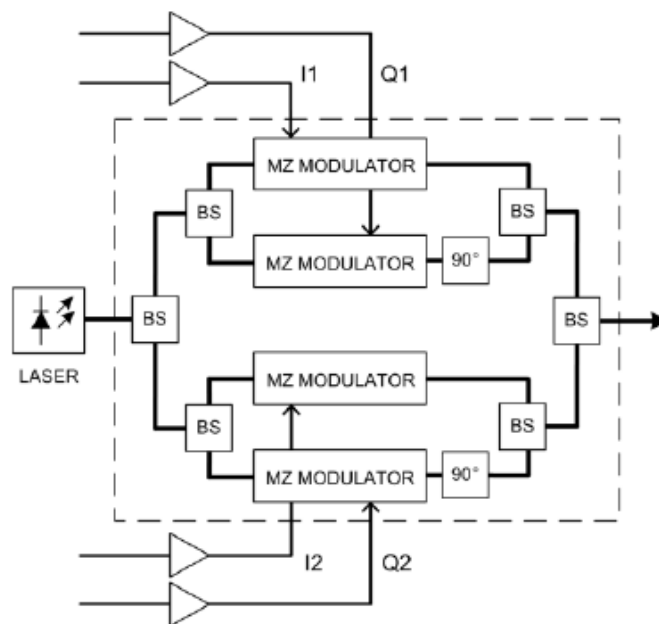
Σχήμα 2-1: Παράλληλος οπτικός IQ διαμορφωτής (σχήμα από [6])

Η παραπάνω διάταξη αποτελεί έναν παράλληλο IQ διαμορφωτή. Παρατηρείται ότι με χρήση διαμορφωτών Mach Zender, Αναλογικών-σε-Ψηφιακών Μετατροπέων (DACs) καθώς και απλούστερων οπτικών διατάξεων (όπως στροφέας φάσης και διαχωριστές πόλωσης) επιτυγχάνεται με εύκολο και αποδοτικό τρόπο η παραγωγή σημάτων QAM διαφόρων τάξεων. Συγκεκριμένα, η τάξη της QAM διαμόρφωσης καθορίζεται από το πλήθος των σταθμών του σήματος που παράγει ο DAC, όπου τα σήματα αυτά με τη σειρά τους οδηγούν τους διαμορφωτές Mach Zender. Επομένως, εάν ο DAC παράγει σήματα 6 σταθμών ανά συνιστώσα επιτυγχάνεται διαμόρφωση 36-QAM (όπου με παράλειψη των πιο μακρινών σημείων του αστερισμού οδηγούμαστε σε 32-QAM), για σήματα 4 σταθμών λαμβάνεται διαμόρφωση 16-QAM, ενώ για σήματα 2 σταθμών διαμόρφωση QPSK.



Σχήμα 2-2: Σηματικοί αστερισμοί 36-QAM, 16-QAM και QPSK

Μία ανάλογης λειτουργικότητας διάταξη είναι και ο τετραπλός-παράλληλος IQ διαμορφωτής, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα. Η διαφορά του με τον προηγούμενο διαμορφωτή έγκειται στον τρόπο οδήγησης των διαμορφωτών Mach Zender, όπου πραγματοποιείται αποκλειστικά με σήματα 2 σταθμών. Το γεγονός αυτό κάνει την ύπαρξη των DACs μη αναγκαία και συνεπώς απλοποιείται το ηλεκτρικό τμήμα του πομποδέκτη. Αντίθετα, όμως, αυξάνεται η πολυπλοκότητα του οπτικού τμήματος του διαμορφωτή. Τέλος, λόγω της δυνατότητας μόνο για δυαδικά σήματα οδήγησης, είναι δυνατή η παραγωγή μόνο των σχημάτων QPSK και 16-QAM. [6]



Σχήμα 2-3: Τετραπλός παράλληλος οπτικός IQ διαμορφωτής (σχήμα από [6])

Για τη διαμόρφωση του οπτικού σήματος προτείνεται, επίσης, και η μέθοδος της OFDM διαμόρφωσης. Το πλεονέκτημα, όμως, της μη ανάγκης χρησιμοποίησης πολύπλοκων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος στο δέκτη (πχ. Ισοστάθμιση) που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη μέθοδο διαμόρφωσης, αναιρείται από την αυξημένη πολυπλοκότητα κατασκευής των διατάξεων στο οπτικό πεδίο.

Πλέον, έχοντας επιτύχει την ικανότητα αλλαγής του σχήματος διαμόρφωσης μεταξύ δύο ή τριών πιθανών και συνεπώς την ικανότητα μεταβολής του πλήθους των bit ανά σύμβολο, ο οπτικός πομποδέκτης έχει την ευχέρεια πολλαπλών τρόπων λειτουργίας. Οι τρόποι αυτοί εξαρτώνται κατά πρώτον από το αν ο ρυθμός συμβόλων είναι σταθερός ή έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλεται και κατά δεύτερον, από το αν το τελικό σήμα προς μετάδοση αποτελείται από πολλαπλά φέροντα ή όχι. Δεδομένου ότι το σήμα προς μετάδοση αποτελείται από περισσότερα του ενός φέροντα, μπορεί να επιτευχθεί ακόμα ένα επίπεδο ευελιξίας ορίζοντας συγκεκριμένους ρυθμούς δεδομένων για το τελικό σήμα μέσω της αυξομείωσης του πλήθους των φερόντων.

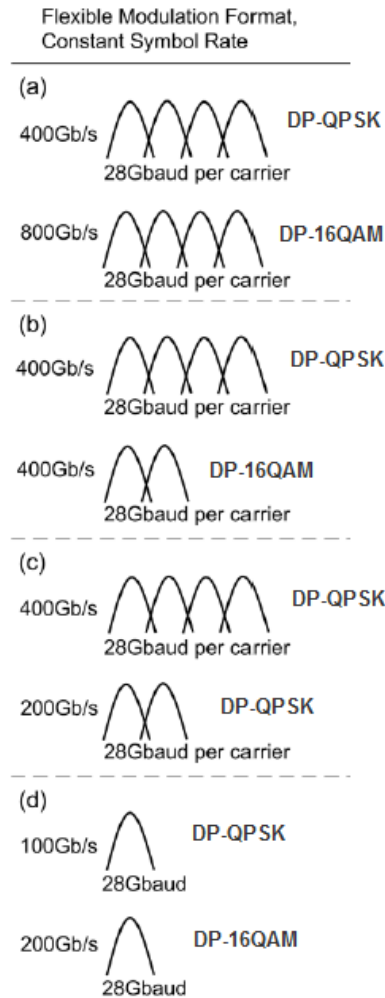
Στην πρώτη περίπτωση όπου ο ρυθμός συμβόλων είναι σταθερός, η ευελιξία του οπτικού πομποδέκτη έγκειται στο διαφορετικό πλήθος ψηφίων που κωδικοποιούνται σε ένα σύμβολο (τάξη διαμόρφωσης) καθώς και στο πλήθος των φερόντων του τελικού σήματος.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας το σενάριο όπου ο ρυθμός συμβόλων είναι ίσος με 28GBaud, και θεωρώντας ότι υπάρχει πολύπλεξη και στην πόλωση του συνολικού σήματος ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων προκύπτει μέσω της σχέσης:

$$\text{Ρυθμός μετάδοσης (bps)} = 28\text{GBaud} \times \log_2(M) \frac{\text{bits}}{\text{πόλωση}} \times \#\text{φερόντων} \times \#\text{πολώσεων}$$

Όπου M η τάξη διαμόρφωσης (4 για QPSK, 16 για 16-QAM, 32 για 32-QAM κ.ο.κ.)

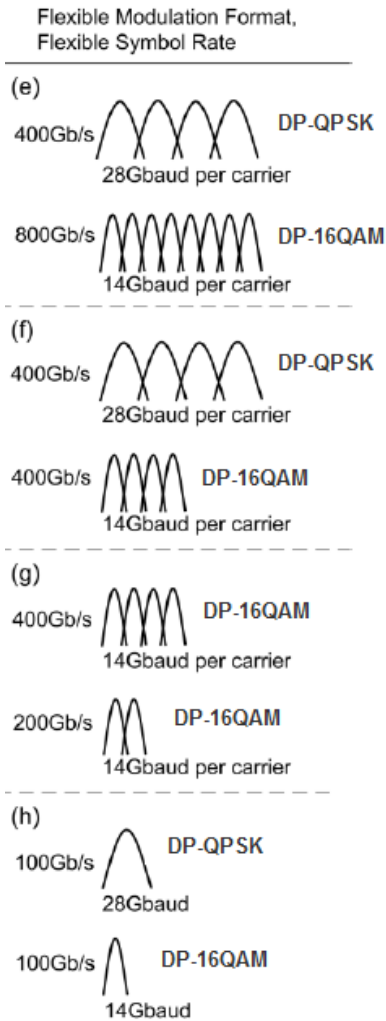
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια που αποτυπώνουν την ευελιξία στη χωρητικότητα, στη δέσμευση εύρους ζώνης και στη φασματική απόδοση.[6]



Σχήμα 2-4: Φασματική απόδοση στην περίπτωση σταθερού ρυθμού μετάδοσης και με εναλλαγή σχημάτων διαμόρφωσης (σχήμα από [6])

Στην εικόνα 2-4a παρατηρείται πώς με χρήση του ίδιου εύρους ζώνης μπορεί να επιτευχθεί ευελιξία στο ρυθμό μετάδοσης και στην φασματική απόδοση. Επίσης, είναι δυνατή η διατήρηση της ευελιξίας στη φασματική απόδοση ακόμα και για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης (εικόνα 2-4b). Στην εικόνα 2-4c αναδεικνύεται η δυνατότητα για αποδέσμευση εύρους ζώνης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, πλέον, για μετάδοση νέου καναλιού, χωρίς όμως να μειώνεται η φασματική απόδοση. Τέλος, στην εικόνα 2-4d εμφανίζεται η περίπτωση όπου υπάρχει ένα μοναδικό φέρον στο σήμα. Ο ρυθμός μετάδοσής του αυξάνεται όταν αυξάνεται η τάξη διαμόρφωσης έχοντας σταθερό ρυθμό συμβόλων.

Η ευελιξία του οπτικού πομποδέκτη ενισχύεται στην περίπτωση που αρθεί ο περιορισμός του σταθερού ρυθμού συμβόλων. Τα επόμενα σενάρια, αναδεικνύουν τη βελτίωση αυτή. Σημειώνεται ότι για την επίτευξη της μεταβολής του ρυθμού συμβόλων είναι αναγκαία η περαιτέρω ενίσχυση των επιμέρους στοιχείων του πομποδέκτη ώστε να υποστηρίζονται οι αλλαγές αυτές.



Σχήμα 2-5: Φασματική απόδοση στην περίπτωση μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης και με εναλλαγή σχημάτων διαμόρφωσης (σχήμα από [6])

Όπως φαίνεται από την εικόνα 2-5e πλέον είναι εφικτή η πολύπλεξη μεγαλύτερου πλήθους φερόντων σε σχέση με το σενάριο της εικόνας 2-5a (με μικρότερο, όμως, ρυθμού συμβόλων) στο ίδιο εύρος ζώνης και με τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης.[6]

2.2. Πλεονεκτήματα και Εφαρμογές

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκαν υλοποιήσεις και χαρακτηριστικά των οπτικών πομποδεκτών οι οποίοι ακολουθούν τις σύγχρονες τάσεις στην εξέλιξη των οπτικών δικτύων. Αξίζουν, όμως, να σημειωθούν τόσο τα κέρδη όσο και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι ευέλικτοι οπτικοί πομποδέκτες μέσω διαφόρων εφαρμογών.

Η εισαγωγή ευέλικτων πομποδεκτών στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα είναι σε θέση να προσφέρει οικονομικά οφέλη. Τα επιμέρους δομικά στοιχεία του δικτύου που απαιτούνται περιορίζονται σε πλήθος, άρα επιτυγχάνεται περιορισμός των εξόδων εγκατάστασής τους με ταυτόχρονη τη βελτίωση της αποδοτικότητας του σχεδιασμού του δικτύου. Επιπλέον δαπάνες

μπορούν να εξοικονομηθούν από την ικανότητα διαχείρισης του διαθέσιμου περιθωρίου OSNR του συστήματος, λόγω της προσαρμοσμένης στις εφαρμογές μετάδοσης της πληροφορίας.[6]

Επίσης, πολλές εφαρμογές προκύπτουν από την ικανότητα των ευέλικτων πομποδεκτών να μπορούν να μεταδώσουν πληροφορία σε μεγαλύτερη απόσταση όταν λειτουργούν με μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης. Το σενάριο αυτό εμφανίζεται στην περίπτωση των μεγάλων εταιρικών δικτύων καθώς ο όγκος της μεταφερόμενης κίνησης είναι κατά προσέγγιση αντιστρόφως ανάλογος της απόστασης μετάδοσης. Παραδείγματα για την παραπάνω προσέγγιση αναφέρονται από εταιρίες με εφαρμογές υπολογιστικού νέφους (cloud computing applications). Μία εφαρμογή που χρησιμοποιεί όμοιους ευέλικτους πομποδέκτες θα διευκόλυνε το σχεδιασμό του δικτύου και επομένως θα μείωνε τα λειτουργικά έξοδα.[6]

Άλλο είδος εφαρμογής σχετίζεται με την αντιμετώπιση πλήρως καταστρεπτικών συμβάντων στο δίκτυο (π.χ. κοψίματα ινών), οι οποίες οδηγούν σε αναγκαστικές μεταγωγές της πληροφορίας από εφεδρικές διαδρομές για λόγους προστασίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις η εφεδρική διαδρομή που χρησιμοποιείται για προστασία είναι μεγαλύτερη της κύριας. Προκειμένου να προστατευθεί το σύνολο της μεταφερόμενης πληροφορίας, είναι αναγκαίο οι πομποδέκτες να είναι σε θέση να μεταφέρουν την πληροφορία σε μακρινή απόσταση, προκειμένου να λειτουργήσουν στην εφεδρική διαδρομή. Στην περίπτωση στατικών πομποδεκτών, για τη λειτουργία τόσο της κύριας όσο και της εφεδρικής ζεύξης με μόνο ένα είδος πομποδέκτη, πρέπει να χρησιμοποιηθεί πομποδέκτης ο οποίος θα υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις μετάδοσης πάνω από την κύρια διαδρομή. Συνεπώς ο σχεδιασμός του δικτύου κρίνεται ως μη αποδοτικός. Αντιθέτως, ένα είδος πομποδέκτη που έχει τη δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις δύο διαδρομές με μόνο κόστος ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ο όγκος πληροφορίας στην εφεδρική διαδρομή θα είναι μικρότερος από αυτόν της κύριας. Αξίζει, βέβαια, να σημειωθεί ότι η ικανότητα για αύξηση του όγκου πληροφορίας στην κύρια διαδρομή σε σχέση με την εφεδρική είναι τελικά το πλεονέκτημα σε σχέση με έναν πομποδέκτη σταθερού ρυθμού μετάδοσης καθώς το περιθώριο για υψηλότερη επίδοση που προκύπτει λόγω της μικρότερης απόστασης της κύριας διαδρομής ανταλλάσσεται για υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης.[6]

Τέλος, οι πομποδέκτες νέας γενιάς είναι σε θέση να αξιοποιηθούν σε δίκτυα τα οποία υποστηρίζουν πολλαπλά επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου οι κατάλληλοι πομποδέκτες θα μπορούν να μεταφέρουν κίνηση εφαρμογών υψηλής προτεραιότητας, καθώς και κίνηση best-effort εφαρμογών οι οποίες έχουν μικρότερες απαιτήσεις μετάδοσης. Αντίθετα σε περιπτώσεις που το δίκτυο εμφανίζει αστοχίες στη λειτουργία του, είναι δυνατή η μετάδοση μόνο της πληροφορίας που ανήκει στις εφαρμογές υψηλής προτεραιότητας.[7]

Τα τελευταία σενάρια που παρουσιάστηκαν θέτουν ακόμα μία προϋπόθεση για να καταστεί δυνατή η εισαγωγή ευελιξίας στους πομποδέκτες του δικτύου. Αυτή έγκειται στη γνώση των συνθηκών που επικρατούν στο δίκτυο, τόσο σε επίπεδο φυσικού στρώματος όσο και στο επίπεδο δικτύου. Για την γνώση των παραμέτρων που επηρεάζουν την μετάδοση του οπτικού σήματος χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι Παρακολούθησης Οπτικής Επίδοσης (Optical Performance Monitoring – OPM) και αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

3. Μηχανισμοί Υποβάθμισης Φυσικού Στρώματος & Παρακολούθηση Οπτικής Επίδοσης

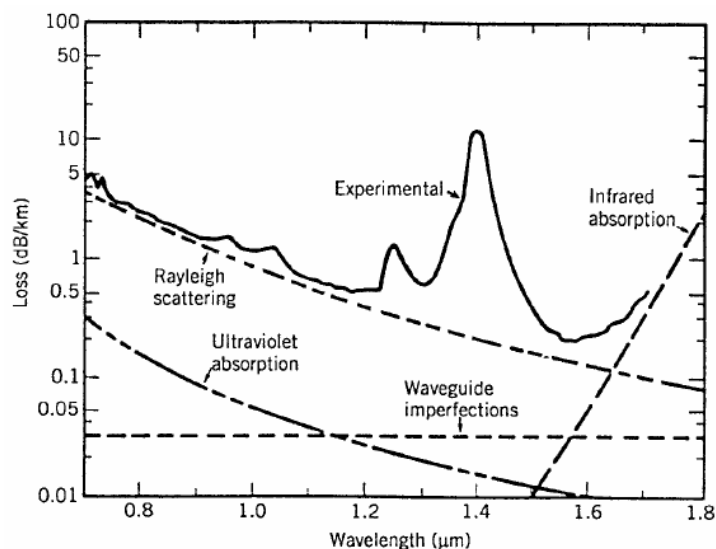
3.1. Μηχανισμοί υποβάθμισης της ποιότητας μετάδοσης του οπτικού σήματος (Physical Layer Impairments)

Τα φαινόμενα που υποβαθμίζουν την ποιότητα μετάδοσης του οπτικού σήματος εντός μίας οπτικής ζεύξης διακρίνονται με βάση την επίδρασή τους στο φάσμα και στο χρονικό πεδίο του σήματος σε γραμμικά και μη-γραμμικά και αναλύονται ακολούθως.

Γραμμικά Φαινόμενα

Απώλειες Ισχύος

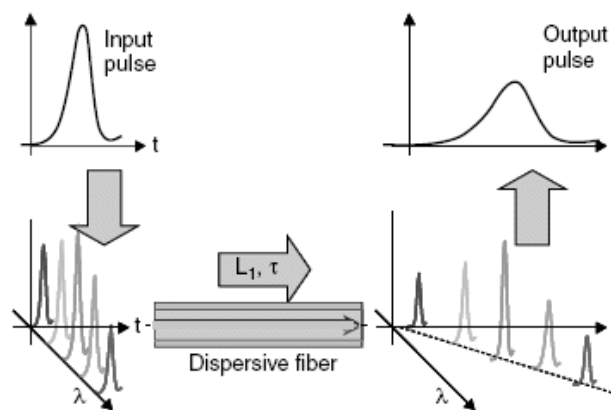
Η απώλεια ισχύος μπορεί να οριστεί ως η απώλεια της ισχύος του οπτικού σήματος που συσσωρεύεται στην οπτική ζεύξη από την πηγή έως τον προορισμό και αποτελείται από τις εσωτερικές απώλειες της ίνας και τις εξωτερικές απώλειες λόγω της μηχανικής παραμόρφωσής της. Οι εσωτερικές απώλειες οφείλονται σε φαινόμενα εξασθένησης, απορρόφησης, ανάκλασης, διάθλασης καθώς και στα οπτικά στοιχεία εξαρτημάτων που συνδέονται στην ίνα. Θεωρώντας ότι η ισχύς στην αρχή της ίνας μήκους L είναι P_{in} , η ισχύς στην έξοδό της είναι ίση με $P_{out} = P_{in} \cdot e^{-aL}$, όπου a είναι ο συντελεστής εξασθένησης της ίνας. Οι απώλειες που προκαλούνται λόγω της εισαγωγής οπτικών εξαρτημάτων (συζεύκτες, φίλτρα, πολυπλέκτες) στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας ονομάζονται απώλειες εισαγωγής και είναι ανεξάρτητες του μήκους κύματος. Το σχήμα 3-1 δείχνει την επίδραση του κάθε φαινομένου εξασθένησης στην ισχύ του σήματος. [8][9]



Σχήμα 3-1: Φαινόμενα εξασθένησης του σήματος στην οπτική ίνα [10]

Χρωματική Διασπορά

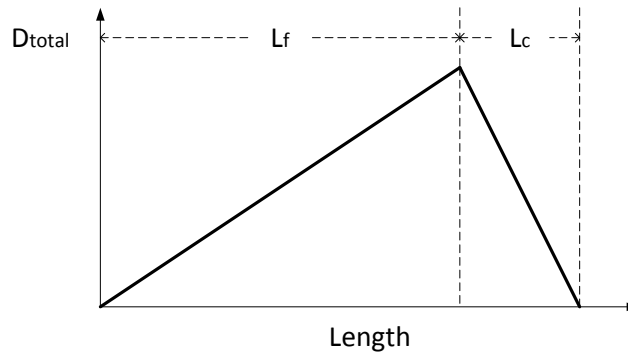
Η υποβάθμιση της ποιότητας ενός οπτικού σήματος εξαιτίας των διαφορετικών φασματικών συνιστωσών που διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες η καθεμία ονομάζεται Χρωματική Διασπορά (Chromatic Dispersion – CD). Η χρωματική διασπορά προκαλεί τη χρονική διεύρυνση ενός οπτικού παλμού με αποτέλεσμα αυτός να παρεμβάλλεται χρονικά σε γειτονικούς παλμούς. Θεωρείται ως ο κυριότερος γραμμικός μηχανισμός υποβάθμισης του οπτικού σήματος για συστήματα που λειτουργούν σε ρυθμούς μετάδοσης υψηλότερους από 2.5Gbps. Η χρωματική διασπορά εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης, το σχήμα διαμόρφωσης και τον τύπο της ίνας. Η συνολική διασπορά στο τέλος μιας οπτικής ζεύξης είναι το άθροισμα της διασποράς καθενός από τα τμήματα ίνας που αποτελούν τη συνολική ζεύξη. Η διασπορά ποσοτικοποιείται μέσω της παραμέτρου διασποράς D η οποία δείχνει πόση είναι η χρονική διεύρυνση του παλμού για φασματικές συνιστώσες που απέχουν ένα μήκος κύματος (μονάδες ps/nm).[8]



Σχήμα 3-2: Αρχή λειτουργίας της χρωματικής διασποράς [11]

Για την αντιστάθμιση της επίδρασης της διασποράς στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα χρησιμοποιούνται ειδικού τύπου ίνες, οι λεγόμενες DCF (Dispersion Compensation Fiber) οι οποίες χαρακτηρίζονται από αρνητική τιμή παραμέτρου διασποράς. Μία ίνα μήκους L_f και παραμέτρου διασποράς D_f μπορεί να αντισταθμιστεί με χρήση ενός τμήματος ίνας DCF μήκους L_c και παραμέτρου D_c , έτσι ώστε η συνολική διασπορά στο τέλος της DCF ίνας να είναι σχεδόν μηδενική και να ικανοποιείται η σχέση: $D_f L_f + D_c L_c = 0$. Σημειώνεται ότι η παράμετρος διασποράς δεν είναι ίδια για όλα τα μήκη κύματος, επομένως η διασπορά αντισταθμίζεται σε άλλα μήκη κύματος περισσότερο ενώ σε άλλα λιγότερο. Η γραφική παράσταση του σχήματος 3-3 απεικονίζει την επίδραση της ίνας DCF στη συνολική διασπορά.[8]

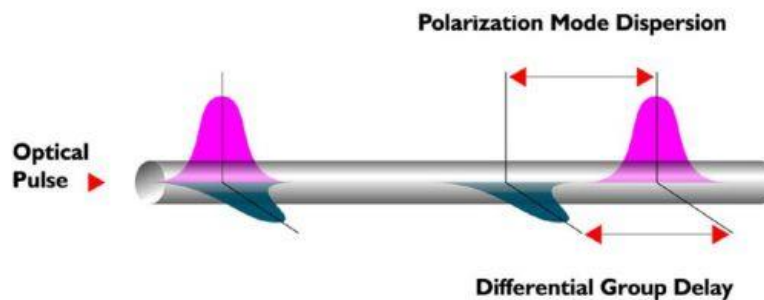
Για την αποφυγή χρησιμοποίησης διαφορετικών τύπων ίνας εντός του δικτύου, η τάση στα σύγχρονα δίκτυα προκειμένου να εξαλειφθούν οι επιπτώσεις της χρωματικής διασποράς είναι η εφαρμογή αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Συγκεκριμένα, ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται ο περιορισμός της διασποράς είναι η υλοποίηση FIR φίλτρων.[28]



Σχήμα 3-3: Συνολική Διασπορά μετά τη χρήση ίνας αντιστάθμισης διασποράς (DCF) [9]

Διασπορά Τρόπων Πόλωσης

Διασπορά του οπτικού παλμού προκαλείται και από τη διάδοσή του σε ίνες οι οποίες δε χαρακτηρίζονται από τέλεια συμμετρία, έχουν κατασκευαστικές ατέλειες ή είναι εκτεθειμένες σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες όπως υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Οι παραπάνω ανωμαλίες θέτουν εμπόδια στη διάδοση των παλμών εντός της ίνας και συγκεκριμένα οδηγούν τις πολώσεις της ίνας να διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες ομάδας. Αποτέλεσμα της συμπεριφοράς αυτής είναι η διεύρυνση του παλμού, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3-4. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Διασπορά Τρόπων Πόλωσης (Polarization Mode Dispersion – PMD). Η πρόσθετη αυτή χρονική διάρκεια του παλμού ονομάζεται διαφορική καθυστέρηση ομάδας (Differential Group Delay – DGD) ($\Delta\tau$) και είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του μήκους της ίνας. Δηλαδή ισχύει: $\Delta\tau = D_{PMD}\sqrt{L}$, όπου D_{PMD} είναι η παράμετρος διασποράς τρόπων πόλωσης της ίνας και μετράται, συνήθως, σε ps/\sqrt{km} .



Σχήμα 3-4: Μηχανισμός της διασποράς τρόπων πόλωσης [12]

Εξαιτίας της εξάρτησης από την τετραγωνική ρίζα του μήκους η διασπορά τρόπων πόλωσης είναι αρκετά μικρότερη σε σύγκριση με τη χρωματική διασπορά. Αντίθετα, το φαινόμενο έχει ιδιαίτερα αρνητική επίδραση σε WDM συστήματα που έχουν ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων και υψηλών ρυθμών μετάδοσης (μεγαλύτερων από 40Gbps). Ο πλέον αποδοτικός τρόπος αντιστάθμισης αυτού του μηχανισμού υποβάθμισης είναι, όπως και στην περίπτωση της χρωματικής διασποράς, οι

τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, όπου καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της τιμής της παραμέτρου της PMD και η διόρθωσή της.[8] [28]

Θόρυβος

Η κύρια πηγή προέλευσης προσθετικού θορύβου στα οπτικά συστήματα είναι η Αυθόρμητη Εκπομπή Φωτονίων κατά τη διαδικασία της ενίσχυσης (Amplified Spontaneous Emission – ASE). Οι οπτικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεσοι επαναλήπτες και ως προενισχυτές στο δέκτη. Ο θόρυβος αυτός ποσοτικοποιείται μέσω της εικόνας θορύβου (noise figure – NF). Η εικόνα θορύβου είναι ένας συντελεστής ο οποίος δείχνει πόσο υψηλότερη είναι πυκνότητα ισχύος του θορύβου στην έξοδο του ενισχυτή σε σύγκριση με το γινόμενο της αντίστοιχης πυκνότητας στην είσοδο και του κέρδους του ενισχυτή. Η εικόνα θορύβου μετριέται σε decibels.

Η αυθόρμητη εκπομπή πραγματοποιείται και προς τις δύο κατευθύνσεις του ενισχυτή, αλλά η επίδοση του συστήματος επηρεάζεται μόνο από την αυθόρμητη εκπομπή προς την κατεύθυνση του δέκτη καθώς σε αυτή το σήμα συνδιαδίδεται με το θόρυβο. Η αυθόρμητη εκπομπή στην αντίθετη κατεύθυνση οδηγεί σε μείωση της επίδοσης του ενισχυτή και συγκεκριμένα στη μείωση του κέρδους του. Επίσης, ο θόρυβος αυθόρμητης εκπομπής είναι ευρυζωνικός (περίπου 40nm) και συνεπώς απαιτείται προσεκτική ανάλυσή του προκειμένου να προσδιοριστεί η επίπτωσή του στην επίδοση του συστήματος. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου προτείνεται η αύξηση της έντασης των laser καθώς και η μείωση των ανακλάσεων των ενισχυτών.[8]

Πέραν του θορύβου που προέρχεται από τους οπτικούς ενισχυτές και η επίδρασή του είναι κυρίαρχη θόρυβο εισάγουν και τα υπόλοιπες μονάδες ενός οπτικού συστήματος. Η ίδια η οπτική ζεύξη εισάγει θόρυβο υποβαθμίζοντας την ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος. Για τη μελέτη του χρησιμοποιείται το μοντέλο του λευκού προσθετικού γκαουσιανού θορύβου (Additive White Gaussian Noise – AWGN). Επιπλέον, θόρυβος εισάγεται τόσο από τον πομπό όσο και από τον δέκτη του συστήματος κατά την επεξεργασία του εξερχόμενου και του εισερχόμενου σήματος αντίστοιχα.

Μη Γραμμικά φαινόμενα Kerr

Πέραν των μηχανισμών που υποβαθμίζουν το οπτικό σήμα με γραμμικό τρόπο, υπάρχουν και κατηγορίες μηχανισμών που επιδρούν μη γραμμικά σε αυτό. Οι μηχανισμοί αυτοί βασίζονται στη μη-γραμμική απόκριση κάθε διηλεκτρικού (άρα και της οπτικής ίνας) στο φως υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ως γνωστόν, η πόλωση P ενός διηλεκτρικού που διεγείρεται από τα ηλεκτρικά δίπολα του υλικού είναι μη-γραμμική συνάρτηση του ηλεκτρικού πεδίου E εξαιτίας της μη αρμονικής κίνησης των ηλεκτρονίων. Ισχύει, επομένως, η σχέση:

$$P = \epsilon_0(\chi^{(1)}.E^1 + \chi^{(2)}.E^2 + \chi^{(3)}.E^3 + \dots)$$

Όπου ϵ_0 η επιτρεπτότητα του κενού χώρου και $\chi^{(k)}$ η ηλεκτρική δεκτικότητα k τάξης. Εκτός από την συνεισφορά της γραμμικής δεκτικότητας $\chi^{(1)}$ που επικρατεί, στις οπτικές ίνες η δεκτικότητα $\chi^{(3)}$ είναι υπεύθυνη για τα μη γραμμικά φαινόμενα της αυτοδιαμόρφωσης φάσης, της

ετεροδιαμόρφωσης φάσης και της μίξης τεσσάρων φωτονίων. Η δεκτικότητα δεύτερης τάξης λόγω συμμετρίας της ίνας είναι μηδενική. Τα φαινόμενα αυτά ονομάζονται μη-γραμμικότητες Kerr και χαρακτηρίζονται από την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ισχύ του σήματος.[2][8]

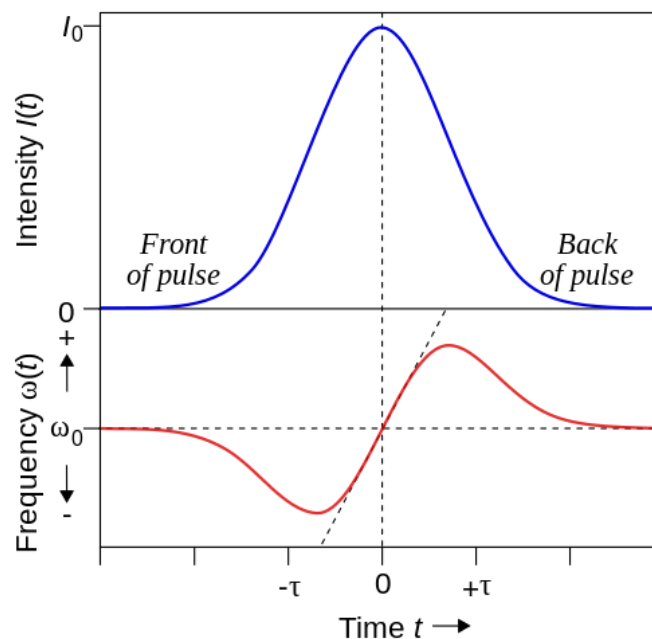
Αξίζει να αναφερθεί ότι τα φαινόμενα της αυτοδιαμόρφωσης και της ετεροδιαμόρφωσης φάσης επιδρούν μόνο στη φάση του οπτικού σήματος, γεγονός που προκαλεί τη φασματική διεύρυνσή του και περαιτέρω διασπορά. Συνεπώς, η ανάγκη για προσεκτική μελέτη των μη γραμμικών φαινομένων για τα σύγχρονα οπτικά συστήματα γίνεται όλο και μεγαλύτερη καθώς:

- Για την μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις υπάρχει αύξηση της ισχύος εκπομπής
- Για την αύξηση της κίνησης που μεταφέρει κάθε μήκος κύματος αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης και
- Για την αύξηση της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος μειώνεται η απόσταση μεταξύ γειτονικών καναλιών.

Ακολουθώς περιγράφονται συνοπτικά οι προαναφερθέντες μη γραμμικοί μηχανισμοί υποβάθμισης.

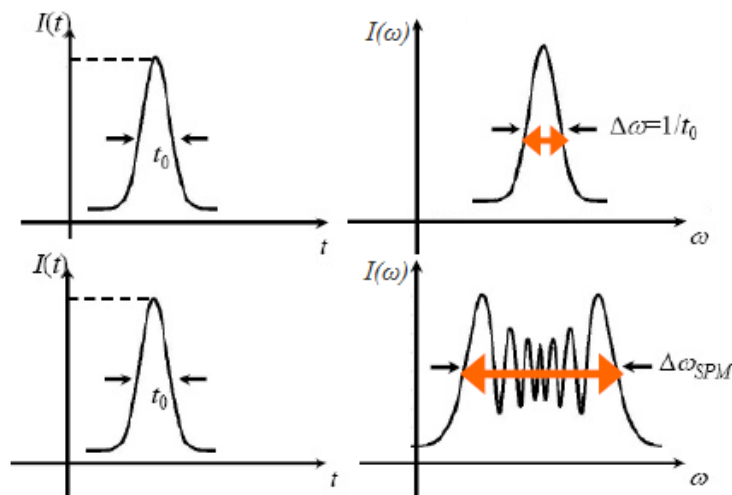
Αυτοδιαμόρφωση Φάσης

Η μη γραμμική διαμόρφωση φάσης ενός οπτικού παλμού που προκαλείται από την ένταση του πεδίου του ίδιου σε ένα οπτικό μέσο ονομάζεται Αυτοδιαμόρφωση Φάσης (Self-Phase Modulation – SPM). Ένας πολύ στενός οπτικός παλμός καθώς διαδίδεται στο μέσο προκαλεί χρονική μεταβολή του δείκτη διάθλασης του μέσου. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση θετικής κλίσης του δείκτη διάθλασης (dn/dt) στο τμήμα του παλμού που προηγείται χρονικά και αρνητικής κλίσης ($-dn/dt$) σε αυτό που υπολείπεται. Αυτή η προσωρινή μεταβολή του δείκτη διάθλασης έχει ως αποτέλεσμα την προσωρινή μεταβολή φάσης και συνεπώς στην ανακατομή του φασματικού περιεχομένου του παλμού (φαινόμενο chirp).[8]



Σχήμα 3-5: Μεταβολή της συχνότητας του σήματος (chirp) λόγω μη-γραμμικότητας της ίνας [9]

Επομένως, η κυριότερη επίδραση της αυτοδιαμόρφωσης φάσης είναι η διαπλάτυνση του παλμού στο πεδίο της συχνότητας με ταυτόχρονη διατήρηση του σχήματος του παλμού στο χρονικό πεδίο. Καθώς το chirp είναι εντονότερο όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς του διαδιδόμενου σήματος, το φαινόμενο της αυτοδιαμόρφωσης φάσης είναι εντονότερο σε συστήματα που λειτουργούν με μεγάλη ισχύ εκπομπής. Επίσης, το chirp εξαρτάται από το είδος του παλμού, και επομένως για να περιοριστεί το φαινόμενο πραγματοποιείται επεξεργασία του αρχικού παλμού μέσω διαμόρφωσης με RZ παλμών οι οποίοι έχουν αρχικό chirp.



Σχήμα 3-6: Μεταβολή φασματικού περιεχομένου του σήματος λόγω της αυτοδιαμόρφωσης φάσης [9]

Τα φαινόμενα της αυτοδιαμόρφωσης φάσης και της διασποράς έχουν από τη φύση τους αντίθετη συμπεριφορά. Το μεν πρώτο επηρεάζει το σήμα στο πεδίο της συχνότητας αφήνοντας το χρονικό προφίλ του ανεπηρέαστο, ενώ το δεύτερο επιδρά αντίστροφα. Με την κατάλληλη επιλογή σχήματος παλμών και ισχύος εισόδου το ένα φαινόμενο είναι δυνατόν να αντισταθμίσει το άλλο, οδηγώντας σε μη παραμορφωμένους παλμούς τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας, γεγονός χρήσιμο στα οπτικά συστήματα μεγάλης χωρητικότητας.[9]

Ετεροδιαμόρφωση Φάσης

Ο μη γραμμικός συντελεστής ανάκλασης που συναντά ένας οπτικός παλμός δεν εξαρτάται μόνο από την ένταση του ίδιου του παλμού αλλά και από την ένταση του πεδίου άλλων παλμών που συνδιαδίδονται με αυτόν. Η μη γραμμική διαμόρφωση φάσης ενός οπτικού παλμού που προκαλείται από τις διακυμάνσεις της έντασης άλλων οπτικών παλμών ονομάζεται Ετεροδιαμόρφωση Φάσης ((X)Cross-Phase Modulation – XPM).

Το αποτέλεσμα της αυτοδιαμόρφωσης φάσης μπορεί να είναι η μη συμμετρική φασματική διαπλάτυνση και η παραμόρφωση του σχήματος του παλμού. Η ετεροδιαμόρφωση φάσης υποβαθμίζει την επίδοση του συστήματος με τον ίδιο τρόπο όπως και η αυτοδιαμόρφωση φάσης: ανακατανομή φασματικού περιεχομένου (chirp) και χρωματική διασπορά. Η ετεροδιαμόρφωση

φάσης περιορίζει ακόμα περισσότερο την επίδοση του συστήματος όταν το πλήθος των καναλιών που συνδιαδίδονται είναι μεγάλο. Η μεταβολή της φάσης του σήματος μπορεί να προκληθεί μόνο όταν δύο παλμοί επικαλύπτονται χρονικά. Εξαιτίας αυτής της επικάλυψης, η εξαρτώμενη από την ένταση ολίσθηση φάσης, και συνεπώς το chirp, ενισχύεται οδηγώντας σε περαιτέρω διαπλάτυνση του παλμού.

Οι επιδράσεις της ετεροδιαμόρφωσης φάσης είναι δυνατό να περιοριστούν μέσω της αύξησης της απόστασης μεταξύ των διαφορετικών μηκών κύματος. Επίσης, μέσω της επιλογής διαφορετικών ρυθμών μετάδοσης για τα γειτονικά κανάλια, το χρονικό παράθυρο της επικάλυψης των παλμών μειώνεται με αποτέλεσμα την αντιμετώπιση του φαινομένου.[8]

3.2. Μετρικές και Μέθοδοι Παρακολούθησης Οπτικής Επίδοσης

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν συνοπτικά τα φαινόμενα που περιορίζουν την ποιότητα μετάδοσης στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας. Για τη εύρυθμη λειτουργία ενός οπτικού δικτύου με χαρακτηριστικά ευελιξίας απαραίτητη προϋπόθεση είναι η παρακολούθηση των μηχανισμών αυτών καθώς και η γνώση των επιπτώσεών τους στο δίκτυο. Η ενότητα αυτή εστιάζει στις παραμέτρους οι οποίες ποσοτικοποιούν την επίδραση των μηχανισμών υποβάθμισης της ποιότητας μετάδοσης καθώς και σε τεχνικές που επιτυγχάνουν την παρακολούθησή τους.

Οπτικός Σηματοθορυβικός Λόγος – OSNR

Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που καθορίζουν την ποιότητα μετάδοσης σε ένα οπτικό σύστημα επικοινωνίας είναι ο οπτικός σηματοθορυβικός λόγος (Optical Signal-to-Noise Ratio). Ο συμβατικός σηματοθορυβικός λόγος (SNR) ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του σήματος P προς την ισχύ του θορύβου N :

$$SNR = \frac{P}{N}$$

Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη της επίδοσης όλων των συστημάτων επικοινωνίας.

Στα οπτικά συστήματα, όμως, οι συχνότητες των φερόντων είναι πολύ υψηλότερες από την περιοχή συχνοτήτων των διαμορφωμένων σημάτων (περίπου 200THz ή και περισσότερο). Επομένως, ο θόρυβος καλύπτει ένα εύρος ζώνης που είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που καταλαμβάνει μόνο του το σήμα. Η ποιότητα του τελικού σήματος βασίζεται κυρίως στο φιλτράρισμα του θορύβου στο δέκτη. Για την περιγραφή την ποιότητα του σήματος αγνοώντας την επίδραση του δέκτη χρησιμοποιείται ο OSNR. Η μετρική αυτή ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της ισχύος του σήματος και της ισχύος του θορύβου εντός ενός δοθέντος εύρους ζώνης. Συνήθως το εύρος ζώνης αναφοράς είναι της τάξης των 12.5GHz. Το εύρος ζώνης αναφοράς είναι ανεξάρτητο από το σχήμα διαμόρφωσης, τη συχνότητα και το δέκτη. Η σχέση που συνδέει OSNR και SNR είναι η εξής:

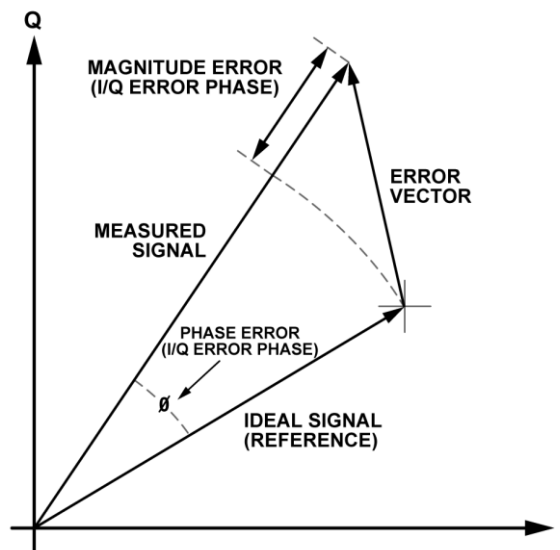
$$OSNR = SNR \frac{p}{2B_{ref}T_s}$$

Όπου p το πλήθος των πολώσεων που χρησιμοποιεί το σήμα, B_{ref} το εύρος ζώνης αναφοράς και T_s η διάρκεια ενός μεταδιδόμενου συμβόλου.[4][13]

Παρακολούθηση OSNR – Τεχνική Πλάτους Διανύσματος Λαθών EVM

Στην περίπτωση που στο οπτικό σύστημα μετάδοσης χρησιμοποιούνται σχήματα διαμόρφωσης M-QAM ιδιαίτερα χρήσιμη για την αξιολόγηση της οπτικής επίδοσης είναι η τεχνική του Πλάτους του Διανύσματος Λάθους (Error Vector Magnitude – EVM).

Ως γνωστόν, τα σύμβολα πληροφορίας που μεταδίδονται αντιστοιχούν σε σημεία επί του μιγαδικού επιπέδου. Τα σημεία που αντιστοιχούν στα M διαφορετικά σύμβολα του σχήματος διαμόρφωσης συνιστούν το διάγραμμα αστερισμού. Τα ληφθέντα σύμβολα στο δέκτη, λόγω της επίδρασης των φαινομένων διάδοσης (διασπορά, μη γραμμικά φαινόμενα) αποκλίνουν από τα σημεία του αστερισμού. Το διάνυσμα λάθους είναι το διάνυσμα που προκύπτει από το ληφθέν σύμβολο και το ιδανικό σύμβολο του αστερισμού, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3-7: Τεχνική υπολογισμού διανύσματος λάθους

Η μέση τιμή του πλάτους του διανύσματος λάθους δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$EVM_{avg} = \sqrt{\frac{\text{Ισχύς Διανύσματος Λάθους}}{\text{Μέση Ισχύς Σήματος Αναφοράς}}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum [(I_{ref,i} - I_{mes,i})^2 + (Q_{ref,i} - Q_{mes,i})^2]}{\frac{1}{N} \sum [I_{ref,i}^2 + Q_{ref,i}^2]}}$$

Η τιμή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλέον και για την εκτίμηση του σηματοθορυβικού λόγου του συστήματος (με την προϋπόθεση ότι ο θόρυβος είναι λευκός προσθετικός γκαουσιανής κατανομής), καθώς ισχύει η σχέση [14] [18] [23]:

$$SNR \approx \frac{1}{EVM_{avg}^2}$$

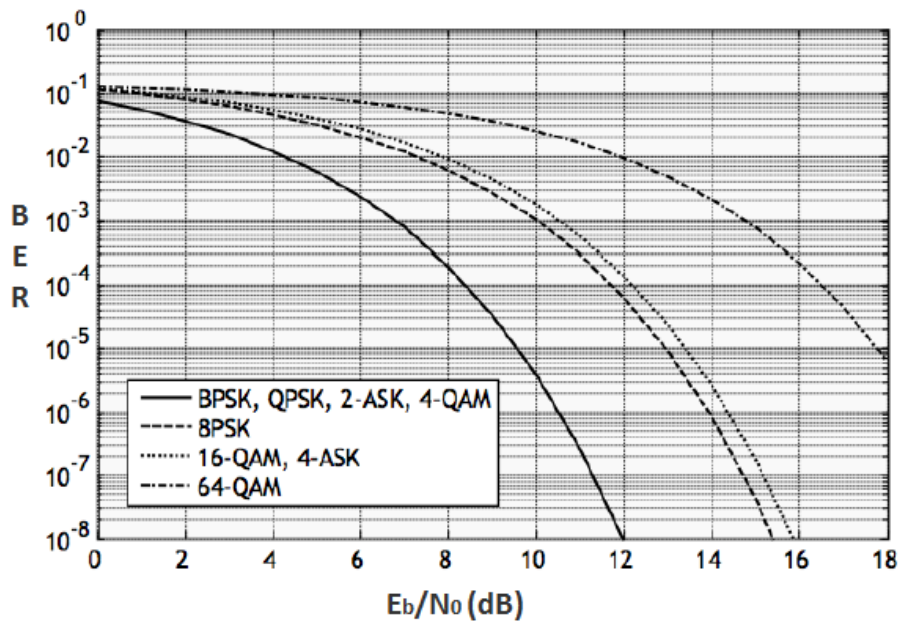
Λόγος Εσφαλμένων Ψηφίων – BER

Ο λόγος εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Ratio – BER) είναι η συνηθέστερη μετρική που χρησιμοποιείται για να επαληθευτεί η ποιότητα της μετάδοσης και να αξιολογηθεί η επίδοση του δικτύου. Ο υπόψη λόγος ορίζεται ως ο αριθμός των εσφαλμένων ψηφίων κατά τη διάρκεια μίας μετάδοσης προς το συνολικό αριθμό των ψηφίων που εστάλησαν.

Ιδιαίτερα χρήσιμες είναι οι καμπύλες επίδοσης οι οποίες συσχετίζουν το λόγο εσφαλμένων ψηφίων με την ισχύ του συστήματος. Η ισχύς περιγράφεται από το λόγο ενέργεια ψηφίου προς πυκνότητα ισχύος θορύβου (E_b/N_0). Για το μέγεθος αυτό ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$SNR = \frac{P}{N} = \frac{E_b \times \log_2(M)}{T_s} \frac{1}{N_0 W} \xrightarrow{w=1/T_s} \frac{E_b}{N_0} = \frac{SNR}{\log_2(M)}$$

Όπου M το πλήθος bit ανά σύμβολο, T_s η διάρκεια ενός συμβόλου και W το εύρος ζώνης. Οι καμπύλες επίδοσης δείχνουν τη συμπεριφορά των διαφόρων σχημάτων διαμόρφωσης στο ρυθμό λαθών συναρτήσει της ισχύος του σήματος όπως φαίνεται στο σχήμα 3-7.[4]



Σχήμα 3-8: Καμπύλες επίδοσης BER για διάφορα σχήματα διαμόρφωσης (σχήμα από [4])

4. Προτεινόμενη μέθοδος για τον υπολογισμό της Ποιότητας Μετάδοσης

4.1. Γενικά περί της μεθόδου

Σε αυτό το κεφάλαιο της εργασίας αναλύεται η μέθοδος με την οποία προσδιορίζεται η ποιότητα μετάδοσης σε ένα ευέλικτο οπτικό σύστημα. Θεωρείται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι σε θέση να λειτουργήσει πάνω σε έναν οπτικό πομποδέκτη ως επέκταση του λογισμικού ελέγχου του. Καθίσταται επομένως δυνατή η εισαγωγή «ευφυΐας» στον πομποδέκτη όπως αναφέρθηκε και στα εισαγωγικά κεφάλαια της εργασίας.

Υπενθυμίζεται ότι οι βασικές αρχές λειτουργίας του οπτικού πομποδέκτη είναι οι εξής:

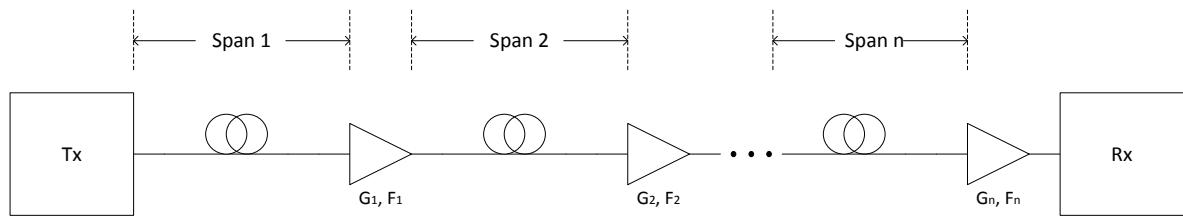
- Ο πομποδέκτης λαμβάνει πληροφορίες από το φυσικό στρώμα και από το στρώμα δικτύου για να είναι σε θέση να γνωρίζει την τοπολογία του και την κατάσταση του.
- Στη συνέχεια, με βάση τις παραπάνω πληροφορίες, πραγματοποιεί εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης μέσω της μετρικής του BER.
- Ελέγχει αν η τιμή του BER είναι πάνω από το κατώφλι ώστε να υπάρχει αξιόπιστη μετάδοση και ενημερώνει για το αν είναι δυνατή η μετάδοση της πληροφορίας.

Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιώντας ένα απλό μοντέλο οπτικής ζεύξης, της οποίας γνωρίζει τα χαρακτηριστικά, πραγματοποιεί μία εκτίμηση για τη μεταβολή δύο βασικών παραμέτρων του σήματος. Οι παράμετροι αυτές είναι ο σηματοθορυβικός λόγος και η μη-γραμμική στροφή φάσης του σήματος. Προσδιορίζοντας τις μεταβολές τους είναι σε θέση να προχωρήσει σε μία εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης στο σύστημα.

4.2. Μοντελοποίηση οπτικής ζεύξης

Για τον υπολογισμό της ποιότητας μετάδοσης, είναι απαραίτητη η γνώση της τοπολογίας του δικτύου και των χαρακτηριστικών της ζεύξης πάνω από την οποία θα γίνει η μετάδοση της πληροφορίας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα σχετικά απλό μοντέλο που περιγράφει μια οπτική ζεύξη με πομπό τον πομποδέκτη που μελετάται και δέκτη τον επόμενο κόμβο του οπτικού δικτύου. Η ζεύξη αυτή αποτελείται από τμήματα ίνας ακολουθούμενα από οπτικούς ενισχυτές όπως φαίνεται στο σχήμα 4-1. Επομένως, οι παράμετροι που κρίνονται αναγκαίες για την ανάλυση της μεθόδου είναι:

- τα χαρακτηριστικά της ίνας (συντελεστές εξασθένισης και μη γραμμικότητας, μήκος ίνας),
- το πλήθος των τμημάτων ίνας που χρησιμοποιούνται,
- τα χαρακτηριστικά των ενισχυτών.



Σχήμα 4-1: Μοντέλο οπτικής ζεύξης

Επόμενο βήμα είναι να εξεταστεί το πώς τα παραπάνω χαρακτηριστικά επηρεάζουν τις παραμέτρους ποιότητας του σήματος καθώς και το ίδιο το σήμα.

4.3. Προσδιορισμός του σηματοθορυβικού λόγου

Μία από τις παραμέτρους που δίνουν εικόνα για την επίδοση του οπτικού συστήματος είναι ο σηματοθορυβικός λόγος ο οποίος ορίστηκε στο κεφάλαιο 3. Η διάδοση του οπτικού σήματος μέσα από μία οπτική ζεύξη όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο οδηγεί σε υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου και κατά συνέπεια σε αύξηση του ρυθμού λαθών του συστήματος.

Η υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθεί μέσω ανάλυσης του θορύβου στη ζεύξη αυτή. Αρχικά, θεωρούμε ότι κάθε τμήμα οπτικής ίνας απλά εξασθενεί το σήμα (απώλειες ισχύος) και η όποια επίδραση της διασποράς αντισταθμίζεται στο τέλος της ζεύξης. Επομένως, τα στοιχεία της ζεύξης που χειροτερεύουν το σηματοθορυβικό λόγο είναι οι οπτικοί ενισχυτές.

Στη μέθοδο που αναλύεται, ο ενισχυτής θεωρείται ως μία διάταξη με κέρδος G η οποία προσθέτει λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN). Ο θόρυβος που εισάγει ένας ενισχυτής υπολογίζεται μέσω της εικόνας θορύβου του (Noise Figure – NF). Πρόκειται για έναν αριθμό που μετρά τη χειροτέρευση του σηματοθορυβικού λόγου ενός σήματος λόγω της διέλευσής του από ένα στοιχείο όπως ένας ενισχυτής. Ορίζεται δηλαδή ως εξής:

$$NF = SNR_{in,dB} - SNR_{out,dB} \quad (dB)$$

Εάν ο όρος αυτός μετατραπεί από την κλίμακα decibel σε φυσικό αριθμό, λαμβάνεται ο συντελεστής θορύβου (Noise Factor – F) του ενισχυτή, για τον οποίο ισχύει:

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

Στην περίπτωση που εξετάζεται στο παρόν κείμενο είναι επιθυμητός ο υπολογισμός της χειροτέρευσης του σηματοθορυβικού λόγου εξαιτίας της διασύνδεσης διαδοχικών ενισχυτών. Η γνωστή από τη βιβλιογραφία σχέση του Friis δίνει ως αποτέλεσμα το συνολικό συντελεστή θορύβου της αλυσίδας ενισχυτών [15]:

$$F_{total} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_n}$$

Όπου G_i και F_i το κέρδος και ο συντελεστής θορύβου του i -οστού κατά σειρά συνδεδεμένου ενισχυτή. Για το προς μελέτη σύστημα, τυπικές τιμές της εικόνας θορύβου και του κέρδους των ενισχυτών είναι 6 και 20dB αντίστοιχα. [18] [23]

4.4. Προσδιορισμός της μη γραμμικής στρωφής φάσης

Η δεύτερη παράμετρος του σήματος της οποίας ποσοτικοποιείται η μεταβολή της μέσω της μεθόδου που αναλύεται είναι η μη γραμμική στρωφή φάσης. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα μη γραμμικά φαινόμενα της αυτοδιαμόρφωσης και της ετεροδιαμόρφωσης φάσης προκαλούν στρωφή φάσης στο σήμα που μεταδίδεται μέσω της οπτικής ζεύξης. Η μεταβολή αυτή είναι άμεσα εξαρτημένη από την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος καθώς και από το πλήθος των καναλιών που συνδιαδίδονται στην περίπτωση ενός WDM συστήματος.

Η ποσοτικοποίηση της μη γραμμικής στρωφής φάσης με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις μπορεί να γίνει μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\varphi_{NL,k} = \gamma L_{eff} P_0^{(k)} + 2 \sum_{h=1, h \neq k}^N \gamma L_{eff} P_0^{(h)}$$

Η σχέση αυτή δίνει ως αποτέλεσμα τη στρωφή φάσης στο k -οστό κανάλι του συνολικού σήματος $\varphi_{NL,k}$ ως υπέρθεση της στρωφής φάσης λόγω αυτοδιαμόρφωσης (πρώτος όρος του αθροίσματος) και της στρωφής λόγω ετεροδιαμόρφωσης (δεύτερος όρος του αθροίσματος).

Η παράμετρος γ ονομάζεται συντελεστής μη γραμμικότητας της οπτικής ίνας και ορίζεται ως:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}$$

όπου n_2 ο μη γραμμικός συντελεστής του δείκτη διάθλασης, λ το μήκος κύματος του σήματος και A_{eff} η ενεργός επιφάνεια της οπτικής ίνας.

Η παράμετρος L_{eff} είναι το κανονικοποιημένο μήκος διάδοσης του σήματος λαμβάνοντας υπόψη την εξασθένιση. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται προκειμένου να ισχύει η θεώρηση ότι η διάδοση γίνεται με σταθερή ισχύ σε απόσταση ίση με L_{eff} και ισούται με:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-aL}}{a}$$

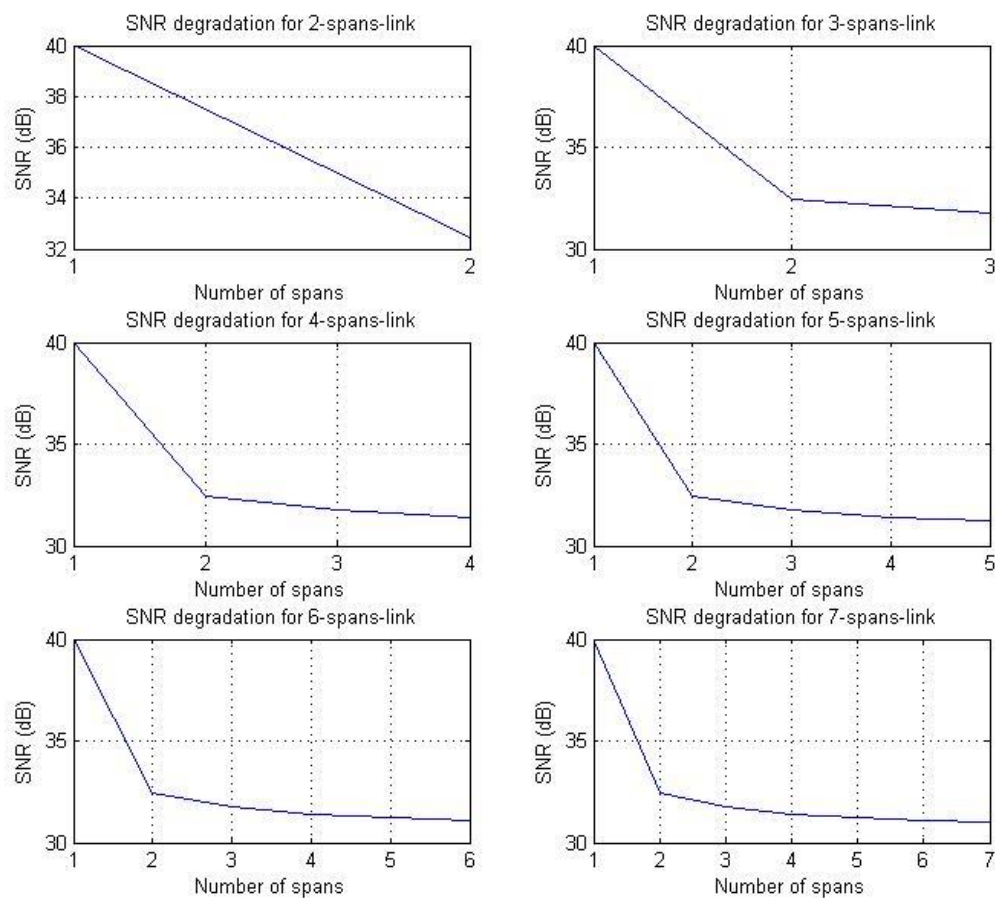
όπου L το πραγματικό μήκος της ζεύξης και a ο συντελεστής εξασθένισης της ίνας. Τέλος, με $P_0^{(k)}$ συμβολίζεται η ισχύς με την οποία μεταδίδεται το k -οστό κανάλι. [9] [16] [17] [20] [21]

4.5. Επίδραση στα χαρακτηριστικά του σήματος

Επίδραση στο SNR

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η χειροτέρευση του σηματοθορυβικού λόγου κατά τη διάδοση μέσα από μία οπτική ζεύξη όπως η προαναφερθείσα, παρουσιάζονται ακολούθως μερικά ενδεικτικά παραδείγματα.

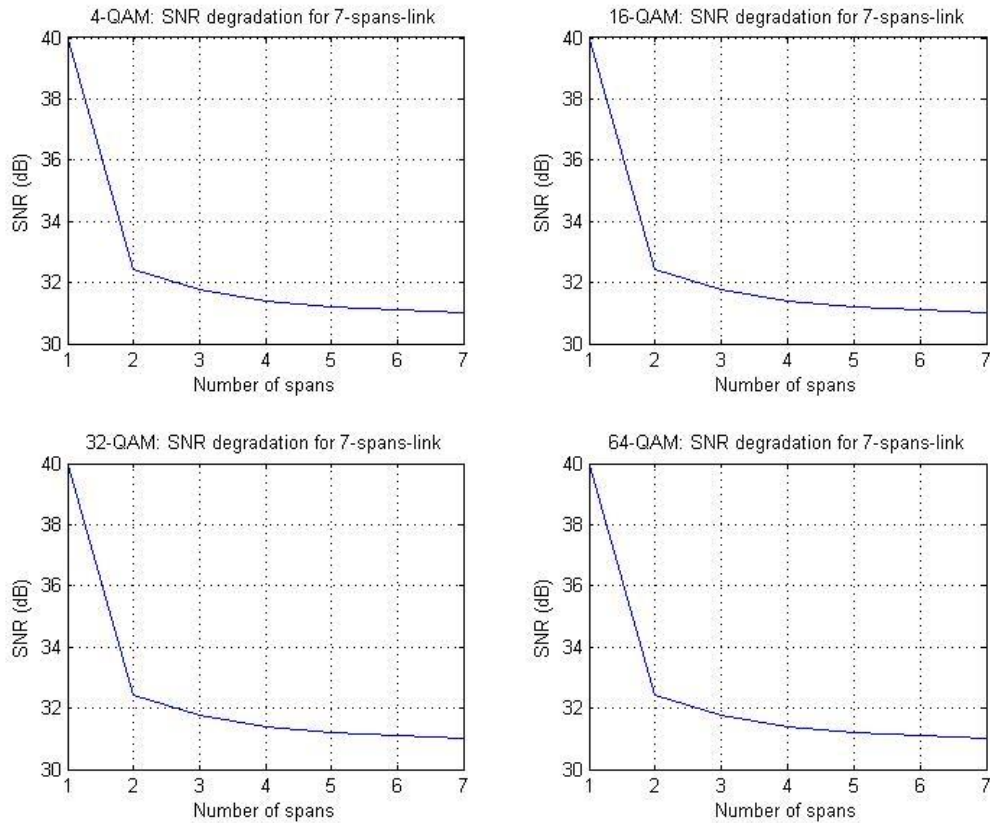
Η μείωση του σηματοθορυβικού λόγου ενός σήματος QPSK με αρχική τιμή τα 40dB για μία ζεύξη που αποτελείται από δύο έως και επτά τμήματα ίνας (άρα και ισάριθμους ενισχυτές) παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα:



Σχήμα 4-2: Υποβάθμιση σηματοθορυβικού λόγου ενός σήματος QPSK συναρτήσει των τμημάτων ίνας μίας οπτικής ζεύξης

Όπως γίνεται αντιληπτό μεγαλύτερη συμβολή στη μείωση του σηματοθορυβικού λόγου έχει ο πρώτος κατά σειρά ενισχυτής καθώς εισάγει υποβαθμίζει την ποιότητα του σήματος κατά 7dB περίπου.

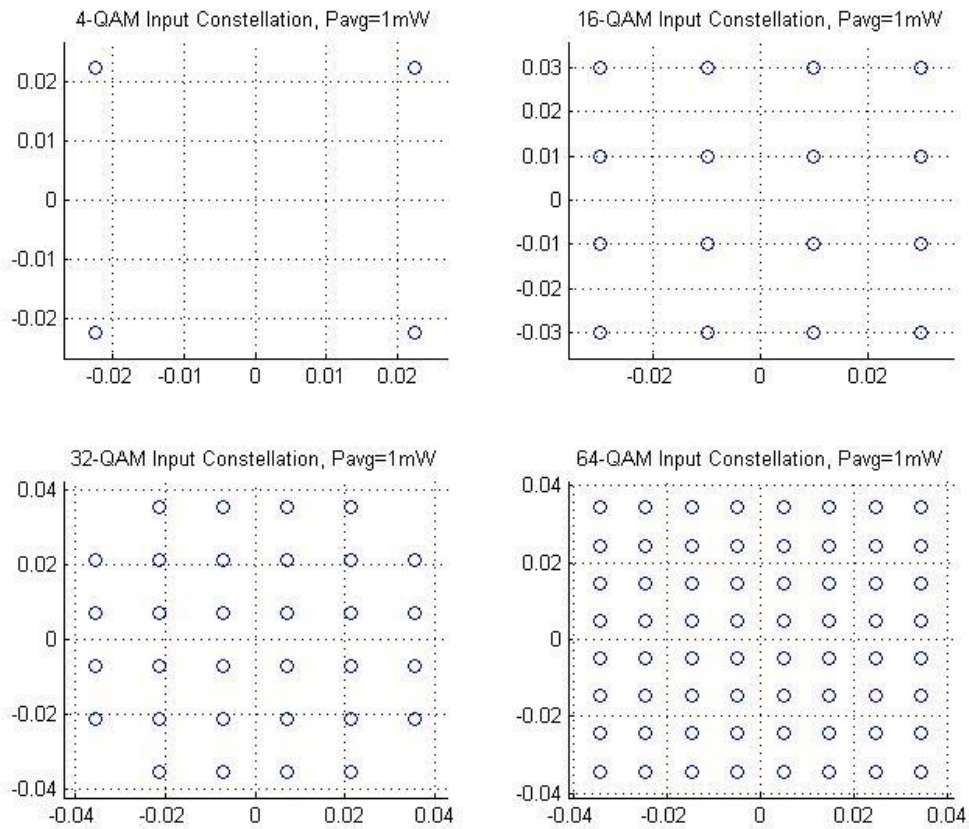
Οι γραφικές του σχήματος 4-2 αφορούν την περίπτωση που ως σχήμα διαμόρφωσης χρησιμοποιείται αυτό της QPSK. Η μεταβολή του SNR όταν γίνεται χρήση των υπόλοιπων σχημάτων διαμόρφωσης που αναφέρθηκαν παραπάνω φαίνεται στα γραφήματα του σχήματος 4-3.



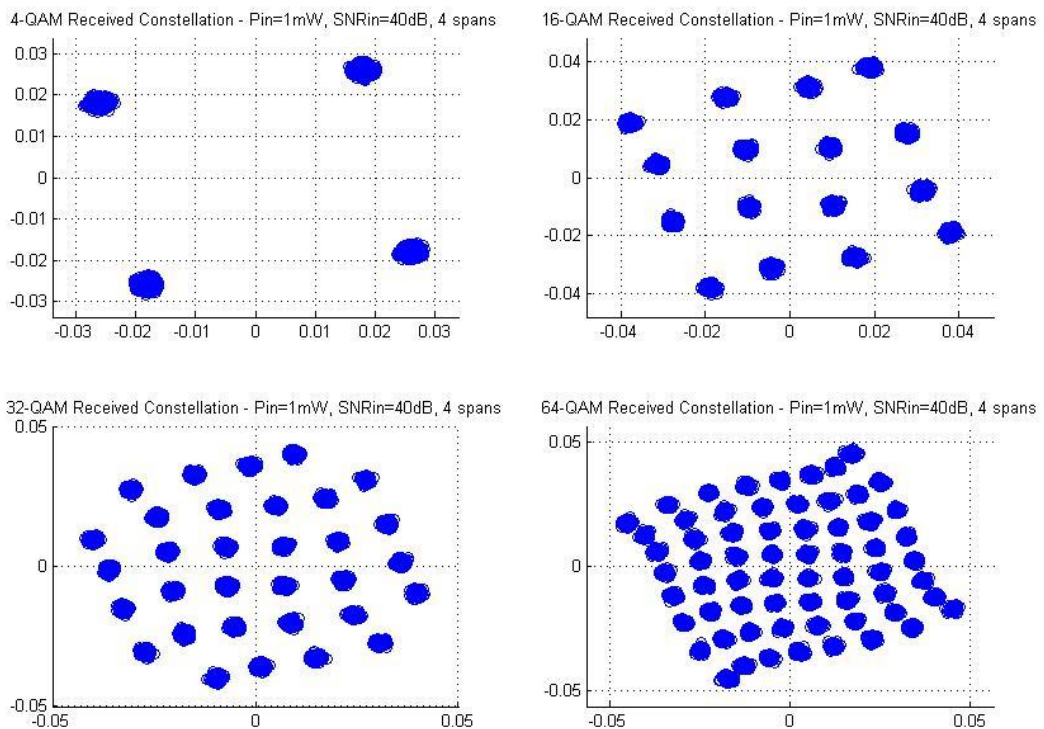
Σχήμα 4-3: Υποβάθμιση σηματοθοροβικού λόγου σημάτων QPSK, 16-QAM, 32-QAM και 64-QAM

Παρατηρείται ότι το σχήμα διαμόρφωσης που επιλέγεται δεν επηρεάζει τη μεταβολή του SNR του σήματος. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς στην εξίσωση του Friis δεν εμπλέκεται η τάξη διαμόρφωσης του σήματος. Παρ' όλη όμως την ανεξαρτησία αυτή, η ίδια υποβάθμιση SNR προκαλεί μεγαλύτερη μείωση της ποιότητας του ληφθέντος σηματικού αστερισμού και επομένως μειωμένη ικανότητα ανάκτησης της πληροφορίας που στάλθηκε. Η διαπίστωση αυτή γίνεται περισσότερο κατανοητή μέσω της σύγκρισης των σηματικών αστερισμών του αρχικού και του ληφθέντος στο δέκτη σήματος (σχήματα 4-4 και 4-5). Υποθέτουμε ότι η μετάδοση γίνεται σε ζεύξη 4 τμημάτων ίνας με αρχικό SNR ίσο με $40dB^1$.

¹ Οι τιμές στους άξονες των διαγραμμάτων των σηματικών αστερισμών είναι τέτοιες ώστε η συνολική μέση ισχύς του αρχικού σήματος P_{avg} να ισούται με $0dBm(1mW)$.



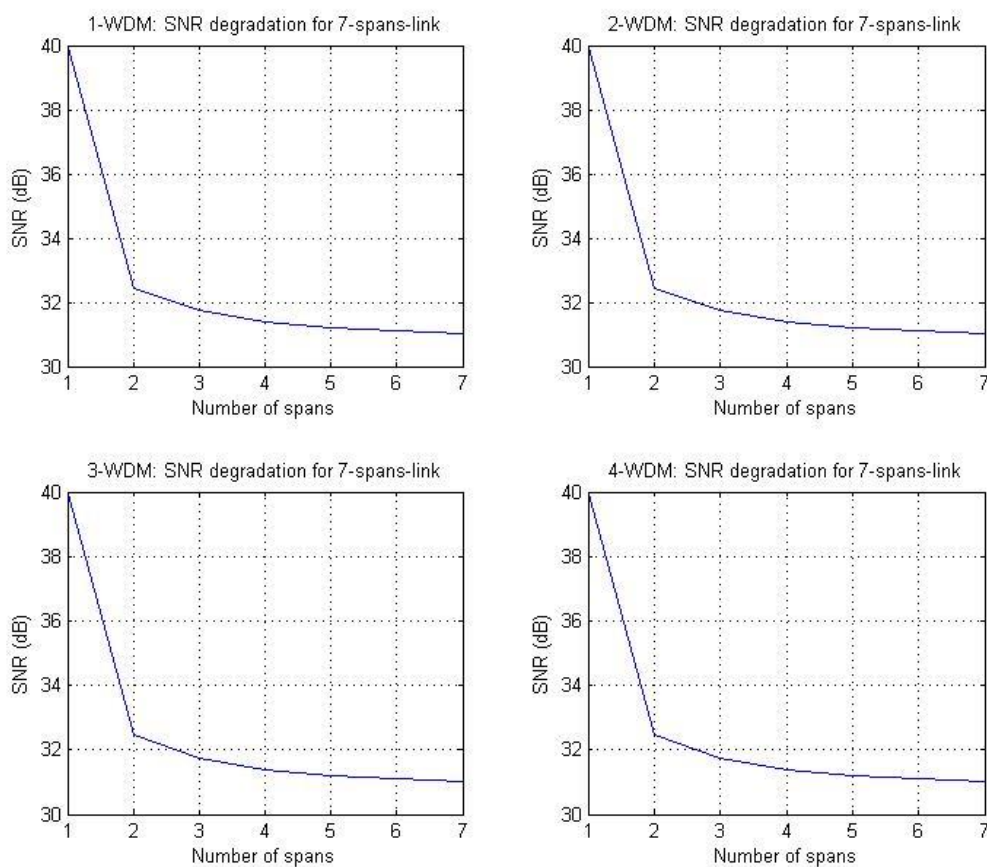
Σχήμα 4-4: Αρχικός σηματοκός αστερισμός των διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης



Σχήμα 4-5: Λαμβανόμενος σηματοκός αστερισμός μετά από διάδοση σε ζεύξη με 4 τμήματα ίνας και αρχικό σηματοθοροβικό λόγο 40dB

Οι ληφθέντες σηματοί αστερισμοί διαφέρουν περισσότερο από τους ιδανικούς όσο αυξάνεται η τάξη διαμόρφωσης και συνεπώς η κοινή μείωση του SNR σε κάθε περίπτωση δεν προσφέρει κάποιο κέρδος στη διαδικασία της ανίχνευσης και φώρασης του σήματος. Οι παραπάνω αστερισμοί επιπλέον επηρεάζονται και από την επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων όπως θα εξηγηθεί και παρακάτω.

Ένα τελευταίο σημείο το οποίο αξίζει να αναλυθεί όσον αφορά την υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου είναι η επίδραση του πλήθους του αριθμού των καναλιών που συνδιαδίδονται στο σήμα. Η δυνατότητα πολύπλεξης πολλαπλών καναλιών στο ίδιο σήμα αποτελεί ένα ακόμα επίπεδο ευελιξίας του συστήματος και επομένως είναι απαραίτητο να ελεγχθεί το πώς επηρεάζεται η ποιότητα μετάδοσης του σήματος σε ένα σύστημα WDM. Το ακόλουθο γράφημα εξετάζει την περίπτωση αυτή:



Σχήμα 4-6: Υποβάθμιση σηματοθορυβικού λόγου ενός σήματος QPSK στην περίπτωση συστήματος WDM

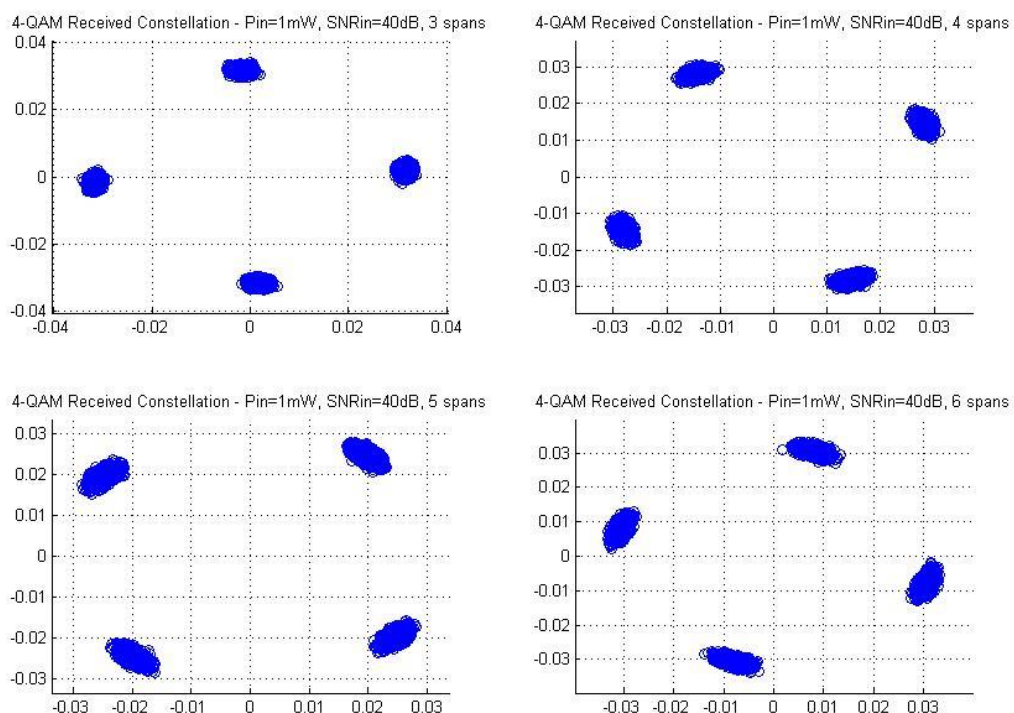
Και εδώ φαίνεται ότι ο αριθμός των καναλιών του WDM συστήματος δεν έχει επίδραση στο SNR του σήματος. Συνεπώς, οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν το λόγο σήματος προς θόρυβο είναι τα χαρακτηριστικά των ενεργών στοιχείων της οπτικής ζεύξης, στην προκειμένη περίπτωση των οπτικών ενισχυτών.

Επίδραση της μη-γραμμικής στρωφής φάσης

Για να γίνει φανερή η επίδραση της μη-γραμμικής στρωφής φάσης στην ποιότητα του σήματος απεικονίζονται οι σηματοί αστερισμοί του αρχικού σήματος και του σήματος μετά τη διάδοσή του στην οπτική ζεύξη που μελετάται.

Επίδραση των τμημάτων ίνας και της αρχικής ισχύος

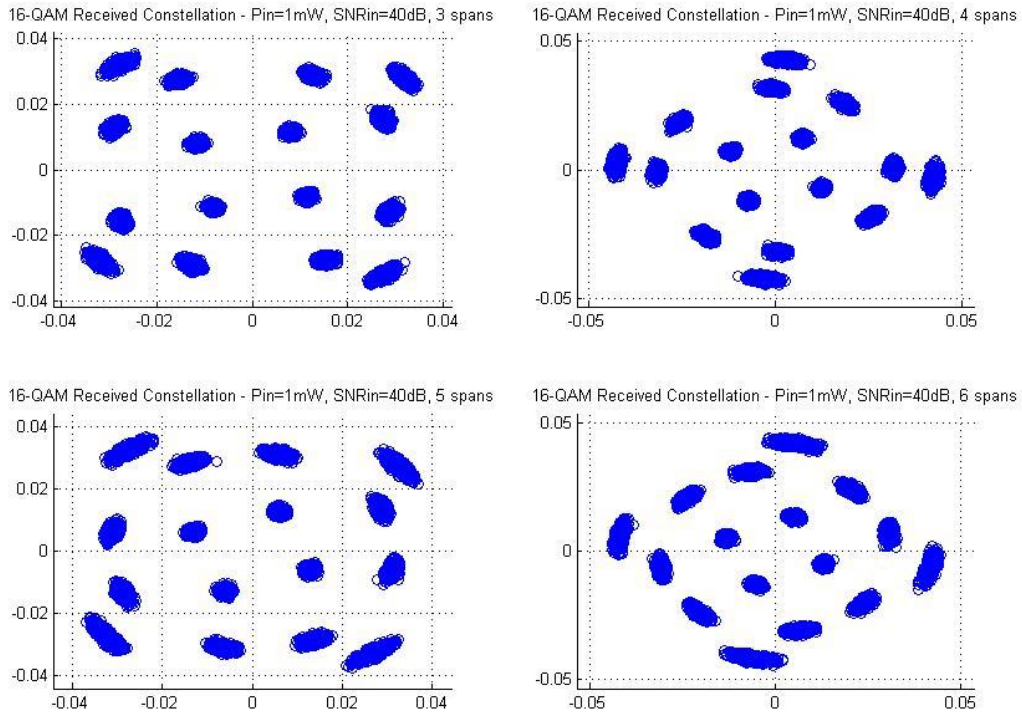
Αρχικά, θεωρούμε ένα σήμα με ένα κανάλι το οποίο διαμορφώνεται σε QPSK και έχει ισχύ εισόδου 0dBm (1mW) και αρχικό SNR ίσο με 40dB. Η μεταβολή της φάσης του σήματος καθώς αυτό διαδίδεται σε μία ζεύξη με αυξανόμενο πλήθος τμημάτων ίνας παρουσιάζεται στο σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7: Μη γραμμική στρωφή φάσης του σηματοί αστερισμοί QPSK σήματος για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 1mW

Γίνεται αντιληπτό ότι καθώς αυξάνεται το πλήθος των τμημάτων ίνας στη ζεύξη αυξάνεται παράλληλα και η στρωφή φάσης που εισάγεται στο σήμα.

Η εξάρτηση από την ισχύ του σήματος όπως προαναφέρθηκε, έχει σημαντική επίδραση στη φάση που εισάγουν οι μη γραμμικότητες της ίνας. Αυτό παρατηρείται εντονότερα στην περίπτωση σχημάτων διαμόρφωσης που τα σημεία του αστερισμού τους βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Τέτοια σχήματα είναι και τα 16-QAM, 32-QAM και 64-QAM. Σε πρώτη φάση εξετάζεται η περίπτωση ενός 16-QAM σήματος ενός καναλιού με ισχύ 0dBm (1mW) και αρχικό σηματοθορυβικό λόγο 40dB όπως και στην προηγούμενη περίπτωση του QPSK σήματος.

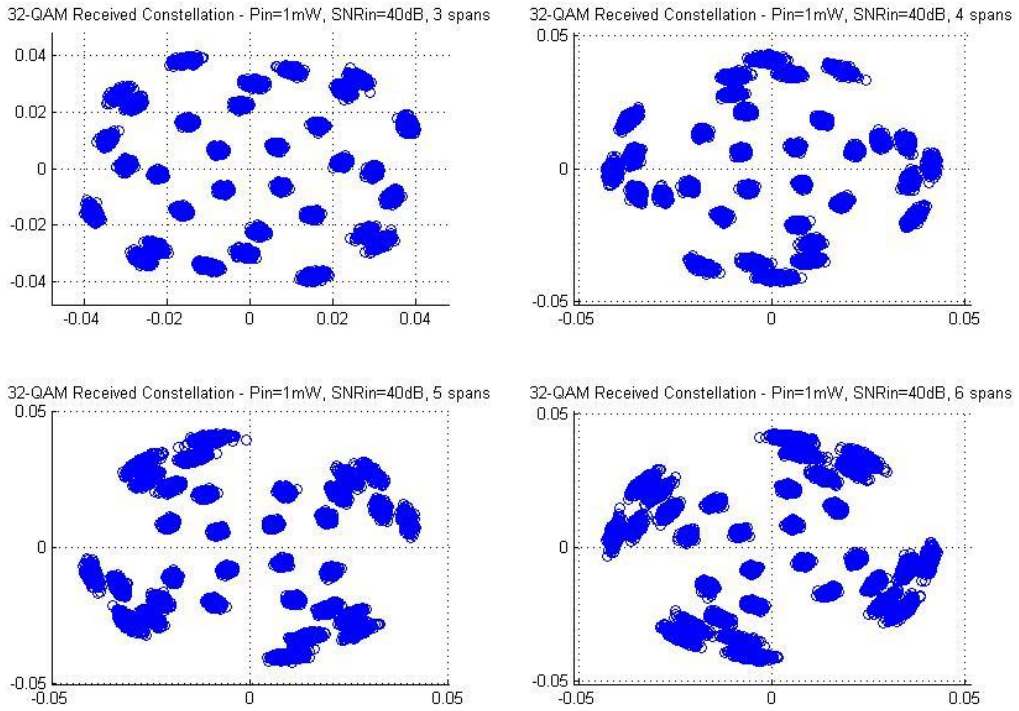


Σχήμα 4-8: Μη γραμμική στρόφη φάσης του σηματοδότη αστερισμού 16-QAM για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 1mW

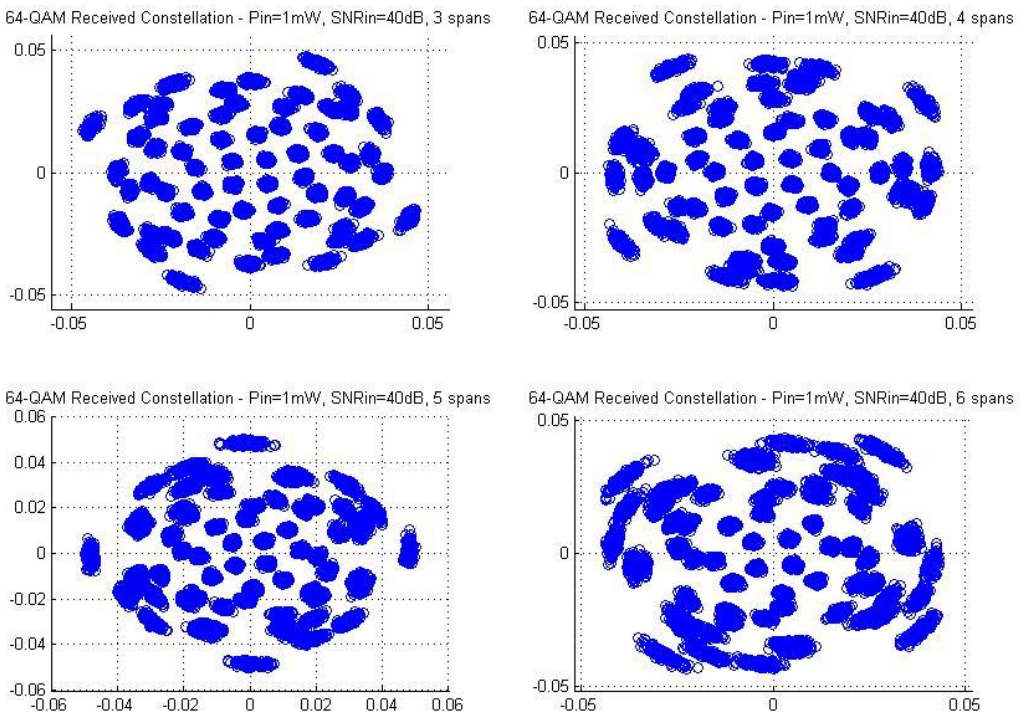
Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4-8 τα εξωτερικά σημεία του αστερισμού στρέφονται περισσότερο σε σύγκριση με τα εσωτερικά. Η αιτία για το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ανάλυση που έγινε παραπάνω και τη γραμμική εξάρτηση της στρόφης φάσης από την ισχύ του σήματος. Σύμβολα του σήματος με μεγαλύτερη ισχύ υφίστανται μεγαλύτερη παραμόρφωση στη φάση τους καθώς και συνεπώς η μετάδοσή τους από μία ζεύξη με μεγάλο πλήθος τμημάτων ίνας καθίσταται αδύνατη.

Η χειροτέρευση της ποιότητας του σήματος γίνεται ακόμα μεγαλύτερη στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται σχήματα ακόμη μεγαλύτερης τάξης όπως το 32-QAM και το 64-QAM. Ενδεικτικά είναι τα σχήματα 4-9 και 4-10.

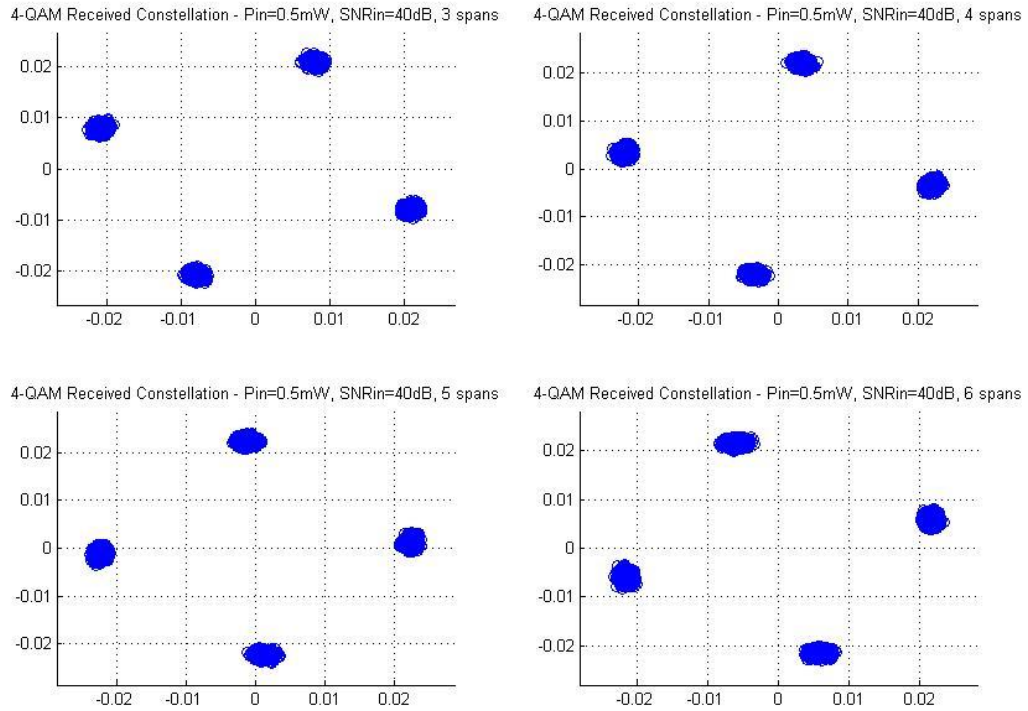
Αντίθετα, όταν η ισχύς εισόδου μειώνεται, τότε η επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων είναι με τη σειρά της μικρότερη. Με αυτή τη συλλογιστική, στην περίπτωση των σχημάτων διαμόρφωσης QPSK και 16-QAM και με ισχύ εισόδου ίση με -3dBm (0.5mW), οι σηματοδότη αστερισμοί του λαμβανόμενου σήματος είναι αυτοί των σχημάτων 4-11 και 4-12.



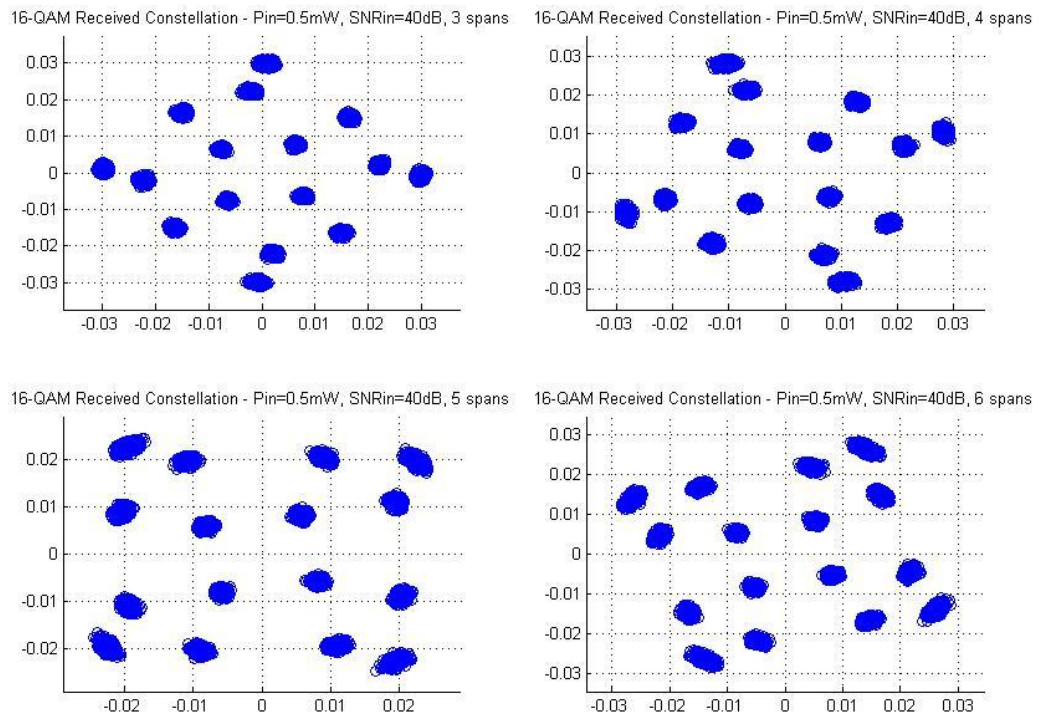
Σχήμα 4-9: Μη γραμμική στροφή φάσης του σηματοδότη αστερισμού 32-QAM για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 1mW



Σχήμα 4-10: Μη γραμμική στροφή φάσης του σηματοδότη αστερισμού 64-QAM για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 1mW



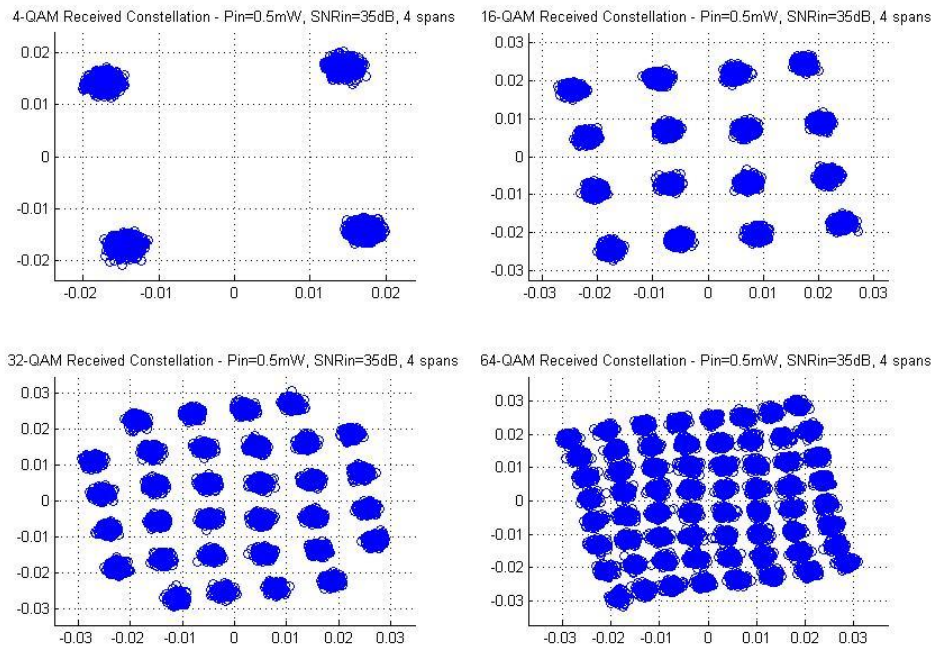
Σχήμα 4-11: Μη γραμμική στρόφη φάσης του σηματού αστερισμού σήματος QPSK για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 0.5mW



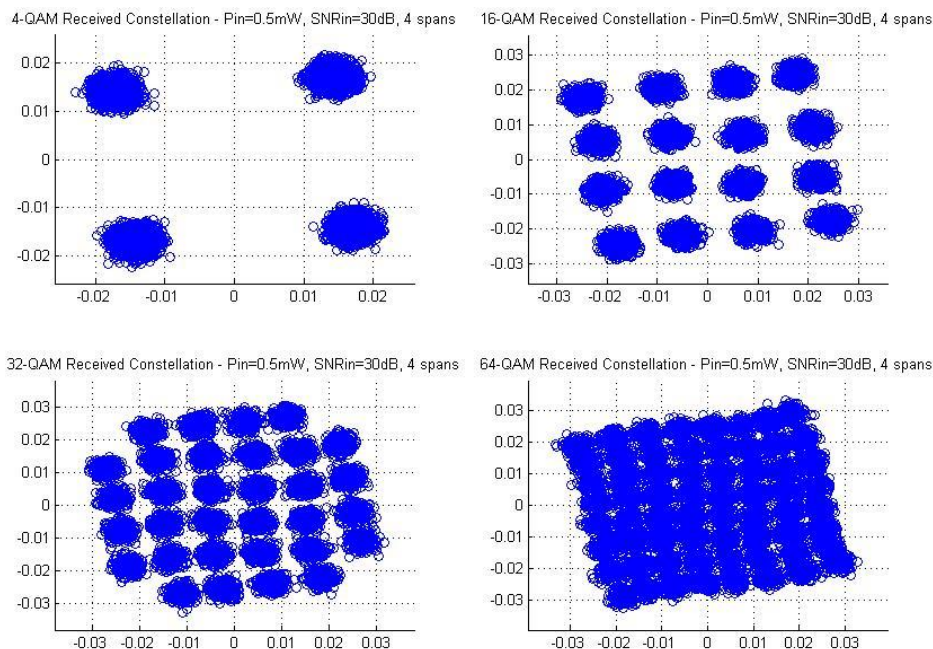
Σχήμα 4-12: Μη γραμμική στρόφη φάσης του σηματού αστερισμού σήματος 16-QAM για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας στη ζεύξη – Ισχύς σήματος 0.5mW

Επίδραση σηματοθορυβικού λόγου και αριθμού καναλιών

Ένας επιπλέον παράγοντας που επιδρά στη στροφή φάσης του σήματος είναι ο σηματοθορυβικός λόγος του καναλιού. Όσο μικρότερος είναι αυτός, τόσο χειρότερη είναι η ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος. Έτσι, για σήματα με αρχική ισχύ -3dBm (0.5mW) και αρχικό SNR ίσο με 35dB και 30dB , οι σηματικοί αστερισμοί για τα τέσσερα διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης που μελετούνται είναι αυτοί των σχημάτων 4-13 και 4-14.

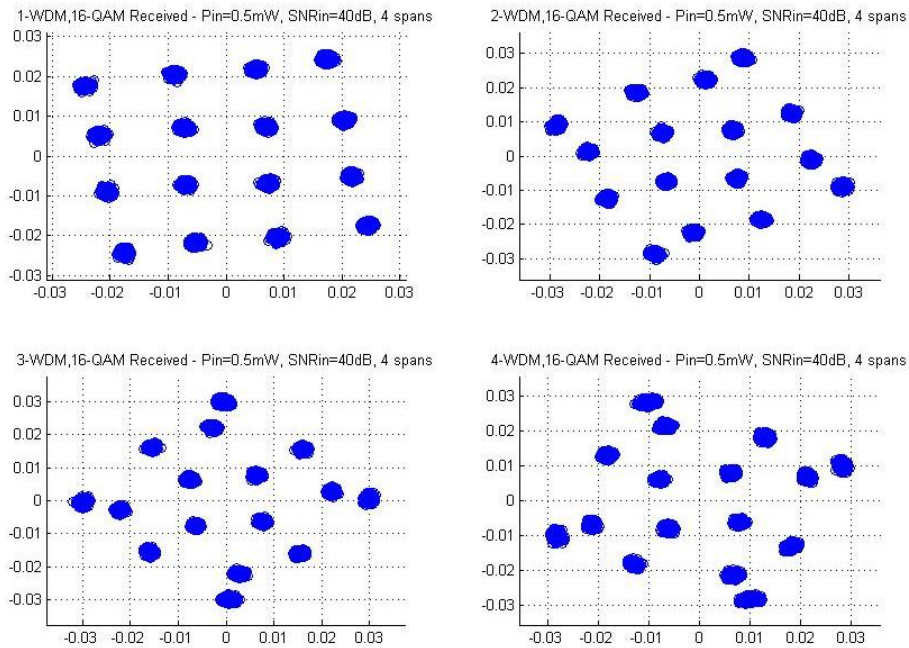


Σχήμα 4-13: Μη γραμμική στροφή φάσης σηματικών αστερισμών για αρχικό σηματοθορυβικό λόγο στη ζεύξη 35dB – Ισχύς σήματος 1mW

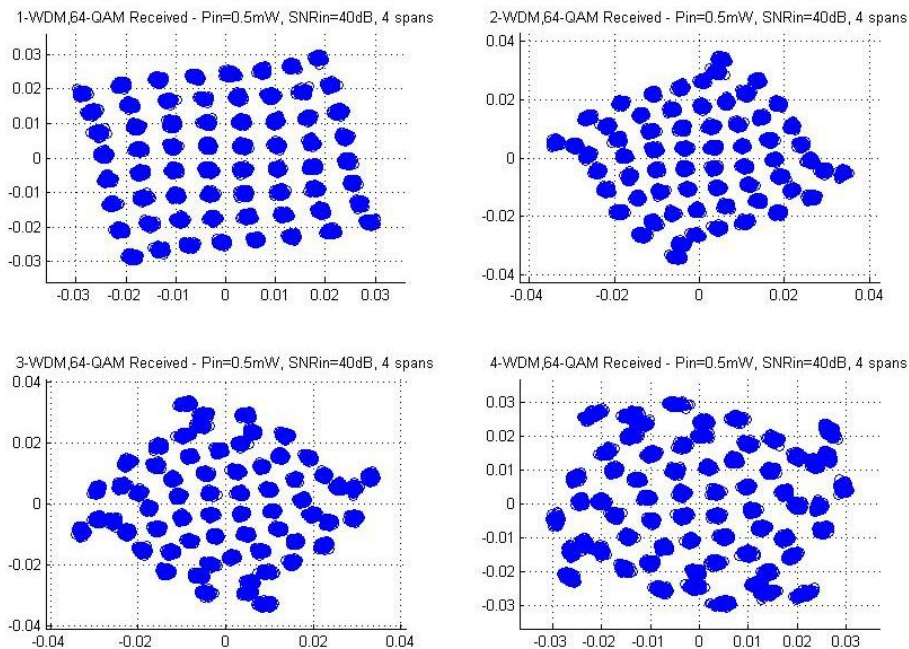


Σχήμα 4-14: Μη γραμμική στροφή φάσης σηματικών αστερισμών για αρχικό σηματοθορυβικό λόγο στη ζεύξη 30dB – Ισχύς σήματος 1mW

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί και με γραφικό τρόπο η συσχέτιση της μη γραμμικής φάσης με το πλήθος των καναλιών ενός συστήματος WDM. Στη θεωρητική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην αρχή της παρούσας ενότητας, είναι φανερό πως αύξηση του πλήθους των καναλιών οδηγεί σε αύξηση της στροφής φάσης του σήματος λόγω του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται και από τους ακόλουθους σηματικούς αστερισμούς για σχήματα διαμόρφωσης 16-QAM και 64-QAM (σχήματα 4-15, 4-16) που έχουν αρχική ισχύ -3dBm (0.5mW), αρχικό σηματοθορυβικό λόγο στη ζεύξη 40dB και διαδίδονται σε ζεύξη 4 τμημάτων. Το WDM αποτελείται από 1 έως 4 κανάλια.



Σχήμα 4-15: Μη γραμμική στροφή φάσης σηματικού αστερισμού 16-QAM σε σύστημα WDM – Ισχύς σήματος 1mW



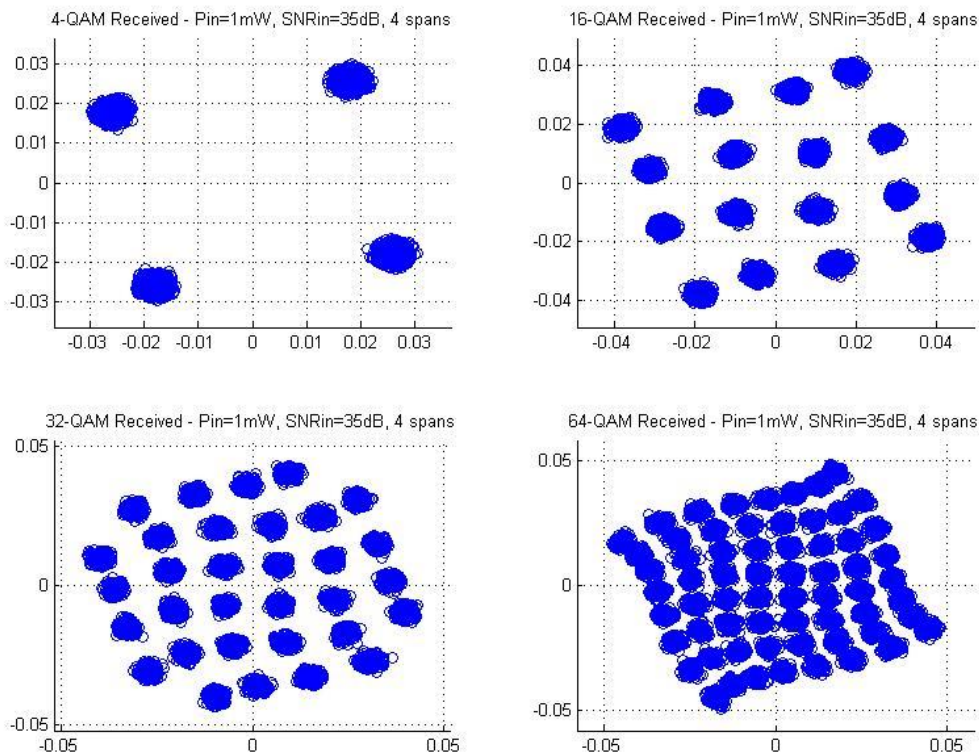
Σχήμα 4-16: Μη γραμμική στροφή φάσης σηματικού αστερισμού 64-QAM σε σύστημα WDM – Ισχύς σήματος 1mW

4.6. Ανάκτηση φάσης του σήματος

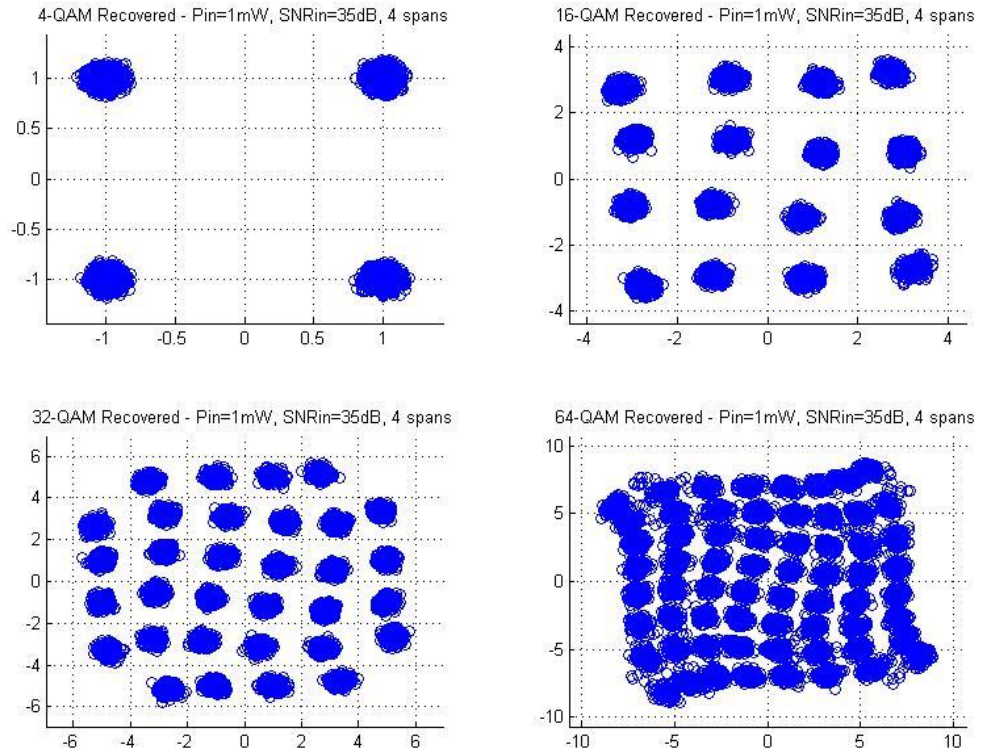
Η μέθοδος που αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο είναι σχεδιασμένη ώστε να υπολογίζει την ποιότητα μετάδοσης πάνω από μία ζεύξη δεδομένων χαρακτηριστικών. Η ποιότητα μετάδοσης είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη μετρική του λόγου λανθασμένων ψηφίων (BER). Επομένως, είναι απαραίτητη η εκτίμηση για το πλήθος των λανθασμένων ψηφίων κατά τη μετάδοση πάνω από μία ζεύξη. [19] [22]

Οι σηματικοί αστερισμοί που παρουσιάστηκαν παραπάνω και αποτελούν ουσιαστικά την είσοδο στο κύκλωμα φάρασης είναι αδύνατο να ανιχνευτούν χωρίς λάθη, λόγω της μεγάλης στροφής φάσης που έχουν υποστεί και του θορύβου που έχει εισαχθεί. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται μια τεχνική ανάκτησης φάσης βασισμένη σε τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος ώστε να εκτιμηθεί η αξιοπιστία της μετάδοσης. [29]

Η επίδραση της τεχνικής αυτής στους σηματικούς αστερισμούς των διαφόρων σχημάτων διαμόρφωσης παρουσιάζεται στα σχήματα 4-17 και 4-18. Οι ληφθέντες αστερισμοί έχουν προκύψει μετά από μετάδοση ενός καναλιού σε ζεύξη με αρχικό SNR ίσο με 35dB και με 4 τμήματα ίνας. Η αρχική ισχύς των σημάτων είναι 1mW.



Σχήμα 4-17: Ληφθέντες σηματικοί αστερισμοί πριν την ανάκτηση φάσης



Σχήμα 4-18 Ληφθέντες σηματοί αστερισμοί μετά την ανάκτηση φάσης

Παρατηρείται, επομένως, ότι μέσω της ανάκτησης φάσης καθίσταται δυνατή η αποδιαμόρφωση του σήματος που έχει θεωρηθεί ότι διαδίδεται μέσω της εκάστοτε οπτικής ζεύξης και συνεπώς και η εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης.

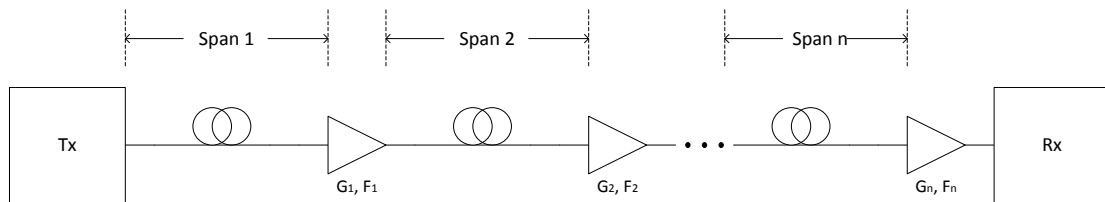
5. Αποτελέσματα της μεθόδου & παραδείγματα

Στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιούνται προσομοιώσεις της μεθόδου που αναλύθηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρουσιάζεται η επίδοση του συστήματος με χρήση της μετρικής του BER. Η μετρική αυτή όπως έχει ήδη αναφερθεί αντιπροσωπεύει μια εκτίμηση της ποιότητας μετάδοσης του συστήματος η οποία είναι και ο τελικός στόχος της εργασίας αυτής.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου γίνεται παράθεση παραδειγμάτων και σεναρίων δικτυακών τοπολογιών και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε αυτά.

5.1. Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα

Όπως και στο κεφάλαιο 4 χρησιμοποιούμε το μοντέλο ζεύξης του σχήματος 5-1. Θεωρούμε ότι η μέθοδος που αναλύθηκε εκτελείται στον πομπό ενώ τα αποτελέσματά της αφορούν το σήμα που διαδίδεται μέσω της προς μελέτη ζεύξης.



Σχήμα 5-1: Μοντέλο οπτικής ζεύξης

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων θεωρείται ότι οι ενισχυτές είναι όμοιοι με τα κέρδη και τις εικόνες θορύβου να έχουν τιμές:

$$G_1 = G_2 = \dots = G_n = 20dB$$

$$NF_1 = NF_2 = \dots = NF_n = 6dB$$

Επίσης, τα τμήματα ίνας που χρησιμοποιούνται στις ζεύξεις χαρακτηρίζονται από συντελεστή απωλειών $a = 0.22dB/km$ και έχουν μήκος $L = 80km$. Ο συντελεστής μη γραμμικότητας της ίνας έχει μία τυπική τιμή που συναντάται συχνά στα πραγματικά συστήματα και είναι $\gamma = 3$ ενώ με βάση τις παραπάνω τιμές του συντελεστή απωλειών και του πραγματικού μήκους της ίνας, το κανονικοποιημένο μήκος διάδοσης προκύπτει περίπου ίσο με $L_{eff} = 20km$. Υπενθυμίζεται ότι αγνοούνται τα φαινόμενα διασποράς καθώς θεωρούμε ότι αντισταθμίζονται στο τέλος της ζεύξης με τη χρήση ψηφιακών αλγορίθμων.

Έχοντας τις παραπάνω τιμές ως σταθερές, ο κόμβος διαχειρίζεται ως μεταβλητές εισόδου:

- την αρχική τιμή του σηματοθορυβικού λόγου της ζεύξης SNR_{in} ,
- το πλήθος των τμημάτων ίνας της ζεύξης (*number of spans*),
- το πλήθος των καναλιών WDM που χρησιμοποιούνται στη ζεύξη αυτή (*number of channels*).

Δύο παράμετροι που επίσης διαχειρίζονται ως μεταβλητές από τον κόμβο αναφοράς είναι ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (*baud rate*) και το σχήμα διαμόρφωσης (*modulation format*) γεγονός που δείχνει την ικανότητα ευελιξίας του. Η δυνατότητα αλλαγής σχημάτων διαμόρφωσης οδηγεί όμως και στην ανάγκη αλλαγή των επιπέδων ισχύος του σήματος προκειμένου να αποφευχθεί η μεγάλη διέγερση των μη γραμμικών φαινομένων στη ζεύξη όπως αναλύθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Επομένως, μία ακόμη μεταβλητή που χρησιμοποιείται είναι η ισχύς του πομπού (*launch power*).

Θεωρώντας τις παραπάνω μεταβλητές, εκτελούνται προσομοιώσεις του προτεινόμενου μοντέλου με τις τιμές τους να μεταβάλλονται ως εξής:

- SNR_{in} : από 30 έως 40dB
- *number of spans*: από 1 έως 7
- *number of channels*: από 1 έως 4
- *baud rate*: 28 και 56GBaud
- *modulation format*: QPSK, 16-QAM, 32-QAM και 64-QAM
- *launch power*: 0dBm και 3dBm για QPSK, -3dBm και 0dBm για 16-QAM, -6dBm και -dBm για 32-QAM και 64-QAM

Ακολούθως πραγματοποιείται προσομοίωση της μετάδοσης 300000 συμβόλων μέσω των διαφορετικών ζεύξεων που προκύπτουν από την επιλογή των παραπάνω μεταβλητών. Η παρουσίασή τους γίνεται με βάση το σχήμα διαμόρφωσης κατά σειρά από το πιο εύρωστο (QPSK) προς το λιγότερο εύρωστο (64-QAM).

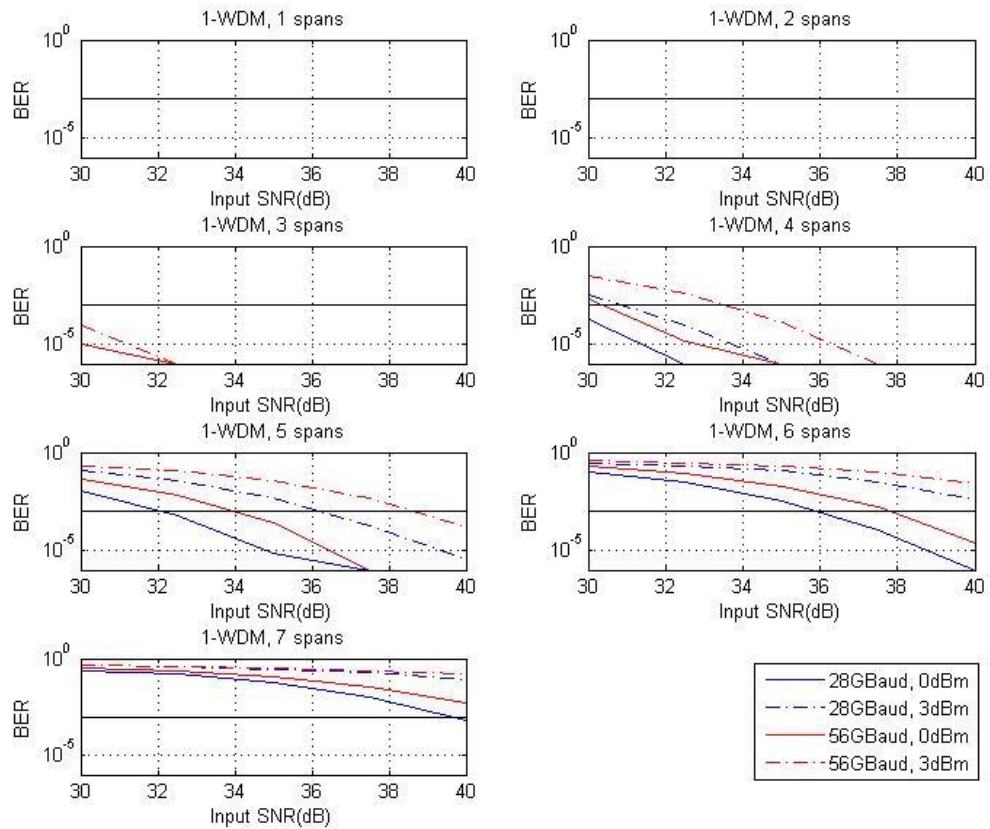
Η μετρική του BER που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ποιότητας μετάδοσης υπολογίζεται ως εξής:

$$BER = \frac{\text{πλήθος λανθασμένων ψηφίων μετά την ανίχνευση}}{\text{συνολικό πλήθος ψηφίων}}$$

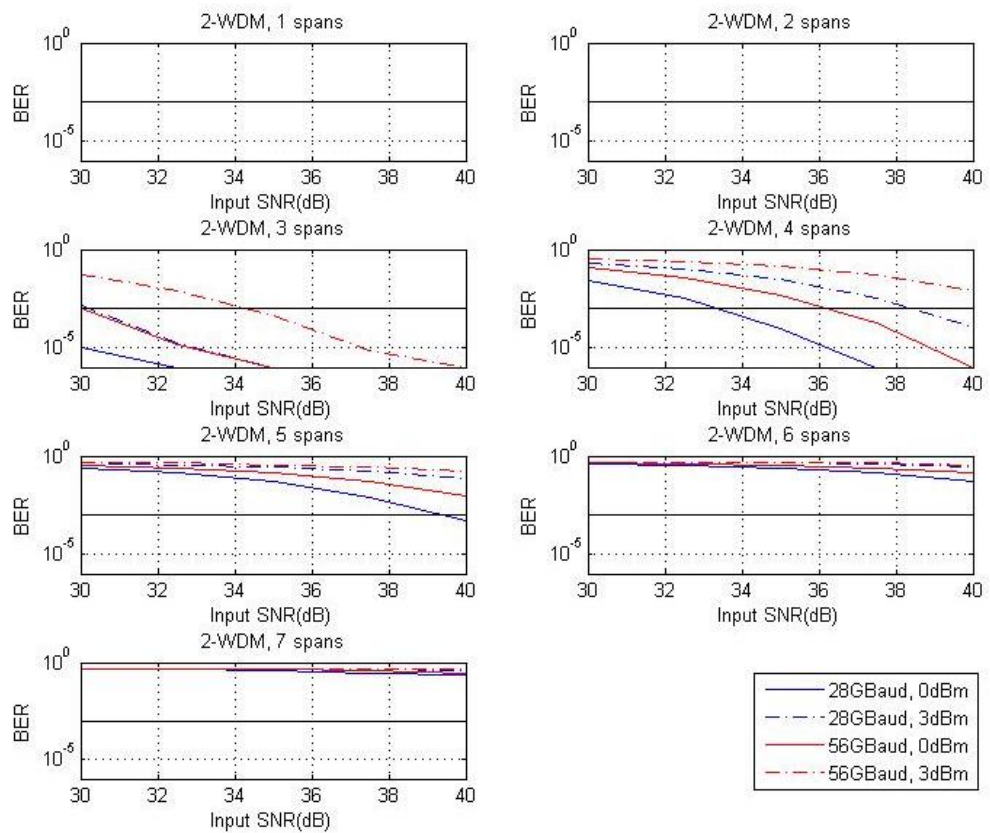
Οι κώδικες που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση της προσομοίωσης παρατίθενται στο Παράρτημα Α στο τέλος της εργασίας.

QPSK

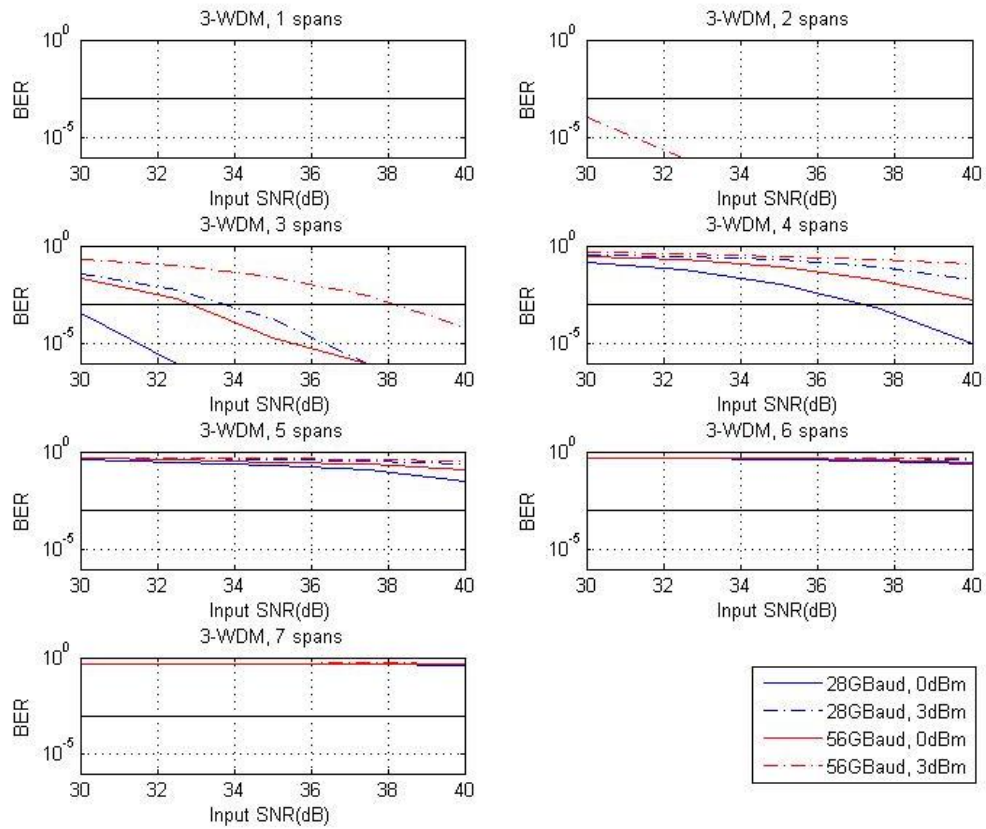
Αρχικά παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις του BER συναρτήσει του αρχικού σηματοθορυβικού λόγου για όλες τις περιπτώσεις πλήθους τμημάτων ίνας στη ζεύξη καθώς και αριθμού καναλιών στο WDM σύστημα (Σχήματα 5-2 έως 5-5).



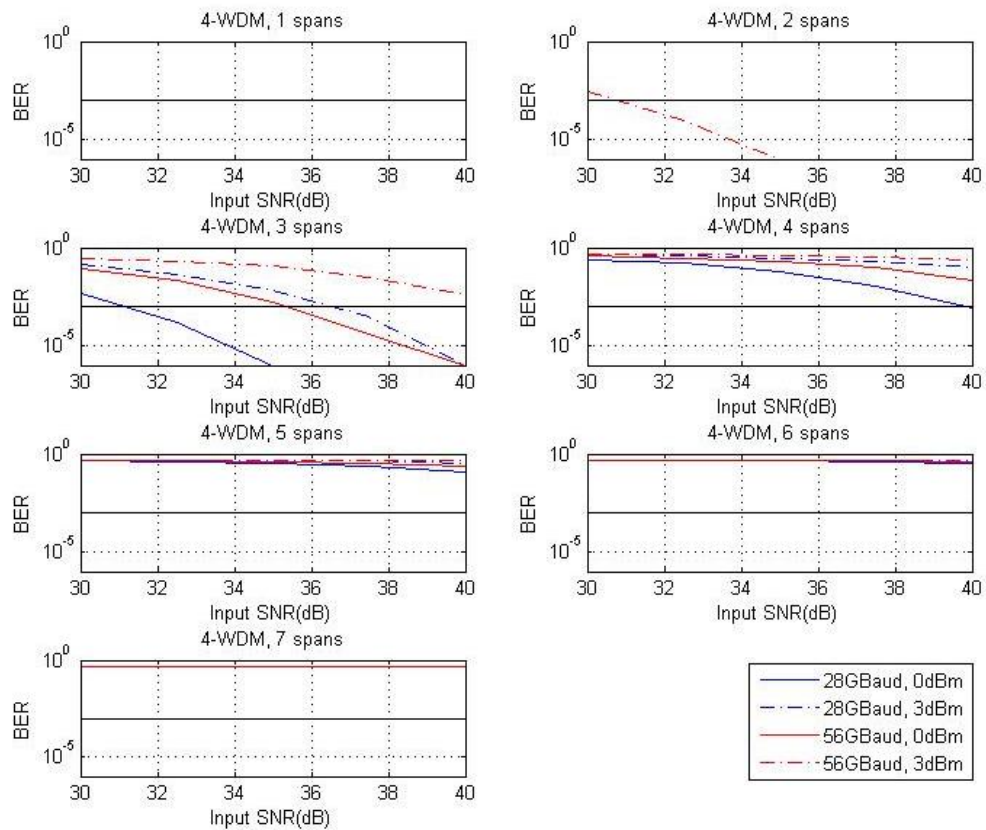
Σχήμα 5-2: QPSK, 1 κανάλι WDM: BER συναρτήσεως αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας



Σχήμα 5-3: QPSK, 2 κανάλια WDM: BER συναρτήσεως αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας



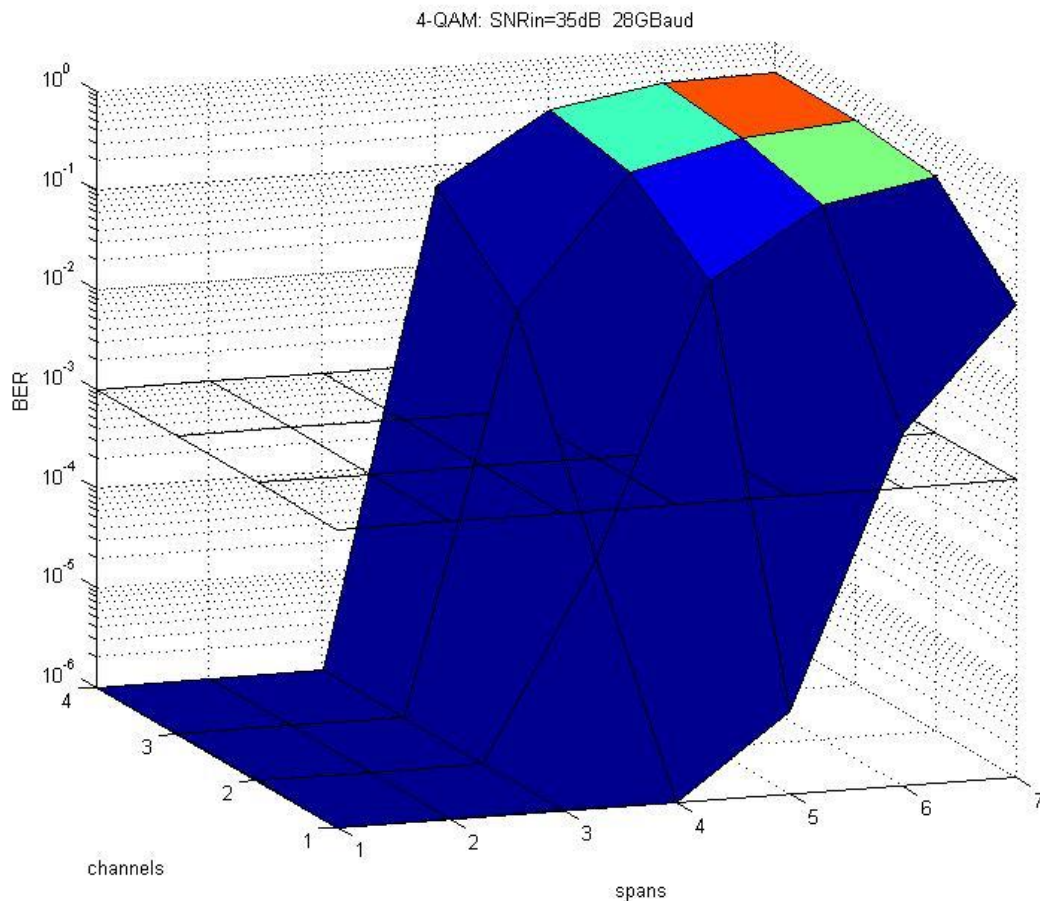
Σχήμα 5-4: QPSK, 3 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας



Σχήμα 5-5: QPSK, 4 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας

Παρατηρείται ότι η αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου στην αρχή της ζεύξης οδηγεί σε βελτίωση της ποιότητας μετάδοσης καθώς η καμπύλη $BER = f(SNR)$ έχει φθίνουσα συμπεριφορά. Ακόμη γίνεται φανερή και η επίδραση των τμημάτων ίνας της ζεύξης, καθώς περισσότερα τμήματα οδηγούν σε αύξηση του ποσοστού λανθασμένων ψηφίων. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί και η επίδραση του πλήθους των καναλιών που συνδιαδίδονται με το σήμα. Ενώ στην περίπτωση ενός μοναδικού καναλιού και για μικρό πλήθος τμημάτων ίνας (Σχήμα 5-2, γραφικές για τμήματα ίνας από 1 έως 4) η μετάδοση γίνεται χωρίς λάθη, όταν στο σύστημα εισάγονται περισσότερα κανάλια η μετάδοση καθίσταται μη αξιόπιστη ακόμη και για μικρές αποστάσεις. Οι μόνες περιπτώσεις που εξακολουθούν να έχουν ποσοστό λαθών μικρότερο από το κατώφλι ανίχνευσης ($BER=10^{-3}$) είναι αυτές με μεγάλο αρχικό σηματοθορυβικό λόγο, μικρό ρυθμό μετάδοσης (28GBaud) και χαμηλή ισχύ (0dBm-1mW).

Τέλος, στο σχήμα 5-5 παρατηρείται η επιφάνεια που σχηματίζει το BER στον τρισδιάστατο χώρο με ανεξάρτητες μεταβλητές το πλήθος των καναλιών και τον αριθμό των τμημάτων ίνας της ζεύξης.

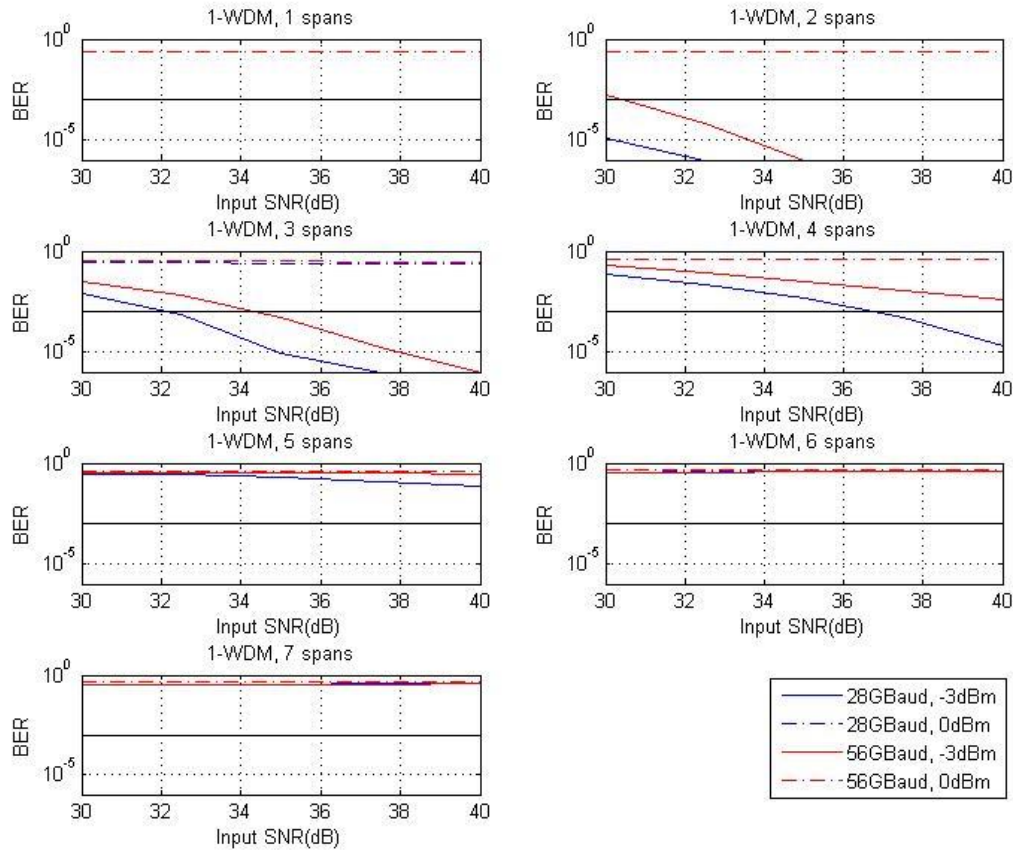


Σχήμα 5-6: QPSK, SNRin=35dB: BER συναρτήσει πλήθους τμημάτων ίνας και αριθμού καναλιών WDM

Παρατηρείται ότι όταν και τα δύο μεγέθη έχουν μεγάλες τιμές τότε η ποιότητα μετάδοσης κρίνεται μη ικανοποιητική.

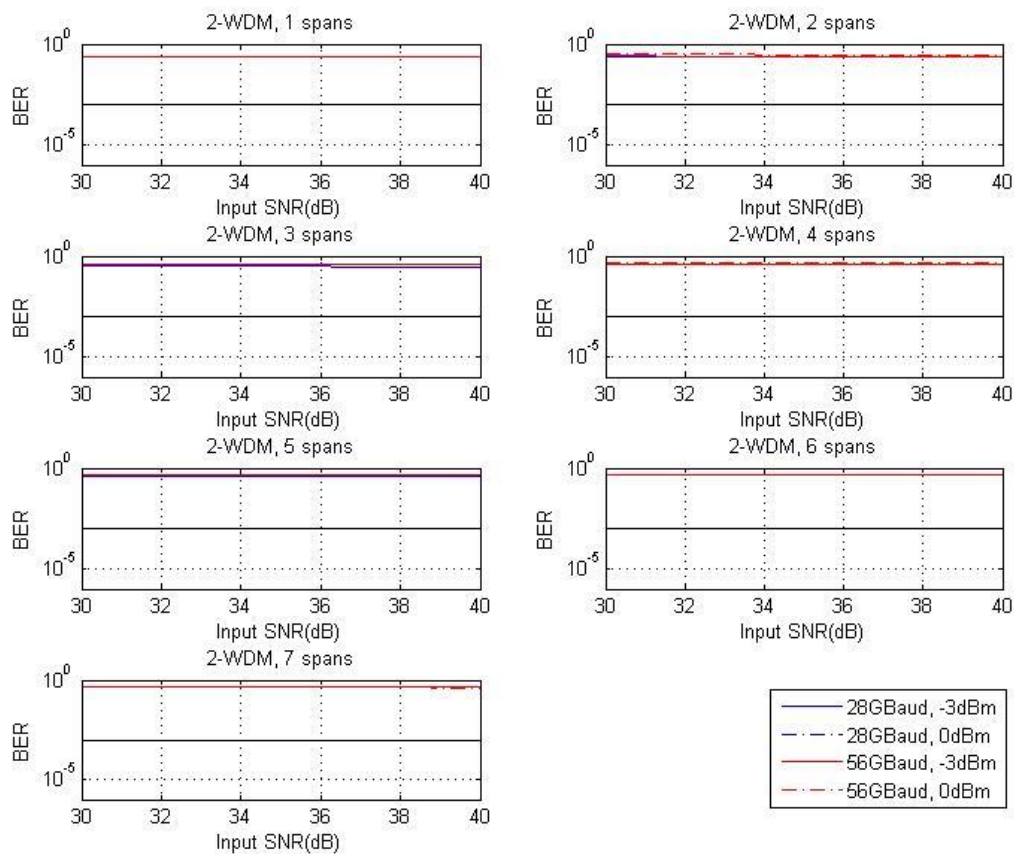
16-QAM

Όπως και στην περίπτωση της QPSK παρουσιάζονται αρχικά οι γραφικές παραστάσεις $BER = f(SNR)$ (Σχήματα 5-7, 5-8)



Σχήμα 5-7: 16-QAM, 1 κανάλι WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας

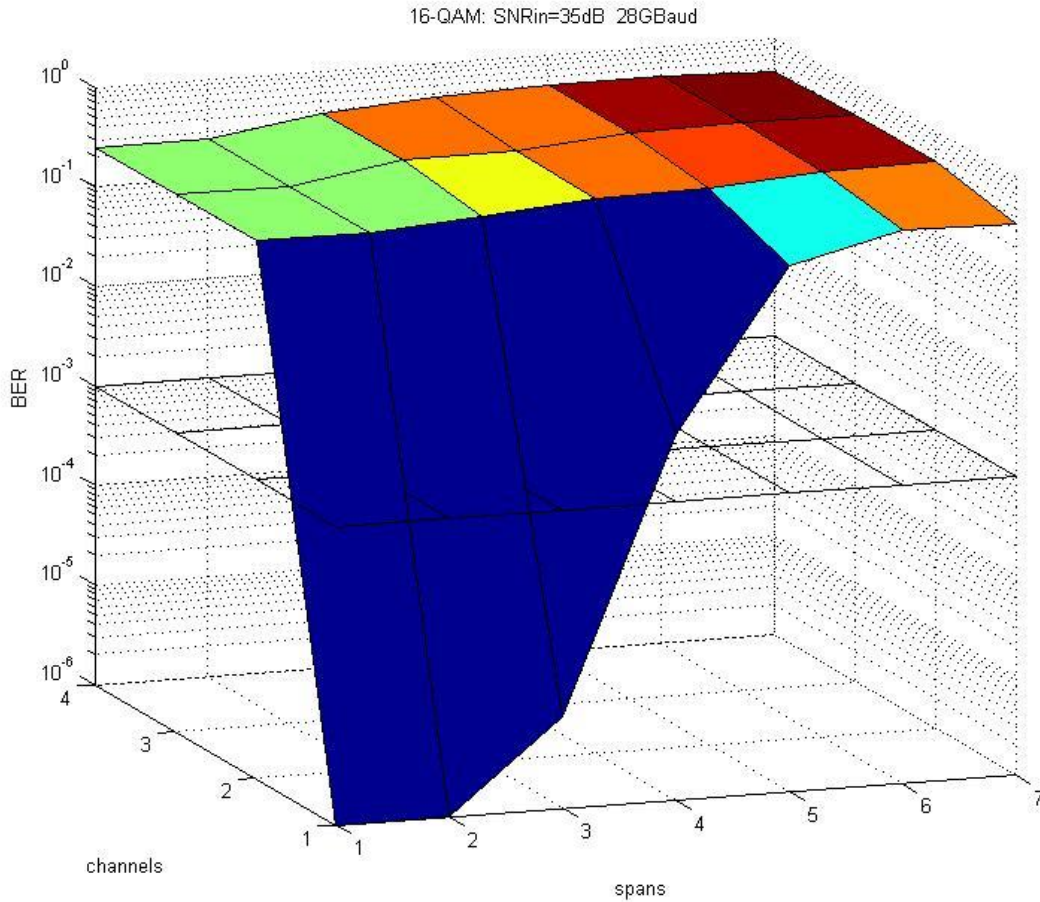
Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το 16-QAM σχήμα διαμόρφωσης ο συνολικός αριθμός λαθών αυξάνεται περαιτέρω στο σύστημα ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπάρχουν άλλα κανάλια τα οποία να συνδιαδίδονται με το σήμα που μελετάται. Συγκεκριμένα για ρυθμούς μετάδοσης στα 56GBaud και με ισχύ 2mW είναι αδύνατη η αξιόπιστη μετάδοση ακόμα και σε ζεύξη με μόνο ένα τμήμα ίνας. Η πλέον αξιόπιστη μετάδοση επιτυγχάνεται με ρυθμό μετάδοσης στα 28GBaud με ισχύ εισόδου στο 0dBm (1mW) αλλά για ζεύξεις με λιγότερα από 4 τμήματα ίνας. Επίσης, ο σηματοθορυβικός λόγος για αξιόπιστη μετάδοση σε ζεύξη με 4 τμήματα ίνας πρέπει να ξεπερνά τα 36dB.



Σχήμα 5-8: 16-QAM, 2 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας

Το σχήμα 5-8 καταδεικνύει το γεγονός ότι η μετάδοση ενός WDM σήματος το οποίο διαμορφώνεται με 16-QAM δεν καθίσταται δυνατή για κανένα συνδυασμό τιμών των μεταβλητών που μπορεί να μεταβληθεί από τον κόμβο αποστολέα. Παρατηρείται ότι ακόμη και στην περίπτωση των 2 καναλιών όλες οι τιμές της συνάρτησης $BER = f(SNR)$ είναι πάνω από το κατώφλι όπου καθίσταται δυνατή η ανάκτηση του σήματος. Συνεπώς το σχήμα 16-QAM δεν είναι δυνατόν να υποστηρίξει ένα σύστημα WDM με τις δεδομένες τιμές των παραμέτρων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

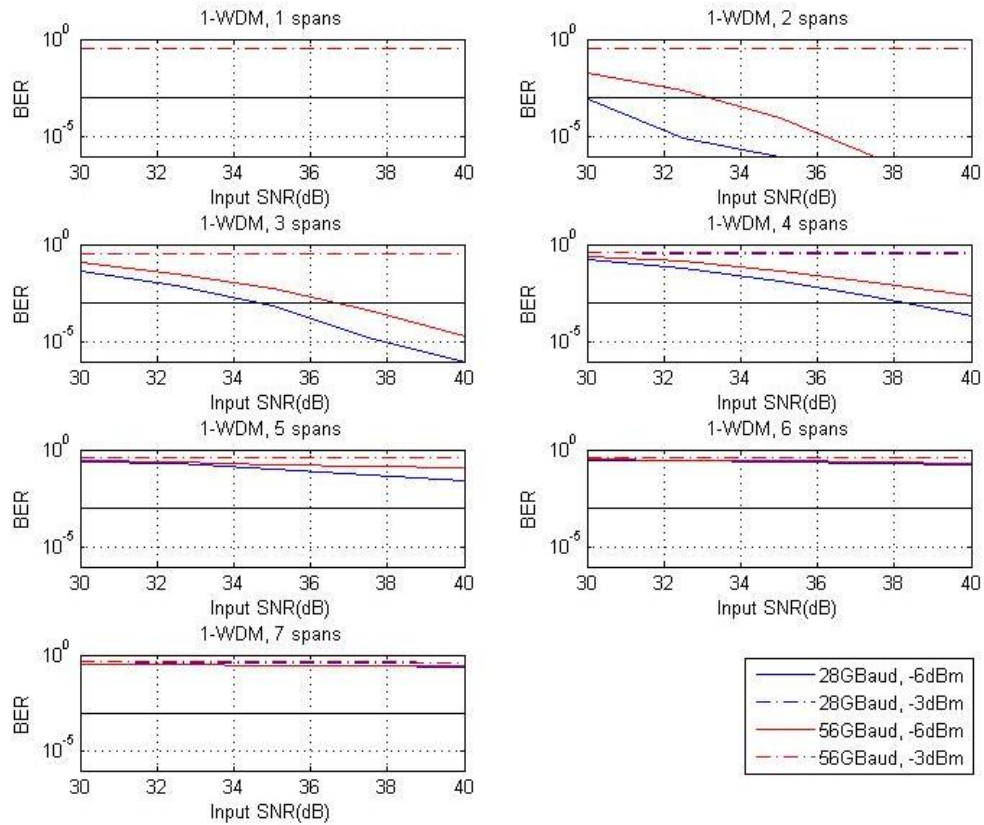
Τέλος, στο σχήμα 5-9 επιβεβαιώνεται η προηγούμενη παρατήρηση, μέσω της τρισδιάστατης επιφάνειας του BER συναρτήσει του πλήθους των καναλιών και των τμημάτων ίνας της ζεύξης.



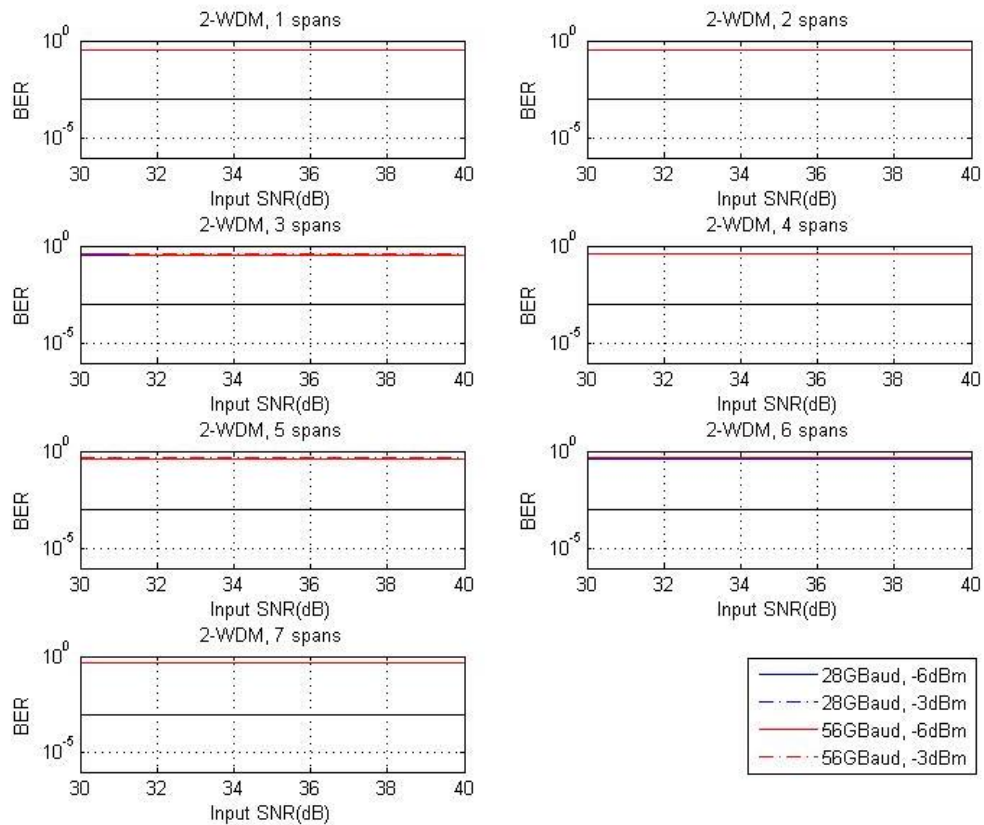
Σχήμα 5-9: 16-QAM, SNRin=35dB: BER συναρτήσει πλήθους τμημάτων ίνας και αριθμού καναλιών WDM

32-QAM

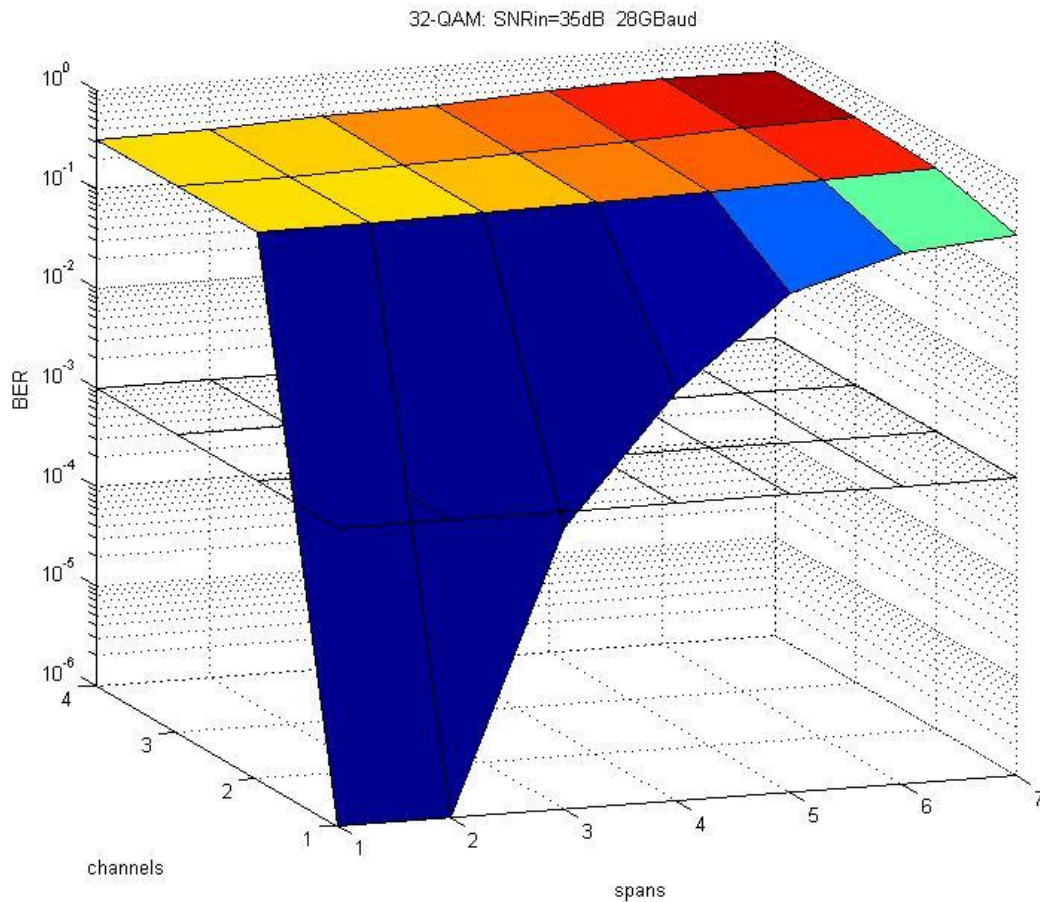
Και για το συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης ακολουθείται η ίδια συλλογιστική όπως και για τα σχήματα QPSK και 16-QAM. Οι γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 5-10 και 5-11 παρουσιάζουν την ομοιότητα της συμπεριφοράς του σχήματος 32-QAM με αυτό του 16-QAM. Και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι το σχήμα αυτό δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση σήματος σε ένα σύστημα WDM (Σχήμα 5-11). Επιπροσθέτως, δυσχεραίνεται περαιτέρω και η μετάδοση στην περίπτωση ενός μόνο καναλιού (Σχήμα 5-10). Η μετάδοση καθίσταται αξιόπιστη και για μεγάλο εύρος τιμών σηματοθορυβικού λόγου μόνο σε περιπτώσεις ζεύξεων με μόλις 2 τμήματα ίνας, ενώ η τιμή του BER ξεπερνά την τιμή του κατωφλίου σε όλες τις άλλες περιπτώσεις. Ενδεικτικό της συμπεριφοράς αυτής, είναι και το τρισδιάστατο διάγραμμα του σχήματος



Σχήμα 5-10: 32-QAM, 1 κανάλι WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας



Σχήμα 5-11: 32-QAM, 2 κανάλια WDM: BER συναρτήσει αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας

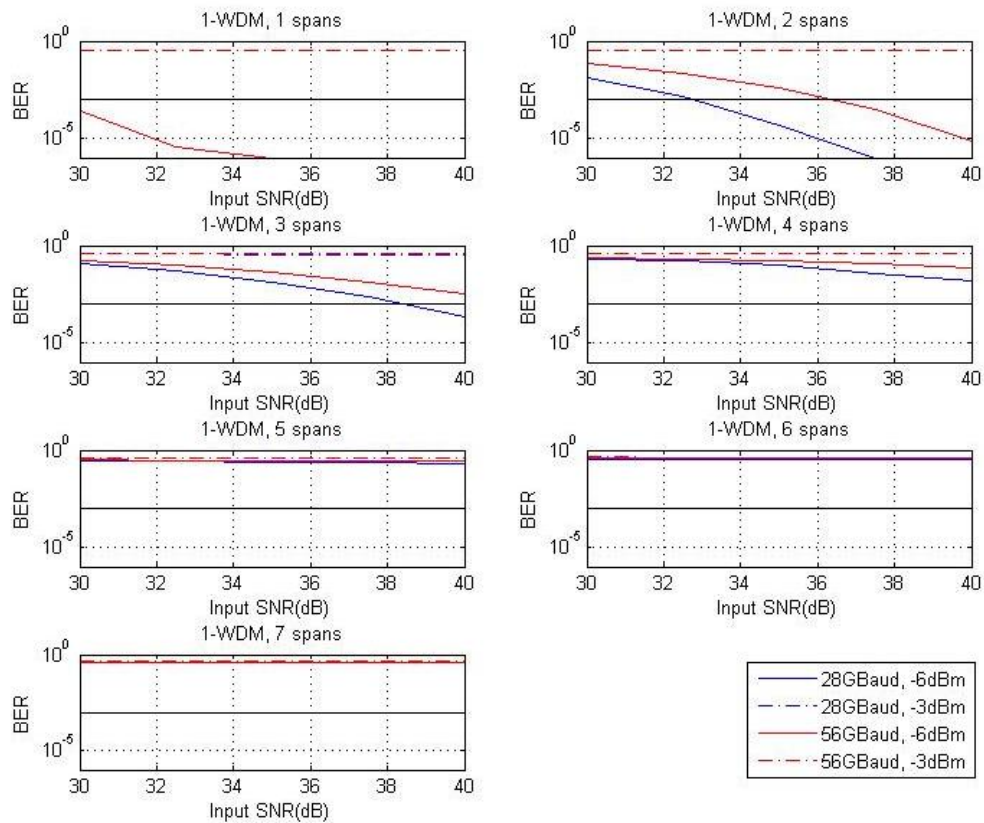


Σχήμα 5-12: 32-QAM, SNRin=35dB: BER συναρτήσει πλήθους τμημάτων ίνας και αριθμού καναλιών WDM

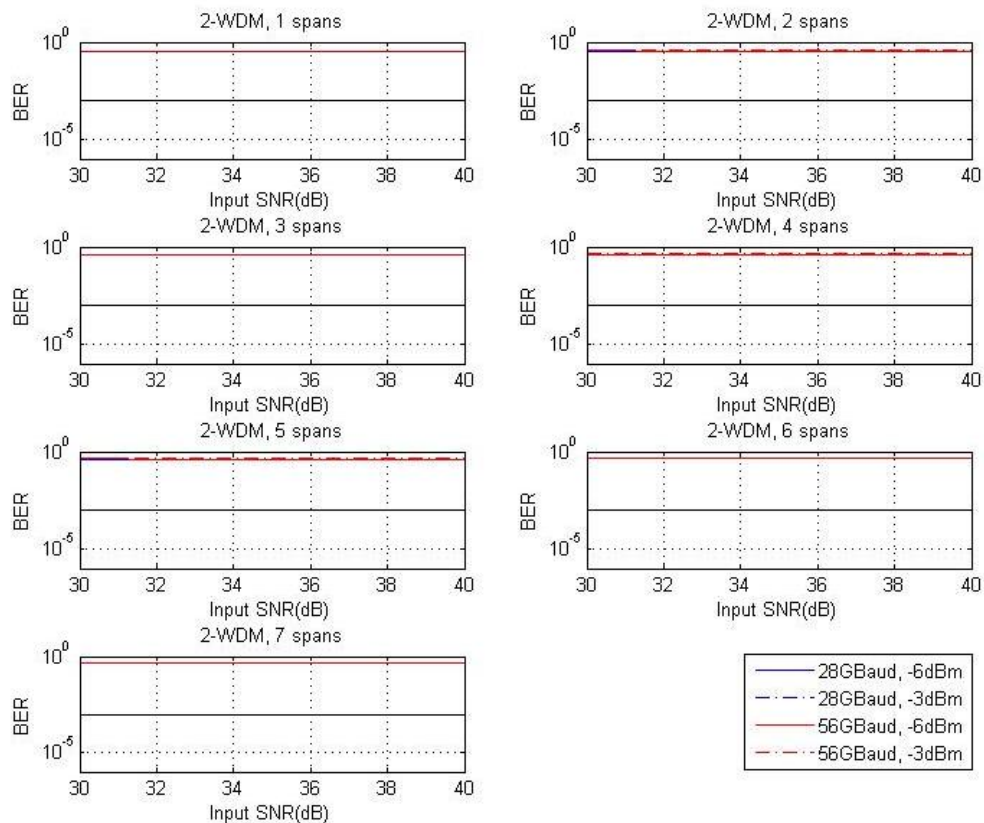
64-QAM

Το τελευταίο σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις είναι το 64-QAM. Η συμπεριφορά του σήματος και της ποιότητας μετάδοσής του ακολουθεί τις περιπτώσεις των 16-QAM και 32-QAM. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα σχήματα που ακολουθούν, ούτε το συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης είναι δυνατόν να υποστηρίξει μετάδοση σε σύστημα WDM (Σχήμα 5-14) καθώς η τιμή του BER ξεπερνά σε κάθε περίπτωση την τιμή κατωφλίου του 10^{-3} .

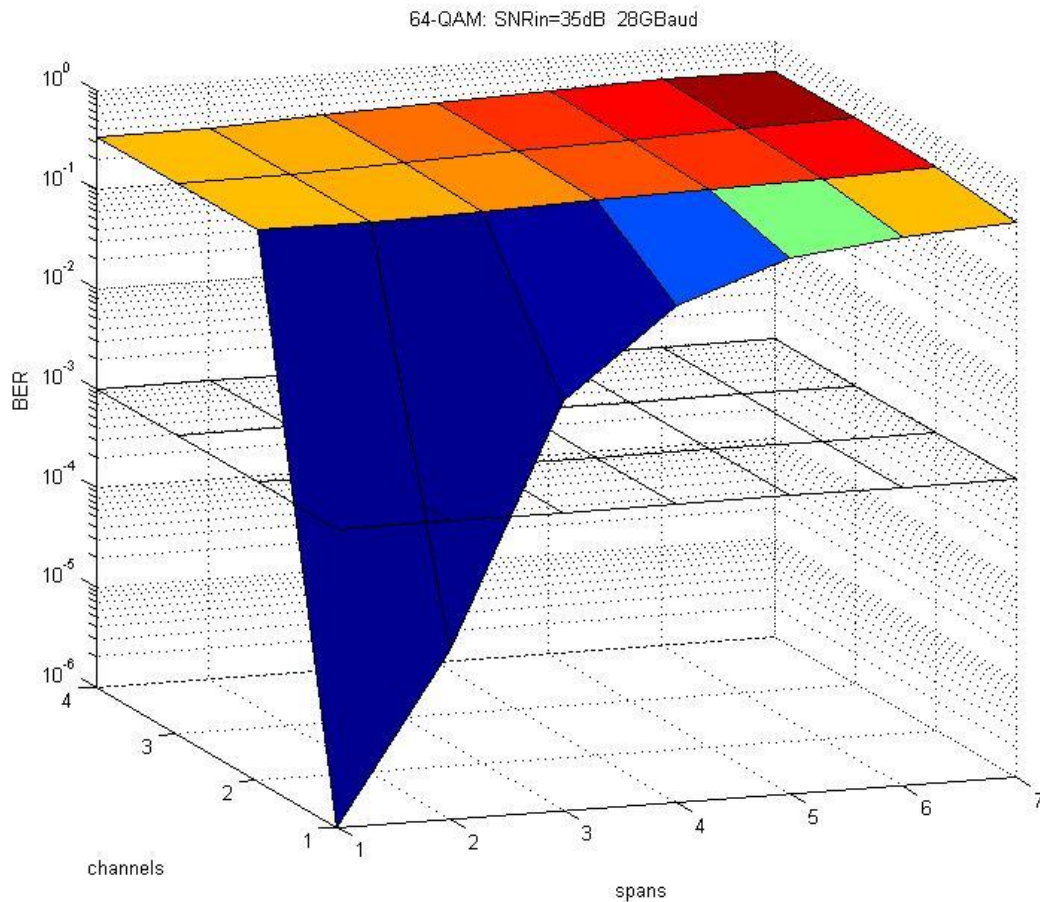
Τέλος, η μετάδοση ενός μόνο καναλιού είναι εφικτή μόνο σε πολύ μικρές αποστάσεις (ζεύξεις με το πολύ 2 τμήματα ίνας) για χαμηλό ρυθμό συμβόλων και μικρή ισχύ. Επίσης, ο σηματοθορυβικός λόγος για τα σενάρια αυτά μπορεί να λάβει τιμές από μικρό εύρος υψηλών τιμών (πάνω από 35dB)



Σχήμα 5-13: 64-QAM, 1 κανάλι WDM: BER συναρτήσεις αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας



Σχήμα 5-14: 64-QAM, 2 κανάλια WDM: BER συναρτήσεις αρχικού SNR για διαφορετικό πλήθος τμημάτων ίνας



Σχήμα 5-15: 64-QAM, SNR_{in}=35dB: BER συναρτήσει πλήθους τμημάτων ίνας και αριθμού καναλιών WDM

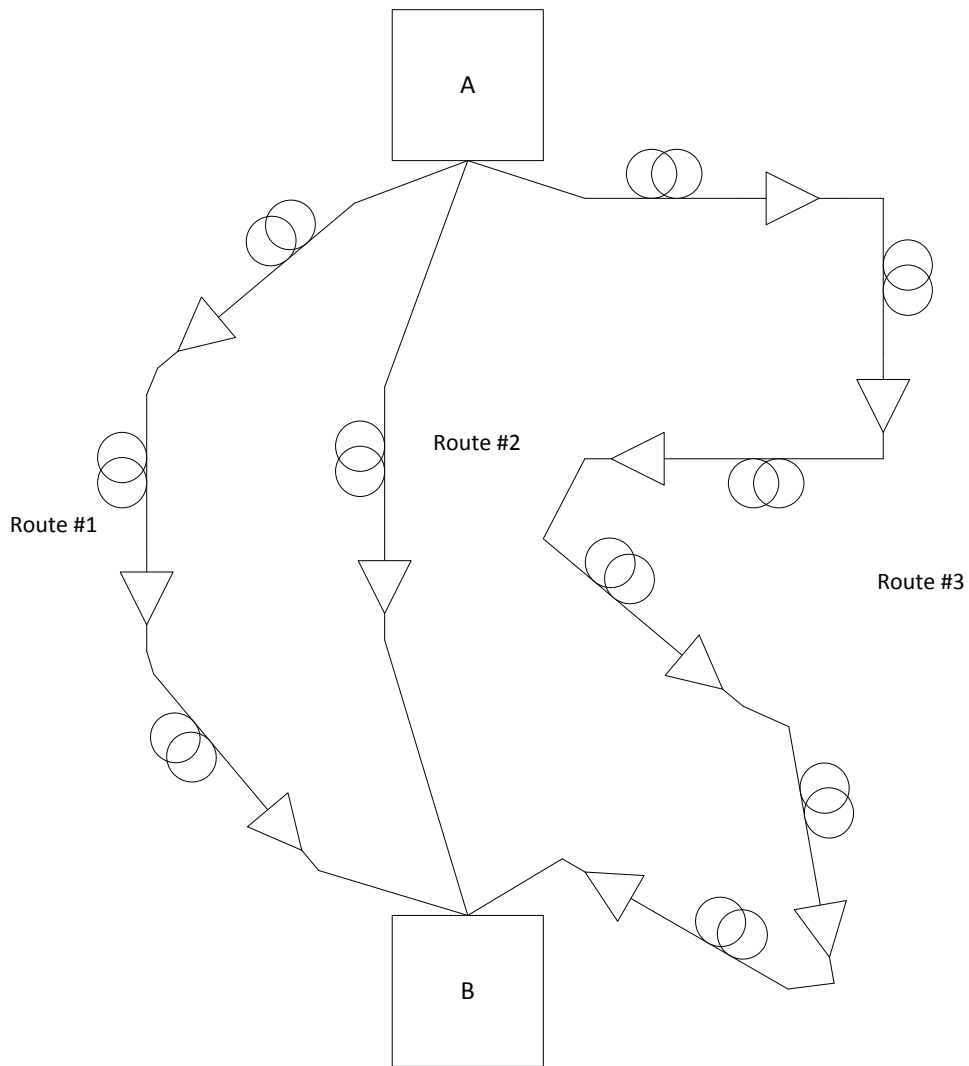
5.2. Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου

Για να γίνει περισσότερο αντιληπτή η χρησιμότητα της μεθόδου παρουσιάζεται στη συνέχεια ένα υποθετικό σενάριο όπου απαιτείται η μετάδοση πληροφορίας μέσω ενός οπτικού δικτύου από τον πομποδέκτη Α στον πομποδέκτη Β.

Στο σενάριο αυτό υπάρχουν τρεις εναλλακτικές διαδρομές όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-16. Οι διαδρομές αυτές έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς:

- το πλήθος τμημάτων ίνας που τις αποτελούν,
- τον αριθμό των καναλιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη ζεύξη (σύστημα WDM)
- το σηματοθορυβικό λόγο στην αρχή της κάθε ζεύξης.

Με τη βοήθεια της μεθόδου είναι δυνατός ο προσδιορισμός των υπόλοιπων χαρακτηριστικών του προς μετάδοση σήματος ώστε να ικανοποιείται συγκεκριμένη ποιότητα μετάδοσης (δηλαδή BER). Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά είναι το σχήμα διαμόρφωσης, η ισχύς εισόδου και ο ρυθμός συμβόλων.



Σχήμα 5-16: Τοπολογία σεναρίου

Σκοπός είναι η μετάδοση 300000 συμβόλων από τον κόμβο A στον κόμβο B μέσω της διαδρομής όπου επιτυγχάνεται BER της τάξης του 10^{-3} με όσο το δυνατόν αποδοτικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Τα χαρακτηριστικά των τριών διαδρομών είναι τα ακόλουθα:

Διαδρομή #1

- 3 τμήματα ίνας
- Αρχικό SNR: 36dB
- Πλήθος καναλιών WDM: 1

Διαδρομή #2

- 1 τμήμα ίνας
- Αρχικό SNR: 35dB
- Πλήθος καναλιών WDM: 3

Διαδρομή #3

- 6 τμήματα ίνας
- Αρχικό SNR: 40dB
- Πλήθος καναλιών WDM: 3

Επόμενο βήμα είναι η εκτέλεση της μεθόδου για κάθε διαδρομή.

Διαδρομή #1

Η πρώτη διαδρομή υποστηρίζει μετάδοση μόνο ενός καναλιού, επομένως, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι αρχικά δυνατή η μετάδοση με όλα τα σχήματα διαμόρφωσης. Για αρχικό SNR ίσο με 36dB και 3 τμήματα ίνας, ελέγχουμε στα διαγράμματα της προηγούμενης ενότητας σε ποιες περιπτώσεις το BER έχει τιμή κάτω από 10^{-3} .

Για σχήμα διαμόρφωσης 64-QAM δεν υπάρχει κανένας συνδυασμός ρυθμού συμβόλων και ισχύος που να ικανοποιεί την απαίτηση $BER \leq 10^{-3}$ (Σχήμα 5-13)

Για σχήμα διαμόρφωσης 32-QAM παρατηρώντας το σχήμα 5-10 είναι εμφανές ότι για ρυθμό συμβόλων 28GBaud με ισχύ 0dBm (1mW) επιτυγχάνεται το επιθυμητό BER. Σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμός μετάδοσης σε bit ανά δευτερόλεπτο είναι:

$$bit\ rate = 28 \frac{Gsymbol}{sec} \times 5 \frac{bit}{symbol} = 140Gbps$$

Για σχήμα διαμόρφωσης 16-QAM από το σχήμα 5-7 προκύπτει ότι για ρυθμούς συμβόλων 28GBaud και 56GBaud με ισχύ 0dBm (1mW) επιτυγχάνεται το επιθυμητό BER. Επιλέγεται όμως ο υψηλότερος ρυθμός καθώς είναι ζητούμενη η αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των πόρων. Άρα, στην περίπτωση ο ρυθμός μετάδοσης σε bit ανά δευτερόλεπτο είναι:

$$bit\ rate = 56 \frac{Gsymbol}{sec} \times 4 \frac{bit}{symbol} = 224Gbps$$

Τέλος, για σχήμα διαμόρφωσης QPSK από το σχήμα 5-2 προκύπτει πως όλοι οι συνδυασμοί ισχύων και ρυθμών συμβόλων ικανοποιούν το απαιτούμενο BER. Άρα, με δεδομένη την απαίτηση για μέγιστη αποδοτικότητα επιλέγεται ο συνδυασμός των 56GBaud με ισχύ 0dBm (1mW). Ο ρυθμός μετάδοσης σε bit ανά δευτερόλεπτο είναι:

$$bit\ rate = 56 \frac{Gsymbol}{sec} \times 2 \frac{bit}{symbol} = 112Gbps$$

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, ο συνδυασμός σχήματος διαμόρφωσης – ρυθμού συμβόλων – ισχύος που επιλέγεται για τη διαδρομή 1 είναι:

16-QAM – 56GBaud – 0dBm (1mW)

Διαδρομή #2

Στη διαδρομή #2 παρατηρείται ότι η μετάδοση πρέπει να γίνει σε σύστημα WDM με 3 κανάλια. Αυτό σημαίνει, με βάση τα αποτελέσματα της ενότητας 5.1 ότι το μόνο σχήμα διαμόρφωσης που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί είναι το QPSK. Επομένως, με τη βοήθεια του σχήματος 5-4 προκύπτει ότι για κάθε συνδυασμό ρυθμού συμβόλων και ισχύος επιτυγχάνεται η ζητούμενη ποιότητα μετάδοσης (BER). Ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό με πριν για μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας ο καταλληλότερος συνδυασμός για τη διαδρομή αυτή είναι:

QPSK – 56GBaud – 0dBm (1mW)

Για τον συνδυασμό αυτό ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων προκύπτει ίσος με:

$$\text{bit rate} = 56 \frac{\text{Gsymbol}}{\text{sec}} \times 2 \frac{\text{bit}}{\text{symbol}} = 112 \text{Gbps}$$

Διαδρομή #3

Όπως και στη διαδρομή 2 έτσι και σε αυτή λόγω της μετάδοσης WDM είναι δυνατή η χρησιμοποίηση μόνο του σχήματος QPSK. Όμως, παρατηρώντας και πάλι το σχήμα 5-4, γίνεται αντιληπτό πως κανένας συνδυασμός ρυθμού μετάδοσης και ισχύος δεν καλύπτει την απαίτηση για $BER \leq 10^{-3}$. Συνεπώς, η διαδρομή αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δεδομένη μετάδοση καθώς δεν υποστηρίζει τις απαιτήσεις για την ποιότητα μετάδοσης.

Συγκρίνοντας πλέον τις 2 δυνατές διαδρομές για το παρόν σενάριο, επιλέγεται τελικά η διαδρομή 1 καθώς η μετάδοση ολοκληρώνεται ταχύτερα έχοντας την ίδια αξιοπιστία με τη διαδρομή 2.

Η μέθοδος είναι πλέον σε θέση να ενημερώσει είτε τον τοπικό ελεγκτή του πομποδέκτη είτε το στρώμα ελέγχου του δικτύου για την διαδρομή που προτείνεται να ακολουθηθεί καθώς και για τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το προς μετάδοση σήμα.

Σημείωση:

Το παραπάνω σενάριο παρουσιάζει έναν τρόπο με τον οποίο αξιοποιούνται τα αποτελέσματα της μεθόδου που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Η μέθοδος αυτή, όμως, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και με αντίστροφο τρόπο. Αυτό θα σήμαινε ότι είναι δυνατόν να εξαχθούν αποτελέσματα για τη βέλτιστη ποιότητα μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί σε μία μετάδοση έχοντας ως δεδομένα όλα τα χαρακτηριστικά του σήματος αλλά και της ζεύξης.

6. Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα

6.1. Σύνοψη και Συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε και στα πρώτα κεφάλαια της εργασίας τα ευέλικτα οπτικά δίκτυα θα αποτελέσουν την εξέλιξη των στατικών δικτύων που βρίσκονται επί του παρόντος σε πλήρη λειτουργία. Η προσθήκη ευφυΐας σε όλα τα δομικά στοιχεία που συνιστούν το δίκτυο είναι ο καθοριστικότερος παράγοντας που μπορεί να συμβάλλει στη μετάβαση αυτή. Εξαίρεση δεν θα μπορούσαν να αποτελούν οι οπτικοί πομποδέκτες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε μία μέθοδος υπολογισμού της ποιότητας μετάδοσης σε μία οπτική ζεύξη. Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί τις δυνατότητες ευελιξίας ενός οπτικού πομποδέκτη όπως η εναλλαγή διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης, ρυθμών μετάδοσης συμβόλων και ισχύος καθώς και τις δυνατότητες της Παρακολούθησης της Οπτικής Επίδοσης ενός οπτικού συστήματος επικοινωνίας. Τελικός στόχος της είναι ο προσεγγιστικός υπολογισμός της ποιότητας μετάδοσης μιας ζεύξης δεδομένων χαρακτηριστικών με την εκμετάλλευση της σχέσης αναλογίας μεταξύ της ποιότητας μετάδοσης με τη μετρική του BER.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αυτή ώστε να προσομοιωθούν διαφορετικά σενάρια μετάδοσης επιβεβαιώθηκαν τα διάφορα trade-offs που υπάρχουν σε ένα οπτικό σύστημα επικοινωνίας. Η ανάγκη για μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο ώστε να αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης, η μείωση της ποιότητας μετάδοσης με την αύξηση του μήκους μετάδοσης και η ανάγκη για μεγαλύτερη ισχύ όσο αυξάνεται η τάξη διαμόρφωσης είναι μερικά από αυτά. Επιπλέον, έγινε αντιληπτή η επίδραση της ισχύος του σήματος όταν για τη μετάδοση χρησιμοποιούνται σχήματα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης μέσω της μεγαλύτερης παραμόρφωσης που υφίσταται το ίδιο το σήμα. Σημειώνεται, τέλος, ότι οι παράμετροι και οι συνθήκες προσομοίωσης επιλέχτηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνονται εύκολα διακριτά τα διαφορετικά επίπεδα της ποιότητας μετάδοσης.

6.2. Περαιτέρω Έρευνα

Μέσω της προτεινόμενης μεθόδου είναι δυνατή η προσθήκη και περαιτέρω διαδικασιών και δυνατοτήτων ώστε να ενισχυθεί η ευελιξία ενός οπτικού πομποδέκτη. Η εφαρμογή αλγορίθμων παρακολούθησης τόσο του σηματοθορυβικού λόγου της ζεύξης όσο και της μη-γραμμικής φάσης του σήματος μπορεί να καταστήσει δυνατό τον υπολογισμό της ποιότητας μετάδοσης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, η δυνατότητα υλοποίησης του προτεινόμενου αλγορίθμου σε ταχείς μικροεπεξεργαστές (πχ FPGA) είναι ικανή να προσφέρει την ευκολία της άμεσης και ζωντανής (real time) παρακολούθησης της οπτικής επίδοσης του δικτύου με χρονικά και οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

Τέλος, προσδίδοντας στον οπτικό πομποδέκτη την ικανότητα εφαρμογής της μεθόδου και των προτάσεων της χωρίς τη συνεχή παρέμβαση του στρώματος ελέγχου, η διαχείριση του δικτύου γίνεται ευκολότερη. Οι πόροι του συστήματος χρησιμοποιούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους για

διακίνηση πληροφορίας χρηστών περιορίζοντας στο ελάχιστο την πληροφορία ελέγχου που ανταλλάσσεται μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Αναφορές – Βιβλιογραφία

- [1] Cisco VNI 2012, <http://www.cisco.com>
- [2] P.G. Agrawal, “Fiber Optic Communication System, Second edition,” John Wiley & Sons, 1997
- [3] “D4.2 Optical performance monitoring techniques for heterogeneous transmission systems”, CHRON, <http://www.ict-chron.eu>
- [4] G. Kramer “Fundamentals of Coding and Modulation, Tutorial at ECOC 2009, Vienna, Austria”
- [5] M. Jinno, T. Ohara, Y. Sone, A. Hirano, O. Ishida, M. Tomizawa, “Introducing Elasticity and Adaptation into the Optical Domain toward More Efficient and Scalable Optical Transport Networks”, NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation
- [6] B. Teipen, M. Eiselt, K. Grobe, J.P. Elbers, “Adaptive Data Rates for Flexible Transceivers in Optical Networks”, Journal of Networks, vol. 7, no. 5, May 2012
- [7] W. Wei, C. Wang, J. Yu, “Cognitive Optical Networks: Key Drives, Enabling Techniques and Adaptive Bandwidth Services”, Topics in Optical Communications, IEEE Communications Magazine, January 2012
- [8] C.V. Saradhi, “Physical Layer Impairment Aware Routing (PLIAR) in WDM Optical Networks: Issues and Challenges”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 11, no. 4, Fourth Quarter 2009
- [9] Η. Αβραμόπουλος, “Σημειώσεις και Διαφάνειες για το μάθημα Φωτονική Τεχνολογία”, photonics.ece.ntua.gr/announcements.html
- [10] Εικόνα από http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber
- [11] Εικόνα από <http://www.globalspec.com/reference/21710/160210/chapter-2-13-2-chromatic-dispersion>
- [12] Εικόνα από <http://www.tuhh.de/okt/Forschung/Pmd/>
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Signal-To-Noise_Ratio
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/Error_vector_magnitude
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Friis_formulas_for_noise

- [16] M. Malekiha, "Analysis of Non Linear Effects and their Mitigation in Fiber-Optic Communication Systems", 2011 Open Access Dissertations and Theses, Paper 6037
- [17] E. Ip, J.M. Kahn, "Compensation of Dispersion and Nonlinear Impairments Using Digital Backpropagation", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 20, October 2008
- [18] Z. Dong, A.P.T. Lau, C. Lu, "OSNR Monitoring for QPSK and 16-QAM Systems in presence of Fiber Nonlinearities for Digital Coherent Receivers", *Optics Express*, vol. 20, no. 17, August 2012
- [19] K-P. Ho, J.M. Kahn, "Electronic Compensation Technique to Mitigate Nonlinear Phase Noise", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 3, March 2004
- [20] C. Chang, "Investigation of Nonlinear Effects in 100Gbit/s Optical 16QAM Transmission Systems
- [21] C. Behrens, R.I. Killey, S.J. Savory, M. Chen, P. Bayvel, "Nonlinear Distortion in Transmission of Higher Order Modulation Formats", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no.15, August 2010
- [22] C-Y. Lin, R. Asif, M. Holtmannspoetter, B. Schmauss, "Nonlinear mitigation using carrier phase estimation and digital backward propagation in coherent QAM transmission", *Optics Express*, vol. 20, no. 26, December 2010
- [23] B. Nebendahl, R. Schmogrow, T. Dennis, A. Josten, D.Hillerkuss, S. Koenig, J. Meyer, M. Dreschmann, M. Winter, M. Huebner, W. Freude, C. Koos, J. Leuthold, "Quality Metrics in Optical Modulation Analysis: EVM and its relation to Q-factor, OSNR and BER", *ACP Technical Digest* 2012
- [24] K. Roberts, C. Laperle, "Flexible Transceivers", *ECOC Technical Digest*, 2012
- [25] R. Schmogrow, D.Hillerkuss, M. Dreschmann, M. Huebner, M. Winter, J. Meyer, B. Nebendahl, C. Koos, J. Becker, W. Freude, J. Leuthold, "Real-Time Software Defined Multiformat Transmitter Generating 64QAM at 28GBaud", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no.21, November 2010
- [26] M. Jinno, H. Takahara, Y. Sone, K. Yonenaga, A. Hirano, "Multiflow Optical Transponder for Efficient Multilayer Optical Networking", *IEEE Communications Magazine*, Topics in Optical Communications, May 2012
- [27] S. Gringeri, B. Basch, V. Shukla, R. Egorov, T. J. Xia, "Flexible Architectures for Optical Transport Nodes and Networks", *IEEE Communications Magazine*, 100 Gigabit Ethernet, July 2012

[28] X. Zhou, E. Mateo, G. Li, “Fiber Nonlinearity Management – from Carrier Perspective”, OSA/OFC/NFOEC 2011

[29] T. Pfau, S. Hoffmann, R. Noe, “Hardware-Efficient Coherent Digital Receiver Concept with Feedforward Carrier Recovery for M-QAM Constellations”, Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 8, April 2009

Παράρτημα Α – Κώδικες MATLAB ®

Κώδικας Προσομοίωσης – Κεφάλαιο 5

```
close all; clear all; clc;

% Simulation Parameters
noSyms = 300000;           % Number of symbols to simulate
M = [4 16 32 64];        % Modulation order (M=4 for QPSK, M=16 for 16QAM,
                          % M=64 for 64QAM, etc.)
num_chan = 1:4;          % Number of channels in the fiber (WDM system)
snr = 30:2.5:40;         % Input SNR
num_spans = 1:7;         % Number of spans in the link
baudRate = 1:2;          % Baud Rate in multiples of 28GBaud;

BER = zeros(length(M),length(num_chan),2,...
             length(snr),length(num_spans),length(baudRate));

%% Modulation Format for-loop
for i=1:length(M)
    [IQin,DiffSymsIN,DiffbitsIN,demodObj,modObj] = diffQAM_mod(noSyms,M(i));

    %% WDM Channels for-loop
    for j=1:length(num_chan)

        %% Launch Power for-loop
        Pin = launch_power(M(i));
        for k=1:length(Pin)
            % Normalisation of launched power for each modulation format
            scale = modnorm(IQin,'avpow',Pin(k)/1000);
            IQin = scale*IQin;

            %% Input SNR for-loop
            for l=1:length(snr)
                % Add noise to modulated QAM signal to simulate transmission
                % in a noisy AWGN channel
                IQawgn = awgn(IQin,snr(l),'measured');

                %% Number of Spans for-loop
                for m=1:length(num_spans)
                    % Non-linear phase noise parameters
                    Etransm = IQawgn;
                    snr_trans = snr(l);
                    alpha = 0.22;           % fiber attenuation coefficient
                    fib_len = 80;           % fiber length
                    fib_loss = alpha*fib_len;
                    gain = 20;              % gain of each amplifier (dB)
                    Gdb = gain-fib_loss;
                    NF = 6;                 % noise figure for each amplifier (dB)
                    gamma = 3;
                    Leff = 20;

                    [NLphase,SNRdeg] = Non_linear_phase_wdm...
                        (Etransm, snr_trans, gamma, Leff, num_chan(j),...
                         num_spans(m), Gdb, NF, noSyms);

                    %% Baud Rate for-loop
                    for n=1:length(baudRate)
                        SNRdeg(num_spans(m)) = SNRdeg(num_spans(m)) - (n-1)*3;

                        % Add gaussian noise due to multiple spans
                        IQawgn = awgn(IQawgn,SNRdeg(num_spans(m)),'measured');

                        % Add non-linear phase noise
                        IQawgn = IQawgn.*exp(1i*NLphase);

                        % Phase Recovery, Blind Phase Search algorithm
```

```

IQawgn_norm = IQawgn*(1/scale);
Zk = IQawgn_norm;
N = 40;
plotOut = 0;
Bfinal = 64;
B1 = 64;
Bfactor = Bfinal/B1;
stage = 1;
UW = 1;
test_phs = ((0:Bfinal-1)/Bfinal)*(pi/2);
test_phs_idx = 1:Bfactor:Bfinal;
[test_phs_sel Xk_sell mindk2_idx mindk2_idx2UW] = ...
    mStageBPS_v2(M(i), Zk, N, B1, Bfinal, test_phs,...
    test_phs_idx, stage, UW, plotOut);
IQout = Xk_sell;

[DiffSymsOUT,DiffbitsOUT] = ...
    diffQAM_demod(M(i), IQout, demodObj);

% Calculate bit error rate (BER)
nbits = size(DiffbitsOUT,1)*log2(M(i));
errB = abs(DiffbitsOUT - ...
    DiffbitsIN(1:size(DiffbitsOUT,1),:));
BER(i,j,k,l,m,n) = length(find(errB))/nbits;

end

end

end

end

end

end

```