

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Συγκριτική μελέτη ψηφιακών διαμορφώσεων σε οπτικά δίκτυα WDM-  
PON»



Του φοιτητή  
Τόσιου Νικολάου  
Αρ. Μητρώου: 52026Μ

Επιβλέπων  
Ι. Μαρμόκος

Ημερομηνία 16/10/2022

Τίτλος Δ.Ε. Συγκριτική μελέτη ψηφιακών διαμορφώσεων σε οπτικά δίκτυα WDM-PON

Κωδικός Δ.Ε. 21135

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Νικόλαος Τόσιος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Ιωάννης Μαρμόκος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε 16/10/2022

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 29/02/2024

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα» στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Τόσιου Νικολάου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

## *«Ευχαριστίες»*

*Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγητή μου κ. Ιωάννη Μαρμόκο, ο οποίος μου εμπιστεύτηκε το συγκεκριμένο θέμα και με καθοδηγούσε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου.*

*Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία μου στάθηκε σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού μου προγράμματος, με υποστήριξε και με ενθάρρυνε σε όλα μου τα βήματα.*

*Τέλος δεν θα μπορούσα να αφήσω τους φίλους μου και συναδέλφους οι οποίοι με υποστήριξαν, με βοήθησαν με όποιο τρόπο μπόρεσαν στην μέχρι τώρα πορεία μου.*

## Πρόλογος

Η εξέλιξη της επικοινωνίας είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα της εποχής μας και παίζει πλέον καθοριστικό ρόλο στην καθημερινότητα μας και στον τρόπο ζωής μας, έχοντας συμβάλει θετικά σε πολλούς τομείς όπως οι επιστήμες, το εργασιακό περιβάλλον, η ανάγκη για ανθρώπινη επικοινωνία αλλά και η ψυχαγωγία. Οι ρυθμοί αυτής της εξέλιξης πλέον στις μέρες μας είναι ραγδαίοι τόσο για τους κοινούς χρήστες αυτής της τεχνολογίας, όσο και για αυτούς που εργάζονται επαγγελματικά σ' αυτόν τον χώρο, με αποτέλεσμα η συνεχής γνώση και ενημέρωση να καθίσταται αναγκαία. Κίνητρο για ανάληψη του συγκεκριμένου θέματος ήταν σίγουρα αφενός μεν η επαγγελματική μου εξέλιξη, μιας και εργάζομαι ήδη στον χώρο των τηλεπικοινωνιών, αφετέρου δε η ανάγκη για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της μετάδοσης πληροφορίας μέσω των οπτικών δικτύων, τα οποία αφορούν το μέλλον των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων καθώς και ενημέρωσης των σύγχρονων τρόπων αυτής. Μέσα από το συγκεκριμένο θέμα θα μπορέσω να διευρύνω τις γνώσεις μου πάνω στο αντικείμενο της δουλείας μου με τελικό αποτέλεσμα να μπορώ να κατανοώ καλύτερα τα προβλήματα που καλούμαι να αντιμετωπίσω και να βρίσκω λύσεις πάνω σ' αυτά.

## Περίληψη

Με την αυξανόμενη ζήτηση για ευρυζωνική πρόσβαση υψηλής ταχύτητας, οι αρχιτεκτονικές πολυπλεξίας-παθητικού οπτικού δικτύου διαίρεσης μήκους κύματος (WDM-PON) έχουν αναδειχθεί ως πολλά υποσχόμενες λύσεις για την παροχή υπηρεσιών οπτικής επικοινωνίας υψηλής χωρητικότητας και κλιμάκωσης στους τελικούς χρήστες. Στα WDM-PON, η επιλογή της ψηφιακής διαμόρφωσης διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της απόδοσης του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της απόδοσης εύρους ζώνης, της ποιότητας του σήματος και της οικονομικής απόδοσης. Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια συγκριτική μελέτη των διαφορετικών ψηφιακών διαμορφώσεων που χρησιμοποιούνται σε οπτικά δίκτυα WDM-PON, εστιάζοντας στα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς και τις διαφορές τους. Η παρούσα μελέτη διερευνά έξι διαφορετικές ψηφιακές διαμορφώσεις σε σύστημα πολυπλεξίας 16 καναλιών. Οι διαμορφώσεις είναι οι εξής : RZ (Return to Zero), NRZ (non-Return-to-Zero), SCRZ(Carrier-Suppressed-Return-to-Zero), DuoBinary, DPSK (Differential-Phase-Shift-Keying) και DQPSK (Differential-Quadrature-Phase-Shift-Keying). Κάθε διαμόρφωση αξιολογείται με βάση βασικές μετρήσεις απόδοσης, όπως η απόσταση μετάδοσης και ο προϋπολογισμός ισχύος. Επιπλέον, ο αντίκτυπος των ψηφιακών διαμορφώσεων στην πολυπλοκότητα, το κόστος και την επεκτασιμότητα του συστήματος αναλύεται για να παρέχει πληροφορίες σχετικά με πρακτικά ζητήματα ανάπτυξης. Μέσω της ανάλυσης που βασίζεται σε προσομοίωση και της πειραματικής επικύρωσης, η συγκριτική μελέτη υπογραμμίζει τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία των διαφορετικών αυτών ψηφιακών διαμορφώσεων στα οπτικά δίκτυα WDM-PON. Τέλος εξετάζει πώς παράγοντες όπως η τοπολογία του δικτύου και οι απαιτήσεις υπηρεσιών επηρεάζουν την επιλογή της ψηφιακής διαμόρφωσης και τις επιπτώσεις της για την απόδοση του συστήματος.

# *«Comparative study of digital configurations in WDM-PON optical networks»*

*«Nikolaos Tosios»*

## **Abstract**

With the increasing demand for high-speed broadband access, Wavelength Division Multiplexing- Passive Optical Network (WDM-PON) architectures have emerged as promising solutions to deliver high-capacity and scalable optical communication services to end-users. In WDM-PONs, the choice of digital modulation plays a critical role in determining the system performance, including bandwidth efficiency, signal quality, and cost-effectiveness. This paper presents a comparative study of different digital modulations employed in WDM-PON optical networks, focusing on their advantages, limitations and trade-offs. The study investigates six different digital modulations, in a 16-channel WDM. Those are: RZ (Return to Zero), NRZ (non-Return-to-Zero), SCRZ (Carrier-Supressed-Return-to-Zero), DuoBinary, DPSK (Differential-Phase-Shift-Keying) and DQPSK (Differential-Quadrature-Phase-Shift-Keying). Each modulation is evaluated based on key performance metrics such as transmission distance and power budget. Additionally, the impact of digital configurations on system complexity, cost, and scalability is analyzed to provide insights into practical development considerations. Through simulation-based analysis and experimental validation, the comparative study highlights the strengths and weaknesses of these different modulations in WDM-PON optical networks. Finally it examines how factors such as network topology and service requirements influence the choice of modulation and its implications for system performance.

# Περιεχόμενα

## Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
Περιεχόμενα .....	7
Αρκτικόλεξα– Ακρωνύμια .....	9
1.Εισαγωγή.....	11
1.1    Στόχος διπλωματικής εργασίας .....	11
2. Οπτικά δίκτυα.....	12
2.1    Η εξέλιξη της πορείας των οπτικών δικτύων .....	12
2.2    Βασικές Διατάξεις ενός οπτικού πομπού .....	13
2.2.1    Lasers .....	13
2.2.2    Εξωτερικοί οπτικοί διαμορφωτές .....	14
2.2.3    Mach Zehnder Διαμορφωτής.....	14
2.3    Η οπτική ίνα .....	15
2.4    Η κίνηση της πληροφορίας στα οπτικά δίκτυα .....	17
2.5    Περιοριστικοί παράγοντες των οπτικών δικτύων.....	18
2.5.1    Γραμμικά φαινόμενα.....	18
2.5.2    Μη Γραμμικά φαινόμενα .....	18
3.    Η ψηφιακή διαμόρφωση σήματος.....	20
3.1    ASK (Amplitude Shift Keying).....	20
3.2    FSK (Frequency Shift Keying).....	21
3.3    PSK (Phase Shift Keying).....	22
4. Ψηφιακές διαμορφώσεις ανώτερης τάξης.....	22
4.1    NRZ (Non-Return-to-Zero).....	22
4.2    RZ (Return-to- Zero) .....	23
4.3    Carrier Suppressed Return to Zero (CSRZ) .....	25
4.4    DuoBinary (DB).....	25
4.5    DPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) .....	27
4.6    DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) .....	28
5. Προσομοίωση και συγκριτική μελέτη των τεχνικών διαμόρφωσης με την βοήθεια του Optisystem31	
5.1    Σχεδιασμός οπτικού δικτύου WDM NRZ με 16 καναλιών με την βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης Optisystem. ....	31

5.2	Προσομοίωση και συγκριτική μελέτη διαμορφώσεων οπτικού σήματος σε σύστημα WDM με λογισμικό “Optisystem” .....	39
5.2.1	Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων RZ και NRZ σε σχέση με την ισχύ .....	40
5.2.2	Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων RZ και NRZ σε σχέση με την απόσταση....	44
5.2.3	Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων CSRZ και DuoBinary σε σχέση με την ισχύ 47	
5.2.4	Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων CSRZ και DuoBinary σε σχέση με την απόσταση.....	50
5.2.5	Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων DPSK και DQPSK σε σχέση με την ισχύ...53	
5.2.6	Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων DPSK και DQPSK σε σχέση με την απόσταση.....	57
	Συμπεράσματα.....	65
	Βιβλιογραφία – Αναφορές .....	66



## **Αρκτικόλεξα– Ακρωνύμια**

<b>AWG</b>	<b>Arbitrary Waveform Generator</b>
<b>BER</b>	<b>Bit Error Rate</b>
<b>CSRZ</b>	<b>Carrier Suppressed Return to Zero</b>
<b>CWL</b>	<b>Continuous Wave Laser</b>
<b>DB</b>	<b>Duo Binary</b>
<b>DCF</b>	<b>Dispersion Compensating Fiber</b>
<b>DPSK</b>	<b>Differential Phase Shift Keying</b>
<b>DQPSK</b>	<b>Differential Quadrature Phase Shift Keying</b>
<b>MZM</b>	<b>Mach Zender Modulation</b>
<b>NRZ</b>	<b>Non Return to Zero</b>
<b>RZ</b>	<b>Return to Zero</b>
<b>SMF</b>	<b>Single Mode Fiber</b>
<b>WDM</b>	<b>Wavelength Division Multiplexer</b>
<b>PON</b>	<b>Passive Optical Network</b>
<b>EDFA</b>	<b>Erbium Doped Fiber Amplifier</b>
<b>PA</b>	<b>Power Amplifier</b>

# **A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

# 1.Εισαγωγή

Το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο θέτει το ερευνητικό πλαίσιο μέσα στο οποίο εκπονήθηκε η παρούσα διπλωματική. Στην πρώτη ενότητα περιγράφεται ο στόχος της διπλωματικής εργασίας. Στην δεύτερη ενότητα θα γίνει περιγραφή του τρόπου λειτουργίας και της δομής ενός οπτικού δικτύου, περιγράφοντας τις διατάξεις τους, καθώς και τους περιοριστικούς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να το επηρεάσουν αρνητικά. Ακολουθεί η τρίτη ενότητα όπου γίνεται περιγραφή των βασικών κατηγοριών και ο τρόπος λειτουργίας των ψηφιακών διαμορφώσεων. Στην τέταρτη ενότητα, γίνεται η παρουσίαση και η περιγραφή των έξι διαμορφώσεων (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK & DQPSK) που θα μελετηθούν στο επόμενο πειραματικό μέρος. Στην τελευταία ενότητα καταλήγουμε στο πειραματικό μέρος όπου περιγράφεται ο σχεδιασμός του οπτικού δικτύου WDM (Wavelength-Division-Multiplexer) 16 καναλιών με τις κατάλληλες ρυθμίσεις των παραμέτρων στα πλαίσια του λογισμικού “Optisystem”. Τέλος ακολουθούν οι μετρήσεις των προσομοιώσεων και η απεικόνισή τους σε σχεδιαγράμματα όπου γίνονται συγκριτικές παρατηρήσεις και αναφέρονται τα ανάλογα συμπεράσματα.

## 1.1 Στόχος διπλωματικής εργασίας

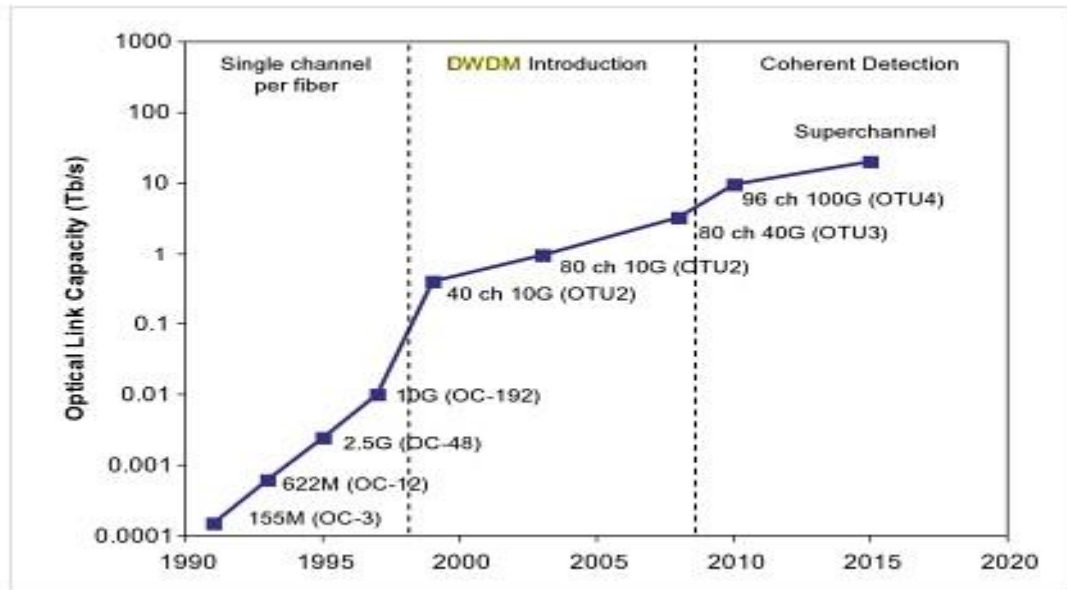
Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη και παρουσίαση έξι επιλεγμένων ψηφιακών σχημάτων διαμόρφωσης σήματος, των Return-to-Zero (RZ), non-Return-to-Zero (NRZ), Carrier-Suppressed-Return-to-Zero (CSRZ), Duo-Binary (DB), Differential Phase shift Keying (DPSK) και Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) . Αρχικά, στο Α’ θεωρητικό μέρος θα παρουσιαστούν οι διαμορφώσεις, ξεκινώντας από τις πιο απλές και καταλήγοντας σε πιο σύνθετες. Έπειτα στο Β’ πειραματικό μέρος, θα γίνει συστηματική μελέτη και σύγκριση των μεταξύ τους επιδόσεων, προσομοιώνοντας την λειτουργία τους στα πλαίσια του λογισμικού OPTISYSTEM. Εξετάζοντας τις διαφορετικές αυτές διαμορφώσεις, η μελέτη θα προσπαθήσει να αποκαλύψει τα αντίστοιχα δυνατά σημεία, αδυναμίες και μετρήσεις απόδοσης όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων, την ποιότητα του σήματος, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και την επεκτασιμότητα. Τέτοιου είδους αντίστοιχες έρευνες είναι ζωτικής σημασίας για την καθοδήγηση των σχεδιαστών δικτύων και τη βελτιστοποίηση των υποδομών WDM-PON..

## 2. Οπτικά δίκτυα

Με την εξάπλωση των οπτικών ινών, η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών υπήρξε ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό είχε σαν αντίκτυπο να βελτιωθεί ο τρόπος που γίνονται πολλές καθημερινές εργασίες αλλά και η ποιότητα και η ευκολία της επικοινωνίας των ανθρώπων μεταξύ τους ανεξαρτήτως των αποστάσεων. Σ' αυτό το κεφάλαιο θα δούμε αναλυτικά τι είναι τα οπτικά δίκτυα, από τι αποτελούνται και ποια είναι τα χαρακτηριστικά τους που τα καθιστά πρωταγωνιστές στην εξέλιξη των επικοινωνιών. Ακόμη θα μελετήσουμε τι είναι η διαμόρφωση σήματος και ποιες τεχνικές χρησιμοποιούνται ώστε να επιτευχθούν αυτές. Προκειμένου όμως να μελετηθούν καλύτερα τα διάφορα σχήματα διαμόρφωσης, θα πρέπει πρώτα να μελετηθεί ο τρόπος λειτουργίας καθώς και η δομή του οπτικού δικτύου.

### 2.1 Η εξέλιξη της πορείας των οπτικών δικτύων

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 όπου ξεκίνησε η αυξημένη χρήση του ιντερνέτ, μέχρι σήμερα που γιγαντώθηκε αυτός ο αριθμός, έχουν αλλάξει πολλά πράγματα. Αρχικά η χωρητικότητα των οπτικών διασυνδέσεων δεν ξεπερνούσε τις μερικές εκατοντάδες Mbps και σε κάθε οπτική ίνα υπήρχε μόνο ένα κανάλι. Η ευρεία χρήση των e-mail ως νέο μέσο επικοινωνίας προκάλεσε ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας όπου γρήγορα έσπασε το φράγμα των Gbps. Στην συνέχεια η αύξηση της χωρητικότητας συνεχίστηκε με την χρήση της πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing WDM) όπου αρχικά επιτεύχθηκε η πολυπλεξία και η ενίσχυση ενός μικρού αριθμού μηκών κύματος (από 4 έως 8) ανά οπτική ίνα. Παράλληλη ήταν η ανάπτυξη των καναλιών όπου έφτανε τις ταχύτητες των 10Gb/s. Από το 2000 και έπειτα η τεχνολογία WDM αναβαθμίστηκε σε DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) γνωστό και ως 'πυκνό' WDM όπου πλέον η κάθε ίνα μπορούσε να υποστηρίξει από 40 μέχρι 80 μήκη κύματος ή ακόμα και παραπάνω σε μερικές περιπτώσεις. Παράλληλα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά κανάλια της τάξεως των 40 Gb/s εκτοξεύοντας τις δυνατότητες μεταφοράς δεδομένων των οπτικών δικτύων. Από το 2010 και έπειτα, η εμφάνιση των social media, οι online πλατφόρμες και οι υπηρεσίες Video On Demand, άλλαξαν και πάλι τα δεδομένα, εξαντλώντας τα περιθώρια της τότε υπάρχουσας χωρητικότητας. Στις μέρες μας πλέον η αύξηση της χωρητικότητας από 40Gb/s σε 100Gb/s δεν φαίνεται να είναι αρκετή, αφού το μέλλον επιφυλάσσεται για ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση, με καινούριες εφαρμογές που έχουν ήδη μπει στην καθημερινότητα μας (cloud computing, IoT, υπηρεσίες clouds κλπ). Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της χωρητικότητας, μετάδοσης δεδομένων, των οπτικών δικτύων από τις αρχές της δεκαετίας του 90[1].



**Εικόνα 2.1** Η εξέλιξη των οπτικών δικτύων[1]

Σε κάθε περίπτωση το σίγουρο είναι πως τα οπτικά δίκτυα υψηλής χωρητικότητας αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή για την υλοποίηση ευρυζωνικών υποδομών, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της οπτικής ίνας. Δηλαδή το μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης (~25 THz στη φασματική περιοχή γύρω από τα 1550 nm) παράλληλα με τις χαμηλές απώλειες διάδοσης (~0.25 dB/Km)

## 2.2 Βασικές Διατάξεις ενός οπτικού πομπού

### 2.2.1 Lasers

Οι δύο κυριότερες οπτικές πηγές ενός οπτικού πομπού είναι το LED και το laser ημιαγωγού. Στα οπτικά συστήματα επικοινωνίες συναντάμε σχεδόν αποκλειστικά τα laser λόγω των πλεονεκτημάτων που έχουν έναντι στα LED. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι το στενό φασματικό εύρος, η ευκολία σύζευξης του παραγόμενου φωτός στις οπτικές ίνες και τέλος το μικρό μέγεθος και η αξιοπιστία του. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα lasers καταμεμημένης ανάδρασης (distributed feedback - DFB ), στα οποία τα κάτοπτρα που οδηγούν την οπτική δέσμη σε πολλαπλές διαδρομές υλοποιούνται με τη βοήθεια φραγμάτων περίθλασης. Τα laser δρουν ως πηγές συνεχών κυμάτων (Continuous Wave – CW) δημιουργώντας οπτικά κύματα με σταθερή ένταση, σταθερή φάση και σταθερή πόλωση. [5]

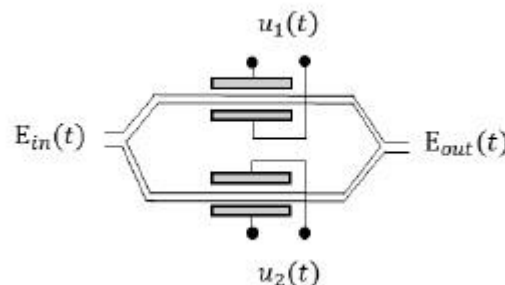
## 2.2.2 Εξωτερικοί οπτικοί διαμορφωτές

Ανάλογα με τον τρόπο που διαμορφώνεται το φως που παράγει μια οπτική πηγή, οι οπτικοί πομποί χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: σε αυτούς που χρησιμοποιούν απευθείας διαμόρφωση (Direct Modulation) και σε αυτούς που χρησιμοποιούν εξωτερική διαμόρφωση (External Modulation) [8]. Οι τελευταίοι είναι ευρέως διαδεδομένοι επειδή βασίζονται τη λειτουργία τους σε αμιγώς οπτικά φαινόμενα και επομένως είναι κατάλληλοι για διαμόρφωση σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Παραδείγματα διαμορφωτών που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις εξωτερικής διαμόρφωσης είναι ο διαμορφωτής φάσης (Phase Modulator-PM), ο διαμορφωτής Mach-Zehnder – MZM και ο διαμορφωτής IQ (IQ modulator – IQM), ο οποίος αποτελείται από δύο παράλληλους MZMs. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των 3 διαμορφωτών.

Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες των οπτικών πομπών, με βάση τον τρόπο που διαμορφώνεται το φως που παράγει η οπτική πηγή (laser) και αυτοί είναι οι Direct Modulation (απευθείας διαμόρφωση) και External Modulation (εξωτερική διαμόρφωση) [5]. Οι πιο διαδεδομένοι είναι οι External Modulation λόγω του ότι βασίζονται την λειτουργία τους σε αμιγώς οπτικά φαινόμενα και επομένως έχουν την δυνατότητα για διαμόρφωση σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων (bit rate). Παρακάτω να αναλυθεί περαιτέρω ο διαμορφωτής Mach-Zehnder, η λειτουργία του οποίου θα μας φανεί χρήσιμη στις διατάξεις που θα ακολουθήσουν.

## 2.2.3 Mach Zehnder Διαμορφωτής

Στο συμβολόμετρο Mach-Zehnder το εισερχόμενο οπτικό κύμα χωρίζεται σε δύο ίσους οπτικούς δρόμους, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να διαμορφώσουν την φάση του καθενός ξεχωριστά. Η εικόνα 2.2.3 μας βοηθάει να κατανοήσουμε καλύτερα την διάταξη ενός διαμορφωτή Mach Zehnder[8].



Εικόνα 2.2.3 Διάταξη διαμορφωτή Mach-Zehnder [8]

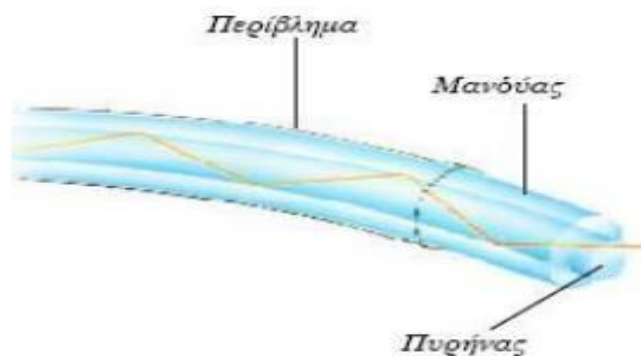
Αφού αποκτήσουν μια σχετική διαφορά φάσης, ανάλογη της εξωτερικής τάσης, τα δύο μέρη του οπτικού σήματος επανασυνδέονται και συμβάλλουν. Η επανασύνδεση μπορεί να είναι είτε ανααιρετική (push-pull) είτε ενισχυτική (push-push). Έχουμε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την λειτουργία του συμβολόμετρου Mach Zehnder:

**Push-Push:** Σ' αυτήν την κατηγορία, με τις κατάλληλες ρυθμίσεις των τάσεων (Εικόνα 2.2.3) στους δύο οπτικούς δρόμους, του Mach-Zehnder, εισάγεται η ίδια φάση και το συμβολόμετρο λειτουργεί σαν διαμορφωτής φάσης.

**Push-Pull:** Εδώ οι φάσεις που εισάγονται είναι αντίθετες ( διαφορά φάσης  $\pi$ ) με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται διαμόρφωση πλάτους. Εδώ ανάλογα με το σημείο πόλωσης διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση ο MZM λειτουργεί στο quadrature point με σταθερή τάση DC bias =  $-V_{\pi}/2$  και peak-to-peak διαμόρφωση κατά  $V_{\pi}$ . Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται διαμόρφωση πλάτους. Στην δεύτερη περίπτωση ο MZM λειτουργεί στο σημείο ελάχιστης μετάδοσης (minimum transmission point) DC bias =  $-V_{\pi}$  και peak-to-peak διαμόρφωση κατά  $2V_{\pi}$ . Εδώ ο MZM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ταυτόχρονη διαμόρφωση φάσης και πλάτους. [26] ,[27], [28]

### 2.3 Η οπτική ίνα

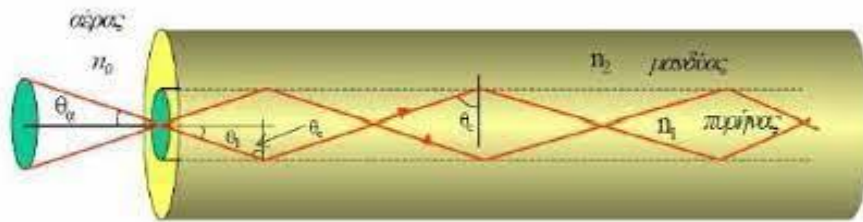
Η οπτική ίνα είναι το κύριο μέσο μετάδοσης της πληροφορίας στα οπτικά δίκτυα. Στην ουσία πρόκειται για κυματοδηγό φωτός κυλινδρικής διατομής. Μία οπτική ίνα αποτελείται από τρία μέρη όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3.1



**Εικόνα 2.3.1** Δομή οπτικής ίνας [3]

Από μέσα προς τα έξω έχουμε τον πυρήνα (core), τον μανδύα (cladding) και το περίβλημα (coating ή jacket). Ενίοτε μετά τον μανδύα υπάρχει και επιπλέον επίστρωση με συνθετικές ίνες για επιπλέον προστασία. Η μετάδοση του σήματος - φωτός μέσω του εσωτερικού της οπτικής ίνας βασίζεται στο

φαινόμενο της ολικής ανάκλασης. Πιο συγκεκριμένα, το σήμα μεταδίδεται μέσω του πυρήνα αφού ανακλάται κάθε φορά που προσπίπτει στην επιφάνεια που χωρίζει τον πυρήνα με τον μανδύα. Για να λειτουργήσει βέβαια το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης θα πρέπει να ισχύουν δύο βασικές προϋποθέσεις. Πρώτον, ο πυρήνας και ο μανδύας να έχουν μεταξύ τους διαφορετικό δείκτη διάθλασης ( $n$ ) και πιο συγκεκριμένα ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα να είναι μεγαλύτερος από αυτόν του μανδύα ( $n_1 > n_2$ ). Δεύτερον, θα πρέπει η ακτίνα φωτός να προσπίπτει στην επιφάνεια του πυρήνα με γωνία μεγαλύτερη της κρίσιμης. Σε διαφορετική περίπτωση το σήμα διαθλάται μέσα στον πυρήνα και σε κάποια μόλις μέτρα, σταματά να διαδίδεται. Η εικόνα 2.3.2 μας βοηθά να κατανοήσουμε καλύτερα το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης. [4]



**Εικόνα 2.3.2** Διάδοση οπτικού σήματος μέσα από την ίνα [4]

Το οπτικό σήμα εισάγεται στην ίνα σχηματίζοντας γωνία  $\theta_i$  με την κάθετο στο κέντρο του πυρήνα. Εδώ συμβαίνει το φαινόμενο της διάθλασης στην διεπιφάνεια αέρας-πυρήνας ίνας, με αποτέλεσμα η ακτίνα φωτός να κάμπτεται και να σχηματίζει νέα γωνία  $\theta_r$  ως προς την κάθετο του πυρήνα. Αυτή η νέα γωνία πρέπει να είναι κατάλληλη έτσι ώστε όταν η ακτίνα προσκρούει στην διεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα να υποστεί το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης και να μπορέσει να ταξιδέψει μέσα στην οπτική ίνα. Όπως είπαμε και πιο πάνω θα πρέπει ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα να είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν του μανδύα και αυτό συνήθως πετυχαίνεται με προσμίξεις  $\text{GeO}_2$  στο συνθετικό γυαλί που χρησιμοποιείται.

Οι οπτικές ίνες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το υλικό κατασκευής τους δηλαδή σε αυτές που αποτελούνται από γυαλί, από πλαστικό και από συνδυασμό και των δύο. Ακόμη μπορούμε να τις κατηγοριοποιήσουμε με βάση τους τρόπους διάδοσης του σήματος σε μονότροπες –SMF όπου μόνο ένα EM διαδίδεται, προσφέρει το μέγιστο BR και είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη ίνα και σε πολύτροπες –MMF όπου μπορούμε να έχουμε πολλαπλά EM ακτίνες φωτός, εδώ όμως έχουμε μεγαλύτερη διασπορά.

Τέλος ένας τρίτος τρόπος κατηγοριοποίησης είναι με βάση το προφίλ διάθλασης όπου έχουμε τις ίνες βηματικού δείκτη με δύο διακριτούς δείκτες διάθλασης ανάμεσα στον πυρήνα και τον μανδύα και τις ίνες βαθμιαίου δείκτη όπου έχουμε προοδευτική μεταβολή του δείκτη από το κέντρο προς την περιφέρεια.



## 2.4 Η κίνηση της πληροφορίας στα οπτικά δίκτυα

Ένα οπτικό δίκτυο αποτελείται από ένα πομπό, ένα δέκτη και την οπτική ίνα ως μέσο μεταφοράς του σήματος. Ο πομπός αρχικά παράγει το σήμα και έπειτα το διαμορφώνει ώστε να μπορεί να μεταδοθεί. Έτσι με την βοήθεια των διαμορφωτών που υπάρχουν στον πομπό το αρχικό ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε οπτικό (φωτεινό) σήμα, δηλαδή σε ψηφιακή μορφή. Αυτή η μετατροπή γίνεται με την βοήθεια μιας οπτικής πηγής αλλά και ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος οδήγησης. Έπειτα το σήμα μεταδίδεται μέσω ενός οπτικού καλωδίου. Στην επαφή του πομπού με το οπτικό καλώδιο συνήθως υπάρχει και κάποιος κατάλληλος φακός, ο οποίος βοηθά ώστε να διοχετεύεται πλήρως το φωτεινό σήμα στο εσωτερικό του καλωδίου. Στην άλλη πλευρά του οπτικού καλωδίου υπάρχει ο δέκτης ο οποίος σε αντίθετο ρόλο από τον πομπό τώρα, μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό ώστε να μπορέσουμε να επεξεργαστούμε την πληροφορία και να την διαβάσουμε. Για να γίνει αυτή η διαδικασία χρησιμοποιούνται οι φωτοανιχνευτές όπου έπειτα εξάγεται το ηλεκτρικό σήμα, το οποίο μπορεί να χρειαστεί και κάποια ενίσχυση προκειμένου να ανακτηθεί η πληροφορία σωστά.

Ακόμη σε πολλά σημεία του δικτύου μπορεί να υπάρχουν διατάξεις μεταγωγής έτσι ώστε να δρομολογείται κίνηση στα κανάλια των ινών. Επίσης πολλές φορές το οπτικό σήμα λόγω των μεγάλων αποστάσεων που διανύει με αποτέλεσμα να εξασθενεί ή των θορύβων που μπορεί να περνάνε σ αυτό, καθίσταται αναγκαία η χρήση ενισχυτών σήματος. Αυτοί οι ενισχυτές μπορούν αν συνδεθούν πριν τον πομπό, ενδιάμεσα στο δίκτυο ή ακόμη και πριν τον δέκτη [2]. Τέλος αξίζει να αναφέρουμε πως τα στοιχεία ενός οπτικού δικτύου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα ενεργά και τα παθητικά. Ενεργά είναι οι φωτεινές πηγές (Lasers), οι οπτικοί ενισχυτές, οι δέκτες κτλ. Στα παθητικά έχουμε τους μεταγωγούς, τους οπτικούς συζεύκτες κτλ. Στην εικόνα 2.4 έχουμε την αναπαράσταση ενός οπτικού δικτύου.



**Εικόνα 2.4** Σύστημα οπτικού δικτύου με ενισχυτές[2]

## 2.5 Περιοριστικοί παράγοντες των οπτικών δικτύων

Η οπτική ίνα σαφώς και υπερτερεί ως μέσο μετάδοσης του οπτικού σήματος σε σχέση με προηγούμενα υλικά όπως ο χαλκός και έχει πολύ καλά χαρακτηριστικά. Θεωρείται πλέον το πιο προηγμένο σύστημα επικοινωνίας το οποίο έχει την δυνατότητα να καλύψει μεγάλες αποστάσεις προσφέροντας παράλληλα υψηλές ταχύτητες. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν και κάποιοι περιοριστικοί παράγοντες, κυρίως λόγω των επιδράσεων κάποιων φαινομένων, τους οποίους πρέπει να γνωρίζουμε και να λαμβάνουμε υπόψη προκειμένου να επιτευχθούν κάθε φορά τα επιθυμητά αποτελέσματα. Θα τους περιγράψουμε παρακάτω χωρίζοντας τους σε γραμμικά και μη γραμμικά φαινόμενα.

### 2.5.1 Γραμμικά φαινόμενα

Η κυριότερη επίδραση στην ποιότητα του σήματος προκαλείται λόγω της εξασθένησης του, καθώς διανύει την απόσταση που πρέπει να καλύψει, ώστε να φτάσει η πληροφορία στον τελικό της προορισμό. Ένα άλλο γραμμικό φαινόμενο που έχει αρνητική επίδραση είναι η διασπορά. Πιο συγκεκριμένα με τον όρο διασπορά στα συστήματα επικοινωνίας αναφερόμαστε στη διεύρυνση του των παλμών των οπτικών σημάτων καθώς διαδίδονται μέσω της οπτικής ίνας. Οι δύο συνήθεις τύποι διασποράς είναι οι εξής:

#### Χρωματική διασπορά

Η χρωματική διασπορά συμβαίνει επειδή διαφορετικά μήκη κύματος φωτός ταξιδεύουν μέσω ενός οπτικού μέσου με διαφορετικές ταχύτητες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διεύρυνση του πλάτους των παλμών και παραμόρφωση αυτών, με αποτέλεσμα το τελικό σήμα να είναι κατά πολύ διαφορετικό από το αρχικό. Κάτι τέτοιο εξισορροπείται χρησιμοποιώντας “ίνα εξισορρόπησης διασποράς”

#### Διασπορά λειτουργίας πόλωσης (PMD)

Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν το φως που διαδίδεται μέσω μιας οπτικής ίνας χωρίζεται σε δύο ορθογώνιες καταστάσεις πόλωσης. Αυτοί οι τρόποι πόλωσης ταξιδεύουν με ελαφρώς διαφορετικές ταχύτητες, οδηγώντας σε διαφορεική καθυστέρηση μεταξύ τους. Το PMD συνήθως προκαλείται από ατέλειες στην κατασκευή ινών ή περιβαλλοντικούς παράγοντες. Αντίστοιχα και εδώ το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με κατάλληλη “ίνα διατήρησης πόλωσης” ή με κατάλληλες διαμορφώσεις σήματος

### 2.5.2 Μη Γραμμικά φαινόμενα

Εκτός βέβαια από τις γραμμικές, έχουμε και τις μη γραμμικές επιδράσεις. Στα οπτικά δίκτυα, τα μη γραμμικά φαινόμενα προκύπτουν κυρίως λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των φωτεινών σημάτων που διαδίδονται μέσω των οπτικών ινών. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να επηρεάσουν

σημαντικά την απόδοση και την αποδοτικότητα των συστημάτων οπτικών επικοινωνιών. Ακολουθούν ορισμένα βασικά μη γραμμικά φαινόμενα που συναντώνται συνήθως σε οπτικά δίκτυα.

### **Μη γραμμικό φαινόμενο Kerr**

Το φαινόμενο Kerr προκύπτει όταν ένα έντονο οπτικό πεδίο αλληλεπιδρά με ένα υλικό, προκαλώντας μια πόλωση εντός του υλικού λόγω της μετατόπισης των ηλεκτρονίων. Αυτό οδηγεί σε αλλαγή του δείκτη διάθλασης του υλικού, που σχετίζεται άμεσα με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Σε αντίθεση με τα γραμμικά υλικά όπου ο δείκτης διάθλασης είναι ανεξάρτητος από την ένταση του φωτός, τα μη γραμμικά υλικά Kerr εμφανίζουν δείκτη διάθλασης που εξαρτάται από την ένταση. Αυτό σημαίνει ότι ο δείκτης διάθλασης του υλικού αλλάζει με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Η αλλαγή στον δείκτη διάθλασης που προκαλείται από το φαινόμενο Kerr είναι στιγμιαία και εμφανίζεται σε χρονική κλίμακα συγκρίσιμη με την οπτική περίοδο. Μερικές από τις συνέπειες του φαινομένου Kerr περιγράφονται στην συνέχεια.

### **Self Phase-Modulation (SPM):**

Το φαινόμενο SPM εμφανίζεται όταν η ένταση ενός οπτικού σήματος προκαλεί μια μετατόπιση φάσης στον εαυτό του καθώς διαδίδεται μέσω ενός μη γραμμικού μέσου όπως μια οπτική ίνα. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε αλλαγή του εύρους του οπτικού σήματος, με αποτέλεσμα τα γειτονικά μήκη κύματος να παρεμβάλλονται μεταξύ τους.

### **Cross Phase-Modulation (XPM):**

Αντίστοιχα το φαινόμενο XPM εμφανίζεται όταν η ένταση ενός οπτικού σήματος επηρεάζει τη φάση ενός άλλου σήματος που διαδίδεται στην ίδια ίνα. Το συναντάμε κυρίως στα συστήματα πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM), που θα δούμε παρακάτω. Το XPM μεταξύ καναλιών σε κοντινή απόσταση μπορεί να προκαλέσει αλληλεπιδράσεις και παραμόρφωση σήματος.

### **Four Wave-Mixing (FWM):**

Το FWM εμφανίζεται όταν αλληλεπιδρώντα οπτικά σήματα δημιουργούν νέες συχνότητες. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να παράγει ανεπιθύμητα στοιχεία σήματος σε διαφορετικά μήκη κύματος.

### **Stimulated Raman Scattering (SRS):**

Η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman εμφανίζεται όταν τα προσπίπτοντα φωτόνια αλληλεπιδρούν με το υλικό και διεγείρουν την εκπομπή νέων φωτονίων σε διαφορετικές συχνότητες. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να συμβεί όταν οπτικά σήματα υψηλής έντασης διαδίδονται μέσω της ίνας. Τα έντονα ηλεκτρικά πεδία που σχετίζονται με αυτά τα σήματα μπορούν να προκαλέσουν μια μη γραμμική απόκριση στο υλικό της ίνας, προκαλώντας τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των οπτικών κυμάτων.

Αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία νέων οπτικών συχνοτήτων, με αποτέλεσμα τη διεύρυνση του φάσματος και πιθανώς να προκαλέσει υποβάθμιση του σήματος. [16]

### **Μη γραμμικές επιδράσεις πόλωσης:**

Τα μη γραμμικά φαινόμενα πόλωσης, όπως η διασπορά τρόπου πόλωσης (PMD) και η απώλεια που εξαρτάται από την πόλωση (PDL), μπορούν επίσης να επηρεάσουν την απόδοση των οπτικών δικτύων. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση του σήματος που εξαρτάται από την πόλωση και να περιορίσουν την απόσταση μετάδοσης και τη χωρητικότητα των συστημάτων οπτικής επικοινωνίας.

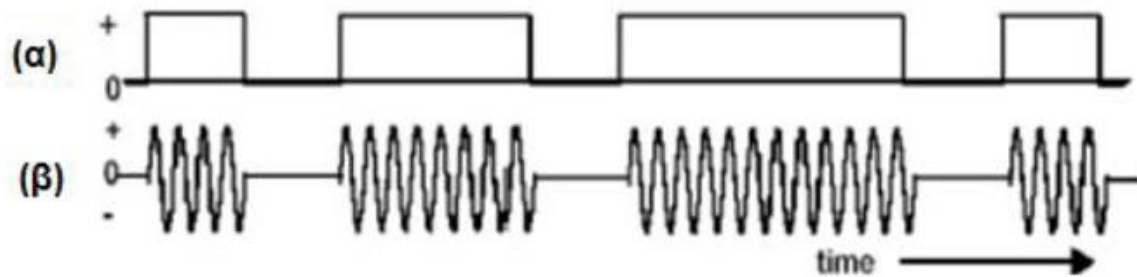
## **3. Η ψηφιακή διαμόρφωση σήματος**

Η ψηφιακή διαμόρφωση είναι μια μέθοδος κωδικοποίησης για μετάδοση ψηφιακών δεδομένων (bits) σε ένα αναλογικό σήμα φορέα, όπως είναι το οπτικό σήμα. Στην ψηφιακή διαμόρφωση, το πλάτος, η φάση ή η συχνότητα του φέροντος σήματος μεταβάλλεται για να αντιπροσωπεύει τα δυαδικά ψηφία (bits) των ψηφιακών δεδομένων. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική και αξιόπιστη μετάδοση ψηφιακών πληροφοριών μέσω αναλογικών καναλιών επικοινωνίας όπως είναι η οπτική ίνα. Οι τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αναλογική διαμόρφωση, συμπεριλαμβανομένης της υψηλότερης φασματικής απόδοσης, της ανθεκτικότητας σε θόρυβο και παρεμβολές και συμβατότητα με τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας δεδομένων. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένης της ασύρματης επικοινωνίας, της δορυφορικής επικοινωνίας και της ψηφιακής μετάδοσης.

### **3.1 ASK (Amplitude Shift Keying)**

Κατά την διαμόρφωση πλάτους, το πλάτος του φέροντος σήματος μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή του δυαδικού σήματος που μεταφέρει την πληροφορία. Πιο συγκεκριμένα αν η τιμή του bit είναι ένα "1" τότε μεταδίδεται κάποια ισχύς  $x$  Watt, ενώ όταν η τιμή του bit είναι μηδέν "0", μεταδίδονται πολύ λιγότερα ή σχεδόν μηδενικά Watt. Η διαμόρφωση αυτή έχει επικρατήσει, στις οπτικές επικοινωνίες και με την ονομασία OOK (ON-OFF-Keying) και είναι ίσως η πιο παλιά και απλή μορφή ψηφιακής διαμόρφωσης. Πάνω σ αυτήν την λογική έχουμε πολλές ψηφιακές διαμορφώσεις ανώτερης τάξης, όπου αντίστοιχα κάθε bit αντιπροσωπεύεται με ύπαρξη παλμού ή απουσία του (RZ, NRZ, CSRZ κτλ). Αυτές θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Χαρακτηριστική είναι η σχέση ισχύος μεταξύ των δύο αυτών καταστάσεων ON και OFF, η οποία ονομάζεται λόγος σβέσης ER (Extinction – Ratio) και ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος που μεταδίδεται στο bit "0" προς την ισχύ που μεταδίδεται στο bit "1". Οι τιμές του ER εξαρτώνται από

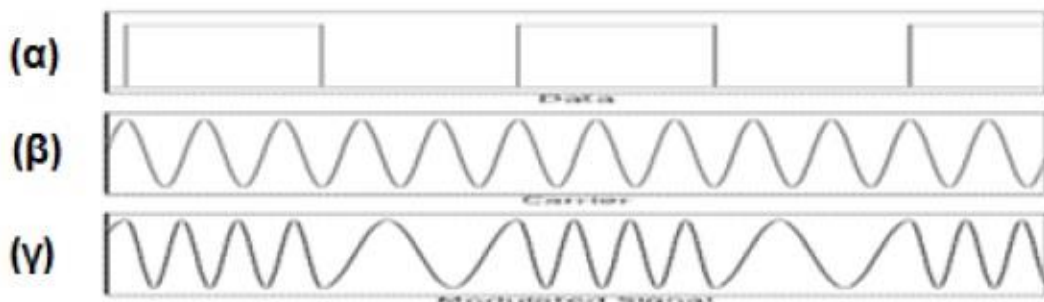
την διαμόρφωση του σήματος ( άμεση ή εξωτερική διαμόρφωση). Στην εικόνα 3.2.1 έχουμε συγκριτικά την αποτύπωση του σήματος στο δυαδικό και στο φέρον σήμα.



**Εικόνα 3.2.1 (α) δυαδικό σήμα (β) φέρον σήμα μετά την διαμόρφωση πλάτους**

### 3.2 FSK (Frequency Shift Keying)

Η διαμόρφωση αλλαγής συχνότητας έχει παρόμοια λογική με την διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους, μόνο που εδώ η τιμή “0” αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη συχνότητα  $f_1$  και η τιμή “1” σε μια άλλη συχνότητα  $f_2$ . Έτσι κωδικοποιείται το δυαδικό σήμα σε σήμα διαμόρφωσης. Η εικόνα 3.2.2 μας βοηθάει να κατανοήσουμε καλύτερα την λογική αυτή.



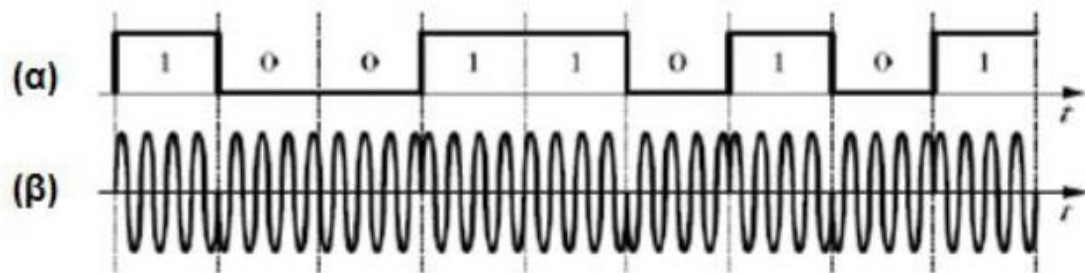
**Εικόνα 3.2.2 (α) Δεδομένα πληροφορίας (β) ημιτονοειδές φέρον σήμα (γ) Διαμορφωμένο σήμα κατά συχνότητα**

Σαν δείκτης διαμόρφωσης συχνότητας ορίζεται ο λόγος της διαφοράς  $f_2$  (bit “1”) μείον  $f_1$  (bit “0”) προς το εύρος ζώνης σήματος πληροφορίας. Θεωρείται ως πιο πολύπλοκο σύστημα διαμόρφωσης

αφού πρέπει οι παράμετροι του πομπού του δέκτη και της γραμμής μετάδοσης να ταιριάζουν μεταξύ τους για την αποφυγή αλλοίωσης της αρχικής πληροφορίας.

### 3.3 PSK (Phase Shift Keying)

Σ' αυτή την περίπτωση για την κωδικοποίηση του ψηφιακού σήματος χρησιμοποιείται η φάση του φέροντος. Στην πιο απλή της μορφή και εύκολα κατανοητή, η τιμή της φάσης αλλάζει μεταξύ των τιμών "0" και "1" κατά  $180^\circ$ . Στην εικόνα 3.2.3 αποτυπώνεται η μεταβολή της φάσης του διαμορφωμένου ημιτονοειδούς σήματος σε κάθε αλλαγή bit του δυαδικού σήματος.



Εικόνα 3.2.3 (α) Δεδομένα πληροφορίας (β) διαμορφωμένο σήμα κατά φάση

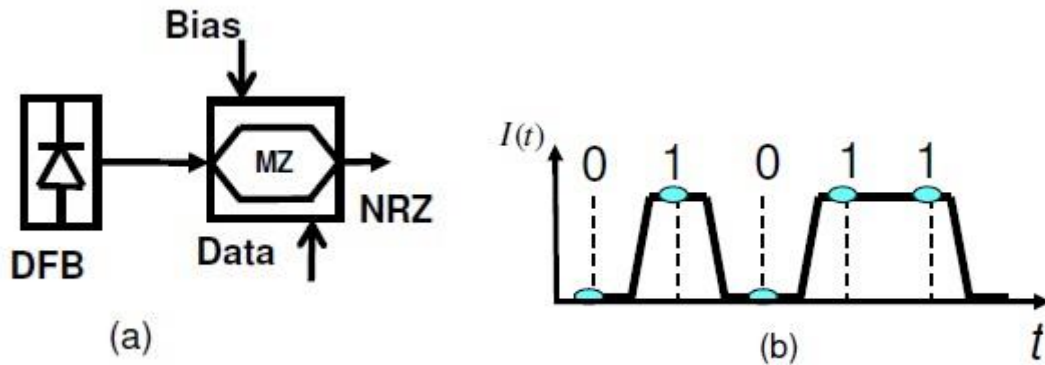
## 4. Ψηφιακές διαμορφώσεις ανώτερης τάξης

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναπτυχθεί ο τρόπος λειτουργίας των ψηφιακών διαμορφώσεων ( NRZ, RZ, CSRZ, DPSK & DQPSK) ξεκινώντας από τον τρόπο λειτουργίας των βασικών διατάξεων ενός πομπού.

### 4.1 NRZ (Non-Return-to-Zero)

Η NRZ υπήρξε μία από τις πλέον διαδεδομένες μορφές διαμόρφωσης σήματος στις πρώιμες μέρες των οπτικών δικτύων, κυρίως λόγω της χαμηλότερης ηλεκτρικής ισχύς που απαιτούσε σε σχέση με την RZ, της μεγαλύτερης ανοχής, στις αποκλίσεις φάσης του αρχικού σήματος (laser) και τέλος λόγω της απλότητας στα συστήματα πομπού και δέκτη. Στην NRZ (non-Return-to-Zero) ο κάθε παλμός καταλαμβάνει μία ολόκληρη χρονοθυρίδα. Εδώ όμως η ένταση του σήματος δεν μηδενίζεται στο τέλος της χρονοθυρίδας αλλά αλλάζει κατάσταση ανάλογα με την κατάσταση του επόμενου bit. Το μπλοκ διάγραμμα ενός πομπού NRZ φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου το ηλεκτρικό σήμα διαμορφώνεται με έναν εξωτερικό διαμορφωτή έντασης. Ο διαμορφωτής έντασης είναι ένα MZM, η

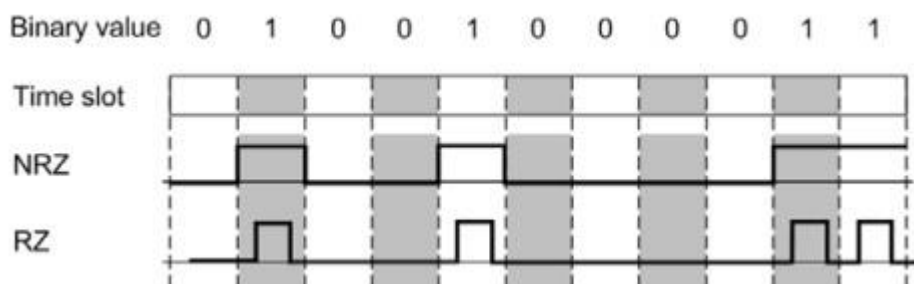
πόλωση του οποίου γίνεται στο μέσο τετραγωνικό σημείο της συνάρτησης μεταφοράς (quadrature point). Γενικά, το διαμορφωμένο οπτικό σήμα NRZ έχει το πιο συμπαγές φάσμα σε σύγκριση με αυτό με άλλες μορφές διαμόρφωσης με αποτέλεσμα να παρουσιάζει καλύτερη ανοχή σε φαινόμενα διασποράς. [6]



Εικόνα 4.1 (a) Διάγραμμα μπλοκ NRZ (b) Διαμορφωμένο σήμα NRZ [6]

## 4.2 RZ (Return-to- Zero)

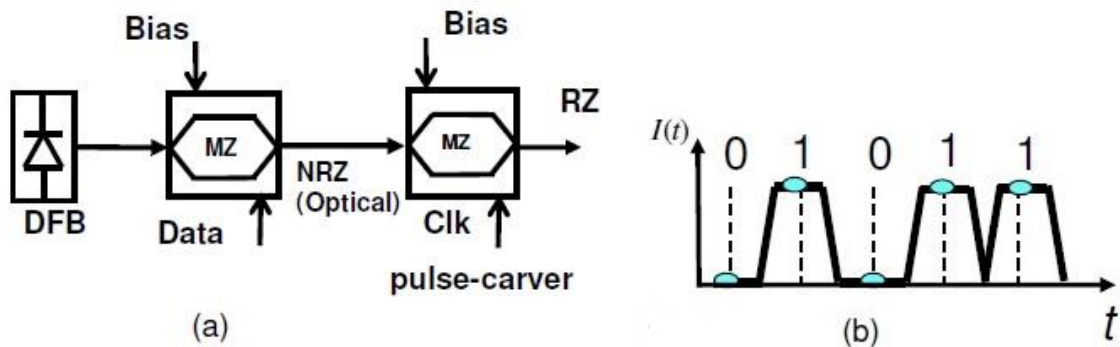
Η RZ (Return-to-Zero) επαναφέρει το πλάτος του κάθε συμβόλου στο μηδέν στο τέλος κάθε bit. Εδώ το λογικό "1" αντιστοιχεί σε οπτικό παλμό με χρονική διάρκεια μικρότερη από την διάρκεια του bit (duty cycle). Συγκεκριμένα ανάλογα με το duty cycle έχουμε τις διαμορφώσεις RZ (33% , 50% & 67%). Στην εικόνα 4.2.1 φαίνεται ξεκάθαρα η διαφορά μεταξύ της λογικής των διαμορφώσεων RZ & NRZ.



Εικόνα 4.2.1 Σύγκριση παλμών RZ & NRZ στο ίδιο bit rate

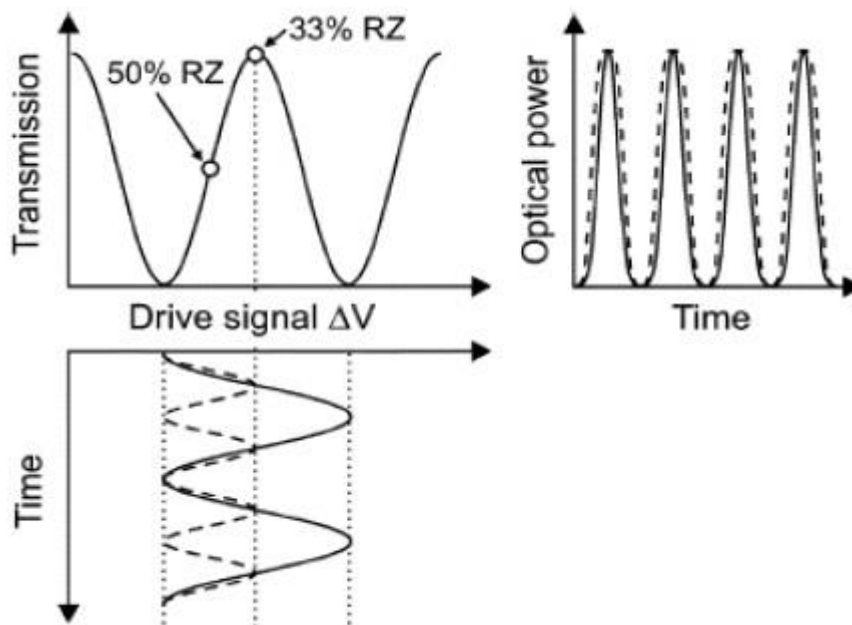
Θεωρούμε ότι τα σήματα RZ παράγονται χρησιμοποιώντας μία ακολουθία δύο διαμορφωτών MZ, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.2. Αρχικά, το οπτικό σήμα NRZ παράγεται από τον πρώτο MZ

διαμορφωτή έντασης. Έπειτα στον δεύτερο MZM χρησιμοποιείται ένα σήμα ρολογιού, με τον ίδιο ρυθμό δεδομένων με το ηλεκτρικό σήμα, για να διαμορφώσει τα RZ οπτικά σήματα.



Εικόνα 4.2.2 (α) Διάγραμμα μπλοκ RZ (β) Διαμορφωμένο σήμα RZ [6]

.Με τις κατάλληλες ρυθμίσεις στο MZM μπορούμε να μεταβάλλουμε το duty cycle του παλμού. Για duty cycle 50% ο MZM πρέπει να λειτουργεί στο quadrature point με DC bias  $V\pi$  (peak-to-peak) και συχνότητα ίδια με του αρχικού παλμού. Ρίχνοντας την συχνότητα στο μισό του αρχικού παλμού και μεταφέροντας την λειτουργία πόλωσης στο maximum, DC bias  $2V\pi$  το duty cycle μετατρέπεται σε 33%, ενώ στην περίπτωση που η λειτουργία πόλωσης πηγαίνει στο μηδέν με DC bias  $2V\pi$  (peak-to-peak) έχουμε duty cycle 67% αλλά και εναλλαγή φάσης σε κάθε συνεχόμενο bit. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται carrier – suppressed και θα μελετηθεί πιο αναλυτικά παρακάτω. [9]

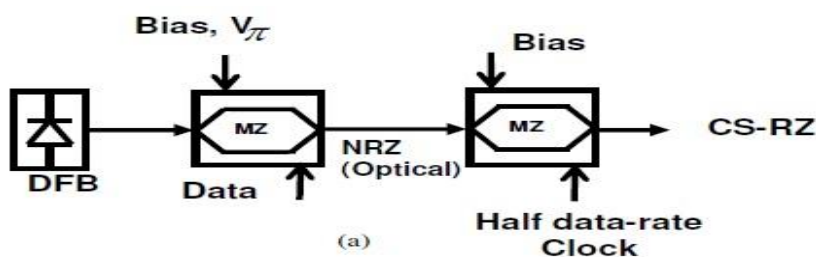


Εικόνα 4.2.3 Ρυθμίσεις πόλωσης για RZ 33% & 50% [9]

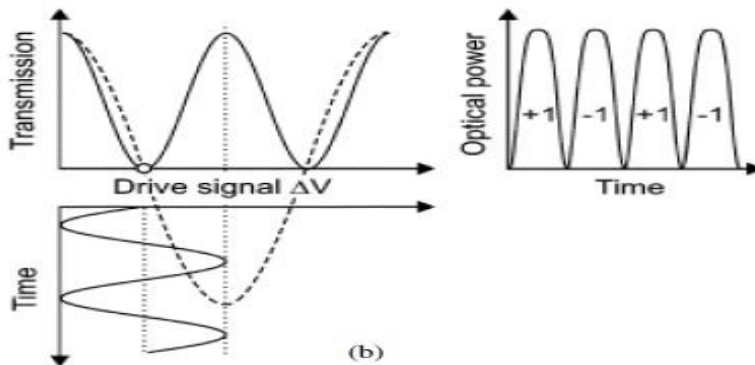


### 4.3 Carrier Suppressed Return to Zero (CSRZ)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω κατά την διαμόρφωση CSRZ, στο φέρον σήμα, έχουμε συνεχόμενες εναλλαγές φάσης, με αποτέλεσμα η φέρουσα συνιστώσα να καταστέλλεται. Αντίθετα, οι πληροφορίες κωδικοποιούνται στη διαμόρφωση του ίδιου του παλμού χωρίς ξεχωριστό φορέα. Η φάση εναλλάσσεται μεταξύ διαδοχικών bit. Έτσι αν τα μονά bit έχουν φάση 0 τα ζυγά θα έχουν φάση 'π'. με μεγαλύτερη ανοχή σε έντονα μη γραμμικά φαινόμενα. Το κύριο πλεονέκτημα της διαμόρφωσης CSRZ είναι η φασματική απόδοση. Με την αφαίρεση του φορέα, οι απαιτήσεις εύρους ζώνης μειώνονται, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων. Συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών όπου η φασματική απόδοση είναι ζωτικής σημασίας. Τα σχήματα (a) και (b) της παρακάτω εικόνας μας βοηθούν να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο λειτουργίας της CSRZ. [9]



Εικόνα 4.3.1 (a) Διάγραμμα μπλοκ CSRZ [9]

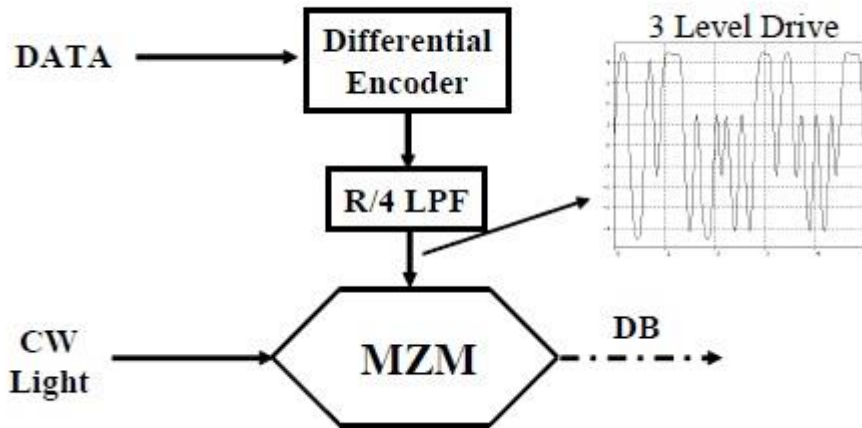


Εικόνα 4.3.2 Ρυθμίσεις πόλωσης για CSRZ 33% & 50% [9]

### 4.4 DuoBinary (DB)

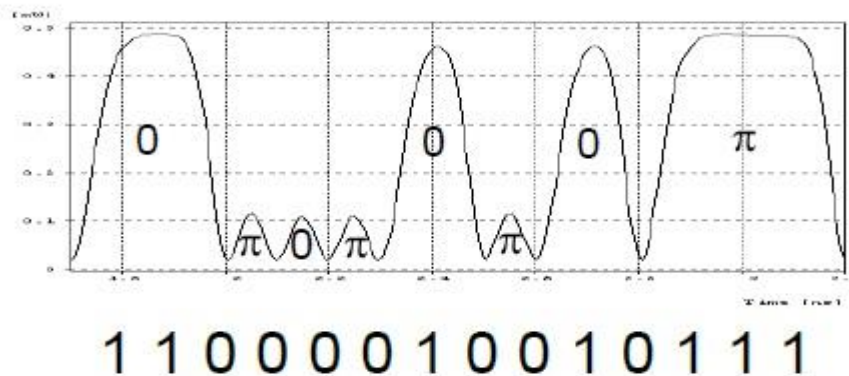
Η συγκεκριμένη είναι μια μορφή διαμόρφωσης παλμού που στοχεύει στην εξισορρόπηση μεταξύ της φασματικής απόδοσης και της απλότητας στα συστήματα επικοινωνίας και εμπίπτει στην κατηγορία της διαμόρφωσης πλάτους παλμών. Στη διδυαδική διαμόρφωση, η κυματομορφή του σήματος αντιπροσωπεύει ζεύγη bit και όχι μεμονωμένα bit. Αυτό επιτυγχάνεται με την κωδικοποίηση των δεδομένων σε τρία επίπεδα. Έτσι έχουμε 0 για '00' και '11', δηλαδή όταν τα bit είναι ίδια και +1 για '01' ενώ -1 για '10' αντίστοιχα. Αυτή η μορφή διαμόρφωσης παρέχει οφέλη φασματικής απόδοσης

παρόμοια με σχήματα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης αλλά με απλούστερη εφαρμογή. Ωστόσο, για να επιτευχθούν αυτά τα οφέλη, ο πομπός DB απαιτεί πρόσθετο εξοπλισμό. Το σχηματικό του πιο συνηθισμένου πομπού DB φαίνεται στην εικόνα 4.4.1. [10] – [13]



**Εικόνα 4.4.1 Low Pass Filter Duobinary transmitter**

Το σήμα των δεδομένων διέρχεται αρχικά από έναν διαφορικό κωδικοποιητή. Ο διαφορικός κωδικοποιητής αποτελείται από μία XOR πύλη σε συνδυασμό με ένα 1-bit delay. Η έξοδος αυτού του λογικού βήματος δημιουργεί συσχετίσεις μεταξύ bits. Η κωδικοποιημένη ακολουθία διέρχεται στη συνέχεια μέσω ενός LPF (low pass filter) Το φιλτράρισμα προκαλεί τη μετατροπή του αρχικού ψηφιακού σήματος 2 επιπέδων σε σήμα 3 επιπέδων, εικόνα 4.51. Η φιλτραρισμένη κυματομορφή 3 επιπέδων πλέον πολώνεται στο μηδέν (bias point null) της καμπύλης μεταφοράς MZM και διαμορφώνει το φως μεταξύ των 0 και  $V\pi$  με  $2V\pi$  (peak-to-peak) . Το σήμα DB θα ακολουθήσει έναν αλγόριθμο αναστροφής φάσης που υπαγορεύει ότι η φάση μεταξύ των παλμών λογικού ‘1’ αλλάζει όταν παρεμβάλλεται περιττός αριθμός ‘0’ ενώ παραμένει ίδια αν ο αριθμός των μηδενικών bit που παρεμβάλλονται είναι άρτιος. Η εικόνα 4.4.2 μας βοηθά να καταλάβουμε πότε έχουμε αλλαγή φάσης.

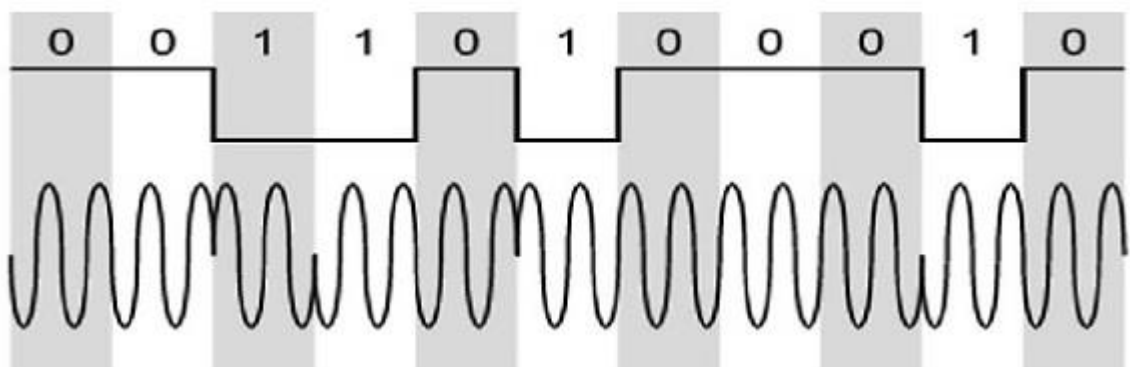


**Εικόνα 4.4.2 Κυματομορφή Duobinary με τυχαία ακολουθία bit**

Ένα από τα βασικά της πλεονεκτήματα είναι ότι βοηθά στον μετριασμό της παρεμβολής μεταξύ των συμβόλων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σκόπιμη διαμόρφωση των παλμών με τέτοιο τρόπο ώστε να επικαλύπτονται εν μέρει οπότε είναι αρκετά αποτελεσματική για την μετάδοση οπτικών ιών μεγάλων αποστάσεων. Στα μειονεκτήματά της μπορεί να αναφερθεί το ότι ενώ απλοποιεί τον πομπό χρησιμοποιώντας μια δυαδική πηγή, μπορεί να αυξήσει την πολυπλοκότητα του δέκτη λόγω της ανάγκης για προηγμένη επεξεργασία σήματος. Συνοπτικά μπορούμε να πούμε πως, η διδυαδική διαμόρφωση είναι μια τεχνική που επιτυγχάνει μια ισορροπία μεταξύ της φασματικής απόδοσης και της απλότητας υλοποίησης στα συστήματα επικοινωνίας.

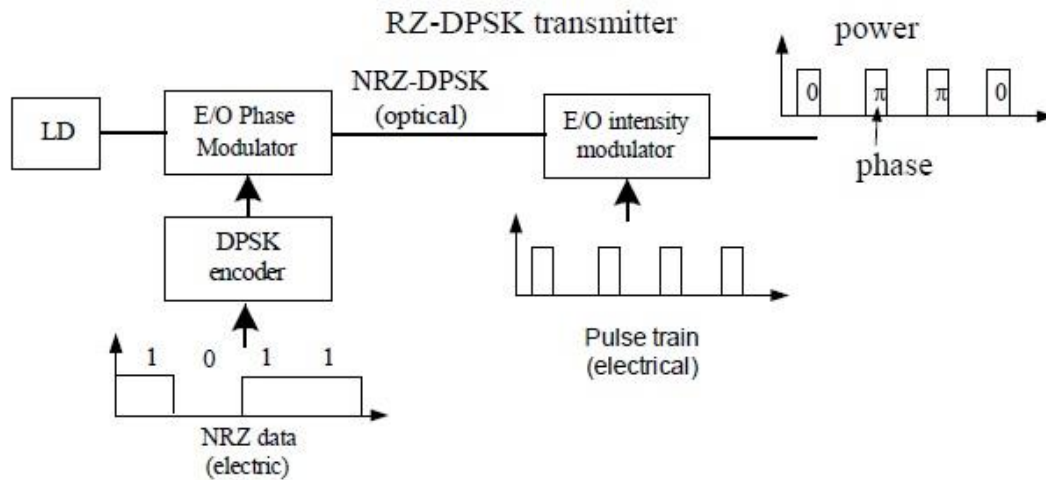
#### 4.5 DPSK (Differential Binary Phase Shift Keying)

Η διαφορική διαμόρφωση μετατόπισης φάσης ή αλλιώς Διαφορική PSK όπως αναφέρεται συνήθως είναι μία από τις πιο βασικές και σημαντικές τεχνικές διαμόρφωσης στα οπτικά συστήματα. Στο κεφάλαιο 3.2.3 αναφέραμε τον τρόπο λειτουργίας της ψηφιακής διαμόρφωσης φάσης PSK. Η διαφορά εδώ είναι ότι η πληροφορία του bit αποτυπώνεται στην διαφορά φάσης του συμβόλου σε σχέση με το προηγούμενο, δηλαδή διαμορφώνονται οι αλλαγές φάσης σε σχέση με το προηγούμενο σύμβολο. Αυτό σημαίνει ότι η φάση ενός συμβόλου καθορίζεται όχι απόλυτα αλλά διαφορετικά κάθε φορά, από την φάση του προηγούμενου συμβόλου. Πιο συγκεκριμένα όταν το bit της πληροφορίας είναι 1, τότε έχουμε μετατόπιση της φάσης του φέροντος σήματος κατά  $180^\circ$  σε σχέση με την προηγούμενη φάση του, ενώ όταν το bit πληροφορίας είναι 0 τότε δεν έχουμε μετατόπιση φάσης. Η εικόνα 4.5.1 μας βοηθάει να κατανοήσουμε πολύ πιο εύκολα την σχέση αλλαγής φάσης του φέροντος σε σχέση με την τιμή του bit. Παρατηρούμε ότι κάθε φορά που το bit έχει την τιμή '1', η φάση του φέροντος μετατοπίζεται κατά  $180^\circ$ .



Εικόνα 4.5.1 Διαμορφωμένο σήμα κατά DPSK

Στην εικόνα 4.5.2 βλέπουμε ένα μπλοκ διάγραμμα της DPSK ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα την λειτουργία της.



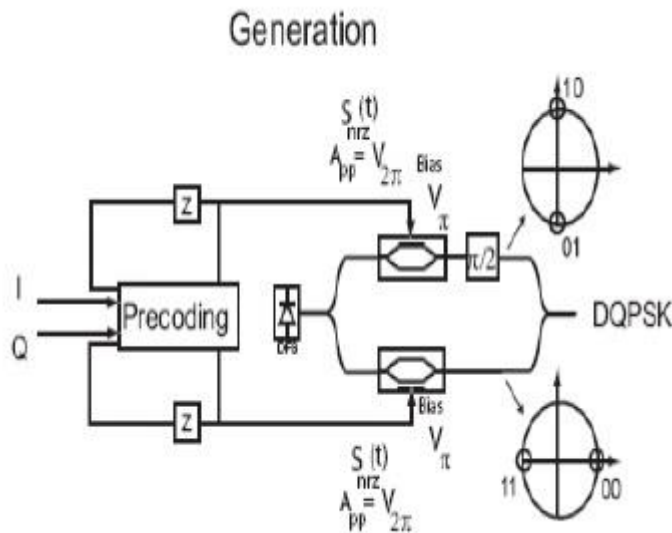
Εικόνα 4.5.2 Διάγραμμα μπλοκ ενός RZ-DPSK πομπού [14],[25]

Σε έναν πομπό DPSK, τα NRZ δεδομένα αρχικά μετατρέπονται από μια πύλη NOR και στη συνέχεια συνδυάζονται με ένα 1-bit delay σε μια XOR πύλη. Το ηλεκτρικό σήμα κωδικοποιημένο κατά DPSK οδηγείται στην συνέχεια μέσω ενός ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή φάσης για τη δημιουργία οπτικού σήματος DPSK. Έπειτα ένας ακόμη διαμορφωτής έντασης εισάγει ένα οπτικό παλμό ώστε να πάρουμε το τελικό RZ-DPSK. Το ψηφιακό bit "1" αντιπροσωπεύεται από μια αλλαγή φάσης  $\pi$  στον οπτικό φορέα μεταξύ των διαδοχικών bit. Για την αποδιαμόρφωση του σήματος αντίστοιχα, αρχικά θα πρέπει πρώτα το σήμα να μετατραπεί από διαμόρφωση φάσης σε διαμόρφωση πλάτους. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την βοήθεια ενός διαμορφωτή Mach-Zehnder λίγο πριν το σήμα φτάσει στον δέκτη, ο οποίος συνήθως είναι μία φωτοδίοδος που μπορεί να ανιχνεύσει την οπτική ισχύ. Ο τύπος αυτός διαμόρφωσης είναι πολύ σημαντικός και μας βοηθάει στο να περιορίσουμε την επίδραση σφάλματος στον δέκτη αλλά και στον σχεδιασμό ευκολότερων συστημάτων λήψης.

#### 4.6 DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)

Η DQPSK μεταδίδει δύο bit για κάθε σύμβολο οπότε έχουμε 4 συνδυασμούς bit (00, 01, 11, 10). Εδώ το φέρον έχει μία από τις τέσσερις φάσεις ( $0, \pi/2, -\pi/2, \pi$ ) όπου κάθε μία από αυτές αναπαριστά 2 bits σε καθένα από τους τέσσερις συνδυασμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για την συγκεκριμένη διαμόρφωση στο κύκλωμα του πομπού χρησιμοποιείται μία πηγή συνεχούς οπτικού σήματος (laser), ένας διαχωριστής ο οποίος διαιρεί το φως σε δύο διαδρομές με δύο αντίστοιχους

διαμορφωτές Mach-Zehnder ως ρυθμιστές φάσης. Στην μία υπάρχει οπτικός μεταλλάκτης φάσης  $\pi/2$ . Οι δύο διαδρομές καταλήγουν σε ένα συζεύκτη (combiner) ώστε να έχουμε το τελικό σήμα εξόδου του πομπού. Το διάγραμμα ενός σχήματος διαμόρφωσης DQPSK φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.6.1 Διάγραμμα μπλοκ ενός DQPSK πομπού [14],[25]

Αντίστοιχα στον δέκτη υπάρχουν οι αποδιαμορφωτές που ανιχνεύουν και λαμβάνουν το σήμα. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση έχει στενότερο φάσμα σε σχέση με την DPSK, οπότε μεγαλύτερη ανεκτικότητα στην διασπορά και επιτρέπει καλύτερο οπτικό φιλτράρισμα και μικρότερα διαστήματα καναλιών. Πιο συγκεκριμένα επιτρέπει επεξεργασία ρυθμού δεδομένων 40Gb/sec σε διάστημα καναλιού 50GHz.

# **Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ**

## **ΜΕΡΟΣ**

## 5. Προσομοίωση και συγκριτική μελέτη των τεχνικών διαμόρφωσης με την βοήθεια του Optisystem

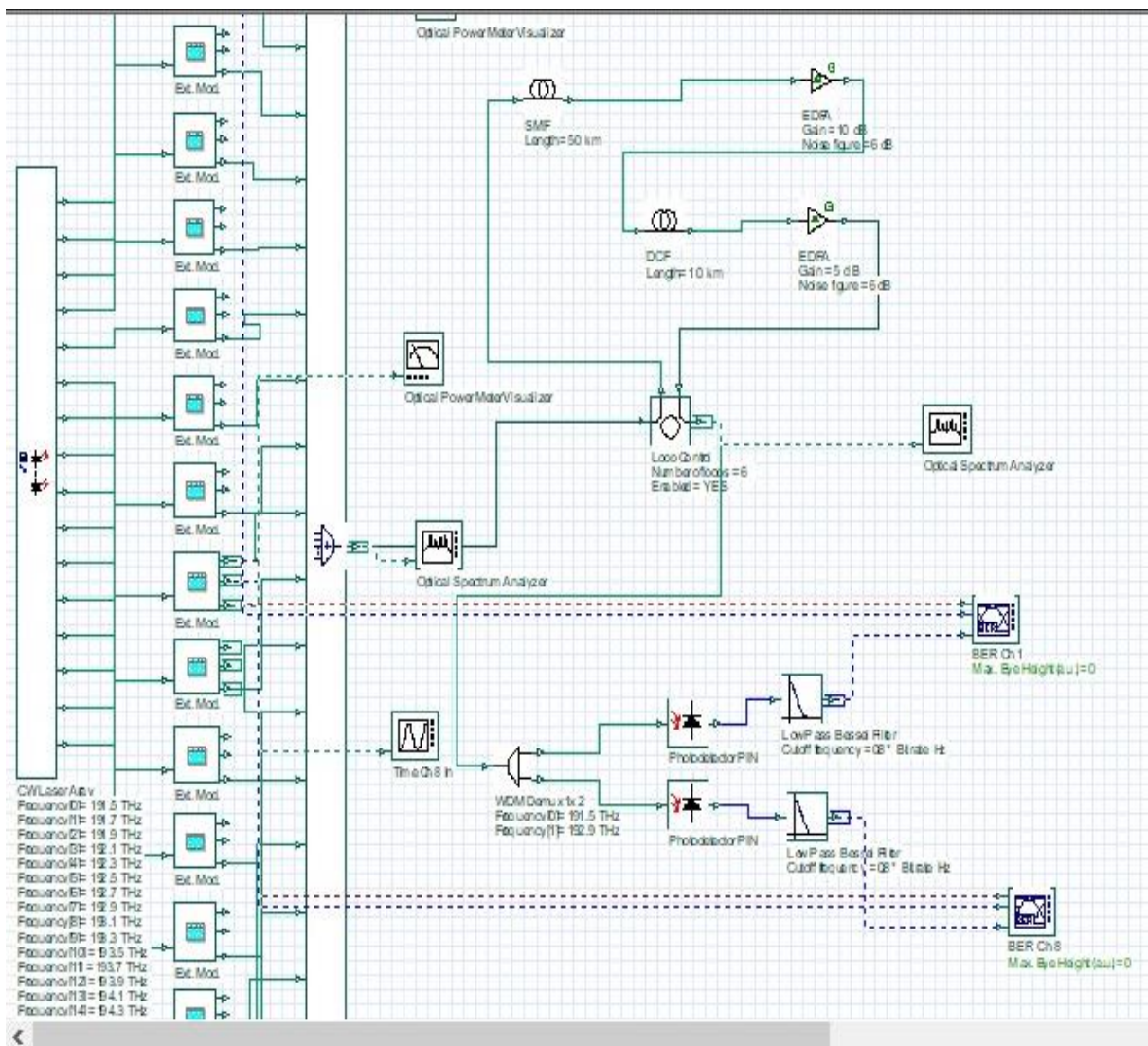
Σ' αυτό το κεφάλαιο θα γίνει συστηματική μελέτη και σύγκριση των μεταξύ του επιδόσεων, προσομοιώνοντας το οπτικό δίκτυο WDM στα πλαίσια του λογισμικού 'Optisystem'. Αρχικά θα δοθεί μια σαφή εικόνα ολόκληρου του σχεδιασμού και έπειτα θα εξετασθεί κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Αφού τελειώσουμε με το σχεδιαστικό μέρος θα προσομοιωθούν έξι διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης οπτικού σήματος σε δύο διαφορετικά σενάρια απ όπου θα προκύψουν τα αντίστοιχα διαγράμματα (plots). Στο πρώτο σενάριο, θα μεταβάλλεται, αυξητικά, η ισχύς του οπτικού σήματος (laser) διατηρώντας σταθερή την απόσταση της οπτικής ζεύξης και στο δεύτερο σενάριο θα αυξάνεται η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη διατηρώντας την ισχύ σταθερή. Παρατηρώντας και καταγράφοντας τις τιμές των δεικτών ποιότητας BER και Q Factor θα προκύψουν τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Η ίνα που θα χρησιμοποιηθεί είναι η τυπική ίνα μονότροπης διάδοσης (SMF). Ταυτόχρονα θα ληφθούν υπ όψιν όλες οι παράμετροι, όπως φαινόμενα διασποράς, μη γραμμικά φαινόμενα κτλ. Τέλος θα αναφερθεί γιατί επιλέγονται αυτές οι παράμετροι, η σημασία τους, καθώς και οι επιπτώσεις που έχουν στα προσομοιωμένα αποτελέσματα.

### 5.1 Σχεδιασμός οπτικού δικτύου WDM NRZ με 16 καναλιών με την βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης Optisystem.

#### Οπτικό δίκτυο πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) 16 καναλιών

Η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος "WDM" (Wavelength Division Multiplexing) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Για την πολυπλεξία πολλαπλών οπτικών σημάτων σε μια ενιαία οπτική ίνα χρησιμοποιούνται διαφορετικά μήκη κύματος (χρώματα) φωτός για τη μεταφορά μεμονωμένων ροών δεδομένων. Λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή ότι διαφορετικά μήκη κύματος φωτός μπορούν να ταξιδεύουν ταυτόχρονα μέσω μιας οπτικής ίνας χωρίς να παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Σε κάθε ροή δεδομένων (ή κανάλι) εκχωρείται ένα μοναδικό μήκος κύματος και πολλαπλά κανάλια συνδυάζονται σε μια ενιαία οπτική ίνα χρησιμοποιώντας έναν πολυπλέκτη "MUX". Το "MUX" συνδυάζει αυτά τα κανάλια μήκους κύματος σε μια κοινή ίνα εξόδου, δημιουργώντας ένα σύνθετο οπτικό σήμα με πολλαπλά μήκη κύματος. Καθώς τα μεμονωμένα οπτικά σήματα εισέρχονται στο mux μέσω των αντίστοιχων θυρών εισόδου τους, συνδυάζονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας στοιχεία επιλογής μήκους κύματος, όπως τα πλέγματα περίθλασης, τα παρατεταγμένα πλέγματα κυματοδηγού (AWG) ή τα φίλτρα λεπτής μεμβράνης.[15] Έτσι διασφαλίζεται ότι κάθε κανάλι μήκους κύματος κατευθύνεται στην κατάλληλη ίνα εξόδου. Η ίνα εξόδου του "MUX" μεταφέρει το σύνθετο οπτικό σήμα που περιέχει όλα τα συνδυασμένα κανάλια μήκους κύματος. Στο άκρο λήψης, ένας αποπολυπλέκτης "DEMUX" διαχωρίζει τα συνδυασμένα οπτικά σήματα πίσω στα μεμονωμένα κανάλια μήκους κύματος, επιτρέποντας σε κάθε ροή δεδομένων να ανιχνεύεται και να υποβάλλεται σε επεξεργασία ανεξάρτητα. Η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας, με κυριότερο την σημαντική αύξηση της συνολικής χωρητικότητας στη μετάδοσης του οπτικού δικτύου. Επίσης τα συστήματα WDM μπορούν εύκολα να επεκταθούν προσθέτοντας επιπλέον μήκη κύματος/κανάλια για να ικανοποιήσουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η ευελιξία. Το WDM επιτρέπει τη μετάδοση διαφορετικών τύπων δεδομένων (π.χ. φωνή, βίντεο, δεδομένα) μέσω

της ίδιας οπτικής ίνας ταυτόχρονα, παρέχοντας ευελιξία στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του δικτύου. Τέλος και αρκετά σημαντικό είναι το κόστος. Τέλος μειώνει την ανάγκη για πρόσθετη υποδομή οπτικών ινών, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κόστους σε σύγκριση με την ανάπτυξη ξεχωριστών ινών για κάθε ροή δεδομένων. Το οπτικό δίκτυο που θα μελετήσουμε και θα κάνουμε τις συγκρίσεις των διαμορφώσεών μας είναι ένα WDM 16 καναλιών το οποίο διανύει μία απόσταση οπτικής ίνας 360km μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Πιο αναλυτικά, στην εικόνα 5.1 από αριστερά έχουμε ένα laser Array δεκαέξι πομπών διαφορετικών συχνοτήτων, οι οποίοι καταλήγουν σε δεκαέξι subsystems στους οποίους γίνονται οι διαμορφώσεις του οπτικού σήματος. Τα δεκαέξι αυτά διαμορφωμένα οπτικά σήματα καταλήγουν σε ένα multiplexer. Στην συνέχεια αυτό συνδέεται με μία οπτική ζεύξη, η οποία αποτελείται από κομμάτια οπτικής ίνας και οπτικούς ενισχυτές και ένα “loop” ώστε να μπορέσω να πάρω το εφικτό μήκος της οπτικής ζεύξης. Καταλήγει σε ένα αποπολυπλέκτη όπου διαχωρίζονται οι συχνότητες του πρώτου και του όγδοου καναλιού και στους τελικούς δέκτες, οι οποίοι αποτελούνται από φωτοδιόδους για την επαναφορά του αρχικού ηλεκτρικού μας σήματος. Στις εξόδους έχουμε τοποθετήσει τα BER analyzer για την μέτρηση των συντελεστών ποιότητας του τελικού σήματος.

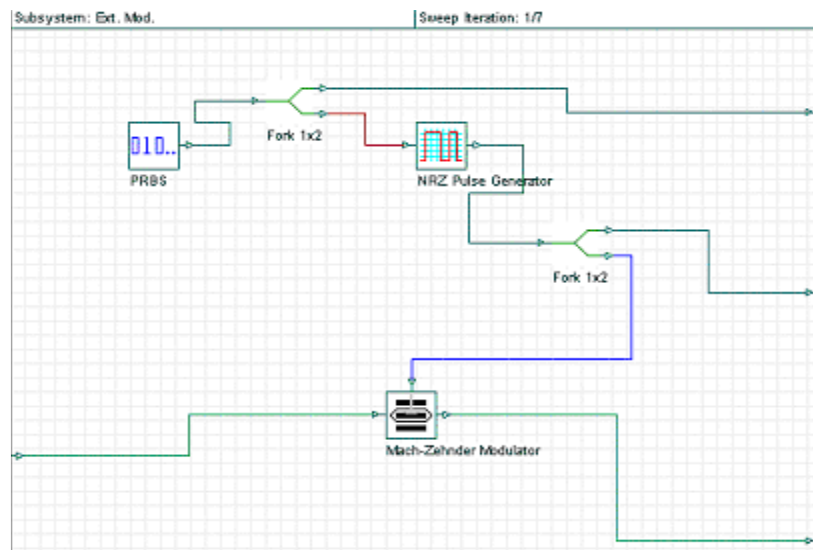


Εικόνα 5.1 Δίκτυο WDM 16 καναλιών



## Υποσύστημα διαμόρφωσης

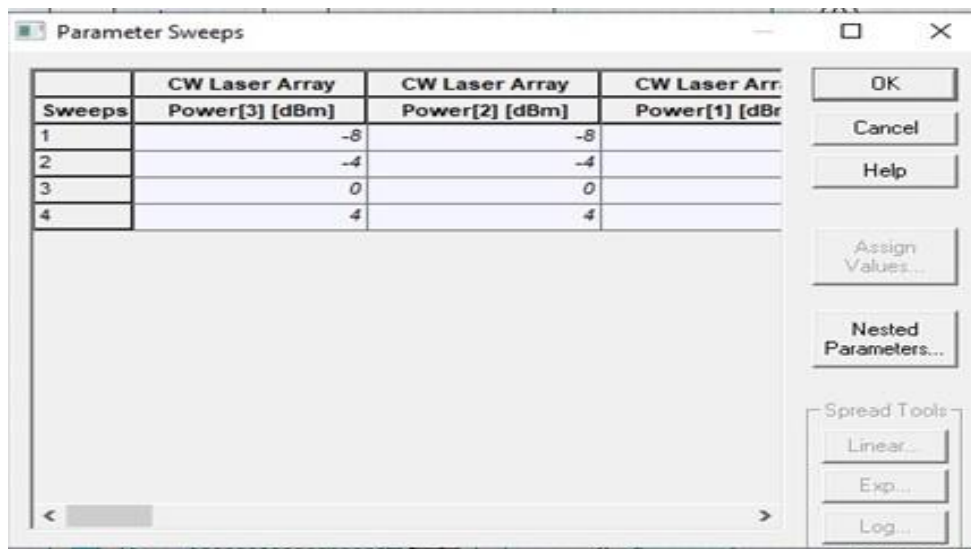
Όπως βλέπουμε στην εικόνα 5.1.1 το συγκεκριμένο υποσύστημα αποτελείται από μια γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας δυαδικών ψηφίων, μία γεννήτριάς παλμών NRZ και ένα διαμορφωτή Mach-Zehnder. Η χρήση ενός υποσυστήματος απλοποιεί ολόκληρη τη διαδικασία σχεδιασμού και μας βοηθά να το κατανοούμε καλύτερα χωρίζοντας το σε νοητά τμήματα. Παρακάτω θα χρειαστεί να σχεδιαστούν και να γίνει σύγκριση διαμορφώσεων σε οπτικά δίκτυα με ίδιες παραμέτρους. Οι σχεδιαστικές αλλαγές με την βοήθεια των subsystems γίνονται πιο εύκολα και πιο γρήγορα.



Εικόνα 5.1.1 Διαμόρφωση NRZ external modulation στο λογισμικό Optisystem

## Συστοιχία λέιζερ CW

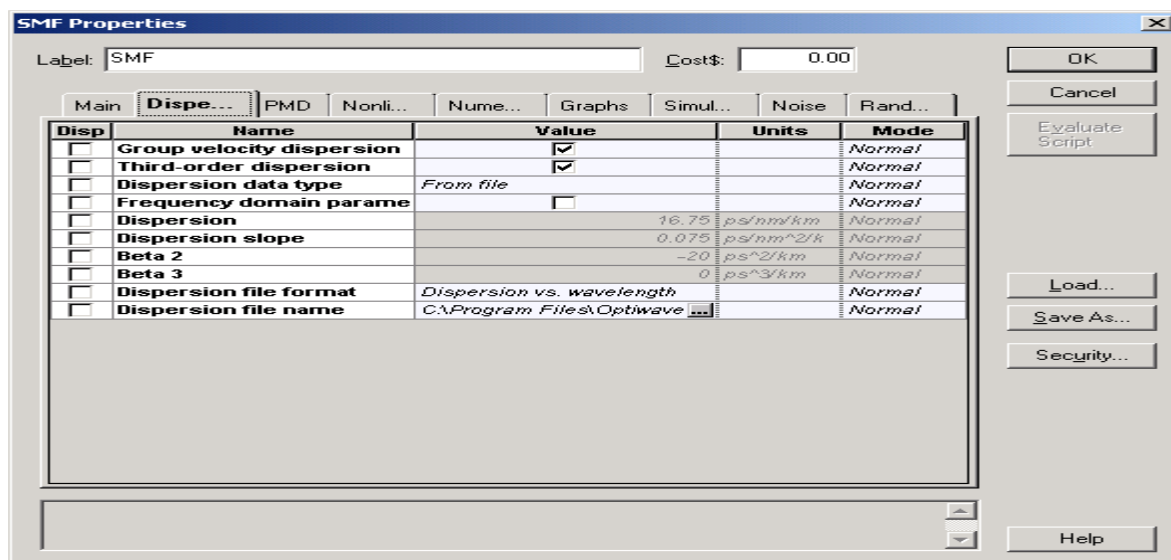
Αρχικά θα εισαχθεί ο αριθμός των θυρών εξόδου και, στη συνέχεια, θα εισαχθούν οι τιμές συχνότητας για κάθε κανάλι. Οι τιμές συχνότητας μπορούν να εισαχθούν με την βοήθεια του παράθυρου διαλόγου όπου επιτρέπει την εισαγωγή της πρώτης τιμής συχνότητας και στη συνέχεια να αυξάνεται κάθε επόμενη συχνότητα κατά μια σταθερή τιμή. Αυτή η μέθοδος εξοικονομεί χρόνο όταν έχουμε να ορίσουμε τιμές σε πολλά κανάλια. Στην καρτέλα Power θα επιλεγθεί η λειτουργία (mode) σε 'Sweep' σε 4 διαφορετικές επαναλήψεις (iterations), με ελάχιστη και μέγιστη τιμή -8 dBm και 4 dBm αντίστοιχα. Εικόνα 5.1.2



Εικόνα 5.1.2 CW Array Laser – Power Iterations

### Μονότροπη ίνα (Single mode fiber)

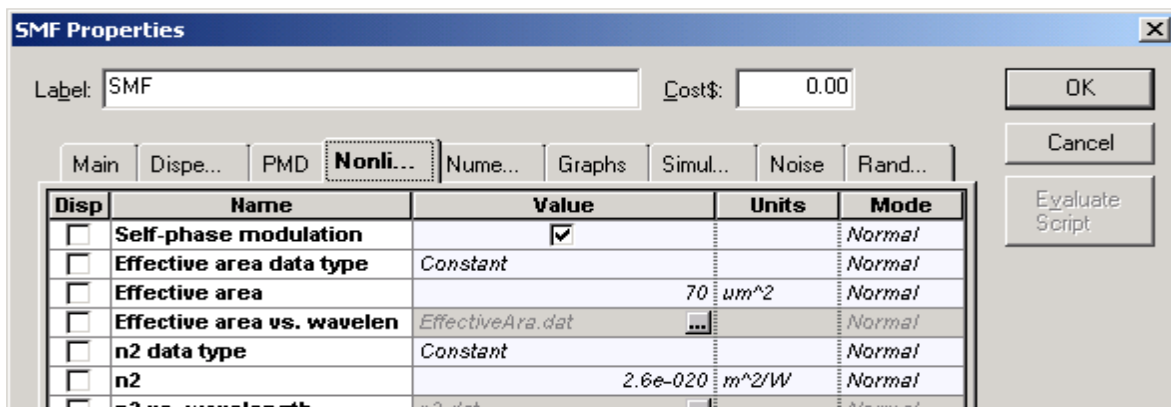
Οι παράμετροι που επιλέγονται για την χρήση της ίνας είναι εξαιρετικά σημαντικές και θα επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η πρώτη καρτέλα (Main) επιτρέπει να επιλέχθει το μήκος της ίνας σας (50 km), η εξασθένιση και η απόδοση ζεύξης εισόδου/εξόδου. Στην δεύτερη καρτέλα (dispersion), έχει φορτωθεί ένα αρχείο δεδομένων GVD, το οποίο το παρέχει ο κατασκευαστής της ίνας και είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο από αυτόν (Εικόνα 5.1.3). Αυτό το αρχείο επιτρέπει να λαμβάνονται υπόψη, στα αποτελέσματα μας, φαινόμενα διασποράς που συμβαίνουν στην ίνα.



Εικόνα 5.1.3 Χαρακτηριστικά της SMF στο Optiwave (dispersion)

Επόμενη καρτέλα που μας ενδιαφέρει είναι η καρτέλα Nonlinear (Εικόνα 5.1.4), όπου μπορείτε να ελέγξετε όλες τις μη γραμμικές παραμέτρους, όπως το Effective Area και το n<sub>2</sub>. Η πιο σημαντική

παράμετρος σε αυτήν την καρτέλα είναι η Effective area. Ο όρος effective area, αναφέρεται στην περιοχή διατομής μέσω της οποίας η οπτική ισχύς περιορίζεται στον πυρήνα της ίνας. Πιο συγκεκριμένα, αντιπροσωπεύει την περιοχή στην οποία διαδίδεται η οπτική ισχύς εντός του πυρήνα της οπτικής ίνας. Η αποτελεσματική περιοχή μιας οπτικής ίνας εξαρτάται από το προφίλ του δείκτη διάθλασης, τη διάμετρο του πυρήνα και το αριθμητικό άνοιγμα (NA). Αυτή η τιμή μπορεί να ληφθεί από τους προμηθευτές ινών. Η παράμετρος n2 αφορά τον μη γραμμικό δείκτη διάθλασης του υλικού που συνθέτει τον πυρήνα της ίνας. Αυτή η παράμετρος περιγράφει την απόκριση του υλικού στην ένταση του φωτός που διαδίδεται μέσω της ίνας και είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τον προσδιορισμό των μη γραμμικών οπτικών ιδιοτήτων της ίνας. .

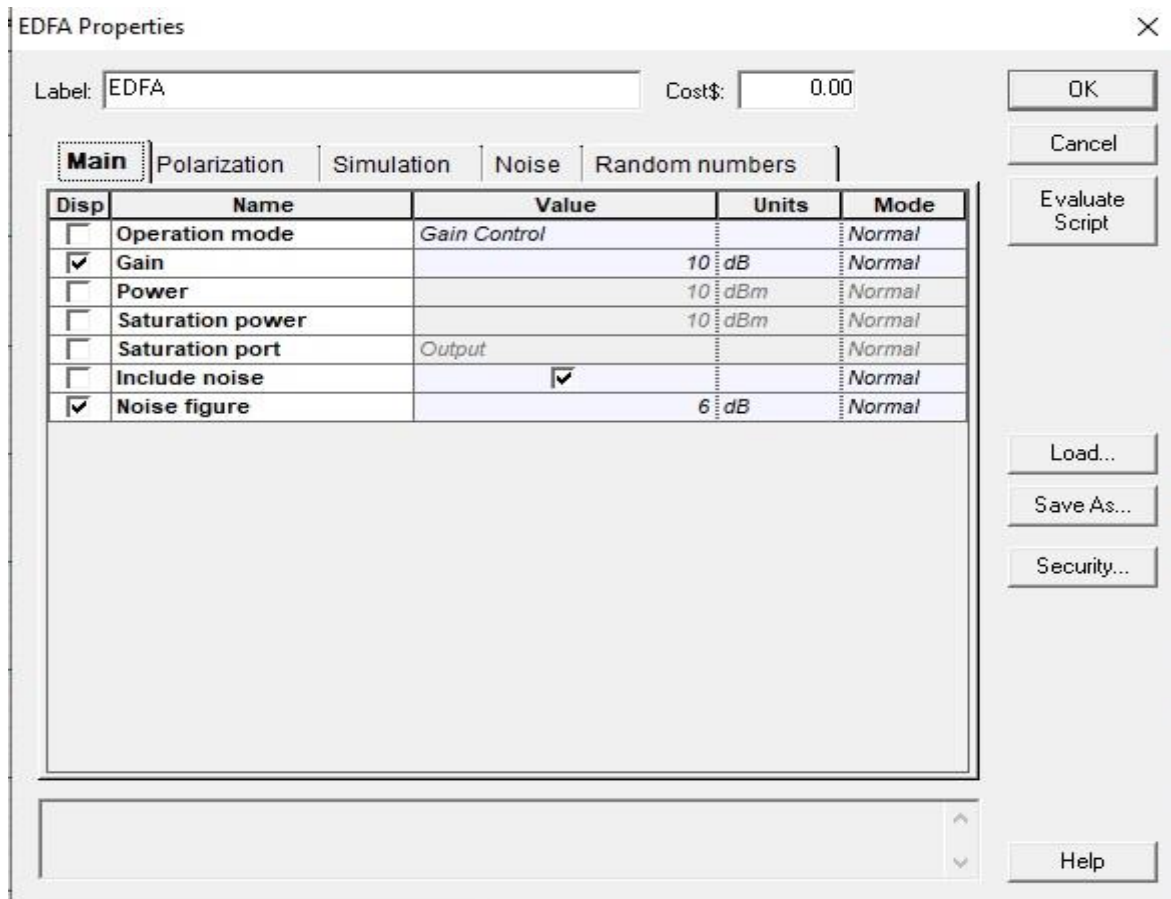


Εικόνα 5.1.4 Χαρακτηριστικά της SMF στο Optiwave (Nonlinear)

## EDFA (Erbium – Doped –Fiber- Amplifier)

Το δίκτυό μας σαφώς θα χρειαστεί κάποια ενδιάμεση ενίσχυση σήματος και αυτό θα γίνει με την βοήθεια ενισχυτών-ινών Doped Erbium (EDFA) . Είναι ένας τύπος οπτικού ενισχυτή που χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών για την ενίσχυση οπτικών σημάτων που μεταδίδονται μέσω οπτικών ινών. Ο πυρήνας ενός EDFA είναι ένα μήκος οπτικής ίνας εμποτισμένης με ιόντα ερβίου, συνήθως με τη μορφή ίνας γυαλιού πυριτίου με πρόσμειξη ερβίου. Όταν τα οπτικά σήματα περνούν μέσα από την ίνα με πρόσμειξη ερβίου, τα ιόντα ερβίου απορροφούν το οπτικό σήμα (συνήθως σε μήκη κύματος περίπου 980 nm ή 1480 nm), το οποίο τα διεγείρει σε υψηλότερα επίπεδα ενέργειας. Με την επιστροφή στη βασική τους κατάσταση, τα διεγερμένα ιόντα ερβίου εκπέμπουν φωτόνια σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, που αντιστοιχούν στα μήκη κύματος του σήματος που ενδιαφέρουν (π.χ. περίπου 1550 nm στη ζώνη C του οπτικού φάσματος). Αυτή η διαδικασία διεγερμένης εκπομπής έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση του οπτικού σήματος. [4] Στο συγκεκριμένο σενάριο χρησιμοποιούμε ένα μοντέλο Ideal EDFA, το οποίο αφορά μόνο τις παραμέτρους “Gain” και “Noise Figure”. Η παράμετρος “Gain” αναφέρεται στην ενίσχυση της οπτικής ισχύος που επιτυγχάνεται από τον ενισχυτή. Η ενίσχυση μετριέται σε (dB) και αντιπροσωπεύει την αναλογία της

οπτικής ισχύος εξόδου προς την οπτική ισχύ εισόδου, εκφρασμένη λογαριθμικά. Η παράμετρος Noise Figure αφορά την πρόσθετη ισχύ θορύβου που προστίθεται από τον ενισχυτή στο ενισχυμένο σήμα. Ένας χαμηλός αριθμός θορύβου υποδηλώνει ότι ο ενισχυτής εισάγει λιγότερο θόρυβο και διατηρεί την ποιότητα του σήματος πιο αποτελεσματικά. Ο αριθμός θορύβου μετριέται σε (dB) και ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του θορύβου εξόδου προς την ισχύ του θορύβου εισόδου. Αυτές οι δύο τιμές είναι αρκετά ξεκάθαρες, καθώς το Gain έχει ρυθμιστεί να αντισταθμίζει την απώλεια ισχύος στην ίνα και το Noise Figure έχει οριστεί σε τυπική τιμή 6 dB.

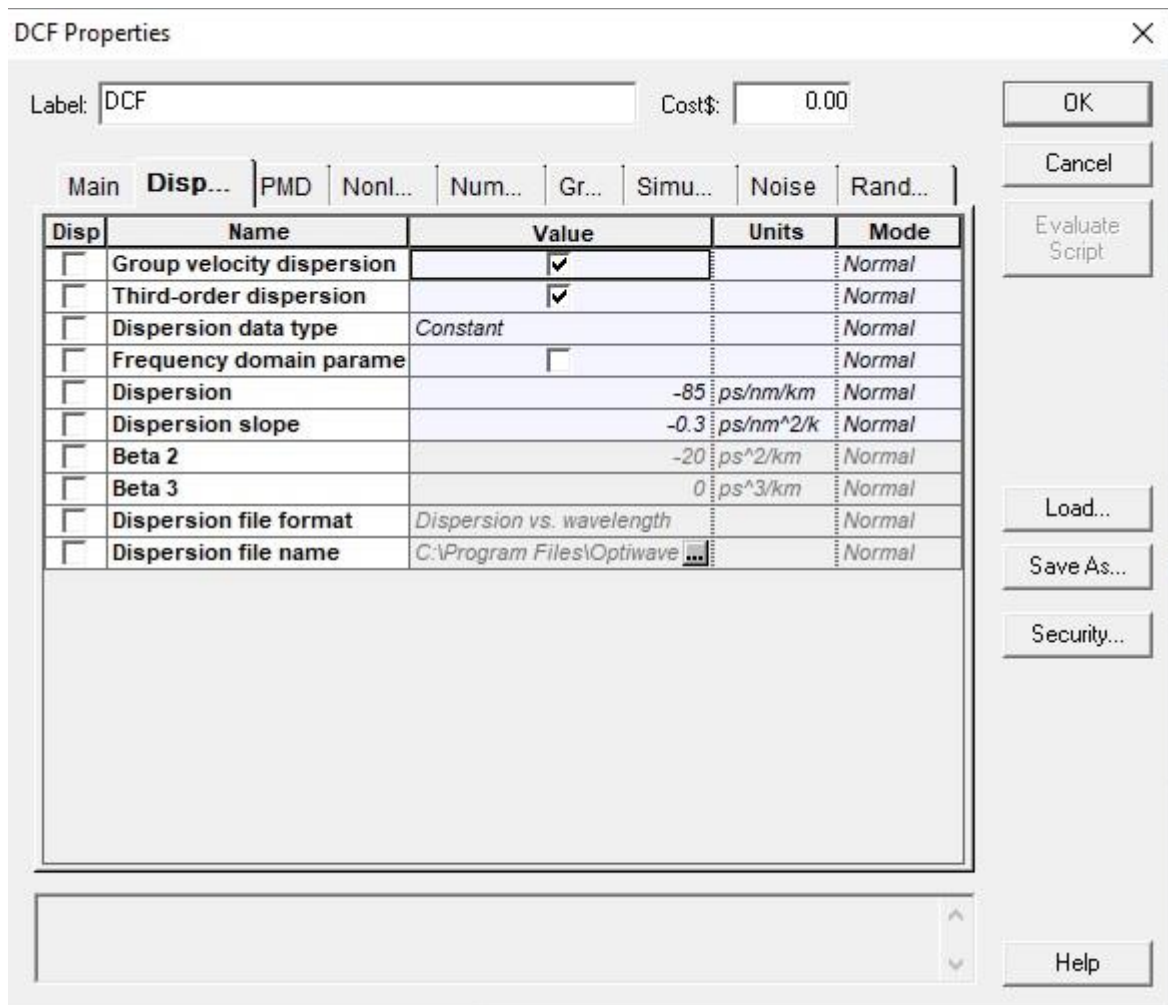


Εικόνα 5.1.5 ιδιότητες Ενισχυτή EDFA

### DCF (Dispersion – Compensating- Fiber)

Είναι ένας τύπος οπτικής ίνας που έχει σχεδιαστεί για να μειώνει τη χρωματική διασπορά. Η ομαδική διασπορά ταχύτητας GVD (Group Velocity Dispersion) συμβαίνει όταν διαφορετικά μήκη κύματος φωτός ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες μέσω μιας οπτικής ίνας, προκαλώντας επιμήκυνση και παραμόρφωση παλμού. Ακόμα η κλίση διασποράς αναφέρεται στον ρυθμό μεταβολής του GVD σε σχέση με το μήκος κύματος. Προσδιορίζει ποσοτικά πώς το μέγεθος του GVD ποικίλλει ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Το συγκεκριμένο είδος ίνας DCF χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση αυτού του φαινομένου και την αποκατάσταση της ακεραιότητας των οπτικών

σημάτων. Οι παράμετροι επιλέχθηκαν παρόμοια με το SMF. Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση θέλουμε να ορίσουμε το μήκος, το GVD και την κλίση διασποράς ώστε να αντισταθμίζουν τέλεια τη διασπορά που συσσωρεύεται στο στοιχείο SMF (βλ. Εικόνα 5.1.6).

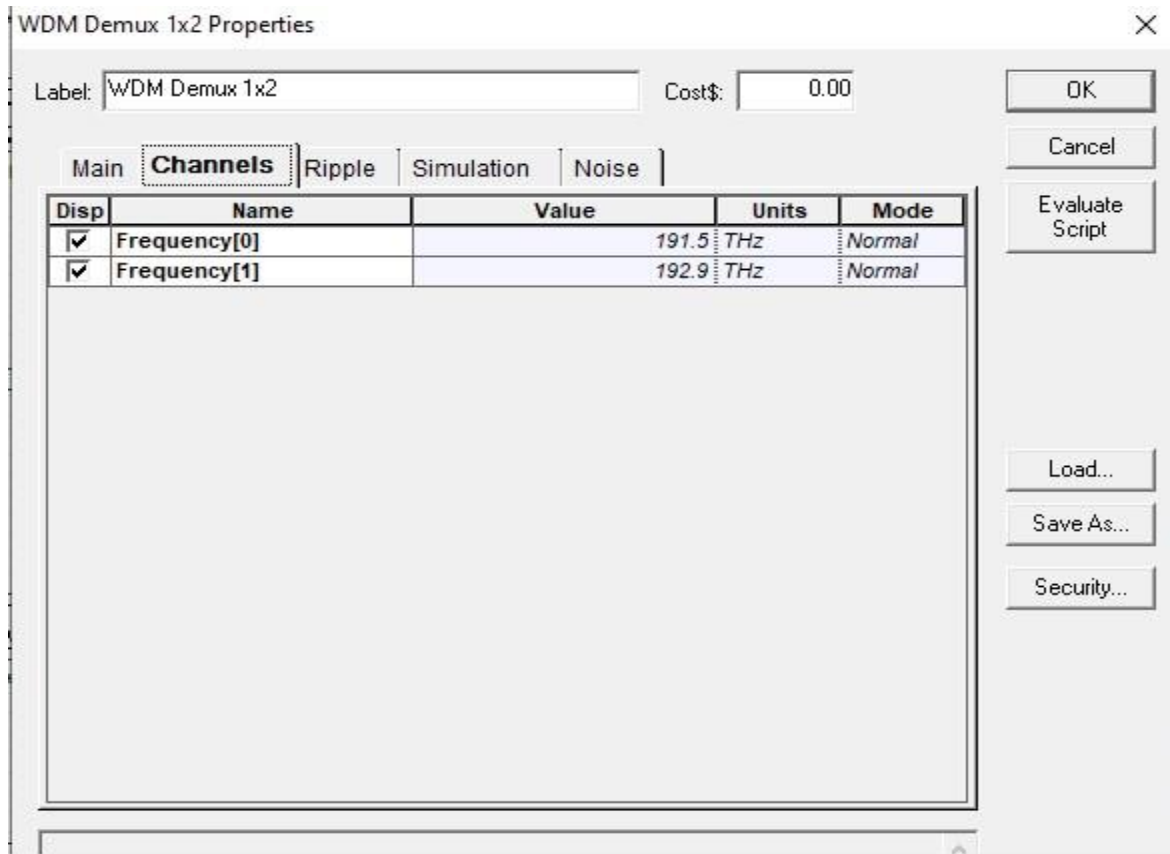


Εικόνα 5.1.6 ιδιότητες ίνας DCF

## WDM Demux

Στα συστήματα πολυπλεξίας διαίρεσης κύματος (WDM), ένα demux, συντομογραφία του αποπολυπλέκτη (demultiplexer), είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό πολλαπλών οπτικών σημάτων, το καθένα από τα οποία μεταφέρεται σε διαφορετικό μήκος κύματος, από μία οπτική ίνα σε μεμονωμένες ίνες εξόδου. Λειτουργεί με βάση την αρχή της επιλεκτικότητας μήκους κύματος. Έχει σχεδιαστεί για να διαχωρίζει τα οπτικά σήματα με βάση τα αντίστοιχα μήκη κύματος τους. Κάθε ίνα εισόδου του demux μεταφέρει πολλαπλά οπτικά σήματα, το καθένα διαμορφωμένο σε διαφορετικό μήκος κύματος. Το demux χρησιμοποιεί στοιχεία επιλεκτικού μήκους κύματος, όπως πλέγματα περίθλασης, παρατεταγμένα πλέγματα κυματοδηγού (AWG) ή οπτικά φίλτρα, για να διαχωρίσει τα εισερχόμενα σήματα με βάση τα μήκη κύματός τους[4]. Κάθε θύρα

εξόδου του demux αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κανάλι μήκους κύματος, επιτρέποντας την εξαγωγή μεμονωμένων οπτικών σημάτων και την κατεύθυνση προς τους αντίστοιχους προορισμούς τους. Στην συγκεκριμένη θα ρυθμιστεί το demux ώστε να πάρουμε έξοδο τις συχνότητες του πρώτου και του όγδοου καναλιού. (Εικόνα 5.1.7). Η επιλογή των καναλιών έγινε με την λογική του πιο απομακρυσμένου καναλιού (πρώτο) και του πιο κοντινού (όγδοο) στην συχνότητα 193.1 THz, ώστε να έχουμε εικόνα του χειρότερου και του καλύτερου σεναρίου στις μετρήσεις που θα ακολουθήσουν.

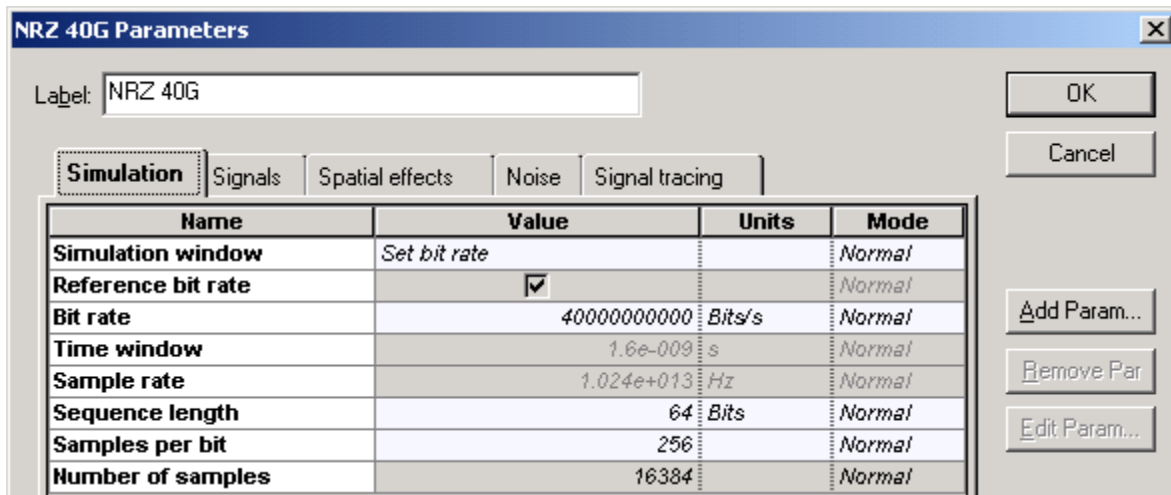


Εικόνα 5.1.7

Τα υπόλοιπα εξαρτήματα είναι πολύ απλά και τις περισσότερες φορές λειτουργούν καλά με τις προεπιλεγμένες τιμές τους.

### Layout parameter

Τέλος το “bit rate” θα ρυθμιστεί από το Layout Parameter στα 40Gbps. Το παράθυρο διαλόγου Layout Parameters μπορεί να ανοίξει κάνοντας διπλό κλικ οπουδήποτε στη διάταξη εμφανίζοντας την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5.1.8

## 5.2 Προσομοίωση και συγκριτική μελέτη διαμορφώσεων οπτικού σήματος σε σύστημα WDM με λογισμικό “Optisystem”

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε σύστημα πολυπλεξίας 16 καναλιών, με απόσταση 200 GHz μεταξύ τους, που διαδίδονται μέσω ινών SMF 360 km θα καταγραφούν οι τιμές των παραμέτρων Q factor και BER αρχικά για τέσσερις διαφορετικές τιμές ισχύος -8, -4, 0 και 4 dBm αντίστοιχα και έπειτα για μεταβολές της απόστασης πομπού και δέκτη, διατηρώντας σταθερή την ισχύ. Στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών, ο παράγοντας Q (Q factor) και ο ρυθμός σφάλματος bit (Bit Error Rate) είναι δύο σημαντικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ποιότητας και της απόδοσης των μεταδιδόμενων σημάτων. Ο παράγοντας Q, γνωστός και ως Συντελεστής Ποιότητας, είναι ένα μέτρο της ποιότητας ενός οπτικού σήματος σε ένα σύστημα επικοινωνίας. Απεικονίζει την σχέση μεταξύ της μέσης οπτικής ισχύος του σήματος και της μέσης οπτικής ισχύος του θορύβου. Μαθηματικά, ο παράγοντας Q υπολογίζεται ως πηλίκο της διαφοράς μεταξύ της μέσης οπτικής ισχύος του σήματος και της μέσης οπτικής ισχύος του θορύβου διά την τυπική απόκλιση θορύβου

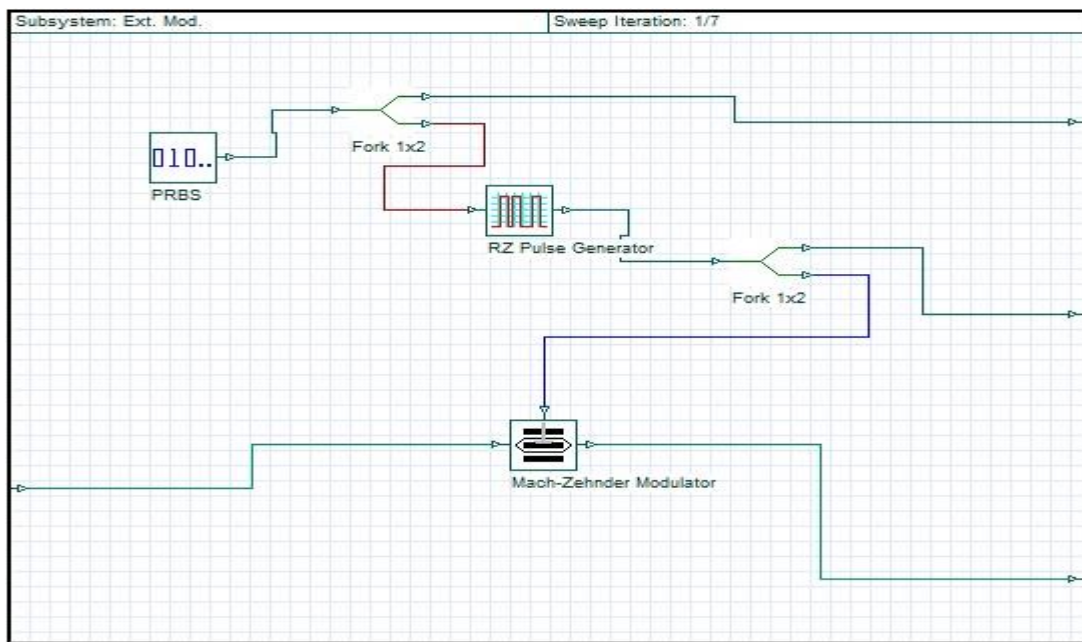
$$Q = \frac{P_{signal} - P_{noise}}{\sigma_{noise}}$$

Ένας υψηλότερος συντελεστής Q υποδηλώνει υψηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) και καλύτερη ποιότητα σήματος. Ο ρυθμός σφαλμάτων bit (BER) είναι ένα μέτρο του αριθμού των σφαλμάτων bit που συμβαίνουν σε ένα σύστημα μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με τον συνολικό αριθμό των bit που μεταδίδονται. Απεικονίζει την ακρίβεια της μετάδοσης και λήψης δεδομένων στο σύστημα. Το BER εκφράζεται συνήθως ως αναλογία ή ποσοστό, που αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να συμβεί ένα σφάλμα bit κατά τη μετάδοση. Ένα χαμηλότερο BER υποδηλώνει υψηλότερη αξιοπιστία μετάδοσης και καλύτερη απόδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, μία τιμή BER  $10^{-9}$

σημαίνει ότι, κατά μέσο όρο, εμφανίζεται ένα σφάλμα bit για κάθε δισεκατομμύριο bit που μεταδίδονται. Αυτή η τιμή θα οριστεί και σαν όριο αποδεκτής λειτουργίας μετάδοσης.

### 5.2.1 Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων RZ και NRZ σε σχέση με την ισχύ

Η πρώτη διαμόρφωση που θα μελετηθεί είναι η NRZ, τα χαρακτηριστικά της οποίας και ο τρόπος λειτουργίας έχουν αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τρέχοντας τις προσομοιώσεις και με την βοήθεια ενός BER Analyzer έγινε συλλογή των αποτελεσμάτων των παραγόντων Q Factor και BER. Έπειτα ακολουθήθηκε η ίδια ακριβώς διαδικασία αντικαθιστώντας το σύστημα διαμόρφωσης σε RZ τροποποιώντας κατάλληλα τα subsystems με αυτά που βλέπουμε στην εικόνα 5.2.1



Εικόνα 5.2.1 Διαμόρφωση RZ στο λογισμικό Optisystem external modulation

Έτσι πήραμε τα αντίστοιχα γραφήματα (plots) τα οποία απεικονίζονται παρακάτω. Το BER analyzer συνδέθηκε στο κανάλι ένα, το οποίο είναι και το πιο απομακρυσμένο θεωρώντας το ως το πιο δυσμενές σενάριο με τις πιθανόν χειρότερες μετρήσεις. Αρχικά τα διαγράμματα απεικονίζουν του BER analyzer χωρίς τις ρυθμίσεις των μη γραμμικών φαινομένων στο λογισμικό μας, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



SMF Properties

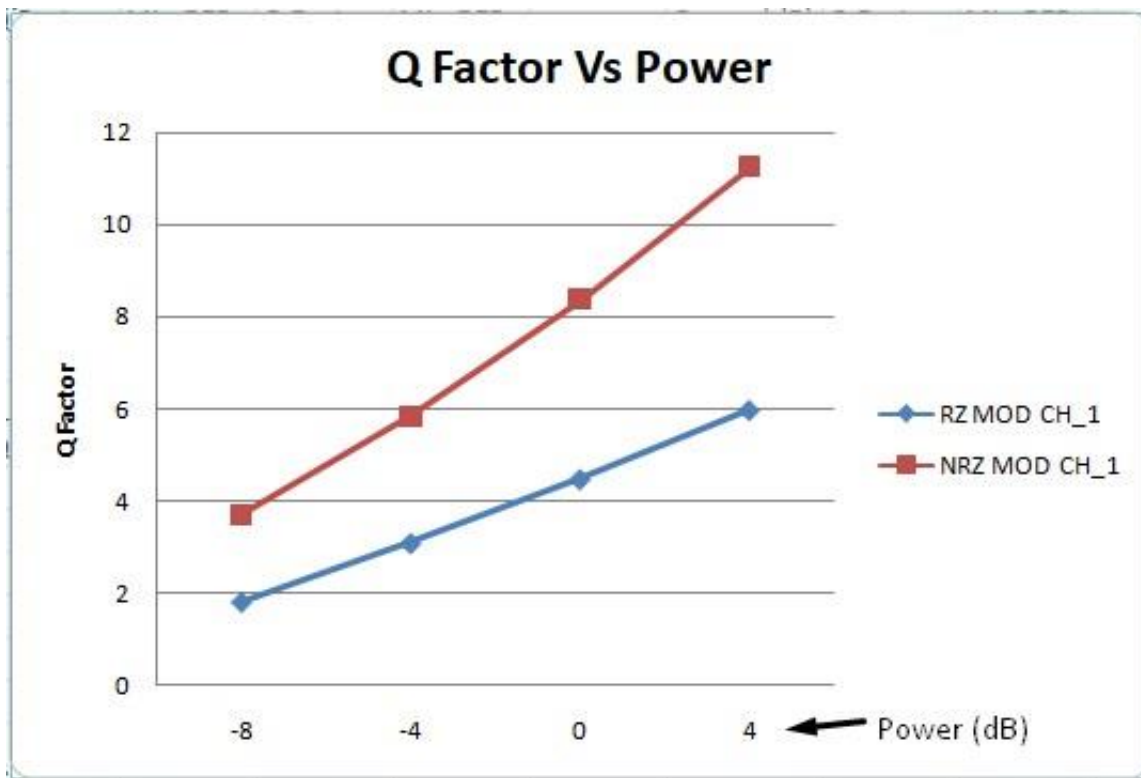
Label: SMF Cost\$: 0.00

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

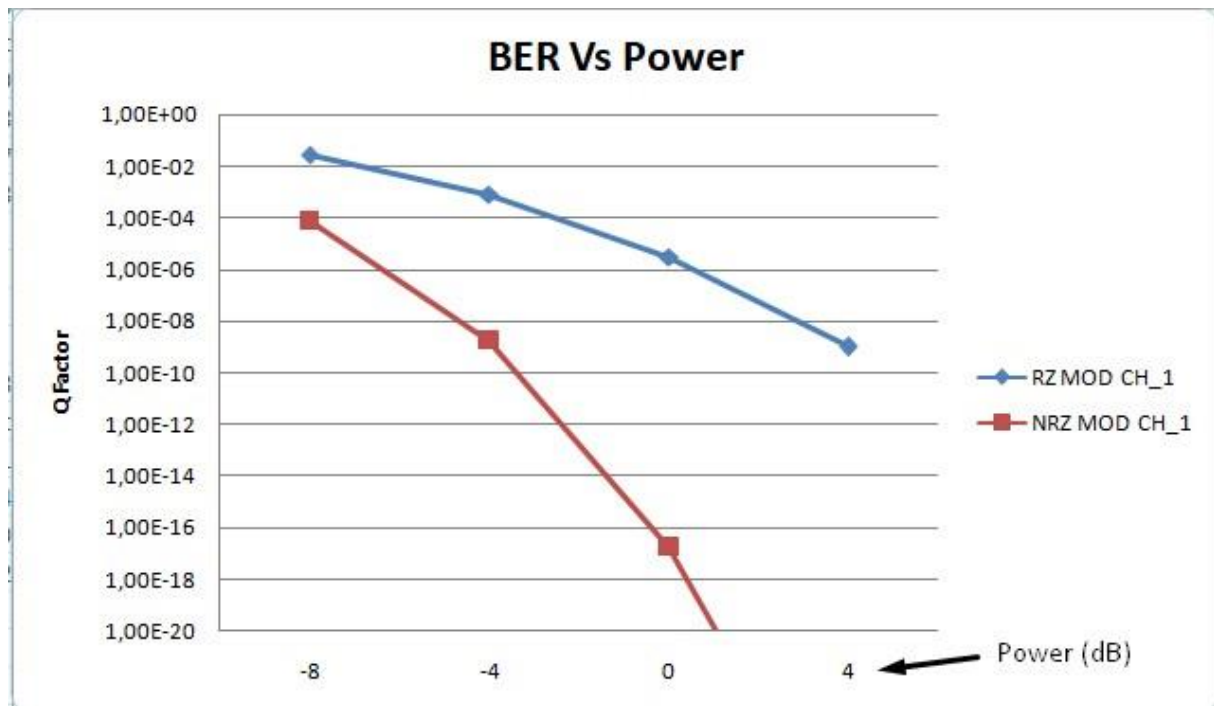
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Self-phase modulation	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Effective area data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Effective area	70	um^2	Normal
<input type="checkbox"/>	Effective area vs. wavelen	EffectiveAra.dat		Normal
<input type="checkbox"/>	n2 data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	n2	2.6e-020	m^2/W	Normal
<input type="checkbox"/>	n2 vs. wavelength	n2.dat		Normal
<input type="checkbox"/>	Self-steepening	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Full Raman Response	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Intrapulse Raman Scatt.	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Raman self-shift time1	14.2	fs	Normal
<input type="checkbox"/>	Raman self-shift time2	3	fs	Normal
<input type="checkbox"/>	Fract. Raman contribution	0.18		Normal
<input type="checkbox"/>	Orthogonal Raman factor	0.75		Normal

Buttons: OK, Cancel, Evaluate Script, Load..., Save As..., Security...

Εικόνα 5.2.2 Non linear effects



Εικόνα 5.2.3 Q Factor Vs Power (dB) για μήκος οπτικής ζεύξης 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 8dB και 5 dB αντίστοιχα και χωρίς γραμμικά φαινόμενα

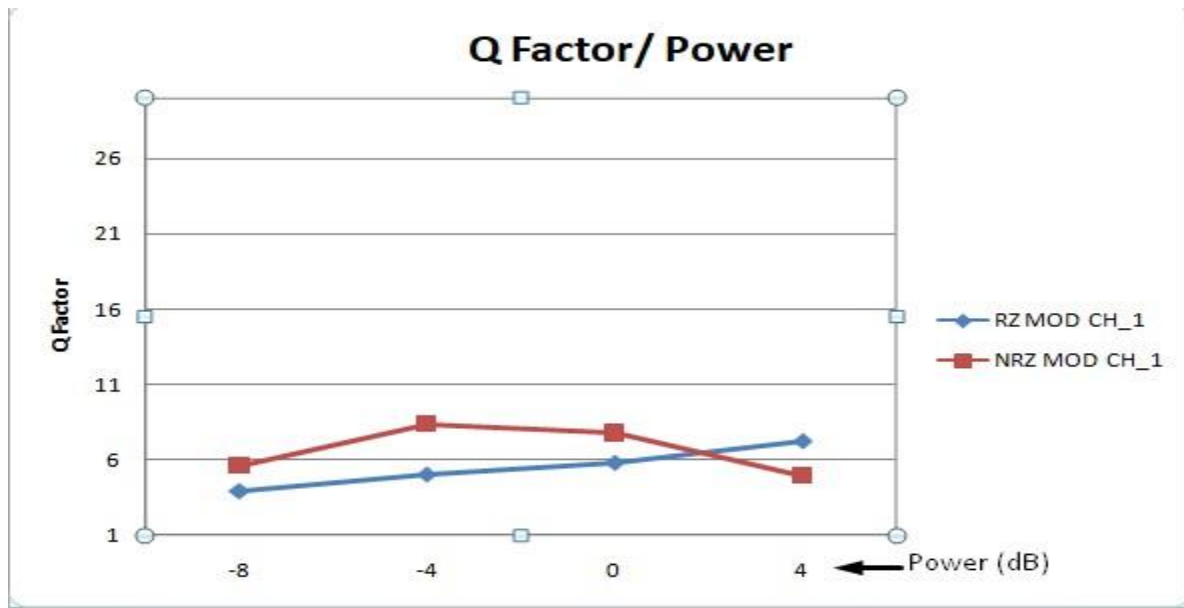


**Εικόνα 5.2.4 BER Vs Power (dB) για μήκος οπτικής ζεύξης 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 8dB και 5 dB αντίστοιχα και χωρίς γραμμικά φαινόμενα**

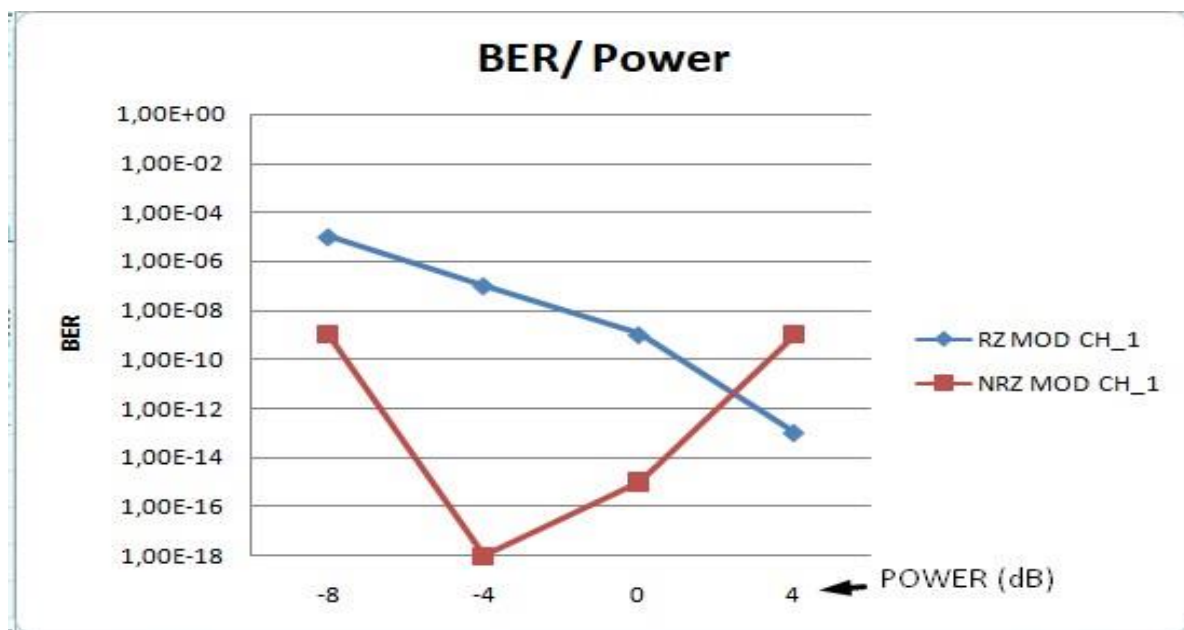
Σαν συμπέρασμα μπορούμε να πούμε πως η ισχύς εισόδου επηρεάζει κατά πολύ το τελικό αποτέλεσμα στην ποιότητα του τελικού σήματος και στις δύο διαμορφώσεις και πως για να είναι λειτουργικό το σύστημα μας, στην περίπτωση της NRZ χρειάζεται ισχύ τουλάχιστον -4dB. Η RZ χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη ισχύ για να δώσει αποδεκτές τιμές, στην συγκεκριμένη περίπτωση 4dB. Όπως ήταν αναμενόμενο και από το θεωρητικό μέρος η NRZ, έχει μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με την RZ, αυτό συμβαίνει επειδή οι παλμοί της RZ έχουν το μισό duty cycle σε σχέση με την NRZ, οπότε έχει και μικρότερη ενέργεια ανά παλμό, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η τιμή του BER.

#### **ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ σε RZ & NRZ**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε πως προσθέτουμε και ρυθμίζουμε τις παραμέτρους των μη γραμμικών φαινομένων στην καρτέλα της μονότροπης ίνας SMF που χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό του δικτύου μας. Εδώ χρειάστηκε να αυξήσουμε και την ενίσχυση στον πρώτο EDFA κατά 2 dB ώστε να οι τιμές των μετρήσεων να κινούνται σε πιο αποδεκτά όρια. Τα αποτελέσματα του BER analyzer με την προσθήκη των μη γραμμικών φαινομένων απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 5.2.5 Q factor Vs Power (dB) για μήκος οπτικής ζεύξης 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων



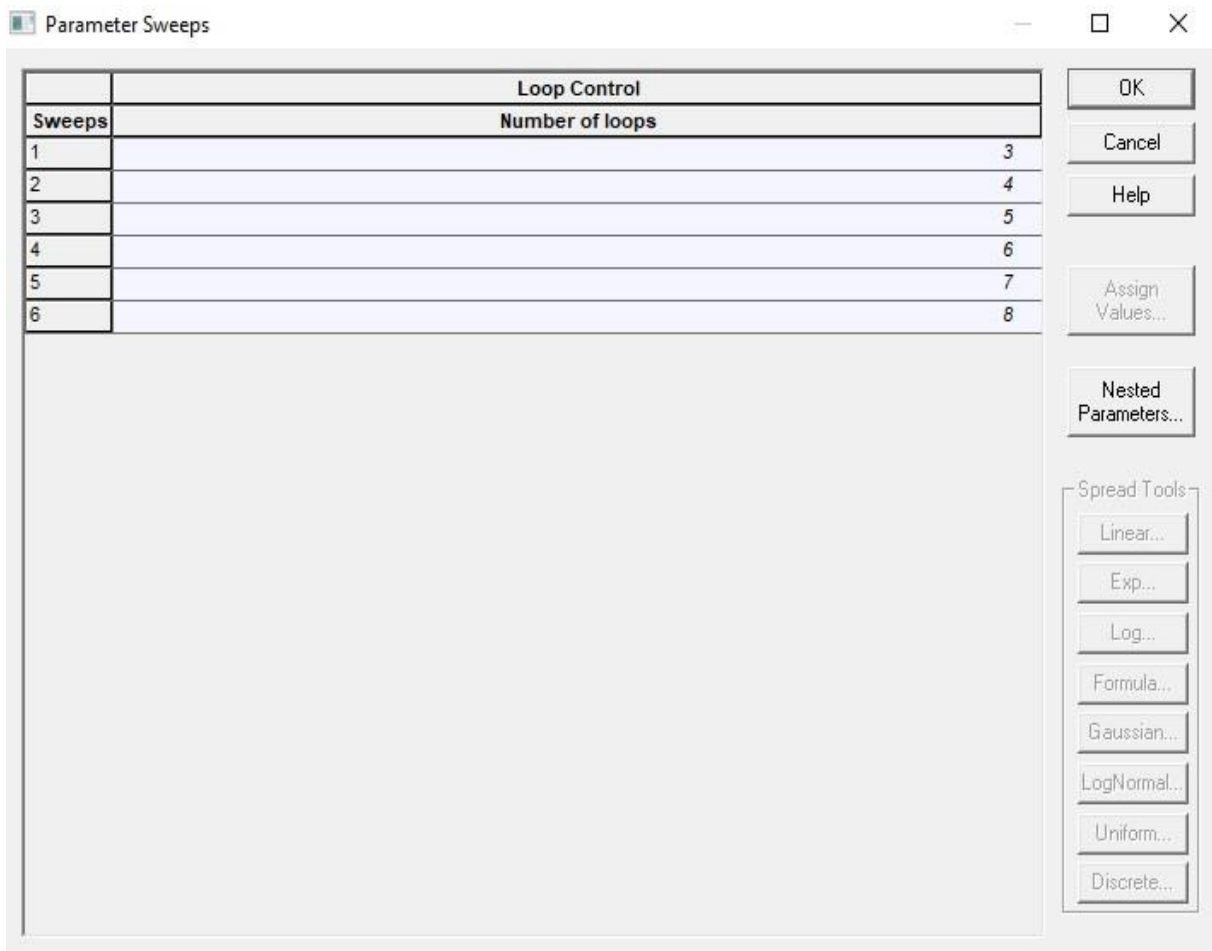
Εικόνα 5.2.6 BER Vs Power (dB) για μήκος οπτικής ζεύξης 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων

Με την προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων χρειάστηκε να αυξήσουμε την ενίσχυση στο πρώτο EDFA κατά 2dB για να μπούμε σε περιθώρια αποδεκτών τιμών. Η NRZ διατηρεί την υπεροχή της στις χαμηλές τιμές ισχύος όμως όταν αυξάνεται αρκετά η τιμή όπως συμβαίνει στην τελευταία περίπτωση, φαίνεται πως επηρεάζεται αρκετά και έχουμε αντιστροφή από τα -4dB και πάνω. Οι μη γραμμικότητες έχουν να κάνουν με την οπτική ισχύ. Όσο μεγαλύτερη η οπτική ισχύς τόσο μεγαλύτερες οι συνέπειες των μη γραμμικών φαινομένων όπως είναι η διασπορά παλμών. Επίσης όσο αλλοιώνεται η μορφή του παλμού τόσο αυξάνεται το BER. Εδώ παρατηρείται πως για το NRZ αυτό είναι πιο έντονο και εξηγείται λογικά, αφού το RZ έχει μεγαλύτερο περιθώριο να διευρυνθεί ο παλμός

του μιας και είναι πιο περιορισμένος, λόγω μικρότερου duty cycle. Άρα σ αυτήν την περίπτωση η RZ βλέπουμε πως λειτουργεί καλύτερα και είναι πιο ανθεκτική.

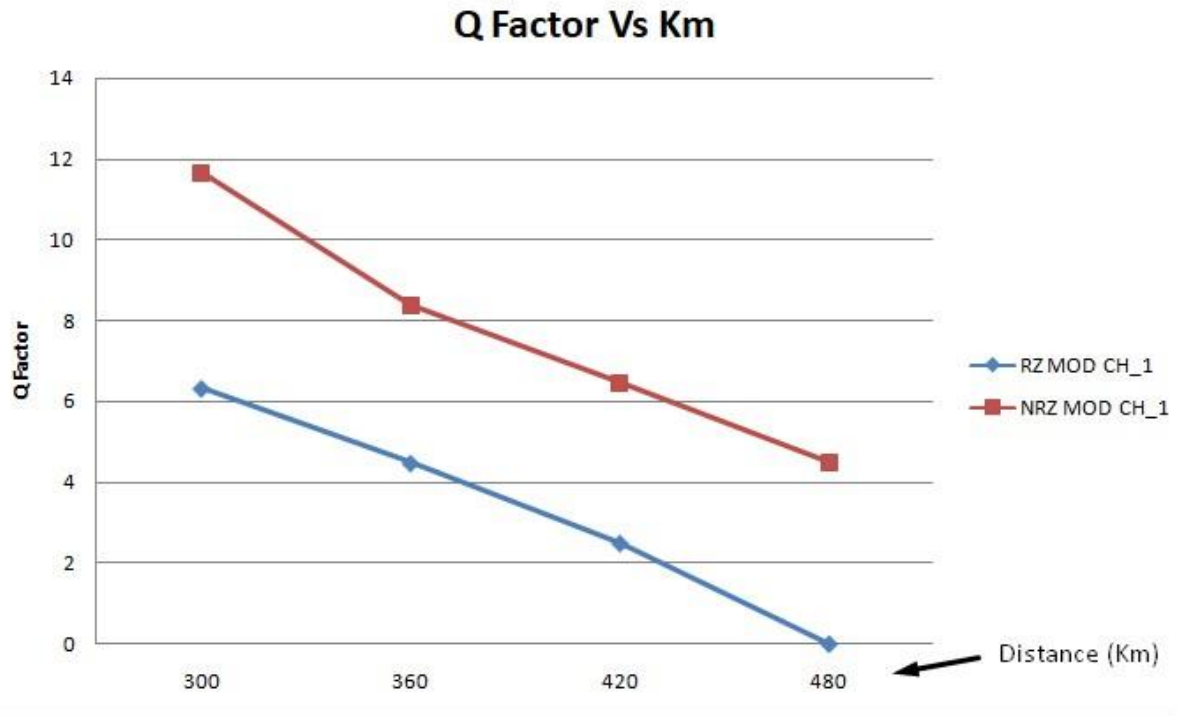
## 5.2.2 Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων RZ και NRZ σε σχέση με την απόσταση

Στη συνέχεια διατηρήθηκε σταθερή η ισχύς του σήματος 0dB, μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι μεταβολές των αποστάσεων κινήθηκαν μεταξύ 180Km και 480km. Η διαδικασία έγινε με τις κατάλληλες ρυθμίσεις του εξαρτήματος “loop control” σε λειτουργία “sweep” με έξι επαναλήψεις και με τιμές από τρία έως οκτώ αντίστοιχα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Σε κάθε επανάληψη το σήμα μας διανύει 60Km.

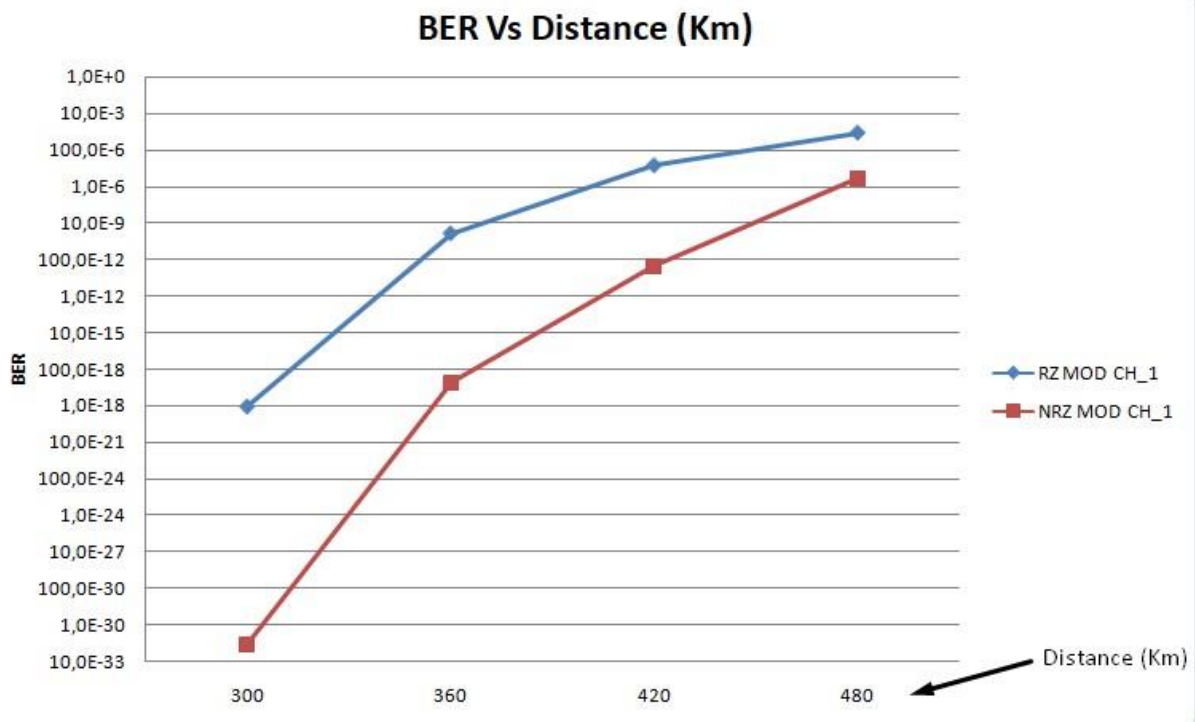


Εικόνα 5.2.7 Iterations of loop control

Τα παρακάτω διαγράμματα μας δείχνουν τις μεταβολές των παραμέτρων.



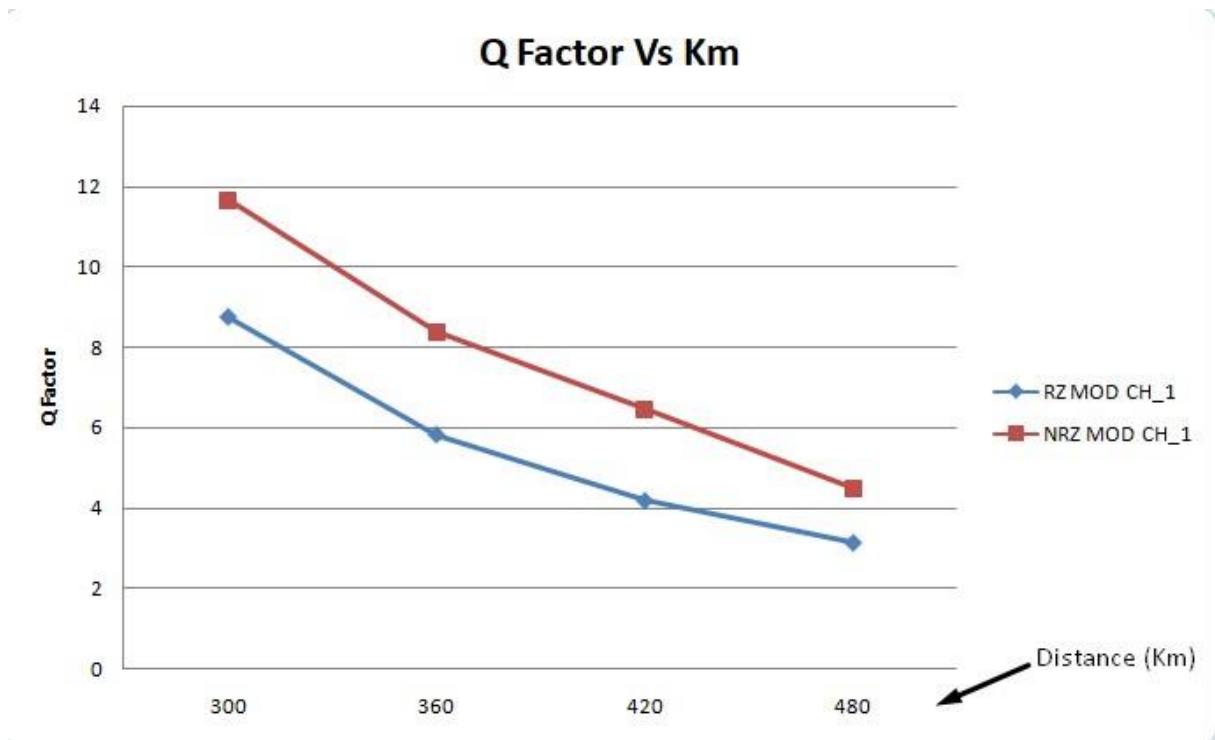
Εικόνα 5.2.8 Q factor Vs distance (Km) για ισχύ οπτικού σήματος 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 8dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.



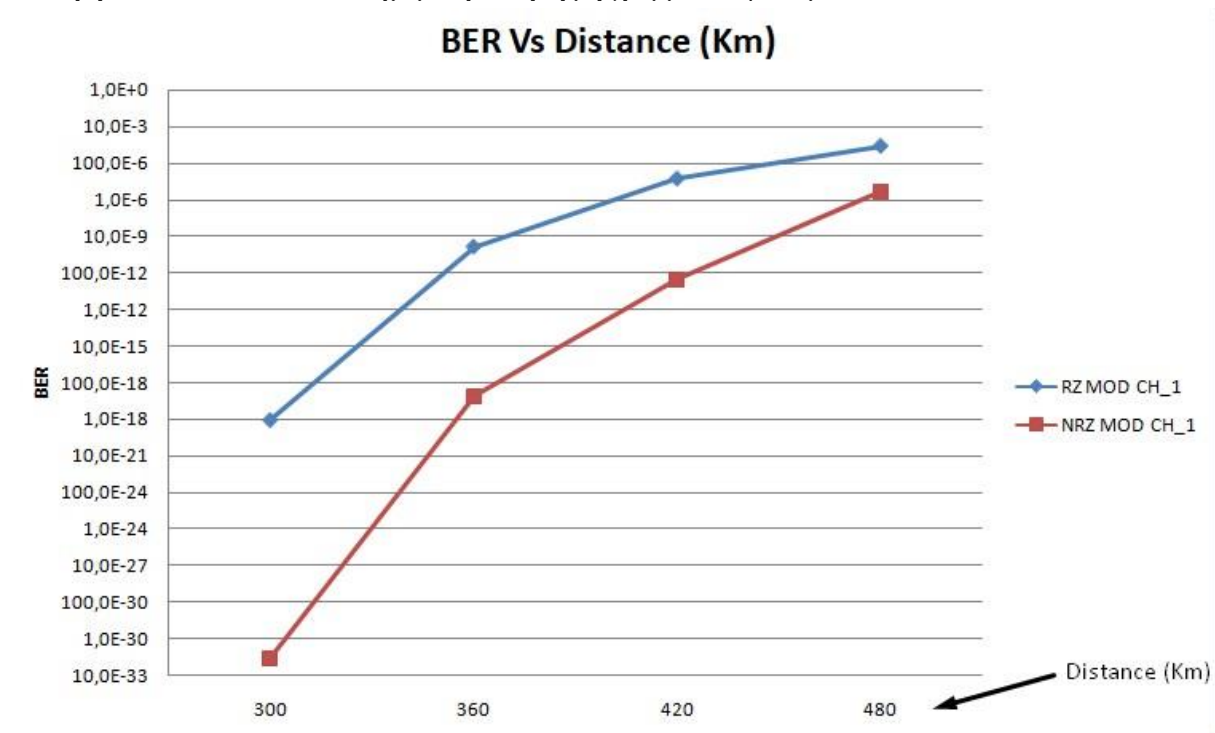
Εικόνα 5.2.9 BER Vs distance (Km) για ισχύ οπτικού σήματος 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 8dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων

Όσο μικρότερη η απόσταση τόσο καλύτερες οι τιμές μας αλλά και εδώ η υπεροχή της NRZ είναι ξεκάθαρη. Η RZ φαίνεται πως από τα 360Km και πάνω θα χρειαστεί κάποια επιπλέον ενίσχυση ή μεγαλύτερη ισχύς οπτικού σήματος, ενώ η NRZ θα χρειαστεί τέτοια επέμβαση όταν η ζεύξη

ξεπεράσει τα 450 Km. Με την ίδια ακριβώς λογική όπως έγινε και στο προηγούμενο σενάριο προσθέσαμε τις ρυθμίσεις των μη γραμμικών φαινομένων. Με την ίδια ενίσχυση παίρναμε πολύ χαμηλές τιμές από τα 300 km και χρειάστηκε να την αυξήσουμε κατά 2 dB στον πρώτο ενισχυτή EDFA. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 5.2.10 Q factor Vs distance (Km) για ισχύ οπτικού σήματος 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

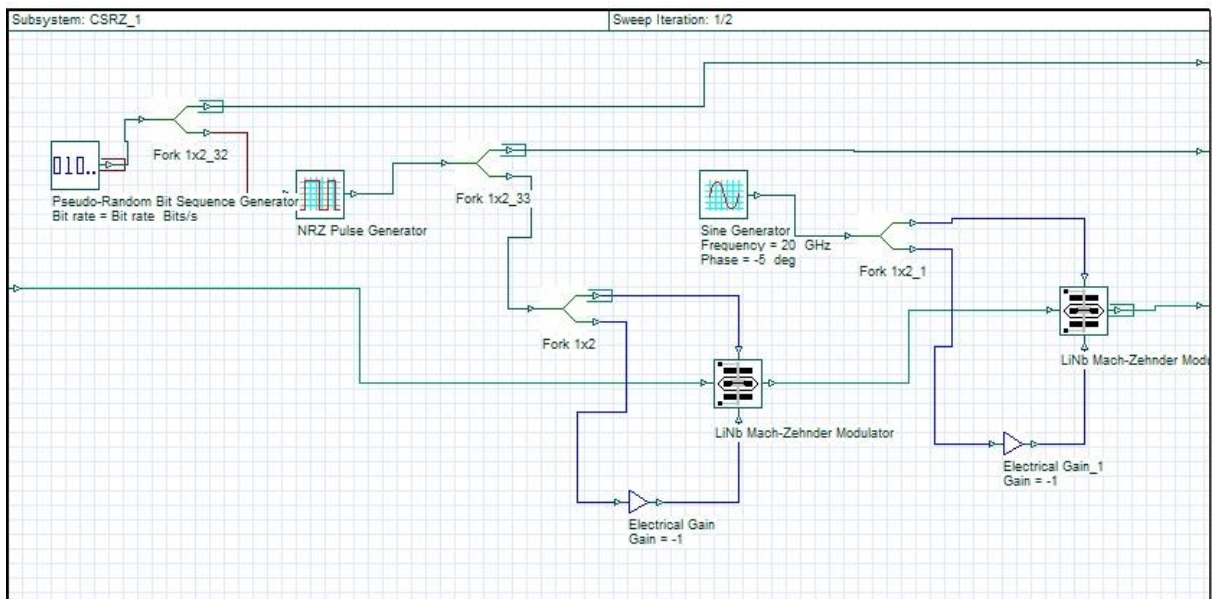


Εικόνα 5.2.11 BER Vs distance (Km) για ισχύ οπτικού σήματος 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

Η ενίσχυση αυτή των 2 dB ήταν ικανοποιητική ώστε να αντισταθμίσει τα μη γραμμικά φαινόμενα και να πάρουμε παρόμοιες μετρήσεις με τα αρχικά διαγράμματα.

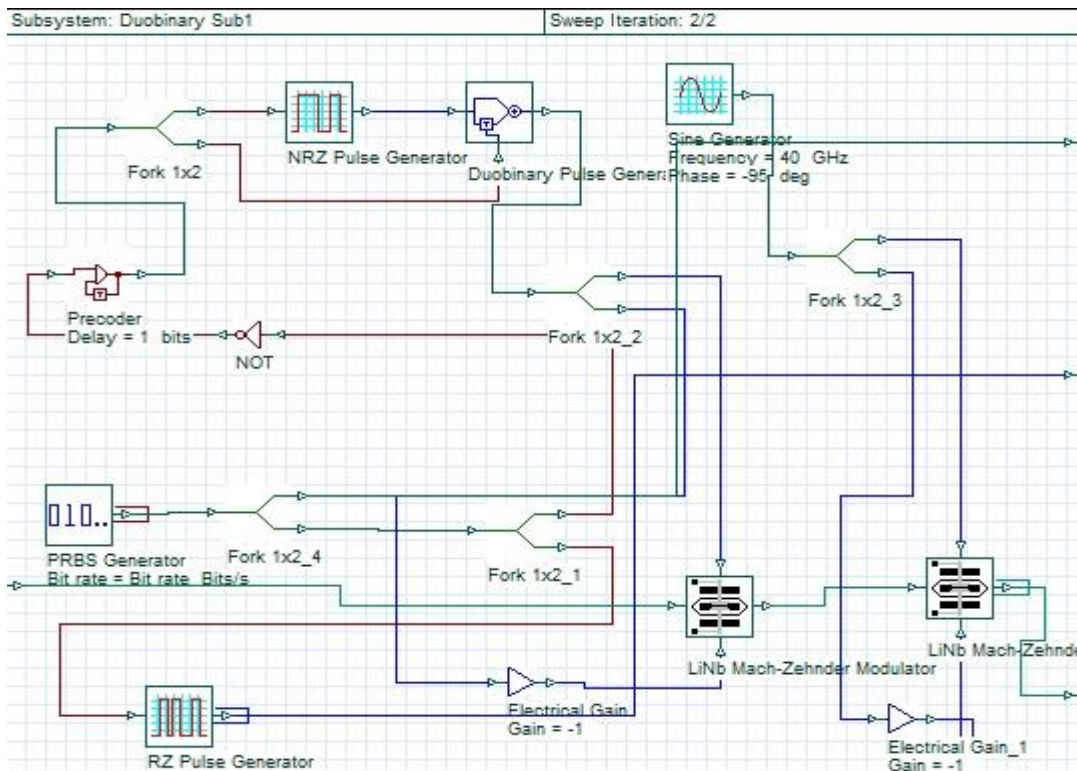
### 5.2.3 Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων CSRZ και DuoBinary σε σχέση με την ισχύ

Στην συνέχεια το υποσύστημα διαμόρφωσης αντικαταστάθηκε με αυτό που φαίνεται στην εικόνα 5.2.12, ενός πομπού CSRZ. Ο τρόπος λειτουργίας της carrier suppressed διαμόρφωσης περιγράφεται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το υπόλοιπο οπτικό δίκτυο παρέμεινε ίδιο με την προηγούμενη ενότητα, δηλαδή και πάλι τιμές ισχύος (-8dB, -4dB, 0dB και 4dB) και απόσταση σταθερή 360Km.



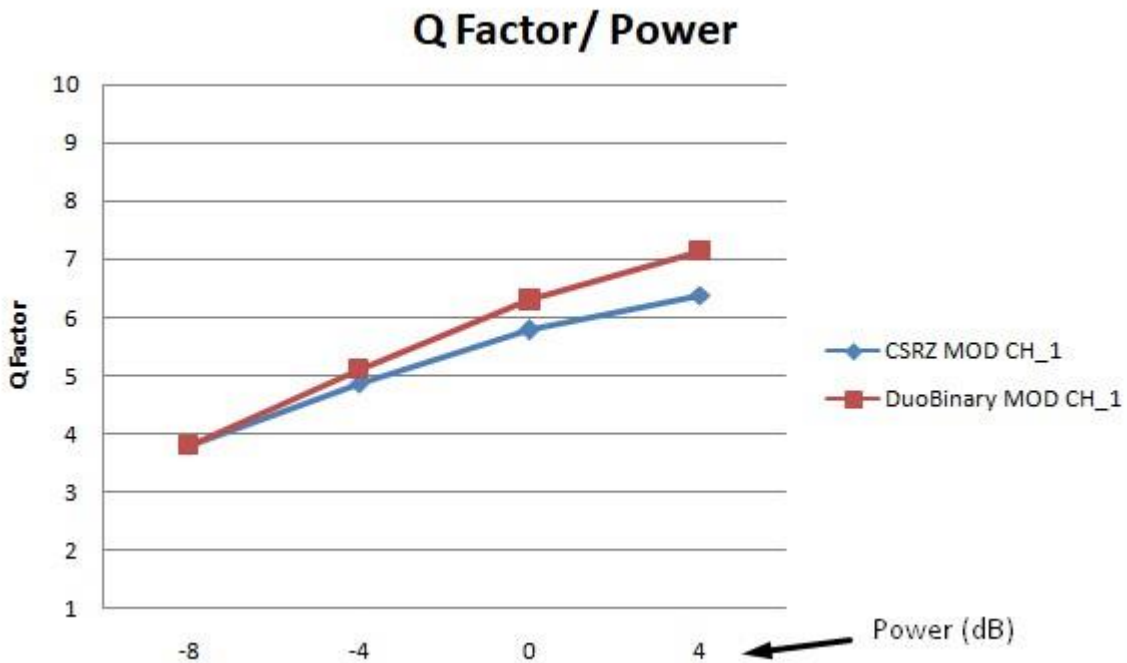
Εικόνα 5.2.12 Διαμόρφωση CSRZ στο λογισμικό Optisystem

Με την βοήθεια του BER analyzer έγιναν οι μετρήσεις των συντελεστών ποιότητας για τις διάφορες τιμές ισχύος που προαναφέρθηκαν. Έπειτα και πάλι αντικαταστάθηκε το subsystem-CSRZ με αυτό της παρακάτω εικόνας, DuoBinary subsystem.



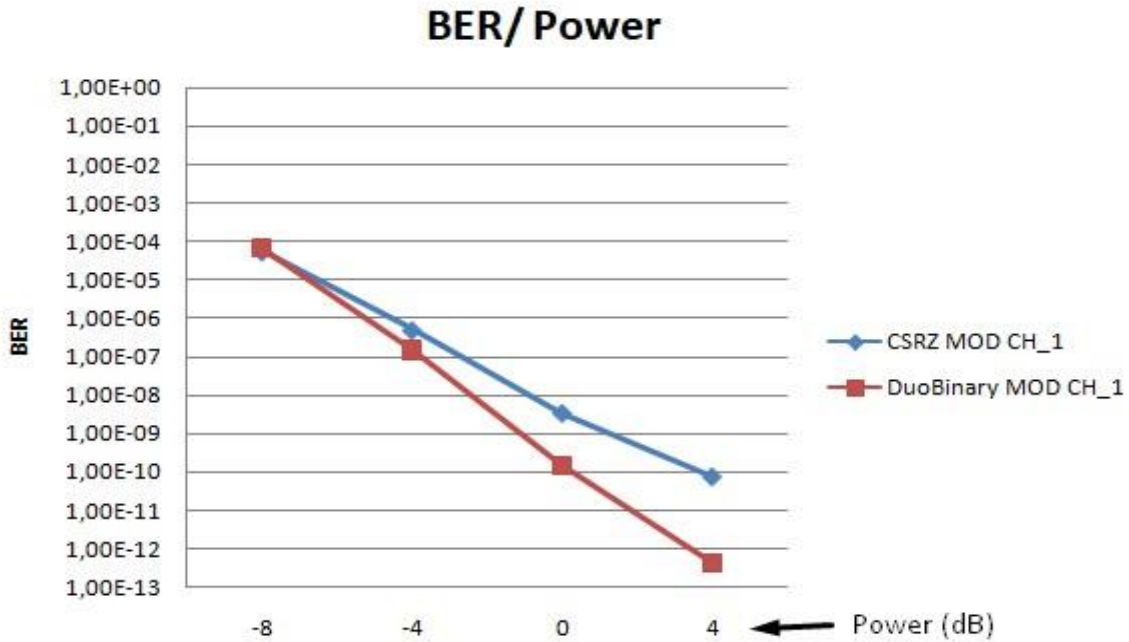
Εικόνα 5.2.13 Διαμόρφωση DuoBinary στο λογισμικό Optisystem

Οι τελικές τιμές των συντελεστών ποιότητας (Q factor & BER) απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα, εικόνες 5.2.14 και 5.2.15 αντίστοιχα.



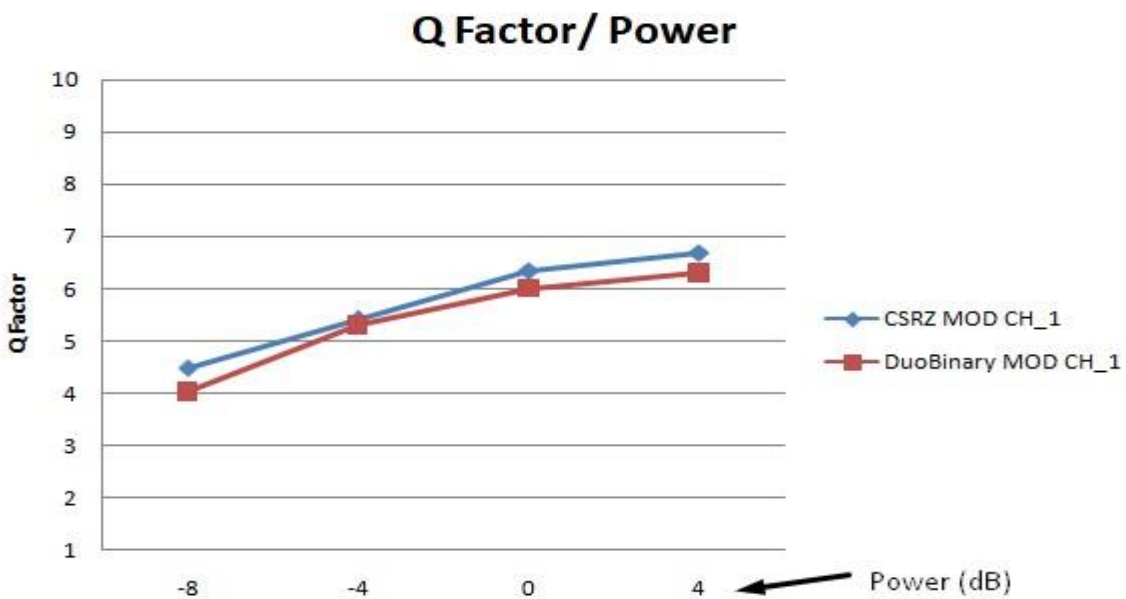
Εικόνα 5.2.14 Q factor Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.



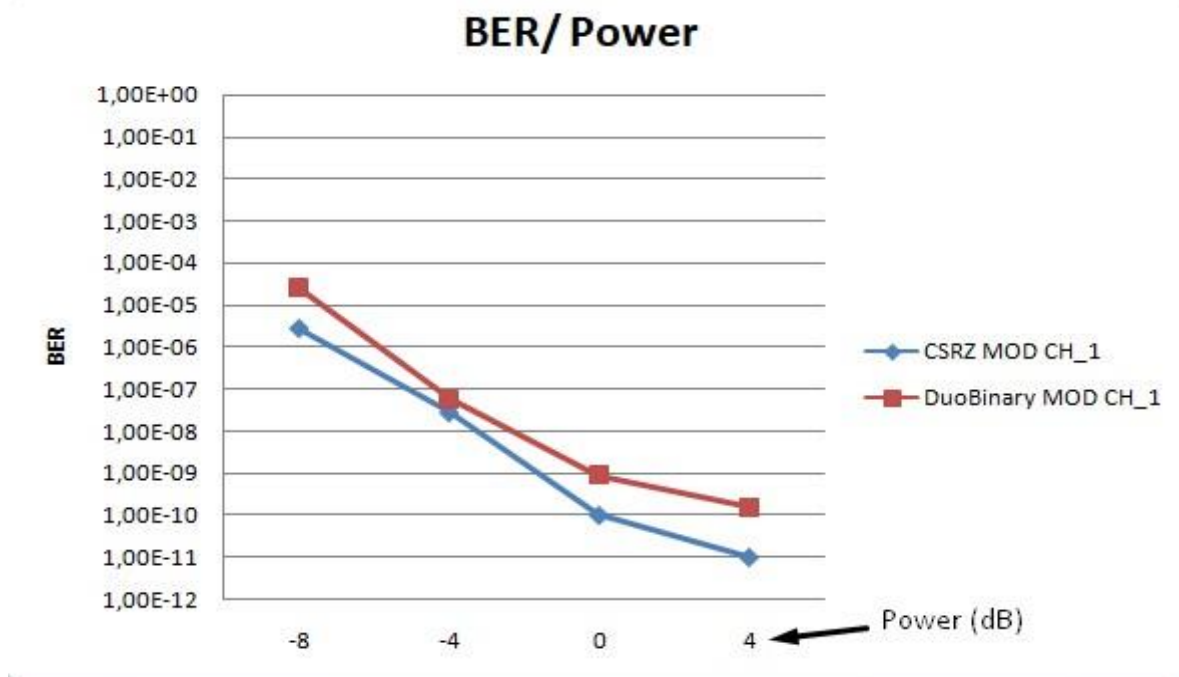


**Εικόνα 5.2.15 BER Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.**

Οι συγκεκριμένες διαμορφώσεις είναι πιο ευαίσθητες και χρειάστηκε από την αρχή η ενίσχυση των 10dB. Από τα διαγράμματα αρχικά συμπεραίνουμε πως η DuoBinary δίνει καλύτερα αποτελέσματα όσο αυξάνεται η ισχύς. Στα 0 dB η CSRZ συνεχίζει να δίνει μη αποδεκτές τιμές, δηλαδή κάτω του ορίου  $10^{-9}$ , στο κανάλι 1, το οποίο είναι και το πιο απομακρυσμένο. Για να πάρουμε αποδεκτές τιμές θα χρειαστεί η ισχύς μας να ρυθμιστεί στα 4dB σε αντίθεση με την DuoBinary που ξεκινάει να δίνει αποδεκτές τιμές από τα 0dB. Στην συνέχεια ακολουθούν τα ίδια διαγράμματα με την πρόσθεση μη γραμμικών φαινομένων.



**Εικόνα 5.2.16 Q Factor Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.**

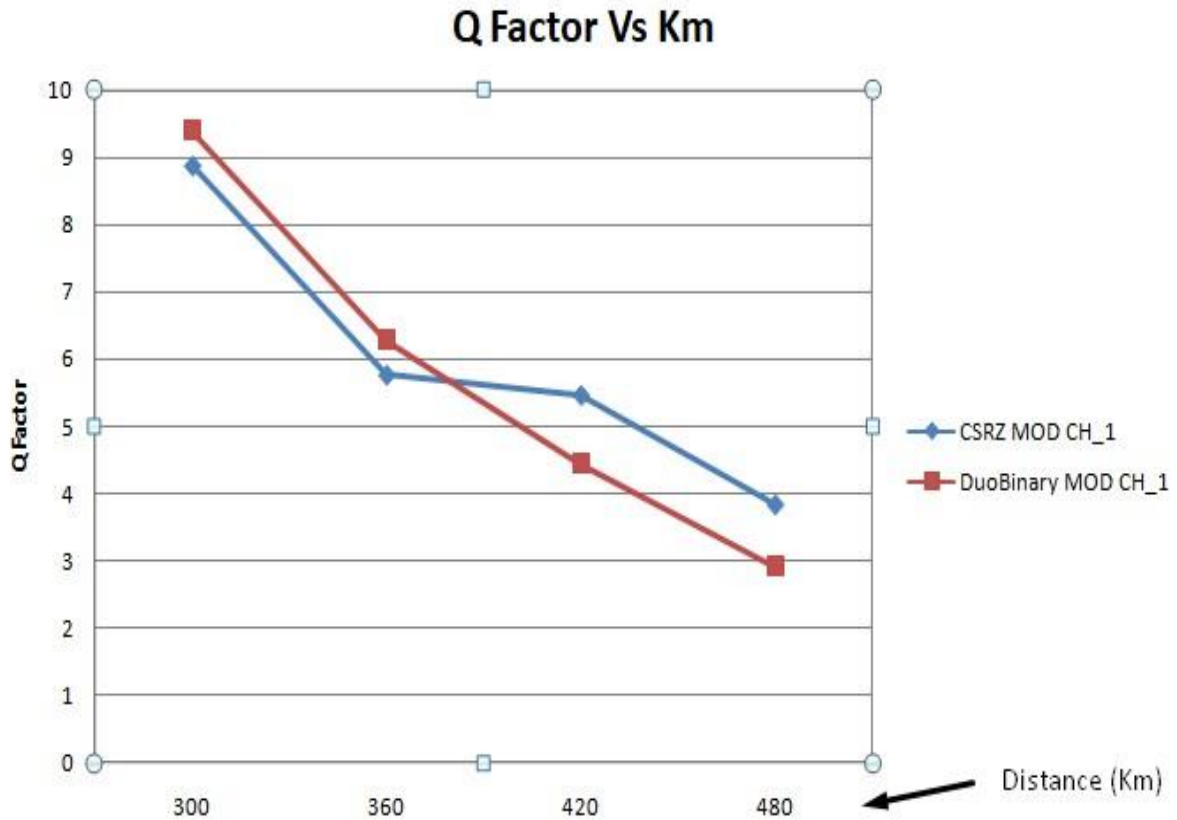


**Εικόνα 5.2.17 BER Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.**

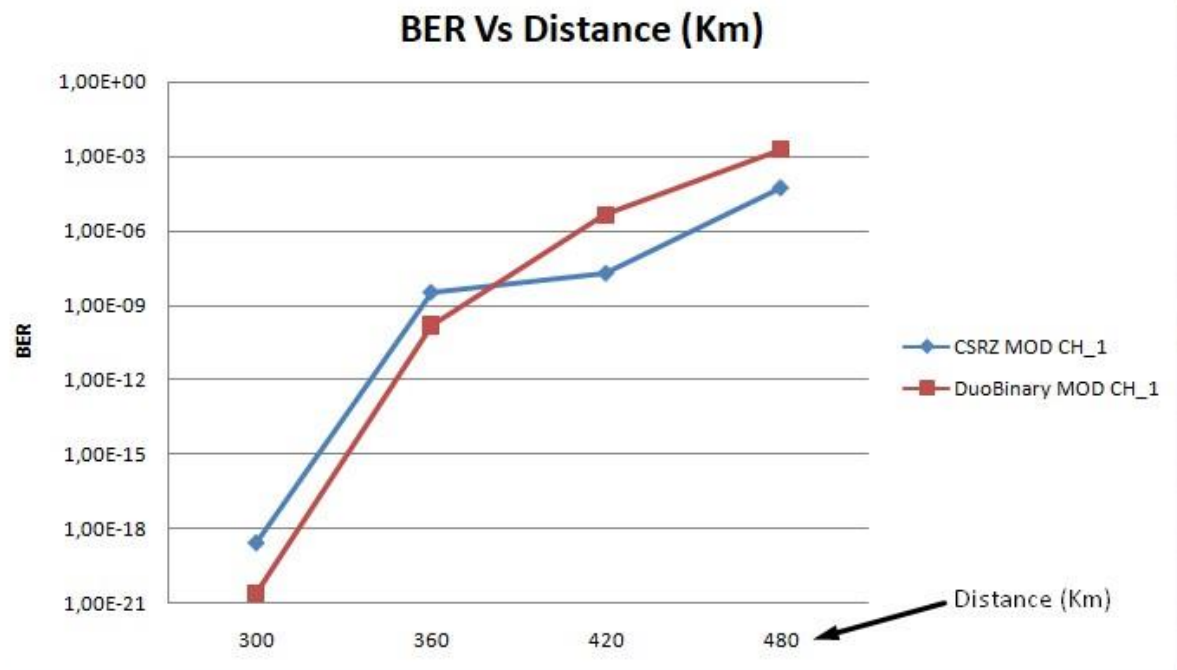
Εδώ παρατηρούμε πως δεν χρειάστηκε επιπλέον ενίσχυση παρόλη την προσθήκη των μη γραμμικών φαινομένων. Ακόμη γίνεται εμφανές πως η CSRZ έχει μεγαλύτερη ανοχή στα μη γραμμικά φαινόμενα και παρουσιάζει πλέον καλύτερους δείκτες ποιότητας σε σχέση με την DuoBinary. Σαν λογικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε πως το μειωμένο φασματικό πλάτος των σημάτων CSRZ την καθιστά λιγότερο επιρρεπή σε μη γραμμικά φαινόμενα και πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετριάσει τον αντίκτυπο της μη γραμμικότητας των ινών ώστε να βελτιώσει τη συνολική απόδοση του συστήματος.

#### **5.2.4 Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων CSRZ και DuoBinary σε σχέση με την απόσταση**

Αφού μελετήθηκε η συμπεριφορά των δικτύων μας μεταβάλλοντας την ισχύ του οπτικού σήματος, θα μελετηθεί η συμπεριφορά του μεταβάλλοντας την απόσταση. Θα μετρηθούν τέσσερις περιπτώσεις μεταξύ 300Km και 480Km, όπου σε κάθε περίπτωση θα αυξάνουμε κατά 60Km την απόσταση. Τα αποτελέσματα του BER analyzer και των δυο διαμορφώσεων χωρίς γραμμικά φαινόμενα αρχικά φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.

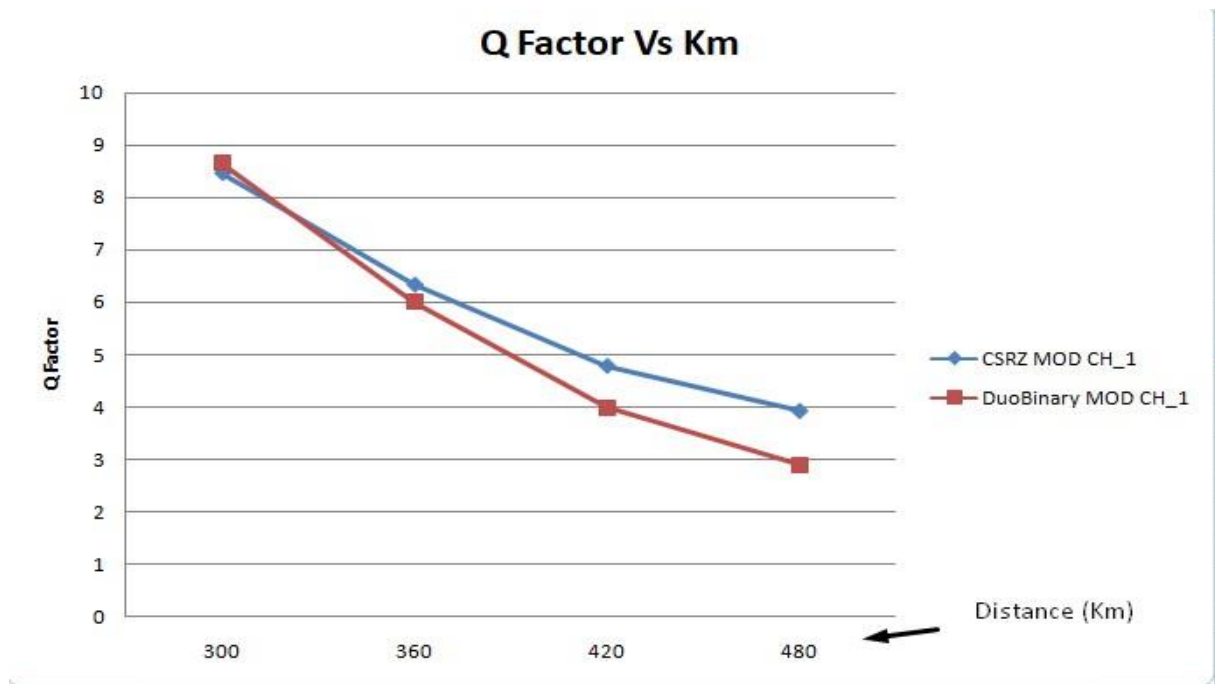


Εικόνα 5.2.18 Q Factor Vs Distance (Km) για οπτική ζεύξη με ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

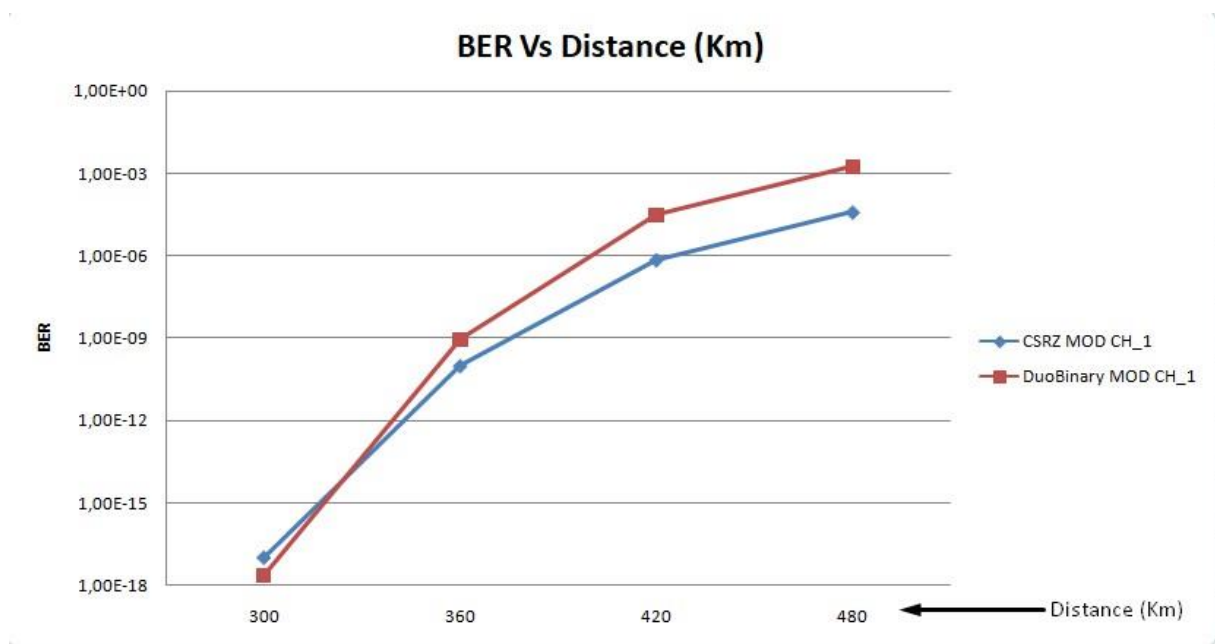


Εικόνα 5.2.19 BER Vs Distance (Km) για οπτική ζεύξη με ισχύ 0dB και δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

Και εδώ τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα, όσο αυξάνεται η απόσταση τόσο πέφτουν οι δείκτες ποιότητας και με την DuoBinary να δίνει καλύτερες τιμές λόγω της έλλειψης των μη γραμμικών φαινομένων. Η ισχύς είναι σταθερή στα 0dB και το δίκτυό των 16 καναλιών μας μπορεί να υποστηρίξει απόσταση μέχρι και 360Km. Από εκεί και πάνω φαίνεται πως θα χρειαστεί είτε επιπλέον ενίσχυση είτε αύξηση της ισχύος. Παρατηρείται ένα crossing, στις πολύ χαμηλές τιμές των μετρήσεων περίπου στα 400m. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης των φαινομένων διασποράς, τα οποία γίνονται και πιο έντονα όσο αυξάνεται η απόσταση και φαίνεται η μεγαλύτερη ανοχή της CSRZ σ αυτά τα φαινόμενα [17],[18]. Ακολουθούν τα διαγράμματα με την προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.



Εικόνα 5.2.20 Q Factor Vs Distance (Km) για οπτική ζεύξη με ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

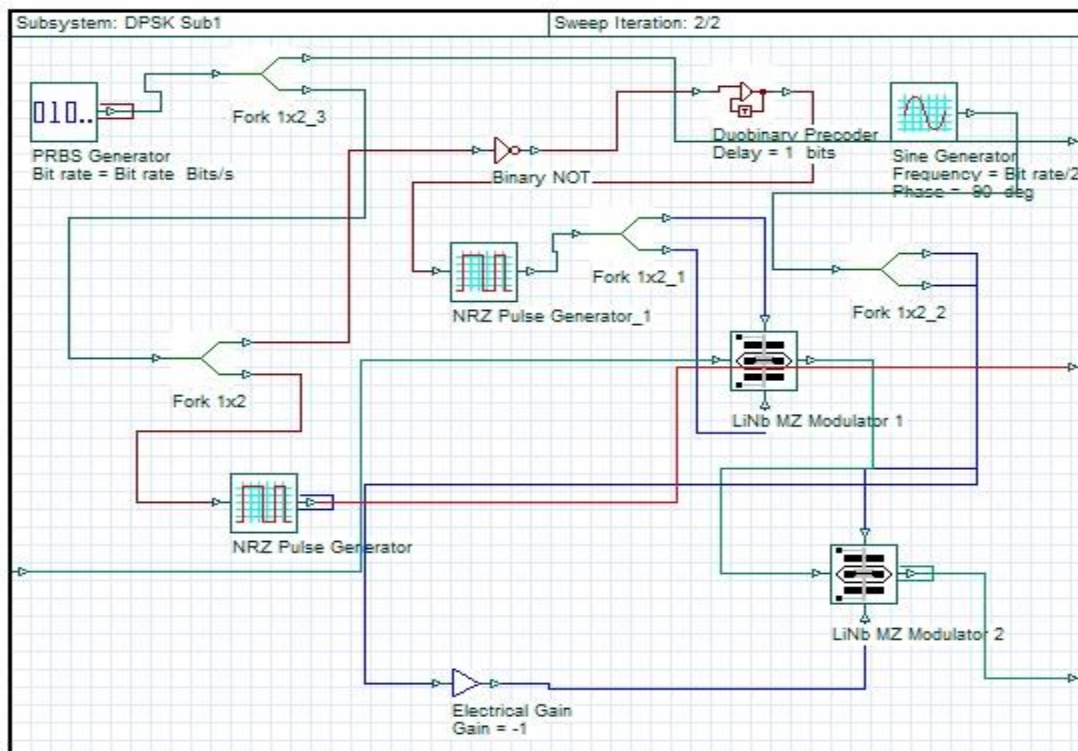


**Εικόνα 5.2.21 BER Vs Distance (Km) για οπτική ζεύξη με ισχύ 0dB και δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.**

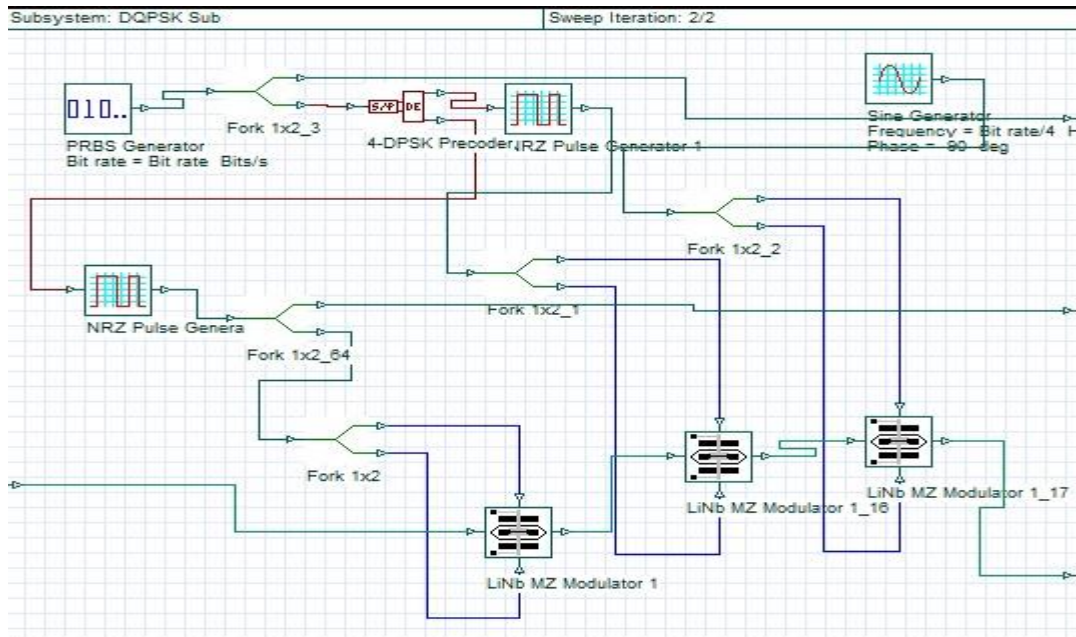
Με την προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων παρατηρείται αυτό το crossing να συμβαίνει σε πιο κοντινές αποστάσεις, περίπου στα 320 Km και εντός αποδεκτών τιμών στου δείκτης ποιότητας. Αυτό κάνει την CSRZ να πλεονεκτεί έναντι της DuoBinary στην συγκεκριμένη περίπτωση. Επίσης και στις δύο περιπτώσεις οι δείκτες ποιότητας παρουσιάζονται βελτιωμένοι και το δίκτυο λειτουργεί εντός των αποδεκτών ορίων μέχρι και τα 360 Km. Έτσι μπορούμε να πούμε πως τα μη γραμμικά φαινόμενα επηρεάζουν θετικά τις συγκεκριμένες διαμορφώσεις. [17] –[20]

### 5.2.5 Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων DPSK και DQPSK σε σχέση με την ισχύ

Στην τελευταία συγκριτική μελέτη μας χρησιμοποιήθηκαν οι διαμορφώσεις DPSK και DQPSK. Προσομοιώθηκε και πάλι το ίδιο οπτικό δίκτυο με τις ίδιες περιπτώσεις στις αλλαγές της ισχύος του πομπού. Τα αντίστοιχα subsystems απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν. [21] –[24]

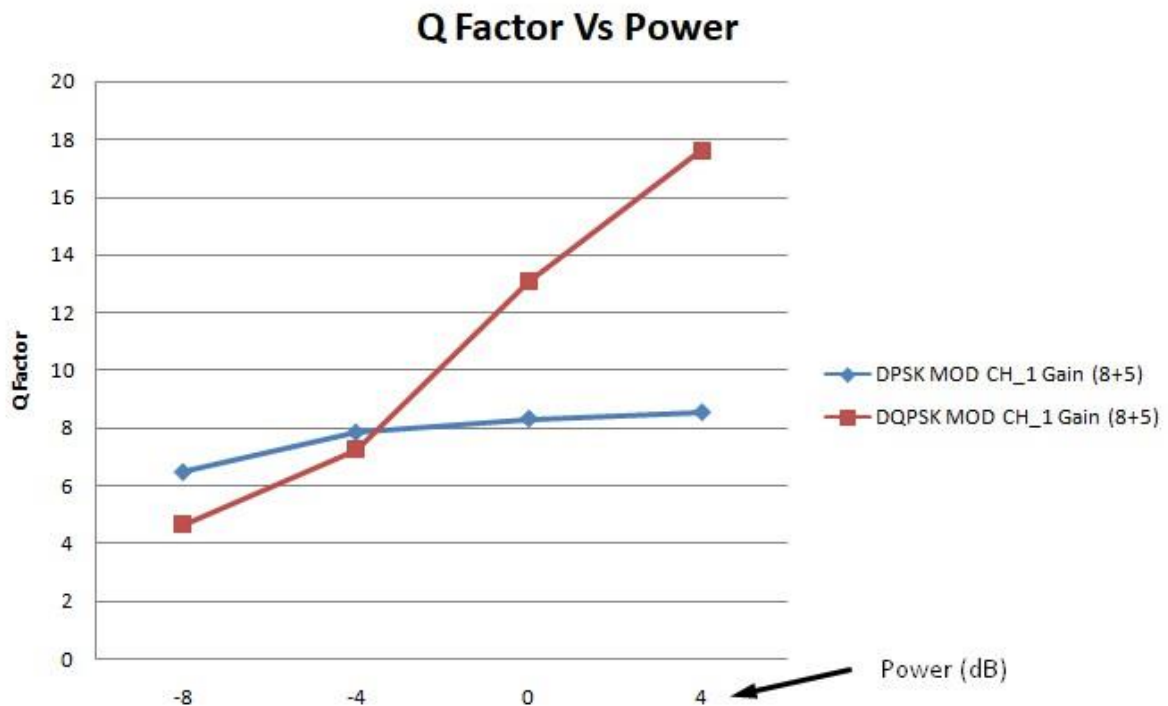


**Εικόνα 5.2.22 Διαμόρφωση DPSK στο λογισμικό Optisystem [21] [22]**

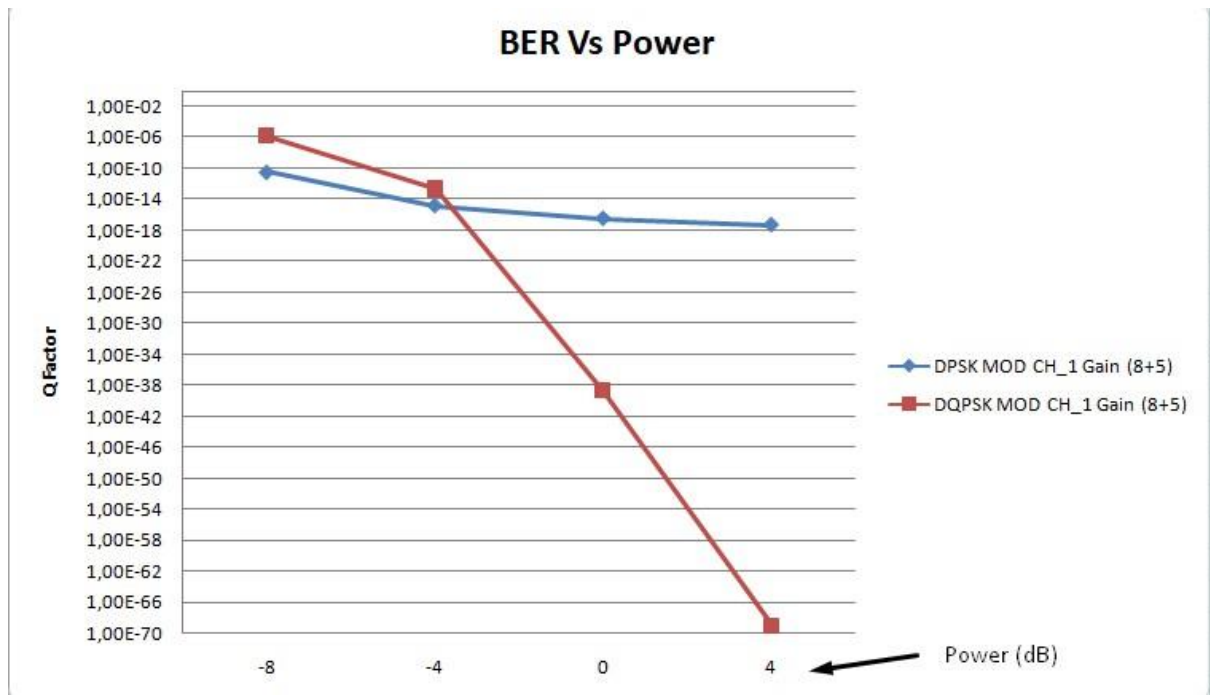


Εικόνα 5.2.23 Διαμόρφωση DQPSK στο λογισμικό Optisystem [21] [22]

Τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις μας και τις ενδείξεις του BER analyzer απεικονίζονται παρακάτω.

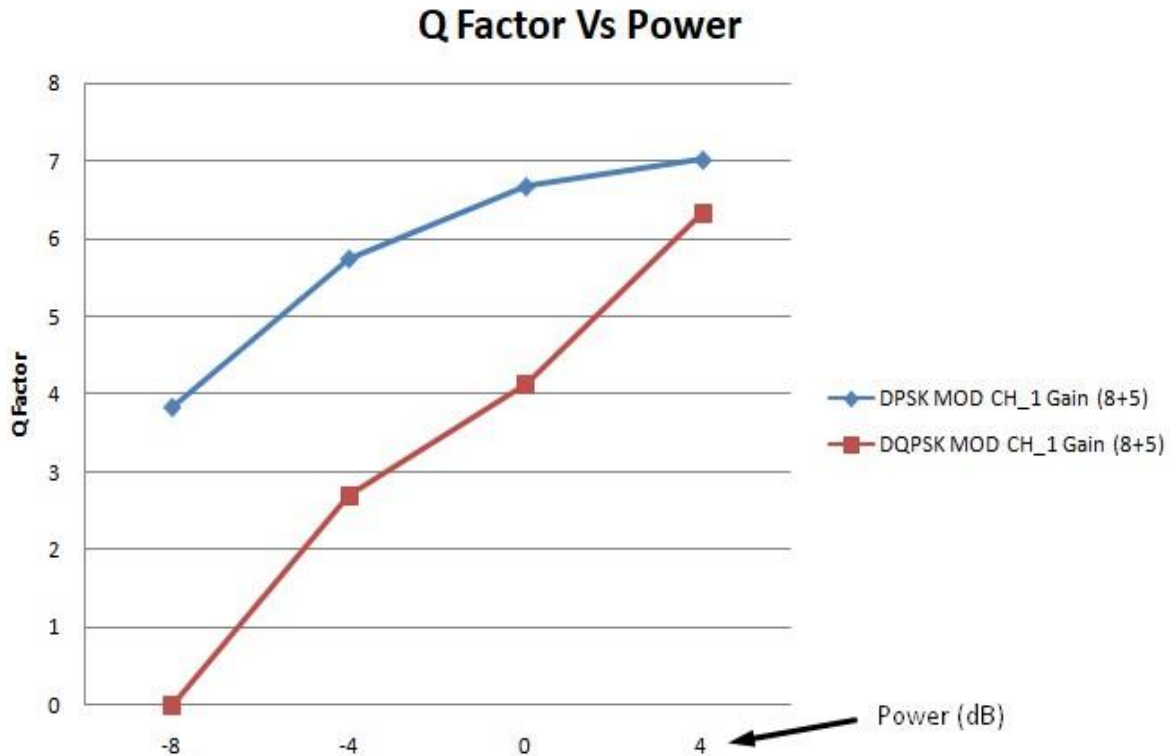


Εικόνα 5.2.24 Q Factor Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη 360 Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 8dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

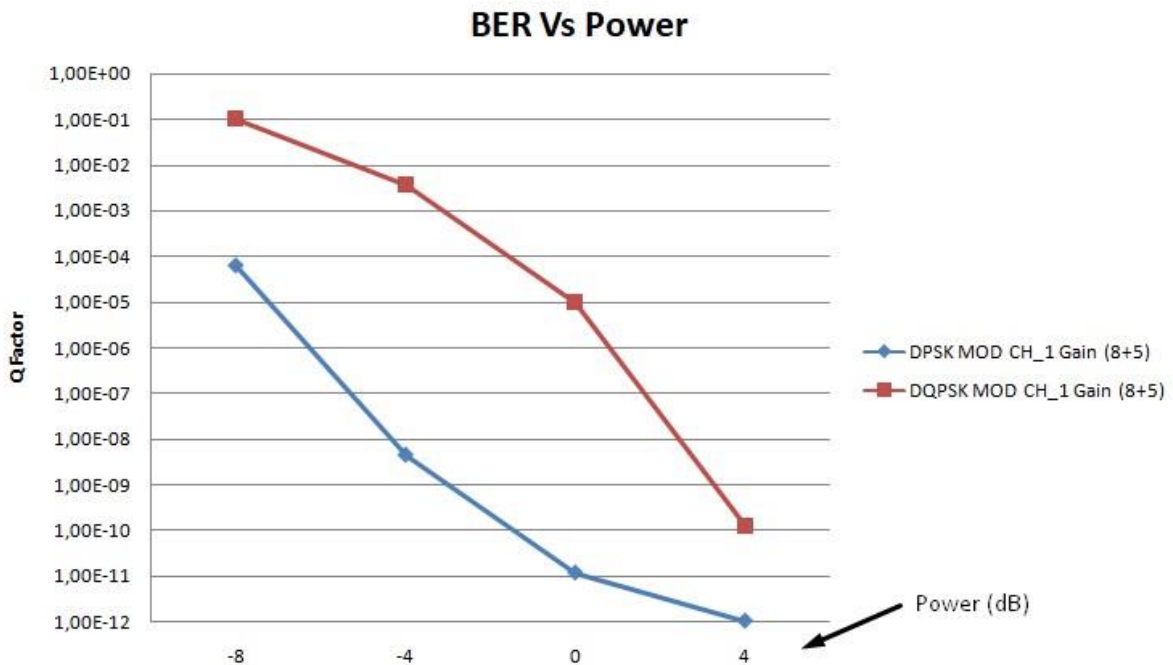


**Εικόνα 5.2.25 BER Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη με απόσταση 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 8dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.**

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η DQPSK χρειάζεται τουλάχιστον -4dB για να μπορέσει να μας δώσει αποδεκτές τιμές στο BER analyzer ενώ η DPSK φαίνεται να δουλεύει σ αυτές τις συνθήκες και γίνεται λειτουργική και από τα -8dB. Το DQPSK παρέχει υψηλότερο SNR σε σύγκριση με το DPSK, ειδικά σε υψηλά επίπεδα οπτικής ισχύος. Αυτό συμβαίνει επειδή το DQPSK κωδικοποιεί δύο bit ανά σύμβολο, ενώ το DPSK κωδικοποιεί μόνο ένα bit ανά σύμβολο. Ως αποτέλεσμα, το DQPSK προσφέρει μεγαλύτερη ανοχή στον θόρυβο, καθιστώντας το λιγότερο ευαίσθητο στην υποβάθμιση του σήματος που προκαλείται από υψηλά επίπεδα οπτικής ισχύος. Γι αυτό βλέπουμε να δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα όταν η οπτική ισχύς αυξάνεται κατά πολύ. Προσθέτοντας και εδώ μη γραμμικά φαινόμενα, τα αποτελέσματα απεικονίζονται στις δυο επόμενες εικόνες.



**Εικόνα 5.2.26** Εικόνα 5.2.26 Q Factor Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη με απόσταση 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 18dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων



**Εικόνα 5.2.27** BER Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη με απόσταση 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 8dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων

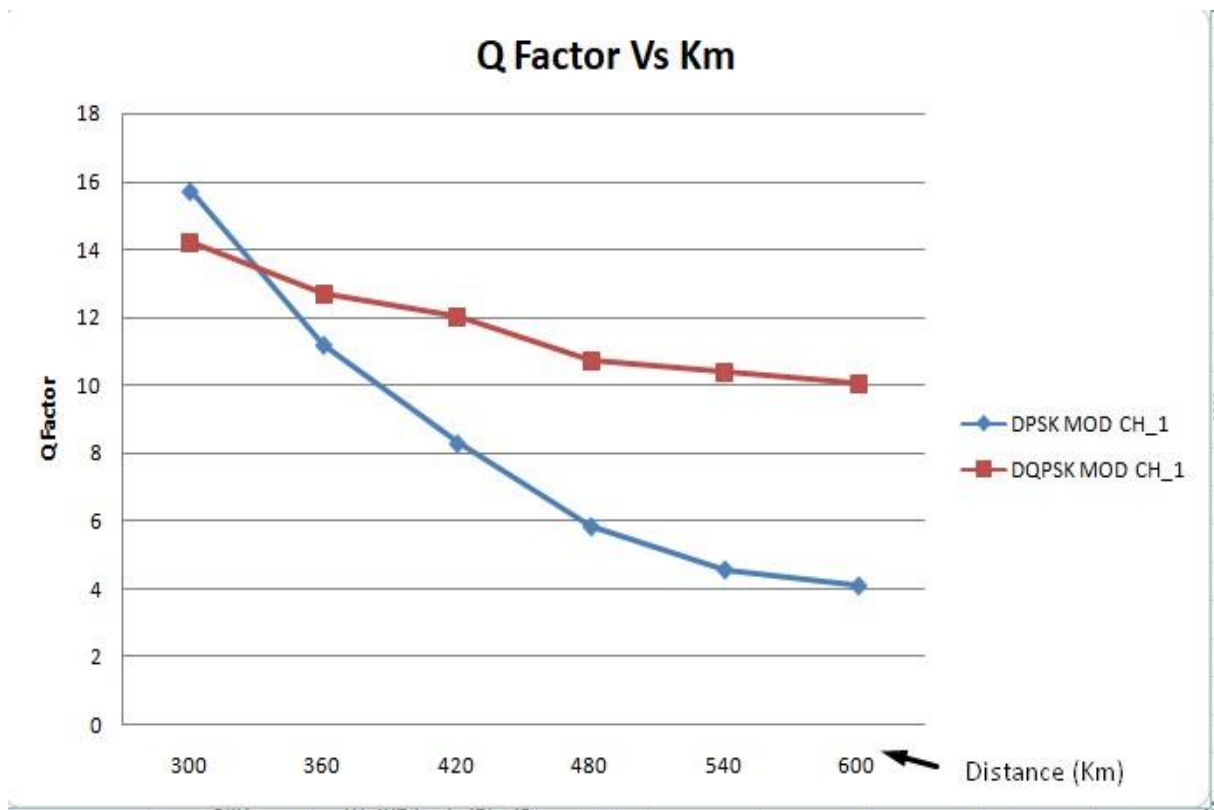
Εδώ, σε αντίθεση με τις προηγούμενες συγκρίσεις, στις προηγούμενες διαμορφώσεις, δεν αυξήσαμε την ενίσχυση, την διατηρήσαμε ίδια. Η επιρροή των μη γραμμικών φαινομένων είναι εμφανή και στις



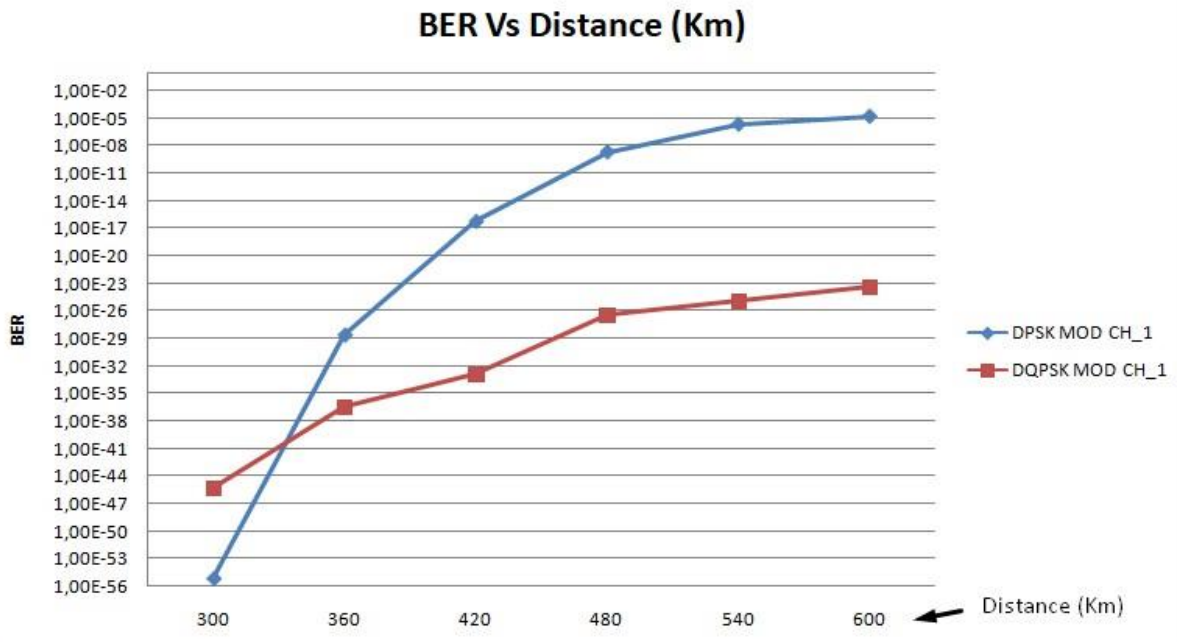
δύο περιπτώσεις, περισσότερο όμως στην DQPSK, η οποία φαίνεται πως δουλεύει μόνο στην περίπτωση όπου έχουμε οπτικό σήμα 4dB. Σαν συμπέρασμα η DQPSK χρειάζεται μεγαλύτερη ισχύ σήματος εισόδου ή μεγαλύτερη ενίσχυση. Η DPSK φαίνεται να έχει μεγαλύτερη ανοχή στα μη γραμμικά φαινόμενα και να δουλεύει και με χαμηλότερες τιμές ισχύος. Τα πράματα αλλάζουν κατά πολύ αν μπει ενίσχυση όπως θα δούμε παρακάτω στις μεταβολές της απόστασης.

### 5.2.6 Προσομοίωση και μελέτη διαμορφώσεων DPSK και DQPSK σε σχέση με την απόσταση

Τελευταίο συγκριτικό σενάριο και εδώ όπως και στις διαμορφώσεις που προηγήθηκαν, η διατήρηση σταθερής ισχύος (0dB) και η μεταβολή της απόστασης με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα. Εδώ όπως αναφέραμε και προηγουμένως χρειάστηκε να δοθεί παραπάνω ενίσχυση κατά 2 dB έτσι ώστε ληφθούν ικανοποιητικές τιμές ειδικά οι προσομοιώσεις έδειχναν μη λειτουργικά δίκτυα.

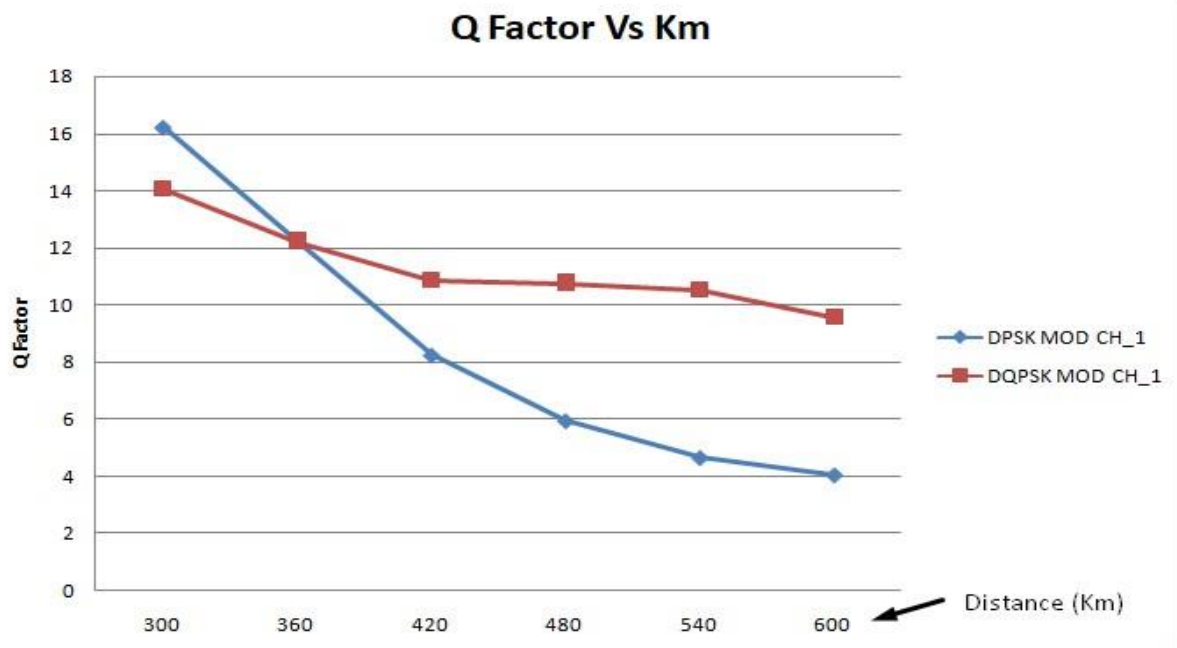


Εικόνα 5.2.28 Q factor Vs Distance (Km) για οπτική ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

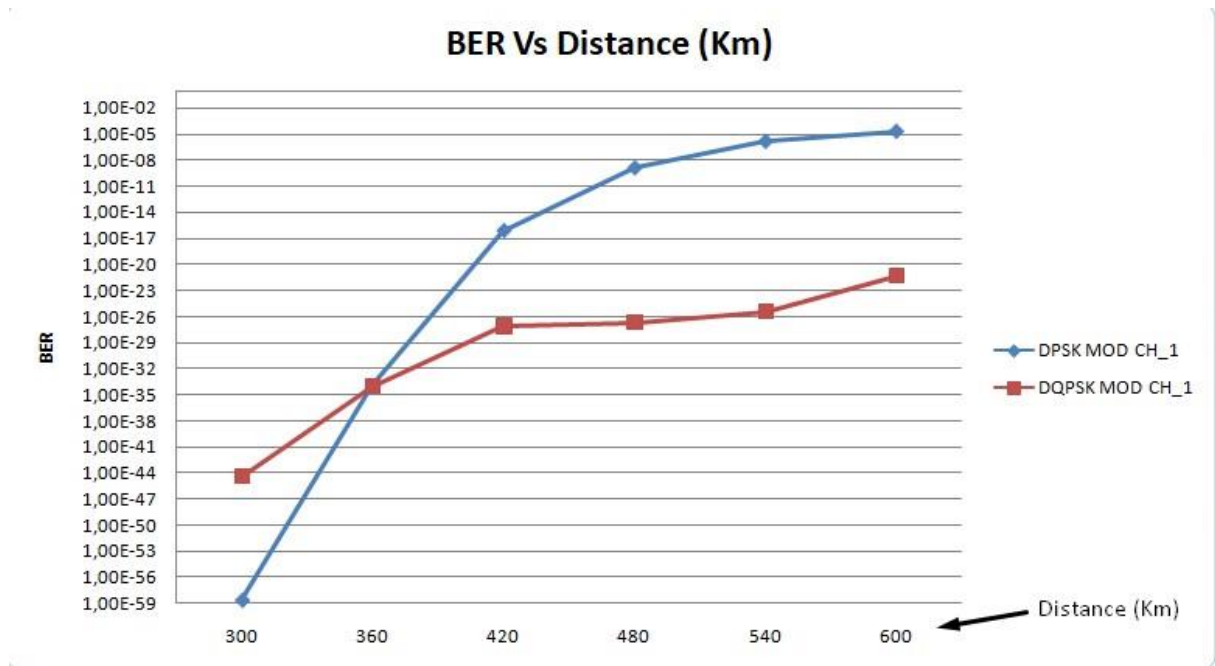


**Εικόνα 5.2.29 BER Vs Distance (Km) για οπτική ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων**

Και εδώ παρατηρείται το ίδιο μοτίβο με τις περιπτώσεις της μεταβολής ισχύος. Στις κοντινές αποστάσεις η DPSK παρουσιάζει καλύτερη ποιότητα σήματος, όμως όσο αυξάνεται η απόσταση, επηρεάζεται αρνητικά κατά πολύ περισσότερο σε σχέση με την DQPSK.. Η δεύτερη φαίνεται να διατηρεί πιο σταθερές τιμές με πολύ μικρότερες απώλειες καθώς αυξάνεται η απόσταση και μετά τα 300Km πλεονεκτεί της DPSK και μας δίνει σήμα εντός ορίων και πάνω από 600 Km ενώ τα όρια της DPSK σταματούν στα 500m. Τέλος ακολουθούν τα διαγράμματα με την προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.



**Εικόνα 5.2.30 Q factor Vs Distance (Km) για οπτική ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.**



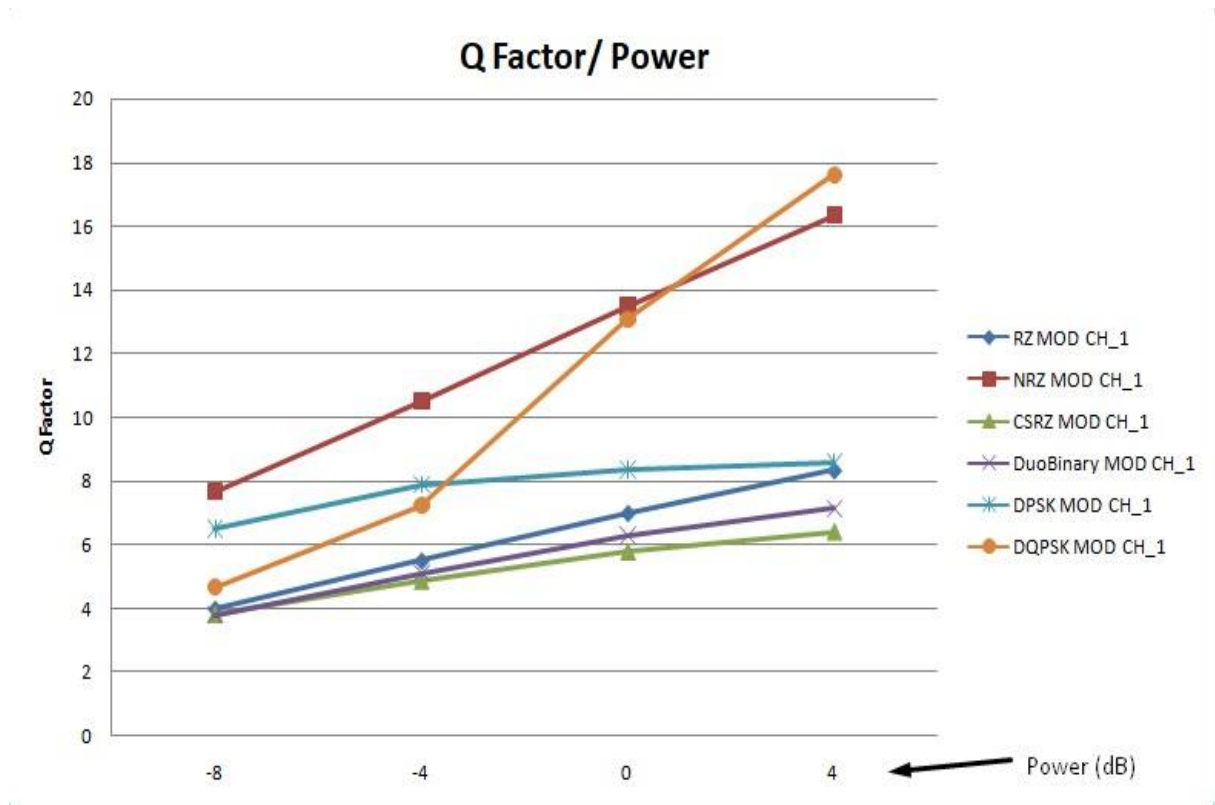
**Εικόνα 5.2.31 BER Vs Distance (Km) για οπτική ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.**

Τα ίδια ακριβώς συμπεράσματα προκύπτουν και εδώ καθώς οι δύο αυτές διαμορφώσεις φαίνεται πως επηρεάζονται ελάχιστα από την προσθήκη των μη γραμμικών φαινομένων με την αύξηση της ενίσχυσης που έγινε κατά 2 dB. Καθώς η DQPSK φαίνεται να παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή στην αύξηση της απόστασης, την καθιστά επικρατέστερη σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται να υπάρχει δυνατότητα επέκτασης του δικτύου. Η DPSK φαίνεται να ξεπερνάει τα όρια των αποδεκτών τιμών από τα 500 Km και πάνω και εδώ

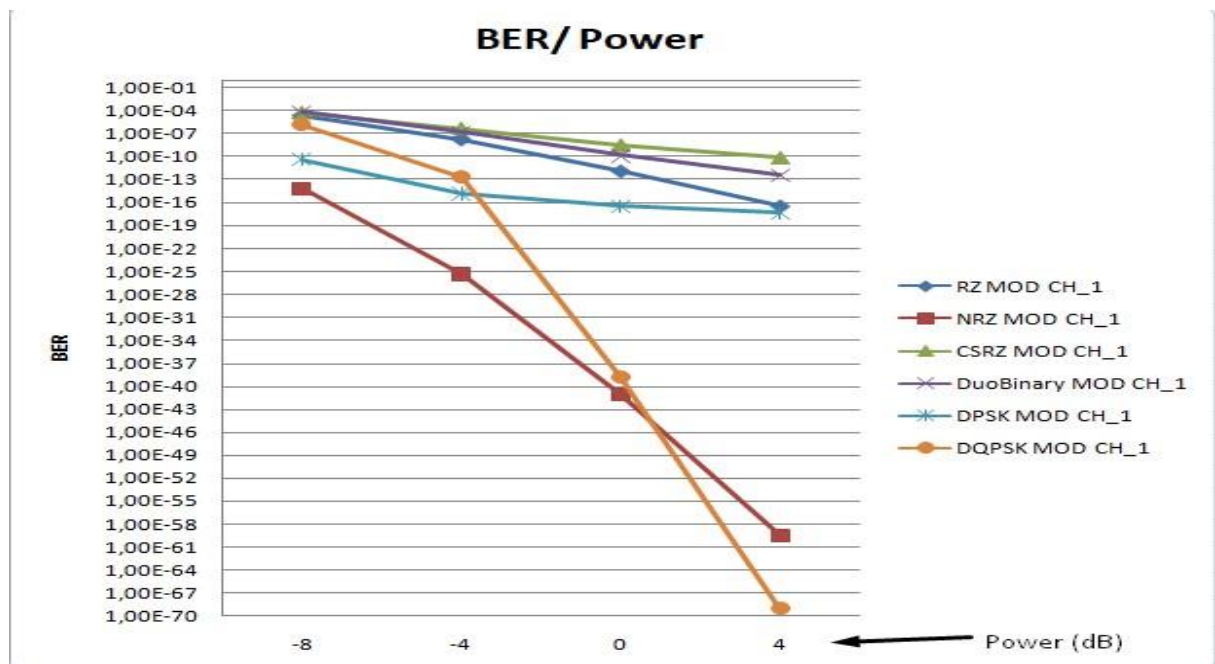
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω έχουν συγκεντρωθεί οι μετρήσεις των ποιοτικών δεικτών και των έξι διαμορφώσεων που συγκρίθηκαν, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια συνολική εικόνα για τις δυνατότητες της κάθε διαμόρφωσης και στα δύο βασικά σενάρια που μελετήσαμε, σε σχέση με την ισχύ και σε σχέση με την απόσταση και επαναλαμβάνονται λαμβάνοντας υπόψη τα μη γραμμικά φαινόμενα.

## Α: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΙΣΧΥΟΣ

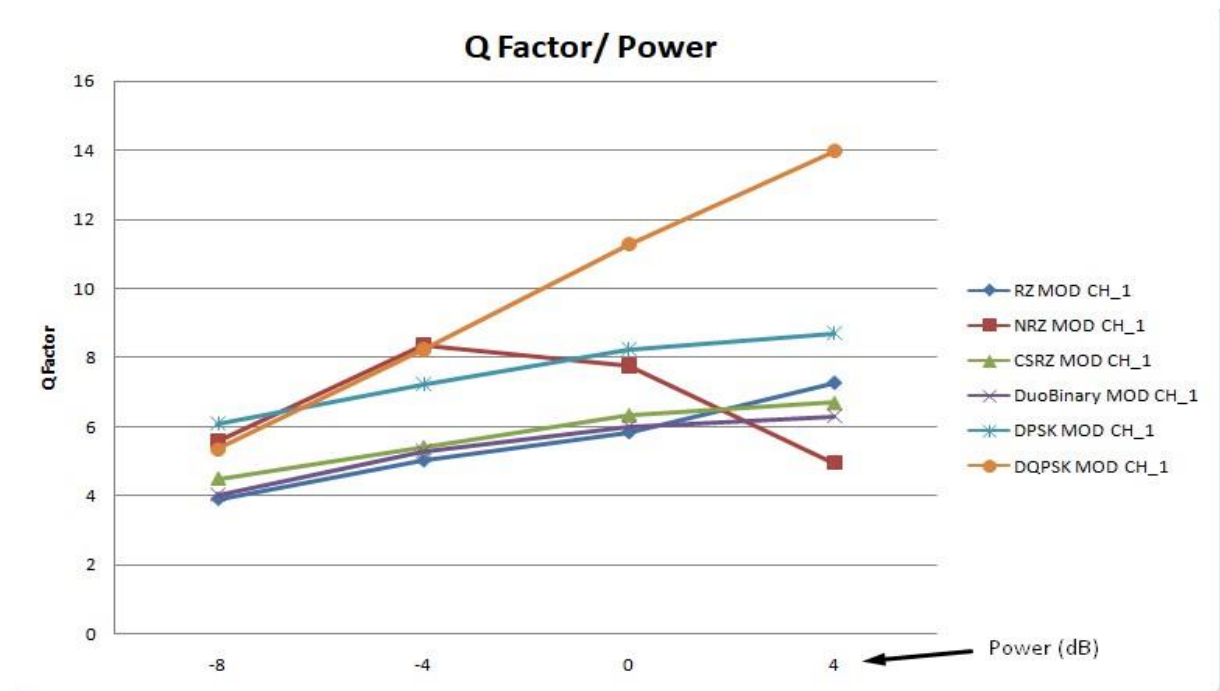


Εικόνα 5.2.32 Q Factor Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη 360 Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

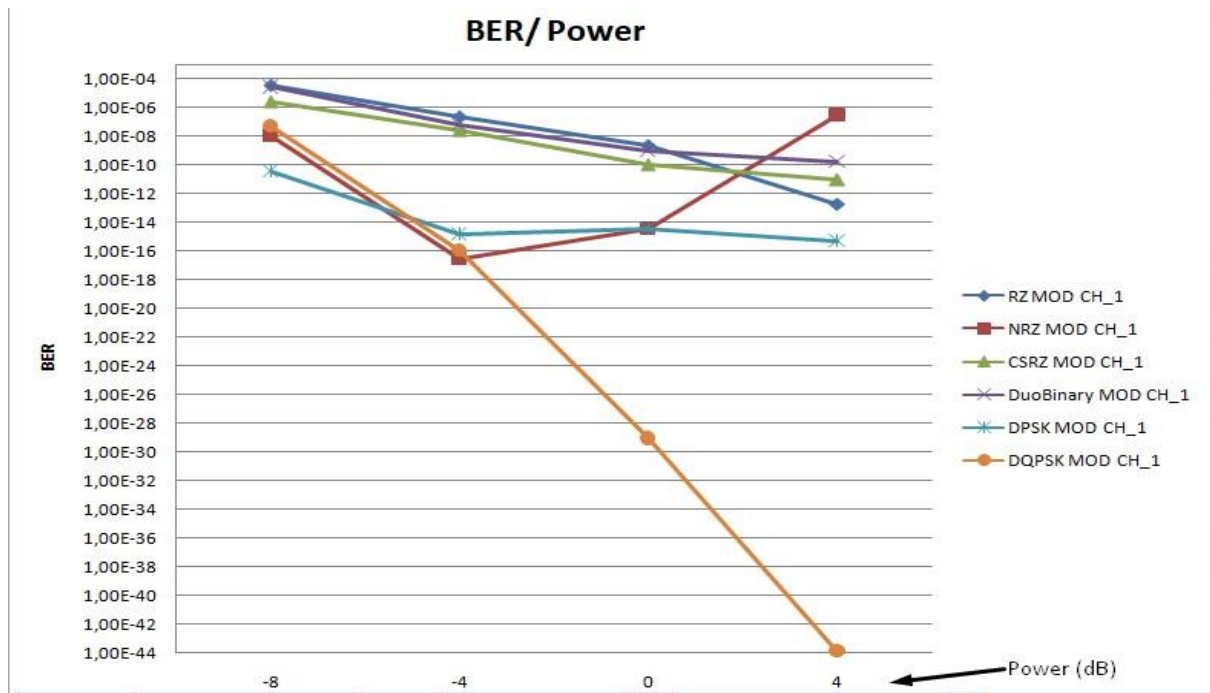


Εικόνα 5.2.33 BER Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη 360 (Km) με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

Από την συνολική εικόνα διακρίνουμε πως οι RZ, CSRZ και DuoBinary χρειάζονται μεγαλύτερη ισχύ για να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις του δικτύου μας, ενώ ή NRZ, DPSK και DQPSK, μπορούν και είναι λειτουργικές και με χαμηλότερες τιμές στην ισχύ του σήματος. Η NRZ μας δίνει πολύ καλά αποτελέσματα σ αυτήν την περίπτωση όπου εκλείπουν τα μη γραμμικά φαινόμενα όμως όταν υπάρχει δυνατότητα να αυξηθεί αρκετά η ισχύς (4 dB) η DQPSK δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Ακολουθούν τα ίδια διαγράμματα με την προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.



**Εικόνα 5.2.34 Q Factor Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.**

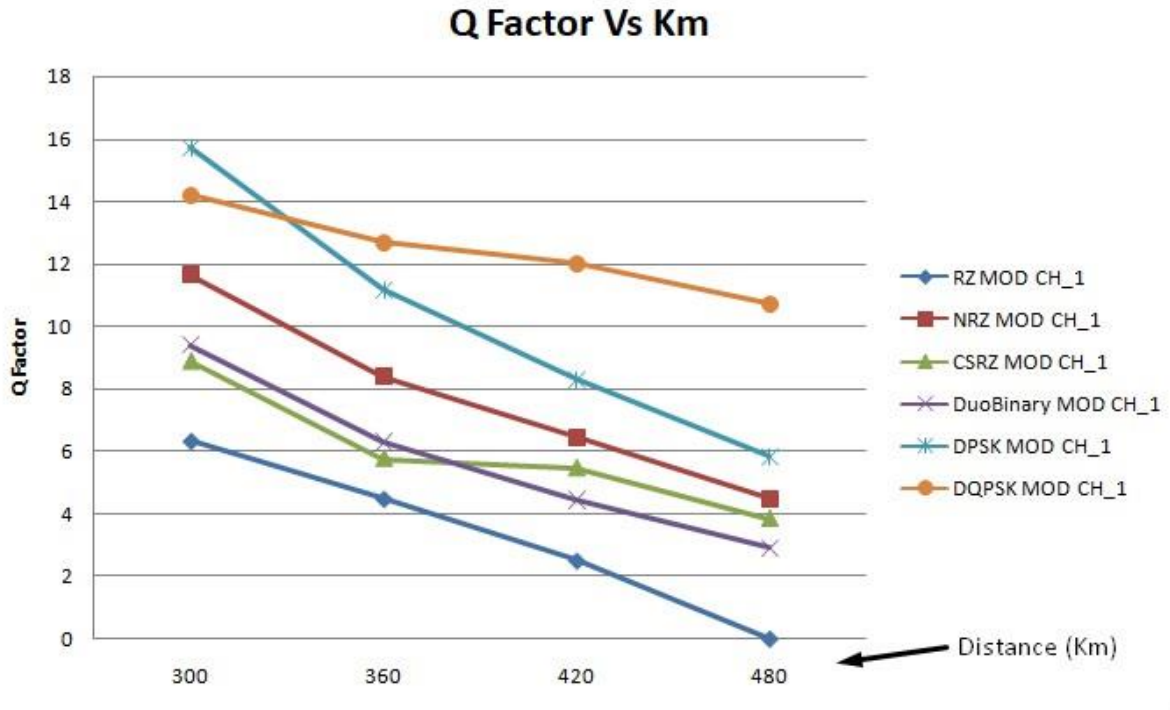


**Εικόνα 5.2.35 BER Vs Power (dB) για οπτική ζεύξη 360Km με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.**

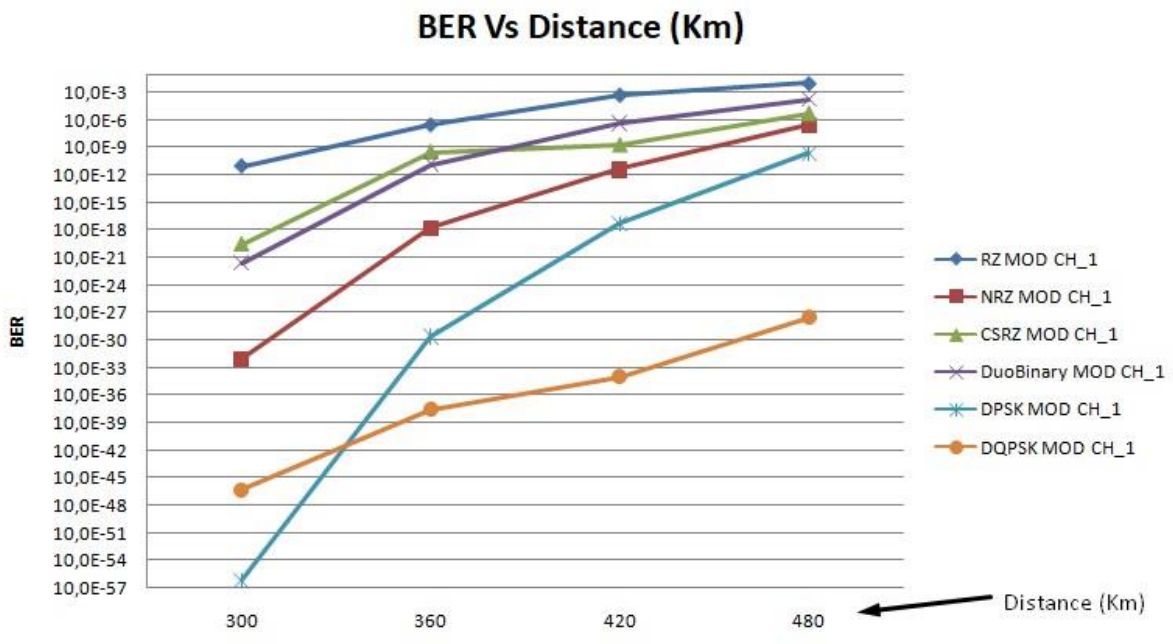
Στην περίπτωση που έχουμε να κάνουμε με μη γραμμικά φαινόμενα η DQPSK φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή. Όσο αυξάνεται η ισχύς αυξάνονται και οι ποιοτικοί της δείκτες σε αντίθεση με την NRZ όπου εδώ φαίνεται να επηρεάζεται αρνητικά από την προσθήκη των μη γραμμικών φαινομένων. Μία άλλη ποιοτική λύση φαίνεται να είναι και η DPSK η οποία επίσης διατηρεί καλές τιμές σ αυτήν την περίπτωση. Οι υπόλοιπες διαμορφώσεις παρουσιάζουν σταθερά χαμηλότερες επιδόσεις και χρειάζονται αρκετή ενίσχυση για να έχουμε επιθυμητά αποτελέσματα.

## **B: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ**

Παρακάτω βλέπουμε την συνολική εικόνα και των έξι διαμορφώσεων και το πως επηρεάζονται οι ποιοτικοί δείκτες αυξάνοντας την απόσταση.

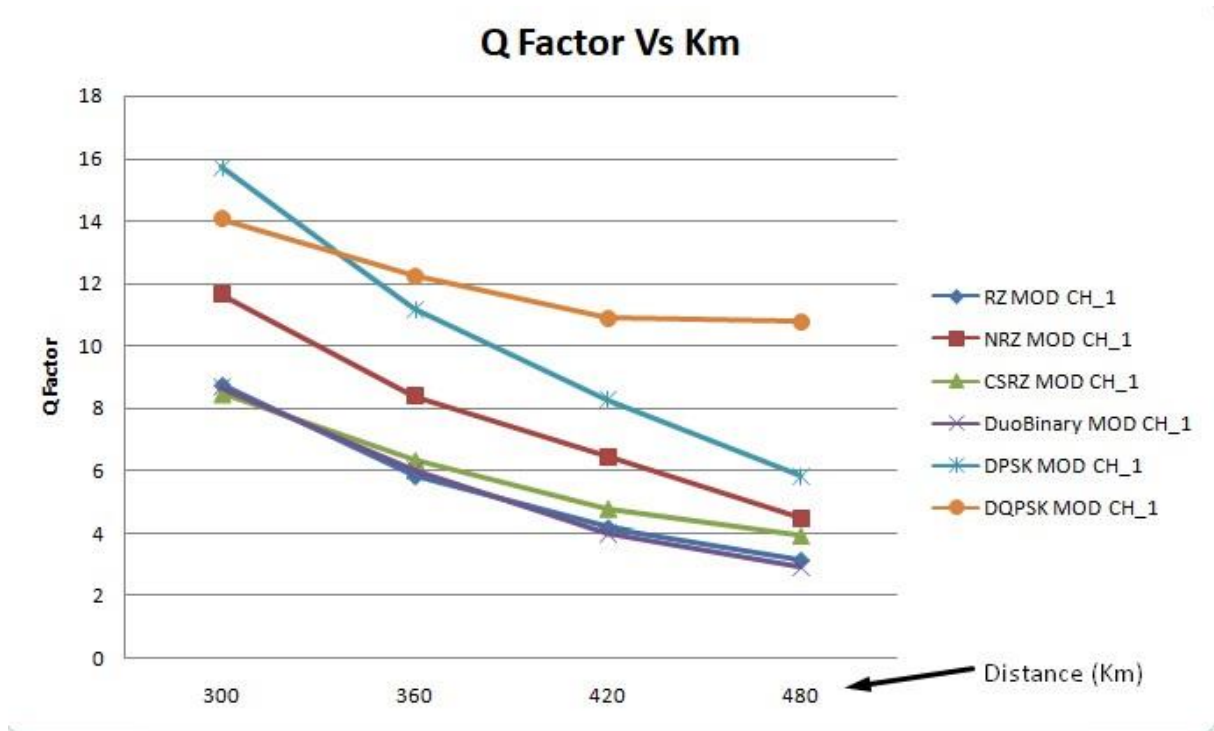


Εικόνα 5.2.36 Q factor Vs distance για οπτική ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

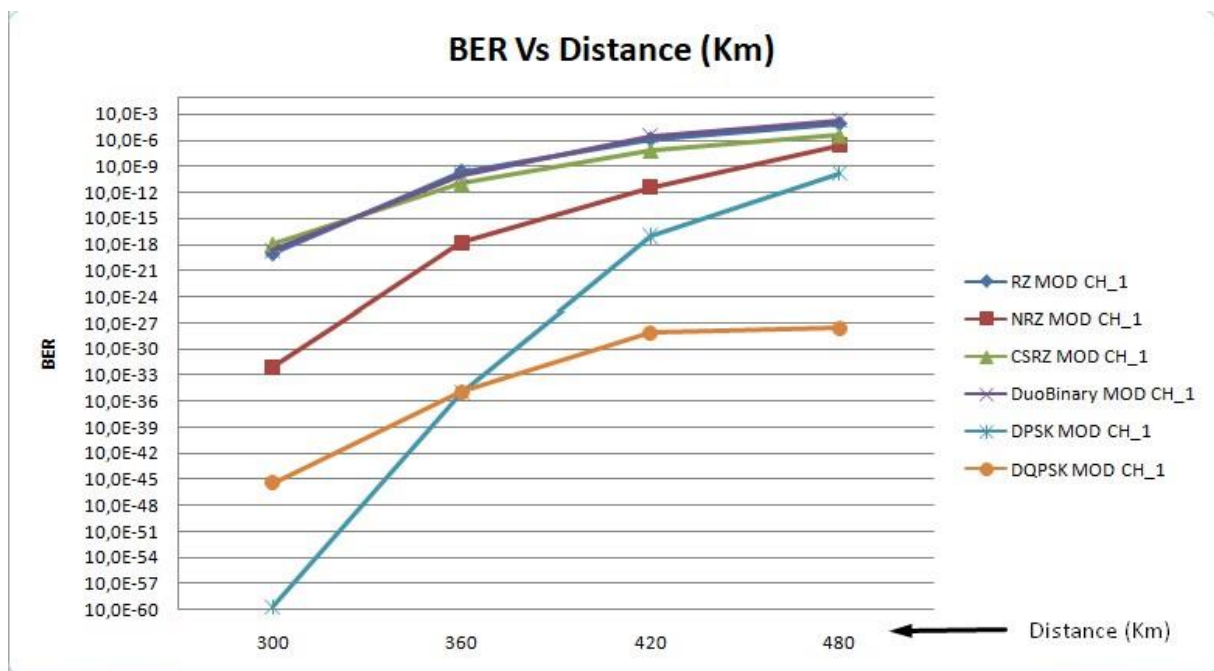


Εικόνα 5.2.37 BER Vs distance για οπτική ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα χωρίς προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ξεκάθαρα πως η DQPSK μαζί με την DPSK και την NRZ φαίνονται να επηρεάζονται λιγότερο από την αύξηση της απόστασης και να είναι οι πιο κατάλληλες ενώ λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα φαίνεται να δίνουν οι RZ CSRZ και DuoBinary. Ακολουθούν και τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων με την προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.



Εικόνα 5.2.38 Q factor Vs distance για οπτική ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.



Εικόνα 5.2.39 BER Vs distance για οπτική ισχύ 0dB με δύο ενισχυτές EDFA με απολαβή 10dB και 5 dB αντίστοιχα με προσθήκη μη γραμμικών φαινομένων.

Όπως ήταν αναμενόμενο η αρνητική επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων στην NRZ είναι και εδώ εμφανής με αποτέλεσμα στις μεγάλες αποστάσεις να πλεονεκτούν οι DPSK και DQPSK. Στις κοντινές αποστάσεις οι DuoBinary και CSRZ έχουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα



## Συμπεράσματα

Η κάθε διαμόρφωση έχει τα δικά της χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως κατάλληλη ή μη σε κάποιο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ανάλογα τις ανάγκες που έχει να υπηρετήσει και τις συνθήκες που πρέπει να αντιμετωπίσει. Στην συγκριτική μελέτη των έξι αυτών διαμορφώσεων, είδαμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μίας, είτε αυτά έχουν να κάνουν με τις παραμέτρους του δικτύου, είτε με τις δυνατότητες που θέλουμε να έχει αυτό, αλλά είτε και την απλότητα ενός πομπού – δέκτη, η οποία παραπέμπει σε δεύτερη φάση και στο κόστος κατασκευής του. Διαμορφώσεις που απαιτούν αυξημένη πολυπλοκότητα σε πομπούς και δέκτες, πολλές φορές δεν είναι οικονομικά συμφέρουσες και σίγουρα δεν είναι οι πρώτες επιλογές των κατασκευαστριών εταιρειών. Ακόμη η επαφή και η εξοικείωση με το “Optisystem” βοήθησε να γνωρίσουμε και να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο λειτουργίας πολλών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στα οπτικά δίκτυα. Τέλος το λογισμικό “Optisystem” που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία αποδείχθηκε πολύτιμο εργαλείο για την προκατασκευαστική μελέτη ενός οπτικού δικτύου τηλεπικοινωνιών, με απώτερο σκοπό να μας βοηθήσει να κάνουμε τις κατάλληλες επιλογές προτού ξεκινήσει η υλοποίησή του.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές

- [1] <http://www.fiber-optic-components.com/what-is-the-meaning-of-100g-channels-networks-to-service-providers.html>
- [2] Χρήστος Ευθυμίου, «Εισαγωγή στις οπτικές επικοινωνίες», Τ.Ε.Ι. Σερρών, τμήμα Πληροφορικής κι Επικοινωνιών, 2011.
- [3] <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C107/144/1034,3734/>
- [4] Ι. Μαρμόκος, «Σημειώσεις μαθήματος Οπτικά δίκτυα», Τμήμα Μηχανικών πληροφορικής και ηλεκτρονικών συστημάτων ΔΙΠΙΑΕ
- [5] High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission, Matthias Seimetz
- [6] Chris Xu, Xiang Liu, and Xing Wei, “Comparison of return-to-zero differential phase-shift keying and on-off keying in long-haul dispersion managed transmission”, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, no. 4, pp. 617-619, April 2003
- [7] Sen Zhang, “Advanced optical modulation formats in high-speed lightwave system”, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Kansas.
- [8] Ezra Ip and Joseph M. Kahn “Power Spectra of Return-to-Zero Optical Signals“ IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, March 2006
- [9] Muhammad Haris, “ADVANCED MODULATION FORMATS FOR HIGH-BIT-RATE OPTICAL NETWORKS” School of Electrical and computer Engineering Georgia Institute of Technology, August, 2008
- [10] I. Lyubomirsky and B. Pitchumani, "Impact of optical filtering on duobinary transmission," Ieee Photonics Technology Letters, vol. 16, pp. 1969-1971, 2004.
- [11] I. Lyubomirsky and C. C. Chien, "Tailoring the duobinary pulse shape for optimum performance," Journal of Lightwave Technology, vol. 23, pp. 3732-3736, 2005.
- [12] H. Kim and C. X. Yu, "Optical duobinary transmission system featuring improved receiver sensitivity and reduced optical bandwidth," Photonics Technology Letters, IEEE, vol. 14, pp. 1205-1207, 2002.
- [13] C. Xie, L. Moller, and R. Ryf, "Improvement of optical NRZ- and RZ-duobinary transmission systems with narrow bandwidth optical filters," Photonics Technology Letters, IEEE, vol. 16, pp. 2162-2164, 2004.
- [14] Sherong Zhang, Benyuan Zhu, Claudine Allen " Advanced Optical Modulation Formats and Their Comparison in Fiber-Optic Systems", January, 2004

- [15] Y. Hibino “An array of photonic filtering advantages: arrayed-waveguide-grating multi/demultiplexers for photonic networks” November, 2000
- [16] Sanjeev Verma, Amayika Kakati, M.R Tripathy, Aran Kumar Singh, Sunil Kumar, Haneet Rana “Performance analysis of GPON network for maximum Q-FACTOR and minimum BER for various fiber length using uniform fiber Bragg's grating” International Conference on Information Technology (InCITe), 2016
- [17] Peter J. Winzer, and Rene-Jean Essiambre, “Advanced optical modulation formats,” Proceedings of the IEEE, vol. 94, pp. 952-985, 2006.
- [18] A. Hirano, Y. Miyamoto, K. Yonenaga, A. Sano, and H. Toba, “40 Gbit/s l-band transmission experiment using SPM-tolerant carrier-suppressed RZ format,” Electronic Letters., vol. 35, no. 25, pp. 2213–2215, 1999.
- [19] Hari Shankar, “Duobinary Modulation for Optical systems”, <http://www.inphi corp.com/products/whitepapers> consulted on 11/01/2007
- [20] Kazi Abu Taher; Satya P. Majumder; B. M. Azizur Rahman, “Performance of different modulation formats in 40 Gb/s optical systems in the presence of polarization mode dispersion and nonlinear effects” International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology, Dhaka, Bangladesh, 2014
- [21] Optical Communication System Design Software , Tutorials - Volume 1 & 2
- [22] Y. Miyamoto, K. Yonenaga, A. Hirano and M. Tomizawa "Nx40 - Gbit/s DWDM transport system using novel return-to-zero formats with modulation bandwidth reduction", IEICE Transaction Communications, vol. E85-B, 374-385, (2002)
- [23] P.V. Mamyshev and N.A. Mamysheva, Opt. Lett. 24, 1454, (1999).
- [24] A. Mecozzi, C.B. Clausen, M. Schtaif, IEEE Phot. Technol. Lett., 12, 392 (2000).002).
- [25] M. Dutta “Different Type Modulation Technique for Fider Transmission” Electronics and Communication Engineering, NITTTR Chandigarh, India 2016
- [26] H. Chenyang, H. Wei “Simulation and Comparison of Advanced Modulation Formats for Wavelength Reuse in High-Speed WDM-PON System” Journal of Physics, 2011
- [27] P. J. Winzer and R.-J. Essiambre, "Advanced Modulation Formats for High- Capacity Optical Transport Networks," Lightwave Technology, Journal of, vol. 24, pp. 4711-4728, 2006.
- [28] E. Ip, J. M. Kahn “Power Spectra of Return-to-Zero Optical Signals” JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, MARCH 2006