



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

Σχεδίαση, μελέτη και προσομοίωση αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος για δρομολόγηση δεδομένων σε ρυθμούς μετάδοσης έως 160 Gb/s.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Σ. Κατσιμίγγος

Επιβλέπων: Αβραμόπουλος Ηρακλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος, 2010



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

Σχεδίαση, μελέτη και προσομοίωση αμιγώς οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος για δρομολόγηση δεδομένων σε ρυθμούς μετάδοσης έως 160 Gb/s.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Σ. Κατσιμίγγος

Επιβλέπων: Αβραμόπουλος Ηρακλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

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

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

.....
Κωνσταντίνος Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος, 2010

.....
Κωνσταντίνος Σ. Κατσιμίγγος

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

Copyright © Κωνσταντίνος Σ. Κατσιμίγγος, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, η ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση τηλεπικοινωνιακής κίνησης, καθιστά επιτακτική την αμιγώς οπτική επεξεργασία δεδομένων. Μια από τις βασικότερες διεργασίες ενός δρομολογητή δικτύου είναι η μετατροπή μήκους κύματος για την αποφυγή σύγκρουσης πακέτων πληροφορίας. Οι αμιγώς οπτικοί μετατροπείς μήκους κύματος, που βασίζονται στα μη γραμμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στους ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές, έχουν λάβει σημαντική προσοχή λόγω του μικρού μεγέθους τους, της χαμηλής κατανάλωσης και της δυνατότητας ολοκλήρωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται και σχεδιάζεται ένα κύκλωμα μετατροπής μήκους κύματος σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα γίνεται σχεδίαση και προσομοίωση της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος με χρήση ενός ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή (SOA), ενός οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου (OBF) και μιας συμβολομετρικής διάταξης Mach Zehnder Interferometer (MZI). Μελετούνται δύο διαφορετικές τεχνικές φιλτραρίσματος που στόχο έχουν την αλλαγή πολικότητας του τελικού σήματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται μια εισαγωγή στην τεχνολογία των οπτικών ινών και γενικότερα των οπτικών δικτύων. Αναφέρονται επίσης βασικές έννοιες όπως η πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM), η μεταγωγή κυκλώματος και πακέτων και πώς αυτά συνδυάζονται για να μας δώσουν τις διάφορες γενιές οπτικών δικτύων.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας αναφέρεται στη χρησιμότητα της μετατροπής του μήκους κύματος στα οπτικά δίκτυα νέας γενιάς με σκοπό την υλοποίηση φωτονικών δρομολογητών που επιτελούν συγχρόνως σύνθετες διεργασίες όπως επίλυση σύγκρουσης πακέτων. Επίσης, αναλύεται το θεωρητικό μοντέλο του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή που αποτελεί τα βασικά στοιχεία του οπτικού μετατροπέα. Δίνεται έμφαση στα φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα στον ενισχυτή λόγω της μη γραμμικότητας του μέσου αυτού, καθώς επίσης και στο θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από την ενίσχυση και επεξεργασία των σημάτων. Τέλος, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις διαφορετικές τεχνικές μετατροπής μήκους κύματος με σκοπό την καλύτερη ποιότητα και αξιοπιστιμότητα των οπτικών σημάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα παραπάνω στοιχεία προκύπτουν από πειραματικές μελέτες, των οποίων τα αποτελέσματα απεικονίζονται και σχολιάζονται εκτενώς.

Στο τρίτο μέρος περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε καθώς επίσης και τα επιμέρους κυκλωματικά στοιχεία της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Στο τέταρτο μέρος γίνεται ο σχολιασμός των προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για ρυθμοδότηση 40 Gb/s και 160 Gb/s αντίστοιχα, με εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών φιλτραρίσματος.

Στο πέμπτο και τελευταίο μέρος καταλήγουμε στα τελικά συμπεράσματα όπως αυτά προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. Αναφέρονται πιθανές βελτιώσεις ενώ παράλληλα παραθέτονται διάφορες μελλοντικές εφαρμογές.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μετατροπή μήκους κύματος ,ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής,ζωνοπερατό οπτικό φίλτρο, συμβολόμετρο Mach Zehnder, ετεροδιαμόρφωση κέρδους,ετεροδιαμόρφωση φάσης,επιτάχυνση καμπύλης κέρδους ενισχυτή.

ABSTRACT

In the recent years, the continuous and greater expansion of telecommunication traffic makes all-optical signal processing imperative. A process of utmost importance of a router is wavelength conversion to avoid data packet conflicts. All optical wavelength converters based on non linear phenomena that take place in the semiconductor optical amplifiers, have received considerable attention in terms of small footprint, low power consumption, and optical integration.

In this diploma thesis, we study and design an all optical wavelength conversion circuit that operates at a high bit rate. Specifically, we design and simulate a converter consisting of a soa, a bandpass optical filter and a Mach Zender Interferometer. Two different filtering techniques, which focus on the inversion of the polarity of output signal, are examined.

In the first chapter of this study, an introduction is made to the technology of fiber optics and fiber optics networks in general. Basic meanings are also mentioned such as wavelength division multiplexing, circuit switching, packet switching and how the knowledge of these are combined to give the different generations of fiber optics networks.

The second chapter refers to the use of wavelength conversion in new generation of optical networks, aiming at the realization of optical routers, which at the same time execute complex processes such as solving packet conflicts. Furthermore, the basic theoretical model of semiconductor optical amplifier, that is the primary constituent of wc, is investigated. Considerable emphasis is given to the phenomena that take place into the active region of the soa because of its nonlinearity, as well as the theoretical background around the amplification and processing of signals. Finally, the interest is also focused on different techniques of wavelength conversion aiming at improved quality and utilization of optical signals. It is worth mentioning that the analysis derives from experimental studies, whose results are shown and commented extensively.

In the third part, the simulation model that was used is described in detail, as well as the modules of this particular application.

In the fourth part, we comment on the results obtained by the simulations at bit rates of 40Gbps and 160 Gbps respectively, based on the different filtering techniques.

In the fifth and last chapter, we reach the final conclusion of our analysis resulting from the simulations. Additionally, possible improvements on the operation principle of the wc and various future applications are also mentioned.

KEY WORDS

Wavelength conversion, SOA - Semiconductor Optical Amplifier, OBF - optical bandpass filter, Mach Zehnder interferometer, XGM - cross gain modulation, XPM - cross phase modulation, speed up SOA

Στη νονά μου...

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το επιστέγασμα των προσπαθειών μου για την αποφοίτηση από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ανάγκη μου να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου όλον αυτόν τον καιρό εκδηλώνεται στις παρακάτω γραμμές.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κύριο Αβραμόπουλο, για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπο μου στην ανάθεση της παρούσας εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω τόσο για την επίβλεψη της όσο και για την εποικοδομητική συνεργασία μας μέσα από την οποία έμαθα πολλά πάνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον χώρο όπως των οπτικών τηλεπικοινωνιών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Χρήστο Σταματιάδη για την πολύτιμη καθοδήγηση του και υπομονή που επέδειξε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας. Η συνδρομή του ήταν καθοριστική και δίχως αυτή δε θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Σπύρο και Παναγιώτα, και τον αδερφό μου, Δημήτρη, για την ψυχολογική και οικονομική στήριξη τους τόσα χρόνια. Όπως επίσης και την κοπέλα μου, Έλενα, γιατί ήταν πάντα δίπλα μου και μου έδινε δύναμη να συνεχίσω. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον νονό μου, Γιώργο, που αποτέλεσε και αποτελεί παράδειγμα προς μίμηση για μένα. Τέλος, να τονίσω ότι χωρίς τη συνδρομή των παραπάνω ανθρώπων δε θα είχα καταφέρει κάτι αξιόλογο ως τώρα.

Σας ευχαριστώ πολύ όλους,

Κωνσταντίνος Κατσιμίγγος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.1 Εισαγωγή.....	17
1.2 Οπτικά δίκτυα και βασικές έννοιες.....	18
1.2.1 WDM.....	19
1.2.2 Μεταγωγή κυκλώματος.....	20
1.2.3 Μεταγωγή πακέτου.....	21
1.2.4 Οπτικά δίκτυα 1 ^{ης} γενιάς.....	23
1.2.5 Οπτικά δίκτυα 2 ^{ης} γενιάς WDM και μεταγωγή κυκλώματος.....	24
1.2.6 Τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα 3 ^{ης} γενιάς.....	26
2.1 Μετατροπή μήκους κύματος :χρησιμότητα.....	27
2.1.1 Λειτουργικότητα και χαρακτηριστικά.....	30
2.1.2 Είδη μετατροπής μήκους κύματος.....	30
2.2 Το βασικό συστατικό του μετατροπέα : Ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής (SOA).....	31
2.2.1 SOA's σε σχέση με άλλους οπτικούς ενισχυτές.....	31
2.2.2 Δομή του ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή.....	33
2.2.3 Αρχή λειτουργίας και βασικά χαρακτηριστικά.....	34
2.2.3.1 Ενίσχυση οπτικού σήματος και κέρδος του ενισχυτή.....	36
2.2.3.2 Κέρδος ασθενούς σήματος.....	37
2.2.3.3 Κορεσμός του SOA από βραχύ οπτικό παλμό.....	37
2.2.3.4 Χρονική σταθερά ανάκαμψης φορέων.....	40
2.2.3.5 Κορεσμένο κέρδος του SOA υπό την επίδραση CW σήματος.....	41
2.2.4 Μη γραμμικά φαινόμενα των SOAs.....	45
2.2.4.1 Αυτοδιαμόρφωση φάσης (SPM : Self Phase Modulation).....	45
2.2.4.2 Ετεροδιαμόρφωση Φάσης (XPM :Cross Phase Modulation).....	46
2.2.4.3 Μίξη Τεσσάρων Φωτονίων (FWM:Four Wave Mixing).....	47
2.2.4.4 Ετεροδιαμόρφωση Κέρδους (XGM:Cross Gain Modulation).....	48
2.3 Είδη κυκλωμάτων μετατροπής μήκους κύματος.....	48
2.3.1 Οπτοηλεκτρονική μέθοδος.....	49
2.3.2 Υλοποίηση με συμβολομετρικές διατάξεις (interferometric techniques).....	50
2.3.3 Μίξη κυμάτων (wave mixing).....	52
2.3.4 Υλοποίηση με οπτικές πύλες (optical gating).....	52
2.4 Αρχή λειτουργίας Μετατροπέα Μήκους Κύματος στις προσομοιώσεις.....	53
2.4.1 Αντεστραμμένο ή μη αντεστραμμένο σήμα στην έξοδο.....	56
2.4.2 Επιτάχυνση ανάκαμψης καμπύλης κέρδους SOA.....	57
3.1 Εισαγωγικά για τις προσομοιώσεις.....	61
3.1.1 Η πλατφόρμα VPI.....	61
3.1.2 Γενικές παράμετροι της προσομοίωσης.....	62
3.1.3 Στοιχεία των προσομοιώσεων.....	63
4.1 Προσομοιώσεις.....	70
4.1.1 Προσομοίωση της λειτουργίας μετατροπέα μήκους κύματος σε ρυθμό 40Gbps.....	70
4.1.1.1 Προσομοίωση SOA-OBF-MZI και ελαφριά μετατόπιση του φίλτρου προς τις μπλε αρμονικές.....	70
4.1.1.1.1 Σήμα μετά την πηγή σήματος σταθερού πλάτους.....	71
4.1.1.1.2 Σήμα μετά την γεννήτρια παλμικής ακολουθίας PRBS.....	73
4.1.1.1.3 Σήμα μετά τον συζεύκτη.....	76
4.1.1.1.4 Σήμα μετά τον SOA.....	78

4.1.1.1.5 Σήμα μετά το στοιχείο chop signal.....	81
4.1.1.1.6 Αντεστραμμένο σήμα μετά το οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο (OBF)	82
4.1.1.1.6 Τελικό μη αντεστραμμένο σήμα	87
4.1.1.2 Προσομοίωση SOA-OBF με αρκετή μετατόπιση του φίλτρου προς τις μπλε αρμονικές	93
4.1.2 Προσομοίωση της λειτουργίας μετατροπέα μήκους κύματος σε ταχύτητα 160Gbps	96
4.1.2.1 Προσομοίωση SOA-OBF-MZI και ελαφριά μετατόπιση του φίλτρου προς τις μπλε αρμονικές.....	96
4.1.2.1.1 Σήμα μετά την πηγή σήματος σταθερού πλάτους.....	98
4.1.2.1.2 Σήμα μετά την γεννήτρια παλμικής ακολουθίας PRBS	99
4.1.2.1.3 Σήμα μετά τον συζεύκτη	101
4.1.2.1.4 Σήμα μετά τον SOA	102
4.1.2.1.5 Σήμα μετά το στοιχείο chop signal.....	104
4.1.2.1.6 Αντεστραμμένο σήμα μετά το οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο (OBF)	105
4.1.2.1.7 Τελικό μη αντεστραμμένο σήμα.....	109
4.1.2.2 Προσομοίωση SOA-OBF με αρκετή μετατόπιση του φίλτρου προς τις μπλε αρμονικές	114
5.1 Τελικά συμπεράσματα	118
5.1.1 Παρατηρήσεις και πιθανές βελτιώσεις	118
5.1.2 Προεκτάσεις για περαιτέρω έρευνα	119
5.1.3 Εφαρμογές του μετατροπέα μήκους κύματος	119

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικ.01 Σύστημα πολυπλεξίας μήκους κύματος.....	19
Εικ.02 Τα τρία στάδια της τεχνικής μεταγωγής κυκλώματος.....	21
Εικ.03 Τεχνική μεταγωγής πακέτου.....	22
Εικ.04 Δίκτυο μεταγωγής πακέτων που προωθεί πακέτα με τη μέθοδο νοητού κυκλώματος.....	23
Εικ.05 Δίκτυο μεταγωγής πακέτων που προωθεί πακέτα με τη μέθοδο αυτοδύναμου πακέτου.....	23
Εικ.06 Γραφική απεικόνιση βασικής ιδέας μετατροπής μήκους κύματος.....	25
Εικ.07 Η εξέλιξη των οπτικών τεχνολογιών και δικτύων.....	27
Εικ.08 Δρομολόγηση μηκών κύματος σε δίκτυα με ή χωρίς δυνατότητα μετατροπής μήκους κύματος.....	28
Εικ.09 Περιορισμός δικτύου λόγω απουσίας μετατροπεία μήκους κύματος.....	28
Εικ.10 Δρομολογητής CRS1 της CISCO.....	29
Εικ.11 Είδη μετατροπής μήκους κύματος.....	31
Εικ.12 Η δομή του ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή.....	33
Εικ.13 Απορρόφηση και εξαναγκασμένη εκπομπή σε ένα άτομο με δύο ενεργειακές στάθμες.....	35
Εικ.14 Ενεργειακές στάθμες σε ημιαγώγιμη p διάταξη και συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε (α)θερμική ισορροπία και (β) αντιστροφή πληθυσμού.....	35
Εικ.15 (α) Διάταξη p-n (β) Συγκέντρωση φορέων χωρίς εφαρμογή τάσης έγχυσης (γ)Συγκέντρωση φορέων με εφαρμογή τάσης έγχυσης V_f	35
Εικ.16 Ανάκαμψη καμπύλης κέρδους SOA.....	39
Εικ.17 (α) Βραχύς οπτικός παλμός Gauss και (b) κορεσμός κέρδους από τον βραχύ οπτικό παλμό.....	41
Εικ.18 (α)Παλμός εισόδου εύρους 20ps (β) Κέρδος ενισχυτή χωρίς CW σήμα (γ)Κέρδος ενισχυτή με CW σήμα.....	44
Εικ.19 Φαινόμενο XPM M καναλιών σε μη γραμμικό μέσο διάδοσης.....	47
Εικ.20 Το φαινόμενο FWM στον SOA.....	48
Εικ.21 Οπτοηλεκτρονική μέθοδος.....	50
Εικ.22 Υλοποίηση μετατροπεία με συμβολόμετρο Mach Zehnder βασιζόμενο στο φαινόμενο XPM.....	51
Εικ.23 Βασική ιδέα μετατροπής μήκους κύματος με τη βοήθεια του φαινομένου FWM.....	52
Εικ.24 Μετατροπείας μήκους κύματος που βασίζεται στο φαινόμενο XGM, κάνοντας χρήση ενός SOA και ενός οπτικού βαθυπερατού φίλτρου (OBF).....	53
Εικ.25 Αρχή λειτουργίας μετατροπεία μήκους κύματος που ακολουθείται στην παρούσα εργασία.....	53
Εικ.26 Φασματικές απεικονίσεις των σημάτων και των συναρτήσεων του φίλτρου και του συμβολόμετρου.....	55
Εικ.27 (α)Αρχή λειτουργίας του μετατροπεία για κανονική και αντεστραμμένη πολικότητα (β)Φασματικές αλλαγές στη μη αντεστραμμένη λειτουργία του μετατροπεία.....	56
Εικ.28 Σχηματική απεικόνιση της μη αντεστραμμένης και της αντεστραμμένης λειτουργίας του μετατροπεία.....	56
Εικ.29 Απεικόνιση της διαδικασίας επιτάχυνσης της ανάκαμψης του ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή.....	57
Εικ.30 Κυματομορφές των σημάτων που έχουν μετατραπεί με διαφορετική μετατόπιση φίλτρου σε πειραματικές διατάξεις.....	58
Εικ.31 Φασματικές απεικονίσεις για διαφορετικές μετατοπίσεις του φίλτρου.....	59
Εικ.32 Η σύγκριση της λειτουργίας του μετατροπεία μεταξύ «μπλε»μετατοπισμένου φίλτρου και «κόκκινου»μετατοπισμένου φίλτρου.....	60

Εικ.33 Αναπαράσταση ενός Laser ημιαγωγού και του μοντέλου TLLM δείχνοντας έναν κόμβο μέσα σε ένα τμήμα του μοντέλου.....	61
Εικ.34 Δομή του στοιχείου Tx Pulse.....	64
Εικ.35 Κωδικοποίηση RZ και NRZ.....	65
Εικ.36 Το φάσμα της cw πηγής με τη μία αρμονική.....	66
Εικ.37 Συναρτήσεις μεταφοράς και απόκριση συχνότητας για διάφορες τιμές ενός βαθυπερατού gaussian φίλτρου.....	68
Εικ.38 Μια εσωτερική ματιά στο στοιχείο Mach-Zehnder Interferometer.....	69
Εικ.39 Μοντέλο προσομοίωσης SOA - OBF - MZI σε ρυθμό μετάδοσης 40Gbps και για μικρή μετατόπιση του φίλτρου.....	70
Εικ.40 Γενικές μεταβλητές για ρυθμό μετάδοσης 40Gbps.....	71
Εικ.41 Τιμές μεταβλητών στοιχείου cw laser.....	72
Εικ.42 Έξοδος cw laser στο πεδίο του χρόνου.....	72
Εικ.43 Φασματική περιγραφή εξόδου laser σταθερού πλάτους.....	73
Εικ.44 Τιμές μεταβλητών γεννήτριας PRBS.....	73
Εικ.45 Φάσμα εξόδου γεννήτριας PRBS.....	74
Εικ.46 Φάσμα γεννήτριας PRBS σε μεγέθυνση.....	74
Εικ.47 Παλμοί γεννήτριας παλμικής ακολουθίας PRBS.....	75
Εικ.48 Απόσταση παλμών rump σήματος.....	75
Εικ.49 Παλμός όπως εξέρχεται από το στοιχείο Tx Pulse.....	76
Εικ.50 Φασματική απεικόνιση σήματος μετά τον συζεύκτη.....	76
Εικ.51 Φάσμα σήματος εξόδου συζεύκτη σε μεγέθυνση.....	77
Εικ.52 Παλμοί μετά το στοιχείο coupler.....	77
Εικ.53 Φασματική ανάλυση σήματος μετά τον SOA.....	78
Εικ.54 Απεικόνιση φάσματος σήματος μετά τον SOA σε μεγέθυνση.....	78
Εικ.55 Παλμοί στην έξοδο του ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή.....	79
Εικ.56 Τιμές μεταβλητών του στοιχείου SOA.....	80
Εικ.57 Τιμές μεταβλητών του στοιχείου chop signal.....	81
Εικ.58 Παλμοί μετά το στοιχείο chop signal.....	81
Εικ.59 Φασματική απεικόνιση στην έξοδο του στοιχείου chop signal.....	82
Εικ.60 Απόκριση πλάτους φίλτρου για ταχύτητα 40Gbps.....	82
Εικ.61 Τιμές μεταβλητών του οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου στην αντεστραμμένη λειτουργία για ρυθμό μετάδοσης 40Gbps.....	83
Εικ.62 Το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος του φάσματος από το ζωνοπερατό φίλτρο.....	84
Εικ.63 Φάσμα στην έξοδο του φίλτρου σε μεγέθυνση.....	84
Εικ.64 Αντεστραμμένοι παλμοί στην έξοδο του φίλτρου.....	85
Εικ.65 Διαφορές στις κορυφές των παλμών.....	85
Εικ.66 Διάγραμμα ματιού για την αντεστραμμένη λειτουργία μετά το ζωνοπερατό φίλτρο.....	86
Εικ.67 Διάγραμμα ματιού για μηδενική μετατόπιση.....	87
Εικ.68 Τιμές μεταβλητών του συμβολόμετρου.....	87
Εικ.69 Υλοποίηση για την εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς του συμβολόμετρου MZI.....	88
Εικ.70 Συνάρτηση μεταφοράς για καθυστέρηση του άνω βραχίονα 0.5ps.....	88
Εικ.71 Συνάρτηση μεταφοράς για καθυστέρηση 1ps.....	89
Εικ.72 Συνάρτηση μεταφοράς για καθυστέρηση 2ps.....	89
Εικ.73 Φάσμα στην έξοδο του συμβολόμετρου.....	90
Εικ.74 Φάσμα τελικού σήματος που έχει υποστεί μετατροπή μήκους κύματος.....	90
Εικ.75 Παλμοί που έχουν υποστεί μετατροπή μήκους κύματος.....	91
Εικ.76 Διάγραμμα ματιού τελικού μη αντεστραμμένου σήματος.....	91
Εικ.77 Παλμοί στην δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου.....	92
Εικ.78 Διάγραμμα ματιού για τη δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου.....	92
Εικ.79 Φάσμα στη δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου.....	92
Εικ.80 Μοντέλο προσομοίωσης μη αντεστραμμένης λειτουργίας με SOA-OBF για ρυθμό μετάδοσης 40Gbps.....	93
Εικ.81 Τιμές μεταβλητών του οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου για την μη αντεστραμμένη λειτουργία του μετατροπέα σε ρυθμό μετάδοσης 40Gbps.....	93

Εικ.82 Διάγραμμα ματιού μη αντεστραμμένης λειτουργίας μετατροπέα	94
Εικ.83 Φασματική απεικόνιση στην έξοδο του μετατροπέα για μη αντεστραμμένη λειτουργία	95
Εικ.84 Φασματική απεικόνιση σε μεγέθυνση.....	95
Εικ.85 Παλμοί στην έξοδο του μετατροπέα κάνοντας χρήση του μοντέλου του μη αντεστραμμένου σήματος στην έξοδο	96
Εικ.86 <u>Μοντέλο προσομοίωσης αντεστραμμένης λειτουργίας μετατροπέα για ταχύτητα 160Gbps</u>	97
Εικ.87 Τιμές για τις γενικές μεταβλητές.....	97
Εικ.88 Χρονική απεικόνιση της εξόδου της πηγής σταθερού πλάτους.....	98
Εικ.89 Φασματική απεικόνιση της πηγής cw	98
Εικ.90 Απεικόνιση στο πεδίο των συχνοτήτων της εξόδου της γεννήτριας PRBS	99
Εικ.91 Φασματική απεικόνιση σε μεγέθυνση της παλμικής ακολουθίας PRBS	99
Εικ.92 Παλμοί στην έξοδο της γεννήτριας	100
Εικ.93 Απόσταση παλμών	100
Εικ.94 Πλάτος FWHM παλμού	101
Εικ.95 Φασματική απεικόνιση σήματος μετά τον συζεύκτη.....	101
Εικ.96 Παλμοί στην έξοδο του συζεύκτη	102
Εικ.97 Φάσμα μετά τον ημιαγωγίμο ενισχυτή	102
Εικ.98 Φασματική απεικόνιση σε μεγέθυνση.....	103
Εικ.99 Παλμοί μετά την έξοδο από τον SOA	103
Εικ.100 Παλμοί στην έξοδο του στοιχείου chop signal.....	104
Εικ.101 Φάσμα σήματος στην έξοδο του στοιχείου chop signal	104
Εικ.102 Τιμές μεταβλητών του οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου για την αντεστραμμένη λειτουργία του μετατροπέα σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gbps	105
Εικ.103 Απόκριση πλάτους φίλτρου για ταχύτητα 160Gbps	106
Εικ.104 Απεικόνιση στο πεδίο των συχνοτήτων του σήματος στην έξοδο του φίλτρου	106
Εικ.105 Φασματική απεικόνιση σε μεγέθυνση.....	107
Εικ.106 Αντεστραμμένοι παλμοί στην έξοδο του φίλτρου	107
Εικ.107 Διαφορές στις κορυφές των παλμών	108
Εικ.108 Διάγραμμα ματιού στην έξοδο του φίλτρου	108
Εικ.109 Διάγραμμα ματιού για μηδενική μετατόπιση του φίλτρου	109
Εικ.110 Παλμοί στην έξοδο της συμβολομετρικής διάταξης.....	110
Εικ.111 Διάγραμμα ματιού στην έξοδο του συμβολόμετρου.....	110
Εικ.112 Φασματική απεικόνιση του σήματος στην έξοδο του συμβολόμετρου	111
Εικ.113 Παλμοί μετά την εισαγωγή επιπλέον φάσης στον άνω βραχίονα	112
Εικ.114 Τελικό διάγραμμα ματιού	112
Εικ.115 Φασματική απεικόνιση του τελικού σήματος μετά τη μετατροπή μήκους κύματος	113
Εικ.116 Παλμοί στην δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου	113
Εικ.117 Διάγραμμα ματιού για τη δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου	114
Εικ.118 Φάσμα στη δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου.....	114
Εικ.119 <u>Μοντέλο προσομοίωσης μη αντεστραμμένης λειτουργίας μετατροπέα για ταχύτητα 160Gbps</u>	115
Εικ.120 Τιμές μεταβλητών του οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου για την μη αντεστραμμένη λειτουργία του μετατροπέα σε ρυθμό μετάδοσης 160 Gbps	115
Εικ.121 Φασματική απεικόνιση σήματος μη αντεστραμμένης λειτουργίας.....	116
Εικ.122 Παλμοί στην έξοδο της διάταξης.....	117
Εικ.123 Διάγραμμα ματιού για τη μη αντεστραμμένη λειτουργία σε ταχύτητα 160 Gbps.....	117
Εικ.124 Σύγκριση της ανάκαμψης της καμπύλης κέρδους του ενισχυτή και χαρακτηριστικών του chirp σε σχέση με τη διάρκεια του παλμού	118
Εικ.125 Υλοποίηση αμιγώς οπτικού δρομολογητή υπό την επίβλεψη του εργαστηρίου PCRL της σχολής HMMY του ΕΜΠ	120
Εικ.126 Η διάταξη μετατροπής μήκους κύματος όπως χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα BOOM.....	120
Εικ.127 Τα αποτελέσματα του μετατροπέα της διάταξης	121
Εικ.128 Μία ακόμη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της διάταξης.....	121

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1 Μεταβλητές γεννήτριας PRBS	63
Πίνακας 2 Μεταβλητές στοιχείου cw laser	65
Πίνακας 3 Μεταβλητή couple factor συζεύκτη.....	66
Πίνακας 4 Μεταβλητή amplitude του στοιχείου τροφοδοσίας του SOA	67
Πίνακας 5 Μεταβλητές στοιχείου chop signal.....	67
Πίνακας 6 Μεταβλητές οπτικού φίλτρου.....	68
Πίνακας 7 Μεταβλητές συμβολόμετρου Mach-Zehnder	69

1.1 Εισαγωγή

Οι τελευταίες δεκαετίες έχουν χαρακτηριστεί δίκαια ως η εποχή της πληροφορίας. Είναι φανερό πως η συνεχής ανάγκη για τη μετάδοση όσο το δυνατόν περισσότερης πληροφορίας στο λιγότερο δυνατό χρόνο και σε μεγαλύτερη απόσταση. Μέχρι σήμερα όμως, οι επικοινωνιακές ζεύξεις περιορίζονται από την ταχύτητα των ηλεκτρονικών, καθώς στους κόμβους ενός δικτύου απαιτείται η οπτοηλεκτρονική μετατροπή για την επεξεργασία των σημάτων. Εφόσον μια περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας των ηλεκτρονικών δεν είναι εφικτή, είναι επιτακτική η ανάγκη για τη μετάβαση στα αμιγώς οπτικά δίκτυα. Οι διαθέσιμες εμπορικές διατάξεις, όπως οι ηλεκτρονικοί δρομολογητές και οι μεταγωγείς, δεν περιορίζουν τις ζεύξεις μόνο από πλευράς ταχύτητας. Το μεγάλο τους μέγεθος και η υψηλή κατανάλωση θέτουν επιπρόσθετους περιορισμούς στις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις. Τα παραπάνω προβλήματα αποσκοπούν να επιλύσουν αμιγώς οπτικές διατάξεις οι οποίες απαιτούν πολύ μικρή ισχύ λειτουργίας, καταλαμβάνουν ελάχιστο χώρο και υποστηρίζουν εκρηκτικούς ρυθμούς λειτουργίας της τάξεως των Tb/s.

Οι ζεύξεις με οπτικές ίνες υπερτερούν έναντι του χαλκού για αρκετούς λόγους. Πρώτον, για κάθε μία από τις τρεις περιοχές μήκους κύματος που καλύπτουν (0.85, 1.3, 1.55 μm) υπάρχει μια τεράστια διαθέσιμη χωρητικότητα περίπου 25 THz. Είναι, δηλαδή, σαν να είχαμε πολλά ομοαξονικά καλώδια μαζί και έτσι έχουμε περισσότερη πληροφορία στον ίδιο χρόνο. Επίσης, ο ρυθμός σφάλματος μπορεί να βελτιωθεί από 10^{-5} περίπου σε 10^{-15} . Η βελτίωση αυτή οφείλεται στο ότι οι χάλκινες ζεύξεις είναι πιο ευάλωτες σε ανεπιθύμητες εξωτερικές επιδράσεις γιατί τα κινούμενα ηλεκτρόνια επηρεάζουν το ένα το άλλο, ενώ τα κινούμενα φωτόνια της φωτεινής εκπομπής δεν αλληλεπιδρούν με άλλα κινούμενα φωτόνια. Επίσης, η εξασθένηση στο σήμα των οπτικών ινών είναι πολύ πιο μικρή σε σχέση με άλλους τρόπους μετάδοσης. Για παράδειγμα, το ομοαξονικό καλώδιο έχει απόσβεση 7 dB/km σε σχέση με μία οπτική ίνα όπου η απόσβεση περιορίζεται από 0.2 έως 0.5 dB/km. Επιπρόσθετα, το μικρό μέγεθός τους τις καθιστά ακόμη πιο ελκυστικές στην μετάδοση πληροφορίας. Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η δυνατότητα ολοκλήρωσης οπτικών κυματοδηγών σε πλακίδια πυριτίου προσδίδει μεγαλύτερη ευχέρεια στις διάφορες οπτικές εφαρμογές που απαιτούν οπτικά στοιχεία.

Η επικράτηση των οπτικών ινών στις τηλεπικοινωνίες, οδήγησε τις ερευνητικές δραστηριότητες στη μελέτη των πολυσημειακών ζεύξεων και δικτύων. Ως καρπός της έρευνας αυτής τα πολυσημειακά αυτά συστήματα ήδη έχουν αρχίσει να γίνονται διαθέσιμα εμπορικά (FBTx με πιο δημοφιλή FBTH Fiber To The Home) προσφέροντας ευρυζωνικές υπηρεσίες. Η διαθέσιμη σήμερα τεχνολογία καθιστά δυνατή την προσαρμογή μεγάλου αριθμού ταυτόχρονων συνδέσεων μέσα στο διαθέσιμο εύρος ζώνης μιας και μόνο ίνας. Μπορούμε να κατασκευάσουμε δίκτυο πολλαπλής προσπέλασης στο οποίο οι δυναμικά διαθέσιμες συνδέσεις μεταξύ κόμβων χρησιμοποιούν διαφορετικά μήκη κύματος, τα λεγόμενα WDM (Wavelength

Division Multiplexing) δίκτυα ή δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος. Ο όρος «δυναμικά» δεν είναι τυχαίος και εννοούμε ότι οι διασυνδέσεις εναλλάσσονται γρήγορα. Στα οπτικά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς δίνεται έμφαση στη χρήση διαφορετικών μηκών κύματος σε κάθε διασύνδεση μεταξύ κόμβων ή ομάδες διασυνδέσεων ώστε να μην συγκρούονται τα πακέτα πληροφορίας. Καθώς τα διαθέσιμα μήκη κύματος σε ένα δίκτυο είναι περιορισμένα, γεννιέται το ερώτημα πως θα γίνει η καλύτερη εκμετάλλευση τους. Σε αυτό συμβάλλει η αμιγώς οπτική διαδικασία της μετατροπής του μήκους κύματος. Η διάταξη που επιτελεί την παραπάνω διαδικασία μελετάται στην παρούσα εργασία. [1][2][3][4]

1.2 Οπτικά δίκτυα και βασικές έννοιες

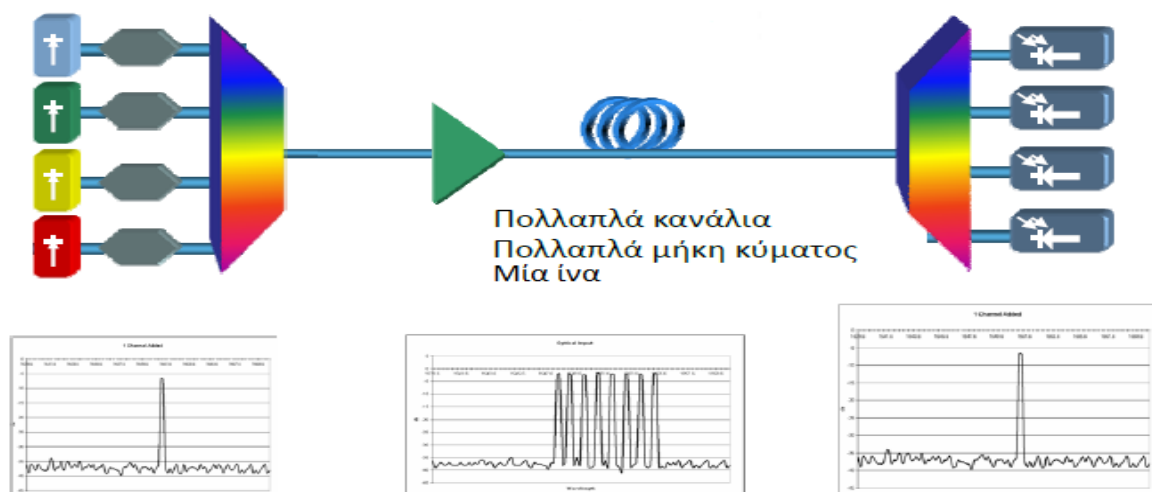
Όπως έγινε εμφανές, η συνεχής ανάγκη για τη μετάδοση όσο το δυνατόν περισσότερης πληροφορίας στο λιγότερο δυνατό χρόνο οδήγησε στη μετάδοση δεδομένων με υψηλότερο ρυθμό μέσα από μία ίνα, σε αντίθεση με το παρελθόν όπου χρησιμοποιούνταν πολλές ίνες για να μεταφέρουν δεδομένα σε χαμηλούς ρυθμούς κάτι που είναι και πολύ πιο δαπανηρό. Έτσι, η ιδέα της πολυπλεξίας που προϋπήρχε στα ηλεκτρονικά εφαρμόστηκε και στα οπτικά δίκτυα. Οι τεχνικές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται είναι η ευρέως διαδεδομένη πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM : Wavelength Division Multiplexing) και η λιγότερη χρησιμοποιούμενη οπτική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (OTDM : Optical Time Division Multiplexing)¹. Επίσης, θα αναφερθούμε στις τεχνικές μεταγωγής κυκλώματος και μεταγωγής πακέτου που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την πολυπλεξία μήκους κύματος στα οπτικά δίκτυα. Τέλος, θα περιγράψουμε τα δίκτυα αυτά και την ανάγκη για τη μετάβαση στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς.

¹ Αντίστοιχη μέθοδος της πολυπλεξίας μήκους κύματος WDM είναι η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM : Frequency Division Multiplexing) που χρησιμοποιείται στις ηλεκτρονικές διατάξεις. Επίσης, η οπτική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (OTDM : Optical Time Division Multiplexing) χρησιμοποιείται σε αντιστοιχία με την ηλεκτρονική πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου (TDM : Time Division Multiplexing).

1.2.1 WDM

Σε κάθε οπτική ίνα ένα οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα. Είναι δυνατόν, λοιπόν, από την ίδια ίνα να περάσουν περισσότερα του ενός διαφορετικά σήματα διαφορετικής συχνότητας (λ) ή αλλιώς διαφορετικού χρώματος εφόσον μιλάμε για οπτικά σήματα, που το καθένα να αντιπροσωπεύει μία ροή δεδομένων. Έτσι το κάθε μήκος κύματος μεταφέρει ένα ποσοστό της συνολικής πληροφορίας. Με βάση το παραπάνω χαρακτηριστικό έγινε δυνατή η παράλληλη μετάδοση πληροφορίας και στις οπτικές ίνες, όπου κάθε μήκος κύματος μεταφέρει και κάποιο ποσοστό των δεδομένων. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση bits ή αλλιώς τη σειριακή μετάδοση χαρακτήρων.

Βέβαια, αρκετά στοιχεία πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός WDM συστήματος. Η χωρητικότητα αλλά και η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από τον αριθμό των καναλιών ή μηκών κύματος, το ρυθμό μετάδοσης του κάθε μήκους κύματος, την ισχύ που θα έχει κάθε κανάλι, την απόσταση που θα έχουν μεταξύ τους τα μήκη κύματος, τον τύπο της ίνας, των διαθέσιμων ενισχυτών του συστήματος και το φάσμα ενίσχυσής τους καθώς επίσης και από γραμμικά και μη γραμμικά φαινόμενα. Τα κυριότερα φαινόμενα που περιορίζουν μία WDM ζεύξη είναι, όσον αφορά τα μη γραμμικά φαινόμενα, η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (SRS : Stimulated Raman Scattering), η μίξη τεσσάρων φωτονίων (FWM : Four Wave Mixing), και η ετεροδιαμόρφωση φάσης (XPM : Cross Phase Modulation) λόγω του ότι συνταξιδεύουν πολλά κύματα μέσα στην ίδια ίνα. Τέλος το γραμμικό φαινόμενο της διασποράς περιορίζει και αυτό με τη σειρά του την απόδοση του συστήματος, με ιδιαίτερη επίδραση να έχουν η χρωματική διασπορά (Chromatic Dispersion) και η διασπορά τρόπων πόλωσης (PMD : Polarization Mode Dispersion). [21][22]



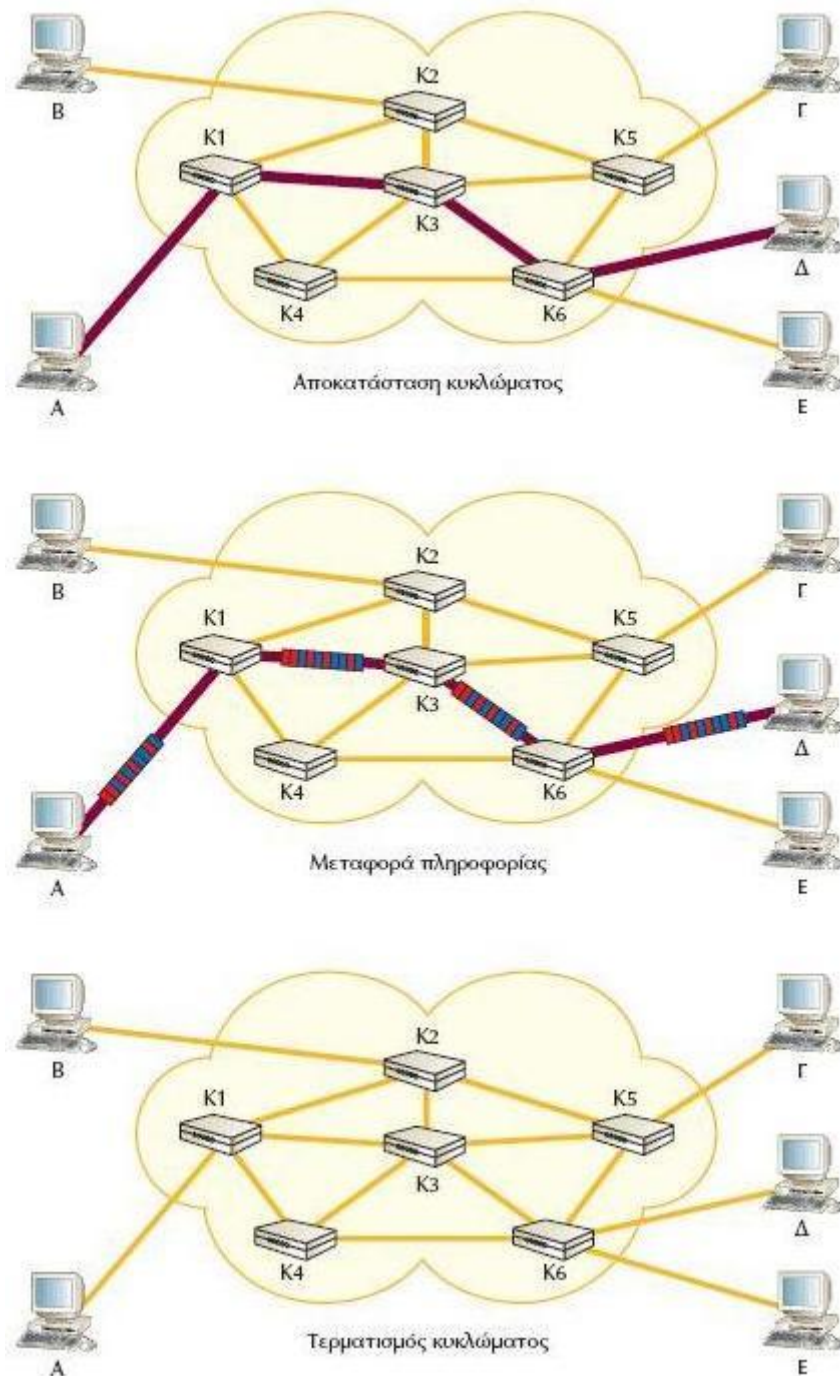
Εικ.01 Απεικόνιση συστήματος πολυπλεξίας μήκους κύματος. Τα διαφορετικά μήκη κύματος μεταφέρουν ένα μέρος της συνολικής πληροφορίας και όλα μαζί συνδιαδίδονται μέσα από την ίδια ίνα. Στο κάτω μέρος φαίνεται η φασματική ανάλυση στον πομπό για ένα μήκος κύματος, στην ίνα για το συνολικό πολυπλεγμένο σήμα και στον δέκτη για το λαμβανόμενο μήκος κύματος που είναι ίδιο με αυτό που εισήλθε. [1]

1.2.2 Μεταγωγή κυκλώματος

Είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε δίκτυα επικοινωνίας με σκοπό να προωθηθεί μια πληροφορία από ένα πομπό σε ένα δέκτη. Στην μεταγωγή κυκλώματος για να επικοινωνήσουν δυο σταθμοί αποκαθίσταται μια αποκλειστική φυσική σύνδεση μεταξύ τους που διατηρείται σταθερή σε όλη την διάρκεια της επικοινωνίας. Αποτελείται από μια σειρά συνδέσεων μεταξύ των κόμβων του δικτύου και ειδικότερα από τρεις φάσεις.

- **Αποκατάσταση κυκλώματος.** Ο σταθμός A θέλει να επικοινωνήσει με το σταθμό Δ. Για να γίνει αυτό, πρέπει πρώτα να δημιουργηθεί μια σύνδεση (κύκλωμα) από άκρη σε άκρη (από τον A στον Δ). Η σύνδεση υλοποιείται τμηματικά, από τον A στον κόμβο K1 , από τον κόμβο K1 στον κόμβο K3, από τον κόμβο K3 στον κόμβο K6 και από τον κόμβο K6 στον Δ. Αν διαπιστωθεί, ότι ο Δ δεν είναι απασχολημένος, αποκαθίσταται η σύνδεση.
- **Μεταφορά πληροφορίας.** Τώρα μπορεί να αρχίσει, μέσω του δικτύου, η μεταφορά της πληροφορίας από το σταθμό A στο σταθμό Δ. Αυτή μπορεί να είναι αναλογική ή ψηφιακή, ανάλογα με τη φύση του δικτύου. Βέβαια, καθώς οι τηλεπικοινωνιακοί φορείς, διεθνώς, αναπτύσσουν ολοκληρωμένα ψηφιακά δίκτυα, η χρήση ψηφιακής μετάδοσης, τόσο για τη φωνή όσο και για τα δεδομένα, έχει αρχίσει να κυριαρχεί. Η μετάδοση, που είναι συνήθως διπλής κατεύθυνσης (από τον A στο Δ και από το Δ στον A) γίνεται μέσω της γραμμής A-K1 , της εσωτερικής μεταγωγής στον K1 , της γραμμής K1-K3, της εσωτερικής μεταγωγής στον K3, της γραμμής K3-K6, της εσωτερικής μεταγωγής στον K6 και της γραμμής K6-Δ
- **Τερματισμός κυκλώματος.** Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα η μεταφορά των δεδομένων τελειώνει και η σύνδεση τερματίζεται. Οι κόμβοι μεταγωγής, που μετείχαν στη συγκεκριμένη σύνδεση, ενημερώνονται κατάλληλα, ώστε να ελευθερώσουν τους πόρους, που είχαν δεσμεύσει. Αυτοί οι πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν αργότερα για κάποια άλλη σύνδεση.

Η τεχνική της μεταγωγής κυκλώματος μπορεί να είναι αρκετά αναποτελεσματική. Η χωρητικότητα του τηλεπικοινωνιακού καναλιού, ένας αρκετά πολύτιμος πόρος ενός δικτύου, αφιερώνεται σε όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας των δύο σταθμών, ακόμη κι αν δεν μεταδίδεται πληροφορία. Παράδειγμα δικτύου που κάνει χρήση μεταγωγής κυκλώματος είναι το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο PSTN (Public Switched Telephone Network). [27]



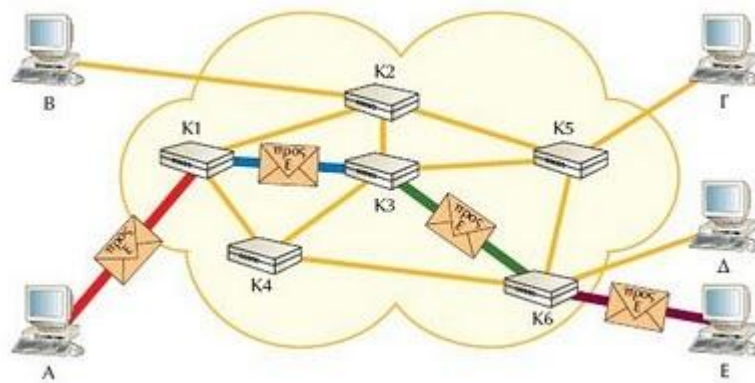
Εικ.02 Τα τρία στάδια της τεχνικής μεταγωγής κυκλώματος.[30]

1.2.3 Μεταγωγή πακέτου

Η μεταγωγή πακέτου είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε δίκτυα επικοινωνίας με σκοπό να προωθηθεί μια πληροφορία από ένα πομπό σε ένα δέκτη. Στη μεταγωγή πακέτου τα προς μετάδοση μηνύματα τεμαχίζονται σε πακέτα μικρού αριθμού bytes. Τυπικό μέγιστο μήκος πακέτου είναι τα 1000 bytes. Κάθε πακέτο περιέχει τμήμα της ωφέλιμης πληροφορίας του χρήστη και επιπλέον μια διεύθυνση προορισμού (destination address) κι ένα αριθμό σειράς (sequence number). Κάθε κόμβος του δικτύου, που λέγεται και κόμβος μεταγωγής πακέτου (Packet Switching

Node, PSN), χρησιμοποιεί τη διεύθυνση προορισμού του πακέτου, για να αποφασίσει σε ποιον κόμβο θα το προωθήσει. Οι αριθμοί σειράς των πακέτων χρησιμοποιούνται από το σταθμό προορισμού, για να επανακατασκευάσει το αρχικό μήνυμα από τα κομμάτια που, που έχει λάβει μέσα στα πακέτα.

Ας δούμε τη διαδικασία μεταγωγής πακέτου. Ο σταθμός A θέλει να στείλει ένα μήνυμα στον σταθμό B. Το μήνυμα τεμαχίζεται σε πακέτα και τα πακέτα στέλνονται ένα κάθε φορά από τον σταθμό A στον κόμβο μεταγωγής K1, με τον οποίο είναι συνδεδεμένος. Όταν ο κόμβος μεταγωγής λάβει ολόκληρο τα πακέτο, εξετάζει τη διεύθυνση προορισμού και το προωθεί σε έναν άλλο κόμβο μεταγωγής, έστω τον K2. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το πακέτο να φθάσει στον σταθμό προορισμού. Κάθε κόμβος αποφασίζει, πώς να προωθήσει το πακέτο, εξετάζοντας τη διεύθυνση προορισμού και τις πληροφορίες που έχει για την κίνηση στους κόμβους του δικτύου. Παρατηρήστε, ότι κάθε κόμβος προωθεί το πακέτο σε επόμενο κόμβο, μόνο αφού το λάβει ολόκληρο. Γι' αυτό, πιο συγκεκριμένα αυτή η τεχνική λέγεται και μεταγωγή πακέτων με αποθήκευση και προώθηση (store and forward). Παράδειγμα δικτύου που κάνει χρήση μεταγωγής πακέτου είναι τα δίκτυα Ethernet.[27]



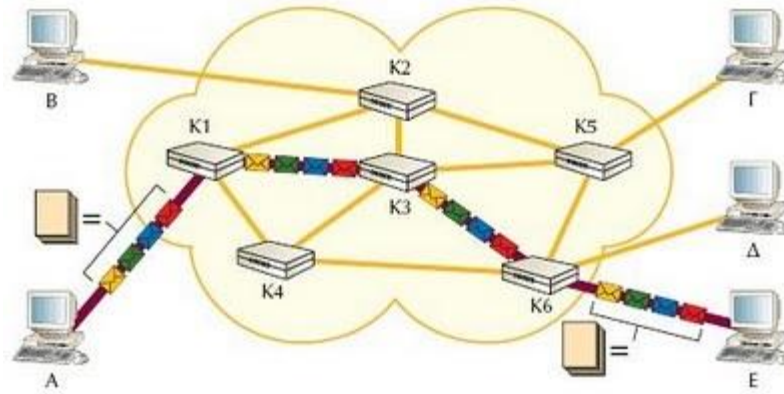
Εικ.03 Τεχνική μεταγωγής πακέτου. Η πληροφορία τεμαχίζεται σε πακέτα. Κάθε κόμβος του δικτύου, αφού λάβει ολόκληρο το πακέτο, το προωθεί στον επόμενο κόμβο, μέχρι να φθάσει στον προορισμό [30]

Υπάρχουν δύο παραλλαγές αυτής της τεχνικής:

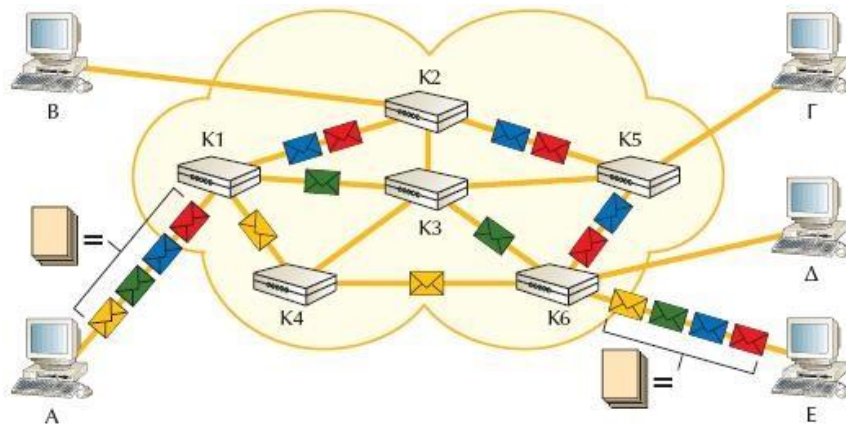
- Μεταγωγή νοητού κυκλώματος
- Μεταγωγή με αυτοδύναμα πακέτα

Στα νοητά κυκλώματα, καθορίζεται μία διαδρομή μεταξύ των ενδιαμέσων κόμβων του δικτύου, την οποία ακολουθούν όλα τα πακέτα για να φτάσουν στον προορισμό τους.

Στα αυτοδύναμα πακέτα, κάθε πακέτο ακολουθεί διαφορετική διαδρομή η οποία καθορίζεται δυναμικά στον εκάστοτε δρομολογητή (router) του κόμβου. Σε αυτήν την περίπτωση τα πακέτα μπορεί να φτάσουν με διαφορετική (λάθος) σειρά, πράγμα που σημαίνει ότι ο παραλήπτης θα πρέπει να φροντίσει να τα βάλει στη σωστή σειρά πριν να επεξεργαστεί την πληροφορία.[30]



Εικ.04 Δίκτυο μεταγωγής πακέτων που προωθεί πακέτα με τη μέθοδο νοητού κυκλώματος[30]



Εικ.05 Δίκτυο μεταγωγής πακέτων που προωθεί πακέτα με τη μέθοδο αυτοδύναμου πακέτου.[30]

1.2.4 Οπτικά δίκτυα 1^{ης} γενιάς

Στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης των οπτικών δικτύων η οπτική ίνα χρησιμοποιήθηκε απλά σαν μέσο μετάδοσης ενώ όλος ο υπόλοιπος εξοπλισμός ήταν ηλεκτρονικός. Η υιοθέτηση αυτής της αρχιτεκτονικής εκμεταλλεύεται την οπτική ίνα ως ένα ιδιαίτερα αξιόπιστο μέσο μετάδοσης για μεγάλες αποστάσεις αλλά λόγω του ότι χρησιμοποιεί οπτοηλεκτρονική μετατροπή (O/E/O conversion) για 3R αναγέννηση του σήματος (**R**eshape, **R**etime, **R**eamplify : Αναδιαμόρφωση, Επανασυγχρονισμός, Επανενίσχυση γίνεται αναφορά στην **παράγραφο 2.3.1**) σε ενδιάμεσες και σχετικά μικρές αποστάσεις αυξάνει δραματικά το κόστος. Έτσι λοιπόν προέκυψε η ανάγκη για επεξεργασία του σήματος σε αμιγώς οπτικό επίπεδο.

Η ανάπτυξη του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου (**Erbium Doped Fiber Amplifier**) έφερε επανάσταση στην μετάδοση με οπτικές ίνες. Με τη βοήθεια των ενισχυτών αυτών αυξάνεται η απόσταση επανενίσχυσης του σήματος ενώ η υιοθέτηση αυτής της προσέγγισης δεν απαιτεί αναδιαμόρφωση (**R**eshape) και επανασυγχρονισμό (**R**etime) των οπτικών παλμών αφού δεν εμπλέκεται ηλεκτρονικό τμήμα στην μετάδοση και άρα δεν έχουμε εισαγωγή στο σήμα επιδράσεων μη γραμμικής

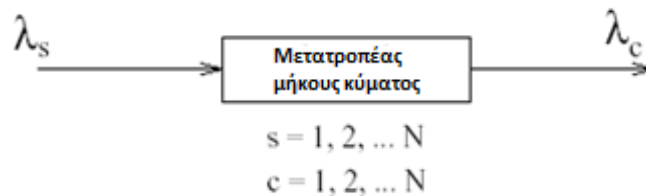
διάδοσης που επιφέρει η προηγούμενη προσέγγιση. Επιπλέον ειδικά σε WDM συστήματα ο διαχωρισμός στα επιμέρους μήκη κύματος είχε σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους σε συστήματα μεγάλης κλίμακας αφού οι EDFA συμπεριφέρονται σε όλα τα μήκη κύματος το ίδιο και είναι αποτέλεσμα του τεράστιου εύρους ζώνης που παρέχουν. Ωστόσο τα πρώτα συστήματα αυτά υλοποιούσαν τις λειτουργίες της μεταγωγής (switching) σε ηλεκτρονικό επίπεδο με αποτέλεσμα όλα τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα των παραπάνω πρώτης γενιάς οπτικών δικτύων είναι τα πρότυπα SDH (Synchronous Digital Hierarchy) και SONET (Synchronous Optical Network) που χρησιμοποιήθηκαν κατ'όρον και εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα.[21][22]

1.2.5 Οπτικά δίκτυα 2^{ης} γενιάς - WDM και μεταγωγή κυκλώματος

Η ανάγκη για μετάδοση πληροφορίας σε περισσότερους χρήστες με το μικρότερο κόστος οδήγησε στην εξέλιξη των δικτύων οπτικών ινών 1^{ης} γενιάς που αφορούσαν συνδέσεις σημείο προς σημείο και χρήση ηλεκτρονικής επεξεργασίας, σε αυτά της 2^{ης} γενιάς. Τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς συνίστανται στην συνδυασμένη χρήση της τεχνικής μεταγωγής κυκλώματος και πολυπλεξίας παρέχοντας τη δυνατότητα για ευρυζωνικές συνδέσεις υψηλής ταχύτητας δεδομένων και μεγάλης χρονικής διάρκειας, καθώς και τη δυνατότητα για αποδοτική διαχείριση ενός τεράστιου όγκου δεδομένων απευθείας στο οπτικό επίπεδο. Η επιπλέον ταχύτητα που προσφέρει η αμιγώς οπτική λογική (all-optical) σε συνδυασμό με τεχνικές πολυπλεξίας όπως οι WDM (Wavelength Division Multiplexing) και OTDM (Optical Time Division Multiplexing) μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για εύρος ζώνης. Τα παραπάνω δίκτυα έχουν υιοθετήσει την τεχνική πολυπλεξίας WDM ενώ η τεχνική OTDM δεν είναι τόσο διαδεδομένη καθώς απαιτεί τη 3R αναγέννηση του σήματος.

Την υιοθέτηση των οπτικών δικτύων ως δικτύων κορμού για μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις ακολούθησε η μεταφορά κάποιων λειτουργιών από το ηλεκτρονικό τμήμα στο οπτικό τμήμα του δικτύου όπως για παράδειγμα η μεταγωγή (switching) / δρομολόγηση (routing) ή τουλάχιστον κάποιες λειτουργίες τους. Οι αυξημένες λειτουργικές δυνατότητες των δικτύων αυτών, οφείλονται στη χρήση των οπτικών πολυπλεξιών προσθήκης/αφαίρεσης δεδομένων (OADMs) και των οπτικών στοιχείων διασύνδεσης (OXCs). Τα στοιχεία αυτά τοποθετούνται σε ενδιάμεσα σημεία της ζεύξης και ο βασικός τους ρόλος είναι η δρομολόγηση των εισερχόμενων WDM καναλιών. Οι OADMs επιλεκτικά «αφαιρούν» ορισμένα κανάλια από τη ζεύξη και επιτρέπουν τη διέλευση των υπολοίπων καναλιών, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να «προσθέτουν» νέα κανάλια στη ζεύξη στη θέση αυτών που «αφαιρέθηκαν». Ανάλογη λειτουργία επιτελούν και οι OXCs, αλλά με πολύ μεγαλύτερο αριθμό καναλιών. Επίσης απαραίτητη είναι και η χρήση οπτικών ενισχυτών ινών ερβίου για την περιοδική ενίσχυση των σημάτων.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση τα WDM οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρέχουν συνδέσεις μήκους κύματος μεταξύ των τερματικών, και για το λόγο αυτό αποκαλούνται και δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength-routed networks). Κατά συνέπεια, οι συνδέσεις μεταξύ των τερματικών γραμμής είναι υψηλής χωρητικότητας και παρέχονται σε σταθερή βάση. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό αυτής της αρχιτεκτονικής είναι και το θέμα της παρούσας εργασίας, η τεχνική **μετατροπής μήκους κύματος (wavelength conversion)**: Η διαδικασία αυτή συνίσταται στην αντιγραφή των δεδομένων ενός μήκους κύματος, έστω λ_1 , σε ένα νέο, έστω λ_2 , και τη μετάδοση του νέου μήκους κύματος μέσα από το δίκτυο. Η μετατροπή μήκους κύματος επιτρέπει την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων μηκών κύματος στο δίκτυο. Τα βασικότερα οπτικά στοιχεία, που χρησιμοποιούνται ως μετατροπείς μήκους κύματος, είναι οι οπτικοί ημιαγωγίμοι ενισχυτές (SOAs) και οι οπτικές συμβολομετρικές πύλες.



Εικ.06 Γραφική απεικόνιση βασικής ιδέας μετατροπής μήκους κύματος. Το εισερχόμενο σήμα με κύμα λ_s εξέρχεται αφού υποστεί μετατροπή σε άλλο μήκος κύματος λ_c .

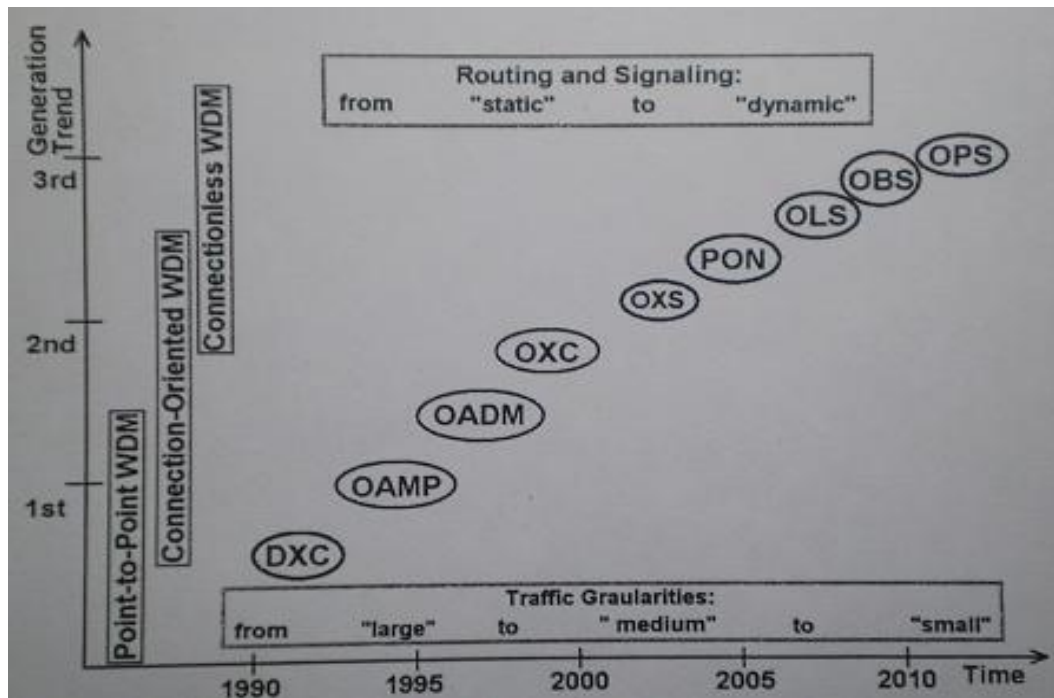
Παρ' όλα αυτά, τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς δεν παρέχουν τη δυνατότητα για χειρισμό δεδομένων μικρού μεγέθους (granularity), αφού επιτελούν μεταγωγή κυκλώματος. Ταυτόχρονα, η επεξεργασία στη μεταδιδόμενη πληροφορία περιορίζεται, σε επίπεδο μήκους κύματος και ο χρόνος μεταγωγής της πληροφορίας (switching period) είναι της τάξης δεκάδων λεπτών. Αποτέλεσμα είναι η δέσμευση ενός τεράστιου εύρους ζώνης σε μία σύνδεση, και αυτή να διατηρείται στατική για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την εδραίωση της σύνδεσης, ακόμα και αν αυτή είναι ανενεργή. Κατά συνέπεια, τα δίκτυα αυτά δεν είναι σε θέση να παρέχουν εύρος ζώνης κατ' απαίτηση και είναι πλήρως αδύνατη η εξυπηρέτηση εκρηκτικών ροών δεδομένων.

Τα μειονεκτήματα αυτά καθιστούν απαγορευτική τη χρήση των οπτικών συστημάτων δεύτερης γενιάς σε δίκτυα, στα οποία απαιτείται άμεσα η παροχή πολλαπλών υπηρεσιών τόσο συνεχούς, όσο και εκρηκτικής ροής δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Τέτοια δίκτυα είναι, για παράδειγμα, τα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs). Επομένως, αν και οι επιδόσεις των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς είναι αρκετά ικανοποιητικές για τα δίκτυα ευρείας περιοχής, δεν επαρκούν για την αποδοτική διασύνδεση σε δίκτυα μεγαλύτερης εκρηκτικότητας και αμεσότερης πρόσβασης. Για την εξυπηρέτηση αυτών των δικτύων και τη βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, οι ελπίδες έχουν εναποτεθεί στα μελλοντικά οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς. [21][22]

1.2.6 Τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα 3^{ης} γενιάς

Ο βασικός στόχος των μελλοντικών οπτικών δικτύων είναι η αποδοτική εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, υπό την έννοια της παροχής συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας μόνο κατά το χρονικό διάστημα, για το οποίο οι συνδέσεις αυτές είναι ενεργές. Για την επίτευξη της παροχής μεγάλου εύρους ζώνης κατ' απαίτηση πρέπει να υιοθετηθεί η τεχνική μεταγωγής πακέτου, αλλά αντικαθιστώντας τα ηλεκτρονικά κυκλώματα με οπτικά, ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Τα οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς, ταυτίζονται δηλαδή με τα αμιγώς οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου (optical packet switching – OPS).

Στα αμιγώς οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων η πληροφορία αποστέλλεται με τη μορφή οπτικών πακέτων δεδομένων και όχι με τη μορφή μεγάλου μεγέθους συνεχών ροών δεδομένων. Σε αυτήν την περίπτωση το κάθε πακέτο δεδομένων αποτελείται από το πεδίο της επικεφαλίδας (header), το οποίου το περιεχόμενο καθορίζει τον προορισμό του πακέτου μέσα στο δίκτυο, από το πεδίο του φορτίου (payload), το περιεχόμενο του οποίου είναι τα χρήσιμα δεδομένα προς μετάδοση, και από την προστατευτική ζώνη (guardband), η οποία περιέχει τον απαραίτητο αριθμό βοηθητικών bits για την υποστήριξη των διαφόρων λειτουργικών διαδικασιών του δικτύου. Τα βασικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν ένα οπτικό δίκτυο μεταγωγής πακέτων είναι ότι η μεταγωγή και η δρομολόγηση των δεδομένων επιτελούνται απευθείας στο οπτικό επίπεδο χωρίς την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό και αντίστροφα. Η αμιγώς οπτική μεταγωγή εγγυάται επεξεργασία των δεδομένων σε μεγαλύτερες ταχύτητες, οπότε και μεγαλύτερο συνολικό ρυθμό διέλευσης δεδομένων, καθώς και μικρότερη κατανάλωση ισχύος. Επίσης, η μεταγωγή γίνεται σε επίπεδο μεμονωμένου πακέτου και κάθε πακέτο επεξεργάζεται ως ξεχωριστή οντότητα. Τελικά παρά το γεγονός ότι τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς δεν είναι ακόμη ευρέως διαδεδομένα και παρουσιάζουν προβλήματα στο τρόπο δρομολόγησης των πακέτων φαίνεται πως αποτελούν το μέλλον στις επικοινωνίες γιατί με την μεταγωγή πακέτου φαίνεται να γεφυρώνεται το χάσμα ανάμεσα στα ηλεκτρικά και οπτικά δίκτυα καθώς είναι δυνατή η χρήση τους σε ένα ενιαίο δίκτυο ταυτόχρονα.[21][22]



Εικ.07 Η εξέλιξη των οπτικών τεχνολογιών και δικτύων. Στον κάθετο άξονα απεικονίζονται οι τρεις γενιές δικτύων ενώ στον οριζόντιο ο χρόνος. Στα αριστερά βλέπουμε την εξέλιξη των δικτύων πολυπλεξίας μήκους κύματος. Στο πάνω μέρος της εικόνας βλέπουμε ότι με τον χρόνο υπήρξε εξέλιξη στη δρομολόγηση και σηματοδότηση από στατική σε δυναμική. Στο κάτω μέρος της βλέπουμε ότι οι οντότητες της κίνησης του δικτύου ολοένα και μικραίνουν. Τέλος στα οβάλ σχήματα παρατηρούμε την εξέλιξη και τις κυρίαρχες τεχνολογίες και πως αυτές εξελίσσονται ακόμα. Παρατηρούμε ότι στην τρίτη γενιά συναντάμε την τεχνολογία OPS (optical packet switching) ή οπτική μεταγωγή πακέτου. [9]

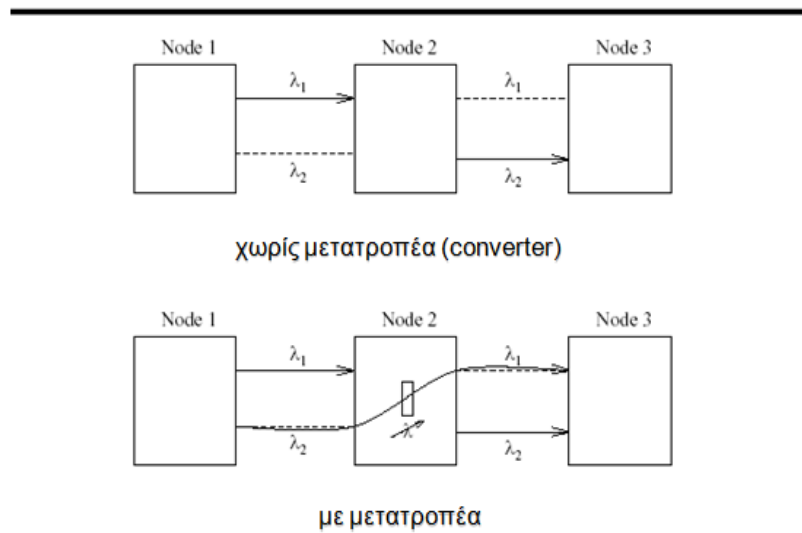
2.1 Μετατροπή μήκους κύματος : χρησιμότητα

Ένας μετατροπέας μήκους κύματος είναι μια διάταξη η οποία μετατρέπει τα δεδομένα ενός εισερχόμενου σήματος σε μήκος κύματος λ_1 σε ένα εξερχόμενο σήμα διαφορετικού μήκους κύματος λ_2 . Ένας λόγος που χρειάζεται να γίνει το παραπάνω είναι ότι μπορεί τα εισερχόμενα δεδομένα σε ένα δίκτυο να είναι σε διαφορετικό μήκος κύματος, μη συμβατό με αυτό του δικτύου. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι η σύνδεση των δικτύων 1^{ης} γενιάς (με λ στην περιοχή των 1310nm περιοχή μηδενικής διασποράς) με δίκτυα 2^{ης} γενιάς (με λ στην περιοχή των 1550nm περιοχή ενίσχυσης ενισχυτών ερβίου). Γενικά στα όρια ενός δικτύου θα πρέπει να είναι δυνατή η μετατροπή μήκους κύματος ώστε να μπορεί να προσαρμόζει τα σήματα εκτός δικτύου σε κατάλληλο μήκος κύματος για τη χρήση εντός δικτύου και αντίστροφα.

Ένας άλλος λόγος είναι ότι σε ένα δίκτυο δρομολόγησης μηκών κύματος, όπως τα δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος WDM, έχουμε διάφορες οπτικές διαδρομές. Έτσι η δρομολόγηση των πακέτων γίνεται πρόβλημα ανάθεσης μηκών κύματος καθώς δε θα πρέπει δύο ίδια μήκη κύματος από διαφορετικές ίνες να αναμειχθούν. Οδηγούμαστε, λοιπόν, στην ανάγκη μετατροπής του μήκους κύματος. Η τεχνική αυτή αυξάνει τις επιλογές δρομολόγησης για μία οπτική διαδρομή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερη πιθανότητα εμπλοκής (blocking probability)

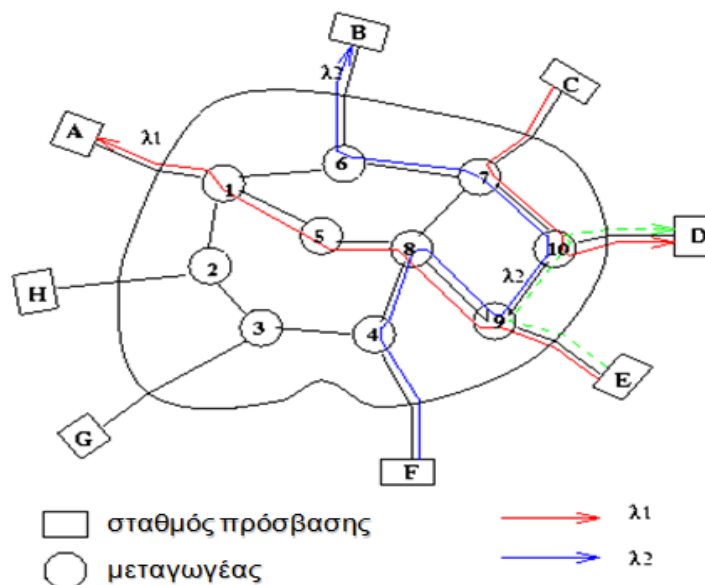
του δικτύου, δηλαδή υπάρχει μικρότερη πιθανότητα κάποια διαδρομή να θεωρηθεί ως κατειλημμένη. Επιπρόσθετα, η τεχνική προσφέρει εκμετάλλευση της χωρητικότητας του δικτύου, καλύτερη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων μηκών κύματος, μείωση της πολυπλοκότητας και του αριθμού των καναλιών και αποδοτικότερη δρομολόγηση.

Περιορισμός συνέχειας μηκών κύματος σε ένα δίκτυο δρομολόγησης μηκών κύματος



Εικ.08 Δρομολόγηση μηκών κύματος σε δίκτυα με ή χωρίς δυνατότητα μετατροπής μήκους κύματος[7]

Περιορισμός συνέχειας (continuity) μηκών κύματος



Εικ.09 Περιορισμός δικτύου λόγω απουσίας μετατροπέα μήκους κύματος. Με πράσινο χρώμα καταδεικνύεται η αδυναμία κυματοδήγησης σε μήκος κύματος λ_1 ή λ_2 στη ζεύξη E και D.[7]

Τέλος, στα οπτικά δίκτυα νέας γενιάς, η χρήση των μετατροπένων μήκους κύματος θα είναι επιβεβλημένη καθώς θα αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των φωτονικών δρομολογητών με αποτέλεσμα τη δημιουργία οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτων (OPS : Optical Packet Switching). Οι οπτικοί δρομολογητές θα είναι σε θέση να επιλύσουν τα σημαντικά προβλήματα των αντίστοιχων ηλεκτρονικών διατάξεων. Σήμερα, οι εμπορικά διαθέσιμες διατάξεις δρομολογητών έχουν διαστάσεις που ξεπερνούν τα 2 μέτρα, ζυγίζουν παραπάνω από 700 κιλά, καταναλώνουν 10 kW, ενώ η συνολική χωρητικότητα της κάθε κάρτας του δρομολογητή δεν ξεπερνά τα 40Gbps. Αντίθετα, οι οπτικοί δρομολογητές θα υποστηρίζουν εκρηκτικούς ρυθμούς μετάδοσης της τάξεως των Tb/s, θα καταναλώνουν μερικά Watt, θα είναι συμπαγείς και μικροί σε μέγεθος. Έτσι, με τις αμιγώς οπτικές διατάξεις, τα δίκτυα δεν θα περιορίζονται από τη χαμηλή ταχύτητα των ηλεκτρονικών και τα πακέτα δεν θα συσσωρεύονται στο buffer των κόμβων, καθώς δεν θα απαιτείται η οπτοηλεκτρονική μετατροπή των σημάτων.



Εικ.10 Δρομολογητής CRS1 της CISCO. Ζυγίζει 723kg, έχει ύψος 2,13m και καταναλώνει 10kW.

2.1.1 Μετατροπέας μήκους κύματος : λειτουργικότητα και χαρακτηριστικά

Ένας ιδανικός μετατροπέας μηκών κύματος κατέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Διαφάνεια στους ρυθμούς bit και στις διαμορφώσεις σημάτων
- Μεγάλο εύρος μηκών κύματος τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο
- Δυνατότητα για ίδια μήκη κύματος εισόδου και εξόδου (όχι μετατροπή) για πιθανή χρήση σε WDM διατάξεων διακοπών
- Αναισθησία στην πόλωση των σημάτων εισόδου
- Υψηλό λόγο 'απόσβεσης' και μεγάλο λόγο σήματος-προς-θόρυβο (ο λόγος 'απόσβεσης' ορίζεται ως ο λόγος της οπτικής ισχύος που εκπέμπεται για ένα bit '0' προς την οπτική ισχύ που εκπέμπεται για ένα bit '1')
- Απλή υλοποίηση
- Χαμηλός χρόνος απόκρισης του μετατροπέα, δηλαδή ταχύς χρόνος προετοιμασίας του μήκους κύματος εξόδου
- Χαμηλό κόστος

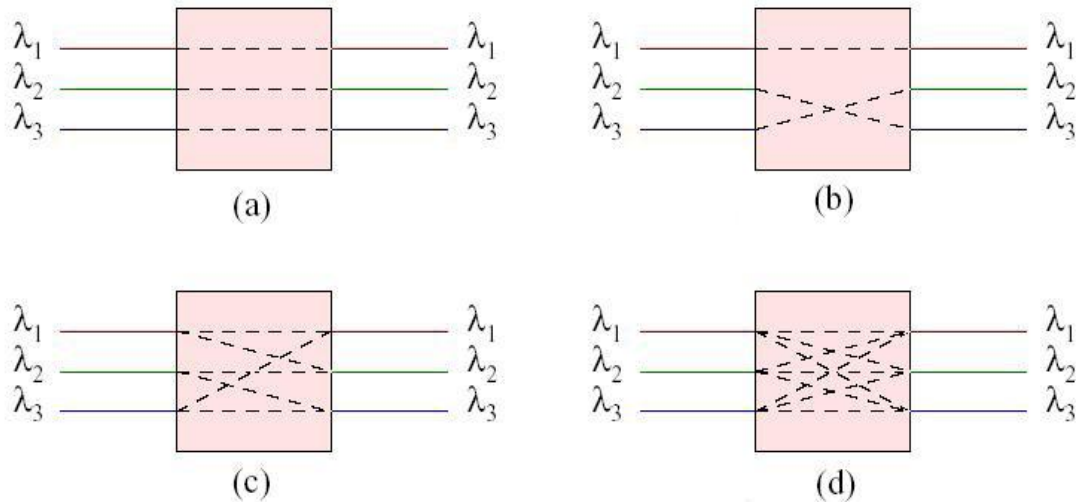
Από ότι καταλαβαίνουμε είναι δύσκολη η υλοποίηση ενός μετατροπέα που να συντάσσεται με όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά οπότε η υλοποίηση του εξαρτάται από την εφαρμογή.[5][7][18]

2.1.2 Είδη μετατροπής μήκους κύματος

1. Πλήρης μετατροπής μήκους κύματος (full wavelength conversion). Κάθε μήκος κύματος εισόδου μπορεί να μετατραπεί σε οποιοδήποτε μήκος κύματος εξόδου.
2. Η περιορισμένη μετατροπή μήκους κύματος (limited wavelength conversion) σημαίνει ότι κάθε μήκος κύματος εισόδου μπορεί να μετατραπεί σε ένα μόνο υποσύνολο των μηκών κύματος εξόδου.
3. Σταθερή μετατροπή μήκους κύματος (fixed wavelength conversion) αποτελεί υποπερίπτωση της περιορισμένης μετατροπής. Κάθε μήκος κύματος εισόδου μπορεί να μετατραπεί σε ακριβώς ένα άλλο μήκος κύματος.
4. Όταν δεν μπορεί να γίνει μετατροπή μήκους κύματος (no wavelength conversion) , το μήκος κύματος εισόδου όμως θα πρέπει να είναι το ίδιο με το μήκος κύματος εξόδου

Γενικά, όσο περισσότερα μήκη κύματος μπορούν να μετατραπούν, τόσο ο βαθμός πολυπλοκότητας αυξάνει. Ειδικότερα αν μιλάμε για καθαρά οπτική πλήρη μετατροπή είναι αρκετά πολύπλοκη αλλά και δαπανηρή. Παρ' όλα αυτά έρευνες έχουν δείξει ότι

το κέρδος από τη χρήση πλήρους μετατροπής σε σχέση με τη χρησιμοποίηση περιορισμένης μετατροπής δεν είναι τόσο μεγάλο. Έτσι, κάνοντας χρήση περιορισμένης μετατροπής μπορούμε να μειώσουμε το κόστος της εφαρμογής καθώς μειώνεται ο αριθμός των μετατροπών μήκους κύματος αλλά και των μεταγωγέων.[5][7][18]



Εικ.11 Είδη μετατροπής μήκους κύματος. (α)Καμία μετατροπή (β)Σταθερή μετατροπή (γ)Περιορισμένη μετατροπή (δ)Πλήρης μετατροπή[24]

2.2 Το βασικό συστατικό του μετατροπέα : Ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής (SOA)

Η επεξεργασία σημάτων και ειδικότερα η τεχνική της μετατροπής του μήκους κύματος με καθαρά οπτικά στοιχεία έχει λάβει σημαντική προσοχή τα τελευταία χρόνια χάρη στις πολλές εφαρμογές που προσφέρει. Γενικά η παραπάνω επεξεργασία βασίζεται σε μη γραμμικά φαινόμενα που εισάγουν τα στοιχεία της διάταξης όπου ένα από αυτά είναι ο ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής ή SOA. Ο ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής σε σχέση με άλλες τεχνικές, όπως μη γραμμικές ίνες, είναι ιδιαίτερα δημοφιλής ειδικά λόγω αυτών που παρέχει, όπως το μικρό μέγεθος, χαμηλή κατανάλωση ισχύος και οπτική ολοκλήρωση. Αρκετές ερευνητικές ομάδες έχουν υλοποιήσει και επιδείξει συστήματα μετατροπής μήκους κύματος βασισμένοι σε διάφορες τεχνικές. Μία από αυτές προϋποθέτει, όπως και στη περίπτωση μας, τη χρήση ενός SOA, ενός ζωνοπερατού φίλτρου και ενός συμβολόμετρου όπως MZI (Mach Zender Interferometer). Πριν επεκταθούμε όμως στην ανάλυση του παραπάνω μοντέλου θα ήταν σωστό να αναφερθούμε στη θεωρία του SOA.

2.2.1 SOA's σε σχέση με άλλους οπτικούς ενισχυτές

Οι ενισχυτές που υπάρχουν στην φωτονική τεχνολογία μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες στους ενισχυτές ίνας και ενισχυτές κυματοδηγού. Ο χαρακτηρισμός για το ποιος τύπος είναι καλύτερος εξαρτάται από την εφαρμογή

προς υλοποίηση.Οι ενισχυτές ίνας βασίζονται είτε σε ίνες οι οποίες περιέχουν προσμίξεις όπως έρβιο (EDFAs Erbium Doped Fiber Amplifiers) είτε βασίζονται σε εξαναγκασμένη σκέδαση Raman ή Brillouin.Επίσης υπάρχουν και άλλα δύο είδη οπτικών ενισχυτών που χρησιμοποιούν κυματοδηγούς για την ενίσχυση οπτικών σημάτων.Αυτοί είναι οι SOAs και οι EDWAs (Erbium Doped Waveguide Amplifiers) που έχουν παρόμοια αρχή λειτουργίας με τους EDFAs.

Τα πλεονεκτήματα των ενισχυτών ίνας είναι :

- Απλή σύζευξη ίνας με χαμηλές απώλειες
- Αμελητέες ανακλάσεις στις διεπαφές μεταξύ των ινών
- Πολωτική αναισθησία
- Υψηλό κέρδος και υψηλή ισχύ εξόδου
- Πολύ αργές δυναμικές διαδικασίες κατά τη μεταβολή του κέρδους. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς σε γραμμική ενίσχυση πολλών καναλιών δεν υπάρχει διακαναλική παρεμβολή μεταξύ τους
- Χαμηλή εικόνα θορύβου

Τα μειονεκτήματα των παραπάνω ενισχυτών είναι ότι απαιτούν οπτικές πηγές άντλησης και επίσης δεν μπορούν να ενισχύσουν όλα τα μήκη κύματος.

Τα πλεονεκτήματα των SOAs είναι :

- + Προσαρμοστικότητα και ικανότητα μονολιθικής ή υβριδικής ολοκλήρωσης με άλλα οπτικά στοιχεία όπως συζεύκτες για τη δημιουργία πολύπλοκων κυκλωμάτων
- + Μικρό μέγεθος
- + Χρειάζονται εξωτερική πηγή ρεύματος για την άντληση των φορέων
- + Έχουν μεγάλο εύρος οπτικού εύρους ζώνης που μπορεί να ξεπεράσει τα 100nm σε σχέση με τα ~40nm των ενισχυτών ίνας
- + Επιτρέπουν πολύ μεγάλη ευελιξία στην επιλογή του μήκους κύματος για το οποίο ο ενισχυτής παρουσιάζει το μέγιστο κέρδος
- + Στη μη γραμμική περιοχή μπορούν να επιτελέσουν αμιγώς οπτική επεξεργασία του σήματος λόγω των πολύ ισχυρών μη γραμμικοτήτων και των πολύ γρήγορων δυναμικών φαινομένων των φορέων στα ημιαγώγιμα υλικά.
- + Πολύ χαμηλό κόστος

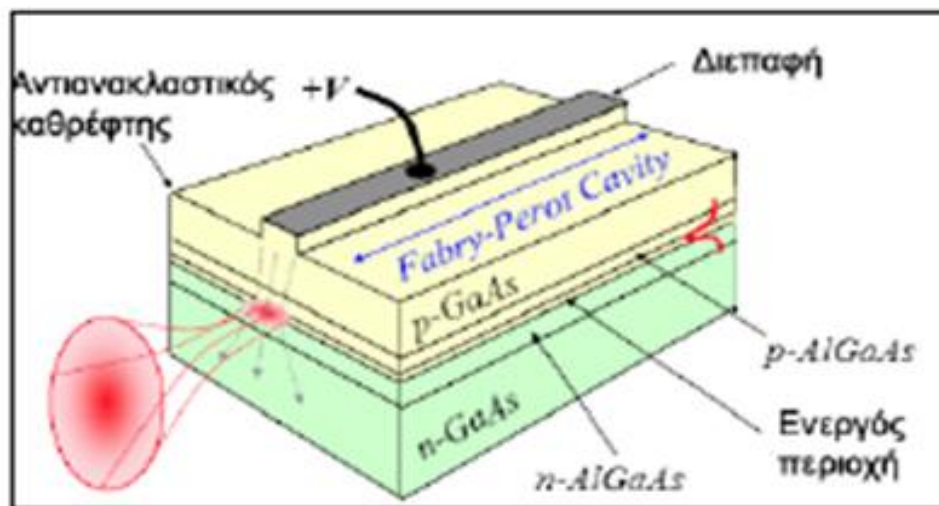
Τα μειονεκτητά τους είναι όλα αυτά που αναφέρονται ως πλεονεκτήματα στους ενισχυτές ίνας.Πρέπει,επίσης, να σημειωθεί ότι το κόστος ενός packaged SOA

δηλαδή SOA που του έχουν προσαρμοστεί ίνες είναι αρκετά υψηλό λόγω του εξειδικευμένου προσωπικού και εξοπλισμού που απαιτείται. [16]

2.2.2 Δομή του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή

Οι SOA έχουν γενικά παρόμοια δομή με ένα ημιαγωγικό laser. Αποτελούνται από μια διπλή ετεροένωση ενός p- και n- στρώματος εκατέρωθεν της ενεργούς περιοχής. Η επιλογή ετεροδομής για την κατασκευή τους είναι απαραίτητη και επιλέγεται έτσι ώστε να διατηρείται το πάχος της ενεργούς περιοχής αρκετά μικρό, και παράλληλα να γίνεται η επανένωση των φορέων μέσα στην ενεργό περιοχή, αποφεύγοντας την διάχυσή τους εκτός αυτής. Για το σκοπό αυτό το υλικό της ενεργού περιοχής επιλέγεται ώστε να έχει λίγο μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από τα υλικά των γύρω υποστρωμάτων. Έτσι η κυματοδότηση του σήματος προς ενίσχυση αλλά και η επανένωση των φορέων του ενισχυτή γίνονται μέσα στα όρια της ενεργού περιοχής.

Το ενεργειακό διάκενο και κατεπέκταση το μήκος κύματος του διακένου του ημιαγωγού καθορίζεται από τη χημική του σύσταση. Γενικά χρησιμοποιούνται τετραεδρικά μίγματα δύο στοιχείων της ομάδας III και δύο της ομάδας V του περιοδικού πίνακα με τη δομή να είναι $(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{As}_{1-y}\text{P}_y)$. Με την παραπάνω δομή το ενεργειακό διάκενο μεταβάλλεται μεταξύ 0,36eV (InAs) και 2,26eV (GaP) που αν το μεταφράσουμε σε μήκη κύματος, καθίσταται δυνατή η οπτική ενίσχυση μηκών κύματος μεταξύ των 950nm και 1800nm καλύπτοντας έτσι όλο το φάσμα εκπομπής τηλεπικοινωνιακού ενδιαφέροντος. [16][20]



Εικ.12 Η δομή του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή. Φαίνεται η ενεργός περιοχή του μεταξύ της διπλής ετεροένωσης ενός p- και n- στρώματος, το σημείο από όπου εισέρχεται και κυματοδηγείται στη συνέχεια το φως και η επιφάνεια η οποία τροφοδοτεί τον ενισχυτή. [20]

2.2.3 Αρχή λειτουργίας και βασικά χαρακτηριστικά

Η αρχή λειτουργίας ενός SOA βασίζεται στη θεωρία επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, θερμικές, ηλεκτρικές ή οπτικές διεγέρσεις των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας συντελούν στη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων και οπών στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Το κάθε ζεύγος ηλεκτρονίου και οπής ονομάζεται φορέας και η διαδικασία αυτή καλείται αναστροφή πληθυσμού. Η αντίστροφη διαδικασία της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών μπορεί να είναι μη ακτινοβολούσα ή ακτινοβολούσα. Η ακτινοβολούσα επανασύνδεση συνίσταται στην αυθόρμητη αποδιέγερση των ηλεκτρονίων ή στην εξαναγκασμένη αποδιέγερση των φορέων λόγω εισερχόμενου φωτονίου. Η πρώτη διαδικασία προκαλεί την αυθόρμητη εκπομπή φωτός, ενώ η δεύτερη προκαλεί την εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός. Η εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός παράγει φωτόνια, τα οποία έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα εισερχόμενα φωτόνια, και είναι η διαδικασία, που αξιοποιείται για τη λειτουργία του SOA ως ενισχυτή.

Το εισερχόμενο οπτικό σήμα ενισχύεται όταν ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής υπερτερεί του ρυθμού απορρόφησης. Για να γίνει αυτό γίνεται έγχυση ηλεκτρικού ρεύματος στην ενεργό περιοχή πράγμα όμως που είναι αντίθετο με την αυθόρμητα και την εξαναγκασμένη εκπομπή αφού μειώνεται η συγκέντρωση των φορέων στη ζώνη αγωγιμότητας (πυκνότητα φορέων N). Η σύνδεση των παραπάνω διαδικασιών περιγράφεται από την εξίσωση ροής, η οποία εκφράζει τη μεταβολή της πυκνότητας των φορέων στο χωρικό σημείο z , κατά μήκος του διαμήκους άξονα του ενισχυτή και κατά τη χρονική στιγμή t :

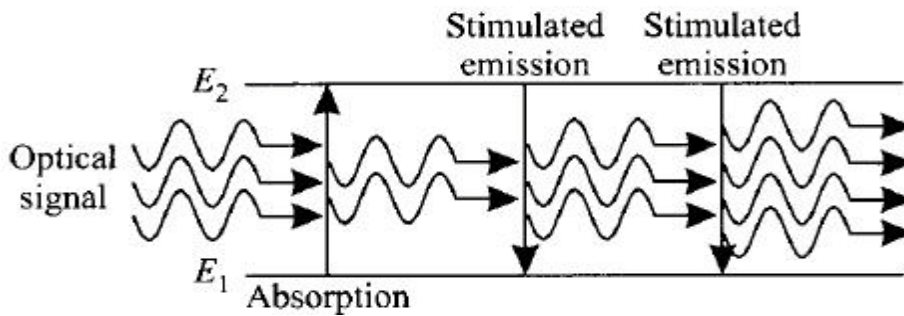
$$\frac{dN(z, t)}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N(z, t)}{\tau_c} - \frac{\Gamma \cdot g \cdot [N(z, t) - N_T] \cdot P(z, t)}{A\hbar\omega_0} \quad (1.1)$$

όπου:

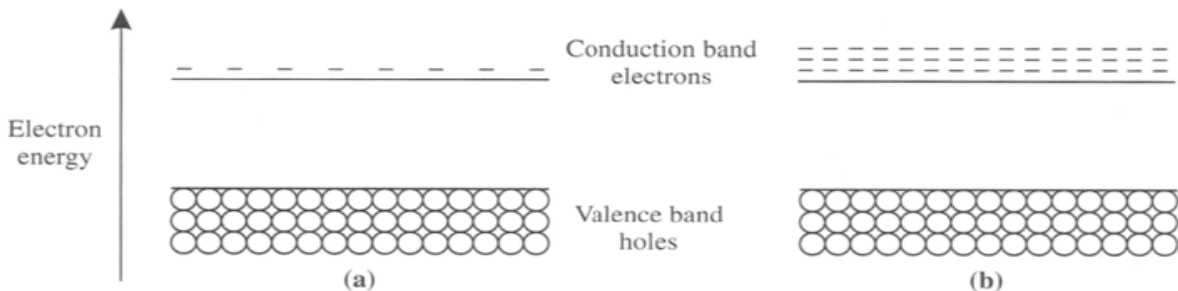
- I το ρεύμα έγχυσης
- e το φορτίο του ηλεκτρονίου
- V ο όγκος της ενεργούς περιοχής
- τ_c ο χρόνος ζωής των φορέων
- Γ ο οπτικός παράγοντας σύμπτυξης οπτικής
- g ο παράγοντας κέρδους
- N_T η πυκνότητα των φορέων στην περιοχή διαφάνειας του ενισχυτή
- A το εμβαδό διατομής της ενεργούς περιοχής του ημιαγωγού

- \hbar η σταθερά Planck
- ω_0 η φέρουσα συχνότητα του εισερχόμενου οπτικού πεδίου
- $P(z,t)$ η ισχύς του εισερχόμενου οπτικού σήματος

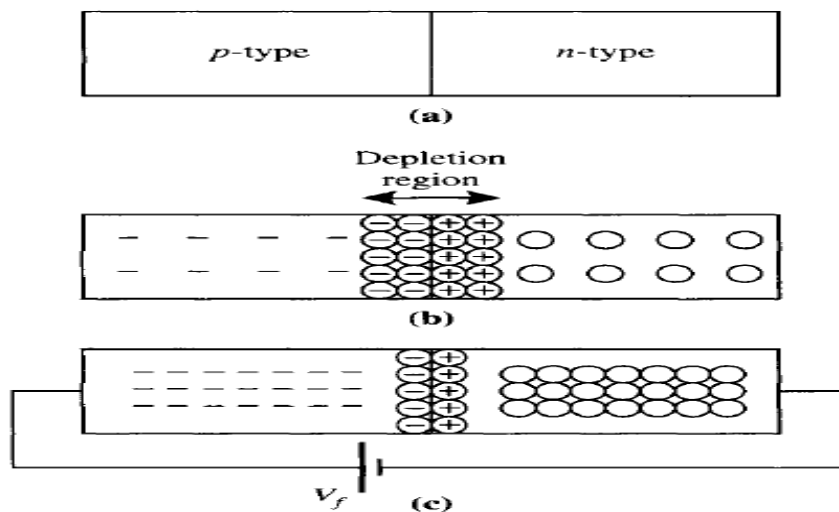
Ο πρώτος όρος του δεξιού σκέλους της σχέσης, I/eV , αποδίδει τη διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος, ενώ ο δεύτερος και τρίτος όρος αποδίδουν την αποδιέγερση και, επομένως, τη μείωση των φορέων λόγω της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης επανασύνδεσης, αντίστοιχα. [1][2][19][23]



Εικ.13 Απορρόφηση και εξαναγκασμένη εκπομπή σε ένα άτομο με δύο ενεργειακές στάθμες. [20]



Εικ.14 Ενεργειακές στάθμες σε ημιαγώγιμη p διάταξη και συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε α) θερμική ισορροπία και β) αντιστροφή πληθυσμού. [7]



Εικ.15 (α) Διάταξη p-n (β) Συγκέντρωση φορέων χωρίς εφαρμογή τάσης έγχυσης (γ) Συγκέντρωση φορέων με εφαρμογή τάσης έγχυσης V_f [7]

2.2.3.1 Ενίσχυση οπτικού σήματος και κέρδος του ενισχυτή

Η διάδοση ενός οπτικού σήματος κατά τη διεύθυνση του z-άξονα (διαμήκης άξονας) του ημιαγωγού περιγράφεται από τη σχέση:

$$\frac{dP(z,t)}{dz} = [\Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T] - a_s] \cdot P(z,t) \quad (1.2)$$

Η σταθερά a_s εκφράζει τις εσωτερικές απώλειες ισχύος του ενισχυτή λόγω σκέδασης του κυματοδηγούμενου πεδίου.

Οι εξισώσεις (1.1) και (1.2) αποτελούν τις δύο κλασικές εξισώσεις ροής του ενισχυτή. Στις δύο εξισώσεις ροής αγνοούνται τα ενδοζωνικά φαινόμενα (intraband effects) των φορέων, όπως δημιουργία φασματικής οπής (spectral hole burning), θέρμανση φορέων (carrier heating) και απορρόφηση ελεύθερων φορέων - απορρόφηση δύο φωτονίων (free carrier absorption – two photon absorption). Αυτά τα ενδοζωνικά φαινόμενα έχουν πολύ μικρούς χαρακτηριστικούς χρόνους απόκρισης, που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες fsec. Αποτέλεσμα των μικρών χρονικών σταθερών απόκρισης αυτών των φαινομένων στην περίπτωση των οπτικών σημάτων διάρκειας μερικών psec είναι τα ενδοζωνικά φαινόμενα να επέρχονται σε σταθερή κατάσταση και να μην επηρεάζουν την απόκριση του ενισχυτή.

Το κέρδος ενίσχυσης ενός SOA, θεωρώντας την περίπτωση ενίσχυσης οπτικού σήματος συνεχούς (CW) κύματος, ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου από τον ενισχυτή προς την ισχύ εισόδου σε αυτόν :

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P(L)}{P(0)} \quad (1.3)$$

όπου:

- $P(0) = P_{in}$ η ισχύς εισόδου
- $P(L) = P_{out}$ η ισχύς εξόδου
- L το μήκος του κυματοδηγού.

Όμως ο SOA έχει διαφορετικές περιοχές λειτουργίας άρα ο υπολογισμός του κέρδους θα πρέπει να γίνει για κάθε περιοχή ξεχωριστά. Έτσι, για τον αναλυτικό υπολογισμό του κέρδους του ημιαγωγού θα πρέπει να εξετάσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας του SOA. Θα αναφερθούμε λοιπόν, στην ακόρεστη (unsaturated) και στην κορεσμένη (saturated) περιοχή, όπου έχουμε αντίστοιχα το κέρδος ασθενούς σήματος (small signal gain) και το κορεσμένο κέρδος (saturated gain) του ενισχυτή. [1][2][19][23]

2.2.3.2 Κέρδος ασθενούς σήματος (ακόρεστη περιοχή λειτουργίας)

Το κέρδος ασθενούς σήματος του ενισχυτή είναι το κέρδος, που αποδίδει ο SOA, όταν το εισερχόμενο οπτικό σήμα έχει πολύ μικρή οπτική ισχύ. Στην περίπτωση αυτή, η πυκνότητα φορέων $N(z,t)$ καθίσταται ανεξάρτητη από τη χωρική μεταβλητή z , αφού η μικρή ισχύς του οπτικού σήματος εισόδου θεωρούμε ότι δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του ενισχυτή. Θέτοντας στη σχέση (1.1) $P(z,t) \cong 0$, η πυκνότητα φορέων στη μόνιμη κατάσταση βρίσκεται ότι είναι ίση με $N_{ss} = \frac{I \cdot \tau_c}{eV}$.

Ορίζουμε το **κέρδος ασθενούς σήματος** ως :

$$G_0 = \frac{P(L,t)}{P(0,t)} = \exp[\Gamma \cdot g \cdot [N_{ss} - N_T] \cdot L - a_s \cdot L] \quad (1.4)$$

Επιπλέον, ορίζουμε το συνολικό αριθμό φορέων ανά διατομή, που είναι διαθέσιμοι προς ενίσχυση ως :

$$N_{tot}(t) = \int_{z=0}^{z=L} [N(z,t) - N_T] \cdot dz \quad (1.5)$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης (1.2) και αντικαθιστώντας το συνολικό αριθμό φορέων από την σχέση (1.5), προκύπτει ότι το **κέρδος του ενισχυτή** σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση

$$G(t) = \exp[\Gamma \cdot g \cdot N_{tot}(t) - a_s \cdot L] \quad (1.6)$$

[1][2][19][23]

2.2.3.3 Κέρδος κορεσμού ενισχυτή(κορεσμένη περιοχή λειτουργίας)

Θεωρούμε ότι ο ενισχυτής δέχεται ως είσοδο στενό οπτικό παλμό μη μηδενικής ισχύος, ενώ λειτουργεί στην περιοχή ασθενούς σήματος. Σε αυτήν την περίπτωση το κυρίαρχο φαινόμενο, για όση χρονική διάρκεια διαδίδεται ο παλμός μέσα από τον ενισχυτή, είναι η αποδιέγερση των φορέων λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής, δεδομένου ότι στο μικρό αυτό χρονικό διάστημα, που χρειάζεται για να διαδοθεί ο παλμός μέσα από το SOA, η διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος και η αυθόρμητη εκπομπή φορέων συμβάλλουν σε πολύ μικρό βαθμό στη μεταβολή της πυκνότητας φορέων. Κατά συνέπεια, αγνοούμε τους δύο πρώτους όρους του δεξιού σκέλους της σχέσης (1.1) και ολοκληρώνοντας της λαμβάνουμε :

$$\frac{d}{dt} N_{tot}(t) = -\frac{1}{h\omega_0 A} \int_{z=0}^{z=L} P(z,t) \cdot \Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T] \cdot dz$$

$$\stackrel{(2)}{\Rightarrow} \frac{d}{dt} N_{tot}(t) = -\frac{1}{h\omega_0 A} \int_{z=0}^{z=L} \frac{\partial P(z,t)}{\partial z} dz = -\frac{1}{h\omega_0 A} [P(L,t) - P(0,t)]$$

Από την σχέση (1.3) όμως έχουμε

$$G(t) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \Rightarrow P(L,t) = G(t) \cdot P(0,t)$$

Επομένως :

$$\frac{d}{dt} N_{tot}(t) = -\frac{1}{h\omega_0 A} P(0,t) [G(t) - 1] \stackrel{\Gamma \cdot g}{\Rightarrow}$$

$$\frac{\Gamma \cdot g}{G(t) - 1} \frac{d}{dt} N_{tot}(t) = -\frac{\Gamma \cdot g}{h\omega_0 A} P(0,t) \quad (1.7)$$

Παραγωγίζοντας την σχέση (1.6) βρίσκουμε ότι

$$\frac{dG(t)}{dt} = \Gamma \cdot g \cdot \frac{dN_{tot}(t)}{dt} \cdot G(t) \Rightarrow$$

$$\frac{\Gamma \cdot g}{G(t) - 1} \frac{dN_{tot}(t)}{dt} = \frac{1}{G(t) - 1} \frac{dG(t)}{dt} \frac{1}{G(t)}$$

Με αντικατάσταση της παραπάνω σχέσης στη σχέση (1.7) και λύνοντας ως προς $G(t)$, βρίσκουμε ότι το **κέρδος κορεσμού του SOA από βραχύ οπτικό παλμό** προκύπτει από την έκφραση :

$$G(t) = \left[1 - \left(1 - \frac{1}{G_0} \right) \cdot \exp\left(-\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}} \right) \right]^{-1} \quad (1.8)$$

όπου:

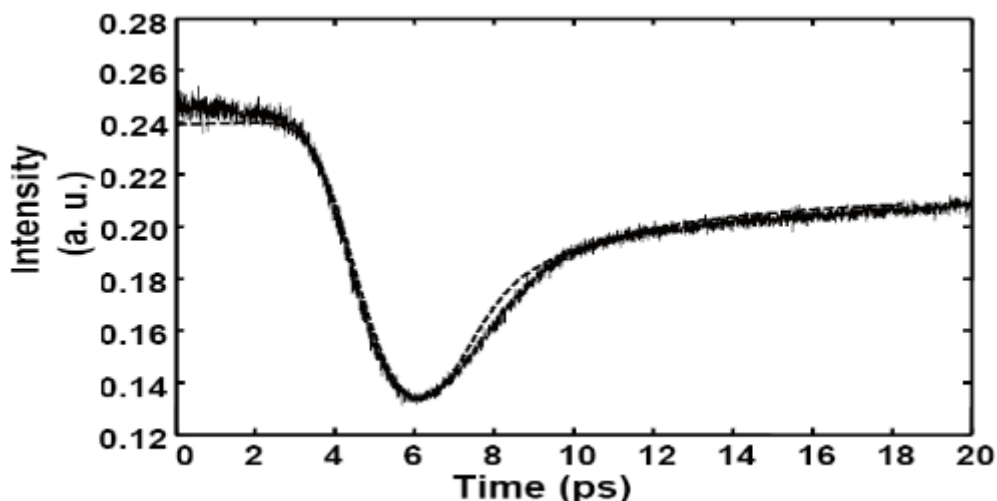
- $U_{in}(t)$ η ενέργεια του παλμού που βρίσκεται μέσα στον ενισχυτή τη χρονική στιγμή t . Αν θεωρήσουμε τη χρονική στιγμή 0, ως τη στιγμή την οποία ο παλμός με

κυματομορφή ισχύος $P_{in}(t)$ αρχίζει να εισέρχεται στο SOA, τότε η $U_{in}(t)$ εκφράζεται ως

$$U_{in}(t) = \int_0^t P_{in}(t') dt'$$

• U_{sat} η ενέργεια κορεσμού του SOA όπου ισχύει $U_{sat} = P_{sat} \cdot \tau_c$.

Η σχέση (1.8) δείχνει ότι το κέρδος του ημιαγωγού μειώνεται, για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η διάδοση του στενού παλμού μέσα από τον ημιαγωγό. Επομένως, ο χρόνος κορεσμού του SOA μπορεί να είναι αρκετά μικρός και να μην υπερβαίνει τα μερικά psec. Ο χρόνος κορεσμού του SOA εξαρτάται από τη διάρκεια του παλμού και το κέρδος του φτάνει στη μικρότερη τιμή του περίπου τη χρονική στιγμή που ο παλμός φθάνει στη μέγιστη τιμή του και το αντίστροφο. Το κέρδος του SOA ανακάμπτει σε τρεις διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Η πρώτη και η πιο γρήγορη ανάκαμψη κέρδους (*Ultrafast Gain Recovery*) λαμβάνει χώρα σε χρόνους της τάξεως μερικών *υπό-picoseconds* που προωθείται από το φαινόμενο του διασκορπισμού των φορέων στην ενεργό περιοχή. Η δεύτερη χρονική κλίμακα ανάκαμψης αγγίζει χρόνους της τάξεως μερικών *picoseconds* και συμβαίνει από τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους φορείς και τα φωτόνια. Τέλος, η τρίτη χρονική κλίμακα ανάκαμψης επιτελείται σε χρόνους της τάξεως μερικών *nanoseconds*, εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα ηλεκτρόνια και τις οπές της ενεργού περιοχής του SOA. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα αναπαριστάται η συμφωνία της καμπύλη ανάκαμψης κέρδους του SOA συναρτήσεως του χρόνου, σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. [1][2][19][23]



Εικ.16 Ανάκαμψη καμπύλης κέρδους SOA. Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στη θεωρητική προσέγγιση και η συνεχής γραμμή στην πειραματική καμπύλη. [13]

2.2.3.4 Χρονική σταθερά ανάκαμψης φορέων

Αμέσως μετά την έξοδο του στενού οπτικού παλμού από τον ενισχυτή, το κέρδος του ενισχυτή αρχίζει να ανακάμπτει, λόγω της διέγερσης φορέων από την έγχυση ρεύματος προς την αρχική του τιμή, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος. Ως χρόνος ανάκαμψης του κέρδους του ενισχυτή ορίζεται το χρονικό διάστημα, που απαιτείται για να ανακάμψει το κέρδος από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής του G_0 .

Κατά την χρονική περίοδο της ανάκαμψης του κέρδους δεν υπάρχει οπτικό σήμα μέσα στο SOA, οπότε στη σχέση (1.1) μπορούμε να αγνοήσουμε τον τρίτο όρο του δεξιού σκέλους, ο οποίος είναι ο όρος εξαναγκασμένης εκπομπής. Από την σχέση (1.1) λοιπόν έχουμε

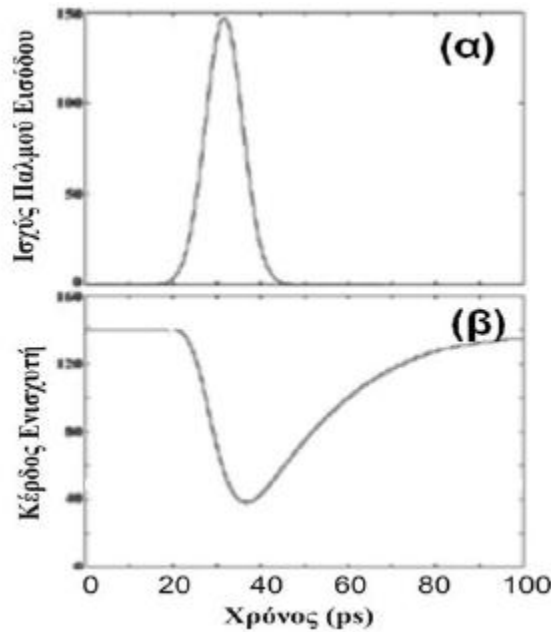
$$\begin{aligned} \frac{\partial N(z,t)}{\partial t} &= \frac{I}{eV} - \frac{N(z,t)}{\tau_c} = \frac{I}{eV} - \frac{N_T}{\tau_c} - \frac{N(z,t) - N_T}{\tau_c} \Rightarrow \\ \frac{d}{dt} N_{tot}(t) &= \left(\frac{I}{eV} - \frac{N_T}{\tau_c} \right) L - \frac{N_{tot}(t)}{\tau_c} = \left(\frac{N_{ss} - N_T}{\tau_c} \right) L - \frac{N_{tot}(t)}{\tau_c} \Rightarrow \\ \Gamma \cdot g \cdot \frac{d}{dt} N_{tot}(t) &= \Gamma \cdot g \cdot \left(\frac{N_{ss} - N_T}{\tau_c} \right) L - \Gamma \cdot g \cdot \frac{N_{tot}(t)}{\tau_c} \Rightarrow \\ \frac{1}{G(t)} \frac{dG(t)}{dt} &= \frac{\ln G_0}{\tau_c} - \frac{\ln G(t)}{\tau_c} \end{aligned}$$

Λύνοντας την παραπάνω διαφορική εξίσωση ως προς $G(t)$, προκύπτει η έκφραση του κέρδους για τη χρονική διάρκεια της ανάκαμψης, η οποία δίνεται από τη σχέση :

$$G(t) = G_0 \cdot \left[\frac{G(t_s)}{G_0} \right]^{\exp[-(t-t_s)/\tau_c]}, \quad t \geq t_s \quad (1.9)$$

Με βάση αυτή την αναλυτική έκφραση ανάκαμψης του κέρδους, προκύπτει ότι η χρονική σταθερά ανάκαμψης από το 10% στο 90% του G_0 συνδέεται με το χρόνο ζωής των φορέων μέσω της σχέσης $\tau_r = \tau_c \cdot \ln \left(\frac{\ln 0,1}{\ln 0,9} \right) \cong 3,13 \cdot \tau_c$. Τυπικές τιμές χρονικών σταθερών ανάκαμψης κέρδους για τους ημιαγωγούς είναι από μερικές δεκάδες ως μερικές εκατοντάδες psec.

Στην παρακάτω απεικόνιση βλέπουμε πως όταν δεν υπάρχει στενός οπτικός παλμός στον ενισχυτή το κέρδος διατηρεί μια αρχική μέγιστη τιμή. Όταν εισέρχεται και όσο διαρκεί ο παλμός το κέρδος σταδιακά μειώνεται και όταν εξέρχεται το κέρδος σταδιακά αυξάνεται φτάνοντας σε μια τιμή πολύ κοντά στην αρχική του τιμή.



Εικ. 17 (α) Βραχύς οπτικός παλμός Gauss και (β) κορεσμός κέρδους από τον βραχύ οπτικό παλμό[19]

Η χρονική σταθερά ανάκαμψης του SOA είναι πολύ σημαντική παράμετρος για τη χρήση του ενισχυτή σε οπτικές μεταγωγικές διατάξεις, καθώς αυτή καθορίζει τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του ενισχυτή. Για αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας, είναι απαραίτητη η μείωση του χρόνου ανάκαμψης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές επιτάχυνσης της χρονικής απόκρισης, όπως είναι η εφαρμογή ισχυρού CW σήματος στον ενισχυτή, με μήκος κύματος του σήματος στην περιοχή κέρδους ή στην περιοχή διαφάνειας του ενισχυτή.[1][2][19][23]

2.2.3.5 Κορεσμένο κέρδος του SOA υπό την επίδραση CW σήματος

Αν ως είσοδος στον ενισχυτή θεωρηθεί οπτικό CW σήμα με σταθερή οπτική ισχύ P_{CW} στην είσοδο, τότε η πυκνότητα φορέων διαμορφώνεται πάλι σε μια μόνιμη σταθερή κατάσταση, διαφορετική όμως από αυτήν της περιοχής ασθενούς σήματος. Η τιμή $N(z)$ της πυκνότητας φορέων σε αυτήν την κατάσταση, σε κάθε z , υπολογίζεται από τη σχέση (1.1), μηδενίζοντας τη χρονική παράγωγο της πυκνότητας φορέων και αγνοώντας, πλέον, τη χρονική εξάρτηση των υπολοίπων μεγεθών, οπότε προκύπτει

$$N(z) - N_T = \frac{(N_{ss} - N_T)}{1 + \frac{P(z)}{P_{sat}}} \quad (1.10)$$

όπου $P(z)$ η ισχύς του CW σήματος σε κάθε σημείο z του ημιαγωγού και $P_{sat} = \frac{\hbar\omega_0 A}{\Gamma g \tau_c}$

η ισχύς κορεσμού του SOA, η οποία εκφράζει το ποσό της ισχύος του σήματος που απαιτείται για να μειωθεί η συνολική πυκνότητα των φορέων στο μισό της αντίστοιχης τιμής της στην περιοχή ασθενούς σήματος.

Αγνοώντας τις εσωτερικές απώλειες, a_s , του ενισχυτή στη σχέση (1.6), καθώς αυτές θεωρούνται αμελητέες, ως προς το κέρδος του ενισχυτή, και χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις των σχέσεων (1.4) και (1.10) στην (1.6), έχουμε τελικά, το **κέρδος G_{CW} στη μόνιμη κατάσταση**, το οποίο γράφεται ως εξής[16] :

$$G_{CW} = G_0 \cdot \exp[-(G_{CW} - 1)P_{CW}/P_{sat}] \quad (1.11)$$

Εφαρμόζοντας στον SOA ένα βραχύ αλλά ισχυρό οπτικό παλμό μαζί με το CW, το κέρδος του θα αρχίσει να μεταβάλλεται όπως προηγουμένως, με αλλαγμένο όμως πλέον το G_0 . Αν επαναλάβουμε την ανάλυση για τον κορεσμό του ενισχυτή, έχοντας όμως κατά νου ότι ο αριθμός των φορέων N_{tot} και το G_0 έχουν μειωθεί, το κέρδος του προκύπτει ίσο με [48] :

$$G(t) = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{G_{CW}}\right) \exp\left(-\frac{U_{in}}{U_{sat}}\right)} \quad (1.12)$$

Όταν παρέλθει ο παλμός, ο SOA θα ξαναρχίσει τη διαδικασία ανάκαμψης κέρδους, παρά την ύπαρξη του CW σήματος. Το πέρασμα του παλμού, μετέβαλε τον αριθμό των φορέων μέχρι την τιμή $N_{tot}(0)$, που είναι η τιμή από την οποία αρχίζει η ανάκαμψη κέρδους. Η διαφορική εξίσωση που δίνει τη χρονική μεταβολή του N_{tot} είναι

$$\frac{dN_{tot}}{dt} + \frac{N_{tot}}{\tau_c} + \frac{\Gamma g N_{tot} P_{in}}{Ah\omega_0} - \frac{(N_{ss} - N_T)L}{\tau_c} = 0$$

Με χρήση κατάλληλων μετασχηματισμών προκύπτει

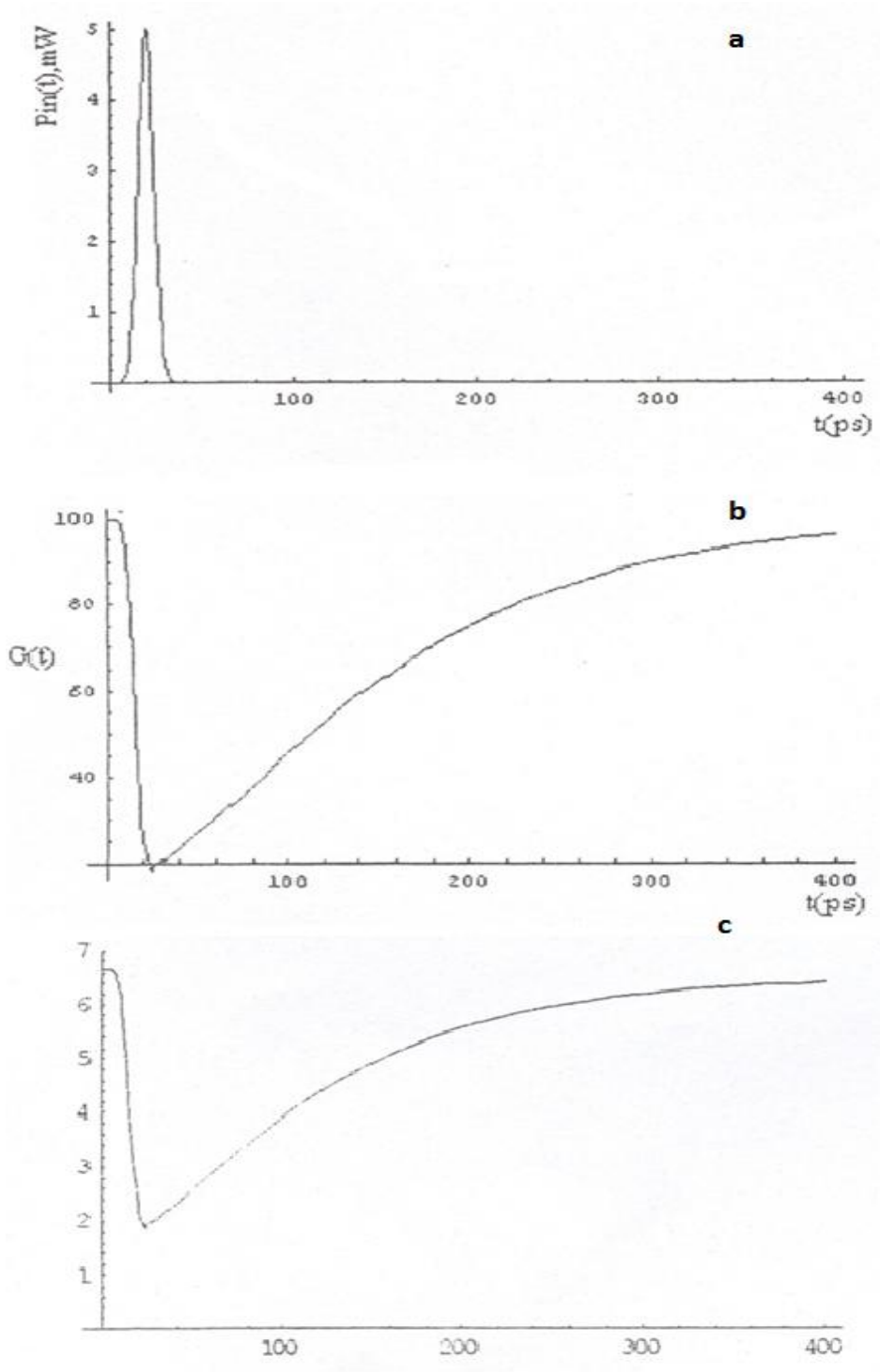
$$N_{tot}(t) = \left[N_{tot}(0) - \frac{(N_{ss} - N_T)L}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}} \right] \exp\left[-\frac{t \left(1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}\right)}{\tau_c} \right] + \frac{(N_{ss} - N_0)L}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}} \quad (1.13)$$

Επομένως, κατά την ανάκαμψη του κέρδους θα έχουμε [8] :

$$(6) \xrightarrow[a_s=0]{(13)} G(t) = G_0 \left[\frac{G(t_s)}{G_0} \right]^{\exp\left(-\frac{t-t_s}{\tau_c/(1+P_{in}/P_{sat})}\right)} \quad (1.14)$$

Από την σχέση (1.14) παρατηρούμε ότι η σταθερά ανάκαμψης χρόνου είναι μικρότερη, σε σχέση με την περίπτωση που δεν είχαμε CW σήμα. Αυτό σημαίνει ότι ο ενισχυτής φτάνει πιο γρήγορα τη μέγιστη τιμή του κέρδους (G_{CW}). Οπότε, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή ενός CW σήματος στον ενισχυτή οδηγεί σε μείωση του μέγιστου κέρδους, ενώ επιπλέον το κέρδος ανακάμπτει πιο γρήγορα.

Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να φανούν καλύτερα μέσω γραφικών παραστάσεων για το κέρδος του ενισχυτή. Συγκεκριμένα, στην εικόνα 18 αναπαρίσταται η μεταβολή του κέρδους, με ή χωρίς CW, για παλμό εισόδου γκαουσιανής μορφής με εύρος 20 ps. **[1][2][19][23]**



Εικ.18 (α)Παλμός εισόδου εύρους 20ps (β) Κέρδος ενισχυτή χωρίς CW σήμα (γ)Κέρδος ενισχυτή με CW σήμα.[23]

2.2.4 Μη γραμμικά φαινόμενα των SOAs

Οι SOAs είναι ενεργές διατάξεις, όπου κατά τη διάρκεια της ενίσχυσης έχουν τόσο γραμμική όσο και μη γραμμική συμπεριφορά. Η γραμμική συμπεριφορά τους οφείλεται στην αλλαγή της πυκνότητας των φορέων που βρίσκονται στην ενεργή περιοχή και για αυτό είναι υπεύθυνα τα εισερχόμενα οπτικά σήματα. Γενικά τα μη γραμμικά φαινόμενα δημιουργούν διάφορα προβλήματα όπως το chirp στην φάση, παρεμβολές λόγω FWM κάτι που επιδρά αρνητικά στο αρχικό σήμα ως θόρυβος ή υποβιβασμός της ισχύος. Λόγω, λοιπόν, της ισχυρής μη γραμμικής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν, οι SOAs τα τελευταία χρόνια βρίσκουν εφαρμογή σε υλοποιήσεις που δεν αφορούν ενίσχυση αλλά επεξεργασία σήματος όπως και στην περίπτωση μας με τη μετατροπή του μήκους κύματος. Έτσι θα αναφερθούμε παρακάτω στα διάφορα μη γραμμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, τα οποία είναι τα εξής :

1. Αυτοδιαμόρφωση φάσης (SPM : Self Phase Modulation)
2. Ετεροδιαμόρφωση φάσης (XPM : Cross Phase Modulation)
3. Μίξη τεσσάρων φωτονίων (FWM : Four Wave Mixing)
4. Ετεροδιαμόρφωση κέρδους (XGM : Cross Gain Modulation)

2.2.4.1 Αυτοδιαμόρφωση φάσης (SPM : Self Phase Modulation)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο SOA είναι ένα μη γραμμικό στοιχείο, το οποίο προκαλεί στροφή φάσης στα σήματα που διαδίδονται σε αυτόν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεταβολή του κέρδους του ενισχυτή, που οδηγεί σε μεταβολή του δείκτη διάθλασης του ημιαγωγού, ο οποίος εξαρτάται από τη συγκέντρωση φορέων μέσα στον ενισχυτή.

Ο δείκτης διάθλασης των SOA είναι ένα μιγαδικό μέγεθος, του οποίου το πραγματικό μέρος περιγράφει την συμπεριφορά της φάσης του εισερχόμενου οπτικού πεδίου, ενώ το φανταστικό του μέρος περιγράφει το κέρδος του υλικού:

$$\underline{n} = n' - jn'' \quad (1.15)$$

Έτσι, το πλάτος και η φάση ενός οπτικού πεδίου αφού διαδοθεί μέσα από τον ενισχυτή, περιγράφεται ως

$$\frac{E_{out}}{E_{in}} = \exp\left(-j \frac{2\pi nL}{\lambda}\right) = \exp\left(-j \frac{2\pi n'L}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi n''L}{\lambda}\right) = e^{-j\Delta\varphi} \cdot \sqrt{G} \quad (1.16)$$

όπου φ η μη γραμμική στροφή φάσης, G το κέρδος ισχύος του υλικού, L το μήκος του μέσου και λ το μήκος κύματος του φωτός.

Η παράμετρος, που συσχετίζει τη μεταβολή στη φάση με το κέρδος του υλικού, είναι ο παράγοντας επαύξησης ή διεύρυνσης φασματικής γραμμής (linewidth enhancement factor) και ισχύει:

$$\frac{dn'}{dN} = \alpha \frac{dn''}{dN} \quad (1.17)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η στροφή φάσης και το κέρδος ισχύος του ενισχυτή συνδέονται με τη σχέση

$$\varphi(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln G(t) + \varphi_{in} \quad (1.18)$$

Αποτέλεσμα της εξάρτησης της φάσης του πεδίου από το κέρδος, όταν το πεδίο, που διαδίδεται, είναι ένας στενός οπτικός παλμός, είναι η εμφάνιση ολίσθησης συχνότητας (*chirp*), κατά μήκος του παλμού. Η μη γραμμική απόκριση κέρδους του ενισχυτή, κατά τον κορεσμό του, έχει ως αποτέλεσμα το προπορευόμενο χρονικά τμήμα του παλμού να αντιλαμβάνεται μεγαλύτερο κέρδος από το πίσω τμήμα του παλμού. Κατά συνέπεια, κάθε χρονικό τμήμα του παλμού αποκτά διαφορετική φάση κατά τη διάδοσή του και αντιλαμβάνεται διαφορετική συχνότητα ως φέρουσα. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η αλλοίωση του σχήματος του παλμού, όπως επίσης και η αλλοίωση του φασματικού του περιεχομένου, το οποίο, μάλιστα, διευρύνεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυτοδιαμόρφωση φάσης (Self-Phase Modulation).

Αν ο ενισχυτής χρησιμοποιηθεί ως μη γραμμικό μέσο ενός συμβολόμετρου και θεωρήσουμε ότι G_1 , G_2 είναι τα κέρδη που “βλέπουν” τα δύο σήματα στους οπτικούς δρόμους του συμβολόμετρου, η διαφορά φάσης θα δίνεται από την σχέση

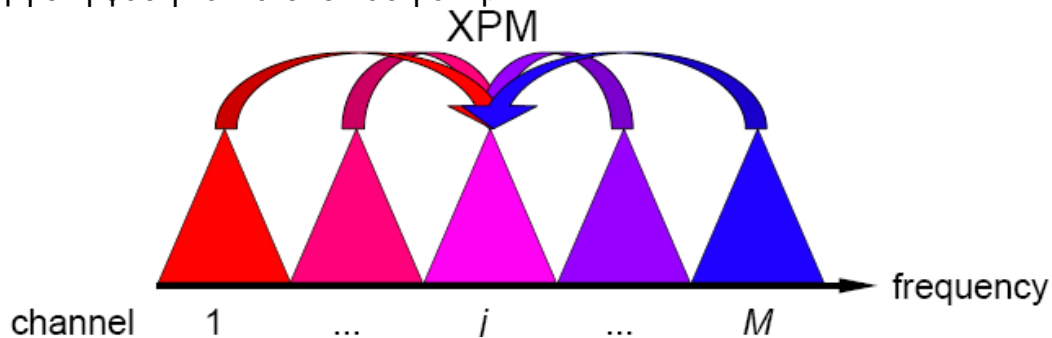
$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{\alpha}{2} \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (1.19)$$

[1][2][19][23]

2.2.4.2 Ετεροδιαμόρφωση Φάσης (XPM :Cross Phase Modulation)

Η ετεροδιαμόρφωση φάσης λαμβάνει χώρα όταν οπτικοί παλμοί συνδιαδίδονται μέσα σε ένα μη γραμμικό μέσο, όπως μία οπτική ίνα ή ένας SOA. Στην περίπτωση αυτή οι οπτικοί παλμοί προκαλούν μη γραμμική στροφή φάσης στους άλλους. Στα

συστήματα WDM το φαινόμενο αυτό αποτελεί πρόβλημα αφού τα κανάλια επηρεάζουν το δείκτη διάθλασης των άλλων καναλιών δημιουργώντας μη γραμμική αλλαγή στη φάση και κατεπέκταση chirp.



Εικ.19 Φαινόμενο XPM M καναλιών σε μη γραμμικό μέσο διάδοσης [1][29]

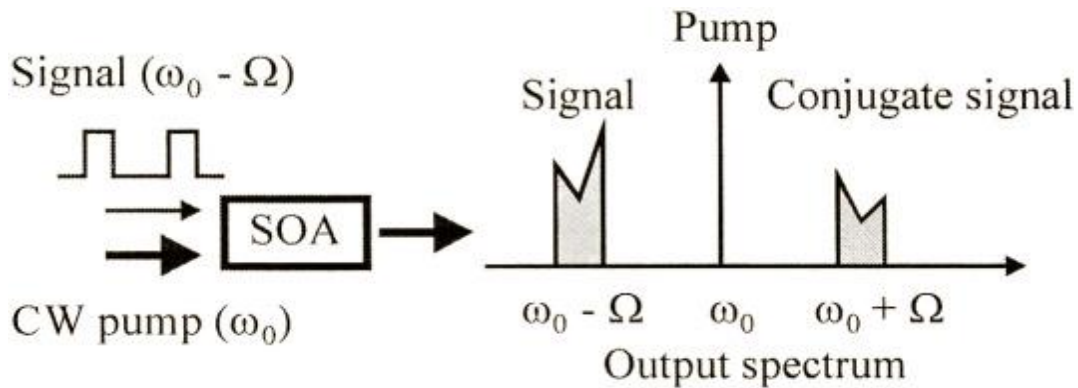
Για δύο ισχείς συνδιαδιδόμενες η γραμμική φάση που εξαρτάται από την ισχύ δίνεται από την σχέση :

$$\varphi_j^{NL} = \frac{\omega_j z}{c} \Delta n_j = \frac{\omega_j z n_2}{c} \left[|E_j|^2 + 2|E_{3-j}|^2 \right] \text{ όπου } j = 1 \text{ ή } j = 2$$

Ο πρώτος όρος είναι ο όρος της αυτοδιαμόρφωσης φάσης δηλαδή η ισχύς του ίδιου του σήματος προκαλεί μη γραμμική μεταβολή του δείκτη διάθλασης και κατά συνέπεια της φάσης. Ο δεύτερος όρος είναι ο όρος της ετεροδιαμόρφωσης που μας αφορά στην προκειμένη και έχει να κάνει με το ότι η ισχύς του ενός σήματος επιβάλλει μη γραμμική μεταβολή στο δείκτη διάθλασης του άλλου και κατά συνέπεια στην φάση του. Παρατηρούμε επίσης ότι η μεταβολή της φάσης και κατεπέκταση το τετέρισμα που εισάγει το XPM είναι διπλάσιο από αυτό που εισάγει η SPM. Αυτό έρχεται προς επιβεβαίωση των προβλημάτων που δημιουργούνται στα συστήματα WDM από το XPM. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο συμβαίνει και στην ενεργό περιοχή του SOA καθώς διαδίδονται παραπάνω του ενός οπτικοί παλμοί διαμέσου του. Τέλος, εξαιτίας του ότι το XPM μεταβάλλει μόνο τη φάση των σημάτων, αν χρησιμοποιηθεί ο SOA σε συνδυασμό με μία συμβολομετρική διάταξη όπως πχ *Mach Zehnder*, οι μεταβολές αυτές μπορούν να μετατραπούν σε αλλαγές πλάτους στα σήματα, βάσει του φαινομένου της προσθετικής ή αναιρετικής συμβολής. Έτσι μπορούν να δημιουργηθούν διατάξεις μετατροπής μήκους κύματος. [1][17]

2.2.4.3 Μίξη Τεσσάρων Φωτονίων (FWM: Four Wave Mixing)

Το φαινόμενο της μίξης τεσσάρων φωτονίων είναι μία μη γραμμική διαδικασία η οποία μπορεί να συμβεί σε ένα SOA ανάμεσα σε δύο οπτικά πεδία, ένα ισχυρό οπτικό σήμα CW μη διαμορφωμένο σήμα με γωνιακή συχνότητα ω_0 και ένα ασθενέστερο διαμορφωμένο σήμα με γωνιακή συχνότητα $\omega_0 - \Omega$ τα οποία όμως έχουν την ίδια πόλωση. Τα εισερχόμενα πεδία προκαλούν την διαμόρφωση του κέρδους του ενισχυτή βάσει της συχνότητας Ω με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα καινούριο πεδίο με γωνιακή συχνότητα $\omega_0 + \Omega$, όπως ακριβώς φαίνεται και στην εικόνα 20 .



Εικ. 20 Το φαινόμενο FWM στον SOA. [20]

Το καινούριο πεδίο που δημιουργείται ονομάζεται “συζευγμένο” (*conjugate*) επειδή η φάση του είναι αντίθετη από το διαμορφωμένο σήμα εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι το φάσμα του συζευγμένου σήματος είναι μετατοπισμένο και αντεστραμμένο αντίγραφο του διαμορφωμένου σήματος εισόδου. Η συγκεκριμένη λειτουργία που επιτελείται στους SOAs μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές όπως: μετατροπή μήκους κύματος, αντισταθμιστές διασποράς και οπτικούς αποπολυπλέκτες. [1][17]

2.2.4.4 Ετεροδιαμόρφωση Κέρδους (XGM:Cross Gain Modulation)

Το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους εμφανίζεται κατά την ταυτόχρονη διάδοση-ενίσχυση δύο σημάτων μέσα από τον SOA, σε αντίθεση με την αυτοδιαμόρφωση φάσης που η ίδια η ισχύς του παλμού διαμορφώνει τη φάση του λόγω του φαινομένου Kerr. Όταν ένας ισχυρός οπτικός παλμός συνδιαδοθεί με άλλα σήματα μέσα στον ενισχυτή, μέσω του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους, διαμορφώνει το κέρδος των άλλων σημάτων. Έτσι δίνεται η δυνατότητα βάσει του παραπάνω φαινομένου, να ελέγχουμε με ένα σήμα ελέγχου (*control signal*) το πλάτος ενός σήματος. Σε αυτήν ακριβώς την τεχνική βασίζεται και η μετατροπή του μήκους κύματος όπου το ασθενές μη διαμορφωμένο CW (*continuous wave*) διαμορφώνεται ή καλύτερα ελέγχεται το κέρδος του από ένα ισχυρό διαμορφωμένο σήμα. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε αντιγραφή της πληροφορίας από το ένα σήμα στο άλλο, δηλαδή από το σήμα ελέγχου στο σήμα σταθερού πλάτους CW. [1][17]

2.3 Είδη κυκλωμάτων μετατροπής μήκους κύματος

Τέσσερις είναι οι βασικές κατηγορίες κυκλωμάτων μετατροπής μήκους κύματος :

1. Οπτοηλεκτρονική μέθοδος (*optoelectronic approach*)
2. Υλοποίηση με συμβολομετρικές διατάξεις (*interferometric techniques*)
3. Μίξη κυμάτων (*wave mixing*)
4. Με οπτικές πύλες (*optical gating*)

Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι τρεις τελευταίες μέθοδοι είναι καθαρά οπτικές.

2.3.1 Οπτοηλεκτρονική μέθοδος

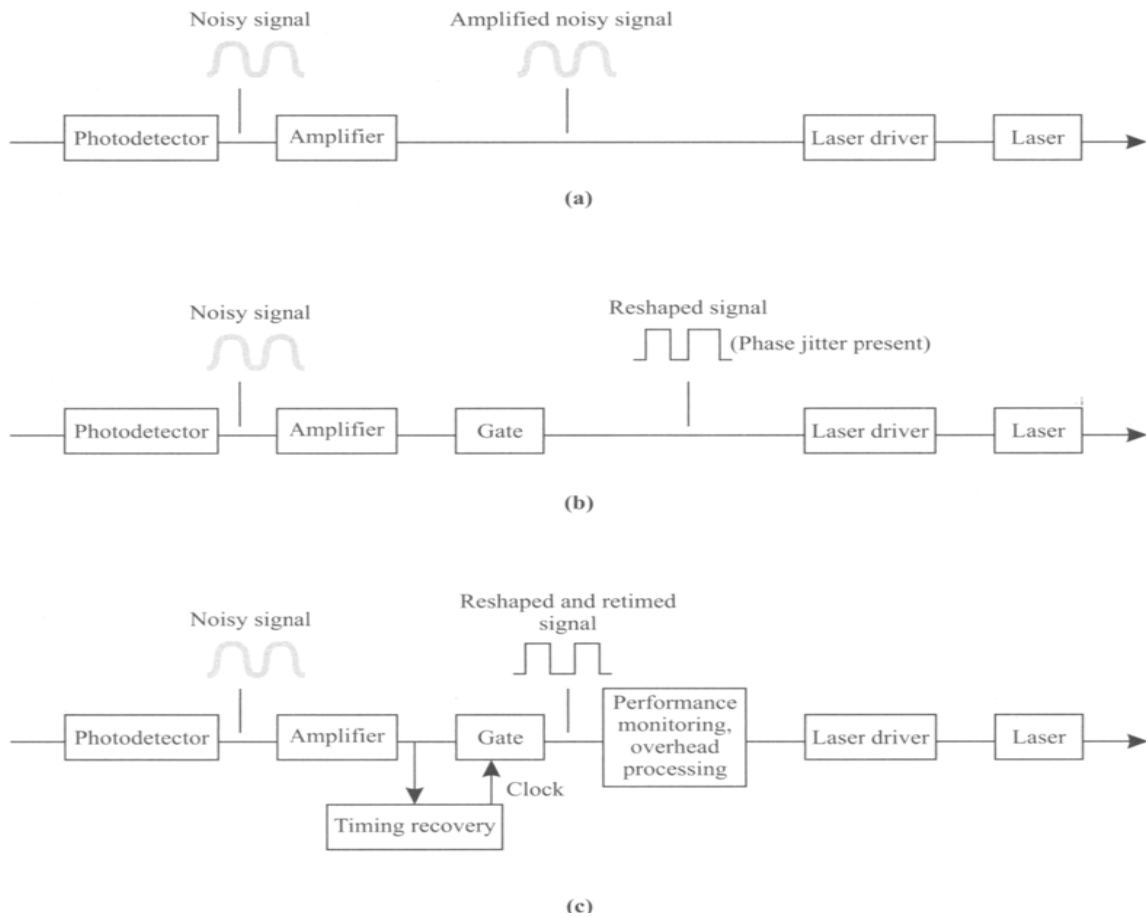
Στην τεχνική αυτή η μετατροπή μήκους κύματος πραγματοποιείται μέσω της ανίχνευσης του σήματος και της αναμετάδοσής του. Αρχικά το εισερχόμενο σήμα μετατρέπεται πρώτα σε ηλεκτρικό από οπτικό. Έπειτα υφίσταται αναγέννηση και τελικά επαναμεταδίδεται σε διαφορετικό μήκος κύματος. Ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται για την αναγέννηση του σήματος, υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες κυκλωμάτων μετατροπής κύματος αυτής της υλοποίησης.

Στην πρώτη κατηγορία 1R (**Reamplify**: Επανενίσχυση) το σήμα απλά υφίσταται ενίσχυση χωρίς να αλλάζει η κυματομορφή του ή να υπάρχει χρονικός συγχρονισμός. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αναλογικά σήματα αλλά τα σημαντικά επίπεδα θορύβου που εισάγονται στη διάταξη και το ότι δεν απαλείφονται οι μη γραμμικότητες και η διασπορά του σήματος, δεν την καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλή.

Μία άλλη εναλλακτική είναι η 2R (**Reshape, Reamplify** : Αναδιαμόρφωση, Επανενίσχυση) όπου το σήμα αφού υποστεί ενίσχυση, αλλάζει και το σχήμα των παλμών. Η προσέγγιση αυτή βρίσκει εφαρμογή μόνο σε ψηφιακά σήματα. Το σήμα αναδιαμορφώνει το σχήμα των παλμών του αφού περάσει μέσα από μια λογική πύλη, όμως η εισαγωγή jitter² λόγω της διαδικασίας αυτής μειώνει τον αριθμό των σταδίων που μπορούν να υλοποιηθούν.

Τέλος, η τρίτη μέθοδος 3R (**Reshape, Retime, Reamplify** : Αναδιαμόρφωση, Επανασυγχρονισμός, Επανενίσχυση) εκτός από ανασχηματισμό των παλμών περιλαμβάνει και χρονική αναγέννηση των παλμών για εξισορρόπηση του jitter. Αυτό απαλείφει τις μη γραμμικότητες, τη διασπορά που έχει εισάγει η ίνα αλλά και τον θόρυβο που εισάγει ο ενισχυτής και ταυτόχρονα δεν εισάγει επιπλέον θόρυβο. Η χρονική επανατοποθέτηση των παλμών έχει και άμεση εξάρτηση από το ρυθμό μετάδοσης κάτι που υποδηλώνει αδυναμία λειτουργίας σε υψηλούς ρυθμούς ή διαφοροποίηση της δομής. Αν προσθέσουμε σε όλες τις παραπάνω υλοποιήσεις την περιορισμένη διαφάνεια και την υψηλή κατανάλωση κατανοούμε γιατί η οπτοηλεκτρονική μέθοδος δεν λαμβάνει πια σημαντική έρευνα. **[6][8][9][17]**

² Ορισμός jitter σύμφωνα με ITU : οι στιγμιαίες αποκλίσεις καθοριστικών τμημάτων ενός ψηφιακού σήματος σε σχέση με τις ιδανικές θέσεις τους στον χρόνο



Εικ.21 Οπτοηλεκτρονική μέθοδος.Οι τρεις διαφορετικοί τρόποι αναγέννησης του σήματος. (α)1R - Reamplify: Επανεπίσχυση (β)2R - Reshape, Reamplify : Αναδιαμόρφωση, Επανεπίσχυση (γ)3R - Reshape, Retime, Reamplify : Αναδιαμόρφωση, Επανασυγχρονισμός, Επανεπίσχυση[20]

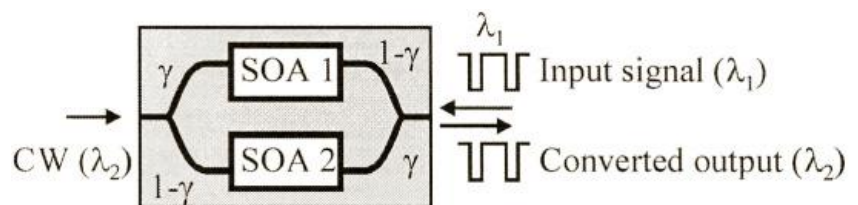
2.3.2 Υλοποίηση με συμβολομετρικές διατάξεις

Η τεχνική αυτή βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση SOA με μια συμβολομετρική διάταξη όπως Mach-Zehnder (MZI) ή Michelson interferometer (MI).Μία πιθανή προσέγγιση αυτής της υλοποίησης είναι ένα συμβολόμετρο Mach- Zehnder (MZI).Η γενική αρχή είναι ότι η περιοδική παλμοσειρά που φέρει τη πληροφορία και βρίσκεται στο μήκος κύματος εισόδου διοχετεύεται στον ένα από τους δύο κλάδους του συμβολόμετρου προκαλώντας διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης του μέσου που βρίσκεται σε αυτόν. Στη προκειμένη περίπτωση είναι ο ενισχυτής ημιαγωγού SOA. Η μεταβολή αυτή αποτυπώνεται σε αντίστοιχη μεταβολή φάσης στη πεδιακή συνιστώσα του φέροντος CW σήματος που διέρχεται τον κλάδο στο επιθυμητό μήκος κύματος και συμβάλει με την άλλη συνιστώσα του άλλου κλάδου στον συζεύκτη εξόδου. Με τον τρόπο αυτό η διαμόρφωση φάσης μετατρέπεται σε αντίστοιχη διαμόρφωση έντασης.

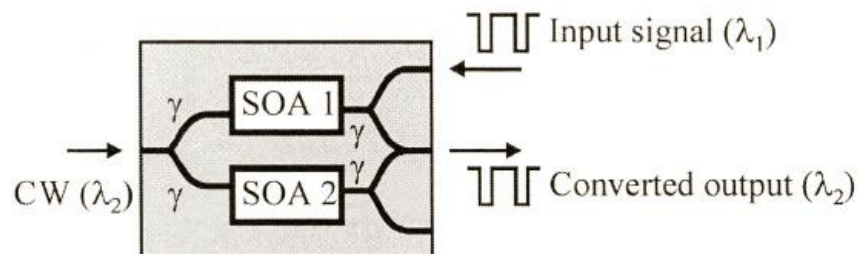
Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί το συμβολόμετρο MZI μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές αρχιτεκτονικές μετατροπών μήκους κύματος με τη χρήση *συμμετρικού* ή *μη συμμετρικού* συμβολόμετρου MZI. Στο μετατροπέα μήκους κύματος με μη συμμετρικό MZI, το σήμα CW (έστω μήκους κύματος λ_2), διαμοιράζεται μη συμμετρικά σε κάθε βραχίονα του συμβολόμετρου με τη βοήθεια

ενός 2×2 συζεύκτη. Παράλληλα, το διαμορφωμένο κατά πλάτος σήμα εισόδου (έστω μήκους κύματος λ_1), οδηγεί σε κορεσμό και τις δύο διατάξεις SOA, εισάγοντας διαφορετική ολίσθηση φάσης στο σήμα CW. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της συνεχούς μεταβολής των φορέων στην ενεργό περιοχή του SOA και τη συνεπαγόμενη αλλαγή στο δείκτη διάθλασής τους. Έπειτα ο συζεύκτης εξόδου επανασυνδέει τις διαχωρισμένες συνιστώσες του σήματος CW (λ_2), οι οποίες μπορούν να συμβάλουν αναιρετικά ή προσθετικά. Ο τύπος της συμβολής εξαρτάται από τη διαφορά φάσης των σημάτων στους δύο βραχίονες του MZI, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την τάση του ρεύματος στους SOAs και από την ισχύ των σημάτων εισόδου. Η ίδια αρχή λειτουργίας διέπει και τον μετατροπέα μήκους κύματος με συμμετρικό MZI. Παρόλα αυτά στη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική μετατροπέα, το σήμα εισόδου (λ_1) εισέρχεται μόνο στον ένα SOA και επιπρόσθετα πρέπει να χρησιμοποιηθούν συζεύκτες με λόγο διαχωρισμού σήματος 50:50 και ένας επιπλέον συζεύκτης (50:50) στην έξοδο του μετατροπέα.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι ανεξάρτητο της πόλωσης του σήματος, λειτουργεί για ένα καλό εύρος μηκών κύματος, το τετέρισμα δεν αποτελεί πρόβλημα αλλά αντίθετα στη αντεστραμμένη λειτουργία του μετατροπέα το αρνητικό chirp προκαλεί συμπίεση των παλμών και έτσι το σήμα μπορεί να διαδοθεί για μεγαλύτερες αποστάσεις, τέλος απαιτείται μικρότερη ισχύς εισόδου του σήματος δεδομένων για να επιτραπεί μη γραμμική στροφή φάσης. Το σοβαρότερο μειονέκτημα είναι ότι η τροφοδότηση του SOA θα πρέπει να ελέγχεται και να διατηρείται σταθερή καθώς μικρές αλλαγές μπορούν να δημιουργήσουν αλλαγές στο δείκτη διάθλασης και κατά συνέπεια σημαντικές αλλαγές στη φάση των σημάτων που εισχωρούν στη συσκευή. [6][8][9][17]



Asymmetric MZI wavelength converter

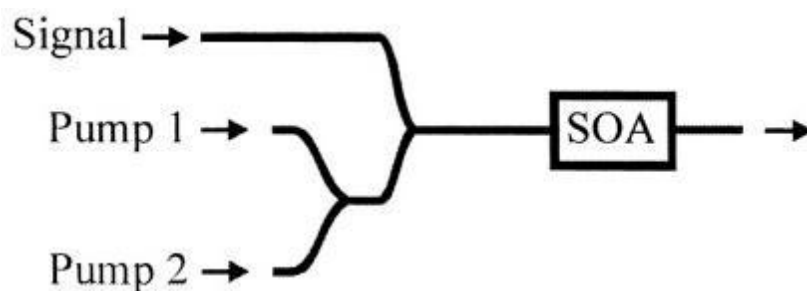


Symmetric MZI wavelength converter

Εικ.22 Υλοποίηση μετατροπέα με συμβολόμετρο Mach Zehnder βασισμένο στο φαινόμενο XPM. Στο κάτω μέρος της εικόνας φαίνεται η περίπτωση συμμετρικού MZI με ίδιους λόγους σύζευξης και στο πάνω με ασύμμετρο MZI και διαφορετικούς λόγους σύζευξης. [20]

2.3.3 Μίξη κυμάτων (wave mixing)

Η μίξη τεσσάρων φωτονίων εκτός από ένα μη γραμμικό φαινόμενο το οποίο δημιουργεί προβλήματα στη μετάδοση πληροφορίας στις οπτικές ίνες μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μετατροπή μήκους κύματος. Η αρχή είναι η ίδια όπως περιγράφηκε προηγουμένα στην **παράγραφο 2.2.4.3**, δηλαδή η γένεση νέων συχνοτήτων. Το βασικό μοντέλο της μετατροπής χρησιμοποιεί δύο μη διαμορφωμένα σήματα *CW* (*pump1* και *pump2*) και ένα διαμορφωμένο σήμα εισόδου. Βάσει αυτού, το φαινόμενο *FWM* δημιουργεί ένα καινούριο σήμα το οποίο αποτελεί ένα φασματικό αντίγραφο του σήματος εισόδου που περιέχει τη πληροφορία και με κατάλληλη χρήση ενός φίλτρου μπορεί να απομονωθεί. Για να επιτευχθεί αποτελεσματική μετατροπή μήκους κύματος με *FWM* στο *SOA*, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της κατάστασης πόλωσης τόσο του διαμορφωμένου σήματος εισόδου όσο και των αρχικά μη διαμορφωμένων σημάτων *CW*. Για αυτόν τον λόγο η συγκεκριμένη τεχνική είναι δύσκολη προς υλοποίηση, αφού ο συνεχής έλεγχος της πόλωσης ενός σήματος είναι μία αρκετά δύσκολη διαδικασία. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχει κάποιου είδους διαμόρφωση, είτε της φάσης είτε του πλάτους και δεν εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης αλλά βασίζεται καθαρά στο γνωστό μη γραμμικό φαινόμενο της μίξης των τεσσάρων φωτονίων. Τα αποτελέσματα περιορίζονται αρκετά από τη διαφορά σε επίπεδο συχνότητας των δύο εισερχόμενων σημάτων, λόγω του ότι πρέπει να φιλτραριστεί το εξερχόμενο σήμα και ειδικότερα όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση των δύο σημάτων τόσο χειρότερη είναι η ποιότητα της μετατροπής. Τέλος, αντίστοιχη τεχνική, η οποία χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μήκους κύματος, είναι η μέθοδος της διαφορικής γένεσης συχνοτήτων (***Difference Frequency Generation***). Η διαφορά των δύο έγκειται στο μέσο. Η διαδικασία του *FWM* λαμβάνει χώρα σε ένα μέσο με τρίτης τάξης μη γραμμικότητα, ενώ το *DFG* σε δεύτερης τάξης μη γραμμικότητα του μέσου. [6][8][9][17]



Εικ.23 Βασική ιδέα μετατροπής μήκους κύματος με τη βοήθεια του φαινομένου *FWM*. [20]

2.3.4 Υλοποίηση με οπτικές πύλες

Η μέθοδος αυτή κάνει χρήση συσκευών που τα χαρακτηριστικά τους υφίσταται αλλαγές σε σχέση με την εισερχόμενη ισχύ των σημάτων, όπως ο *SOA*. Αυτή η αλλαγή μπορεί να μεταφερθεί σε ένα άλλο αδιαμόρφωτο σήμα το οποίο περνάει μέσα από τη συσκευή. Έτσι αυτό στην έξοδο περιέχει την πληροφορία που ήταν στο εισερχόμενο διαμορφωμένο σήμα. Ειδικότερα, όταν τροφοδοτούμε τον *SOA* με ένα

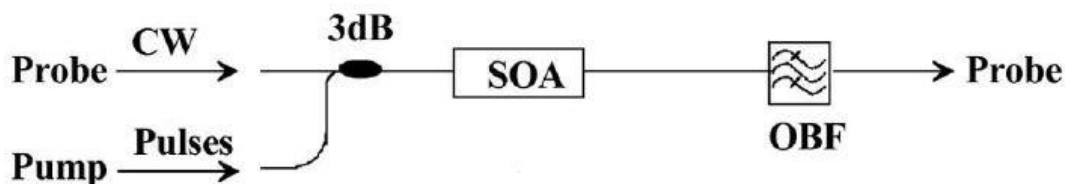
σήμα σημαντικής ισχύος τότε ο ενισχυτής έρχεται σε κορεσμό. Το μέσο ενίσχυσης δίνει όλα ή σχεδόν όλα τα διεγερμένα ηλεκτρόνια και για ένα μικρό διάστημα δεν μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω, μέχρι επιπλέον ισχύς να αποδοθεί από το σήμα πληροφορίας. Έτσι, όταν εισάγεται ένα διαμορφωμένο σήμα υψηλής ισχύος πολυπλεγμένο με ένα σήμα σε άλλο μήκος κύματος σημαντικά χαμηλότερης ισχύος, που δεν έχει διαμορφωθεί, στην έξοδο, το αδιαμόρφωτο σήμα θα περιέχει όλες τις πληροφορίες-διαμορφώσεις που έχει το σήμα πληροφορίας. Αν και οι πληροφορίες αυτές εμφανίζονται με αντίθετη πολικότητα. Στη συνέχεια, το αρχικό σήμα πληροφορίας απορρίπτεται από ένα φίλτρο και αυτό που απομένει είναι ένα σήμα το οποίο είναι αντεστραμμένο σε σχέση με το σήμα δεδομένων. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς με κατάλληλη διάταξη, συμβολόμετρο, μπορεί να αντιστραφεί η πολικότητα. Πρόβλημα αποτελούν τα επίπεδα ισχύος των σημάτων, γιατί καθώς απαιτείται το σήμα που φέρει την πληροφορία να έχει υψηλό επίπεδο ισχύος σε σχέση με το CW σήμα, θα πρέπει το σήμα πληροφορίας να ενισχυθεί προτού εισέλθει στον ενισχυτή. Ακολούθως το καινούριο σήμα πληροφορίας στην έξοδο θα πρέπει να ενισχυθεί και αυτό με τη σειρά του. Η παραπάνω μέθοδος είναι βασικά η τεχνική η οποία χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία. [6][8][9][17]



Εικ.24 Μετατροπές μήκους κύματος που βασίζεται στο φαινόμενο XGM, κάνοντας χρήση ενός SOA και ενός οπτικού βαθυπερατού φίλτρου (OBF). Παρατηρούμε την αντεστραμμένη πολικότητα του σήματος εξόδου σε σχέση με το σήμα εισόδου.

2.4 Αρχή λειτουργίας μετατροπέα μήκους κύματος στις προσομοιώσεις

Στις προσομοιώσεις που έγιναν διατηρήθηκε ένα βασικό μοντέλο. Αυτό προϋποθέτει τη χρήση μιας πηγής laser που παράγει ένα μη διαμορφωμένο σταθερού πλάτους (CW continuous wave) σήμα (probe signal) και μια πηγή που παράγει παλμικό σήμα διαμόρφωσης RZ (Return to Zero) (pump ή control signal). Τα δύο σήματα συνδυάζονται με έναν συζεύκτη 3dB (3dB coupler) και εισέρχονται στην ενεργό περιοχή SOA. Έπειτα, υπάρχει ένα ζωνοπερατό φίλτρο το οποίο επιλέγει το διαμορφωμένο πια CW σήμα, που εξέρχεται από τον SOA και απορρίπτει το pump signal.



Εικ.25 Αρχή λειτουργίας μετατροπέα μήκους κύματος που ακολουθείται και στην παρούσα εργασία. Φαίνονται τα σήματα, σταθερού πλάτους (probe), το σήμα που φέρει την πληροφορία (pump)

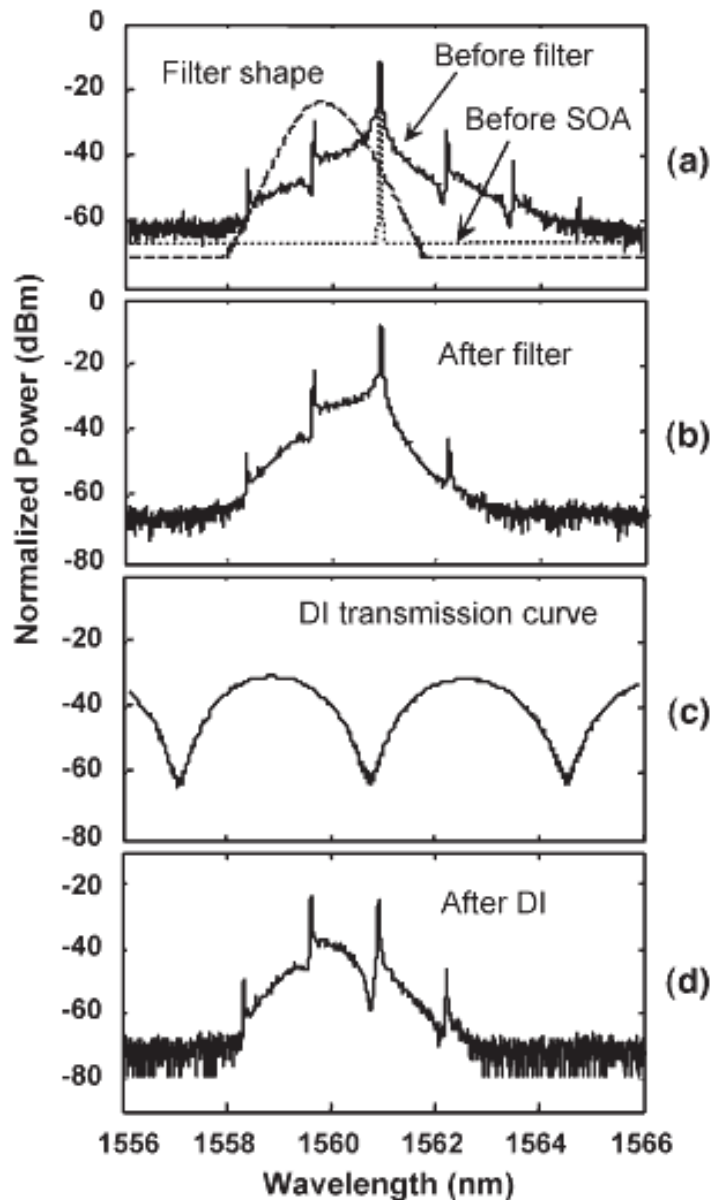
και το εξερχόμενο σήμα πληροφορίας με το αλλαγμένο μήκος κύματος (probe) ίδιο με αυτό του σταθερού πλάτους.[13]

Πιο αναλυτικά, το pump σήμα με σημαντικά υψηλότερη ισχύ από το probe θα προκαλέσει μη γραμμική μετατόπιση φάσης και διαμόρφωση πλάτους μέσω των φαινομένων XPM και XGM στον SOA αντίστοιχα. Έτσι, όχι μόνο θα διαμορφώσει την καμπύλη κέρδους του SOA, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αλλά και το δείκτη διάθλασης και κατεπέκταση τη φάση του probe με μη γραμμικό τρόπο. Εφόσον η πρώτη παράγωγος της φάσης είναι το chirp, φυσικά έπεται ότι το σήμα τώρα παρουσιάζει τετέρισμα (chirp) με διευρυμένο φάσμα. Ειδικότερα το προπορευόμενο τμήμα του probe σήματος που έχει μετατραπεί θα είναι μετατοπισμένο προς τις κόκκινες φασματικές συνιστώσες (red shifted), ενώ το μέρος του παλμού που έπεται θα είναι μετατοπισμένο προς τις μπλε φασματικές συνιστώσες (blue shifted). Το αποτέλεσμα μετά την έξοδο του SOA είναι ένα ενισχυμένο chirped σήμα με διευρυμένο φάσμα, το οποίο εισέρχεται στο βαθυπερατό φίλτρο. Αν το σήμα στην έξοδο του φίλτρου είναι αντεστραμμένο ή μη, εξαρτάται από τη μετατόπιση $\Delta\lambda_{det}$ του φίλτρου σε σχέση με την κεντρική συχνότητα του CW λ_c . Αν επιλεγεί η φασματική περιοχή μακριά από τη κεντρική συνιστώσα του probe σήματος, τότε οδηγούμαστε σε μη αντεστραμμένο σήμα. Διατηρώντας την κεντρική συνιστώσα το σήμα εξέρχεται με αντεστραμμένη μορφή.

Τέλος, στην περίπτωση αντεστραμμένου σήματος στην έξοδο θα πρέπει να αντιστρέψουμε την πολικότητα του σήματος μέσω μια συμβολομετρικής διάταξης DI (Delay Interferometer), ώστε να πάρουμε το μη αντεστραμμένο σήμα. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει να θέσουμε μία από τις συχνότητες αποκοπής του συμβολόμετρου³, όντας περιοδικό φίλτρο, κοντά στην κεντρική συχνότητα όπου η περισσότερη ενέργεια είναι συγκεντρωμένη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η οπτική ισχύς να μειώνεται αρκετά σε αυτό το σημείο όταν περνάει μέσα από το DI. Έτσι παίρνουμε το σήμα μη αντεστραμμένο αλλά σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος από ότι μετά την έξοδό του από το ζωνοπερατό φίλτρο.

Η συγκεκριμένη τεχνική προσφέρει ταχύτητες άνω των 100Gbps, όμως θα πρέπει να αναφέρουμε ότι για να μετρήσουμε την απόδοση θα πρέπει το σήμα να αποπολυπλέκεται σε χαμηλότερες ταχύτητες, καθώς δεν έχουμε τόσο γρήγορα ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης ποιότητας BER tester (Bit Error Rate tester).

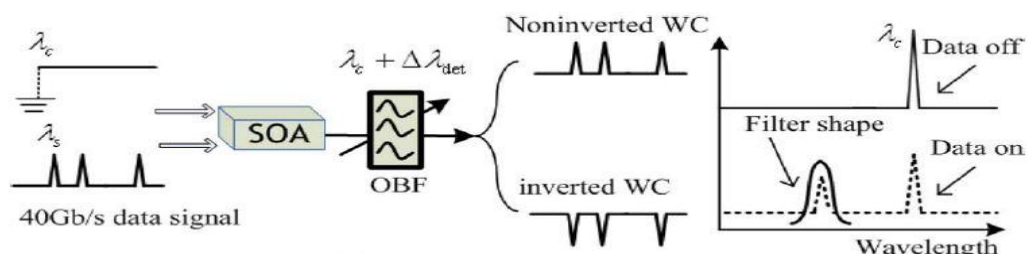
³ Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως notch filter δηλαδή notch = χαράδρα γιατί όντως από την απεικόνιση της συνάρτησης μεταφοράς του φαίνεται σαν να έχει διάφορες χαράδρες.



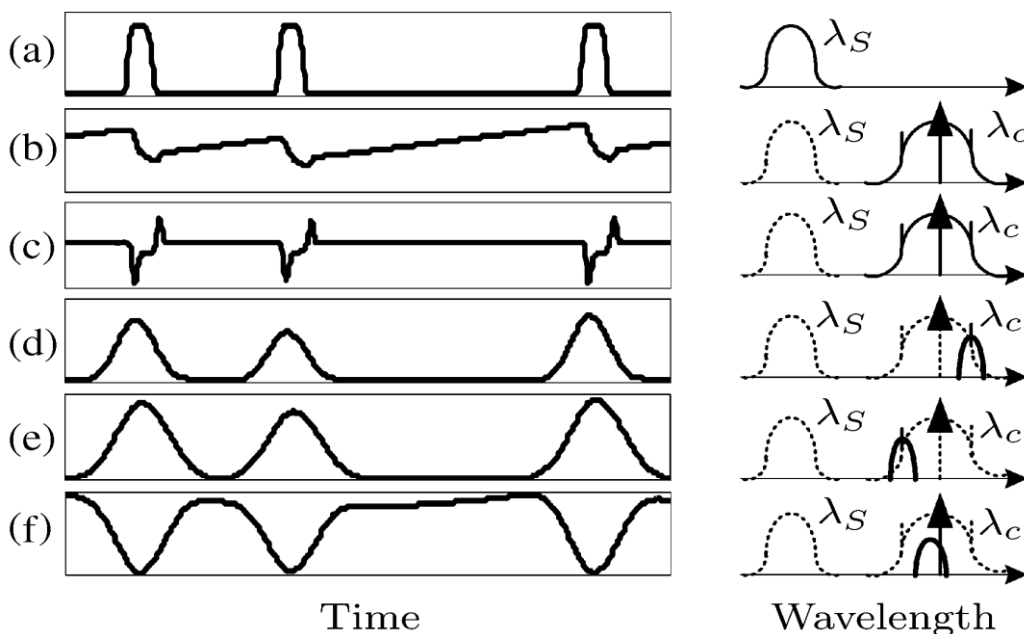
Εικ.26 Φασματικές απεικονίσεις των σημάτων και των συναρτήσεων του φίλτρου και του συμβολόμετρου. Στον οριζόντιο άξονα έχουμε την ισχύ σε dBm και στον οριζόντιο το μήκος κύματος (α) Παρατηρούμε το σήμα probe πως είναι πριν την είσοδο του στον ενισχυτή με τη μία φασματική συνιστώσα του και αντίστοιχα πως έχει διαμορφωθεί στην έξοδο του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή. Επίσης, παρατηρούμε το σχήμα του φίλτρου και πως είναι ελαφρά μετατοπισμένο ως προς την κεντρική συχνότητα του probe σήματος και προς τις μπλε συνιστώσες (μικρότερα λ). (β) Η φασματική απεικόνιση μετά το φίλτρο όπου παραμένει κυρίαρχη η κεντρική συχνότητα και το σήμα εξέρχεται αντεστραμμένο. (γ) Η συνάρτηση μεταφοράς της συμβολομετρικής διάταξης όπου παρατηρούμε ότι μία από τις συχνότητες αποκοπής του (notch) έχει ταυτιστεί με την κεντρική συνιστώσα για να την συμπίψει. (δ) Η έξοδος του μετατροπέα μετά την καταπίεση της κεντρικής συνιστώσας και την αντιστροφή της πολικότητας. [13]

2.4.1 Αντεστραμμένο ή μη αντεστραμμένο σήμα στην έξοδο

Εξαιτίας του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης, ως συνέπεια της προαναφερθείσας μετατόπισης στο φασματικό περιεχόμενο του σήματος probe λ_c στον SOA, όταν το οπτικό σήμα δεδομένων λ_s είναι άσσος το σήμα probe θα διευρυνθεί με επιπλέον φασματικές συνιστώσες. Αν το OBF στην έξοδο του SOA είναι φασματικά μετατοπισμένο ως προς το μήκος κύματος λ_c κατά μία ποσότητα $\pm \Delta\lambda_{det}$, τότε θα επιλεγεί το προπορευόμενο ή το τμήμα του παλμού που έπεται και θα καταπιεστεί το κεντρικό τμήμα του παλμού λ_c . Συνέπεια αυτού είναι και η έξοδος από το OBF να είναι άσσος. Στην περίπτωση που το σήμα δεδομένων λ_s είναι μηδέν, δεν θα υπάρξει στιγμιαία μετατόπιση συχνότητας στο σήμα λ_c και η έξοδος του OBF θα είναι επίσης μηδέν, όπως φαίνεται και στην εικόνα 27 για $\lambda_c + \Delta\lambda_{det}$. Στην περίπτωση που επιλέγεται η φασματική περιοχή που έχει δημιουργηθεί λόγω του φαινομένου XPM τότε το σήμα είναι μη αντεστραμμένο.



Εικ.27 (α) Αρχή λειτουργίας του μετατροπέα για κανονική και αντεστραμμένη πολικότητα (β) Φασματικές αλλαγές στη μη αντεστραμμένη λειτουργία του μετατροπέα. [11]

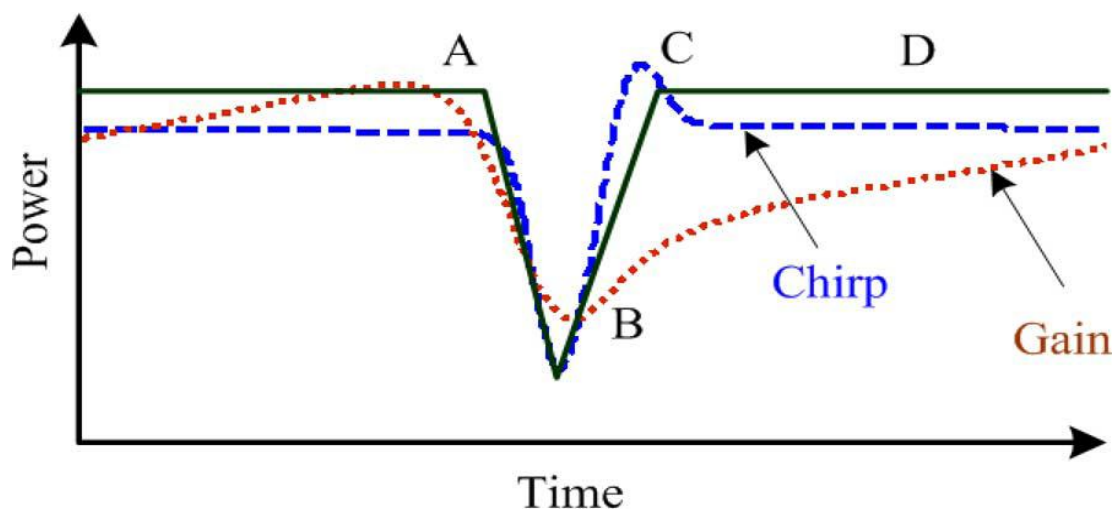


Εικ.28 Σχηματική απεικόνιση της μη αντεστραμμένης και της αντεστραμμένης λειτουργίας του μετατροπέα. (α) Οι εισερχόμενοι παλμοί με RZ κωδικοποίηση. (β) Το σήμα στην έξοδο του ενισχυτή (γ) Το chirp που προήλθε από το XPM. (δ) Η μη αντεστραμμένη κυματομορφή με μετατόπιση προς τα κόκκινα μήκη κύματος (ε) Η μη αντεστραμμένη κυματομορφή με μετατόπιση προς τα μπλε μήκη

κύματος (στ)Η αντεστραμμένη κυματομορφή για μικρή μετατόπιση του φίλτρου προς τα μπλε μήκη κύματος.[12]

Από την άλλη, το φαινόμενο XGM που λαμβάνει χώρα στο SOA από μόνο του χωρίς φιλτράρισμα, θα μας δώσει αντεστραμμένους παλμούς αλλά με αργή ανάκαμψη.Εντούτοις, έρευνες έχουν δείξει ότι αν τοποθετήσουμε το φίλτρο έτσι ώστε να είναι τοποθετημένο ελαφρά προς τις μπλε φασματικές συνιστώσες, η επιτάχυνση της ανάκαμψης είναι δυνατή και χωρίς παρεμβολές του ενός παλμού στον άλλο(pattern effects). Στην περίπτωση αυτή, ο παλμός εξέρχεται αντεστραμμένος αφού το φαινόμενο XGM κυριαρχεί.

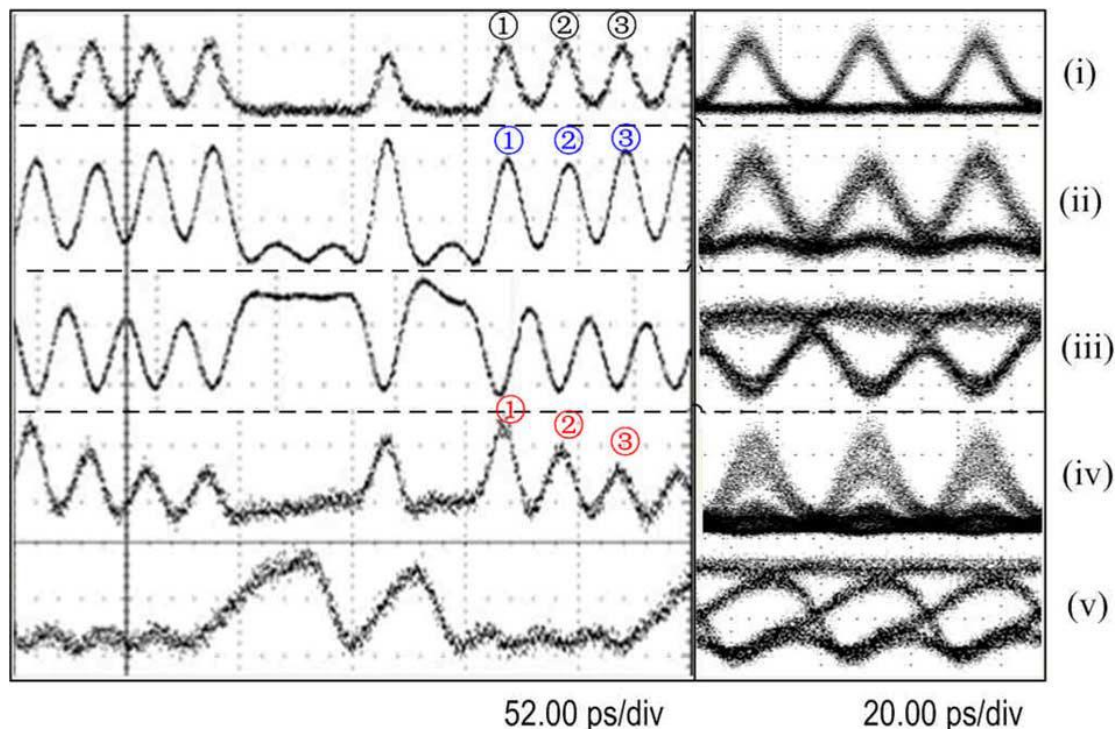
2.4.2 Επιτάχυνση ανάκαμψης καμπύλης κέρδους SOA



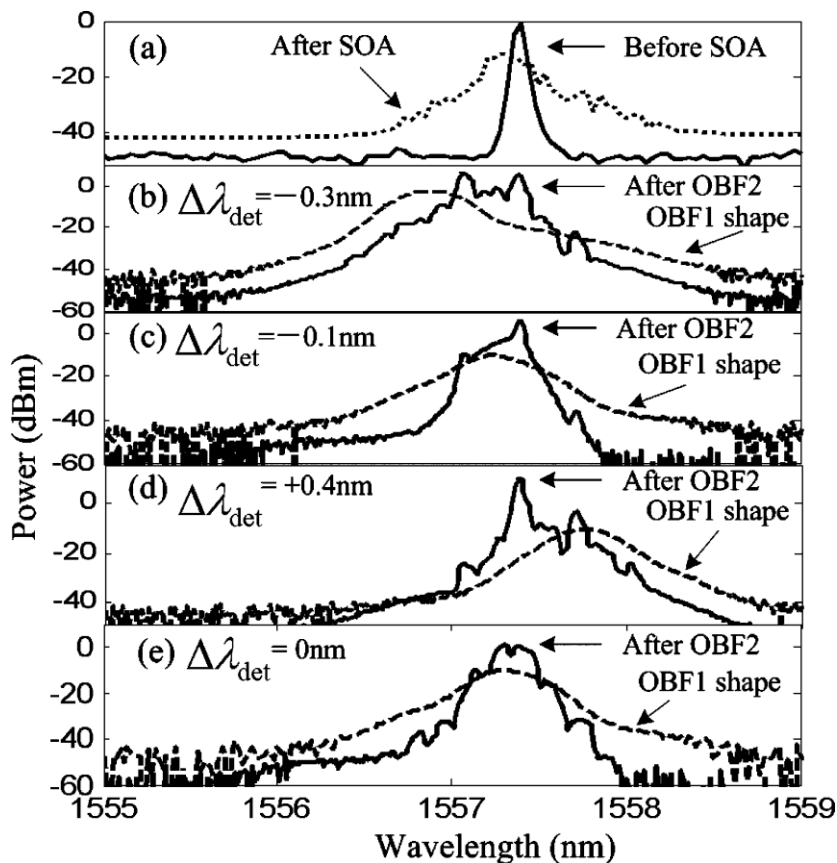
Εικ.29 Απεικόνιση της διαδικασίας επιτάχυνσης της ανάκαμψης του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή.[11]

Η περιγραφή του παραπάνω σχήματος αποτελεί την εξήγηση γιατί μπορεί να επιταχυνθεί η ανάκαμψη του κέρδους του SOA.Οι διακεκομμένες γραμμές, με τελεία και με παύλες είναι το κέρδος και το τετέρισμα του SOA αντίστοιχα. Όταν ο παλμός αρχίζει να διαδίδεται στο σημείο A, οι φορείς της ενεργού περιοχής μειώνονται και το κέρδος αγγίζει το ελάχιστο ποσοστό του στο σημείο B. Στη χρονική περίοδο από το A στο B, το σήμα CW μετατοπίζεται προς τις κόκκινες –“αργές” συχνοτικές συνιστώσες (red chirp). Αποτέλεσμα αυτού, είναι ότι το συχνοτικά μετατοπισμένο ως προς τις μπλε συχνοτικές συνιστώσες OBF, απορρίπτει σε μεγάλο ποσοστό το “αργό” τμήμα του παλμού και ταυτόχρονα περιορίζεται η ισχύς της εξόδου του.Με το πέρας της χρονικής διάρκειας του παλμού, η καμπύλη κέρδους του SOA αρχίζει να ανακάμπτει. Στο σημείο C η καμπύλη που προσδιορίζει το chirp του παλμού, εμφανίζει το μεγαλύτερο ρυθμό μεταβολής της και συνεπώς ο παλμός CW υφίσταται τη μεγαλύτερη μετατόπιση προς τις μπλε – “ταχύτερες” φασματικές συνιστώσες (maximum blue chirp). Εφόσον η κεντρική συχνότητα φιλτραρίσματος του OBF έχει συντονιστεί στη συχνότητα $\lambda_c + \Delta\lambda_{det}$, θα επιλεγεί αποκλειστικά η “γρήγορη” συνιστώσα του παλμού και θα εμφανιστεί στην έξοδό του.Καθώς η ανάκαμψη του κέρδους συνεχίζει, από το χρονικό σημείο C ως το D, η καμπύλη chirp σταθεροποιείται, το chirp του παλμού οδεύει προς το μηδέν και η ισχύς εξόδου του

OBF μειώνεται και πάλι, εφόσον απορρίπτεται ξανά το “αργό” τμήμα του παλμού *CW*. Με αυτόν τον τρόπο, η ισχύς εξόδου του *OBF* παραμένει καθ’ όλη τη διάρκεια ανάκαμψης του *SOA* περίπου σταθερή. Στην περίπτωση που ο *SOA* και το *OBF* θεωρηθούν ως ένα ενιαίο σύστημα, σύμφωνα με τα παραπάνω, έχουμε ταχύτερη ανάκαμψη πλάτους του συστήματος, παρόλο που η καμπύλη κέρδους του *SOA* ανακάμπτει με πιο αργό ρυθμό. Εργαστηριακά ο χρόνος που απαιτείται για την ανάκαμψη του *SOA* ποικίλει, αλλά για να έχουμε ένα μέτρο σύγκρισης, είναι δυνατόν να μειωθεί ο χρόνος με την παραπάνω μέθοδο από 90ps σε 3ps [13] αν και οι τιμές ποικίλλουν αναλόγως με το αν είναι αποτελεσματικό το φιλτράρισμα της εξόδου του ενισχυτή.

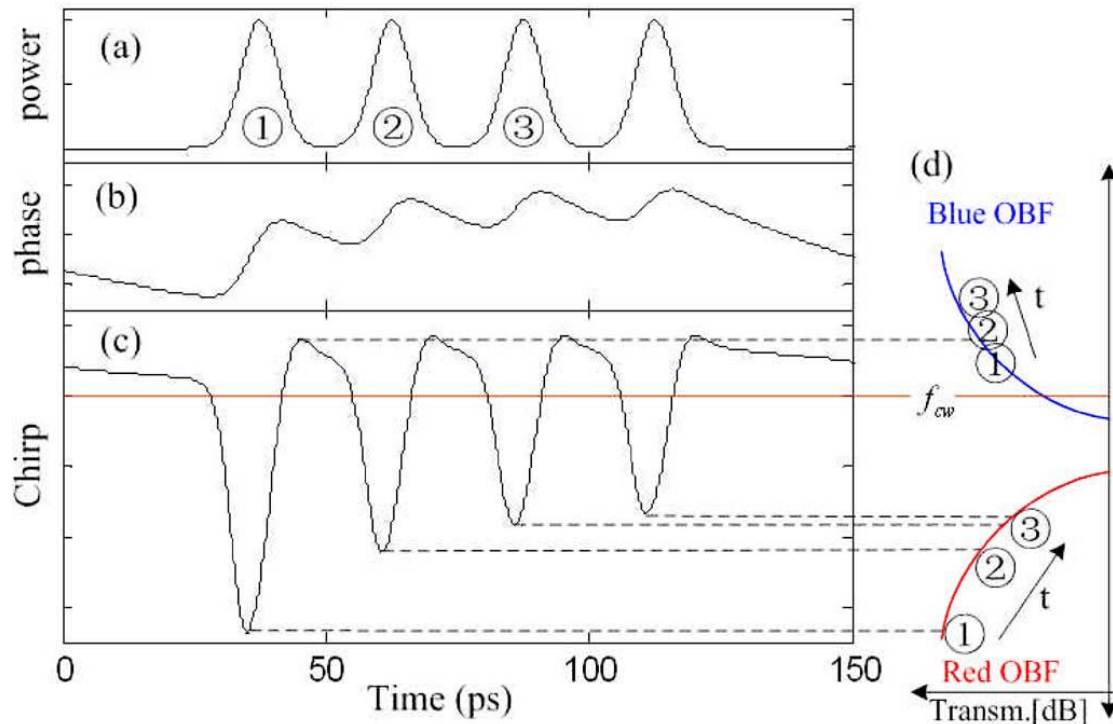


Εικ.30 Κυματομορφές των σημάτων που έχουν μετατραπεί με διαφορετική μετατόπιση φίλτρου σε πειραματικές διατάξεις. (α) Εισερχόμενη κυματομορφή με κωδικοποίηση RZ. (β)-(ε) Εξερχόμενες κυματομορφές από το φίλτρο για μετατοπίσεις $-0,3nm$, $-0,1nm$, $+0,4nm$, $0nm$ αντίστοιχα. Η δεξιά στήλη απεικονίζει τα διαγράμματα ματιού. [11]



Εικ.31 Φασματικές απεικονίσεις για διαφορετικές μετατοπίσεις του φίλτρου. (α) Φάσμα πριν και μετά τον SOA. (β)-(ε) Το φάσμα στην έξοδο του φίλτρου καθώς και το σχήμα του φίλτρου για μετατοπίσεις -0.3nm, -0,1nm, +0.4nm, 0nm αντίστοιχα [11]

Τα πειραματικά αποτελέσματα της εικόνας 30 μπορούν να εξηγηθούν από την ανάλυση στο πεδίο του φάσματος εικόνα 31. [11] Η απεικόνιση δείχνει το φάσμα των σημάτων που έχουν υποστεί μετατροπή μήκους κύματος για διάφορες τιμές της κεντρικής συχνότητας του φίλτρου. Στο α) βλέπουμε το φάσμα του probe σήματος πριν και μετά τον SOA. Στην έξοδο του ενισχυτή, παρατηρούμε ότι εξαιτίας του φαινομένου του XPM το φάσμα έχει διευρυνθεί ασύμμετρα. Στις εικόνες β) έως ε) φαίνεται το φάσμα εξόδου του σήματος για τιμές μετατόπισης του φίλτρου από την λ_c , -0.3, -0.1, +0.4, και 0 nm, αντίστοιχα. Στην εικόνα β) βλέπουμε ότι η πλευρά των μπλε φασματικών συνιστωσών γίνεται κυρίαρχη, με τη βοήθεια της μετατόπισης του φίλτρου προς τις μπλε συνιστώσες και έτσι παρατηρείται ένα καλό διάγραμμα ματιού. Ενώ στην εικόνα δ) το φίλτρο λόγω της μετατόπισής του, δεν είναι δυνατόν να καταπιέσει την κεντρική συνιστώσα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται διαφωνία (crosstalk) μεταξύ της κεντρικής και της κορυφής των κόκκινων συνιστωσών, κάτι που οδηγεί σε παρεμβολές του ενός παλμού στον άλλο (pattern effects) στο πεδίο του χρόνου. Επίσης στις εικόνες β) και δ) η μετατόπιση του φίλτρου είναι διαφορετική για να έχουμε την καλύτερη μετατροπή του μήκους κύματος λόγω του ασύμμετρου φάσματος στην έξοδο του SOA. Εξάλλου η αρνητική κλίση του φίλτρου είναι μεγαλύτερη από την θετική, οπότε το μοντέλο της μπλε μετατόπισης είναι πιο εύκολο να καταπιέσει την κεντρική συνιστώσα, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για την κόκκινη προσέγγιση. Τέλος στην εικόνα γ) η κεντρική κορυφή παραμένει κυρίαρχη και το σήμα είναι αντεστραμμένο, αλλά όπως παρατηρήσαμε και προηγουμένως στην απεικόνιση 25 είναι αρκετά θορυβώδες λόγω της αργής ανάκαμψης του ενισχυτή.



Εικ.32 Η σύγκριση της λειτουργίας του μετατροπέα μεταξύ «μπλε»μετατοπισμένου φίλτρου και «κόκκινου»μετατοπισμένου φίλτρου.(α)Συνεχόμενοι άσσοι (β)Η εξέλιξη της φάσης (γ)Η εξέλιξη του chirp (δ)Ανάλυση με βάση τη συχνότητα και το πλάτος του σήματος ,δηλαδή ισχύς. [11]

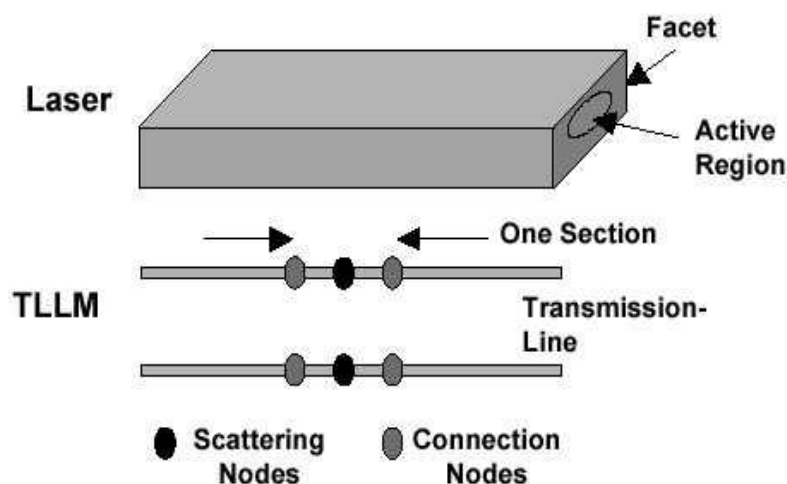
Τέλος στα πειράματα επιλέγεται η λήψη του μη αντεστραμμένου σήματος, με το φίλτρο να έχει μετατοπισμένη κεντρική συχνότητα προς τις “μπλε” φασματικές συνιστώσες και αυτό γιατί παρουσιάζει καλύτερη απόδοση.Η παραπάνω επιλογή, μπορεί να εξηγηθεί με τη βοήθεια των chirp χαρακτηριστικών.Όπως βλέπουμε στο σχήμα 32 [11] στην απεικόνιση α) έχουμε ένα RZ σήμα με τέσσερα συνεχόμενα bit που είναι άσσοι.Το β) μας δείχνει τη μεταβολή της φάσης του probe σήματος στην έξοδο του SOA.Μπορούμε να δούμε ότι η φάση αυξάνεται γρήγορα όσα αναφορά το μπροστινό κομμάτι του παλμού, κάτι που αντιστοιχεί στη μείωση των ενεργών φορέων του SOA.Εντούτοις, η φάση μειώνεται αργά στο κομμάτι του παλμού που έπεται, κάτι που πηγάζει από την ανάκαμψη του SOA.Η εικόνα γ) δείχνει το chirp του probe σήματος και ως γνωστόν είναι η πρώτη παράγωγος της φάσης.Βλέπουμε ότι με συνεχόμενη έγχυση παλμών με λογικό ένα,η μείωση των φορέων μειώνεται όπως και το chirp της κόκκινης κορυφής.Αυτό οδηγεί σε μείωση του πλάτους των παλμών (Εικ 30. κόκκινες κορυφές 1,2,3) εφόσον έχει εφαρμοστεί φιλτράρισμα των κόκκινων φασματικών συνιστωσών και έτσι παρατηρείται το φαινόμενο της διαφωνίας των κορυφών των παλμών (crosstalk) με αποτέλεσμα τη μεταξύ τους παρεμβολή (pattern effects) κατά τη σχεδίαση του διαγράμματος ματιού.Έτσι, βλέπουμε ένα αρκετά θορυβώδες διάγραμμα ματιού βάση της προσέγγισης αυτής.Από την άλλη, μπορεί κανείς να δει ότι η μπλε κορυφή του chirp αυξάνεται ελαφρά και παραμένει σχεδόν σταθερή (Εικ 30. μπλε κορυφές 1,2,3).Αυτό πηγάζει από την αντίστοιχη συμπεριφορά της ανάκαμψης των φορέων του SOA για συνεχόμενους άσσοι.Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η επιλογή των μπλε συνιστωσών από το φίλτρο μας δίνει καλύτερη απόδοση στη μέθοδο μετατροπής μήκους κύματος με μη αντεστραμμένους παλμούς.Για αυτό στη παρούσα εργασία επιλέγεται η μετατόπιση του φίλτρου ελαφρά προς τις μπλε συνιστώσες, για να λάβουμε το αντεστραμμένο σήμα και έπειτα μετατοπίζεται αρκετά το φίλτρο για να λάβουμε το μη αντεστραμμένο σήμα.

3.1 Εισαγωγικά για τις προσομοιώσεις

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας θα ασχοληθούμε με ότι χρειάζεται να ξέρει ο αναγνώστης για την πλατφόρμα προσομοίωσης, όπως ο τρόπος λειτουργίας της, οι γενικές παράμετροι και τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις έγιναν με χρήση της πλατφόρμας Virtual Photonics Incorporated (VPI) και τα εργαλεία VPIcomponentMaker και VPItransmissionMaker έκδοση 8.0.

3.1.1 Η πλατφόρμα VPI

Στο πακέτο VPI, η ανάλυση των οπτικών ημιαγωγικών στοιχείων, όπως είναι τα Lasers και οι SOAs, γίνεται με την χρήση του μοντέλου Transmission-Line Laser Module (TLLM). Το μοντέλο αυτό, επιλύει χρονικά σε πολλές επαναλήψεις τις διαφορικές εξισώσεις της εμπρόσθιας, που μας αφορά, και οπίσθιας διάδοσης οπτικών σημάτων μέσα στον SOA χωρίζοντας την κοιλότητά του σε πολλά διαμήκη τμήματα. Το μήκος του κάθε τμήματος είναι η μέση απόσταση που διανύει το σήμα σε ένα βήμα. Το κάθε βήμα καθορίζεται από τη συχνότητα δειγματοληψίας της προσομοίωσης. Για παράδειγμα διπλασιάζοντας τη συχνότητα δειγματοληψίας, διπλασιάζεται και ο αριθμός των μερών που χωρίζεται ο SOA. Γενικά ανάλογα με την ακρίβεια που επιθυμείται στη προσομοίωση της συμπεριφοράς του SOA τίθεται και η συχνότητα δειγματοληψίας αν και υπάρχει ένα όριο δειγματοληψίας πέρα από το οποίο η μακροσκοπική συμπεριφορά του παραμένει αμετάβλητη. Κάθε τμήμα στο πρόγραμμα αποτελείται από διάφορους κόμβους (nodes) ή καλύτερα το κάθε τμήμα εφαρμόζει διάφορους τελεστές στα οπτικά σήματα που διέρχονται μέσα από αυτό σε κάθε επανάληψη και μιμούνται διάφορες φυσικές λειτουργίες του SOA όπως π.χ. η ενίσχυση, ο θόρυβος και οι απώλειες. Επίσης, οι κόμβοι των διπλανών τμημάτων συνδέονται με γραμμές μεταφοράς, που αντιπροσωπεύουν την καθυστέρηση διάδοσης κυματοδηγού. [16]



Εικ.33 Αναπαράσταση ενός Laser ημιαγωγού και του μοντέλου TLLM δείχνοντας έναν κόμβο μέσα σε ένα τμήμα του μοντέλου [16]

3.1.2 Γενικές παράμετροι της προσομοίωσης

Εκτός από τα στοιχεία που απαιτούνται για την προσομοίωση των πειραμάτων μας, χρειάζεται να ορίσουμε και κάποιες γενικές παραμέτρους (global parameters), που διέπουν τις μεταβλητές των στοιχείων σε όλο μοντέλο εκτός αν αυτές έχουν δεχθεί καθορισμένη τιμή από το χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που μας αφορούν είναι :

Time window

Θέτει την περίοδο όπου αναπαρίσταται ένα block από δεδομένα, δηλαδή πιο απλά τη διάρκεια ενός block. Αυτή η παράμετρος ουσιαστικά καθορίζει την ποιότητα των φασματικών απεικονίσεων αλλά και των μετρήσεων της ποιότητας των σημάτων όπως αναλύονται από τους BER (Bit Error Rate) tester. Βέβαια, όσο επιθυμούμε καλύτερη ποιότητα, έχουμε και πιο χρονοβόρες προσομοιώσεις. Αν το δούμε από μαθηματικής άποψης, είναι ο λόγος M/B όπου M είναι ο αριθμός των bits σε κάθε block που έχει μορφή 2^m (m ακέραιος) και B ο ρυθμός δειγματοληψίας σε Hz.

Boundary conditions

Αυτή η παράμετρος μας δίνει τη δυνατότητα επιλογής της πληροφορίας σε ένα block αν θα είναι περιοδική, απεριοδική ή συνδυασμός των δύο.

Bit rate default

Καθορίζει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή πόσα bit θα έχουμε ανά μονάδα χρόνου. Κάθε στοιχείο του μοντέλου που έχει στη μεταβλητή Bit rate την τιμή default, λαμβάνει την ανωτέρω τιμή. Μπορούμε όμως να ορίσουμε σε όσα στοιχεία επιθυμούμε κάποια άλλη ανεξάρτητη τιμή.

Sample rate default

Αποτελεί το ρυθμό δειγματοληψία και είναι ο πολλαπλασιασμός $S*B$, όπου B ρυθμός μετάδοσης και S αριθμός δειγμάτων ανά bit. Το S θα πρέπει να έχει τη μορφή 2^s , όπου s ακέραιος. Μεγάλες τιμές του S μας δίνουν περισσότερη ακρίβεια στους υπολογισμούς με BER tester γιατί κάθε bit αναπαριστάται από περισσότερα δείγματα καθώς επίσης προσομοιώνουμε και μεγαλύτερο οπτικό εύρος. Η χαμηλότερη τιμή του είναι 8 δείγματα ανά bit. Η γενική μεταβλητή Sample rate default θα εφαρμοστεί στα στοιχεία που έχουν την επιλογή default στην αντίστοιχη μεταβλητή τους. Τέλος, όπως και πριν, είναι δυνατή η ρύθμιση τιμών από το χρήστη σε όποια στοιχεία επιθυμούμε.

Sample Mode Bandwidth

Η μεταβλητή αυτή επιτελεί την ίδια ακριβώς λειτουργία με την παραπάνω, μόνο που βρίσκει εφαρμογή σε samples και όχι σε blocks.

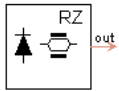
Sample Mode Center Frequency

Θέτει μία γενική κεντρική συχνότητα δειγματοληψίας για όλα τα στοιχεία που έχουν αυτή ως τιμή τους στην αντίστοιχη μεταβλητή. Χρησιμοποιείται για μέθοδο που λειτουργεί με samples, όπως καταδεικνύει και το όνομά της.

Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχει ένα τεράστιος αριθμός μεταβλητών, οι οποίες δεν αναφέρονται σκοπίμως και δεχόμαστε ότι είναι στην default τιμή τους.

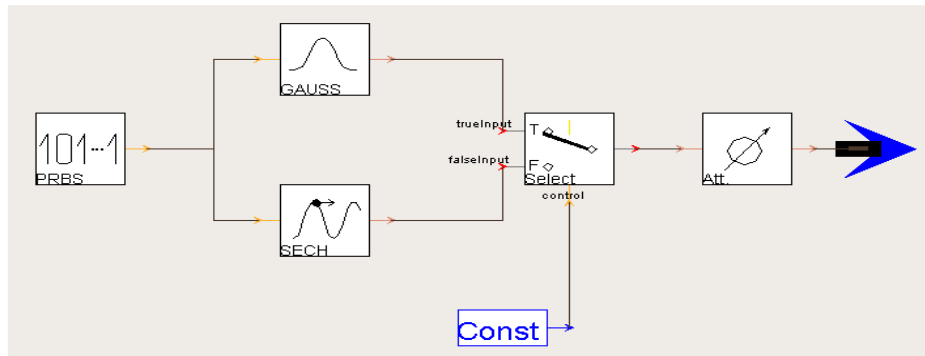
3.1.3 Στοιχεία των προσομοιώσεων

Για τη διενέργεια των προσομοιώσεων έγινε χρήση των ακόλουθων στοιχείων του VPI τα οποία αναλύουμε με τη σειρά που εμφανίζονται στις υλοποιήσεις. Επίσης, επεξηγούμε τις διάφορες μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν και όσες δεν αναφέρονται έχουν την default τιμή τους ή την λαμβάνουν από τις γενικές παραμέτρους.



Tx Pulse : Μέσω αυτού του στοιχείου παράγεται μια παλμική ακολουθία που περιέχει Gaussian ή υπέρ-Gaussian ή sechant παλμούς με RZ κωδικοποίηση. Αποτελείται από μία γεννήτρια PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) ακολουθίας, μία γεννήτρια Gaussian ή υπέρ-Gaussian παλμών, μία γεννήτρια sechant παλμών, ένα διακόπτη που ανάλογα με τη ρύθμιση επιλέγει τον τύπο των παλμών και έναν attenuator που καθορίζει την ισχύ των παλμών στα επιθυμητά επίπεδα. Οι μεταβλητές που μας αφορούν είναι :

PulseShape	Το είδος των παλμών που εξέρχονται από τη γεννήτρια
SampleRate	Το εύρος του σήματος που δημιουργείται
BitRate	Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων
EmissionFrequency	Καθορίζει εάν θα παράγει ξεχωριστά δείγματα (samples) ή blocks δειγμάτων
PeakPower	Το μέγιστο οπτικής ισχύος κάθε παλμού
FWHM (Full Width at Half Maximum)	Η διάρκεια FWHM του παλμού, βρίσκοντας το εύρος του παλμού όταν αυτό έχει πέσει στη μισή του ισχύ.
PRBS_Type	Ο τύπος της prbs ακολουθίας
PRBS_Order	Ο βαθμός της ακολουθίας k που καθορίζει την περίοδο της π.χ. 2^{k-1}

Πίνακας 1 Μεταβλητές της γεννήτριας PRBS.**Εικ.34** Δομή του στοιχείου Tx Pulse

Σε αυτό το σημείο,θα πρέπει να αναφέρουμε τι είναι κωδικοποίηση RZ και τι ακολουθία PRBS, καθώς είναι βασικές έννοιες του παραπάνω στοιχείου και γενικά της υλοποίησης.

Κωδικοποίηση RZ (Return to Zero)

Η RZ είναι μια δυαδική κωδικοποίηση κατά την οποία τα 1 αναπαρίστανται με μια δεδομένη τιμή τάσεως (συνήθως θετική) και τα 0 με μια άλλη (συνήθως αρνητική), ενώ υπάρχει ουδέτερη κατάσταση. Το 1 αναπαριστάται από την κατάσταση ON του laser μόνο για τη μισή διάρκεια του bit, ενώ στην άλλη μισή αυτό είναι OFF. [3][10]

Πλεονεκτήματα

Δυνατότητα για πολυπλεξία OTDM και επίτευξη υψηλού ρυθμού μετάδοσης (μέχρι 640 Gb/s) σε ένα μόνο κανάλι.

Διατήρηση χρονισμού σε μεγάλες ακολουθίες '1'.

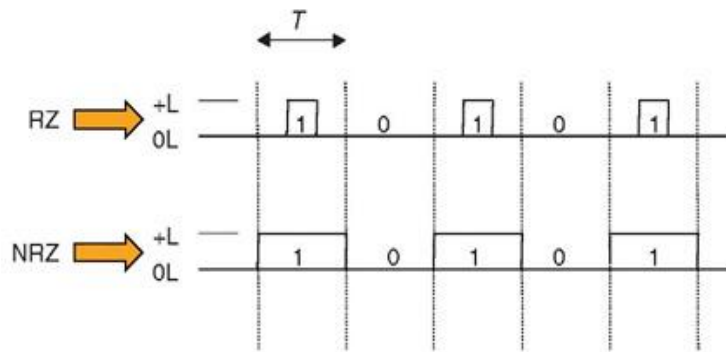
Μεγαλύτερη ανοχή σε διασπορά.

Μειονεκτήματα

Πολυπλοκότητα στον πομπό.

Μεγαλύτερο φασματικό περιεχόμενο για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης.

Πιο έντονα μη γραμμικά φαινόμενα.



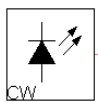
Εικ.35 Κωδικοποίηση RZ και NRZ. [10]

Ακολουθία PRBS (Pseudo Random Binary Sequence)

Η δημιουργία της παλμοσειράς εξαρτάται άμεσα και από την ακολουθία των δυαδικών ψηφίων που θα κωδικοποιηθούν. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιείται η PRBS, που είναι μια ψευδοτυχαία ακολουθία από δυαδικά ψηφία. Τυχαία, με την έννοια ότι η τιμή κάθε ψηφίου είναι ανεξάρτητη από τις τιμές των υπολοίπων και προσδιορίζεται από την πιθανότητα που έχει οριστεί να είναι άσσος ή μηδέν. Έτσι, αν η πιθανότητα αυτή είναι 50% τότε η επιλογή μεταξύ άσσου και μηδενικού πραγματοποιείται με την εκτέλεση ενός πειράματος Βερνούλι. Ακόμα είναι ψευδής, αφού είναι ντετερμινιστική και μετά από N ψηφία επαναλαμβάνει τον εαυτό της, κάτι που δεν συμβαίνει φυσικά στις πραγματικές δυαδικές ακολουθίες. Τα N ψηφία αυτά ορίζονται ως $N=2^k-1$, όπου το k ονομάζεται τάξη της PRBS.

Η PRBS είναι μια ακολουθία που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις τηλεπικοινωνίες και στις προσομοιώσεις, καθώς προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό τις πραγματικές συνθήκες αποστολής δεδομένων. Στην πράξη, δίνει μια περιοδική παλμοσειρά αφού πρόκειται για ντετερμινιστική ακολουθία δυαδικών ψηφίων, της οποίας η περίοδος υπολογίζεται από τον τύπο:

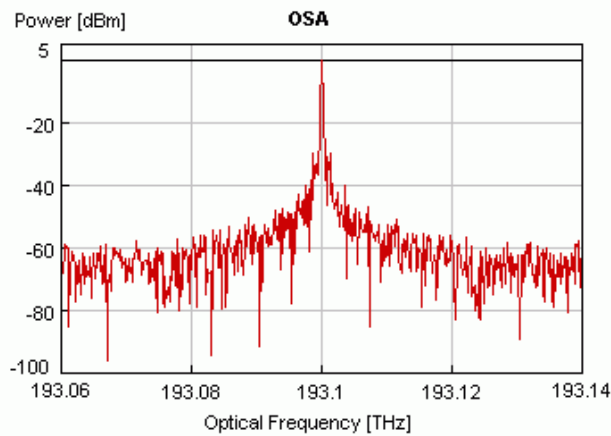
$$T = \frac{1}{R} * (2^k - 1) \text{ όπου } R \text{ ο ρυθμός μετάδοσης και } k \text{ η τάξη της. [25]}$$



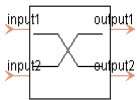
Continuous Wave Laser : Προσομοιώνει μια πηγή laser που παράγει ένα σήμα σταθερής ισχύος στο πεδίο του. Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τη λειτουργία του είναι η συχνότητα εκπομπής (EmissionFrequency) και η μέση ισχύς του (AveragePower). Οι μεταβλητές του παραπάνω στοιχείου, που μας ενδιαφέρουν στα συγκεκριμένα πειράματα, είναι :

EmissionFrequency	Η συχνότητα εκπομπής του laser
AveragePower	Η ισχύς του σήματος στην έξοδο
OutputDataType	Καθορίζει εάν θα παράγει ξεχωριστά

Πίνακας 2 Μεταβλητές στοιχείου cw laser



Εικ.36 Το φάσμα της cw πηγής με τη μία αρμονική. Η παραπάνω πηγή ακτινοβολεί στα 193.1 THz (κεντρική συχνότητα) και έχει πλάτος ισχύος 5 dBm.



X Coupler : Προσομοιώνει έναν οπτικό συζεύκτη, ο οποίος ενώνει και διαχωρίζει την ισχύ των οπτικών σημάτων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν φυσικός διαχωριστής δύο σημάτων για έλεγχο σήματος. Η

παράμετρος που μας αφορά είναι :

CoupleFactor

Καθορίζει το ποσό ισχύος στις δύο εξόδους του. Για παράδειγμα αν έχουμε 0.5 couple factor (περίπτωση συζεύκτη 3dB) τότε η ισχύς του σήματος χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη στις εξόδους του.

Πίνακας 3 Μεταβλητή couple factor συζεύκτη



Ground : Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιείται για να τερματίσει τις ακάλυπτες θύρες εξόδου κάθε στοιχείου.



Null Source : Αντίστοιχα με το παραπάνω, το στοιχείο αυτό, χρησιμοποιείται για τις αχρησιμοποίητες εισόδους, όπως π.χ. των στοιχείων SOA και MZI.

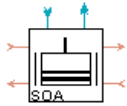


DC Source : Παράγει έναν ηλεκτρικό παλμό σταθερού πλάτους και ουσιαστικά είναι το στοιχείο τροφοδοσίας του SOA. Η μεταβλητή που μας ενδιαφέρει είναι :

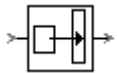
Amplitude

Το μέγεθος του DC σήματος εξόδου

Πίνακας 4 Μεταβλητή amplitude του στοιχείου τροφοδοσίας του SOA



Semiconductor Optical Amplifier : Προσομοιώνει τη λειτουργία του ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή. Όπως φαίνεται και από το σχήμα στα αριστερά, διαθέτει τρεις εισόδους και τρεις εξόδους. Οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν δίνονται παρακάτω στην **απεικόνιση 56**. Όπως γίνεται εμφανές από το στοιχείο DC Source οι μπλε εισόδους και έξοδος είναι για ηλεκτρική παροχή, ενώ οι υπόλοιπες εισόδους και έξοδοι είναι για οπτικά σήματα. Γενικά αυτή η σύμβαση χρησιμοποιείται στην πλατφόρμα VPI.



Converter Sample To Block : Μετατρέπει ένα σήμα τύπου Sample (δείγμα) σε Block (μπλοκ δειγμάτων).



ChopSignalOpt : Αποκόπτει ανεπιθύμητα παροδικά μεταβατικά φαινόμενα κατά τη διάρκεια επαναφοράς στην σταθερή κατάσταση. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιείται για να εμφανιστεί το αποτέλεσμα του σήματος στην τελική του μορφή. Το στοιχείο αυτό δέχεται οπτικά ή ηλεκτρικά σήματα και βγάζει στην έξοδό του ένα σήμα. Τα μεγέθη που μας αφορούν είναι :

DataType	Μας δίνεται η δυνατότητα επιλογής εισόδου ανάμεσα σε samples ή blocks
Iterations	Αριθμός επαναλήψεων. Στην περίπτωση μας όπου έχουμε ως είσοδο blocks, αφού έχει προηγηθεί ο μετατροπέας Sample To Block , το iterations καθορίζει τον αριθμό των εισερχόμενων blocks ώστε το στοιχείο να αποδώσει μία έξοδο.

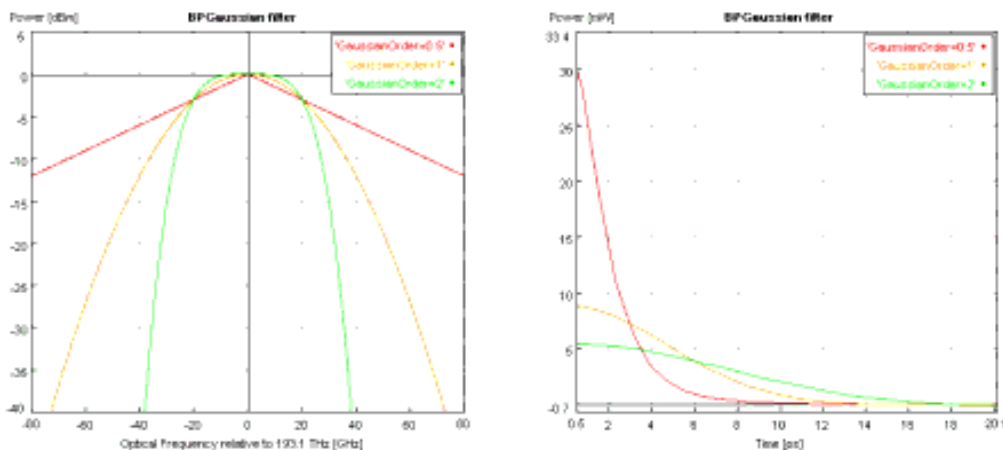
Πίνακας 5 Μεταβλητές στοιχείου chop signal



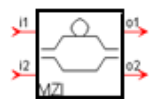
Optical Filter (FilterOpt) : Το στοιχείο αυτό προσομοιώνει οπτικά μοντέλα φίλτρων. Μπορεί να προσομοιώσει ζωνοπερατά, χαμηλοπερατά και άλλα φίλτρα με διάφορες βασικές συναρτήσεις μεταφοράς όπως Gaussian, Bessel, Chebyshev κτλ. Είναι σε θέση να δεχθεί και συνάρτηση μεταφοράς ως είσοδο από τον χρήστη. Μέσα από μία πληθώρα παραμέτρων, αυτές που μας ενδιαφέρουν άμεσα είναι :

FilterType	Τύπος του φίλτρου
TransferFunction	Συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου
Bandwidth	Το εύρος συχνοτήτων όπου επιτρέπει τη διέλευση αρμονικών
CenterFrequency	Η κεντρική συχνότητα του φίλτρου. Η τιμή της οποίας μας δίνει και την ανάλογη μετατόπιση (detuning) του φίλτρου από την κεντρική συχνότητα της cw πηγής.

Πίνακας 6 Μεταβλητές οπτικού φίλτρου



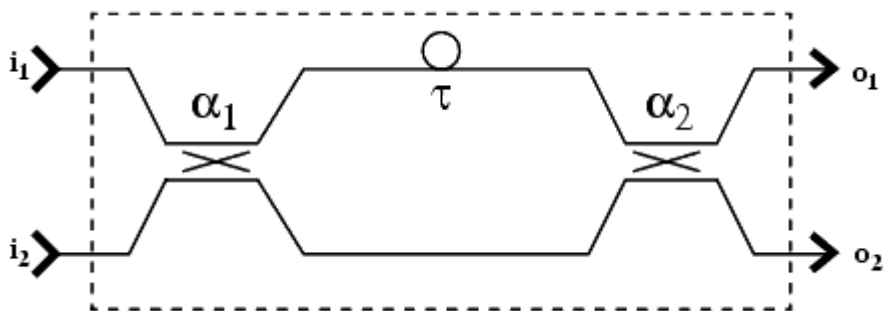
Εικ.37 Συναρτήσεις μεταφοράς και απόκριση συχνότητας για διάφορες τιμές ενός βαθυπερατού gaussian φίλτρου.



Filter Mach-Zehnder Interferometer : Είναι μια συμβολομετρική διάταξη Mach-Zehnder. Αποτελείται από δύο X Coupler και μία γραμμή καθυστέρησης στον ένα βραχίονα. Η καθυστέρηση που υπόκειται το οπτικό σήμα στον πάνω βραχίονα οδηγεί σε διαφορετική ολίσηση φάσης των σημάτων στον κάθε βραχίονα. Οι μεταβλητές που μας αφορούν είναι :

CoupleFactor1	Καθορίζει το ποσοστό ισχύος στις εξόδους του πρώτου συζεύκτη
CoupleFactor2	Καθορίζει το ποσοστό ισχύος στις εξόδους του δεύτερου συζεύκτη
DelayTime	Η καθυστέρηση που εισάγει η γραμμή καθυστέρησης
PhaseShift_Upper	Η στροφή φάσης που εισάγει ο πάνω βραχίονας
PhaseShift_Lower	Αντίστοιχα η ολίσθηση φάσης που προκαλεί ο κάτω βραχίονας.

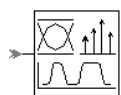
Πίνακας 7 Μεταβλητές συμβολόμετρου Mach-Zehnder



Εικ.38 Μια εσωτερική ματιά στο στοιχείο **Mach-Zehnder Interferometer**

Τέλος, η συνάρτηση μεταφοράς του συμβολόμετρου είναι :

$$(1) \quad T(f) = \begin{pmatrix} \sqrt{1-\alpha} & j\sqrt{\alpha} \\ j\sqrt{\alpha} & \sqrt{1-\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-j2\pi f\tau} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\phi_{\text{Upper}}} & 0 \\ 0 & e^{j\phi_{\text{Lower}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{1-\alpha} & j\sqrt{\alpha} \\ j\sqrt{\alpha} & \sqrt{1-\alpha} \end{pmatrix}$$



SignalAnalyzer : Είναι ένας οπτικός και ηλεκτρικός αναλυτής σημάτων. Παρέχει διάφορες λειτουργίες τόσο στο πεδίο του φάσματος, όσο και του χρόνου σχετικά με την απεικόνιση και επεξεργασία των σημάτων. Επιπρόσθετα, μας δίνει τη δυνατότητα απόκτησης του διαγράμματος ματιού ενός σήματος, παρέχοντας έτσι ένα μέτρο για την ποιότητα. Το διάγραμμα ματιού παράγεται με την υπέρθεση των bits ενός σήματος.

4.1 Προσομοιώσεις

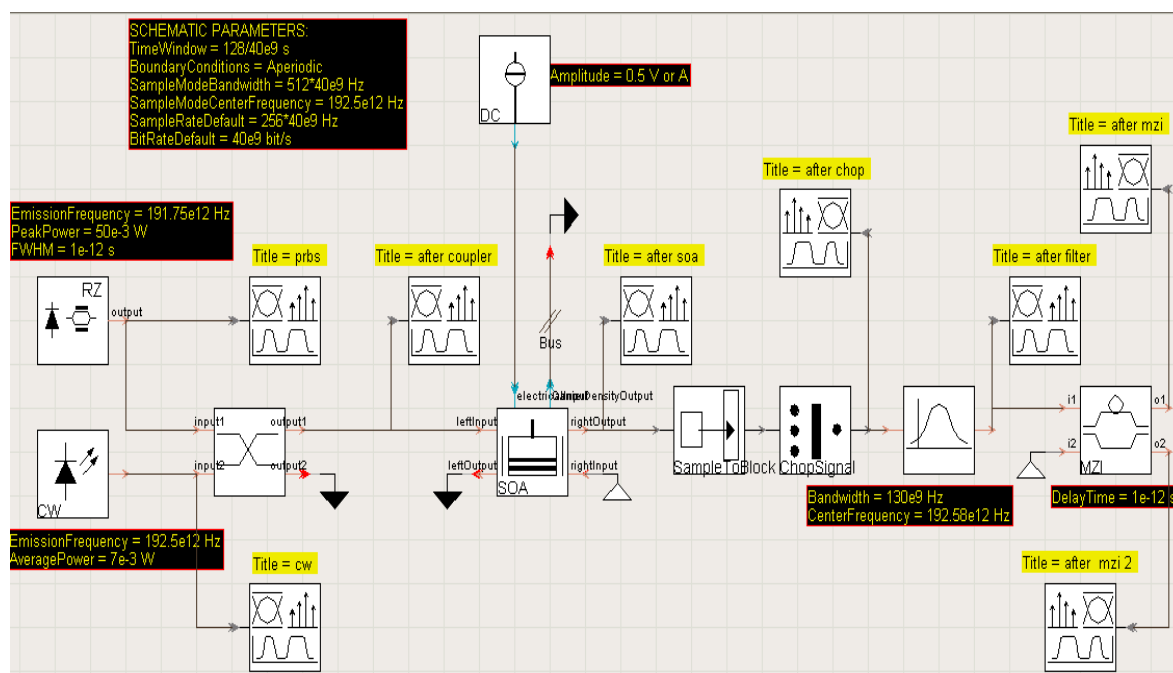
Στο κεφάλαιο αυτό, θα προβάλλουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της τεχνικής της μετατροπής του μήκους κύματος, όπως αναλύθηκε παραπάνω με SOA-OBF-DI (inverted signal) ή SOA-OBF (non-inverted). Η μελέτη και ο σχολιασμός των κυματομορφών θα γίνει σταδιακά και με κάθε λεπτομέρεια.

4.1.1 Προσομοίωση της λειτουργίας μετατροπεία μήκους κύματος σε ταχύτητα 40Gbps

Αρχικά, παρουσιάζουμε το μοντέλο προσομοίωσης για ρυθμό μετάδοσης 40Gb/s, το οποίο χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, η μετατόπιση του φίλτρου από την κεντρική συχνότητα του ροοβε σήματος είναι ελαφρά προς τις μπλε αρμονικές διατηρώντας την κεντρική συχνότητα του cw σήματος. Έτσι, λαμβάνουμε στην έξοδο του φίλτρου ένα αντεστραμμένο σήμα και μέσω μιας συμβολομετρικής διάταξης αλλάζουμε την πολικότητά του, ώστε να λάβουμε το τελικό μη αντεστραμμένο σήμα, το οποίο έχει υποστεί μετατροπή μήκους κύματος. Στο δεύτερο κομμάτι, η μετατόπιση είναι ακόμα πιο μεγάλη, περίπου 4 φορές μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα στην έξοδο του φίλτρου να λάβουμε το μη αντεστραμμένο σήμα κατευθείαν. Με αυτόν τον τρόπο, επιλέγουμε τις καινούριες αρμονικές που δημιουργούνται μακριά από την κεντρική συχνότητα και την καταπιέζουμε χωρίς τη χρήση επιπλέον συμβολομετρικής διάταξης.

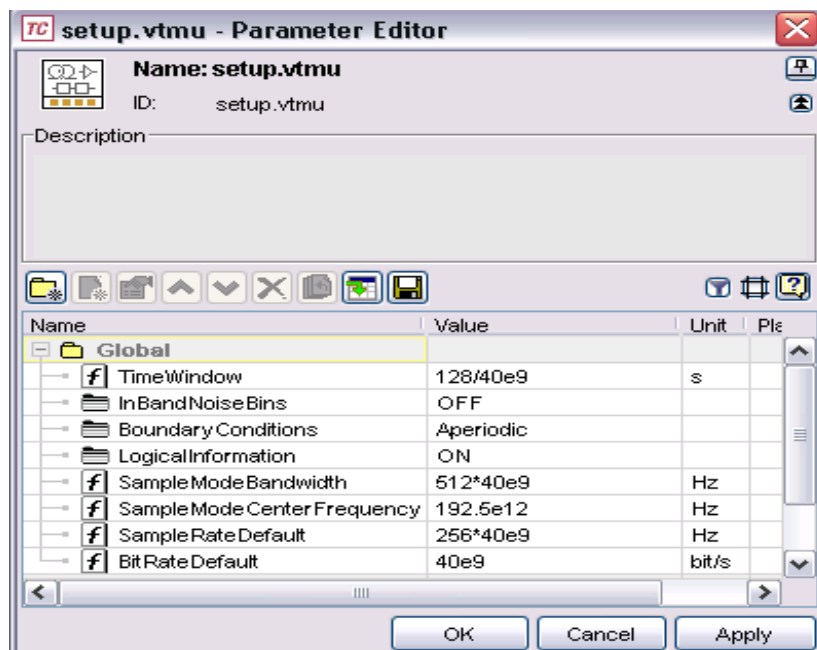
4.1.1.1 Προσομοίωση SOA-OBF-MZI και ελαφριά μετατόπιση του φίλτρου προς τις μπλε αρμονικές

Παρακάτω απεικονίζεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για αυτήν την προσομοίωση:



Εικ.39 Μοντέλο προσομοίωσης SOA - OBF - MZI σε ρυθμό μετάδοσης 40Gbps και για μικρή μετατόπιση του φίλτρου.

Αρχικά ορίσαμε τις γενικές μεταβλητές για το μοντέλο :



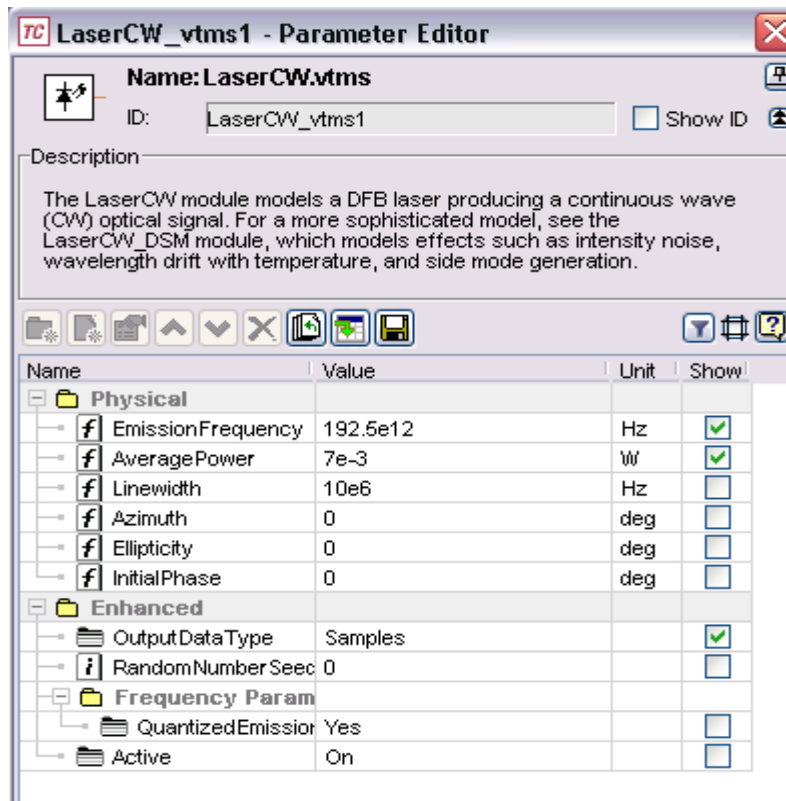
Εικ.40 Γενικές μεταβλητές για ρυθμό μετάδοσης 40Gbps.

Μέσα από μια διαπραγμάτευση ποιότητας και χρόνου προσομοίωσης, ορίσαμε τις παραπάνω τιμές για τις γενικές παραμέτρους του συστήματος. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η επιλογή της κεντρικής συχνότητας δειγματοληψίας στα 192,5THz δεν είναι τυχαία. Αυτό έγινε ουσιαστικά για να κεντράρουμε το παράθυρο των απεικονίσεων μας στην κεντρική συχνότητα του σήματος σταθερού πλάτους cw, έτσι ώστε να δούμε καλύτερα τη μετατόπιση που θα έχει το φίλτρο σε σχέση με αυτή.

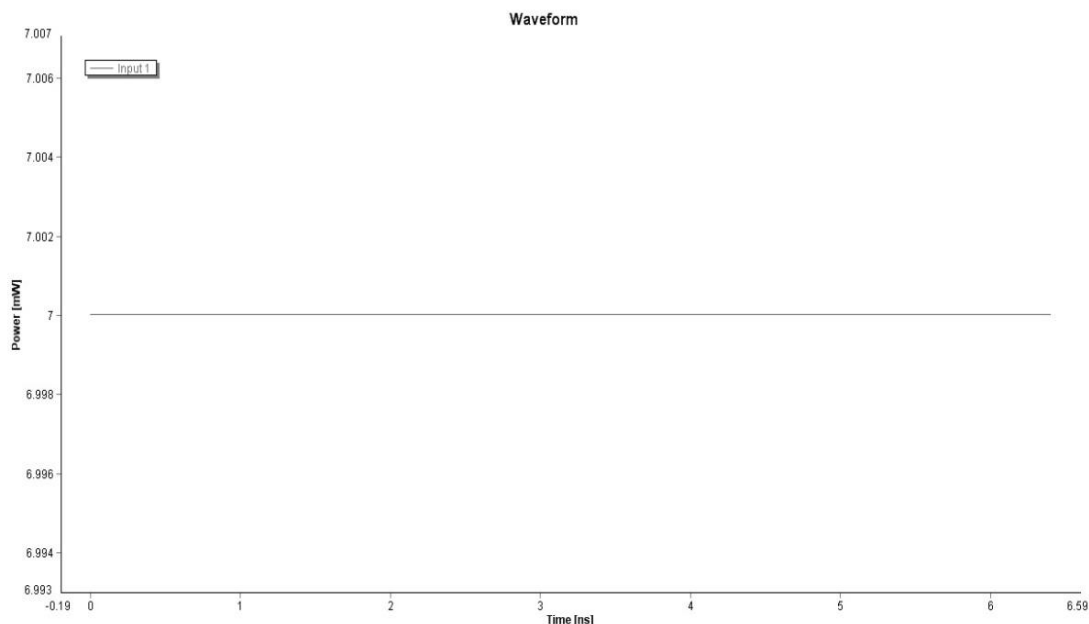
Αφού ορίσαμε και τις γενικές μεταβλητές, θα προχωρήσουμε στην προβολή και τον σχολιασμό των βημάτων της προσομοίωσης της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος σε ταχύτητα 40Gb/s.

4.1.1.1.1 Σήμα μετά την πηγή σήματος σταθερού πλάτους

Αρχικά χρησιμοποιήσαμε ένα cw laser για τη δημιουργία ενός σταθερού σήματος στο χρόνο με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :



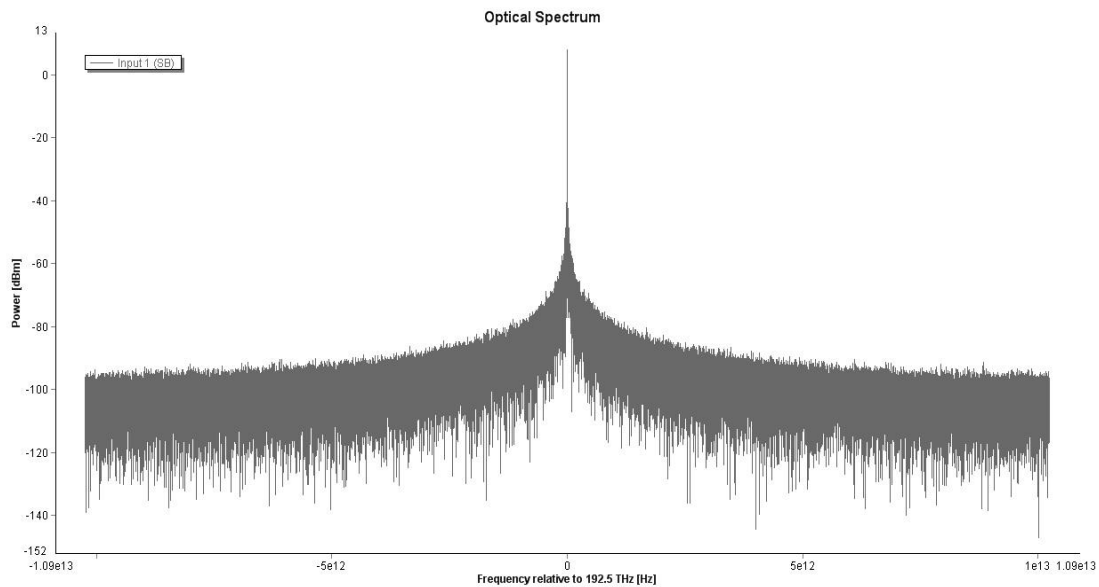
Εικ.41 Τιμές μεταβλητών στοιχείου cw laser



Εικ.42 Έξοδος cw laser στο πεδίο του χρόνου.

Στην ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, παρατηρούμε τη σταθερή συνιστώσα με επίπεδο ισχύος 7mW. Στη φασματική περιγραφή του σήματος στην έξοδο του cw, βλέπουμε τη μία και μοναδική συνιστώσα σε συχνότητα στα 192.5THz και ισχύς περίπου 8,45dBm($10\log 7\text{mW}$). Στην πραγματικότητα βέβαια, δεν είναι μία μόνο κεντρική συχνότητα αλλά φάσμα έστω και απειροελάχιστο, αλλά πάντα δεχόμαστε

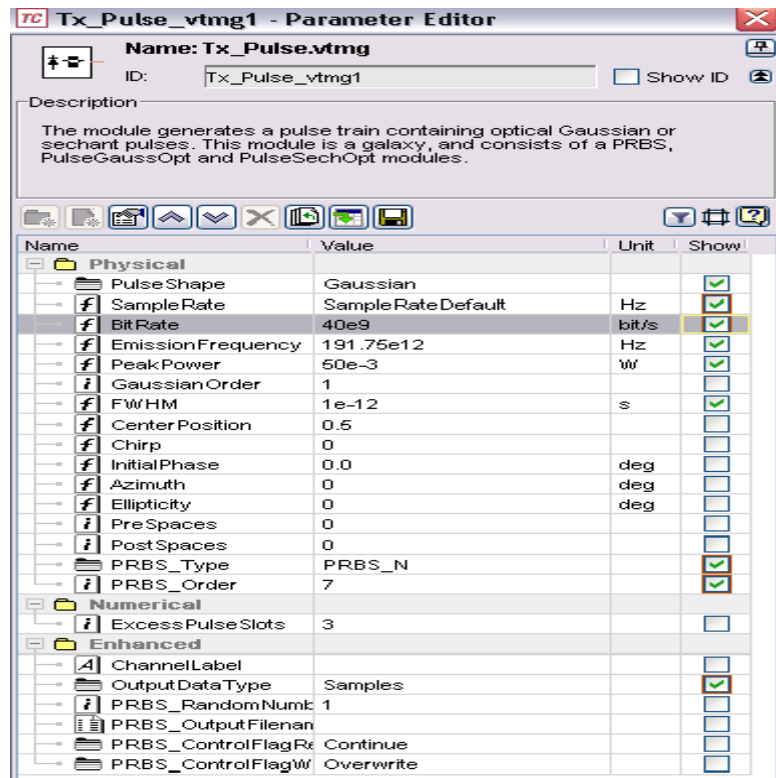
να μιλάμε εκ μέρους αυτού του φάσματος και των ιδιοτήτων του μέσω της φέρουσας συχνότητας.



Εικ.43 Φασματική περιγραφή εξόδου laser σταθερού πλάτους.

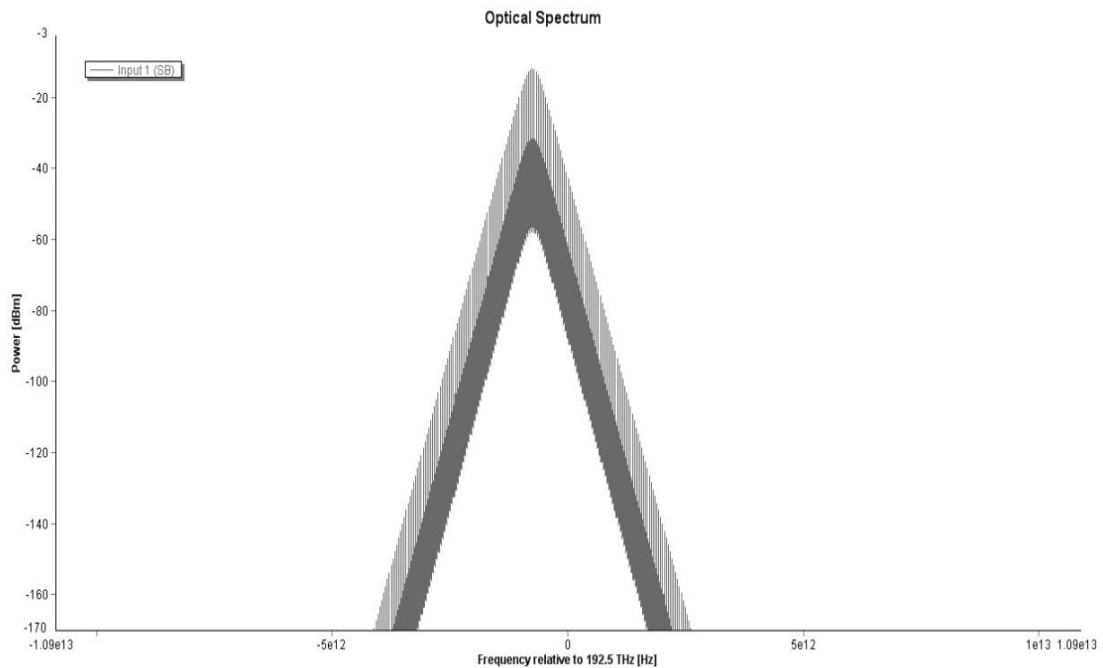
4.1.1.1.2 Σήμα μετά την γεννήτρια παλμικής ακολουθίας PRBS

Για την παραγωγή του σήματος ελέγχου κάναμε χρήση μιας γεννήτρια παλμικής ακολουθίας PRBS, που δημιουργεί γκαουσιανούς παλμούς με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :



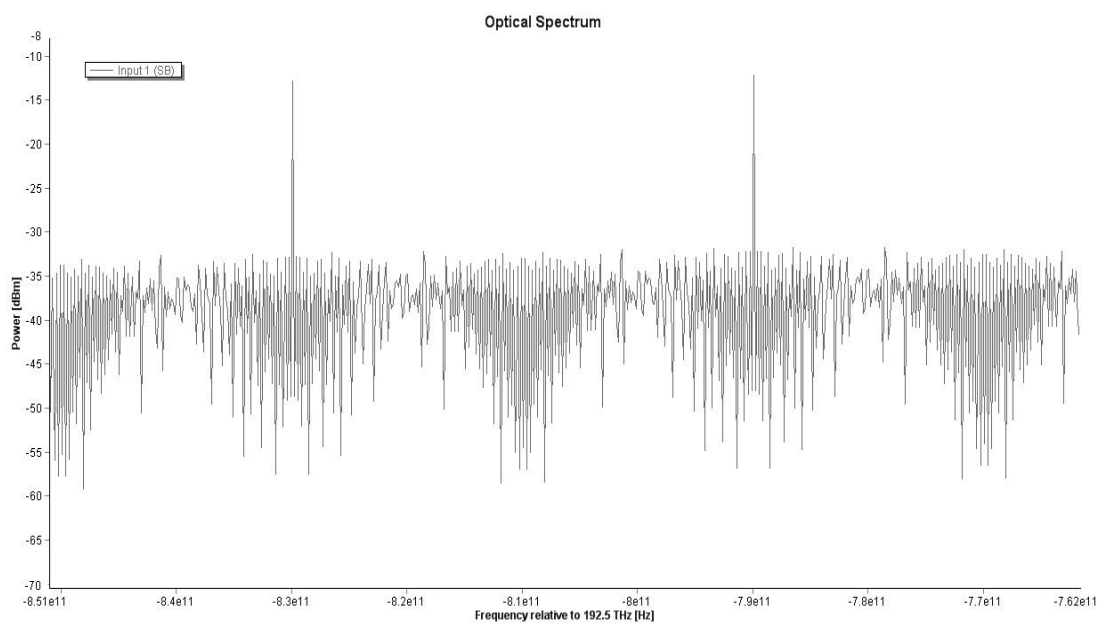
Εικ.44 Τιμές μεταβλητών γεννήτριας PRBS.

Το φάσμα του διαμορφωμένου σήματος με φέρουσα συχνότητα 191,75THz.

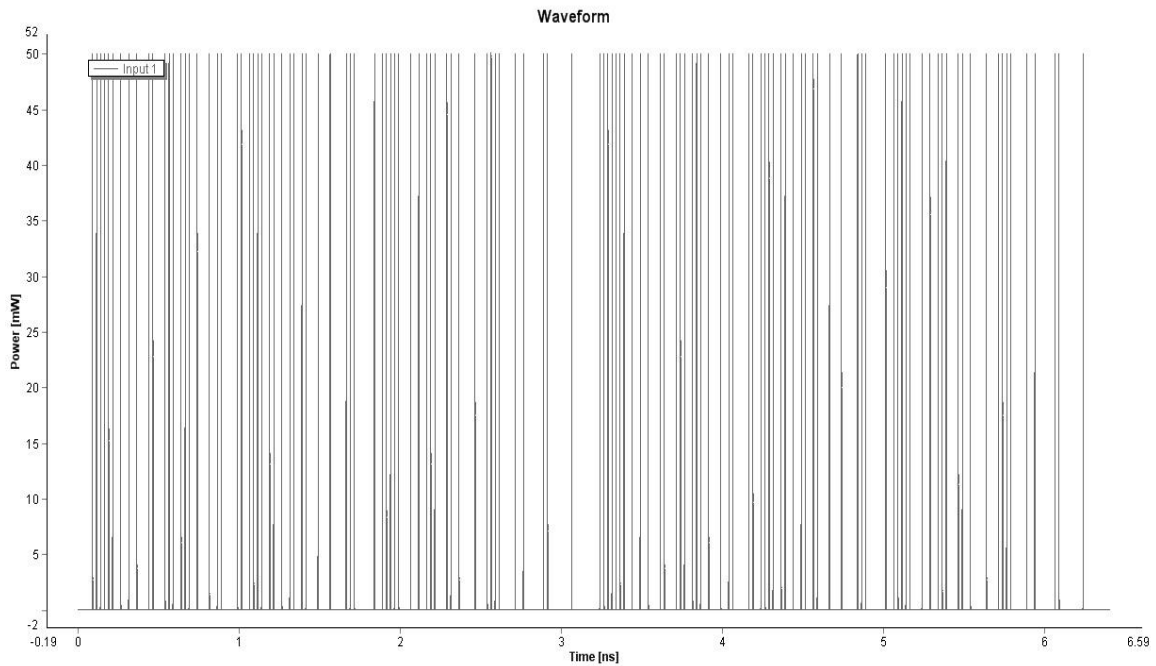


Εικ.45 Φάσμα εξόδου γεννήτριας PRBS

Αν το μεγεθύνουμε θα παρατηρήσουμε ότι το σήμα είναι διαμορφωμένο και οι αρμονικές μεταξύ τους απέχουν 40GHz, σε αντίθεση με το αδιαμόρφωτο σήμα του cw laser.

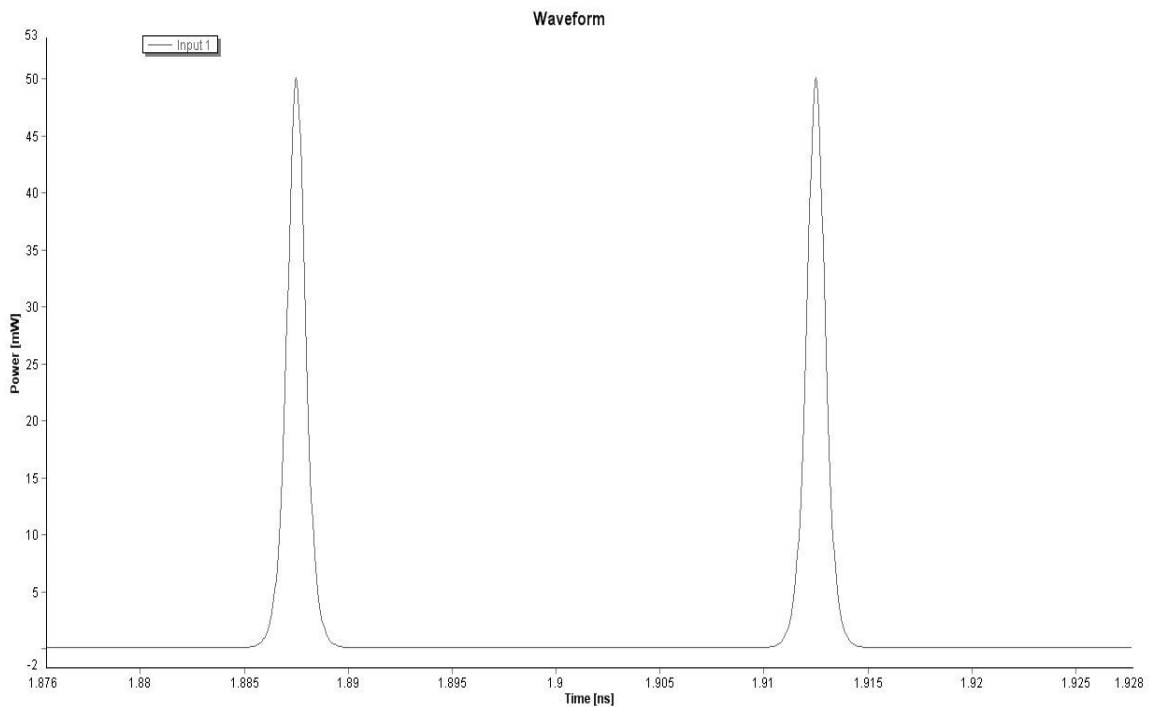


Εικ.46 Φάσμα γεννήτριας PRBS σε μεγέθυνση.



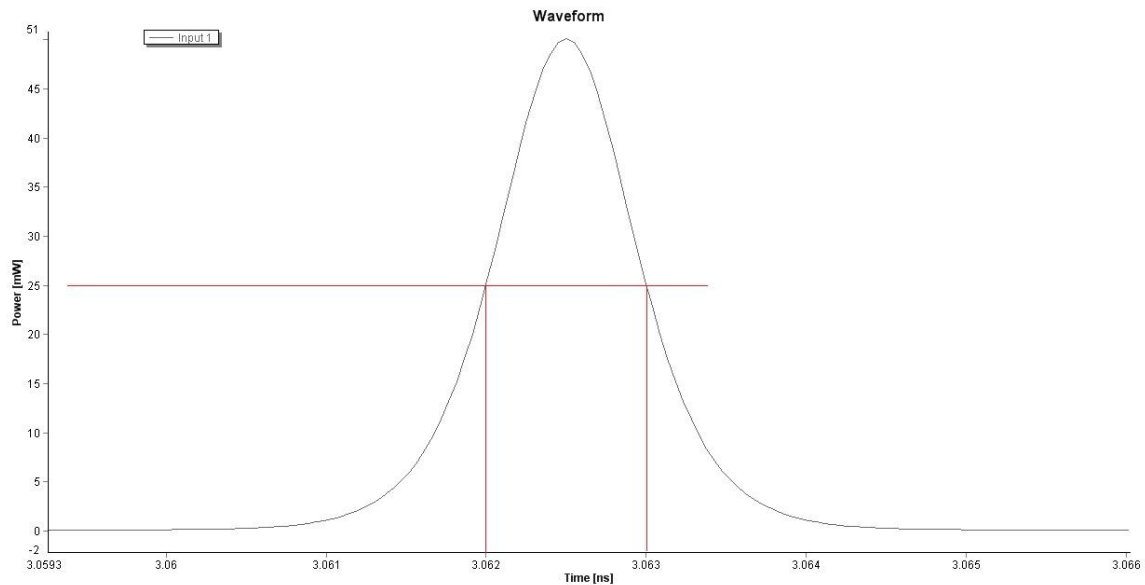
Εικ.47 Παλμοί γεννήτριας παλμικής ακολουθίας PRBS

Στο πεδίο του χρόνου παρατηρούμε ότι οι παλμοί έχουν ισχύ κορυφής 50mW και απέχουν μεταξύ τους 25ps ($1.91-1.885=0.025\text{ns} = 25\text{ps}$).



Εικ.48 Απόσταση παλμών μmtr σήματος

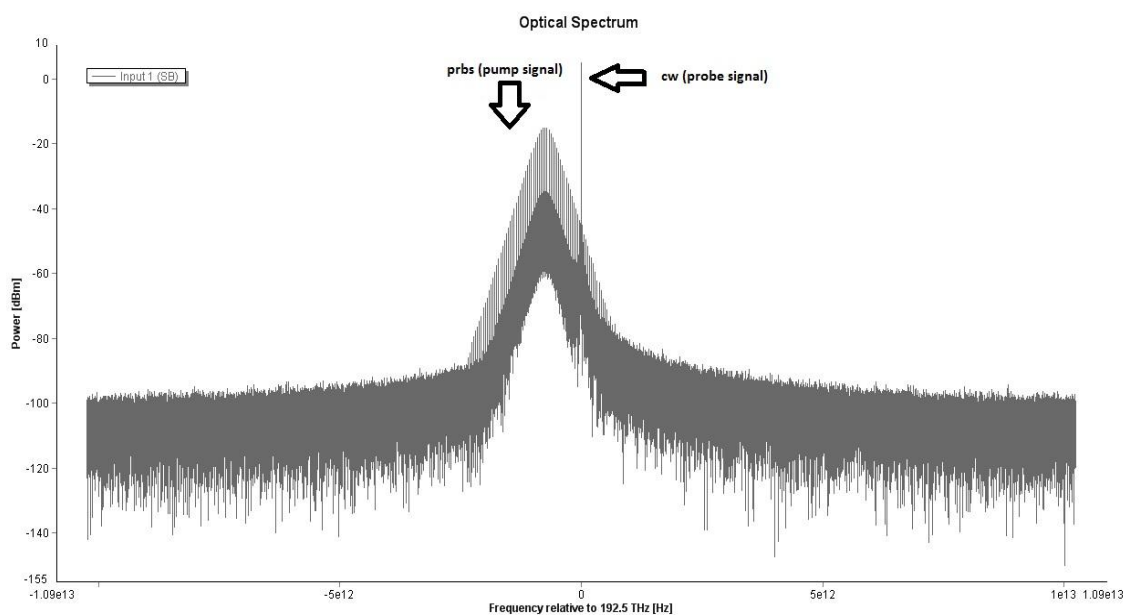
Επίσης παρατηρούμε το πλάτος FWHM του παλμού που είναι 1ps ($3.062-3.061=0.001\text{ns} = 1\text{ps}$). Το πλάτος FWHM είναι το πλάτος που έχει ο παλμός όταν βρίσκεται στη μισή ισχύ του, όπως φαίνεται άλλωστε και στη παρακάτω απεικόνιση.



Εικ. 49 Παλμός όπως εξέρχεται από το στοιχείο Tx Pulse

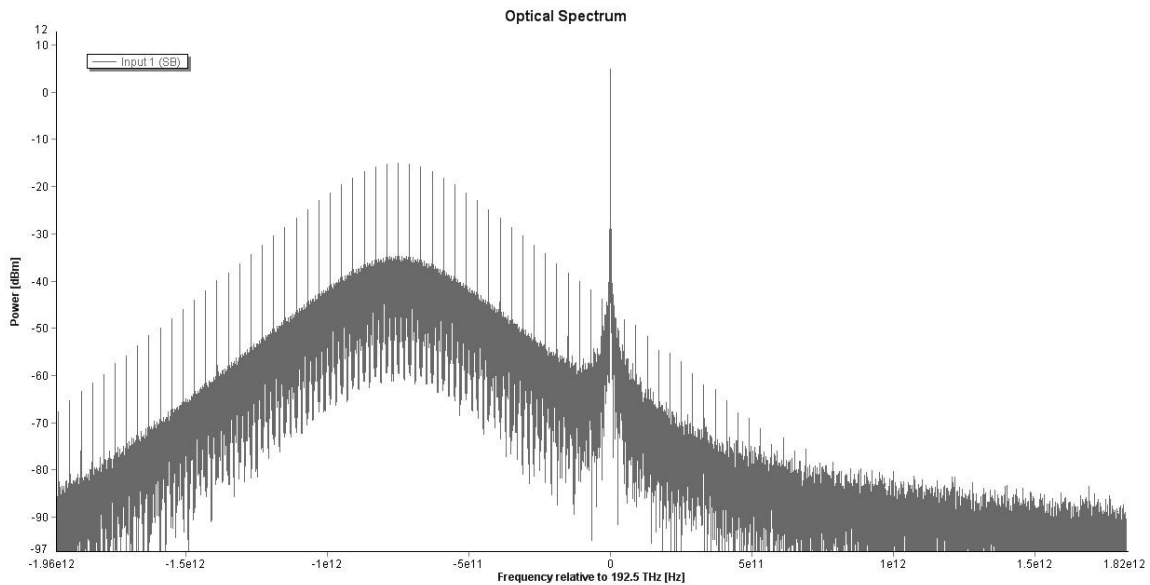
4.1.1.1.3 Σήμα μετά τον συζεύκτη

Τα δύο παραπάνω σήματα εισέρχονται στο συζεύκτη με **λόγο σύζευξης 0,5** (3dB coupler), δηλαδή διαχωρίζει την εισερχόμενη ισχύ ακριβώς στα δύο στις εξόδους του. Στην πραγματικότητα όμως, υπάρχει κάποιου είδους απώλεια από αυτό το παθητικό στοιχείο αφού δεν είναι ιδανικός ο διαχωρισμός. Επίσης, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στην παρούσα φάση έχουμε ένα μόνο συζευγμένο σήμα, το οποίο θα συνεχίσει την πορεία του μέσα από τα υπόλοιπα στοιχεία της υλοποίησης. Η ανάλυση του φάσματος του στην έξοδο, μας δείχνει τα δύο σήματα pump και probe αντίστοιχα.



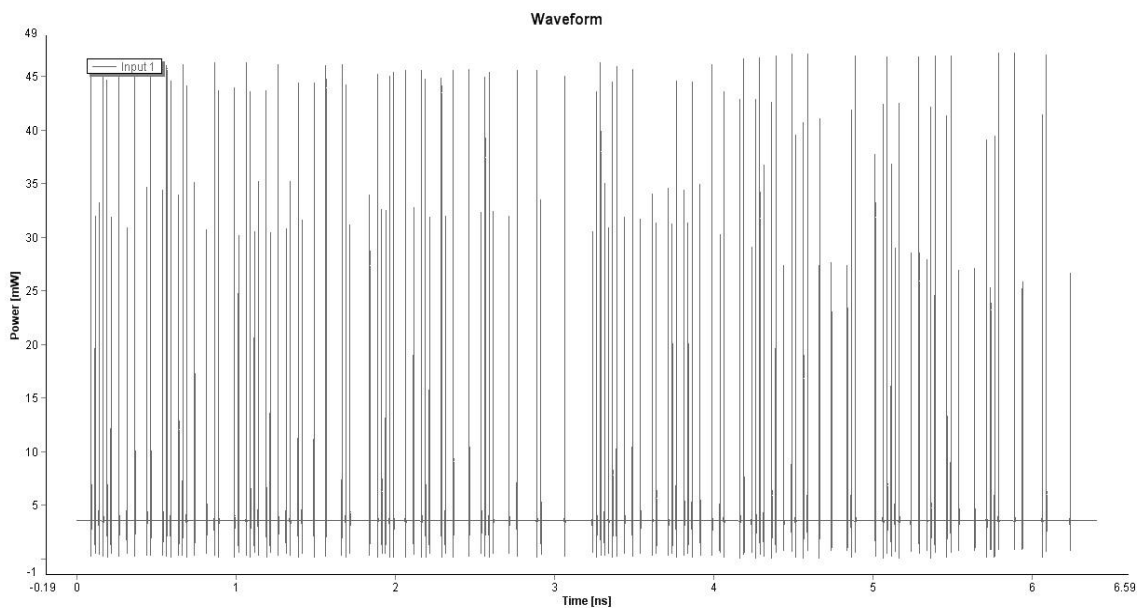
Εικ.50 Φασματική απεικόνιση σήματος μετά τον συζεύκτη

Αν κάνουμε λίγο ακόμα μεγέθυνση στην προηγούμενη απεικόνιση θα παρατηρήσουμε ότι δεν έχει υποστεί ακόμα κανενός είδους διαμόρφωση το probe σήμα, απλά έχει γίνει η σύζευξη των δύο σημάτων.



Εικ.51 Φάσμα σήματος εξόδου συζεύκτη σε μεγέθυνση

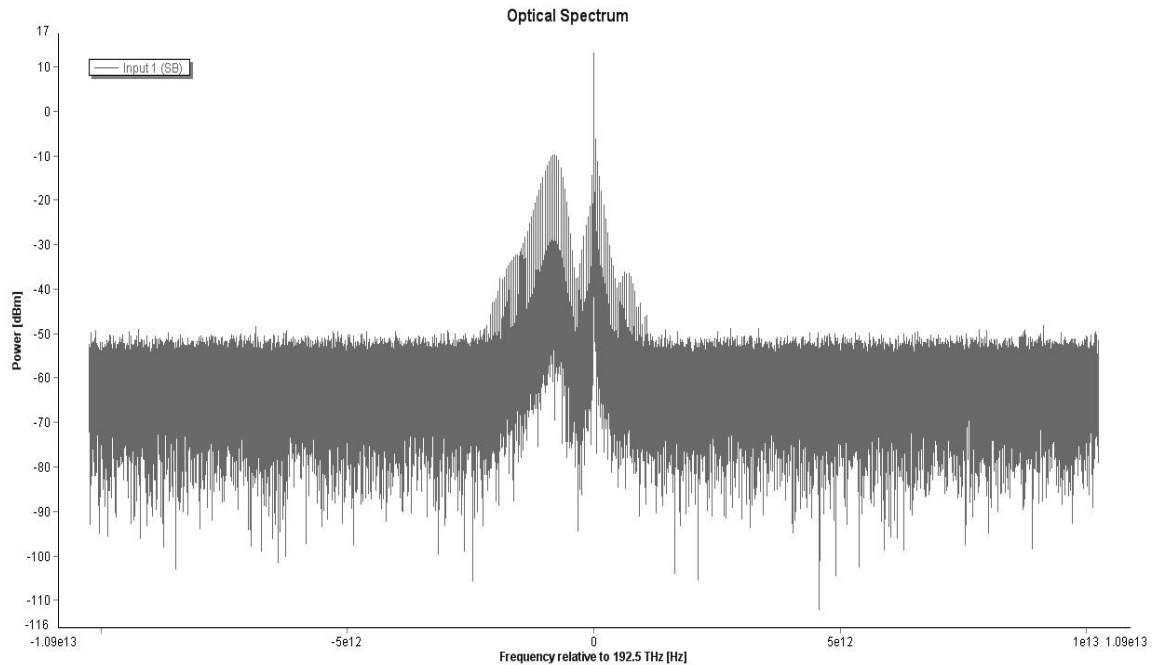
Ακολουθεί η απεικόνιση των παλμών μετά τον συζεύκτη.



Εικ.52 Παλμοί μετά το στοιχείο coupler

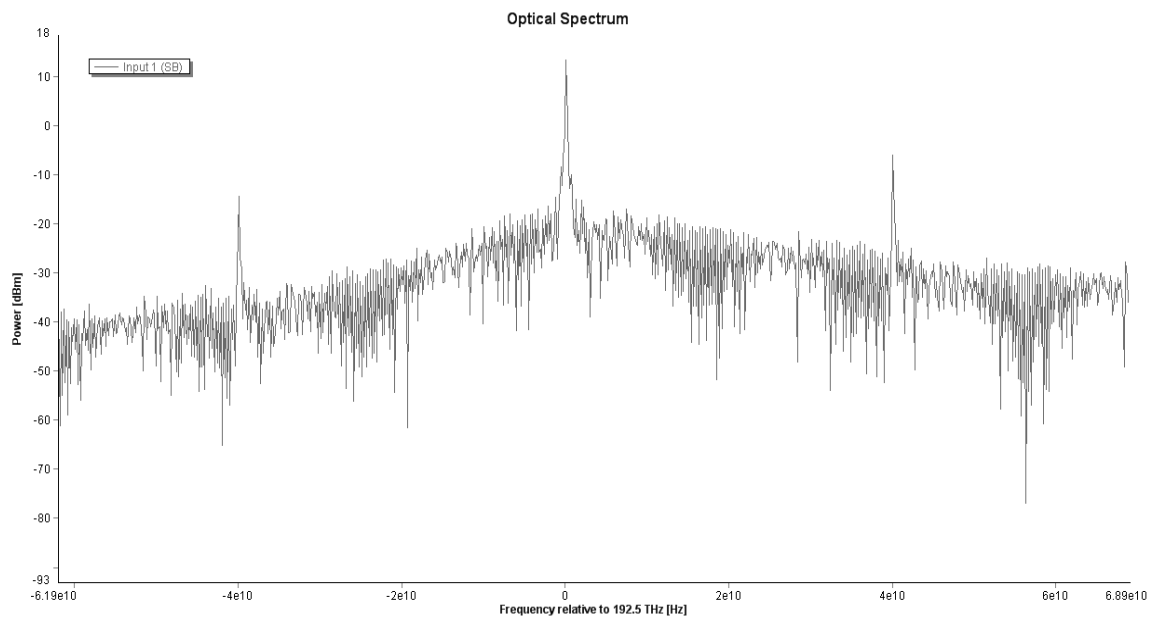
4.1.1.1.4 Σήμα μετά τον SOA

Εφόσον τα σήματα περάσουν από το στοιχείο coupler και συζευχθούν, το συζευγμένο σήμα τώρα εισέρχεται στο SOA, όπου λόγω των φαινομένων που έχουν αναφερθεί θα διαμορφωθεί. Το σήμα στην έξοδο του SOA φαίνεται διευρυμένο λόγω του φαινομένου XPM αλλά και ενισχυμένο, όπως βλέπουμε στο φάσμα.



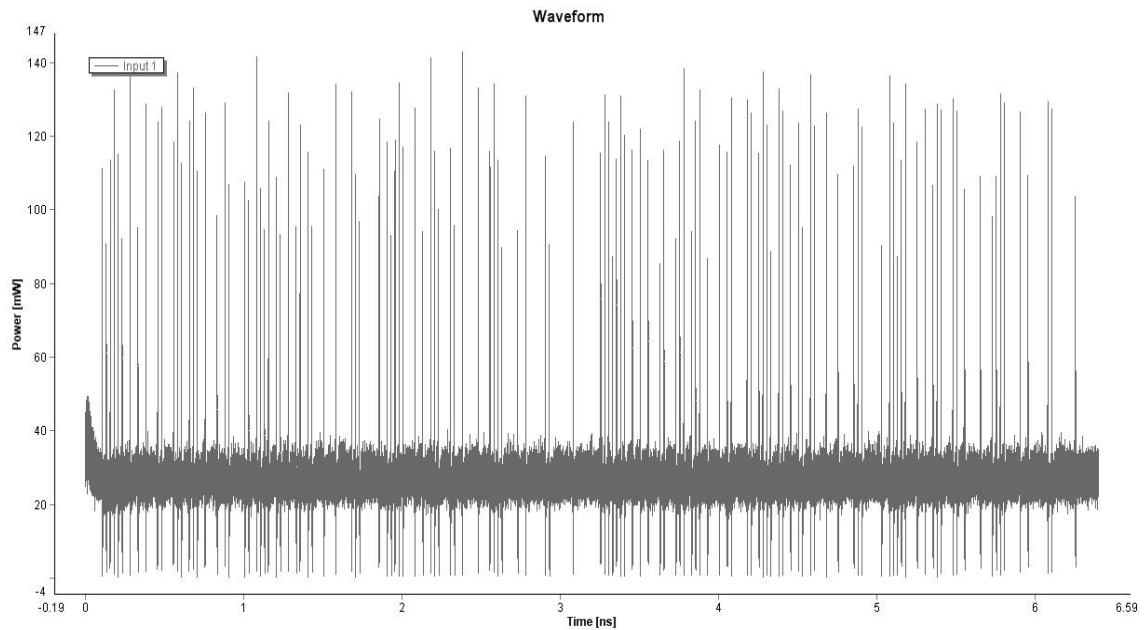
Εικ.53 Φασματική ανάλυση σήματος μετά τον SOA.

Αν το μεγεθύνουμε παρατηρούμε τη διαμόρφωση που έχει υποστεί το σήμα λόγω της παρουσίας του rump σήματος στο SOA.



Εικ.54 Απεικόνιση φάσματος σήματος μετά τον SOA σε μεγέθυνση

Στις απεικονίσεις των παλμών παρατηρούμε ότι ο SOA έχει ενισχύσει το σήμα αλλά ταυτόχρονα έχει εισάγει αρκετό θόρυβο, κάτι βέβαια που θα εξαλειφθεί με τη χρήση των επόμενων στοιχείων, φίλτρο και συμβολόμετρο.



Εικ.55 Παλμοί στην έξοδο του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή

Συνολικά, οι μεταβλητές του SOA που έλαβαν μέρος στην προσομοίωση ήταν οι εξής :

TC SOA_TLM_vtmg2 - Parameter Editor

Name: SOA_TLM.vtmg
ID: SOA_TLM_vtmg2 Show ID

Description

This module is a Transmission Line Model of a Semiconductor Optical Amplifier (SOA) with low feedback. It can be used to model Reflective SOAs and edge-emitting LEDs. It includes MQW and Bulk SOAs. Only X-polarization is supported.

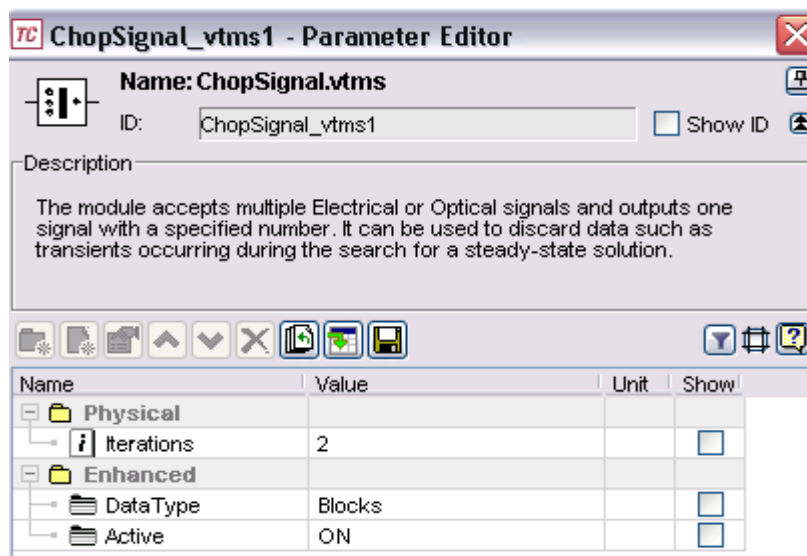
Name	Value	Unit	Show
Device Structure			
ActiveRegionType	Bulk		<input type="checkbox"/>
DeviceSectionLength	1600e-6	m	<input type="checkbox"/>
ActiveRegionWidth	1.2e-6	m	<input type="checkbox"/>
ActiveRegionThickne	100e-9	m	<input type="checkbox"/>
CurrentInjectionEffici	1.0		<input type="checkbox"/>
Optical Parameters			
NominalWavelength	1.5525246e-6	m	<input type="checkbox"/>
GroupEffectiveIndex	3.5		<input type="checkbox"/>
InternalLoss	3500	1/m	<input type="checkbox"/>
InternalLoss Carrier D	0	m ²	<input type="checkbox"/>
ConfinementFactor	0.17		<input type="checkbox"/>
OpticalCouplingEfficie	0.5		<input type="checkbox"/>
FacetReflectivity	1.0e-6		<input type="checkbox"/>
FacetReflectivityPha	0.0	deg	<input type="checkbox"/>
FacetReflectivityPha	0.0	deg	<input type="checkbox"/>
Carrier Dynamics			
Linear Recombination	2e9	1/s	<input type="checkbox"/>
Bimolecular Recombin	1.0e-17	m ³ /s	<input type="checkbox"/>
Auger Recombination	9.4e-41	m ⁶ /s	<input type="checkbox"/>
Initial Carrier Density	1.0e+24	1/m ³	<input type="checkbox"/>
Gain Parameters			
GainModel	Linear		<input type="checkbox"/>
GainCoefficientLinear	4e-20	m ²	<input type="checkbox"/>
Carrier Density Transp	1e+24	1/m ³	<input type="checkbox"/>
GainShapeModel	Flat		<input type="checkbox"/>
Nonlinear Gain Coeffic	3e-23	m ³	<input type="checkbox"/>
Nonlinear Gain Timeecc	1500e-15	s	<input type="checkbox"/>
ChirpModel	LinewidthFactor		<input type="checkbox"/>
LinewidthFactor	6		<input type="checkbox"/>
Carrier Density RefInc	2.0e+24	1/m ³	<input type="checkbox"/>
Spontaneous Emiss			
NoiseModel	InversionParameter		<input type="checkbox"/>
InversionParameter	3		<input type="checkbox"/>
Numerical			
BuildUpTime	100e-12	s	<input type="checkbox"/>
RandomNumber Seed	0		<input type="checkbox"/>
Visualization			
VisualizationMode	None		<input type="checkbox"/>
SaveToFile	Off		<input type="checkbox"/>

Εικ. 56 Τιμές μεταβλητών του στοιχείου SOA

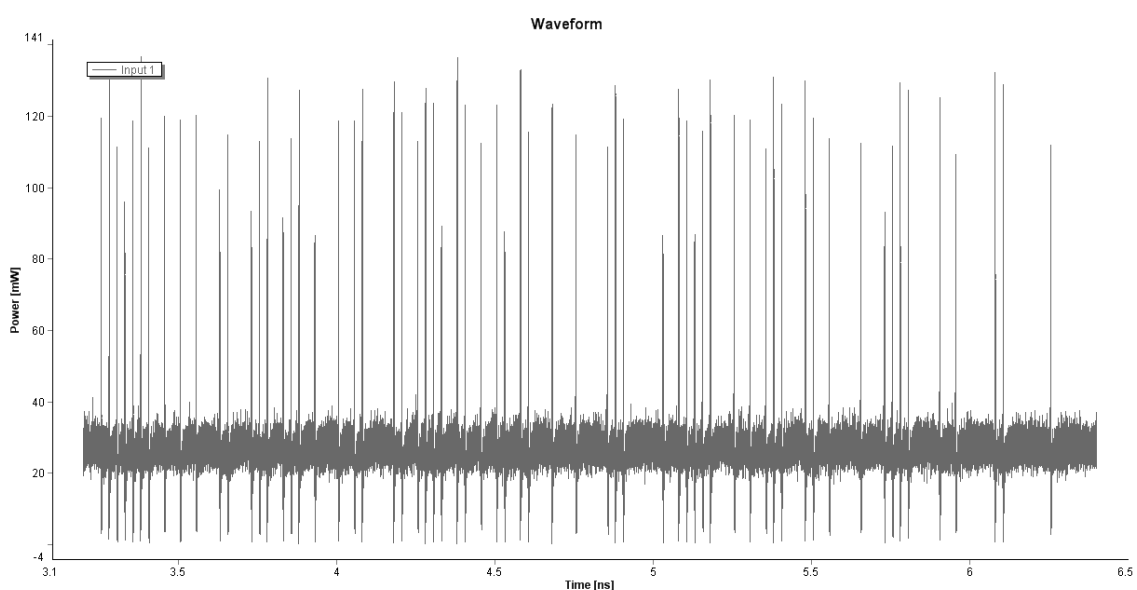
Επίσης, αξίζει να αναφέρουμε ότι η τροφοδότηση του SOA ήταν 500mA.

4.1.1.1.5 Σήμα μετά το στοιχείο chop signal

Μετά τον ημιαγωγίμο ενισχυτή το σήμα από μορφή blocks θα μετατραπεί σε samples μέσω του στοιχείου sample to block converter ,καθώς το στοιχείο chop signal δέχεται ως είσοδο σήματα της μορφής block ενώ ο SOA δέχεται samples μόνο.Η μεταβλητή που μας ενδιαφέρει για το στοιχείο chop signal είναι το **iterations όπου έχει επιλεχθεί η τιμή 2**. Έτσι πρέπει να αναφέρουμε ότι σε όλες τις προηγούμενες απεικονίσεις τα διάφορα σήματα έχουν διπλάσια bits σε σχέση με το στιγμιότυπο στην έξοδο του στοιχείου chop signal,καθώς απαιτούνται δύο blocks (iterations = 2) από το στοιχείο αυτό για να επιτευχθεί μία έξοδος.Η παραπάνω διαπίστωση γίνεται αμέσως αντιληπτή αν συγκρίνουμε τους παλμούς μετά το στοιχείο chop signal εικ.58 με αυτούς μετά τον ενισχυτή εικ. 55.

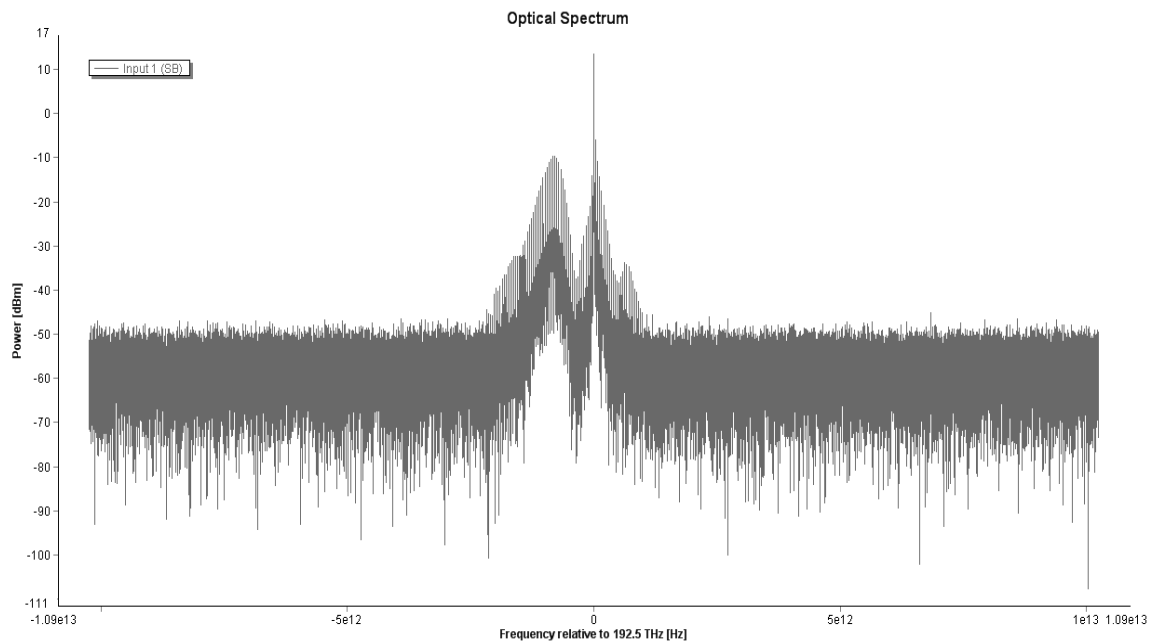


Εικ.57 Τιμές μεταβλητών του στοιχείου chop signal



Εικ.58 Παλμοί μετά το στοιχείο chop signal.

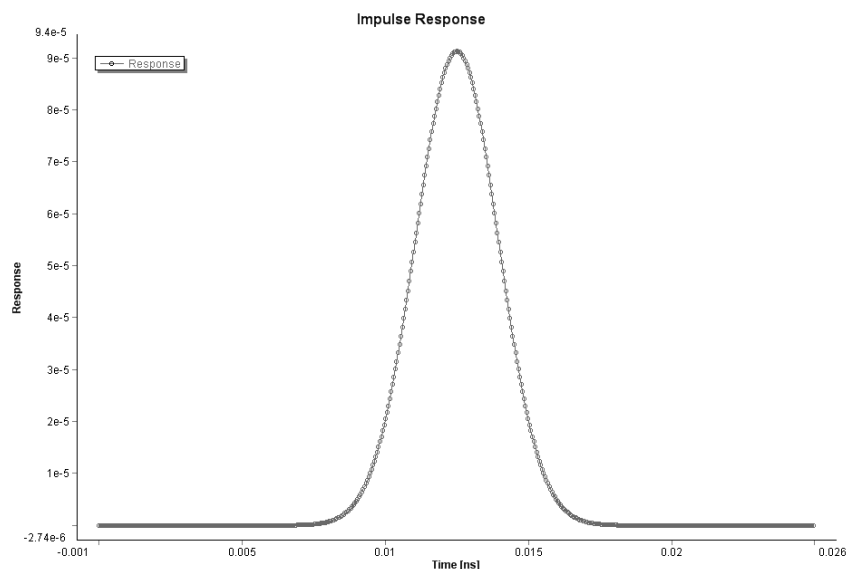
Τέλος, στο πεδίο των συχνοτήτων, γίνεται περισσότερο εμφανές πως το σήμα είναι στην τελική του μορφή πριν εισέλθει στο ζωνοπερατό φίλτρο. Έτσι, κατανοούμε ότι αφού διέλθει δια μέσου του στοιχείου chop signal έχουν απορριφθεί τα όποια μεταβατικά φαινόμενα.



Εικ.59 Φασματική απεικόνιση στην έξοδο του στοιχείου chop signal.

4.1.1.1.6 Αντεστραμμένο σήμα μετά το οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο (OBF)

Το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή των κατάλληλων φασματικών συνιστωσών έχει γκαουσιανή μορφή και παρακάτω απεικονίζεται η απόκριση πλάτους του όπως εξάχθηκε από την πλατφόρμα.

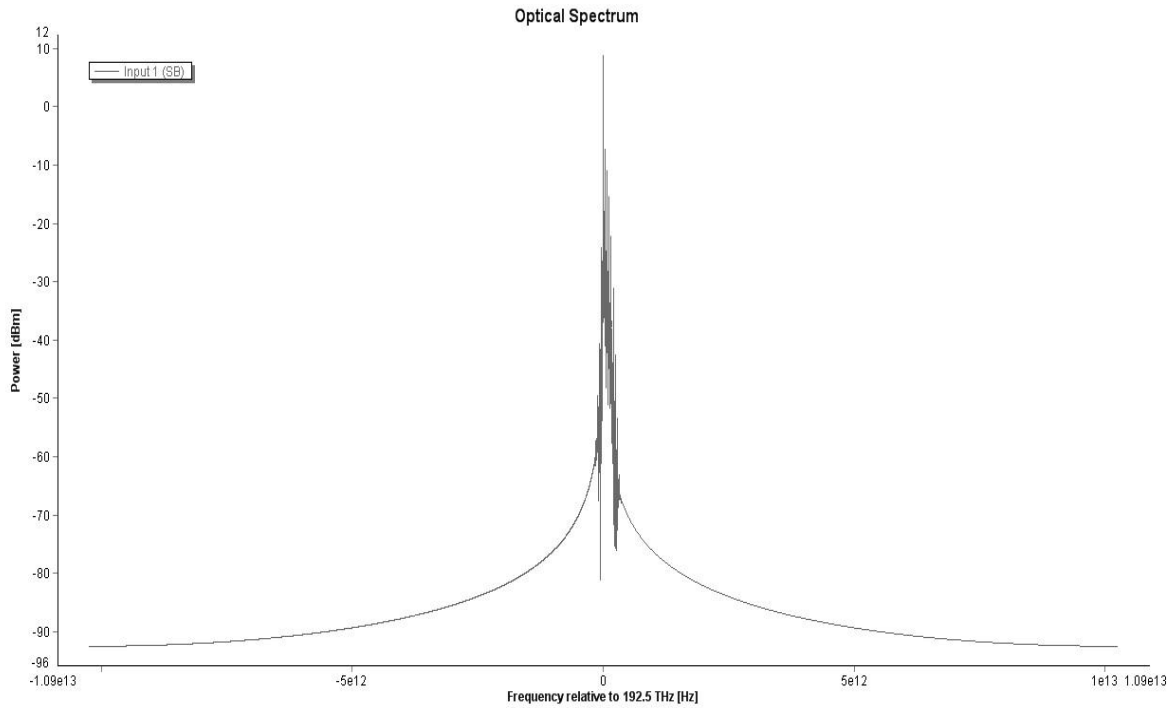


Εικ. 60 Απόκριση πλάτους φίλτρου για ταχύτητα 40Gbps

Ύστερα από αρκετές δοκιμές, τελικά, η κεντρική συχνότητα ορίστηκε να είναι μετατοπισμένη προς τις μπλε αρμονικές κατά 0,64nm ή 80GHz, δηλαδή στα 192,58THz (CW σήμα 192,5THz) και το εύρος ζώνης στα 130GHz. Το φάσμα του σήματος στην έξοδο του φίλτρου, καταδεικνύει ότι έχουν επιλεγεί οι αρμονικές με ελαφρά μεγαλύτερες συχνότητες (μπλε) από την φέρουσα συχνότητα του cw σήματος. Ωστόσο, παραμένει ακόμα ισχυρή η φέρουσα συχνότητα και όπως περιγράφηκε και πειραματικά για αυτό το σήμα μας είναι αντεστραμμένο. Ειδικότερα, οι τιμές των μεταβλητών που επιλέχθηκαν είναι οι εξής :

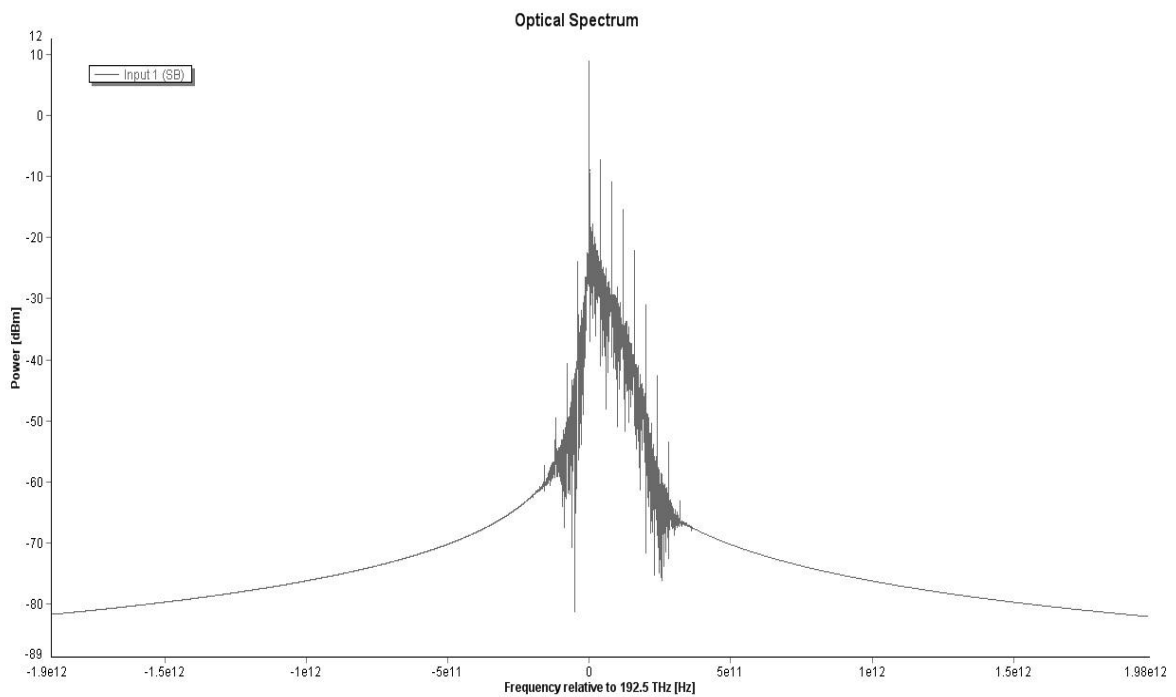
Name	Value	Unit	Show
Physical			
FilterType	BandPass		<input checked="" type="checkbox"/>
TransferFunction	Gaussian		<input checked="" type="checkbox"/>
f Bandwidth	130e9	Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
f CenterFrequency	192.58e12	Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
f GaussianOrder	1		<input type="checkbox"/>
MinimumPhase	Off		<input type="checkbox"/>
ComplementaryPower	Off		<input type="checkbox"/>
Enhanced			
f NoiseDynamic	3.0	dB	<input type="checkbox"/>
f NoiseResolution	BitRateDefault/4.	Hz	<input type="checkbox"/>
f NoiseThreshold	-100	dB	<input type="checkbox"/>
f ActiveFilterBandwidth	1.0e12	Hz	<input type="checkbox"/>
f ActiveFilterBandwidth	193.1e12	Hz	<input type="checkbox"/>
LimitToActiveFilterBa	Off		<input type="checkbox"/>
ConserveMemory	On		<input type="checkbox"/>
DigitalFilterOrderDefi	Automatic		<input type="checkbox"/>
f DigitalFilterAccuracy	1.e-4		<input type="checkbox"/>
Active	On		<input type="checkbox"/>
Visualization			
VisualizationMode	None		<input type="checkbox"/>
SaveToFile	Off		<input type="checkbox"/>

Εικ.61 Τιμές μεταβλητών του οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου.



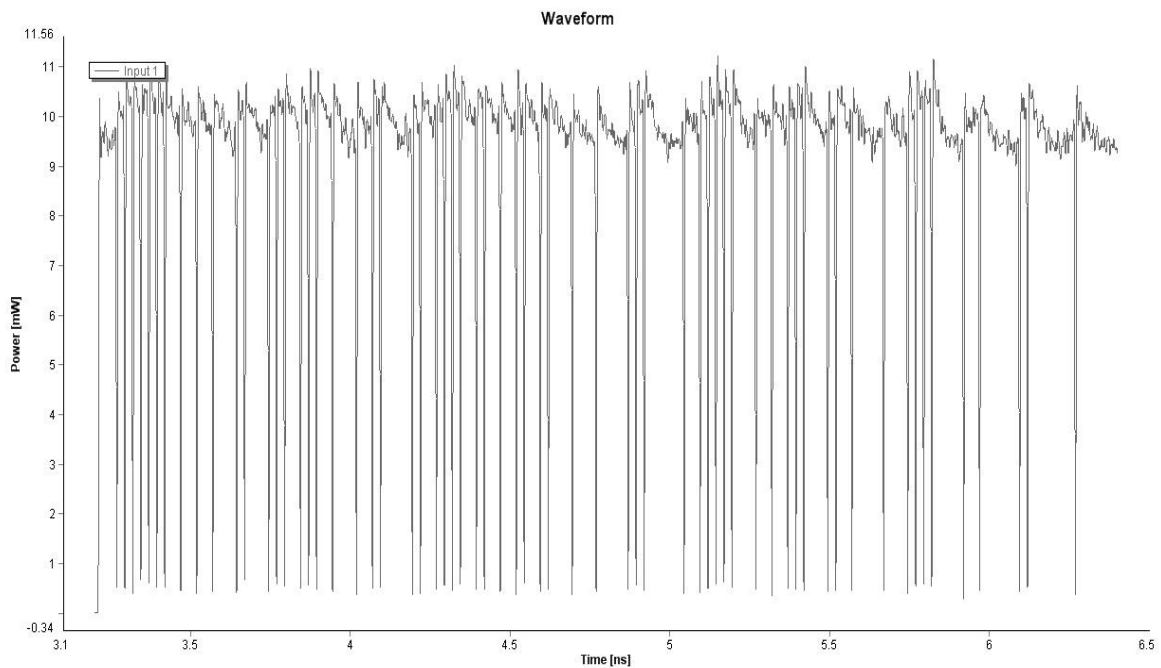
Εικ. 62 Το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος του φάσματος από το ζωνοπερατό φίλτρο.

Περαιτέρω μεγέθυνση μας δείχνει ακριβώς τις αρμονικές που έχουν «επιβιώσει» από το φίλτρο με κυρίαρχη ακόμα την φέρουσα συχνότητα.



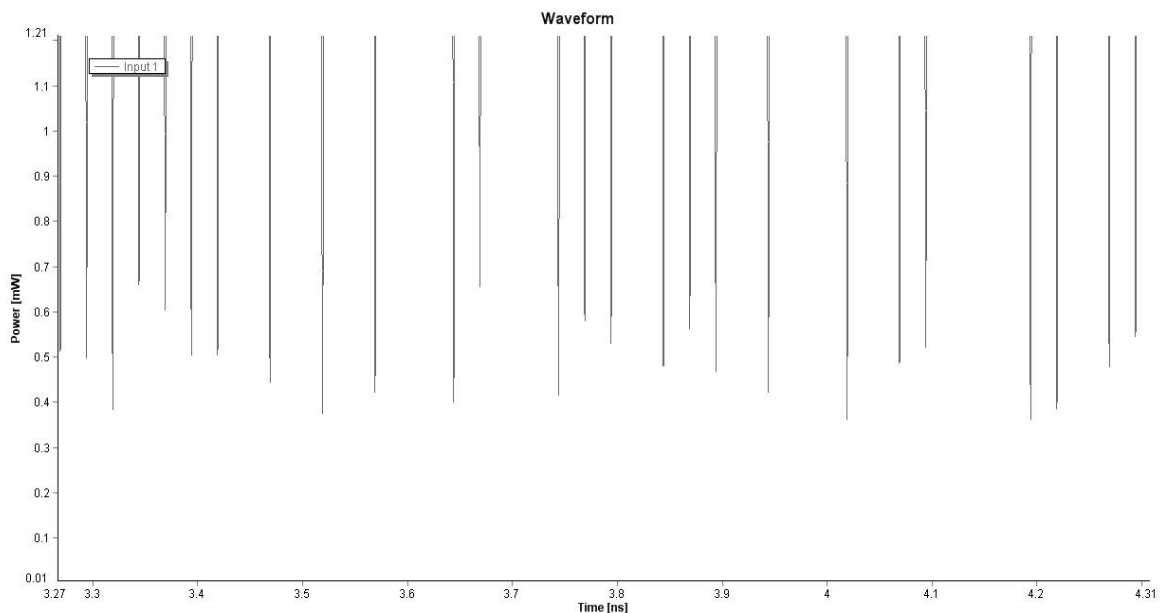
Εικ.63 Φάσμα στην έξοδο του φίλτρου σε μεγέθυνση.

Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου μας δείχνει ότι ο θόρυβος που είχε παραχθεί από τον ενισχυτή έχει σχεδόν εξαλειφθεί.



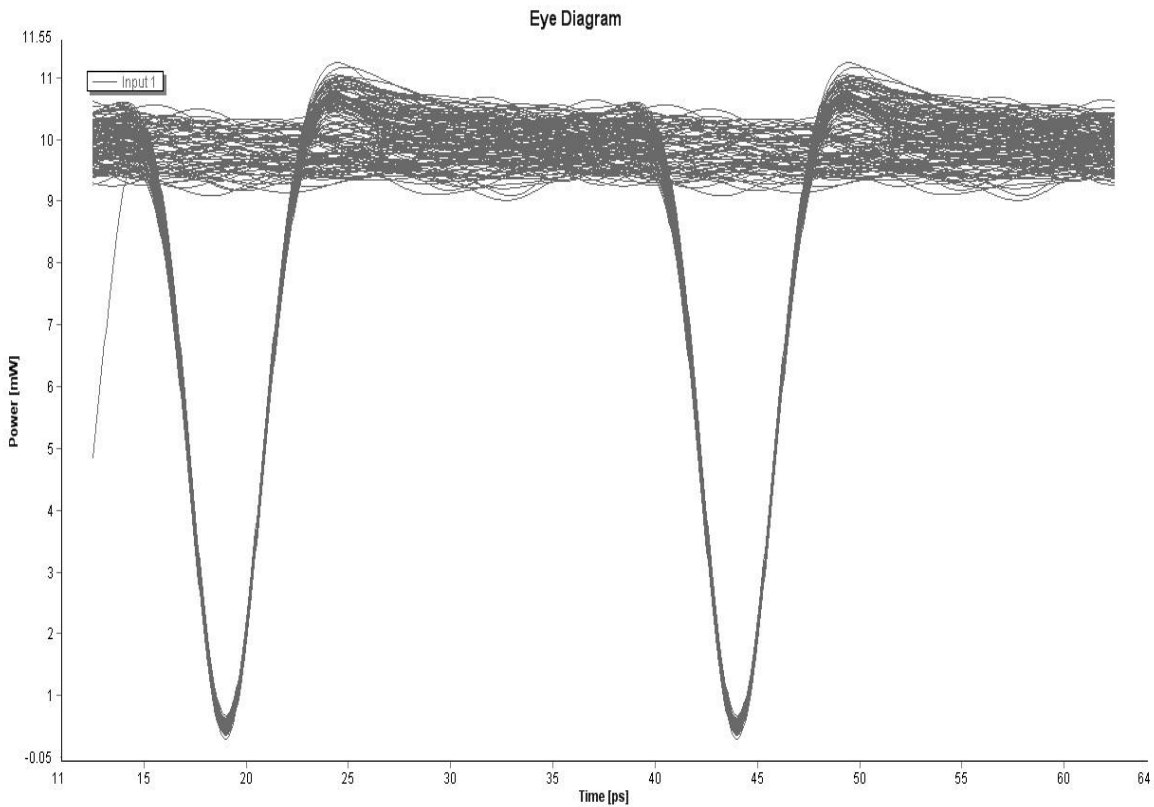
Εικ.64 Αντεστραμμένοι παλμοί στην έξοδο του φίλτρου

Επίσης, όπως είδαμε και στα πειραματικά αποτελέσματα, η παρεμβολή μεταξύ των κορυφών είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζεται το φαινόμενο της διαφωνίας μεταξύ των κορυφών (crosstalk).



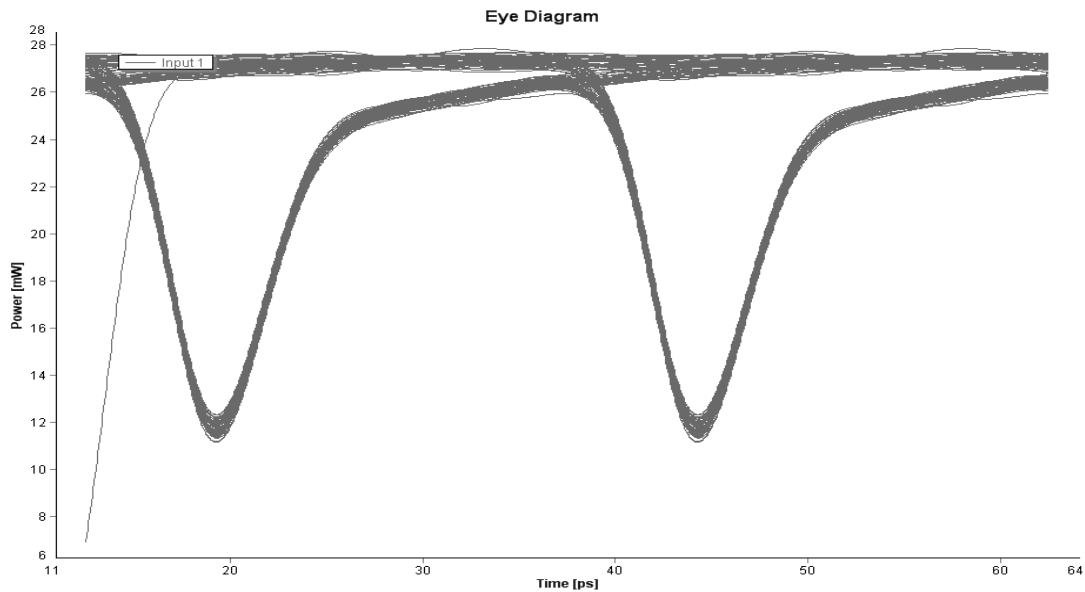
Εικ.65 Διαφορές στις κορυφές των παλμών

Έτσι, αν υπερθέσουμε τα bit του σήματος, λαμβάνουμε ένα αρκετά καλό διάγραμμα ματιού.



Εικ.66 Διάγραμμα ματιού για την αντεστραμμένη λειτουργία μετά το ζωνοπερατό φίλτρο

Στο σημείο αυτό, θα αντιπαραβάλουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μηδενική μετατόπιση του φίλτρου. Σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα ματιού επιβεβαιώνουμε ότι και πειραματικά. Το φαινόμενο XGM που λαμβάνει χώρα στο SOA από μόνο του χωρίς φιλτράρισμα θα μας δώσει αντεστραμμένους παλμούς αλλά με αργή ανάκαμψη. Από ότι μπορούμε να διακρίνουμε η ανάκαμψη της καμπύλης κέρδους γίνεται από 30 με 40 ps (εικ.67) σε 5 με 7 ps (εικ.66) με σωστό φιλτράρισμα.

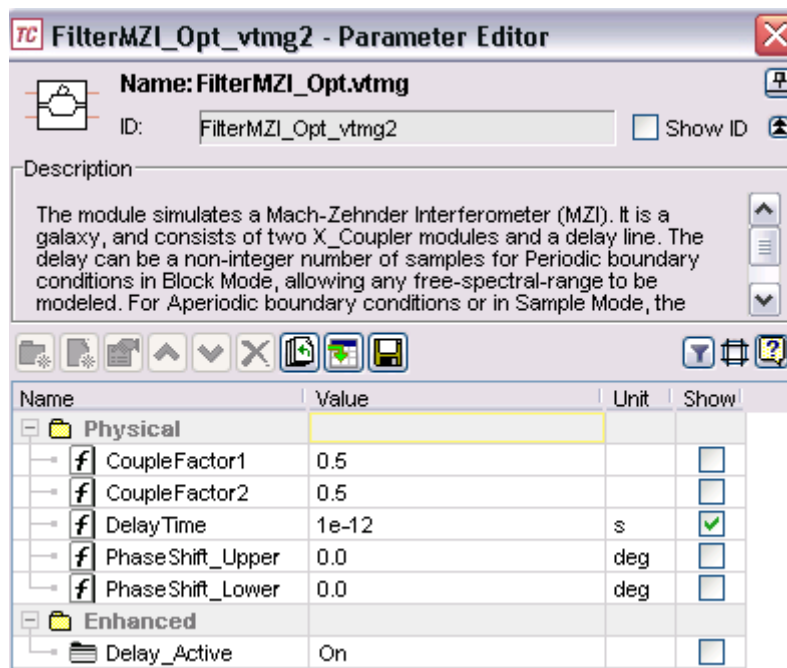


Εικ.67 Διάγραμμα ματιού για μηδενική μετατόπιση.

4.1.1.1.7 Τελικό μη αντεστραμμένο σήμα

Το τελευταίο στάδιο είναι η αντιστροφή της πολικότητας του παραπάνω σήματος αφού περάσει μέσα από το συμβολόμετρο Mach Zehnder. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να καταπιεστεί η κυρίαρχη κεντρική συχνότητα.

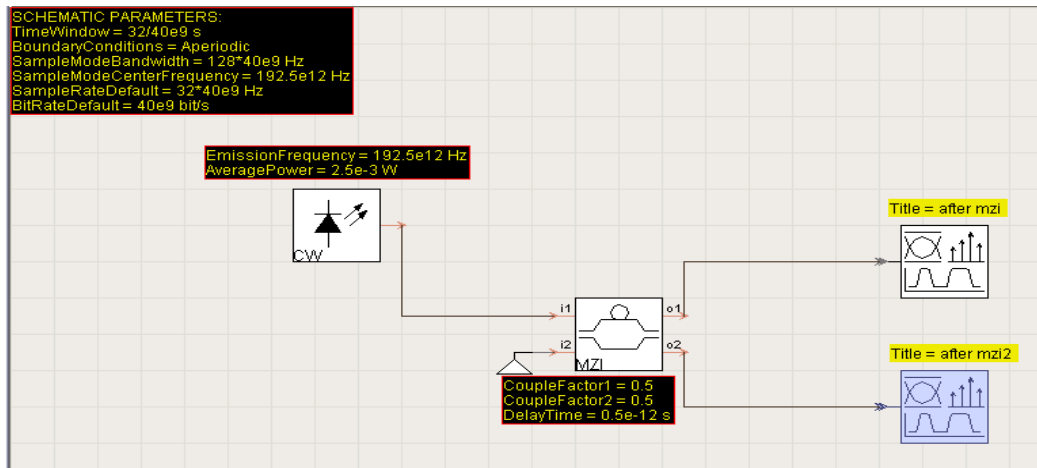
Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν είναι :



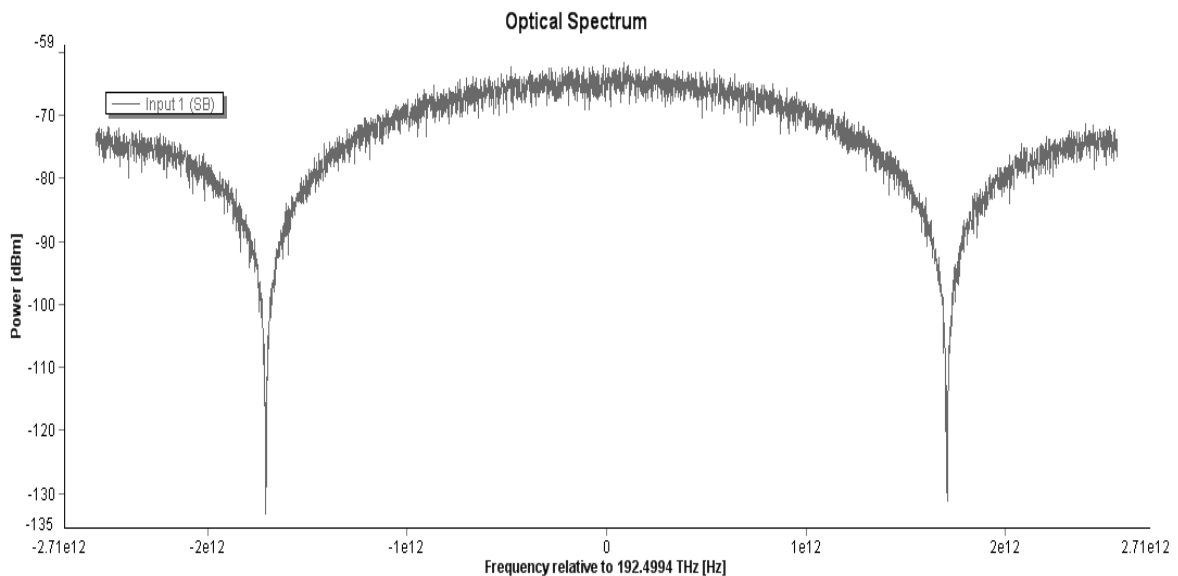
Εικ.68 Τιμές μεταβλητών του συμβολόμετρου.

Γνωρίζαμε από τα πειραματικά στοιχεία ότι η τιμή της καθυστέρησης θα έπρεπε να είναι κοντά στην τιμή του πλάτους του παλμού. Ύστερα από δοκιμές, σαν βέλτιστη

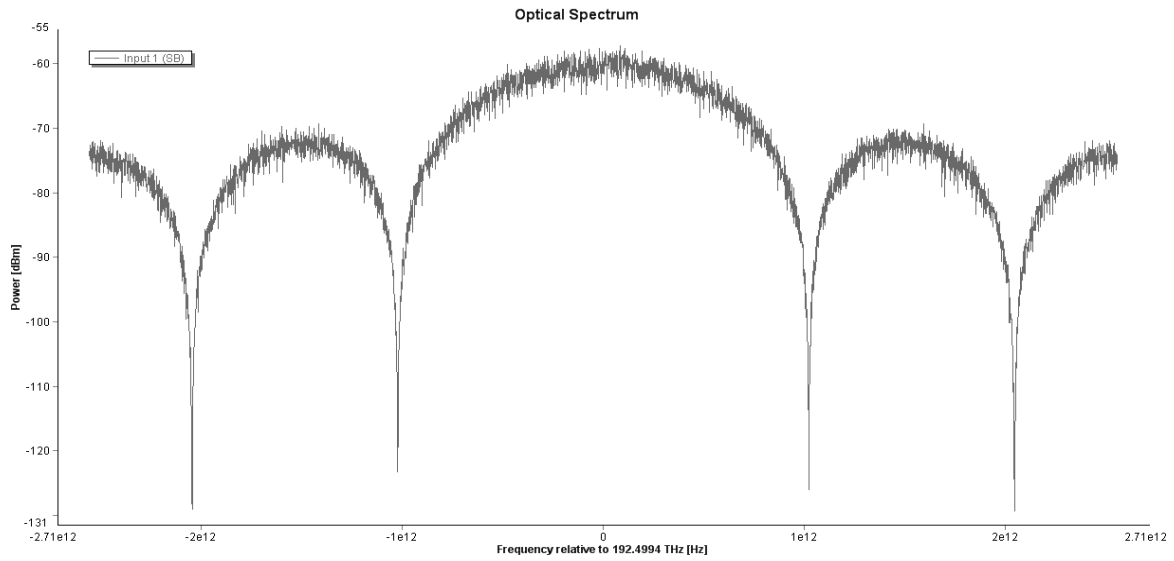
τοποθετήσαμε την ίδια τιμή, δηλαδή 1ps. Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του συμβολόμετρου, την προσομοιώσαμε για διάφορες τιμές καθυστέρησης του άνω βραχίονα. Ουσιαστικά παρατηρούμε πως αλλάζει η συνάρτηση μεταφοράς και αναλόγως τοποθετούμε την κατάλληλη τιμή στην προσομοίωση μας. Αυτό που κάνουμε είναι μεταβάλλοντας την τιμή της καθυστέρησης να προσπαθούμε να πετύχουμε κάποια από τις συχνότητες αποκοπής (notches ή «χαράδρες») ακριβώς στην κεντρική συνιστώσα με αποτέλεσμα να την συμπιέσει.



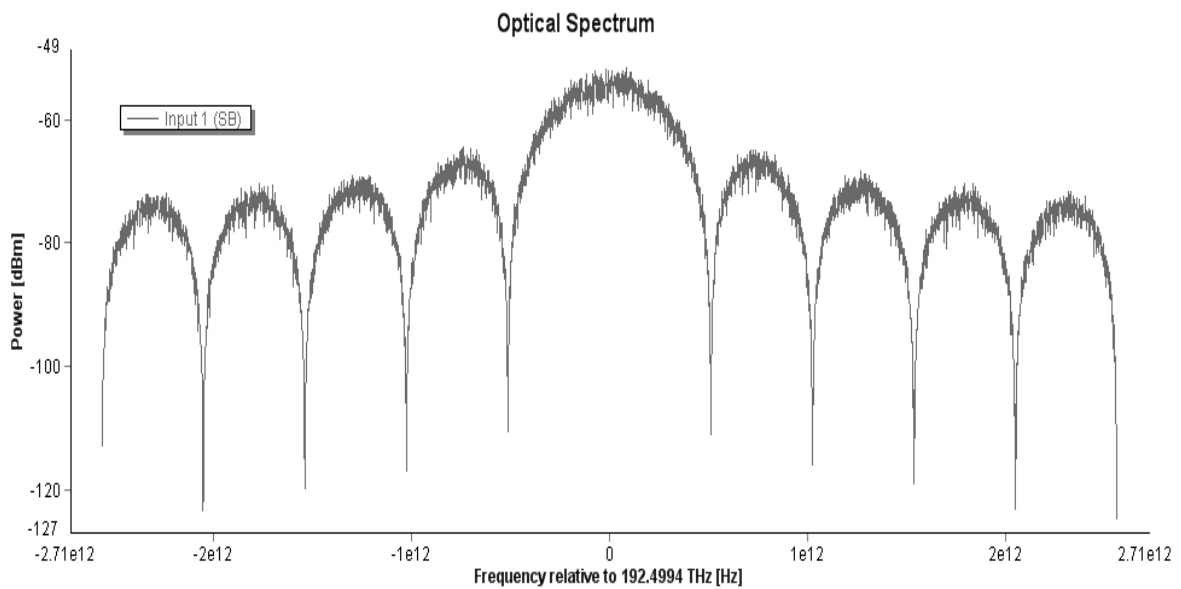
Εικ.69 Υλοποίηση για την εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς του συμβολόμετρου MZI



Εικ.70 Συνάρτηση μεταφοράς για καθυστέρηση του άνω βραχίονα 0.5ps

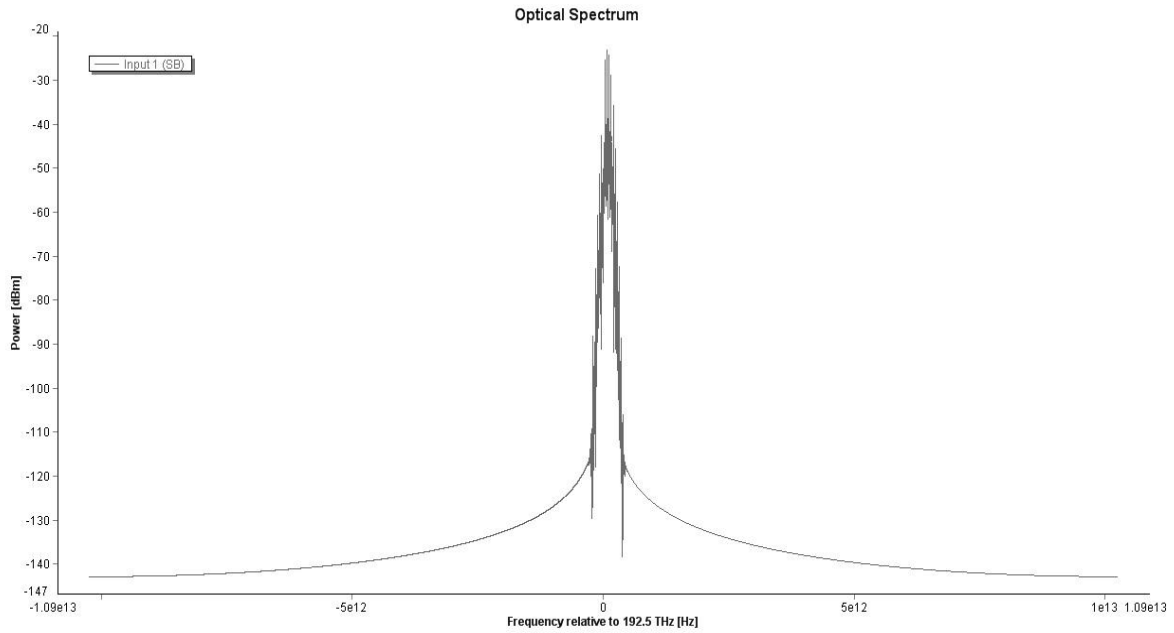


Εικ.71 Συνάρτηση μεταφοράς για καθυστέρηση 1 ps



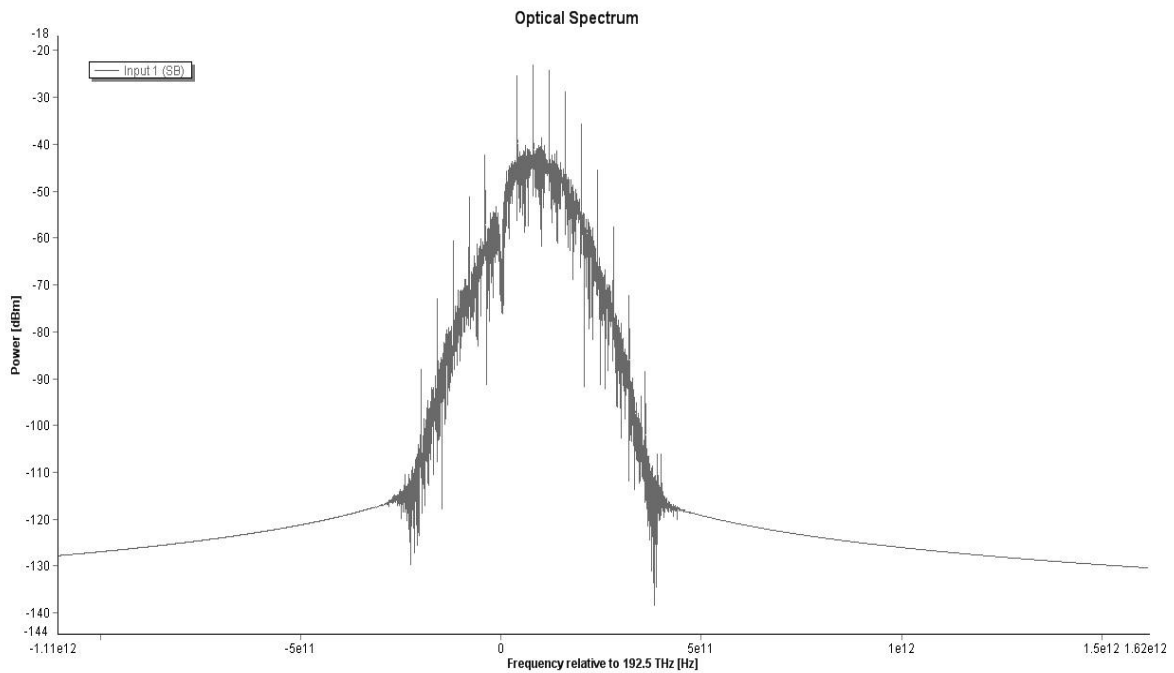
Εικ.72 Συνάρτηση μεταφοράς για καθυστέρηση 2 ps

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνουμε την καθυστέρηση, οι περιοδικές αυτές «χαράδρες» έρχονται ολοένα και πιο κοντά. Έτσι, λόγω των παραπάνω, στην προσομοίωσή μας παρατηρούμε ότι στο φάσμα του σήματος μετά την έξοδο από τη συμβολομετρική διάταξη η φέρουσα συχνότητα απουσιάζει.



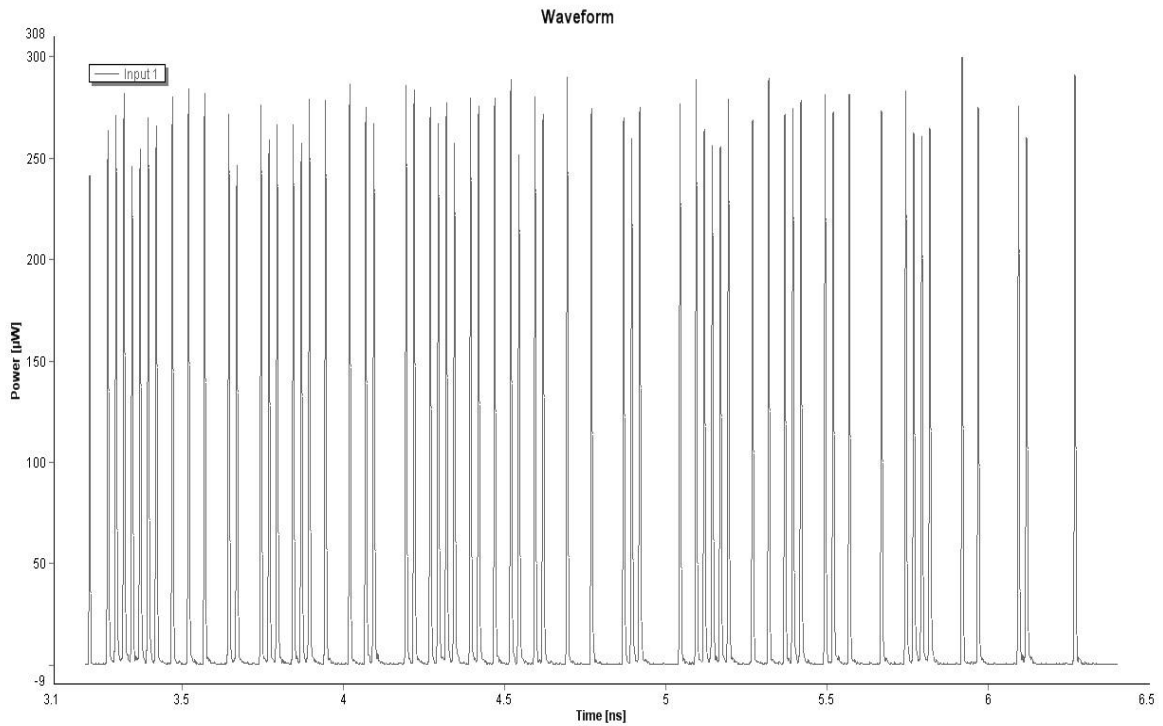
Εικ.73 Φάσμα στην έξοδο του συμβολόμετρου

Ύστερα από μεγέθυνση της απεικόνισης του φάσματος παρατηρήσουμε ακόμα καλύτερα την απουσία της φέρουσας συχνότητας.



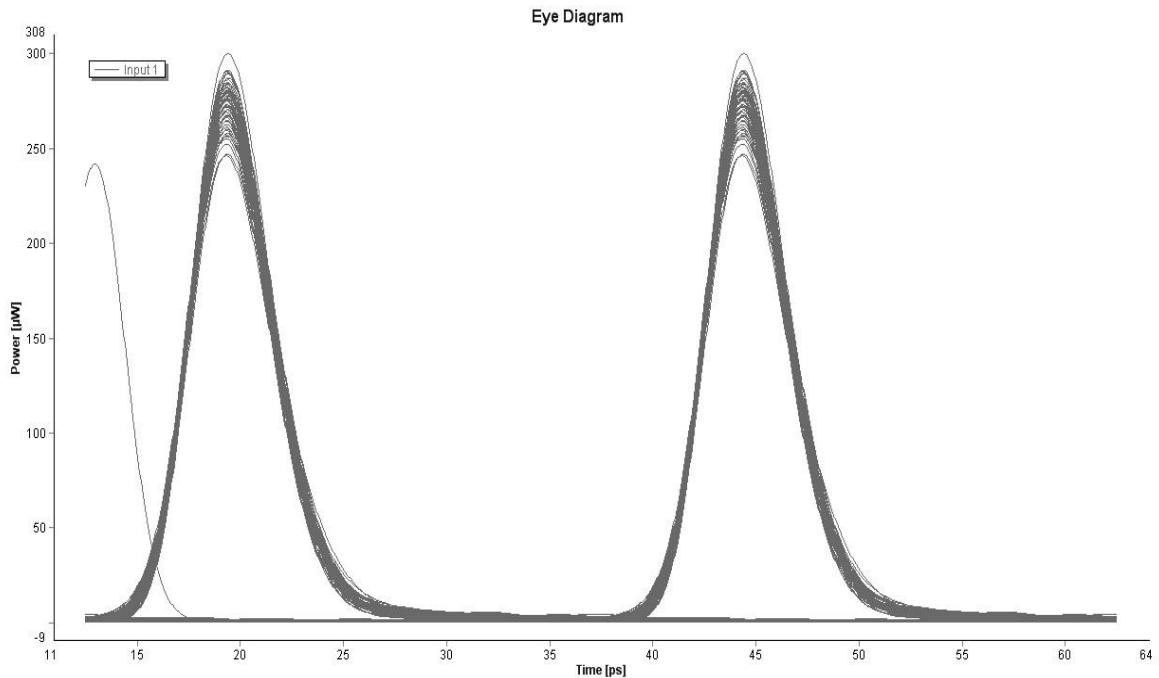
Εικ.74 Φάσμα τελικού σήματος που έχει υποστεί μετατροπή μήκους κύματος

Στο πεδίο του χρόνου παρατηρούμε ότι στους παλμούς έχει εξαλειφθεί ο θόρυβος που προστέθηκε από τον SOA, καθώς είναι και αυτό ένα φίλτρο (περιοδικό). Οπότε, κατανοούμε ότι με την παραπάνω τεχνική φίλτρου-συμβολόμετρου βελτιώνεται και το σήμα στην έξοδο εκτός από την αντιστροφή της πολικότητας.



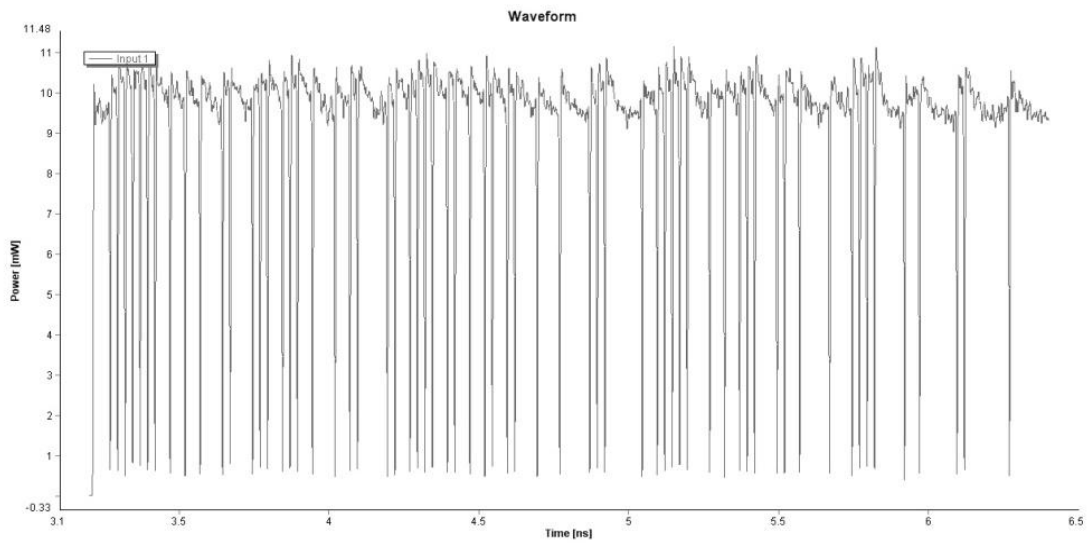
Εικ.75 Παλμοί που έχουν υποστεί μετατροπή μήκους κύματος.

Έτσι, λαμβάνουμε το τελικό διάγραμμα ματιού όπου το σήμα μας μη αντεστραμμένο έχει επιδεχθεί μετατροπή μήκους κύματος.

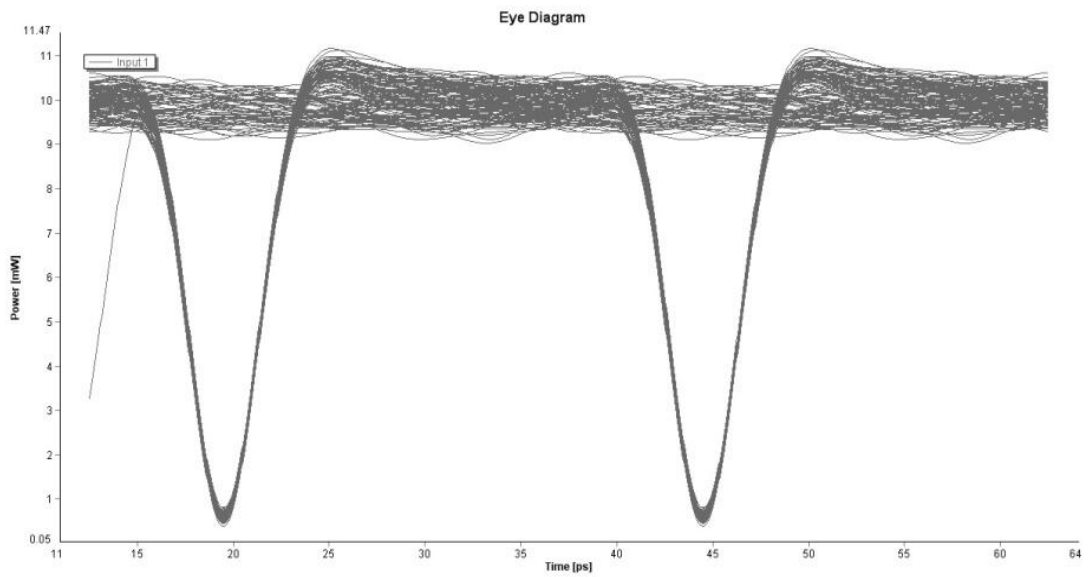


Εικ.76 Διάγραμμα ματιού τελικού μη αντεστραμμένου σήματος.

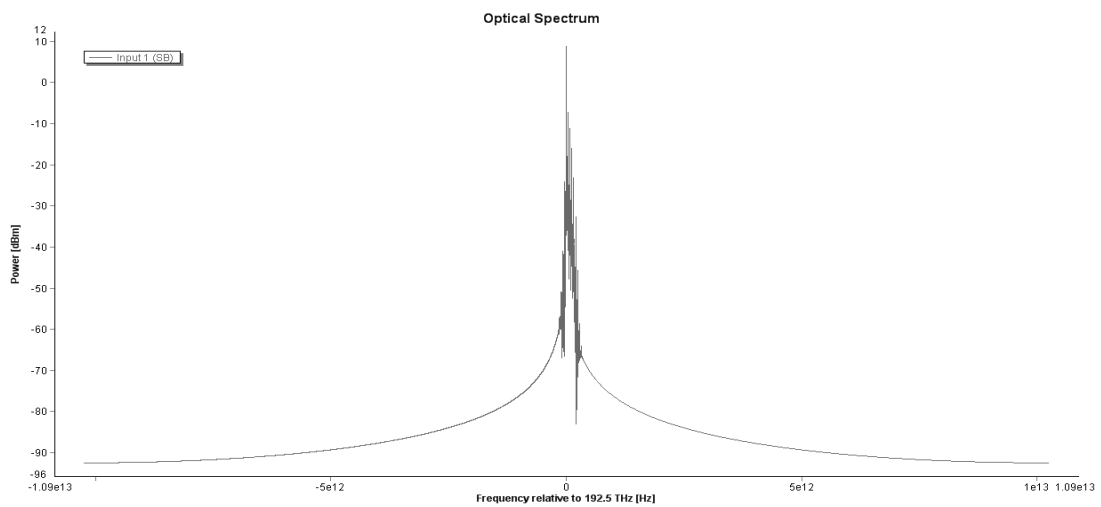
Για λόγους πληρότητας ακολουθούν τα αποτελέσματα στη δεύτερη έξοδο του MZI, ο βραχίονας αυτός δεν έχει στοιχείο καθυστέρησης με αποτέλεσμα το σήμα να είναι αντεστραμμένο στην έξοδο.



Εικ.77 Παλμοί στην δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου



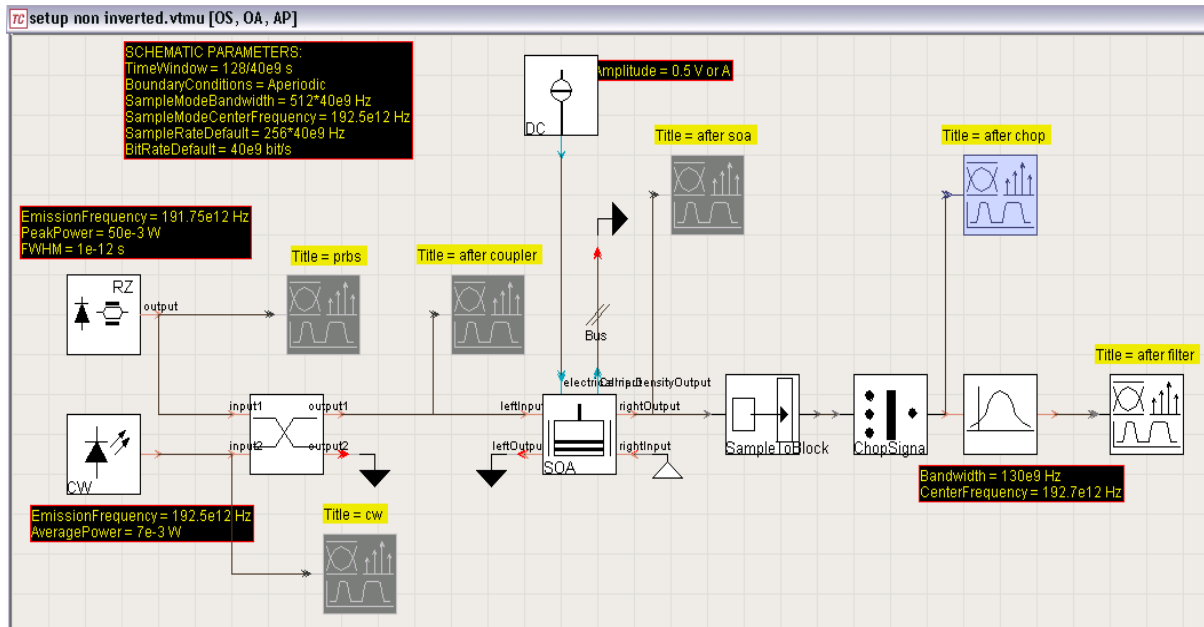
Εικ.78 Διάγραμμα ματιού για τη δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου



Εικ.79 Φάσμα στη δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου

4.1.1.2 Προσομοίωση SOA-OBF με αρκετή μετατόπιση του φίλτρου προς τις μπλε αρμονικές

Το μοντέλο προσομοίωσης είναι ίδιο με το παραπάνω μόνο που απουσιάζει το συμβολόμετρο.



Εικ.80 Μοντέλο προσομοίωσης μη αντεστραμμένης λειτουργίας με SOA-OBF για ρυθμό μετάδοσης 40 Gbps

Το σύστημα δεν φέρει αλλαγές και η μοναδική μεταβλητή που υπόκειται σε αλλαγή είναι η κεντρική συχνότητα του φίλτρου.Επίσης, οι απεικονίσεις μέχρι και πριν την έξοδο του φίλτρου είναι οι ίδιες και δεν επαναλαμβάνονται.

FilterOpt_vtms1 - Parameter Editor

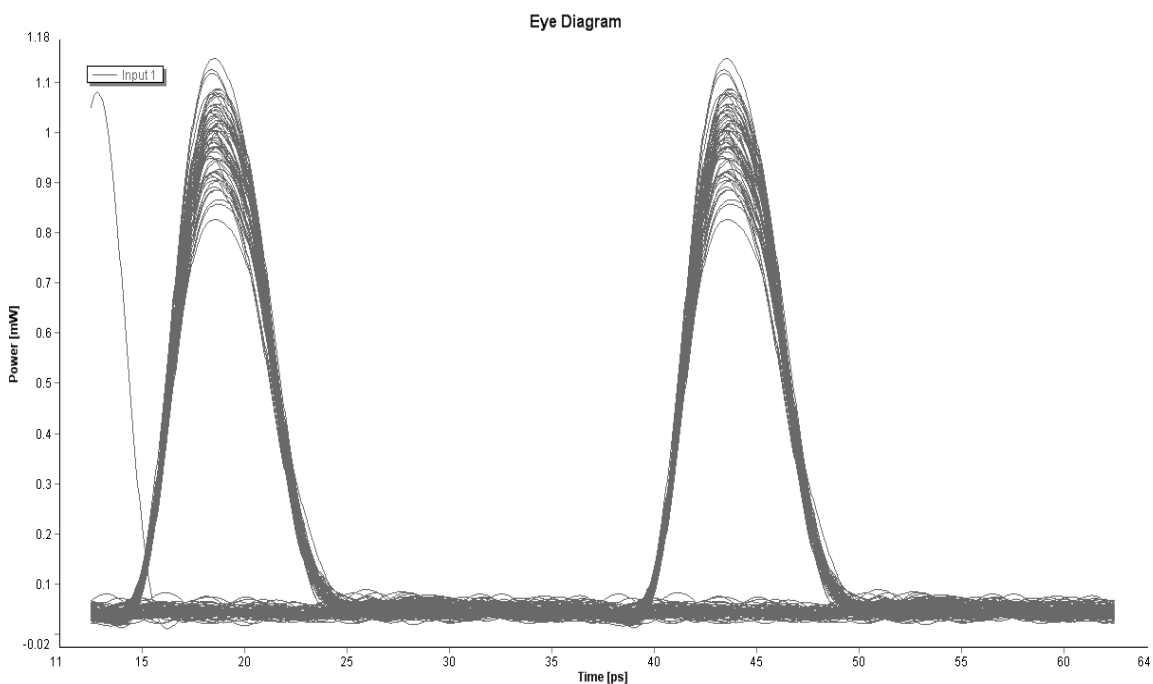
Name: FilterOpt.vtms
ID: FilterOpt_vtms1

Description
The FilterOpt module is a universal optical filter model for simulations of band and comb filters with the standard transfer functions: Butterworth, Bessel, Elliptic, Gaussian, Rectangular, Trapezoid and Integrator. The model can also simulate a measured filter whose transfer function is supplied in an input file.

Name	Value	Unit	Show
Physical			
Filter Type	Band Pass		<input type="checkbox"/>
Transfer Function	Gaussian		<input type="checkbox"/>
Bandwidth	130e9	Hz	<input type="checkbox"/>
Center Frequency	192.7e12	Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
Gaussian Order	1		<input type="checkbox"/>
Minimum Phase	Off		<input type="checkbox"/>
Complementary Power	Off		<input type="checkbox"/>
Enhanced			
Noise Dynamic	3.0	dB	<input type="checkbox"/>
Noise Resolution	Bit Rate Default/4	Hz	<input type="checkbox"/>
Noise Threshold	-100	dB	<input type="checkbox"/>
Active Filter Bandwidth	1.0e12	Hz	<input type="checkbox"/>
Active Filter Bandwidth	193.1e12	Hz	<input type="checkbox"/>
Limit To Active Filter Ba	Off		<input type="checkbox"/>
Conserve Memory	On		<input type="checkbox"/>
Digital Filter Order Defi	Automatic		<input type="checkbox"/>
Digital Filter Accuracy	1.e-4		<input type="checkbox"/>
Active	On		<input type="checkbox"/>
Visualization			
Visualization Mode	None		<input type="checkbox"/>
Save To File	Off		<input type="checkbox"/>

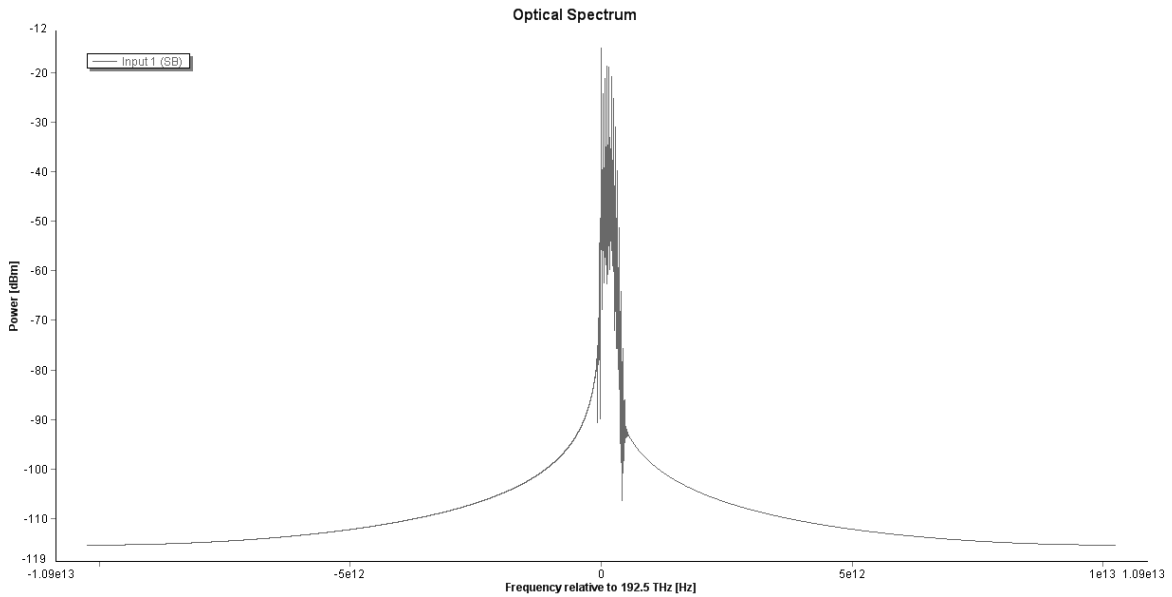
Εικ.81 Τιμές μεταβλητών του οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου για την μη αντεστραμμένη λειτουργία του μετατροπέα σε ρυθμό μετάδοσης 40Gbps.

Στο παρόν προσομοιωτικό μοντέλο έχουμε μεγαλύτερη μετατόπιση του φίλτρου ως προς την κεντρική συχνότητα του cw σήματος. Με αυτό τον τρόπο επιλέγουμε τις φασματικές συνιστώσες, οι οποίες παράγονται λόγω του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης. Οι παλμοί αναμένουμε να είναι μη αντεστραμμένοι, όπως και φαίνεται από τις παρακάτω απεικονίσεις. Η ποιότητα του σήματος εξόδου δεν είναι καλύτερη σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο κάτι που γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα ματιού και γίνεται ακόμη πιο ξεκάθαρο σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Επιβεβαιώνουμε, λοιπόν, και με την προσομοίωση τα πειραματικά δεδομένα όπως τα αναλύσαμε στην ενότητα 2.4. Έτσι, όταν διατηρούμε την κεντρική συνιστώσα του σήματος μετά τον SOA και επιλέγουμε την φασματική περιοχή κοντά σε αυτή και ελαφρά προς τις μπλε συνιστώσες, λαμβάνουμε ένα καθαρό διάγραμμα ματιού στην έξοδο.

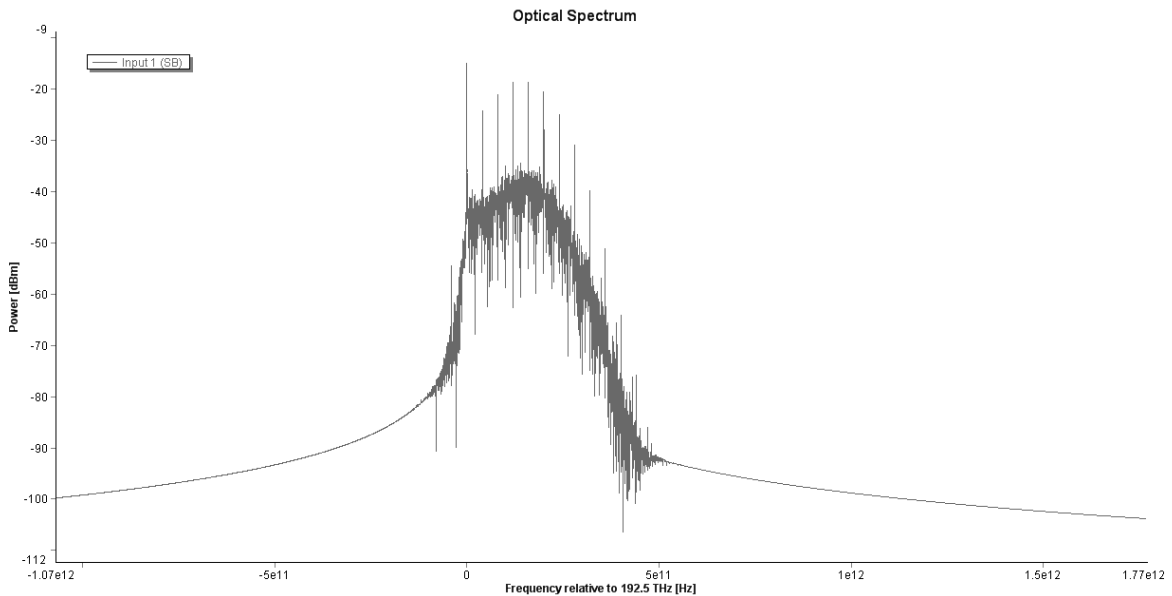


Εικ. 82 Διάγραμμα ματιού μη αντεστραμμένης λειτουργίας μετατροπέα

Επίσης, στο φάσμα του σήματος μετά το φίλτρο, βλέπουμε την απουσία της κεντρικής συνιστώσας και την επιλογή της περιοχής των μπλε φασματικών συνιστωσών.

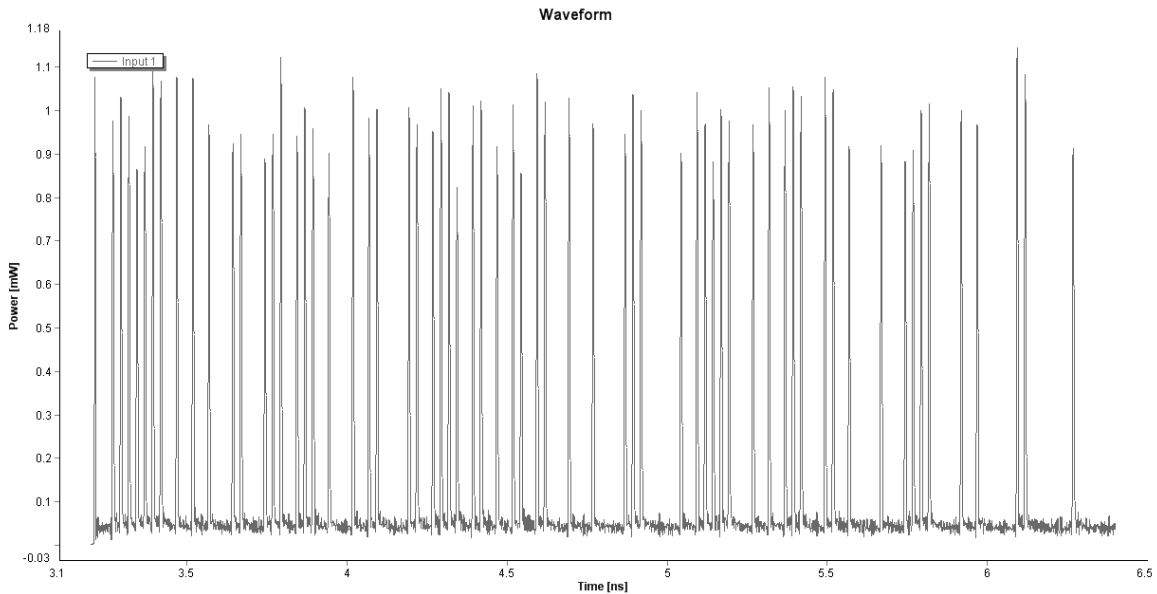


Εικ.83 Φασματική απεικόνιση στην έξοδο του μετατροπέα για μη αντεστραμμένη λειτουργία.



Εικ.84 Φασματική απεικόνιση σε μεγέθυνση

Επιπρόσθετα, στο πεδίο του χρόνου παρατηρούμε τις διαφορές στην ισχύ κορυφής των παλμών, οι οποίες είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο, κάτι που δημιουργεί πρόβλημα στο λογικό επίπεδο «1» του παλμού όπως βλέπουμε και στο διάγραμμα ματιού. Τέλος στη στάθμη «0» δεν έχει εξαλειφθεί τελείως ο θόρυβος. Αυτό οφείλεται και στην έλλειψη της συμβολομετρικής διάταξης, η οποία βοηθούσε σε κάποιο βαθμό, όπως και το φίλτρο, στην μείωση του ποσοστού του θορύβου στους παλμούς.



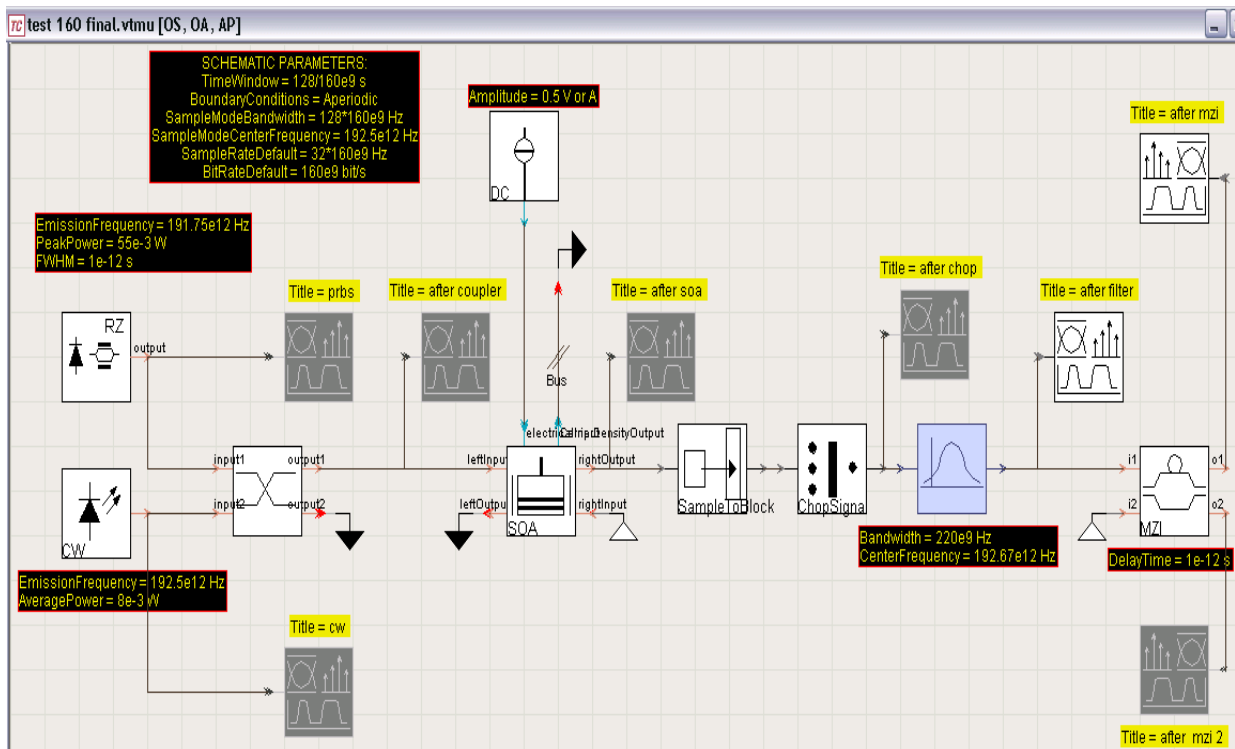
Εικ.85 Παλμοί στην έξοδο του μετατροπέα κάνοντας χρήση του μοντέλου του μη αντεστραμμένου σήματος στην έξοδο.

4.1.2 Προσομοίωση της λειτουργίας μετατροπέα μήκους κύματος σε ταχύτητα 160Gbps

Στις επόμενες παραγράφους, παρουσιάζουμε τη λειτουργία του μετατροπέα στην υψηλή ταχύτητα των 160Gbps. Παραθέτουμε, όπως και πριν, τις δύο αντίστοιχες υλοποιήσεις, με φίλτρο μικρής μετατόπισης και συμβολόμετρο, όπως επίσης και με φίλτρο που έχει αρκετή μετατόπιση σε σχέση με την κεντρική συχνότητα του cw σήματος. Επίσης, αναλύουμε και σχολιάζουμε τα τελικά αποτελέσματα σε σχέση με την χαμηλότερη ταχύτητα των 40Gbps. Στις παρακάτω υλοποιήσεις μεταβάλλουμε κάποιες μεταβλητές, όπως την ισχύ κορυφής του rump ή του probe σήματος, για να τονίσουμε ότι υπάρχει ένα εύρος στην επιλογή των τιμών που αφορούν την προσομοίωση μας. Βέβαια, η επιλογή αυτών, αν υπολογίσουμε τον αριθμό των επαναλήψεων που έγιναν πλησιάζει το βέλτιστο.

4.1.2.1 Προσομοίωση SOA-OBF-MZI και ελαφριά μετατόπιση του φίλτρου προς τις μπλε αμομονιές

Ανάλογο είναι το μοντέλο και για την ταχύτητα των 160Gbps.



Εικ.86 Μοντέλο προσομοίωσης αντεστραμμένης λειτουργίας του μετατροπέα για ταχύτητα 160Gbps

Τα στοιχεία παραμένουν ως έχουν, ενώ οι γενικές μεταβλητές της υλοποίησης ορίστηκαν ως εξής :

Name	Value	Unit	Pla...	Sh...
Global				
f TimeWindow	128/160e9	s		<input checked="" type="checkbox"/>
InBandNoiseBir	OFF			<input type="checkbox"/>
Boundary Condi	Aperiodic			<input checked="" type="checkbox"/>
LogicalInformati	ON			<input type="checkbox"/>
f Sample ModeBa	128*160e9	Hz		<input checked="" type="checkbox"/>
f Sample ModeCe	192.5e12	Hz		<input checked="" type="checkbox"/>
f Sample RateDef	32*160e9	Hz		<input checked="" type="checkbox"/>
f Bit Rate Default	160e9	bit/s		<input checked="" type="checkbox"/>
DesignRules				

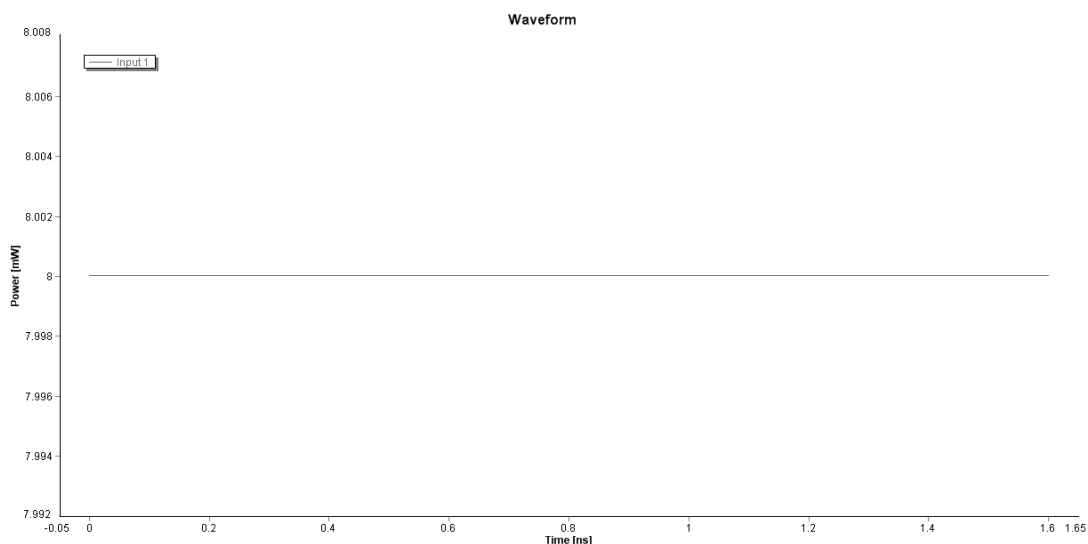
Εικ. 87 Τιμές για τις γενικές μεταβλητές

Παρατηρούμε την αλλαγή στο ρυθμό μετάδοσης αλλά και τις αλλαγές στις μεταβλητές sample mode bandwidth και sample rate default. Οι μεταβλητές ορίστηκαν έτσι ώστε να μειωθεί το χρονικό διάστημα για την επεξεργασία και τελική προβολή των αποτελεσμάτων, πάντα όμως διατηρώντας την ποιότητα των προσομοιώσεων σε ένα καλό επίπεδο. Δεν παρατηρούνται πάντως αντιληπτές διαφορές σε σχέση με την προσομοίωση σε ταχύτητα 40Gbps.

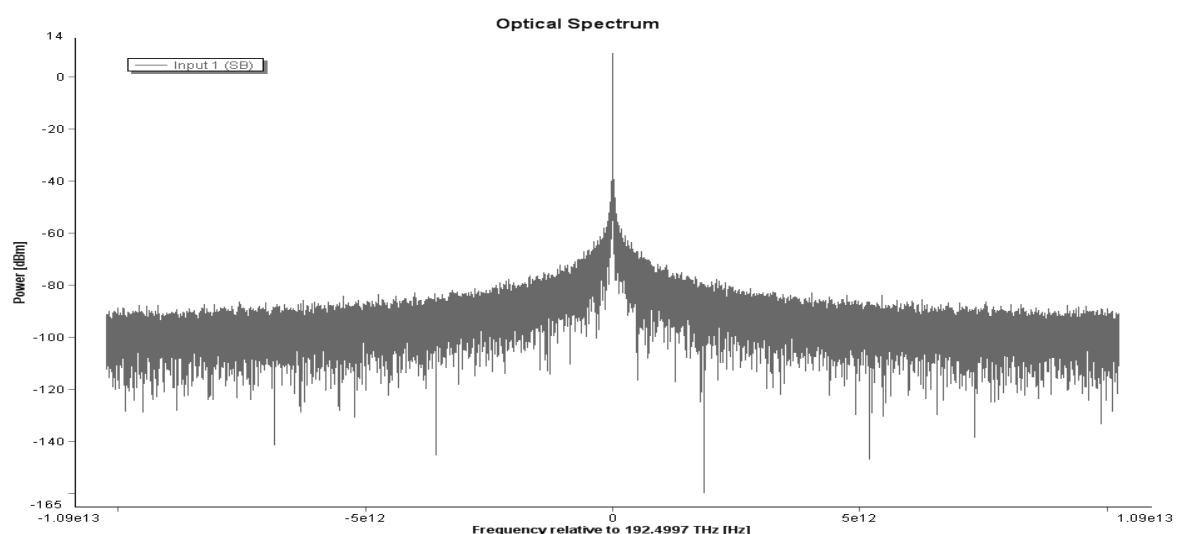
Εκτός από τις αλλαγές στις γενικές μεταβλητές, υπήρξαν και κάποιες αλλαγές σε διάφορες τιμές των μεταβλητών ορισμένων στοιχείων. Αυτές παραθέτονται στις επόμενες ενότητες, καθώς επίσης προβάλλονται οι απεικονίσεις και γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

4.1.2.1 Σήμα μετά την πηγή σήματος σταθερού πλάτους

Αρχικά, σχετικά με το σήμα σταθερού πλάτους, η ισχύς κορυφής είναι **8mW**. Παρακάτω παραθέεται η χρονική και φασματική απεικόνιση του cw σήματος.



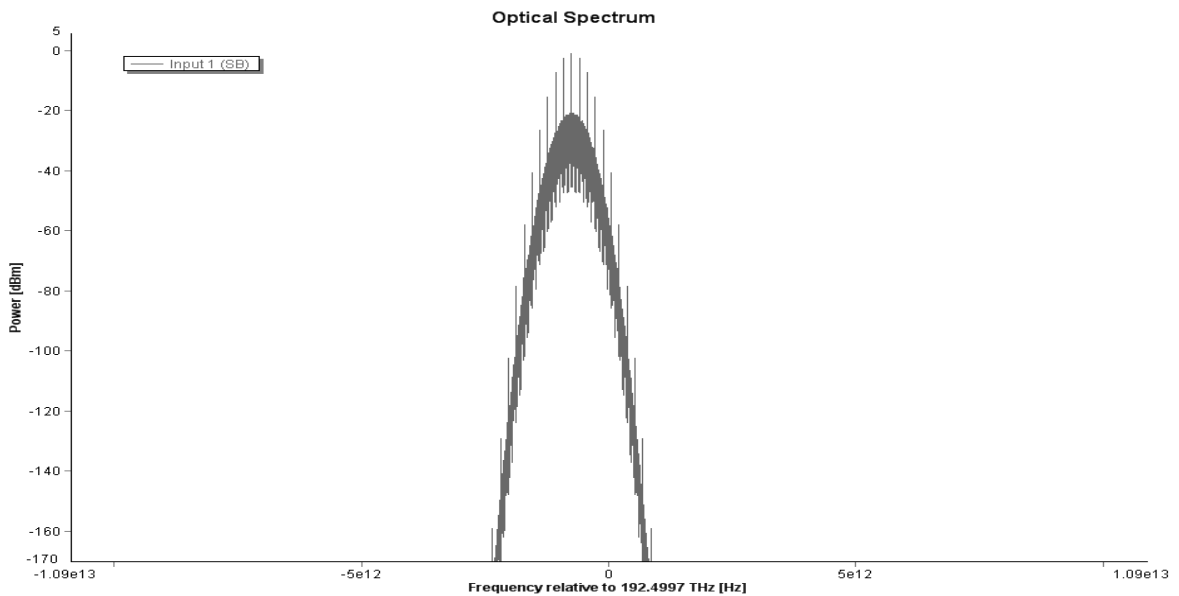
Εικ. 88 Χρονική απεικόνιση της εξόδου της πηγής σταθερού πλάτους



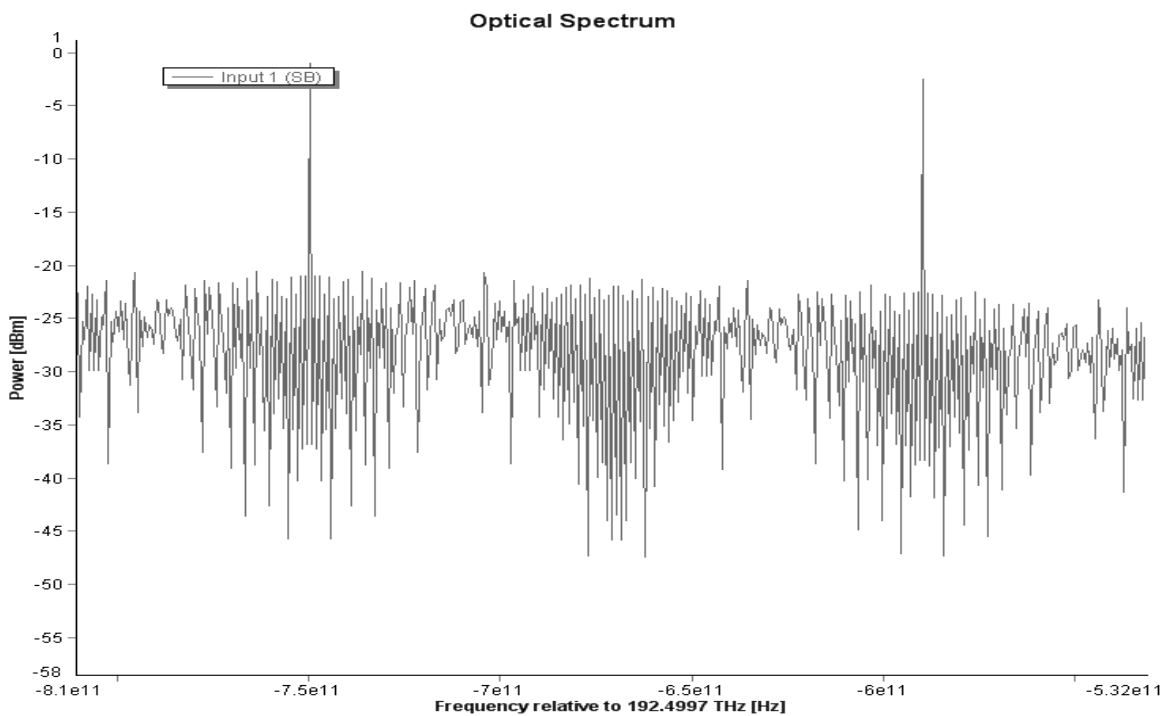
Εικ. 89 Φασματική απεικόνιση της πηγής cw

4.1.2.1.2 Σήμα μετά την γεννήτρια παλμικής ακολουθίας PRBS

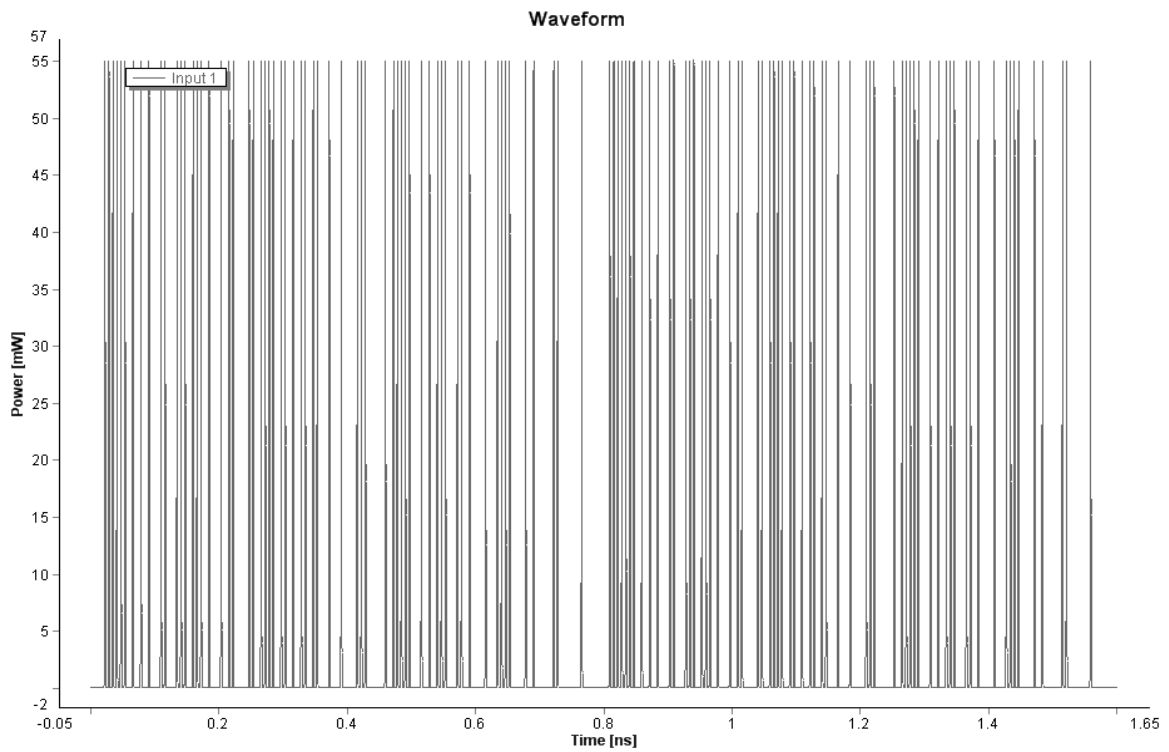
Μία ακόμα αλλαγή κάναμε στην **ισχύ κορυφής των παλμών** που εξέρχονται από την γεννήτρια PRBS και έτσι τώρα διαμορφώθηκε στα **55mW** ενώ το **εύρος των παλμών παραμένει σταθερά ίσο με 1ps**. Στη συνέχεια, βλέπουμε την απεικόνιση στο πεδίο της συχνότητας και αν κάνουμε περαιτέρω μεγέθυνση παρατηρούμε ότι το σήμα είναι διαμορφωμένο και οι αρμονικές απέχουν 160GHz.



Εικ. 90 Απεικόνιση στο πεδίο των συχνοτήτων της εξόδου της γεννήτριας PRBS

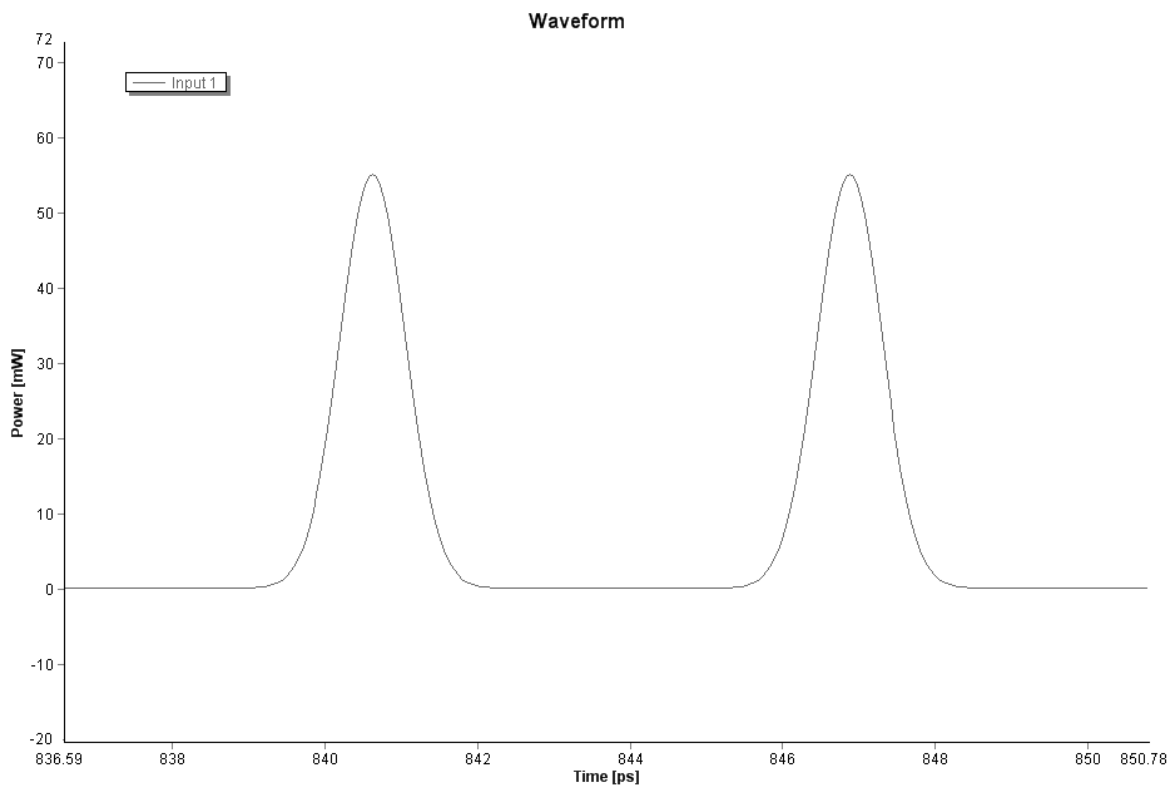


Εικ.91 Φασματική απεικόνιση σε μεγέθυνση της παλμικής ακολουθίας PRBS



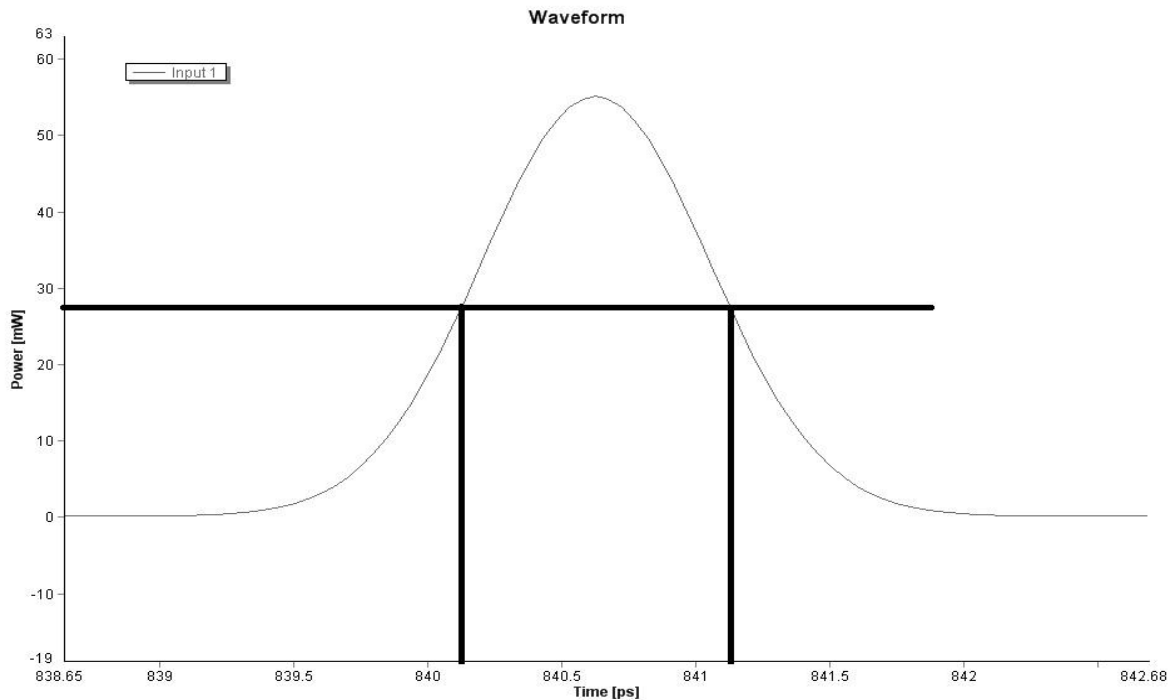
Εικ.92 Παλμοί στην έξοδο της γεννήτριας

Στο πεδίο του χρόνου οι παλμοί απέχουν μεταξύ τους 6.25ps και όπως γίνεται εμφανές η ισχύς κορυφής είναι 55mW.



Εικ.93 Απόσταση παλμών

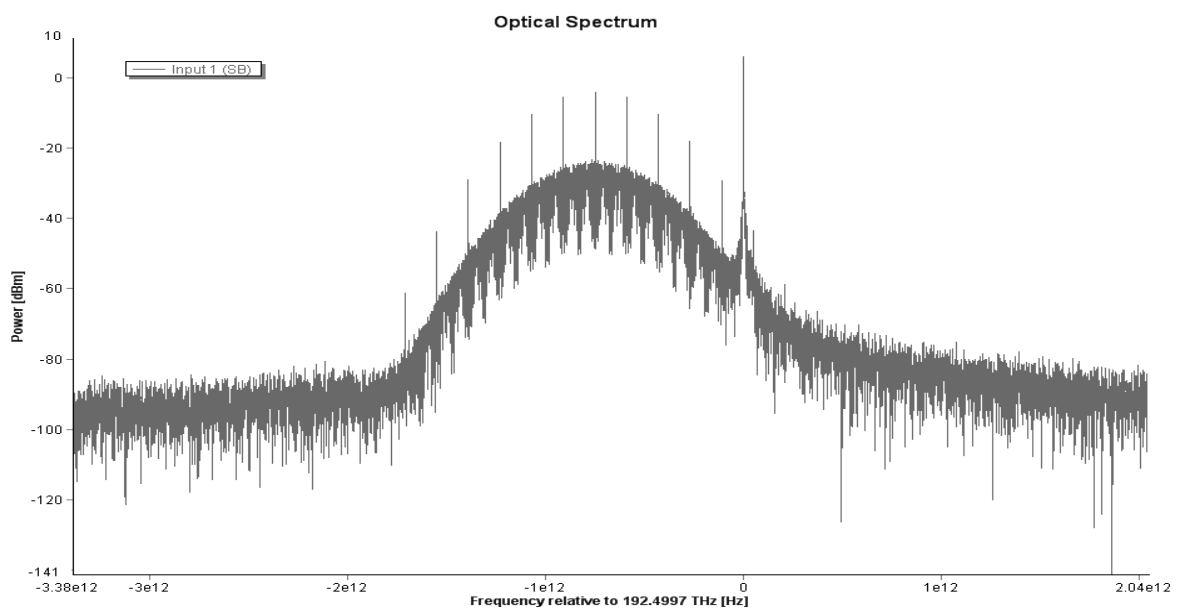
Επίσης, το πλάτος FWHM του παλμού όπως φαίνεται είναι 1 ps.



Εικ.94 Πλάτος FWHM παλμού

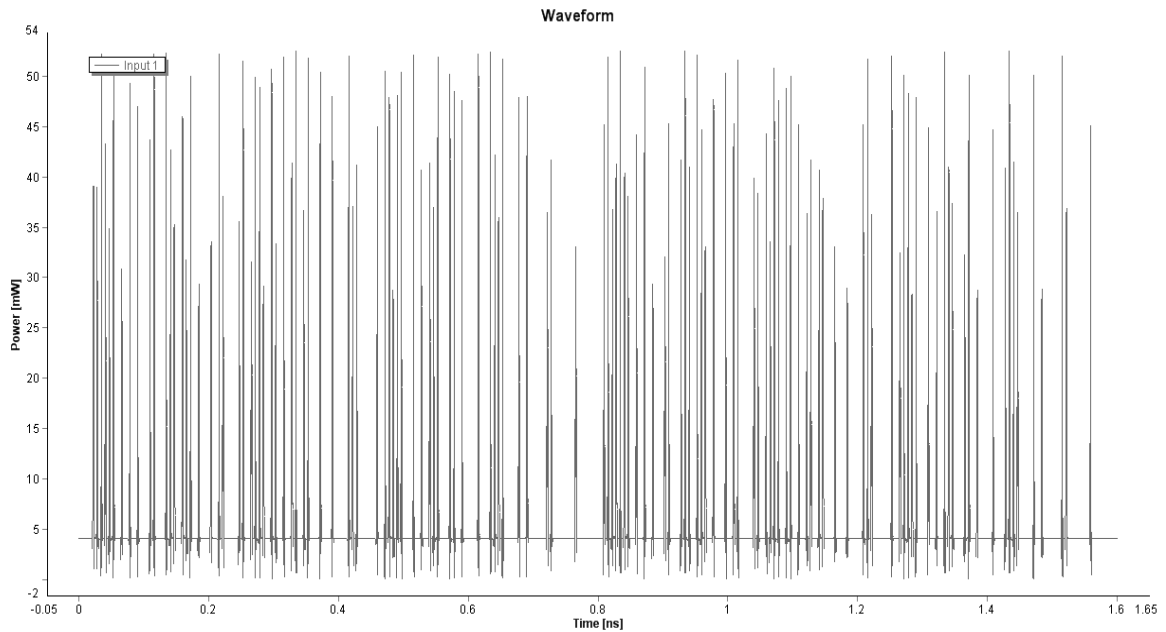
4.1.2.1.3 Σήμα μετά τον συζεύκτη

Στην παρούσα φάση, τα σήματα εισάγονται στον συζεύκτη όπου και παρατηρούμε τη φασματική απεικόνιση του αδιαμόρφωτου ακόμη σήματος. Αντίστοιχα με πριν, παρατηρούμε τις δύο κορυφές των σημάτων τοποθετημένες στις συχνότητες 191,75 THz και 192,5 THz αντίστοιχα.



Εικ.95 Φασματική απεικόνιση σήματος μετά τον συζεύκτη

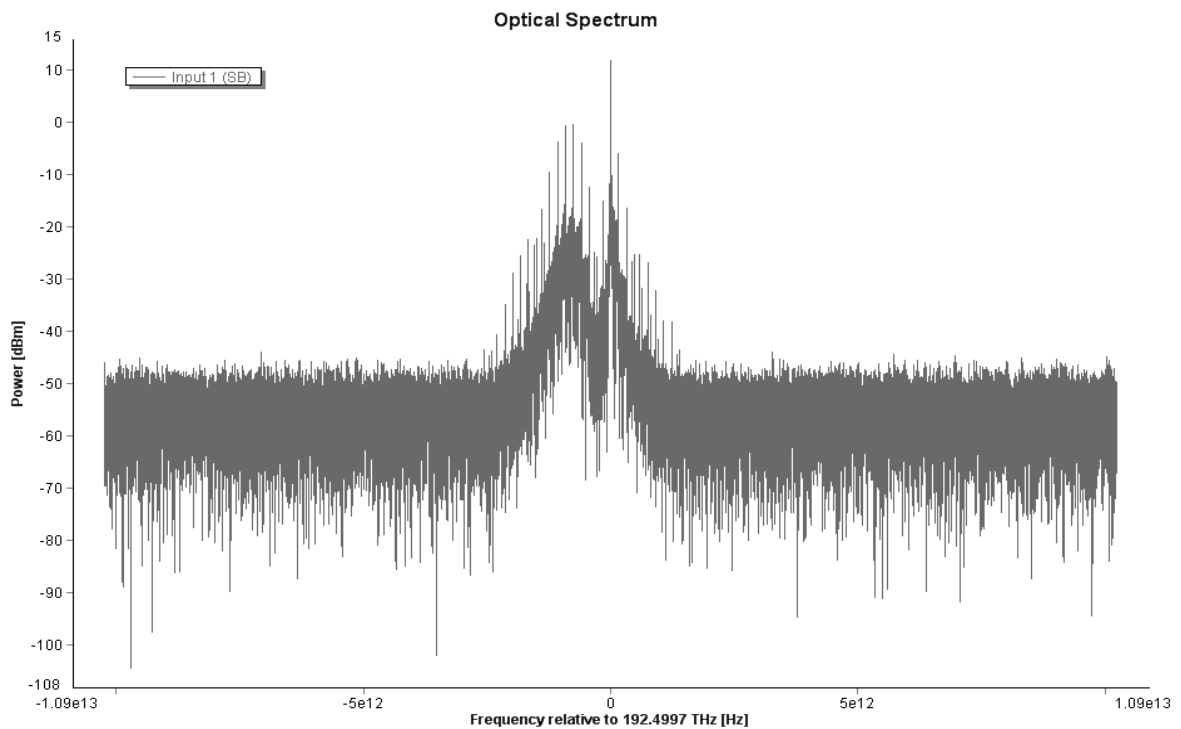
Για λόγους πληρότητας παραθέτουμε και τη μορφή των παλμών μετά τον συζεύκτη.



Εικ.96 Παλμοί στην έξοδο του συζεύκτη

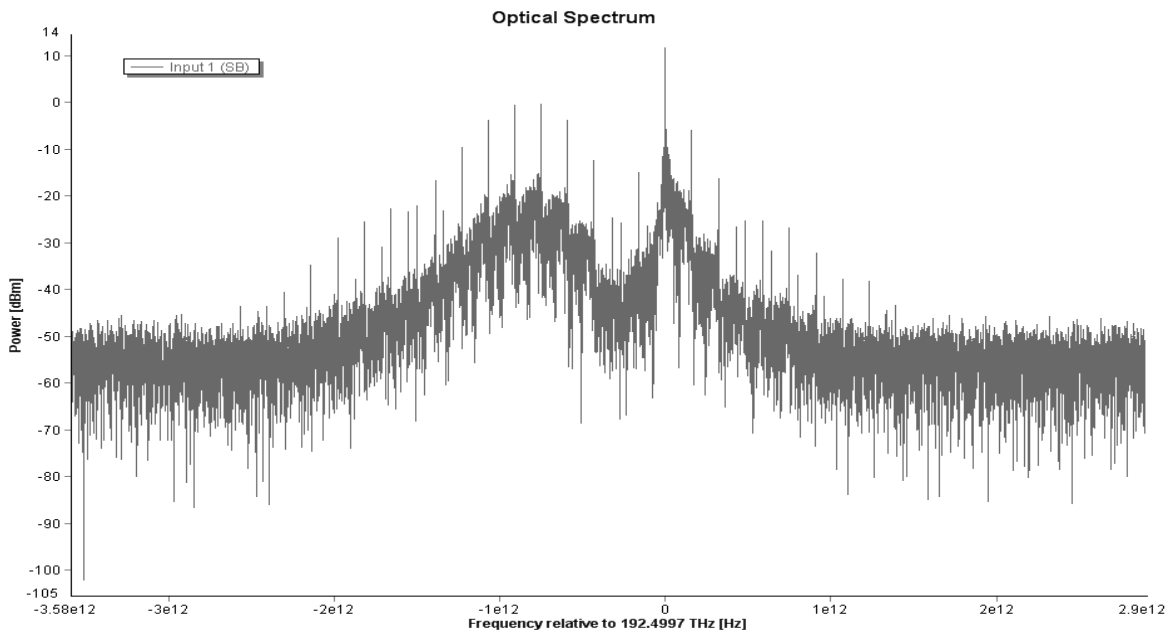
4.1.2.1.4 Σήμα μετά τον SOA

Έπειτα, το συζευγμένο σήμα εισάγεται στο SOA όπου και θα υποστεί διαμόρφωση λόγω των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή. Το σήμα εξέρχεται ενισχυμένο και διευρυμένο φασματικά λόγω του XPM.



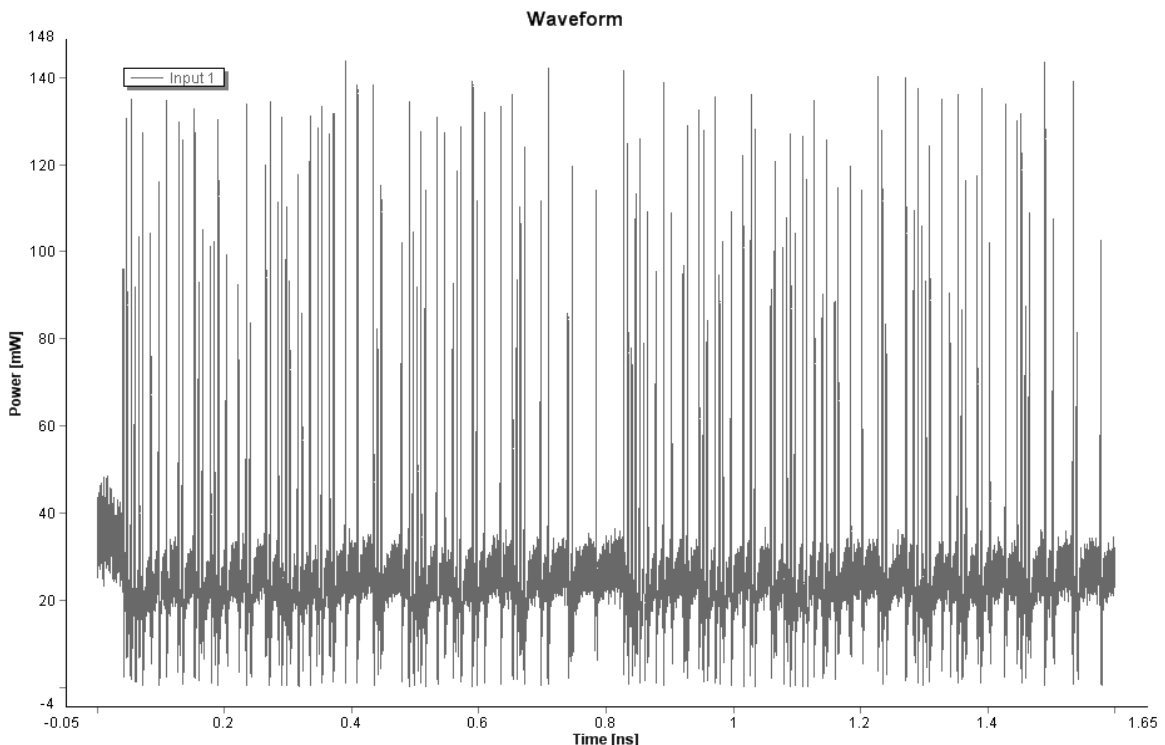
Εικ.97 Φάσμα μετά τον ημιαγωγικό ενισχυτή

Έτσι,μεγεθύνοντας περαιτέρω παρατηρούμε ότι όντως έχει υποστεί διαμόρφωση.



Εικ.98 Φασματική απεικόνιση σε μεγέθυνση

Επίσης, όπως γίνεται αντιληπτό και από τις προηγούμενες απεικονίσεις οι παλμοί εξέρχονται με ένα σημαντικό επίπεδο θορύβου.

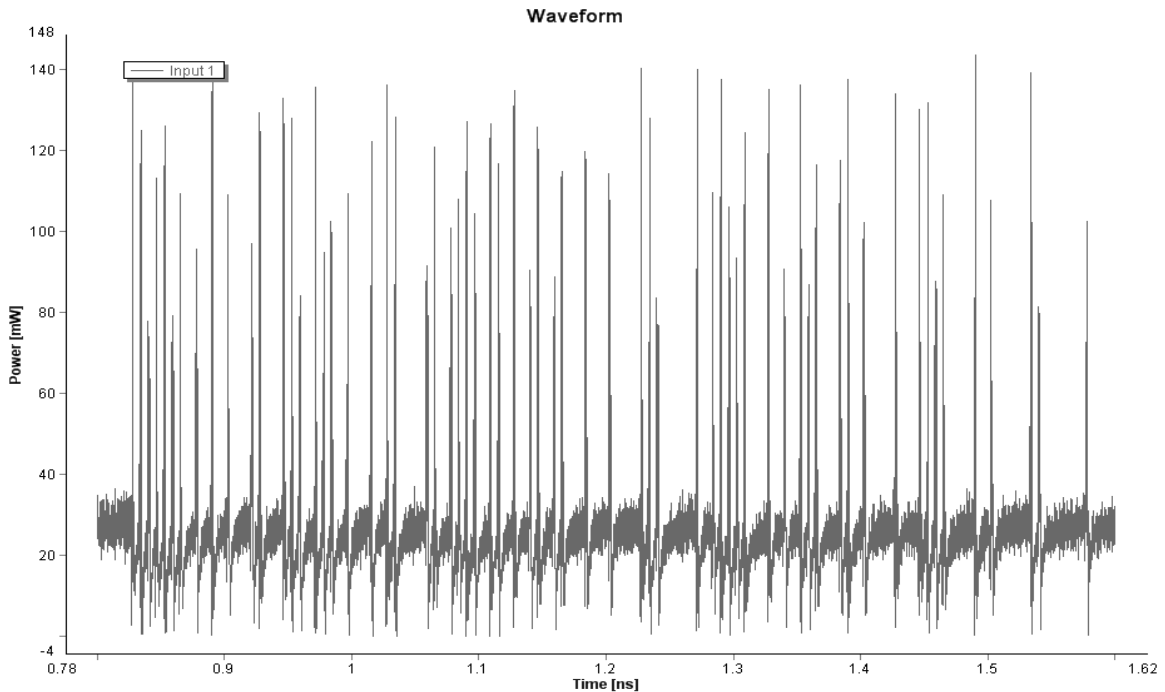


Εικ.99 Παλμοί μετά την έξοδο από τον SOA

Τέλος αξίζει να τονίσουμε ότι δεν υπήρξε καμία μεταβολή στα στοιχεία του ημιαγωγίου οπτικού ενισχυτή.

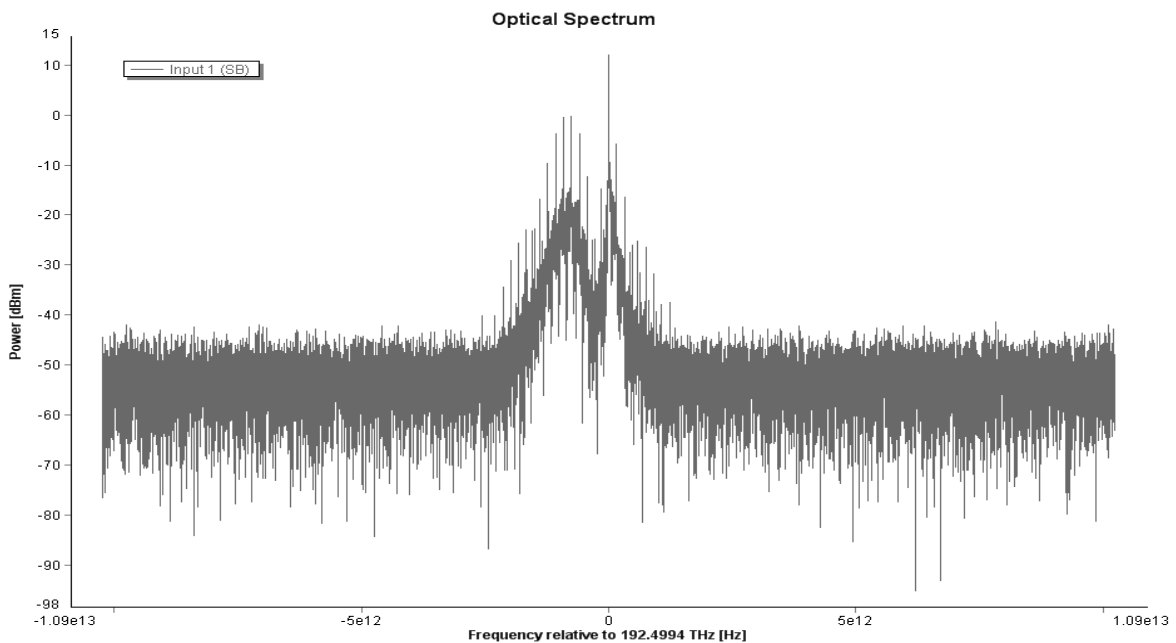
4.1.2.1.5 Σήμα μετά το στοιχείο chop signal

Στη συνέχεια, το σήμα , αφού υποστεί μετατροπή σε block, εισάγεται στο στοιχείο chop signal. Τα διάφορα μεταβατικά φαινόμενα αποβάλλονται με αποτέλεσμα να απεικονίζεται παρακάτω στην τελική σταθερή μορφή του.



Εικ.100 Παλμοί στην έξοδο του στοιχείου chop signal

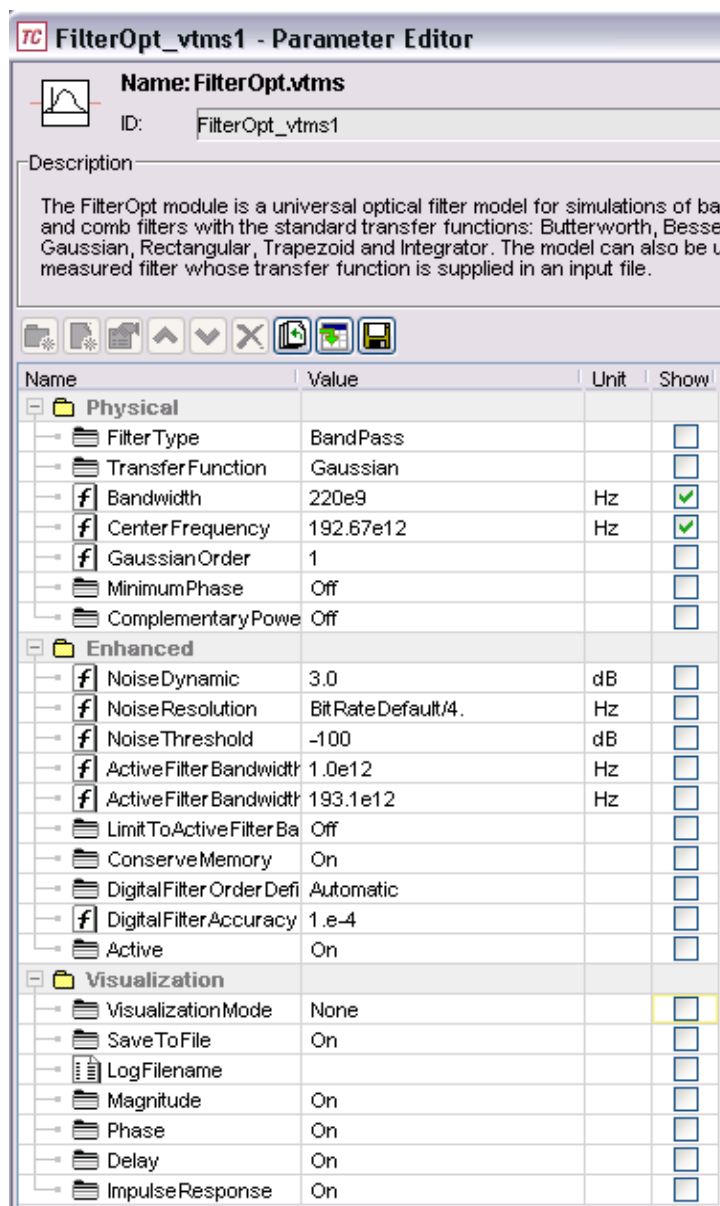
Παρατηρούμε, επίσης, την εξάλειψη των μεταβατικών φαινομένων με αποτέλεσμα οι δύο φασματικές κορυφές να γίνονται πιο ξεκάθαρες.



Εικ.101 Φάσμα σήματος στην έξοδο του στοιχείου chop signal

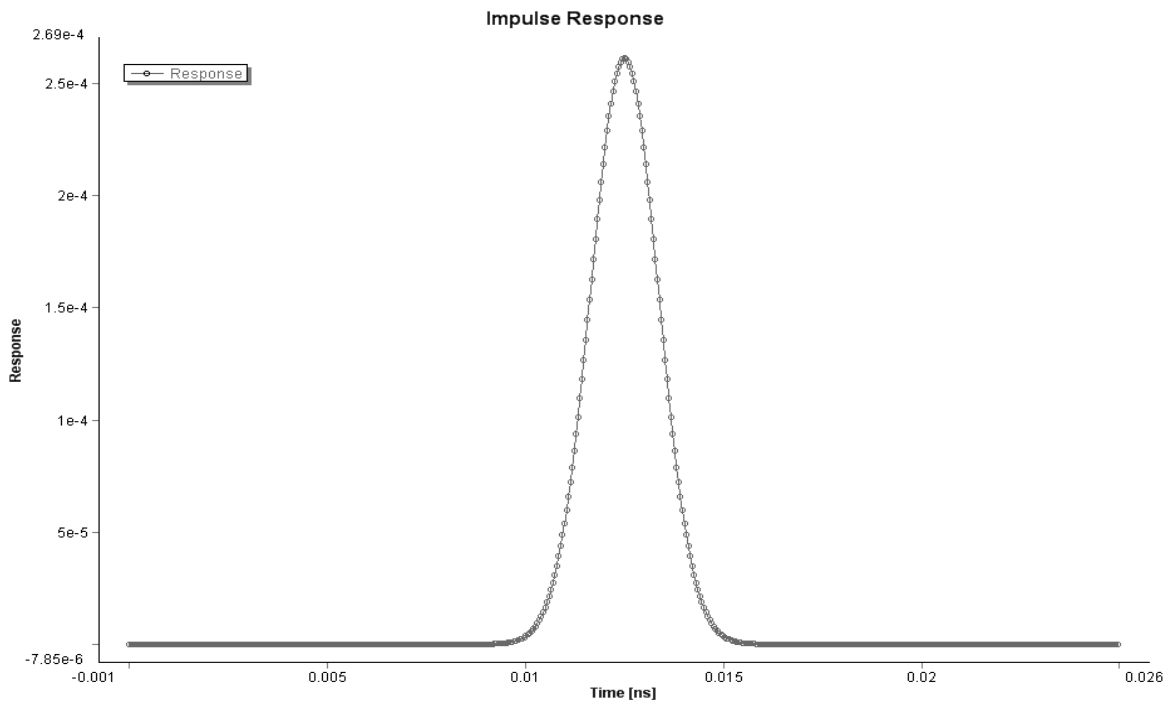
4.1.2.1.6 Αντεστραμμένο σήμα μετά το οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο (OBF)

Τα χαρακτηριστικά του φίλτρου σε αυτή τη φάση έχουν υποστεί αλλαγές ως προς το εύρος και την κεντρική συχνότητα, διατηρώντας όμως κυρίαρχη τη φέρουσα συχνότητα του σήματος σταθερού πλάτους. Ο λόγος της αλλαγής αυτής, έγκειται στο ότι στα οπτικά φάσματα ο ρυθμός μετάδοσης δηλώνεται από την απόσταση των φασματικών τόνων. Έτσι, με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, αν διατηρήσουμε το ίδιο εύρος και την ίδια κεντρική συχνότητα του φίλτρου, δε θα καταφέρουμε να επιλέξουμε τις κατάλληλες αρμονικές. Είναι σχεδόν αντίστοιχο με το να μην εισάγουμε καθόλου μετατόπιση στο φίλτρο μας.

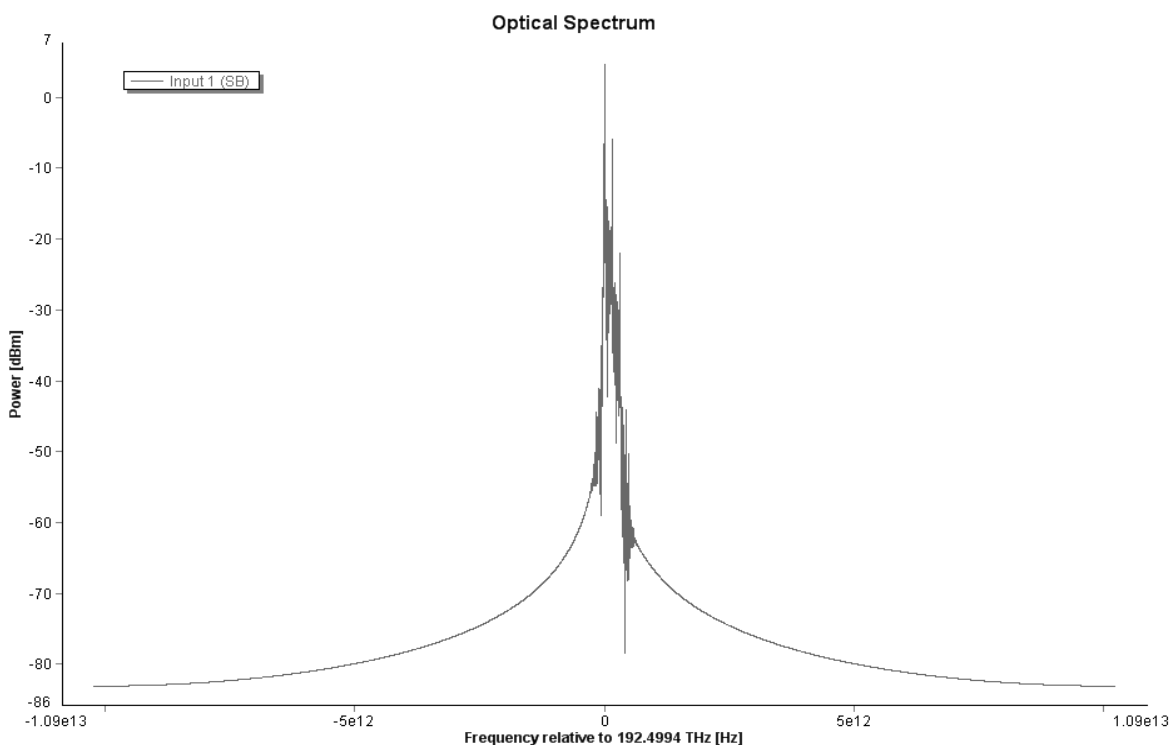


Εικ.102 Τιμές μεταβλητών του οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου για την αντεστραμμένη λειτουργία του μετατροπέα σε ρυθμό μετάδοσης 160Gbps.

Το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή των κατάλληλων φασματικών συνιστωσών έχει γκαουσιανή μορφή και παρακάτω φαίνεται η απόκρισή πλάτους του όπως εξάχθηκε από την προσομοίωση.

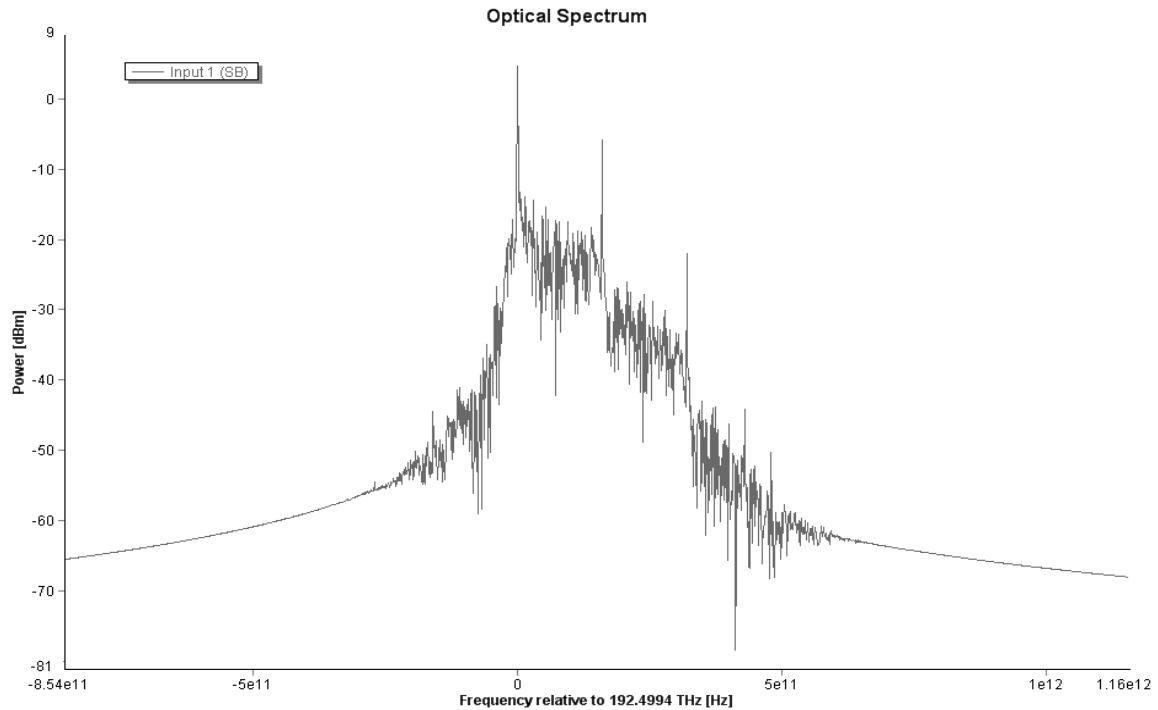


Εικ.103 Απόκριση πλάτους φίλτρου για ταχύτητα 160Gbps



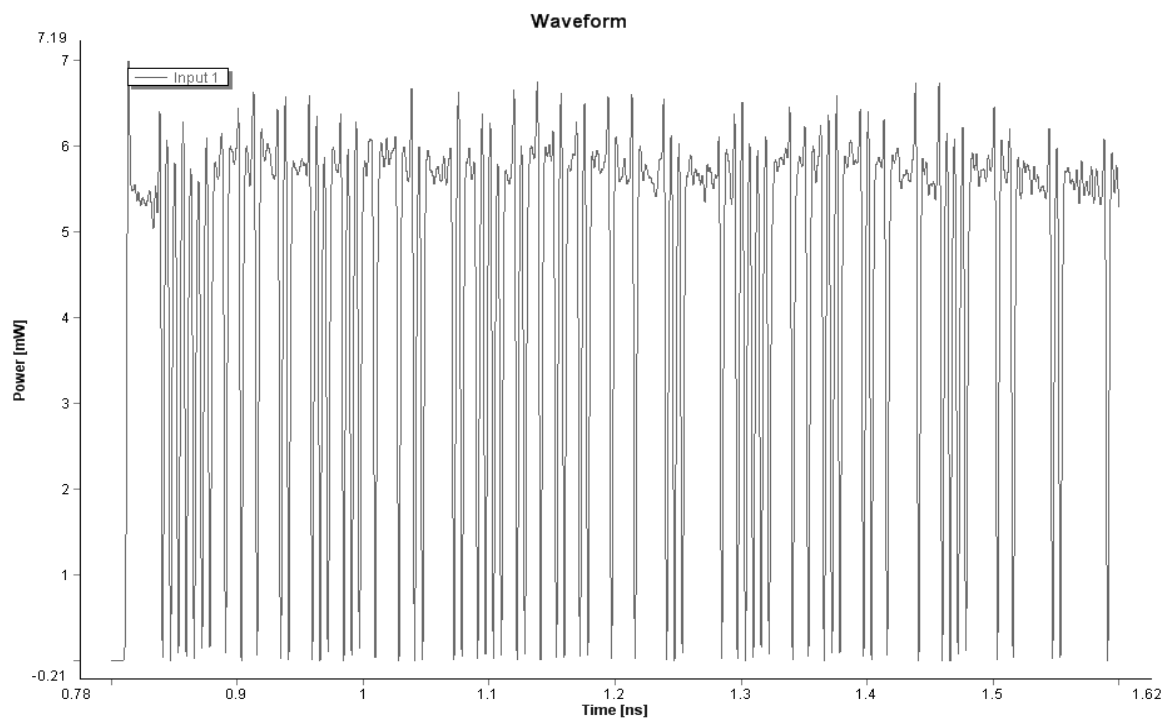
Εικ.104 Απεικόνιση στο πεδίο των συχνοτήτων του σήματος στην έξοδο του φίλτρου

Στο πεδίο των συχνοτήτων, είναι εμφανής και πάλι η διατήρηση της φέρουσας συχνότητας αλλά και η επιλογή των μπλε φασματικών συνιστωσών σε μια περιοχή κοντά σε αυτή.

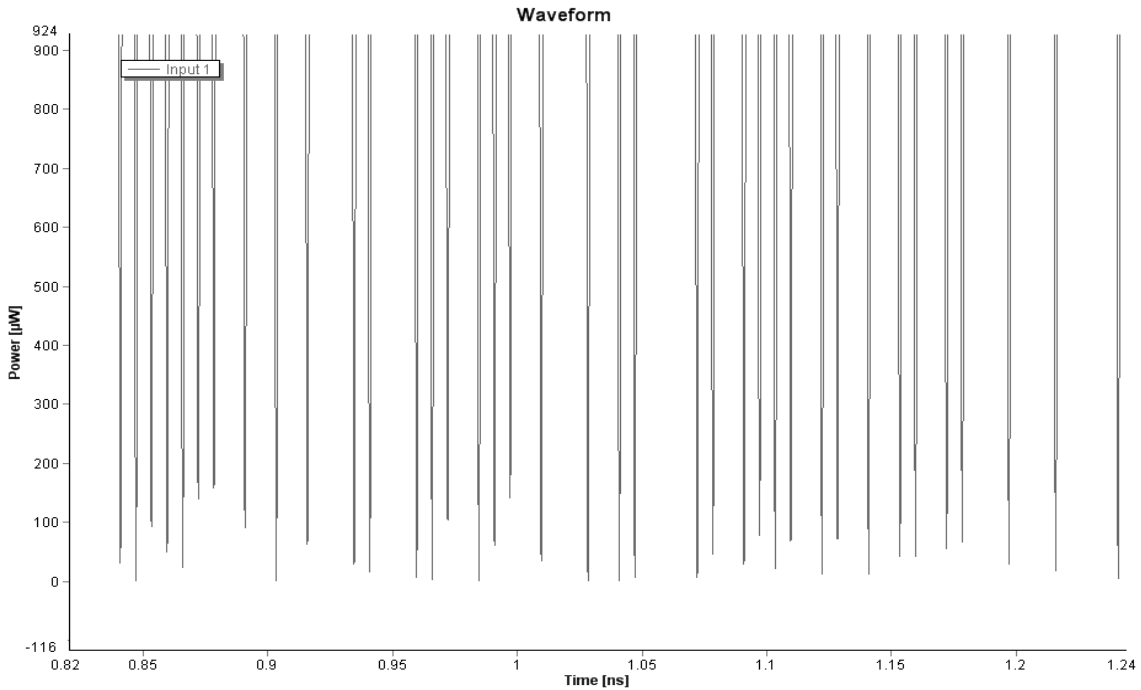


Εικ.105 Φασματική απεικόνιση σε μεγέθυνση

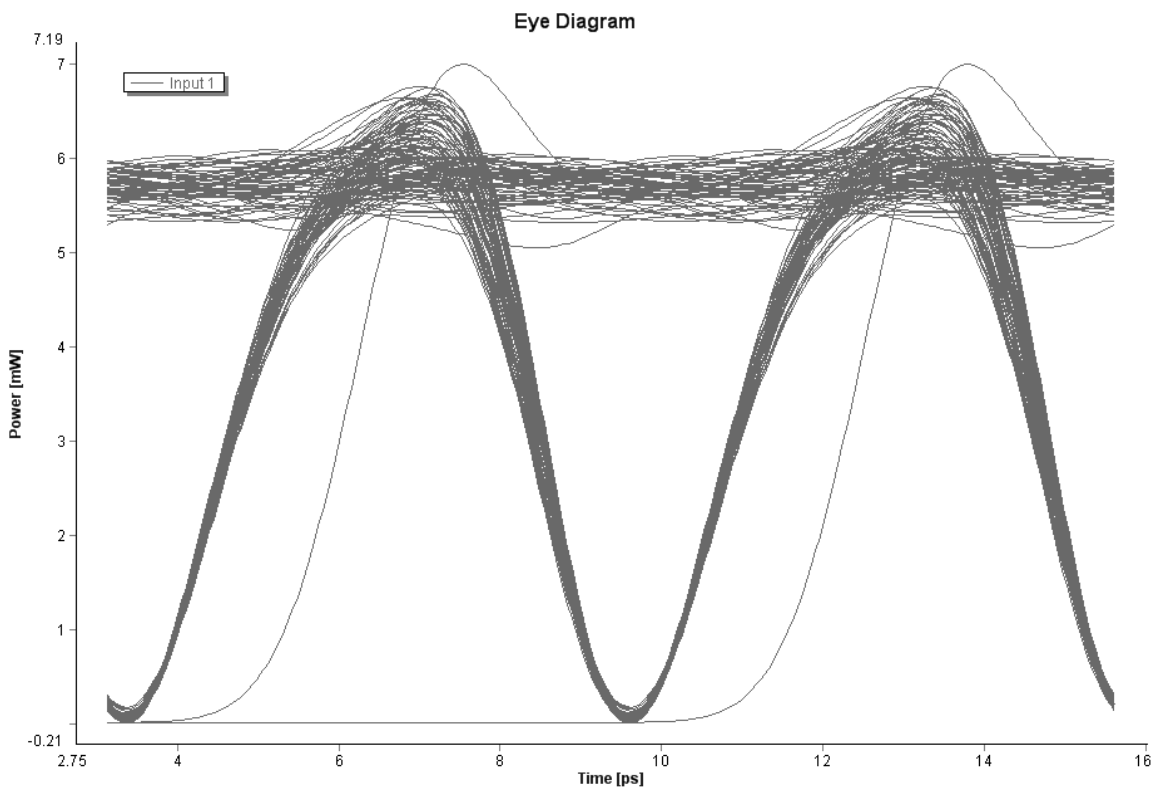
Στο πεδίο του χρόνου, παρατηρούμε και πάλι ότι οι παλμοί παρουσιάζουν μικρές μεταβολές ως προς το πλάτος τους, με αποτέλεσμα να μην έχουμε πρόβλημα παρεμβολής μεταξύ των κορυφών. Έτσι, ένα αρκετά καλό ανοιχτό διάγραμμα ματιού απεικονίζεται στην έξοδο του ζωνοπερατού φίλτρου.



Εικ.106 Αντεστραμμένοι παλμοί στην έξοδο του φίλτρου



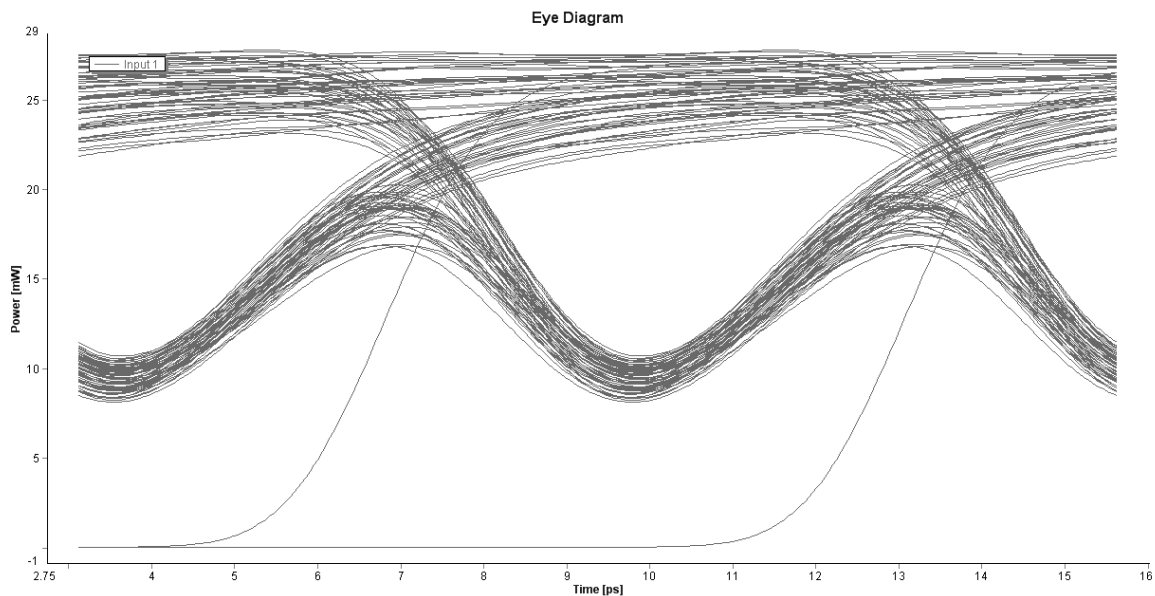
Εικ.107 Διαφορές στις κορυφές των παλμών



Εικ.108 Διάγραμμα ματιού στην έξοδο του φίλτρου

Παρατηρούμε επίσης, ότι η ανάκαμψη γίνεται μέσα σε 4 ps περίπου. Στο σημείο αυτό θα αντιπαραβάλουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μηδενική μετατόπιση του φίλτρου. Σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα ματιού, επιβεβαιώνουμε ότι και πειραματικά, δηλαδή το φαινόμενο XGM που λαμβάνει χώρα στο SOA από μόνο του χωρίς φιλτράρισμα θα μας δώσει αντεστραμμένους παλμούς αλλά με αργή

ανάκαμψη. Από ότι μπορούμε να διακρίνουμε η ανάκαμψη της καμπύλης κέρδους γίνεται από 30 με 40 ps (εικ.109) σε 4 ps (εικ.108) με σωστό φιλτράρισμα.

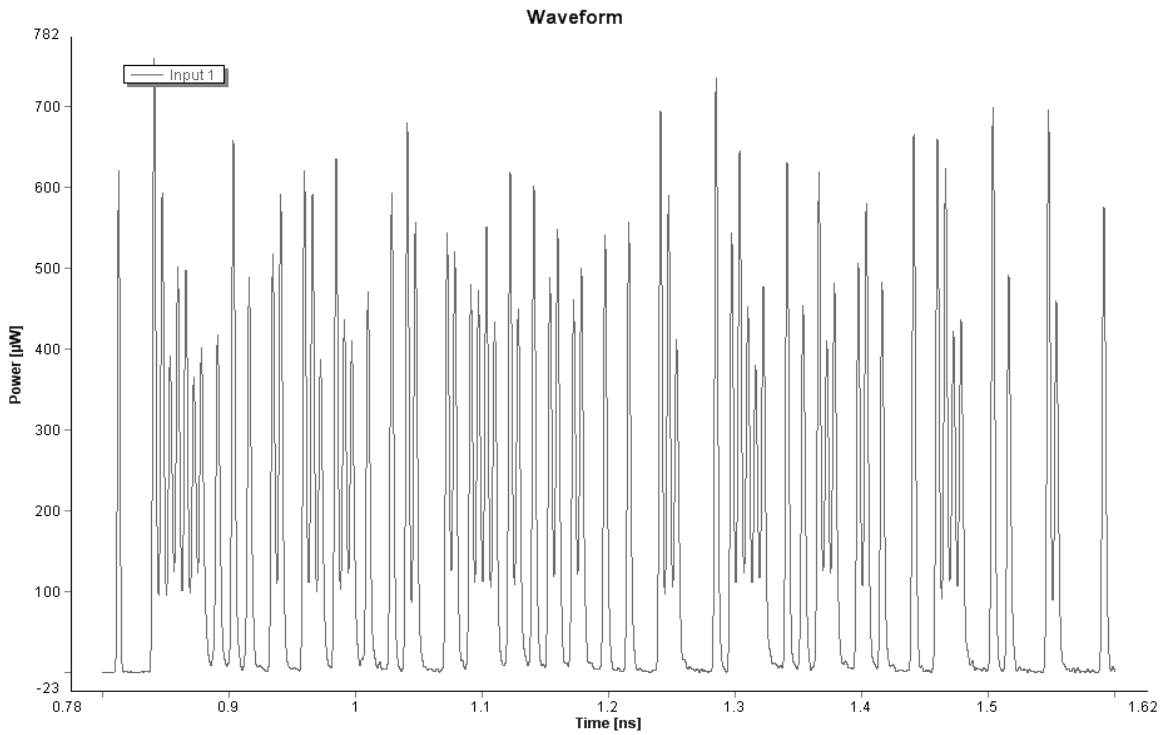


Εικ. 109 Διάγραμμα ματιού για μηδενική μετατόπιση του φίλτρου

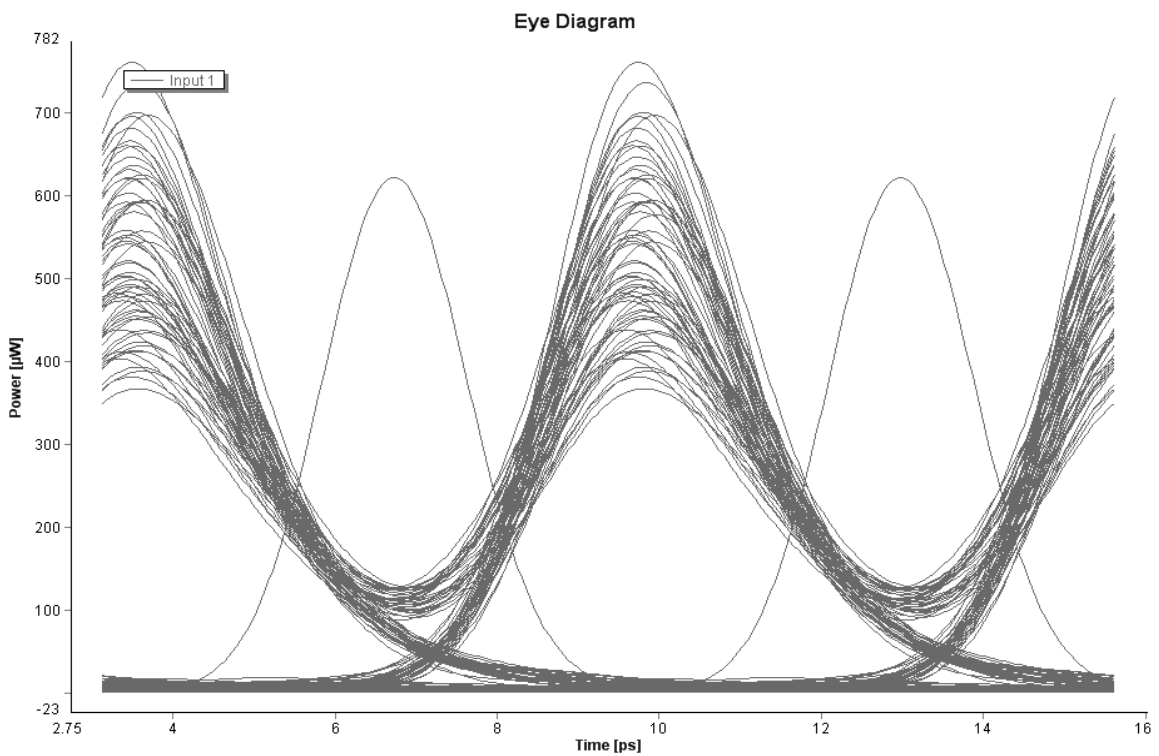
4.1.2.1.7 Τελικό μη αντεστραμμένο σήμα

Τελικά, το σήμα προκειμένου να αντιστραφεί η πολικότητα του εισέρχεται στο ίδιο συμβολόμετρο με τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Στην αρχή, διατηρούμε τις ρυθμίσεις του συμβολόμετρου ως προς την καθυστέρηση του άνω βραχίονα και δεν μεταβάλλουμε καθόλου το στοιχείο της φάσης. Τα αποτελέσματα όμως, μας υπαγορεύουν να γίνει κάτι τέτοιο. Ας δούμε λοιπόν, αρχικά τις απεικονίσεις χωρίς να αλλάξουμε κάτι στο στοιχείο φάσης.

Παρατηρούμε ότι οι κορυφές των παλμών παρουσιάζουν κάποιες διαφορές. Επίσης, θα πρέπει να σκεφτούμε ότι αυξάνοντας το ρυθμό μετάδοσης ουσιαστικά οι παλμοί έρχονται όλο και πιο κοντά. Στην περίπτωση των 160Gbps, η απόσταση μεταξύ των παλμών είναι 6.25ps σε σχέση με αυτή των 25ps για 40Gbps. Έτσι, αν λάβουμε υπόψη μας ότι δεν επιταχύνουμε πλήρως τη διαδικασία ανάκαμψης του κέρδους (~4ps) αλλά και την απόσταση των παλμών παρατηρούμε ότι για συνεχόμενους άσσους παρουσιάζεται κάποιου είδους παρεμβολή μεταξύ των παλμών. Αυτό γίνεται πιο ξεκάθαρο στο ενδιάμεσο των παλμών στο διάγραμμα ματιού.

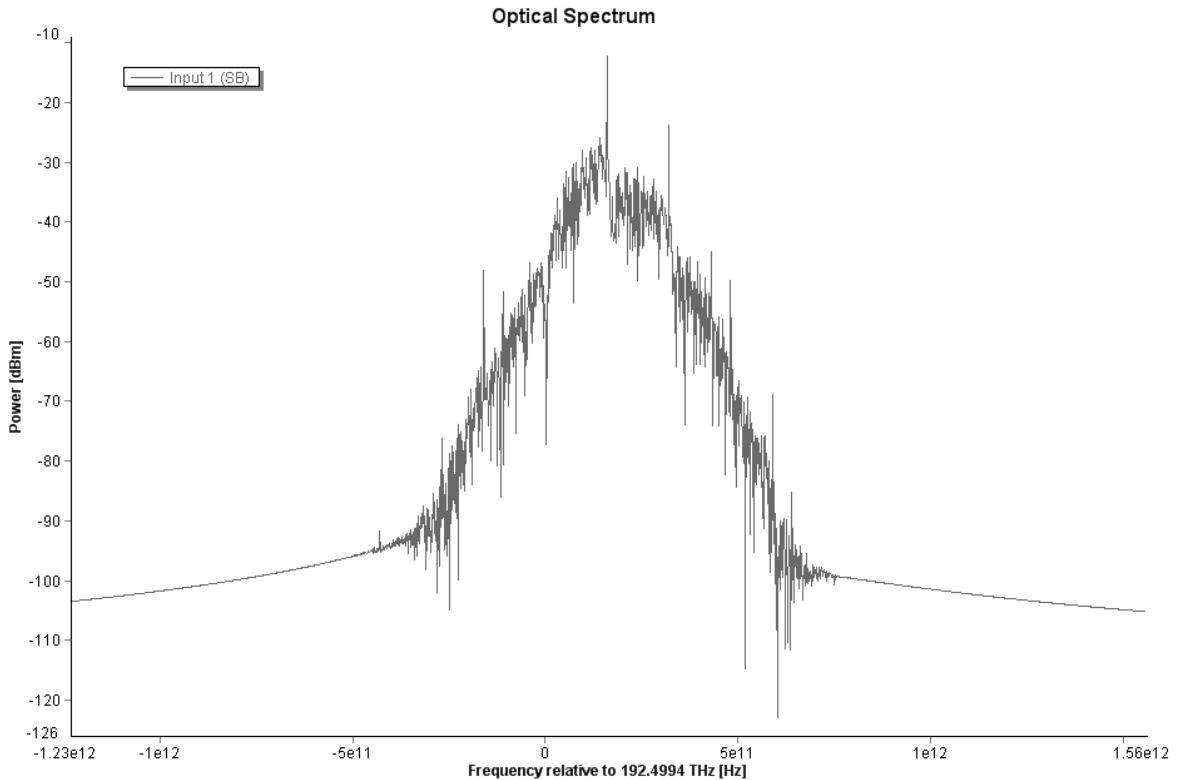


Εικ.110 Παλμοί στην έξοδο της συμβολομετρικής διάταξης



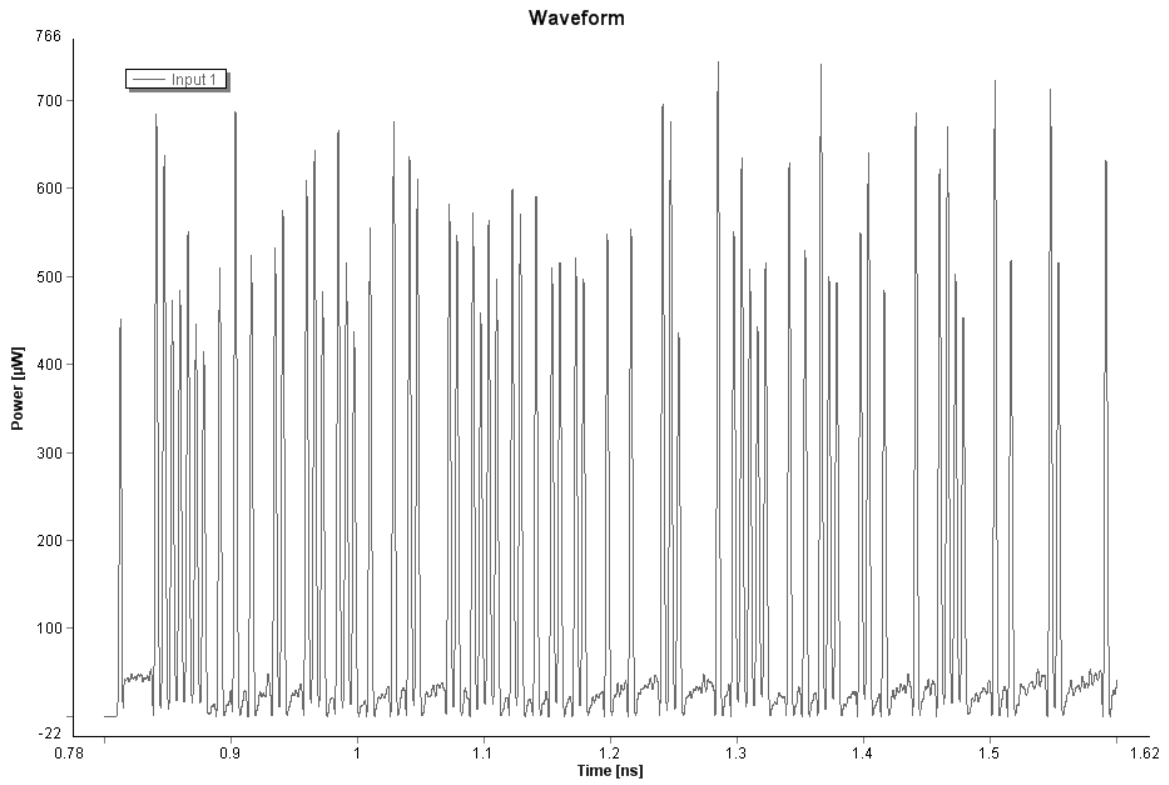
Εικ.111 Διάγραμμα ματιού στην έξοδο του συμβολόμετρου

Τέλος, φασματικά παρατηρούμε τη συμπίεση της κεντρικής συχνότητας και την επιλογή των αρμονικών μεγαλύτερων συχνοτήτων από αυτή.

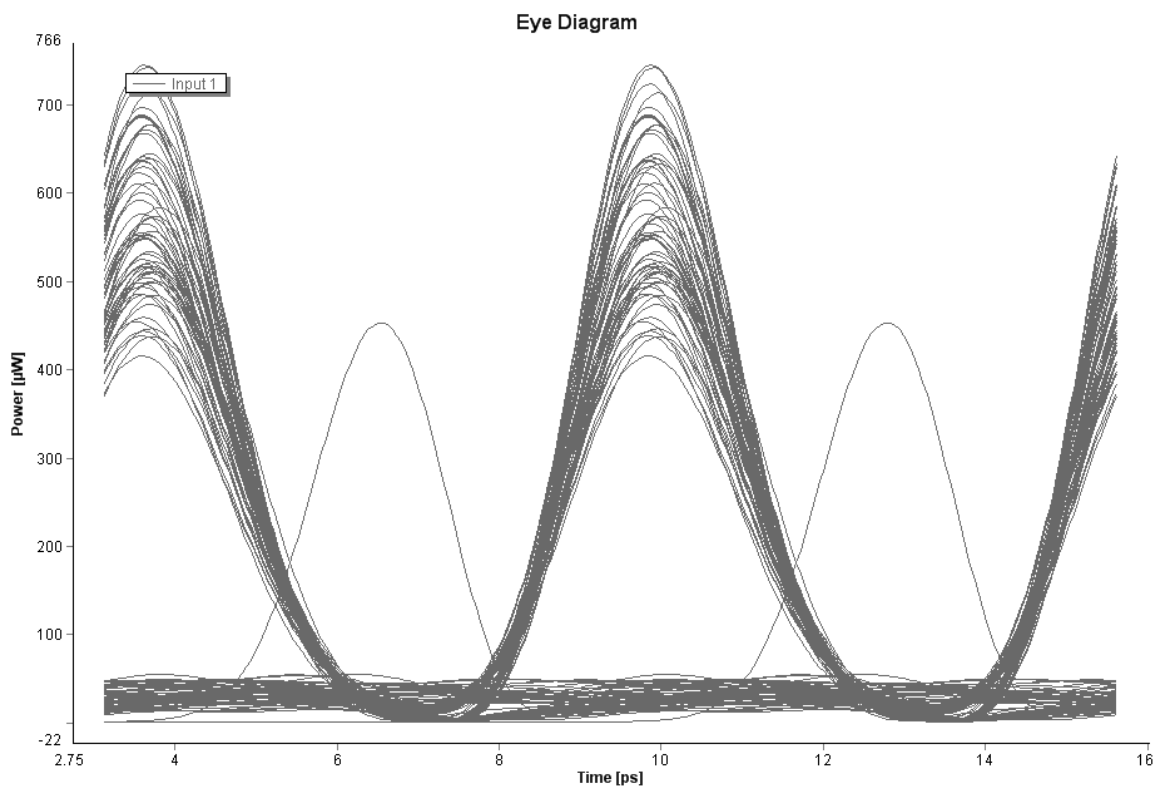


Εικ. 112 Φασματική απεικόνιση του σήματος στην έξοδο του συμβολόμετρου

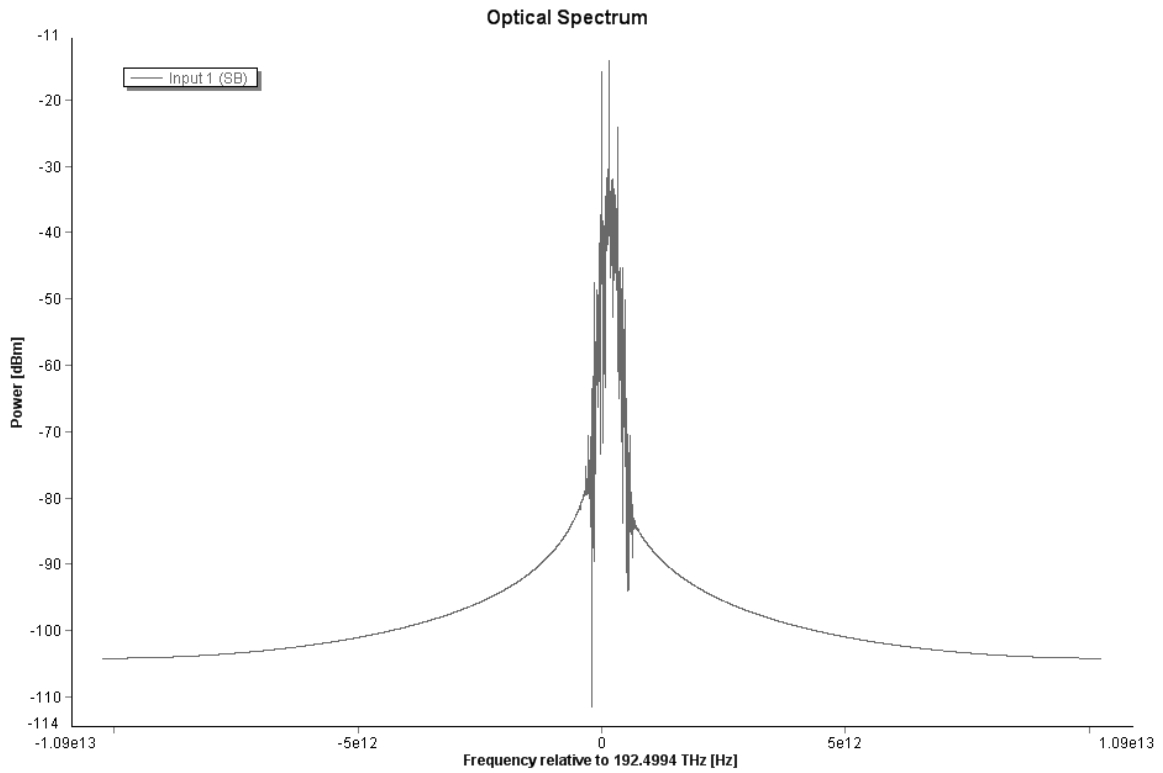
Για να περιορίσουμε το φαινόμενο θορύβου στο διάστημα μεταξύ των παλμών κάνουμε ουσιαστικά πιο επιλεκτικό φιλτράρισμα των αρμονικών. Εισάγουμε λοιπόν, επιπλέον διαφορά φάσης για τον άνω βραχίονα, κάτι που μεταφράζεται με επιπλέον χρονική διαφορά των δύο διαδρομών. Από την ανάλυση που έγινε στην **ενότητα 4.1.1.1.7**, κατανοούμε ότι το συμβολόμετρο - περιοδικό φίλτρο Mach Zehnder γίνεται πιο επιλεκτικό με αποτέλεσμα να απορρίπτει τα όποια φαινόμενα δημιουργήθηκαν από την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Ουσιαστικά, μετατοπίζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του όπως κάναμε με την εισαγωγή περαιτέρω καθυστέρησης. Αν δούμε τη συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφηκε στην **ενότητα 3.1.3**, είναι εμφανής η σχέση μεταξύ των εννοιών της φάσης και της διαφοράς μεταξύ των διαδρομών. Αν εισάγουμε διαφορά στους δύο δρόμους έχουμε διαφοράς φάσης $e^{-j2\pi\tau}$ και ανάποδα. Η ολίσθηση φάσης που εισάγεται στην περίπτωση μας είναι **11 μοίρες**.



Εικ.113 Παλμοί μετά την εισαγωγή επιπλέον φάσης στον άνω βραχίονα

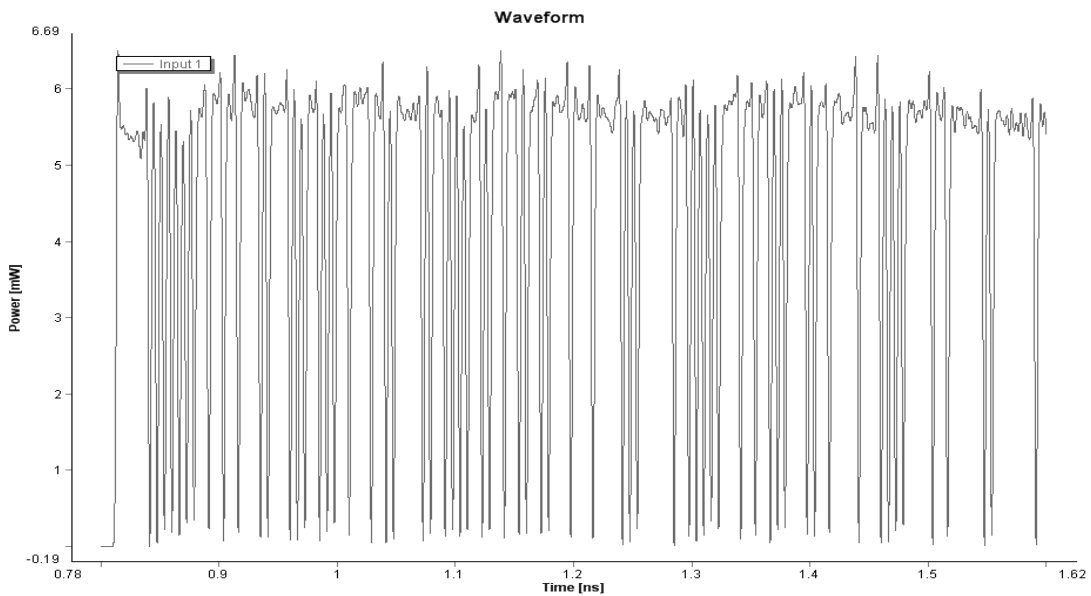


Εικ.114 Τελικό διάγραμμα ματιού

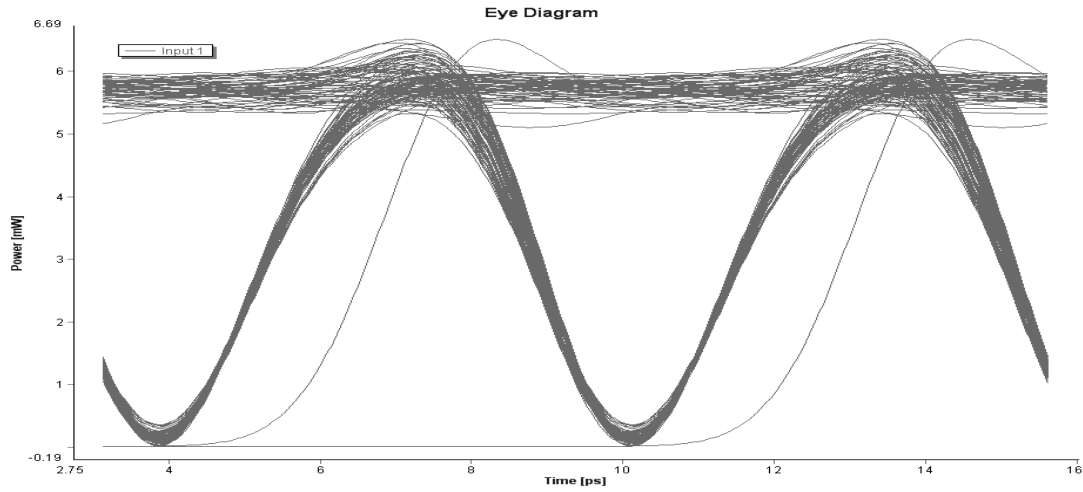


Εικ.115 Φασματική απεικόνιση του τελικού σήματος μετά τη μετατροπή μήκους κύματος.

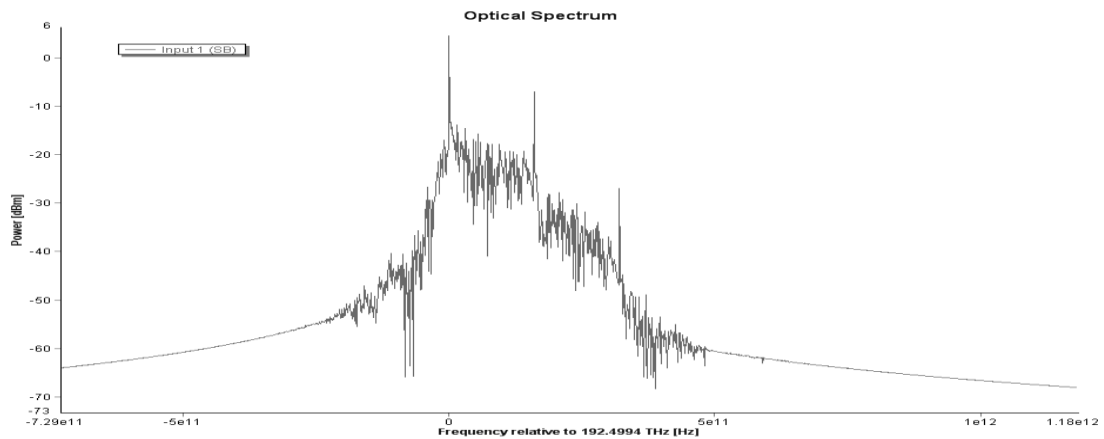
Για λόγους πληρότητας παραθέτουμε και τις απεικονίσεις στην άλλη έξοδο του συμβολόμετρου.



Εικ.116 Παλμοί στην δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου



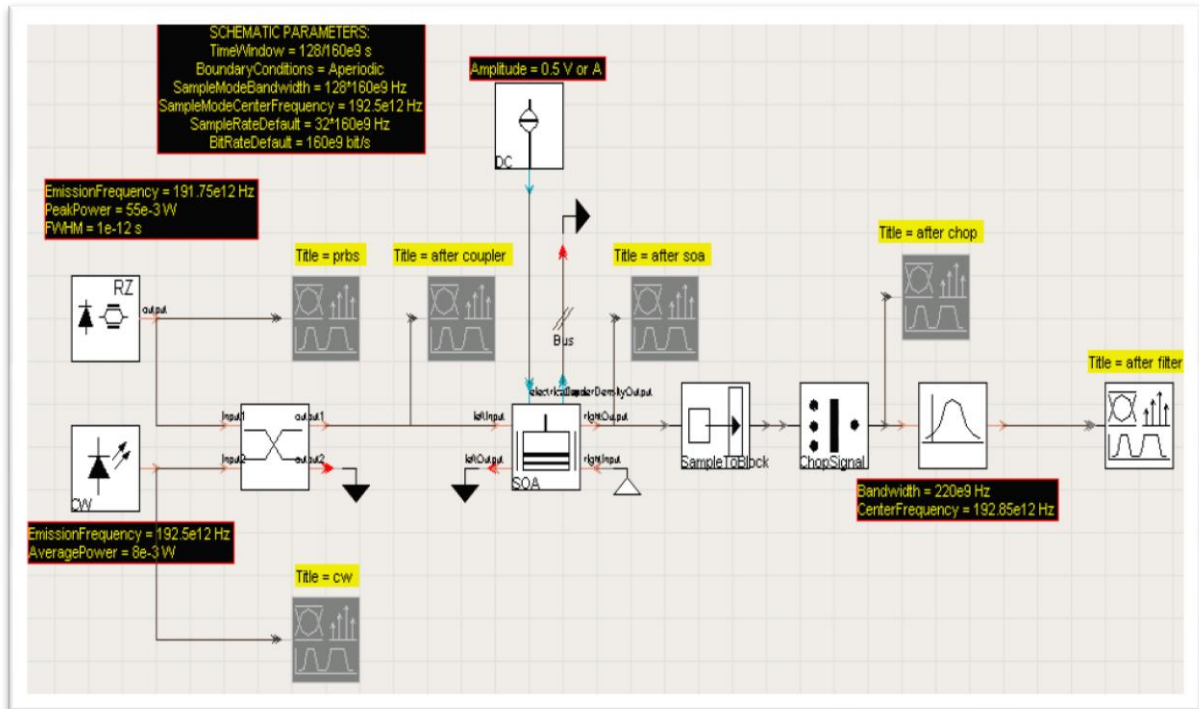
Εικ. 117 Διάγραμμα ματιού για τη δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου



Εικ. 118 Φάσμα στη δεύτερη έξοδο του συμβολόμετρου

4.1.2.2 Προσομοίωση SOA-OBF με αρκετή μετατόπιση του φίλτρου προς τις μπλε αμομονικές

Ανάλογο είναι το μοντέλο προσομοίωσης για αρκετή μετατόπιση του φίλτρου και για την ταχύτητα των 160Gbps.



Εικ. 119 Μοντέλο προσομοίωσης μη αντεστραμμένης λειτουργίας μετατροπέα για ταχύτητα 160Gbps

Σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται και από το μοντέλο, απουσιάζει η συμβολομετρική διάταξη και ορίζουμε ως κεντρική συχνότητα του φίλτρου :

FilterOpt_vtms1 - Parameter Editor

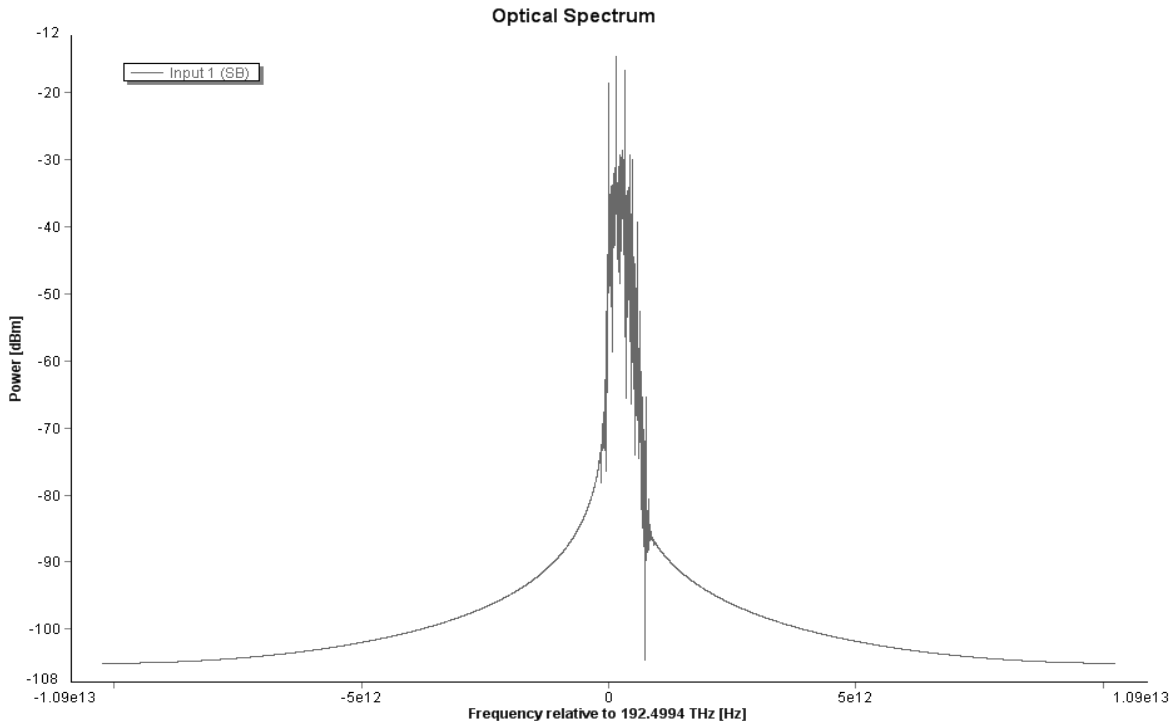
Name: FilterOpt.vtms
 ID: FilterOpt_vtms1

Description
 The FilterOpt module is a universal optical filter model for simulations of band pass, band stop and comb filters with the standard transfer functions: Butterworth, Bessel, Chebyshev, Elliptic, Gaussian, Rectangular, Trapezoid and Integrator. The model can also be used to simulate a measured filter whose transfer function is supplied in an input

Name	Value	Unit	Show
Physical			
Filter Type	BandPass		<input type="checkbox"/>
Transfer Function	Gaussian		<input type="checkbox"/>
Bandwidth	220e9	Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
Center Frequency	192.85e12	Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
Gaussian Order	1		<input type="checkbox"/>
Minimum Phase	Off		<input type="checkbox"/>
Complementary Power	Off		<input type="checkbox"/>
Enhanced			
Noise Dynamic	3.0	dB	<input type="checkbox"/>
Noise Resolution	BitRateDefault/4.	Hz	<input type="checkbox"/>
Noise Threshold	-100	dB	<input type="checkbox"/>
Active Filter Bandwidth	1.0e12	Hz	<input type="checkbox"/>
Active Filter Bandwidth	193.1e12	Hz	<input type="checkbox"/>
Limit To Active Filter Ba	Off		<input type="checkbox"/>
Conserve Memory	On		<input type="checkbox"/>
Digital Filter Order Defi	Automatic		<input type="checkbox"/>
Digital Filter Accuracy	1.e-4		<input type="checkbox"/>
Active	On		<input type="checkbox"/>
Visualization			
Visualization Mode	None		<input type="checkbox"/>
Save To File	On		<input type="checkbox"/>
Log Filename			<input type="checkbox"/>
Magnitude	On		<input type="checkbox"/>
Phase	On		<input type="checkbox"/>
Delay	On		<input type="checkbox"/>
Impulse Response	On		<input type="checkbox"/>

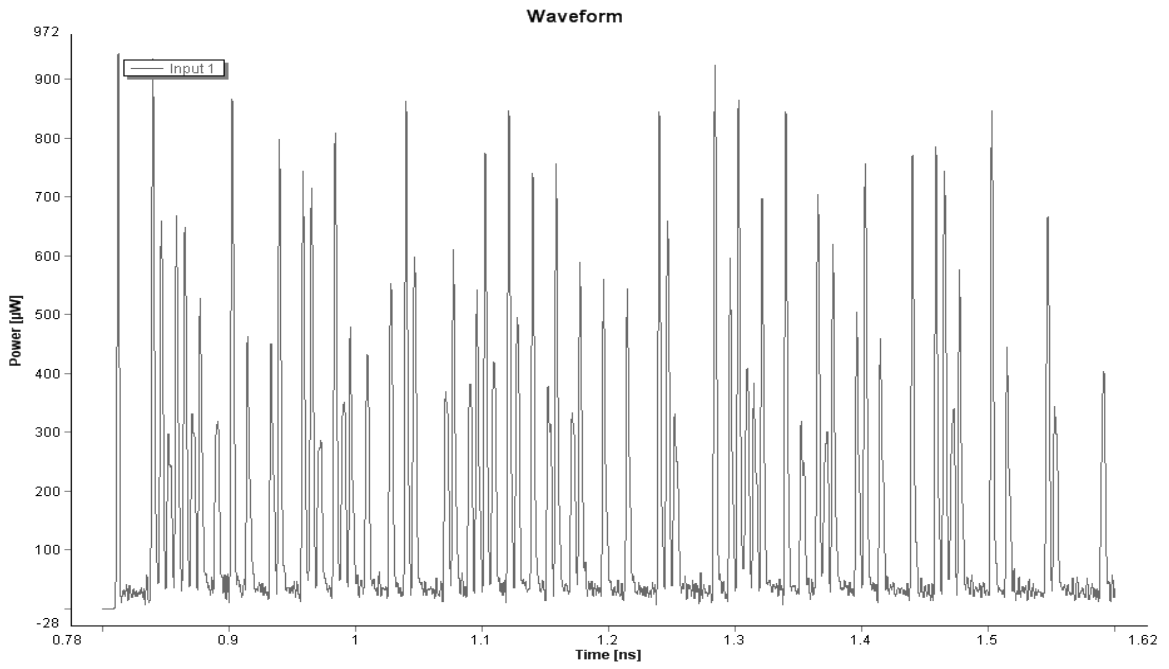
Εικ. 120 Τιμές μεταβλητών οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου για την μη αντεστραμμένη λειτουργία του μετατροπέα σε ρυθμό μετάδοσης 160Gbps.

Φασματικά επιλέγουμε τις συνιστώσες που παράγονται λόγω του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης. Πιο συγκεκριμένα, αυτές προς τις υψηλότερες συχνότητες, όπως γίνεται εμφανές από την παρακάτω φασματική απεικόνιση στην έξοδο του φίλτρου.

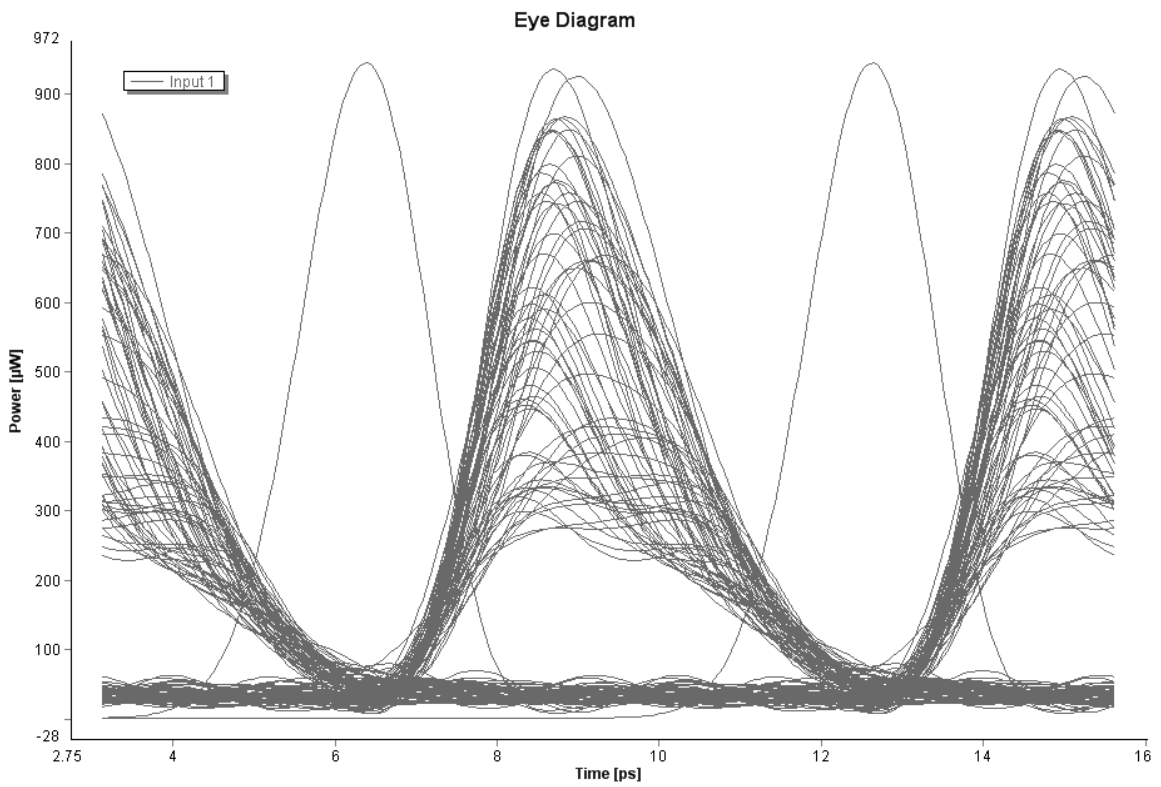


Εικ. 121 Φασματική απεικόνιση σήματος μη αντεστραμμένης λειτουργίας

Στο πεδίο του χρόνου, οι κορυφές των παλμών παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Υπάρχει, λοιπόν, διαφωνία (crosstalk) μεταξύ των κορυφών με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε ένα όχι και τόσο καλό διάγραμμα ματιού στην έξοδο, το οποίο είναι ιδιαίτερα κλειστό και σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ικανοποιητική έξοδο του μετατροπέα. Αν το αντιπαραβάλουμε με τους αρχικούς παλμούς δεδομένων ουδεμία σχέση έχουν αυτούς στην έξοδο. Γίνεται ξεκάθαρο, γιατί η μέθοδος αυτή είναι προβληματική ιδιαίτερα σε μεγαλύτερες ταχύτητες κάτι που συνάδει άλλωστε και με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Εικ. 122 Παλμοί στην έξοδο της διάταξης



Εικ. 123 Διάγραμμα ματιού για τη μη αντεστραμμένη λειτουργία σε ταχύτητα 160 Gbps

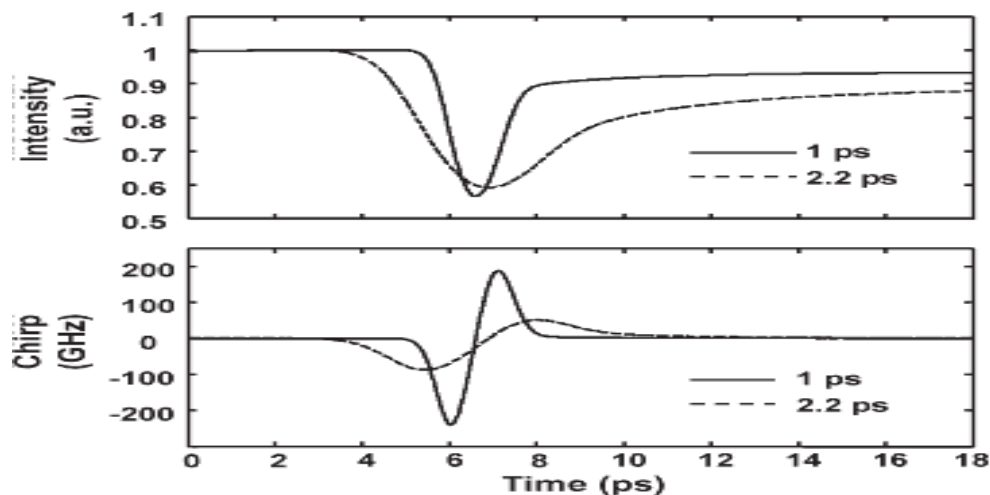
5.1 Τελικά συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την εργασία, τις παρατηρήσεις αλλά και τις προεκτάσεις για επιπλέον προσομοιώσεις ή πειραματικές διατάξεις που μπορούν να υλοποιηθούν. Τέλος, παραθέτουμε πιθανές μελλοντικές χρήσεις της διάταξης αυτής.

5.1.1 Παρατηρήσεις και πιθανές βελτιώσεις

Καταρχάς, έγινε εμφανές πως με την παρούσα προσομοίωση του ημιαγωγίμου ενισχυτή η επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης από 160Gbps καθίσταται δύσκολη καθώς απαιτείται πιο γρήγορη ανάκαμψη της καμπύλης κέρδους του SOA, μικρότεροι παλμοί και πιο ευρύ φίλτρο. Η ανάκαμψη του SOA είναι πολύ σημαντική παράμετρος για τη χρήση του ενισχυτή σε οπτικές μεταγωγικές διατάξεις, καθώς αυτή καθορίζει τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του ενισχυτή. Για αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας, είναι απαραίτητη η μείωση του χρόνου ανάκαμψης. Επίσης, για τη λειτουργία του μετατροπέα σε μεγαλύτερες ταχύτητες είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση μικρότερων παλμών ώστε να ενισχύσουμε το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης και να παράγουμε αρκετό chirp. Έτσι, αφού φιλτράρουμε αποτελεσματικά με ένα πιο ευρύ φίλτρο, καθώς με την περαιτέρω αύξηση του ρυθμού μετάδοσης η απόσταση των φασματικών συνιστωσών αυξάνει, μπορούμε να επιταχύνουμε αρκετά την ανάκαμψη του κέρδους του SOA όπως περιγράψαμε και στην ενότητα 2.4.

Έτσι λοιπόν, παράγοντας μικρότερους παλμούς και χρησιμοποιώντας ένα πιο ευρύ φίλτρο μπορούμε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα ακόμα και σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Παρακάτω στην απεικόνιση 124 παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει ένα αργό και ένα γρήγορο κομμάτι ανάκαμψης. Από τις προσομοιώσεις καταλαβαίνουμε ότι το γρήγορο κομμάτι της ανάκαμψης του κέρδους καθορίζεται από τη διάρκεια του παλμού και το αργό από τη δυναμική των φορέων του SOA. Αυτό σημαίνει στην περίπτωση μας, για παλμούς διάρκειας 1ps, ότι η ανάκαμψη του μετατροπέα περιορίζεται από το πλάτος των παλμών και όχι από τους φορείς του ημιαγωγίμου ενισχυτή. Οι προσομοιώσεις, επίσης, έδειξαν ότι με περαιτέρω μείωση, η ανάκαμψη της λειτουργίας του μετατροπέα περιορίζεται από τις ταχύτερες αλλαγές στη δυναμική των φορέων του ενισχυτή. Έτσι, αυτή η προσέγγιση δείχνει ότι είναι δυνατή η λειτουργία και σε μεγαλύτερους ρυθμούς από 160Gbps.



Εικ.124 Σύγκριση της ανάκαμψης της καμπύλης κέρδους του ενισχυτή και χαρακτηριστικών του chirp σε σχέση με τη διάρκεια του παλμού (α) Ανάκαμψη της καμπύλης κέρδους του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή για 1ps και 2.2 ps αντίστοιχα. (β) Ανάλυση του chirp και της μεταβολής του σε σχέση με τη διάρκεια του παλμού.[13]

5.1.2 Προεκτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα τελευταία χρόνια, η επιστημονική κοινότητα έχει δείξει αρκετό ενδιαφέρον για μία ιδιαίτερη μορφή παλμών που ονομάζονται σολιτόνια. Με τα σολιτόνια είναι δυνατόν να στείλουμε έναν παλμό και να διαδίδεται χωρίς να υποστεί διαπλάτυνση λόγω διασποράς, ακόμα και αν το μέσο εμφανίζει συντελεστή χρονικής διασποράς για άλλο είδος παλμού. Επιπρόσθετα, οι οπτικές ίνες είναι σε θέση χάρη στο φαινόμενο Kerr να συντηρήσουν τη διάδοση των παλμών αυτών. Κατανοούμε λοιπόν, ότι τα σολιτόνια μπορούν να ανοίξουν το δρόμο σε οπτικά συστήματα πολύ μεγάλων αποστάσεων και εξαιρετικά υψηλών ρυθμών μετάδοσης, χρησιμοποιώντας κατάλληλους παλμούς παρά πολύ βραχείας διάρκειας, όπως και στις προσομοιώσεις μας. Το μόνο βασικό πρόβλημα με τα σολιτόνια είναι ότι θα πρέπει να διατηρείται τόσο η κυματομορφή όσο και το πλάτος, δηλαδή η ισχύς του παλμού, που σημαίνει ότι πρέπει να ενισχύονται περιοδικά κατά μήκος της διαδρομής για να αντισταθμίζονται οι απώλειες. Έτσι, ο μετατροπέας μήκους κύματος, ως ένα μέρος ενός οπτικού συστήματος, θα ήταν σωστό να ελεγχθεί ως προς τη λειτουργία και την αλληλεπίδρασή του με τα σολιτόνια.

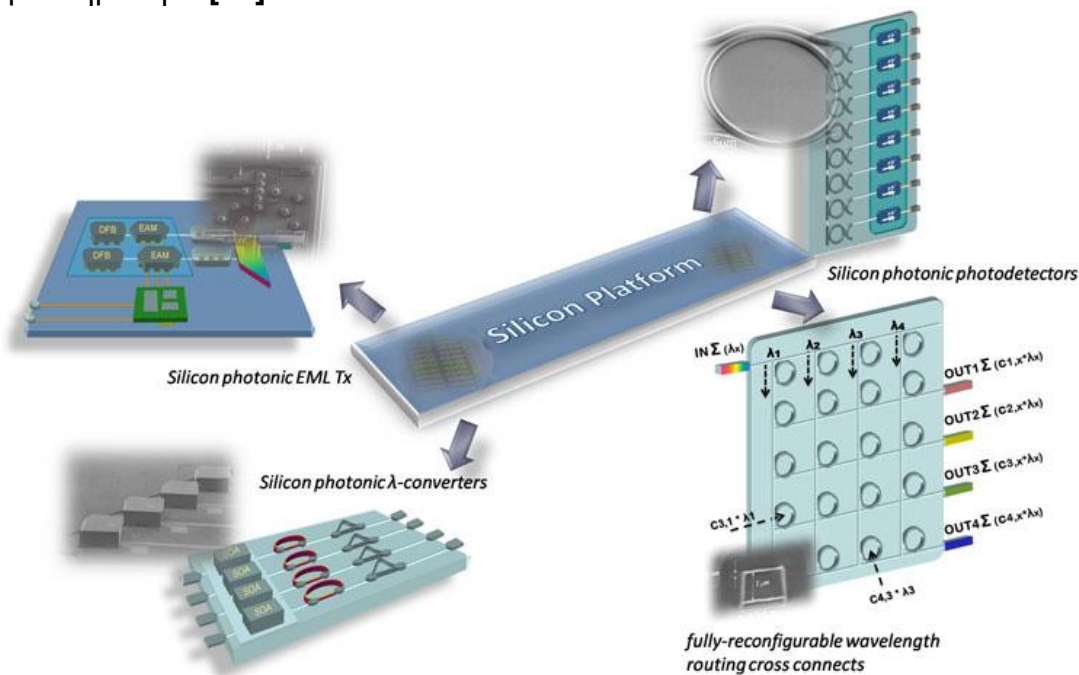
Ένα άλλο αξιοσημείωτο θέμα είναι η εξάρτηση της λειτουργίας του μετατροπέα μήκους κύματος από την πολωτική κατάσταση του εισερχόμενου σήματος. Στην πειραματική υλοποίηση είναι απαραίτητος ο έλεγχος της πολωτικής κατάστασης του σήματος στην είσοδο του μετατροπέα. Ειδικότερα, στην περίπτωση ολοκλήρωσης του μετατροπέα μήκους κύματος σε πλακίδιο πυριτίου και τη χρήση δακτυλίων ως φίλτρα, είναι δυνατή η κυματοδότηση δύο ρυθμών TE και TM με αποτέλεσμα να απαιτείται ακριβής έλεγχος της πολωτικής κατάστασης του εισερχόμενου σήματος. Τέλος, στην περίπτωση υλοποίησης του στοιχείου αντιστροφής της πολικότητας του σήματος με ένα PMF (Polarization Maintaining Fiber) και πολωτές, το σύστημα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις αλλαγές της πόλωσης και για αυτό απαιτείται συνεχής έλεγχος της πολωτικής κατάστασης των εισερχόμενων σημάτων. Για αυτό το λόγο επιβάλλεται η χρήση ενός ολοκληρωμένου συμβολομέτρου είτε σε πυρίτιο είτε σε InP για την επίτευξη της αναγκαίας σταθερότητας στη μετάδοση δεδομένων.

5.1.3 Εφαρμογές του μετατροπέα μήκους κύματος

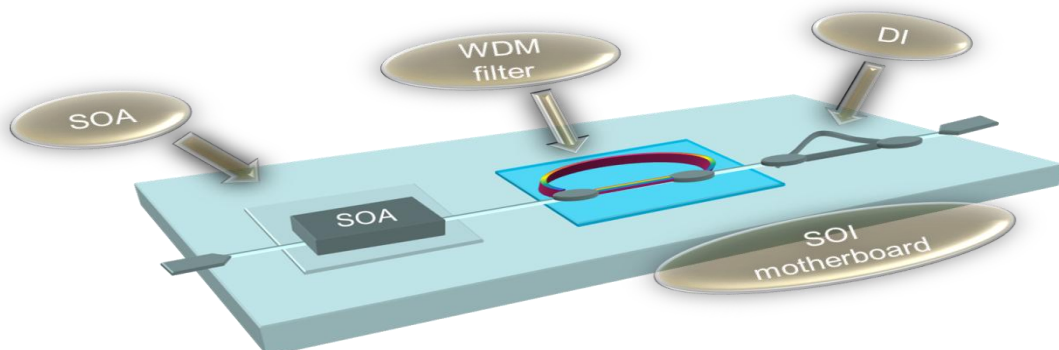
Στην τελευταία ενότητα της παρούσας εργασίας θα αναφερθούμε στις πιθανές εφαρμογές μιας τέτοιας διάταξης. Στην αρχή της εργασίας, καταγράψαμε την ανάγκη των μετατροπέων μήκους κύματος στα οπτικά δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος WDM. Μέσα σε ένα τέτοιο οπτικό δίκτυο, θα πρέπει να είναι δυνατή η δρομολόγηση σε διάφορα μήκη κύματος χωρίς να υπάρχει κάποια σύγκρουση δεδομένων στις διασυνδέσεις μεταξύ των κόμβων. Η δρομολόγηση και η επίλυση σύγκρουσης πακέτων στα δίκτυα είναι εξειδικευμένες διεργασίες που επιτελούν οι δρομολογητές (routers). Οι σημερινές, όμως, ηλεκτρονικές διατάξεις δρομολογητών περιορίζουν αρκετά τις επικοινωνιακές ζεύξεις λόγω της ανάγκης οπτοηλεκτρονικής μετατροπής των σημάτων στους κόμβους. Την επίλυση του παραπάνω προβλήματος είναι πιθανόν στο μέλλον να δώσει η υλοποίηση φωτονικών δρομολογητών. Προς την

κατεύθυνση αυτή,ο μετατροπέας μήκους κύματος,ως αναπόσπαστο κομμάτι των φωτικών δρομολογητών, έρχεται να δώσει ιδιαίτερη ώθηση,καθώς προσφέρει τη δυνατότητα ολοκλήρωσης, χαμηλή κατανάλωση ισχύος, μικρό μέγεθος και έχει εκρηκτική ταχύτητα λειτουργίας. Αυτή τη στιγμή, βρίσκεται σε εξέλιξη μία ερευνητική δραστηριότητα [28] υπό την επίβλεψη του εργαστηρίου PCRL [29] της σχολής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ σε συνεργασία με άλλους φορείς. Σύντομα, θα είναι δυνατή η υλοποίηση ενός αμιγώς οπτικού δρομολογητή που θα δώσει ώθηση στις τηλεπικοινωνίες. Τέλος,θα πρέπει να κατανοήσουμε ότι η πραγματοποίηση ενός τόσο σημαντικού επιτεύγματος δε θα ήταν δυνατή, αν δεν υπήρχε αντίστοιχη έρευνα στο πεδίο των μετατροπένων μήκους κύματος, που αποτελούν αναπόσπαστο και πολύ σημαντικό στοιχείο της όλης υλοποίησης.

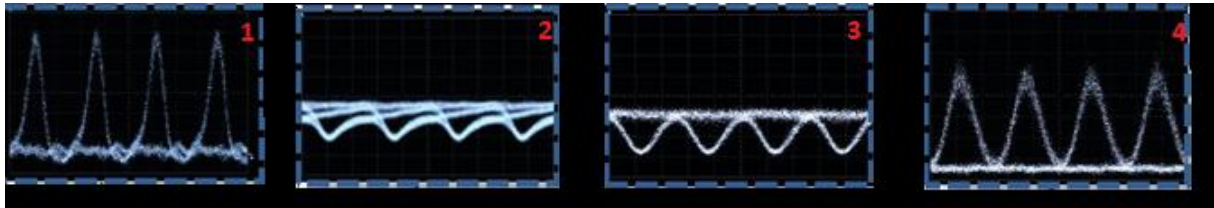
Ακολουθούν απεικονίσεις σχετικά με την παραπάνω ερευνητική δραστηριότητα [28]:



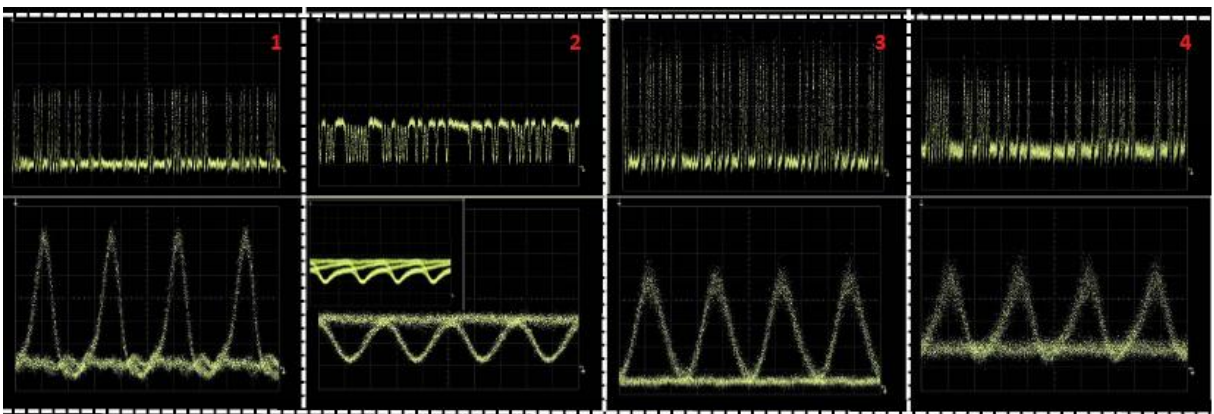
Εικ.125 Υλοποίηση φωτονικού δρομολογητή υπό την επίβλεψη του εργαστηρίου PCRL της σχολής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ. Παρατηρούμε την ύπαρξη τεσσάρων διατάξεων μετατροπής μήκους κύματος που λειτουργούν σε ταχύτητες των 160 Gbps και συνολικού ρυθμού μετάδοσης τα 640Gbps.[28]



Εικ.126 Η διάταξη μετατροπής μήκους κύματος του προγράμματος BOOM. Παρατηρούμε τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή, το οπτικό φίλτρο και τη συμβολομετρική διάταξη με τον άνω βραχίονα να έχει μεγαλύτερη διαδρομή.[28]



Εικ.127 Τα αποτελέσματα του μετατροπέα : 1.Αρχικό σήμα. 2.Η ανάκαμψη του κέρδους του ενισχυτή αν δεν υπάρξει κανένα φιλτράρισμα. 3.Το σήμα μετά το οπτικό φίλτρο, λαμβάνεται ένα τέλειο ανοιχτό διάγραμμα ματιού. 4.Το σήμα μετά την αντιστροφή της πολικότητας από το συμβολόμετρο,επίσης ένα πολύ καλό διάγραμμα ματιού λαμβάνεται στην έξοδο του.[28]



Εικ.128 Μία ακόμη απεικόνιση των αποτελεσμάτων : 1.Αρχικό σήμα. 2.Το σήμα μετά το φιλτράρισμα με ελαφριά μετατόπιση του φίλτρου.Στο ένθετο απεικονίζεται η ανάκαμψη του κέρδους χωρίς φιλτράρισμα 3.Το μη αντεστραμμένο σήμα μετά το συμβολόμετρο. 4.Το μη αντεστραμμένο σήμα μετά το οπτικό φίλτρο αν το μετατοπίσουμε αρκετά χωρίς να επιλέξουμε τη κεντρική συνιστώσα του σήματος σταθερού πλάτους.Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ματιού δεν είναι καλύτερο από αυτό στην εικόνα 3.[28]

Μία άλλη πιθανή χρήση της μετατροπής μήκους κύματος θα μπορούσε να είναι η υλοποίηση οπτικών υπολογιστικών συστημάτων ή οπτικών στοιχείων στο εσωτερικό ενός υπολογιστή. Τα τελευταία χρόνια, η υιοθέτηση μιας αμιγώς οπτικής ή μιας υβριδικής τεχνολογίας που θα συνδυάζει ηλεκτρονικά και οπτικά μέρη στο χώρο των υπολογιστών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.Στο εσωτερικό των υπολογιστών θα πρέπει να είναι δυνατή σε μικρές αποστάσεις η οπτική δρομολόγηση πακέτων για την αποφυγή σύγκρουσης δεδομένων.Έτσι, ο μετατροπέας μήκους κύματος ως αναπόσπαστο κομμάτι των φωτονικών δρομολογητών που θα υπάρχουν στα υπολογιστικά συστήματα θα μπορεί να βρει εφαρμογή σε μια τέτοιου είδους υλοποίηση.Αν και η όλη ιδέα είναι θεωρητική προς στιγμή, οι δυνατότητες είναι αμέτρητες καθώς αξίζει να σκεφτούμε ότι σχεδόν όλα τα διαθέσιμα τεχνολογικά προϊόντα απαιτούν τη χρήση κάποιου υπολογιστικού συστήματος.

Από τα παραπάνω, κατανοούμε ότι οι δυνατότητες του οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος είναι αρκετά ενθαρρυντικές και γρήγορα είναι πολύ πιθανό να ενσωματωθεί σε διάφορες εμπορικές διατάξεις.Η χρήση του μετατροπέα μήκους κύματος στο μέλλον θα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι αρκετών εφαρμογών και για αυτό η περαιτέρω βελτιστοποίησή είναι επιβεβλημένη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

[1] Αβραμόπουλος Ηρακλής, **Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες**, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ

[2] Govind P. Agrawal, **Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες**, Δεύτερη έκδοση, Επιμέλεια μετάφρασης Βασίλειος Α. Κώτσος, Εκδόσεις Τζιόλα

[3] Paul E. Green, **Δίκτυα οπτικών ινών**, Επιμέλεια μετάφρασης Κ.Καρούμπαλος, εκδόσεις Παπασωτηρίου

[4] Jeff Hecht, **City of light, the story of fiber optics**, Oxford University Press

[5] Harry J.R.Dutton, **Understanding optical communications**, Prentice hall

[6] Ivan P. Kaminov, Tingye Li, **Optical fiber communications IV A components**, Academic Press

[7] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, **Optical networks a practical prespective**, Second edition, Morgan Kaufmann publishers

[8] Krzysztof Iniewski, Care McCrosky, Daniel Minoli, **Network infrastructure and architecture, designing high-availability networks**, John Wiley & Sons Publications

[9] Biswanath Mukherjee, **Optical WDM networks**, Springer

[10] Αβραμόπουλος Ηρακλής, **Συστήματα Μετάδοσης και Δίκτυα Οπτικών Ινών**, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ

Δημοσιεύσεις αποτελεσμάτων επιστημονικών ερευνών

[11] **Ultrafast All-Optical Signal Processing Based on Single Semiconductor Optical Amplifier and Optical Filtering**, Jianji Dong, Student Member, IEEE, Xinliang Zhang, Member, IEEE, Songnian Fu, Jing Xu, P. Shum, Senior Member, IEEE, and Dexiu Huang, IEEE journal of selected topics in quantum electronics, vol. 14, no. 3, may/june 2008

[12] **Semiconductor-Optical-Amplifier-Based Inverted and Non-Inverted Wavelength Conversion at 40 Gb/s Using a Detuning Optical Bandpass Filter**, DONG Jian-Ji, ZHANG Xin-Liang, HUANG De-Xiu, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong,

University of Science and Technology, Wuhan 430074, CHIN.PHYS.LETT. Vol. 24, No. 12 (2007) 3450

[13] Error-Free All-Optical Wavelength Conversion at 160 Gb/s Using a Semiconductor Optical Amplifier and an Optical Bandpass Filter , Y. Liu, Member, IEEE, E. Tangdiongga, Z. Li, Shaoxian Zhang, Huug de Waardt, G. D. Khoe, Fellow, IEEE, and H. J. S. Dorren, Member, IEEE, Journal of lightwave technology, vol. 24, no. 1, january 2006

[14] Error-Free 320-Gb/s All-Optical Wavelength Conversion Using a Single Semiconductor Optical Amplifier, Y. Liu, Member, IEEE, E. Tangdiongga, Z. Li, Member, IEEE, Huug de Waardt, Member, IEEE, A. M. J. Koonen, Fellow, IEEE, G. D. Khoe, Fellow, IEEE, Xuewen Shu, Ian Bennion, Member, IEEE, and H. J. S. Dorren, Member, IEEE, Journal of lightwave technology, vol. 25, no. 1, january 2007

[15] 100Gbit/s all-optical wavelength conversion with integrated SOA delayed-interference configuration , J. Leuthold, C.H. Joyner, B. Mikkelsen, G. Raybon, J.L. Pleumeekers, B.I. Miller, K. Dreyer and C.A. Burrus, IEEE 2000 28 April 2000

Διπλωματικές και διδακτορικές διατριβές

[16] Διδακτορική διατριβή Κωνσταντίνος Χ. Βυρσωκινός ,Αμιγώς οπτική επεξεργασία δεδομένων σε ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα , ΕΜΠ, Μάϊος 2007

[17] Διδακτορική διατριβή , ΣΥΓΓΛΕΤΟΣ Β. ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ , Μελέτη φυσικού στρώματος και στρατηγικές μετάβασης προς δυναμικά επαναδιαρθρώσιμα μητροπολιτικά δίκτυα υπερ-υψηλής χωρητικότητας, ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2005

[18] Διπλωματική εργασία , Παπαϊωάννου Σωτήριος Αλεξούδη Θεονίτσα, Διασύνδεση διαδοχικών σταδίων μετατροπών μήκους κύματος σε ρυθμούς μετάδοσης 10Gb/s : Συγκριτική μελέτη αρχιτεκτονικών SOA-MZI τεχνολογίας , ΑΠΘ , Φεβρουάριος 2010

[19] Διπλωματική εργασία , ΚΑΚΑΕΣ ΣΕΡΑΦΕΙΜ , Προσομοίωση οπτικής πύλης χορ με χρήση συμβολόμετρου mach zehnder με ημιαγωγίσιμους οπτικούς ενισχυτές, ΑΠΘ , Οκτώβριος 2009

[20] Διπλωματική εργασία , ΛΑΖΑΡΟΥ Σ. ΙΩΑΝΝΗΣ , WDM μετατροπείας μήκους κύματος για δρομολόγηση πακέτων δεδομένων στα 40 Gb/s , ΑΠΘ , 2010

[21] Διπλωματική εργασία, Ευθύμιος Ι. Ρούβαλης, Πολυκυματική Πηγή Laser για δίκτυα Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος (WDM) , ΕΜΠ, Μάϊος 2007

[22] Διπλωματική εργασία , Δημήτριος Κ. Ζήσης , Προσομοίωση μετατροπείας μήκους κύματος με ημιαγωγίσιμο οπτικό ενισχυτή (SOA) και ζωνοπερατό φίλτρο (chirp filtering) σε ταχύτητες μεταγωγής 160 και 320 Gb/s, ΑΠΘ, Σεπτέμβριος 2009

[23] Διπλωματική εργασία, Θεοδώρα Δ. Κυριλλή, **Αμιγώς οπτική επίλυση σύγκρουσης πακέτων σε αμιγώς οπτικά δίκτυα**, ΕΜΠ, Ιούλιος 2006

[24] Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ιωάννης Λακουμέντας, **Δρομολόγηση και ανάθεση συχνοτήτων σε WDM οπτικά δίκτυα**, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σεπτέμβριος 2006

[25] Διπλωματική εργασία, Δημήτριος Ι. Καλαβρουζιώτης, **Σχεδιασμός και Προσομοίωση Οπτικού Δικτύου Πρόσβασης για Παροχή Πολλαπλών Ευρυζωνικών Υπηρεσιών**, ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2009

Ιστοσελίδες

[26] Competent Consulting Services for the Laser and Photonics Industry,
<http://www.rp-photonics.com>

[27] Wikipedia
<http://www.en.wikipedia.org>

[28] Boom project
<http://www.ict-boom.eu>

[29] Photonics Communications Research Laboratory
National Technical University of Athens
<http://www.telecom.ntua.gr/photonics>

[30] <http://diktya-bp.blogspot.com>