



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της
εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων
συστημάτων ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

Μάρκος Αλέξανδρος Φ. Φράγκος



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



**ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ**
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



**ΕΣΠΑ
2007-2013**
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

ΑΘΗΝΑ

Ιούλιος 2013



NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS

**SCHOOL OF SCIENCES
DEPARTMENT OF INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS**

PROGRAM OF POSTGRADUATE STUDIES

PhD THESIS

**Research in parametric optical amplification and injection
locking focused on high bit rate optical communication
systems applications**

Markos Alexandros F. Fragkos



**European Union
European Social Fund**



MINISTRY OF EDUCATION, LIFELONG LEARNING AND RELIGIOUS AFFAIRS
MANAGING AUTHORITY



**NSRF
2007-2013
programme for development
EUROPEAN SOCIAL FUND**

Co- financed by Greece and the European Union

ATHENS

July 2013

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παραμετρικοί ενσχυτές ευαίσθητοι στη φάση και εφαρμογές τους σε υψίρρυθμα συστήματα οπτικών επικοινωνιών

Μάρκος Αλέξανδρος Φ. Φράγκος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:

Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Θωμάς Σφηκόπουλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Περικλής Πετρόπουλος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Southampton

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

**Δημήτριος Συβρίδης,
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**Θωμάς Σφηκόπουλος,
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

**Περικλής Πετρόπουλος,
Καθηγητής Πανεπιστημίου
Southampton**

**Παναγιώτης Μαθιόπουλος,
Ερευνητής Α' Εθνικού
Αστεροσκοπείου Αθηνών**

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

**Κυριάκος Χιτζανίδης,
Καθηγητής ΕΜΠ**

**Αντώνης Μπόγγρης,
Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Αθηνών**

(Υπογραφή)

**Θωμάς Καμαλάκης,
Επίκουρος Καθηγητής Χαροκόπειου
Πανεπιστημίου**

Ημερομηνία εξέτασης 23/07/2013

PhD THESIS

Phase sensitive amplifiers and their applications in high bit rate optical communication systems

Markos Alexandros F. Fragkos

SUPERVISOR: Dimitris Syvridis, Professor UoA

THREE-MEMBER ADVISORY COMMITTEE:

Dimitris Syvridis, Professor UoA

Thomas Sfikopoulos, Professor UoA

Periklis Petropoulos, Professor in University of Southampton

SEVEN-MEMBER EXAMINATION COMMITTEE

(Signature)

**Dimitris Syvridis,
Professor UoA**

(Signature)

**Periklis Petropoulos,
Professor University of Southampton**

(Signature)

**Kyriakos Xitzanidis,
Professor NTUA**

(Signature)

**Thomas Kamalakis,
Assistant professor University**

(Signature)

**Thomas Sfikopoulos,
Professor UoA**

(Signature)

**Panagiotis Mathiopoulos,
Researcher A' Athens National
Observatory**

(Signature)

**Antonis Bogris,
Assistant professor TEI Athens**

Examination Date 23/07/2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετούμε τεχνικές οι οποίες προσφέρουν αμιγώς οπτική αναγέννηση σε σήματα διαμορφωμένα κατά φάση. Σκοπός είναι ο σχεδιασμός ολοκληρωμένων συστημάτων τα οποία θα βελτιώσουν τις επιδόσεις των σύμφωνων οπτικών επικοινωνιών. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής διερευνούνται οι ιδιότητες και οι επιδόσεις της ευαίσθητης στη φάση παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έγχυση οπτικής ισχύος. Η ευαίσθητη στη φάση παραμετρική ενίσχυση είναι γνωστό ότι μπορεί να προσφέρει άμεση αμιγώς οπτική συμπίεση του θορύβου φάσης και αποτελεί ιδανική λύση για την αναγέννηση PSK σημάτων. Ωστόσο παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η αυξημένη πολυπλοκότητα των πρακτικών υλοποιήσεων και η δυσκολία εφαρμογής της σε WDM συστήματα μετάδοσης. Μέσω μιας εκτενούς θεωρητικής μελέτης, η οποία συμπεριελάμβανε την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης (οπτικές διατάξεις, οπτικά φαινόμενα, διάδοση), εξάγαμε χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις των τοπολογιών παραμετρικών ενισχυτών μονής και διπλής άντλησης. Η παραπάνω μελέτη οδήγησε στον σχεδιασμό μιας πρωτότυπης αρχιτεκτονικής για την αμιγώς οπτική αναγέννηση RZ-DPSK σημάτων, η οποία στηρίζεται στη μονή άντληση και περιλαμβάνει μία ρεαλιστική λύση για την παραγωγή συμφασικού στο σήμα συζυγούς, το οποίο αποτελεί ένα από τα βασικότερα προβλήματα για την πρακτική υλοποίηση των παραμετρικών ενισχυτών. Προτεινόμενος αναγεννητής παρουσιάζει αξιοσημείωτες επιδόσεις, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει τη δυνατότητα ελαχιστοποίησης του μεγέθους του, βελτιστοποίησης των επιδόσεων και συμβατότητα με τα WDM συστήματα μετάδοσης μέσω μίας χαμηλής πολυπλοκότητας επέκτασης.

Στη συνέχεια ακολούθησε η θεωρητική, μέσω προσομοιώσεων, μελέτη των ιδιοτήτων της τεχνικής εγκλειδωσης φάσης με έγχυση οπτικής ισχύος σε ημιαγωγικά laser. Όπως ήδη είναι γνωστό, η τεχνική αυτή μπορεί να προσφέρει διεύρυνση του εύρους ζώνης του εγκλειδωμένου laser ενώ ταυτόχρονα παρέχει συμπίεση του θορύβου πλάτους και αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών φάσης του εγχεόμενου σήματος. Από τη μελέτη αυτή αποδεικνύεται ότι το εγκλειδωμένο laser μπορεί να αναπαράγει PSK και QPSK σήματα τα οποία μπορούν να φθάσουν έως και τα 25 Gbaud/s, ενώ ταυτόχρονα η συμπίεση θορύβου πλάτους που προσφέρει η τεχνική της εγκλειδωσης φάσης οδηγεί στη σημαντική βελτίωση της ποιότητας του υποβαθμισμένου σήματος. Βάσει των αποτελεσμάτων προτείνεται η χρήση του εγκλειδωμένου (slave) laser ως αναγεννητή και οι επιδόσεις του επιβεβαιώνονται πειραματικά. Η μελέτη του συστήματος περιλαμβάνει τη χρήση τόσο μονότροπου όσο και πολύτροπου (Fabry-Pérot) slave laser, με το τελευταίο να προσδίδει στο σύστημα την επιπλέον ιδιότητα της διαφάνειας ως προς το μήκος κύματος. Οι αξιοσημείωτες επιδόσεις του προτεινόμενου αναγεννητή τον καθιστούν ως μία χαμηλού κόστους, μικρής ενεργειακής κατανάλωσης και χαμηλής πολυπλοκότητας εναλλακτική λύση για την αναβάθμιση των σύμφωνων οπτικών συστημάτων μετάδοσης.

Τα εξαιρετικού ενδιαφέροντος αποτελέσματα που προέκυψαν από την προηγούμενη μελέτη μας έδωσαν τη δυνατότητα να επεκτείνουμε τη χρήση του εγκλειδωμένου laser και σε άλλες εφαρμογές οι οποίες μπορούσαν να οφηληθούν από τις ιδιότητές του. Έτσι λοιπόν, προτάθηκε και μελετήθηκε θεωρητικά και πειραματικά η χρήση του εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser ως βαθμίδα συμπίεσης της πληροφορίας πλάτους στην πλευρά του δέκτη για το σαφή διαχωρισμό των ροών πληροφορίας που φέρει ένα σήμα με διπλή ορθογώνια διαμόρφωση DPSK/ASK. Ο νέος δέκτης βελτιστοποίησε την απόδοση της συγκεκριμένης διαμόρφωσης από πλευράς ρυθμού αλλά και από πλευράς απόστασης διάδοσης καθιστώντας την ως μία σοβαρή εναλλακτική για την αύξηση της χωρητικότητας καναλιού σε μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε λοιπόν, στην παρούσα διδακτορική διατριβή οδήγησε στον σχεδιασμό τριών ολοκληρωμένων συστημάτων αμιγώς οπτικής επεξεργασίας σήματος τα οποία αποτελούν υλοποιήσιμες και σχετικά χαμηλής πολυπλοκότητας λύσεις για τη βελτίωση των επιδόσεων των σύμφωνων συστημάτων μετάδοσης.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: παραμετρική ενίσχυση, εγκλείδωση φάσης με οπτική έγχυση, σύμφωνα συστήματα επικοινωνίας, αμιγώς οπτική αναγέννηση, ορθογώνια σχήματα διαμόρφωσης

ABSTRACT

In this work we investigate techniques that can provide all-optical regeneration of phase modulated signals. Our objective is to design complete optical set-ups that will improve the performance of coherent optical communications. Within the context of this study the properties and the performance of phase sensitive parametric amplification and optical injection locking are investigated.

The all-optical phase noise suppression that phase sensitive parametric amplifiers are capable of, is already known, and consists an ideal solution for PSK regeneration. Although, it features some significant drawbacks such as the increased implementation complexity and the difficulty to manage multiple WDM channels. An extensive theoretical study was carried out, which included the development of a numerical model that describes the physical phenomena and optical systems, and from which we extracted useful conclusions about the behavior and the performance of single and dual pump parametric amplifier topologies. The outcome of the previous investigation was the design of an innovative architecture for the all-optical regeneration of RZ-DPSK signals, which is based on the single pump topology and provides a realistic solution for the coherent generation of idler wave, which up until now remains one of the most important difficulties for the practical implementation of the parametric amplifiers. The proposed regenerator exhibits remarkable performance, while providing the capability of footprint minimisation, performance improvement and WDM compatibility using a low complexity extension.

Subsequently, we theoretically investigated the properties of optical injection locking in semiconductor laser. As is already known, this technique enhances the modulation bandwidth of a phase locked laser while enabling it to suppress the amplitude noise of the injected signal and replicate its phase characteristics. We demonstrated that the injection locked laser can replicate PSK and QPSK signals that reach 25 Gbaud/s while the amplitude noise suppression significantly improves the quality of the injected signals. These impressive findings make the injection locked laser a notable regenerator and its performance is evaluated through experimental investigation. The testbed of regenerator included the use of single-mode and multi-mode (Fabry-Pérot) slave laser, with the latter to provide the additional property of colorless regeneration. The remarkable performance of the proposed regenerator along with low implementation cost, energy sufficiency and low complexity of the system make it a great alternative for the upgrade of the optical coherent transmission systems.

The exceptional findings of the previous investigation gave us the opportunity to extend the use of the injection locked laser to other applications that could benefit from its properties. So, it was proposed and theoretically and experimentally investigated the use of injection locked laser as an additional stage of the receiver to suppress the amplitude information of a dual orthogonal DPSK/ASK signal and provide better discrimination between the two distinct information. The proposed receiver improved the performance of the specific modulation regarding to the bit rate and the transmission distance making it an important alternative for the channel capacity upgrade of long reach transmissions.

The outcome of the specific thesis is the design of three integrated systems for all-optical signal processing that provide ease of implementation and low complexity alternatives for the performance improvement of the coherent transmission systems.

SUBJECT AREA: All-optical signal processing

KEYWORDS: parametric amplification, injection locking, optical coherent communication, all-optical signal regeneration, orthogonal modulation formats

*Στους γονείς μου,
Φραγκίσκο και Αυγουστίνα*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής είναι μία πολυδιάστατη πνευματική δοκιμασία, η οποία προάγει τη δημιουργικότητα, οξύνει την περιέργεια και διευρύνει τις γνώσεις ενώ απαιτεί ισχυρή αποφασιστικότητα και έντονη αφοσίωση. Η ενασχόληση με μία καινοτόμα ιδέα και το γεγονός ότι το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να δώσει λύση σε κάποιον επιστημονικό, τεχνικό ή φιλοσοφικό προβληματισμό προσφέρει μία ανυπέρβλητη ηθική ικανοποίηση. Από την προσωπική μου εμπειρία τα θετικά στοιχεία που αποκόμησα είναι πολύ σημαντικότερα των όποιων αμφιταλαντεύσεων και προβληματισμών αντιμετώπισα κατά την πορεία της διδακτορικής διατριβής μου. Ο γνωστικός μου ορίζοντας και τα ενδιαφέροντά μου διευρύνθηκαν. Έμαθα τον τρόπο να ψάχνω, να φιλτράρω και να συνδυάζω τις πληροφορίες που συλλέγω. Απέκτησα νέες τεχνικές δεξιότητες και έμαθα να συνεργάζομαι υγιώς με τους συναδέλφους μου για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Η ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε μέσα από τη συνεργασία και την υποστήριξη κάποιων πολύ σημαντικών για μένα ατόμων τα οποία θέλω να ευχαριστήσω ξεχωριστά.

Θα ήθελα κατ' αρχήν να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή και δασκαλό μου κ. Δημήτριο Συβρίδη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στις ικανότητές μου και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ ερευνητικά με τον τομέα των οπτικών επικοινωνιών. Είναι ο άνθρωπος που μέσα από τους διαλόγους μας, όλα αυτά τα χρόνια μου έδινε κίνητρο να συνεχίζω και να βρίσκομαι πάντα σε μία κατάσταση εγρήγορης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο κ. Αντώνη Μπόγρη για την πολύτιμη επιστημονική βοήθειά του όλα αυτά τα χρόνια αλλά και την ηθική υποστήριξη που μου παρείχε δίνοντάς μου τη δύναμη να ξεπεράσω τα όποια αδιέξοδα συνάντησα.

Ευχαριστώ όλους τους συναδέλφους και φίλους Α. Αργύρη, Η. Σίμο, Χ. Σίμο, Α. Καψάλη, Ε. Γρίβα, Χ. Μεσαριτάκη, Μ. Μπούρμπο, Σ. Δεληγιαννίδη, Χ. Τσεκρέκο και Μαρία Καβρουλάκη, οι οποίοι μέσα από την πολύτιμη ανταλλαγή απόψεων και γνώσεων, το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας αλλά και το ευχάριστο κλίμα συνύπαρξης κατέστησαν εφικτή την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ιδιαίτερω θέλω να ευχαριστήσω τους συναδέλφους, φίλους και συνοδοιπόρους Ν. Ράππη και Ε. Πικάση με τους οποίους λόγω της κοινής αφετηρίας μας μοιραστήκαμε τους προβληματισμούς μας και συνεργαστήκαμε στενά για την αντιμετώπιση των επιστημονικών εμποδίων που στον καθένα μας ανέκυπταν.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου Φραγκίσκο και Αυγουστίνα, οι οποίοι όλα αυτά τα χρόνια με στήριξαν στις επιλογές μου και μέσα από την σωστή καθοδήγηση και την ηθική υποστήριξη μου έδιναν δύναμη και κουράγιο να συνεχίζω. Σε αυτούς οφείλω το μεγαλύτερο κομμάτι της προσωπικότητάς μου ως επιστήμονα και ως ανθρώπου.

ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

1. Fragkos, A. Bogris, and D. Syvridis, "All-Optical Regeneration Based on Phase-Sensitive Nondegenerate Four-Wave Mixing in Optical Fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 24, pp. 1826-1828, 2010
2. A. Fragkos, A. Bogris, D. Syvridis, and R. Phelan, "Amplitude Noise Limiting Amplifier for Phase Encoded Signals Using Injection Locking in Semiconductor Lasers," *J. Lightw. Technol.*, vol. 30, no. 5, pp. 764-771, 2012
3. A. Fragkos, A. Bogris, D. Syvridis, and R. Phelan, "Colorless Regenerative Amplification of Constant Envelope Phase-Modulated Optical Signals Based on Injection-Locked Fabry-Pérot Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 1, pp. 28-30, 2012
4. A. Fragkos, A. Bogris, and D. Syvridis, "Efficient Orthogonal Modulation Enabled by Injection Locked Limiting Amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 25, no. 7, pp. 667-670, 2013
5. A. Fragkos, A. Bogris, and D. Syvridis, "Black-box Optical Regenerator exploiting Non-Degenerate Phase-Sensitive Amplification," *ECOC*, P1.03, September (2010)
6. A. Fragkos, A. Bogris, D. Syvridis, R. Phelan, J. O' Carroll, B. Kelly, and J. O' Gorman "Amplitude Regeneration of Phase Encoded Signals Using Injection Locking in Semiconductor Lasers," *OSA/OFC/NFOEC*, OWG1, March (2011)
7. A. Fragkos, A. Bogris, and D. Syvridis, "Spectrally efficient and High Extinction Ratio DPSK/ASK Orthogonal Modulation Schemes Based on Injection Locking Limiting Amplifiers," *ECOC*, P3.04, September (2012)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	35
1.1 Ιστορική αναδρομή στις σύμφωνες οπτικές επικοινωνίες	36
1.2 Αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος	39
1.3 Κίνητρο της διατριβής.....	41
1.4 Δομή διδακτορικής διατριβής.....	43
2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.....	45
2.1 Βασικά φαινόμενα κατά τη διάδοση φωτός σε οπτική ίνα	45
2.1.1 Εξασθένηση στην οπτική ίνα.....	46
2.1.2 Χρωματική διασπορά.....	47
2.1.3 Φαινόμενα Πόλωσης	49
2.1.4 Μη γραμμικά φαινόμενα	53
2.2 Τρόποι αντιμετώπισης των περιοριστικών παραγόντων διάδοσης.....	58
2.2.1 Αντιμετώπιση της εξασθένησης.....	58
2.2.2 Αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς	60
2.2.3 Αντιμετώπιση της διασποράς τρόπων πόλωσης	61
2.2.4 Αντιμετώπιση των μη γραμμικών φαινομένων	62
2.3 Εξίσωση διάδοσης κυμάτων σε οπτική ίνα και μέθοδοι προσομοίωσης	63
3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	67
3.1 Διαμόρφωση κατά πλάτος (ASK)	67
3.1.1 Χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης ASK και αρχιτεκτονική του πομπού.....	67
3.1.2 Αρχιτεκτονική του δέκτη	71
3.2 Δυαδική διαμόρφωση φάσης (BPSK).....	72
3.2.1 Χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης BPSK και αρχιτεκτονική του πομπού.....	72
3.2.2 Αρχιτεκτονική του δέκτη	74
3.3 Ορθογωνική διαμόρφωση φάσης (QPSK)	79
3.3.1 Χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης QPSK και αρχιτεκτονική του πομπού	80
3.3.2 Αρχιτεκτονική του QPSK δέκτη.....	81
3.4 Σύγκριση των σχημάτων διαμόρφωσης.....	83
3.5 Συμπεράσματα	85
4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΙ ΣΤΗ ΦΑΣΗ	87

4.1	Παραμετρικές διεργασίες	87
4.1.1	Προέλευση της μίξης τεσσάρων κυμάτων.....	87
4.1.2	Θεωρία της μίξης τεσσάρων κυμάτων	89
4.1.3	Μη γραμμική προσαρμογή φάσης	91
4.2	Παραμετρικός ενισχυτής με ένα κύμα άντλησης (1P-FOPA)	92
4.3	Παραμετρικός ενισχυτής με δύο κύματα άντλησης (2P-FOPA)	104
4.4	Παραμετρικοί ενισχυτές ευαίσθητοι στη φάση (PSA).....	114
4.4.1	Συνθήκη προσαρμογής φάσης και επιπτώσεις στις επιδόσεις του ενισχυτή	114
4.4.2	Τοπολογίες ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών	119
4.4.3	Συγκριτικές επιδόσεις αναγέννησης RZ-DPSK σημάτων με χρήση PIA και PSA	121
4.5	Αμιγώς οπτική αναγέννηση 40 Gb/s RZ-DPSK σήματος βασισμένη σε PSA μονής άντλησης.....	124
4.5.1	Αρχή λειτουργίας.....	125
4.5.2	Αριθμητική μελέτη.....	128
4.6	Συμπεράσματα	134
5.	ΕΓΚΛΕΪΔΩΣΗ ΦΑΣΗΣ ΜΕ ΈΓΧΥΣΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	135
5.1	Ιστορική αναδρομή.....	135
5.2	Εγκλείδωση φάσης σε ημιαγωγικά laser	137
5.2.1	Αρχή λειτουργίας του ημιαγωγικού laser.....	137
5.2.2	Εξισώσεις ροής	140
5.2.3	Αρχή λειτουργίας της εγκλείδωσης φάσης	141
5.2.4	Χαρακτηριστικές παράμετροι της εγκλείδωσης φάσης	144
5.2.5	Δυναμική συμπεριφορά των εγκλειδωμένων laser και περιοχές λειτουργίας	145
5.2.6	Ιδιότητες των εγκλειδωμένων laser.....	147
5.2.7	Εφαρμογές των εγκλειδωμένων laser	149
5.3	Αριθμητική μελέτη των χαρακτηριστικών μεταφοράς ενός εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser.....	149
5.3.1	Απόκριση σε μονοτονική διαμόρφωση φάσης	150
5.3.2	Απόκριση σε μονοτονική διαμόρφωση πλάτους	152
5.3.3	Απόκριση σε ευρυζωνική διαμόρφωση φάσης.....	155
5.4	Αμιγώς οπτική αναγέννηση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση με χρήση εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser 158	
5.4.1	Αριθμητική μελέτη.....	158
5.4.2	Πειραματική μελέτη	162
5.5	Αμιγώς οπτική αναγέννηση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση με χρήση εγκλειδωμένου Fabry-Pérot laser 171	
5.5.1	Αρχή λειτουργίας της μονότροπης εκπομπής εγκλειδωμένου Fabry-Pérot laser	172
5.5.2	Πειραματική μελέτη	172

5.6	Συμπεράσματα	178
6.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΔΩΜΕΝΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ LASER ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ DPSK/ASK ΣΗΜΑΤΩΝ	179
6.1	Εισαγωγή.....	179
6.2	Πειραματική μελέτη	181
6.3	Αριθμητική μελέτη.....	186
6.4	Συμπεράσματα	190
7.	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	191

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Απεικόνιση ενός τυπικού ομόδунου δέκτη για την αποδιαμόρφωση PSK σήματος.....	36
Σχήμα 1-2: Απεικόνιση ενός τυπικού ετερόδунου δέκτη για την αποδιαμόρφωση FSK σήματος.....	37
Σχήμα 1-3: Καμπύλη απολαβής ενός τυπικού EDFA συναρτήσει του μήκους κύματος (α) και πακετάρισμα ενός εμπορικά διαθέσιμου τέτοιου ενισχυτή (β).	38
Σχήμα 1-4: Σχηματική απεικόνιση ενός ΟΕΟ επαναλήπτη σήματος σε WDM σύστημα.	40
Σχήμα 1-5: Εξέλιξη των επιδόσεων των οπτικών δικτύων με βάση το γινόμενο χωρητικότητας-μήκους διάδοσης συναρτήσει του χρόνου.....	42
Σχήμα 2-1: Γεωμετρική αναπαράσταση μιας τυπικής οπτικής ίνας (α) και απεικόνιση της κυματοδήγησης στο εσωτερικό μιας μονότροπης και μιας πολύτροπης ίνας (β).....	46
Σχήμα 2-2: Απεικόνιση των βασικών συνιστωσών εξασθένησης της διαδιδόμενης οπτικής ισχύος στο εσωτερικό μιας οπτικής ίνας συναρτήσει του μήκους κύματος. Η συνεχόμενη καμπύλη αντιστοιχεί στη συνολική εξασθένηση που προκύπτει από τη συνεισφορά των τριών επιμέρους συνιστωσών.....	46
Σχήμα 2-3: Εξάρτηση της διασποράς (D) από το μήκος κύματος για τα διάφορα είδη οπτικών ινών. Με μαύρο χρώμα απεικονίζονται οι τυπικές μονότροπες ίνες (SMF), με κόκκινο οι μονότροπες ίνες μετατοπισμένου ZDWL (DSF), με πράσινο οι ίνες αντιστάθμισης διασποράς (DCF) και με μπλέ οι ίνες με επίπεδη διασπορά (DFF).....	49
Σχήμα 2-4: Εξέλιξη του επιπέδου πόλωσης κατά τη διάδοση συνεχούς κύματος σε οπτική ίνα.	50
Σχήμα 2-5: Επίδραση της διπλοθλαστικότητας της οπτικής ίνας στη διάδοση ενός οπτικού παλμού.	50
Σχήμα 2-6: Η επίδραση της διπλοθλαστικότητας στις διάφορες συχνότητες.	51
Σχήμα 2-7: Διαχωρισμός του παλμού στους δύο πολωτικούς άξονες εξαιτίας της συνδυασμένης δράσης της διπλοθλαστικότητας και της σύζευξης των τρόπων.....	51
Σχήμα 2-8: Φασματική απόκριση της απολαβής Raman για κύμα εισαγόμενο στο 1 μm. Η τιμή κορυφής για το συγκεκριμένο σήμα είναι 10^{-13} cm/W ενώ στην περιοχή των 1.55 μm είναι 7×10^{-12} cm/W.....	56
Σχήμα 2-9: Επίδραση του φαινομένου SRS στην περίπτωση μιας WDM διάδοσης.....	57
Σχήμα 2-10: Απεικόνιση του μηχανισμού οπτικής ενίσχυσης μέσω των ενεργειακών μεταβάσεων των ιόντων Er^{+3} οι οποίες πραγματοποιούνται στο εσωτερικό ενός EDFA.	58
Σχήμα 2-11: Φασματική απεικόνιση της απολαβής και της εικόνας θορύβου ενός σύγχρονου ενισχυτή EDFA.	59
Σχήμα 2-12: Διαχείριση της διασποράς με τη χρήση ινών αντιστάθμισης της διασποράς DCF.....	60
Σχήμα 2-13: Αντιμετώπισης της διασποράς με χρήση αμιγώς οπτικής αντιστροφής φάσματος.	61
Σχήμα 2-14: Μια σύγχρονη μέθοδος οπτικής αντιστάθμισης της PMD.....	62
Σχήμα 2-15: Μια σύγχρονη μέθοδος ηλεκτρικής αντιστάθμισης της PMD.....	62

Σχήμα 3-1: Απεικόνιση της διάταξης ενός εξωτερικού διαμορφωτή πλάτους MZM.....	68
Σχήμα 3-2: Απεικόνιση της χαρακτηριστικής μεταφοράς ενός MZM και του αστερισμού του σήματος που προκύπτει στην έξοδό του.	69
Σχήμα 3-3: Απεικόνιση του πομπού ενός RZ-ASK σήματος καθώς επίσης και του μηχανισμού μορφοποίησης παλμών μέσω της ημιτονικής συχνότητας που οδηγεί τον δεύτερο MZM.	70
Σχήμα 3-4: Απεικόνιση του οπτικού φάσματος ενός 10 Gb/s NRZ-ASK (α) και ενός 10 Gb/s RZ-ASK σήματος με εύρος παλμών 67% (β). Στο σχήμα (β) είναι εμφανής η διεύρυνση του φάσματος λόγω της RZ μορφοποίησης των παλμών.	70
Σχήμα 3-5: Απεικόνιση ενός πλήρους ASK πομπο-δέκτη. ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους και ΔΦ: φωτοδίοδος.	71
Σχήμα 3-6: Διάγραμμα οφθαλμού ενός 10 Gb/s NRZ-ASK σήματος (α) και ενός 10 Gb/s RZ-ASK σήματος με χρονικό εύρος παλμών 67% (β).	72
Σχήμα 3-7: Απεικόνιση της διάταξης ενός τυπικού εξωτερικού διαμορφωτή φάσης.....	72
Σχήμα 3-8: Χαρακτηριστική μεταφοράς ενός διαμορφωτή φάσης μονού βραχίωνα και ο αντίστοιχος αστερισμός του σήματος εξόδου.	73
Σχήμα 3-9: Απεικόνιση του οπτικού φάσματος ενός 10 Gb/s NRZ-PSK (α) και ενός 10 Gb/s RZ-PSK με χρονικό εύρος παλμών ίσο με 67% (β).	74
Σχήμα 3-10: Απεικόνιση της βασικής τοπολογίας σύμφωνης ετερόδυνης (α) και ομόδυνης (β) φώρασης για την αποδιαμόρφωση PSK σημάτων. VCO: voltage control oscillator.....	75
Σχήμα 3-11: Απεικόνιση ενός τυπικού DPSK πομποδέκτη με χρήση ισοσταθμισμένης φώρασης. ΔΦ: διαμορφωτής φάσης, DI: delay interferometer και ΦΔ: φωτοδίοδος.	76
Σχήμα 3-12: Απεικόνιση του διαγράμματος οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου 10 Gb/s NRZ-DPSK (α) και 10 Gb/s RZ-DPSK σήματος με χρονικό εύρος παλμών ίσο με 67% με χρήση ισοσταθμισμένου δέκτη.	77
Σχήμα 3-13: Διάγραμμα των βασικών διεργασιών που πραγματοποιεί ένας ψηφιακός σύμφωνος δέκτης για την αποδιαμόρφωση ενός PSK σήματος (α) και πρακτική υλοποίηση ενός τέτοιου δέκτη.....	79
Σχήμα 3-14: Απεικόνιση ενός τυπικού QPSK πομπού και του αντίστοιχου αστερισμού του εκπεμπόμενου σήματος.....	80
Σχήμα 3-15: Απεικόνιση του οπτικού φάσματος ενός 10 Gb/s NRZ-QPSK σήματος....	81
Σχήμα 3-16: Απεικόνιση ενός τυπικού DQPSK συστήματος λήψης με ισοσταθμισμένο δέκτη.	81
Σχήμα 3-17: Απεικόνιση του διαγράμματος οφθαλμού ενός 10 Gb/s NRZ-DQPSK σήματος πριν (α) και μετά τη λήψη (β, γ). Στο διάγραμμα (β) απεικονίζεται η συνιστώσα I ενώ στο (γ) η συνιστώσα Q του QPSK σήματος.	82
Σχήμα 3-18: Απεικόνιση ενός σύμφωνου ψηφιακού δέκτη για την αποδιαμόρφωση QPSK σήματος.	83
Σχήμα 3-19: Στο πολικό διάγραμμα (α) απεικονίζεται η φάση δύο διαδοχικών bit. Στο πολικό διάγραμμα (β) απεικονίζεται η τυχαία ολίσθηση φάσης των διαδοχικών bit ύστερα από την επίδραση του θορύβου (κόκκινοι κύκλοι) και η απόφαση που λαμβάνει ο DPSK δέκτης (πράσινος κύκλος). Στο διάγραμμα (γ) απεικονίζεται η τυχαία ολίσθηση	

φάσης των διαδοχικών bit ύστερα από την επίδραση του θορύβου (κόκκινοι κύκλοι) και η απόφαση που λαμβάνει ο PSK δέκτης (πράσινοι κύκλοι).....	84
Σχήμα 4-1: Συχνотικά προϊόντα της μίξης τεσσάρων κυμάτων για δύο κύματα άντλησης στις συχνότητες ω_2 και ω_3 και ένα ασθενές σήμα στην ω_1	90
Σχήμα 4-2: Απολαβή του 1P-FOPA συναρτήσεως της σχετικής φασματικής απόστασης μεταξύ του σήματος και του κύματος άντλησης.	96
Σχήμα 4-3: Απολαβή του 1P-FOPA συναρτήσεως της σχετικής φασματικής απόστασης μεταξύ σήματος και κύματος άντλησης για διαφορετικές φασματικές αποστάσεις μεταξύ του κύματος άντλησης και του μήκους κύματος μηδενικής διασποράς.....	97
Σχήμα 4-4: Απολαβή του 1P-FOPA συναρτήσεως της φασματικής απόστασης μεταξύ κύματος άντλησης και μήκους κύματος μηδενικής διασποράς για διαφορετικές τιμές της ισχύος του κύματος άντλησης.	97
Σχήμα 4-5: Απολαβή ενός 1P-FOPA συναρτήσεως της σχετικής φασματικής απόστασης μεταξύ του σήματος και του κύματος άντλησης για δύο διαφορετικά μήκη HNL-DSF ίνας, διατηρώντας το γ_{PPL} σταθερό και ίσο με 3.....	98
Σχήμα 4-6: Διάγραμμα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του 1P-FOPA. ΕΠ: Ελεγκτής πόλωσης, ΟΖΦ: Οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, HNLF: ίνα υψηλής μή γραμμικότητας.	99
Σχήμα 4-7: Καμπύλη απολαβής του 1P-FOPA με υπολογισμό της εξίσωσης 4.27 (μαύρη γραμμή) και με αριθμητική προσομοίωση της NLSE (κόκκινες κουκίδες) συναρτήσεως της σχετικής φασματικής απόστασης μεταξύ σήματος και κύματος άντλησης.	100
Σχήμα 4-8: Φάσμα του σήματος και του κύματος άντλησης πριν (α) και μετά (β) τον ενισχυτή 1P-FOPA.	100
Σχήμα 4-9: Απολαβή ενισχυτή 1P-FOPA συναρτήσεως της ισχύος του κύματος άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.....	101
Σχήμα 4-10: Σχετική φασματική απόσταση μεταξύ των λοβών μέγιστης ενίσχυσης και του κύματος άντλησης συναρτήσεως του μήκους της ίνας και της ισχύος του κύματος άντλησης για τον 1P-FOPA. Η μαύρη γραμμή προσδιορίζει την περιοχή των 20 dB που αντιστοιχεί σε γινόμενο $\gamma_{PPL}=3$	102
Σχήμα 4-11: Εύρος ζώνης του 1P-FOPA συναρτήσεως του μήκους της ίνας και της ισχύος του κύματος άντλησης για τιμές ενίσχυσης μεγαλύτερες των 10 dB. Η μαύρη γραμμή προσδιορίζει την περιοχή των 20 dB που αντιστοιχεί σε γινόμενο $\gamma_{PPL}=3$	102
Σχήμα 4-12: Πειραματική διάταξη ενός παραμετρικού ενισχυτή 2P-FOPA. ΟΖΦ: Οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, EDFA: οπτικός ενισχυτής ερβίου, HNLF: ίνα υψηλής μή γραμμικότητας.	104
Σχήμα 4-13: Παράγωγα που προκύπτουν κατά την παραμετρική διαδικασία με τη χρήση δύο κυμάτων άντλησης.	105
Σχήμα 4-14: Καμπύλη απολαβής του 2P-FOPA συναρτήσεως του μήκους κύματος του σήματος για τοποθέτηση των κυμάτων άντλησης συμμετρικά γύρω από το μήκος κύματος $\lambda_c=1554.1$ nm και σχετική φασματική απόσταση μεταξύ τους ίση με 60 nm.	106
Σχήμα 4-15: Καμπύλες απολαβής του 2P-FOPA συναρτήσεως του μήκους κύματος του σήματος για σταθερή φασματική απόσταση μεταξύ των κυμάτων άντλησης ίση με 60 nm και διαφορετικές αποστάσεις του κεντρικού μήκους κύματος ως προς το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς.	107

Σχήμα 4-16: Καμπύλη απολαβής του 2P-FOPA συναρτήσει του μήκους κύματος του σήματος για δύο διαφορετικά επίπεδα ισχύος των κυμάτων άντλησης διατηρώντας τη φασματική τους απόσταση και το μήκος της ίνας σταθερά.....	108
Σχήμα 4-17: Καμπύλη απολαβής του 2P-FOPA συναρτήσει του μήκους κύματος του σήματος για δύο διαφορετικούς συνδυασμούς L και P, διατηρώντας σταθερό το γινόμενο τους ώστε να προσφέρει ενίσχυση 20 dB.....	109
Σχήμα 4-18: Απεικόνιση της θεωρητικής καμπύλης απολαβής του 2P-FOPA (μαύρη γραμμή) για $\gamma_{PL}=3$ και της αντίστοιχης καμπύλης ύστερα από προσομοίωση (κόκκινες κουκίδες).....	110
Σχήμα 4-19: Φάσμα των κυμάτων πριν (α) και μετά (β) την παραμετρική διαδικασία σε έναν 2P-FOPA. Στο φάσμα εξόδου είναι ευδιάκριτη η παρουσία των παραγώγων που προκύπτουν από τις διαδικασίες MI και BS.....	110
Σχήμα 4-20: Απολαβή του ενισχυτή 2P-FOPA συναρτήσει της συνολικής ισχύος των κυμάτων άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας...	111
Σχήμα 4-21: Εύρος ζώνης του ενισχυτή 2P-FOPA στα 1.3 dB συναρτήσει της συνολικής ισχύος των κυμάτων άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.....	112
Σχήμα 4-22: Φασματική απόσταση μεταξύ των κυμάτων άντλησης για τον ενισχυτή 2P-FOPA συναρτήσει της συνολικής ισχύος των κυμάτων άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.....	112
Σχήμα 4-23: Ολίσθηση του κεντρικού μήκους κύματος, λ_c , για τον ενισχυτή 2P-FOPA συναρτήσει της συνολικής ισχύος των κυμάτων άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.....	113
Σχήμα 4-24: Καμπύλη απολαβής του ενισχυτή 1P-FOPA συναρτήσει της φάσης του σήματος για σταθερή φάση στο κύμα άντλησης ίση με μηδέν.....	114
Σχήμα 4-25: Καμπύλη απολαβής (α) και φάσης εξόδου (β) του ευαίσθητου στη φάση ενισχυτή 1P-FOPA συναρτήσει της φάσης του σήματος στην είσοδο για σταθερές φάσεις εισόδου του κύματος άντλησης ($\varphi_P=\pi/4$) και του συζυγούς ($\varphi_i=0$).....	115
Σχήμα 4-26: Καμπύλη απολαβής (α) και φάσης εξόδου (β) του ευαίσθητου στη φάση ενισχυτή 1P-PSA συναρτήσει της φάσης εισόδου του σήματος για μηδενική φάση του κύματος άντλησης και φάση του συζυγούς κύματος η οποία μεταβάλλεται ταυτόχρονα με τη φάση του σήματος παίρνοντας ίδιες τιμές.....	116
Σχήμα 4-27: Απεικόνιση της απόκλισης φάσης και του SNR του σήματος στην έξοδο του 1P-PSA συναρτήσει του SNR του σήματος εισόδου για υποβάθμιση του τελευταίου μόνο από θόρυβο πλάτους (τετράγωνο) και μόνο από θόρυβο φάσης (κύκλοι) για λειτουργία του ενισχυτή στην γραμμική περιοχή.....	117
Σχήμα 4-28: Καμπύλη απολαβής (α) και φάσης εξόδου (β) του ευαίσθητου στη φάση ενισχυτή 1P-PSA συναρτήσει της φάσης του σήματος στην είσοδο για διαφορετικά επίπεδα ισχύος του σήματος.....	118
Σχήμα 4-29: Απεικόνιση της απόκλισης φάσης και του SNR του σήματος στην έξοδο του 1P-PSA συναρτήσει του SNR του σήματος εισόδου για υποβάθμιση του τελευταίου μόνο από θόρυβο πλάτους (τετράγωνο) και μόνο από θόρυβο φάσης (κύκλοι) για λειτουργία του ενισχυτή στη μη γραμμική περιοχή.....	118
Σχήμα 4-30: Τοπολογία του 1P-PSA.....	119
Σχήμα 4-31: Τοπολογία του 2P-PSA.....	120

Σχήμα 4-32: Τοπολογία του εκφυλισμένου 2P-PSA.	121
Σχήμα 4-33: Διαγράμματα των τριών συστημάτων διάδοσης. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η τυπική οπτική ζεύξη με αντιστάθμιση διασποράς και οπτική ενίσχυση, στο σχήμα (β) απεικονίζεται η υλοποίηση του Matsumoto με επαναλαμβανόμενους 1P-PIA αναγεννητές και στο σχήμα (γ) απεικονίζεται η υλοποίηση με έναν 1P-PSA αναγεννητή τοποθετημένο σε συγκεκριμένη θέση στην οπτική ζεύξη.....	122
Σχήμα 4-34: Απεικόνιση του παράγοντα Q για τις τρεις διαφορετικές υλοποιήσεις διάδοσης συναρτήσει του μήκους της οπτικής ζεύξης.	124
Σχήμα 4-35: Διάγραμμα του προτεινόμενου αναγεννητή RZ-DPSK σημάτων. ΣΚ: συμβολόμετρο καθυστέρησης, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΣΕΦ: στοιχείο ελέγχου φάσης, ΦΔ: φωτοδίοδος, HNLF1: μη γραμμική ίνα για την υλοποίηση του PIA, HNLF2: μη γραμμική ίνα για την τη μετατροπή του RZ-OOK σε NRZ-OOK, HNLF3: μη γραμμική ίνα για την υλοποίηση του NRZ-OOK σε RZ-DPSK και HNLF4: μη γραμμική ίνα για την υλοποίηση του PSA.	125
Σχήμα 4-36: Παραγωγή σύμφωνων RZ παλμοσειρών μέσω της μη ευαίσθητης στη φάση παραμετρικής ενίσχυσης.	126
Σχήμα 4-37: Φασματική και χρονική απεικόνιση του μηχανισμού αμιγώς οπτικής μετατροπής του RZ-OOK σήματος σε NRZ-OOK μέσω του στενού φασματικού φιλτραρίσματος των XPM παραγώγων.....	126
Σχήμα 4-38: Απεικόνιση του μηχανισμού αμιγώς οπτικής μετατροπής του NRZ-OOK σήματος σε NRZ-DPSK μέσω της διαδικασίας XPM.	127
Σχήμα 4-39: Διάγραμμα του μοντέλου του υπό μελέτη συστήματος διάδοσης.....	128
Σχήμα 4-40: Χαρακτηριστική μεταφοράς της διαδικασίας XPM που λαμβάνει χώρα στην HNLF2 (α) και στην HNLF3 (β).	130
Σχήμα 4-41: Απεικόνιση του μηχανισμού μετατροπής σχημάτων διαμόρφωσης. Στο διάγραμμα οφθαλμού (α) απεικονίζεται το RZ-OOK σήμα μετά το συμβολόμετρο ενώ στο διάγραμμα οφθαλμού (β) απεικονίζεται η μετατροπή του σήματος σε NRZ-OOK μετά την HNLF2.	130
Σχήμα 4-42: Διάγραμμα οφθαλμού της φάσης του βοηθητικού σήματος πριν (α) και μετά (β) την αναγέννηση.	131
Σχήμα 4-43: Διαγράμματα οφθαλμού του 40 Gb/s RZ-DPSK σήματος πριν (α) και μετά την αναγέννηση για λειτουργία του PSA στην γραμμική (β) και στη μη γραμμική περιοχή (γ). Ο υπολογισμός των ματιών πραγματοποιήθηκε για SNR=18 dB.....	131
Σχήμα 4-44: Απεικόνιση του ηλεκτρικού SNR του σήματος στην έξοδο του αναγεννητή συναρτήσει του SNR στην είσοδο αυτού (α) και της τυπικής απόκλισης της φάσης εξόδου συναρτήσει της φάσης εισόδου (β). Οι μαύρες καμπύλες αντιστοιχούν στην περιοχή γραμμικής λειτουργίας του PSA ενώ οι κόκκινες καμπύλες αντιστοιχούν στην περιοχή του κόρου.	132
Σχήμα 4-45: Διάγραμμα ενός πιθανού αναγεννητή ικανού να διαχειριστεί ταυτόχρονα όλα τα κανάλια μιας WDM μετάδοσης. COMB : πηγή παραγωγής χτένας συχνοτήτων, ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους.	133
Σχήμα 5-1: Απεικόνιση της ατομικής απορρόφησης (α), της αυθόρμητης εκπομπής (β) και της εξαναγκασμένης εκπομπής (γ).....	138
Σχήμα 5-2: Απεικόνιση του ενεργού υλικού και των φορέων μιας ημιαγωγική διάταξης laser.	139

Σχήμα 5-3: Απεικόνιση του μηχανισμού διάχυσης φορέων κατά την τροφοδοσία ενός laser.	139
Σχήμα 5-4: Απεικόνιση του μηχανισμού εξαναγκασμένης εκπομπής στο εσωτερικό της οπτικής κοιλότητας (α). Απεικόνιση των μηκών κύματος συντονισμού της οπτικής κοιλότητας (β).	140
Σχήμα 5-5: Διάγραμμα φασόρων του μηχανισμού εγκλείδωσης. Το διάγραμμα (α) απεικονίζει την περιστροφή του ανυσματικού πεδίου ενός ελεύθερα ταλαντούμενου laser το οποίο εκπέμπει στη συχνότητα που επιβάλλεται από την κοιλότητά του. Το διάγραμμα (β) απεικονίζει τη σταθεροποίηση του ανυσματικού πεδίου του slave laser κατά την εγκλείδωση, η οποία επιτυγχάνεται με το άθροισμα τριών διανυσμάτων : 1) Ο φάσοντας του slave laser περιστρέφεται κατά $\Delta\omega$ (μαύρο άνυσμα), 2) το εγχεόμενο πεδίο του master προσθέτει μία πραγματική συνιστώσα (κόκκινο άνυσμα) και 3) το πλάτος του συνολικού πεδίου μειώνεται λόγω της αρνητικής ενίσχυσης (πράσινο άνυσμα).....	143
Σχήμα 5-6: Απεικόνιση της εξάρτησης του $\Delta\omega_{inj}$ από το ποσοστό έγχυσης για στατική λειτουργία του συστήματος εγκλείδωσης φάσης. Η συχνотική απόσταση μεταξύ των άνω και κάτω ορίων εγκλείδωσης, για σταθερό ποσοστό έγχυσης, ορίζεται ως εύρος ζώνης εγκλείδωσης (BW_{LR}) και απεικονίζεται για την περίπτωση του $R=-10$ dB.....	145
Σχήμα 5-7: Απεικόνιση του εύρους ζώνης εγκλείδωσης σε δυναμική (μαύρη καμπύλη) και στατική (κόκκινη καμπύλη) λειτουργία. Η πράσινη περιοχή αντιστοιχεί στην περιοχή σταθερής εγκλείδωσης φάσης ενώ η κίτρινη περιοχή αντιστοιχεί στην περιοχή ασταθούς εγκλείδωσης.....	146
Σχήμα 5-8: Φασματική απόκριση ενός ελεύθερα ταλαντούμενου ημιαγωγικού laser και ενός εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser για διάφορες τιμές του ποσοστού έγχυσης R . 148	
Σχήμα 5-9: Απεικόνιση της συμπίεσης του θορύβου RIN ενός εγκλειδωμένου laser για διαφορετικά επίπεδα έγχυσης οπτικής ισχύος.....	148
Σχήμα 5-10: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικά επίπεδα έγχυσης ισχύος και σταθερό ρεύμα πόλωσης ίσο με $2I_{κατ}$. Οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -26 dB, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -20 dB και οι πράσινες σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -14 dB.....	151
Σχήμα 5-11: Χρονική απεικόνιση της διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου σήματος (μαύρη κυματομορφή) και της διαταραχής που μεταφέρει αυτό στο πλάτος του εγκλειδωμένου laser (κόκκινη κυματομορφή). Η διαμόρφωση φάσης έχει συχνότητα 10 GHz και η εγκλείδωση έχει επιτευχθεί για $R=-14$ dB και $I=2I_{κατ}$	151
Σχήμα 5-12: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικά ρεύματα πόλωσης και σταθερό ποσοστό έγχυσης ισχύος -14 dB. Οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης $2I_{κατ}$, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης $4I_{κατ}$ και οι πράσινες σε ρεύμα πόλωσης $6I_{κατ}$	152
Σχήμα 5-13: Απόκριση πλάτους (α) και φάσης (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης πλάτους του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικά ποσοστά έγχυσης και σταθερό ρεύμα κατωφλίου ίσο με $2I_{κατ}$. Οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -20 dB, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -14 dB και οι πράσινες σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -8 dB.....	153
Σχήμα 5-14: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικά ρεύματα πόλωσης και σταθερό ποσοστό έγχυσης ισχύος -14 dB. Οι μαύρες γραμμές	

αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης $2I_{κατ}$, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης $4I_{κατ}$ και οι πράσινες σε ρεύμα πόλωσης $6I_{κατ}$	154
Σχήμα 5-15: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικά ποσοστά έγχυσης και ρεύμα πόλωσης ίσο με $2I_{κατ}$. Οι μαύρες καμπύλες αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης -20 dB, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης -14 dB και οι πράσινες σε ποσοστό έγχυσης -8 dB.	155
Σχήμα 5-16: Χρονική απεικόνιση της διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου σήματος (μαύρη κυματομορφή) και της διαταραχής που μεταφέρει αυτή στο πλάτος του εγκλειδωμένου laser (κόκκινη κυματομορφή) για πληροφορία 10 Gb/s (α) και 16 Gb/s (β) και συνθήκες εγκλειδωσης $R=-14$ dB και $I=2I_{κατ}$	156
Σχήμα 5-17: Ηλεκτρικό φάσμα του εγκλειδωμένου laser για την περίπτωση εγχεόμενου σήματος με 10 Gb/s PSK διαμόρφωση (κόκκινο φάσμα) και χωρίς καθόλου διαμόρφωση (μαύρο φάσμα).....	157
Σχήμα 5-18: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικές τιμές του ρεύματος πόλωσης και σταθερό ποσοστό έγχυσης ίσο με -14 dB. Οι μαύρες καμπύλες αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης 40 mA, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης 80 mA και οι πράσινες σε ρεύμα πόλωσης 120 mA.....	157
Σχήμα 5-19: Διάγραμμα διασύνδεσης των λειτουργικών μονάδων για την αριθμητική μελέτη της εγκλειδωσης φάσης. ΨΔΣ: Ψευδοτυχαία δυαδική σειρά, ASE: μονάδα προσθήκης θορύβου ASE, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΟΕ: οπτική εξασθένηση και ΦΔ: φωτοδίοδος.	158
Σχήμα 5-20: Πολικά διαγράμματα αστερισμών του υποβαθμισμένου από θόρυβο ASE σήματος πριν (μαύρες κουκίδες) και μετά την αναγέννηση (κόκκινες κουκίδες). Τα διαγράμματα (α) και (β) απεικονίζουν τις επιδόσεις της εγκλειδωσης φάσης για 10 Gb/s και 25 Gb/s PSK σήματα ενώ τα διαγράμματα (γ) και (δ) απεικονίζουν τις επιδόσεις της εγκλειδωσης φάσης για 20 Gb/s και 50 Gb/s QPSK σήματα.	160
Σχήμα 5-21: Απόκριση του slave laser σε διάφορες τιμές ολίσθησης φάσης του master laser για ρυθμό 10 Gb/s. Το slave laser λειτουργεί σε ρεύμα πόλωσης ίσο με 40 mA ενώ το ποσοστό έγχυσης ισούται με $R=-14$ dB.....	161
Σχήμα 5-22: Συμπύκνωση θορύβου πλάτους συναρτήσει του ρεύματος πόλωσης του slave laser για διαφορετικές διαμορφώσεις και σταθερό ποσοστό έγχυσης για την κάθε μία (-17 dB για 10 Gb/s PSK, -13 dB για 25 Gb/s PSK, -12 dB για 20 Gb/s QPSK και -5 dB για 50 Gb/s QPSK).....	161
Σχήμα 5-23: Διάγραμμα της πειραματικής υλοποίησης ενός εγκλειδωμένου ενισχυτή ημιαγωγικού laser. ΕΠ: ελεγκτής πόλωσης, ΔΜ: διαμορφωτής φάσης, ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους, ΓΨΔΣ: γεννήτρια ψευδοτυχαίας δυαδικής σειράς, ΓΣ: γεννήτρια ραδιοσυχνοτήτων, ΟΑ: οπτικός απομονωτής, ΟΕ: οπτικός εξασθενητής, EDFA1: προενισχυτής ρυθμίζει τη στάθμη του οπτικού σήματος σήμα-προς-θόρυβο, EDFA2: ρυθμίζει τον λόγο του οπτικού σήματος-προς-θόρυβο και το ποσοστό έγχυσης, EDFA3: τελικός ενισχυτής για τη λήψη, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΟΚ: οπτικός κυκλοφορητής, ΣΚ: συμβολόμετρο καθυστέρησης, ΦΔ: φωτοδίοδος.....	162
Σχήμα 5-24 Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης του master (α) και του slave laser (β) για δύο διαφορετικά επίπεδα θορύβου του master laser.....	165
Σχήμα 5-25: Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης του master (α) και του slave laser (β) για δύο διαφορετικά επίπεδα θορύβου του διαμορφωμένου κατά φάση master laser με ρυθμό 10 Gbps.....	165

Σχήμα 5-26: Απεικόνιση των ηλεκτρικών παλμών που διαμορφώνουν τη φάση του master laser και των ταλαντώσεων αποκατάστασης του slave laser κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων του master laser από τη μία κατάσταση φάσης στην άλλη.	166
Σχήμα 5-27: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει της λαμβανόμενης ισχύος στον δέκτη για σταθερό οπτικό SNR του master laser ίσο με 25 dB.....	167
Σχήμα 5-28: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει του οπτικού SNR στην είσοδο του slave laser για σταθερή ισχύ στην είσοδο του δέκτη ίση με -7.5 dBm.....	167
Σχήμα 5-29: Διαγράμματα οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου 10 Gb/s DPSK σήματος με (β,δ) και χωρίς (α,γ) εγκλείωση φάσης για 30 dB (α,β) και 25 dB (γ,δ) οπτικό SNR του master laser.....	168
Σχήμα 5-30: Φασματική απόκριση του πλάτους του slave laser (κόκκινη γραμμή) σε ημιτονοειδείς διαταραχές πλάτους του master laser (β) εντός του συχνοτικού παραθύρου από 1GHz – 18 GHz.	168
Σχήμα 5-31: Διαγράμματα οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου 10 Gb/s DPSK σήματος με (β,δ,στ,η) και χωρίς (α,γ,ε,ζ) εγκλείωση φάσης για 1 GHz (α,β), 2 GHz (γ,δ), 4 GHz (ε,στ) και 8 GHz (ζ,η) ημιτονοειδούς διαταραχής πλάτους στο master laser διατηρώντας σταθερό το άνοιγμα του οφθαλμού και το ποσοστό έγχυσης.	169
Σχήμα 5-32: Διαγράμματα οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου 10 Gb/s DPSK σήματος με (β,δ) και χωρίς (α,γ) εγκλείωση φάσης για 1 GHz ημιτονοειδούς διαταραχής πλάτους 5 dBm (α,β) και 15 dBm (γ,δ).	170
Σχήμα 5-33: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει της λαμβανόμενης ισχύος στον δέκτη για 10 Gb/s DPSK σήμα υποβαθμισμένο από ημιτονοειδή διαταραχή ισχύος 18 dBm και συχνότητας 1 GHz.	171
Σχήμα 5-34: Διάγραμμα πειραματικής υλοποίησης ενός εγκλειδωμένου ενισχυτή Fabry-Pérot laser. ΓΨΔΣ: γεννήτρια ψευδοτυχαίας δυαδικής σειράς bit, ΔΦ: διαμορφωτής φάσης, ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους, ΦΔ: φωτοδίοδος, ΕΠ: ελεγκτής πόλωσης, EDFA1: πηγή θορύβου, EDFA2: ρυθμίζει το ποσοστό έγχυσης, EDFA3: τελικός ενισχυτής για τη λήψη, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΟΑ: οπτικός απομονωτής, ΟΕ: οπτικός κυκλοφορητής, ΟΕ: οπτικός εξασθενητής, ΣΚ: συμβολόμετρο καθυστέρησης.	173
Σχήμα 5-35: Διάγραμμα εξάρτησης του εύρους ζώνης εγκλείωσης (α) και της συμπίεσης πλευρικών τρόπων (β) από το ποσοστό έγχυσης για τρία μήκη κύματος εγκλείωσης.....	174
Σχήμα 5-36: Φάσμα του ελεύθερα ταλαντούμενου Fabry-Pérot (μαύρη γραμμή) και του εγκλειδωμένου στο μήκος κύματος 1538.89 nm (κόκκινη γραμμή), 1549.09 nm (πράσινη γραμμή) και 1555.29 nm (μπλέ γραμμή).....	175
Σχήμα 5-37: Απεικόνιση του ηλεκτρικού φάσματος ενός 10 Gb/s DPSK σήματος με (κόκκινη γραμμή) και χωρίς (μαύρη γραμμή) θόρυβο ASE στο πλάτος του (α), και του αντίστοιχου αναγεννημένου σήματος (β).	175
Σχήμα 5-38: Διαγράμματα οφθαλμού του επιβαρυμένου από θόρυβο πλάτους 10 Gb/s DPSK σήματος (β,δ,στ) και του αναγεννημένου σήματος (α,γ,ε) για εγκλείωση στα 1538.89 nm (α, β), 1548.09 nm (γ, δ) και 1555.29 nm (ε, στ). Το οπτικό SNR του εγχεόμενου σήματος διατηρείται σταθερό και ίσο με 23 dB.....	176
Σχήμα 5-39: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει της ισχύος λήψης στον DPSK δέκτη για υποβαθμισμένο 10 Gb/s DPSK σήμα οπτικού SNR 23 dB (μαύρη γραμμή) και για το αντίστοιχο αναγεννημένο σήμα στα μήκη κύματος των 1538.89 nm (μπλέ γραμμή), 1549.09 nm (πράσινη γραμμή) και 1555.29 nm (κόκκινη γραμμή).....	177

- Σχήμα 6-1: Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης ενός DPSK/ASK δέκτη. ΓΨΔΣ: Γεννήτρια ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας, ΔΠ: Διαμορφωτής πλάτους, ΔΦ: Διαμορφωτής φάσης, ΕΠ: Ελεγκτής πόλωσης, EDFA 1: Προ-ενισχυτής διάδοσης, EDFA 2: Προ-ενισχυτής για ισοστάθμιση απωλειών ισχύος, EDFA 3: Ενισχυτής γραμμής σταθερής ισχύος εξόδου για τη ρύθμιση οπτικού SNR, EDFA 4: Ρύθμιση ποσοστού έγχυσης, ΟΖΦ: Οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΟΕ: Οπτικός εξασθενητής, ΟΑ: Οπτικός απομονωτής, ΣΚ: Συμβολόμετρο καθυστέρησης και ΦΔ: Φωτοδίοδος. 182
- Σχήμα 6-2: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων για 10 Gb/s ASK σήμα μετά την άμεση αποδιαμόρφωσή του (κόκκινα τετράγωνα) και 10 Gb/s DPSK σήμα αποδιαμορφωμένο με (μαύρες κουκίδες) και χωρίς εγκλείδωση φάσης (μπλέ τρίγωνα). 183
- Σχήμα 6-3: Διαγράμματα οφθαλμού για το αποδιαμορφωμένο ASK σήμα με $ER=5$ dB (α), το υποβαθμισμένο DPSK σήμα με απενεργοποιημένη τη βαθμίδα εγκλείδωσης (β), το συμπιεσμένο ASK σήμα στην έξοδο του slave laser (γ) και το πλήρως ανεκτημένο DPSK σήμα με ενεργοποιημένη τη βαθμίδα εγκλείδωσης (δ). 184
- Σχήμα 6-4: Διαγράμματα οφθαλμού για το αποδιαμορφωμένο ASK σήμα με $ER=8$ dB (α), το υποβαθμισμένο DPSK σήμα με απενεργοποιημένη τη βαθμίδα εγκλείδωσης (β), το συμπιεσμένο ASK σήμα στην έξοδο του slave laser (γ) και το πλήρως ανεκτημένο DPSK σήμα με ενεργοποιημένη τη βαθμίδα εγκλείδωσης (δ). 184
- Σχήμα 6-5: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων για το αποδιαμορφωμένο 10 Gb/s ASK σήμα με (πράσινοι ρόμβοι) και χωρίς διάδοση (κόκκινα τετράγωνα) και για το αποδιαμορφωμένο 10 Gb/s DPSK σήμα με (μπλέ τρίγωνα) και χωρίς διάδοση (μαύρες κουκίδες). 185
- Σχήμα 6-6: Διάγραμμα διασύνδεσης των δομικών μοντέλων για την αριθμητική μελέτη του DPSK/ASK πομποδέκτη. ΔΦ: διαμορφωτής φάσης, ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΨΔΑ: ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία, SMF: μονότροπη ίνα, DCF: ίνα αντιστάθμισης διασποράς, EDFA: ενισχυτής γραμμής, ΟΣ: οπτικός συζεύκτης 3 dB, ΟΕ: οπτική εξασθένηση, ΣΚ: συμβολόμετρο καθυστέρησης και ΦΔ: φωτοδίοδος. 186
- Σχήμα 6-7: Διαγράμματα οφθαλμού για αποδιαμορφωμένο 20 Gb/s DPSK/ASK σήμα. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται το αποδιαμορφωμένο ASK σήμα στην έξοδο του ASK δέκτη, στα σχήματα (β) και (δ) απεικονίζεται το αποδιαμορφωμένο DPSK σήμα με και χωρίς τη βαθμίδα της εγκλείδωσης φάσης και στο σχήμα (γ) απεικονίζεται το πλάτος του σήματος στην έξοδο του slave laser. 188
- Σχήμα 6-8: Διαγράμματα οφθαλμού για αποδιαμορφωμένο 50 Gb/s DPSK/ASK σήμα. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται το αποδιαμορφωμένο ASK σήμα στην έξοδο του ASK δέκτη, στα σχήματα (β) και (δ) απεικονίζεται το αποδιαμορφωμένο DPSK σήμα με και χωρίς τη βαθμίδα της εγκλείδωσης φάσης και στο σχήμα (γ) απεικονίζεται το πλάτος του σήματος στην έξοδο του slave laser. 189
- Σχήμα 6-9: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων για 20 Gb/s (μαύρες γραμμές) και 50 Gb/s (κόκκινες γραμμές) DPSK/ASK σήμα συναρτήσεως του μήκους διάδοσης. 190

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1: Μη γραμμικοί συντελεστές για διάφορα είδη ινών	103
Πίνακας 4-2: Παράμετροι για τις πηγές laser	129
Πίνακας 4-3: Παράμετροι μη γραμμικών ινών.....	129
Πίνακας 5-1: Παράμετροι laser	146
Πίνακας 6-1: Χαρακτηριστικά των 100 Gb/s σχημάτων διαμόρφωσης.....	180

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν στο τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και πιο συγκεκριμένα στο εργαστήριο οπτικών επικοινωνιών του συγκεκριμένου τμήματος, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Δημήτριου Συβρίδη.

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

1. Εισαγωγή

Ζούμε στην εποχή της ραγδαίας τεχνολογικής ανάπτυξης, όπου η καθημερινότητά μας και η παραγωγικότητάς μας στηρίζονται εξ' ολοκλήρου σε ένα μεγάλο αριθμό έξυπνων συσκευών. Κινητά, υπολογιστές, τηλεοράσεις, γυαλιά όλα συνδεδεμένα μεταξύ τους ανταλλάσσουν πληροφορίες με το διαδίκτυο προσφέροντας γρήγορη, εύκολη και μεγάλου όγκου πληροφόρηση ανά πάσα στιγμή οπουδήποτε και αν βρισκόμαστε. Η όλο και αυξανόμενη εξάρτησή μας από τις παντός είδους υπηρεσίες που οι συσκευές αυτές παρέχουν, όπως για παράδειγμα η τηλεδιάσκεψη, τα διαδικτυακά παιχνίδια, οι διαδικτυακές αγορές και συναλλαγές, η γρήγορη ενημέρωση και πολλές άλλες, καθώς επίσης και η ολοένα αυξανόμενη διείσδυση των τεχνολογιών αυτών στα νοικοκυριά οδηγούν στην ανάγκη αύξησης των ρυθμών δεδομένων που διαδίδονται μέσα από το δίκτυο οπτικών ινών το οποίο αποτελεί τον τηλεπικοινωνιακό κορμό που διασυνδέει χρήστες, κράτη και χώρες μεταξύ τους.

Ο τηλεπικοινωνιακός δίαυλος που ονομάζεται οπτική ίνα, από την εφεύρεσή της, τη δεκαετία του 1970, μέχρι και σήμερα αποτελεί το ιδανικότερο μέσο μετάδοσης πληροφορίας αφού μπορεί να υποστηρίξει ένα τεράστιο όγκο δεδομένων, ο οποίος φθάνει σε ρυθμό μέχρι και τα 50 Tb/s, ενώ λόγω των χαμηλών απωλειών (0.2 dB/km) που παρουσιάζει, επιτρέπει στα δεδομένα να διαδίδονται σε οπτικές ζεύξεις χιλιάδων χιλιομέτρων με μικρές απαιτήσεις σε ενίσχυση και αναγέννηση συγκριτικά με τα υπόλοιπα τηλεπικοινωνιακά μέσα όπως είναι ο χαλκός και ο αέρας (ασύρματη μετάδοση).

Η εκμετάλλευση του πραγματικά τεράστιου εύρους ζώνης που παρέχει η οπτική ίνα ωστόσο δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση. Ένας μεγάλος αριθμός τεχνολογικών καινοτομιών χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες ώστε να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός συνδυασμός μήκους διάδοσης και ρυθμού δεδομένων με προοπτικές εξέλιξης. Χαρακτηριστικές παράμετροι της ίνας όπως η χρωματική διασπορά, η διασπορά πόλωσης, οι μη γραμμικότητες και οι απώλειες, τις οποίες θα μελετήσουμε διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο, καθώς επίσης και τεχνολογικοί περιορισμοί όπως η ταχύτητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, οι επιδόσεις των πομπών (πηγές laser) καθώς επίσης και η απόδοση των δεκτών οδηγούν σε περιορισμό του μέγιστου ρυθμού αλλά και του μέγιστου μήκους διάδοσης των οπτικών σημάτων.

Η γνώση όμως που προέκυψε μέσα από την μελέτη και τον πειραματισμό, οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών όπως η αμιγώς οπτική ενίσχυση και η αύξηση του ωφέλιμου εύρους ζώνης μέσω της πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (wavelength division multiplexing, WDM), οι οποίες "εκτόξευσαν" τον ρυθμό δεδομένων και το μήκος διάδοσης, τα οποία περιορίζονταν από τις υπάρχουσες, μέχρι το 1990, τεχνολογίες. Παράλληλα η ραγδαία αυξανόμενη ταχύτητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων επέτρεψε την αύξηση του ρυθμού δεδομένων ανά κανάλι, ενώ νέα σχήματα διαμόρφωσης βελτίωσαν περαιτέρω τη φασματική απόδοση των καναλιών ωθώντας τη συνολική χωρητικότητα των οπτικών μεταδόσεων σε υψηλότερα επίπεδα.

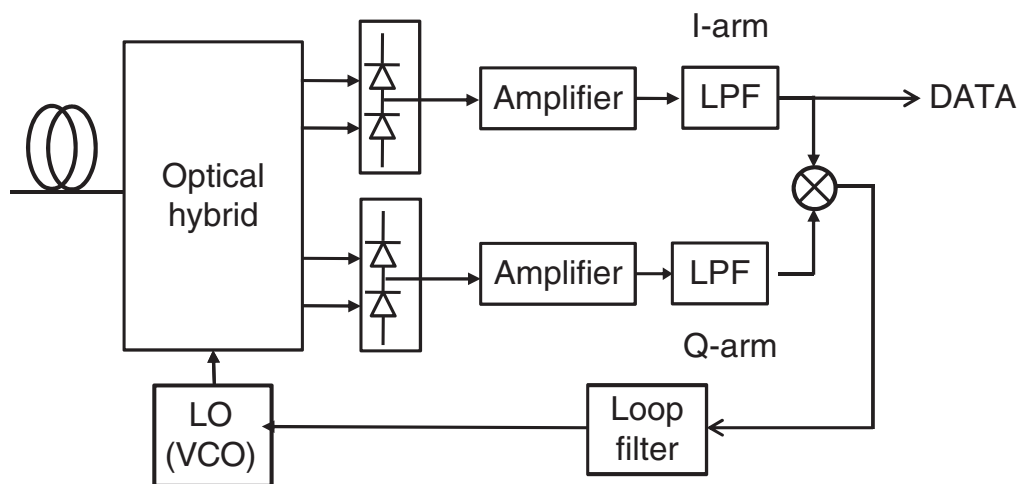
Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιάσουμε μία σύντομη ιστορική αναδρομή της πορείας των οπτικών επικοινωνιών προσεγγίζοντάς αυτές από τη σκοπιά των συστημάτων διαμόρφωσης και λήψης, θα αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος, και θα παραθέσουμε τα κίνητρα που οδήγησαν στην υλοποίηση αυτής τη διατριβής καθώς επίσης και τη συμβολή της στους τομείς της σύμφωνης λήψης, των φασματικά αποδοτικών σχημάτων διαμόρφωσης και της αμιγώς οπτικής αναγέννησης σήματος.

1.1 Ιστορική αναδρομή στις σύμφωνες οπτικές επικοινωνίες

Τα πρώτα συστήματα οπτικής μετάδοσης, που υλοποιήθηκαν στις αρχές του 1970, χρησιμοποιούσαν ημιαγωγικά laser (light amplification by stimulated emission of radiation), τα οποία διαμορφώνονταν άμεσα κατά πλάτος (intensity modulation, IM), μέσω του ρεύματος τροφοδοσίας, φέροντας την πληροφορία στην ένταση του οπτικού τους πεδίου. Η πληροφορία αυτή ανακτώταν άμεσα στον δέκτη μέσω μιας φωτοδιόδου, η οποία μετέτρεπε την οπτική ισχύ σε ηλεκτρικό ρεύμα (direct detection, DD). Αυτό το σύστημα μετάδοσης καθιερώθηκε ως IMDD και απετέλεσε τη ραχοκοκαλιά των οπτικών ζεύξεων από την έναρξή τους μέχρι και σήμερα. Το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται από την απλότητα και το χαμηλό κόστος υλοποίησης, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει ανεξαρτησία των επιδόσεων του δέκτη από τη φάση και την πολωτική κατάσταση (state of polarization, SOP) του λαμβανόμενου σήματος. Η τελευταία αυτή ιδιότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική αν κανείς λάβει υπ' όψιν του τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται οι προαναφερθείσες παράμετροι κατά τη διάδοση ενός σήματος σε μία οπτική ίνα.

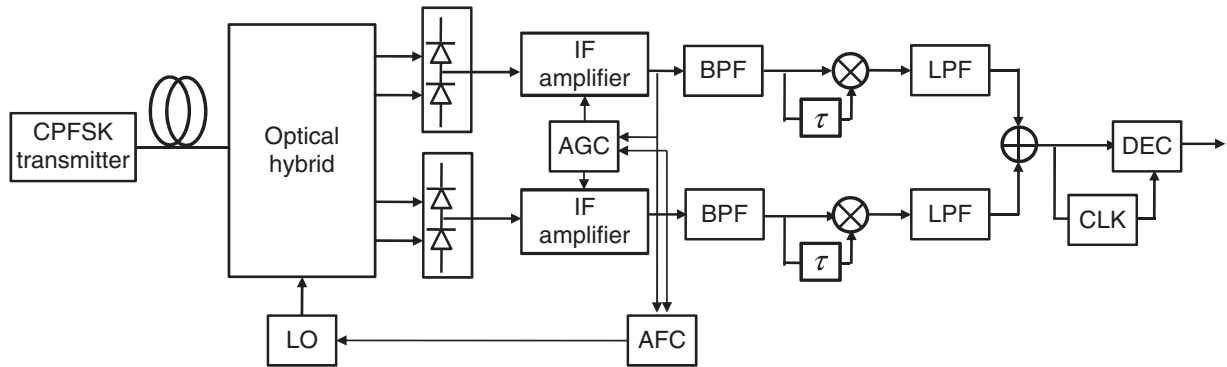
Παράλληλα με το IMDD αναπτύχθηκαν και τα σύμφωνα συστήματα εκπομπής και λήψης, τα οποία αρχικά στηρίζονταν στη διαμόρφωση της συχνότητας του οπτικού φέροντος και αργότερα της φάσης του. Η λήψη ενός τέτοιου σήματος απαιτούσε τη χρήση ενός τοπικού ταλαντωτή στον δέκτη, ο οποίος λειτουργούσε είτε στην ίδια (ομόδυνη φώραση) (σχ. 1-1) είτε σε διαφορετική (ετερόδυνη φώραση) (σχ. 1-2) συχνότητα από αυτήν του λαμβανόμενου σήματος. Για την ανάκτηση της πληροφορίας, το λαμβανόμενο σήμα και ο τοπικός ταλαντωτής (local oscillator, LO) θα πρέπει να μην υπόκεινται σε μεγάλες διαφορές φάσης, με άλλα λόγια θα πρέπει να βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία στη φάση και στην πόλωση. Στην τελευταία αυτή απαίτηση οφείλεται και ο χαρακτηρισμός των συγκεκριμένων δεκτών ως «σύμφωνων».

Η εξάρτηση αυτή των σύμφωνων δεκτών από τη φάση αλλά και την SOP του λαμβανόμενου σήματος περιέπλεκε την υλοποίηση του δέκτη. Έτσι, το πρώτο σύστημα σύμφωνης εκπομπής με ετερόδυνη λήψη, το οποίο προτάθηκε από τον DeLange στις αρχές του 1970 [1], δεν κατάφερε να προσελκύσει την απαιτούμενη προσοχή αφού το IMDD σύστημα μετάδοσης είχε αρχίσει να εδραιώνεται στις οπτικές επικοινωνίες της εποχής λόγω της απλότητας στην υλοποίηση και των ικανοποιητικών του επιδόσεων.



Σχήμα 1-1: Απεικόνιση ενός τυπικού ομόδυνου δέκτη για την αποδιαμόρφωση PSK σήματος.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 1-2: Απεικόνιση ενός τυπικού ετερόδυνου δέκτη για την αποδιαμόρφωση FSK σήματος.

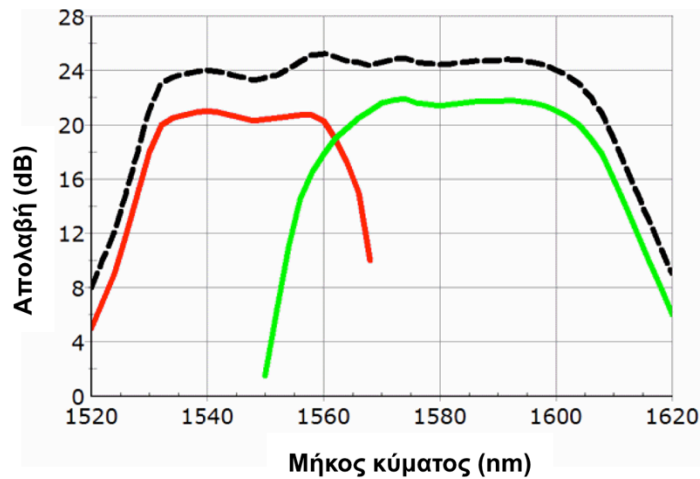
Παρόλα αυτά η έρευνα πάνω στη συγκεκριμένη περιοχή συνεχίστηκε. Με την ανάπτυξη της τεχνικής του διαφορισμού πόλωσης [2], η οποία χρησιμοποιεί δύο κάθετα πολωμένους τοπικούς ταλαντωτές, και με την εκ των υστέρων επεξεργασία του αποδιαμορφωμένου σήματος, επιτυγχάνεται η ανεξαρτησία του δέκτη από την SOP του λαμβανόμενου σήματος. Επίσης, η κατασκευή ημιαγωγικών laser με στενό εύρος γραμμής (linewidth), το οποίο οδηγούσε σε συμπίεση του θορύβου φάσης, και η ανάπτυξη τεχνικών ακριβέστερης σταθεροποίησης της συχνότητας εκπομπής οδήγησε σε απλούστευση των σύμφωνων δεκτών και αύξηση των επιδόσεών τους.

Μετά τις αρχές του 1980, άρχισε να χρησιμοποιείται εκτενώς και η διαμόρφωση φάσης (phase-shift keying, PSK), η οποία προσέφερε αυξημένη ευαισθησία του σύμφωνου δέκτη κατά 6 dB συγκριτικά με τον δέκτη άμεσης φώρασης. Το αποτέλεσμα αυτό βασιζόταν στο γεγονός ότι τα σύμβολα του PSK σήματος απείχαν διπλάσια απόσταση μεταξύ τους από ό,τι απείχαν τα σύμβολα ενός διαμορφωμένου κατά πλάτος σήματος. Η αύξηση της ευαισθησίας του δέκτη που παρείχαν τα σύμφωνα συστήματα, ουσιαστικά προσέφερε αύξηση του μήκους διάδοσης χωρίς την απαίτηση ενδιάμεσων σταδίων ενίσχυσης.

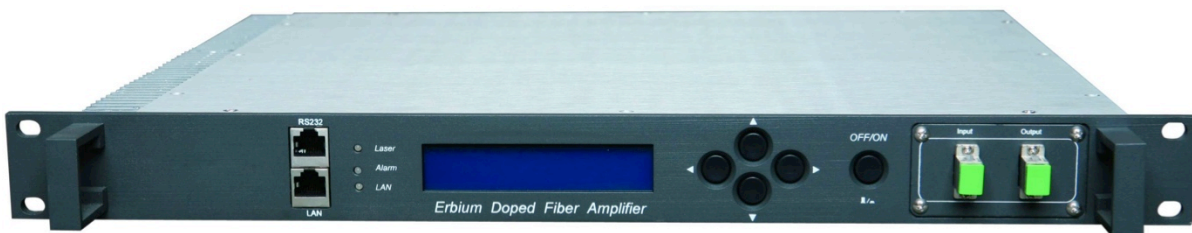
Επιπροσθέτως, η ανάπτυξη τεχνικών ανάκτησης της φάσης του φέροντος των PSK σημάτων [3] σε συνδυασμό με την βελτιστοποίηση της σταθερότητας των βρόχων οπτικής εγκλειδωσης φάσης (optical phase locked loop, OPPLL), επέτρεψε την υλοποίηση ομόδυνων δεκτών αυξημένων επιδόσεων. Παράδειγμα ενός τυπικού ομόδυνου δέκτη για τη σύμφωνη αποδιαμόρφωση PSK σημάτων απεικονίζεται στο σχήμα 1-1.

Και ενώ η μελέτη και ανάπτυξη των σύμφωνων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών έδειχνε να κερδίζει έδαφος, στις αρχές του 1990 υλοποιείται ο πρώτος οπτικός ενισχυτής με ίνα ερβίου (erbium doped fiber amplifier, EDFA) ο οποίος φέρνει επανάσταση στις οπικές επικοινωνίες και αλλάζει το τηλεπικοινωνιακό τοπίο μια για πάντα. Ο EDFA προσέφερε αμιγώς οπτική ενίσχυση σε ένα ευρύ φάσμα οπτικών συχνοτήτων, το οποίο κάλυπτε όλη τη C-μπάντα (1530nm - 1565 nm) και την L-μπάντα (1565 nm - 1625 nm) χαμηλών απωλειών της οπτικής ίνας (σχ. 1-3α), ενώ παράλληλα παρείχε υψηλή απολαβή, η οποία έφθανε έως και τα 60 dB [4], και χαμηλή εικόνα θορύβου, η οποία περιοριζόταν από το κβαντικό όριο των 3 dB [5]. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας ήταν η αναισθησία, την οποία παρουσίαζαν οι συγκεκριμένοι ενισχυτές, στη φάση και στην πόλωση του εισαγόμενου σε αυτούς σήματος.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



(α)



(β)

Σχήμα 1-3: Καμπύλη απολαβής ενός τυπικού EDFA συναρτήσει του μήκους κύματος (α) και πακετάρισμα ενός εμπορικά διαθέσιμου τέτοιου ενισχυτή (β).

Επιπλέον, η ευαισθησία των δεκτών δεν περιοριζόταν πια από τον θόρυβο βολής (shot-noise) του λαμβανόμενου σήματος αλλά από τον συσσωρευμένο ενισχυμένο θόρυβο αυθόρμητης εκπομπής (amplified spontaneous emission, ASE) που αποκτούσε το σήμα ύστερα από τα επάλληλα στάδια ενίσχυσης μέσω των EDFA.

Από την άλλη βέβαια, ο σύμφωνος δέκτης δεν προσέφερε μόνο αυξημένη ευαισθησία αλλά διέθετε και έναν αριθμό επιπρόσθετων πλεονεκτημάτων, τα οποία τον έκαναν ιδιαίτερος ελκυστικό. Για παράδειγμα μπορούσε να διαχειριστεί σήματα τα οποία έφεραν πολυ-επίπεδες διαμορφώσεις φάσης (QPSK, quadrature phase shift keying), ενώ προσέφερε τη δυνατότητα αντιστάθμισης της χρωματικής διασποράς και της διασποράς πώλωσης μέσω της εκ των υστέρων επεξεργασίας του αποδιαμορφωμένου σήματος. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα αυτά δεν αποτελούσαν τόσο σημαντικές απαιτήσεις για τα οπτικά δίκτυα στις αρχές του 1990, ενώ ταυτόχρονα αύξαναν σημαντικά το κόστος υλοποίησης. Παράλληλα υπήρχαν κάποιες τεχνικές δυσκολίες, όπως η αυξημένης πολυπλοκότητας τεχνική σταθερής εγκλείδωσης φάσης του φέροντος στους ομόδυνους δέκτες και η απαίτηση η ενδιάμεση συχνότητα (intermediate frequency, IF), του ταλαντωτή στον ετερόδυνο δέκτη, να είναι υψηλότερη του ρυθμού δεδομένων, οι οποίες δεν είχαν βρεί λύση μέχρι τις αρχές του '90.

Όλα τα παραπάνω συναίνεσαν στη διακοπή της περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης των σύμφωνων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών για περίπου 10 χρόνια. Επιπροσθέτως, τα IMDD συστήματα, τα οποία στηρίζονταν στην αναγέννηση μέσω EDFA επωφελήθηκαν από την τεχνική της πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM), η οποία αύξησε δραματικά τη χωρητικότητα των οπτικών μεταδόσεων. Η χαμηλής πολυπλοκότητας και χαμηλού κόστους υλοποίηση των WDM δικτύων σε συνδυασμό με την αμιγώς οπτική ενίσχυση που προσέφεραν οι EDFA σε όλα τα WDM κανάλια ταυτόχρονα, εδραίωσε την χρήση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής, αυξάνοντας

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

ραγδαία τη συνολική χωρητικότητα των οπτικών μεταδόσεων σε ρυθμούς που έφθαναν έως και 1000 φορές τους μέχρι τότε εφικτούς.

Η συνεχώς αυξανόμενη όμως απαίτηση για όλο και υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, λόγω της ραγδαίας αύξησης των διαδικτυακών υπηρεσιών αλλά και των ενεργών χρηστών την τελευταία δεκαετία, οδηγεί σε μία τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τα σύμφωνα συστήματα επικοινωνιών. Η ανάπτυξη νέων σχημάτων διαμόρφωσης, όπως το PM-QPSK (QPSK με πολυπλεξία πόλωσης, polarization multiplexing-QPSK) το οποίο αυτή τη στιγμή αποτελεί την επικρατέστερη διαμόρφωση για κανάλια 100 Gb/s στα δίκτυα μεγάλης έκτασης (wide area networks, WAN), η ανάπτυξη νέων τεχνικών αποδιαμόρφωσης σημάτων φάσης όπως η διαφορική λήψη με χρήση συμβολομέτρου καθυστέρησης για την αποδιαμόρφωση του διαφορικού PSK (differential PSK), η αύξηση της ταχύτητας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, η οποία πλέον αγγίζει τα 40 Gb/s, αλλά και η χρήση τεχνικών αμιγώς οπτικής επεξεργασίας σήματος, όπως η οπτική ενίσχυση και αναγέννηση, έχουν ως αποτέλεσμα την απλούστευση των συστημάτων σύμφωνα λήψης επιτρέποντας την χαμηλού κόστους και αυξημένων επιδόσεων υλοποίησή τους.

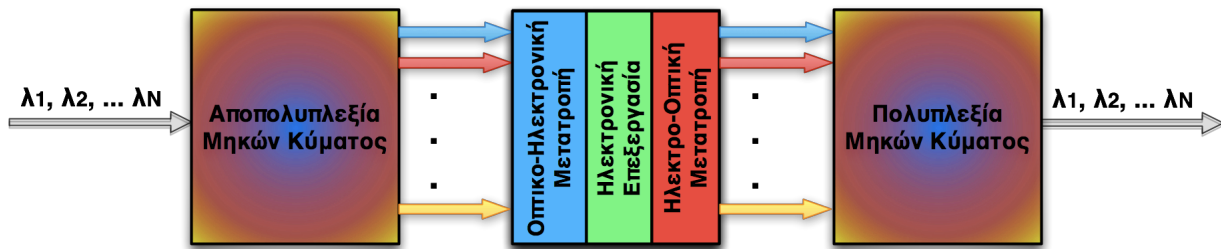
Στην παράγραφο που ακολουθεί θα παρουσιάσουμε μία σύντομη περιγραφή των μεθόδων αμιγώς οπτικής επεξεργασίας σήματος και θα αναφέρουμε τους τρόπους με τους οποίους αυτές συμβάλλουν στην αύξηση του ρυθμού δεδομένων και στη βελτίωση των σύμφωνα συστημάτων λήψης.

1.2 Αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος

Η αντιμετώπιση της οπτικής εξασθένησης στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς στηριζόταν στην περιοδική αναγέννηση του σήματος. Οι πρώτοι εμπορικά διαθέσιμοι επαναλήπτες βασίζονταν στην οπτική/ηλεκτρική/οπτική μετατροπή του σήματος (optical/electrical /optical conversion, OEO) πραγματοποιώντας την αναγέννηση στο ηλεκτρικό επίπεδο. Η διαδικασία αυτή περιελάμβανε τη μετατροπή του ενθόρυβου σήματος σε ηλεκτρικό μέσω μιας φωτοδιόδου, την ψηφιοποίησή του και την αφαίρεση του θορύβου με ηλεκτρονική επεξεργασία και τέλος τη διαμόρφωση ενός καινούριου καθαρού οπτικού φέροντος, το οποίο παραγόταν τοπικά, με την ανεκτημένη πληροφορία (σχ.Σχήμα 1-4). Όπως είναι κατανοητό, τα στάδια της OEO μετατροπής του σήματος είχαν ως αποτέλεσμα να περιορίζεται ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων, λόγω της περιορισμένης ταχύτητας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, και να αυξάνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους και των ενεργειακών απαιτήσεων. Ωστόσο, οι OEO επαναλήπτες αποτελούσαν τη μοναδική λύση η οποία παρόλα τα μειονεκτήματά της προσέφερε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Με την έλευση των οπτικών ενισχυτών EDFA, οι OEO επαναλήπτες αντικαταστάθηκαν από την αμιγώς οπτική ενίσχυση στο μεγαλύτερο μέρος του δικτύου. Ωστόσο, η συσσώρευση του θορύβου ASE σε συνδυασμό με τη μη γραμμικότητα της ίνας οδηγούσε σε επιπλέον υποβάθμιση του σήματος περιορίζοντας έτσι τον μέγιστο αριθμό επάλληλων σταδίων οπτικής ενίσχυσης που επιτρεπόταν να χρησιμοποιηθεί. Έτσι, οι OEO επαναλήπτες συνέχισαν να υφίστανται σε συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου, όπου η αυξημένη συσσώρευση πληροφορίας και η έντονη παραμόρφωση λόγω ASE απαιτούσαν την πλήρη αναγέννηση των αρχικών χαρακτηριστικών του οπτικού σήματος.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρου ρυθμών συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 1-4: Σχηματική απεικόνιση ενός ΟΕΟ επαναλήπτη σήματος σε WDM σύστημα.

Μέχρι και σήμερα, όλες οι βασικές διεργασίες, τις οποίες πραγματοποιούν οι κόμβοι των οπτικών δικτύων, όπως η μεταγωγή πακέτου, η δρομολόγηση και η μετατροπή μήκους κύματος, πραγματοποιούνται από οπτικές διατάξεις οι οποίες βασίζονται στην ΟΕΟ μετατροπή. Βέβαια η ραγδαία αύξηση των απαιτούμενων ρυθμών δεδομένων οδηγεί αναπόφευκτα σε μία τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση των δικτύων με τη δομή που αυτή τη στιγμή έχουν. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου αδιεξόδου, από τις αρχές του 1990 μέχρι και σήμερα, ιδιαίτερη προσπάθεια έχει δοθεί στην έρευνα και ανάπτυξη τεχνικών για την αμιγώς οπτική επεξεργασία των διαδιδόμενων σημάτων.

Οι τεχνικές που μέχρι στιγμής έχουν προταθεί βασίζονται κυρίως σε μη γραμμικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις οπτικές ίνες και οι οποίες οφείλονται στο φαινόμενο Kerr, δηλαδή στη μη γραμμική εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ισχύ του οπτικού σήματος. Φαινόμενα όπως η ετεροδιαμόρφωση απολαβής (cross gain modulation, XGM), η ετεροδιαμόρφωση και η ιδιοδιαμόρφωση φάσης (cross and self-phase modulation, XPM, SPM) και η μίξη τεσσάρων κυμάτων (four wave mixing, FWM), τα οποία ήταν γνωστά από τα τέλη της δεκαετίας του 1960, αποτελούν τις βασικές μη γραμμικές διαδικασίες στις οποίες έχει στηριχτεί ένας μεγάλος αριθμός αμιγώς οπτικών διατάξεων που έχουν προταθεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Στην παράγραφο αυτή δεν θα επεκταθούμε περαιτέρω στα φαινόμενα αυτά καθώς αποτελούν αντικείμενο μελέτης του κεφαλαίου 4, ωστόσο θα αναφέρουμε κάποιες διατάξεις αντιπροσωπευτικές για τις βασικές διαδικασίες που πραγματοποιούνται στους κόμβους, ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μία γενική εικόνα της πραγματικότητας των σύγχρονων οπτικών δικτύων και των διαθέσιμων οπτικών διατάξεων.

Έτσι λοιπόν, το 1991 οι Nayar et al. [6] παρουσιάζουν τον πρώτο οπτικό μεταγωγέα ο οποίος βασίζεται στο φαινόμενο SPM. Οι Lee et al. το 2005 καταφέρνουν να πραγματοποιήσουν αμιγώς οπτική ανάκτηση ρολογιού και αποπολυπλεξία ενός σήματος ρυθμού 80 Gb/s πολυπλεγμένου χρονικά (optical time division multiplexing, OTDM) χρησιμοποιώντας το φαινόμενο XPM σε μία ισχυρά μη γραμμική ίνα μήκους 1 m [7]. Οι Lee et al. το 2005 καταφέρνουν να πραγματοποιήσουν αμιγώς οπτική μετατροπή σχήματος διαμόρφωσης, από RZ-OOK σε NRZ-OOK, χρησιμοποιώντας στενό φίλτράρισμα σε συνδυασμό με το φαινόμενο XPM [8]. Τέλος, με τη χρήση του φαινομένου FWM σε μη γραμμική ίνα μήκους 1 km, οι Yu et al. κατάφεραν το 2001 να πραγματοποιήσουν μετατροπή μήκους κύματος για σήμα 80 Gb/s [9]. Αυτά είναι κάποια παραδείγματα από ένα μεγάλο αριθμό εργασιών που έχουν δημοσιευθεί και τα οποία παρουσιάζουν αξιοσημείωτες επιδόσεις.

Εδώ πρέπει να προσθέσουμε, ότι ένας σημαντικός αντίπαλος των EDFA, ο οποίος προέκυψε μέσα από τη μελέτη των παραπάνω μη γραμμικών φαινομένων και συγκέντρωσε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας τα τελευταία χρόνια είναι ο οπτικός παραμετρικός ενισχυτής (fiber optic parametric amplifier, FOPA). Η συγκεκριμένη οπτική διάταξη, η οποία βασίζεται στο φαινόμενο FWM σε μη γραμμικά υλικά, προσφέρει γινόμενο απολαβής-εύρους ζώνης το οποίο ξεπερνάει κατά πολύ το αντίστοιχο ενός EDFA. Πειραματικές μετρήσεις έχουν αποδείξει ότι η απολαβή ενός

τέτοιου ενισχυτή μπορεί να φθάσει έως και τα 70 dB [10], ενώ με κατάλληλο σχεδιασμό το εύρος ζώνης του μπορεί να φθάσει έως και την αξιοσημείωτη τιμή των 300 nm [11]. Επίσης, ρυθμίζοντας την ισχύ και τη θέση του κύματος ή των κυμάτων άντλησης του FOPA μπορούμε να μετατοπίσουμε την περιοχή ενίσχυσης ώστε να καλύψει περιοχές που είναι αδύνατο να καλυφθούν από τον EDFA [12]. Επίσης, η σιγμοειδής καμπύλη απολαβής που παρουσιάζει ο κορεσμένος FOPA καθώς επίσης και η ταχύτατη απόκρισή του τον καθιστούν άξιο αντικαταστάτη των ΟΕΟ αναγεννητών σημάτων διαμορφωμένων κατά πλάτος [13].

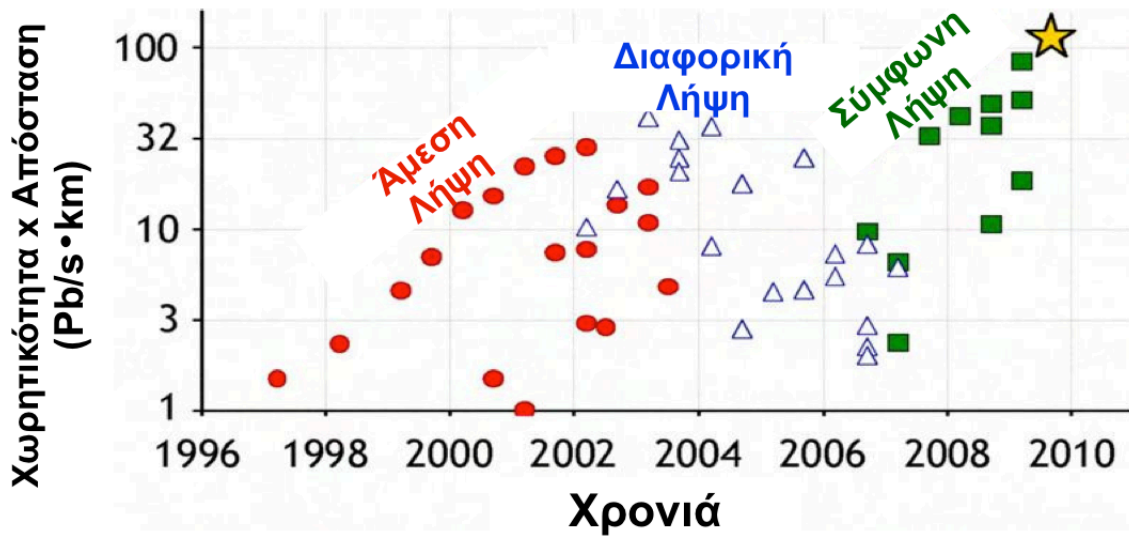
Μία πολύ σημαντική ιδιότητα που διαθέτουν οι FOPA και η οποία έχει συγκεντρώσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, είναι η ικανότητα συμπίεσης του θορύβου φάσης του λαμβανόμενου σήματος. Με κατάλληλο συνδυασμό των φασικών χαρακτηριστικών των κυμάτων που αλληλεπιδρούν στο εσωτερικό ενός παραμετρικού ενισχυτή, μέσω της ευαισθησίας στη φάση που αυτός παρουσιάζει οδηγεί στην κβάντιση της φάσης του εισερχόμενου σήματος σε δύο ή σε τέσσερις στάθμες [14], [15]. Η συγκεκριμένη ιδιότητα των παραμετρικών ενισχυτών αποτελεί βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής και θα διερευνηθεί ενδελεχώς στο κεφάλαιο 4. Χάρη σε αυτή την ιδιότητα, οι ευαίσθητοι στη φάση παραμετρικοί ενισχυτές (phase sensitive, PS-FOPA) παρέχουν αναγέννηση φάσης σε PSK και QPSK σήματα επιτρέποντας έτσι τη χρήση τους για την βελτίωση των επιδόσεων των σύμφωνων οπτικών συστημάτων.

Παρά τις σημαντικές καινοτομίες που έχουν προταθεί στον τομέα της αμιγώς οπτικής επεξεργασίας, η τεχνολογία αυτή διαθέτει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Οι οπτικές διατάξεις που μέχρι στιγμής έχουν προταθεί μπορούν να διαχειριστούν ένα μόνο κανάλι κάθε φορά και όχι όλο το φάσμα μιας WDM μετάδοσης ταυτόχρονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στην περίπτωση των διαμορφώσεων του 1 bit/σύμβολο, όπως για παράδειγμα στην OOK (on-off keying) και την PSK, οι αμιγώς οπτικές αρχιτεκτονικές πολυ-κάναλης επεξεργασίας να μην παρουσιάζουν σημαντικά τεχνο-οικονομικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις αντίστοιχες ΟΕΟ υλοποιήσεις, αφού οι τελευταίες είναι λιγότερο πολύπλοκες και ενεργειακά αποδοτικότερες. Ωστόσο στην περίπτωση των πολυ-επίπεδων διαμορφώσεων, όπως για παράδειγμα ενός QPSK σήματος, η πολυπλοκότητα ενός ΟΕΟ αναγεννητή αυξάνεται εκθετικά και ανάλογα αυξάνεται η ενεργειακή του κατανάλωση, καθιστώντας την αμιγώς οπτική αναγέννηση προτιμότερη λύση.

Από την παραπάνω σύντομη περιγραφή των μέχρι στιγμής διαθέσιμων και προτεινόμενων διατάξεων αμιγώς οπτικής επεξεργασίας σήματος, συμπεραίνουμε ότι δύο είναι οι βασικές κατευθυντήριες γραμμές προς τις οποίες δρομολογείται η έρευνα και ανάπτυξη σε αυτό τον τομέα. Από τη μία μεριά θα πρέπει να σχεδιαστούν διατάξεις οι οποίες θα υποστηρίζουν πολυ-κάναλη επεξεργασία διατηρώντας απλουστευμένη υλοποίηση ώστε να παρέχουν σημαντικά ανταγωνιστικότερες επιδόσεις συγκριτικά με τα ήδη εγκατεστημένα συστήματα ΟΕΟ για τη διαχείριση απλών διαμορφώσεων (OOK, PSK). Από την άλλη μεριά, θα πρέπει να σχεδιαστούν διατάξεις οι οποίες θα υποστηρίζουν πολυ-επίπεδες διαμορφώσεις (QPSK, 8-PSK) οι οποίες είτε από μόνες τους είτε σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές σύμφωνων δεκτών και αναγεννητών να προσφέρουν βελτιωμένες επιδόσεις.

1.3 Κίνητρο της διατριβής

Σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε παραπάνω, η εξέλιξη των επιδόσεων των οπτικών δικτύων τα τελευταία 20 χρόνια συνοψίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 1-5, στο οποίο απεικονίζεται το γινόμενο χωρητικότητας-μήκους διάδοσης συναρτήσει του χρόνου για τα τρία διαφορετικά συστήματα μετάδοσης [16].



Σχήμα 1-5: Εξέλιξη των επιδόσεων των οπτικών δικτύων με βάση το γινόμενο χωρητικότητας-μήκους διάδοσης συναρτήσει του χρόνου.

Όπως παρατηρούμε, η εδραίωση των οπτικών ενισχυτών EDFA στα μέσα της δεκαετίας του 1990 επέτρεψε τη διάδοση των ΟΟΚ σημάτων σε μεγαλύτερα μήκη, ενώ η σταδιακή αύξηση των μεταδιδόμενων WDM καναλιών σε συνδυασμό με την αύξηση του ανά κανάλι ρυθμού μετάδοσης, η οποία έφθασε τα 40 Gb/s το 2000, οδήγησε σε υψηλότερες χωρητικότητες και επομένως σε βελτίωση των συνολικών επιδόσεων. Ακολούθησε η ανάπτυξη των συστημάτων διαφορικής λήψης η οποία βελτίωσε την ευαισθησία των δεκτών και πολλαπλασίασε το μέγιστο μήκος διάδοσης. Σχετικά πρόσφατα, στα τέλη της δεκαετίας του 2000, αναζωπυρώθηκε το ενδιαφέρον για τις σύμφωνες οπτικές επικοινωνίες στα πλαίσια του οποίου νέα σχήματα διαμόρφωσης με υψηλότερη φασματική απόδοση αναπτύχθηκαν ενώ βελτιώθηκαν οι επιδόσεις και η απλότητα των δεκτών. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση των επιδόσεων των οπτικών ζεύξεων με ραγδαίο ρυθμό βελτίωσης. Οι επιδόσεις των σύμφωνων συστημάτων μέσα σε διάστημα λιγότερο από 5 χρόνια επέδειξαν επιδόσεις οι οποίες ξεπερνούν τις αντίστοιχες των προαναφερθέντων συστημάτων λήψης και όπως φαίνεται υπάρχει χώρος για περαιτέρω βελτίωση.

Λαμβάνοντας λοιπόν υπ' όψιν την παρούσα κατάσταση των οπτικών ζεύξεων από πλευράς αποστάσεων και ρυθμών, συμπεραίνουμε ότι το μέλλον των οπτικών επικοινωνιών έγκυται στη βελτίωση και την εμπορική εκμετάλλευση των σύμφωνων συστημάτων λήψης. Για το σκοπό αυτό, η μελέτη και η ανάπτυξη των συστημάτων αυτών θα πρέπει να δρομολογηθεί με βάση τρεις κατευθυντήριες γραμμές: τη χωρητικότητα, το μήκος διάδοσης και το κόστος. Από τη μία λοιπόν θα πρέπει να σχεδιασθούν νέα σχήματα διαμόρφωσης με αυξημένη φασματική απόδοση, τα οποία θα εκτινάξουν τη χωρητικότητα καναλιού οδηγώντας σε ρυθμούς της τάξεως των 100 Gb/s και των 400 Gb/s. Από την άλλη θα πρέπει να σχεδιασθούν νέα συστήματα αναγέννησης και λήψης τα οποία θα παρέχουν πλήρη ανάκτηση του υποβιβασμένου από θόρυβο οπτικού σήματος και υποστήριξη πολυ-κάναλης επεξεργασίας ενώ παράλληλα θα αυξάνουν την ευαισθησία των δεκτών οδηγώντας σε αύξηση του μήκους διάδοσης. Τέλος, ο παραπάνω σχεδιασμός θα πρέπει να γίνει με γνώμονα την απλότητα υλοποίησης, την ευκολία εγκατάστασης και βέβαια την ενεργειακή απόδοση, παράγοντες οι οποίοι θα μειώσουν το συνολικό κόστος και θα κάνουν ιδιαίτερα ανταγωνιστική την υιοθέτηση των νέων αυτών τεχνολογιών.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, πραγματοποιήθηκε μία μελέτη ως προς τον σχεδιασμό αμιγώς οπτικών συστημάτων επεξεργασίας σήματος για την ανάκτηση και αποδιαμόρφωση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση, με γνώμονα την πρακτική υλοποίησή τους ώστε να αποτελέσουν αποδοτικές λύσεις για την αναβάθμιση των οπτικών δικτύων. Για το σκοπό αυτό διερευνήθηκαν, μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων, οι επιδόσεις και τα χαρακτηριστικά των ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών και προτάθηκε μία νέα τοπολογία η οποία προσφέρει αναγέννηση RZ-DPSK σημάτων. Επίσης, μελετήθηκε διεξοδικά, μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και πειραματικών μετρήσεων, η μέθοδος της οπτικής εγκλειδωσης φάσης στα ημιαγωγικά laser. Η μελέτη αυτή οδήγησε σε έναν αριθμό εφαρμογών, οι οποίες επωφελοούνται της ιδιότητας συμπίεσης θορύβου πλάτους που η εγκλειδωση φάσης προσφέρει. Έτσι, προτάθηκε και αξιολογήθηκε η χρήση των ημιαγωγικών laser ως αμιγώς οπτικών αναγεννητών (D)PSK και (D)QPSK σημάτων και ως επιπρόσθετη μονάδα στον δέκτη για την αποδιαμόρφωση του πολυ-επίπεδου σχήματος διπλής ορθογωνίας διαμόρφωσης DPSK/ASK.

Στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζεται μία σύντομη περιγραφή της δομής της διδακτορικής αυτής διατριβής ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μία γενικότερη εικόνα των θεμάτων που θα μελετηθούν.

1.4 Δομή διδακτορικής διατριβής

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα παρουσιασθεί μία αναλυτική περιγραφή των βασικών παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα ενός οπτικού σήματος κατά τη διάδοσή του στην οπτική ίνα. Θα ασχοληθούμε λοιπόν με τις απώλειες, τη διασπορά και τη μη γραμμικότητα, τις οποίες θα μελετήσουμε εις βάθος και θα αναφέρουμε τους τρόπους αντιμετώπισης των επιπτώσεων που αυτές επιφέρουν στο σήμα. Επίσης, θα αναφερθούμε στα φαινόμενα της σκέδασης Raman, της σκέδασης Brillouin, της ιδιοδιαμόρφωσης και ετεροδιαμόρφωσης φάσης (SPM και XPM) και στη μίξη τεσσάρων κυμάτων (FWM), τα οποία λαμβάνουν χώρα στην οπτική ίνα και οφείλονται στην επίδραση της μη γραμμικότητας. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζεται και αναλύεται η μη γραμμική εξίσωση Schrödinger βάσει της οποίας μοντελοποιείται η διάδοση σήματος στην ίνα. Το μοντέλο αυτό είναι ιδιαίτερος σημαντικό καθώς χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα βασικά σήματα της δυαδικής διαμόρφωσης πλάτους (amplitude shift keying, ASK) και φάσης (PSK) και της ορθογωνικής διαμόρφωσης φάσης (QPSK) περιγράφοντας την αρχιτεκτονική του πομπού και του δέκτη και αναφέροντας τα κυριότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματά τους ως προς την πολυπλοκότητα υλοποίησης, τη φασματική απόδοση και την ανθεκτικότητά τους κατά τη διάδοση. Επίσης, για να ολοκληρωθεί το τοπίο των πομποδεκτών, οι οποίοι έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες οπτικές επικοινωνίες, θα παρουσιαστούν οι αρχιτεκτονικές των δεκτών διαφορικής λήψης για την αποδιαμόρφωση των DPSK και DQPSK σημάτων. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου θα επισημάνουμε τη συμβολή της αμιγώς οπτικής επεξεργασίας σήματος για τη βελτίωση των συγκεκριμένων δεκτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα παρουσιασθεί μια εκτενής μελέτη των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων των παραμετρικών ενισχυτών. Ξεκινώντας από μία θεωρητική και αριθμητική διερεύνηση των μη ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών (PIA) θα παρουσιασθεί η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος αυτού δίνοντας στον αναγνώστη το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο ώστε να κατανοήσει τους φυσικούς μηχανισμούς αλλά και τις δυνατότητες που οι συγκεκριμένοι ενισχυτές προσφέρουν. Στη

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

συνέχεια μελετώνται εκτενώς με τη βοήθεια προσομοιώσεων τα χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις των ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών (PSA), πραγματοποιείται μια συγκριτική μελέτη της ικανότητας αναγέννησης μεταξύ των PSA και των PIA και προτείνεται μία πρωτότυπη τοπολογία για την αμιγώς οπτική αναγέννηση RZ-DPSK σημάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο θα παρουσιασθεί μια ενδελεχής μελέτη, μέσω προσομοιώσεων, των ιδιοτήτων συμπίεσης θορύβου πλάτους και ανάκτησης πληροφορίας φάσης που προσφέρει η μέθοδος της εγκλείδωσης φάσης με οπτική έγχυση ισχύος σε ένα ημιαγωγικό laser. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την εκμετάλλευση των προαναφερθέντων ιδιοτήτων για την χρήση των ημιαγωγικών laser ως φθηνών και ενεργειακά αποδοτικών οπτικών διατάξεων για την αμιγώς οπτική αναγέννηση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης προτείνεται η χρήση ενός εγκλειδωμένου μονότροπου laser για την αναγέννηση (D)PSK και (D)QPSK σημάτων, οι επιδόσεις της οποίας επαληθεύονται μέσω πειραματικής διερεύνησης. Με αντικατάσταση του μονότροπου laser από ένα Fabry-Pérot ο προτεινόμενος αναγεννητής αποκτά την επιπρόσθετη ιδιότητα της διαφάνειας ως προς το μήκος κύματος των προς επεξεργασία σημάτων. Για την υλοποίηση του μοντέλου των δύο laser και της διαδικασίας της οπτικής έγχυσης χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις ροής του Petermann [17], οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο αυτό.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία πρωτότυπη υλοποίηση ενός δέκτη για την αποδιαμόρφωση DPSK/ASK σημάτων, η οποία βασίζεται στην εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των εγκλειδωμένων ημιαγωγικών laser που μελετήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η αξιολόγηση των επιδόσεων του προτεινόμενου δέκτη πραγματοποιείται μέσω της πειραματικής διερεύνησης της υλοποίησης, ενώ μέσα από έναν αριθμό προσομοιώσεων μελετώνται ενδελεχώς οι δυνατότητες του δέκτη ως προς τον μέγιστο ρυθμό που αυτός μπορεί να υποστηρίξει αλλά και τη μέγιστη απόσταση μετάδοσης δεδομένων.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και σχολιάζονται εν συντομία οι μελλοντικές δραστηριότητες ως προς την αμιγώς οπτική αναγέννηση με την χρήση των μεθόδων που μελετήθηκαν.

2. Βασικά στοιχεία ενός συστήματος οπτικής διάδοσης

Η οπτική ίνα αποτελεί ένα ιδιαιτέρως ενδιαφέρον τηλεπικοινωνιακό μέσο αφού σε αντίθεση με τον χαλκό και τον ελεύθερο χώρο παρέχει διάδοση με χαμηλή εξασθένηση για ένα τεράστιο εύρος συχνοτήτων, της τάξεως των 40 THz, το οποίο φυσικά είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το διαθέσιμο εύρος ζώνης των υπολοίπων τηλεπικοινωνιακών μέσων. Το εύρος ζώνης αυτό είναι επαρκές ώστε να υποστηρίξει τη μετάδοση ενός αξιοθάυμαστα μεγάλου όγκου δεδομένων επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την υλοποίηση υπηρεσιών όπως βιντεοκλήσεις, μετάδοση βίντεο υψηλής ποιότητας (high definition), ανταλλαγή και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων στο διαδίκτυο (cloud storage). Η ιδιότητα των χαμηλών απωλειών επιτρέπει στα σήματα να διαδίδονται για μεγάλες αποστάσεις σε υψηλούς ρυθμούς, μειώνοντας τις απαιτήσεις για συχνή ενίσχυση ή αναγέννηση. Χάρη λοιπόν στις χαμηλές απώλειες και στο υψηλό εύρος ζώνης που υποστηρίζεται, τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών κυριαρχούν στις επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων που απαρτίζουν το δίκτυο κορμού.

Όσο το μήκος μιας οπτικής ζεύξης αυξάνεται και ο ρυθμός των μεταδιδόμενων δεδομένων μεγαλώνει, η διασπορά γίνεται ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας. Η διασπορά αντιστοιχεί στο φαινόμενο κατά το οποίο διαφορετικές συνιστώσες του σήματος ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες μέσα στο μέσο διάδοσης που στην περίπτωση μας είναι η οπτική ίνα. Οι συνιστώσες αυτές αναφέρονται και στα χωρικά (τρόποι διάδοσης) και στα φασματικά (φασματικές συνιστώσες) χαρακτηριστικά του σήματος διαχωρίζοντας έτσι τη διασπορά σε δύο επιμέρους τύπους: την χρωματική διασπορά και τη διασπορά τρόπων. Η επίδραση της διασποράς στις περισσότερες περιπτώσεις επιφέρει τη διαπλάτυνση των παλμών του σήματος και επομένως οι παλμοί που αντιστοιχούν στα διαδοχικά bits αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα την αλληλοεπικάλυψή τους, ένα φαινόμενο που ονομάζεται αλληλοπαρεμβολή συμβόλων (intersymbol interference, ISI). Πέρα από τη διασπορά, ένας εξίσου σημαντικός περιοριστικός παράγοντας είναι και η μη-γραμμικότητα η οποία άρχισε να γίνεται αισθητή όταν τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών εξελίχθηκαν χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο αριθμό μηκών κύματος, σε υψίρρυθμες διαμορφώσεις για μεγάλες αποστάσεις. Όπως θα δούμε παρακάτω υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ της διασποράς και της μη-γραμμικότητας.

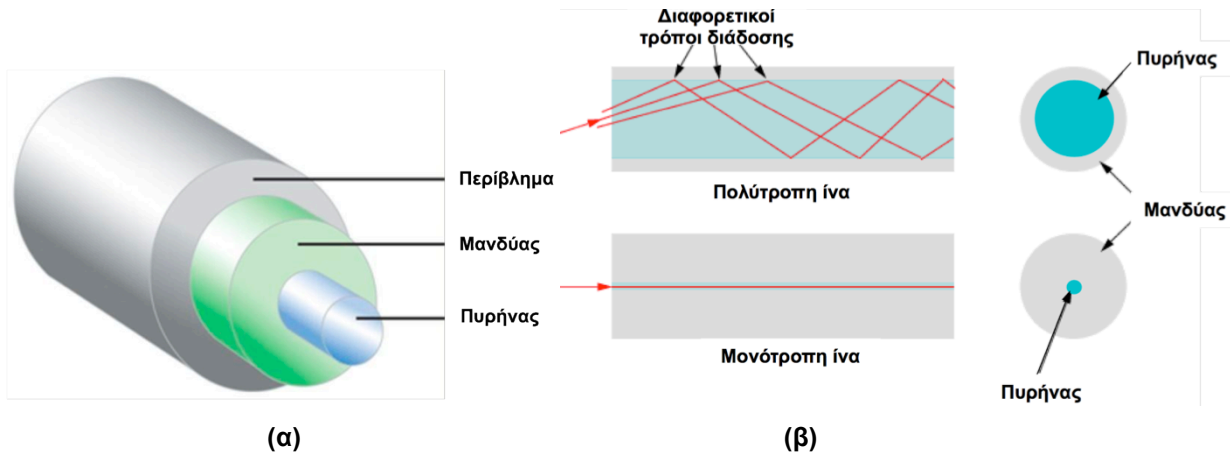
Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα βασικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάδοση σε μία οπτική ίνα καθώς επίσης και οι παράμετροι που επηρεάζουν και καθορίζουν τη διάδοση αυτή, με σκοπό ο αναγνώστης να αποκτήσει το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο και τη φυσική διαίσθηση ώστε να κατανοήσει ευκολότερα τις σύνθετες διαδικασίες που θα περιγράψουμε στα επόμενα κεφάλαια. Η ανάλυση ξεκινά με μία συνοπτική περιγραφή των βασικών φαινομένων που καθορίζουν τη διάδοση σε οπτικές ίνες και τους τρόπους που έχουν επινοηθεί για την αντιστάθμιση των αρνητικών επιδράσεών τους ενώ στη συνέχεια ακολουθεί παράθεση πληροφοριών αναφορικά με τις μεθόδους μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής αυτής διατριβής.

2.1 Βασικά φαινόμενα κατά τη διάδοση φωτός σε οπτική ίνα

Η δομή της οπτικής ίνας φαίνεται στο σχήμα 2-1α, στο οποίο διακρίνεται η κεντρική περιοχή (πυρήνας), το στρώμα που περιβάλλει τον πυρήνα (μανδύας) και το προστατευτικό στρώμα για την προστασία της οπτικής ίνας (περίβλημα). Ο πυρήνας και ο μανδύας κατασκευάζονται από άμορφο SiO₂. Ο κύριος τύπος οπτικών ινών που χρησιμοποιείται σήμερα έχει πολύ μικρή διάμετρο πυρήνα ίση με 8 έως 12μm και βαθμωτό προφίλ δείκτη διάθλασης. Αυτός ο τύπος αποτελεί τη μονότροπη ίνα (single mode fiber, SMF) και ονομάζεται έτσι γιατί οι διαστάσεις και το προφίλ του δείκτη

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

διάθλασης επιτρέπουν μόνο ένα τρόπο κυματοδηγησης. Αν η διάμετρος του πυρήνα αυξηθεί μέχρι και τα 62.5 μm, η οπτική ίνα επιτρέπει τη διέγερση περισσότερων του ενός τρόπων διάδοσης και ονομάζεται πολύτροπη (multimode fiber, MMF). Η διαφορά αυτή στον τρόπο κυματοδηγησης του φωτός στο εσωτερικό της SMF και της MMF απεικονίζεται στο σχήμα 2-2β. Η μεγάλη διασπορά τρόπων που παρατηρείται στις πολύτροπες ίνες τις καθιστά ακατάλληλες για τις επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, ωστόσο είναι αρκετά χρήσιμες για την υποστήριξη υψίρρυθμων εφαρμογών στο δίκτυο πρόσβασης [18]. Σήμερα για τη μετάδοση μεγάλου ρυθμού πληροφορίας σε επίπεδο δικτύου κορμού χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ίνες SMF των οποίων τα χαρακτηριστικά θα περιγραφούν στη συνέχεια.

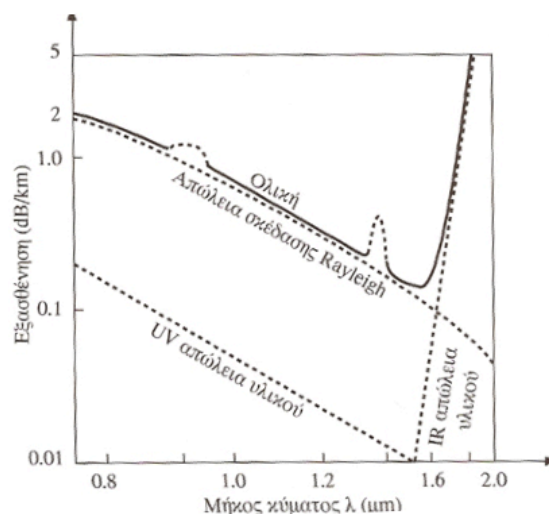


Σχήμα 2-1: Γεωμετρική αναπαράσταση μιας τυπικής οπτικής ίνας (α) και απεικόνιση της κυματοδηγησης στο εσωτερικό μιας μονότροπης και μιας πολύτροπης ίνας (β).

2.1.1 Εξασθένηση στην οπτική ίνα

Η οπτική δέσμη κατά τη διάδοσή της στην οπτική ίνα υπόκειται σε εξασθένηση της ισχύος της, η οποία μεταβάλλεται εκθετικά με την απόσταση όπως παρακάτω:

$$P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L) \quad (2.1)$$



Σχήμα 2-2: Απεικόνιση των βασικών συνιστωσών εξασθένησης της διαδιδόμενης οπτικής ισχύος στο εσωτερικό μιας οπτικής ίνας συναρτήσεως του μήκους κύματος. Η συνεχόμενη καμπύλη αντιστοιχεί στη συνολική εξασθένηση που προκύπτει από τη συνεισφορά των τριών επιμέρους συνιστωσών.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Στην σχέση 2.1, α είναι η σταθερά εξασθένησης, P_{IN} , P_{OUT} η ισχύς του φωτός στην είσοδο και την έξοδο της οπτικής ίνας και L το μήκος της. Η εξασθένηση της οπτικής ίνας εξαρτάται από το μήκος κύματος του διαδιδόμενου φωτός όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-2.

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα, εμφανίζονται δύο «παράθυρα» χαμηλής εξασθένησης στις περιοχές των 1310 nm και των 1550 nm, με το τελευταίο να παρέχει τη χαμηλότερη εξασθένηση (0.2 dB). Το εύρος ζώνης κάθε φασματικού παράθυρο είναι αρκετά μεγάλο (1280-1325 nm για το πρώτο και 1420-1650 nm για το δεύτερο) και θεωρητικά επιτρέπεται η εκμετάλλευση όλου αυτού του τεράστιου φασματικού εύρους.

Ένας από τους βασικούς παράγοντες εξασθένησης στις οπτικές ίνες είναι η απορρόφηση του ίδιου του υλικού του SiO₂ στις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που αντιστοιχούν στο υπεριώδες (ultra-violet, UV) και το υπέρυθρο (infra-red, IR). Εάν φωτόνια της UV-περιοχής προσπέσουν στα μόρια του SiO₂, ένα πλήθος των φωτονίων αυτών απορροφάται από τα μόρια του υλικού οδηγώντας τα σε εξαναγκασμένες ηλεκτρονικές ταλαντώσεις. Αντίθετα, το εύρος συχνοτήτων της IR-περιοχής αντιστοιχεί σε συχνότητες ιδιοταλάντωσης του μορίου SiO₂, επομένως τα φωτόνια αυτής της περιοχής απορροφούνται διεγείροντας μοριακές δονήσεις του υλικού.

Επιπροσθέτως συμβάλλει η σκέδαση Rayleigh του φωτός στις διάφορες μικροσκοπικές ανομοιογένειες, οι οποίες «παγώνουν» μέσα στο υλικό του SiO₂ κατά τη διαδικασία της κατασκευής της ίνας. Οι ανομοιογένειες αυτές σκεδάζουν ένα μέρος του κυματοδηγούμενου φωτός είτε προς τα τοιχώματα είτε προς τα πίσω (back-scattering). Ο νόμος των απωλειών, για αυτή την περίπτωση, είναι ανάλογος του $1/\lambda^4$, το οποίο σημαίνει ότι το ποσό του φωτός που κυματοδηγείται εξασθενεί περισσότερο στα μικρότερα μήκη κύματος.

Τέλος, κατά τη διαδικασία της κατασκευής των οπτικών ινών υδρατμοί που δεσμεύονται στο SiO₂ οδηγούν στο σχηματισμό ιόντων OH⁻, τα οποία έχουν χαρακτηριστικές γραμμές απορρόφησης στα μήκη κύματος $2720 \text{ nm} / (n + 1)|_{n=1,2,3,\dots}$, όπου n η τάξη της αρμονικής [19].

Στα προηγούμενα έρχεται να προστεθεί και ένας επιπλέον αριθμός εξωτερικών παραγόντων απωλειών όπως είναι οι απώλειες λόγω κάμψης της οπτικής ίνας κατά την εγκατάσταση μιας ζεύξης, οι απώλειες στους ενδιάμεσους συνδετήρες (connectors), οι οποίοι ενώνουν δύο τμήματα ινών, και οι απώλειες συγκολλήσεων (splices).

2.1.2 Χρωματική διασπορά

Η έννοια της διασποράς περιγράφει κάθε φαινόμενο κατά το οποίο διαφορετικές συνιστώσες του διαδιδόμενου σήματος οδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες στην οπτική ίνα, με αποτέλεσμα την άφιξή τους σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στο δέκτη.

Στη μονότροπη οπτική ίνα κυριαρχούν η χρωματική διασπορά και η διασπορά τρόπων πόλωσης. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι πολύτροπες ίνες που αναφέραμε παραπάνω υποφέρουν και από τη διασπορά τρόπων, η οποία κυριαρχεί σε αυτές και σχετίζεται με τις διαφορετικές χρονικές αφίξεις των διαφόρων τρόπων κυματοδηγησης. Στην παρούσα παραγράφου θα επικεντρωθούμε στο φαινόμενο της χρωματικής διασποράς και θα αναλύσουμε τους βασικούς περιορισμούς που αυτή θέτει στις επιδόσεις ενός σήματος.

Η χρωματική διασπορά σχετίζεται με το φαινόμενο κατά το οποίο οι διαφορετικές φασματικές συνιστώσες ενός σήματος ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες. Για την κατανόηση του φαινομένου αυτού θα πρέπει να αντιληφθούμε τη σημασία της σταθεράς διάδοσης. Η χρωματική διασπορά εκδηλώνεται για δύο λόγους. Ο πρώτος σχετίζεται με την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από τη συχνότητα, γεγονός το οποίο προκαλεί τη

διασπορά του υλικού η οποία είναι και η κυρίαρχη συνιστώσα της χρωματικής διασποράς. Ο δεύτερος σχετίζεται με το γεγονός ότι η ενέργεια του φωτός διαδίδεται κατά ένα μέρος στον πυρήνα και κατά ένα μέρος στο μανδύα, το οποίο προκαλεί την επονομαζόμενη διασπορά κυματοδηγού. Ο ενεργός δείκτης διάθλασης ενός τρόπου κυμαίνεται μεταξύ των δεικτών διάθλασης των δύο αυτών περιοχών και η πραγματική τιμή του εξαρτάται από τα ποσοστά της ισχύος που περιέχεται στην κάθε περιοχή. Η κατανομή της ισχύος ενός τρόπου μεταξύ του πυρήνα και του μανδύα της ίνας είναι συνάρτηση του μήκους κύματος και μάλιστα, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη η ισχύς που διαδίδεται στον πυρήνα. Επομένως η σταθερά διάδοσης του τρόπου εξαρτάται από αυτό τον παράγοντα ακόμα και αν η διασπορά του υλικού μπορεί να αγνοηθεί.

Μια μαθηματική περιγραφή της διάδοσης των παλμών συμπεριλαμβάνοντας και το φαινόμενο της διασποράς θα δοθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού. Εδώ απλά θα τονίσουμε ότι η χρωματική διασπορά κυρίως επηρεάζει το σχήμα των παλμών που διαδίδονται και είναι υπεύθυνη για την αλληλοπαρεμβολή συμβόλων. Η παράμετρος κλειδί για την εξέλιξη των παλμών σε μία οπτική ίνα είναι η δεύτερη παράγωγος της σταθεράς διάδοσης $\beta_2 = d^2\beta/d^2\omega$, η οποία ονομάζεται παράμετρος διασποράς της ταχύτητας ομάδας (group velocity dispersion parameter, GVD parameter). Η ορολογία αυτή δικαιολογείται αν αναλογιστούμε ότι $\beta_1 = d\beta/d\omega$, όπου $1/\beta_1$ είναι η ταχύτητα ομάδας.

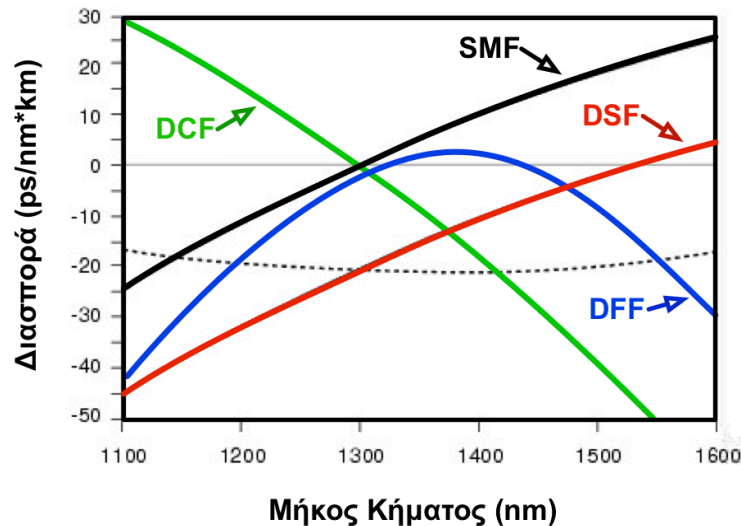
Εφόσον λοιπόν η παράμετρος β_2 σχετίζεται με το ρυθμό της αλλαγής της ταχύτητας ομάδας συναρτήσει της συχνότητας, η χρωματική διασπορά ονομάζεται επίσης και διασπορά ταχύτητας ομάδας (GVD).

Όταν η χρωματική διασπορά μπορεί να αγνοηθεί ($\beta_2 \approx 0$), όλοι οι παλμοί διαδίδονται χωρίς το σχήμα τους να υπόκειται σε μεταβολές. Το μήκος κύματος για το οποίο η οπτική ίνα παρουσιάζει σχεδόν μηδενική διασπορά ονομάζεται μήκος κύματος μηδενικής διασποράς (zero dispersion wavelength, ZDWL) και αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο μιας ίνας. Αν $\beta_2 > 0$, τότε η οπτική διάδοση γίνεται στο καθεστώς ομαλής χρωματικής διασποράς, ενώ αντίθετα γίνεται στο καθεστώς ανώμαλης χρωματικής διασποράς. Για την περιγραφή της χρωματικής διασποράς συνηθίζεται να χρησιμοποιούμε την παράμετρο D , η οποία συνδέεται με την παράμετρο β_2 με βάση τη σχέση:

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.2)$$

Η ολική διασπορά D για όλο το εύρος των μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες καθώς επίσης και για διάφορους τύπους ινών απεικονίζεται στο σχήμα 2-3. Στις συνήθεις SMF ίνες η διασπορά είναι σχεδόν μηδέν γύρω από την περιοχή των 1310 nm ενώ ο περιορισμός της τιμής της διασποράς γύρω από την περιοχή των 1.55μm πραγματοποιείται με εισαγωγή διασποράς κυματοδηγού αντιθέτου προσήμου από τη διασπορά υλικού του SiO₂, το οποίο επιτυγχάνεται με κατάλληλο σχεδιασμό της γεωμετρίας και του προφίλ του δείκτη διάθλασης. Με τον τρόπο της ελεγχόμενης εισαγωγής διασποράς κυματοδηγού μπορούν να υλοποιηθούν οι ίνες μετατοπισμένης διασποράς (dispersion shifted fiber, DSF), οι ίνες αντιστάθμισης διασποράς (dispersion compensating fiber, DCF) και οι ίνες επίπεδης διασποράς (dispersion flattened fiber, DFF), η φασματική απόκριση των οποίων απεικονίζεται στο σχήμα 2-3. Όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, οι DSF έχουν κλίση περίπου ίδια με τις SMF αλλά το λ_0 (μήκος μηδενικής διασποράς) είναι μετατοπισμένο κοντά στα 1550 nm, ενώ οι DCF έχουν κλίση διασποράς αντίθετου προσήμου από τις SMF. Τέλος, οι DFF έχουν περιορισμένη τιμή D και μάλιστα σταθερή για αρκετά μεγάλη περιοχή μηκών κύματος γύρω από τα 1550 nm.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 2-3: Εξάρτηση της διασποράς (D) από το μήκος κύματος για τα διάφορα είδη οπτικών ινών. Με μαύρο χρώμα απεικονίζονται οι τυπικές μονότροπες ίνες (SMF), με κόκκινο οι μονότροπες ίνες μετατοπισμένου ZDWL (DSF), με πράσινο οι ίνες αντιστάθμισης διασποράς (DCF) και με μπλέ οι ίνες με επίπεδη διασπορά (DFF).

Στην περιοχή γύρω από τη μηδενική διασπορά, η εξάρτηση της διασποράς από το μήκος κύματος είναι σχεδόν γραμμική και δίνεται από την έκφραση:

$$D = \frac{dD}{d\lambda}(\lambda - \lambda_0) \quad (2.3)$$

όπου η παράμετρος $dD/d\lambda$ είναι η κλίση της διασποράς, η τιμή της οποίας κυμαίνεται από 0.02 ps/nm²/km έως 0.08 ps/nm²/km.

2.1.3 Φαινόμενα Πόλωσης

Μία τυπική μονότροπη ίνα διαθέτει δύο κάθετους οπτικούς άξονες πόλωσης επιτρέποντας σε οποιοδήποτε γραμμικά πολωμένο σε τυχαία διεύθυνση εισερχόμενο κύμα να διαδοθεί εν μέρει και στους δύο αυτούς άξονες. Στην περίπτωση μιας ιδανικής ίνας με απόλυτη κυλινδρική συμμετρία και ιστροπικά χαρακτηριστικά, οι δύο αυτοί πολωτικοί τρόποι οδεύουν με τα ίδια χαρακτηριστικά διάδοσης κατά μήκος της ίνας και φθάνουν ταυτόχρονα στο δέκτη. Ωστόσο, κατά τη διαδικασία της κατασκευής και της εγκατάστασης μιας οπτικής ίνας, η παρουσία μηχανικών τάσεων, κάμψεων, αλλαγών θερμοκρασίας αλλά και συγκολλήσεων οδηγούν σε μορφολογικές ατέλειες της διατομής της ίνας δίνοντάς της ένα προφίλ περισσότερο ελλειπτικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι δύο πολωτικοί άξονες να εμφανίζουν ελαφρώς διαφορετικές σταθερές διάδοσης και επομένως οι δύο πολωτικές συνιστώσες (τρόποι) του διαδιδόμενου κύματος να οδεύουν με διαφορετική ταχύτητα (ταχύτητα ομάδας, differential group delay, DGD). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διπλοθλαστικότητα και περιγράφεται από τον όρο B , ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y| \quad (2.4)$$

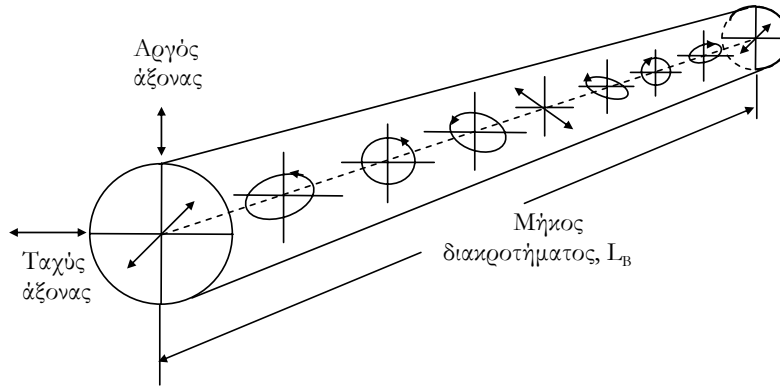
όπου $k_0=2\pi/\lambda$ είναι ο κυματάριθμός του διαδιδόμενου κύματος. Οι δείκτες x, y αντιστοιχούν στους δύο κάθετους άξονες πόλωσης της οπτικής ίνας.

Ο άξονας πόλωσης ενός τμήματος ίνας κατά το οποίο το κύμα που θα εισαχθεί θα διαδοθεί με τη μεγαλύτερη τιμή ταχύτητας, ονομάζεται ταχύς άξονας της ίνας ενώ ο άξονας πόλωσης κατά το οποίο αν εισαχθεί κύμα θα διαδοθεί με τη μικρότερη ταχύτητα

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

ονομάζεται βραδύς άξονας της ίνας. Έτσι η κατάσταση πόλωσης του διαδιδόμενου κύματος είναι εν γένει ελλειπτική και το επίπεδό της στρέφεται συνεχώς και μάλιστα με ακανόνιστο τρόπο, με την ισχύ να «ταλαντώνεται» μεταξύ του x και του y άξονα. Αποδεικνύεται ότι η ισχύς ταλαντώνεται μεταξύ των δύο πολωτικών αξόνων κατά το μήκος διάδοσης με περίοδο L_B , η οποία καλείται μήκος διακροτήματος [20] (σχήμα 2-4).

$$L_B = \frac{\lambda}{B} \quad (2.5)$$



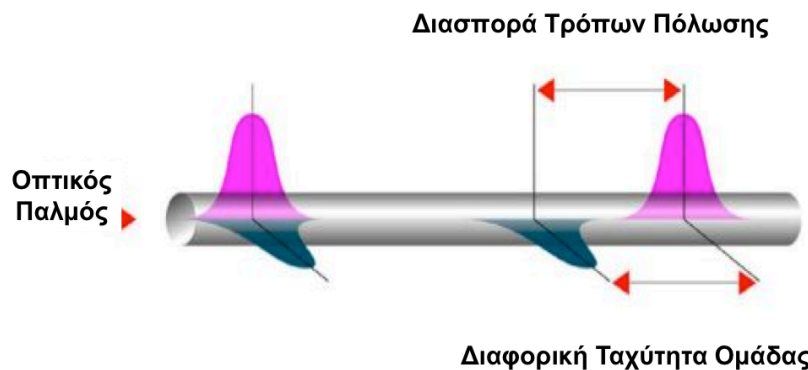
Σχήμα 2-4: Εξέλιξη του επιπέδου πόλωσης κατά τη διάδοση συνεχούς κύματος σε οπτική ίνα.

Στην περίπτωση ενός αδιαμόρφωτου συνεχούς κύματος (continuous wave, CW), η διάδοση των δύο ορθογώνια πολωμένων τρόπων, περιγράφεται ικανοποιητικά με την έννοια της στροφής πόλωσης του κύματος CW. Αντίθετα, στην περίπτωση διάδοσης στενών οπτικών παλμών, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μία ποσοτική περιγραφή των επιδράσεων του φαινομένου καθώς αναμένεται η συνολική ενέργεια του παλμού να κατανεμηθεί στον ταχύ και βραδύ άξονα όπως φαίνεται στο σχήμα 2-5. Το τελικό αποτέλεσμα είναι να διαδίδονται δύο παλμοί στους δύο πολωτικούς άξονες, οι οποίοι αναμένεται να φτάσουν στο δέκτη με σχετική καθυστέρηση.

Η καθυστέρηση μεταξύ των δύο τρόπων στην περίπτωση ομοιόμορφα κατανεμημένης διπλοθλαστικότητας δίνεται από την έκφραση

$$\Delta\tau = \frac{L}{\Delta v_g} = \frac{d\Delta\beta}{d\omega} L = \left(\frac{\Delta n}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{d\Delta n}{d\omega} \right) L \quad (2.6)$$

όπου Δv_g είναι η διαφορά της ταχύτητας ομάδας μεταξύ των δύο τρόπων. Η ποσότητα $\Delta\tau/L$ συνήθως εκφράζεται σε μονάδες ps/km για την περίπτωση μικρών ομοιόμορφα διπλοθλαστικών ινών.

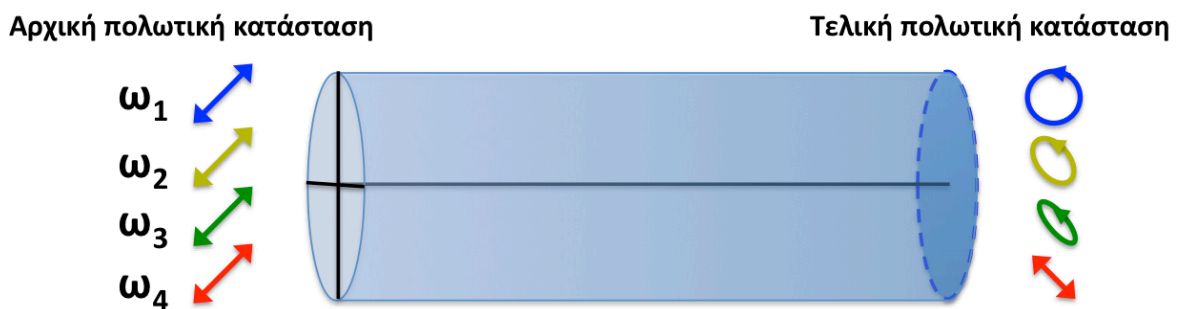


Σχήμα 2-5: Επίδραση της διπλοθλαστικότητας της οπτικής ίνας στη διάδοση ενός οπτικού παλμού.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

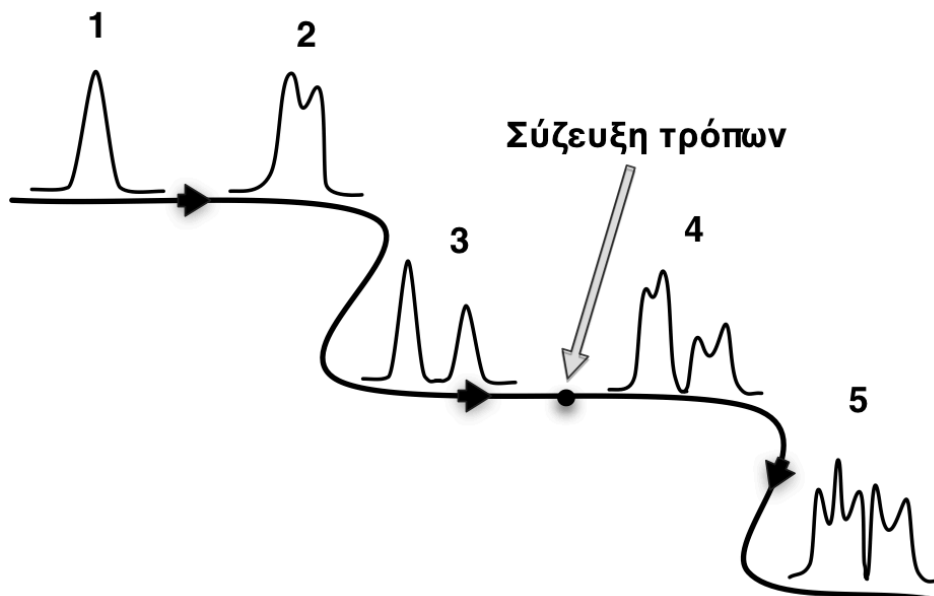
Σε οπτικές ίνες μεγάλου μήκους η διπλοθλαστικότητα συνδυάζεται με τυχαία σύζευξη της πόλωσης μεταξύ των δύο πολωτικών αξόνων, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα το φαινόμενο της διασποράς τρόπων πόλωσης (polarization mode dispersion, PMD), την οποία θα συζητήσουμε στη συνέχεια της παραγράφου αυτής. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της διπλοθλαστικότητας είναι ότι εκδηλώνεται διαφορετικά στις διάφορες συχνότητες. Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε ένα ομοιόμορφα διπλοθλαστικό τμήμα οπτικής ίνας στο οποίο εισάγουμε τέσσερα γραμμικά πολωμένα κύματα φωτός υπό γωνία 45° ως προς τους δύο άξονες τα οποία έχουν διαφορετικές συχνότητες. Η φάση του καθενός κύματος στην έξοδο, η οποία καθορίζει την πολωτική κατάσταση εξόδου, μεταβάλλεται με τη συχνότητα του φέροντος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-6, και η μεταβολή αυτή δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\omega} = \frac{d\Delta\beta}{d\omega} L = \Delta\tau \quad (2.7)$$



Σχήμα 2-6: Η επίδραση της διπλοθλαστικότητας στις διάφορες συχνότητες.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η επίδραση της διπλοθλαστικότητας και της τυχαίας σύζευξης τρόπων κατά τη διάδοση ενός στενού παλμού σε μία οπτική ίνα.



Σχήμα 2-7: Διαχωρισμός του παλμού στους δύο πολωτικούς άξονες εξαιτίας της συνδυασμένης δράσης της διπλοθλαστικότητας και της σύζευξης των τρόπων

Ο στενός παλμός (1) διαχωρίζεται σε δύο παλμούς (2) οι οποίοι απομακρύνονται γραμμικά (3) λόγω της τοπικής διπλοθλαστικότητας. Σε κάποιο τυχαίο σημείο λόγω μιας

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

τοπικής διαταραχής της συμμετρίας μέρος της ισχύος από τον ένα τρόπο συζεύγνυται στον ορθογώνιο τρόπο (4). Η διπλοθλαστικότητα στο δεύτερο τμήμα έχει σαν αποτέλεσμα μία περαιτέρω απομάκρυνση των δύο πολωτικών τρόπων (5, 6). Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει μία απλοποιημένη περίπτωση δύο διπλοθλαστικών τμημάτων ίνας με καλά καθορισμένους πολωτικούς άξονες. Σε ένα πραγματικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα οπτικών ινών η τοπική διπλοθλαστικότητα είναι πολύ μικρή και η σύζευξη των πολωτικών τρόπων είναι κατανεμημένη τυχαία κατά μήκος της ίνας, με αποτέλεσμα η αλλοίωση του παλμού να εμφανίζεται με τη μορφή μίας διεύρυνσης. Η διεύρυνση αυτή εξηγεί και τον όρο «διασπορά πόλωσης» που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του φαινομένου. Η διασπορά πόλωσης όπως και η χρωματική διασπορά περιορίζει το ρυθμό μετάδοσης και αποδεικνύεται ότι η καθυστέρηση DGD μεταξύ των δύο πολωτικών αξόνων μεταβάλλεται με την τετραγωνική ρίζα του μήκους της οπτικής ίνας. Καθώς τα χαρακτηριστικά της PMD μεταβάλλονται επίσης τυχαία με τη θερμοκρασία [21] και τη συχνότητα, το φαινόμενο θα πρέπει να περιγραφεί με στατιστικό τρόπο. Έχει αποδειχθεί [22]-[28] ότι η χρονική καθυστέρηση των παλμών που αντιστοιχούν στις δύο ορθογώνια πολωμένες καταστάσεις είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function, PDF) Maxwell. Έτσι, για ένα τμήμα ίνας μήκους Δz , η μέση καθυστέρηση είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας αυτού του μήκους και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_{DGD,mean} = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \delta_{\tau} \sqrt{\Delta z} \quad (2.8)$$

Η ποσότητα δ_{τ} χαρακτηρίζει πλήρως ένα τμήμα ίνας από άποψη DGD, μετρείται σε ps/\sqrt{km} και ονομάζεται συντελεστής PMD. Η εξάρτηση της PMD από την οπτική συχνότητα περιγράφεται με τη δεύτερης τάξης διασπορά τρόπων πόλωσης [29] και δεν θα μας απασχολήσει στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Η PMD σε συνδυασμό με την χρωματική διασπορά υποβαθμίζουν σημαντικά τις επιδόσεις ενός υψίρρυθμου συστήματος με αποτέλεσμα στα υπάρχοντα εγκατεστημένα οπτικά καλώδια, όπου η εγγενής εκκεντρότητα της ίνας είναι μεγαλύτερη, δύσκολα μπορούν να μεταδοθούν 10 Gb/s.

Μία πρόχειρη εκτίμηση των ανεκτών ορίων ως προς το μήκος και το ρυθμό μετάδοσης, R_{bit} , εξαιτίας της επίδρασης της PMD, μπορεί να γίνει με τον εξής τρόπο. Έστω μία ίνα με συντελεστή PMD δ_{τ} και μήκος L . Παρότι η καθυστέρηση των δύο παλμών είναι μεταβαλλόμενη κατά μήκος της ίνας, μπορεί σε πρώτη προσέγγιση να θεωρηθεί σταθερή, οπότε η τελική καθυστέρηση των δύο παλμών που αντιστοιχούν στον ταχύ και τον βραδύ άξονα μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$\Delta\tau = \delta_{\tau} \sqrt{L} \quad (2.9)$$

Για ασφαλή μετάδοση, αυτή η καθυστέρηση πρέπει να είναι μικρότερη από ένα κλάσμα της περιόδου του παλμού, T_{bit} , π.χ. έστω το 1/10, επομένως ο μέγιστος επιτρεπόμενος ρυθμός θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{1}{10} T_{bit} = \delta_{\tau} \sqrt{L} \Leftrightarrow R_{bit} = \frac{1}{10 \delta_{\tau} \sqrt{L}} \quad (2.10)$$

2.1.4 Μη γραμμικά φαινόμενα

Τα μη γραμμικά φαινόμενα που παρουσιάζονται στις οπτικές ίνες οφείλονται στο σύνολό της στην ελαστική και στην ανελαστική σκέδαση του κύματος στο διηλεκτρικό μέσο. Στις ανελαστικές σκεδάσεις δεν ανταλλάσσεται ενέργεια μεταξύ του διαδιδόμενου κύματος και του μέσου και τα φαινόμενα που προκύπτουν από αυτές περιγράφονται από την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του μέσου από την ένταση του διαδιδόμενου κύματος. Στη δεύτερη ομάδα φαινομένων έχουμε μεταφορά ενέργειας από τα φωτόνια του διαδιδόμενου κύματος σε φωνόνια του μέσου. Έτσι προκύπτουν φωτόνια χαμηλότερης συχνότητας, δηλαδή μεγαλύτερου μήκους κύματος, εξαιτίας της διαφοράς ενέργειας.

Η απόκριση του μέσου στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο \vec{E} περιγράφεται από το διάνυσμα της διηλεκτρικής πόλωσης \vec{P} , το οποίο σε γραμμικά, ομογενή και ισοτροπικά μέσα παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από το διάνυσμα του εφαρμοζόμενου πεδίου. Η σταθερά αναλογίας σε αυτή την περίπτωση είναι βαθμωτό μέγεθος και σχετίζεται με τη διηλεκτρική σταθερά του κενού, ϵ_0 , και την επιδεκτικότητα του μέσου, χ_{medium} .

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_{medium} \vec{E} \quad (2.11)$$

Η μη γραμμική απόκριση ενός μέσου συμπεριλαμβάνει τους όρους δεύτερης και τρίτης τάξης του ηλεκτρικού πεδίου και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\chi^{(1)} \cdot \vec{E} + \chi^{(2)} : \vec{E}\vec{E} + \chi^{(3)} : \vec{E}\vec{E}\vec{E}) \quad (2.12)$$

Ο όρος $\chi^{(j)}$ καλείται επιδεκτικότητα j τάξης και είναι ένας πίνακας διαστάσεων $(j+1) \times (j+1)$. Ο όρος χ_{mn} παριστάνει τη συνεισφορά στην πόλωση P_m που εμφανίζεται στον άξονα m λόγω της συνιστώσας E_n ($\chi_{mn} E_n$). Η ακριβής μορφή των όρων χ_{mn} και οι τάξεις της επιδεκτικότητας που συνεισφέρουν στην ολική πόλωση του μέσου προκύπτουν από τα κβαντομηχανικά χαρακτηριστικά του μέσου. Βέβαια οι όροι χ_{mn} μπορούν να εισαχθούν με φαινομενολογικό τρόπο έτσι όπως προκύπτει από θεωρητικές απλουστεύσεις και παραδοχές ή από πειραματικές παρατηρήσεις και μετρήσεις. Οι όροι χ_{mn} έχουν τη μορφή κρουστικής απόκρισης φίλτρου $\chi_{mn}(t)$ και παριστάνουν την απόκριση των ηλεκτρονίων του μέσου στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο. Πολύ χρήσιμη είναι η αναπαράσταση των $\chi_{mn}(\omega)$ στο πεδίο της συχνότητας από το μετασχηματισμό Fourier του $\chi_{mn}(t)$. Εξαιτίας της συμμετρίας του μορίου SiO_2 ο όρος $\chi^{(2)}$ είναι μηδενικός οπότε στις οπτικές ίνες ο κύριος μη γραμμικός όρος που απομένει για την περιγραφή των μη γραμμικών φαινομένων είναι ο $\chi^{(3)}$. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις βασικές έννοιες του ηλεκτρομαγνητισμού αποδεικνύεται ότι η μη γραμμική εξάρτηση της πόλωσης από το ηλεκτρικό πεδίο ισοδυναμεί με την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ισχύ. Ο δείκτης διάθλασης $n(\omega)$ και η εξασθένηση α συσχετίζονται με την επιδεκτικότητα χ_{medium} :

$$n(\omega) = 1 + \frac{1}{2} \text{Re}[\chi_{medium}(\omega)] \quad (2.13)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{cn(\omega)} \text{Im}[\chi_{medium}(\omega)] \quad (2.14)$$

όπου $\chi_{medium}(\omega)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier της $\chi_{medium}(t)$.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Στην περίπτωση που ο όρος $\chi^{(3)}$ γίνεται σημαντικός η έκφραση του δείκτη διάθλασης τροποποιείται. Έτσι αν ένα κύμα γραμμικά πολωμένο στον x-άξονα προσπίπτει στην ίνα αποδεικνύεται ότι ο δείκτης διάθλασης είναι :

$$n = n_{(\omega, |E|^2)} = n_{(\omega)} + \frac{3\chi_{xxxx}^{(3)}}{8n_{(\omega)}} |E|^2 \quad (2.15)$$

όπου $n_{(\omega)}$ είναι η συνήθης μορφή του δείκτη διάθλασης. Η ποσότητα που δίνεται από το δεύτερο κλάσμα της σχέσης 2.15 καλείται συντελεστής μη γραμμικότητας του δείκτη διάθλασης n_2 και δίνεται από την έκφραση :

$$n_2 = \frac{3}{8n_{(\omega)}} \chi_{xxxx}^{(3)} \quad (2.16)$$

Η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την ισχύ $|E|^2$ έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση κάποιων φαινομένων, όπως η μίξη τεσσάρων φωτονίων (ή αλλιώς μίξη τεσσάρων κυμάτων, four wave mixing-FWM) και η μη γραμμική περίθλαση που διακρίνεται στην αυτοδιαμόρφωση φάσης (self-phase modulation, SPM) και την ετεροδιαμόρφωση φάσης (cross-phase modulation, XPM), οι μηχανισμοί των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Η διαδικασία FWM μελετάται σε βάθος στο τέταρτο κεφάλαιο, καθώς αποτελεί τον υποκείμενο μηχανισμό των αμιγώς οπτικών αναγεννητών φάσης που μελετώνται στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αυτής. Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι κατά τη διαδικασία FWM, τρία φωτόνια από κύματα σε συχνότητες $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ κάτω από ορισμένες συνθήκες συμβάλλουν, γεννώντας ένα φωτόνιο στις συχνότητες $\omega_i + \omega_j \pm \omega_k$. Οι ειδικές συνθήκες που απαιτούνται ονομάζονται και συνθήκες προσαρμογής φάσης. Η SPM αναφέρεται στην ολίσθηση φάσης στην οποία υπόκειται ένα κύμα λόγω της μεταβολής που υφίσταται ο δείκτης διάθλασης από την οπτική ισχύ του ίδιου του κύματος. Η συνολική ολίσθηση φάσης ενός κύματος το οποίο διαδίδεται σε ίνα μήκους z δίνεται από την έκφραση 2.17 και περιλαμβάνει τη γραμμική ολίσθηση η οποία οφείλεται στη διασπορά του υλικού και στη μη γραμμική ολίσθηση λόγω SPM (2.18).

$$\varphi = n \cdot k_0 \cdot z = (n + n_2 \cdot |E|^2) \cdot k_0 \cdot z = \varphi_0 + \varphi_{NL} \quad (2.17)$$

$$\varphi_{NL} = n_2 \cdot k_0 \cdot |E|^2 \cdot z \quad (2.18)$$

Η εξάρτηση της ολίσθησης φάσης του κύματος από την ισχύ του είναι ο λόγος για τον οποίο το φαινόμενο πήρε το όνομά του. Αποτέλεσμα της SPM είναι η φασματική διεύρυνση των οπτικών παλμών η οποία μπορεί να εξηγηθεί ως εξής. Ένα διαμορφωμένο οπτικό σήμα αποτελείται από διάφορες φασματικές συνιστώσες, οι οποίες αλληλεπιδρώντας θα δημιουργήσουν νέες οπτικές συχνότητες κατ' αναλογία με το φαινόμενο FWM. Επιπλέον η φασματική διεύρυνση μπορεί να εξηγηθεί αν αποτιμηθεί η επίδραση της μη-γραμμικότητας στη διαταραχή της συχνότητας (chirp). Λόγω της φ_{NL} θα προκαλείται μία μεταβολή συχνότητας που δίνεται από την έκφραση:

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

$$\Delta\omega = \frac{\partial\varphi_{NL}}{\partial t} = n_2 \cdot k_0 \cdot z \cdot \frac{\partial}{\partial t} (|E_{(z=0,t)}|^2) \quad (2.19)$$

Η μεταβολή συχνότητας αλλάζει μέσα στο «χρονικό παράθυρο» του παλμού και εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή μη γραμμικότητας, από το μήκος και από το εύρος του παλμού. Προφανώς όσο αυξάνει το μήκος διάδοσης τόσο αυξάνει το μέτρο του $\Delta\omega$ άρα τόσο περισσότερες φασματικές συνιστώσες δημιουργούνται καθώς διαδίδεται ο παλμός.

Η ετεροδιαμόρφωση φάσης XPM εμφανίζεται όταν λαμβάνονται υπ' όψιν και οι δύο πολώσεις του μεταδιδόμενου κύματος ή όταν περισσότερα από ένα μήκη κύματος διαδίδονται ταυτόχρονα στην ίδια ίνα. Στην περίπτωση που υπάρχει ένα διαδιδόμενο κύμα σε δύο πολώσεις τότε προκαλείται παραμόρφωση XPM στη μία πόλωση λόγω της άλλης επειδή είναι παρόντες επιπλέον όροι εκτός του $\chi_{xxxx}^{(3)}$ στον τανυστή $\chi^{(3)}$. Η προκαλούμενη μη γραμμική ολίσθηση φάσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση [20]:

$$\varphi_{NL}^{x,y} = n_2 \cdot k_0 \cdot z \cdot \frac{2}{3} \cdot |E_{y,x}|^2 \quad (2.20)$$

Στην περίπτωση εισαγωγής δύο κυμάτων στην οπτική ίνα που βρίσκονται στις οπτικές συχνότητες ω_1, ω_2 , προκαλούνται μεταβολές στη φάση του ενός κύματος λόγω της αλλαγής του δείκτη διάθλασης από την ισχύ του άλλου. Σε αυτή την περίπτωση η προκαλούμενη μη γραμμική ολίσθηση φάσης στο κύμα συχνότητας ω_i είναι της μορφής:

$$\varphi_{NL}^i = n_2 \cdot k_0 \cdot z \cdot 2 \cdot |E_{3-i}|^2, i = 1,2 \quad (2.21)$$

Η μεταβολή της φάσης φ_{NL} λόγω του φαινομένου XPM προκαλεί τη φασματική διεύρυνση του σήματος όπως ακριβώς και το φαινόμενο SPM. Παρατηρώντας τους αριθμητικούς συντελεστές στις φ_{NL} των σχέσεων 2.17, 2.20, 2.21 γίνεται κατανοητό ότι ο όρος XPM λόγω των δύο πολώσεων είναι λιγότερο σημαντικός από τον όρο SPM, ενώ ο όρος XPM λόγω της παρουσίας περισσότερων μηκών κύματος έχει διπλάσια επίδραση από την SPM. Έτσι η επίδραση της XPM είναι περισσότερο σημαντική από την SPM στην περίπτωση πολλών μεταδιδόμενων μηκών κύματος (N), αφού τότε η μη γραμμική ολίσθηση της φάσης ισούται με:

$$\varphi_{NL}^i = n_2 \cdot k_0 \cdot z \cdot 2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N |E_j|^2 \quad (2.22)$$

Από τις εξισώσεις 2.18-2.22 φαίνεται ότι η μη-γραμμική ολίσθηση της φάσης λόγω των φαινομένων SPM/XPM αυξάνει γραμμικά με την απόσταση. Ωστόσο, αυτό είναι εν μέρει αλήθεια μόνο αν θεωρήσουμε τις απώλειες αμελητέες. Αν ληφθεί υπόψη και το φαινόμενο της εξασθένησης θα πρέπει σε όλες τις εξισώσεις να αντικατασταθεί το μήκος z με το ενεργό μήκος της οπτικής ίνας που δίνεται από την έκφραση:

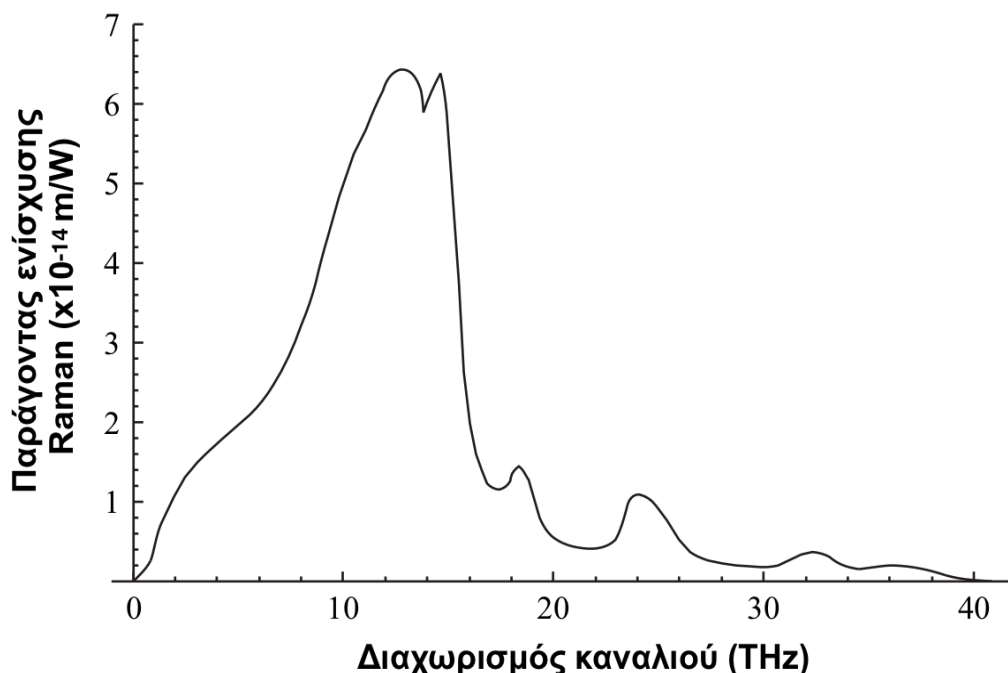
$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-aL}}{a} \quad (2.23)$$

Στην παραπάνω σχέση α είναι οι απώλειες της οπτικής ίνας και L το μήκος της. Με βάση τη σχέση 2.23 παρατηρείται ότι $L_{eff} < 1/\alpha$ και επίσης $L_{eff} \rightarrow 1/\alpha$ για μεγάλο μήκος της οπτικής ίνας.

Στη δεύτερη ομάδα μη γραμμικών φαινομένων, τα οποία όπως είπαμε οφείλονται στην ανελαστική σκέδαση των μεταδιδομένων φωτονίων η οποία οδηγεί σε ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των φωτονίων και του μη γραμμικού μέσου. Στην κατηγορία αυτή φαινομένων ανήκουν η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (stimulated Raman scattering, SRS) και η εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin (stimulated Brillouin scattering, SBS).

Η αρχή και των δύο τύπων σκέδασης είναι η ακόλουθη. Ένα φωτόνιο του μεταδιδομένου κύματος καθώς προσπίπτει σε ένα μόριο του μέσου μεταφέρει ένα μέρος της ενέργειάς του σε φωνόνιο του SiO_2 και η υπόλοιπη ενέργειά του δημιουργεί ένα φωτόνιο μικρότερης συχνότητας ή μεγαλύτερου μήκους κύματος αντίστοιχα.

Κατά την SRS, η αλληλεπίδραση με το μέσο γίνεται μέσω των μοριακών ταλαντώσεων του διηλεκτρικού (οπτικά φωνόνια), οι οποίες ενισχύονται απορροφώντας μέρος της ενέργειας των μεταδιδομένων φωτονίων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η διαφορά ενέργειας μεταφράζεται στη γένεση νέας και χαμηλότερης οπτικής συχνότητας [30]. Εάν δε στο νέο μήκος κύματος υπάρχει ήδη παρουσία κάποιου άλλου κύματος τότε το φαινόμενο εξελίσσεται εξαναγκασμένα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο SRS δεν έχει κάποια προτιμητέα διεύθυνση αλλά είναι πανκατευθυντικό. Το εύρος ζώνης απολαβής της διαδικασίας είναι πολύ μεγάλο, της τάξης των 30 THz με κορυφαία απολαβή στα 13 THz (περίπου 100 nm) από το διαδιδόμενο μήκος κύματος (σχήμα 2-8).



Σχήμα 2-8: Φασματική απόκριση της απολαβής Raman για κύμα εισαγόμενο στο 1 μm . Η τιμή κορυφής για το συγκεκριμένο σήμα είναι 10^{-13} cm/W ενώ στην περιοχή των 1.55 μm είναι 7×10^{-12} cm/W.

Η τιμή κορυφής του παράγοντα απολαβής μειώνεται με το μήκος κύματος και στα 1550 nm είναι 7×10^{-12} cm/W.

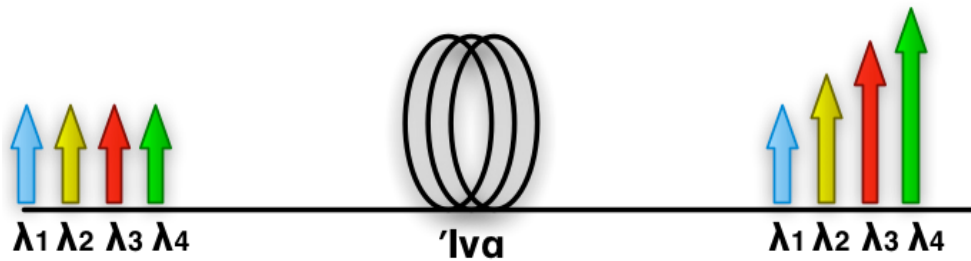
Για την έναυση του φαινομένου απαιτείται το διαδιδόμενο κύμα να ξεπεράσει ένα ελάχιστο κατώφλι ισχύος για το οποίο η ισχύς του διαδιδόμενου κύματος στην έξοδο της

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

ίνας γίνεται ίση με την ισχύ του παραγόμενου από το SRS κύματος. Η τιμή του κατωφλίου δίνεται από την σχέση 2.24 [31] και για τυπικές μονότροπες ίνες φθάνει την τιμή του 1Watt.

$$P_{th,SRS} = 16 \cdot \alpha \cdot \frac{A_{eff}}{g_{SRS}} \quad (2.24)$$

όπου α είναι η εξασθένηση της ίνας και g_{SRS} ο συντελεστής απολαβής της διαδικασίας.



Σχήμα 2-9: Επίδραση του φαινομένου SRS στην περίπτωση μιας WDM διάδοσης.

Στην περίπτωση μετάδοσης πολλών καναλιών WDM το φαινόμενο εξαρτάται από την ολική ισχύ και το ολικό εύρος ζώνης που κατέχουν τα σήματα που εισάγονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχει βρεθεί ένας πρόχειρος κανόνας επιλογής [30] σύμφωνα με τον οποίο η SRS έχει σαν αποτέλεσμα τα μεγαλύτερα μήκη κύματος να ενισχύονται σε βάρος των μικρότερων μηκών κύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 2-9.

Αυτές οι ιδιότητες της SRS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση ενισχυτών. Έτσι με ένα ισχυρό κύμα άντλησης σε μήκος κύματος περίπου 100 nm μικρότερο από τα 1.55 μm, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη απολαβή, μπορούν να ενισχυθούν ένα ή περισσότερα μήκη κύματος που βρίσκονται στην περιοχή των 1.55 μm. Επειδή μάλιστα το φαινόμενο είναι πανκατευθυντικό, η πηγή άντλησης μπορεί να τεθεί έτσι ώστε να ταξιδεύει αντίθετα από την κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων προς ενίσχυση.

Στη διαδικασία SBS ένα φωτόνιο που οδεύει προς την εμπρόσθια διεύθυνση μπορεί να δημιουργήσει ένα ακουστικό κύμα (φωνόνιο) στο μέσο το οποίο κινείται προς την ίδια διεύθυνση με το αρχικό οπτικό κύμα και ένα φωτόνιο που οδεύει προς την αντίθετη διεύθυνση (οπισθοσκεδάση). Το οπισθοσκεδαζόμενο φωτόνιο υπόκειται σε συχνοτική ολίσθηση Doppler, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα ήχου στο μέσο αλλά και από την συχνότητα του αρχικού φωτονίου. Σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, στην περίπτωση της διάδοσης ενός κύματος στην περιοχή των 1.55 μm διαμέσου μιας τυπικής μονότροπης ίνας, το οπισθοσκεδαζόμενο κύμα εμφανίζεται 11 GHz χαμηλότερα από το αρχικό μήκος κύματος.

$$f = f_0 - n \cdot \frac{u_{\eta\chiου(SiO_2)}}{c} \cdot f_0 \cong f_0 - 11 \text{ GHz} \quad (2.25)$$

όπου f_0 είναι η αρχική συχνότητα του σήματος το οποίο υπόκειται σε σκέδαση Brillouin.

Η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία δρα εξαναγκασμένα και για εύρος ζώνης 20 MHz γύρω από τη νέα συχνότητα. Το κατώφλι ισχύος πάνω από το οποίο το φαινόμενο SBS είναι ισχυρό δίνεται με βάση την αναφορά [31] από την ακόλουθη σχέση :

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψηρών συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

$$P_{th,SBS} = 21 \cdot \alpha \cdot \frac{A_{eff}}{g_{SBS}} \quad (2.26)$$

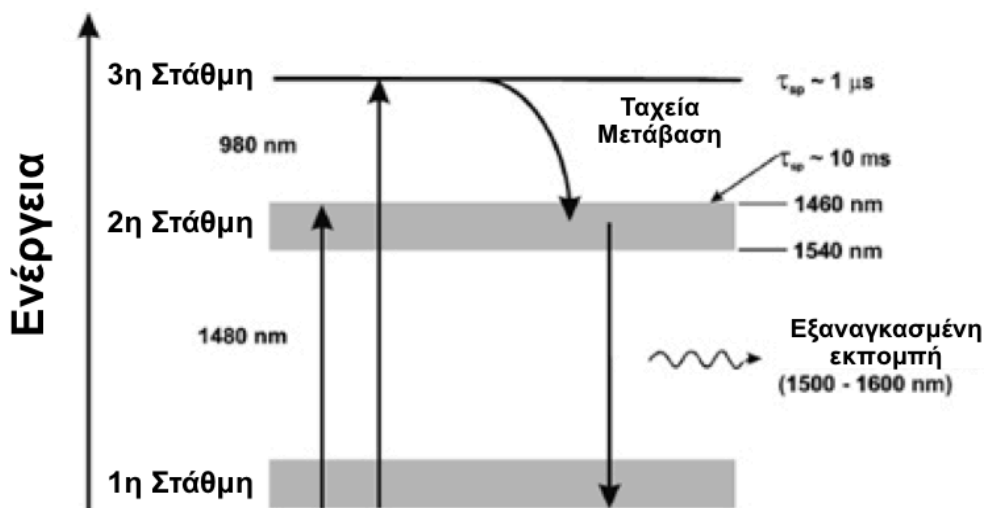
και προκύπτει ότι είναι της τάξης των 10 mW, τιμή αρκετά κοντά στα επίπεδα ισχύος που χρησιμοποιούνται στις οπτικές μεταδόσεις [31].

2.2 Τρόποι αντιμετώπισης των περιοριστικών παραγόντων διάδοσης

Στην παρούσα παράγραφο θα αναπτύξουμε συνοπτικά τις μεθόδους που έχουν υιοθετηθεί για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλούνται από τα φαινόμενα διάδοσης που αναφέραμε παραπάνω.

2.2.1 Αντιμετώπιση της εξασθένησης

Η εξασθένηση ήταν ο κύριος περιορισμός για την επίτευξη ζεύξεων μεγάλων αποστάσεων και η πρώτη λύση που δόθηκε, όπως αναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο, ήταν η τοποθέτηση ΟΕΟ αναγεννητών-επαναληπτών περιοδικά κατά μήκος της ζεύξης, οι οποίοι πραγματοποιούσαν την επεξεργασία του σήματος σε ηλεκτρικό επίπεδο. Το μειονέκτημά τους ήταν ότι απαιτούσαν την οπτικο-ηλεκτρονική και την ηλεκτρο-οπτική μετατροπή του σήματος, το οποίο περιόριζε το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Παράλληλα, η χρήση των ΟΕΟ αναγεννητών σε WDM συστήματα μετάδοσης, ήταν σε γενικές γραμμές μη αποδοτική καθώς απαιτούσε την αποπολυπλεξία της διαδιδόμενης δέσμης μηκών κύματος και την χρήση πολλαπλών μονάδων ΟΕΟ ο αριθμός των οποίων έπρεπε να είναι ίσος με το πλήθος των μηκών κύματος. Η αυξημένη πολυπλοκότητα, το κόστος υλοποίησης και η ενεργειακή κατανάλωση σε συνδυασμό με την περιορισμένη απόκριση των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων, τα οποία στις μέρες μας δεν ξεπερνούν σε ρυθμό τα 40 Gb/s, περιόρισαν την χρήση τους σε συγκεκριμένα μόνο κομβικά σημεία.



Σχήμα 2-10: Απεικόνιση του μηχανισμού οπτικής ενίσχυσης μέσω των ενεργειακών μεταβάσεων των ιόντων Er^{+3} οι οποίες πραγματοποιούνται στο εσωτερικό ενός EDFA.

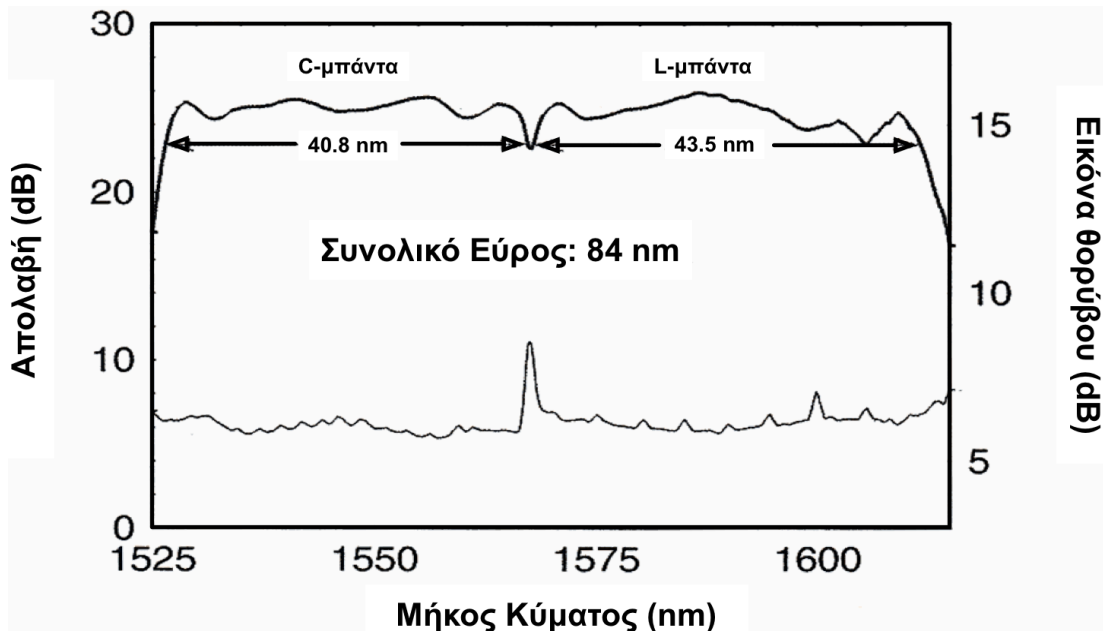
Η λύση στο πρόβλημα της εξασθένησης ήρθε οριστικά με την εφεύρεση των αμιγώς οπτικών ενισχυτών με ένα προσμίξεων ερβίου (Er) (erbium doped fiber amplifiers, EDFA). Στους ενισχυτές EDFA τα ιόντα ερβίου αποτελούν την ενεργειακή δεξαμενή η οποία παρέχει στο εισεχόμενο σήμα την επιθυμητή ενίσχυση. Με τη βοήθεια ενός δευτερεύοντος μήκους κύματος (πηγή άντλησης) τα ηλεκτρόνια των ιόντων ερβίου Er^{+3} που βρίσκονται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση μεταπηδούν σε ανώτερες

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

στάθμες (${}^4I_{11/2}$ για άντληση στα 980 nm ή ${}^4I_{13/2}$ για άντληση στα 1480 nm). Ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην ${}^4I_{13/2}$ είναι κατά πολύ μεγαλύτερος (≈ 10 msec) από τον αντίστοιχο των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη στάθμη ${}^4I_{11/2}$, ενώ η τελευταία έχει την ιδιότητα τα ηλεκτρόνια της να μεταπίπτουν προς την ${}^4I_{13/2}$ (σχήμα 2-10). Έτσι τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ${}^4I_{13/2}$ είναι διαθέσιμα για χρόνο 10 msec πριν να μεταπέσουν στη βασική ζώνη ${}^4I_{15/2}$ εκπέμποντας φωτόνιο στην περιοχή μηκών κύματος 1.52-1.57 μm .

Η εκπομπή φωτονίων είναι αυθόρμητη όταν δεν εισάγεται οπτικό σήμα αλλά μπορεί να γίνει εξαναγκασμένη όταν στην ίνα προσμίξουν εισαχθεί μία ασθενής σύμφωνη δέσμη. Σε αυτή την περίπτωση τα διαθέσιμα ηλεκτρόνια σε μεγάλο ποσοστό αποδιεγείρονται με σύμφωνο τρόπο παράγοντας φωτόνια της ίδιας συχνότητας, φάσης και πόλωσης με τα εισαγόμενα στην ίνα φωτόνια. Στις περισσότερες υλοποιήσεις EDFA χρησιμοποιούνται δύο κύματα άντλησης, τα οποία εισάγονται εκατέρωθεν της οπτικής ίνας ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη πυκνότητα διεγερμένων φορέων καθ' όλο το μήκος της ίνας και επομένως να διασφαλίζεται η παροχή της μέγιστης ενίσχυσης.

Οι ενισχυτές EDFA χαρακτηρίζονται από υψηλή απολαβή και σχετικά χαμηλή εικόνα θορύβου επιτρέποντας έτσι τη μετάδοση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις παρά τη συνεχή υποβάθμιση του λόγου σήματος προς θόρυβο κατά τη διέλευση του σήματος από διαδοχικά στάδια ενίσχυσης. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ενισχυτών EDFA είναι η περιορισμένη και συνήθως μη επίπεδη φασματική τους απόκριση. Έτσι ενώ υπάρχουν περίπου 200 nm διαθέσιμου εύρους ζώνης το οποίο διατίθεται από τα ιόντα ερβίου γύρω από την περιοχή των 1.55 μm , οι σύγχρονοι ενισχυτές EDFA εκμεταλλεύονται ένα κομμάτι μόλις 85nm το οποίο παρουσιάζει σταθερή απολαβή σε όλο το εύρος του [32]. Η φασματική απόκριση της απολαβής και της εικόνας θορύβου (noise figure, NF) ενός τέτοιου EDFA φαίνεται στο σχήμα 2-11.



Σχήμα 2-11: Φασματική απεικόνιση της απολαβής και της εικόνας θορύβου ενός σύγχρονου ενισχυτή EDFA.

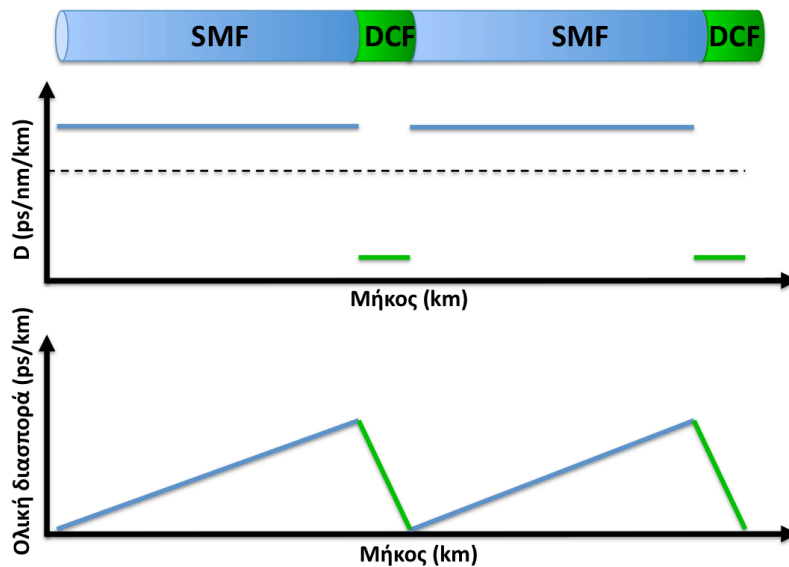
Η μη επίπεδη απόκριση των EDFA είναι σημαντικός περιοριστικός παράγοντας ειδικά στα συστήματα πολυπλεξίας μήκους κύματος και μάλιστα σε ζεύξεις με μεγάλο πλήθος ενισχυτών. Για το λόγο αυτό ακολουθείται είτε η διαδικασία εξίσωσης σε κάθε βαθμίδα ενίσχυσης είτε η εισαγωγή προσμίξεων που μορφοποιούν το φασματικό προφίλ της απολαβής. Υπάρχουν και άλλα είδη ενισχυτών όπως οι ενισχυτές προσμίξεων πραιοδουμίου που είναι κατάλληλοι για την περιοχή των 1.3 μm , οι ημιαγωγικοί οπτικοί

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

ενισχυτές (semiconductor optical amplifiers, SOA) και οι ενισχυτές που χρησιμοποιούν το φαινόμενο Raman. Τελευταία έχουν προταθεί και οι παραμετρικοί ενισχυτές για τους οποίους θα μιλήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο, καθώς και συνδυαστικές δομές παραμετρικών και Raman ενισχυτών [33].

2.2.2 Αντιμετώπιση της χρωματικής διασποράς

Σε υψήρρυθμες ζεύξεις μεγάλου μήκους, η επίδραση της διασποράς κατά τη διάδοση αντισταθμίζεται με την εισαγωγή συστημάτων τα οποία διαθέτουν αρνητική διασπορά. Τέτοια συστήματα είναι η οπτική ίνα αντιστάθμισης της διασποράς (DCF), το φράγμα περίθλασης Bragg σε οπτική ίνα (fiber Bragg grating, FBG), οι συστοιχίες κυματοδηγών (arrayed waveguides, AWG), οι συντονιστές μικροδακτυλίου (micro-ring resonators) [34]-[39] και η αντιστροφή φάσματος στο μέσο της διαδρομής (mid span spectral inversion, SI) [40], [41]. Στα συστήματα διαχείρισης διασποράς συνήθως χρησιμοποιούνται διατάξεις ινών με διαφορετικό πρόσημο διασποράς. Ένα τέτοιο σύστημα εικονίζεται στο σχήμα 2-12. Μια μεγάλη μήκους ζεύξη SMF χωρίζεται σε μικρότερου μήκους τμήματα και κάθε τμήμα SMF συνοδεύεται από ένα τμήμα ίνας με αντίθετο πρόσημο διασποράς (DCF). Το μήκος και η τιμή διασποράς της DCF σχεδιάζονται κατάλληλα ώστε να αντισταθμίζεται η συνολική διασπορά που προκάλεσε η SMF. Με τον τρόπο αυτό η ολική διασπορά είναι μη μηδενική κατά μήκος της ζεύξης, αλλά σχεδόν μηδενίζεται στο τέλος μιας περιόδου διάδοσης. Υπάρχουν και άλλοι τρόποι διαχείρισης διασποράς χρησιμοποιώντας π.χ. τμήματα ινών με μη μηδενική διασπορά, αλλά πολύ μικρότερη από εκείνη των SMF, (non zero dispersion shifted fibers, NZDSF) με ίση και αντίθετη τιμή διασποράς ή τμήματα SMF και NZDSF με τρόπο ώστε στο τέλος της περιόδου διάδοσης η διασπορά να είναι μηδέν.



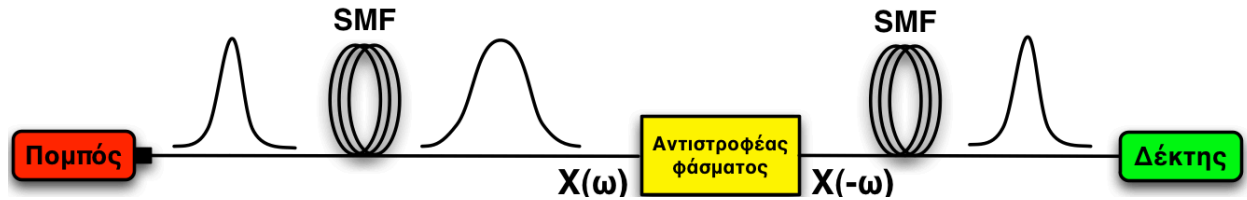
Σχήμα 2-12: Διαχείριση της διασποράς με τη χρήση ινών αντιστάθμισης της διασποράς DCF.

Η μέθοδος αντιστροφής φάσματος χρησιμοποιεί μια αμιγώς οπτική διάταξη στη μέση της ζεύξης η οποία εμφανίζει στην έξοδο της ένα νέο κύμα που είναι ανάλογο με το μιγαδικό συζυγές του εισερχομένου σε αυτή σήματος.

Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει στο νέο κύμα να διαδοθεί στο υπόλοιπο μισό της ζεύξης και να φτάσει στο δέκτη μεταφέροντας την πληροφορία του αρχικού σήματος με ταυτόχρονη ακύρωση των συνεπειών της διασποράς και της μη-γραμμικότητας που συσσωρεύτηκαν στο πρώτο μισό της ζεύξης. Όπως συζητήθηκε στην παράγραφο 2.1.2, εξαιτίας της διασποράς οι διάφορες φασματικές συνιστώσες ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα με συνέπεια τα φασικά τους χαρακτηριστικά να μεταβάλλονται με διαφορετικό τρόπο κατά τη διάδοσή τους. Στην έξοδο της διάταξης αντιστροφής φάσματος οι

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

φασματικές συνιστώσες του νέου κύματος εμφανίζονται με αντίθετες τιμές φάσης εφόσον το νέο κύμα είναι ανάλογο του μιγαδικού συζυγούς του αρχικού σήματος. Όταν αυτό το κύμα διαδοθεί στο υπόλοιπο μισό της ζεύξης η διασπορά της ίνας θα προκαλέσει την ίδια ολίσθηση φάσης που είχε προκαλέσει και στο πρώτο μισό της ζεύξης, μηδενίζοντας εν τέλει τη φασική ολίσθηση κάθε φασματικής συνιστώσας. Τελικά στο δέκτη οι φασματικές συνιστώσες καταφθάνουν χωρίς διαφορά φάσης δηλαδή χωρίς καθυστέρηση και επομένως δεν διασπείρεται η ενέργεια του παλμού στο χρόνο (σχήμα 2-13).



Σχήμα 2-13: Αντιμετώπισης της διασποράς με χρήση αμιγώς οπτικής αντιστροφής φάσματος.

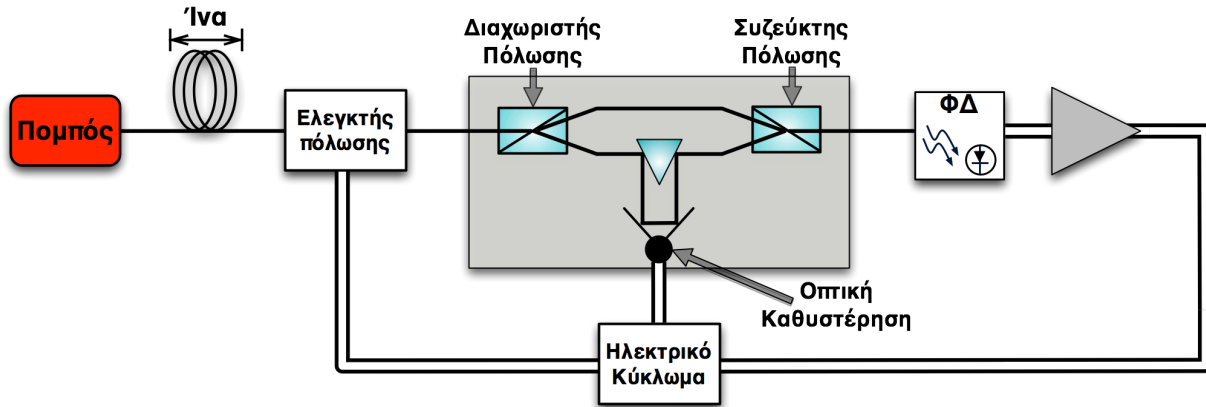
Κατ' αναλογία, η διάταξη αντιστροφής μπορεί να αντισταθμίσει εν μέρει και την επίδραση της μη γραμμικότητας. Έστω φ_{NL} η ολίσθηση φάσης λόγω της μη γραμμικότητας κατά τη διάδοση στο πρώτο μισό της ζεύξης. Στην έξοδο της διάταξης αντιστροφής εμφανίζεται $-\varphi_{NL}$ και η διάδοση στο άλλο μισό της ζεύξης προκαλεί ξανά φ_{NL} ολίσθηση, έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι μηδέν. Η αλήθεια είναι ότι αυτό γίνεται ιδανικά μόνο στην περίπτωση που η εξασθένηση του μέσου είναι μηδενική. Σε πραγματικές οπτικές ίνες αυτό δεν ισχύει οπότε και η αντιστάθμιση της μη γραμμικότητας πραγματοποιείται εν μέρει.

2.2.3 Αντιμετώπιση της διασποράς τρόπων πόλωσης

Το πρόβλημα της PMD σήμερα αντιμετωπίζεται με βελτιστοποίηση της διαδικασίας κατασκευής της ίνας, ώστε ο συντελεστής PMD να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Το πρόβλημα της PMD στην περίπτωση ήδη εγκατεστημένων ζεύξεων αντιμετωπίζεται στο δέκτη είτε με οπτική αντιστάθμιση είτε με ηλεκτρική αντιστάθμιση [42].

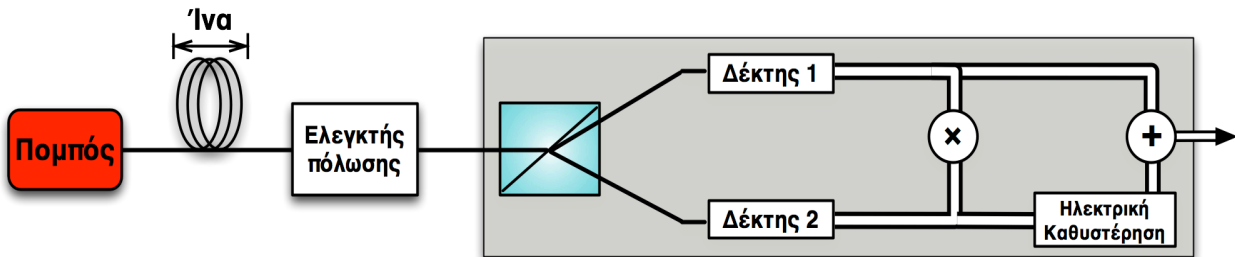
Μία σύγχρονη μέθοδος οπτικής αντιστάθμισης [43] φαίνεται στο σχήμα 2-14. Στην είσοδο του δέκτη βρίσκεται διάταξη η οποία έχει έναν ηλεκτρικά ελεγχόμενο ελεγκτή πόλωσης. Στην έξοδο του ελεγκτή πόλωσης το λαμβανόμενο σήμα χωρίζεται σε δύο κάθετες μεταξύ τους πολώσεις. Η μία πολωτική κατάσταση καθυστερεί ως προς την άλλη με μεταβολή του μήκους διαδρομής της μίας πολωτικής κατάστασης. Έτσι εξασφαλίζεται μια βέλτιστη καθυστέρηση της μιας πόλωσης ως προς την άλλη που είναι ακριβώς (ή περίπου ακριβώς) αντίθετη με την καθυστέρηση που επιβλήθηκε από την PMD της ίνας. Ως μέτρο αξιολόγησης χρησιμοποιείται η επίδοση ως προς την πιθανότητα σφάλματος. Ταυτόχρονα παράγονται ηλεκτρικά σήματα (που εξαρτώνται από την επίδοση ως προς το BER) τα οποία ρυθμίζουν τον ελεγκτή πόλωσης στην είσοδο έτσι ώστε να στρέψουν το επίπεδο πόλωσης του λαμβανόμενου φωτός για να συμπέσει με τους κύριους άξονες της διάταξης διαχωρισμού πόλωσης και καθυστέρησης των δύο πολωτικών καταστάσεων.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 2-14: Μια σύγχρονη μέθοδος οπτικής αντιστάθμισης της PMD.

Μία απλή μέθοδος ηλεκτρικής αντιστάθμισης φαίνεται στο σχήμα 2-15. Πάλι χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρικά ελεγχόμενος ελεγκτής πόλωσης και ένας διαχωριστής πολωτικής κατάστασης ο οποίος οδηγεί το οπτικό σήμα σε δύο δέκτες. Το ηλεκτρικό σήμα του ενός δέκτη καθυστερεί ως προς το άλλο με μία μεταβλητή ηλεκτρική καθυστέρηση. Τα δύο σήματα προστίθενται και γίνεται φώραση του σήματος. Η βέλτιστη καθυστέρηση είναι εκείνη που ελαχιστοποιεί το BER ενώ και πάλι παράγονται ηλεκτρικά σήματα για να στραφεί η πόλωση του εισερχομένου οπτικού σήματος στους κύριους άξονες του διαχωριστή πόλωσης.



Σχήμα 2-15: Μια σύγχρονη μέθοδος ηλεκτρικής αντιστάθμισης της PMD.

2.2.4 Αντιμετώπιση των μη γραμμικών φαινομένων

Παρά την πολύ μικρή τιμή του παράγοντα η_2 τα μη γραμμικά φαινόμενα μπορούν να γίνουν αισθητά ακόμα και για χαμηλές τιμές οπτικής ισχύος (mW), εξαιτίας της χαμηλής εξασθένησης και της μικρής ενεργού περιοχής του πυρήνα. Όσο πιο μεγάλη είναι η διατομή του πυρήνα τόσο πιο μικρή θα είναι η χωρική πυκνότητα ισχύος και τόσο λιγότερο επιβλαβής θα είναι η επίδραση των μη γραμμικοτήτων. Με βάση αυτή τη λογική οι σχεδιαστές πρότειναν την ίνα τύπου LEAF (large effective area fiber) η οποία έχει μεγαλύτερη ενεργό διατομή πυρήνα και ελαχιστοποιεί την επίδραση των μη γραμμικοτήτων κατά τη μετάδοση πολλών χρωματικών καναλιών [44]- [46]. Εκτός από τη σχεδίαση LEAF υπάρχουν και άλλοι τρόποι για την αποφυγή των μη γραμμικών φαινομένων και εξαρτώνται από τη φύση των φαινομένων.

Η επίδραση του FWM στην περίπτωση WDM μετάδοσης σε SMF παρότι είναι μικρή δεν μπορεί να αποφευχθεί παρά μόνο με πολυπλεξία πόλωσης ή εφαρμογή διαμόρφωσης της φάσης ή της συχνότητας [47]. Στην περίπτωση μετάδοσης σε DSF, όπου το FWM είναι πιο ισχυρό η λύση είναι η εφαρμογή άνισων αποστάσεων συχνότητας μεταξύ των WDM καναλιών [48]. Το κατώφλι SBS μπορεί να προσεγγίσει υψηλές τιμές επιτρέποντας τη διάδοση ισχυρότερων κυμάτων αν εφαρμοστεί μια διαμόρφωση χαμηλής συχνότητας στο ρεύμα του laser εκπομπής ή μια διαμόρφωση στη φάση όπως θα δούμε παρακάτω στο κεφάλαιο 3. Το φαινόμενο SRS που μεταφέρει ενέργεια από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα μήκη κύματος κανάλια αντιμετωπίζεται σε συνδυασμό με

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

την αντιμετώπιση της μη επίπεδης απόκρισης των EDFA κατά μήκος της ζεύξης με εξίσωση ισχύος των διαφόρων μεταδιδόμενων WDM καναλιών [49].

Αξίζει να υπενθυμίσουμε ότι η μέθοδος αντιστροφής φάσματος η οποία έχει προταθεί για την αντιστάθμιση διασποράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αντιστάθμιση της παραμόρφωσης λόγω των μη γραμμικών φαινομένων όπως ήδη αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο.

2.3 Εξίσωση διάδοσης κυμάτων σε οπτική ίνα και μέθοδοι προσομοίωσης

Η μη-γραμμική εξίσωση του Schrödinger (non-linear Schrödinger equation, NLSE) περιγράφει πλήρως την επίδραση της πλειοψηφίας των φαινομένων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις που περιγράφουν τη διάδοση των κυμάτων σε οπτική ίνα είτε λαμβάνουν υπόψη ένα τρόπο πόλωσης αγνοώντας τη διπλοθλαστικότητα και τη διασπορά πόλωσης, είτε δύο τρόπους πόλωσης στην περίπτωση που τα φαινόμενα αυτά δεν μπορούν να αγνοηθούν. Η NLSE προκύπτει με τη βοήθεια της βασικής ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας [20]. Στην περίπτωση της θεώρησης ενός τρόπου πόλωσης αποδεικνύεται ότι η περιβάλλουσα του ηλεκτρικού πεδίου ικανοποιεί την παρακάτω εξίσωση διάδοσης:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{a}{2} \cdot A - \frac{i}{2} \cdot \beta_2 \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i \cdot \gamma \cdot |A|^2 \cdot A + \frac{1}{6} \cdot \beta_3 \cdot \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} - i \cdot \gamma \cdot T_R \cdot A \cdot \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \quad (2.27)$$

Στην παραπάνω σχέση η $A(z,t)$ παριστάνει την αργή περιβάλλουσα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η χρονική παράμετρος T προκύπτει από το μετασχηματισμό $T = t - z / v_g = t - \beta_1 \cdot z$. Με τη χρήση αυτής της χρονικής μεταβλητής το χρονικό παράθυρο παρατήρησης του παλμού ταξιδεύει με την ταχύτητα ομάδας. Ο παράγοντας γ παριστάνει την επίδραση της μη γραμμικότητας που δίνεται από την έκφραση:

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega_0}{c \cdot A_{eff}} \quad (2.28)$$

όπου A_{eff} είναι η ενεργός διατομή του πυρήνα. Ο όρος που είναι ανάλογος του $\partial |A|^2 / \partial t$ σχετίζεται με το φαινόμενο SRS. Ο παράγοντας T_R με τη σειρά του σχετίζεται με την κλίση της απολαβής Raman (σχήμα 2-8) και παίρνει τιμές της τάξεως 2-4 fsec όπως προκύπτει από πειραματικές μετρήσεις. Η σταθερά διάδοσης συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση με τους όρους της διασποράς β_2, β_3 σύμφωνα με την ανάπτυξη κατά Taylor:

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 \cdot (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \cdot \beta_2 \cdot (\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \cdot \beta_3 \cdot (\omega - \omega_0)^3 + \frac{1}{24} \cdot \beta_4 \cdot (\omega - \omega_0)^4 + \dots \quad (2.29)$$

Στις τυπικές μονότροπες ίνες η προσέγγιση της σταθεράς διάδοσης μέχρι και τη δεύτερη τάξη της διασποράς είναι αρκετά ακριβής, αφού αυτή καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από τη συχνότητα. Αν η οπτική ίνα είναι DSF, η μικρή τιμή της δεύτερης τάξης διασποράς επιβάλλει να συμπεριληφθεί η τρίτης τάξης διασπορά, ώστε να πραγματοποιηθεί η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

σταθεράς διάδοσης. Η τέταρτης τάξης διασπορά συμπεριλαμβάνεται μόνο στην περίπτωση της προσομοίωσης του φαινομένου FWM και όταν τα αρχικά κύματα είναι αρκετά απομακρυσμένα στο φάσμα, όπως θα δούμε και στο τέταρτο κεφάλαιο. Στην εξίσωση, δεν εμφανίζονται καθόλου οι όροι β_0, β_1 . Ο πρώτος αφενός απαλείφεται λόγω του ότι η εξίσωση αφορά την αργά μεταβαλλόμενη περιβάλλουσα του πεδίου και όχι συνολικά αυτό. Ο δεύτερος συγχωνεύεται στο χρόνο T μέσω του μετασχηματισμού $T = t - z/u_g = t - \beta_1 \cdot z$ που σχολιάστηκε παραπάνω.

Η 2.27 είναι η εξίσωση διάδοσης της περιβάλλουσας του πεδίου που προκύπτει μετά από προσεγγίσεις και οι όροι της δεν περιγράφουν όλα τα φαινόμενα που είναι παρόντα στις οπτικές ίνες. Δεν λαμβάνει υπ' όψιν της το φαινόμενο SBS, ενώ επιπλέον ισχύει ικανοποιητικά για μικρό φασματικό εύρος σχετικά με την οπτική συχνότητα ($\Delta\omega/\omega_0 \ll 1$). Έτσι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή σήματος διαμορφωμένου με πολύ στενούς παλμούς (<0.1 psec).

Στην περίπτωση που ληφθούν υπ' όψιν και οι δύο πολώσεις του κύματος που διαδίδεται, ειδικά όταν τα φαινόμενα της διπλοθλαστικότητας και της PMD είναι παρόντα, τότε η εξίσωση 2.27 πρέπει να γραφεί τόσο για τη x -συνιστώσα του πεδίου όσο και για την y . Η απλοποιημένη μορφή της 2.27 για διάδοση τόσο x όσο και y πολωμένων κυμάτων χωρίς να λαμβάνεται το φαινόμενο SRS και διασπορές ανώτερης τάξης από τη δεύτερη:

$$\frac{\partial A_x}{\partial z} = -\frac{a}{2} \cdot A_x - \frac{d}{2} \frac{\partial A_x}{\partial T} - \frac{i}{2} \cdot \beta_2 \cdot \frac{\partial^2 A_x}{\partial T^2} + i \cdot \gamma \cdot \left[|A_x|^2 + \frac{2}{3} \cdot |A_y|^2 \right] \cdot A_x \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial A_y}{\partial z} = -\frac{a}{2} \cdot A_y - \frac{d}{2} \frac{\partial A_y}{\partial T} - \frac{i}{2} \cdot \beta_2 \cdot \frac{\partial^2 A_y}{\partial T^2} + i \cdot \gamma \cdot \left[|A_y|^2 + \frac{2}{3} \cdot |A_x|^2 \right] \cdot A_y \quad (2.31)$$

όπου d η διαφορά των αντίστροφων ταχυτήτων όμαδας που σχετίζεται με τη διπλοθλαστικότητα της ίνας με βάση τη σχέση:

$$d = \Delta\beta_1 = \beta_{1,y} - \beta_{1,x} = \frac{1}{u_{g,y}} - \frac{1}{u_{g,x}} = \frac{\Delta n}{c} \quad (2.32)$$

Οι εξισώσεις 2.30 και 2.31 εφαρμόζονται άμεσα για την αριθμητική προσομοίωση της οπτικής ίνας που έχει σταθερή διαμήκη διπλοθλαστικότητα. Στην περίπτωση που θέλουμε να προσομοιώσουμε την PMD, θα πρέπει ανά διαστήματα να επιβάλλουμε μία τυχαία στροφή της πόλωσης, ώστε η διπλοθλαστικότητα να είναι τυχαία κατά το μήκος της διάδοσης. Η ίνα θεωρείται σαν μία επαλληλία διαδοχικών τμημάτων μήκους dz_{PMD} , που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένη διπλοθλαστικότητα. Ο προσανατολισμός της διπλοθλαστικότητας μεταβάλλεται τυχαία ανά dz_{PMD} κατά μία γωνία θ ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Η απότομη μεταβολή της κατάστασης πόλωσης έχει σαν αποτέλεσμα την τυχαία μεταβολή της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο τρόπων πόλωσης. Για αυτό το λόγο, μετά από κάθε τυχαία στροφή των αξόνων, θα πρέπει να εισάγεται και μία τυχαία διαφορά φάσης φ μεταξύ των συνιστωσών A_x, A_y [50]. Ο μετασχηματισμός που πρέπει να επιβάλλεται μεταξύ των δύο συνιστωσών στο τέλος κάθε τμήματος μήκους dz_{PMD} δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$\begin{bmatrix} A'_x \\ A'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \cdot e^{i\varphi} \\ -\sin\theta \cdot e^{-i\varphi} & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Για την ικανοποιητική περιγραφή των επιπτώσεων της PMD θα πρέπει το βήμα dz_{PMD} να είναι μικρό, της τάξης των 100 m για την καλύτερη περιγραφή της τυχαίας διαμήκουσ αλλαγής της διπλοθλαστικότητας. Ο συντελεστής δ_τ της PMD μπορεί να συμπεριληφθεί στις εξισώσεις 2.30-2.31, καθώς δίνεται από την έκφραση [51]:

$$\delta_\tau = \sqrt{\frac{8}{3\pi}} \cdot \frac{\Delta n}{c} \cdot \sqrt{dz_{PMD}} \quad (2.34)$$

Η αριθμητική προσομοίωση της NLSE και στις δύο περιπτώσεις γίνεται με τη βοήθεια της μεθόδου Split-Step Fourier όπως περιγράφεται στην αναφορά [20]. Παρόλο που η μέθοδος είναι σχετικά απλή στην υλοποίησή της, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή των βημάτων της απόστασης z και του χρόνου T . Αν και βασικές οδηγίες έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία [52], πολλές φορές είναι απαραίτητο να επαναληφθούν οι υπολογισμοί με μικρότερο βήμα και στις δύο διαστάσεις για την εξασφάλιση της ακρίβειας. Ιδιαίτερης μέριμνας χρίζει η επιλογή του χρονικού παραθύρου, ώστε να εξασφαλισθεί ότι η ενέργεια του σήματος είναι καλά ορισμένη σε αυτό. Αν η ενέργεια του σήματος διασπείρεται ταχέως και υπερβεί τα όρια του παραθύρου, μοιραία αυτό θα οδηγήσει σε αριθμητικές αστάθειες, καθώς αυτό το μέρος της ενέργειας θα εμφανισθεί στο άλλο άκρο του παραθύρου. Η χρήση του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) επιβάλλει περιοδικές οριακές συνθήκες, οπότε απαιτείται και η χρήση μεγάλου παραθύρου που εξασφαλίζει ότι η ενέργεια δεν προσεγγίζει τα όρια του.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές
υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

3. Συστήματα Διαμόρφωσης

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέραμε ότι η απλότητα της αρχιτεκτονικής και το χαμηλό κόστος υλοποίησης του συστήματος διαμόρφωσης κατά πλάτος (amplitude shift keying, ASK) σε συνδυασμό με την ευρεία χρήση των EDFA και του WDM συστήματος μετάδοσης, καθιέρωσαν την ASK ως την καταλληλότερη διαμόρφωση για τα οπτικά δίκτυα έως τα τέλη της δεκαετίας του 1990. Ωστόσο, για μεγάλα μήκη διάδοσης, η αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών καναλιών μιας WDM μετάδοσης αυξάνει, διεγείροντας την έναυση μη γραμμικών φαινομένων, με κυριότερο αυτό της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM). Η αύξηση του μήκους της οπτικής διάδοσης καθώς επίσης και η αύξηση του αριθμού των WDM καναλιών που επιβάλλουν οι σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις οδήγησαν στην αξιοποίηση των ανθεκτικότερων, στην επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων, σχημάτων διαμόρφωσης φάσης [53]. Έτσι λοιπόν, το ενδιαφέρον για τα σύμφωνα συστήματα επικοινωνιών αναζωπυρώθηκε και διαμορφώσεις όπως το διαφορικό PSK (differential PSK, DPSK) και το QPSK, άρχισαν να υιοθετούνται στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα από το 2005 και ύστερα, με κύρια εφαρμογή σε μεγάλων αποστάσεων οπτικές ζεύξεις (π.χ υποθαλάσσιες). Παράλληλα, η έρευνα για αύξηση των επιδόσεων οδήγησε σε νέες ιδέες για τη βελτίωση της αρχιτεκτονικής των PSK δεκτών αλλά και σε νέα σχήματα διαμόρφωσης με αυξημένη φασματική απόδοση και βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας στις επιδράσεις της οπτικής μετάδοσης.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιάσουμε τα βασικά είδη διαμορφώσεων που αυτή τη στιγμή χρησιμοποιούνται στα οπτικά δίκτυα κοντινών και μεγάλων αποστάσεων, μελετώντας την αρχιτεκτονική και τις επιδόσεις των πομποδεκτών, καθώς επίσης και τη φασματική απόδοση και την ανθεκτικότητα στις επιβλαβείς επιδράσεις της οπτικής διάδοσης που παρουσιάζουν οι συγκεκριμένες διαμορφώσεις.

3.1 Διαμόρφωση κατά πλάτος (ASK)

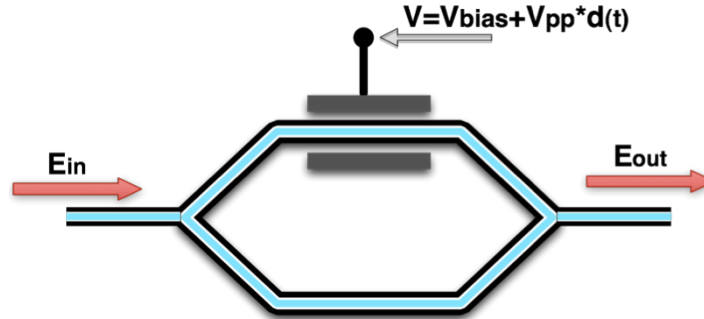
3.1.1 Χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης ASK και αρχιτεκτονική του πομπού

Η διαμόρφωση πλάτους ενός οπτικού σήματος μπορεί να επιτευχθεί είτε άμεσα, διαμορφώνοντας το ρεύμα τροφοδοσίας του laser, είτε έμμεσα, διαμορφώνοντας εξωτερικά την οπτική ένταση του σήματος χρησιμοποιώντας είτε ακουστο-οπτικούς [54], [55] είτε ηλεκτρο-οπτικούς διαμορφωτές πλάτους [54], [56]. Η άμεση διαμόρφωση χρησιμοποιήθηκε εκτενώς τα πρώτα χρόνια της επανάστασης των οπτικών επικοινωνιών, λόγω της ευκολίας στην υλοποίηση, αλλά υπέφερε από περιορισμένο εύρος ζώνης, το οποίο ήταν εξαρτημένο από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του πομπού (συχνότητα ταλαντώσεων αποκατάστασης) [54], [57]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ακόμα και στις μέρες μας, κυρίως σε εφαρμογές χαμηλών ρυθμών (<10 Gb/s) και κόστους [58].

Οι εξωτερικοί διαμορφωτές πλάτους από την άλλη επιδεικνύουν αυξημένες επιδόσεις, αφού δεν παρουσιάζουν φαινόμενα chirp και οι ρυθμοί διαμόρφωσης που προσφέρουν είναι ανεξάρτητοι των δυναμικών χαρακτηριστικών της πηγής laser, φθάνοντας μέχρι και τα 40 Gb/s. Οι πιο διαδεδομένες και εμπορικά διαθέσιμες υλοποιήσεις είναι οι ηλεκτρο-οπτικοί διαμορφωτές νιοβικού λιθίου (LiNbO_3) σε τοπολογία συμβολομέτρου Mach-Zehnder (Mach-Zehnder modulator, MZM), οι οποίοι στηρίζονται στο ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο Pockels [56], κατά το οποίο ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού εξαρτάται από την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του. Η αλλαγή του δείκτη διάθλασης οδηγεί σε αλλαγή της φάσης του διαδιδόμενου, μέσω του υλικού, οπτικού πεδίου. Έτσι, χρησιμοποιώντας την τοπολογία που απεικονίζεται στο σχήμα 3-1, επιτυγχάνεται η μετατροπή των διακυμάνσεων φάσης, τις οποίες επιβάλλει το εξωτερικά εφαρμοζόμενο

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

ηλεκτρικό πεδίο, σε πλάτος, μέσω της καταστρεπτικής και ενισχυτικής συμβολής των διαφορετικής φάσεως κυμάτων των δύο βραχιόνων. Οι συγκεκριμένοι διαμορφωτές έχουν σχετικά υψηλό κόστος υλοποίησης και διαθέτουν αρκετά μεγάλο μήκος (~4 cm), απαγορευτικό για την μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσή τους. Ωστόσο, οι αρκετά μεγάλοι ρυθμοί που μπορούν να υποστηρίξουν τους καθιστούν ιδανικούς για τη χρήση τους σε υψήρρυθμες και υψηλής ποιότητας εφαρμογές.



Σχήμα 3-1: Απεικόνιση της διάταξης ενός εξωτερικού διαμορφωτή πλάτους MZM.

Η χαρακτηριστική μεταφοράς του MZM έχει τη μορφή ημιτόνου (σχ. 3-2α) και η γραμμική περιοχή της περιγράφεται από την παρακάτω έκφραση:

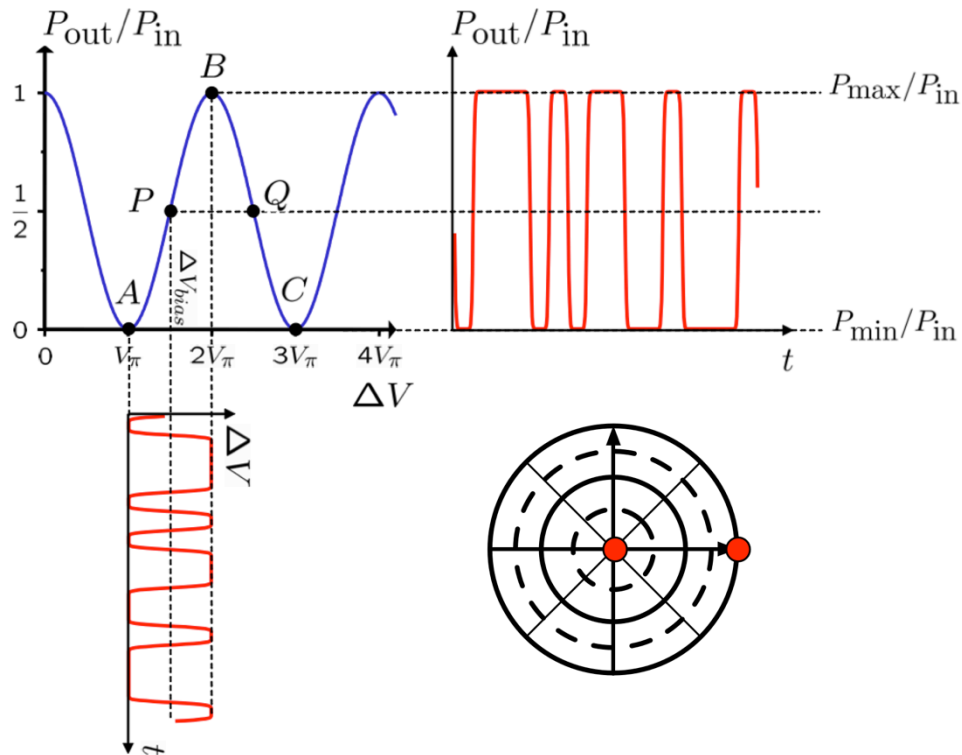
$$E_{out(t)} = E_{in(t)} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2V_{\pi}} (V_{bias} + 2V_{pp} \cdot d(t)) \right] \quad (3.1)$$

όπου E_{in} και E_{out} είναι η οπτική ένταση του πεδίου στην είσοδο και στην έξοδο του ενισχυτή, V_{π} είναι η τάση μισού κύματος του διαμορφωτή, η οποία αντιστοιχεί στην τάση που απαιτείται για μεταβολή της φάσης του οπτικού πεδίου κατά π , V_{pp} είναι το από κορυφή-σε-κορυφή (peak-to-peak) πλάτος της τάσης της κυματομορφής πληροφορίας και V_{bias} είναι η τάση πόλωσης που εφαρμόζεται στον ακροδέκτη του διαμορφωτή. Η χρονοσειρά της δυαδικής πληροφορίας (ακολουθία άσπων και μηδενικών) που οδηγεί την πηγή τάσης δίνεται από τη μεταβλητή $d(t)$. Η ρύθμιση του σημείου λειτουργίας του διαμορφωτή επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επιλογή των προαναφερθέντων τάσεων ώστε ο διαμορφωτής να λειτουργεί πάντα εντός της γραμμικής περιοχής και έτσι να αποφεύγονται οποιεσδήποτε διακυμάνσεις πλάτους. Στο σχήμα 3-2 απεικονίζεται ο μηχανισμός μεταφοράς της πληροφορίας μιας τυχαίας παλμοσειράς στο πλάτος του εισερχόμενου στον διαμορφωτή οπτικού πεδίου καθώς και ο αστερισμός που αντιστοιχεί στο εξερχόμενο ASK σήμα.

Χαρακτηριστική παράμετρος των διαμορφωμένων κατά πλάτος σημάτων, η οποία θα παίξει σημαντικό ρόλο στη μελέτη της DPSK/ASK διαμόρφωσης που παρουσιάζεται στο έκτο κεφάλαιο, είναι ο ονομαζόμενος λόγος σβέσης (extinction ratio, ER), ο οποίος αντιστοιχεί στη διαφορά οπτικής ισχύος μεταξύ του «άσπου» (P_1) και του «μηδέν» (P_0) της πληροφορίας πλάτους και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E.R = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_0} \quad (3.2)$$

Ο λόγος σβέσης όπως εύκολα κανείς μπορεί να συμπεράνει μελετώντας την σχέση 3.1 και παρατηρώντας το σχήμα 3-2, εξαρτάται και ρυθμίζεται από τις τάσεις V_{pp} και V_{bias} .



Σχήμα 3-2: Απεικόνιση της χαρακτηριστικής μεταφοράς ενός MZM και του αστερισμού του σήματος που προκύπτει στην έξοδό του.

Η εξίσωση 3.1 θα χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο μοντέλο του διαμορφωτή πλάτους που υλοποιούμε στα πλαίσια της αριθμητικής μελέτης του κεφαλαίου 6.

Η μορφή του ASK σήματος που απεικονίζεται στο σχήμα 3-2 αποτελεί την τυπική non-return-to-zero παλμοσειρά (NRZ) κατά την οποία συνεχόμενες αλληλουχίες «άσων» ή «μηδενικών» οδηγούν στην εξαγωγή ενός ενιαίου παλμού χρονικής διάρκειας ίσης με άθροισμα των περιόδων των επιμέρους παλμών. Οι συνεχόμενες αλληλουχίες «άσων» και «μηδενικών» έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης ισχύος μετάδοσης, οδηγώντας σε διέγερση των μη γραμμικών φαινομένων κατά τη διάδοση μεγάλων αποστάσεων, ενώ ταυτόχρονα δυσχαιρένεται ο συγχρονισμός στον δέκτη.

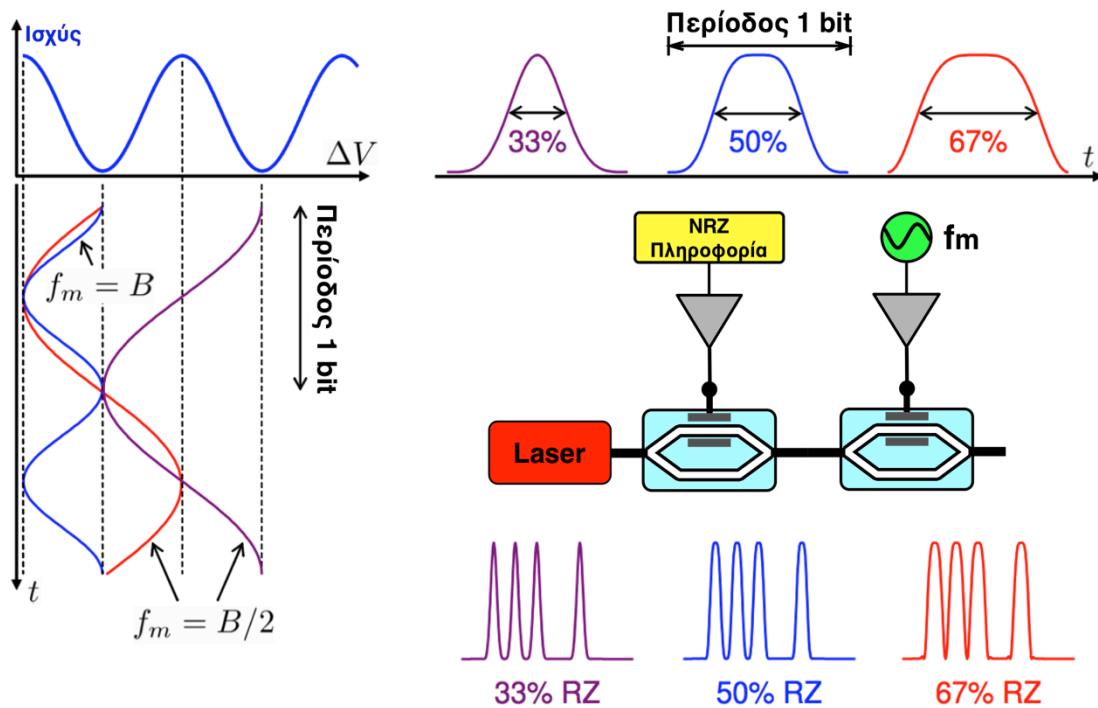
Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιείται η return-to-zero (RZ) μορφοποίηση παλμών (pulse carving), κατά την οποία κάθε παλμός αποκτά περίοδο μικρότερη από αυτήν που αντιστοιχεί στο ρυθμό πληροφορίας. Έτσι, η μέση ισχύς μετάδοσης μειώνεται ενώ ανακτάται ευκολότερο ο συγχρονισμός στον δέκτη. Για την υλοποίηση της RZ-ASK διαμόρφωσης απαιτείται ένας δεύτερος MZM, ο οποίος τροφοδοτείται με μία ημιτονική τάση στον ακροδέκτη του, η συχνότητα, το πλάτος και η μέση τιμή της οποίας επιλέγονται κατάλληλα ώστε να οδηγούν στην εξαγωγή παλμών με περίοδο ίση με το 33%, το 50% ή το 67% του ρυθμού δεδομένων. Οι συγκεκριμένες τιμές είναι επιλεγμένες με βάση τα πρότυπα της ITU (international telecommunication union).

Ένας τυπικός RZ-ASK πομπός απεικονίζεται στο σχήμα 3-3, στο οποίο είναι εμφανής η διαδικασία της μορφοποίησης των παλμών με βάση τη χρησιμοποιούμενη ημιτονική συχνότητα.

Βέβαια, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η RZ-ASK διαμόρφωση, όπως είναι αναμενόμενο, συνοδεύονται και από κάποιο κόστος. Έτσι, πέρα από την σχετικά μικρή αλλά παρόλα αυτά αυξημένη πολυπλοκότητα που εισάγεται στον πομπό, η RZ μορφοποίηση επιφέρει και μία διεύρυνση του φάσματος του σήματος, ανάλογη του

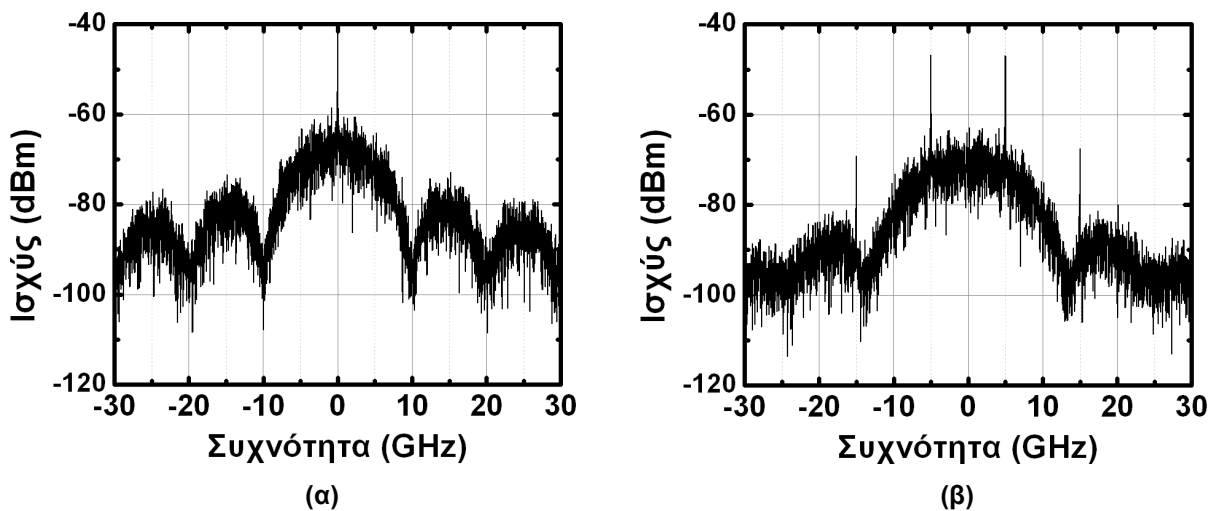
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

χρονικού εύρους των παλμών, η οποία οδηγεί σε μείωση της φασματικής του απόδοσης.



Σχήμα 3-3: Απεικόνιση του πομπού ενός RZ-ASK σήματος καθώς επίσης και του μηχανισμού μορφοποίησης παλμών μέσω της ημιτονικής συχνότητας που οδηγεί τον δεύτερο MZM.

Στο σχήμα 3-4 απεικονίζονται τα οπτικά φάσματα ενός 10 Gb/s NRZ-ASK (σχ. 3-4α) και ενός 10 Gb/s RZ-ASK σήματος με χρονικό εύρος παλμών 67% (σχ. 3-4β). Όπως παρατηρούμε ενώ το οπτικό φάσμα που αντιστοιχεί στους NRZ παλμούς καλύπτει το διπλάσιο εύρος ζώνης (20 GHz) από το αντίστοιχο σήμα βασικής ζώνης (10 GHz), το φάσμα των RZ παλμών διευρύνεται καλύπτοντας περίπου 1.5 φορά μεγαλύτερο εύρος ζώνης.



Σχήμα 3-4: Απεικόνιση του οπτικού φάσματος ενός 10 Gb/s NRZ-ASK (α) και ενός 10 Gb/s RZ-ASK σήματος με εύρος παλμών 67% (β). Στο σχήμα (β) είναι εμφανής η διεύρυνση του φάσματος λόγω της RZ μορφοποίησης των παλμών.

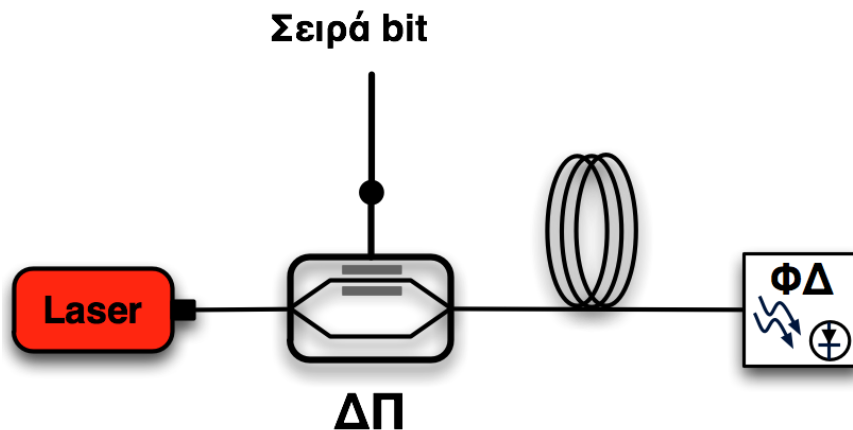
Στην πράξη το NRZ-ASK σχήμα διαμόρφωσης χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των εμπορικά διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με πολυπλεξία μήκους κύματος

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

για ρυθμούς που φθάνουν έως και 10 Gb/s ανά κανάλι. Αντίθετα το σχήμα της RZ-ASK διαμόρφωσης αποτελεί τη μοναδική λύση σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα τα οποία επιλέγουν την πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (time division multiplexing, TDM) και τα οποία προσφέρουν αποτελεσματικότερη αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς [59].

3.1.2 Αρχιτεκτονική του δέκτη

Το βασικό πλεονέκτημα της ASK διαμόρφωσης είναι η απλή υλοποίηση του δέκτη, ο οποίος στηρίζεται στην άμεση φώραση του σήματος μέσω μίας και μόνο φωτοδιόδου, ανεξαρτήτως της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης μορφής παλμών (NRZ ή RZ). Η αρχιτεκτονική ενός τυπικού πομπο-δέκτη ASK απεικονίζεται στο σχήμα 3-5, ενώ στο σχήμα 3-6 απεικονίζονται τα διαγράμματα οφθαλμού που αντιστοιχούν στα αποδιαμορφωμένα NRZ-ASK και RZ-ASK σήματα με ρυθμό 10 Gb/s.



Σχήμα 3-5: Απεικόνιση ενός πλήρους ASK πομπο-δέκτη. ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους και ΦΔ: φωτοδίοδος.

Οι βασικοί παράγοντες που υποβιβάζουν την ποιότητα του αποδιαμορφωμένου σήματος στον ASK δέκτη είναι ο θόρυβος βολής (shot noise) και ο θερμικός θόρυβος (thermal noise) της φωτοδιόδου. Ο θόρυβος βολής προκύπτει από την τυχαία παραγωγή των ηλεκτρονίων κατά τη διαδικασία της φώρασης, η οποία ουσιαστικά οφείλεται στην κβαντική φύση του φωτός. Ο θόρυβος βολής ακολουθεί την κατανομή Poisson με φασματική πυκνότητα ισχύος η οποία δίνεται από την σχέση 3.3.

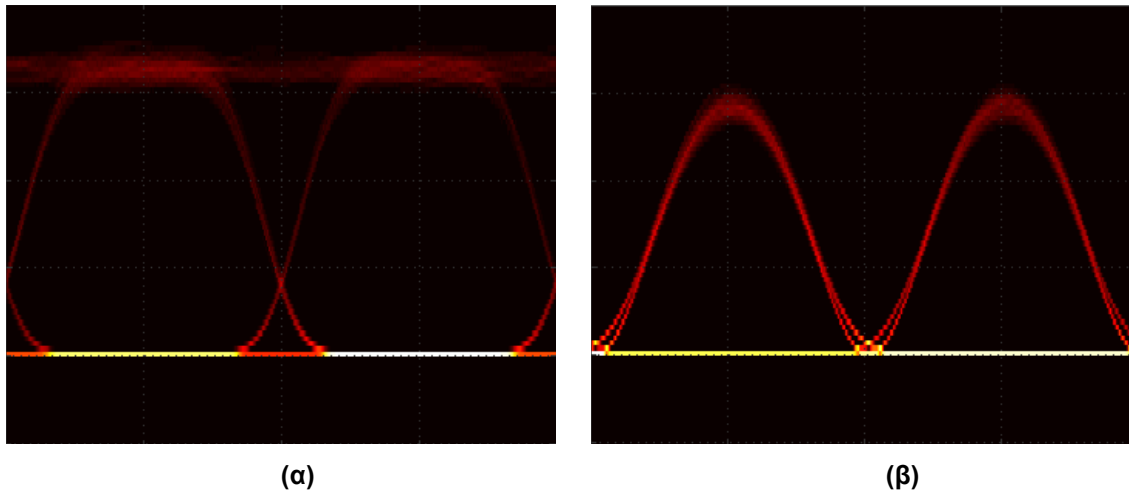
$$S_{shot} = 2 \cdot e \cdot R_{resp} \cdot P_{opt} \quad (3.3)$$

Ο θερμικός θόρυβος οφείλεται στην τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων εντός των ωμικών στοιχείων, με φασματική πυκνότητα ισχύος η οποία ακολουθεί την κατανομή Gauss και δίνεται από τη σχέση 3.4.

$$S_{thermal} = 4 \cdot k_b \cdot \frac{T}{R} \quad (3.4)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου (1.602×10^{-19} C), R_{resp} είναι η αποκρισιμότητα της φωτοδιόδου (συνήθης τιμή ~ 1.5 W/A), P_{opt} είναι η οπτική ισχύς του λαμβανόμενου σήματος (σε W), k_b είναι η σταθερά του Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), T είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος (σε $^{\circ}$ K) και R είναι η αντίσταση εξόδου της φωτοδιόδου, η οποία συνήθως ισούται με 50 Ω .

Οι σχέσεις αυτές λήφθηκαν υπ' όψιν κατά τη μοντελοποίηση των φωτοδίοδων στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη των συστημάτων που παρουσιάζονται στα κεφάλαια 4, 5 και 6.

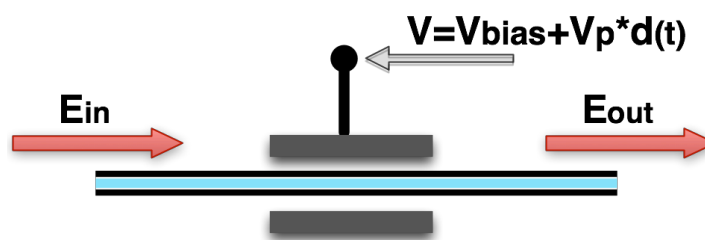


Σχήμα 3-6: Διάγραμμα οφθαλμού ενός 10 Gb/s NRZ-ASK σήματος (α) και ενός 10 Gb/s RZ-ASK σήματος με χρονικό εύρος παλμών 67% (β).

3.2 Δυαδική διαμόρφωση φάσης (BPSK)

3.2.1 Χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης BPSK και αρχιτεκτονική του πομπού

Από την εφεύρεση των ηλεκτρο-οπτικών εξωτερικών διαμορφωτών LiNbO₃ επωφελήθηκαν άμεσα και οι PSK πομποί των οποίων οι επιδόσεις αυξήθηκαν και η πολυπλοκότητα μειώθηκε σημαντικά. Λόγω της άμεσης εξάρτησης της φάσης του διαδιδόμενου οπτικού σήματος από τον δείκτη διάθλασης του ηλεκτρο-οπτικού μέσου, ο σχεδιασμός των εξωτερικών διαμορφωτών φάσης είναι απλούστερος από αυτόν των διαμορφωτών πλάτους. Επομένως ένας και μόνο ελεγχόμενος από τάση ηλεκτρο-οπτικός βραχίονας αρκεί για να διαμορφώσει κατά φάση ένα οπτικό φέρον προσδίδοντάς του ελεγχόμενο βάθος διαμόρφωσης (σχ. 3-7).



Σχήμα 3-7: Απεικόνιση της διάταξης ενός τυπικού εξωτερικού διαμορφωτή φάσης.

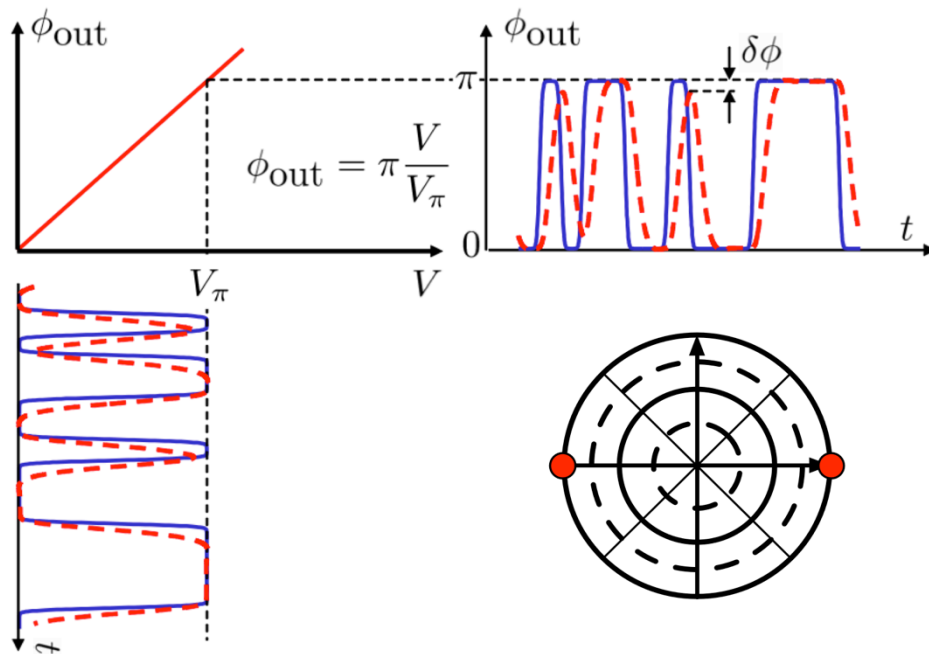
Όπως διακρίνεται από τη χαρακτηριστική μεταφοράς του σχήματος 3-8, ο δείκτης διάθλασης του διαμορφωτή φάσης παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από τις μεταβολές τάσης του ηλεκτρικού πεδίου που οδηγεί τον ηλεκτρο-οπτικό βραχίονα με αποτέλεσμα η φάση του διαμορφωμένου οπτικού πεδίου να δίνεται από την ακόλουθη έκφραση.

$$E_{out} = E_{in} \cdot e^{-j\frac{\pi}{V_{\pi}}V(t)} \quad (3.5)$$

όπου V_{π} είναι η τάση μισού κύματος, που αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο, και $V(t)$ η ροή δεδομένων με μορφή NRZ παλμών τάσης. Όπως εύκολα μπορούμε να συμπεράνουμε, η τάση $V(t)$, η οποία οδηγεί τον διαμορφωτή φάσης, θα πρέπει να είναι κατάλληλου πλάτους ώστε να οδηγήσει σε πλήρη διαμόρφωση του σήματος, δηλαδή σε διαφορά μεταξύ των δύο επαγόμενων φασικών καταστάσεων που

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

ισούται με π . Το μειονέκτημα της απλής αυτής τοπολογίας (σχ. 3-7) είναι ότι οποιαδήποτε διακύμανση τάσης είτε ως προς τον χρόνο είτε ως προς το πλάτος της, οδηγεί σε αντίστοιχη διακύμανση της φάσης, αποτέλεσμα μη επιθυμητό. Για το σκοπό αυτό έχουν σχεδιασθεί διαμορφωτές φάσης που στηρίζονται στην τοπολογία Mach-Zehnder, η ανάλυσή τους όμως ξεφεύγει από το πλαίσιο της παρούσας μελέτης.



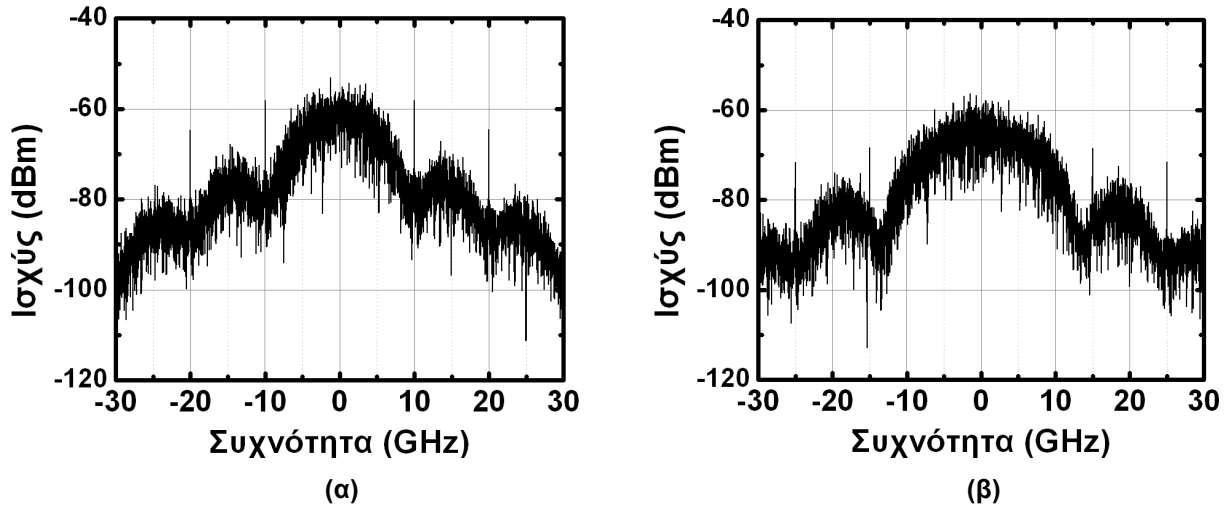
Σχήμα 3-8: Χαρακτηριστική μεταφοράς ενός διαμορφωτή φάσης μονού βραχίονα και ο αντίστοιχος αστερισμός του σήματος εξόδου.

Παρατηρώντας τον αστερισμό του PSK σήματος (σχ. 3-8) και συγκρίνοντάς τον με τον αντίστοιχο του ASK σήματος (σχ. 3-2) διακρίνουμε το βασικό πλεονέκτημα του πρώτου έναντι του δεύτερου σχήματος διαμόρφωσης. Για σταθερή ισχύ του οπτικού σήματος, η ενεργειακή απόσταση μεταξύ των δύο καταστάσεων φάσης είναι διπλάσια από την απόσταση των δύο καταστάσεων πλάτους, γεγονός το οποίο οδηγεί σε αύξηση κατά 6 dB της ευαισθησίας στον δέκτη.

Το PSK σήμα, στην έξοδο ενός ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή που μόλις περιγράψαμε, διαθέτει σταθερή οπτική ισχύ ενώ η φάση του έχει τη μορφή NRZ παλμών. Τα μειονεκτήματα της NRZ διαμόρφωσης που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο επιβαρύνουν και το παρόν σήμα. Για το σκοπό αυτό, και σε αυτή τη διαμόρφωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μορφοποίηση παλμών ώστε το πλάτος του οπτικού PSK σήματος να αποκτήσει τη μορφή RZ παλμών. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη διαδικασία είναι ίδια με αυτά που αναφέραμε για το RZ-ASK σήμα, δηλαδή ευκολότερος συγχρονισμός στον δέκτη και μεγαλύτερη ανθεκτικότητα για διάδοση μεγάλων αποστάσεων. Ο πομπός του RZ-PSK σήματος είναι ίδιος με αυτόν του σχήματος 3-3, μόνο που αντικαθίσταται ο διαμορφωτής πλάτους MZM1 με έναν διαμορφωτή φάσης.

Στο σχήμα 3-9 απεικονίζονται τα φάσματα ενός 10 Gb/s NRZ-PSK και ενός 10 Gb/s RZ-PSK με χρονικό εύρος παλμών ίσο με 67%. Όπως παρατηρούμε το εύρος ζώνης των PSK σημάτων είναι ίδιο με των αντίστοιχων ASK, με τη μόνη διαφορά ότι τα πρώτα παρουσιάζουν συμπίεση του φέροντος.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 3-9: Απεικόνιση του οπτικού φάσματος ενός 10 Gb/s NRZ-PSK (α) και ενός 10 Gb/s RZ-PSK με χρονικό εύρος παλμών ίσο με 67% (β).

3.2.2 Αρχιτεκτονική του δέκτη

Σε αντίθεση με την απλή υλοποίηση της άμεσης φώρασης που χρησιμοποιείται για την αποδιαμόρφωση του ASK σήματος, το PSK σήμα έχει το μειονέκτημα ότι η πληροφορία που βρίσκεται φορτωμένη στη φάση του για να ανιχνευθεί από τον δέκτη θα πρέπει με κάποιο τρόπο να μεταφερθεί στο πλάτος. Η λύση αυτή δόθηκε μέσα από τη χρήση του φαινομένου του διακροτήματος, σύμφωνα με το οποίο το άθροισμα δύο κυμάτων πάνω σε ένα μη γραμμικό μέσο, όπως για παράδειγμα μία φωτοδίοδος, μεταφέρει τα χαρακτηριστικά φάσης των δύο κυμάτων στο πλάτος του παραγόμενου κύματος. Ας δούμε λεπτομερέστερα την παραπάνω διαδικασία μελετώντας ξεχωριστά τις τρεις βασικές υποκατηγορίες PSK δεκτών.

Σύμφωνη φώραση: Ας θεωρήσουμε αρχικά ότι το χρονικά μεταβαλλόμενο οπτικό πεδίο του λαμβανόμενου στον δέκτη PSK σήματος είναι της μορφής :

$$E_{s(t)} = \sqrt{P_s} \cdot \exp[j\omega_{s(t)} - j(\varphi_{s(t)} + \varphi_{n(t)})] \quad (3.6)$$

όπου P_s και $\omega_{s(t)}$ είναι η ισχύς και η συχνότητα του οπτικού σήματος, $\varphi_{s(t)}$ είναι η πληροφορία φάσης και $\varphi_{n(t)}$ είναι ο θόρυβος φάσης.

Στον δέκτη ένας τοπικός ταλαντωτής (local oscillator, LO) (δευτερεύουσα πηγή laser) παράγει ένα οπτικό πεδίο της μορφής:

$$E_{LO(t)} = \sqrt{P_{LO}} \cdot \exp[j\omega_{LO(t)} - j(\varphi_{LO(t)})] \quad (3.7)$$

Όταν τα δύο αυτά πεδία πέσουν πάνω σε μία φωτοδίοδο, τότε το παραγόμενο ρεύμα θα είναι ανάλογο της συνολικής ισχύος που προκύπτει από το άθροισμα των δύο πεδίων, και η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

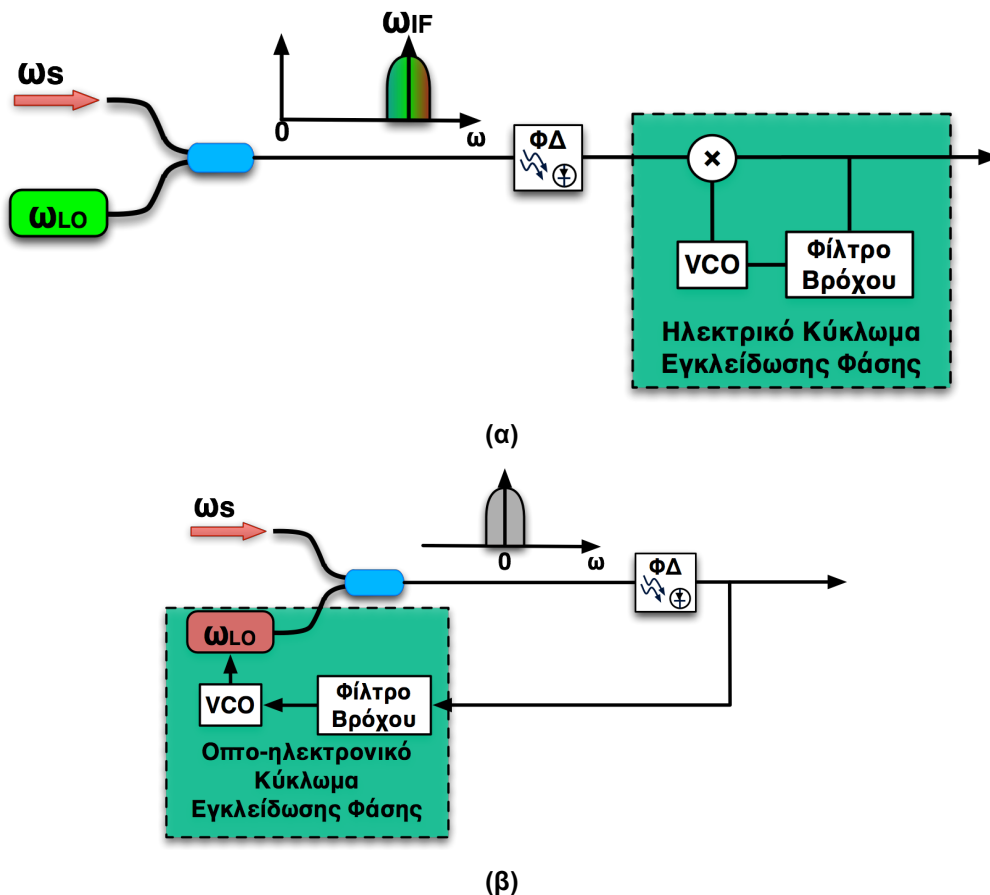
$$P_{tot} = P_s + P_{LO} + 2\sqrt{P_s P_{LO}} \cos[(\omega_s - \omega_{LO})t + \varphi_{s(t)} + \varphi_{n(t)} - \varphi_{LO(t)}] \quad (3.8)$$

Όπως παρατηρούμε από τη σχέση 3.8, το διακρότημα των δύο πεδίων παράγει μία διακύμανση πλάτους η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς των χαρακτηριστικών φάσης των δύο κυμάτων και ανιχνεύεται στη συχνότητα $\omega_s - \omega_{LO}$.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Ανάλογα λοιπόν με τη συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή γίνεται και ο διαχωρισμός των σύμφωνων δεκτών σε ετερόδυνους ($\omega_{LO} \neq \omega_s$) και ομόδυνους ($\omega_{LO} = \omega_s$), οι απλουστευμένες τοπολογίες των οποίων απεικονίζονται στα διαγράμματα του σχήματος 3-10. Στην περίπτωση του ετερόδυνου δέκτη το διακρότητα εμφανίζεται στην ενδιάμεση μικροκυματική συχνότητα (intermediate frequency, IF) $\omega_{IF} = |\omega_s - \omega_{LO}|$, ενώ στην περίπτωση του ομόδυνου δέκτη το αποδιαμορφωμένο σήμα επιστρέφει στη βασική ζώνη.

Όπως εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε μελετώντας τη σχέση 3.8, ο χαρακτηρισμός των δεκτών αυτών ως σύμφωνων έγγυται στην προϋπόθεση κατά την οποία ο τοπικός ταλαντωτής πρέπει να βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με το λαμβανόμενο σήμα, δηλαδή θα πρέπει $\varphi_{n(t)} = \varphi_{LO(t)}$ ώστε στο πλάτος του διακροτήματος να αποτυπώνεται μόνο η ροή πληροφορίας και όχι οι τυχαίες διακυμάνσεις λόγω της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο κυμάτων. Για να επιτευχθεί η συνθήκη συμφωνίας, πολύπλοκα συστήματα εγκλειδωσης φάσης μέσω ηλεκτρονικών (phase locked loop, PLL) [60] και οπτικο-ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (optical phase locked loop, OPLL) [61] χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με πομπούς και τοπικούς οπτικούς ταλαντωτές υψηλών επιδόσεων.



Σχήμα 3-10: Απεικόνιση της βασικής τοπολογίας σύμφωνης ετερόδυνης (α) και ομόδυνης (β) φώρασης για την αποδιαμόρφωση PSK σημάτων. VCO: voltage control oscillator.

Αν στην προηγούμενη συνθήκη συνυπολογίσουμε και την τυχαία χρονική μεταβολή της πώλησης του λαμβανόμενου σήματος κατανοούμε ότι η πολυπλοκότητα των συγκεκριμένων δεκτών αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Αυτός ήταν και ο βασικός λόγος που τα σύμφωνα συστήματα εκπομπής και λήψης δεν χρησιμοποιήθηκαν σε εμπορικές εφαρμογές τις δεκαετίες του 1980 και 1990.

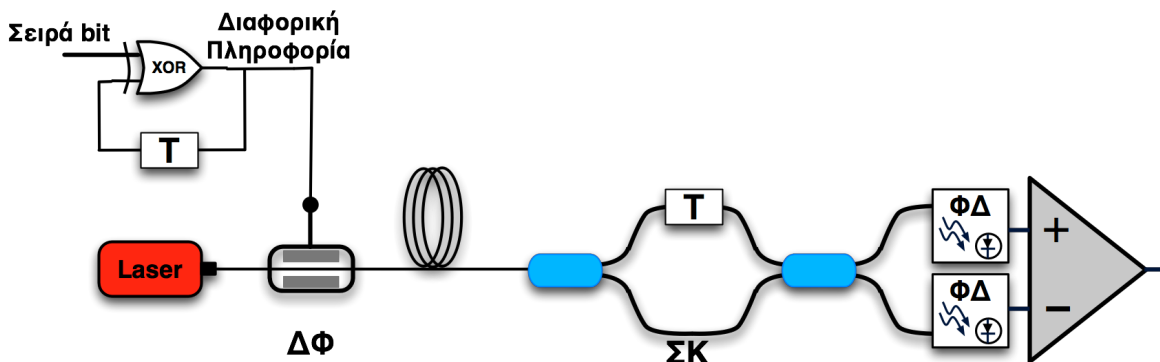
Πρόσφατα μία πολύ ενδιαφέρουσα και αρκετά απλουστευμένη τοπολογία ομόδυνης φώρασης προτάθηκε από τους Chiuchiarelli et al. [62], σύμφωνα με την οποία τα

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

πολύπλοκα κυκλώματα κλειδώματος φάσης και πόλωσης αντικαταστάθηκαν από ένα και μόνο στάδιο εγκλειδωσης φάσης με οπτική έγχυση. Για το σκοπό αυτό, η πληροφορία φάσης κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας τον 8b/10b κώδικα γραμμής [62] ώστε να αναδειχθεί το συμπιεσμένο φέρον του PSK σήματος, το οποίο στη μεριά του δέκτη είναι ικανό να κλειδώσει έναν τοπικό ταλαντωτή μέσω της διαδικασίας της οπτικής εγκλειδωσης φάσης, ώστε αυτός να κληρονομήσει με υψηλή ακρίβεια τα χαρακτηριστικά θορύβου φάσης του σήματος χωρίς να αναπαράγει την πληροφορία του.

Συμβολομετρική φώραση: Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, μία νέα τοπολογία ομόδυνου δέκτη προτάθηκε, η οποία δεν απαιτούσε τη χρήση τοπικού ταλαντωτή. Η επονομαζόμενη αυτο-ομόδυνη (self-homodyne) ή συμβολομετρική (interferometric) φώραση χρησιμοποιούσε ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης (delay interferometer, DI) πριν τη φωτοδίοδο του δέκτη, το οποίο παρήγαγε το διακρότημα του λαμβανόμενου σήματος με τον καθυστερημένο κατά μία περίοδο εαυτό του. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την άμεση εξάλειψη του θορύβου φάσης αλλά ταυτόχρονα οι διακυμάνσεις που αποτυπώνονταν στο πλάτος του αποδιαμορφωμένου σήματος αντιστοιχούσαν στις φασικές διαφορές μεταξύ δύο διαδοχικών bit. Για το σκοπό αυτό, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που επιτελούσε τη λογική πράξη XOR μεταξύ των διαδοχικών bit χρησιμοποιήθηκε για να οδηγεί το διαμορφωτή φάσης στη μεριά του πομπού. Η παραλλαγμένη αυτή διαμόρφωση φάσης έγινε γνωστή ως διαφορικό PSK (differential phase shift keying, DPSK), σύστημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε εκτενώς σε εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων, όπως σε υποθαλάσσιες οπτικές ζεύξεις [63], [64], κυρίως στις αρχές του 2000.

Ένα τυπικό σύστημα DPSK πομποδέκτη απεικονίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 3-11.



Σχήμα 3-11: Απεικόνιση ενός τυπικού DPSK πομποδέκτη με χρήση ισοσταθμισμένης φώρασης. ΔΦ: διαμορφωτής φάσης, DI: delay interferometer και ΦΔ: φωτοδίοδος.

Το σύστημα λήψης του παραπάνω σχήματος, όπως παρατηρούμε διαθέτει δύο φωτοδιόδους για τη φώραση του σήματος, το οποίο όπως θα δούμε στην ανάλυση που ακολουθεί, οδηγεί σε αυξημένη ευαισθησία.

Ας δούμε λοιπόν λεπτομερώς τον δέκτη ενός DPSK σήματος. Το συμβολόμετρο καθυστέρησης Mach-Zehnder διαθέτει σύνθετη μήτρα σκέδασης, η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\begin{bmatrix} E_{out,1} \\ E_{out,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{a} & -j\sqrt{1-a} \cdot e^{-j\varphi_0} \\ -j\sqrt{1-a} \cdot e^{-j\varphi_0} & \sqrt{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in}(t-\tau) \\ E_{in}(t) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

όπου α είναι οι απώλειες της οπτικής σύζευξης (συνήθως $\alpha=3\text{dB}$), φ_0 είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο οπτικών βραχιώνων και τ είναι η χρονική καθυστέρηση που εισάγει ο ένας βραχίονας ως προς τον άλλον.

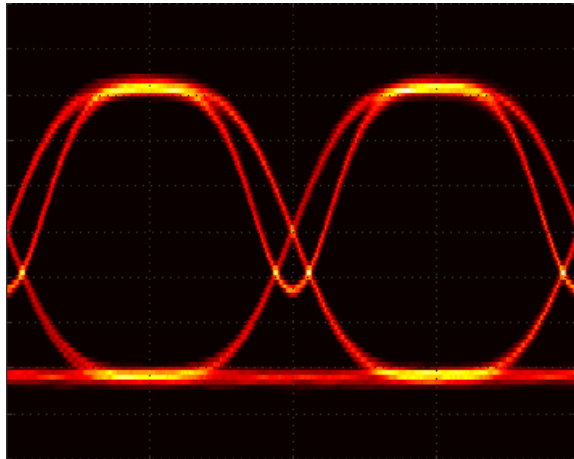
Θεωρώντας ότι το λαμβανόμενο σήμα, $E_s(t)$, δίνεται από την σχέση 3.6 και ότι ο οπτικός συζεύκτης εισάγει 3 dB απώλειες, καταλήγουμε ότι η οπτική ισχύς στην έξοδο του κάθε βραχίονα θα δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$P_{out,1} = \frac{1}{2}P_0[1 - \cos(\varphi_{(t-\tau)} - \varphi_{(t)} + \varphi_0 - \omega_s\tau)] \quad (3.10)$$

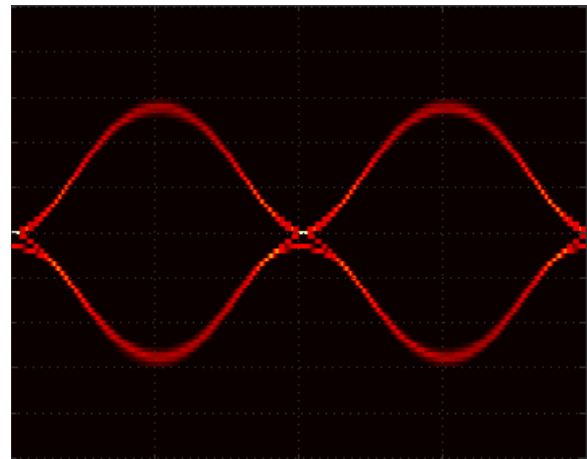
$$P_{out,2} = \frac{1}{2}P_0[1 + \cos(\varphi_{(t-\tau)} - \varphi_{(t)} + \varphi_0 - \omega_s\tau)] \quad (3.11)$$

Τα κύματα στην έξοδο των δύο βραχιώνων του συμβολομέτρου έχουν διαφορετική πολικότητα, με αποτέλεσμα αφαιρώντας τα ηλεκτρικά σήματα που προκύπτουν στην έξοδο της φωτοδιόδου του κάθε βραχίονα να καταλήγουμε με διπλάσια ισχύ σήματος στον δέκτη. Ο συγκεκριμένος δέκτης είναι γνωστός ως ισοσταθμισμένος (balanced receiver) και προσφέρει 3 dB μεγαλύτερη ευαισθησία συγκριτικά με τον δέκτη άμεσης φώρασης.

Οι παραπάνω μαθηματικοί τύποι (3.9-3.11) είναι ιδιαίτερως σημαντικοί καθώς βάσει αυτών πραγματοποιείται η υλοποίηση των αριθμητικών μοντέλων των DPSK δεκτών που μελετάμε στα κεφάλαια 4, 5 και 6 της παρούσας διδακτορικής διατριβής.



(α)



(β)

Σχήμα 3-12: Απεικόνιση του διαγράμματος οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου 10 Gb/s NRZ-DPSK (α) και 10 Gb/s RZ-DPSK σήματος με χρονικό εύρος παλμών ίσο με 67% με χρήση ισοσταθμισμένου δέκτη.

Εδώ πρέπει να προσθέσουμε ότι και στα DPSK σήματα χρησιμοποιείται η RZ μορφοποίηση παλμών χωρίς να απαιτείται κάποια περαιτέρω αλλαγή στον δέκτη. Στο σχήμα 3-12 απεικονίζονται τα διαγράμματα οφθαλμού ενός 10 Gb/s NRZ-DPSK και ενός 10 Gb/s RZ-DPSK με χρονικό εύρος παλμών ίσο με 67% ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει οικειότητα με την απεικόνιση των σχημάτων διαμόρφωσης που θα μελετηθούν στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω ανάλυση παρατηρούμε ότι DPSK σύστημα συνδυάζει την ανθεκτικότητα των PSK σημάτων με την απλή υλοποίηση της άμεσης φώρασης των ASK δεκτών, ενώ ταυτόχρονα με τη χρήση ισοσταθμισμένου δέκτη επιτυγχάνει βελτίωση κατά 3 dB της ευαισθησίας του έναντι της άμεσης φώρασης.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Ψηφιακή σύμφωνη φώραση (digital coherent detection): Η ραγδαία αύξηση της ταχύτητας και της πολυπλοκότητας των διεργασιών των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων καθώς επίσης και η ελαχιστοποίηση του μεγέθους τους, οδήγησε σχετικά πρόσφατα στην υλοποίηση ενός νέου είδους δεκτών για την αποδιαμόρφωση των κατά φάση διαμορφωμένων σημάτων. Οι σύμφωνοι ψηφιακές δέκτες υλοποιούνται με βάση την αρχή λειτουργίας των ομόδυνων συστημάτων λήψης, δηλαδή χρησιμοποιούν έναν τοπικό ταλαντωτή ίδιας συχνότητας με αυτή του λαμβανόμενου σήματος για τη μετατροπή της πληροφορίας φάσης σε πλάτος, σε συνδυασμό με την εκ των υστέρων ψηφιακή επεξεργασία του σήματος για την πλήρη ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο. Το πλεονέκτημα που προσφέρει η ψηφιακή επεξεργασία σήματος είναι ότι πλέον δεν απαιτείται η συμφωνία φάσης και πόλωσης μεταξύ του τοπικού ταλαντωτή και του λαμβανόμενου σήματος, αφού μέσω μίας σειράς αλγοριθμικών διεργασιών μπορούμε να ανακτήσουμε όλη την φασματική πληροφορία που κρύβεται στο οπτικό σήμα.

Έτσι υλοποιώντας απλά κυκλώματα διαφορισμού πόλωσης (polarization diversity) [2], [65] και διαφορισμού φάσης (phase diversity) [65]-[67], και αναλύοντας τα ηλεκτρικά σήματα που προκύπτουν από τις διαδικασίες αυτές, οι μονάδες ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (digital signal processing unit, DSPU) μπορούν να πραγματοποιήσουν εκ των υστέρων την αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς, την αντιστάθμιση της PMD, την απομάκρυνση της παραμόρφωσης ISI και την ανάκτηση ρολογιού σε πραγματικό χρόνο.

Στο σχήμα 3-13 απεικονίζεται η πρακτική υλοποίηση ενός τέτοιου σύμφωνου ψηφιακού δέκτη για την αποδιαμόρφωση PSK σημάτων καθώς επίσης και η αλληλουχία των διεργασιών που επιτελείται κατά την ψηφιακή επεξεργασία του αποδιαμορφωμένου σήματος ώστε να ανακτηθούν πλήρως τα χαρακτηριστικά του.

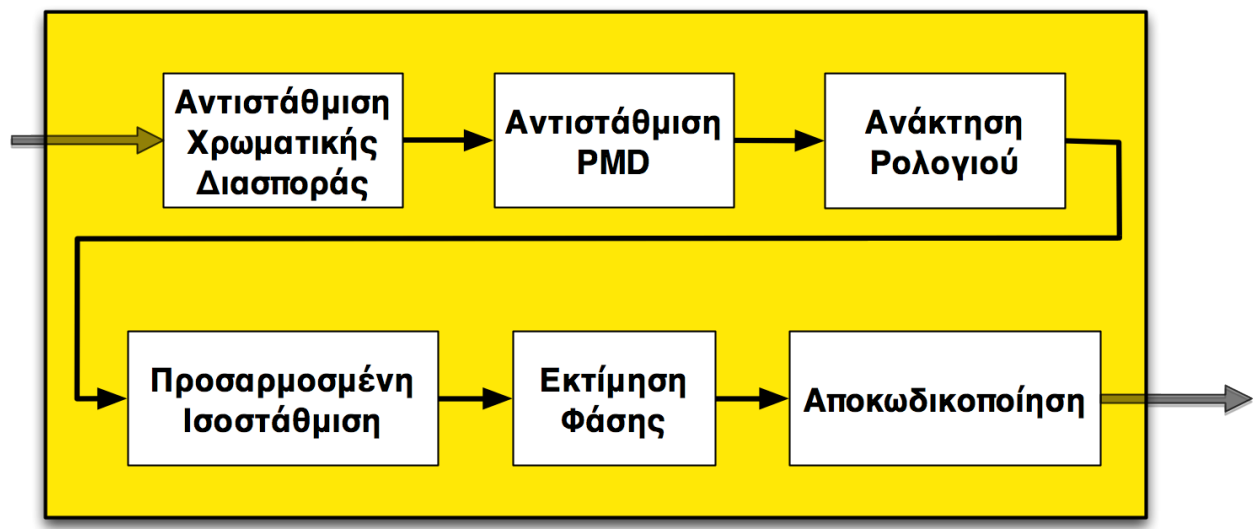
Με την χρήση της μεθόδου διαφορισμού πόλωσης και φάσης, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα παράγονται τέσσερα ηλεκτρικά σήματα, I_x , I_y , I_{Qx} και I_{Qy} , όπου οι δείκτες x , y δηλώνουν τους άξονες πόλωσης και τα I και Q τους κάθετους άξονες φάσης στους οποίους θα αναφερθούμε στην επόμενη παράγραφο. Τα αναλογικά αυτά σήματα στη συνέχεια μετατρέπονται σε ψηφιακά μέσω μιας μονάδας αναλογικής-ψηφιακής μετατροπής (analog-to-digital conversion, ADC) και στη συνέχεια οδηγούνται στη μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος για την τελική επεξεργασία τους και την ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η ψηφιακή σύμφωνη λήψη όχι μόνο προσφέρει απλοϊκότερη υλοποίηση του δέκτη, αφού δεν απαιτείται η χρήση των πολύπλοκων οπτο-ηλεκτρονικών κυκλωμάτων εγκλειδωσης φάσης των σύμφωνων δεκτών, αλλά παράλληλα οδηγεί σε οικονομικότερες οπτικές ζεύξεις, αφού όλες οι ίνες αντιστάθμισης της χρωματικής διασποράς και αντιστάθμισης PMD αντικαθίστανται από την εκ των υστέρων ψηφιακή επεξεργασία του αποδιαμορφωμένου σήματος. Οι ψηφιακοί σύμφωνοι δέκτες αποτελούν την αιχμή του δόρατος της έρευνας στις οπτικές επικοινωνίες την τελευταία δεκαετία αναζωπυρώνοντας το ενδιαφέρον για τα σύμφωνα οπτικά συστήματα μετάδοσης, καθιστώντας τα ως τους ιδανικούς υποψηφίους για τις υψίρρυθμες και μεγάλων αποστάσεων εφαρμογές των μελλοντικών οπτικών δικτύων.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



(α)



(β)

Σχήμα 3-13: Διάγραμμα των βασικών διεργασιών που πραγματοποιεί ένας ψηφιακός σύμφωνος δέκτης για την αποδιαμόρφωση ενός PSK σήματος (α) και πρακτική υλοποίηση ενός τέτοιου δέκτη.

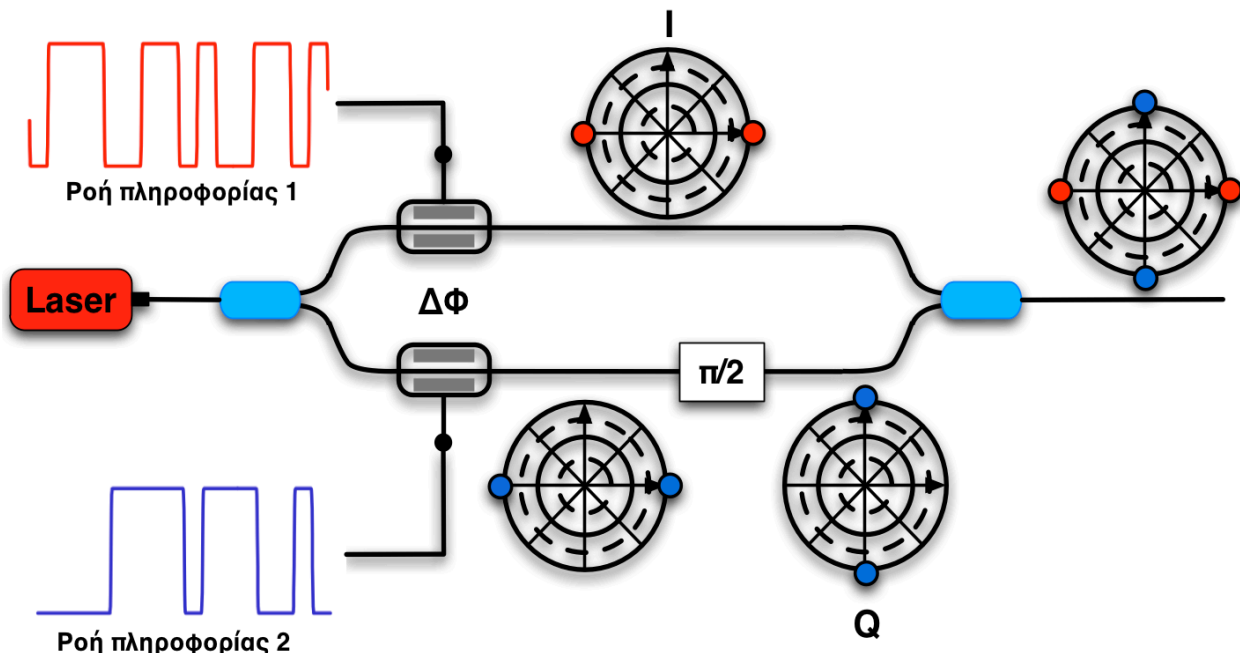
3.3 Ορθογωνική διαμόρφωση φάσης (QPSK)

Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για υψηλότερη χωρητικότητα των οπτικών καναλιών οδηγεί στην αύξηση των ρυθμών σε τιμές που ξεπερνούν τα 40 Gb/s με βασική προϋπόθεση τη διατήρηση της ποιότητας του σήματος. Καθώς όμως ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται, η αποδοτικότητα των δυαδικών διαμορφώσεων (ASK, PSK) μειώνεται σημαντικά αφού πλέον η επίδραση των χρωματικής διασποράς και της διασποράς πόλωσης υποβαθμίζει δραματικά το σήμα περιορίζοντας έτσι τη μέγιστη απόσταση διάδοσης. Επίσης, η διεύρυνση του εύρους ζώνης των υψίρρυθμων σημάτων οδηγεί σε αύξηση του φασματικού παραθύρου των WDM καναλιών με άμεσο αποτέλεσμα τον περιορισμό του συνολικού αριθμού καναλιών μετάδοσης. Οι παραπάνω παράγοντες σε συνδυασμό με την περιορισμένη στα 40 Gb/s ταχύτητα των σύγχρονων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αλλά και το υψηλό οικονομικό και ενεργειακό κόστος τους οδήγησαν στην ανάπτυξη και χρήση νέων πολυ-επίπεδων διαμορφώσεων οι οποίες προσφέρουν υψηλότερη φασματική απόδοση δίνοντας λύση στο πρόβλημα της υψηλής χωρητικότητας.

Στο χώρο των διαμορφώσεων φάσης τέτοια εναλλακτικά σχήματα διαμόρφωσης, τα οποία όχι μόνο έχουν διερευνηθεί πειραματικά αλλά και έχουν υιοθετηθεί σε εμπορικές εφαρμογές, είναι το DQPSK [68], [69], το 8-PSK [70], το OFDM (optical frequency division multiplexing) [71], το QPSK με διαίρεση πόλωσης (PD-QPSK) [72] αλλά και πολλές άλλες, τις οποίες όμως δεν θα αναφέρουμε στην παρούσα διδακτορική διατριβή αφού ξεφεύγουν αρκετά από το αντικείμενο μελέτης.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Στην παρούσα παράγραφο θα αναφερθούμε αποκλειστικά στο QPSK σύστημα εκπομπής και λήψης αφού αποτελεί ένα σχήμα διαμόρφωσης το οποίο θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στην παρούσα διατριβή.



Σχήμα 3-14: Απεικόνιση ενός τυπικού QPSK πομπού και του αντίστοιχου αστερισμού του εκπεμπόμενου σήματος.

3.3.1 Χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης QPSK και αρχιτεκτονική του πομπού

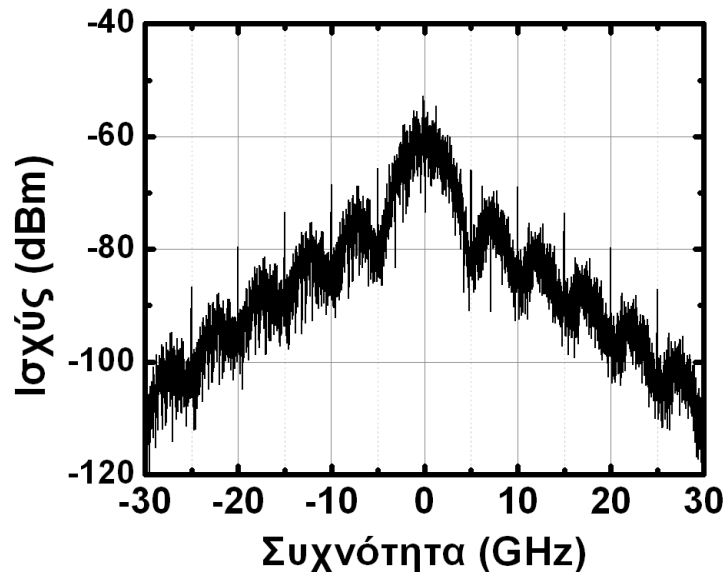
Ένας τυπικός QPSK πομπός αποτελείται από δύο επιμέρους εξωτερικούς διαμορφωτές φάσης, οι οποίοι οδηγούνται από διαφορετικές ροές πληροφορίας ίδιου ρυθμού. Τα δύο οπτικά πεδία που εξέρχονται από τους βραχίονες των δύο διαμορφωτών συνδυάζονται με διαφορά φάσης $\pi/2$ σε έναν οπτικό συζεύκτη δίνοντας έτσι στο τελικό σήμα τέσσερα διακριτά επίπεδα φάσης, $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ (σχ. 3-14). Οι δύο άξονες που ορίζουν τις τέσσερις φασικές καταστάσεις, όπου ανά δύο διαφέρουν κατά π , ονομάζονται συμφασικός (in-phase) και κάθετος (quadrature phase) άξονας, και από δω και στο εξής θα αναφερόμαστε σε αυτούς με τα γράμματα I και Q, αντίστοιχα.

Όπως εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε, ο συνδυασμός των δύο ροών πληροφορίας με τον παραπάνω τρόπο έχει ως αποτέλεσμα δύο bit να κωδικοποιούνται σε ένα σύμβολο, το οποίο σημαίνει ότι για τον ίδιο ρυθμό bit επιτυγχάνεται ο μισός ρυθμός συμβόλων και επομένως το σήμα καλύπτει το μισό εύρος ζώνης.

Η παραπάνω φασματική ιδιότητα γίνεται εύκολα αντιληπτή αν κανείς παρατηρήσει το σχήμα 3-15, στο οποίο απεικονίζεται το οπτικό φάσμα ενός 10 Gb/s (5Gbaud) NRZ-QPSK σήματος, και το συγκρίνει με τα αντίστοιχα φάσματα των διαμορφώσεων OOK (σχ. 3-4α) και PSK (σχ. 3-9α).

Η αύξηση της φασματικής απόδοσης που προσφέρει το QPSK και κατ' επέκταση όλες οι πολυ-επίπεδες διαμορφώσεις υψηλότερης κλίμακας, συνοδεύεται από το αρκετά σοβαρό μειονέκτημα της αύξησης της πολυπλοκότητας του πομπού και του δέκτη. Η αύξηση αυτή είναι ανάλογη του αριθμού των επιπέδων της διαμόρφωσης και έχει άμεση επίπτωση στο οικονομικό και ενεργειακό κόστος αλλά και τον όγκο των διατάξεων εκπομπής και λήψης.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



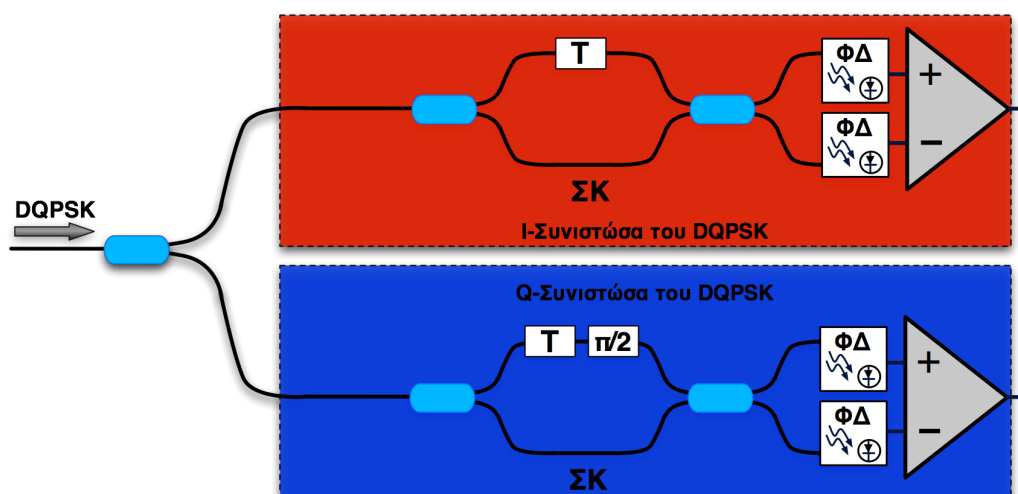
Σχήμα 3-15: Απεικόνιση του οπτικού φάσματος ενός 10 Gb/s NRZ-QPSK σήματος.

Ωστόσο η βελτίωση στις επιδόσεις των υψίρρυθμων συστημάτων που προσφέρει η χρήση των πολυ-επίπεδων διαμορφώσεων είναι σημαντική και ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να προσφέρει ικανοποιητική αύξηση του γινομένου κόστους-απόδοσης.

3.3.2 Αρχιτεκτονική του QPSK δέκτη

Οι δέκτες για την αποδιαμόρφωση των QPSK σημάτων στηρίζονται στις αρχιτεκτονικές των PSK δεκτών που αναφέραμε στο κεφάλαιο 3.2.2. Ωστόσο η σύμφωνη λήψη είναι ιδιαίτερος πολύπλοκη, επομένως μέχρι στιγμής οι πιο αποδοτικοί δέκτες, που έχουν διερευνηθεί εκτενώς πειραματικά και είναι εμπορικά διαθέσιμοι για υψίρρυθμες εφαρμογές, βασίζονται στην διαφορική λήψη (DQPSK) και στην ψηφιακή σύμφωνη λήψη [73].

Διαφορική λήψη με ισοσταθμισμένο δέκτη: Η κατηγορία δεκτών υποστηρίζει την αποδιαμόρφωση DQPSK και RZ-DQPSK σημάτων και υλοποιείται σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 3-16.



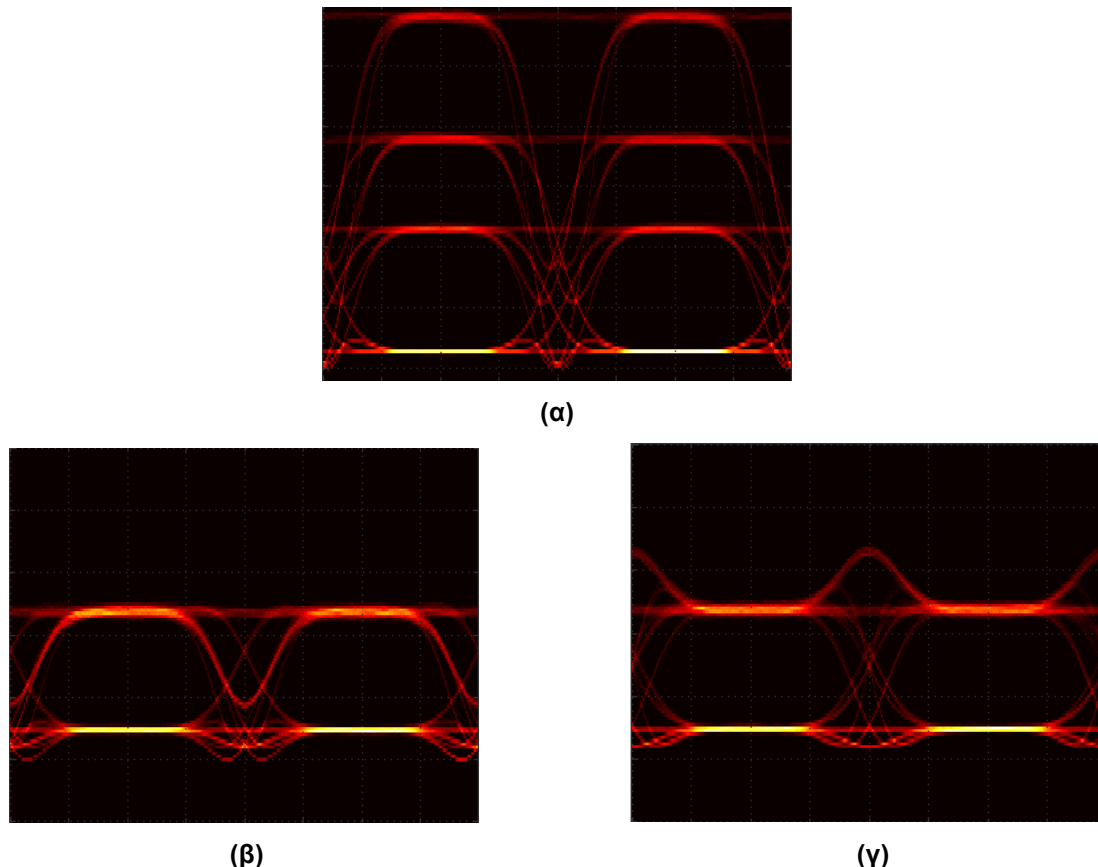
Σχήμα 3-16: Απεικόνιση ενός τυπικού DQPSK συστήματος λήψης με ισοσταθμισμένο δέκτη.

Το σήμα που λαμβάνεται στον δέκτη αρχικά χωρίζεται σε δύο επιμέρους κύματα ίσης ισχύος με τη βοήθεια ενός οπτικού συζεύκτη. Στη συνέχεια τα δύο σήματα οδηγούνται σε δύο ξεχωριστά συμβολόμετρα καθυστέρησης, καθένα από τα οποία αναλαμβάνει να

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

επιλέξει και να αποδιαμορφώσει τη μία από τις δύο ροές πληροφορίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή στον βραχιώνα του ενός συμβολομέτρου μίας επιπλέον διαφοράς φάσης ίσης με $\pi/2$.

Η μήτρα σκέδασης των συμβολομέτρων για την ανάκτηση της I και της Q συνιστώσας του QPSK σήματος περιγράφεται από την σχέση 3.9 μόνο που για την περίπτωση του Q άξονα, εισάγεται μία επιπλέον ολίσθηση φάσης ίση με $\pi/2$. Με βάση τις τροποποιημένες σχέσεις 3.9-3.11 υλοποιείται η μοντελοποίηση των QPSK δεκτών στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη της αμιγώς οπτικής αναγέννησης DQPSK σημάτων που περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.



Σχήμα 3-17: Απεικόνιση του διαγράμματος οφθαλμού ενός 10 Gb/s NRZ-DQPSK σήματος πριν (α) και μετά τη λήψη (β, γ). Στο διάγραμμα (β) απεικονίζεται η συνιστώσα I ενώ στο (β) η συνιστώσα Q του QPSK σήματος.

Η φώραση της κάθε ροής πληροφορίας μπορεί να υλοποιηθεί ακολουθώντας την αρχιτεκτονική του ισοσταθμισμένου δέκτη, η οποία παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.2.2, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο αύξηση της ευαισθησίας του. Στο σχήμα 3-17 απεικονίζονται το διάγραμμα οφθαλμού του σύνθετου 10 Gb/s NRZ-DQPSK σήματος πριν τον διαχωρισμό των δύο ροών πληροφορίας και τα διαγράμματα οφθαλμού των ανεκτημένων 5 Gb/s πληροφοριών μετά τη λήψη.

Το 2003 οι Cho et al. επέδειξαν την πρώτη επιτυχημένη μετάδοση εννέα 25 Gb/s RZ-DQPSK σημάτων σε WDM κανάλια εύρους 25 GHz για μήκος 1000 km [74].

Σύμφωνη ψηφιακή λήψη: Ο συγκεκριμένος QPSK δέκτης δεν έχει καμία απολύτως διαφορά συγκριτικά με τον αντίστοιχο PSK δέκτη, το διάγραμμα του οποίου απεικονίζεται στο σχήμα 3-17. Η χρήση των τεχνικών του διαφορισμού πόλωσης και φάσης οδηγεί στην ανάκτηση και των δύο ροών πληροφορίας ενώ παράλληλα

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψηλών συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

παρέχουν στον δέκτη τη δυνατότητα αντιστάθμισης των διασπορών φάσης και πόλωσης. Στο σχήμα 3-18 απεικονίζεται ένας εμπορικά διαθέσιμος τέτοιος δέκτης.



Σχήμα 3-18: Απεικόνιση ενός σύμφωνου ψηφιακού δέκτη για την αποδιαμόρφωση QPSK σήματος.

Το 2007 οι Savory et al. κατάφεραν να πραγματοποιήσουν την πλήρη ανάκτηση ενός QPSK σήματος ρυθμού 42.5 Gb/s ύστερα από διάδοση 6400 km αναδεικνύοντας έτσι τις αξιοσημείωτες επιδόσεις των σύμφωνων οπτικών συστημάτων [75].

3.4 Σύγκριση των σχημάτων διαμόρφωσης

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέραμε τις βασικές διαμορφώσεις και μελετήσαμε τις αρχιτεκτονικές των αντίστοιχων πομπών και δεκτών που μέχρι στιγμής χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά τμήματα του οπτικού δικτύου ανάλογα με τις επιδόσεις που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση.

Είδαμε λοιπόν ότι το σύστημα ASK με άμεση λήψη, λόγω της απλότητας στην υλοποίηση, προσφέρει έναν ικανοποιητικό συνδυασμό κόστους-επιδόσεων και για το λόγο αυτό έχει κυριαρχήσει στις εφαρμογές κοντινών αποστάσεων για ρυθμούς μέχρι και 40 Gb/s.

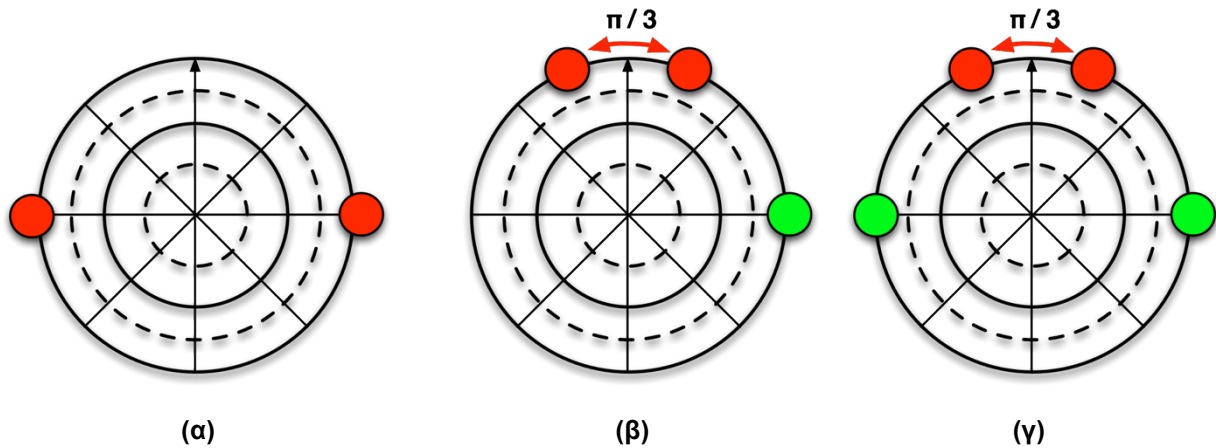
Στον αντίποδα βρίσκεται η εναλλακτική της δυαδικής διαμόρφωσης φάσης PSK, η οποία, όπως αναφέραμε, προσφέρει αύξηση της ευαισθησίας του δέκτη που φθάνει έως και τα 6 dB ενώ ταυτόχρονα είναι περισσότερο ανθεκτική στην επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων, τα οποία αποτελούν τον βασικό παράγοντα υποβάθμισης σήματος για τις μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων. Το μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι η πολυπλοκότητα της υλοποίησης του δέκτη.

Η σύμφωνη λήψη, η οποία απετέλεσε την αρχική μέθοδο αποδιαμόρφωσης των συγκεκριμένων σημάτων, παραγκωνίστηκε λόγω της ιδιαίτερα αυξημένης πολυπλοκότητας των ηλεκτρονικών και οπτικο-ηλεκτρονικών κυκλωμάτων εγκλειδωσης φάσης του τοπικού ταλαντωτή.

Η διαφορική λήψη από τη μία προσφέρει ευκολία στην υλοποίηση και αύξηση της ευαισθησίας του δέκτη κατά 3 dB έναντι της άμεσης φώρασης, λόγω της χρήσης ισοσταθμισμένου δέκτη, από την άλλη όμως συγκριτικά με τη σύμφωνη φώραση παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την αποδιαμόρφωση του DPSK λαμβάνουμε τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών bit, η οποία περιορίζει την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των συμβόλων στην τιμή $\pi/2$ ώστε το σύστημα απόφασης να αποδιαμορφώσει σωστά την πληροφορία. Για να κατανοήσουμε καλύτερα την περίπτωση αυτή ας θεωρήσουμε δύο διαδοχικά bit, τα οποία αρχικά διαφέρουν κατά π αλλά μετά τη διάδοση η επίδραση του θορύβου μειώνει τη διαφορά

τους στα $\pi/3$. Όπως εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε από τους αστερισμούς του σχήματος 3-19, ενώ για την περίπτωση του PSK τα δύο bit βρίσκονται εντός της περιοχής σωστής απόφασης, για την περίπτωση του DPSK η διαφορά $\pi/3$ οδηγεί το σύστημα να λάβει τη λανθασμένη απόφαση «0» αντί του «π». Επίσης, ένας δεύτερος μηχανισμός που οδηγεί σε ελάττωση της ευαισθησίας του DPSK δέκτη έναντι του σύμφωνου είναι ότι κατά την αποδιαμόρφωση του λαμβανόμενου σήματος στη δεύτερη περίπτωση το σήμα συμβάλλει με έναν καθαρό τοπικό ταλαντωτή ενώ στην πρώτη περίπτωση το σήμα συμβάλλει με τον καθυστερημένο εαυτό του αυξάνοντας δύο φορές το επίπεδο του θορύβου στο αποδιαμορφωμένο σήμα.

Τέλος, η σύμφωνη ψηφιακή λήψη συνδυάζει την αυξημένη ευαισθησία της σύμφωνης φώρασης με τα προτερήματα που προσφέρει η ψηφιακή επεξεργασία σήματος. Έτσι, ο δέκτης απαλλάσσεται από τα πολύπλοκα κυκλώματα εγκλείδωσης φάσης του τοπικού ταλαντωτή, αφού αυτό αναλαμβάνεται από την DSPU, ενώ ταυτόχρονα αποκτά επιπλέον δυνατότητες, όπως η αντιστάθμιση χρωματικής διασποράς και PMD, συμπίεση ISI και ανάκτηση ρολογιού.



Σχήμα 3-19: Στο πολικό διάγραμμα (α) απεικονίζεται η φάση δύο διαδοχικών bit. Στο πολικό διάγραμμα (β) απεικονίζεται η τυχαία ολίσθηση φάσης των διαδοχικών bit ύστερα από την επίδραση του θορύβου (κόκκινοι κύκλοι) και η απόφαση που λαμβάνει ο DPSK δέκτης (πράσινοι κύκλος). Στο διάγραμμα (γ) απεικονίζεται η τυχαία ολίσθηση φάσης των διαδοχικών bit ύστερα από την επίδραση του θορύβου (κόκκινοι κύκλοι) και η απόφαση που λαμβάνει ο PSK δέκτης (πράσινοι κύκλοι).

Βέβαια, η υλοποίηση ενός τέτοιου δέκτη αυξάνει το οικονομικό και ενεργειακό κόστος, τα οποία αυξάνονται ραγδαία με την αύξηση του ρυθμού του λαμβανόμενου σήματος.

Για την περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας, οι πολυ-επίπεδες διαμορφώσεις, όπως το QPSK, επιδεικνύουν αυξημένη φασματική απόδοση, η οποία προσφέρει υψηλότερη ανθεκτικότητα στην PMD και τη χρωματική διασπορά, επιτρέποντας έτσι τη διάδοσή τους σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ παράλληλα απαιτούν χαμηλότερες ταχύτητες στα ηλεκτρονικά του δέκτη, μειώνοντας έτσι τις ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και το κόστος υλοποίησης. Βέβαια, η αύξηση των επιπέδων διαμόρφωσης εισάγει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στον δέκτη, ωστόσο ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να προσφέρει καλύτερο γινόμενο κόστους-απόδοσης συγκριτικά με κάποια άλλη εναλλακτική.

Λαμβάνοντας λοιπόν υπ' όψιν μας όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι δε μπορούμε να επιλέξουμε ένα από τα προαναφερθέντα συστήματα διαμόρφωσης ως το ιδανικότερο για όλων των ειδών τις εφαρμογές καθώς σε κάθε περίπτωση παίζει σημαντικό ρόλο το γινόμενο κόστους-απόδοσης. Έτσι, για τις μικρών αποστάσεων οπτικές ζεύξεις με ρυθμούς μέχρι 40 Gb/s φαίνεται ότι το ASK σύστημα με άμεση λήψη θα συνεχίσει να κυριαρχεί για τα επόμενα χρόνια, ενώ τα DPSK και DQPSK συστήματα που προς το παρόν περιορίζονται στις μεγάλων αποστάσεων και υποβρύχιες ζεύξεις,

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

θα αρχίσουν να επεκτείνονται και στα μικρότερης κλίμακας δίκτυα ρυθμών μέχρι 40 Gb/s. Τέλος, οι σύμφωνες πολυ-επίπεδες διαμορφώσεις, όπως το PM-QPSK, με χρήση του σύμφωνου ψηφιακού δέκτη, αν και προς στιγμήν χρησιμοποιούνται σε ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων για μεταδόσεις των 100 Gb/s, ωστόσο η ευρείας κλίμακας εκμετάλλευσή τους θα πραγματοποιηθεί με την ωρίμανση της τεχνολογίας των 100 G όπου οι περισσότερες εφαρμογές θα επωφελούνται σημαντικά από τις επιδόσεις των σύμφωνων συστημάτων επικοινωνιών.

3.5 Συμπεράσματα

Στην παράγραφο 3.4 είδαμε ότι τα κατά φάση διαμορφωμένα σήματα υπερέχουν έναντι των διαμορφωμένων κατά πλάτος λόγω της αυξημένης ευαισθησίας του δέκτη αλλά και της μεγαλύτερης ανθεκτικότητας που παρουσιάζουν τα ίδια τα σήματα στην επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων κατά τις μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων. Παρόλα αυτά ο βασικός παράγοντας που επιβαρύνει τα διαμορφωμένα κατά φάση σήματα, είναι ο μη γραμμικός θόρυβος φάσης, ο οποίος προκύπτει από τη μετατροπή του συσσωρευμένου θορύβου πλάτους σε θόρυβο φάσης μέσω της επίδρασης του φαινομένου Kerr. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού υπάρχουν δύο λύσεις. Είτε θα πρέπει η ισχύς του διαδιδόμενου σήματος να είναι σχετικά μικρή ώστε να περιορίζεται η έναυση των μη γραμμικών φαινομένων, γεγονός το οποίο όμως περιορίζει το μέγιστο μήκος διάδοσης, είτε θα πρέπει το σήμα κατά τη διάδοσή του να διέρχεται από περιοδικά στάδια αναγέννησης, τα οποία θα ανακτούν τα αρχικά χαρακτηριστικά του.

Όπως αναφέραμε στο πρώτο κεφάλαιο, η αναγέννηση σήματος, προς στιγμήν, επιτυγχάνεται σε ηλεκτρικό επίπεδο χρησιμοποιώντας ΟΕΟ επαναλήπτες. Η χρήση των συγκεκριμένων διατάξεων ωστόσο περιορίζει τον συνολικό ρυθμό μετάδοσης αφού αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ενώ ταυτόχρονα η επεξεργασία των σημάτων γίνεται για κάθε WDM κανάλι ξεχωριστά, γεγονός το οποίο αυξάνει την πολυπλοκότητα και περιορίζει επιπλέον τον ρυθμό. Για το σκοπό αυτό μεγάλη προσπάθεια έχει δοθεί στην υλοποίηση διατάξεων οι οποίες θα παρέχουν αμιγώς οπτική αναγέννηση ταυτόχρονα σε όλα τα κανάλια μιας WDM μετάδοσης.

Για τα διαμορφωμένα κατά φάση σήματα, δύο είναι τα επικρατέστερα σχήματα αμιγώς οπτικής αναγέννησης που με διάφορες παραλλαγές έχουν μελετηθεί από διάφορες ερευνητικές ομάδες ανά τον κόσμο: η περιοδική συμπίεση του θορύβου πλάτους και η άμεση συμπίεση του θορύβου φάσης. Στην πρώτη κατηγορία, ο αναγεννητής τοποθετείται περιοδικά κατά μήκος της οπτικής ζεύξης περιορίζοντας τη συσσώρευση του θορύβου πλάτους, ο οποίος εν συνεχεία θα οδηγήσει στην διόγκωση του μη γραμμικού θορύβου φάσης. Αντιπροσωπευτικές διατάξεις αυτής της κατηγορίας αναγεννητών είναι οι μη ευαίσθητοι στη φάση παραμετρικοί ενισχυτές, οι οποίοι επιτυγχάνουν τον ψαλιδισμό του πλάτους του σήματος κατά τη λειτουργία τους στη μη γραμμική περιοχή (κόρος) [76]. Οι αναγεννητές αυτού του τύπου μπορούν να προσφέρουν πολυ-κάναλη επεξεργασία, με ταχύτατους χρόνους απόκρισης και σημαντικό ποσοστό ενίσχυσης σε αντίθεση με εναλλακτικές τεχνικές που βασίζονται στην χρήση ημιαγωγικών ενισχυτών (semiconductor optical amplifier, SOA) [77]. Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, προτείνεται μία εναλλακτική τεχνική μείωσης του θορύβου πλάτους, η οποία στηρίζεται στο φαινόμενο της οπτικής εγκλειδωσης φάσης στα ημιαγωγικά laser και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σαν μονάδα αμιγώς οπτικής περιοδικής αναγέννησης είτε σαν μία προ-ενισχυτική βαθμίδα χαμηλού θορύβου στην πλευρά του δέκτη για σήματα διαμορφωμένα κατά φάση. Η τεχνική αυτή θα μελετηθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 5.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Στην δεύτερη κατηγορία αναγεννητών ανήκουν οι ευαίσθητοι στη φάση παραμετρικοί ενισχυτές, οι οποίοι όπως αναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιούν άμεση αναγέννηση της φάσης. Οι συγκεκριμένοι αναγεννητές, τα τελευταία χρόνια, έχουν συγκεντρώσει το ενδιαφέρον των ερευνητών και ένας μεγάλος αριθμός αρχιτεκτονικών έχει προταθεί, οι οποίες προσφέρουν αξιοσημείωτες επιδόσεις. Ωστόσο, λόγω της ιδιαιτερότητας που παρουσιάζει η υλοποίησή τους, την οποία θα μελετήσουμε ενδελεχώς στο επόμενο κεφάλαιο, μέχρι στιγμής καμία από τις προτεινόμενες τοπολογίες δε μπορεί να πραγματοποιήσει πολυ-κάναλη επεξεργασία ενώ ταυτόχρονα η υλοποίησή τους είναι τόσο πολύπλοκη που απέχει σημαντικά από την άμεση εμπορική εκμετάλλευσή τους. Παρόλα αυτά η περιοχή αυτή έρευνας χρίζει ιδιαίτερης μελέτης καθώς είναι πολλά υποσχόμενη για την υλοποίηση διατάξεων οι οποίες θα ωθήσουν τις ταχύτητες των οπτικών επικοινωνιών σε νέα υψηλότερα επίπεδα. Στα πλαίσια της διερεύνησης αυτής μία νέα αρχιτεκτονική ενός αμιγώς οπτικού 3R (Re-amplification, Re-Timing, Re-Shaping) αναγεννητή για RZ-DPSK σήματα προέκυψε και παρουσιάζεται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

4. Παραμετρικοί ενισχυτές ευαίσθητοι στη φάση

Η ευαίσθητη στη φάση παραμετρική ενίσχυση είναι μία διαδικασία, η οποία μπορεί να προσφέρει αμιγώς οπτική ενίσχυση σημάτων με εικόνα θορύβου (noise figure, NF) μικρότερη από το κβαντικό όριο των 3 dB, το οποίο περιορίζει όλους τους ενισχυτές συμπεριλαμβανομένων και των EDFA. Η βελτίωση αυτή του NF που προσφέρουν οι ευαίσθητοι στη φάση οπτικοί παραμετρικοί ενισχυτές (phase sensitive fiber optical parametric amplifiers, PS-FOPA) μπορεί να οδηγήσει έως και στον διπλασιασμό της απόστασης διάδοσης. Παρόλο που η θεωρία αυτή είναι γνωστή εδώ και 40 χρόνια, η ανάγκη για μικρό εύρος γραμμής και υψηλή ισχύ των κυμάτων άντλησης καθώς επίσης και η προϋπόθεση της προσαρμογής φάσης μεταξύ των αλληλεπιδρώντων κυμάτων που η διαδικασία αυτή επιβάλλει, περιόρισε την έρευνα σε αυτή την περιοχή για αρκετά χρόνια. Μετά την εφεύρεση των EDFA και την αξιοποίησή τους σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων, στις αρχές του 1990, το ενδιαφέρον για την χρήση του PS-FOPA ως μέσον για τη μείωση του συσσωρευμένου θορύβου και την επιπλέον επέκταση του μήκους διάδοσης, αναζωπυρώθηκε.

Μία επιπλέον ιδιότητα που παρουσιάζουν οι PS-FOPA είναι ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες μπορούν να απαλείψουν τον θόρυβο φάσης του εισερχόμενου σήματος. Λόγω της βηματικής μορφής που έχει η χαρακτηριστική μεταφοράς της διαδικασίας συμπίεσης θορύβου φάσης και κυρίως λόγω της περιοδικότητας π που αυτή παρουσιάζει, οι PS-FOPA μπορούν να προσφέρουν αναγέννηση σε PSK σήματα. Αυτή την αξιοσημείωτη ιδιότητα θα μελετήσουμε στο παρόν κεφάλαιο. Αφού δοθεί το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο στον αναγνώστη ώστε να κατανοήσει τη διαδικασία του FWM, στη συνέχεια θα παρουσιαστεί μια μελέτη των ιδιοτήτων και των επιδόσεων των PS-FOPA και της αναγέννησης PSK σημάτων που αυτοί προσφέρουν. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής θα παρουσιαστεί μία νέα αρχιτεκτονική για την αμιγώς οπτική αναγέννηση RZ-DPSK σημάτων η οποία στηρίζεται στην τοπολογία μονής άντλησης των PS-FOPA.

4.1 Παραμετρικές διεργασίες

Στις διεργασίες εξαναγκασμένης σκέδασης (SRS, SBS) που συζητήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι οπτικές ίνες παίζουν έναν ενεργό ρόλο αφού οι διεργασίες αυτές σχετίζονται με τις μοριακές δονήσεις ή τις μεταβολές της πυκνότητας του μέσου. Σε μια άλλη ξεχωριστή ομάδα των μη γραμμικών φαινομένων που ήδη περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, οι οπτικές ίνες παίζουν ένα ρόλο περισσότερο παθητικό ως απλοί μεσολαβητές για την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών κυμάτων που οδεύουν σε αυτή. Τέτοιες μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις ονομάζονται παραμετρικές διεργασίες, επειδή περιλαμβάνουν διαμόρφωση παραμέτρων του μέσου όπως ο δείκτης διάθλασης. Οι παραμετρικές διαδικασίες που εμφανίζονται στην οπτική ίνα είναι η μίξη τεσσάρων κυμάτων, η οποία θα μελετηθεί διεξοδικά σε αυτό το κεφάλαιο, και η αρμονική γένεση (harmonic generation).

4.1.1 Προέλευση της μίξης τεσσάρων κυμάτων

Οι παραμετρικές διεργασίες προκύπτουν σαν αποτέλεσμα της μη γραμμικής απόκρισης των ηλεκτρονίων ενός υλικού κατά την εφαρμογή ενός εξωτερικού οπτικού πεδίου. Η απόκριση αυτή εκφράζεται μέσω της πόλωσης του μέσου, η οποία παρουσιάζει μη γραμμική εξάρτηση από το εφαρμοζόμενο πεδίο, και περιέχει μη γραμμικούς όρους των οποίων το μέγεθος καθορίζεται από τις μη γραμμικές επιδεκτικότητες (βλ. κεφ. 2). Οι παραμετρικές διεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν σε δεύτερης και τρίτης τάξης διαδικασίες ανάλογα με το αν η δεύτερης $\chi^{(2)}$ ή η τρίτης τάξης $\chi^{(3)}$ επιδεκτικότητα καθορίζει τον κυρίαρχο μηχανισμό. Για ένα ιστροπικό μέσο, όπως για παράδειγμα η

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρουθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

οπτική ίνα, δεν υπάρχει εξάρτηση της πόλωσης από τη δεύτερης τάξης επιδεκτικότητα $\chi^{(2)}$, και επομένως εξαλείφεται.

Η τρίτης τάξης επιδεκτικότητα $\chi^{(3)}$ σε γενικές γραμμές περιλαμβάνει τη μη γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ τεσσάρων κυμάτων στην οποία ανήκουν φαινόμενα όπως η γένεση τρίτης αρμονικής, η μίξη τεσσάρων κυμάτων (FWM) και η παραμετρική ενίσχυση [20]. Όπως είδαμε συνοπτικά και σε προηγούμενο κεφάλαιο το FWM έχει εκτενώς διερευνηθεί στις οπτικές ίνες καθώς μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποδοτικό για την παραγωγή νέων κυμάτων, μία εφαρμογή ιδιαίτερα χρήσιμη για τα δίκτυα που στηρίζονται στη δρομολόγηση μήκους κύματος. Τα κύρια χαρακτηριστικά του FWM μπορούν να περιγραφούν θεωρώντας τον όρο της πόλωσης τρίτης τάξης του μέσου:

$$P_{NL} = \varepsilon_0 \chi^{(3)} : EEE \quad (4.1)$$

όπου E είναι το ηλεκτρικό πεδίο, P_{NL} είναι η μη γραμμική πόλωση του μέσου που προκαλείται και ε_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Αν θεωρήσουμε τέσσερα κύματα που ταλαντώνονται στις συχνότητες $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ και τα οποία είναι γραμμικά πολωμένα ως προς τον άξονα x , τότε το συνολικό πεδίο μπορεί να περιγραφεί με βάση την παρακάτω σχέση:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 E_j \exp[i(\beta_j z - \omega_j t)] \quad (4.2)$$

όπου $\beta_j = n_j \omega_j / c$ είναι η σταθερά διάδοσης και n_j ο δείκτης διάθλασης του j -οστού κύματος ενώ όλα τα κύματα διαδίδονται προς την ίδια κατεύθυνση. Με αντικατάσταση της (4.2) στην (4.1), η μη γραμμική πόλωση του μέσου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_{NL} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 P_j \exp[i(\beta_j z - \omega_j t)] \quad (4.3)$$

Με βάση τη σχέση (4.3) οι επιμέρους παράγοντες P_j αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό όρων που περιλαμβάνουν γινόμενα των ηλεκτρικών πεδίων μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα ο παράγοντας P_4 , ο οποίος μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_4 = \frac{3\varepsilon_0}{4} \chi_{\chi\chi\chi}^3 [|E_4|^2 E_4 + 2(|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_3|^2) E_4 + 2E_1 E_2 E_3 \exp(i\theta_+) + 2E_1 E_2 E_3 \exp(i\theta_-) + \dots] \quad (4.4)$$

όπου θ_+ και θ_- ορίζονται ως:

$$\theta_+ = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_4)z - (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \omega_4)t \quad (4.5)$$

$$\theta_- = (\beta_1 + \beta_2 - \beta_3 - \beta_4)z - (\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4)t \quad (4.6)$$

Στην εξίσωση 4.4 μπορούμε να διακρίνουμε τους όρους τριών μη-γραμμικών μηχανισμών. Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος που περιλαμβάνει το E_4 αντιστοιχούν στα φαινόμενα SPM και XPM αντίστοιχα, ενώ οι όροι που απομένουν οφείλονται στο FWM. Το πόσοι από αυτούς είναι σημαντικοί για την παραγωγή μιας παραμετρικής σύζευξης εξαρτάται από την προσαρμογή φάσης μεταξύ του πεδίου E_4 και της πόλωσης P_4 που δίνεται από τις σχέσεις 4.5 και 4.6.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Σημαντική απόδοση του FWM επιτυγχάνεται όταν η προσαρμογή φάσης τείνει να είναι πλήρης. Από τις εξισώσεις 4.5, 4.6 αυτό ισοδυναμεί με προσαρμογή μεταξύ των συχνοτήτων και μεταξύ των σταθερών διάδοσης. Προσεγγίζοντας το φαινόμενο από κβαντομηχανικής απόψεως, η μίξη τεσσάρων κυμάτων λαμβάνει χώρα όταν φωτόνια ενός ή περισσότερων κυμάτων εκμηδενίζονται και νέα φωτόνια δημιουργούνται σε νέες συχνότητες, έτσι ώστε η συνολική ενέργεια και ορμή να διατηρούνται κατά την παραμετρική αλληλεπίδραση. Η βασική διαφορά μεταξύ των παραμετρικών διαδικασιών και των διαδικασιών εξαναγκασμένης σκέδασης έγκειται στο ότι η προσαρμογή φάσης ικανοποιείται αυτομάτως στην περίπτωση των τελευταίων σαν αποτέλεσμα της ενεργού συμμετοχής του μη-γραμμικού μέσου. Αντίθετα, η συνθήκη προσαρμογής φάσης απαιτεί μία συγκεκριμένη επιλογή των συχνοτήτων και των δεικτών διάθλασης ώστε να ενισχυθούν οι παραμετρικές διαδικασίες [20].

Στην εξίσωση 4.4 υπάρχουν δύο τύποι παραγόντων FWM. Ο όρος που περιλαμβάνει τον παράγοντα θ_+ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου τρία φωτόνια μεταφέρουν την ενέργειά τους σε ένα φωτόνιο που βρίσκεται στη συχνότητα $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$. Αυτός ο όρος ευθύνεται για φαινόμενα όπως η γένεση τρίτης αρμονικής ($\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$) και η μετατροπή συχνότητας στην περίπτωση όπου ($\omega_1 = \omega_2 \neq \omega_3$). Σε γενικές γραμμές είναι αρκετά δύσκολο να ικανοποιηθεί η προσαρμογή φάσης για τέτοιες διεργασίες ώστε αυτές να επιτευχθούν με μεγάλη απόδοση. Ο όρος θ_- αντίστοιχα σχετίζεται με την περίπτωση όπου δύο φωτόνια στις συχνότητες ω_1 και ω_2 εξαφανίζονται με ταυτόχρονη παραγωγή δύο φωτονίων στις συχνότητες ω_3 και ω_4 , έτσι ώστε $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$. Η απαίτηση για την προσαρμογή φάσης σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$\Delta k = \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 = (n_3\omega_3 + n_4\omega_4 - n_1\omega_1 - n_2\omega_2)/c \quad (4.7)$$

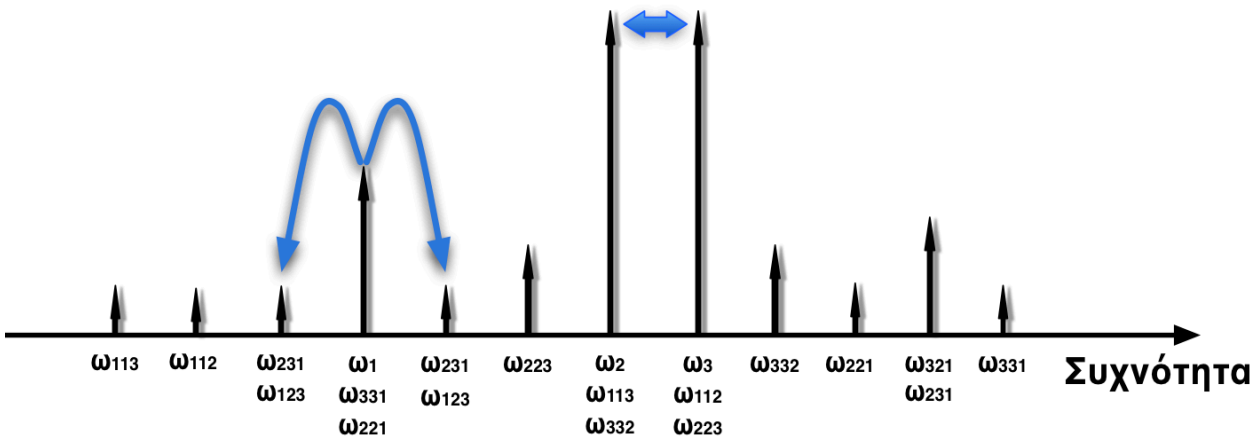
Σε αντίθεση με τις προηγούμενες αλληλεπιδράσεις, η προσαρμογή φάσης στην περίπτωση όπου $\omega_1 = \omega_2$ είναι ευκολότερο να επιτευχθεί. Η περίπτωση αυτή που ονομάζεται και εκφυλισμένη μίξη τεσσάρων κυμάτων (degenerate FWM) είναι ευρέως γνωστή για τη μετατροπή μήκους κύματος στις οπτικές ίνες και εκδηλώνεται όπως η SRS. Ένα ισχυρό κύμα άντλησης (pump wave), το οποίο βρίσκεται στη συχνότητα ω_1 , δημιουργεί δύο πλευρικές ζώνες που βρίσκονται συμμετρικά στις συχνότητες ω_3 και ω_4 με χαρακτηριστικό τη συχνότητα διακροτήματος $\Omega_S = \omega_1 - \omega_3 = \omega_4 - \omega_1$. Να σημειωθεί ότι χωρίς βλάβη της γενικότητας θεωρήσαμε ότι $\omega_3 < \omega_4$. Η χαμηλή πλευρική ζώνη που έχει σαν κέντρο τη συχνότητα ω_3 και η υψηλή πλευρική ζώνη που έχει σαν κέντρο τη συχνότητα ω_4 αντίστοιχα αναφέρονται σαν ζώνες Stokes και anti-Stokes. Η εκφυλισμένη μίξη τεσσάρων κυμάτων αρχικά ονομαζόταν μίξη τριών κυμάτων όπως λογικά προκύπτει από το γεγονός ότι τρία κύματα συμμετέχουν στη διαδικασία αυτή [20]. Επιπλέον να σημειωθεί ότι οι ζώνες Stokes και anti-Stokes ονομάζονται ζώνες του σήματος (signal) και του συζυγούς (conjugate ή idler), δανειζόμενοι ορολογία από τη μικροκυματική θεωρία [20].

4.1.2 Θεωρία της μίξης τεσσάρων κυμάτων

Στην παράγραφο αυτή θα προσπαθήσουμε να εμβαθύνουμε λίγο περισσότερο στη θεωρία της μίξης τεσσάρων κυμάτων που λαμβάνει χώρα στην οπτική ίνα προσπαθώντας να εξηγήσουμε το φυσικό μηχανισμό που κρύβεται πίσω από την εμφάνιση του φαινομένου αυτού. Ας θεωρήσουμε λοιπόν αρχικά ότι δύο κύματα με συχνότητες ω_1 και ω_2 οδεύουν στο εσωτερικό μιας οπτικής ίνας. Κατά τη διάδοσή τους μέσα από το μη γραμμικό μέσο, αλληλεπιδρούν δημιουργώντας ένα διακρότημα με συχνότητα $\omega_1 - \omega_2$, το οποίο διαμορφώνει το δείκτη διάθλασης $n(\omega, |E|^2)$ της οπτικής

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρουθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

ίνας, ο οποίος εξαρτάται από την ένταση του πεδίου. Ένα τρίτο κύμα το οποίο βρίσκεται στη συχνότητα ω_3 και διέρχεται από την προηγούμενη περιοχή θα υποστεί μία διαμόρφωση στη φάση που αντιστοιχεί στη συχνότητα διακροτήματος $\omega_1 - \omega_2$ εξαιτίας του διαμορφωμένου δείκτη διάθλασης n , με αποτέλεσμα το κύμα αυτό να αναπτύξει πλευρικές ζώνες στις συχνότητες $\omega_{3\pm}(\omega_2 - \omega_1)$. Το πλάτος των πλευρικών ζωνών θα είναι ανάλογο του πλάτους του σήματος στην ω_3 . Με τον ίδιο τρόπο το κύμα ω_3 θα αλληλεπιδράσει με το ω_1 και θα διαμορφώσουν τη φάση του ω_2 με συνέπεια τη δημιουργία πλευρικών ζωνών στις $\omega_{2\pm}(\omega_3 - \omega_1)$ κ.ο.κ. Από την παραπάνω ανάλυση είναι προφανές ότι μια τυπική μίξη τεσσάρων κυμάτων περιλαμβάνει πολλές επιμέρους αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυμάτων που συμμετέχουν στη διαδικασία, οι οποίες, λαμβάνοντας υπόψη και τις εκφυλισμένες, θα προκαλέσουν τη γένεση φωτός σε εννέα νέες συχνότητες όπως εικονίζεται και στο σχήμα.



Σχήμα 4-1: Συχνοτικά προϊόντα της μίξης τεσσάρων κυμάτων για δύο κύματα άντλησης στις συχνότητες ω_2 και ω_3 και ένα ασθενές σήμα στην ω_1 .

Από το σχήμα 4-1 φαίνεται επίσης ότι κάποια FWM παράγωγα επικαλύπτουν το αρχικά σήματα στις συχνότητες ω_1 , ω_2 και ω_3 . Επομένως, η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των κυμάτων μπορεί να κατευθυνθεί κατάλληλα, όπως θα δούμε παρακάτω, ώστε να προσφέρει ενίσχυση σε ασθενή κύματα τα οποία λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία. Η ιδιότητα αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερος σημαντική και αποτελεί την αρχή λειτουργίας των παραμετρικών ενισχυτών.

Ας δούμε λοιπόν αναλυτικότερα πως μεταφράζεται σε πεδιακή προσέγγιση η απλή περίπτωση της εκφυλισμένης μίξης τεσσάρων κυμάτων, όπου ένα κύμα άντλησης στη συχνότητα ω_p και ένα σήμα στη συχνότητα ω_s συμμετέχουν για την παραγωγή του συζυγούς παραγώγου στη συχνότητα ω_i . Η έννοια της συζυγίας έγκειται στο γεγονός ότι το παράγωγο κληρονομεί τα χαρακτηριστικά φάσης του σήματος με συζυγή τρόπο (αντίθετο πρόσημο). Με βάση την προϋπόθεση της προσαρμογής φάσης και με την απλοποίηση της εξίσωσης 4.7 έχουμε ότι:

$$\Delta\kappa = \kappa(\omega_s) + \kappa(\omega_i) - 2\kappa(\omega_p) = 0 \quad (4.8)$$

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (4.9)$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι η σχέση (4.8) μπορεί να ικανοποιηθεί στην περίπτωση που τα κύματα είναι φασματικά τοποθετημένα κοντά στο μήκος κύματος μηδενικής διασποράς, το οποίο απαιτεί τη χρήση ινών μετατοπισμένης διασποράς DSF που προσφέρουν τη μηδενική διασπορά στην περιοχή των 1550 nm.

Η αλληλεπίδραση, λοιπόν, των τριών συνεχών κυμάτων (continuous wave, CW) στις συχνότητες ω_p , ω_s και ω_i , τα οποία θεωρούμε ότι χαρακτηρίζονται από το ίδιο διάνυσμα

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

πόλωσης ώστε να μεγιστοποιείται η αλληλεπίδραση τους και περιγράφονται από τις αργά μεταβαλλόμενες περιβάλλουσες ηλεκτρικών πεδίων με μιγαδικά πλάτη $A_{P(z)}$, $A_{S(z)}$ και $A_{I(z)}$ αντίστοιχα. Το συνολικό εγκάρσιο πεδίο $E_{(x,y,z)}$ που διαδίδεται κατά μήκος της μονότροπης οπτικής ίνας μπορεί να γραφεί ως [20]:

$$E_{(x,y,z)} = f_{(x,y)} \frac{1}{2} [A_{P(z)} \exp(ik_p z - i\omega_p t) + A_{S(z)} \exp(ik_s z - i\omega_s t) + A_{I(z)} \exp(ik_i z - i\omega_i t)] \quad (4.10)$$

όπου $f_{(x,y)}$ είναι η εγκάρσια κατανομή του τρόπου που θεωρείται κοινή για τα τρία κύματα κατά μήκος της διάδοσης στην ίνα. Χρησιμοποιώντας τη βασική εξίσωση διάδοσης είναι εύκολο να προκύψουν οι τρεις συζευγμένες εξισώσεις που περιγράφουν την εξέλιξη των μιγαδικών πεδίων των τριών κυμάτων στην οπτική ίνα [78], [79].

$$\frac{dA_P}{dz} = i\gamma [(|A_P|^2 + 2(|A_S|^2 + |A_I|^2)) A_P + 2A_S A_I A_P^* \exp(i\Delta k z)] \quad (4.11)$$

$$\frac{dA_S}{dz} = i\gamma [(|A_S|^2 + 2(|A_P|^2 + |A_I|^2)) A_S + A_I^* A_P^2 \exp(-i\Delta k z)] \quad (4.12)$$

$$\frac{dA_I}{dz} = i\gamma [(|A_I|^2 + 2(|A_P|^2 + |A_S|^2)) A_I + A_S^* A_P^2 \exp(-i\Delta k z)] \quad (4.13)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις οι απώλειες της οπτικής ίνας έχουν αγνοηθεί και $\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{eff}$ είναι ο μη γραμμικός συντελεστής της οπτικής ίνας, όπου n_2 είναι η μη γραμμική παράμετρος που αντιστοιχεί στο φαινόμενο Kerr και A_{eff} είναι η διατομή της ενεργού περιοχής της ίνας. Θεωρούμε επίσης ότι ο μη γραμμικός συντελεστής είναι παρόμοιος και για τα τρία κύματα και είναι πραγματικός αριθμός, έτσι ώστε η απολαβή Raman να είναι αμελητέα. Σύμφωνα και με την ερμηνεία της εξίσωσης 4.4, στις εξισώσεις αυτές οι δύο πρώτοι όροι ευθύνονται για τη μη γραμμική φάση εξαιτίας του SPM και του XPM αντίστοιχα. Ο τελευταίος όρος σε κάθε εξίσωση έχει να κάνει με τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των κυμάτων που αλληλεπιδρούν. Αν η οπτική ίνα εισάγει σημαντικές απώλειες, τότε θα πρέπει στο δεξί μέρος της κάθε εξίσωσης να προστεθεί και ο όρος $-\frac{\alpha}{2} A_j |_{j=P,S,I}$.

4.1.3 Μη γραμμική προσαρμογή φάσης

Ξαναγράφοντας τις εξισώσεις (4.11)-(4.13) ως προς την ισχύ και τη φάση των τριών κυμάτων μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τους φυσικούς μηχανισμούς μεταφοράς ενέργειας. Έτσι θεωρώντας ότι $A_{j(z)} = \sqrt{P_j} \exp(i\phi_j)$ για $j \in \{p, s, i\}$ όπου $P_j = |A_j|^2$ οι εξισώσεις (4.11)-(4.13) μετασχηματίζονται ως εξής [80], [81]:

$$\frac{dP_P}{dz} = -4\gamma (P_P^2 P_S P_I)^{1/2} \sin\theta \quad (4.14)$$

$$\frac{dP_S}{dz} = 2\gamma (P_P^2 P_S P_I)^{1/2} \sin\theta \quad (4.15)$$

$$\frac{dP_I}{dz} = 2\gamma (P_P^2 P_S P_I)^{1/2} \sin\theta \quad (4.16)$$

$$\frac{d\theta}{dz} = \Delta k + \gamma (2P_P - P_S - P_I) + \gamma [(P_P^2 P_I / P_S)^{1/2} + (P_P^2 P_S / P_I)^{1/2} - 4(P_S P_I)^{1/2}] \cos\theta \quad (4.17)$$

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρουσμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Στις εξισώσεις αυτές, η παράμετρος $\theta_{(z)}$ που εξελίσσεται με τη διάδοση εκφράζει τη διαφορά φάσης μεταξύ των κυμάτων που διαδίδονται και ισούται με:

$$\theta_{(z)} = \Delta kz + \Delta\varphi_{NL} + 2\varphi_{P(0)} - \varphi_{S(0)} - \varphi_{i(0)} \quad (4.18)$$

όπου ο όρος $\varphi_{j(z)}$ δηλώνει την αρχική φάση για το κάθε φωτεινό κύμα ξεχωριστά, ο όρος Δkz εκφράζει τη γραμμική ολίσθηση φάσης η οποία οφείλεται στη διασπορά του υλικού ενώ ο όρος $\Delta\varphi_{NL}$, ο οποίος περιλαμβάνει τον δεύτερο και τρίτο όρο της εξίσωσης 4.17, εκφράζει τη μη γραμμική ολίσθηση φάσης που επάγεται από το κύμα άντλησης μέσω των φαινομένων XPM και SPM. Όπως μπορεί κανείς να συμπεράνει παρατηρώντας τις εξισώσεις 4.14-4.17, με κατάλληλη επιλογή τιμών για τη φάση θ , δίνεται η δυνατότητα να ελεγχθεί η κατεύθυνση της ενεργειακής ροής από το κύμα άντλησης στο σήμα και στο συζυγές ($\theta=\pi/2$, παραμετρική ενίσχυση) ή αντίστροφα ($\theta=-\pi/2$, παραμετρική εξασθένιση). Με άλλα λόγια με σωστή ρύθμιση της μεταξύ τους διαφορά φάσης (μη γραμμική προσαρμογή φάσης) καθορίζεται αν το σήμα θα ενισχυθεί ή θα εξασθενήσει.

Η απουσία του συζυγούς κύματος στην είσοδο του ενισχυτή οδηγεί σε αναίρεση της εξάρτησης της ενίσχυσης από τη φάση αφού για οποιοσδήποτε τιμές φάσης των κυμάτων άντλησης και σήματος η διαδικασία FWM παράγει το συζυγές με βάση τον κανόνα προσαρμογής φάσης, διασφαλίζοντας τη διατήρηση του $\theta=\pi/2$ σε κάθε σημείο της ίνας και επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο τη μεταφορά ενέργειας από το κύμα άντλησης στο σήμα και στο συζυγές του στα πρώτα κίβλας μέτρα διάδοσης στην ίνα. Η μη ευαίσθητη στη φάση παραμετρική ενίσχυση μελετήθηκε ιδιαίτερα στο παρελθόν από διάφορες ερευνητικές ομάδες και βρήκε πρόσφορο έδαφος σε μία ευρύτατη γκάμα εφαρμογών όπως περιοριστές θορύβου πλάτους [13], αναδιαμορφωτές παλμών μορφής RZ (RZ reshaping) [82], αμιγώς οπτική μετατροπή μήκους κύματος [83], [84] και αμιγώς οπτική διαγραφή ετικέτας [85].

Την τελευταία δεκαετία ωστόσο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει προσελκύσει η διαδικασία της ευαίσθητης στη φάση παραμετρικής ενίσχυσης [86]-[88], η οποία προσφέρει μία ιδιαίτερως σημαντική ιδιότητα στον ενισχυτή, την υπό συνθήκες κβάντιση της φάσης εξόδου του σήματος και του συζυγούς η οποία όπως θα δούμε και στις επόμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου οδηγεί σε μία σειρά ενδιαφερόντων εφαρμομογών.

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιαστεί η αρχή λειτουργίας των μη ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών (phase insensitive fiber optic parametric amplifier, PI-FOPA) σε τοπολογία μονής (1P-FOPA) και διπλής άντλησης (2P-FOPA) ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει οικειότητα με τη διεργασία της μίξης τεσσάρων κυμάτων. Στη συνέχεια αφού παρουσιαστεί μία εκτενής αριθμητική μελέτη των χαρακτηριστικών των ενισχυτών αυτών θα επικεντρωθούμε στην ειδική περίπτωση των ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών για τους οποίους θα παρουσιασθούν οι βασικές διαφορές ως προς τις επιδόσεις και τα πλεονεκτήματά τους έναντι των PI-FOPA αλλά και η υπεροχή τους ως προς την αναγέννηση PSK σημάτων.

4.2 Παραμετρικός ενισχυτής με ένα κύμα άντλησης (1P-FOPA)

Όταν η παραμετρική διαδικασία λειτουργεί κοντά στη συνθήκη προσαρμογής φάσης, τότε η παράμετρος θ είναι πρακτικά $\pi/2$. Με βάση την παρατήρηση αυτή η σχέση 4.17 μπορεί περαιτέρω να απλοποιηθεί ως εξής [78]:

$$\frac{d\theta}{dz} \approx \Delta k + \gamma(2P_p - P_s - P_i) \approx \Delta k + 2\gamma P_p \approx k \quad (4.19)$$

Η παράμετρος κ που εισάγεται στην παραπάνω εξίσωση είναι ο συνολικός παράγοντας προσαρμογής φάσης και διαφοροποιείται από εκείνο που είδαμε για πρώτη φορά στη σχέση 4.7, στο ότι περιλαμβάνει και τη συνεισφορά της μη γραμμικότητας στη διαταραχή της συνθήκης τέλει προσαρμογής φάσης. Όπως εξηγήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, η τιμή της παραμέτρου κ και όχι της $\Delta\kappa$ καθορίζει για ποιές φασματικές θέσεις του σήματος υπάρχει παραμετρική ενίσχυση και ισοδύναμα το εύρος συχνοτήτων ενός τέτοιου ενισχυτή.

Η δεύτερη προσέγγιση στην εξίσωση 4.19 είναι έγκυρη όταν κατά την παραμετρική ενίσχυση η ενέργεια του κύματος άντλησης δεν καταναλώνεται σημαντικά από τα υπόλοιπα ($P_p \gg P_s, P_i$) οπότε και αγνοείται το φαινόμενο της ισχυρής μείωσης της ενέργειας της άντλησης από τα ενισχυμένα παράγωγα (pump depletion, PD). Ο παράγοντας $\Delta\kappa$ που αφορά τη γραμμική συνιστώσα της προσαρμογής φάσης μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω αν η σταθερά διάδοσης β για τα τρία κύματα αναπτυχθεί κατά Taylor μέχρι και την τέταρτη τάξη γύρω από τη συχνότητα μηδενικής διασποράς ω_0 ($\beta_{2(\omega_0)}=0$). Όπως έχει ήδη αναφερθεί η οπτική ίνα που χρησιμοποιείται είναι DSF, ώστε να υπάρχει δυνατότητα ικανοποίησης της προσαρμογής φάσης, οπότε έχει νόημα και το ανάπτυγμα που προκύπτει.

$$\Delta\kappa = \left\{ \beta_3(\omega_p - \omega_0) + \frac{\beta_4}{2} \left[(\omega_p - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}(\omega_p - \omega_i)^2 \right] \right\} (\omega_p - \omega_s)^2 \quad (4.20)$$

Στην παραπάνω σχέση β_3 και β_4 είναι η τρίτης και τέταρτης τάξης διασπορά στη συχνότητα ω_p . Όταν το κύμα άντλησης τοποθετείται στη συχνότητα μηδενικής διασποράς, η προσαρμογή φάσης εμποδίζεται από τη διασπορά τέταρτης τάξης.

Δεδομένου ότι η τέταρτης τάξης διασπορά κυμαίνεται σε περιοχή τιμών γύρω από το $\beta_4 \approx -10^{-4} \text{ ps}^4/\text{km}$, οι τιμές διασποράς υψηλότερης τάξης περιορίζουν το εύρος λειτουργίας του ενισχυτή ($\Delta\lambda_{ps} = \lambda_p - \lambda_s$) όταν αυτό ξεπερνά τα 100nm, οπότε και δεν έχει νόημα να συμπεριλάβουμε την επίδρασή τους. Για τις τιμές εύρους συχνοτήτων που είναι πιο συνηθισμένες ($\Delta\lambda_{ps} = 30\text{nm}$) μπορεί και η διασπορά τέταρτης τάξης να αγνοηθεί χωρίς την πρόκληση σφαλμάτων στον υπολογισμό του $\Delta\kappa$. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή του εκφράζεται όπως παρακάτω [89]:

$$\Delta\kappa = \frac{\lambda_p^2}{c^2} \frac{1}{4\pi^2} \frac{dD}{d\lambda} (\omega_p - \omega_s)^2 (\omega_p - \omega_0) \quad (4.21)$$

Η παράγωγος $dD/d\lambda$ που εμφανίζεται στη σχέση αντιστοιχεί στην κλίση της διασποράς, η οποία είναι σταθερή στην περιοχή γύρω από το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς λ_0 . Από τη σχέση (4.21) είναι προφανές ότι ο παράγοντας $\Delta\kappa$ αυξάνει όταν είμαστε στο καθεστώς της ομαλής διασποράς ($\omega_p > \omega_0$), γεγονός το οποίο σημαίνει ότι ο συνολικός παράγοντας κ απομακρύνεται από το μηδέν, όσο το σήμα απομακρύνεται φασματικά από το κύμα άντλησης. Αντίθετα, όταν το κύμα άντλησης βρίσκεται στο καθεστώς της ανώμαλης διασποράς ($\Delta\kappa < 0$), δίνεται η δυνατότητα της αντιστάθμισης του μη γραμμικού παράγοντα $2\gamma P_p$ από τη γραμμική συνιστώσα $\Delta\kappa$. Η ανάλυση αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να προβλέψουμε τη μορφή του φάσματος του παραμετρικού ενισχυτή με ένα κύμα άντλησης. Για δεδομένο λ_p μεγαλύτερο του λ_0 , η απολαβή σαν συνάρτηση του λ_s θα έχει τη μορφή δύο λοβών εκατέρωθεν του κύματος άντλησης, με κορυφαία τιμή απολαβής για κάθε λοβό εκεί όπου $\kappa = \Delta\kappa + 2\gamma P_p = 0$. Η παραμετρική διαδικασία

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

διαδικασία που μόλις περιγράψαμε υποκινείται από τους ίδιους μηχανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την αστάθεια διαμόρφωσης (modulation instability, MI) [20]. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της χρωματικής διασποράς και της μη γραμμικότητας.

Η επιπλέον μελέτη της προσαρμογής φάσης με βάση κυρίως τη σχέση 4.21 μας υποδεικνύει ότι για απόλυτη προσαρμογή φάσης ισχύει ότι:

$$2\gamma P_p = -\Delta k \propto (\omega_p - \omega_s)^2 (\omega_p - \omega_0) \quad (4.22)$$

Επομένως η φασματική απόσταση των κορυφών των λοβών για το σήμα εισόδου θα αυξάνει, όσο αυξάνει η ισχύς του κύματος άντλησης P_p δεδομένου ότι η ω_p είναι σταθερή. Αυτή τη συμπεριφορά θα τη μελετήσουμε γραφικά στην επόμενη παράγραφο.

Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι όσα είπαμε για την προσαρμογή φάσης ισχύουν στην περίπτωση που το κύμα άντλησης μένει ενεργειακά ανεπηρέαστο. Αν η ενέργεια του μειωθεί σημαντικά, οπότε και η σχέση $P_p \gg P_s$ δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, η προσέγγιση της (4.19) είναι λανθασμένη. Όταν το κύμα άντλησης μειωθεί ενεργειακά μειώνεται η επίδραση της μη γραμμικής ολίσθησης φάσης με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η συνθήκη μη γραμμικής προσαρμογής φάσης. Η διαταραχή αυτή στην σχετική φάση θ ($\theta < \pi/2$) έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια να αρχίσει να ταλαντώνεται μεταξύ του κύματος άντλησης και του σήματος/παραγώγων, σαν συνέπεια της ταλάντωσης της φάσης θ στο διάστημα $[-\pi/2, \pi/2]$. Περισσότερες λεπτομέρειες για την περίπτωση αυτή θα αναφερθούν σε επόμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου στην οποία θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει ο ενισχυτής σε αυτή την περιοχή λειτουργίας. Στην παρούσα παράγραφο θα περιοριστούμε στην λειτουργία του FOPA υπό το καθεστώς μη ισχυρής μεταφοράς ενέργειας της άντλησης στο σήμα και στο συζυγές.

Οι εξισώσεις 4.11-4.13 καλύπτουν και τις δύο περιπτώσεις, ενώ επιπλέον περιλαμβάνουν την επίδραση της διασποράς μέχρι και την τέταρτη τάξη και τη μη γραμμική ολίσθηση φάσης από τα φαινόμενα SPM, XPM. Με την αριθμητική προσομοίωσή τους είναι εφικτό να μελετηθούν σε βάθος οι επιδράσεις όλων των επιμέρους φαινομένων. Για την ευκολότερη κατανόηση της παραμετρικής ενίσχυσης μπορούμε να αγνοήσουμε τη μείωση της ενέργειας του κύματος άντλησης και επομένως ο δεύτερος όρος του δεξιού σκέλους της 4.11 να αμεληθεί. Η αναλυτική λύση που προκύπτει από την παραπάνω θεώρηση μπορεί να εξαχθεί για τις υπόλοιπες δύο εξισώσεις όπως και στην αναφορά [78] και δίνει την ισχύ του σήματος και του συζυγούς μετά την παραμετρική διαδικασία από τις εκφράσεις:

$$P_{s(L)} = P_{s(0)} \left\{ 1 + \left[\frac{\gamma P_p}{g} \sinh(gL) \right]^2 \right\} \quad (4.23)$$

$$P_{i(L)} = P_{i(0)} \left[\frac{\gamma P_p}{g} \sinh(gL) \right]^2 \quad (4.24)$$

όπου L είναι το μήκος της οπτικής ίνας και g είναι ο συντελεστής παραμετρικής ενίσχυσης που δίνεται από τη σχέση:

$$g^2 = (\gamma P_p)^2 - \left(\frac{k}{2} \right)^2 = -\Delta k \left(\frac{\Delta k}{4} + \gamma P_p \right) \quad (4.25)$$

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Στην περίπτωση που οι απώλειες της οπτικής ίνας δε μπορούν να αγνοηθούν λόγω του μεγάλου μήκους της, τότε το μήκος που καθορίζει την παραμετρική διαδικασία δεν είναι το συνολικό, αλλά το «ενεργό» μήκος όπως έχει καθιερωθεί να λέγεται και το οποίο εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (4.26)$$

όπου α ο συντελεστής απωλειών της οπτικής ίνας. Οι παραμετρικοί ενισχυτές των σύγχρονων εφαρμογών χρησιμοποιούν ειδικά κατασκευασμένες οπτικές ίνες που στο εσωτερικό τους περιέχουν μικροδομές διαφόρων γεωμετριών οι οποίες προσδίδουν αυξημένη μη γραμμικότητα διατηρώντας ταυτόχρονα το απαιτούμενο μήκος αλληλεπίδρασης σε αρκετά μικρές τιμές. Παρόλο που οι απώλειες τους ξεπερνούν αυτές των συνηθισμένων μονότροπων ινών ($\alpha=0.7\text{dB/km}$ αντί του $\alpha=0.2\text{dB/km}$ για τις απλές μονότροπες), το μικρότερο του χιλιομέτρου μήκος τους επιτρέπει να αγνοηθεί η επίδρασή των απωλειών με ασφάλεια, οπότε και $L_{eff} \approx L$. Περισσότερα για τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων ινών αλλά και άλλων μέσων εντός των οποίων λαμβάνει χώρα η παραμετρική ενίσχυση θα δούμε σε επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου αυτού.

Δύο συνθήκες λειτουργίας του παραμετρικού ενισχυτή παρουσιάζουν ενδιαφέρον και μπορούν να σκιαγραφήσουν συνολικά τα χαρακτηριστικά απολαβής. Αφενός η συνθήκη στην οποία η γραμμική συνιστώσα του παράγοντα προσαρμογής φάσης είναι κοντά στο μηδέν ($\Delta k=0$), κάτι που πρακτικά ισχύει όταν το σήμα τοποθετείται φασματικά αρκετά κοντά στο κύμα άντλησης. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή της απολαβής του παραμετρικού ενισχυτή δίνεται από τη σχέση $G_s=(\gamma P_p L)^2$ με βάση τις εξισώσεις 4.23-4.24. Η δεύτερη σημαντική συνθήκη αναφέρεται στο μηδενισμό του συνολικού παράγοντα προσαρμογής φάσης κ που αντιστοιχεί στην τέλεια προσαρμογή φάσης. Για αυτή την περιοχή λειτουργίας η παραμετρική ενίσχυση προσφέρει απολαβή ίση με:

$$G_s \approx \frac{1}{4} \exp(2\gamma P_p L) \quad (4.27)$$

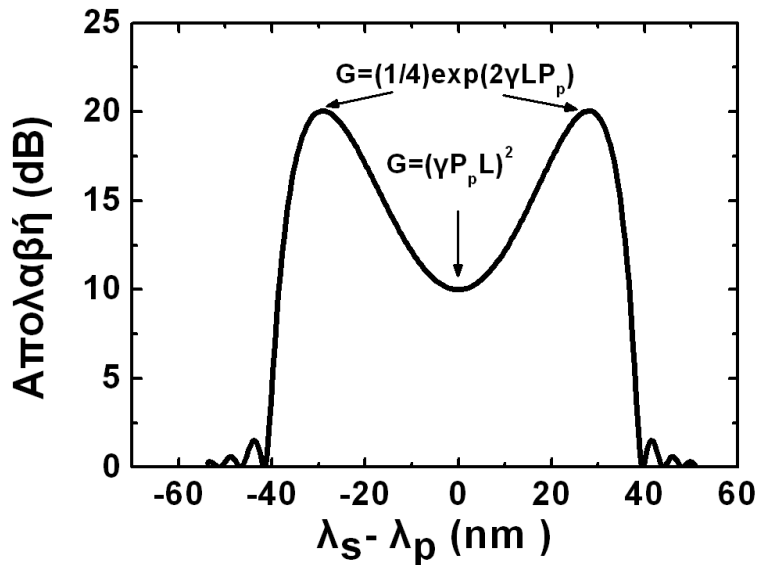
Παρατηρούμε λοιπόν ότι η απολαβή είναι τετραγωνικά εξαρτώμενη από την ισχύ του κύματος άντλησης όταν το σήμα είναι αρκετά κοντά τοποθετημένο στο κύμα άντλησης. Αντίθετα όσο απομακρύνεται, η προσαρμογή φάσης ικανοποιείται όλο και περισσότερο με αποτέλεσμα την εκθετική εξάρτηση της απολαβής από την ισχύ του κύματος άντλησης. Στην επόμενη παράγραφο θα συζητήσουμε εκτενέστερα τα χαρακτηριστικά του εύρους ζώνης απολαβής του 1P-FOPA.

Οι εκφράσεις 4.23-4.27 μπορούν να οδηγήσουν σε χρήσιμα συμπεράσματα για τις ενισχυτικές ιδιότητες των 1P-FOPA. Στο σχήμα 4.2 απεικονίζεται η καμπύλη απολαβής συναρτήσει της φασματικής απόστασης μεταξύ του σήματος και του κύματος άντλησης ($\lambda_s-\lambda_p$) ενώ αποτυπώνονται οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τις δύο περιοχές ενίσχυσης που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Για τον θεωρητικό υπολογισμό της καμπύλης απολαβής με βάση τις προαναφερθείσες εξισώσεις χρησιμοποιήθηκε μία τυπική ίνα μετατοπισμένης διασποράς με μήκος $L=250$ m, παράγοντα μή-γραμμικότητας $\gamma=12 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, μήκος κύματος μηδενικής διασποράς $\lambda_0=1555$ nm, κλίση της χρωματικής διασποράς $dD/d\lambda=0.03 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ και απώλειες $\alpha=0.7\text{dB/km}$. Το κύμα άντλησης τοποθετήθηκε στα $\lambda_p=1556$ nm, κοντά δηλαδή στο σημείο μηδενικής διασποράς για τη μεγιστοποίηση του εύρους απολαβής, ενώ η ισχύς του επιλέχθηκε να είναι ίση με $P_p=1\text{W}$.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

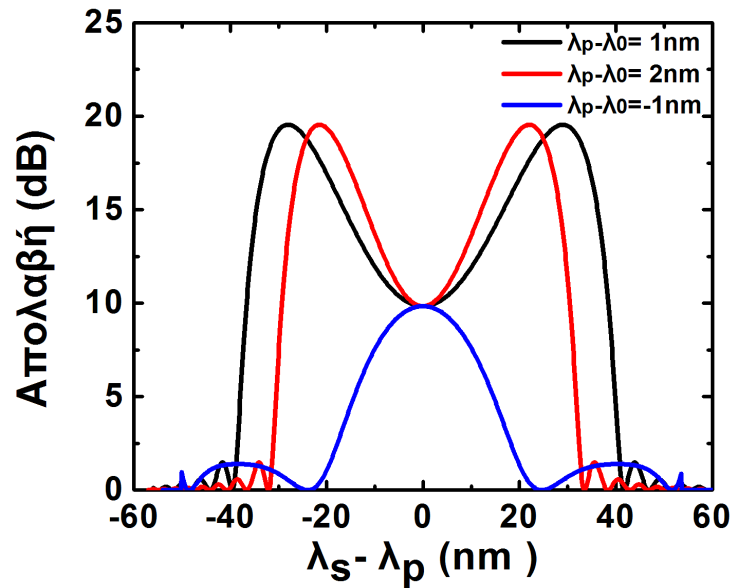
Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4-2, η μέγιστη απολαβή καθορίζεται από το γινόμενο $\gamma P_p L$ και εμφανίζεται στην περιοχή όπου η γραμμική συνιστώσα του παράγοντα προσαρμογής φάσης είναι ίση και αντίθετη με τη μη γραμμική, οπότε ισχύει $k=0$.



Σχήμα 4-2: Απολαβή του 1P-FOPA συναρτήσει της σχετικής φασματικής απόστασης μεταξύ του σήματος και του κύματος άντλησης.

Η θέση του κύματος άντλησης ως προς το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του FWM. Στην παράγραφο 4.2 εξηγήσαμε ότι όταν το κύμα άντλησης βρίσκεται στην περιοχή ομαλής διασποράς ($\lambda_p < \lambda_0$) το Δk παίρνει θετικές τιμές και αυξάνεται με την απομάκρυνση του σήματος από το κύμα άντλησης με αποτέλεσμα η μη γραμμικότητα να μην μπορεί να αντισταθμιστεί από τη διασπορά και επομένως να μην παράγεται παραμετρική ενίσχυση. Όταν όμως το κύμα άντλησης βρεθεί στην περιοχή ανώμαλης διασποράς ($\lambda_p > \lambda_0$) η συνθήκη προσαρμογής επιτυγχάνεται και λοβοί ενίσχυσης δημιουργούνται εκατέρωθεν του κύματος άντλησης. Ωστόσο, από τη σχέση 4.22 παρατηρούμε ότι η αύξηση της φασματικής απόστασης του κύματος άντλησης από το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς οδηγεί σε μείωση της φασματικής απόστασης των λοβών ώστε να διατηρηθεί η προσαρμογή φάσης. Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη ραγδαία συρρίκνωση του εύρους ζώνης του ενισχυτή αφού το Δk έχει τετραγωνική εξάρτηση από τον παράγοντα $\omega_p - \omega_s$.

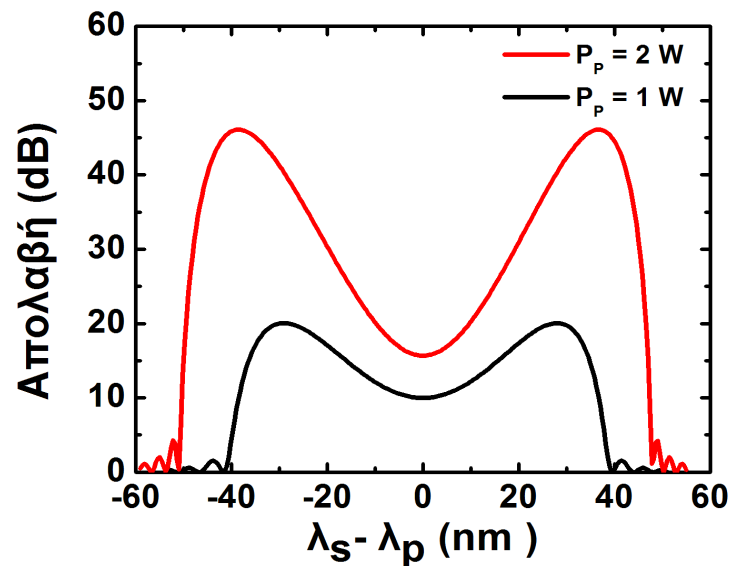
Στο σχήμα 4-3 απεικονίζονται οι τρεις περιπτώσεις που μόλις συζητήθηκαν δίνοντας έτσι μία πρώτη εκτίμηση της περιοχής λειτουργίας και των επιδόσεων του ενισχυτή.



Σχήμα 4-3: Απολαβή του 1P-FOPA συναρτήσει της σχετικής φασματικής απόστασης μεταξύ σήματος και κύματος άντλησης για διαφορετικές φασματικές αποστάσεις μεταξύ του κύματος άντλησης και του μήκους κύματος μηδενικής διασποράς.

Σύμφωνα με τις παραπάνω χαρακτηριστικές απολαβής, για απόσταση 1 nm μεταξύ του κύματος άντλησης και του μήκους κύματος μηδενικής διασποράς το εύρος ζώνης ισούται με 11.6 nm ενώ όταν η απόσταση αυτή αυξηθεί στα 2 nm το εύρος ζώνης συρρικνώνεται στα 8.6 nm. Έτσι λοιπόν, η αύξηση κατά 1 nm της φασματικής απόστασης $\lambda_p - \lambda_0$ οδηγεί σε 3 nm υποβάθμιση του εύρους ζώνης και μετατόπισης των λοβών απολαβής κατά 6 nm πλησιέστερα στο κύμα άντλησης. Στην παραπάνω γραφική μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε τη συμπίεση της παραμετρικής ενίσχυσης κατά τη μετατόπιση του κύματος άντλησης στην περιοχή ομαλής διασποράς.

Το μέγιστο της απολαβής, όπως αναφέραμε παραπάνω, καθορίζεται, με βάση τη σχέση 4.27, από το γινόμενο $\gamma P_p L$. Επομένως, είναι προφανές ότι διατηρώντας το γινόμενο μήκους της ίνας και της μη-γραμμικότητας σταθερό, η απολαβή του ενισχυτή θα αυξηθεί εκθετικά με την αύξηση της ισχύος του κύματος άντλησης.



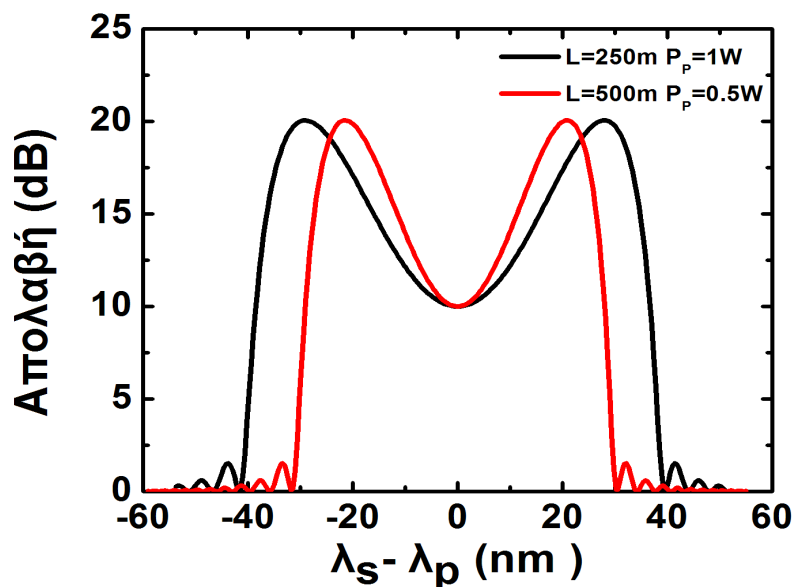
Σχήμα 4-4: Απολαβή του 1P-FOPA συναρτήσει της φασματικής απόστασης μεταξύ κύματος άντλησης και μήκους κύματος μηδενικής διασποράς για διαφορετικές τιμές της ισχύος του κύματος άντλησης.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Το σχήμα 4-4 επιβεβαιώνει τον παραπάνω ισχυρισμό ενώ ταυτόχρονα επιδεικνύει την εξάρτηση του εύρους ζώνης και της μετατόπισης των λοβών ενίσχυσης από την ισχύ του κύματος άντλησης. Έτσι, σύμφωνα με τη σχέση 4.22, η αύξηση του P_p οδηγεί σε αύξηση της απόλυτης τιμής του Δk ώστε να επιτευχθεί η προσαρμογή φάσης με αποτέλεσμα την ολίσθηση της κορυφής των λοβών ενίσχυσης σε μεγαλύτερη φασματική απόσταση ως προς το κύμα άντλησης ενώ παράλληλα το εύρος ζώνης στενεύει λόγω της μεγαλύτερης κλίσης που αποκτά η καμπύλη απολαβής.

Με βάση τις εξισώσεις 4.22 και 4.27 και λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συμπεριφορά της καμπύλης απολαβής του σχήματος 4-4 συμπεραίνουμε ότι κάθε ένας από τους τρεις παράγοντες γ , P_p και L επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο τη απόκριση του παραμετρικού ενισχυτή. Οπότε δεν έχει σημασία να επεκταθεί η μελέτη περαιτέρω. Ωστόσο, αν διατηρήσουμε σταθερό τον παράγοντα $\gamma P_p L$, ώστε να παραμένει σταθερή η απολαβή του συστήματος, το εύρος ζώνης του ενισχυτή πλέον καθορίζεται από το μήκος της ίνας και έχει αντίστροφη εξάρτηση από αυτό. Μικρότερο μήκος ίνας συνεπάγεται μεγαλύτερη ισχύ κύματος άντλησης ώστε να διατηρηθεί σταθερή η απολαβή, το οποίο συνεπάγεται αύξηση του γραμμικού παράγοντα Δk για την επίτευξη προσαρμογής. Η αύξηση αυτή, όπως εξηγήσαμε και προηγούμενως, ολισθαίνει τους λοβούς ενίσχυσης προς μεγαλύτερες φασματικές αποστάσεις μεταξύ σήματος και κύματος άντλησης, αλλά εφόσον η απολαβή διατηρείται σταθερή η κλίση της καμπύλης απολαβής μειώνεται και επομένως το εύρος ζώνης αυξάνεται (σχ. 4-5).

Όσα μόλις περιγράψαμε επιβεβαιώνονται πλήρως από τις καμπύλες απολαβής του σχήματος 4-5. Σύμφωνα λοιπόν, με τα παρακάτω αποτελέσματα, διατηρώντας σταθερό το γινόμενο $\gamma P_p L = 3$, το οποίο ισοδυναμεί με μέγιστη απολαβή 20 dB, η μείωση του μήκους της ίνας από τα 500 m στα 250 m οδηγεί σε αύξηση κατά 5 nm του εύρους ζώνης ενώ ταυτόχρονα ολισθαίνει την περιοχή του μεγίστου της ενίσχυσης κατά 10 nm μακρύτερα από το κύμα άντλησης.

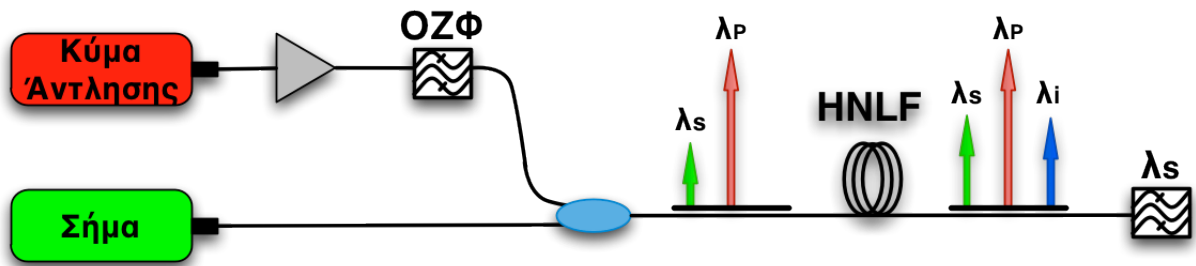


Σχήμα 4-5: Απολαβή ενός 1P-FOPA συναρτήσει της σχετικής φασματικής απόστασης μεταξύ του σήματος και του κύματος άντλησης για δύο διαφορετικά μήκη HNL-DSF ίνας, διατηρώντας το $\gamma P_p L$ σταθερό και ίσο με 3.

Μελετώντας τα αποτελέσματα της παραγράφου αυτής μπορούμε να βγάλουμε κάποια γενικά συμπεράσματα ως προς το πώς επηρεάζουν οι ανωτέρω παράμετροι τις

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

επιδόσεις του ενισχυτή και έτσι μπορούμε να προβούμε στον σχεδιασμό ενός παραμετρικού ενισχυτή με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, η μελέτη που πραγματοποιήσαμε μέχρι τώρα βασίστηκε στις θεωρητικές εξισώσεις 4.22-4.27 οι οποίες αν και προσφέρουν ασφαλή συμπεράσματα για τη γενική συμπεριφορά του ενισχυτή βασίζονται σε κάποιες απλοποιήσεις και θεωρήσεις, οι οποίες λήφθηκαν για τη διευκόλυνση της επίλυσής τους, και επομένως μπορεί να οδηγήσουν σε απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα αντίστοιχα πειραματικά. Για το σκοπό αυτό θα διερευνήσουμε τη συμπεριφορά του ενισχυτή χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο μοντέλο της διεργασίας FWM το οποίο βασίζεται στην επίλυση της μη γραμμικής εξίσωσης Schrödinger που αναφέραμε στο κεφάλαιο 2. Στην NLSE συμπεριλαμβάνονται οι συντελεστές διασποράς έως και τέταρτης τάξης ενώ λαμβάνονται υπ' όψιν και οι απώλειες της ίνας επιτρέποντας την πλήρη μελέτη του φαινομένου FWM. Το μοντέλο του 1P-FOPA που αναπτύξαμε για την αριθμητική μελέτη των επιδόσεών του, υλοποιήθηκε με βάση το διάγραμμα του σχήματος 4-6, στο οποίο ως πηγές άντλησης και σήματος χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα laser τα οποία βασίζονται στις εξισώσεις ροής του Petermann [91]. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν βασικό αντικείμενο μελέτης του κεφαλαίου 5 (εξ. 5.2-5.4), οπότε στην παρούσα ανάλυση δεν θα επεκταθούμε σε λεπτομέρειες.



Σχήμα 4-6: Διάγραμμα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του 1P-FOPA. ΕΠ: Ελεγκτής πόλωσης, ΟΖΦ: Οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, HNLF: ίνα υψηλής μή γραμμικότητας.

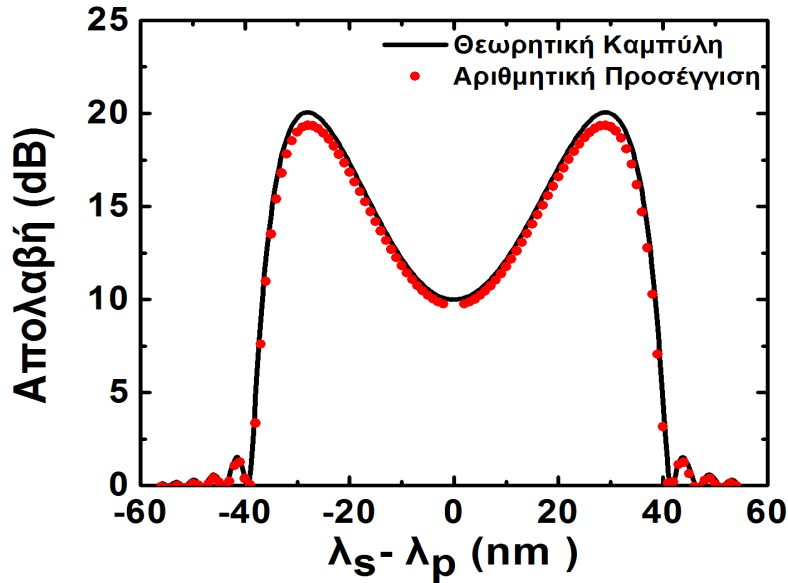
Οι παράμετροι της μη γραμμικής ίνας που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο μας επιλέχθηκαν να είναι ίδιες με αυτές της θεωρητικής μελέτης που παρουσιάσαμε παραπάνω. Έτσι, η μή γραμμικότητα είναι $\gamma=12 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, οι απώλειες είναι $\alpha=0.7 \text{ dB/km}$, το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς είναι $\lambda_0=1555 \text{ nm}$ και η κλίση της διασποράς $dD/d\lambda=0.03 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$. Οι διασπορές ανωτέρας τάξης δίνονται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$\beta_2 = -\lambda_p^2 \frac{dD}{d\lambda} \frac{(\lambda_p - \lambda_0)}{2\pi c} \quad (4.28)$$

$$\beta_3 = \lambda_p^3 \frac{dD}{d\lambda} \frac{(3\lambda_p - 2\lambda_0)}{(2\pi c)^2} \quad (4.29)$$

$$\beta_4 = -6\lambda_p^4 \frac{dD}{d\lambda} \frac{(2\lambda_p - \lambda_0)}{(2\pi c)^3} \quad (4.30)$$

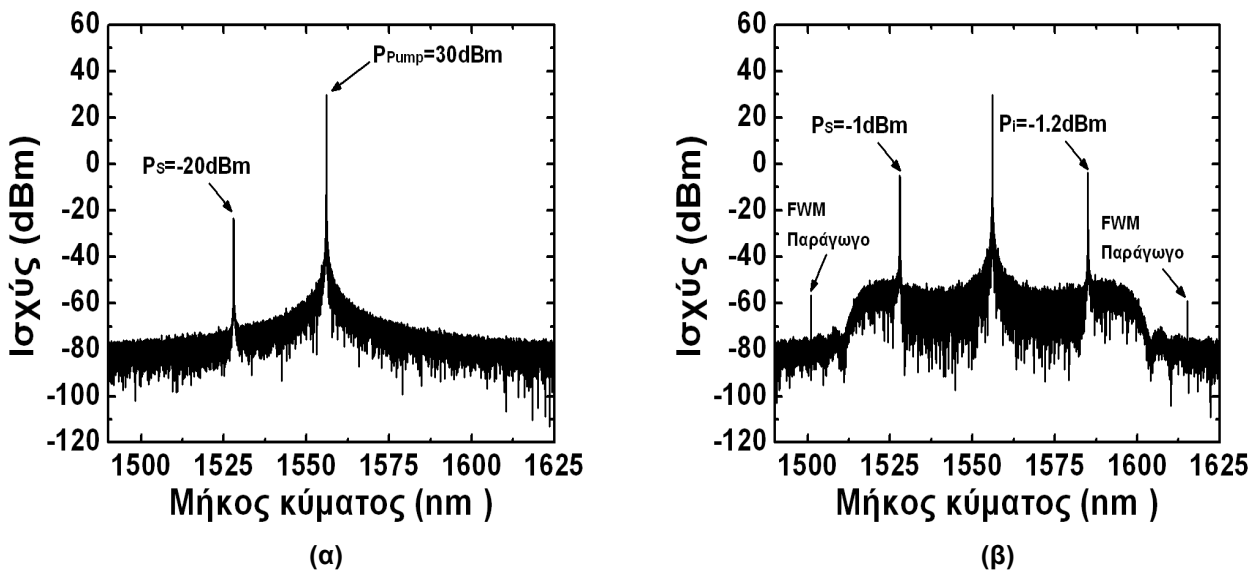
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 4-7: Καμπύλη απολαβής του 1P-FOPA με υπολογισμό της εξίσωσης 4.27 (μαύρη γραμμή) και με αριθμητική προσομοίωση της NLSE (κόκκινες κουκίδες) συναρτήσει της σχετικής φασματικής απόστασης μεταξύ σήματος και κύματος άντλησης.

Τοποθετώντας το κύμα άντλησης στα 1556 nm οι διασπορές ανωτέρας τάξης λαμβάνουν τις τιμές $\beta_2 = -0.0385 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0.0495 \text{ ps}^3/\text{km}$ και $\beta_4 = -2.45 \times 10^{-4} \text{ ps}^4/\text{km}$. Στο σχήμα 4-7 απεικονίζονται οι καμπύλες απολαβής για το μοντέλο του 1P-FOPA που προσομοιώσαμε καθώς επίσης και η αντίστοιχη θεωρητική προσέγγιση που παρουσιάσαμε στο σχήμα 4-2.

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα οι δύο καμπύλες συγκλίνουν σε εξαιρετικό βαθμό με μόνη διαφορά τη μέγιστη τιμή της ενίσχυσης η οποία για την περίπτωση της αριθμητικής προσομοίωσης είναι κατά 0.6 dB μικρότερη, γεγονός το οποίο οφείλεται στις απώλειες που λάβαμε υπ' όψιν μας και οι οποίες είχαν αγνοηθεί κατά τη θεωρητική προσέγγιση.



Σχήμα 4-8: Φάσμα του σήματος και του κύματος άντλησης πριν (α) και μετά (β) τον ενισχυτή 1P-FOPA.

Επιωφελούμενοι λοιπόν από τη δυνατότητα που μας προσφέρει η αριθμητική επίλυση της NLSE να μελετήσουμε εις βάθος τη συμπεριφορά του 1P-FOPA, παρουσιάζουμε το

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

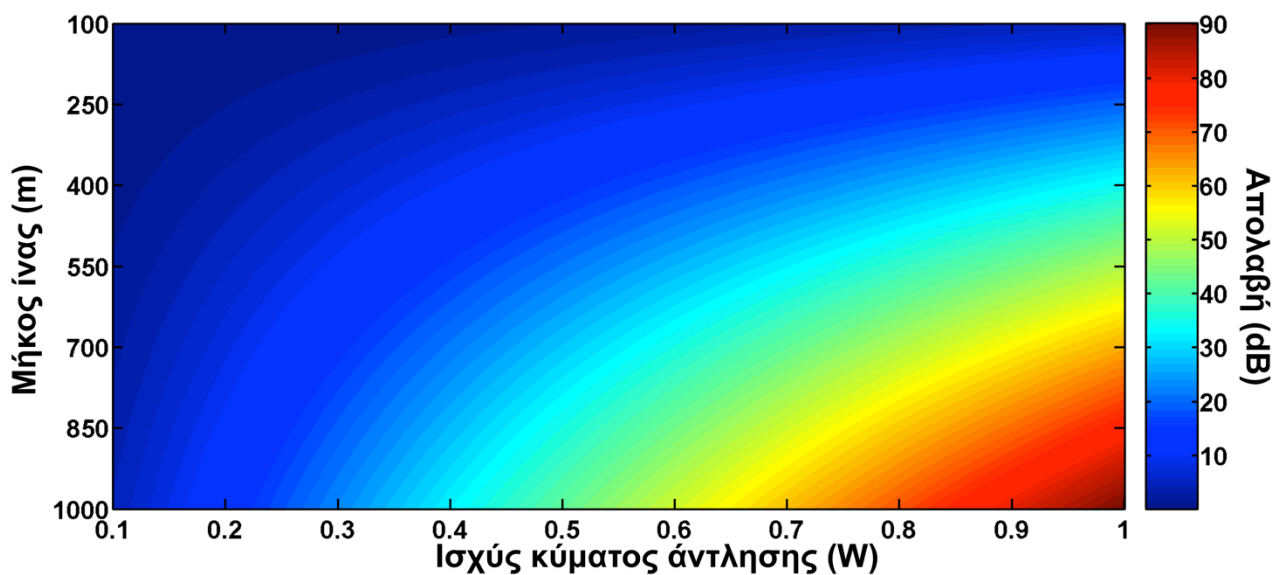
φάσμα που προκύπτει από μία τυπική παραμετρική ενίσχυση τοποθετώντας το σήμα στο μήκος κύματος μέγιστης απολαβής ($\lambda_s=1528$ nm).

Στην έξοδο του ενισχυτή (σχ. 4-8β) είναι έκδηλη η παρουσία των λοβών ενίσχυσης οι οποίοι προκύπτουν από την διαδικασία της παραμετρικής ενίσχυσης.

Παράλληλα, την εμφάνισή τους κάνουν και κάποια από τα χαμηλότερης ισχύος παράγωγα της διεργασίας FWM που αναφέραμε στο κεφάλαιο 4.1.2. Όπως είναι φανερό το σήμα στην έξοδο του ενισχυτή έχει ενισχυθεί κατά 20 dB ενώ το ανύπαρκτο στην είσοδο συζυγές παράγεται με τελική ισχύ περίπου ίση με αυτήν του σήματος (-1.2 dBm).

Αφού λοιπόν βεβαιωθήκαμε για την ορθότητα των αποτελεσμάτων που εξάγει το μοντέλο μας, προχωρούμε στην χαρτογράφηση των επιδόσεων του ενισχυτή μονής άντλησης με βάση τις παραμέτρους που τον χαρακτηρίζουν.

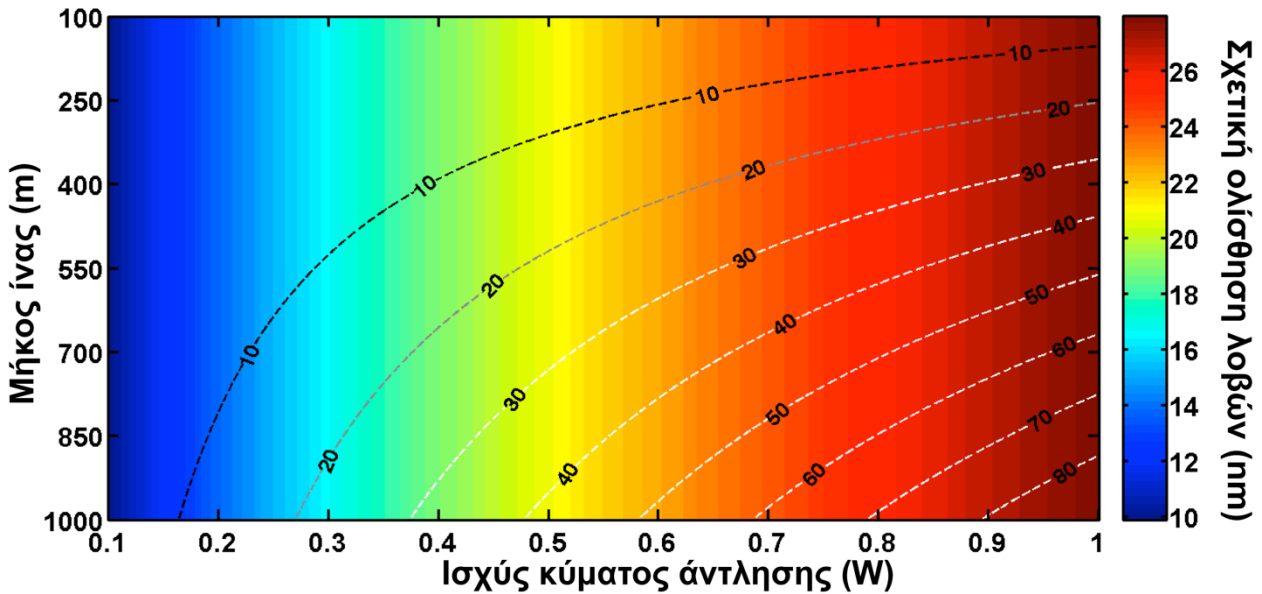
Χρησιμοποιώντας σήμα μικρής ισχύος (-80 dBm), έτσι ώστε ο ενισχυτής να βρίσκεται πάντα σε καθεστώς γραμμικής λειτουργίας, αρχικά υπολογίζουμε τον συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της ισχύος του κύματος άντλησης και του μήκους της μη γραμμικής ίνας, η οποία διαθέτει τα χαρακτηριστικά αυτά που θεωρήσαμε στη μέχρι τώρα μελέτη μας. Σύμφωνα με το σχήμα 4-9 ο παραμετρικός ενισχυτής είναι σε θέση να προσφέρει μία ασύλληπτα υψηλή ενίσχυση η οποία αγγίζει την τιμή των 90 dB για μήκος ίνας 1 km και ισχύ του κύματος άντλησης ίση με 1 W. Βέβαια για τις περισσότερες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές μία τόσο μεγάλη ενίσχυση δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη παρόλα αυτά είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις αξιοσημείωτες δυνατότητες ενός τέτοιου συστήματος.



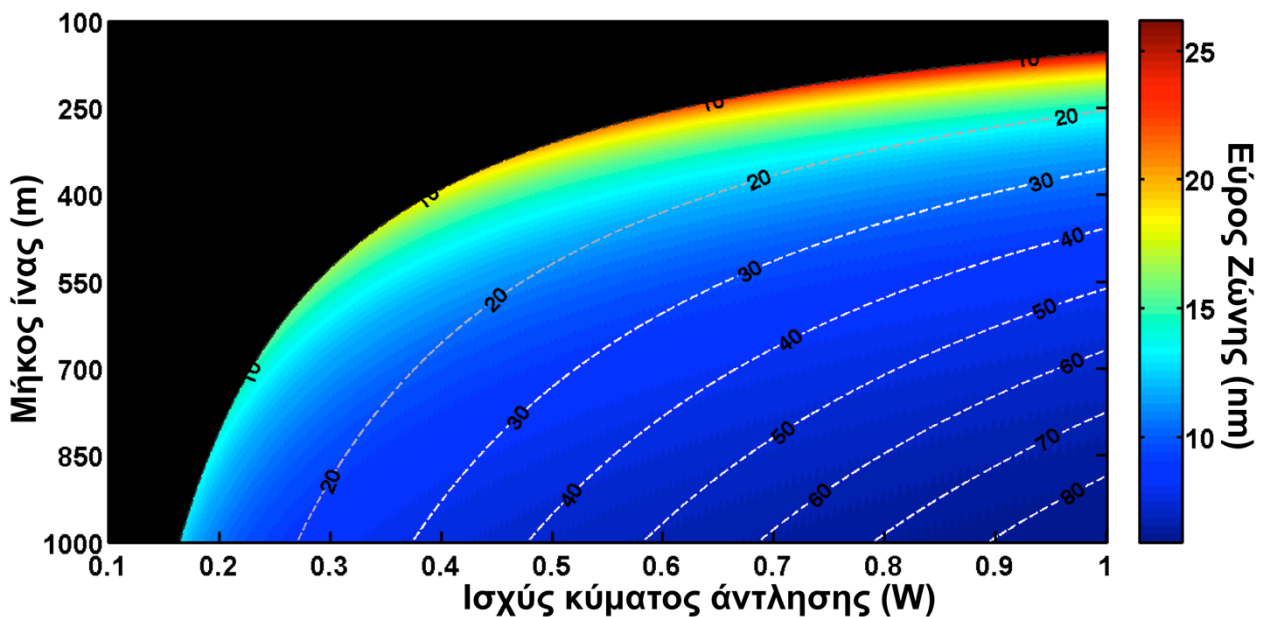
Σχήμα 4-9: Απολαβή ενισχυτή 1P-FOPA συναρτήσει της ισχύος του κύματος άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την σχετική ολίσθηση των λοβών ως προς το μήκος κύματος άντλησης (σχ. 4-10) και το εύρος ζώνης στα 3 dB του παραμετρικού ενισχυτή (σχ. 4-11) συναρτήσει του μήκους της ίνας και της ισχύος του κύματος άντλησης. Σύμφωνα με την εξίσωση 4.22, η ολίσθηση των λοβών εξαρτάται μόνο από το γινόμενο γP_P και επομένως για δεδομένη ισχύ παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως του μήκους της ίνας.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 4-10: Σχετική φασματική απόσταση μεταξύ των λοβών μέγιστης ενίσχυσης και του κύματος άντλησης συναρτήσει του μήκους της ίνας και της ισχύος του κύματος άντλησης για τον 1P-FOPA. Η μαύρη γραμμή προσδιορίζει την περιοχή των 20 dB που αντιστοιχεί σε γινόμενο $\gamma_{PPL}=3$.



Σχήμα 4-11: Εύρος ζώνης του 1P-FOPA συναρτήσει του μήκους της ίνας και της ισχύος του κύματος άντλησης για τιμές ενίσχυσης μεγαλύτερες των 10 dB. Η μαύρη γραμμή προσδιορίζει την περιοχή των 20 dB που αντιστοιχεί σε γινόμενο $\gamma_{PPL}=3$.

Η συμπεριφορά του εύρος ζώνης, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 4-11, είναι σε πλήρη συμφωνία με τα όσα περιγράψαμε κατά τη θεωρητική μελέτη του 1P-FOPA, αποδεικνύοντας ότι καθώς το μήκος της ίνας μειώνεται, για δεδομένη ισχύ του κύματος άντλησης το εύρος ζώνης του ενισχυτή διευρύνεται. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η καμπύλη της απολαβής του ενισχυτή παρουσιάζει μία ιδιομορφία. Για τιμές ενίσχυσης μικρότερες των 10 dB, η διαφορά ενίσχυσης μεταξύ της κορυφής των λοβών και της περιοχής μεταξύ των λοβών είναι μικρότερη από 3 dB, επομένως δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ορθή μέτρηση του εύρους ζώνης στα 3 dB. Για το λόγο αυτό ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε για τιμές απολαβής μεγαλύτερες των 10 dB.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Στα διαγράμματα των σχημάτων 4-10 και 4-11 έχουν χαραχθεί οι περιοχές σταθερής απολαβής για διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων γ , P_P και L . Με αυτό τον τρόπο μπορούμε επιλέγοντας το μήκος της ίνας και την ισχύ του κύματος άντλησης, να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τα χαρακτηριστικά απολαβής, εύρους ζώνης και θέσης λοβών που θα φέρει ο παραμετρικός ενισχυτής. Έτσι λοιπόν, ανάλογα με την εφαρμογή αλλά και τις απαιτήσεις σε όγκο και ισχύ του παραμετρικού ενισχυτή μπορούμε με βάση τα διαγράμματα 4-9, 4-10 και 4-11 να επιλέξουμε τις κατάλληλες παραμέτρους για τον βέλτιστο σχεδιασμό του.

Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι η έρευνα στην περιοχή των παραμετρικών ενισχυτών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μίας ολόκληρης τεχνολογίας γύρω από τον σχεδιασμό και την κατασκευή μη γραμμικών ινών, οι οποίες βασίζονται σε μικροδομές (ίνες φωτονικών κρυστάλλων) και προσμίξεις [92]-[94] για την αύξηση του συντελεστή μη γραμμικότητας. Η αξιοποίηση της τεχνολογίας αυτής έχει οδηγήσει σε μη γραμμικότητες οι οποίες φθάνουν και ξεπερνούν έως και τις 100 φορές την τιμή των $12 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ που μελετάμε σε αυτό το κεφάλαιο. Η τόσο υψηλή μη γραμμικότητα που προσφέρουν οι συγκεκριμένες ίνες μπορεί να μειώσει δραματικά το μήκος των παραμετρικών ενισχυτών και να βελτιώσει την απόδοσή τους. Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η διεργασία FWM είναι ένα φαινόμενο που παράγεται σε μη γραμμικά μέσα και έτσι μπορεί να λάβει χώρα όχι μόνο στο εσωτερικό των οπτικών ινών αλλά και σε ημιαγωγικούς κυματοδηγούς [95]-[98], όπως laser και SOA, διευρύνοντας έτσι την γκάμα των εφαρμογών των παραμετρικών ενισχυτών. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα των μη γραμμικών ινών που μόλις αναφέραμε συναρτήσει των συντελεστών μη γραμμικότητας που αυτές διαθέτουν.

Πίνακας 4-1: Μη γραμμικοί συντελεστές για διάφορα είδη ινών

Τύπος ίνας	Μη γραμμικός συντελεστής ($\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$)
Ίνα με προσμίξεις Βισμούθιου (Bi_2O_3)	500-1820
Ίνα φωτονικών κρυστάλλων	12-300

Το εύρος ζώνης ενίσχυσης, πέρα από τα όσα αναφέραμε στη μέχρι τώρα μελέτη μας, επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες. Η διασπορά τέταρτης τάξης συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του εύρους ζώνης, ωστόσο, όπως θα δούμε και παρακάτω, στους ενισχυτές που κάνουν χρήση δύο κυμάτων άντλησης η διασπορά αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για την αντιστάθμιση της δεύτερης τάξης διασποράς με αποτέλεσμα την διαπλάτυνση και διεύρυνση του εύρους ζώνης λειτουργίας του ενισχυτή [99], [100].

Ένας παράγοντας που είναι δυνατό να υποβαθμίσει δραματικά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του παραμετρικού ενισχυτή είναι η μεταβολή του μήκους κύματος μηδενικής διασποράς κατά μήκος μίας πραγματικής οπτικής ίνας [101], [102]. Όπως αποδεικνύεται, οι διακυμάνσεις της διασποράς διευρύνουν την καμπύλη της απολαβής σε σχέση με τη θεώρηση σταθερής διασποράς, αλλά μειώνουν το μέγιστο κέρδος ενίσχυσης. Παρόλα αυτά έχει πειραματικά αποδειχθεί ότι ομοίομορφο και μεγάλο εύρος λειτουργίας είναι εφικτό με την τεχνητή πρόκληση διακυμάνσεων του λ_0 σε μικρή κλίμακα μέσω της ανακατανομής μικρών τμημάτων της ίδιας ίνας. Η παραπάνω τεχνική βασίζεται στο συμπέρασμα ότι οι μικρής κλίμακας αλλαγές δεν επηρεάζουν δραματικά τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή [103]-[105].

Ένας τρίτος και σημαντικός παράγοντας υποβάθμισης είναι συνδεδεμένος με τα χαρακτηριστικά πόλωσης των κυμάτων που συμμετέχουν στην παραμετρική διαδικασία και την ιδιότητα της τυχαίας διπλοθλαστικότητας των οπτικών ινών, την οποία συζητήσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο (φαινόμενο διασποράς τρόπων πόλωσης). Η

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

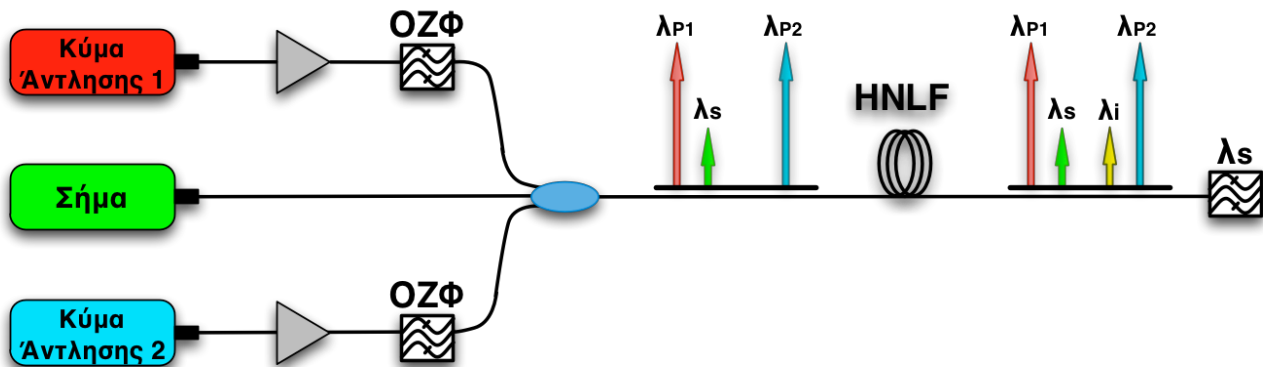
τυχαία διπλοθλαστικότητα αποσυσχετίζει τις αρχικά κοινές πολώσεις του σήματος και του κύματος άντλησης. Η παραμετρική διαδικασία, η οποία είναι ευαίσθητη στην πόλωση, μεγιστοποιείται όταν τα κύματα που οδηγούνται στην οπτική ίνα είναι στην ίδια πολωτική διεύθυνση όπως ειπώθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Η προκαλούμενη αποσυσχέτιση είναι αναμενόμενο να μειώσει το βαθμό της αλληλεπίδρασής τους, και επομένως την απόδοση της παραμετρικής διαδικασίας [106]-[108].

Το φασματικό εύρος της παραμετρικής διεργασίας εξαρτάται και από την κλίση της διασποράς της οπτικής ίνας. Έτσι ενώ οι κοινές DSF έχουν τιμή κλίσης $0.08\text{ps/nm}^2/\text{km}$, για τις πιο σύγχρονες HNL-DSF η κλίση έχει περιοριστεί σε τιμές μικρότερες των $0.03\text{ps/nm}^2/\text{km}$. Μία άλλη τεχνική που αποδίδει καλύτερα χαρακτηριστικά εύρους είναι η λεγόμενη μερική προσαρμογή φάσης (quasi phase matching, QPM). Η QPM επιτυγχάνει τη διαμόρφωση του επιθυμητού προφίλ της διασποράς με την περιοδική τοποθέτηση μικρών τμημάτων ίνας με τιμές διασποράς β_2 και β_4 τέτοιες ώστε να μηδενίζεται η συσσωρευμένη φάση που συμβάλλει στην καταστροφή της προσαρμογής [103], [109].

Μία σημαντική ιδέα η οποία προτάθηκε από τους Mahric et al. [110] το 1996 και υλοποιήθηκε από τους Radic et al. αργότερα [111], [112] αφορά τη διαπλάτυνση του εύρους λειτουργίας του ενισχυτή που συνοδεύεται από μικρή κυμάτωση της απολαβής, μέσω της χρήσης δύο κυμάτων άντλησης πολωμένων στην ίδια διεύθυνση (dual pump fiber optic parametric amplifier, 2P-FOPA). Το σχήμα αυτό θα συζητηθεί εκτενώς στην επόμενη παράγραφο.

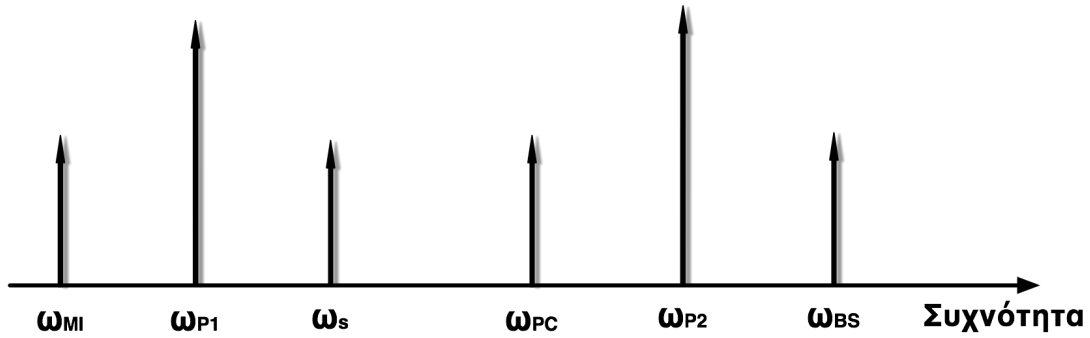
4.3 Παραμετρικός ενισχυτής με δύο κύματα άντλησης (2P-FOPA)

Στο σχήμα 4-12 δίνεται η απλουστευμένη διάταξη ενός ενισχυτή με δύο κύματα άντλησης τα οποία είναι παράλληλα πολωμένα.



Σχήμα 4-12: Πειραματική διάταξη ενός παραμετρικού ενισχυτή 2P-FOPA. OZΦ: Οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, EDFA: οπτικός ενισχυτής ερβίου, HNLF: ίνα υψηλής μή γραμμικότητας.

Η παραμετρική ενίσχυση που εγείρεται από δύο κύματα άντλησης έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά της ενέργειας τους σε τέσσερα κύματα συμπεριλαμβανομένου και του σήματος. Η γένεση των κυμάτων αυτών απορρέει από τη σύζευξη τριών διακριτών διαδικασιών FWM: τη διαδικασία διαταραχής διαμόρφωσης (modulation instability, MI), τη διαδικασία σκέδασης Bragg (Bragg scattering, BS) και τη διαδικασία σύζευξης φάσης (phase conjugation, PC) [113]. Η σύζευξη φάσης αντιστοιχεί στην αναστροφή της φάσης του παραγώγου σε σχέση με το αρχικό σήμα, διαδικασία που συζητήθηκε εκτενώς στην προηγούμενη παράγραφο. Τα παράγωγα των προαναφερθέντων διαδικασιών εικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4-13: Παράγωγα που προκύπτουν κατά την παραμετρική διαδικασία με τη χρήση δύο κυμάτων άντλησης.

Η MI όπως είδαμε και στους 1P-FOPA, είναι μία εκφυλισμένη διαδικασία FWM που επικρατεί όταν η συχνότητα του σήματος βρίσκεται κοντά σε μία από τις συχνότητες των κυμάτων άντλησης (στην ω_{P1} στην περίπτωση μας) με αποτέλεσμα τη γένεση ενός παραγώγου στη συχνότητα $\omega_{MI}=2\omega_{P1}-\omega_s$. Η διαδικασία BS είναι μια FWM διαδικασία της οποίας το προϊόν προσδιορίζεται από τη σχέση συχνοτήτων $\omega_{BS}=\omega_{P2}+\omega_s-\omega_{P1}$ και δεν εμφανίζει συζυγή χαρακτηριστικά ως προς το αρχικό σήμα. Με βάση τη διαδικασία BS οι 2P-FOPA έχουν προταθεί σαν συντονιζόμενες διατάξεις μετατροπής μήκους κύματος [114], [115]. Η διεργασία με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της παραμετρικής ενίσχυσης είναι η PC. Η παρουσία της είναι ιδιαίτερα ισχυρή όταν χρησιμοποιούνται δύο κύματα άντλησης υψηλής ισχύος, συμμετρικά τοποθετημένα σε σχέση με τη συχνότητα μηδενικής διασποράς και απομακρυσμένα ώστε να αποτρέπεται σημαντική μεταξύ τους αλληλεπίδραση FWM. Αν το σήμα είναι επίσης σχετικά μακριά από τα δύο κύματα άντλησης, η διαδικασία MI μπορεί να αγνοηθεί και επικρατούσα διεργασία είναι η PC για την οποία $\omega_{PC}=\omega_{P1}+\omega_{P2}-\omega_s$. Σύμφωνα με τη βασική θεωρία των 2P-FOPA [78], [113], υπό τη θεώρηση της αμελητέας απορρόφησης της ισχύος των κυμάτων άντλησης από το σήμα και το συζυγές και της ίδιας πολωτικής κατάστασης των κυμάτων εισόδου, η απολαβή του ενισχυτή αυτού δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$P_{s(L)} = P_{s(0)} \left[1 + \frac{4\gamma^2 P_{P1} P_{P2}}{g^2} \sinh^2(gL) \right] \quad (4.31)$$

$$P_{i(L)} = P_{s(0)} \frac{4\gamma^2 P_{P1} P_{P2}}{g^2} \sinh^2(gL) \quad (4.32)$$

όπου P_{P1} και P_{P2} είναι οι τιμές της ισχύος για τα δύο κύματα άντλησης αντίστοιχα. Ο συντελεστής παραμετρικής ενίσχυσης σε αυτή την περίπτωση δίνεται από τη σχέση:

$$g^2 = 4\gamma^2 P_{P1} P_{P2} - \left(\frac{k}{2}\right)^2 \quad (4.33)$$

Ο παράγοντας προσαρμογής φάσης k στην τοπολογία του παραμετρικού ενισχυτή με διπλή άντληση διαφοροποιείται ελαφρά σε σχέση με αυτόν της σχέσης 4.17 και εκφράζεται ως $k=\Delta k+\gamma(P_{P1}+P_{P2})$. Για τους ενισχυτές 2P-FOPA η διασπορά τέταρτης τάξης δε μπορεί να αγνοείται, γιατί είναι ο βασικός παράγοντας περιορισμού του εύρους ζώνης του ενισχυτή. Έτσι η σχέση που δίνει το γραμμικό παράγοντα προσαρμογής φάσης περιλαμβάνει την επίδρασή της. Επιπλέον, ο συντελεστής αυτός πλέον υπολογίζεται στη συχνότητα $\omega_c=(\omega_{P1}+\omega_{P2})/2$. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$\Delta k \approx \beta_{2c} [(\omega_s - \omega_c)^2 - \omega_d^2] + \beta_{4c} [(\omega_s - \omega_c)^4 - \omega_d^4]/12 \quad (4.34)$$

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Να σημειωθεί ότι στην παραπάνω σχέση $\omega_d=(\omega_{P1}-\omega_{P2})/2$ είναι η ημιδιαφορά των συχνοτήτων των δύο κυμάτων άντλησης. Επιπλέον οι παράμετροι β_{2c} και β_{4c} είναι οι γνωστοί παράγοντες της διασποράς που δίνονται από τους τύπους 4.28 και 4.30 υπολογισμένοι στη συχνότητα ω_c .

Μία γρήγορη εκτίμηση των χαρακτηριστικών ενίσχυσης του 2P-FOPA μπορεί να πραγματοποιηθεί μελετώντας την περιοχή τέλειιας προσαρμογής φάσης ($k=0$) και την περιοχή προσαρμογής των σταθερών διάδοσης ($\Delta k=0$), όπως ακριβώς και στην περίπτωση του 1P-FOPA. Για την πρώτη συνθήκη που αντιστοιχεί και στη μέγιστη απολαβή, έχουμε ότι:

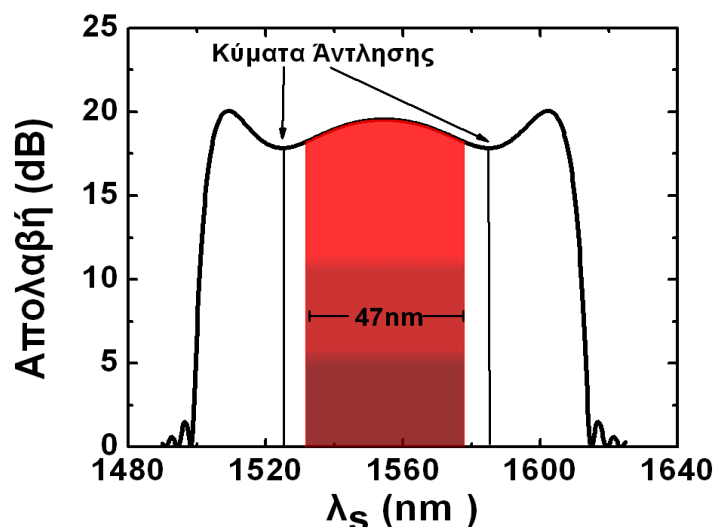
$$G = \frac{1}{4} \exp(4\gamma L \sqrt{P_{P1}P_{P2}}) \quad (4.35)$$

Η παραπάνω έκφραση παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες σε σχέση με την έκφραση 4.27 που περιγράφει την αντίστοιχη περίπτωση στους 1P-FOPA. Η βασική ομοιότητα αφορά την εκθετική εξάρτηση της απολαβής από την ισχύ των κυμάτων άντλησης. Επιπλέον, αν οι τιμές ισχύος για τα κύματα άντλησης του 2P-FOPA και του 1P-FOPA επιλεγούν έτσι ώστε $P_{P1}=P_{P2}=P_P/2$, τα δύο σχήματα παρέχουν την ίδια μέγιστη απολαβή δεδομένου ότι η οπτική ίνα που χρησιμοποιείται είναι κοινή.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς της ενισχυτικής διάταξης στην περιοχή προσαρμογής φάσης των σταθερών διάδοσης ($\Delta k=0$), θεωρούμε ότι $P_{P1}=P_{P2}=P_P/2$ ώστε να απλοποιήσουμε τις πράξεις. Η απολαβή του ενισχυτή που προκύπτει ύστερα από αυτή την απλοποίηση ισούται με:

$$G = \frac{1}{3} \exp(\sqrt{3}\gamma L P_P) \quad (4.36)$$

Η κύρια παρατήρηση είναι ότι η απολαβή ακολουθεί την εκθετική εξάρτηση ως προς την ισχύ των κυμάτων άντλησης που συμμετέχουν στην παραμετρική διαδικασία, ακόμα και στην περίπτωση $\Delta k=0$, σε αντίθεση με την τετραγωνική εξάρτηση που παρουσιάζεται στους 1P-FOPA. Το γεγονός ότι ο συνολικός παράγοντας προσαρμογής φάσης k είναι πιο μικρός στη διάταξη του 2P-FOPA σε σχέση με εκείνο του 1P-FOPA για $\Delta k=0$ ($k=\gamma P_P$ και $k=2\gamma P_P$ αντίστοιχα) εξηγεί την εκθετική εξάρτηση της απολαβής στον πρώτο.



Σχήμα 4-14: Καμπύλη απολαβής του 2P-FOPA συναρτήσει του μήκους κύματος του σήματος για τοποθέτηση των κυμάτων άντλησης συμμετρικά γύρω από το μήκος κύματος $\lambda_c=1554.1$ nm και σχετική φασματική απόσταση μεταξύ τους ίση με 60 nm.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Η παραπάνω παρατήρηση οδηγεί έναν υποψιασμένο αναγνώστη να αντιληφθεί ότι η διπλή άντληση είναι δυνατό να προσφέρει καλύτερα φασματικά χαρακτηριστικά απολαβής. Οι ιδιότητες ενίσχυσης του παραμετρικού ενισχυτή 2P-FOPA μπορούν να αξιολογηθούν καλύτερα με την απεικόνιση της καμπύλης απολαβής με βάση τη σχέση 4.31.

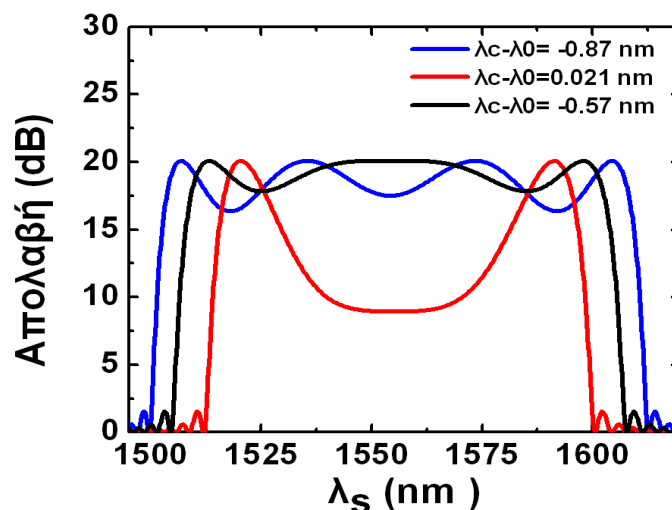
Παρατηρώντας κανείς το σχήμα 4-14, αντιλαμβάνεται κάποια βασικά πλεονεκτήματα των ενισχυτών 2P-FOPA έναντι των ενισχυτών 1P-FOPA. Έτσι λοιπόν, οι παραμετρικοί ενισχυτές διπλής άντλησης προσφέρουν συνεχόμενο και σημαντικά διευρυμένο εύρος ζώνης ενίσχυσης και σταθερή απολαβή, με διακύμανση που κυμαίνεται σε τιμές μικρότερες του 1.5 dB. Επιπλέον, για να επιτευχθεί ίδια τιμή ενίσχυσης με αυτήν του 1P-FOPA απαιτείται η μισή ισχύς ανά κύμα άντλησης.

Ας δούμε όμως λεπτομερέστερα τη συμπεριφορά του 2P-FOPA ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα το μηχανισμό και τα χαρακτηριστικά του, μελετώντας αρχικά τις θεωρητικές καμπύλες απολαβής.

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται η απολαβή του 2P-FOPA για τρεις διαφορετικές θέσεις του λ_c ως προς το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς ($\lambda_c - \lambda_0$) διατηρώντας σταθερή και ίση με 60 nm τη φασματική απόσταση μεταξύ των κυμάτων άντλησης.

Για να γίνει ορθή συγκριτική μελέτη μεταξύ των τοπολογιών 1P-FOPA και 2P-FOPA, επιλέγουμε κοινές χαρακτηριστικές παραμέτρους για τη μη γραμμική ίνα και ίδια συνολική ισχύ των κυμάτων άντλησης έτσι ώστε ο συντελεστής ενίσχυσης που προκύπτει να ισούται με 20 dB. Έτσι λοιπόν, για μήκος ίνας ίσο με 250 m και ισχύ ανά κύμα άντλησης $P_{P1} = P_{P2} = 500$ mW εξάγουμε τις παρακάτω καμπύλες απολαβής.

Στο σχήμα 4-15 μπορεί κανείς να παρατηρήσει την ιδιαίτερη συμπεριφορά ως προς το κεντρικό μήκος κύματος που παρουσιάζει ο παραμετρικός ενισχυτής διπλής άντλησης. Όπως εξηγήσαμε και προηγουμένως η ισχυρή εξάρτηση του Δk από τη διασπορά τέταρτης τάξης αποφέρει ραγδαίες μεταβολές στην τιμή του για μικρές διακυμάνσεις του μήκους κύματος λ_c . Έτσι, για $\lambda_{P1} = 1525$ nm και $\lambda_{P2} = 1585$ nm ο μη γραμμικός συντελεστής προσαρμογής αντισταθμίζεται πλήρως από τον μη γραμμικό συντελεστή οδηγώντας τη διάταξη σε παραμετρική ενίσχυση, ενώ για την περίπτωση όπου $\lambda_{P1} = 1524.7$ nm και $\lambda_{P2} = 1584.7$ nm, ο γραμμικός συντελεστής προσαρμογής λαμβάνει θετικές τιμές εμποδίζοντας έτσι την αντιστάθμισή του από τον μη γραμμικό συντελεστή $\gamma(P_{P1} + P_{P2})$.



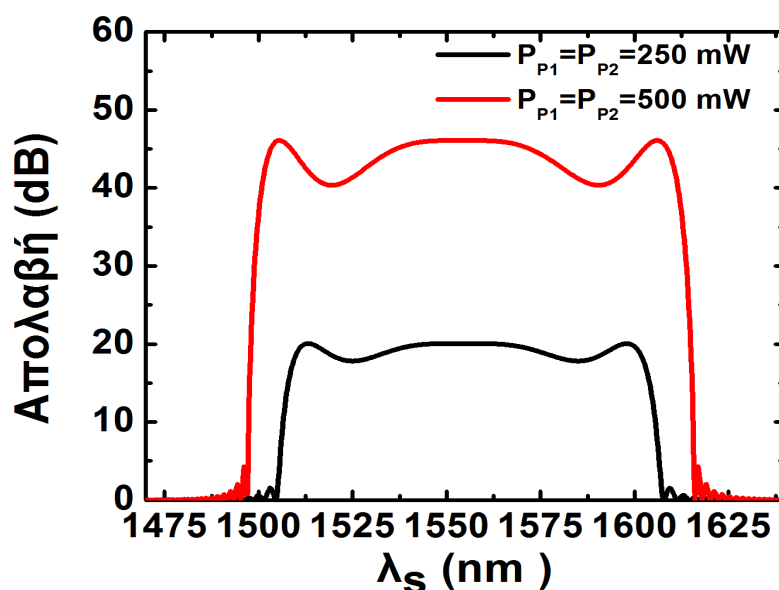
Σχήμα 4-15: Καμπύλες απολαβής του 2P-FOPA συναρτήσει του μήκους κύματος του σήματος για σταθερή φασματική απόσταση μεταξύ των κυμάτων άντλησης ίση με 60 nm και διαφορετικές αποστάσεις του κεντρικού μήκους κύματος ως προς το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο 2P-FOPA παρουσιάζει ανάστροφη λειτουργία συγκριτικά με τον 1P-FOPA, αφού η παραμετρική ενίσχυση ενεργοποιείται σε καθεστώς ομαλής διασποράς ($\lambda_c < \lambda_0$). Εδώ βέβαια πρέπει να προστεθεί ότι, για ολίσθηση μόλις 0.3 nm του κεντρικού μήκους κύματος, λ_c , εντός της περιοχής ομαλής διασποράς ($\lambda_{P1}=1525.3$ nm, $\lambda_{P2}=1585.3$ nm) η απόκριση του ενισχυτή στην περιοχή μεταξύ των κυμάτων άντλησης υποβαθμίζεται εκ νέου οδηγώντας σε ασταθή απόδοση της παραμετρικής ενίσχυσης. Σε αντίθεση λοιπόν με τον 1P-FOPA, ο οποίος παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα ως προς το εύρος προσαρμογής, το κεντρικό μήκος κύματος του 2P-FOPA πρέπει να επιλεγεί με μεγαλύτερη προσοχή ώστε να οδηγήσει στα βέλτιστα χαρακτηριστικά ενίσχυσης. Βέβαια για την ορθή επιλογή του μήκους λ_c δεν αρκεί μόνο η ισόποση και προς την ίδια κατεύθυνση ολίσθηση των κυμάτων άντλησης αλλά απαιτείται και η μεταβολή της μεταξύ τους φασματικής απόστασης γεγονός το οποίο αυξάνει το βαθμό δυσκολίας ως προς την επίτευξη ακρίβειας κατά την υλοποίηση ενός τέτοιου πραγματικού συστήματος.

Η παραπάνω διαδικασία επιλογής της θέσης των κυμάτων άντλησης παρατηρείται στο σχήμα 4-16, στο οποίο μεταβάλλουμε μόνο της ισχύ των δύο αντλήσεων ενώ διατηρούμε το μήκος της ίνας σταθερό και ίσο με 500 m. Αν λοιπόν διπλασιάσουμε την ισχύ των κυμάτων άντλησης από τα 250 mW στο 500 mW, η εξαρτώμενη από την ισχύ προσαρμογή φάσης οδηγεί αφενός μεν σε ολίσθηση του κεντρικού μήκους κύματος κατά 0.23 nm και αφετέρου σε αύξηση της φασματικής απόστασης μεταξύ των κυμάτων άντλησης κατά 14 nm, ώστε να επέλθει η αντιστάθμιση του μή γραμμικού παράγοντα από τον γραμμικό στην περιοχή του κεντρικού μήκους κύματος ($k=0$) η αντιστάθμιση της διασποράς δεύτερης τάξης από τη διασπορά τέταρτης τάξης στην περιοχή των αντλήσεων ($\Delta k=0$) μεγιστοποιώντας έτσι το εύρος ζώνης του ενισχυτή. Η συμπεριφορά αυτή του 2P-FOPA αποτυπώνεται πλήρως στο σχήμα 4-16.

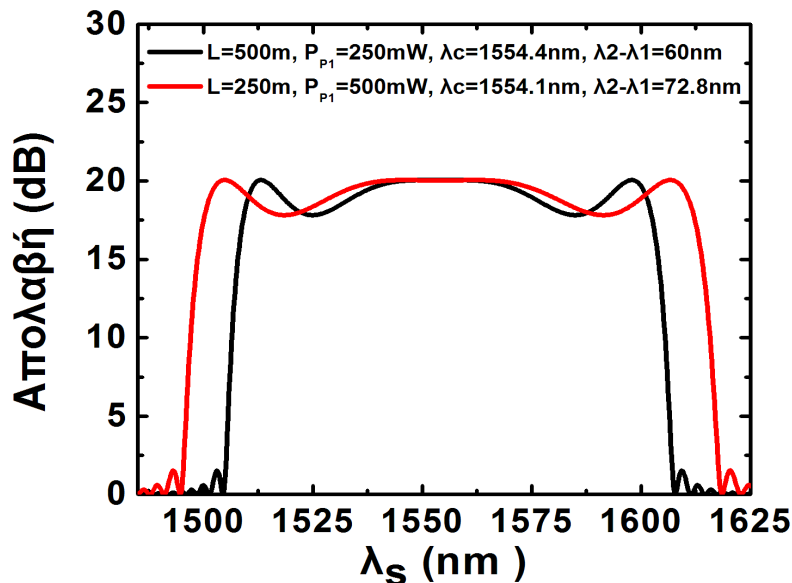
Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες συμπεραίνουμε ότι ο διπλασιασμός της ισχύος οδήγησε σε αύξηση του συντελεστή ενίσχυσης κατά 26 dB ενώ ταυτόχρονα το εύρος ζώνης σταθερής απολαβής του ενισχυτή μειώθηκε κατά 6 nm. Λόγω της ομαλότερης συμπεριφοράς που παρουσιάζει η καμπύλη απολαβής του 2P-FOPA συγκριτικά με την αντίστοιχη του 1P-FOPA, ο υπολογισμός του εύρους ζώνης που θα πραγματοποιηθεί σε αυτή τη μελέτη θα γίνεται στα 1.5 dB.



Σχήμα 4-16: Καμπύλη απολαβής του 2P-FOPA συναρτήσει του μήκους κύματος του σήματος για δύο διαφορετικά επίπεδα ισχύος των κυμάτων άντλησης διατηρώντας τη φασματική τους απόσταση και το μήκος της ίνας σταθερά

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Σύμφωνα με την εξίσωση 4.34 και την σχέση $k=\Delta k+\gamma(P_{P1}+P_{P2})$, η προσαρμογή φάσης δεν εξαρτάται καθόλου από το μήκος της ίνας και επομένως η μεταβολή του δεν απαιτεί την ρύθμιση της θέσης των κυμάτων άντλησης. Ωστόσο, το μήκος της ίνας επιφέρει αλλαγή στον συντελεστή ενίσχυσης, μέσω του συντελεστή $\gamma P_1 P_2 L$, και επομένως στο εύρος ζώνης, μέσω της αλλαγής της κλίσης της καμπύλης απολαβής. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συμπεριφορά αυτή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι διατηρώντας σταθερό το προαναφερθέν γινόμενο μπορούμε να διευρύνουμε το εύρος ζώνης του ενισχυτή με κατάλληλη επιλογή του μήκους της ίνας, της ισχύος των κυμάτων άντλησης και της θέσης τους. Στο σχήμα που ακολουθεί (σχ. 4-17) απεικονίζονται οι καμπύλες απολαβής για δύο διαφορετικούς συνδυασμούς L και P .



Σχήμα 4-17: Καμπύλη απολαβής του 2P-FOPA συναρτήσει του μήκους κύματος του σήματος για δύο διαφορετικούς συνδυασμούς L και P , διατηρώντας σταθερό το γινόμενό τους ώστε να προσφέρει ενίσχυση 20 dB.

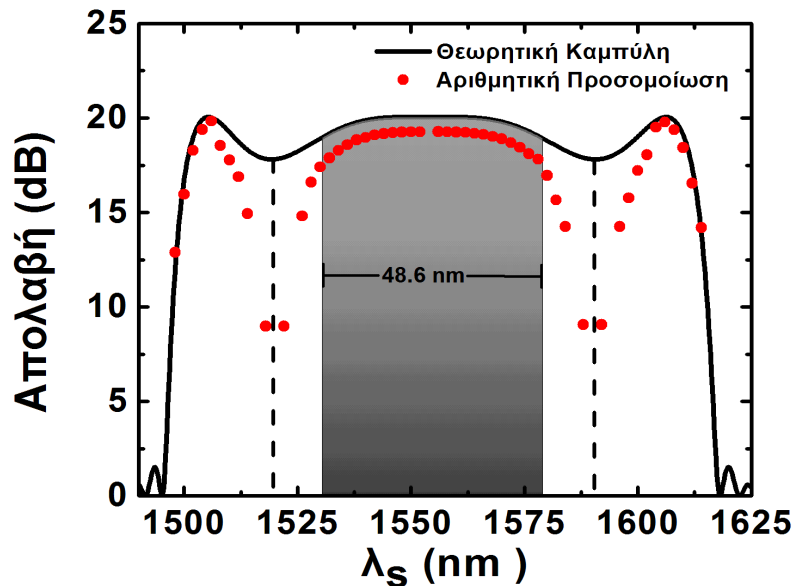
Διατηρώντας λοιπόν σταθερή την απολαβή και ίση με 20 dB, παρατηρούμε ότι αν μειώσουμε το μήκος της ίνας από τα 500 m στα 250 m, διπλασιάζεται η απαιτούμενη ισχύς, το κεντρικό μήκος κύματος, λ_c , ολισθαίνει κατά 0.3 nm προς τα μικρότερα μήκη κύματος, η φασματική απόσταση μεταξύ των κυμάτων άντλησης αυξάνεται κατά 12.8 nm και το εύρος ζώνης διευρύνεται κατά 10 nm φθάνοντας τα 48.6 nm. Λόγω του γεγονότος ότι η διακύμανση της απολαβής στην ευρύτερη περιοχή μεταξύ των δύο κυμάτων άντλησης είναι μικρότερη του 1.5 dB, το εύρος ζώνης λειτουργίας υπολογίστηκε στα σημεία όπου η απολαβή πέφτει στο 1 dB της μέγιστης τιμής.

Η παραπάνω ανάλυση μας έδωσε μια γενική ιδέα της βασικής συμπεριφοράς ενός παραμετρικού ενισχυτή διπλής άντλησης. Ωστόσο, για να έχουμε μία πιο αντιπροσωπευτική άποψη για τα πραγματικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου ενισχυτή αλλά και για να ορίσουμε ένα πλαίσιο λειτουργίας και επιδόσεων θα επαναλάβουμε τις παραπάνω μετρήσεις παρουσιάζοντας μια πιο λεπτομερή μελέτη στηριζόμενοι στο αριθμητικό μοντέλο του 2P-FOPA, το οποίο συνετέθη με βάσει το σχήμα 4-12, και εκμεταλλευόμενοι τα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιήσαμε στο κεφάλαιο 4.2 για την προσομοίωση της FWM διεργασίας.

Στο σχήμα 4-18 απεικονίζεται η καμπύλη απολαβής, η οποία προκύπτει από την προσομοίωση του 2P-FOPA και συγκρίνεται με την αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη για μήκος ίνας 250 m, ισχύ ανά κύμα άντλησης ίση με 500 mW και φασματικές θέσεις των αντλήσεων και τις λοιπές παραμέτρους ρυθμισμένες σύμφωνα με τα παραπάνω

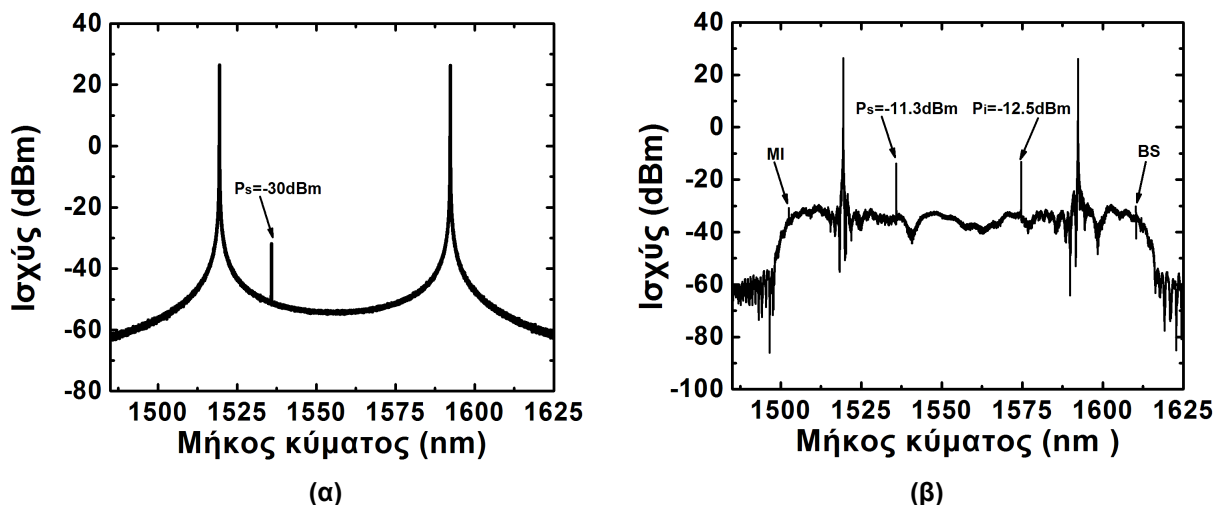
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

αποτελέσματα ώστε ο ενισχυτής να προσφέρει 20 dB ενίσχυσης. Όπως είναι φανερό, το μοντέλο που χρησιμοποιούμε προσεγγίζει σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό τα θεωρητικά αποτελέσματα. Η μόνη διαφορά παρατηρείται στη μέγιστη τιμή της απολαβής η οποία στην περίπτωση της προσομοίωσης είναι κατά 1 dB μικρότερη συγκριτικά με την αντίστοιχη θεωρητική, αποτέλεσμα το οποίο οφείλεται στην εισαγωγή των απωλειών της ίνας, οι οποίες όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο αμελούνται στην θεωρητική προσέγγιση. Όσον αφορά το εύρος ζώνης, υπάρχει μία αμελητέα διαφορά στην κλίση της καμπύλης απολαβής, η οποία επιφέρει ελάττωση της απολαβής στα όρια του εύρους ζώνης της τάξεως των 0.3 dB. Το ποσό αυτό είναι αμελητέο και μας επιτρέπει να θεωρήσουμε κοινό εύρος ζώνης μεταξύ θεωρητικά και αριθμητικά υπολογισμένης απόκρισης του ενισχυτή.



Σχήμα 4-18: Απεικόνιση της θεωρητικής καμπύλης απολαβής του 2P-FOPA (μαύρη γραμμή) για $\gamma_{PL}=3$ και της αντίστοιχης καμπύλης ύστερα από προσομοίωση (κόκκινες κουκίδες).

Στην περιοχή γύρω από τις θέσεις των κυμάτων άντλησης ($\lambda_{p1}=1518.6$ nm και $\lambda_{p2}=1591.4$ nm), το μοντέλο παρουσιάζει βύθισμα της απολαβής (κορεσμός) λόγω της επικράτησης των εκφυλισμένων διαδικασιών MI (στα αριστερά του φάσματος) και BS (στα δεξιά του φάσματος) οι οποίες αγνοούνται στο θεωρητικό μοντέλο της σχέσης 4.31.



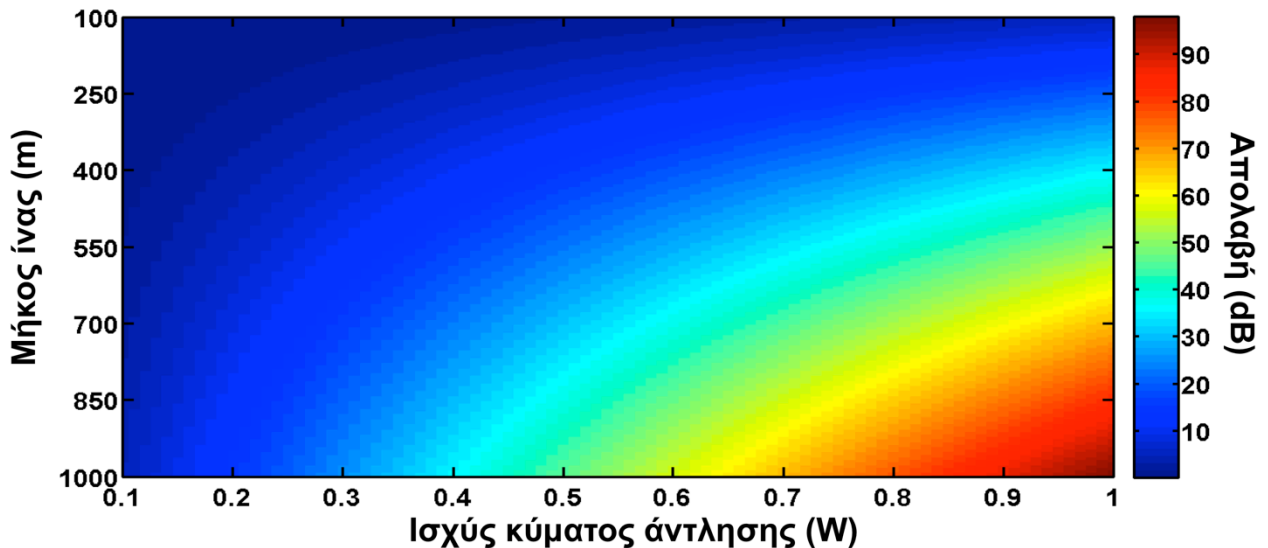
Σχήμα 4-19: Φάσμα των κυμάτων πριν (α) και μετά (β) την παραμετρική διαδικασία σε έναν 2P-FOPA. Στο φάσμα εξόδου είναι ευδιάκριτη η παρουσία των παραγώγων που προκύπτουν από τις διαδικασίες MI και BS.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Για την ορθότερη κατανόηση της διαδικασίας FWM σε έναν 2P-FOPA, στο σχήμα 4-19 παρουσιάζουμε το φάσμα εισόδου και το φάσμα εξόδου του παραμετρικού ενισχυτή με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Για να αποφύγουμε τον κορεσμό της απολαβής το σήμα επιλέγεται να έχει αρκετά χαμηλή ισχύ ($P_s = -30$ dBm) και τοποθετείται σε μία ασφαλή απόσταση από τα κύματα άντλησης εντός της περιοχής της μέγιστης ενίσχυσης ($\lambda_s = 1534$ nm). Στο σχήμα 4-19 παρατηρείται η σημαντική ενίσχυση που προσφέρει ο ενισχυτής στο σήμα και το συζυγές του ενώ στα άκρα του φάσματος κάνουν την εμφάνισή τους τα παράγωγα των διαδικασιών MI και BS με μικρή βέβαια απόδοση.

Αφού λοιπόν επιβεβαιώσαμε την ορθότητα του μοντέλου για τον ενισχυτή διπλής άντλησης στη συνέχεια επιχειρούμε μία αναλυτική χαρτογράφηση των επιδόσεων του (απολαβή και εύρος ζώνης) ως προς τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του (L , P_1 , P_2 , $\lambda_2 - \lambda_1$). Έτσι με τη βοήθεια της σχέσης 4.34, το μοντέλο του παραμετρικού ενισχυτή τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε με δεδομένα το μήκος της ίνας και την ισχύ άντλησης να γίνεται αυτόματος υπολογισμός της φασματικής απόστασης και της θέσης των κυμάτων άντλησης τα οποία οδηγούν σε μεγιστοποίηση του συντελεστή ενίσχυσης και του εύρους ζώνης του ενισχυτή. Η ίνα που χρησιμοποιήθηκε για τους παρακάτω υπολογισμούς διαθέτει τις ίδιες παραμέτρους με αυτές που θεωρήσαμε στο κεφάλαιο 4.2.

Στα διάγραμμα των σχημάτων 4-20 έως 4-23 απεικονίζονται η μέγιστη ενίσχυση του 2P-FOPA, το μέγιστο εύρος ζώνης, στο σημείο όπου η απολαβή πέφτει στο 1.3 dB της μέγιστης, η φασματική απόσταση μεταξύ των κυμάτων άντλησης καθώς επίσης και η ολίσθηση του κεντρικού μήκους κύματος συναρτήσει του μήκους της ίνας και της συνολικής ισχύος των κυμάτων άντλησης ώστε να γίνει μία συγκριτική μελέτη αυτών έναντι των αντίστοιχων του 1P-FOPA που παρουσιάστηκαν στα διάγραμμα των σχημάτων 4-9 έως 4-11.



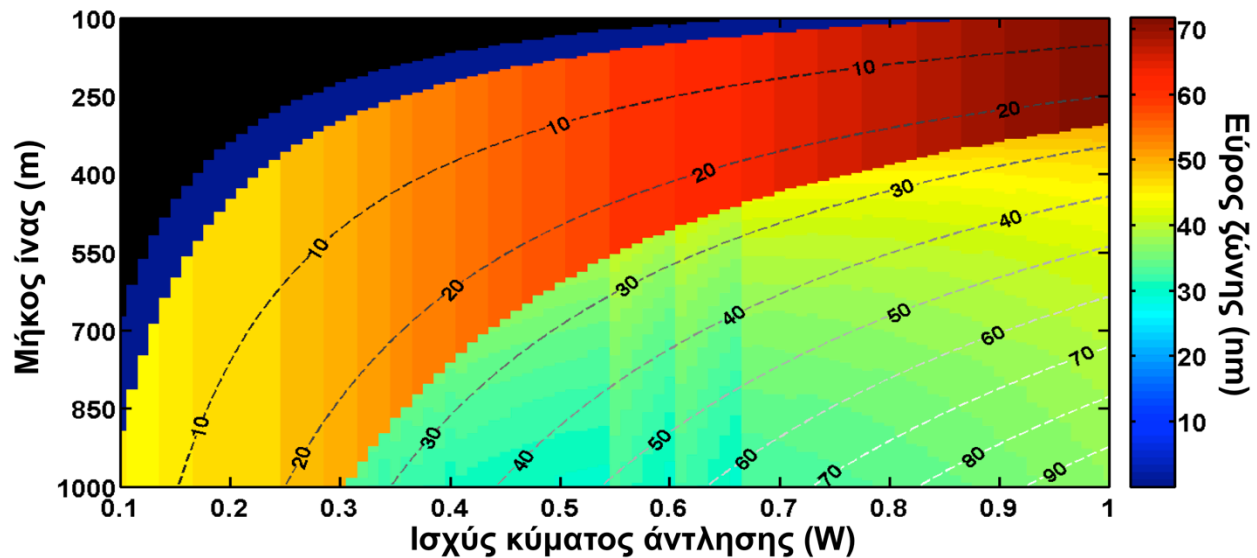
Σχήμα 4-20: Απολαβή του ενισχυτή 2P-FOPA συναρτήσει της συνολικής ισχύος των κυμάτων άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.

Συγκρίνοντας τα σχήματα 4-9 και 4-20 παρατηρούμε ότι η απολαβή του ενισχυτή 2P-FOPA παραμένει ίδια με αυτήν του 1P-FOPA για κοινή επιλογή του συνδυασμού μήκους ίνας και συνολικής ισχύος άντλησης. Το αποτέλεσμα αυτό, όπως εξηγήσαμε και παραπάνω, είναι απολύτως αναμενόμενο αφού η μέγιστη τιμή ενίσχυσης εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το γινόμενο γPL , όπου στην περίπτωση του 2P-FOPA το P αντιστοιχεί στο άθροισμα της ισχύος των δύο αντλήσεων.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

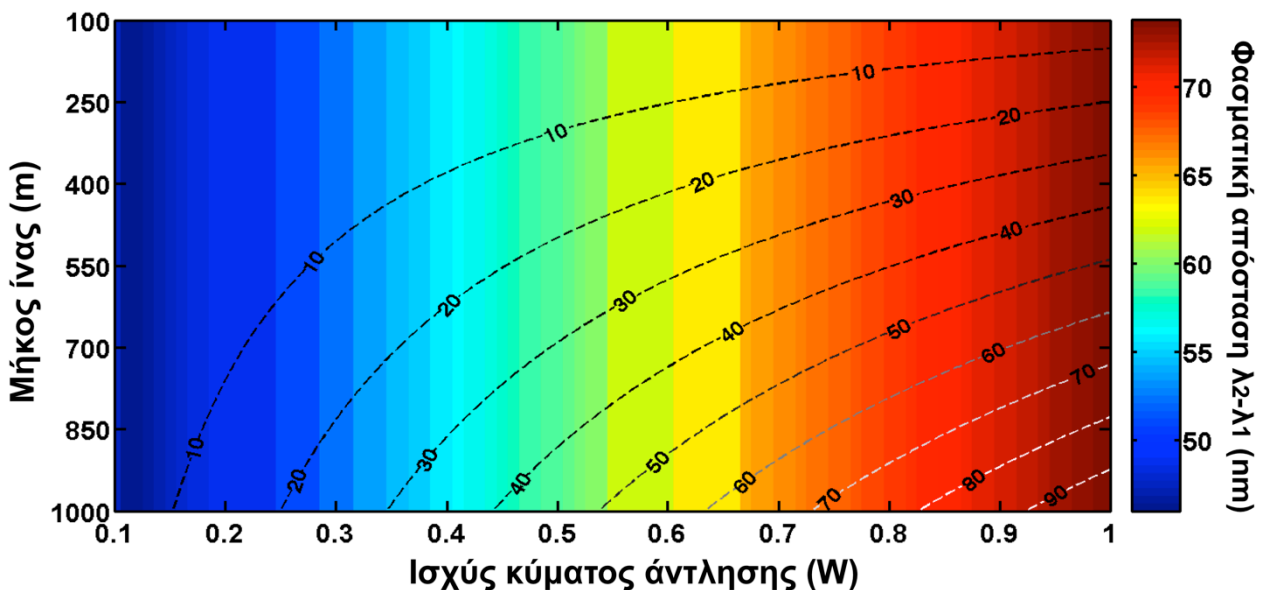
Σύμφωνα με το σχήμα 4-21, το εύρος ζώνης του ενισχυτή 2P-FOPA (σχ. 4-21) φαίνεται ότι μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και τα 60 nm, τιμή εξαιρετικά υψηλή αν κανείς τη συγκρίνει με την αντίστοιχη του 1P-FOPA.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας την ίδια τιμή απολαβής (20 dB) και τις ίδιες χαρακτηριστικές παραμέτρους ($L=500\text{m}$ και $P_1=P_2=P/2=250\text{ mW}$) και για τους δύο ενισχυτές παρατηρούμε ότι ο 2P-FOPA διαθέτει εύρος ζώνης ίσο με 48 nm εν αντιθέσει με τα 30 nm (άθροισμα του εύρους ζώνης και των δύο λοβών) του 1P-FOPA. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερος σημαντικά και αποδεικνύουν την υπεροχή του παραμετρικού ενισχυτή διπλής άντλησης.

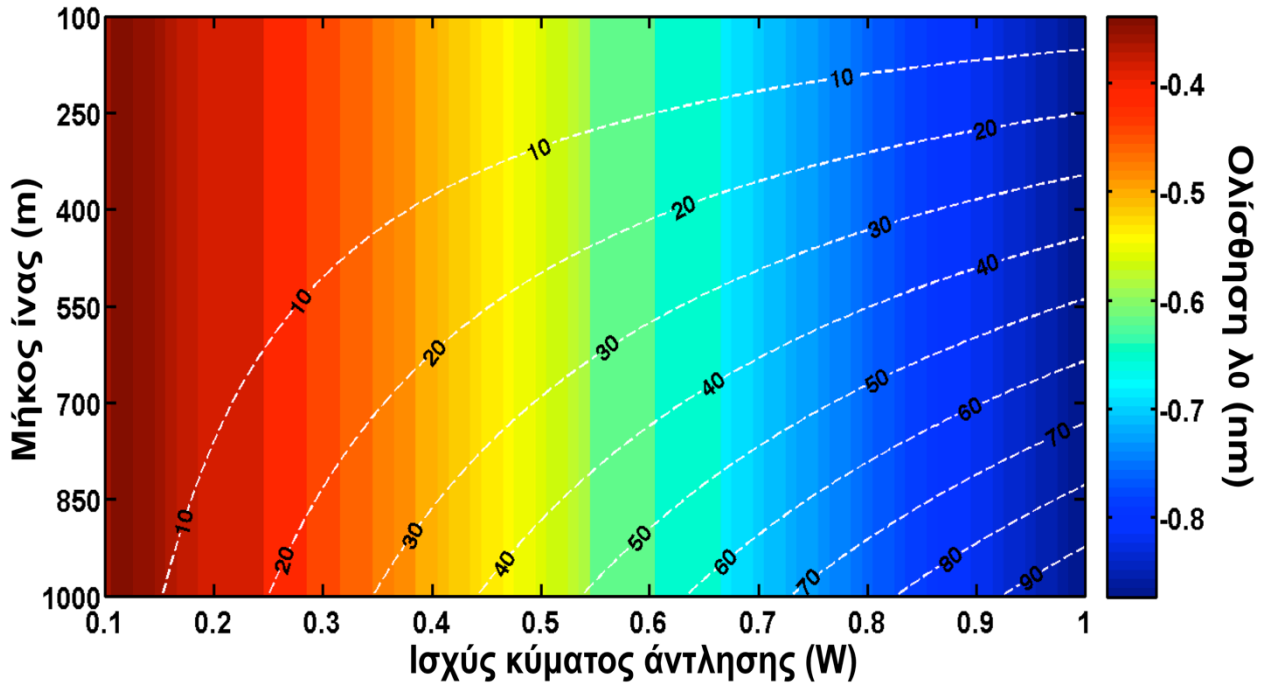


Σχήμα 4-21: Εύρος ζώνης του ενισχυτή 2P-FOPA στα 1.3 dB συναρτήσει της συνολικής ισχύος των κυμάτων άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.

Για να ολοκληρωθεί η μελέτη των παραμετρικών ενισχυτών ως προς τα σχεδιαστικά τους χαρακτηριστικά, στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται η φασματική απόσταση και το κεντρικό μήκος κύματος, λ_c , των κυμάτων άντλησης σαν συνάρτηση του μήκους της ίνας και της ολικής ισχύος των αντλήσεων.



Σχήμα 4-22: Φασματική απόσταση μεταξύ των κυμάτων άντλησης για τον ενισχυτή 2P-FOPA συναρτήσει της συνολικής ισχύος των κυμάτων άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.



Σχήμα 4-23: Ολίσθηση του κεντρικού μήκους κύματος, λ_c , για τον ενισχυτή 2P-FOPA συναρτήσει της συνολικής ισχύος των κυμάτων άντλησης και του μήκους της ίνας για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.

Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω, η μεταβολή του μήκους δεν επιφέρει κάποια αλλαγή στις παραμέτρους αυτές, επομένως η μεταβολή τους καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από την ισχύ των πηγών άντλησης.

Συνοψίζοντας λοιπόν, οι 2P-FOPA, παρά την εκ πρώτης όψεως πολυπλοκότερη υλοποίησή τους λόγω της υψηλότερης ακρίβειας που απαιτείται ως προς τη ρύθμιση του κεντρικού μήκους κύματος και της φασματικής απόστασης των αντλήσεων, προσφέρουν έναν αριθμό σημαντικών πλεονεκτημάτων έναντι των 1P-FOPA. Πέρα από το αξιοσημείωτα διευρυμένο εύρος ζώνης λειτουργίας και τη σταθερότερη απολαβή που διαθέτουν, παρέχουν επίσης τη δυνατότητα ενίσχυσης με αναισθησία στην πόλωση του σήματος, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κάθετα πολωμένων κυμάτων άντλησης. Μία τέτοια διάταξη έχει προταθεί στη βιβλιογραφία επιδεικνύοντας 15 dB ενίσχυσης σε ένα εύρος 20 nm [116].

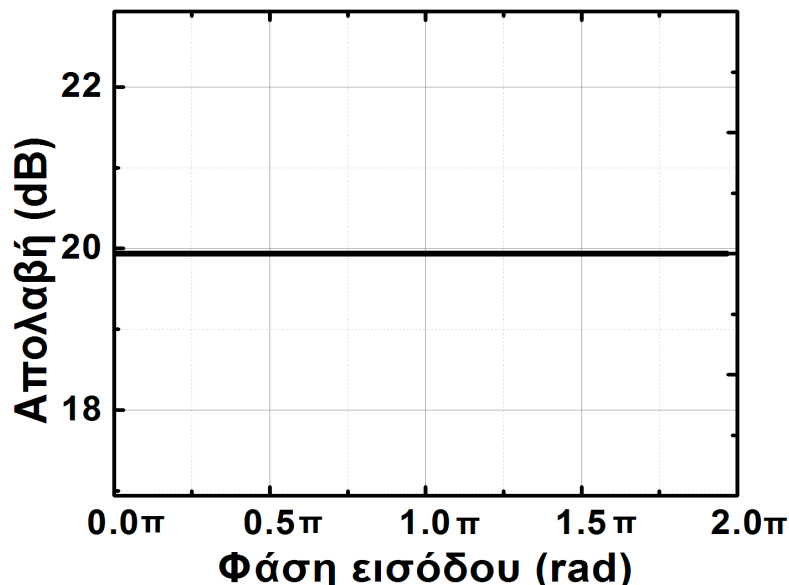
Ένα σημαντικό πρόβλημα, το οποίο επηρεάζει και τις δύο τοπολογίες παραμετρικών ενισχυτών είναι η παρουσία της διεργασίας SBS, η οποία όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 2 περιορίζει τη μέγιστη διαδιδόμενη ισχύ μέσα σε μία οπτική ίνα. Για να κατασταλεί το φαινόμενο αυτό και να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε κύματα άντλησης μεγάλης ισχύος στους παραμετρικούς ενισχυτές, τα κύματα αυτά διαμορφώνονται κατά φάση ώστε να διευρυνθεί αρκετά το φάσμα τους και επομένως η πυκνότητα ισχύος ανά συχνότητα. Αυτό όμως έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την επίδραση στα φασματικά χαρακτηριστικά του συζυγούς και τη στιγμιαία μεταβολή της απολαβής, αφού η διαμόρφωση φάσης διαταράσσει τον παράγοντα προσαρμογής φάσης. Εδώ λοιπόν έγκειται το επιπλέον πλεονέκτημα της τοπολογίας διπλής άντλησης. Αφενός η συνολική ισχύς είναι κατανομημένη σε δύο κύματα με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ευκολότερα η καταστολή του SBS, αφετέρου δε χρησιμοποιώντας αντίστροφες διαμορφώσεις φάσης στα κύματα άντλησης επιτυγχάνεται η εξουδετέρωση της επίδρασής τους στα φασματικά χαρακτηριστικά των παραγώγων και η απολαβή παραμένει χρονικά σταθερή.

4.4 Παραμετρικοί ενισχυτές ευαίσθητοι στη φάση (PSA)

Στις προηγούμενες παραγράφους μελετήσαμε ενδελεχώς τις ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και τις επιδόσεις των παραμετρικών ενισχυτών στην είσοδο των οποίων εισάγονται μόνο το σήμα και το κύμα ή τα κύματα άντλησης. Αυτού του είδους η τοπολογία παρουσιάζει αναισθησία ως προς τη φάση των αλληλεπιδρώντων κυμάτων αφού η έλλειψη του συζυγούς κύματος στην είσοδο του ενισχυτή οδηγεί σε ικανοποίηση της σχέσης προσαρμογής φάσης για κάθε περίπτωση δεδομένου βέβαια ότι έχει γίνει ορθή επιλογή των μηκών κύματος ώστε να εξουδετερώνεται ο γραμμικός από τον μή γραμμικό όρο της ολίσθησης φάσης. Σε αυτή την παράγραφο θα δούμε πώς επηρεάζεται η συμπεριφορά του παραμετρικού ενισχυτή αν στην είσοδό του εισάγουμε και το συζυγές κύμα.

4.4.1 Συνθήκη προσαρμογής φάσης και επιπτώσεις στις επιδόσεις του ενισχυτή

Στο κεφάλαιο 4.1.3 αποδείξαμε ότι όταν η συνολική ολίσθηση φάσης, θ , μεταξύ των κυμάτων που αλληλεπιδρούν στη διεργασία FWM είναι ίση με $\pi/2$ τότε σύμφωνα με τις σχέσεις 4.14-4.16 έχουμε μεταφορά ενέργειας από την άντληση στο σήμα και το συζυγές του (παραμετρική ενίσχυση) ενώ για τιμή ίση με $-\pi/2$ παρατηρείται ροή ενέργειας προς την αντίθετη κατεύθυνση (παραμετρική εξασθένηση). Στην περίπτωση της έλλειψης του συζυγούς κύματος από την είσοδο του παραμετρικού ενισχυτή η σχέση 4.17 ικανοποιείται για οποιαδήποτε διαφορά φάσης μεταξύ των κυμάτων αρκεί η θέση του σήματος και του κύματος άντλησης να είναι κατάλληλη ώστε η μη γραμμικότητα να εξουδετερώνει τη διασπορά και έτσι να ικανοποιείται η προσαρμογή φάσης. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται ο συντελεστής ενίσχυσης ενός 1P-FOPA με ισχύ κύματος άντλησης ίση με 500 mW και μήκος ίνας 500 m. Δεδομένου ότι το σήμα είναι τοποθετημένο στο μήκος κύματος μέγιστης απολαβής ($\lambda_s=1525$ nm) παρατηρούμε ότι η απολαβή παραμένει σταθερή για όλες τις τιμές φάσης του σήματος στο διάστημα $\varphi_s \in [0, 2\pi)$. Η φάση του κύματος άντλησης επιλέχθηκε αυθαίρετα ίση με $\varphi_p=\pi/4$ χωρίς βλάβη της γενικότητας.

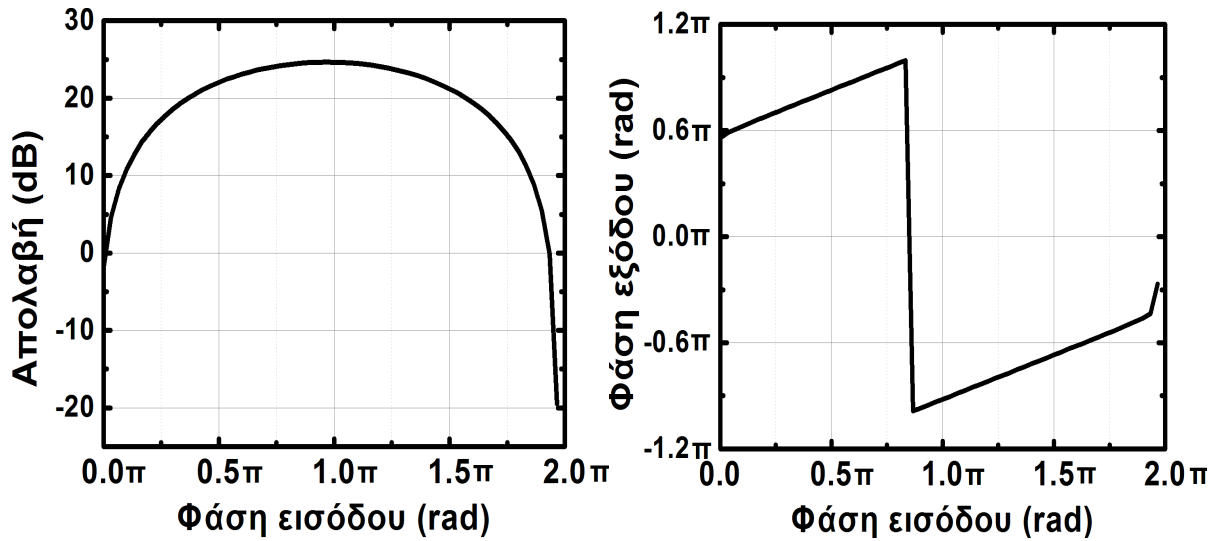


Σχήμα 4-24: Καμπύλη απολαβής του ενισχυτή 1P-FOPA συναρτήσει της φάσης του σήματος για σταθερή φάση στο κύμα άντλησης ίση με μηδέν.

Αν στην είσοδο του ενισχυτή τοποθετήσουμε ένα κύμα στο μήκος κύματος που εμφανίζεται το συζυγές κύμα ($\lambda_i=1588.3$ nm) και δώσουμε σε αυτό μία αυθαίρετη αλλά σταθερή τιμή φάσης ($\varphi_i=0$) τότε παρατηρούμε ότι η απολαβή πλέον αποκτά χαρακτηριστικά ευαισθησίας στη φάση επαληθεύοντας τις τιμές για παραμετρική ενίσχυση και εξασθένηση που αναφέραμε προηγουμένως (σχ. 4-25). Επιπλέον, η

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

μέγιστη τιμή του συντελεστή απολαβής στην περίπτωση του PSA αυξάνεται κατά 6 dB συγκριτικά με την αντίστοιχη του PIA.



Σχήμα 4-25: Καμπύλη απολαβής (α) και φάσης εξόδου (β) του ευαίσθητου στη φάση ενισχυτή 1P-FOPA συναρτήσει της φάσης του σήματος στην είσοδο για σταθερές φάσεις εισόδου του κύματος άντλησης ($\varphi_p = \pi/4$) και του συζυγούς ($\varphi_i = 0$).

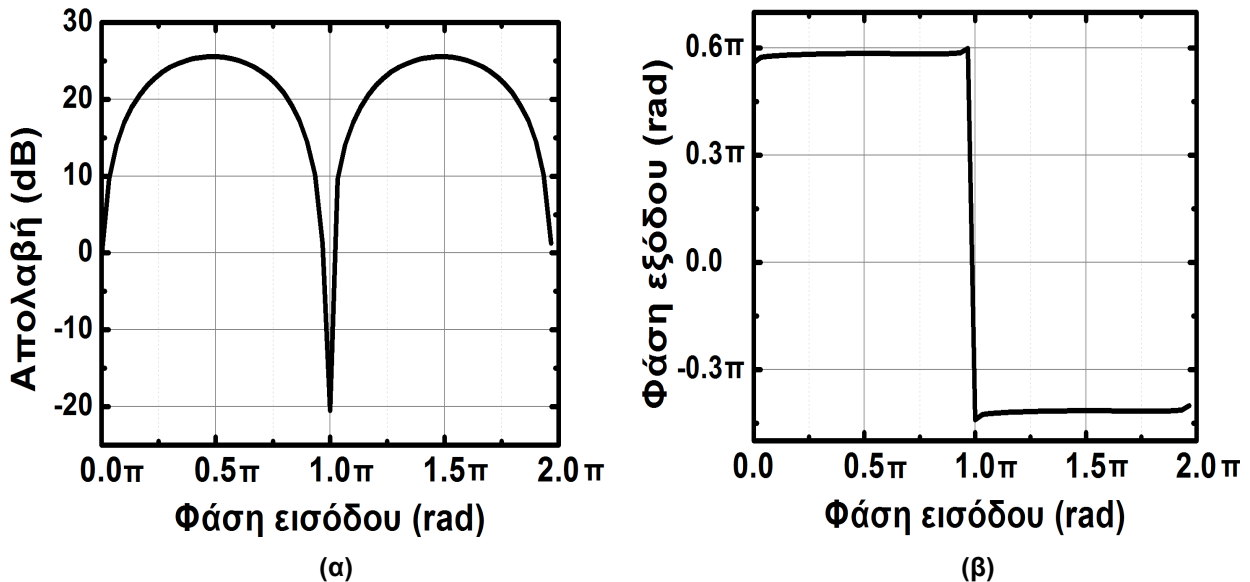
Η επιπλέον αύξηση αυτή στην απολαβή του ενισχυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην είσοδο του ενισχυτή υπάρχει και το συζυγές κύμα, το οποίο συνεισφέρει εξαρχής στην ενίσχυση του σήματος. Έτσι, ανά πάσα στιγμή στο σήμα εισρέει ενέργεια από την πηγή άντλησης λόγω της αλληλεπίδρασής της με το συζυγές με αποτέλεσμα το πεδίο του σήματος στην έξοδο του ενισχυτή να ισούται με δύο φορές το αρχικό πεδίο του σήματος, δηλαδή η συνολική ισχύς του τετραπλασιάζεται. Αν θεωρήσουμε λοιπόν, ότι τα δύο κύματα στην είσοδο του ενισχυτή έχουν την ίδια ισχύ, τότε η παραμετρική ενίσχυση που λαμβάνουν δίνεται από την ακόλουθη έκφραση.

$$G = \cosh(2\gamma P_p L) + \exp\left(-j\left(\varphi_{\sigma\chi\epsilon\tau} + \frac{\pi}{2}\right)\right) \sinh(2\gamma P_p L) \quad (4.37)$$

Επιλέγοντας λοιπόν την κατάλληλη διαφορά φάσης ($\varphi_{\sigma\chi\epsilon\tau} \in [-\pi/2, \pi/2]$) μεταξύ των τριών κυμάτων μπορούμε να ρυθμίσουμε κατά βούληση την επιθυμητή απολαβή του ενισχυτή.

Μία πολύ ενδιαφέρουσα ιδιότητα προκύπτει μέσα από τη συγκεκριμένη συνθήκη λειτουργίας του παραμετρικού ενισχυτή. Αν θεωρήσουμε ότι το σήμα και το συζυγές είναι συμφασικά, δηλαδή $A_s = A_i = \sqrt{P} \exp(i\varphi(t))$, τότε η απολαβή αποκτά δύο λοβούς μεγίστου στο διάστημα $[0, 2\pi)$ ενώ ταυτόχρονα η φάση του σήματος και του συζυγούς στην έξοδο του ενισχυτή αποκτούν τη μορφή βηματικής συνάρτησης με περιοδικότητα π και διαφορά μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων ίση επίσης με π (σχ. 4-26).

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



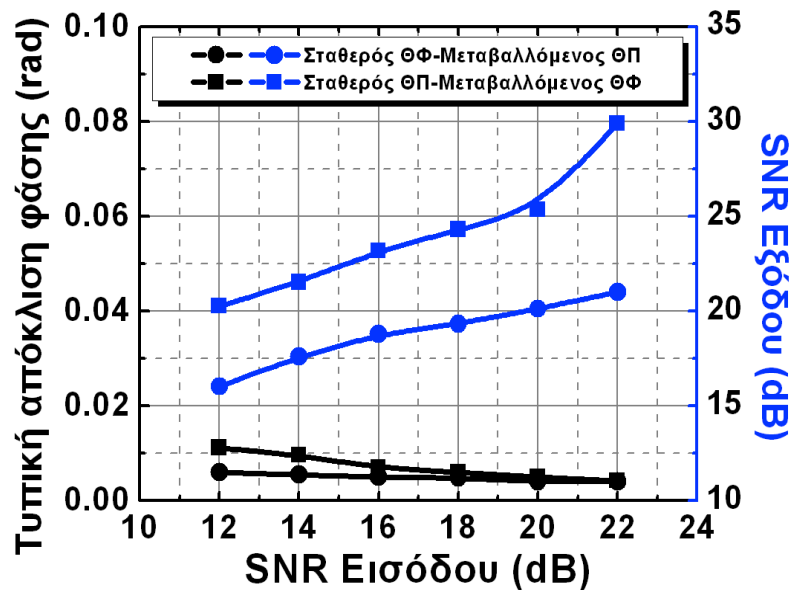
Σχήμα 4-26: Καμπύλη απολαβής (α) και φάσης εξόδου (β) του ευαίσθητου στη φάση ενισχυτή 1P-PSA συναρτήσει της φάσης εισόδου του σήματος για μηδενική φάση του κύματος άντλησης και φάση του συζυγούς κύματος η οποία μεταβάλλεται ταυτόχρονα με τη φάση του σήματος παίρνοντας ίδιες τιμές.

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα, οποιαδήποτε μεταβολή της φάσης του σήματος εντός του διαστήματος $[0, \pi]$, η οποία βέβαια συνοδεύεται από την ίδια μεταβολή φάσης και στο συζυγές, κβαντίζεται σε μία σταθερή τιμή φάσης στην έξοδο του ενισχυτή. Αυτή η ενδιαφέρουσα ιδιότητα των ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών τους καθιστά σε εξαιρετικούς αναγεννητές σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση (PSK) αφού με αυτό τον τρόπο οποιαδήποτε διαταραχή φάσης μπορεί να συμπιεσθεί σε αρκετά σημαντικό βαθμό, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο, ενώ παράλληλα το σήμα ενισχύεται μέσω της διαδικασίας.

Μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα, συνειδητοποιούμε ωστόσο ότι η συμπίεση αυτή της φάσης δε γίνεται χωρίς κανένα απολύτως κόστος. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι καθώς η φάση του σήματος στην είσοδο ολισθαίνει η απολαβή του ενισχυτή μεταβάλλεται, γεγονός το οποίο για μεγάλες διαταραχές της φάσης οδηγεί σε σημαντική διακύμανση της ισχύος του σήματος και του συζυγούς στην έξοδο του ενισχυτή. Το αποτέλεσμα αυτό έχει αρνητική επίδραση στις επιδόσεις του PSA ως αναγεννητή σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση αφού για ισχυρά επίπεδα θορύβου παρουσιάζεται μετατροπή του θορύβου φάσης σε πλάτος.

Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται ξεκάθαρα στο διάγραμμα του σχήματος 4-27, στο οποίο παρουσιάζεται η απόκλιση φάσης και ο λόγος οπτικού σήματος-προς-θόρυβο του σήματος στην έξοδο του ενισχυτή συναρτήσει του λόγου σήματος-προς-θόρυβο στην είσοδο. Για την παραπάνω μελέτη θεωρήσαμε δύο ξεχωριστές περιπτώσεις υποβάθμισης του σήματος εισόδου: στη μία διατηρείται σταθερός ο θόρυβος φάσης και το σήμα υποβαθμίζεται μόνο από θόρυβο πλάτους ενώ στην άλλη θεωρούμε ακριβώς το αντίστροφο. Επίσης, το σήμα και το συζυγές θεωρούμε ότι έχουν ταυτόσημα χαρακτηριστικά θορύβου φάσης και πλάτους. Όταν το σήμα υποβαθμίζεται μόνο από θόρυβο πλάτους παρατηρούμε ότι ο PSA δεν προσφέρει καμία απολύτως βελτίωση αφού δεν υπάρχει κάποιος μηχανισμός συμπίεσης πλάτους, ενώ ταυτόχρονα το SNR μπορεί να υποβαθμιστεί επιπλέον λόγω της μετατροπής θορύβου φάσης σε πλάτος. Αν όμως η κύρια πηγή υποβάθμισης του σήματος είναι ο θόρυβος φάσης, τότε ο PSA παρέχει σημαντική βελτίωση στην έξοδο, η οποία μπορεί να φθάσει έως και τα 8 dB.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



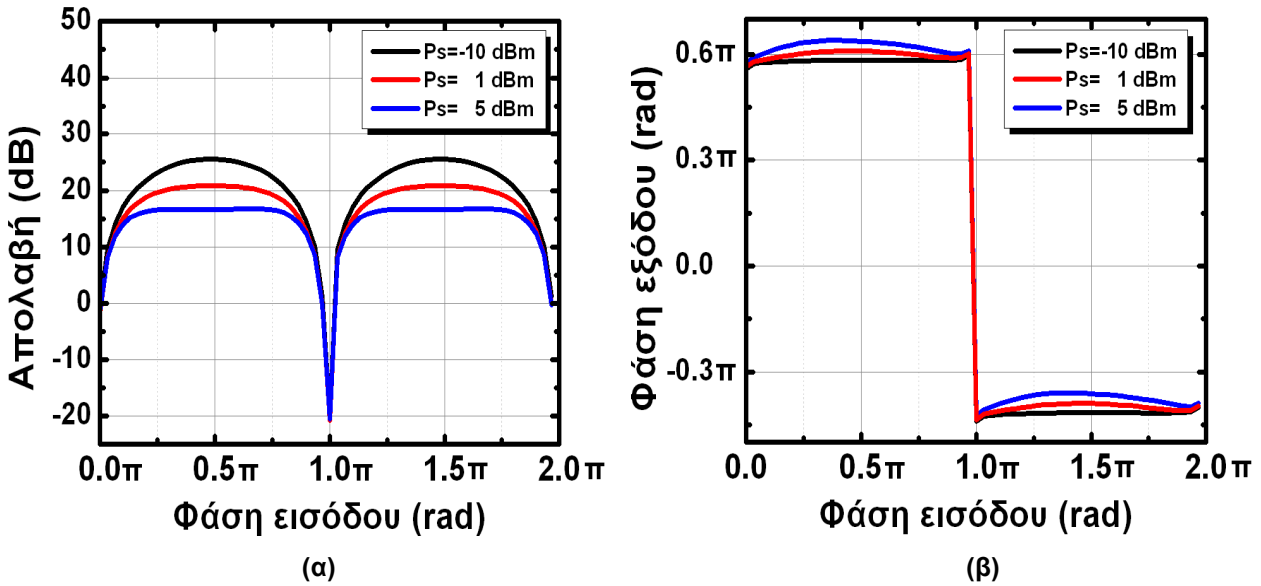
Σχήμα 4-27: Απεικόνιση της απόκλισης φάσης και του SNR του σήματος στην έξοδο του 1P-PSA συναρτήσει του SNR του σήματος εισόδου για υποβάθμιση του τελευταίου μόνο από θόρυβο πλάτους (τετράγωνα) και μόνο από θόρυβο φάσης (κύκλοι) για λειτουργία του ενισχυτή στην γραμμική περιοχή.

Για μικρά SNR του σήματος εισόδου ($SNR < 20$ dB), οι μεγάλες διαταραχές στην φάση περιορίζουν τη βελτίωση του σήματος στα 0.5 dB/dB, καθώς όμως οι διαταραχές αυτές ελαττώνονται οδηγώντας σε μικρότερη υποβάθμιση του σήματος εισόδου ($SNR > 20$ dB) η βελτίωση αυξάνεται ραγδαία φθάνοντας τα 2.5 dB/dB. Σε αντίθεση με το πλάτος, η φάση του σήματος στην έξοδο του ενισχυτή παραμένει σχεδόν σταθερή παρουσιάζοντας μία μικρή μέση απόκλιση της τάξεως των 0.015 rad για όλες τις περιπτώσεις.

Για την επιπλέον βελτίωση του συστήματος, ώστε να παρέχει ολοκληρωμένα χαρακτηριστικά συμπίεσης και του θορύβου φάσης αλλά και του θορύβου πλάτους, ο PSA μπορεί να τεθεί σε καθεστώς μη γραμμικής λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή, η ισχύς του σήματος στην είσοδο πρέπει να είναι επαρκώς υψηλή ώστε να οδηγήσει σε κορεσμό τον ενισχυτή μέσω της σημαντικής μείωσης της ισχύος της άντλησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 4-28, η καμπύλη απολαβής να ψαλιδίζεται στη μέγιστη τιμή της και έτσι να αποκτά σταθερή απόκριση για ένα μεγαλύτερο εύρος διαταραχών φάσης. Με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η μετατροπή θορύβου φάσης σε πλάτος και ταυτόχρονα συμπιέζεται ο θόρυβος πλάτους. Το μειονέκτημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι η μέγιστη ενίσχυση ελαττώνεται ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού ενώ η απόκριση φάσης χάνει το επίπεδο προφίλ της περιορίζοντας έτσι το βαθμό συμπίεσης θορύβου φάσης. Ο μηχανισμός που κρύβεται πίσω από την παραπάνω διαδικασία είναι ο εξής. Καθώς η διαφορά φάσης των αλληλεπιδρώντων κυμάτων πλησιάζει την τιμή $\pi/2$, για την οποία παρατηρείται μέγιστη απολαβή, η ισχύς του κύματος άντλησης μειώνεται σημαντικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ενίσχυσης που μπορεί να προσφέρει το κύμα άντλησης στο σήμα και το συζυγές, ενώ λόγω των φαινομένων SPM και XPM μεταβάλλεται η σχετική φάση μεταξύ των αλληλεπιδρώντων κυμάτων η οποία οδηγεί σε διαταραχή της συνθήκης προσαρμογής φάσης με αποτελέσματα την παραμόρφωση της καμπύλης απόκρισης φάσης εξόδου.

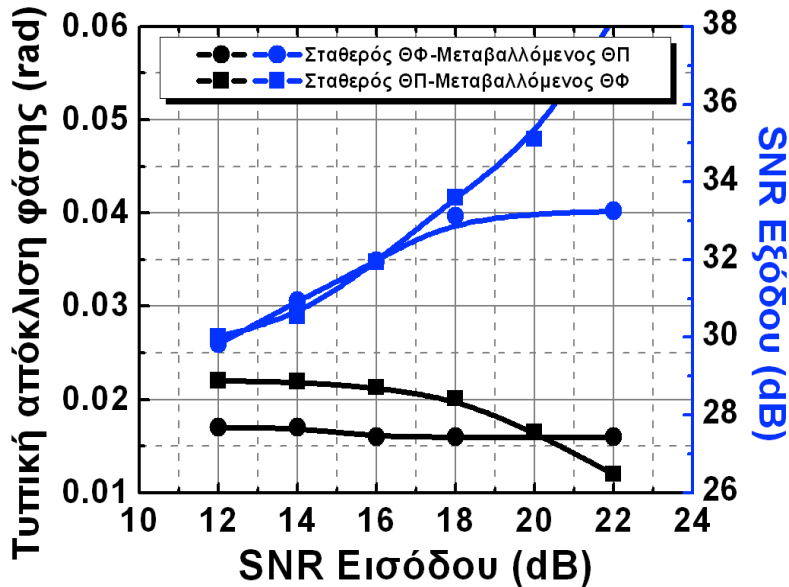
Παρόλα αυτά με ορθή επιλογή του ποσοστού κορεσμού μπορούμε να επιτύχουμε έναν κατάλληλο συνδυασμό συμπίεσης θορύβου πλάτους και φάσης ο οποίος θα οδηγήσει στη βέλτιστη απόδοση του ενισχυτή. Στο σχήμα 4-28 παρουσιάζονται οι καμπύλες απολαβής και φάσης για τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος του σήματος εισόδου.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 4-28: Καμπύλη απολαβής (α) και φάσης εξόδου (β) του ευαίσθητου στη φάση ενισχυτή 1P-PSA συναρτήσει της φάσης του σήματος στην είσοδο για διαφορετικά επίπεδα ισχύος του σήματος.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, για ισχύ σήματος ίση με 1 dBm φαίνεται ότι επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία του PSA με απολαβή που φθάνει τα 21 dB. Οι επιδόσεις ενός τέτοιου ενισχυτή παρουσιάζονται στο σχήμα 4-29, οι οποίες μπορούν να συγκριθούν με τις αντίστοιχες του ενισχυτή σε γραμμική λειτουργία που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 4-28.



Σχήμα 4-29: Απεικόνιση της απόκλισης φάσης και του SNR του σήματος στην έξοδο του 1P-PSA συναρτήσει του SNR του σήματος εισόδου για υποβάθμιση του τελευταίου μόνο από θόρυβο πλάτους (τετράγωνα) και μόνο από θόρυβο φάσης (κύκλοι) για λειτουργία του ενισχυτή στη μη γραμμική περιοχή.

Στο παραπάνω σχήμα είναι προφανής η συμπίεση θορύβου πλάτους που παρέχει ο PSA αφού προσφέρει βελτίωση του SNR που φθάνει μέχρι και τα 18 dB σε αντίθεση με τα μόλις 8 dB που προσέφερε ο PSA σε γραμμική λειτουργία. Παράλληλα, για την περίπτωση όπου το σήμα υποβαθμίζεται μόνο από θόρυβο φάσης παρατηρούμε ότι ακόμα και για πολύ χαμηλά SNR ($SNR < 16$ dB) η βελτίωση στην έξοδο ξεπερνά τα 16 dB. Ο θόρυβος φάσης στην έξοδο του ενισχυτή όπως παρατηρούμε παρουσιάζει εξάρτηση από τον θόρυβο φάσης στην είσοδο συμπεριφορά απόλυτα αναμενόμενη αν

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

λάβουμε υπ' όψιν μας την απόκριση φάσης του σχήματος 4-28. Η διακύμανση στη φάση αν και είναι υψηλότερη της αντίστοιχης στη γραμμική περιοχή, η επίδρασή της στο τελικό σήμα είναι αμελητέα συγκριτικά με τη συνολική βελτίωση που προσφέρει η συμπίεση του θορύβου πλάτους και της μετατροπής του θορύβου φάσης σε πλάτος.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε αυτή την παράγραφο επιδεικνύουν τις αξιοσημείωτες δυνατότητες συμπίεσης θορύβου φάσης και πλάτους των ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών, οι οποίες τους καθιστούν σημαντικούς υποψηφίους για την αμιγώς οπτική αναγέννηση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση. Σε επόμενη παράγραφο θα μελετήσουμε διεξοδικά τη βελτίωση που προσφέρουν οι PSA μέσω της άμεσης συμπίεσης του θορύβου φάσης σε σήματα διαμορφωμένα κατά φάση και θα συγκριθούν οι επιδόσεις τους με την εναλλακτική τεχνική της περιοδικής μείωσης του θορύβου πλάτους η οποία εμποδίζει τη συσσώρευση του μη γραμμικού θορύβου φάσης.

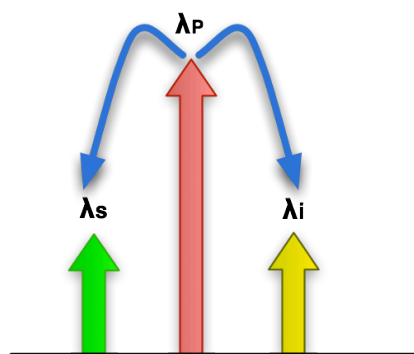
4.4.2 Τοπολογίες ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών

Στην προηγούμενη παράγραφο, μελετήσαμε την απλή περίπτωση ενός PSA μονής άντλησης για την ευκολότερη επεξήγηση του μηχανισμού αλλά και την καλύτερη κατανόηση από τον αναγνώστη. Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιάσουμε όλες τις δυνατές τοπολογίες, οι οποίες μπορούν να παρέχουν ευαίσθητη στη φάση παραμετρική ενίσχυση, και θα αναφέρουμε εν συντομία τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ως προς την υλοποίηση και τις επιδόσεις της κάθε μίας.

Οι ενισχυτές PSA λοιπόν, υλοποιούνται με βάση τις δύο τοπολογίες των ενισχυτών PIA που αναφέραμε στις παραγράφους 4.2 και 4.3 αλλά με κάποιες μικρές τροποποιήσεις. Έτσι λοιπόν έχουμε τις ακόλουθες τρεις τοπολογίες.

- PSA μονής άντλησης
- PSA διπλής άντλησης
- Εκφυλισμένος PSA διπλής άντλησης

PSA μονής άντλησης: Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται ο μηχανισμός μεταφοράς ενέργειας και η θέση των αλληλεπιδρώντων κυμάτων στην τοπολογία PSA μονής άντλησης.



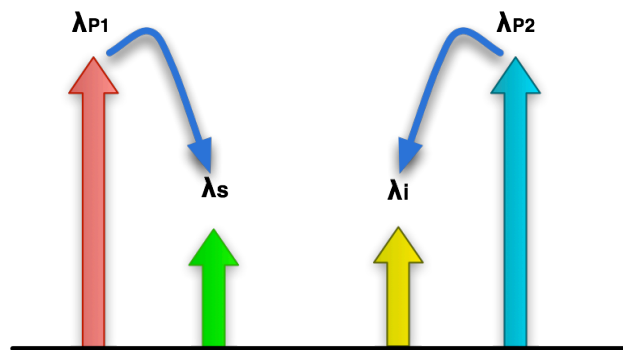
Σχήμα 4-30: Τοπολογία του 1P-PSA.

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής, η σχετική φάση μεταξύ του κύματος άντλησης, του σήματος και του συζυγούς στην είσοδο του PSA θα πρέπει να ελέγχεται ανά πάσα στιγμή ώστε να διασφαλίζεται η προσαρμογή φάσης και έτσι ο PSA να βρίσκεται συνεχώς σε καθεστώς ενίσχυσης. Για το σκοπό αυτό, ειδικά ηλεκτρονικά κυκλώματα παρακολούθησης και εγκλείδωσης φάσης (phase locked-loop, PLL) πρέπει να χρησιμοποιούνται ώστε να ρυθμίζουν κατάλληλα τη φάση κάθε κύματος, ενώ ο συνολικός ενισχυτής θα πρέπει να βρίσκεται σε ειδικά απομονωμένο περιβάλλον ώστε

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές φάσης λόγω θερμικών διακυμάνσεων αλλά και μηχανικών ταλαντώσεων. Επίσης, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 4.3, για την καταστολή του SBS πρέπει να εισάγεται κατάλληλη διαμόρφωση φάσης στο κύμα άντλησης ώστε να διευρύνεται το φάσμα του και να μειώνεται η πυκνότητα ισχύος ανά συχνότητα. Αυτή η διαμόρφωση φάσης όμως επιφέρει διαταραχές στα φασματικά χαρακτηριστικά του σήματος και ως εκ τούτου στην απολαβή του ενισχυτή. Σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε στα κεφάλαια 4.2 και 4.3, ο 1P-PSA διαθέτει περιορισμένο εύρος ζώνης συγκριτικά με τον 2P-PSA. Το σημαντικότερο όμως μειονέκτημα, στο οποίο μέχρι στιγμής δεν έχει δοθεί λύση τουλάχιστον για τη συγκεκριμένη τοπολογία, είναι ότι δεν υπάρχει κάποιος αποδοτικός τρόπος σύμφωνης μεταφοράς της πληροφορίας φάσης από το σήμα στο συζυγές ώστε τα δύο κύματα να διαθέτουν τα ίδια φασματικά χαρακτηριστικά. Αν και πειραματικές υλοποιήσεις τέτοιων ενισχυτών έχουν μελετηθεί ενδελεχώς από διάφορες ερευνητικές ομάδες [117], ωστόσο τα κοινά χαρακτηριστικά φάσης στο σήμα και το συζυγές εισάγονται τεχνηέντως, με την εκ των προτέρων κοινή διαμόρφωση των δύο κυμάτων με την ίδια πληροφορία και την εισαγωγή κοινού θορύβου. Σε επόμενο κεφάλαιο προτείνεται ένας αναγεννητής σε αρχιτεκτονική μονής άντλησης, ο οποίος υιοθετεί ένα ρεαλιστικό σενάριο για τη σύμφωνη μεταφορά των χαρακτηριστικών του σήματος στο συζυγές τοπικά στον αναγεννητή.

PSA διπλής άντλησης (2P-PSA): Στο σχήμα 4-31 απεικονίζεται ο μηχανισμός μεταφοράς ενέργειας και η φασματική τοποθέτηση των αλληλεπιδρώντων κυμάτων στην τοπολογία του PSA διπλής άντλησης.



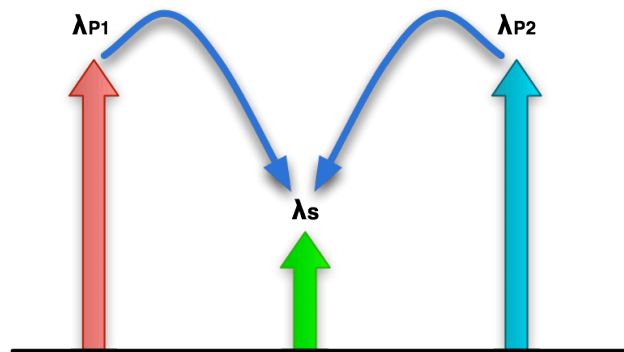
Σχήμα 4-31: Τοπολογία του 2P-PSA.

Ο συγκεκριμένος ενισχυτής παρουσιάζει αυξημένο βαθμό πολυπλοκότητας στην υλοποίησή του καθώς η προσαρμογή φάσης θα πρέπει να διασφαλίζεται για τέσσερα κύματα. Βέβαια σε αντίθεση με τον 1P-PSA παρουσιάζει διευρυμένο εύρος ζώνης και μικρότερη διακύμανση της απολαβής εντός του εύρους αυτού, χαρακτηριστικά τα οποία είναι αρκετά ελκυστικά. Επίσης, όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 4.3, η καταστολή του SBS επιτυγχάνεται ευκολότερα λόγω της μικρότερης απαιτούμενης ισχύος ανά κύμα άντλησης, ενώ η επίδραση της διαμόρφωσης φάσης των κυμάτων άντλησης στο σήμα και το συζυγές εξουδετερώνεται με τη χρήση αντίστροφης πολικότητας στις δύο διαμορφώσεις. Ταυτόχρονα το σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχει αναισθησία στην πόλωση μέσω της τοποθέτησης κάθετα πολωμένων κυμάτων άντλησης [116]. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι χρησιμοποιώντας την διεργασία FWM μπορούμε να παράγουμε μία χτένα συχνοτικών παραγώγων με επιθυμητή φασματική απόσταση μεταξύ τους [118] και με διαχωρισμό των κατάλληλων συνιστωσών να τις χρησιμοποιήσουμε ως κύματα άντλησης απλοποιώντας κατά κάποιο τρόπο τη διαδικασία εγκλείδωσης φάσης των τεσσάρων κυμάτων μεταξύ τους.

Εκφυλισμένος PSA διπλής άντλησης (Degenerate 2P-PSA): Η ειδική αυτή κατηγορία PSA στηρίζεται στην τοπολογία διπλής άντλησης που περιγράψαμε

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

προηγούμενως μόνο που εδώ το σήμα τοποθετείται στο κεντρικό μήκος κύματος λ_c μεταξύ των δύο κυμάτων άντλησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ίδιο το σήμα αυτομάτως να αποτελεί και το συμφασικό συζυγές κύμα.



Σχήμα 4-32: Τοπολογία του εκφυλισμένου 2P-PSA.

Με αυτή την αρχιτεκτονική δίνεται άμεση λύση στο πρόβλημα που παρουσιάζουν οι προηγούμενες δύο τοπολογίες ως προς τη σύμφωνη μεταφορά των χαρακτηριστικών φάσης από το σήμα στο συζυγές. Έτσι, η τοπολογία αυτή επωφελείται των πλεονεκτημάτων του 2P-PSA, ενώ παράλληλα προσφέρει μεγαλύτερη ευκολία ως προς την εγκλείδωση φάσης αφού τα κύματα που λαμβάνουν μέρος στην παραμετρική διαδικασία είναι μόνο τρία. Ωστόσο, υπάρχει ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας. Επειδή το σήμα τοποθετείται στο κεντρικό μήκος κύματος, αυτομάτως ο ενισχυτής περιορίζεται στο να μπορεί να επεξεργαστεί μόνο ένα κανάλι γεγονός απαγορευτικό για την χρήση του συγκεκριμένου PSA στα σύγχρονα WDM συστήματα μετάδοσης.

Μία ιδιαίτερως απλή υλοποίηση η οποία βασίζεται στην εκφυλισμένη τοπολογία διπλής άντλησης προτάθηκε πρόσφατα από τους Kakande et al. [14], [15] σύμφωνα με την οποία χρησιμοποιώντας ένα στάδιο παραμετρικής ενίσχυσης με αναισθησία στη φάση, η αλληλεπίδραση του σήματος και του ενός κύματος άντλησης παράγει το δεύτερο κύμα άντλησης διασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο την προσαρμογή φάσης μεταξύ των τριών κυμάτων. Ο συγκεκριμένος ενισχυτής προσφέρει αναγέννηση PSK σημάτων ενώ με κατάλληλη τροποποίηση χρησιμοποιείται και για σήματα QPSK.

Συνοψίζοντας λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι η ευαίσθητη στη φάση παραμετρική ενίσχυση είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αφού οι επιδόσεις της την καθιστούν ως την ιδανική μέθοδο για την αμιγώς οπτική αναγέννηση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση. Ωστόσο η πολυπλοκότητα υλοποίησης τέτοιων ενισχυτών και η αδυναμία επίλυσης κάποιων σημαντικών προβλημάτων κάνει αδύνατη την άμεση εμπορική εκμετάλλευσή τους. Στόχος της έρευνας πάνω στη συγκεκριμένη περιοχή είναι να σχεδιασθούν όσο το δυνατόν απλούστερες υλοποιήσεις, οι οποίες θα εκμεταλλεύονται το αρκετά διευρυμένο εύρος ζώνης των ενισχυτών αυτών ώστε να παρέχουν αμιγώς οπτική αναγέννηση ταυτόχρονα για όλα τα κανάλια των WDM συστημάτων.

4.4.3 Συγκριτικές επιδόσεις αναγέννησης RZ-DPSK σημάτων με χρήση PIA και PSA

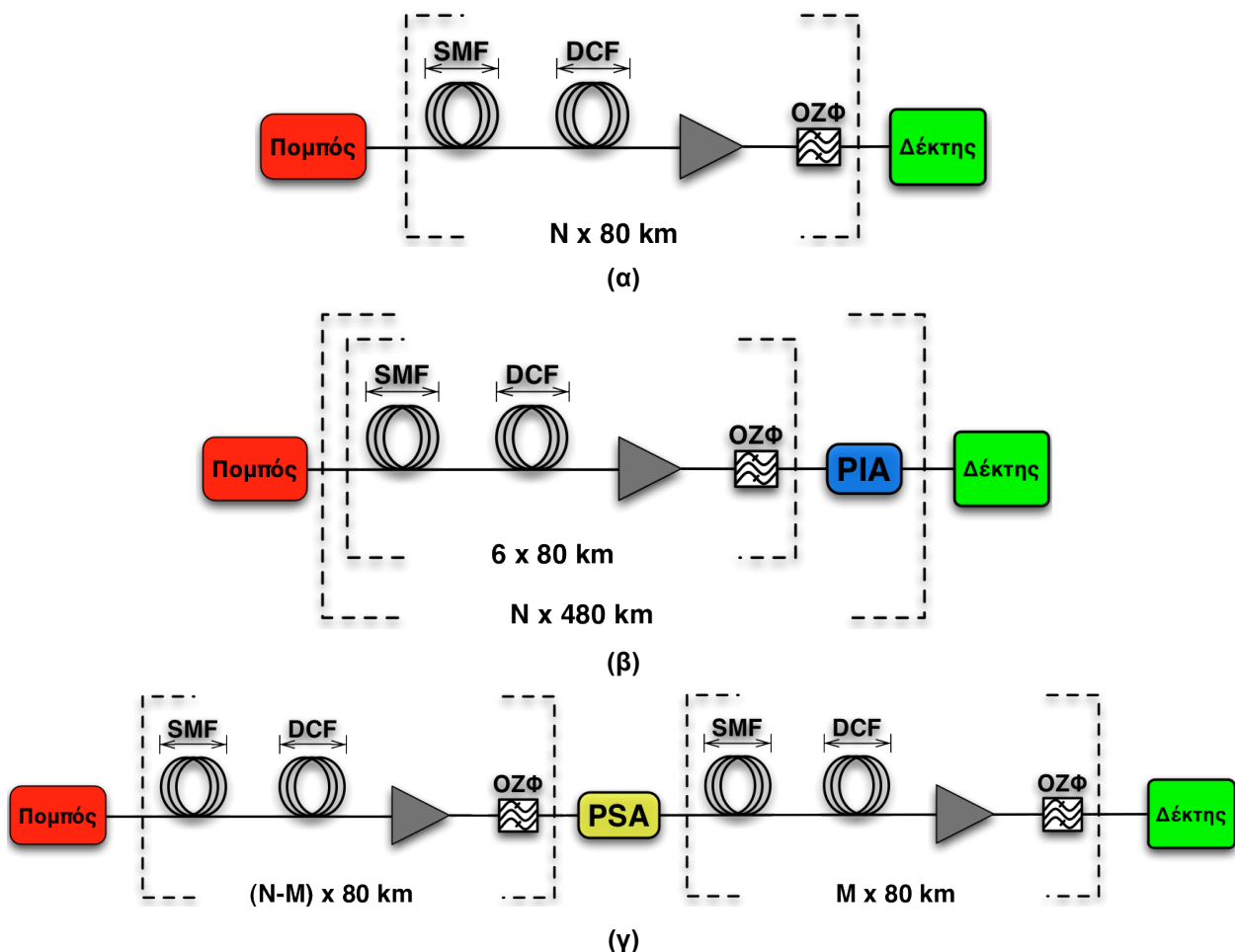
Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, το ενδιαφέρον είναι στραμμένο στη μελέτη και τον σχεδιασμό συστημάτων τα οποία προσφέρουν αμιγώς οπτική επεξεργασία σε σήματα διαμορφωμένα κατά φάση. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα όσα αναφέραμε για τους ευαίσθητους στη φάση παραμετρικούς ενισχυτές, στην παρούσα παράγραφο θα αξιολογήσουμε τις επιδόσεις των PSA ως προς την συμπίεση του θορύβου φάσης για την περίπτωση RZ-DPSK σημάτων και θα τις συγκρίνουμε με τις

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

αντίστοιχες επιδόσεις μιας τεχνικής συμπίεσης του μη γραμμικού θορύβου φάσης η οποία βασίζεται στην χρήση PIA.

Σύμφωνα με τον Matsumoto [119], ένας κορεσμένος μη ευαίσθητος στη φάση παραμετρικός ενισχυτής μονής άντλησης (1P-PIA) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως περιοριστής θορύβου πλάτους. Τοποθετώντας περιοδικά κατά μήκος μιας οπτικής ζεύξης, βαθμίδες τέτοιων ενισχυτών μπορεί να επιτευχθεί αναδιαμόρφωση των παλμών ενός RZ-DPSK σήματος ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται ο συσσωρευμένος θόρυβος πλάτους ο οποίος οδηγεί σε υποβάθμιση του σήματος μέσω του μη γραμμικού θορύβου φάσης που προκύπτει από τη διαδικασία SPM. Με αυτό τον τρόπο ο 1P-PIA παρέχει μία έμμεση αναγέννηση φάσης βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά και το SNR των διαδιδόμενων παλμών του RZ-DPSK σήματος.

Από την άλλη μεριά, ένας ευαίσθητος στη φάση παραμετρικός ενισχυτής, όπως αναφέραμε και στις προηγούμενες παραγράφους, έχει την ικανότητα να επιδρά άμεσα στη φάση του σήματος συμπιέζοντας ισχυρά τον θόρυβο που την επιβαρύνει, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά πλάτους των παλμών του σήματος αν αυτός λειτουργεί στη μη γραμμική περιοχή (κόρος).



Σχήμα 4-33: Διαγράμματα των τριών συστημάτων διάδοσης. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η τυπική οπτική ζεύξη με αντιστάθμιση διασποράς και οπτική ενίσχυση, στο σχήμα (β) απεικονίζεται η υλοποίηση του Matsumoto με επαναλαμβανόμενους 1P-PIA αναγεννητές και στο σχήμα (γ) απεικονίζεται η υλοποίηση με έναν 1P-PSA αναγεννητή τοποθετημένο σε συγκεκριμένη θέση στην οπτική ζεύξη.

Για την άμεση σύγκριση των επιδόσεων των δύο συστημάτων, μοντελοποιήθηκαν οι οπτικές ζεύξεις του παραπάνω σχήματος. Στο σχήμα 4-33α απεικονίζεται μία τυπική

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

οπτική ζεύξη, η οποία αποτελείται από επαναλαμβανόμενα τμήματα αντιστάθμισης διασποράς και οπτικής ενίσχυσης μέσω EDFA ανά 80 km χωρίς ενδιάμεσα στάδια αναγέννησης. Η υποβάθμιση του σήματος που λαμβάνει χώρα κατά τη διάδοση μέσω της συγκεκριμένης ζεύξης χρησιμοποιείται ως αναφορά για τη συγκριτική μελέτη των συστημάτων αναγέννησης. Στο σχήμα 4-33β απεικονίζεται η υλοποίηση των 1P-FOPA αναγεννητών του Matsumoto, οι οποίοι τοποθετούνται ανά 480 km, ενώ στο σχήμα 4-33γ απεικονίζεται η υλοποίηση με βάση τον 1P-PSA. Για τη μελέτη των συστημάτων αυτών χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα διάδοσης σε οπτική ίνα και των laser που αναφέραμε στις προηγούμενες παραγράφους. Η μονότροπη ίνα, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η διάδοση του σήματος, διαθέτει απώλειες 0.2 dB/km, συντελεστή μη γραμμικότητας ίσο με $1.3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ και χρωματική διασπορά ίση με 15.6 ps/nm/km, ενώ η ίνα αντιστάθμισης διασποράς χαρακτηρίζεται από απώλειες 0.67 dB/km, συντελεστή μη γραμμικότητας ίσο με $4 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ και χρωματική διασπορά -130 ps/nm/km. Το σήμα που διαδίδεται είναι 40 Gb/s RZ-DPSK με χρονικό εύρος παλμών (pulsewidth) ίσο με 50% του ρυθμού και ισχύ 1 dBm.

Το κύμα άντλησης του PIA έχει 500 mW ισχύ και το μήκος της μη γραμμικής ίνας είναι 500 m, έτσι ώστε η παρεχόμενη απολαβή από τον ενισχυτή να φθάνει τα 20 dB. Λόγω της επαυξημένης κατά 6 dB απολαβής που παρουσιάζει ο PSA έναντι του PIA, η ισχύς του κύματος άντλησής του επιλέχθηκε στα 400 mW ώστε να παρέχει το ίδιο επίπεδο ισχύος σήματος στην έξοδο του και έτσι να υπάρχει κοινή αναφορά για τη σύγκριση των δύο συστημάτων.

Η προσομοίωση του παραπάνω μοντέλου, λόγω του μεγάλου μήκους διάδοσης και του υψηλού αριθμού bit που απαιτείται, αποδεικνύεται ιδιαίτερος χρονοβόρα, και επομένως ο υπολογισμός του ρυθμού σφαλμάτων (bit error rate, BER) αντικαταστάθηκε από τον υπολογισμό του παράγοντα Q, ο οποίος αποτελεί ένα ισοδύναμο μέγεθος αξιολόγησης της ποιότητας του σήματος και εκφράζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης.

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.38)$$

όπου I_1 και I_0 είναι το ρεύμα στην έξοδο της φωτοδιόδου που αντιστοιχεί στον «1» και στο «0» και σ_1 και σ_0 είναι οι αντίστοιχες τιμές της τυπικής απόκλισης.

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι, η προσομοίωση της οπτικής διάδοσης στην ίνα μοντελοποιήθηκε επιλύοντας την NLSE με τη μέθοδο SSF, ενώ οι EDFA μοντελοποιούνται ως μία βαθμίδα η οποία παρέχει τον κατάλληλο συντελεστή ενίσχυσης και προσθέτει στο σήμα θόρυβο γκαουσιανής κατανομής με φασματική πυκνότητα ισχύος που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση.

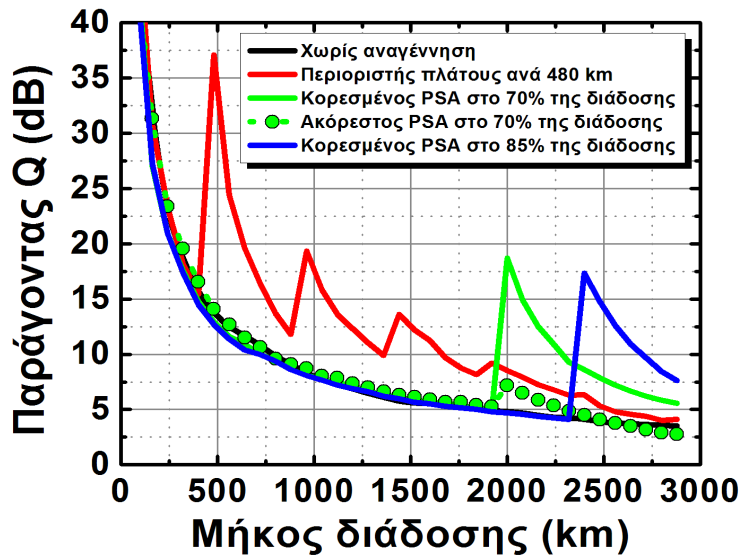
$$S_{ASE} = (G - 1)hfn_{sp} \quad (4.39)$$

όπου G είναι ο συντελεστής ενίσχυσης του οπτικού ενισχυτή, h είναι η σταθερά του Planck (6.626×10^{-34} J·s), f είναι η συχνότητα του σήματος και n_{sp} είναι ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση παίρνει τιμή 1.5.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του σχήματος 4-34, παρατηρούμε ότι οι PIA (περιοριστές θορύβου πλάτους), προσφέρουν σημαντική βελτίωση, η οποία ξεπερνάει την τιμή των 10 dB για αποστάσεις διάδοσης έως και 1000 km. Καθώς όμως το μήκος της οπτικής ζεύξης αυξάνεται η βελτίωση που προσφέρει η συμπίεση θορύβου πλάτους υποβιβάζεται αισθητά περιορίζοντας έτσι τη χρήση των αναγεννητών αυτού του τύπου σε μήκη διάδοσης μέχρι το πολύ 1500 km. Σε παρόμοια και ελαφρώς χειρότερα αποτελέσματα καταλήγει και η χρήση ενός PSA, ο οποίος λειτουργεί στη γραμμική περιοχή λόγω του ότι το σήμα υποβαθμίζεται επιπλέον από τη μετατροπή του θορύβου φάσης σε πλάτος. Αν όμως ο PSA λειτουργήσει στη μη γραμμική περιοχή παρέχοντας

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

ταυτόχρονα συμπίεση πλάτους και φάσης, τότε το σήμα που προκύπτει στην έξοδο του είναι πλήρως αναγεννημένο με βελτίωση του παράγοντα Q της τάξεως των 13 dB.



Σχήμα 4-34: Απεικόνιση του παράγοντα Q για τις τρεις διαφορετικές υλοποιήσεις διάδοσης συναρτήσει του μήκους της οπτικής ζεύξης.

Για μεγάλα μήκη διάδοσης, όπως είναι φανερό από το σχήμα 4-34, η βελτίωση που προσφέρει ο PSA έχει σχεδόν αμελητέα εξάρτηση από το μήκος στο οποίο τοποθετείται αφού αυτή υποβιβάζεται κατά 0.003 dB/km. Το γεγονός αυτό μας παρέχει τη δυνατότητα να τοποθετήσουμε τον PSA όσο πιο κοντά στον δέκτη μπορούμε επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο αξιοσημείωτη βελτίωση του σήματος.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω αποτελέσματα, οι PSA που λειτουργούν στη μη γραμμική περιοχή αποτελούν το ιδανικό σύστημα αναγέννησης αφού προσφέρουν ταυτόχρονη συμπίεση θορύβου πλάτους και φάσης. Επίσης, η εγκατάσταση ενός μόνο PSA τοποθετημένου σε μικρή απόσταση από τον δέκτη προσφέρει 10 dB υψηλότερη βελτίωση σήματος από αυτήν που παρέχει η αναγέννηση με επάλληλα στάδια μη ευαίσθητης στη φάση παραμετρικής ενίσχυσης. Η χρήση λοιπόν των PSA παρέχει μείωση του κόστους εγκατάστασης, χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και μεγαλύτερη βελτίωση σήματος πλεονεκτήματα τα οποία καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική την χρήση των PSA ως αναγεννητές DPSK σημάτων σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων. Ωστόσο, όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο, μέχρι στιγμής δεν έχει προταθεί κάποια υλοποιήσιμη τοπολογία PSA μονής ή διπλής άντλησης, η οποία να παρέχει τη δυνατότητα γένεσης συμφασικού ως προς το σήμα συζυγούς κύματος τοπικά στον ενισχυτή και επίσης να μπορεί να διαχειριστεί περισσότερα του ενός κανάλια. Αυτά είναι δύο βασικά προβλήματα τα οποία δυσχαιρένουν τη χρήση των PSA έναντι των PIA.

4.5 Αμιγώς οπτική αναγέννηση 40 Gb/s RZ-DPSK σήματος βασισμένη σε PSA μονής άντλησης

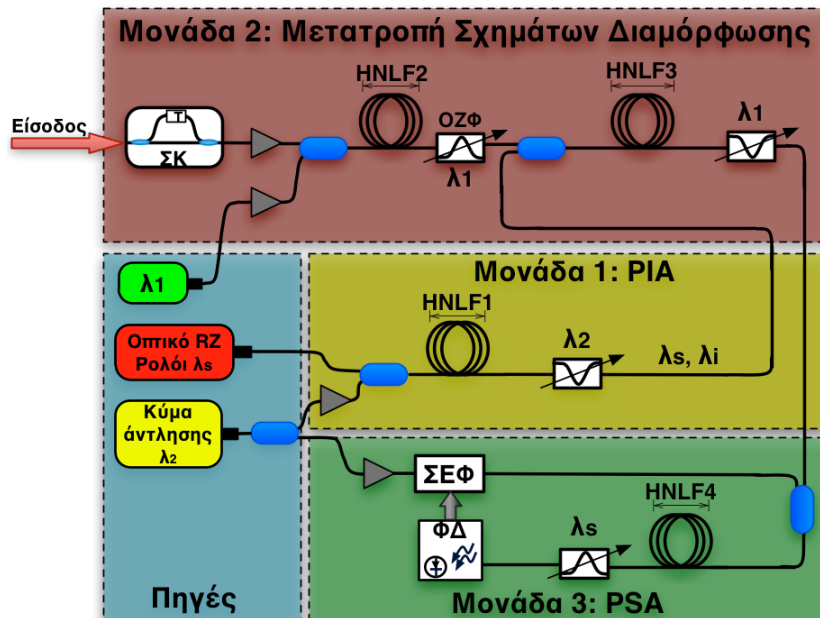
Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε τις επιδόσεις που επιδεικνύει ένας PSA μονής άντλησης ως προς την αναγέννηση RZ-DPSK σημάτων. Ωστόσο, η γένεση του συμφασικού ως προς το σήμα συζυγούς στην πλευρά του αναγεννητή έγινε τεχνηέντως πολλαπλασιάζοντας το λαμβανόμενο σήμα με τον παράγοντα $\exp[j(\omega_s - \omega_p)t - i(\omega_i - \omega_p)t]$. Σε μία πρακτική υλοποίηση αυτό δεν είναι εφικτό και όπως αναφέραμε, η σύμφωνη μεταφορά της φάσης του σήματος στο συζυγές αποτελεί το βασικό πρακτικό μειονέκτημα των PSA.

Σε αυτή την παράγραφο προτείνουμε έναν ολοκληρωμένο μηχανισμό για την παραγωγή ενός συζυγούς κύματος συμφασικού με το σήμα, ο οποίος στηρίζεται στη μη γραμμική διαδικασία XPM. Με αυτόν το τρόπο επιτυγχάνεται αμιγώς οπτική αναγέννηση ενός 40 Gb/s RZ-DPSK σήματος μέσω της ευαίσθητης στη φάση παραμετρικής ενίσχυσης σε τοπολογία μονής άντλησης.

4.5.1 Αρχή λειτουργίας

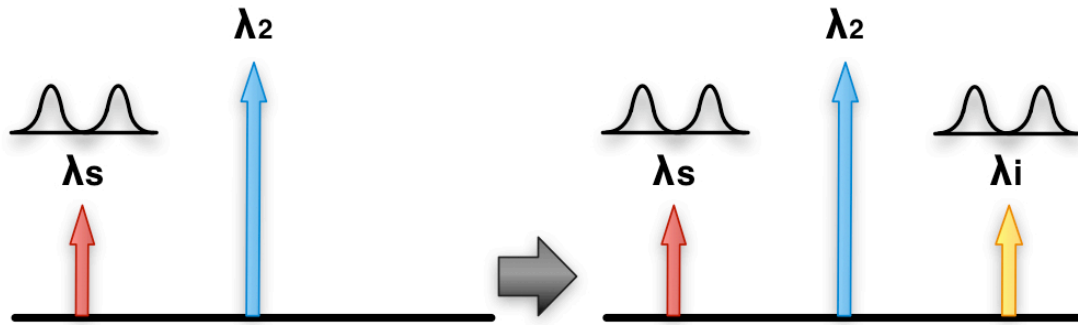
Στο σχήμα 4-35 απεικονίζεται το διάγραμμα του προτεινόμενου αναγεννητή, το οποίο προσομοιώσαμε με τη χρήση των προαναφερθέντων μαθηματικών μοντέλων διάδοσης σε ένα και εξισώσεων ροής για laser.

Σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα, ο αναγεννητής χωρίζεται σε τρεις βασικές λειτουργικές μονάδες. Η πρώτη από αυτές είναι η μονάδα μη ευαίσθητης στη φάση παραμετρικής ενίσχυσης, η οποία αναλαμβάνει την παραγωγή δύο σύμφωνων κυμάτων με κατάλληλη φασματική απόσταση, τα οποία είναι κατά πλάτος διαμορφωμένα με παλμούς τύπου RZ, οι οποίοι φέρουν τον ίδιο χρονισμό με αυτόν του προς αναγέννηση σήματος. Για το σκοπό αυτό το οπτικό σήμα ενός τοπικού laser με μήκος κύματος ίδιο με το λαμβανόμενο, λ_s , αφού διαμορφωθεί κατά πλάτος από μία τοπικά παραγόμενη 40 Gb/s RZ παλμοσειρά, συνδυάζεται με το κύμα άντλησης, λ_2 , και εισάγονται σε μία μη γραμμική ίνα, HNLF1. Το μήκος κύματος του οπτικού ρολογιού επιλέγεται ίδιο με αυτό του λαμβανόμενου σήματος ώστε να μην έχουμε μετατροπή μήκους κύματος στην έξοδο του συστήματος. Για να μη δημιουργηθεί σύγχυση στον αναγνώστη από δω και στο εξής το οπτικό αυτό ρολόι θα ονομάζεται βοηθητικό σήμα. Μέσω της διαδικασίας της παραμετρικής ενίσχυσης, στην έξοδο της ίνας λαμβάνουμε μία νέα RZ παλμοσειρά στο μήκος κύματος λ_i (συζυγές), η οποία είναι πλήρως συγχρονισμένη με αυτήν του βοηθητικού σήματος. Ο μηχανισμός που μόλις περιγράψαμε απεικονίζεται αναλυτικά στο σχήμα 4-36.



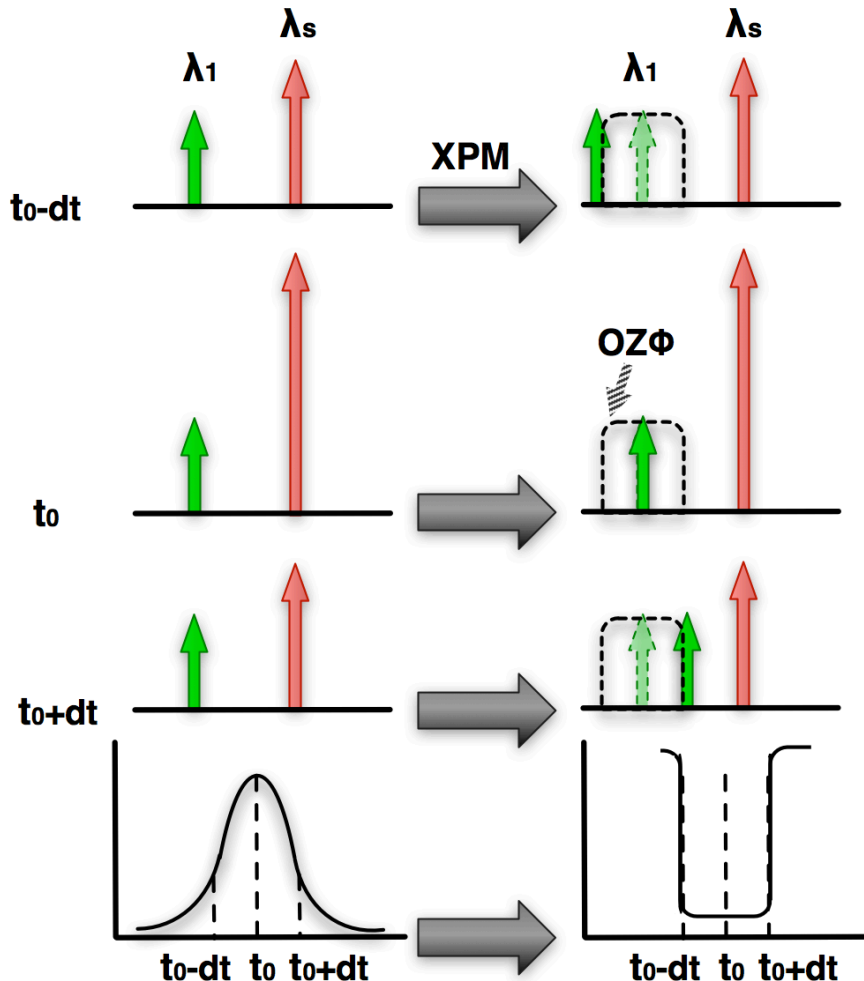
Σχήμα 4-35: Διάγραμμα του προτεινόμενου αναγεννητή RZ-DPSK σημάτων. ΣΚ: συμβολόμετρο καθυστέρησης, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΣΕΦ: στοιχείο ελέγχου φάσης, ΦΔ: φωτοδίοδος, HNLF1: μη γραμμική ίνα για την υλοποίηση του PIA, HNLF2: μη γραμμική ίνα για την μετατροπή του RZ-OOK σε NRZ-OOK, HNLF3: μη γραμμική ίνα για την υλοποίηση του NRZ-OOK σε RZ-DPSK και HNLF4: μη γραμμική ίνα για την υλοποίηση του PSA.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 4-36: Παραγωγή σύμφωνων RZ παλμοσειρών μέσω της μη ευαίσθητης στη φάση παραμετρικής ενίσχυσης.

Η δεύτερη βαθμίδα παίζει ίσως τον πιο σημαντικό ρόλο στην όλη υλοποίηση, καθώς αναλαμβάνει τη σύμφωνη μεταφορά της πληροφορίας φάσης του υποβιβασμένου σήματος στο βοηθητικό σήμα και στο συζυγές του. Για τον σκοπό αυτό αρχικά πραγματοποιείται μετατροπή του υποβιβασμένου σήματος, που φθάνει στον αναγεννητή, από RZ-DPSK σε RZ-OOK με τη βοήθεια ενός συμβολόμετρου καθυστέρησης $1/R_b$ (όπου R_b είναι ο ρυθμός δεδομένων του σήματος).



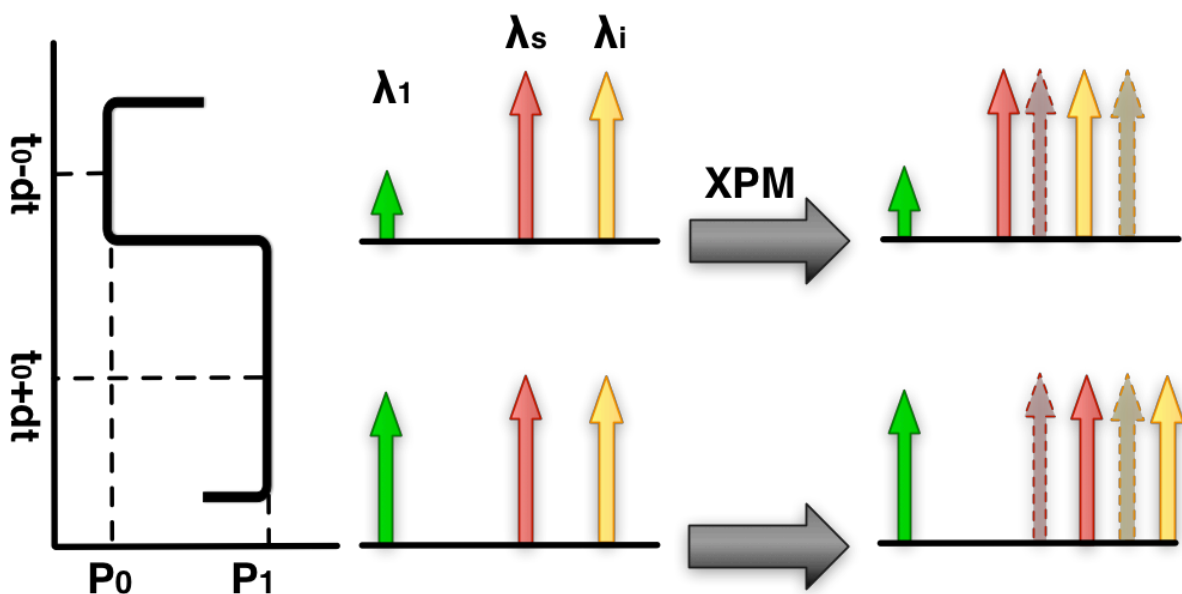
Σχήμα 4-37: Φασματική και χρονική απεικόνιση του μηχανισμού αμιγώς οπτικής μετατροπής του RZ-OOK σήματος σε NRZ-OOK μέσω του στενού φασματικού φίλτραρίσματος των XPM παραγώγων.

Το σήμα που προκύπτει από τη διαδικασία αυτή περιέχει στο πλάτος του όλη την πληροφορία φάσης του αρχικού σήματος καθώς επίσης και την υπέρθεση των

θορύβων φάσης και πλάτους. Το RZ-OOK σήμα στη συνέχεια ενισχύεται και εισάγεται μαζί με ένα συνεχές κύμα, με μήκος κύματος λ_1 , σε μία δεύτερη ίνα υψηλής μη γραμμικότητας στην οποία λαμβάνει χώρα η μη γραμμική διαδικασία της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM) σύμφωνα με την οποία οι μεταβολές πλάτους του ισχυρού κύματος, σε αυτή την περίπτωση του λ_s , μεταφράζονται σε μεταβολές φάσης των κυμάτων που βρίσκονται εντός της φασματικής εμβέλειας του φαινομένου, στην προκειμένη περίπτωση του κύματος λ_1 . Όπως έχει δείχθει από τους Lee et al. [120], αν στην έξοδο της ίνας τοποθετήσουμε ένα φίλτρο με κεντρικό μήκος κύματος το λ_1 και εύρος ζώνης συγκρίσιμο με το εύρος ζώνης της πληροφορίας, τότε οι μεταβολές αυτές οδηγούν σε αρνητικές και θετικές ολισθήσεις του μήκους κύματος λ_1 εκτός του εύρους ζώνης του φίλτρου με αποτέλεσμα το πλάτος του να ακολουθεί την περιβάλλουσα του φίλτρου. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μετατροπή του αρχικού RZ-OOK σήματος σε NRZ-OOK. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται λεπτομερέστερα στο σχήμα 4-38.

Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, το κύμα λ_1 κληρονομεί πλήρως την πληροφορία του RZ-OOK σήματος με ανάστροφο όμως τρόπο. Το αποτέλεσμα αυτό ωστόσο δεν εισάγει σφάλματα κατά τη διαδικασία της αναγέννησης.

Το κύμα λ_1 στη συνέχεια συνδυάζεται με το βοηθητικό σήμα και το συζυγές μέσω ενός οπτικού συζεύκτη και εισάγονται σε μία τρίτη μή γραμμική ίνα όπου πάλι μέσω του φαινομένου XPM πραγματοποιείται η μεταφορά της πληροφορίας πλάτους της NRZ-OOK παλμοσειράς στη φάση των RZ παλμοσειρών των κυμάτων λ_s και λ_i . Η μέγιστη τιμή της ολισθήσης φάσης που προκαλεί το XPM ισούται με το γινόμενο γPL , επομένως η ισχύς του κύματος λ_1 και το μήκος της ίνας πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα ώστε η διαφορά μεταξύ των δύο επιπέδων φάσης που κληρονομούνται στο βοηθητικό σήμα και το συζυγές κύμα να ισούται με π . Έτσι λοιπόν, στην έξοδο της βαθμίδας αυτής λαμβάνουμε δύο πανομοιότυπα RZ-DPSK σήματα στα μήκη κύματος λ_s και λ_i με αυστηρά κλειδωμένες φάσεις και συχνότητες. Ο παραπάνω μηχανισμός απεικονίζεται στο σχήμα 4-38.



Σχήμα 4-38: Απεικόνιση του μηχανισμού αμιγώς οπτικής μετατροπής του NRZ-OOK σήματος σε NRZ-DPSK μέσω της διαδικασίας XPM.

Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι λόγω των επάλληλων σταδίων μετατροπής του σχήματος διαμόρφωσης, πραγματοποιείται υπέρθεση των θορύβων φάσης και πλάτους, με

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

αποτέλεσμα η φάση των κυμάτων που προκύπτουν από την τελευταία αυτή διαδικασία να είναι σημαντικά υποβιβασμένη σε σύγκριση με αυτήν του αρχικού σήματος.

Τα δύο RZ-DPSK σήματα στη συνέχεια, αφού συζευχθούν εκ νέου με το κύμα λ_2 , εισάγονται στην τέταρτη μη γραμμική ίνα η οποία υλοποιεί την ευαίσθητη στην φάση παραμετρική ενίσχυση και οδηγεί στην αναγέννηση των λ_s και λ_i .

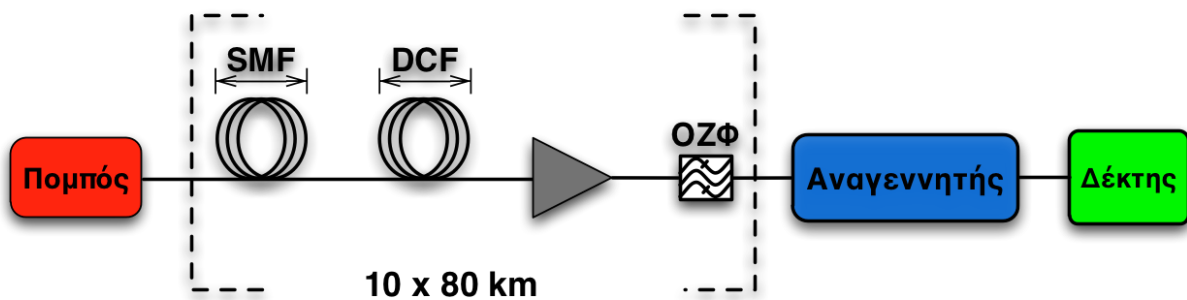
Λόγω της κοινής αλληλεπίδρασης που είχαν στην πρώτη βαθμίδα τα τρία αυτά κύματα έχει διασφαλιστεί η σχέση προσαρμογής φάσης μεταξύ τους.

$$\varphi_s + \varphi_i - 2\varphi_2 = \Delta\varphi = \text{σταθερό} \quad (4.40)$$

Ωστόσο, η διαφορά του μήκους των διαδρομών που ακολουθούν το τρία κύματα ουσιαστικά εισάγει μία επιπλέον ολίσθηση φάσης, η οποία ενδεχομένως να τα αποσυσχετίσει διαταράσσοντας τη συνθήκη μέγιστης ενίσχυσης. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται εισάγοντας ένα στοιχείο αυτόματου ελέγχου της φάσης του κύματος άντλησης λ_2 πριν την εισαγωγή του στην ίνα HNLF4, ώστε να διασφαλίζεται η μέγιστη απολαβή ανά πάσα στιγμή. Σε μία πειραματική υλοποίηση, τον ρόλο του ελεγκτή φάσης θα μπορούσε να παίξει ένας πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής (actuator), ο οποίος μέσω της παρακολούθησης της ισχύος εξόδου του αναγεννητή θα μπορούσε να μεταβάλλει δυναμικά τη σχετική φάση των κυμάτων διαφοροποιώντας το μήκος διάδοσης του λ_2 .

4.5.2 Αριθμητική μελέτη

Στην παρούσα παράγραφο θα προβούμε σε μία πλήρη αξιολόγηση των επιδόσεων του προτεινόμενου αναγεννητή προσομοιώνοντας τη διάδοση ενός 40 Gb/s RZ-DPSK σήματος με χρονικό εύρος παλμών ίσο με 50% του ρυθμού μέσα από μία οπτική ζεύξη μήκους 800 km. Το μοντέλο υλοποιήθηκε σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 4-39 και αποτελείται από 10 επαναλαμβανόμενα τμήματα των 80 km στα οποία πραγματοποιείται διάδοση σε 40 km μονότροπης ίνας, η οποία ακολουθείται από 40 km διάδοσης σε ίνα αντιστάθμισης διασποράς, ενώ στην έξοδο της το σήμα ενισχύεται. Στο τέλος της οπτικής ζεύξης πραγματοποιείται η αναγέννηση του σήματος μέσω του προτεινόμενου αναγεννητή και η ανάκτηση της πληροφορίας φάσης από τον δέκτη.



Σχήμα 4-39: Διάγραμμα του μοντέλου του υπό μελέτη συστήματος διάδοσης.

Το μοντέλο βασίστηκε στα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιήσαμε και περιγράψαμε στις προηγούμενες παραγράφους. Για να προσεγγίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά ενός πραγματικού συστήματος, υλοποιήσαμε όλες τις πηγές laser σύμφωνα με το μοντέλο των εξισώσεων ροής του Petermann [91]. Για την απλοποίηση του μοντέλου, χωρίς αυτό να δημιουργεί πρόβλημα στις επιδόσεις του συστήματος, οι παράμετροι όλων των laser θεωρήθηκαν ίδιες, ενώ οι τιμές τους επιλέχθηκαν με σκοπό να προσδίδουν σε αυτά τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός τυπικού ημιαγωγικού laser. Έτσι λοιπόν, χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα 4-2, τα ημιαγωγικά laser του μοντέλου παρουσιάζουν εύρος γραμμής (linewidth) της τάξεως

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

των 500 kHz και σχετικό θόρυβο έντασης (relative intensity noise, RIN) ίσο με -140 dB/Hz, ενώ η ισχύς εξόδου τους φθάνει τα 6 dBm για ρεύμα πόλωσης ίσο με 60 mA. Τα μήκη κύματος για το κύμα άντλησης (λ_2), το σήμα (λ_s) και το συνεχές κύμα (λ_1) τοποθετήθηκαν στα 1556 nm, 1536nm και 1525 nm αντίστοιχα ώστε με βάση τις παραμέτρους των ινών που θα αναφέρουμε παρακάτω να διασφαλίζονται οι διαδικασίες FWM και XPM που απαιτούνται για τη ορθή λειτουργία του συστήματός μας. Για να ολοκληρώσουμε την περιγραφή των πηγών, αναφέρουμε ότι το βοηθητικό σήμα το οποίο τοποθετείται στο ίδιο μήκος κύματος με το βασικό σήμα, διαμορφώνεται κατά πλάτος από παλμούς γκαουσιανής περιβάλλουσας με ρυθμό επανάληψης (repetition rate) ίσο με 40 GHz και χρονικό εύρος 20 ps (50% του ρυθμού).

Πίνακας 4-2: Παράμετροι για τις πηγές laser

Παράμετροι	Σύμβολο	Τιμή
Παράμετρος ενίσχυσης υλικού	g	$1 \times 10^{-8} \text{ps}^{-1}$
Σταθερά κορεσμού ενίσχυσης	s	5×10^{-7}
Παράγοντας διεύρυνσης εύρους γραμμής	α	5
Ρυθμός αυθόρμητης εκπομπής	β	$0.5 \times 10^{-9} \text{ps}^{-1}$
Χρόνος ζωής φορέων	τ_n	2ns
Αριθμός φορέων στην κατάσταση διαφάνειας	N_0	2.1×10^8
Χρόνος μετ'επιστροφής της κοιλότητας laser	τ_r	7ps
Χρόνος ζωής φωτονίων	τ_p	3.2ps

Η διάδοση του σήματος στην ίνα προσομοιώνεται μέσω της αριθμητικής επίλυσης της μη γραμμικής εξίσωσης Schrödinger χρησιμοποιώντας την αριθμητική μέθοδο SSF. Όπως και στην παράγραφο 4.4.3, για την προσομοίωση της SMF και της DCF στην εξίσωση της NLSE (2.27) συμπεριλάβαμε μόνο τον όρο της διασποράς δεύτερης τάξης, ενώ για τις μη γραμμικές ίνες επεκταθήκαμε μέχρι και τον όρο της τέταρτης τάξης. Οι χαρακτηριστικές παράμετροι των μη γραμμικών ινών, οι οποίες συνοψίζονται στον πίνακα 4-3, επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η επιθυμητή απόδοση των φαινομένων FWM και XPM στα αντίστοιχα στάδια και επομένως να βελτιστοποιούνται οι επιδόσεις του αναγεννητή.

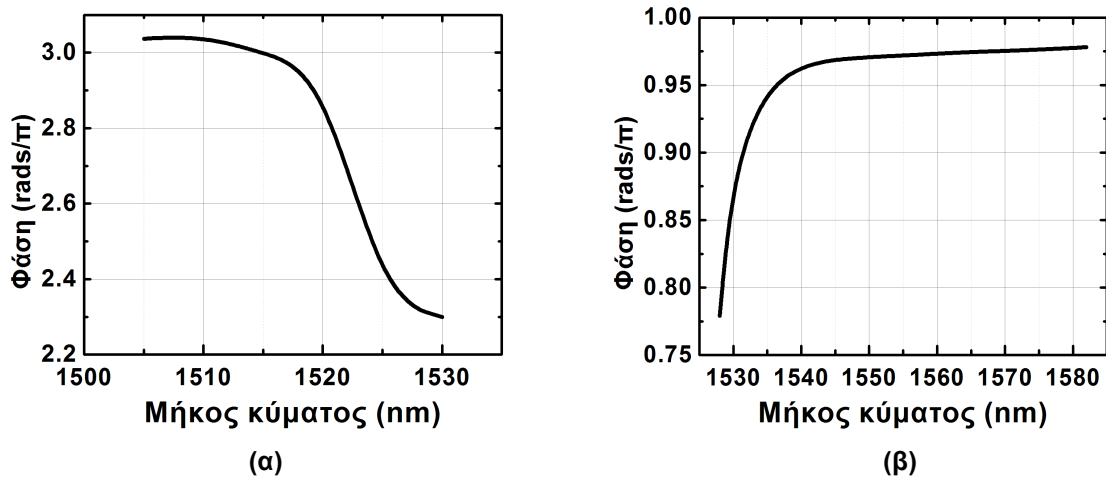
Πίνακας 4-3: Παράμετροι μη γραμμικών ινών

	HNLF1	HNLF2	HNLF3	HNLF4
α (dB/km)	0.7	0.7	0.7	0.7
γ ($\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$)	12	12	12	12
$dD/d\lambda$ ($\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$)	0.03	0.03	0.03	0.03
λ_0 (nm)	1555	1540	1555	1555
L (m)	500	1000	350	500

Το κομμάτι της διάδοσης, όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4-40, αποτελείται από επαναλαμβανόμενα τμήματα SMF μήκους 40 km, DCF μήκους 40 km για την αντιστάθμιση της διασποράς και οπτικής ενίσχυσης μέσω EDFA για την επαναφορά του

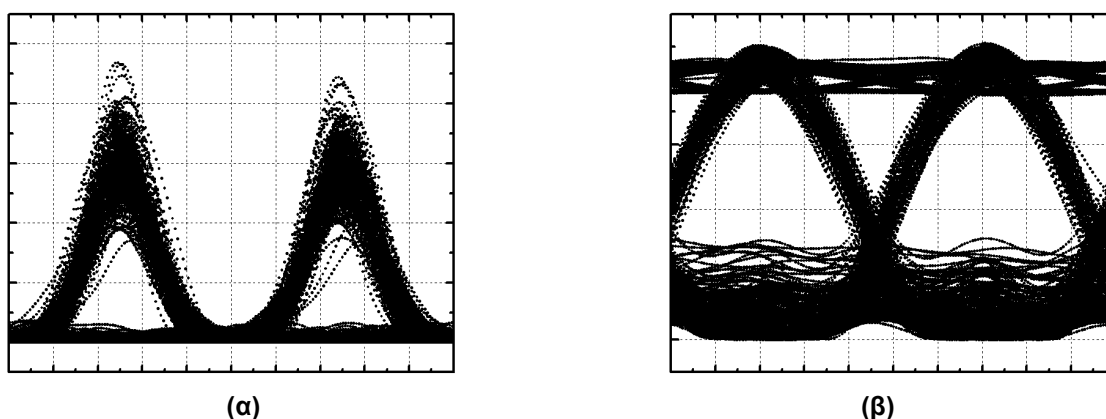
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

σήματος στο αρχικό επίπεδο ισχύος. Η SMF ίνα που χρησιμοποιείται στο μοντέλο μας διαθέτει απώλειες $\alpha_{SMF}=0.22$ dB/km, μη γραμμικό συντελεστή $\gamma_{SMF}=1.3$ W⁻¹km⁻¹ και διασπορά δεύτερης τάξης $\beta_{2,SMF}=-20$ ps²/km, ενώ για την πλήρη αντιστάθμιση της διασποράς χρησιμοποιείται DCF ίνα με $\alpha_{DCF}=0.27$ dB/km, μη γραμμικό συντελεστή $\gamma_{DCF}=4.5$ W⁻¹km⁻¹ και διασπορά δεύτερης τάξης $\beta_{2,DCF}=20$ ps²/km. Ο EDFA, ο οποίος τοποθετείται κάθε 80 km, όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο, εισάγει θόρυβο αυθόρμητης εκπομπής με φασματική πυκνότητα ισχύος που δίνεται από τη σχέση 4.39, ενώ η έξοδος του φιλτράρεται από οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο με εύρος ζώνης 160 GHz ώστε να περιοριστεί κατά το δυνατό η υποβάθμιση του σήματος. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι στα στάδια ενίσχυσης των διαφόρων κυμάτων εντός του αναγεννητή χρησιμοποιείται το ίδιο μοντέλο ενισχυτή και φίλτρου.



Σχήμα 4-40: Χαρακτηριστική μεταφοράς της διαδικασίας XPM που λαμβάνει χώρα στην HNLF2 (α) και στην HNLF3 (β).

Στη πλευρά του πομπού, το σήμα που εξέρχεται από το laser με ισχύ 6 dBm, διαμορφώνεται κατά πλάτος με παλμούς RZ ρυθμού 40 GHz και χρονικού εύρους 20 ps ενώ στη φάση του φορτώνεται πληροφορία DPSK ρυθμού 40 Gb/s. Θεωρώντας αρχικά καθαρό σήμα με ισχύ διάδοσης η οποία ρυθμίζεται στα 0 dBm ($OSNR_{in}=32$ dB), το σήμα που φθάνει στον αναγεννητή μετά από διάδοση 800 km έχει οπτικό SNR ίσο με 20 dB με διάγραμμα οφθαλμού που απεικονίζεται στο σχήμα 4-43α.

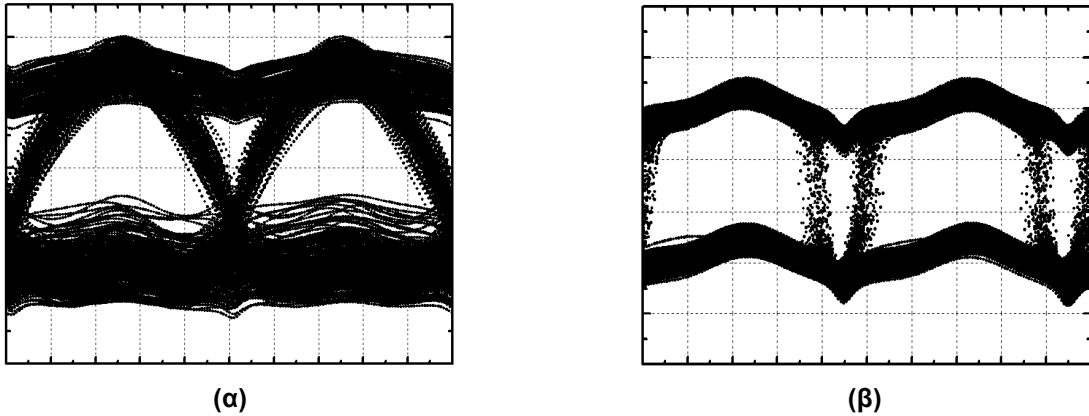


Σχήμα 4-41: Απεικόνιση του μηχανισμού μετατροπής σχημάτων διαμόρφωσης. Στο διάγραμμα οφθαλμού (α) απεικονίζεται το RZ-OOK σήμα μετά το συμβολόμετρο ενώ στο διάγραμμα οφθαλμού (β) απεικονίζεται η μετατροπή του σήματος σε NRZ-OOK μετά την HNLF2.

Το υποβιβασμένο RZ-DPSK σήμα αφού μετατραπεί σε RZ-OOK (σχ.Σχήμα 4-41α) μέσω του συμβολόμετρου καθυστέρησης στην είσοδο του αναγεννητή, στη συνέχεια ενισχύεται μέχρι τα 26.9 dBm και συνδυάζεται με το συνεχές κύμα ($P_{\lambda_1}= 25.72$ dBm), λ_1 ,

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

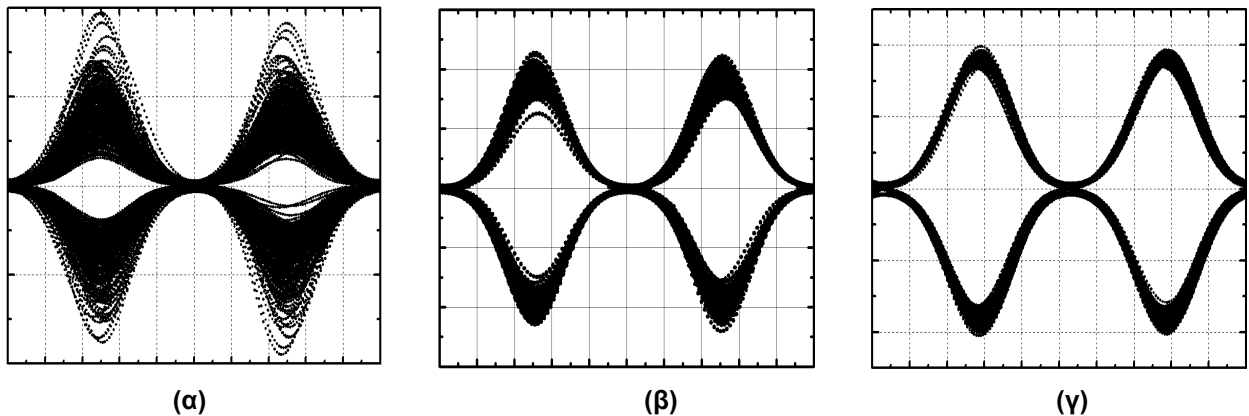
στην HNLF2 όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία XPM με χαρακτηριστική μεταφοράς η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 4-40α.



Σχήμα 4-42: Διάγραμμα οφθαλμού της φάσης του βοηθητικού σήματος πριν (α) και μετά (β) την αναγέννηση.

Στην έξοδο της βαθμίδας αυτής το συνεχές κύμα λ_1 φιλτράρεται από ένα ζωνοπερατό φίλτρο εύρους ζώνης 40 GHz ώστε να μετατραπεί σε NRZ-OOK (σχ. 4-41β).

Στην πρώτη βαθμίδα του αναγεννητή, το βοηθητικό σήμα λ_s με ισχύ -30 dBm, του οποίου το πλάτος διαμορφώνεται από το τοπικά παραγόμενο RZ ρολόι των 40 GHz, αλληλεπιδρά με το κύμα άντλησης λ_2 ($P_2 = 27$ dBm) στο εσωτερικό της ίνας HNLF1 για να παράγει μία συγχρονισμένη RZ παλμοσειρά στο συζυγές μήκος κύματος $\lambda_i = 1576.5$ nm μέσω της διαδικασίας FWM. Με τη χρήση φίλτρου απόρριψης εύρους ζώνης 10 GHz και κεντρικού μήκους κύματος στα 1556 nm ($=\lambda_2$), απομονώνουμε το βοηθητικό σήμα και το συζυγές κύμα τα οποία στη συνέχεια οδηγούμε στη δεύτερη βαθμίδα όπου συνδυάζονται με το NRZ-OOK σήμα και εισάγονται στην τρίτη HNLF ίνα. Η μέση ισχύς του NRZ-OOK σήματος έχει ρυθμιστεί κατάλληλα ($P_{NRZ} = 22.7$ dBm) ώστε σε συνδυασμό με το μήκος της ίνας HNLF3 (350 m) να επιτυγχάνεται μεταφορά της πληροφορίας πλάτους στη φάση και των δύο κυμάτων, λ_s και λ_i , με βάθος διαμόρφωσης ίσο με π . Η χαρακτηριστική μεταφοράς της διαδικασίας XPM που λαμβάνει χώρα στην HNLF3 απεικονίζεται στο σχήμα 4-40β, ενώ η φάση που κληροδοτείται στο βοηθητικό σήμα απεικονίζεται στο σχήμα 4-42α.



Σχήμα 4-43: Διαγράμματα οφθαλμού του 40 Gb/s RZ-DPSK σήματος πριν (α) και μετά την αναγέννηση για λειτουργία του PSA στην γραμμική (β) και στη μη γραμμική περιοχή (γ). Ο υπολογισμός των ματιών πραγματοποιήθηκε για SNR=18 dB.

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι το βοηθητικό σήμα και το συζυγές κύμα μετά τη διαδικασία XPM διαθέτουν ακριβώς τα ίδια φασματικά χαρακτηριστικά με μία μικρή

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

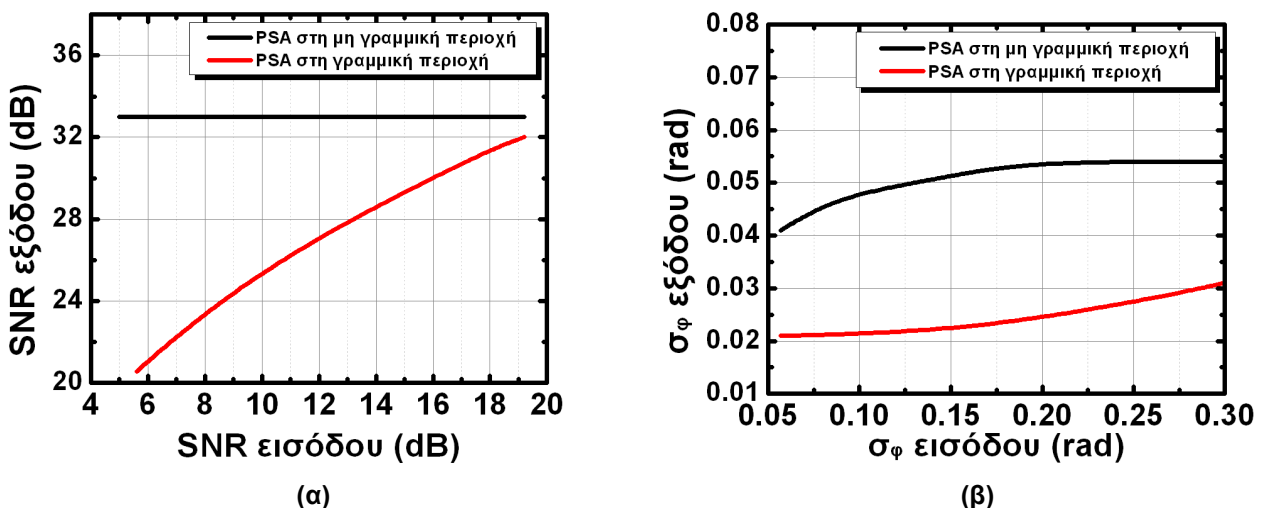
διαφορά λόγω υστέρηση φάσης η οποία εισάγεται λόγω της φασματικής απόστασης μεταξύ των δύο κυμάτων.

Τέλος, με τη χρήση φίλτρου απόρριψης στο μήκος κύματος 1525 nm ($=\lambda_1$) με εύρος ζώνης 10 GHz, απομονώνουμε τα κύματα λ_s και λ_i τα οποία μαζί με το κύμα άντλησης λ_2 εισάγονται στην HNLF4, όπου και πραγματοποιείται η ευαίσθητη στη φάση παραμετρική ενίσχυση η οποία οδηγεί στη συμπίεση του θορύβου φάσης του αρχικού σήματος (σχ. 4-42β).

Η φάση του κύματος άντλησης ελέγχεται ώστε να διασφαλίζεται ανά πάσα στιγμή η προσαρμογή φάσης μεταξύ των τριών κυμάτων και έτσι να επιτυγχάνεται η μέγιστη ενίσχυση. Με ισχύ 27 dBm του κύματος άντλησης, ο συγκεκριμένος PSA είναι σε θέση να προσφέρει ενίσχυση σήματος η οποία φθάνει την τιμή των 24 dB. Η αξιοσημείωτη βελτίωση που προσφέρει ο προτεινόμενος αναγεννητής στο ισχυρά υποβιβασμένο από θόρυβο RZ-DPSK σήμα είναι προφανής στα διαγράμματα οφθαλμού του σχήματος 4-43.

Ανάλογα με την ισχύ του βοηθητικού σήματος, ο PSA της τελευταίας βαθμίδας μπορεί να λειτουργήσει είτε στην γραμμική είτε στη μη γραμμική περιοχή. Για να αξιολογήσουμε λοιπόν πλήρως τις επιδόσεις του προτεινόμενου αναγεννητή, θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά του και στις δύο περιοχές λειτουργίας για διαφορετικά επίπεδα θορύβου του αρχικού σήματος. Σε αυτή την ανάλυση το αρχικό σήμα υποβιβάζεται από επιπρόσθετο γκαουσιανό θόρυβο, ο οποίος εισάγεται σε αυτό πριν την διάδοσή του. Η απόδοση του συστήματος ποσοτικοποιείται μέσω του υπολογισμού του ηλεκτρικού SNR και της τυπικής απόκλισης της φάσης του σήματος στην είσοδο και στην έξοδο του αναγεννητή.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα του σχήματος 4-44, φαίνεται ότι στην περιοχή κόρου ο αναγεννητής προσφέρει καλύτερη βελτίωση του ηλεκτρικού SNR του σήματος, ενώ στην γραμμική περιοχή παρέχει υψηλότερη συμπίεση του θορύβου φάσης. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με τα όσα παρουσιάσαμε στη θεωρητική μελέτη του κεφαλαίου 4.4.1.



Σχήμα 4-44: Απεικόνιση του ηλεκτρικού SNR του σήματος στην έξοδο του αναγεννητή συναρτήσει του SNR στην είσοδο αυτού (α) και της τυπικής απόκλισης της φάσης εξόδου συναρτήσει της φάσης εισόδου (β). Οι μαύρες καμπύλες αντιστοιχούν στην περιοχή γραμμικής λειτουργίας του PSA ενώ οι κόκκινες καμπύλες αντιστοιχούν στην περιοχή του κόρου.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι ο θόρυβος πλάτους του βοηθητικού σήματος και του συζυγούς είναι σχεδόν αμελητέος αφού αυτός καθορίζεται από τους τοπικά παραγόμενους παλμούς RZ, ενώ η φάση των κυμάτων αυτών περιέχει το συνολικό θόρυβο του λαμβανόμενου σήματος λόγω της μετατροπής των σχημάτων

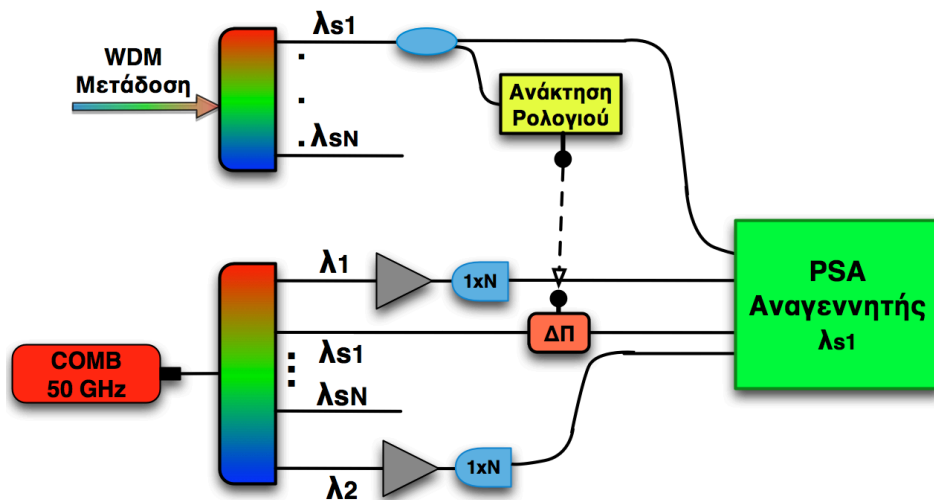
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

διαμόρφωσης. Επομένως, ο μόνος παράγοντας που επιβαρύνει το πλάτος του σήματος στην έξοδο του αναγεννητή είναι η μετατροπή του θορύβου φάσης σε πλάτος κατά την γραμμική λειτουργία του PSA. Στον περιορισμό αυτού του θορύβου οφείλεται η βελτίωση που παρατηρείται κατά τη μη γραμμική λειτουργία του PSA.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο προτεινόμενος αναγεννητής παρουσιάζει αξιοσημείωτες επιδόσεις αφού προσφέρει υψηλό βαθμό συμπίεσης του θορύβου φάσης, ο οποίος φθάνει έως και τα 10 dB, ανακτώντας πλήρως την υποβαθμισμένη πληροφορία του DPSK σήματος ενώ ταυτόχρονα παρέχει πλήρη αναδιαμόρφωση των RZ παλμών βελτιώνοντας το ηλεκτρικό SNR του τελικού σήματος έως και 26 dB.

Εξ' όσων γνωρίζουμε, για πρώτη φορά προτείνεται μία ολοκληρωμένη τοπολογία για την υλοποίηση ενός αναγεννητή RZ-DPSK σημάτων βασισμένου στον PSA μονής άντλησης στην οποία υλοποιείται τοπικά στον αναγεννητή η αμιγώς οπτική γένεση ενός συμφασικού ως προς το λαμβανόμενο σήμα συζυγούς κύματος. Σε αντίθεση με την μονοκάναλη επεξεργασία που προσφέρει η υπάρχουσα πειραματική υλοποίηση που προτάθηκε από τον Kakande et al. [15] και η οποία στηρίζεται στον εκφυλισμένο PSA διπλής άντλησης, ο αναγεννητής που προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή προσφέρει τη δυνατότητα επέκτασης σε WDM συστήματα με μία αύξηση βέβαια της πολυπλοκότητας.

Αν και εκ πρώτης όψεως η υλοποίηση της προτεινόμενης τοπολογίας φαίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκη, ογκώδης, ευαίσθητη σε ολισθήσεις φάσης και ενεργειακά μη αποδοτική, ωστόσο επιδέχεται έναν αριθμό βελτιστοποιήσεων. Έτσι λοιπόν, η μετατροπή του RZ-OOK σήματος σε NRZ-OOK μπορεί να πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό ενός ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (semiconductor optical amplifier, SOA) [121], ενώ η μετατροπή του NRZ-OOK σε RZ-DPSK μπορεί να υλοποιηθεί σε μία τοπολογία SOA Mach-Zehnder [122].



Σχήμα 4-45: Διάγραμμα ενός πιθανού αναγεννητή ικανού να διαχειριστεί ταυτόχρονα όλα τα κανάλια μιας WDM μετάδοσης. COMB : πηγή παραγωγής χτένας συχνοτήτων, ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους.

Οι μικροί μήκους κυματοδηγοί ουσιαστικά θα οδηγήσουν σε ελαχιστοποίηση του όγκου και της ενεργειακής κατανάλωσης ενώ ταυτόχρονα θα μειώσουν τις μεγάλες ολισθήσεις φάσης μεταξύ του σήματος, του συζυγούς και του κύματος άντλησης (λ_2) περιορίζοντας έτσι την χρήση πολύπλοκων συστημάτων κλειδώματος φάσης. Επίσης, η χρήση ινών διαφορετικών παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των επιδόσεων του συστήματος και μείωση της απαιτούμενης ισχύος των επιμέρους κυμάτων. Τέλος, οι τρεις ξεχωριστές ασυσχέτιστες πηγές laser θα μπορούσαν να αντικατασταθούν από μία

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

και μόνο πηγή η οποία μέσω τεχνικών παραγωγής αρμονικών (comb generation) [118] και με κατάλληλο φιλτράρισμα αυτών θα μπορούσε να παράγει τα απαιτούμενα μήκη κύματος τα οποία θα διέθεταν το επιπλέον χαρακτηριστικό της αμοιβαίας συμφωνίας φάσης. Μία πιθανή υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στο παραπάνω διάγραμμα.

4.6 Συμπεράσματα

Η θεωρητική και αριθμητική διερεύνηση που παρουσιάσαμε στο παρόν κεφάλαιο επέδειξε τα πραγματικά εντυπωσιακά χαρακτηριστικά που διαθέτουν οι PSA και την υπεροχή τους έναντι των PIA ως προς τον περιορισμό του μη γραμμικού θορύβου φάσης. Οι συγκεκριμένοι ενισχυτές λοιπόν, παρουσιάζουν ιδιαίτερος ευρύ φάσμα λειτουργίας που μπορεί να καλύψει έως και τα 50 nm, υψηλό συντελεστή απολαβής, με τιμές που μπορούν να φτάσουν ακόμα και τα 90 dB, χαμηλή εικόνα θορύβου, η οποία κυμαίνεται κάτω από το κβαντικό όριο των 3 dB και απόκριση φάσης, η οποία παρέχει άμεση συμπίεση του θορύβου φάσης λόγω του βηματικού προφίλ που διαθέτει. Όλα τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά προβάλλουν τις σημαντικές επιδόσεις των PSA ως προς την αμιγώς οπτική αναγέννηση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση και τους καθιστούν εξαιρετικούς υποψηφίους για την αναβάθμιση των δικτύων επόμενης γενιάς και την είσοδο στην εποχή των 100 G και 400 G συστημάτων. Ωστόσο περιορισμοί ως προς την πρακτική υλοποίηση των οπτικών αυτών διατάξεων εμποδίζουν την άμεση εμπορική εκμετάλλευσή τους.

Στο κεφάλαιο αυτό προτείναμε και μελετήσαμε ως προς τις επιδόσεις της μία νέα αρχιτεκτονική αμιγώς οπτικής αναγέννησης RZ-DPSK σημάτων, η οποία στηρίζεται στην τοπολογία PSA μονής άντλησης και προσφέρει μία αρκετά ρεαλιστική λύση στο πρόβλημα της γένεσης συμφασικού συζυγούς. Αν και η υλοποίηση της συγκεκριμένης τοπολογίας διαθέτει κάποιες πρακτικές δυσκολίες, οι οποίες βέβαια μπορούν να αντιμετωπιστούν με την περαιτέρω τροποποίηση της διάταξης, ωστόσο αποτελεί μία ενδιαφέρουσα λύση για την αξιοποίηση της τοπολογίας μονής άντλησης στα WDM συστήματα οπτικής μετάδοσης.

5. Εγκλειδωση φάσης με έγχυση οπτικής ισχύος

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε διεξοδικά την ιδιότητα της συμπίεσης θορύβου πλάτους καθώς επίσης και τη δυνατότητα αναπαραγωγής των χαρακτηριστικών φάσης που προσφέρει η μέθοδος της εγκλειδωσης φάσης στα ημιαγωγικά laser. Από τη μελέτη αυτή εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις των εγκλειδωμένων laser και προτείνεται η αξιοποίησή τους για την αναγέννηση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση. Το προτεινόμενο σύστημα παρουσιάζει αξιοσημείωτες επιδόσεις, συμβάλλοντας σημαντικά στην αμιγώς οπτική αναγέννηση όσο και στη βελτίωση των ήδη υπάρχοντων σύμφωνων και μη δεκτών που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 3.

5.1 Ιστορική αναδρομή

Η εγκλειδωση φάσης με έγχυση (injection locking) αναφέρεται στη συχνοτική επίδραση η οποία συμβαίνει σε έναν αρμονικό ταλαντωτή όταν αυτός διαταράσσεται από έναν δεύτερο ταλαντωτή ο οποίος ταλαντώνεται σε συχνότητα γειτονική της ιδιοσυχνότητας του πρώτου. Όταν η σύζευξη είναι αρκετά ισχυρή και οι συχνότητες επαρκώς κοντινές, ο δεύτερος ταλαντωτής μπορεί να δεσμεύσει τον πρώτο αναγκάζοντάς τον να ταλαντωθεί στη συχνότητά του. Η εγκλειδωση φάσης με έγχυση παρατηρείται σε αρκετά φυσικά συστήματα αν και έχει κυρίως συνδυαστεί με τους ταλαντωτές (μηχανικούς, ηλεκτρικούς) και τις συντονιζόμενες κοιλότητες laser.

Ο Christiaan Huygens (1629-1695) [123] ήταν ο πρώτος που κατέγραψε το φαινόμενο της εγκλειδωσης φάσης παρατηρώντας ότι δύο εκκρεμή με διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης τα οποία στηρίζονται στον ίδιο ξύλινο τοίχο αποκτούν τελικά την ίδια συχνότητα. Όπως ο ίδιος εξήγησαι, πρόκειται για μία συζευγμένη ταλάντωση η οποία προκύπτει από την ανταλλαγή διαταραχών μεταξύ των ταλαντωτών μέσω του τοίχου και η οποία οδηγεί σταδιακά στην μηχανική εγκλειδωση φάσης των δύο ταλαντώσεων. Οι πρώτες δημοσιευμένες εργασίες πάνω στο θέμα των συζευγμένων ταλαντωτών πραγματοποιήθηκαν γύρω στο 1920 και αναφέρονταν σε ηλεκτρικά συστήματα και κυρίως στον χαρακτηρισμό του συγχρονισμού των κυκλωμάτων με λυχνίες κενού, τα οποία χρησιμοποιούνταν ως FM αποδιαμορφωτές στην αρχή των ραδιοεπικοινωνιών [124], [125]. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, το 1946, ο Adler κατάφερε να συνθέσει μία διαφορική εξίσωση η οποία περιέγραφε τη θεμελιώδη δυναμική συμπεριφορά της ηλεκτρικής εγκλειδωσης [126].

Με την επίδειξη του πρώτου laser το 1965 [127], το φαινόμενο της εγκλειδωσης φάσης εισήλθε, όπως ήταν αναμενόμενο, στον χώρο των οπτικών συχνοτήτων. Τα πρώτα πειράματα εγκλειδωσης με έγχυση οπτικής ισχύος πραγματοποιήθηκαν το 1966 χρησιμοποιώντας δύο laser αερίου HeNe, καθώς όμως προχωρούσε η ανάπτυξη νέων ενεργών υλικών για τα laser, ακολουθούσαν και τα αντίστοιχα πειράματα εγκλειδωσης στα νέα αυτά υλικά. Έτσι, το 1972 πραγματοποιήθηκε η εγκλειδωση laser CO₂ [128] και βέβαια το πιο σημαντικό η εγκλειδωση ημιαγωγικών laser στις αρχές του 1980 [129].

Οι τεχνικές εγκλειδωσης φάσης που εφαρμόστηκαν στις οπτικές κοιλότητες laser ήταν παρόμοιες με αυτές των ηλεκτρονικών ταλαντωτών, ενώ η εξίσωση του Adler τροποποιήθηκε και επεκτάθηκε από διάφορους ερευνητές ώστε να μπορεί να περιγράψει το μηχανισμό της εγκλειδωσης στα laser. Το 1982 ο Lang δημοσίευσε τις πιο ευρέως αποδεκτές εξισώσεις ροής (rate equations), οι οποίες περιέγραφαν πλήρως το μηχανισμό της εγκλειδωσης φάσης με έγχυση οπτικής ισχύος σε μία κοιλότητα laser αφού λάμβαναν υπ' όψιν τους και την παράμετρο διεύρυνσης του εύρους γραμμής (linewidth) [130]. Επί προσθέτως, η έλευση των ημιαγωγικών laser σε συνδυασμό με τις χαμηλών απωλειών οπτικές ίνες, οι οποίες αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1970,

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών σύμφωνης οπτικής λήψης και η εγκλειδωση φάσης με έγχυση οπτικής ισχύος απέτέλεσε μία σημαντική μέθοδο κλειδώματος του τοπικού ταλαντωτή στα συστήματα αυτά [131].

Τη δεκαετία του 1980, η μελέτη του μηχανισμού εγκλειδωσης φάσης οδήγησε σε νέα φαινόμενα και ιδιότητες, τα οποία βρήκαν άμεση αξιοποίηση σε μία σειρά εφαρμογών. Το 1982 οι Kobayashi και Kimura κατάφεραν να διαμορφώσουν τη φάση ενός εγκλειδωμένου laser διαμορφώνοντας άμεσα το ρεύμα τροφοδοσίας του [132], ενώ λίγο αργότερα επέδειξαν μία τεχνική διαμόρφωσης συχνότητας με συμπιεσμένη διαμόρφωση πλάτους [133], την οποία αξιοποίησε ο Kasari ως μία τεχνική FM φασματοσκοπίας κάτω του ορίου θορύβου βολής (sub-shot-noise) [134]. Επίσης, η πρωτοποριακή δουλειά πάνω στα υβριδικά οπτικο-ηλεκτρονικά εγκλειδωμένα υποσυστήματα [135]-[137] οδήγησε στο αποτελεσματικό κλείδωμα φάσης και στη διαμόρφωση φάσης των φασικά παρατεταγμένων κεραιών (phased array antennas) [138]. Τέλος, ο Goldberg ανέπτυξε μία αποδοτική τεχνική οπτικής παραγωγής μικροκυματικού σήματος χρησιμοποιώντας εγκλειδωση των διαμήκων τρόπων ενός laser στις πλευρικές συνιστώσες ενός FM διαμορφωμένου σήματος [139].

Όπως αναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο, με την έλευση των οπτικών ενισχυτών με ίνα ερβίου στις αρχές της δεκαετίας του 1990, έγινε εφικτή η διάδοση σημάτων διαμορφωμένων κατά πλάτος σε οπτικές ζεύξεις πολύ μεγάλων αποστάσεων χρησιμοποιώντας δέκτες άμεσης φώρασης. Αυτό οδήγησε σε μία προσωρινή έκλειψη ενδιαφέροντος ως προς τις σύμφωνες οπτικές επικοινωνίες λόγω πολυπλοκότητας και κόστους. Παρόλα αυτά η εγκλειδωση φάσης σαν μέθοδος συνέχισε να χρησιμοποιείται μιας και προσέφερε ένα μεγάλο αριθμό βελτιώσεων στις ψηφιακές και στις αναλογικές επικοινωνίες. Οι βελτιώσεις αυτές είχαν να κάνουν με τη μείωση της διασποράς λόγω chirp στα άμεσα διαμορφωμένα laser [140], τη μείωση της μη γραμμικής παραμόρφωσης [141]-[143], τη μείωση του σχετικού θορύβου έντασης (relative intensity noise, RIN) [144], [145] και του εύρους γραμμής [146], [147], καθώς επίσης και την αύξηση της συχνότητας των ταλαντώσεων αποκατάστασης (relaxation oscillation frequency) η οποία οδηγεί στην διεύρυνση του εύρους άμεσης διαμόρφωσης των laser [148], [149]. Το γεγονός ότι ο μηχανισμός εγκλειδωσης φάσης προκαλούσε όλες τις παραπάνω βελτιώσεις στα ημιαγωγικά laser, αυτομάτως κατέστησε πολύ σημαντική την αξιοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου και ώθησε το γινόμενο ρυθμού-απόστασης πέρα των μέχρι τότε περιορισμένων ορίων για τις μεγάλων αποστάσεων οπτικές επικοινωνίες.

Τα τελευταία 10 χρόνια, η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων λόγω της μεγάλης διείσδυσης του διαδικτύου παγκοσμίως αλλά και των πάμπολλων δικτυακών εφαρμογών οδήγησε στην ανάγκη αποδοτικής διαχείρισης φάσματος (bandwidth efficiency). Πλέον η τεχνική διαμόρφωσης πλάτους με άμεση φώραση, όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 3, αρχίζει να περιορίζει το μέγιστο δυνατό ρυθμό δεδομένων, αναζωπυρώνοντας έτσι το ενδιαφέρον για τα συστήματα σύμφωνης λήψης και όλων των τεχνικών διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης που αυτά συνεπάγονται. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιαστεί μία ενδεδειγμένη αριθμητική και πειραματική μελέτη των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων των εγκλειδωμένων ημιαγωγικών laser ως προς τη δυνατότητα αμιγώς οπτικής αναγέννησης σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση.

5.2 Εγκλειδωση φάσης σε ημιαγωγικά laser

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει μία σύντομη περιγραφή της αρχής λειτουργίας ενός ημιαγωγικού laser ώστε ο αναγνώστης να κατανοήσει τους φυσικούς μηχανισμούς που διέπουν την παραγωγή φωτός εντός μιας οπτικής κοιλότητας και με ποιό τρόπο αυτοί οδηγούν στην εγκλειδωση φάσης κατά την έγχυση εξωτερικής οπτικής ισχύος.

5.2.1 Αρχή λειτουργίας του ημιαγωγικού laser

Το laser (Ligh Amplification by Stimulated Emission of Radiation) απετέλεσε μία από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις του προηγούμενου αιώνα και έδωσε μεγάλη ώθηση τόσο στις τηλεπικοινωνίες όσο και σε πολλές άλλες εφαρμογές της καθημερινότητάς μας όπως είναι τα οπτικά μέσα αποθήκευσης (CD, DVD), οι εκτυπωτές και πολλά άλλα. Η αρχική ιδέα πάνω στην οποία στηρίχτηκε η υλοποίηση των δομών αυτών ήταν το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής (stimulated emission) το οποίο ανακαλύφθηκε και μελετήθηκε θεωρητικά από τον A. Einstein το 1916 στα πλαίσια της κβαντομηχανικής θεωρίας [150].

Εξαναγκασμένη εκπομπή είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα ατομικό ηλεκτρόνιο, το οποίο βρίσκεται σε κάποια διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση και αλληλεπιδρά με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κάποιας συχνότητας μπορεί να μεταπέσει σε κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας εκπέμποντας ακτινοβολία ίδιας φάσης, συχνότητας, πόλωσης και διεύθυνσης με την προσπίπτουσα ακτινοβολία (σχ. 5-1γ). Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από τη διαδικασία αυτή ονομάζεται σύμφωνη.

Ο αντίστροφος μηχανισμός ονομάζεται ατομική απορρόφηση και αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο ηλεκτρόνια χαμηλής ενεργειακής κατάστασης απορροφούν την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεταβαίνοντας σε κατάσταση υψηλότερης ενέργειας (σχ. 5-1α). Τα ηλεκτρόνια αυτά μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (χρόνος ζωής της ενεργειακής κατάστασης) μπορούν να μεταπέσουν στην αρχική ή σε κάποια ενδιάμεση ενεργειακή κατάσταση εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας που αντιστοιχεί στην ενεργειακή αυτή μετάβαση. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή και η ακτινοβολία που παράγεται είναι ασύμφωνη, σε αντίθεση με αυτήν της εξαναγκασμένης εκπομπής (σχ. 5-1β).

Υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας, ο αριθμός των ηλεκτρονίων σε χαμηλές ενεργειακές καταστάσεις, N_1 , είναι μεγαλύτερος αυτού των υψηλότερων ενεργειών, N_2 , με αποτέλεσμα να κυριαρχεί ο μηχανισμός της απορρόφησης, ενώ ο ρυθμός αυθόρμητης εκπομπής είναι αρκετά μικρός. Ωστόσο, όταν επιτευχθεί η αναστροφή πληθυσμού ($N_2 > N_1$), ο ρυθμός αύξησης των παραγόμενων από αυθόρμητη εκπομπή φωτονίων γίνεται μεγαλύτερος αυτού των απορροφούμενων κάνοντας έτσι το υλικό να ακτινοβολεί σε ένα διευρυμένο φάσμα συχνοτήτων. Αυτή είναι η βασική διαδικασία παραγωγής φωτός στις διόδους LED (Light Emitting Diode) και στους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Αν τα διεγερμένα άτομα τοποθετηθούν εντός μίας κοιλότητας συντονισμού, η οποία εμποδίζει ένας μέρος της ακτινοβολίας που παράγεται από αυθόρμητη εκπομπή να διαφύγει ενώ ταυτόχρονα επιλέγει και συντηρεί συγκεκριμένες συχνότητες (ιδιοσυχνότητες της κοιλότητας) τότε ο ρυθμός παραγωγής φωτονίων από εξαναγκασμένη εκπομπή αυξάνεται δραματικά και το φώς εντός της κοιλότητας ενισχύεται. Αυτός ο μηχανισμός παραγωγής φωτός λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό μιας δίοδου laser.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 5-1: Απεικόνιση της ατομικής απορρόφησης (α), της αυθόρμητης εκπομπής (β) και της εξαναγκασμένης εκπομπής (γ).

Το 1960 έγινε η πρώτη πειραματική επίδειξη ενός laser αερίου HeNe και έκτοτε ακολούθησε μία σειρά υλοποιήσεων με διαφορετικά ενεργά υλικά, όπως χημικά laser [151], laser στερεάς κατάστασης [152], οργανικά laser [153], laser οπτικών ινών [154] και βέβαια τα σημαντικότερα ημιαγωγικά laser.

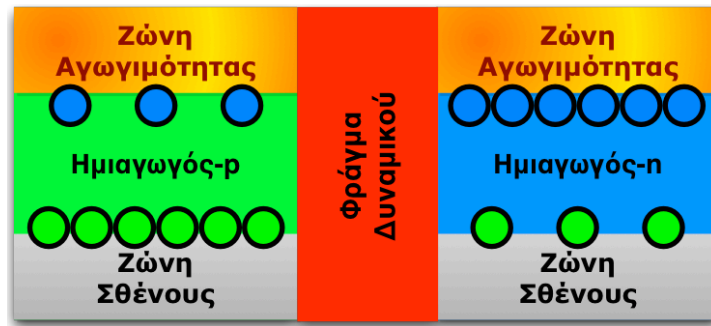
Από την εφεύρεσή τους το 1980 και μετά, τα ημιαγωγικά laser έφεραν επανάσταση στον χώρο των τηλεπικοινωνιών αλλά και λοιπών εφαρμογών μιας και συνδυάζαν το μικρό μέγεθος, τη μικρή κατανάλωση, το μεγάλο φασματικό εύρος εκπομπής ανάλογα με το υλικό (375 nm έως 3500 nm), τη δυνατότητα ρυθμιζόμενης επιλογής συχνότητας (tunability), το μικρό εύρος γραμμής, την καλή ποιότητα οπτικής δέσμης (beam quality) και τη σχετικά μεγάλη για τις διαστάσεις τους απόδοση ισχύος. Μεγάλο ενδιαφέρον από την ερευνητική κοινότητα συσσωρεύτηκε γύρω από τις συγκεκριμένες συσκευές, νέα φαινόμενα ανακαλύφθηκαν, νέες τεχνικές εφαρμόστηκαν, νέες δομές προτάθηκαν, οδηγώντας σε βελτίωση των χαρακτηριστικών τους αλλά και σε βελτίωση ολόκληρου του οικοδομήματος που ονομάζεται οπτικές επικοινωνίες.

Ένα ημιαγωγικό laser αποτελείται από τα ακόλουθα τρία επιμέρους λειτουργικά τμήματα:

Ενεργό υλικό: Το ενεργό υλικό είναι η καρδιά του laser αφού αποτελεί το μέσο το οποίο προσφέρει τις ακτινοβόλες μεταβάσεις και την ενίσχυση του φωτός μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής.

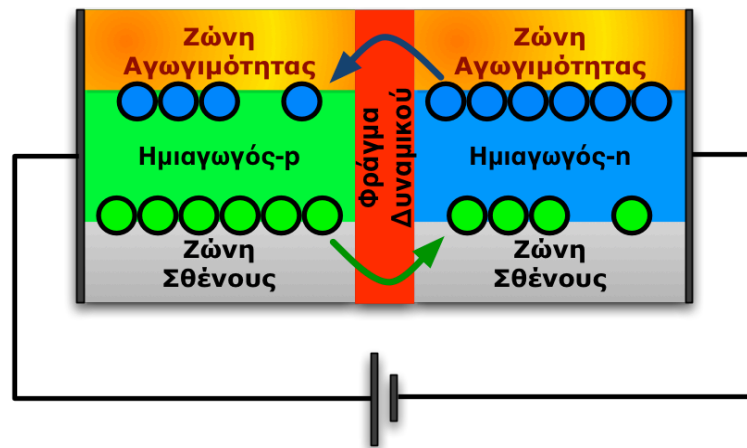
Στα ημιαγωγικά laser το υλικό αυτό είναι ένα κράμα ημιαγωγών, οι οποίοι ανήκουν στις στήλες III-V του περιοδικού πίνακα (σπάνιες γαίες), η αναλογία των οποίων επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγει το επιθυμητό φάσμα μηκών κύματος ακτινοβολίας.

Σε αντίθεση με τα αέρια όπου οι ενεργειακές καταστάσεις είναι διακεκριμένες, στους ημιαγωγούς οι ενεργειακές καταστάσεις εκφυλίζονται δημιουργώντας δύο διευρυμένες ενεργειακές ζώνες, τη ζώνη αγωγιμότητας (υψηλότερης ενέργειας) και τη ζώνη σθένους (χαμηλότερης ενέργειας), οι οποίες χωρίζονται μεταξύ τους από ένα ενεργειακό χάσμα, E_g . Δύο τύποι ημιαγωγού, ο ένας με περίσσεια ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας (φορείς τύπου n) και ο άλλος με περίσσεια οπών στη ζώνη σθένους (φορείς τύπου p) ενώνονται δημιουργώντας μία επαφή p-n. Όταν οι φορείς πλειονότητας της περιοχής τύπου-n (φορείς τύπου n) ξεπεράσουν το φράγμα δυναμικού που δημιουργεί η επαφή p-n, διαχέονται ως φορείς μειονότητας στην περιοχή τύπου-p, όπου πραγματοποιείται αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας ($hf=E_g$) λόγω των τυχαίων επανασυνδέσεων ηλεκτρονίων-οπών που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή αυτή. Ακριβώς η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται για τους φορείς τύπου-p. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και χωρίς κάποιο μηχανισμό εξαναγκασμού, οι φορείς μειονότητας στην κάθε περιοχή παραμένουν λιγότεροι σε αριθμό συγκριτικά με τους φορείς πλειονότητας της περιοχής ($N < N_{th}$), και επομένως τα περιορισμένα σε αριθμό φωτόνια που προκύπτουν από αυθόρμητη εκπομπή απορροφούνται άμεσα από το υλικό.



Σχήμα 5-2: Απεικόνιση του ενεργού υλικού και των φορέων μιας ημιαγωγική διάταξης laser.

Τροφοδοσία ρεύματος: Αν στα άκρα της ημιαγωγικής επαφής που περιγράψαμε παραπάνω εφαρμόσουμε μία τάση κατάλληλης τιμής και πολικότητας (τάση ορθής πόλωσης) τότε μπορούμε να δώσουμε στους φορείς πλειονότητας της κάθε περιοχής την κατάλληλη ενέργεια ώστε να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικού που θέτει η επαφή p-n και επομένως να αυξήσουμε τον ρυθμό αυθόρμητων επανασυνδέσεων. Όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα που επιτρέπεται να διαρρέει το εξωτερικό κύκλωμα τροφοδοσίας (πηγή ρεύματος) της ημιαγωγικής διάταξης τόσο περισσότερο αυξάνεται ο ρυθμός διάχυσης των φορέων και επομένως των επανασυνδέσεων με αποτέλεσμα ο μηχανισμός αυθόρμητης εκπομπής να κυριαρχεί αυτού της απορρόφησης.



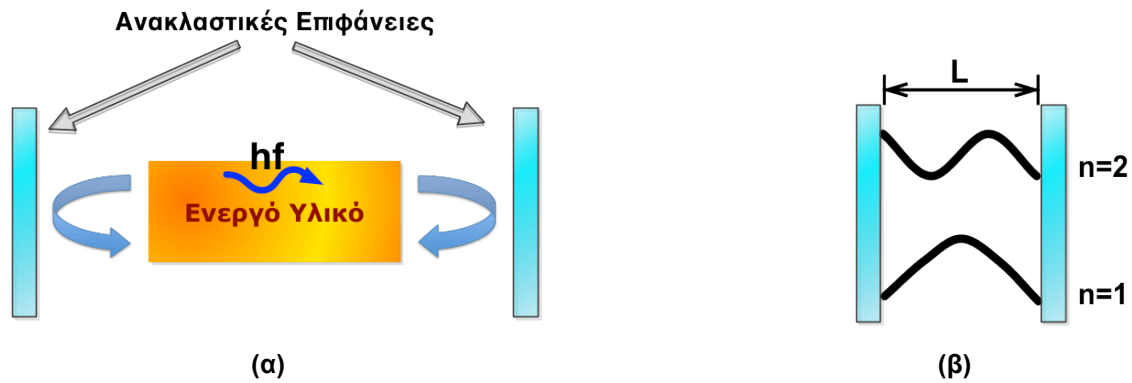
Σχήμα 5-3: Απεικόνιση του μηχανισμού διάχυσης φορέων κατά την τροφοδοσία ενός laser.

Κοιλότητα συντονισμού: Όταν το ενεργό υλικό τοποθετηθεί εντός μίας οπτικής κοιλότητας η οποία έχει την ικανότητα να ανακλά την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τις αυθόρμητες επανασυνδέσεις, τότε η ακτινοβολία εγκλωβίζεται εντός της κοιλότητας, οι μεταβάσεις από εξαναγκασμένη εκπομπή πληθαίνουν και η ισχύς της ακτινοβολίας εντός της κοιλότητας αυξάνεται. Παράλληλα το μήκος της κοιλότητας καθορίζει ποιές από τις ακτινοβολούμενες συχνότητες θα δημιουργήσουν στάσιμα κύματα τα οποία προστίθενται ενισχυτικά κατά φάση και εξαναγκάζουν το υλικό να εκπέμπει σε αυτά τα μήκη κύματος. Τελικά, το διευρυμένο φάσμα αυθόρμητης εκπομπής μετατρέπεται σε ένα καλά καθορισμένο φάσμα εξαναγκασμένης εκπομπής το οποίο αποτελείται μόνο από τις συχνότητες που επιβάλλει η κοιλότητα. Τα επιτρεπτά μήκη κύματος, λ_n , είναι ακέραια πολλαπλάσια του διπλάσιου μήκους της κοιλότητας, L (εξ. 5.1).

$$\lambda_n = 2nL \quad (5.1)$$

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται ο μηχανισμός εξαναγκασμένης εκπομπής που επικρατεί στο εσωτερικό μιας κοιλότητας laser.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 5-4: Απεικόνιση του μηχανισμού εξαναγκασμένης εκπομπής στο εσωτερικό της οπτικής κοιλότητας (α). Απεικόνιση των μηκών κύματος συντονισμού της οπτικής κοιλότητας (β).

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι η κοιλότητα που μόλις περιγράψαμε αποτελεί την τυπική κοιλότητα laser Fabry-Pérot, η έξοδος της οποίας είναι είναι μία χτένα ισαπέχοντων οπτικών συχνοτήτων η περιβάλλουσα των οποίων καθορίζεται από το φασματικό προφίλ της οπτικής ενίσχυσης του υλικού. Τα φασματικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου laser δεν είναι κατάλληλα για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές υψηλών επιδόσεων. Για το λόγο αυτό, ένας αριθμός τεχνικών αναπτύχθηκαν ώστε οι κοιλότητες laser να μπορούν να παράγουν μονοχρωματικό φως. Τέτοια laser είναι τα καταμεμημένης ανατροφοδότησης (Distributed Feedback, DFB), καταμεμημένου ανακλαστήρα Bragg (Distributed Bragg Grating, DBR) και τα laser εξωτερικής κοιλότητας (external cavity) για τα οποία όμως δεν θα επεκταθούμε σε λεπτομέρειες αφού ξεφεύγουν από το αντικείμενο της διατριβής αυτής.

5.2.2 Εξισώσεις ροής

Με την κατασκευή του πρώτου ημιαγωγικού laser γεννήθηκε και η ανάγκη της μοντελοποίησης του φυσικού του μηχανισμού ώστε να μελετηθούν θεωρητικά και να προσομοιωθούν τόσο η δυναμική συμπεριφορά του όσο και ένας μεγάλος αριθμός φαινομένων. Η μαθηματική περιγραφή η οποία χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής για την μοντελοποίηση των πηγών laser είναι αυτή του Petermann η οποία αποτελείται από τις παρακάτω δύο συζευγμένες εξισώσεις, τις επονομαζόμενες εξισώσεις ροής (εξ. 5.2, 5.3), οι οποίες περιγράφουν την πυκνότητα των φωτονίων στο εσωτερικό της κοιλότητας και των φορέων στη ζώνη αγωγιμότητας καθώς επίσης και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

$$\frac{dE(t)}{dt} = G(t) \frac{E(t)}{2} - \frac{1}{\tau_p} \frac{E(t)}{2} + ja \left(G(t) - \frac{1}{\tau_p} \right) \frac{E(t)}{2} + \sqrt{2\beta N(t)} \xi(t) \quad (5.2)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{qLwd} - \frac{1}{\tau_n} N(t) - G(t) |E(t)|^2 \quad (5.3)$$

$$G(t) = \frac{g(N(t) - N_{th})}{1 + s|E(t)|^2} \quad (5.4)$$

Η εξίσωση 5.2 αποτελεί την εξίσωση ροής της πυκνότητας ισχύος των φωτονίων μετεφρασμένη σε αριθμό φωτονίων, $E(t)$. Ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο οι φορείς μετατρέπονται σε ωφέλιμα φωτόνια. Ο παράγοντας

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

εξαναγκασμένης εκπομπής $G_{(t)}$ δίνεται στην εξίσωση 5.4 όπου το g είναι η παράμετρος ενίσχυσης του υλικού, το $N_{(t)}$ είναι η πυκνότητα φορέων στη ζώνη αγωγιμότητας, το N_{th} είναι η πυκνότητα φορέων στο σημείο διαφάνειας κάτω από το οποίο ο ρυθμός απορρόφησης είναι μεγαλύτερος αυτού της εξαναγκασμένης εκπομπής και s είναι η σταθερά κορεσμού της ενίσχυσης. Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης 5.2 εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο χάνονται φωτόνια είτε ως ωφέλιμο φώς, το οποίο εκπέμπεται έξω από την κοιλότητα, είτε στους διάφορους μηχανισμούς απωλειών. Ο όρος αυτός περιγράφεται από τον παράγοντα τ_p ο οποίος είναι ο χρόνο ζωής των φωτονίων. Ο τρίτος όρος εκφράζει τη διεύρυνση του φασματικού εύρους γραμμής της οπτικής δέσμης, η οποία προκύπτει από την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του υλικού από την πυκνότητα φορέων και περιγράφεται από τον παράγοντα α . Ο τελευταίος όρος εκφράζει τη συνεισφορά σε φώς από αυθόρμητη εκπομπή και περιγράφεται από τον ρυθμό αυθόρμητης εκπομπής β ο οποίος ακολουθεί μία γκαουσιανή κατανομή $\xi_{(t)}$ με μηδενική μέση τιμή και συσχέτιση $\langle \xi_m(t)\xi_m^*(t) \rangle = 2\delta_{ms}\delta(t-t')$.

Η εξίσωση 5.3 αποτελεί την εξίσωση ροής της πυκνότητας φορέων, $N(t)$. Ο πρώτος όρος τους δεξιού μέλους εκφράζει την πυκνότητα φορέων ανά μονάδα όγκου που προκύπτουν λόγω της άντλησης ρεύματος I , όπου q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, L , w και d είναι το μήκος, το πλάτος και το ύψος της κοιλότητας, αντίστοιχα. Ο δεύτερος όρος περιγράφει το ρυθμό μείωσης των φορέων λόγω αυθόρμητης εκπομπής, όπου τ_n είναι ο χρόνος ζωής για την επανασύνδεση των φορέων. Τέλος, ο τρίτος όρος περιγράφει το ρυθμό μείωσης των φορέων λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής.

Οι παραπάνω εξισώσεις λαμβάνουν υπόψη τους και τις πιο ασθενείς εξαρτήσεις επιτρέποντάς μας να εξάγουμε χρήσιμα και αξιόπιστα συμπεράσματα για τη στατική αλλά και για τη δυναμική συμπεριφορά ενός μονοχρωματικού laser, διάταξη η οποία θα μελετηθεί ενδελεχώς στην παρούσα διατριβή ως προς τα χαρακτηριστικά εγκλειδωσης φάσης.

5.2.3 Αρχή λειτουργίας της εγκλειδωσης φάσης

Όπως αναφέραμε και στην αρχή του κεφαλαίου, η εγκλειδωση φάσης αποτελεί τον μηχανισμό κατά τον οποίο ένας ταλαντωτής εξαναγκάζει έναν δεύτερο να ταλαντωθεί στη συχνότητά του, υπό την προϋπόθεση ότι η αλληλεπίδρασή τους είναι επαρκώς ισχυρή και οι συχνότητές τους γειτονικές. Στα laser η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με έγχυση οπτικής ισχύος από τον κύριο ταλαντωτή (master laser) στον δευτερεύοντα (slave laser). Για να εξηγηθεί ο φυσικός μηχανισμός αλλά και για να μελετηθούν διάφορα φαινόμενα που προέκυψαν από τη διαδικασία αυτή, ο Lang [155] πρότεινε μία τροποποίηση στις εξισώσεις ροής η οποία συμπεριελάμβανε τον παράγοντα έγχυσης οπτικής ισχύος. Έτσι λοιπόν η εξίσωση ροής της πυκνότητας φωτονίων για το slave laser πήρε την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{dE_{(t)}}{dt} = (1 + ja) \left(G_{(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right) \frac{E_{(t)}}{2} + \sqrt{2\beta N_{(t)}\xi_{(t)}} + \kappa E_{inj} - j\Delta\omega_{inj}E_{(t)} \quad (5.5)$$

Ο τρίτος όρος στο δεξιό μέλος της εξίσωσης 5.5 εκφράζει τη συμβολή του χρονικά αμετάβλητου οπτικού πεδίου, E_{inj} , στην αύξηση της πυκνότητας φωτονίων στην οπτική κοιλότητα. Το εγχεόμενο οπτικό πεδίο και πιο συγκεκριμένα η εγχεόμενη οπτική ισχύς παίζει σημαντικό ρόλο στις επιδόσεις της εγκλειδωσης φάσης, όπως θα δούμε παρακάτω. Ο βαθμός σύζευξης του εγχεόμενου με το υπάρχον πεδίο περιγράφεται από τον παράγοντα κ , ο οποίος ισούται με την αντίστροφη τιμή του χρόνου διάδοσης μετ' επιστροφής (roundtrip) φωτός μέσα στην κοιλότητα, τ_r . Ο τελευταίος όρος εκφράζει τη φασματική διαφορά μεταξύ της συχνότητας του εγχεόμενου πεδίου, ω_{master} , και της

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

βασικής συχνότητας στην οποία εκπέμπει το ελεύθερα ταλαντούμενο (free-running) slave laser, ω_{slave} , και δίνεται από τη σχέση $\Delta\omega_{inj} = \omega_{master} - \omega_{slave}$.

Θεωρώντας ότι η υπέρθεση των δύο πεδίων στο εσωτερικό της κοιλότητας του slave laser εκφράζεται ως ένα χρονικά εξαρτώμενο μιγαδικό πεδίο της μορφής $E_{(t)} = E_{0(t)} \exp[j\varphi_{(t)}]$, όπου $E_{0(t)}$ είναι το πλάτος του πεδίου και $\varphi_{(t)}$ η διαφορά φάσης μεταξύ του εγγεόμενου πεδίου και του πεδίου του slave laser, $\varphi_{(t)} = \varphi_{slave(t)} - \varphi_{master(t)}$, οι εξισώσεις 5.5 και 5.3 μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις επιμέρους διαφορικές εξισώσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν ένα εγκλειδωμένο laser.

$$\frac{dE_{0(t)}}{dt} = \left(G_{(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right) \frac{E_{0(t)}}{2} + \sqrt{2\beta N_{(t)} \xi_{(t)}} \cos(\varphi_{(t)}) + \kappa E_{inj} \cos(\varphi_{(t)}) \quad (5.6)$$

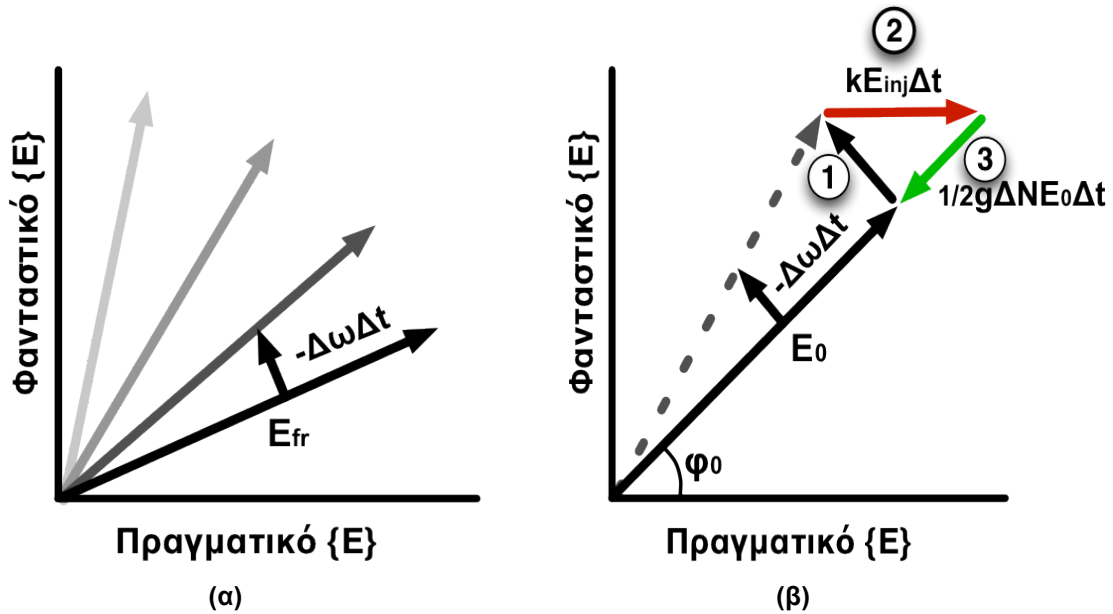
$$\frac{d\varphi_{(t)}}{dt} = \frac{a}{2} \left(G_{(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right) - \kappa \frac{E_{inj}}{E_{0(t)}} \sin(\varphi_{(t)}) - \Delta\omega_{inj} \quad (5.7)$$

$$\frac{dN_{(t)}}{dt} = \frac{I}{qLwd} - \frac{1}{\tau_n} N_{(t)} - G_{(t)} |E_{0(t)}|^2 \quad (5.8)$$

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών ή θεωρώντας γνωστή την τιμή μίας εκ των μεταβλητών E_0 , φ και N_0 μπορούμε να επιλύσουμε το παραπάνω σύστημα διαφορικών εξισώσεων αναδεικνύοντας την κατάσταση ισορροπίας (steady state) της διάταξης σε στατική λειτουργία. Η γνώση του σημείου λειτουργίας μας βοηθάει να εξάγουμε συμπεράσματα για το συχνοτικό εύρος εγκλειδωσης (locking bandwidth), τη διεύρυνση της συχνότητας ταλαντώσεων αποκατάστασης (relaxation oscillation frequency), ω_R , κ.τ.λ. Επίσης, η δυναμική επίλυση του συστήματος χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των μικρών διαταραχών γύρω από το σημείο ισορροπίας μας δίνει πληροφορίες για τη δυναμική συμπεριφορά της διάταξης. Προς το παρόν όμως δεν θα επεκταθούμε περαιτέρω στη θεωρητική μελέτη την εγκλειδωσης, θα επιστρέψουμε όμως στις παραπάνω εξισώσεις σε επόμενο τμήμα του κεφαλαίου αυτού.

Για να γίνει κατανοητός ο φυσικός μηχανισμός της εγκλειδωσης φάσης σε ένα ημιαγωγικό laser θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση 5.5, αγνοώντας προς το παρόν τον όρο της αυθόρμητης εκπομπής χωρίς βλάβη της γενικότητας, και τα διάγραμμα του μιγαδικού διανυσματικού πεδίου (διάγραμμα φασόρων) του σχήματος 5-5 τα οποία αναπτύχθηκαν από τους Henry et al. [156]. Ας θεωρήσουμε λοιπόν την περίπτωση ενός ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser, το οποίο εκπέμπει στη βασική του συχνότητα, ω_{slave} . Ο φάσοντας του πεδίου του, θεωρώντας ως σύστημα αναφοράς τη συχνότητα του master laser, ω_{master} , σε κάθε χρονική στιγμή Δt θα περιστρέφεται κατά $\Delta\omega\Delta t$ (σχ. 5-5α).

$$\Delta\omega = -a \left(G_{(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right) + \Delta\omega_{inj} \quad (5.9)$$



Σχήμα 5-5: Διάγραμμα φασόρων του μηχανισμού εγκλειδωσης. Το διάγραμμα (α) απεικονίζει την περιστροφή του ανυσματικού πεδίου ενός ελεύθερα ταλαντούμενου laser το οποίο εκπέμπει στη συχνότητα που επιβάλλεται από την κοιλότητά του. Το διάγραμμα (β) απεικονίζει τη σταθεροποίηση του ανυσματικού πεδίου του slave laser κατά την εγκλειδωση, η οποία επιτυγχάνεται με το άθροισμα τριών διανυσμάτων : 1) Ο φάσορας του slave laser περιστρέφεται κατά $\Delta\omega$ (μαύρο άνυσμα), 2) το εγχεόμενο πεδίο του master προσθέτει μία πραγματική συνιστώσα (κόκκινο άνυσμα) και 3) το πλάτος του συνολικού πεδίου μειώνεται λόγω της αρνητικής ενίσχυσης (πράσινο άνυσμα).

Κατά την είσοδο του οπτικού πεδίου του master laser στο εσωτερικό της κοιλότητας του slave laser, η διαφορά συχνότητας μεταξύ των δύο πεδίων, η οποία μεταφράζεται σε μία στιγμιαία διαφορά φάσης οδηγεί στη δημιουργία ενός διακροτήματος το οποίο διαταράσσει την συνολική ισχύ με αποτέλεσμα το slave να μεταπίπτει σε ταλαντώσεις της απολαβής του για την αποκατάσταση της ισορροπίας του. Οι ταλαντώσεις της απολαβής, οι οποίες πραγματοποιούνται μέσω των ταλαντώσεων των φορέων επιδρούν ταυτόχρονα και στη φάση του πεδίου. Έτσι, με την άμεση επίδραση στην ισχύ μέσω της απολαβής και την έμμεση επίδραση μέσω της φάσης η ισορροπία εν τέλει αποκαθίσταται. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται από τα διανύσματα του φάσορα του σχήματος 5-5β. Το διάνυσμα 1 (σχ. 5-5β, μαύρο διάνυσμα) που αποτελεί τον φάσορα του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser περιστρέφεται σε κάθε χρονική στιγμή Δt κατά τη συχνοτική διαφορά $\Delta\omega$. Το διάνυσμα 2 (σχ. 5-5β, κόκκινο διάνυσμα) προσθέτει τη συνεισφορά του εγχεόμενου πεδίου, η οποία αυξάνει το συνολικό πεδίο εντός της κοιλότητας οδηγώντας σε μείωση της ενίσχυσης του υλικού μέσω της μείωσης των φορέων κάτω από το κατώφλι έναυσης ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία της διάταξης. Η συνεισφορά της μείωσης της ενίσχυσης, και πιο συγκεκριμένα της αρνητικής ενίσχυσης, εκφράζεται μέσω του διανύσματος 3 (σχ. 5-5β, πράσινο διάνυσμα), το οποίο καταφέρνει εν τέλει να διατηρήσει σταθερή τη διαφορά φάσης (φ_0) μεταξύ των δύο πεδίων (master και slave). Αυτό λοιπόν που ουσιαστικά συμβαίνει σε μία οπτική κοιλότητα laser κατά την εγκλειδωση φάσης είναι ότι το slave laser εκπέμπει διαρκώς στη βασική συχνότητα λειτουργίας του, ω_{slave} , το εγχεόμενο φως του master laser όμως ολισθαίνει διαρκώς τη φάση του slave ώστε αυτή να ταιριάζει με τη δική του. Η συνεχόμενη αυτή ολίσθηση φάσης οδηγεί σε μία πλασματική ολίσθηση συχνότητας δίνοντας την εντύπωση στον εξωτερικό παρατηρητή ότι το slave laser εκπέμπει στο μήκος κύματος του master. Αυτή είναι μία πολύ σημαντική ιδιότητα της εγκλειδωσης φάσης γιατί διευρύνει την εφαρμογή της σε όλη την γκάμα κοιλοτήτων laser, όπως Fabry-Pérot, DFB, DBR ή VCSEL (vertical cavity surface emitting laser), χωρίς τα χαρακτηριστικά της κοιλότητάς τους να επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά του μηχανισμού.

5.2.4 Χαρακτηριστικές παράμετροι της εγκλειδωσης φάσης

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 5.6-5.8 και θεωρώντας τις λύσεις των Murakami et al. [157] καταλήγουμε ότι σε στατική λειτουργία και όταν η ισορροπία του συστήματος έχει αποκατασταθεί, οι φορείς στην κοιλότητα του εγκλειδωμένου laser, N_0 , και η φάση μεταξύ των κυμάτων του master και του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser, φ_0 , θα δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$\Delta N_0 = N_0 - N_{th} = -\frac{2k}{G_{(t)}} \frac{E_{inj}}{E_0} \cos \varphi_0 \quad (5.10)$$

$$\varphi_0 = \sin^{-1} \left(-\frac{\Delta \omega_{inj}}{k\sqrt{1+a^2}} \frac{E_0}{E_{inj}} \right) - \tan^{-1} a \quad (5.11)$$

Από την σχέση 5.11 μπορούμε να εξάγουμε τα όρια εντός των οποίων θα πρέπει να κυμαίνεται η διαφορά φάσης, φ_0 , μεταξύ των δύο κυμάτων ώστε να επιτυγχάνεται εγκλειδωση:

$$-\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(a) \leq \varphi_0 \leq \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(a) \quad (5.12)$$

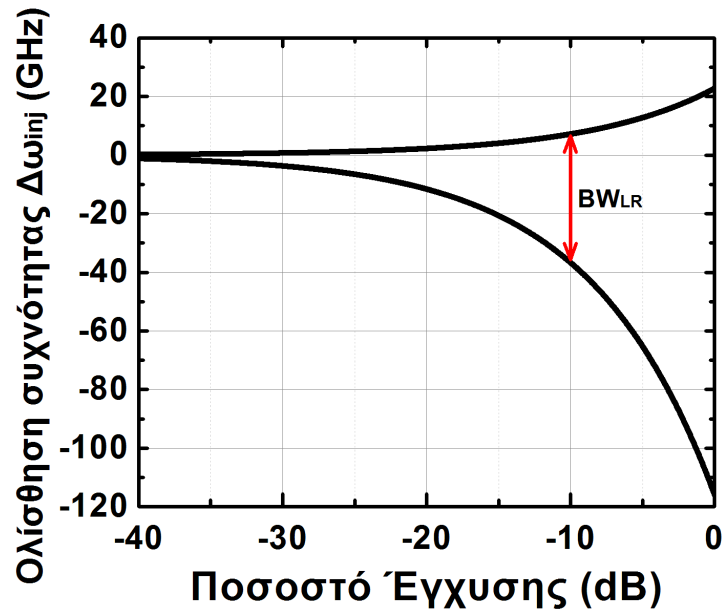
Όμως για τιμές του φ_0 μικρότερες του $-\pi/2$, οι φορείς στην κοιλότητα του laser λαμβάνουν θετικές τιμές με αποτέλεσμα το σύστημα να οδηγείται σε αστάθεια σύμφωνα με τα όσα εξηγήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Επομένως το φ_0 θα πρέπει να παραμένει μεγαλύτερο του $-\pi/2$. Αντικαθιστώντας τη σχέση 5.11 στην σχέση 5.12 μπορούμε να μεταφράσουμε τη διαφορά φάσης μεταξύ του master και του slave σε διαφορά συχνότητας.

$$-k\sqrt{1+a^2} \frac{E_{inj}}{E_0} \leq \Delta \omega_{inj} \leq k \frac{E_{inj}}{E_0} \quad (5.13)$$

Η παραπάνω περιοχή ονομάζεται εύρος ζώνης εγκλειδωσης (locking range) και αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο ποιότητας της εγκλειδωσης φάσης. Το εύρος αυτό εξαρτάται από τον παράγοντα σύζευξης οπτικής ισχύος, k , τον παράγοντα διεύρυνσης του εύρους γραμμής, a , καθώς επίσης και από τον λόγο E_{inj}/E_0 , το τετράγωνο του οποίου ορίζεται ως ποσοστό έγχυσης (injection ratio), R , και εκφράζεται σε dB.

$$R = 10 \cdot \log \left(\frac{E_{inj}}{E_0} \right)^2 = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{inj}}{P_0} \right) \quad (5.14)$$

Στο σχήμα (σχ. 5-6) που ακολουθεί απεικονίζεται το διάγραμμα που εκφράζει την εξάρτηση του εύρους ζώνης εγκλειδωσης από το ποσοστό έγχυσης για στατική λειτουργία του συστήματος, θεωρώντας τον παράγοντα $a=5$ και το $k=142.8 \text{ ns}^{-1}$.



Σχήμα 5-6: Απεικόνιση της εξάρτησης του $\Delta\omega_{inj}$ από το ποσοστό έγχυσης για στατική λειτουργία του συστήματος εγκλειδωσης φάσης. Η συχνотική απόσταση μεταξύ των άνω και κάτω ορίων εγκλειδωσης, για σταθερό ποσοστό έγχυσης, ορίζεται ως εύρος ζώνης εγκλειδωσης (BW_{LR}) και απεικονίζεται για την περίπτωση του $R=-10$ dB.

5.2.5 Δυναμική συμπεριφορά των εγκλειδωμένων laser και περιοχές λειτουργίας

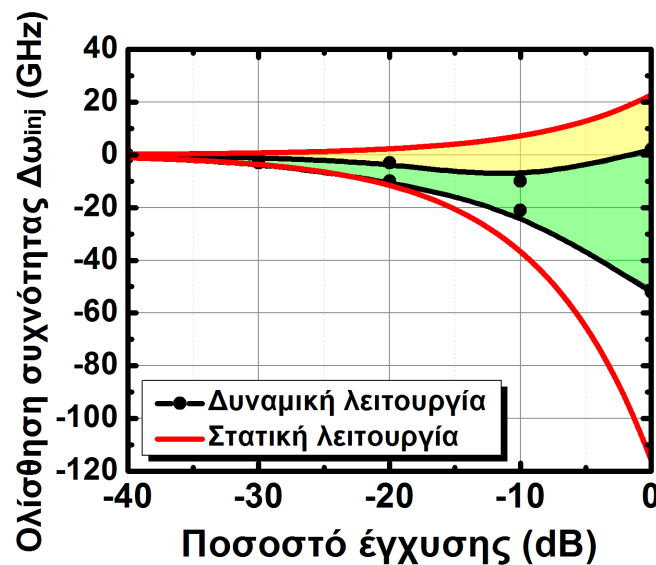
Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε τη στατική λειτουργία ενός εγκλειδωμένου laser βασιζόμενοι στην αναλυτική επίλυση των εξισώσεων ροής, ώστε ο αναγνώστης να κατανοήσει τις βασικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την ποιότητα της εγκλειδωσης φάσης. Για να μελετήσουμε όμως τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος master-slave laser και να αρχίσουμε να εισχωρούμε βαθύτερα στις ιδιότητες του, στην παράγραφο αυτή αλλά και στις μετέπειτα, θα επιλύσουμε αριθμητικά το σύστημα εξισώσεων 5.5 και 5.3 με τη βοήθεια προσομοιώσεων. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε έναντι της μικρού σήματος ανάλυσης λόγω του ότι προσφέρει τη δυνατότητα μελέτης του συστήματος ακόμα και σε μη γραμμικές περιοχές λειτουργίας ενώ παράλληλα μας παρέχει τη δυνατότητα να μελετήσουμε και να απεικονίσουμε τη χρονική εξέλιξη διαφόρων διαδικασιών όπως οι ταλαντώσεις αποκατάστασης, η απόκριση του slave laser σε διάφορες διαταραχές του εγχεόμενου πεδίου και άλλα.

Οι παράμετροι των εξισώσεων ροής (πίνακας 5-1) για το slave laser επιλέχθηκαν κατάλληλα ώστε τα δυναμικά χαρακτηριστικά του αριθμητικού μοντέλου να προσεγγίζουν αυτά του πειραματικού laser που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα που θα παρουσιαστούν σε ακόλουθη παράγραφο. Έτσι λοιπόν, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του πίνακα 5-1 το μοντέλο του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser παρουσιάζει ρεύμα κατωφλίου που ισούται με $I_{κατ}=20$ mA, ενώ το εύρος γραμμής του κυμαίνεται μεταξύ 2.6 MHz και 576 kHz για τιμές ρευμάτων πόλωσης μεταξύ $2I_{κατ}$ και $6I_{κατ}$, αντίστοιχα. Τέλος, η συχνότητα ταλαντώσεων αποκατάστασης που αντιστοιχεί στην παραπάνω περιοχή ρευμάτων πόλωσης κυμαίνεται μεταξύ 4.5 GHz και 10 GHz. Για το master laser χρησιμοποιούμε τις ίδιες παραμέτρους με αυτές του slave laser μιας και τα χαρακτηριστικά του δεν επιδρούν ιδιαίτερα στις επιδόσεις της εγκλειδωσης φάσης. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο laser είναι ότι το ρεύμα τροφοδοσίας του master παραμένει σταθερό στα $2I_{κατ}$ για όλη την αριθμητική μελέτη που θα πραγματοποιήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο, ενώ το slave laser, όπως θα δούμε και παρακάτω, κυμαίνεται μεταξύ των 40 mA και 120 mA.

Πίνακας 5-1: Παράμετροι laser

Παράμετροι	Σύμβολο	Τιμή
Παράμετρος ενίσχυσης υλικού	g	$1 \times 10^{-8} \text{ps}^{-1}$
Σταθερά κορεσμού ενίσχυσης	s	5×10^{-7}
Παράγοντας διεύρυνσης εύρους γραμμής	α	5
Ρυθμός αυθόρμητης εκπομπής	β	$0.5 \times 10^{-9} \text{ps}^{-1}$
Χρόνος ζωής φορέων	τ_n	2ns
Αριθμός φορέων στην κατάσταση διαφάνειας	N_0	2.1×10^8
Χρόνος μετ'επιστροφής της κοιλότητας laser	τ_r	7ps
Χρόνος ζωής φωτονίων	τ_p	3.2ps

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 5-7, η περιοχή σταθερής εγκλείδωσης του slave laser (πράσινη περιοχή) σε δυναμική λειτουργία, όχι μόνο είναι σαφέστατα περιορισμένη συγκριτικά με την αντίστοιχη περιοχή στατικής λειτουργίας αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζει μία περιοχή αστάθειας (κίτρινη περιοχή), η οποία οριοθετείται από τις καμπύλες στατικής και δυναμικής λειτουργίας που αντιστοιχούν στο $\phi_0 = -\pi/2$.



Σχήμα 5-7: Απεικόνιση του εύρους ζώνης εγκλείδωσης σε δυναμική (μαύρη καμπύλη) και στατική (κόκκινη καμπύλη) λειτουργία. Η πράσινη περιοχή αντιστοιχεί στην περιοχή σταθερής εγκλείδωσης φάσης ενώ η κίτρινη περιοχή αντιστοιχεί στην περιοχή ασταθούς εγκλείδωσης.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω αποτελέσματα, για αρνητικές τιμές του ποσοστού έγχυσης, σταθερή εγκλείδωση φάσης ενός δυναμικού συστήματος slave laser επιτυγχάνεται μόνο για αρνητικές ολισθήσεις συχνότητας του master ως προς το slave.

Σε επόμενο κεφάλαιο θα μελετήσουμε την απόκριση του εγκλειδωμένου laser σε μονοτονικά και ευρυζωνικά διαμορφωμένα σήματα εγχεόμενα σήματα, τα οποία τοποθετούνται σε φασματική απόσταση από το μήκος κύματος του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser, η οποία επιβάλλεται από την παραπάνω περιοχή σταθερής εγκλείδωσης, ενώ τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας εγκλείδωσης είναι το εύρος ζώνης διαμόρφωσης και η συμπίεση του θορύβου πλάτους.

5.2.6 Ιδιότητες των εγκλειδωμένων laser

Η εγκλειδωση φάσης στα ημιαγωγικά laser προσφέρει μία ποικιλία ιδιοτήτων οι οποίες βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους και ανοίγουν τους ορίζοντες για ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών σε διάφορους τομείς. Οι σημαντικότερες εκ των ιδιοτήτων είναι η συμπίεση του σχετικού θορύβου έντασης [158], η ελάττωση του εύρους γραμμής [159], η συμπίεση των πλευρικών τρόπων [160], η μείωση της μη γραμμικής παραμόρφωσης και η αύξηση της συχνότητας ταλαντώσεων αποκατάστασης [161]. Όπως θα αναφέρουμε ακολούθως, μέχρι και σήμερα έχει γίνει μία ενδελεχής μελέτη ως προς τις ιδιότητες αυτές από διάφορες ερευνητικές ομάδες οι οποίες επέδειξαν σημαντικά θεωρητικά και πειραματικά ευρήματα τα οποία έδωσαν ιδιαίτερη ώθηση στην κατανόηση και εφαρμογή του φαινομένου της εγκλειδωσης φάσης. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή θα ασχοληθούμε ιδιαίτερα με τη συμπίεση του θορύβου πλάτους, τη συμπίεση των πλευρικών τρόπων και τη διεύρυνση του εύρους ζώνης διαμόρφωσης. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα παράγραφο θα κάνουμε μία μικρή αναφορά στους μηχανισμούς, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τις προαναφερθείσες ιδιότητες, ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μία σχετική οικειότητα με το θέμα, και σε επόμενη παράγραφο θα επεκταθούμε σε μία λεπτομερή αξιολόγηση των επιδόσεων των ιδιοτήτων αυτών στα πλαίσια των εφαρμογών που προτείνονται.

Αύξηση της συχνότητας ταλαντώσεων αποκατάστασης: Το εύρος ζώνης άμεσης διαμόρφωσης ενός laser καθορίζεται από τη συχνότητα ταλαντώσεων αποκατάστασης ή αλλιώς τη συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας. Η συχνότητα αυτή εξαρτάται από εγγενείς παραμέτρους του υλικού και της κοιλότητας όπως ο χρόνος ζωής των φορέων, τ_n , ο χρόνος διάδοσης μετ' επιστροφής, τ_r , και οι απώλειες της κοιλότητας.

$$\omega_{r,enh} = \sqrt{\omega_{fr}^2 + \Delta\omega_R^2} \quad (5.15)$$

όπου ω_{fr} είναι η συχνότητα των ταλαντώσεων αποκατάστασης του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser και $\omega_{r,enh}$ είναι το διευρυμένο εύρος ζώνης διαμόρφωσης του εγκλειδωμένου laser.

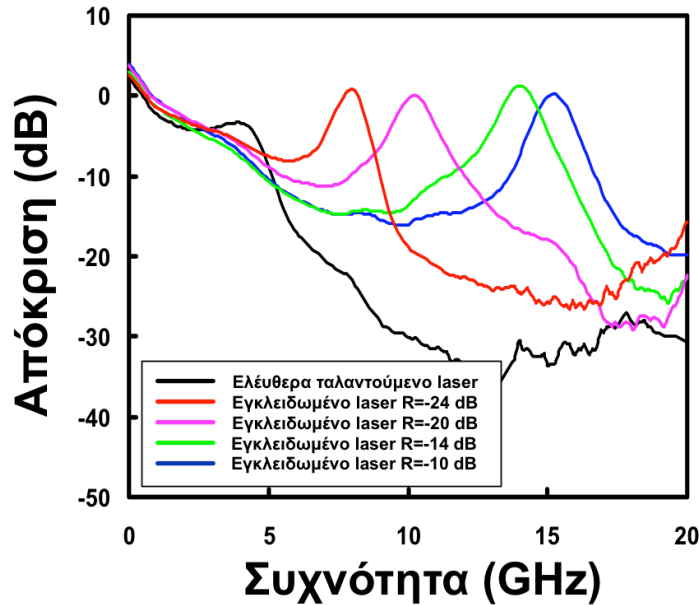
Κατά την έγχυση οπτικής ισχύος στην κοιλότητα ενός ελεύθερα ταλαντούμενου laser, όπως εξηγήσαμε παραπάνω, η οπτική ισχύς στο εσωτερικό της κοιλότητας αυξάνεται γεγονός το οποίο οδηγεί στη μείωση των φορέων ώστε να αποτακασταθεί η ισορροπία της διάταξης. Η μεταβολή αυτή στο πλήθος των φορέων οδηγεί σε ολίσθηση της συχνότητας συντονισμού της κοιλότητας, μέσω του παράγοντα διεύρυνσης εύρους γραμμής a , και δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\Delta\omega_{shift} = -\frac{a}{2} \left(G(t) - \frac{1}{\tau_p} \right) \quad (5.16)$$

Η διαφορά μεταξύ της εγχεόμενης συχνότητας και της ολισθημένης συχνότητας συντονισμού της κοιλότητας ονομάζεται διευρυμένη συχνότητα συντονισμού, $\Delta\omega_R = |\Delta\omega_{inj} - \Delta\omega_{shift}|$, και οδηγεί στην αύξηση της συχνότητας συντονισμού του laser με ταυτόχρονη διεύρυνση του εύρους ζώνης διαμόρφωσης [162], [163], η οποία δίνεται από τη σχέση 5.15.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η ολίσθηση της συχνότητας συντονισμού ενός εγκλειδωμένου laser συναρτήσει του ποσοστού έγχυσης, R , διατηρώντας την φασματική απόσταση μεταξύ του εγχεόμενου πεδίου και του slave laser σταθερή και ίση με -10 GHz, έτσι ώστε για όλες τις τιμές του R που μελετάμε, το slave laser να βρίσκεται πάντα εντός της περιοχής σταθερής εγκλειδωσης.

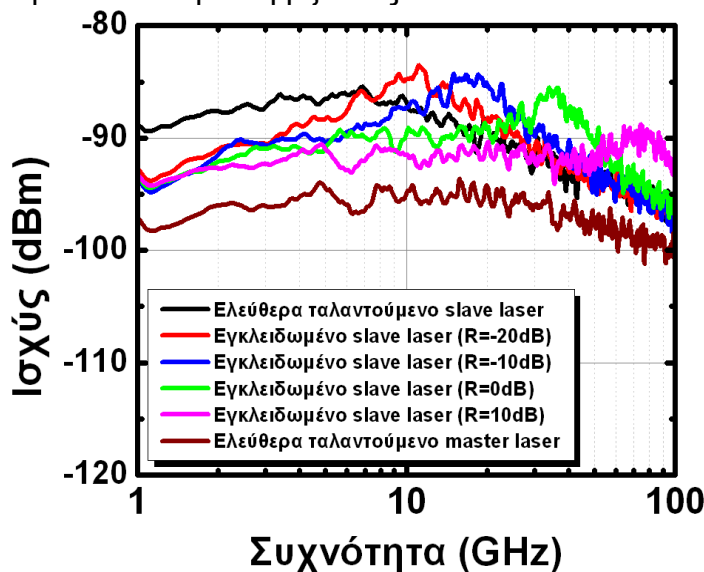
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 5-8: Φασματική απόκριση ενός ελεύθερα ταλαντούμενου ημιαγωγικού laser και ενός εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser για διάφορες τιμές του ποσοστού έγχυσης R.

Μείωση του σχετικού θορύβου έντασης: Ο σχετικός θόρυβος έντασης ενός laser εκφράζει την αστάθεια του επιπέδου ισχύος του η οποία παράγεται από μηχανικές ταλαντώσεις της κοιλότητας και χωρικές και χρονικές ανομοιογένειες της ενίσχυσης του υλικού. Όπως είναι γνωστό, η κορυφή του φάσματος του RIN συμπίπτει με τη συχνότητα ταλαντώσεων αποκατάστασης, επομένως η ολίσθηση της συχνότητας αυτής μέσω της εφαρμογής εγκλειδωσης φάσης έχει ως αποτέλεσμα τη συμπίεση του θορύβου RIN στην περιοχή γύρω από τη συχνότητα συντονισμού του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser.

Η παραπάνω συμπεριφορά απεικονίζεται ξεκάθαρα στο σχήμα 5-9. Το slave laser που χρησιμοποιείται στην προκειμένη περίπτωση διαθέτει χαρακτηριστικές παραμέτρους που δίνονται από τον πίνακα 5-1, ενώ το master laser διαθέτει χαμηλότερο ρυθμό αυθόρμητης εκπομπής ($\beta=0.1 \times 10^{-9} \text{ ps}^{-1}$) ώστε να παρουσιάζει χαμηλότερο RIN. Για $\Delta\omega_{inj}=-10 \text{ GHz}$ παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό έγχυσης, το RIN του εγκλειδωμένου laser μειώνεται προσεγγίζοντας αυτό του master laser.



Σχήμα 5-9: Απεικόνιση της συμπίεσης του θορύβου RIN ενός εγκλειδωμένου laser για διαφορετικά επίπεδα έγχυσης οπτικής ισχύος.

Συμπίεση πλευρικών τρόπων: Μία ιδιαίτερως σημαντική ιδιότητα που παρουσιάζει η εγκλειδωση φάσης είναι ότι μπορεί να οδηγήσει σε μονότροπη εκπομπή ένα Fabry-Pérot laser. Με κατάλληλη επιλογή του ποσοστού έγχυσης αλλά και της φασματικής απόστασης του εγχεόμενου μήκους κύματος από τον τρόπο της Fabry-Pérot κοιλοότητας στον οποίο θέλουμε αυτή να εκπέμψει μπορούμε να προκαλέσουμε τη συμπίεση των πλευρικών τρόπων με λόγο (side mode suppression ratio, SMSR), ο οποίος μπορεί να ξεπεράσει και τα 48 dB [160]. Την ιδιότητα αυτή θα μελετήσουμε διεξοδικά σε επόμενη παράγραφο.

5.2.7 Εφαρμογές των εγκλειδωμένων laser

Η απλότητα στην υλοποίηση, το μικρό μέγεθος, η ενεργειακή απόδοση καθώς επίσης και το χαμηλό κόστος των εγκλειδωμένων laser, έχει ωθήσει τα τελευταία χρόνια την αξιοποίηση τους σε μία σειρά καινοτόμων εφαρμογών, οι οποίες προσφέρουν ανέλπιστα σημαντική βελτίωση των επιδόσεων. Οι Kuramoto και Yamashita το 2003 επέδειξαν αμιγώς οπτική αναδιαμόρφωση παλμών για ASK σήματα με τη χρήση εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser [164]. Ο Chiucharelli et al. το 2011 εκμεταλλευόμενος την ιδιότητα ανάδειξης φέροντος που παρέχει η κωδικοποίηση 8b/10b επέδειξε την σύμφωνη ομόδυνη αποδιαμόρφωση ενός PSK σήματος χρησιμοποιώντας την εγκλειδωση φάσης ως τεχνική εγκλειδωσης του τοπικού ταλαντωτή στο εισερχόμενο σήμα απλοποιώντας έτσι το πολύπλοκο οπτο-ηλεκτρονικό κύκλωμα εγκλειδωσης φάσης του ομόδυνου σύμφωνου δέκτη [62]. Οι Lau et al. το 2008 έδειξαν την αξιοποίηση της εγκλειδωσης φάσης για τη διεύρυνση του εύρους ζώνης διαμόρφωσης ενός εξωτερικού διαμορφωτή φάσης [165]. Τέλος, η χρήση της εγκλειδωσης φάσης σε Fabry-Pérot laser για τη μονότροπη εκπομπή τους και την βελτίωση των χαρακτηριστικών τους έχει προταθεί ως μία οικονομική εναλλακτική για τις εφαρμογές σε παθητικά οπτικά δίκτυα (passive optical networks, PON) [166]-[168].

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα μελετήσουμε διεξοδικά μέσω προσομοιώσεων την απόκριση του εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser στις διαταραχές φάσης και πλάτους που εισάγει το εγχεόμενο οπτικό πεδίο, και θα αξιολογήσουμε κατά πόσο οι επιδόσεις της συγκεκριμένης συσκευής μπορούν να παρέχουν ικανοποιητική αναγέννηση σε διαμορφωμένα κατά φάση σήματα.

5.3 Αριθμητική μελέτη των χαρακτηριστικών μεταφοράς ενός εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε μία εκτενή αριθμητική μελέτη των ιδιοτήτων της αναπαραγωγής φάσης και της συμπίεσης θορύβου πλάτους που προσφέρει η μέθοδος της εγκλειδωσης φάσης. Για το σκοπό αυτό αναπτύξαμε ένα αριθμητικό μοντέλο για την περιγραφή του συστήματος master-slave laser, το οποίο βασίστηκε στις εξισώσεις ροής του Petermann (5.3 και 5.5).

Αντίστοιχες θεωρητικές μελέτες της συμπεριφοράς ενός εγκλειδωμένου laser έχουν παρουσιαστεί από διάφορες ερευνητικές ομάδες [165], [169], [170], ωστόσο όλες περιορίζονται στη δυναμική μελέτη του συστήματος master και slave laser χρησιμοποιώντας ανάλυση μικρού σήματος για μονοτονικές διαταραχές και υψηλά ποσοστά έγχυσης ($R > 0$). Στην παρούσα παράγραφο, θα ξεκινήσουμε από μία μονοτονική μελέτη ώστε να βγάλουμε κάποια πρώιμα συμπεράσματα για την απόκριση και τα θορυβικά χαρακτηριστικά του εγκλειδωμένου laser και στη συνέχεια θα επεκτείνουμε τη μελέτη μας για ευρυζωνικά σήματα υψηλών ρυθμών με διαμόρφωση στη φάση, ώστε να αξιολογήσουμε τις επιδόσεις του. Η όλη ανάλυση θα πραγματοποιηθεί για αρνητικές τιμές του ποσοστού έγχυσης ώστε να μελετηθεί η ιδιότητα της συμπίεσης του θορύβου πλάτους, ενώ η φασματική απόσταση του

εγχεόμενου μήκους κύματος από αυτό του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser, για κάθε τιμή του ποσοστού έγχυσης, λαμβάνει τις τιμές που ορίζονται από το άνω άκρο της περιοχής εγκλειδωσης του σχήματος 5-7. Η περιοχή αυτή λειτουργίας επιλέγεται καθώς έχει αποδειχθεί από τους Lau et al. [171] ότι η εγκλειδωση σε αυτή την περιοχή οδηγεί στη μέγιστη ολίσθηση της κορυφής συντονισμού και επομένως στο μέγιστο εύρος διαμόρφωσης.

5.3.1 Απόκριση σε μονοτονική διαμόρφωση φάσης

Κάθε φασική μεταβολή του εγχεόμενου σήματος στο εσωτερικό ενός εγκλειδωμένου laser ακολουθείται από μία σειρά ταλαντώσεων των φορέων του ημιαγωγού και επομένως της απολαβής του ώστε να καταφέρει να επέλθει εκ νέου η συνθήκη ισορροπίας του συστήματος. Η παραπάνω διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα η φασική διαταραχή του εγχεόμενου σήματος να κληροδοτηθεί στο slave laser αλλά ταυτόχρονα επιφέρει και μία διαταραχή στο πλάτος του πεδίου μέσω της διαταραχής στην απολαβή. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί, δηλαδή η μεταφορά φάσης-σε-φάση και η μεταφορά φάσης-σε-πλάτος, χαρακτηρίζουν την απόκριση ενός εγκλειδωμένου laser σε φασικές διαταραχές και η επίδρασή τους υπολογίζεται μέσω των ακόλουθων συντελεστών.

$$m_{PM-PM} = \frac{\Delta\varphi_{slave}}{\Delta\varphi_{inj}} \quad (5.17)$$

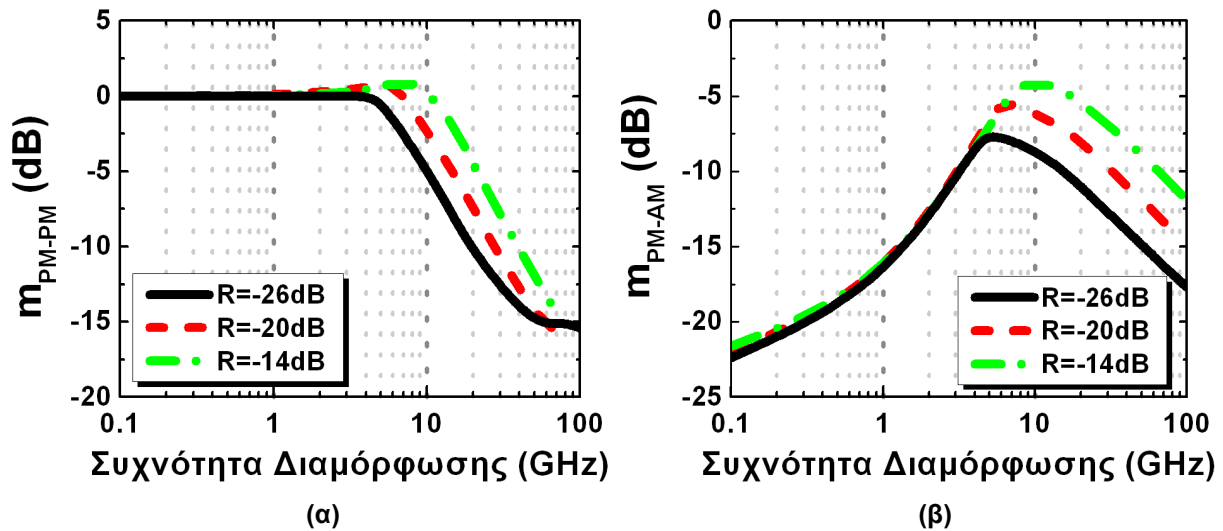
$$m_{PM-AM} = \frac{\frac{\Delta P_{slave}}{P_{slave}}}{\frac{\Delta\varphi_{inj}}{\pi/2}} \quad (5.18)$$

Ο συντελεστής m_{PM-PM} ισούται με τον λόγο του βάθους διαμόρφωσης φάσης που κληρονομείται από το εγκλειδωμένο laser, $\Delta\varphi_{slave}$, προς το βάθος διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου σήματος, $\Delta\varphi_{inj}$. Ενώ ο συντελεστής m_{PM-AM} ισούται με τον λόγο της κανονικοποιημένης διακύμανσης πλάτους του slave laser προς το κανονικοποιημένο βάθος διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου σήματος. Το P_{slave} είναι η μέση ισχύς του slave laser ενώ το ΔP_{slave} αποτελεί τη διακύμανση των διαταραχών της ισχύος αυτής.

Για να μελετήσουμε λοιπόν πλήρως τα δυναμικά χαρακτηριστικά αυτής της απόκρισης αλλά και να αξιολογήσουμε τις επιδόσεις του εγκλειδωμένου laser χρησιμοποιούμε μία ημιτονική διαμόρφωση πλάτους π στη φάση του master laser και υπολογίζουμε τους συντελεστές m_{PM-PM} και m_{PM-AM} για συχνότητες διαμόρφωσης εντός του φασματικού παραθύρου από 100 MHz έως 100 GHz και για διάφορα ποσοστά έγχυσης ισχύος διατηρώντας το ρεύμα πόλωσης σταθερό και ίσο με 2 φορές το κατώφλι.

Το σχήμα 5-10, απεικονίζει ξεκάθαρα την άμεση εξάρτηση του εύρους διαμόρφωσης από το ποσοστό έγχυσης οπτικής ισχύος. Όπως παρατηρούμε για ποσοστό έγχυσης -26 dB, η συχνότητα συντονισμού, $\omega_{r, enh} = 4.8$ GHz, του εγκλειδωμένου laser δεν διαφέρει πολύ συγκριτικά με αυτήν του ελεύθερα ταλαντούμενο slave laser, περιορίζοντας έτσι το μέγιστο ρυθμό διαμόρφωσης που μπορεί να ακολουθήσει. Καθώς όμως το ποσοστό έγχυσης αυξάνει, ακόμα και για χαμηλή τιμή ρεύματος πόλωσης ($I=2I_{κατ}$), η συχνότητα συντονισμού ολισθαίνει διευρύνοντας έτσι το εύρος ζώνης διαμόρφωσης και επιτρέποντας στο εγκλειδωμένο laser να αναπαράγει ημιτονικές διαμορφώσεις που φθάνουν ακόμη και τα 10 GHz ($R=-14$ dB).

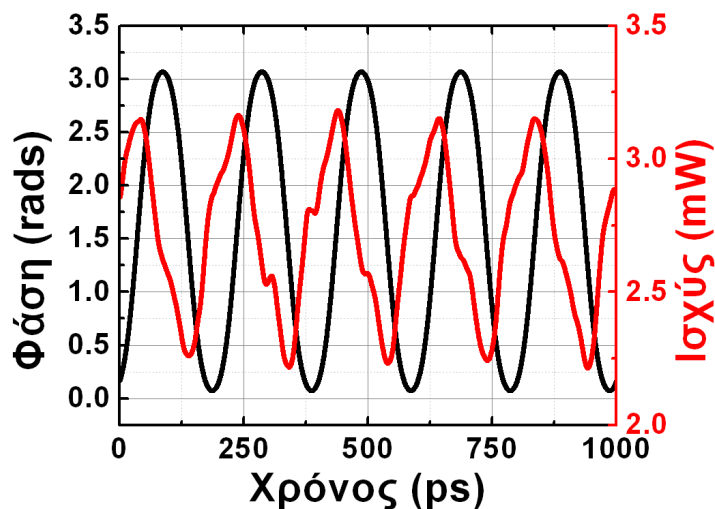
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 5-10: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικά επίπεδα έγχυσης ισχύος και σταθερό ρεύμα πόλωσης ίσο με 2Iκατ. Οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -26 dB, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -20 dB και οι πράσινες σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -14 dB.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, το πλεονέκτημα της αναπαραγωγής φάσης από το εγκλειδωμένο laser επιφέρει μία ανεπιθύμητη παρενέργεια, τη μετατροπή της διαμόρφωσης αυτής σε πλάτος. Το αποτέλεσμα αυτό είναι εμφανές στο σχήμα 5-11 όπου η ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη φάση του εγχεόμενου σήματος οδηγεί σε μία σχεδόν ημιτονική διαταραχή στο πλάτος του εγκλειδωμένου laser.

Ωστόσο, όπως παρατηρούμε στο σχήμα 5-10β, για συχνότητες διαμόρφωσης μικρότερες από τη συχνότητα συντονισμού, η μετατροπή αυτή παραμένει αρκετά περιορισμένη σε τιμές κάτω των -10 dB, καθώς όμως πλησιάζουμε στη συχνότητα συντονισμού ο συντελεστής αυτός αυξάνει υποβαθμίζοντας αισθητά το τελικό σήμα. Η επίδραση αυτή ενισχύεται ακόμα περισσότερο με τη αύξηση του ποσοστού έγχυσης καθώς για συγκεκριμένο ρεύμα πόλωσης η αύξηση αυτή συνοδεύεται από μείωση του συντελεστή απόσβεσης των ταλαντώσεων αποκατάστασης.

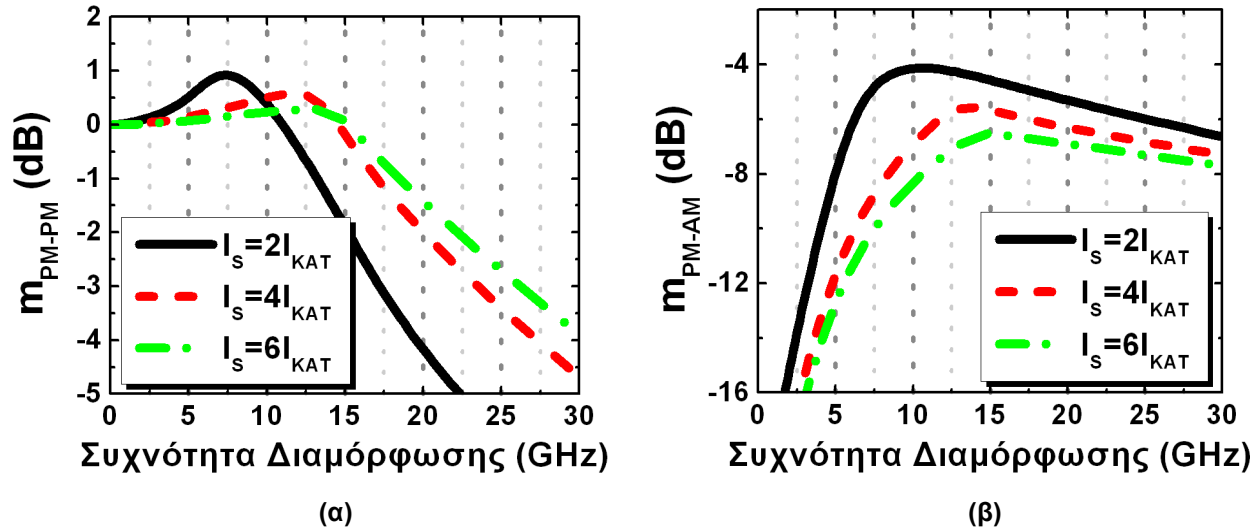


Σχήμα 5-11: Χρονική απεικόνιση της διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου σήματος (μαύρη κυματομορφή) και της διαταραχής που μεταφέρει αυτό στο πλάτος του εγκλειδωμένου laser (κόκκινη κυματομορφή). Η διαμόρφωση φάσης έχει συχνότητα 10 GHz και η εγκλειδωση έχει επιτευχθεί για R=-14 dB και I=2Iκατ.

Αυξάνοντας όμως το ρεύμα πόλωσης του slave laser, αυξάνουμε τη δυναμική των φορέων γεγονός το οποίο μεταφράζεται σε ολίσθηση της συχνότητας των ταλαντώσεων

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

αποκατάστασης του ελεύθερα ταλαντούμενου laser, ω_{fr} , σε υψηλότερες τιμές. Παράλληλα, η αλλαγή του δείκτη διάθλασης λόγω της μεταβολής της πυκνότητας των φορέων οδηγεί σε επιπλέον ολίσθηση της επαυξημένης συχνότητας συντονισμού του εγκλειδωμένου laser σε ακόμα μεγαλύτερες τιμές διευρύνοντας ακόμα περισσότερο το εύρος ζώνης διαμόρφωσης. Επίσης, η αύξηση του πληθυσμού των φορέων μέσω του ρεύματος, οδηγεί σε ταχύτερη απόσβεση των ταλαντώσεων αποκατάστασης αφού πλέον το σύστημα πεδίου-φορέων ανταλλάσσει γρηγορότερα ενέργεια.



Σχήμα 5-12: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικά ρεύματα πόλωσης και σταθερό ποσοστό έγχυσης ισχύος -14 dB. Οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης 2I_{KAT}, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης 4I_{KAT} και οι πράσινες σε ρεύμα πόλωσης 6I_{KAT}.

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 5-12α, η αύξηση του ρεύματος πόλωσης σε τιμή ίση με 6 φορές το κατώφλι οδηγεί σε ολίσθηση της συχνότητας συντονισμού του εγκλειδωμένου laser στα 15 GHz για ποσοστό έγχυσης ίσο με -14 dB. Ταυτόχρονα η γρηγορότερη απόσβεση των ταλαντώσεων αποκατάστασης που περιγράψαμε παραπάνω οδηγεί σε μείωση της κορυφής συντονισμού με αποτέλεσμα να συμπιέζεται η μετατροπή διαμόρφωσης φάσης-σε-πλάτος κατά 4 dB (σχ. 5-12β).

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συνηθειοποιούμε ότι το εγκλειδωμένο laser παρουσιάζει εντυπωσιακές επιδόσεις ως προς την αναπαραγωγή πληροφορίας φάσης του εγχεόμενου πεδίου, διαθέτοντας αυξημένο εύρος ζώνης διαμόρφωσης που μπορεί να ξεπεράσει τα 10 GHz. Ωστόσο, πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ του ρεύματος πόλωσης και του ποσοστού έγχυσης ισχύος ώστε να επιτευχθεί το απαιτούμενο εύρος διαμόρφωσης ενώ ταυτόχρονα να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα η μετατροπή της διαμόρφωσης φάσης-σε-πλάτος.

5.3.2 Απόκριση σε μονοτονική διαμόρφωση πλάτους

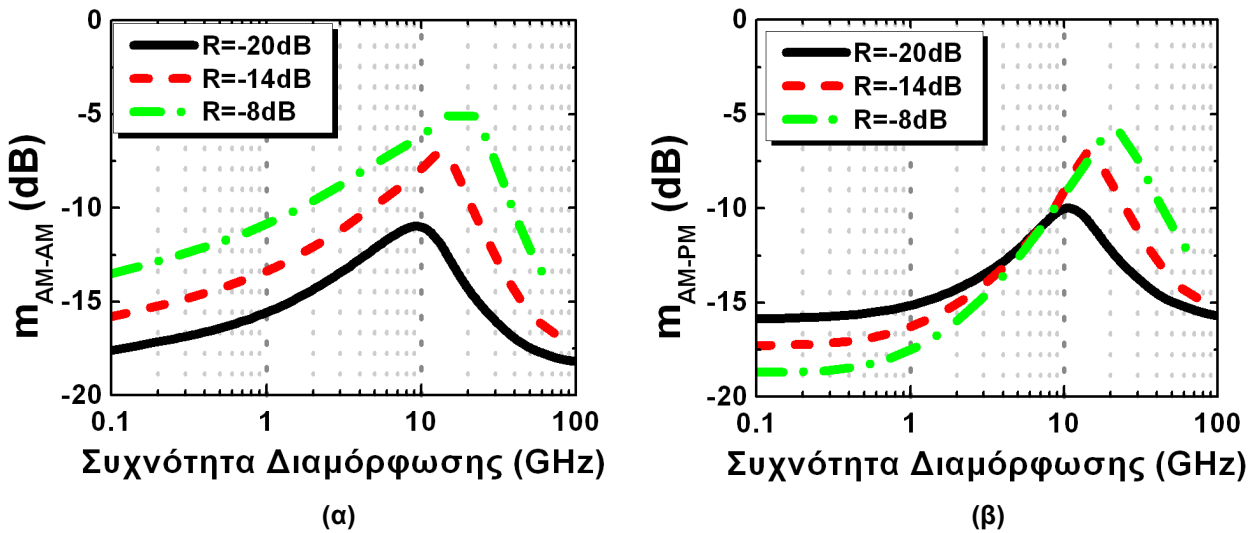
Αφού στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε την απόκριση του εγκλειδωμένου laser σε εγχεόμενο διαμορφωμένο κατά φάση σήμα, το επόμενο βήμα είναι να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά συμπίεσης πλάτους που παρέχει η μέθοδος της εγκλειδωσης φάσης. Έτσι λοιπόν, διαμορφώνοντας ημιτονικά το πλάτος του master laser με βάθος διαμόρφωσης 80% θα αξιολογήσουμε την απόκριση του συστήματος υπολογίζοντας τους κανονικοποιημένους συντελεστές μεταφοράς διαμόρφωσης πλάτους-σε-πλάτος (m_{AM-AM}) και διαμόρφωσης πλάτους-σε-φάση (m_{AM-PM}), οι οποίοι δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

$$m_{AM-AM} = \frac{\Delta P_{slave}/P_{slave}}{\Delta P_{inj}/P_{inj}} \quad (5.19)$$

$$m_{AM-PM} = \frac{\Delta \varphi_{slave}/\varphi_{slave}}{\Delta P_{inj}/P_{inj}} \quad (5.20)$$

Τα P_{inj} , P_{slave} και φ_{slave} αποτελούν αντίστοιχα τη μέση τιμή της ισχύος του εγχεόμενου πεδίου και τη μέση τιμή της ισχύος και της φάσης του slave laser, ενώ τα ΔP_{inj} , ΔP_{slave} και $\Delta \varphi_{slave}$ αποτελούν τις αντίστοιχες διακυμάνσεις των προαναφερθέντων παραμέτρων. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 5-13α, η μεταφορά της διαμόρφωσης πλάτους του εγχεόμενου σήματος στο εγκλειδωμένο laser παραμένει σε επίπεδα χαμηλότερα των -10 dB για ποσοστό έγχυσης -20 dB ακόμα και για περιοχές κοντά στη συχνότητα συντονισμού ($f_{r,enh}=10$ GHz). Το σύστημα δείχνει μία σχετική αναισθησία στις διαταραχές του πλάτους αφού ακόμα και μετά από αύξηση του ποσοτού έγχυσης κατά 12 dB η μεταφορά της διαμόρφωσης πλάτους αυξάνεται κατά μόλις 5 dB για τη συχνότητα των 10 GHz. Ταυτόχρονα, η φάση του εγκλειδωμένου laser παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη από τη διαμόρφωση πλάτους του εγχεόμενου πεδίου επιδεικνύοντας λόγο μεταφοράς πλάτους-σε-φάση μικρότερο των -10 dB για συχνότητες μικρότερες της συχνότητας συντονισμού. Για υψηλά ποσοστά έγχυσης ($R = -8$ dB), παρατηρούμε ότι η επαυξημένη συχνότητα συντονισμού του εγκλειδωμένου laser έχει ολισθήσει σε πραγματικά εντυπωσιακές τιμές, $f_{r,enh}=20$ GHz, αν αναλογιστεί κανείς την αρχική συχνότητα συντονισμού του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser, $f_{r}=4.5$ GHz (σχ. 5-13β).

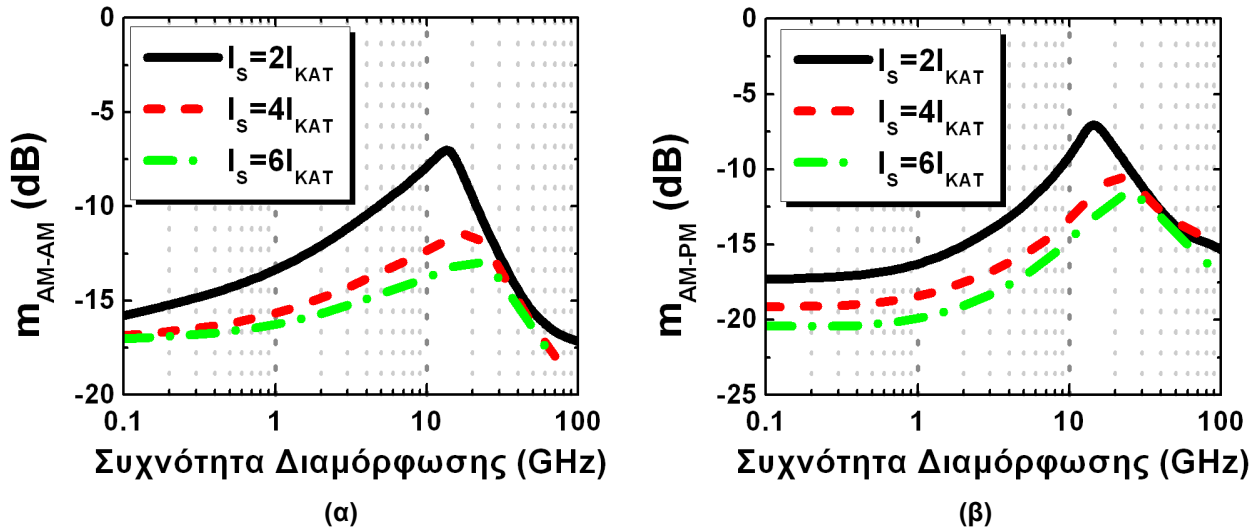


Σχήμα 5-13: Απόκριση πλάτους (α) και φάσης (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης πλάτους του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικά ποσοστά έγχυσης και σταθερό ρεύμα κατωφλίου ίσο με 2Ikατ. Οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -20 dB, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -14 dB και οι πράσινες σε ποσοστό έγχυσης ίσο με -8 dB.

Αν και τα υψηλά επίπεδα έγχυσης ισχύος οδηγούν σε αύξηση της μεταφοράς της διαμόρφωσης πλάτους στο πλάτος και στη φάση του εγκλειδωμένου laser, η αύξηση του ρεύματος πόλωσης μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τις επιδόσεις του συστήματος μέσα από τους μηχανισμούς που περιγράψαμε και στην προηγούμενη παράγραφο.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Έτσι λοιπόν, διατηρώντας σταθερό το ποσοστό έγχυσης σε ένα σχετικά χαμηλό επίπεδο, $R = -14$ dB, επιτυγχάνουμε επιπλέον συμπίεση της μεταφοράς της διαμόρφωσης πλάτους και στο πλάτος και στη φάση του slave laser κατά 5 dB ενώ ταυτόχρονα αυξάνουμε το εύρος ζώνης διαμόρφωσης επιπλέον κατά 20 GHz για ρεύμα πόλωσης έως και 6 φορές το κατώφλι (σχ. 5-14).



Σχήμα 5-14: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου πεδίου για διαφορετικά ρεύματα πόλωσης και σταθερό ποσοστό έγχυσης ισχύος -14 dB. Οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης $2I_{\text{κατ}}$, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης $4I_{\text{κατ}}$ και οι πράσινες σε ρεύμα πόλωσης $6I_{\text{κατ}}$.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις δύο αυτές παραγράφους αναφορικά με την απόκριση φάσης και πλάτους του εγκλειδωμένου laser συμπεραίνουμε ότι, η μέθοδος της εγκλειδωσης φάσης μετατρέπει ένα ημιαγωγικό laser σε έναν εξαιρετικών επιδόσεων ενισχυτή σημάτων διαμόρφωμένων κατά φάση, ο οποίος προσφέρει συμπίεση των εισερχομένων διαταραχών πλάτους της τάξεως των 10 dB, ενώ ταυτόχρονα διαθέτει ένα εύρος ζώνης διαμόρφωσης αρκετών δεκάδων GHz καθιστώντας τον ιδανικό υποψήφιο για έναν μεγάλο αριθμό υψήρρυθμων εφαρμογών. Ο χαρακτηρισμός του συστήματος αυτού ως ενισχυτή προκύπτει από την ιδιότητα κατά την οποία το σήμα στην έξοδο του εγκλειδωμένου laser φέρει τα χαρακτηριστικά φάσης του εγχεόμενου σήματος αλλά ταυτόχρονα η ισχύς του είναι μεγαλύτερη του εγχεόμενου κατά το αντίθετο του ποσοστού έγχυσης (σε dB). Έτσι λοιπόν ο ενισχυτής συμπίεσμένου θορύβου πλάτους που μελετάμε χαρακτηρίζεται από απολαβή $G_{\text{slave}} = -R$ dB, η εικόνα θορύβου του χαρακτηρίζεται από τους συντελεστές $m_{\text{PM-AM}}$, $m_{\text{AM-PM}}$ και $m_{\text{AM-AM}}$ και το εύρος ζώνης διαμόρφωσης ορίζεται από την επαυξημένη συχνότητα συντονισμού $f_{r, \text{enh}}$.

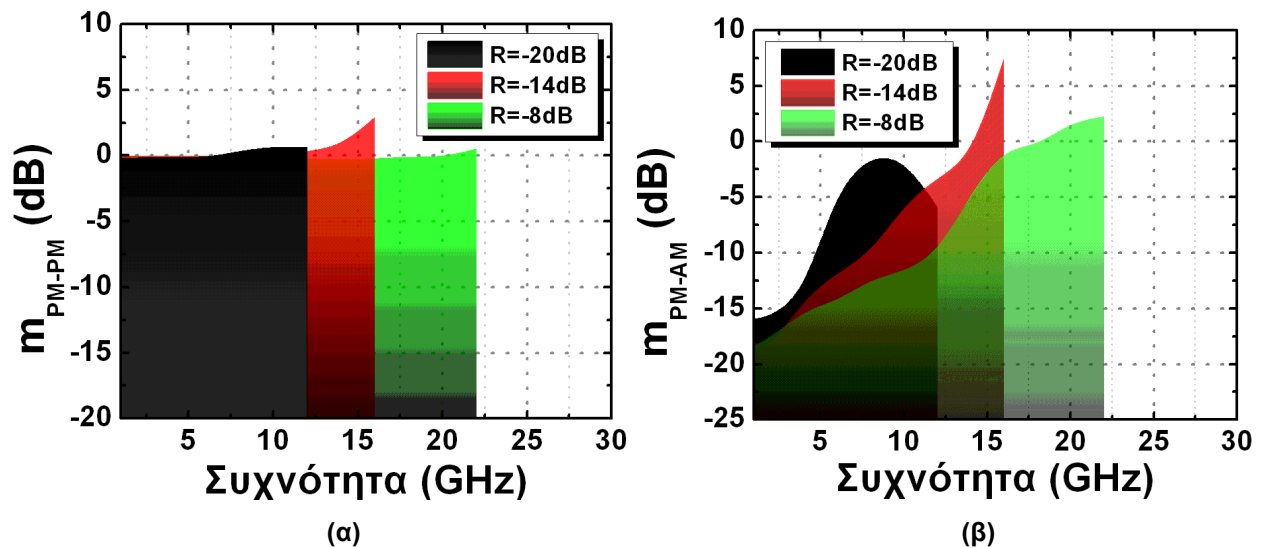
Η εξάρτηση του εύρους ζώνης διαμόρφωσης και των θορύβων του ενισχυτή από το ποσοστό έγχυσης και το ρεύμα οδηγεί σε έναν συμβιβασμό μεταξύ αυτών των παραμέτρων ώστε να βελτιστοποιήσουμε τις επιδόσεις του συστήματος και ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την ενεργειακή του κατανάλωση. Από τα παραπάνω διαγράμματα καταλήγουμε ότι για την αναπαραγωγή ενός σήματος με διαμόρφωση φάσης 10 GHz, ένα ποσοστό έγχυσης οπτικής ισχύος της τάξεως των -14 dB και ρεύματος πόλωσης του slave laser ίσο με 4 φορές το ρεύμα κατωφλίου θα οδηγήσει σε συμπίεση 12 dB του θορύβου φάσης (μεταφορά διαταραχών πλάτους-σε-φάση) και περίπου 8 dB του θορύβου πλάτους (μεταφορά διαμόρφωσης φάσης-σε-πλάτος και μεταφορά διαταραχών πλάτους-σε-πλάτος) ενώ θα προσφέρει ενίσχυση του σήματος της τάξεως των 14 dB.

5.3.3 Απόκριση σε ευρυζωνική διαμόρφωση φάσης

Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε το εύρος ζώνης διαμόρφωσης ενός εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά θορύβου που αυτό παρουσιάζει χρησιμοποιώντας ημιτονικές διαταραχές πλάτους και φάσης. Όμως η μονοτονική διαμόρφωση δεν περιέχει υψηλό φασματικό περιεχόμενο και ως εκ τούτου τα δυναμικά χαρακτηριστικά της είναι εύκολο να αναπαραχθούν από ένα εγκλειδωμένο laser. Για να αξιολογήσουμε λοιπόν πλήρως τις δυνατότητες και τη συμπεριφορά της εγκλειδωσης φάσης θα εξετάσουμε το σύστημα διαμορφώνοντας τη φάση του master laser με ψευδοτυχαία παλμοσειρά διαφορετικών ρυθμών.

Διατηρώντας αρχικά το ρεύμα πόλωσης του slave laser σταθερό και ίσο με 2 φορές το κατώφλι υπολογίζουμε εκ νέου τους συντελεστές m_{PM-PM} και m_{PM-AM} για διαφορετικές τιμές του ποσοστού έγχυσης.

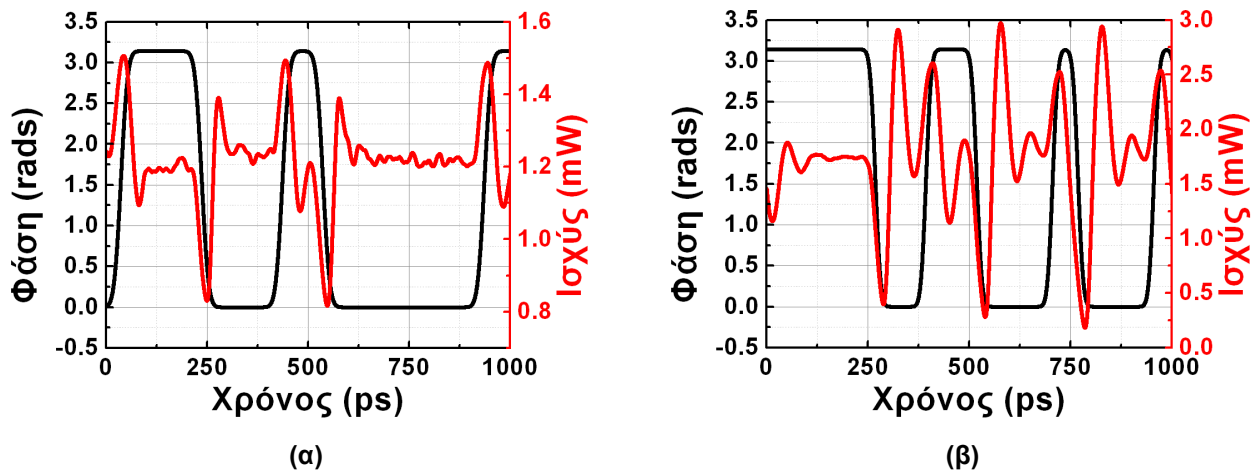
Σύμφωνα με το σχήμα 5-15α, το εγκλειδωμένο laser αν και διατηρεί σχεδόν το ίδιο εύρος ζώνης διαμόρφωσης με το αντίστοιχο μετρηθέν (στα 3 dB) στην περίπτωση της μονοτονικής διαμόρφωσης, η συμπεριφορά του πέραν της περιοχής αυτής αλλάζει δραματικά αφού πλέον το slave laser αδυνατεί να αναπαράγει την πληροφορία φάσης του εγγεόμενου πεδίου. Σε αντίθεση λοιπόν με τη μονοτονική διαμόρφωση, όπου ακόμα και για συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας συντονισμού του slave laser αυτό εξακολουθεί να αναπαράγει την πληροφορία φάσης με μειωμένο όμως πλάτος λόγω της υστέρησης στην απόκριση του, η ταχύτερη δυναμική και η ασυνέχεια μεταξύ των φασικών μεταβάσεων που παρουσιάζει η παλμοσειρά οδηγεί το σύστημα σε ολοκληρωτική απώλεια της εγκλειδωσης όταν ο ρυθμός ξεπεράσει τη συχνότητα συντονισμού του slave laser.



Σχήμα 5-15: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγγεόμενου πεδίου για διαφορετικά ποσοστά έγχυσης και ρεύμα πόλωσης ίσο με $2I_{κατ}$. Οι μαύρες καμπύλες αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης -20 dB, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ποσοστό έγχυσης -14 dB και οι πράσινες σε ποσοστό έγχυσης -8 dB.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την παραπάνω συμπεριφορά ας παρατηρήσουμε το σχήμα 5-16, στο οποίο παρουσιάζονται οι κυματομορφές φάσης του εγγεόμενου πεδίου και πλάτους του slave laser για δύο διαφορετικούς ρυθμούς πληροφορίας. Θεωρώντας ότι οι παλμοί πληροφορίας έχουν χρόνο ανόδου και χρόνο καθόδου που ο καθένας τους ισούται με το $1/4$ της περιόδου του παλμού, οι μεταβάσεις μεταξύ διαδοχικών καταστάσεων φάσης (από 0 σε π και αντίστροφα) αντιστοιχούν σε συχνότητες της τάξεως των 40 GHz και 64 GHz για τις παλμοσειρές των 10 Gb/s και 16 Gb/s,

αντίστοιχα. Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω, κατά τις μεταβάσεις αυτές, το slave laser δε μπορεί να ακολουθήσει το εγχεόμενο σήμα αφού αυτό ωθείται εκτός του εύρους εγκλειδωσης και το σύστημα οδηγείται σε ταλαντώσεις αποκατάστασης με τους φορείς να προσπαθούν να επαναφέρουν την ισορροπία στο σύστημα αυξομειώνοντας την απολαβή του laser.

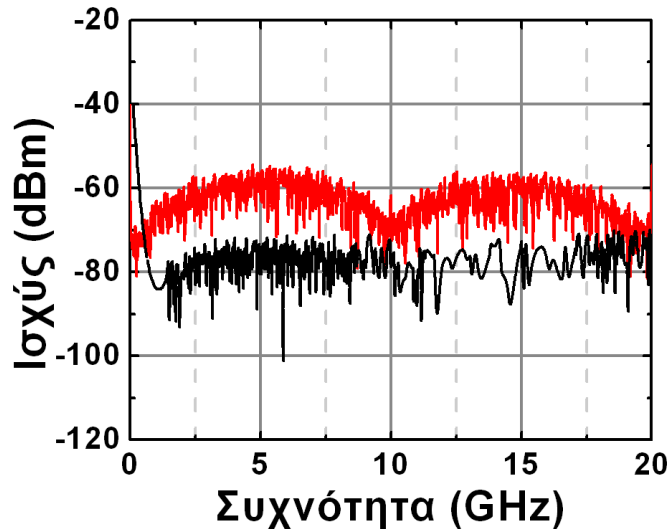


Σχήμα 5-16: Χρονική απεικόνιση της διαμόρφωσης φάσης του εγχεόμενου σήματος (μαύρη κυματομορφή) και της διαταραχής που μεταφέρει αυτή στο πλάτος του εγκλειδωμένου laser (κόκκινη κυματομορφή) για πληροφορία 10 Gb/s (α) και 16 Gb/s (β) και συνθήκες εγκλειδωσης $R=-14$ dB και $I=2I_{\text{κατ}}$.

Οι ταλαντώσεις αυτές, για τις συνθήκες εγκλειδωσης που μελετάμε, έχουν συχνότητα 10 GHz γεγονός το οποίο σημαίνει ότι οριακά προλαβαίνουν να αποσβέσουν στη διάρκεια ενός παλμού 10 Gb/s και έτσι να κλειδώσουν τη φάση του slave laser στη φάση του εγχεόμενου σήματος. Όταν όμως ο ρυθμός της πληροφορίας είναι μεγαλύτερος από τη συχνότητα συντονισμού η αποκατάσταση της ισορροπίας διαρκεί αρκετές περιόδους με αποτέλεσμα το slave laser να καταλήγει σε έναν ατέρμωνα κύκλο αλεπάλληλων ταλαντώσεων χωρίς να καταφέρει να κλειδώσει στο εγχεόμενο πεδίο. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι όσο πιο μεγάλη είναι η φασματική ολίσθηση που έχει το σήμα τόσο μεγαλύτερες είναι οι αυξομειώσεις της απολαβής ώστε να επιτευχθεί η ισορροπία και επομένως τόσο περισσότερο αυξάνεται ο συντελεστής μετατροπής διαμόρφωσης φάσης-σε-πλάτος (σχ. 5-15β). Στο σχήμα 5-15β παρατηρούμε ότι για μία αύξηση της συχνότητας διαμόρφωσης της τάξεως των 2 Gb/s ο συντελεστής m_{PM-AM} αυξάνει κατά 5 dB, τιμή αισθητά μεγαλύτερη συγκρινόμενη με την αντίστοιχη στην περίπτωση της μονοτονικής διαμόρφωσης.

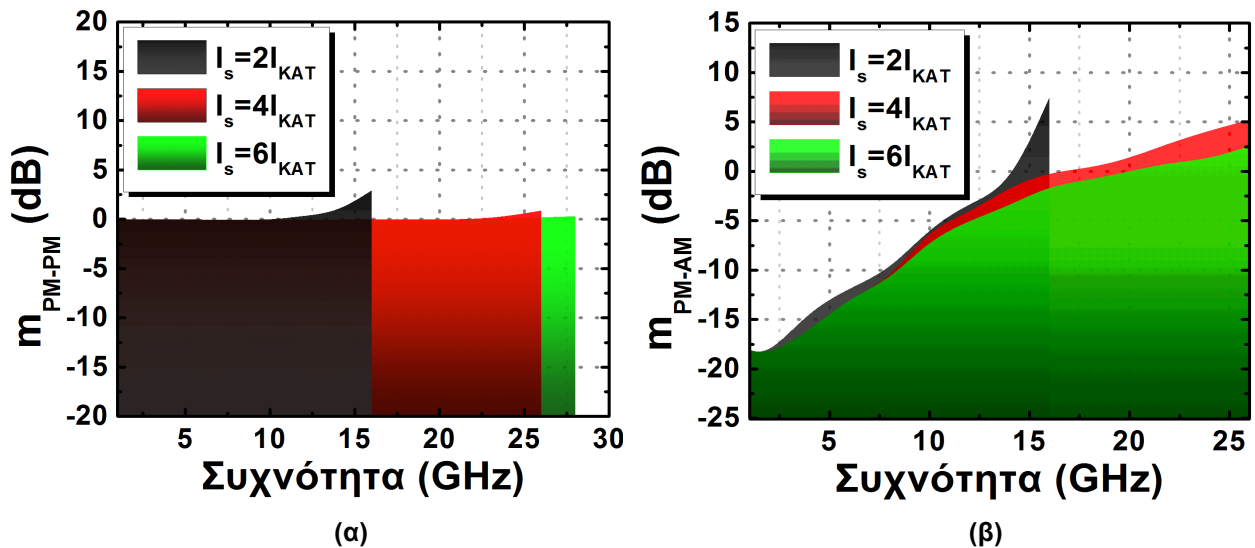
Οι ταλαντώσεις αποκατάστασης που παράγονται κατά τις φασικές μεταβάσεις του εγχεόμενου σήματος έχουν ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο το οποίο έχει περιοδικότητα ίση με το διπλάσιο της περιόδου ενός παλμού. Η τυχαιότητα της παλμοσειράς σε συνδυασμό με το πλούσιο φασματικό περιεχόμενο των ταλαντώσεων αποκατάστασης έχουν ως αποτέλεσμα τη διόγκωση του ηλεκτρικού φάσματος του slave laser γύρω από τη μισή συχνότητα διαμόρφωσης, ενώ ταυτόχρονα η έλειψη συνεχούς συνιστώσας στο τελικό σήμα, λόγω των διπολικών ταλαντώσεων, οδηγεί στη συμπίεση του φάσματος στις χαμηλές συχνότητες. Στο σχήμα 5-17 απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ των ηλεκτρικών φασμάτων του slave laser όταν αυτό αναπαράγει ένα 10 Gb/s PSK σήμα και ένα σήμα το οποίο δε φέρει καμία διαμόρφωση.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 5-17: Ηλεκτρικό φάσμα του εγκλειδωμένου laser για την περίπτωση εγχέομένου σήματος με 10 Gb/s PSK διαμόρφωση (κόκκινο φάσμα) και χωρίς καθόλου διαμόρφωση (μαύρο φάσμα).

Αν και για ρυθμούς μικρότερους του εύρους διαμόρφωσης του slave laser, οι ταλαντώσεις αποκατάστασης περιορίζονται αυστηρά στην περιοχή των φασικών μεταβάσεων και δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα την οφέλιμη πληροφορία, ωστόσο επιβάλλεται το πλάτος τους αλλά και ο χρόνος απόσβεσης να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Έτσι, κατ' αναλογία με τα όσα μελετήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, η αύξηση του ρεύματος πόλωσης του slave laser μπορεί να βελτιώσει δραματικά τις επιδόσεις του συστήματος. Διατηρώντας λοιπόν σταθερό στα -14 dB το ποσοστό έγχυσης και αυξάνοντας το ρεύμα πόλωσης έως και 6 φορές το κατώφλι παρατηρούμε ότι όχι μόνο βελτιώνεται η συμπίεση της μετατροπής της διαμόρφωσης φάσης-σε-πλάτος αλλά ταυτόχρονα διευρύνεται το εύρος διαμόρφωσης του slave laser επιτρέποντας την αναπαραγωγή PSK σημάτων με ρυθμό που αγγίζει αλλά και ξεπερνά τα 25 Gb/s.



Σχήμα 5-18: Απόκριση φάσης (α) και πλάτους (β) του εγκλειδωμένου laser συναρτήσει της συχνότητας διαμόρφωσης φάσης του εγχέομένου πεδίου για διαφορετικές τιμές του ρεύματος πόλωσης και σταθερό ποσοστό έγχυσης ίσο με -14 dB. Οι μαύρες καμπύλες αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης 40 mA, οι κόκκινες αντιστοιχούν σε ρεύμα πόλωσης 80 mA και οι πράσινες σε ρεύμα πόλωσης 120 mA.

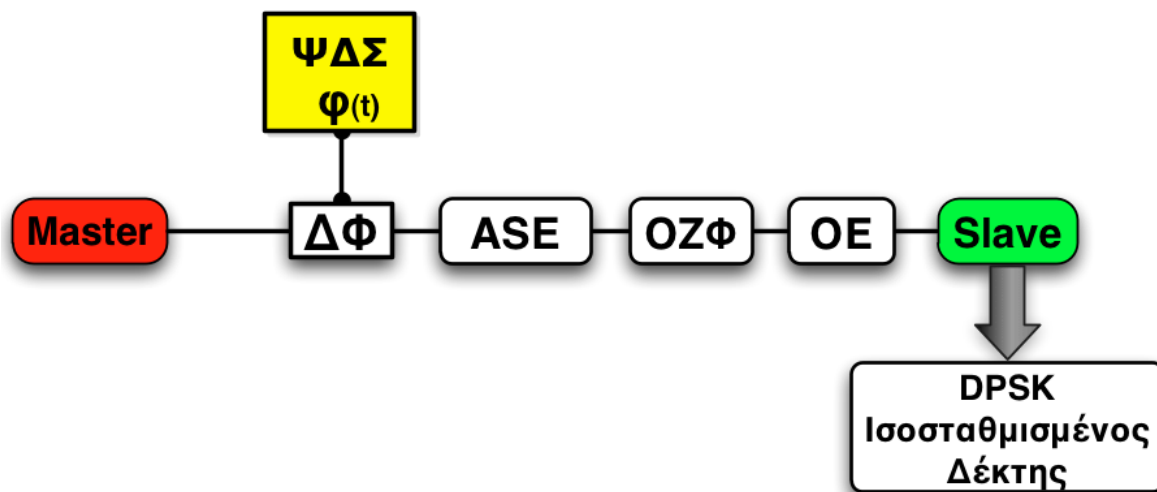
5.4 Αμιγώς οπτική αναγέννηση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση με χρήση εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser

5.4.1 Αριθμητική μελέτη

Στην παράγραφο 5.3 μελετήσαμε την απόκριση φάσης του εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser σε μονοτονική και ευρυζωνική διαμόρφωση φάσης ενώ ταυτόχρονα υπολογίσαμε το βαθμό συμπίεσης των διαταραχών πλάτους που μεταφέρονται από το εγχεόμενο σήμα στο slave laser. Από τα παραπάνω αποτελέσματα λοιπόν καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το εγκλειδωμένο laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας άριστος αναγεννητής σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση προσφέροντας διευρυμένο εύρος ζώνης διαμόρφωσης, το οποίο μπορεί να φθάσει τα 30 GHz, συμπίεση θορύβου πλάτους μέχρι και 10 dB και συντελεστή ενίσχυσης, ο οποίος αγγίζει τα 20 dB.

Για να αξιολογήσουμε το σύστημα σε μία πιο αληθοφανή τηλεπικοινωνιακή περίπτωση θα μελετήσουμε τις επιδόσεις του για αναγέννηση PSK και QPSK σημάτων υψηλών ρυθμών τα οποία υποβαθμίζονται από ευρυζωνικό θόρυβο αυθόρμητης εκπομπής. Ο θόρυβος ASE είναι η βασική πηγή θορύβου σε μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη, η οποία προστίθεται από τις ενδιάμεσες βαθμίδες οπτικής ενίσχυσης και επιβαρύνει τη φάση και το πλάτος του διαδιδόμενου σήματος.

Για τον σκοπό αυτό προσομοιώνουμε το σύστημα master-slave laser του παρακάτω διαγράμματος χρησιμοποιώντας τα μοντέλα των laser και των επιμέρους βαθμίδων του διαμορφωτή φάσης και της πηγής θορύβου ASE που αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 5-19: Διάγραμμα διασύνδεσης των λειτουργικών μονάδων για την αριθμητική μελέτη της εγκλειδωσης φάσης. ΨΔΣ: Ψευδοτυχαία δυαδική σειρά, ASE: μονάδα προσθήκης θορύβου ASE, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΟΕ: οπτική εξασθένηση και ΦΔ: φωτοδίοδος.

Το master laser λειτουργεί σε ρεύμα πόλωσης 40 mA το οποίο του προσδίδει ισχύ εξόδου ίση με 5 mW. Στη συνέχεια μία ψευδοτυχαία ακολουθία ψηφιακών παλμών φορτώνεται στη φάση του σήματος μέσω ενός εξωτερικού διαμορφωτή, ο οποίος μοντελοποιείται με βάση του πίνακες μεταφοράς που δίνονται από τις σχέσεις 5.21, για τον PSK διαμορφωτή, και 5.22, για τον QPSK διαμορφωτή.

$$E_{PSK} = \frac{E_{in}}{2} [1 + e^{i\varphi(t)}] \quad (5.21)$$

$$E_{QPSK} = \frac{E_{in}}{4} [1 + e^{i\varphi_1(t)}] + \frac{E_{in}}{4} [1 + e^{i(\varphi_2(t) + \frac{\pi}{2})}] \quad (5.22)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, E_{in} είναι το ηλεκτρικό πεδίο στην έξοδο του master laser και $\varphi(t)$, $\varphi_{1(t)}$ και $\varphi_{2(t)}$ είναι οι διαφορετικές ροές πληροφορίας με πλάτος π που διαμορφώνουν τη φάση του σήματος ($\varphi(t)$ για τον PSK διαμορφωτή και $\varphi_{1(t)}$ και $\varphi_{2(t)}$ για τον QPSK διαμορφωτή). Οι προαναφερθείσες φάσεις έχουν προέλθει ύστερα από κατάλληλη κωδικοποίηση των δεδομένων (λογική πράξη XOR μεταξύ διαδοχικών bit) ώστε τα σήματα που προκύπτουν να φέρουν διαφορική διαμόρφωση φάσης (DPSK και DQPSK).

Στο διαμορφωμένο κατά φάση σήμα προστίθεται θόρυβος αυθόρμητης εκπομπής με φασματική πυκνότητα ισχύος που εκφράζεται από τη σχέση 4.39. Μεταβάλλοντας την τιμή του συντελεστή ενίσχυσης, G , ουσιαστικά ελέγχουμε τον λόγο σήματος-προς-θόρυβο του εγχεόμενου στο slave laser σήματος.

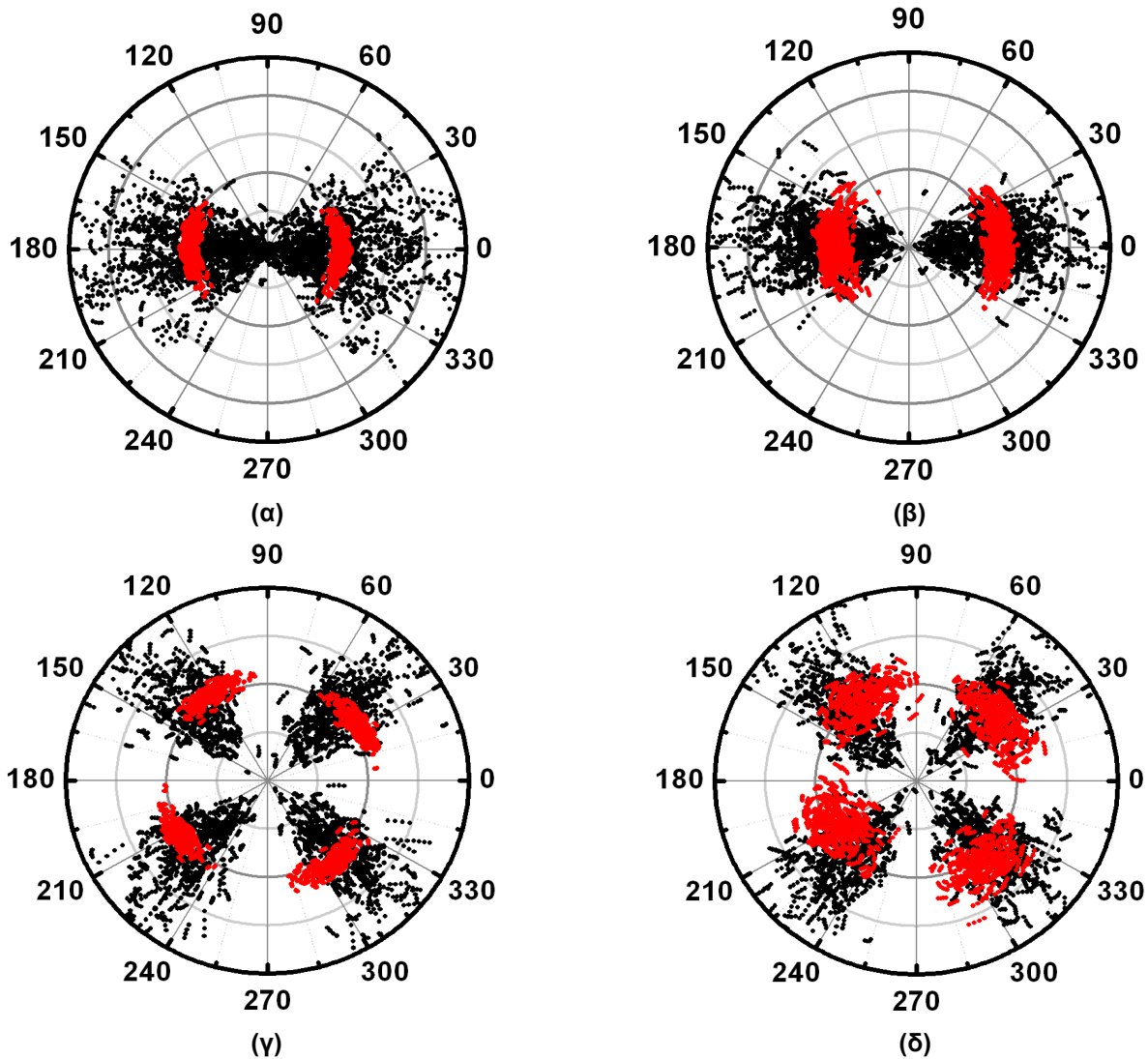
Τέλος, το διαμορφωμένο κατά φάση σήμα αφού φιλτραριστεί με τη χρήση ενός ζωνοπερατού φίλτρου εύρους ζώνης 1 nm, ώστε να περιοριστεί ο θόρυβος εντός του φασματικού παραθύρου του σήματος, η ισχύς του ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να ισούται με $R \cdot P_{slave}$ και εισάγεται στο slave laser όπου και πραγματοποιείται η διαδικασία της εγκλειδωσης φάσης. Το αναγεννημένο οπτικό σήμα στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται με τη βοήθεια ισοσταθμισμένου δέκτη με διαφορική λήψη, ο οποίος υλοποιείται με τη βοήθεια της μήτρας σκέδασης 3.9 για το DPSK σήμα και με κατάλληλη τροποποίηση αυτής για το DQPSK. Η φωτοδίοδος θεωρούμε ότι έχει 40 GHz εύρος ζώνης και χαρακτηρίζεται από θερμικό θόρυβο και θόρυβο βολής οι φασματικές πυκνότητες ισχύος των οποίων εκφράζονται από τις σχέσεις 3.3 και 3.4, αντίστοιχα.

Ρυθμίζοντας λοιπόν κατάλληλα την ισχύ του προστιθέμενου θορύβου ώστε να διατηρούμε σταθερό τον λόγο σήματος-προς-θόρυβο του εγχεόμενου σήματος πραγματοποιούμε μία σειρά προσομοιώσεων ώστε να εξάγουμε τις συνθήκες βέλτιστης αναγέννησης PSK και QPSK σημάτων με ρυθμούς συμβόλων 10 Gbaud και 25 Gbaud.

Στα πολικά διαγράμματα του σχήματος 5-20 απεικονίζονται τα υποβαθμισμένα από θόρυβο σήματα καθώς και τα αντίστοιχα αναγεννημένα μετά από το στάδιο της εγκλειδωσης φάσης. Για την κάθε περίπτωση διαμόρφωσης και ρυθμού έχουν επιλεγεί διαφορετικές συνθήκες εγκλειδωσης.

Για σταθερό λόγο σήματος-προς-θόρυβο ίσο με 18 dB, το εγκλειδωμένο laser παρουσιάζει εντυπωσιακές επιδόσεις αναγέννησης καταφέροντας να συμπιέσει το θόρυβο πλάτους του υποβαθμισμένου σήματος κατά 9.41 dB, 4.54 dB, 7.45 dB και 4.27 dB για τα 10 Gb/s PSK, 25 Gb/s PSK, 20 Gb/s QPSK και 50 Gb/s QPSK σήματα με ποσοστό έγχυσης για την κάθε περίπτωση ίσο με -17 dB, -13 dB, -12 dB και -5 dB αντίστοιχα.

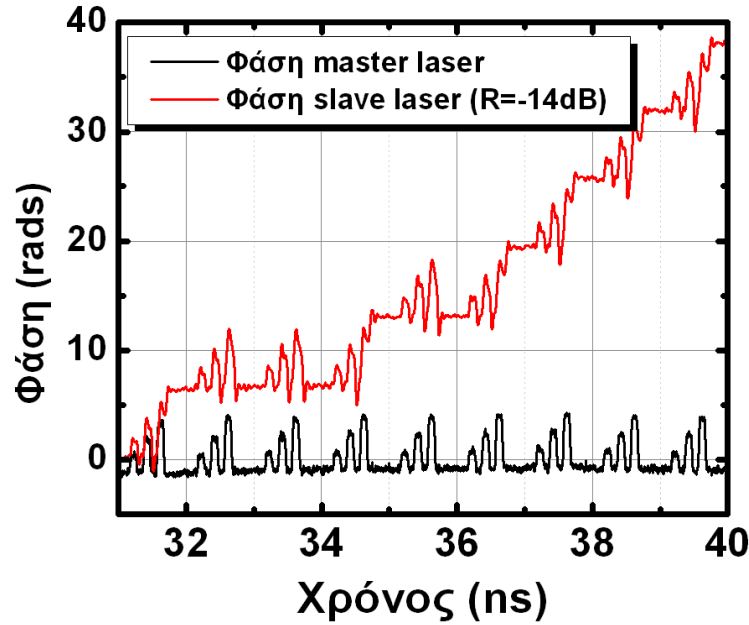
Από τα παρακάτω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι για να επιτευχθεί η εγκλειδωση του slave laser στην περίπτωση ενός QPSK σήματος απαιτείται υψηλότερο ποσοστό έγχυσης και ρεύμα κατωφλίου από ότι απαιτείται για ένα PSK σήμα ίδιου ρυθμού συμβόλων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα QPSK σήμα περιέχει μεταβάσεις φάσης που φθάνουν τα $3\pi/2$, οι οποίες οδηγούν σε στιγμιαία ολισθήση συχνότητας που ξεπερνά κατά πολύ το εύρος ζώνης εγκλειδωσης του slave laser με αποτέλεσμα τη αδυναμία του τελευταίου να ακολουθήσει τις συγκεκριμένες μεταβάσεις. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί στο σχήμα που ακολουθεί, στο οποίο απεικονίζεται η απόκριση ενός slave laser σε ολισθήσεις φάσης του master laser ίσες με $\pi/2$, π και $3\pi/2$ για ρυθμό μεταβάσεων 10 Gb/s.



Σχήμα 5-20: Πολικά διαγράμματα αστερισμών του υποβαθμισμένου από θόρυβο ASE σήματος πριν (μαύρες κουκίδες) και μετά την αναγέννηση (κόκκινες κουκίδες). Τα διαγράμματα (α) και (β) απεικονίζουν τις επιδόσεις της εγκλειδωσης φάσης για 10 Gb/s και 25 Gb/s PSK σήματα ενώ τα διαγράμματα (γ) και (δ) απεικονίζουν τις επιδόσεις της εγκλειδωσης φάσης για 20 Gb/s και 50 Gb/s QPSK σήματα.

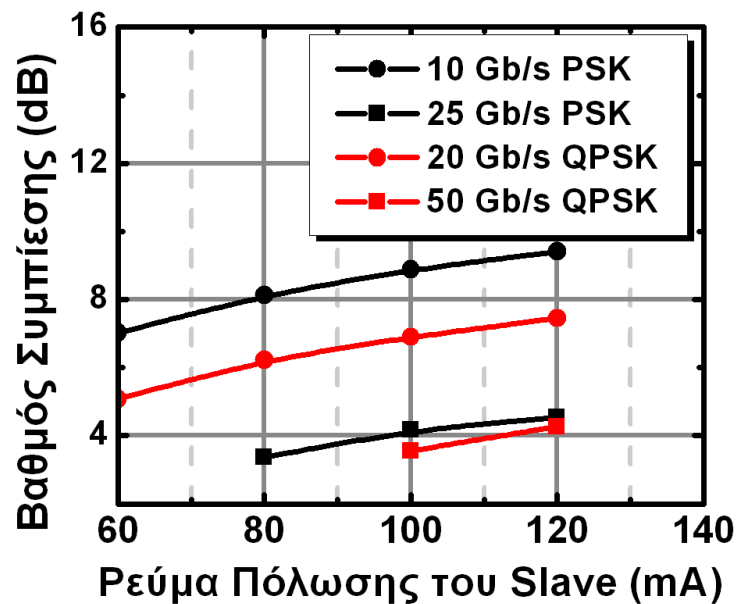
Για ποσοστό έγχυσης ίσο με -14 dB και ρεύμα κατωφλίου 40 mA παρατηρούμε ότι ενώ το slave laser μπορεί να ακολουθήσει τις μεταβάσεις φάσης μέχρι και π , όταν η φάση του master ολισθήσει κατά $3\pi/2$ τα χαμηλά δυναμικά χαρακτηριστικά του slave laser οδηγούν σε μία καθυστέρηση της απόκρισής του με αποτέλεσμα να μην προλαβαίνει να αποκατασταθεί η ισορροπία του συστήματος μέχρι την έλευση της επόμενης μετάβασης. Παρατηρώντας βέβαια με προσοχή το σχήμα 5-21, βλέπουμε ότι για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας υπάρχουν χρονικές στιγμές που το slave laser καταφέρνει να αποκριθεί ακόμα και στις μεγάλες ολισθήσεις φάσης, ωστόσο η όλη συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο βαθμό αστάθειας. Όπως εύκολα μπορεί να συμπεράνει κανείς μελετώντας την παραπάνω συμπεριφορά, η αύξηση του πλάτους των μεταβάσεων σε συνδυασμό με την αύξηση του ρυθμού οδηγεί σε ραγδαία αύξηση των στιγμιαίων συχνοτικών ολισθήσεων του εγχεόμενου σήματος με αποτέλεσμα να απαιτείται διεύρυνση του εύρους ζώνης εγκλειδωσης του slave laser ώστε αυτό να μπορέσει να αποκριθεί στις προκαλούμενες διαταραχές.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 5-21: Απόκριση του slave laser σε διάφορες τιμές ολίσθησης φάσης του master laser για ρυθμό 10 Gb/s. Το slave laser λειτουργεί σε ρεύμα πόλωσης ίσο με 40 mA ενώ το ποσοστό έγχυσης ισούται με $R=-14$ dB.

Τα διαγράμματα του σχήματος 5-20 λήφθηκαν για ρεύμα πόλωσης του slave laser ίσο με 120 mA, δηλαδή 6 φορές το ρεύμα κατωφλίου. Ωστόσο, για να αποκτήσουμε μία πιο ολοκληρωμένη άποψη για τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις του εγκλειδωμένου laser παραθέτουμε το σχήμα 5-22 στο οποίο απεικονίζεται ο συντελεστής συμπίεσης θορύβου πλάτους συναρτήσεως του ρεύματος πόλωσης του slave laser για σταθερό ποσοστό έγχυσης, διαφορετικό για κάθε περίπτωση διαμόρφωσης και επιλεγμένο κατάλληλα ώστε να προσφέρει τη μέγιστη δυνατή συμπίεση θορύβου και την πλήρη αναπαραγωγή της πληροφορίας.



Σχήμα 5-22: Συμπίεση θορύβου πλάτους συναρτήσεως του ρεύματος πόλωσης του slave laser για διαφορετικές διαμορφώσεις και σταθερό ποσοστό έγχυσης για την κάθε μία (-17 dB για 10 Gb/s PSK, -13 dB για 25 Gb/s PSK, -12 dB για 20 Gb/s QPSK και -5 dB για 50 Gb/s QPSK).

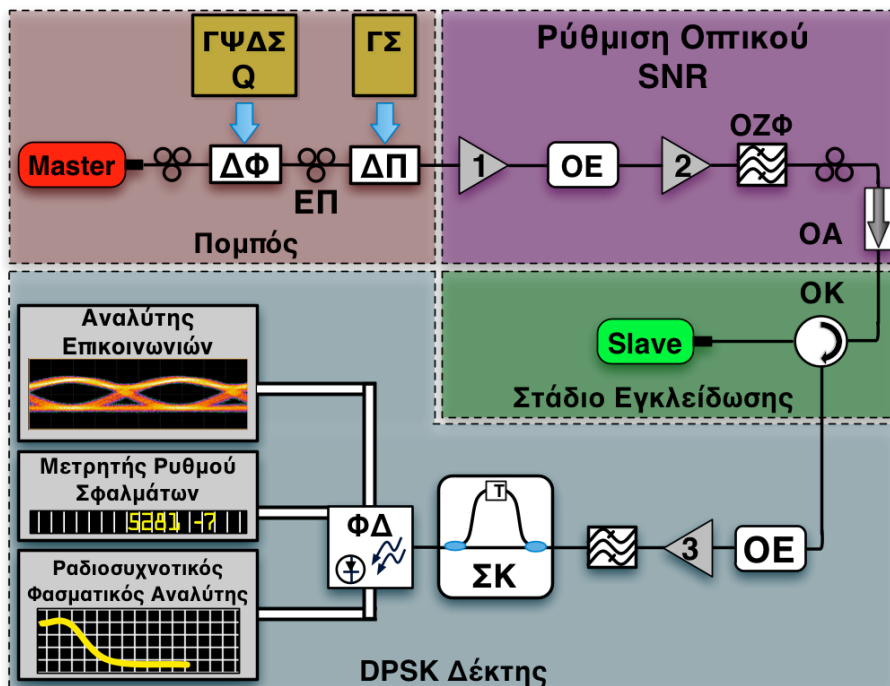
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Η αύξηση του ρεύματος πόλωσης του slave laser οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή συμπίεσης θορύβου πλάτους κατά περίπου 0.05 dB/mA ποσοστό το οποίο παραμένει σχεδόν σταθερό για όλους τους ρυθμούς σημάτων και για όλη την περιοχή που ρευμάτων που μελετάμε. Για αρκετά υψηλούς ρυθμούς και για δεδομένο ποσοστό έγχυσης, η μείωση του ρεύματος πόλωσης κάτω από μία συγκεκριμένη για κάθε περίπτωση τιμή οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια. Οι τιμές αυτές είναι τα 80 mA για την περίπτωση του 25 Gb/s PSK και τα 100 mA για την περίπτωση του 50 Gb/s QPSK.

Από την παραπάνω μελέτη γίνεται σαφές ότι το εγκλειδωμένο ημιαγωγικό laser μπορεί να αποτελέσει έναν άριστο αναγεννητή υψίρρυθμων σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση συνδυάζοντας ταυτόχρονα την απλότητα, το χαμηλό κόστος, το μικρό όγκο και τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Στην παράγραφο που ακολουθεί θα παρουσιαστεί μία εκτενής πειραματική επιβεβαίωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της παρούσας παραγράφου.

5.4.2 Πειραματική μελέτη

Με βάση την αριθμητική μελέτη που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 5.3 υλοποιήσαμε μία σειρά πειραμάτων για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων αυτών και την αξιολόγηση των επιδόσεων ενός πραγματικού εγκλειδωμένου ημιαγωγικού ενισχυτή laser. Η πειραματική διάταξη υλοποιήθηκε με βάση το διάγραμμα του σχήματος 5-23. Ως master laser χρησιμοποιήθηκε μια πηγή laser εξωτερικής κοιλότητας η οποία προσφέρει σταθερή μονοχρωματική φασματική γραμμή εξαιρετικά καλού εύρους με δυνατότητα ρύθμισης του μήκους κύματος εκπομπής σε μία περιοχή από τα 1545 nm έως τα 1565 nm. Η φάση του master laser διαμορφώνεται, μέσω ενός εξωτερικού διαμορφωτή φάσης (Δ.Φ), από μία γεννήτρια ψευδοτυχαίας σειράς παλμών με περιοδικότητα $2^{31}-1$.



Σχήμα 5-23: Διάγραμμα της πειραματικής υλοποίησης ενός εγκλειδωμένου ενισχυτή ημιαγωγικού laser. ΕΠ: ελεγκτής πόλωσης, ΔΜ: διαμορφωτής φάσης, ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους, ΓΨΔΣ: γεννήτρια ψευδοτυχαίας δυαδικής σειράς, ΓΣ: γεννήτρια ραδιοσυχνοτήτων, ΟΑ: οπτικός απομονωτής, ΟΕ: οπτικός εξασθενητής, EDFA1: προενισχυτής ρυθμίζει τη στάθμη του οπτικού σήματος σήμα-προς-θόρυβο, EDFA2: ρυθμίζει τον λόγο του οπτικού σήματος-προς-θόρυβο και το ποσοστό έγχυσης, EDFA3: τελικός ενισχυτής για τη λήψη, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΟΚ: οπτικός κυκλοφορητής, ΣΚ: συμβολόμετρο καθυστέρησης, ΦΔ: φωτοδίοδος.

Ο ρυθμός διαμόρφωσης περιορίστηκε στα 10 Gb/s λόγω έλλειψης εξοπλισμού μεγαλύτερων ρυθμών. Το διαμορφωμένο κατά φάση φως στην έξοδο του Δ.Φ διέρχεται διά μέσου ενός εξωτερικού διαμορφωτή πλάτους (Δ.Π), ο οποίος οδηγείται από μία γεννήτρια ραδιοσυχνοτήτων που εισάγει διαταραχές πλάτους στο σήμα προσπαθώντας να μιμηθεί την επίδραση του θορύβου πλάτους. Η χρήση του συγκεκριμένου τμήματος της πειραματικής διάταξης θα μελετηθεί και εξηγηθεί εκτενώς παρακάτω. Οι εξωτερικοί διαμορφωτές φάσης και πλάτους που χρησιμοποιούνται σε αυτό το πείραμα είναι ηλεκτρο-οπτικοί διαμορφωτές κατασκευασμένοι από LiNbO_3 η λειτουργία των οποίων βασίζεται στο φαινόμενο Pockels, όπως εξηγήσαμε στο κεφάλαιο 3, γεγονός το οποίο τους κάνει ιδιαίτερα ευαίσθητους στην πόλωση του εισερχόμενου οπτικού σήματος. Επομένως, πριν από κάθε τέτοιο διαμορφωτή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5-23, εισάγουμε ένα στοιχείο ελέγχου της πόλωσης (Ε.Π) ώστε να ευθυγραμμίσουμε τον οπτικό άξονα του σήματος με τον άξονα της διαμόρφωσης του κάθε διαμορφωτή. Όταν επιτευχθεί η σωστή ευθυγράμμιση του σήματος τότε έχουμε πλήρη μεταφορά της διαμόρφωσης και λαμβάνουμε τη μέγιστη οπτική ισχύ στην έξοδο του διαμορφωτή. Στη συνέχεια το σήμα περνάει μέσα από έναν ρυθμιστή οπτικής απόσβεσης ο οποίος σε συνδυασμό με τον οπτικό ενισχυτή ερβίου που ακολουθεί ρυθμίζουν τον λόγο του οπτικού σήματος-προς-θόρυβο (OSNR). Όσο χαμηλότερη ισχύ έχει το σήμα που εισέρχεται στον πρώτο οπτικό ενισχυτή τόσο μεγαλύτερος είναι ο θόρυβος αυθόρμητης εκπομπής (ASE) που επιβαρύνει το σήμα μειώνοντας το OSNR του. Εδώ πρέπει να προσθέσουμε ότι ο θόρυβος ASE επιδρά και στο πλάτος και στη φάση του σήματος. Η αρχική ισχύς του σήματος στην έξοδο του master laser είναι 6 dBm, ενώ στην είσοδο του πρώτου ενισχυτή λόγω των ενδιάμεσων απωλειών που εισάγονται από τα στάδια διαμόρφωσης (≈ -7 dB), τους συνδετήρες και τον ρυθμιστή απωλειών (≈ -5 dB) φτάνει μόλις τα -6 dBm. Έτσι λοιπόν, ο πρώτος ενισχυτής ρυθμίζεται να έχει μία σταθερή ισχύ εξόδου ίση με 0 dBm ώστε να μην επιβαρύνει ιδιαίτερα το σήμα και επιπλέον να δίνει στον δεύτερο ενισχυτή τη δυνατότητα ελέγχου του ποσοστού έγχυσης σε ένα μεγάλο εύρος ώστε να μελετηθούν επαρκώς οι συνθήκες εγκλειδωσης για το στάδιο της εγκλειδωσης φάσης που ακολουθεί. Το σήμα στην έξοδο του δεύτερου ενισχυτή αφού διέλθει από ένα οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο (Ο.Ζ.Φ) εύρους ζώνης 1 nm, ώστε να περιορίσει τον θόρυβο ASE που έχει προστεθεί από τις δύο βαθμίδες ενίσχυσης, εισέρχεται σε έναν οπτικό κυκλοφορητή. Ο οπτικός κυκλοφορητής έχει την ικανότητα να δρομολογεί το φως από την πόρτα 1 στην 2 και από την 2 στην 3 εμποδίζοντας το φως να κινηθεί προς την αντίθετη φορά. Παρόλα αυτά, για να αποφύγουμε οποιεσδήποτε αστάθειες του συστήματος από οπισθοσκεδαζόμενο φως, το οποίο θα δημιουργήσει μία οπτική κοιλότητα μεγάλου μήκους μεταξύ master και slave laser, εισάγουμε μία επιπλέον μονάδα απομόνωσης (οπτικός απομονωτής, O.A) ακριβώς πριν τον κυκλοφορητή, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απομόνωση στα 70 dB.

Η διαδικασία της εγκλειδωσης φάσης είναι μία σύμφωνη διαδικασία γεγονός το οποίο σημαίνει ότι όχι μόνο οι φάσεις των δύο πεδίων θα πρέπει να είναι προσαρμοσμένες ώστε να τηρούνται οι συνθήκες ισορροπίας του συστήματος αλλά θα πρέπει και η πόλωση του εγχεόμενου πεδίου να ταυτίζεται με αυτήν του ενυπάρχοντος στην κοιλότητα πεδίου. Για το σκοπό αυτό πριν τον απομονωτή εισάγουμε μία επιπλέον βαθμίδα ελέγχου της πόλωσης.

Το φως που εξέρχεται από την έξοδο 2 του κυκλοφορητή εισάγεται σε ένα μονότροπο ημιαγωγικό laser εντός του οποίου θα ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός της εγκλειδωσης φάσης. Το slave laser λειτουργεί σε ρεύμα πόλωσης 61.19 mA, περίπου 3 φορές το ρεύμα κατωφλίου, και εκπέμπει στα 1548.416 nm με ισχύ 8.2 dBm. Η εγκλειδωση του slave laser και η αναπαραγωγή της πληροφορίας φάσης που φέρει το master laser επιτυγχάνεται για ποσοστό έγχυσης ίσο με -17 dB και φασματική απόσταση 50 pm μεταξύ των κορυφών εκπομπής των δύο laser. Για τον υπολογισμό του ποσοστού

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρουσμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

έγχυσης ισχύος εντός της κοιλότητας χρησιμοποιήθηκε η σχέση 5.14 η οποία συνδυάζει την ανακλαστικότητα της επιφάνειας εξόδου ενός laser με το μετρηθέν εξωτερικό ποσοστό έγχυσης.

$$\frac{R_{int}}{R_{ext}} = \frac{(1-r)^2}{r} \quad (5.14)$$

όπου R_{int} και R_{ext} το εσωτερικό και το εξωτερικό ποσοστό έγχυσης, αντίστοιχα, και r η ανακλαστικότητα της μπροστινής επιφάνειας του ημιαγωγικού laser. Θεωρώντας ότι η ανακλαστικότητα είναι 80% και το μετρηθέν ποσοστό έγχυσης -2 dB, καταλήγουμε ότι τελικά το ποσοστό έγχυσης φωτός μέσα στην κοιλότητα είναι -17 dB.

Η έξοδος του slave laser δρομολογείται, μέσω του κυκλοφορητή, σε έναν τρίτο ενισχυτή, ο οποίος παίζει το ρόλο του προ-ενισχυτή διατηρώντας σταθερή ισχύ εξόδου, 2 dBm, ενώ ταυτόχρονα ρυθμίζει με τη βοήθεια ενός εξασθενητή, τοποθετημένου στην είσοδό του, το οπτικό SNR του σήματος που λαμβάνεται. Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται ώστε να πραγματοποιηθεί μια συστηματική μέτρηση του ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate, BER). Αφού περιορίσουμε το εύρος του θορύβου ASE του ενισχυτή, μέσω ενός οπτικού φίλτρου, το DPSK σήμα αποδιαμορφώνεται με τη χρήση ενός συμβολομέτρου καθυστέρησης και οδηγείται σε μία φωτοδίοδο εύρους ζώνης 12 GHz. Στη συνέχεια το ηλεκτρικό σήμα οδηγείται στην τελευταία βαθμίδα του δέκτη, η οποία αναλαμβάνει τις απαραίτητες μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό του συστήματος. Στη βαθμίδα αυτή χρησιμοποιείται ένας 26 GHz εύρους ζώνης φασματικός αναλυτής ραδιο-συχνοτήτων για την απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του φάσματος του σήματος, ένας 20 GHz αναλυτής επικοινωνιών (communication analyzer), ο οποίος απεικονίζει το διαγράμμα οφθαλμού του σήματος και πραγματοποιεί κάποιες επιμέρους μετρήσεις εξάγοντας αποτελέσματα για το πλάτος και τη χρονική ολίσθηση (jitter) των παλμών και τον παράγοντα Q του διαγράμματος, και ένας μετρητής σφαλμάτων (BER tester).

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι μία επιπλέον σειρά μετρήσεων πραγματοποιήθηκε χωρίς την ενδιάμεση βαθμίδα του εγκλειδωμένου slave laser, ώστε να παρατεθεί μια ορθή σύγκριση των επιδόσεων του προτεινόμενου συστήματος λήψης και του απλού συστήματος DPSK αποδιαμόρφωσης (σχ. 5-3).

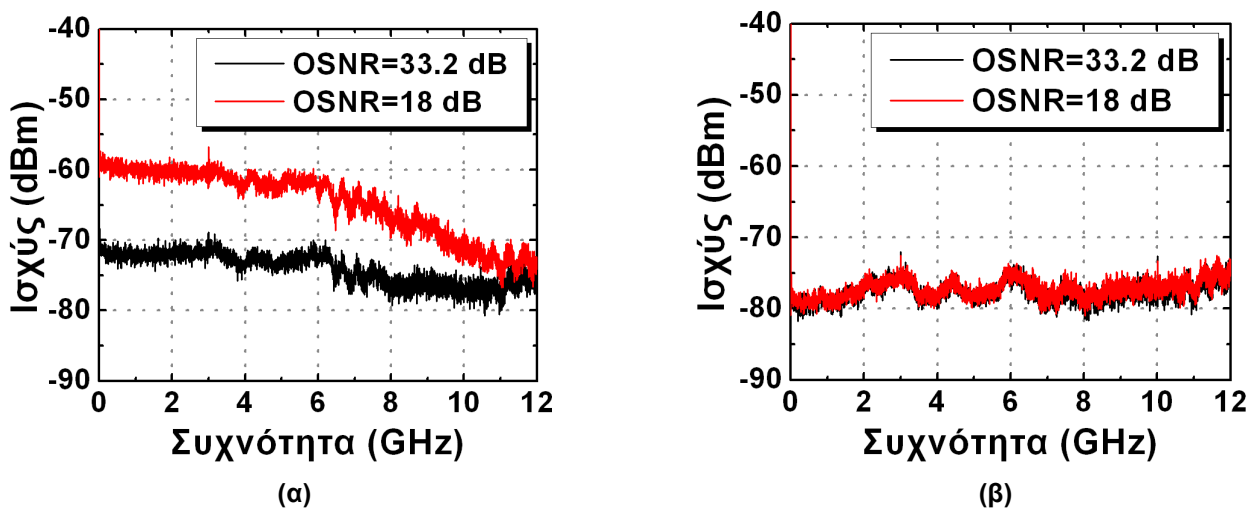
Η πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικά είδη θορύβου. Αρχικά μελετήσαμε τις επιδόσεις του συστήματος για τη χρήση του ως μία ενδιάμεση ή τελική βαθμίδα ενίσχυσης, η οποία προσφέρει συμπίεση του θορύβου πλάτους για DPSK σήματα τα οποία έχουν υποβαθμιστεί από θόρυβο ASE. Ο θόρυβος αυτός προστίθεται στο σήμα κατά τα ενδιάμεσα στάδια ενίσχυσης σε μία οπτική ζεύξη και υποβαθμίζει όχι μόνο το πλάτος του αλλά και τη φάση του. Στην πειραματική διάταξη που σχεδιάσαμε για τη μελέτη του συστήματός μας, η μεγάλου μήκους διάδοση με πολλαπλά στάδια ενίσχυσης αντικαταστάθηκε από μία εν σειρά συνδεσμολογία εξασθενητή-ενισχυτή η οποία ρυθμίζει το οπτικό SNR του σήματος καθορίζοντας με αυτό τον τρόπο την το βαθμό υποβάθμισης του σήματος από την επίδραση του θορύβου ASE.

Στη συνέχεια ακολουθεί μία μελέτη ως προς τις επιδόσεις του συστήματος για την περίπτωση θορύβου ο οποίος επιβαρύνει μόνο το πλάτος του σήματος. Ένας τέτοιος θόρυβος, όσο επίπλαστος και αν φαίνεται, παρόλα αυτά μπορεί να υπάρξει στην έξοδο ενός ευαίσθητου στη φάση παραμετρικού ενισχυτή ως προϊόν της εξαρτημένης από τη φάση ενίσχυσης όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 4. Οι επιδόσεις του συστήματος εγκλειδωσης για την αναγέννηση DPSK σημάτων τα οποία είναι επιβαρυμένα από θόρυβο πλάτους είναι ιδιαίτερα υψηλές καθιστώντας πολύ σημαντική την εφαρμογή του συστήματος αυτού στην έξοδο ενός παραμετρικού ενισχυτή οδηγώντας έτσι σε μία ολοκληρωμένη αμιγώς οπτική αναγέννηση σήματος.

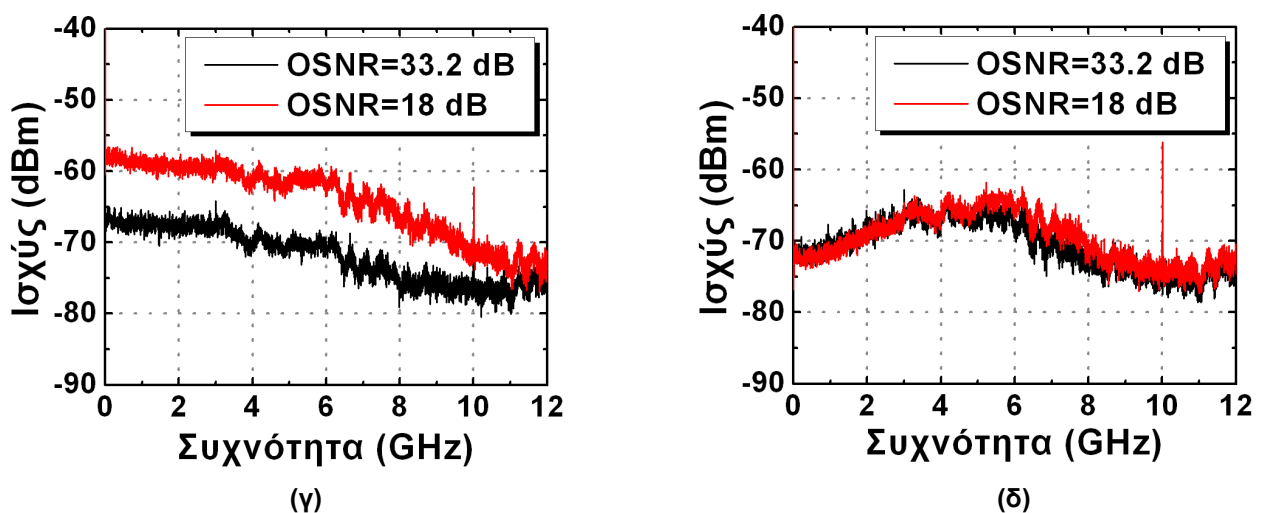
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Επίδραση θορύβου ASE. Χρησιμοποιώντας αρχικά αδιαμόρφωτο master laser, παρατηρούμε τις αξιοσημείωτες επιδόσεις συμπίεσης θορύβου πλάτους που παρουσιάζει το εγκλειδωμένο slave laser. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5-24, για διαφορετικά επίπεδα θορύβου ASE, τα οποία αντιστοιχούν σε οπτικά SNR 33.2 dB και 18 dB, το εγκλειδωμένο laser διατηρεί μία σταθερή στάθμη θορύβου, ισχυρά συμπιεσμένη αγγίζοντας έως και τα 20 dB για ένα σταθερό ποσοστό έγχυσης -17 dB.

Στην περίπτωση κατά την οποία το εγχεόμενο φως είναι διαμορφωμένο κατά φάση με ρυθμό 10 Gbps, το πλάτος του σήματος στην έξοδο του slave laser επιβαρύνεται επιπλέον από το φαινόμενο μετατροπής φάσης σε πλάτος, το οποίο αναλύσαμε διεξοδικά στη θεωρητική μελέτη του κεφαλαίου 5.3. Στο σχήμα 5-25 παρατηρούμε ότι το φάσμα του slave laser παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα γεγονός το οποίο οδηγεί σε επιβεβαίωση της ορθότητας του φυσικού μοντέλου που προσομοιώσαμε και σύγκλιση των επιδόσεων με αυτές του πειραματικού συστήματος.



Σχήμα 5-24 Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης του master (α) και του slave laser (β) για δύο διαφορετικά επίπεδα θορύβου του master laser.

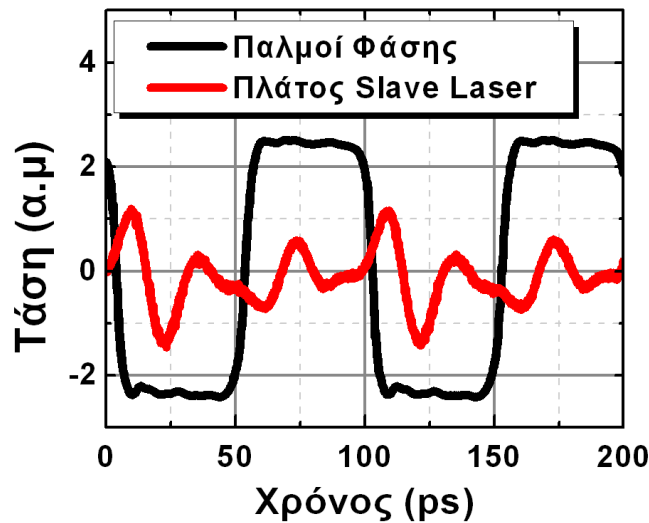


Σχήμα 5-25: Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης του master (α) και του slave laser (β) για δύο διαφορετικά επίπεδα θορύβου του διαμορφωμένου κατά φάση master laser με ρυθμό 10 Gbps.

Όπως λοιπόν αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, όταν η φάση του εγχεόμενου φωτός είναι διαμορφωμένη με παλμούς τότε κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων από τη μία φασική κατάσταση στην άλλη παρατηρείται μία ακαριαία ολίσθηση συχνότητας η

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

οποία ξεπερνάει κατά πολύ το ρυθμό του σήματος οδηγώντας το φέρον εκτός του εύρους ζώνης εγκλειδωσης του slave laser. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το slave laser να οδηγηθεί σε ταλαντώσεις αποκατάστασης μέχρι το φέρον του εγχεόμενου φωτός να επιστρέψει στο αρχικό μήκος κύματος όπου και θα κλειδώσει εκ νέου το slave laser.



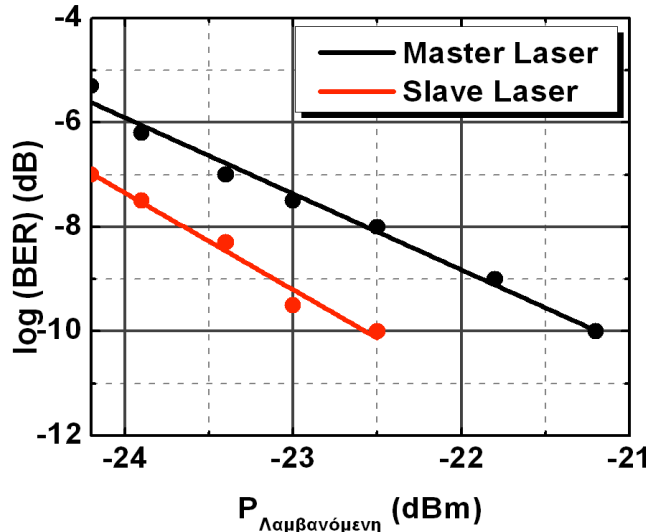
Σχήμα 5-26: Απεικόνιση των ηλεκτρικών παλμών που διαμορφώνουν τη φάση του master laser και των ταλαντώσεων αποκατάστασης του slave laser κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων του master laser από τη μία κατάσταση φάσης στην άλλη.

Στο σχήμα 5-26 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των ολισθήσεων φάσης του διαμορφωμένου master και των ταλαντώσεων αποκατάστασης του slave. Στο παραπάνω σχήμα είναι προφανής η εμφάνιση ενός επαναλαμβανόμενου μοτίβου ταλαντώσεων αποκατάστασης οι οποίες έχουν περιοδικότητα ίση με τη διάρκεια δύο παλμών, οδηγώντας έτσι σε μία εμφανή διόγκωση του ραδιοσυχνοτικού φάσματος του slave laser γύρω από τη συχνότητα των 5 GHz. Αν και εκ πρώτης όψεως από το σχήμα 5-25 συμπεραίνουμε ότι η συμπίεση του θορύβου πλάτους υποβιβάζεται λόγω της μετατροπής φάσης σε πλάτος, παρόλα αυτά η ανομοιορφία του φάσματος, το οποίο παρουσιάζει αυξημένη συμπίεση στις χαμηλές συχνότητες, οδηγεί σε μία συνολική συμπίεση θορύβου της τάξεως των 7 dB (στο εύρος ζώνης των 10 GHz) για την περίπτωση σήματος με οπτικό SNR ίσο με 18 dB.

Ωστόσο, για να αξιολογήσουμε τις επιδόσεις του προτεινόμενου συστήματος ως προς την ικανότητα αναγέννησης DPSK σήματος, πραγματοποιήσαμε μετρήσεις BER συναρτήσει της λαμβανόμενης ισχύος διατηρώντας το οπτικό SNR του master laser σταθερό και ίσο με 25 dB. Η λαμβανόμενη ισχύς μετράται στην είσοδο του DPSK δέκτη και η τιμή της ρυθμίζεται από τον εξασθενητή.

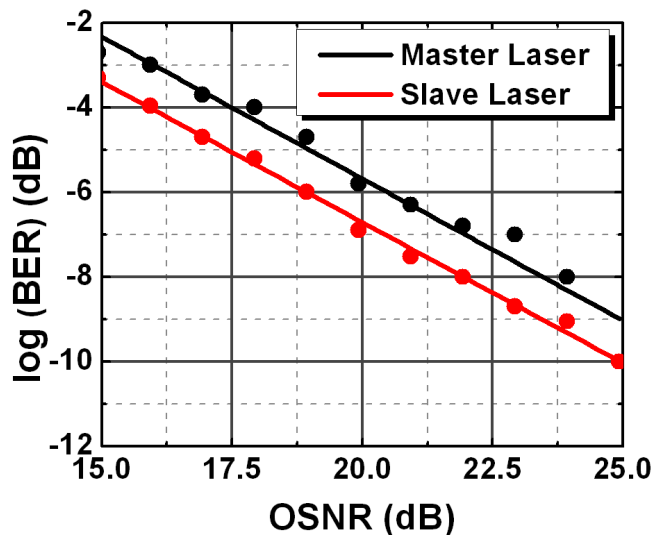
Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 5-27, με τη χρήση της εγκλειδωσης φάσης καταφέραμε να βελτιώσουμε την ευαισθησία του DPSK δέκτη κατά 1.5 dB περίπου, τιμή αρκετά εντυπωσιακή αν λάβουμε υπόψιν μας την απλότητα υλοποίησης του συγκεκριμένου συστήματος και το γεγονός ότι διαχειριζόμαστε ένα σήμα αρκετά μεγάλου ρυθμού.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 5-27: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει της λαμβανόμενης ισχύος στον δέκτη για σταθερό οπτικό SNR του master laser ίσο με 25 dB.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία δεύτερη μέτρηση BER συναρτήσει του οπτικού SNR του master laser διατηρώντας σταθερή την λαμβανόμενη ισχύ στον δέκτη στα -7.5 dBm (σχ. 5-28). Στη δεύτερη αυτή μέτρηση παρατηρούμε ότι το εγκλειδωμένο laser για δεδομένο ρυθμό σφαλμάτων επιτρέπει στον πομπό να εκπέμπει με 1.5 dB χαμηλότερο οπτικό SNR βελτιώνοντας έτσι την ενεργειακή του απόδοση. Εδώ πρέπει να προστεθεί ότι το εγκλειδωμένο laser στην προκειμένη εφαρμογή δρα ως ενισχυτής σήματος με απολαβή η οποία ισούται με την αντίστροφη τιμή του ποσοστού έγχυσης. Επομένως, αφού η εγκλειδωση επιτυγχάνεται, όπως προαναφέραμε, με ποσοστό έγχυσης -17 dB, η απολαβή του συγκεκριμένου ενισχυτή είναι 17 dB.

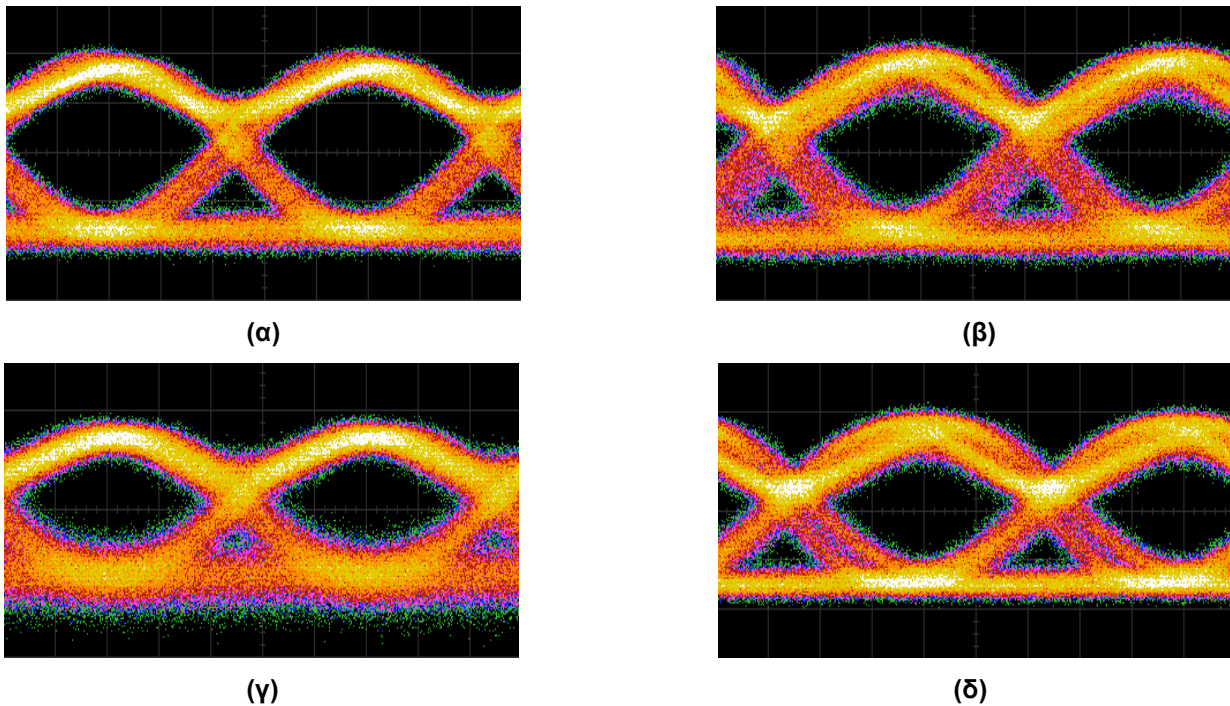


Σχήμα 5-28: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει του οπτικού SNR στην είσοδο του slave laser για σταθερή ισχύ στην είσοδο του δέκτη ίση με -7.5 dBm.

Στο σχήμα 5-29 παραθέτουμε μία σειρά από διαγράμματα οφθαλμού ώστε ο αναγνώστης να προχωρήσει σε μία εποπτική αξιολόγηση της βελτίωσης που προσφέρει το στάδιο της εγκλειδωσης φάσης. Οι παλμοί που προκύπτουν από την αποδιαμόρφωση του slave laser παρουσιάζουν ένα σχετικό jitter το οποίο οφείλεται σε ελλειπή εγκλειδωση, κυρίως κατά τις μεταβάσεις της φάσης, λόγω του μη ικανοποιητικού ποσοστού έγχυσης. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό αυτό, τόσο περισσότερο διευρυμένο είναι το εύρος ζώνης εγκλειδωσης, επιτρέποντας έτσι στο slave laser να κληρονομήσει πλήρως τα χαρακτηριστικά φάσης του εγχεόμενου

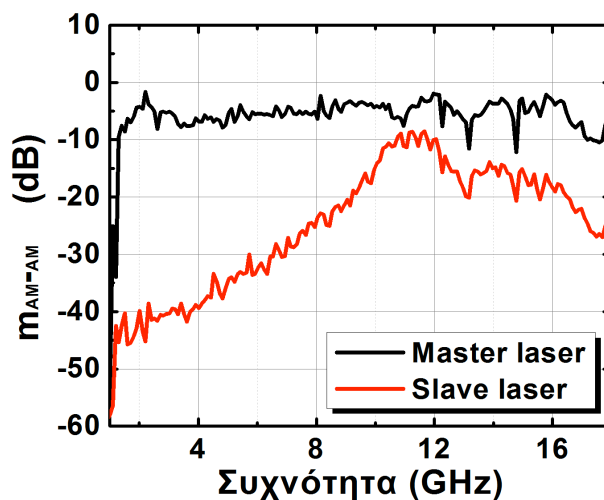
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

σήματος. Καθώς αυξάνει όμως το ποσοστό έγχυσης, η συμπίεση θορύβου πλάτους μειώνεται υποβαθμίζοντας με αυτό τον τρόπο το τελικό σήμα. Επομένως, πρέπει να υπάρξει ένας συμβιβασμός μεταξύ επιτυχημένης εγκλείδωσης (μικρό jitter) και συμπίεσης θορύβου, η οποία θα οδηγήσει στη βέλτιστη αναγέννηση σήματος.



Σχήμα 5-29: Διαγράμματα οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου 10 Gb/s DPSK σήματος με (β,δ) και χωρίς (α,γ) εγκλείδωση φάσης για 30 dB (α,β) και 25 dB (γ,δ) οπτικό SNR του master laser.

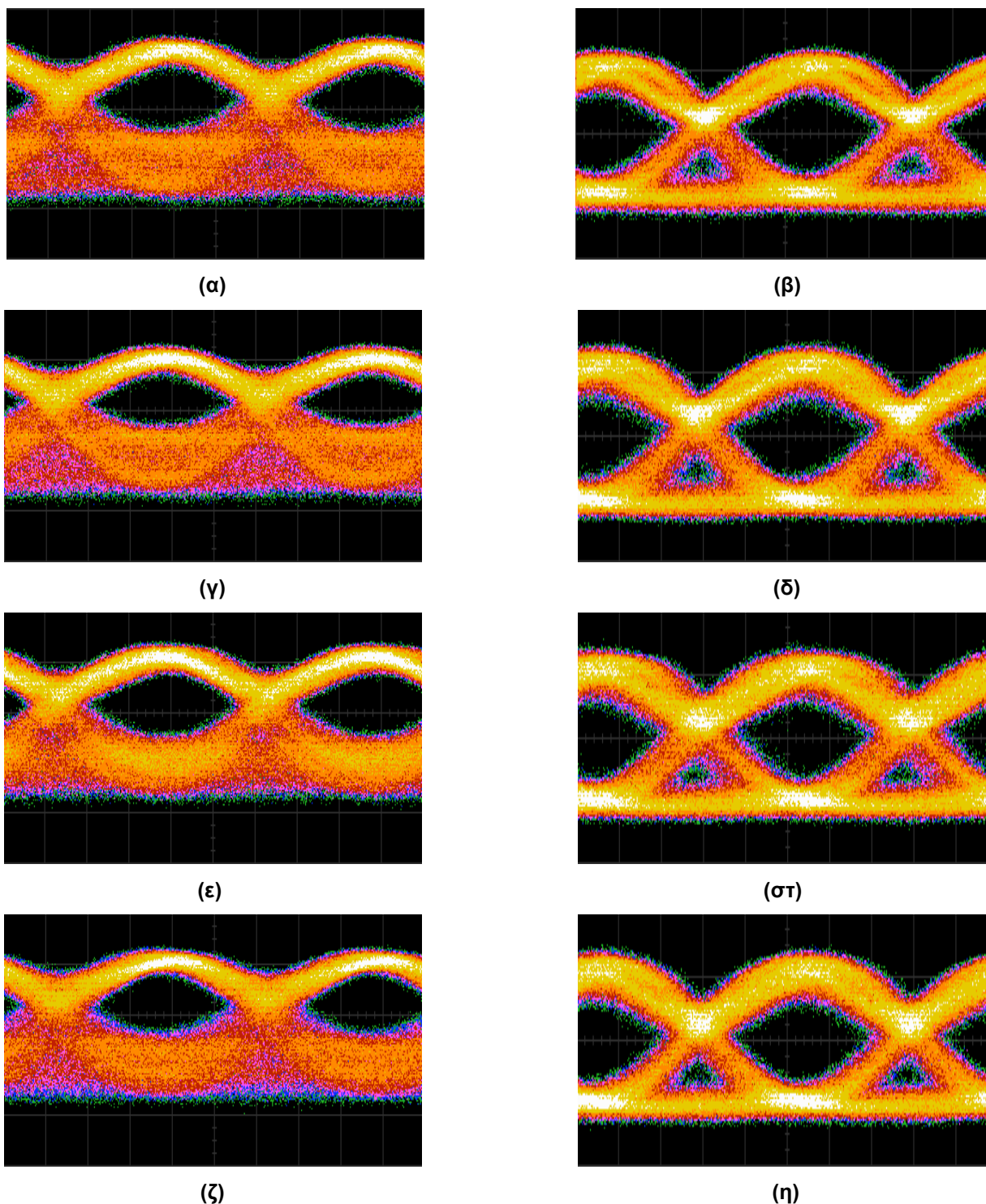
Επίδραση θορύβου πλάτους. Για να εισάγουμε πειραματικά θόρυβο μόνο στο πλάτος ενός οπτικού σήματος χρησιμοποιούμε έναν εξωτερικό διαμορφωτή πλάτους, ο οποίος οδηγείται από ηλεκτρικό θόρυβο. Λόγω όμως της έλειψης κατάλληλης πηγής θορύβου, η οποία θα προσέφερε αρκετή ισχύ ώστε να επιβαρύνει αισθητά το σήμα, οδηγηθήκαμε στην χρήση μιας γεννήτριας ραδιοσυχνοτήτων ημιτονοειδούς κυματομορφής, η οποία εισάγει το επιθυμητό πλάτος διαταραχών. Αν και οι διαταραχές αυτές δεν έχουν χαρακτηριστικά θορύβου, παρόλα αυτά υποβαθμίζουν το άνοιγμα του διαγράμματος οφθαλμού και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να επιβεβαιώσουν τη συμπεριφορά που μελετήσαμε θεωρητικά.



Σχήμα 5-30: Φασματική απόκριση του πλάτους του slave laser (κόκκινη γραμμή) σε ημιτονοειδείς διαταραχές πλάτους του master laser (β) εντός του συχνοτικού παραθύρου από 1GHz – 18 GHz.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Αρχικά λοιπόν, μελετούμε την απόκριση του slave laser σε διαταραχές πλάτους του εγχεόμενου φωτός για ένα εύρος συχνοτήτων από 1 GHz έως 18 GHz. Διατηρώντας το ποσοστό έγχυσης στα -17 dB παρατηρούμε ότι η απόκριση του slave laser (σχ. 5-30) παρουσιάζει τη μορφή που εξάγαμε κατά την αριθμητική ανάλυση του συστήματος (σχ. 5-13α).

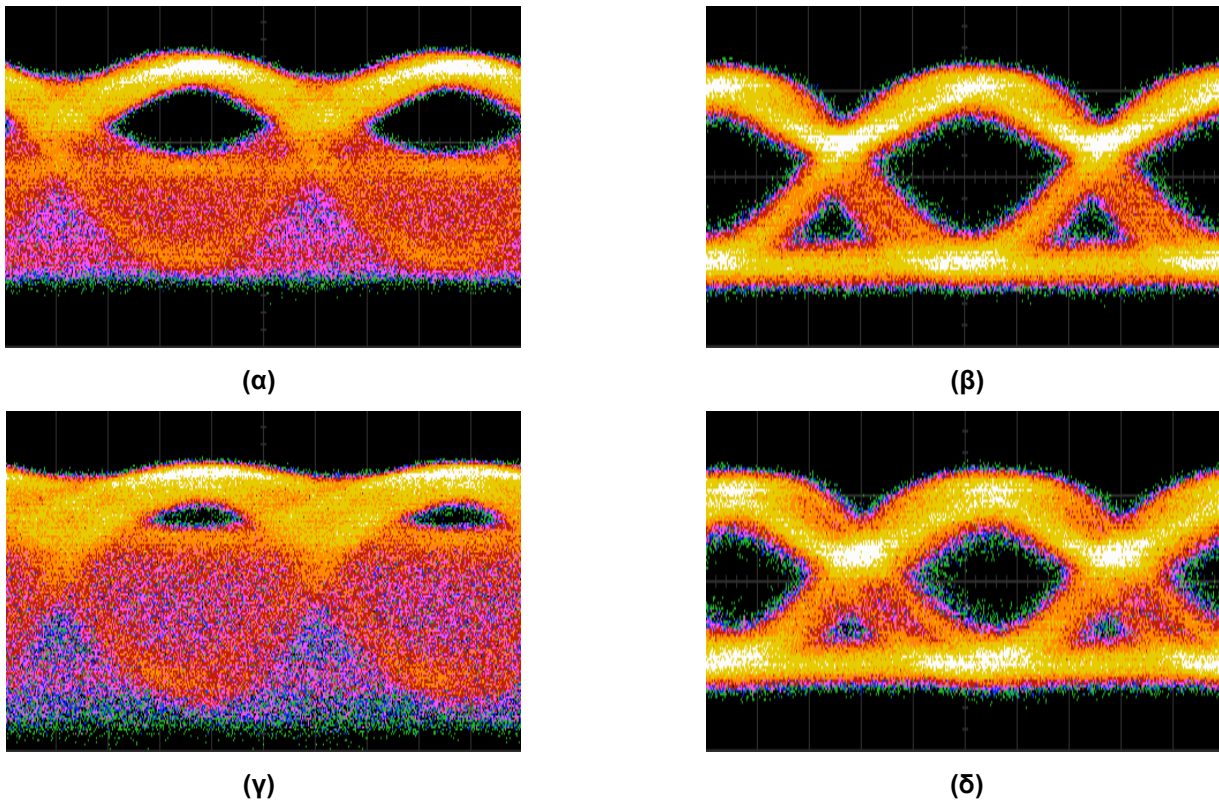


Σχήμα 5-31: Διαγράμματα οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου 10 Gb/s DPSK σήματος με (β,δ,στ,η) και χωρίς (α,γ,ε,ζ) εγκλειδωση φάσης για 1 GHz (α,β), 2 GHz (γ,δ), 4 GHz (ε,στ) και 8 GHz (ζ,η) ημιτονοειδούς διαταραχής πλάτους στο master laser διατηρώντας σταθερό το άνοιγμα του οφθαλμού και το ποσοστό έγχυσης.

Για συχνότητες χαμηλότερες της συχνότητας συντονισμού ο βαθμός συμπίεσης αγγίζει έως και τα 20 dB, ενώ στην περιοχή κοντά στη συχνότητα συντονισμού η συμπίεση

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

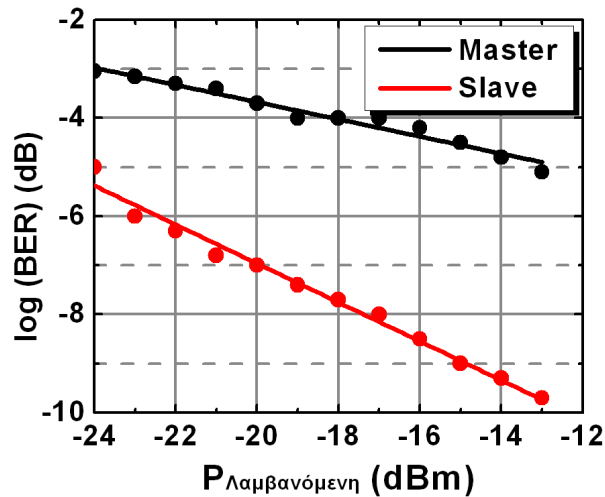
μειώνεται στα 5 dB. Τα πειραματικά αποτελέσματα λοιπόν προσεγγίζουν σημαντικά τα θεωρητικά υπολογισμένα γεγονός το οποίο μας προδιαθέτει θετικά για τις γενικότερες επιδόσεις του συστήματος. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι η συχνότητα συντονισμού του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser είναι περίπου 6 GHz, και όπως εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε από το σχήμα 5-30, η διευρυμένη συχνότητα συντονισμού που αποκτά το εγκλειδωμένο laser φθάνει τα 11 GHz. Στα σχήματα 5-31 και 5-32 παραθέτουμε διαγράμματα οφθαλμού που απεικονίζουν τη συμπίεση θορύβου που παρέχει το εγκλειδωμένο laser για τις συχνότητες και τα επίπεδα πλάτους διαταραχών που μελετήσαμε. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι λόγω του ότι η απόκριση του διαμορφωτή πλάτους δεν είναι επίπεδη σε όλο το φάσμα από 1 GHz έως 18 GHz, η ισχύς του ημιτόνου στην έξοδο της γεννήτριας ρυθμίστηκε κατάλληλα ώστε να παρέχει σταθερό άνοιγμα οφθαλμού στο σήμα του master laser σε όλη την περιοχή. Επίσης, επειδή έχουμε ημιτονική διαμόρφωση πλάτους και όχι θόρυβο, οι διαταραχές χαρακτηρίζονται ως προς την ισχύ του σήματος στην έξοδο της γεννήτριας συχνοτήτων και όχι ως προς το SNR του εγχεόμενου σήματος αφού αυτό παραμένει σταθερό και ίσο με 30 dB.



Σχήμα 5-32: Διαγράμματα οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου 10 Gb/s DPSK σήματος με (β,δ) και χωρίς (α,γ) εγκλειδωση φάσης για 1 GHz ημιτονοειδούς διαταραχής πλάτους 5 dBm (α,β) και 15 dBm (γ,δ).

Από τα παραπάνω σχήματα είναι έκδηλη η εκπληκτική ικανότητα της εγκλειδωσης φάσης να συμπιέζει ισχυρά οποιεσδήποτε διαταραχές πλάτους διατηρώντας σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά φάσης του εγχεόμενου σήματος. Όπως παρατηρούμε, η καθαρότητα του διαγράμματος οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου DPSK σήματος παραμένει σχεδόν σταθερή ανεξάρτητα της υποβάθμισης του αρχικού σήματος (πλάτος ημιτονοειδούς διαταραχής) αλλά και της συχνότητας διαταραχών. Το στάδιο εγκλειδωσης φάσης βελτιώνει το σήμα ακόμα και στην περίπτωση όπου το λαμβανόμενο σήμα είναι ολοκληρωτικά παραμορφωμένο και η λήψη απόφασης στον δέκτη είναι αδύνατη.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψηλών συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 5-33: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει της λαμβανόμενης ισχύος στον δέκτη για 10 Gb/s DPSK σήμα υποβαθμισμένο από ημιτονοειδή διαταραχή ισχύος 18 dBm και συχνότητας 1 GHz.

Τα αποτελέσματα αυτά έρχεται να επιβεβαιώσει η μέτρηση BER που πραγματοποιήθηκε σε σήμα υποβαθμισμένο από ημιτονοειδή διαταραχή 1 GHz συναρτήσει της λαμβανόμενης ισχύος στον DPSK δέκτη (σχ. 5-33). Όπως παρατηρούμε η χρήση της βαθμίδας εγκλειδωσης, για δεδομένο ρυθμό σφαλμάτων ($\sim 10^{-5}$) οδηγεί στη βελτίωση της ευαισθησίας του DPSK δέκτη κατά 11 dB.

Τα πειραματικά αποτελέσματα όχι μόνο επιβεβαιώνουν την θεωρητικά αναμενόμενη συμπεριφορά ενός εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser αλλά αποδεικνύουν ότι μία τέτοια διάταξη μπορεί να αποτελέσει μία οικονομική και πρακτικά απλή εναλλακτική λύση είτε σαν ενδιάμεση βαθμίδα σε μία οπτική ζεύξη περιορίζοντας το μή γραμμικό θόρυβο φάσης, είτε σα μία τελική βαθμίδα για την αναγέννηση DPSK σημάτων υποβαθμισμένων από ASE και τη βελτίωση της ευαισθησίας των DPSK δεκτών είτε στην καλύτερη περίπτωση ως μία βαθμίδα συμπίεσης θορύβου πλάτους στην έξοδο των ευαίσθητων στη φάση παραμετρικών ενισχυτών προσφέροντας ένα σύστημα ολοκληρωμένης αναγέννησης σε φάση και πλάτος.

5.5 Αμιγώς οπτική αναγέννηση σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση με χρήση εγκλειδωμένου Fabry-Pérot laser

Οι επιδόσεις της εγκλειδωσης φάσης που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5.3 καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική την αξιοποίηση των εγκλειδωμένων μονότροπων ημιαγωγικών laser ως ενισχυτές χαμηλού θορύβου-αναγέννητες σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση. Τα μονότροπα laser γενικά διαθέτουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις οπτικές επικοινωνίες υψηλών ρυθμών, μεγάλων αποστάσεων και υψηλής ποιότητας. Το κόστος κατασκευής τους ωστόσο είναι αρκετά υψηλό συγκριτικά με τα απλούστερα και χαμηλότερων επιδόσεων Fabry-Pérot. Στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα, όπου κυριαρχεί η WDM μετάδοση, η χρήση των μονότροπων laser είναι μονόδρομος, αυξάνει όμως ιδιαίτερα το κόστος εγκατάστασης. Η διαφορετικού μήκους κύματος εκπομπή λοιπόν θέτει σημαντικούς περιορισμούς ως προς την ευελιξία και το κόστος εγκατάστασης που προσφέρει η υλοποίηση των προτεινόμενων αναγεννητών.

Από την άλλη μεριά, η δυνατότητα μονότροπης εκπομπής Fabry-Pérot laser μέσω της εγκλειδωσης φάσης είναι γνωστή εδώ και καιρό, και οι επιδόσεις της έχουν μελετηθεί εκτενώς επιδεικνύοντας λόγο συμπίεσης πλευρικών τρόπων (side mode suppression ratio, SMSR) που ξεπερνά τα 40 dB. Μέχρι στιγμής διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για την αξιοποίηση τέτοιων πομπών στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα [167], [168], [172].

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρουσμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Επιγραμματικά αναφέρουμε ότι η μονότροπη εκπομπή των laser αυτών μπορεί να επιτευχθεί είτε με έγχυση ενός μήκους κύματος από μονότροπο laser [172], είτε με έγχυση ενός στενού φασματικού κομματιού θορύβου ASE [173], είτε ακόμα και με αμοιβαία εγκλειδωση μεταξύ δύο Fabry-Pérot laser [174]. Λαμβάνοντας λοιπόν υπ' όψιν όλα τα παραπάνω, στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζουμε μία εκτενή μελέτη των επιδόσεων του προτεινόμενου οπτικού αναγεννητή αντικαθιστώντας το μονότροπο slave laser με ένα Fabry-Pérot laser. Η καινοτόμα αυτή αρχιτεκτονική προσφέρει στον αναγεννητή την επιπλέον ιδιότητα της διαφάνειας μήκους κύματος, επιτρέποντάς του να διαχειριστεί οποιοδήποτε σήμα βρίσκεται εντός του φασματικού παραθύρου εκπομπής του Fabry-Pérot laser. Στη μελέτη που θα ακολουθήσει επιδεικνύεται πειραματικά η επιτυχής αναγέννηση 10 Gb/s DPSK σήματος για ένα φασματικό εύρος 16.4 nm.

5.5.1 Αρχή λειτουργίας της μονότροπης εκπομπής εγκλειδωμένου Fabry-Pérot laser

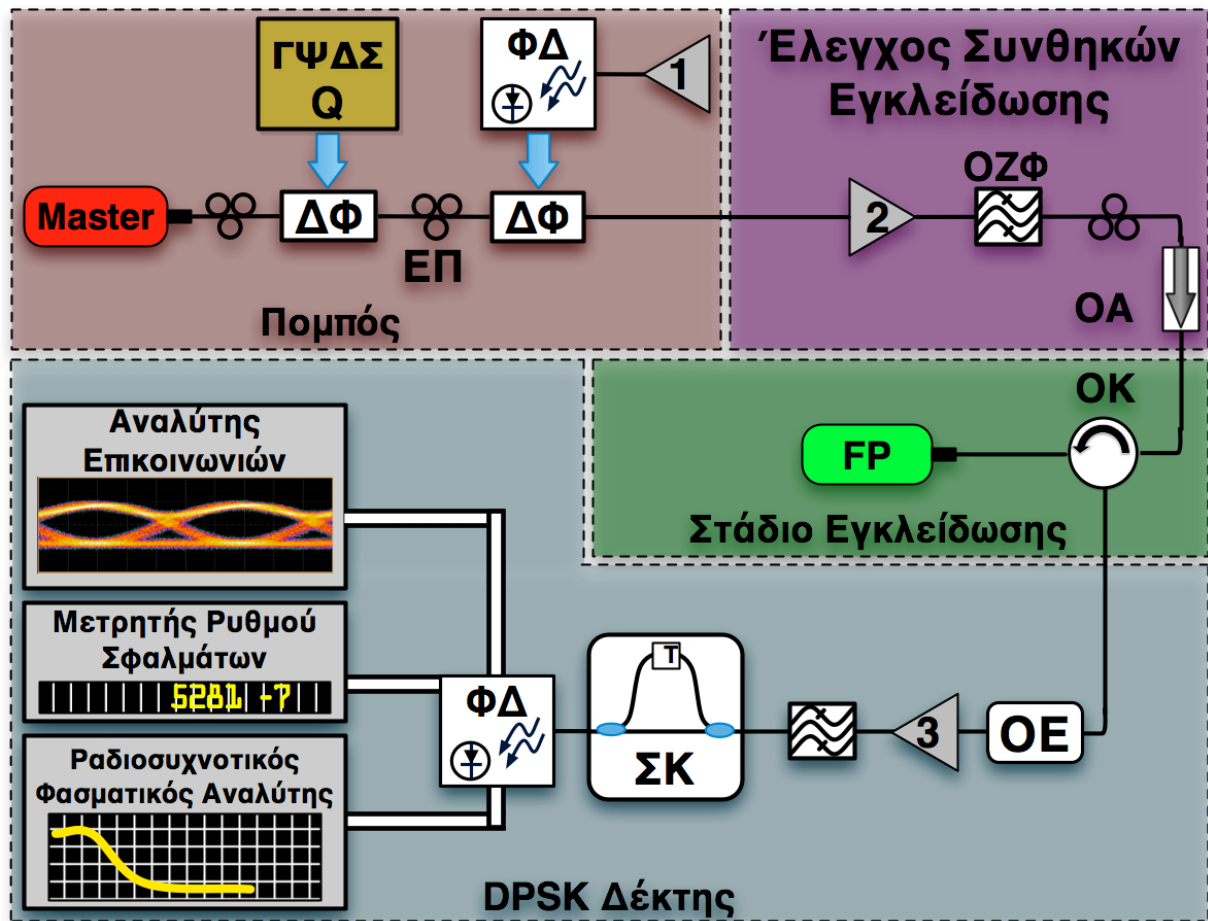
Το φάσμα εκπομπής ενός Fabry-Pérot laser, όπως γνωρίζουμε, αποτελείται από μία “χτένα” ισαπεχόντων μηκών κύματος (διαμήκεις τρόποι εκπομπής), η περιβάλλουσα των οποίων καθορίζεται από το φασματικό προφίλ της απολαβής του ενεργού υλικού ενώ η απόστασή τους εξαρτάται από το μήκος της κοιλότητας. Σε αντίθεση με τα μονότροπα laser, τα Fabry-Pérot μας δίνουν τη δυνατότητα να κλειδώσουμε σε οποιοδήποτε τρόπο εκπομπής μέσω της έγχυσης του αντίστοιχου μήκους κύματος. Η εγκλειδωση φάσης που λαμβάνει χώρα, οδηγεί στην απορρόφηση της απολαβής του υλικού κυρίως από τον εγκλειδωμένο τρόπο με άμεσο αποτέλεσμα την καταστολή των πλευρικών τρόπων. Για μικρά ποσοστά έγχυσης οπτικής ισχύος, η συμπίεση των πλευρικών δεν είναι επαρκής ώστε η εκπομπή του εγκλειδωμένου Fabry-Pérot να θεωρηθεί μονότροπη. Αν αυξήσουμε όμως το ποσοστό έγχυσης και βελτιστοποιήσουμε τη φασματική διαφορά μεταξύ του εγχεόμενου μήκους κύματος και του τρόπου τον οποίο θέλουμε να κλειδώσουμε μπορεί να επιτευχθεί SMSR που ξεπερνά ακόμα και τα 48 dB.

5.5.2 Πειραματική μελέτη

Βασισμένοι στην πειραματική διάταξη του κεφαλαίου 5.4.2 (σχ. 5-23) και εφαρμόζοντας τις απαιτούμενες τροποποιήσεις, μελετήσαμε το Fabry-Pérot laser ως προς τα χαρακτηριστικά εγκλειδωσης και τις επιδόσεις του ως αναγεννητή DPSK σημάτων υποβαθμισμένων εξολοκλήρου από θόρυβο πλάτους.

Στη μελέτη του μονότροπου ημιαγωγικού laser, χρησιμοποιήσαμε ως πηγή θορύβου πλάτους ημιτονικές διαταραχές, οι οποίες διαμόρφωναν της ένταση του οπτικού πεδίου του master laser μέσω ενός εξωτερικού διαμορφωτή πλάτους. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία, στην παρούσα πειραματική διάταξη, χρησιμοποιούμε έναν οπτικό ενισχυτή ερβίου ο οπτικός θόρυβος ASE του οποίου αφού μετατραπεί σε ηλεκτρικό μέσω μιας φωτοδιόδου 12 GHz, προστίθεται την ένταση του οπτικού πεδίου του master laser μέσω ενός εξωτερικού διαμορφωτή πλάτους. Το πλάτος του θορύβου και κατ' επέκταση ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο του οπτικού σήματος ελέγχεται μέσω της ρυθμιζόμενης απολαβής του οπτικού ενισχυτή.

Το ενθόρυβο 10 Gb/s DPSK σήμα, όντας εξασθενημένο στην έξοδο του πομπού λόγω των επάλληλων σταδίων διαμόρφωσης, διέρχεται από τον δεύτερο EDFA ο οποίος ρυθμίζει τη στάθμη του ελέγχοντας με αυτό τον τρόπο και το ποσοστό έγχυσης. Η έξοδος αυτού του ενισχυτή φιλτράρεται μέσω ενός οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου εύρους ζώνης 1 nm, το οποίο περιορίζει κατά το δυνατό τον περίσσειο ASE που προστίθεται στο σήμα από το στάδιο της ενίσχυσης, και στη συνέχεια οδηγείται στο Fabry-Pérot laser μέσω ενός οπτικού κυκλοφορητή.



Σχήμα 5-34: Διάγραμμα πειραματικής υλοποίησης ενός εγκλειδωμένου ενισχυτή Fabry-Pérot laser. ΓΨΔΣ: γεννήτρια ψευδοτυχαίας δυαδικής σειράς bit, ΔΦ: διαμορφωτής φάσης, ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους, ΦΔ: φωτοδίοδος, ΕΠ: ελεγκτής πόλωσης, EDFA1: πηγή θορύβου, EDFA2: ρυθμίζει το ποσοστό έγχυσης, EDFA3: τελικός ενισχυτής για τη λήψη, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΟΑ: οπτικός απομονωτής, ΟΕ: οπτικός κυκλοφορητής, ΟΕ: οπτικός εξασθενητής, ΣΚ: συμβολόμετρο καθυστέρησης.

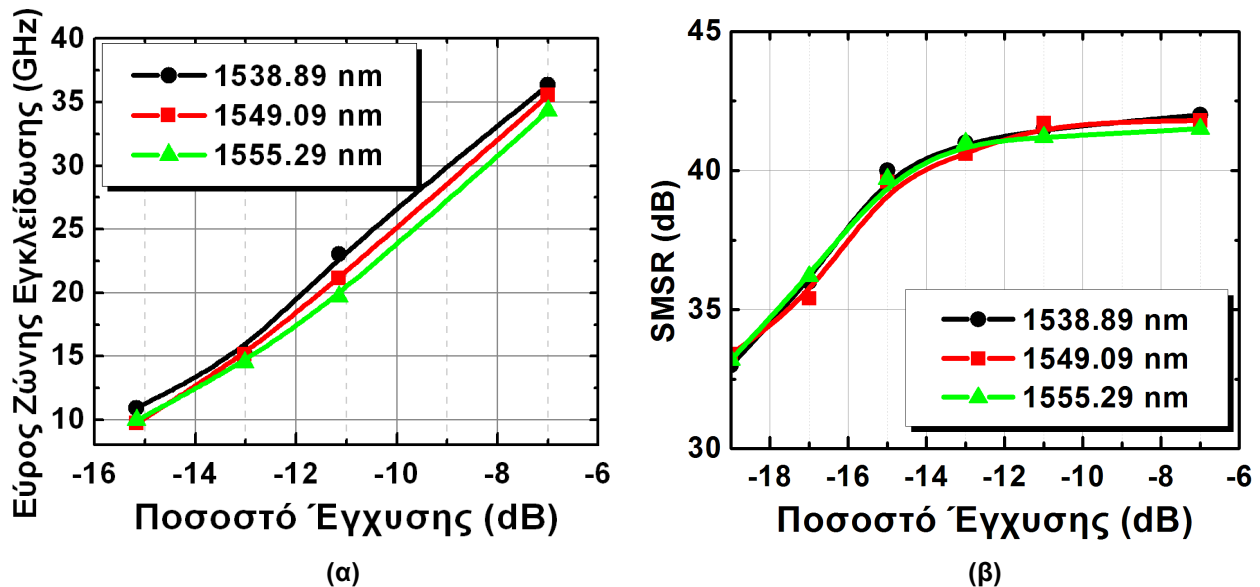
Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, μεταξύ του φίλτρου και του κυκλοφορητή χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής πόλωσης για να βελτιστοποιήσει τις συνθήκες εγκλειδωσης και ένας οπτικός απομονωτής για να εμποδίσει το οπισθοσκεδαζόμενο φως, το οποίο ενδέχεται να δημιουργήσει αστάθειες στο σύστημα. Το σήμα που εξέρχεται από το Fabry-Pérot laser δρομολογείται μέσω του κυκλοφορητή στον DPSK δέκτη όπου πραγματοποιούνται η αποδιαμόρφωσή του μέσω του συμβολόμετρου καθυστέρησης και η φώρασή του μέσω μιας 12 GHz φωτοδίοδου. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού σήματος μελετώνται με τη βοήθεια ενός αναλυτή επικοινωνιών και ενός φασματικού αναλυτή ραδιοσυχνοτήτων ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται και μέτρηση του ρυθμού σφαλμάτων για την τελική αξιολόγηση της ποιότητας του αναγεννημένου σήματος.

Γενικά, η διαδικασία της εγκλειδωσης σε ένα πολύτροπο laser απαιτεί αυξημένη εγχεόμενη ισχύ συγκριτικά με ένα μονότροπο laser καθώς είναι επιβαρυνμένη με την επιπλέον απαίτηση για συμπίεση των πλευρικών τρόπων, όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο [171]. Έτσι λοιπόν, για να επιτύχουμε μονότροπη εκπομπή, διεύρυνση του εύρους εγκλειδωσης και συμπίεση του θορύβου πλάτους και της μετατροπής διαμόρφωσης φάσης σε πλάτος θα πρέπει να γίνει μία πολύ προσεκτική επιλογή του ποσοστού έγχυσης οπτικής ισχύος μέσα στην κοιλότητα του Fabry-Pérot.

Αρχικά πραγματοποιούμε μία στατική μελέτη του συστήματος, χρησιμοποιώντας αδιαμόρφωτο εγχεόμενο φως, έτσι ώστε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για την

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

ποιότητα της μονότροπης εκπομπής του Fabry-Pérot laser, δηλαδή το εύρος ζώνης εγκλειδωσης κάθε τρόπου, τον αριθμό των μεμονομένων τρόπων που μπορούν να κλειδώσουν στον εγχεόμενο φως αλλά και το λόγο συμπίεσης πλευρικών τρόπων (SMSR) συναρτήσει του ποσοστού έγχυσης.

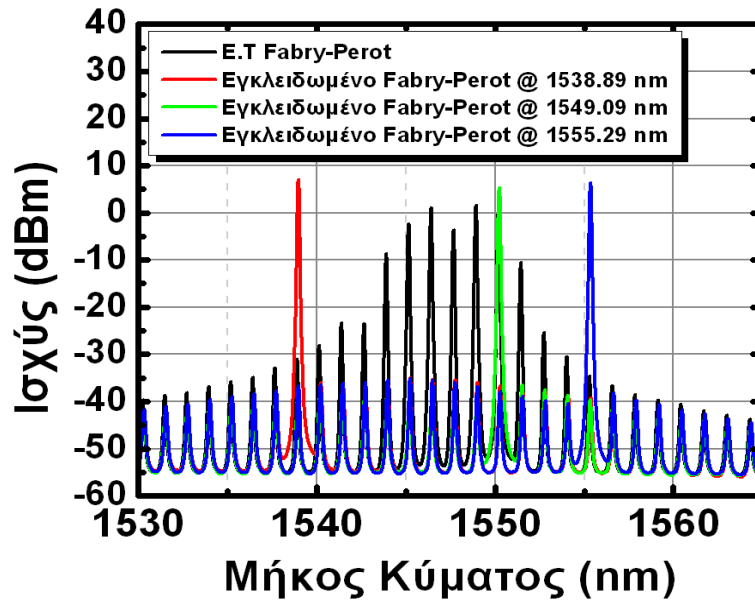


Σχήμα 5-35: Διάγραμμα εξάρτησης του εύρους ζώνης εγκλειδωσης (α) και της συμπίεσης πλευρικών τρόπων (β) από το ποσοστό έγχυσης για τρία μήκη κύματος εγκλειδωσης.

Για δεδομένο ρεύμα τροφοδοσίας της διόδου Fabry-Pérot, ίσο με $I_s=51.24$ mA, καταφέραμε να επιτύχουμε μονότροπη εκπομπή για μία περιοχή μηκών κύματος εύρους 16.4 nm. Αν και το ελάχιστο ποσοστό έγχυσης που απαιτείται για την εγκλειδωση του Fabry-Pérot είναι ίσο με -18 dB, ωστόσο χαμηλό SMSR, μεγαλύτερο των 40 dB, επετεύχθη για $R>-15$ dB (σχ. 5-35β). Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 5-35α το εύρος ζώνης εγκλειδωσης παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από το ποσοστό έγχυσης και λαμβάνει σχεδόν ίδια τιμή για κάθε τρόπο του Fabry-Pérot φάσματος. Λόγω του γεγονότος ότι στην εφαρμογή που θα μελετήσουμε απαιτείται η αναγέννηση 10 Gb/s DPSK σήματος, θα κυμανθούμε σε τιμές του ποσοστού έγχυσης μεγαλύτερες των -15 dB ώστε να διασφαλίσουμε την πλήρη ανάκτηση της πληροφορίας φάσης του εγχεόμενου σήματος από το εγκλειδωμένο Fabry-Pérot.

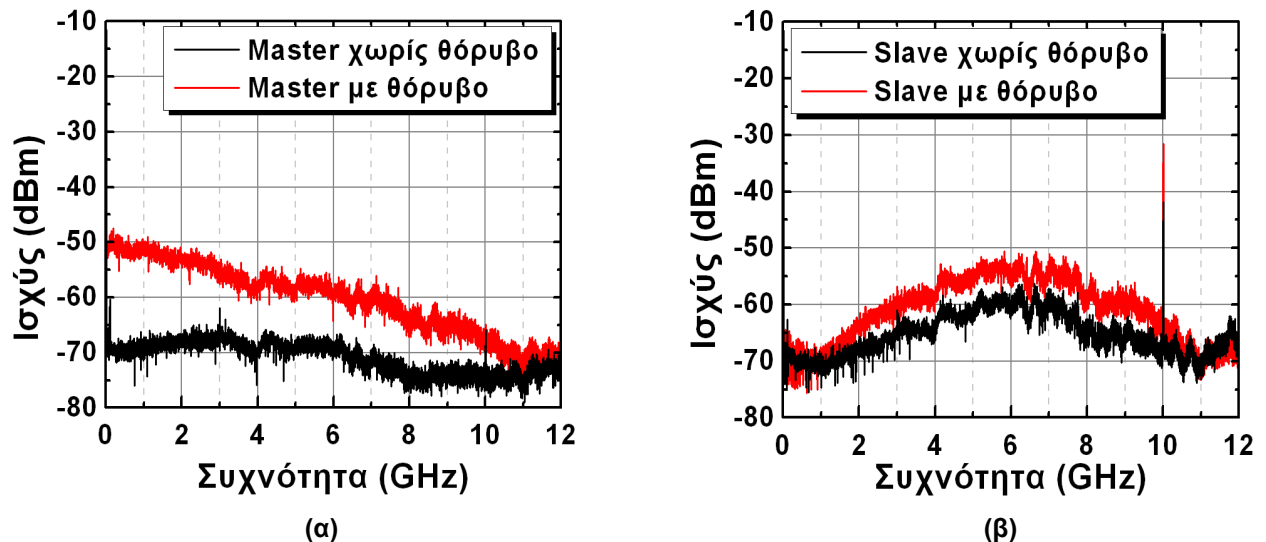
Πράγματι η δυναμική μελέτη του συστήματος αποδεικνύει ότι η εγκλειδωση του Fabry-Pérot για την περίπτωση 10 Gb/s εγχεόμενου σήματος απαιτεί ποσοστό έγχυσης ίσο με -11 dB. Το ποσοστό αυτό όπως φαίνεται από το σχήμα 5-35β προσφέρει σημαντική συμπίεση πλευρικών τρόπων, η οποία ξεπερνά τα 40 dB, ωστόσο οδηγεί σε περιορισμό του βαθμού συμπίεσης του θορύβου πλάτους που κληροδοτείται στο slave laser γεγονός το οποίο είναι δυνατό να υποβαθμίσει τις αναμενόμενες επιδόσεις του συστήματος.

Στο σχήμα που ακολουθεί (σχ. 5-36) απεικονίζεται το οπτικό φάσμα του ελεύθερα ταλαντούμενου Fabry-Pérot laser καθώς επίσης και τα αντίστοιχα φάσματα των εγκλειδωμένων τρόπων με μήκη κύματος 1538.89 nm, 1549.09 nm και 1555.29 nm, για ποσοστό έγχυσης ίσο με -11 dB.



Σχήμα 5-36: Φάσμα του ελεύθερα ταλαντούμενου Fabry-Pérot (μαύρη γραμμή) και του εγκλειδωμένου στο μήκος κύματος 1538.89 nm (κόκκινη γραμμή), 1549.09 nm (πράσινη γραμμή) και 1555.29 nm (μπλέ γραμμή).

Στα διαγράμματα του σχήματος 5-37 απεικονίζονται τα ηλεκτρικά φάσματα ενός 10 Gb/s DPSK σήματος υποβαθμισμένου από θόρυβο πλάτους (σχ. 5-37α) και του αντίστοιχου αναγεννημένου σήματος στην έξοδο του εγκλειδωμένου Fabry-Pérot laser (σχ. 5-37β). Όπως είναι αναμενόμενο, το φάσμα του εγκλειδωμένου laser παρουσιάζει έναν λοβό γύρω από το μισό της συχνότητας διαμόρφωσης, ο οποίος, όπως εξηγήσαμε και στην περίπτωση του μονότροπου laser, οφείλεται στη μετατροπή της διαμόρφωσης φάσης σε πλάτος κατά τις μεταβάσεις της φάσης του σήματος από 0 σε π και αντίστροφα.

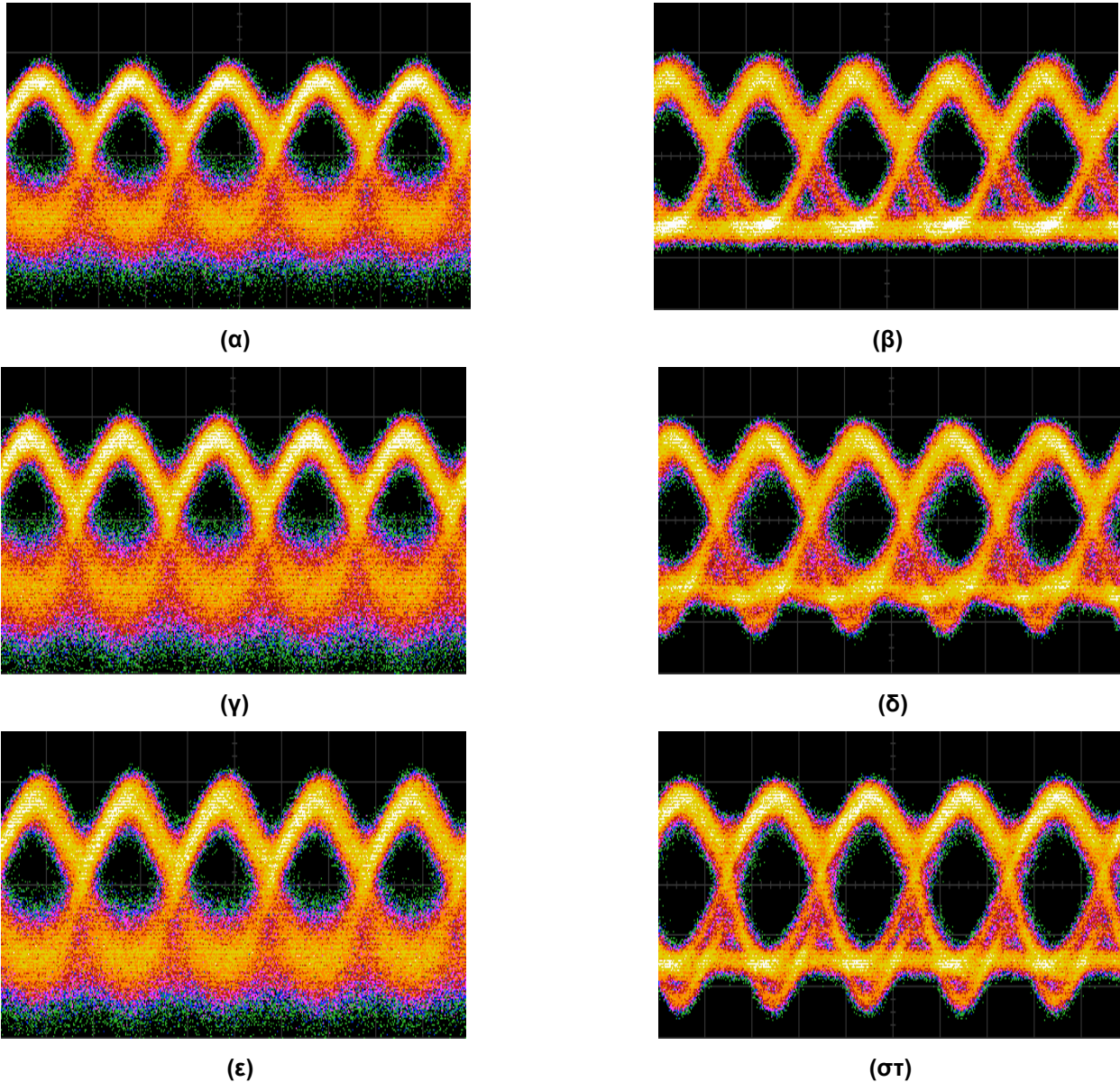


Σχήμα 5-37: Απεικόνιση του ηλεκτρικού φάσματος ενός 10 Gb/s DPSK σήματος με (κόκκινη γραμμή) και χωρίς (μαύρη γραμμή) θόρυβο ASE στο πλάτος του (α), και του αντίστοιχου αναγεννημένου σήματος (β).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο λοβός παρουσιάζει μία διόγκωση της τάξης των 5 dB κατά την προσθήκη του θορύβου πλάτους γεγονός απόλυτα δικαιολογημένο αφού η εγκλειδωση ενός Fabry-Pérot απαιτεί υψηλότερο ποσοστό έγχυσης το οποίο οδηγεί σε μικρότερη συμπίεση θορύβου. Επίσης, όπως αναφέραμε παραπάνω, πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ της συμπίεσης θορύβου και του εύρους ζώνης διαμόρφωσης, παράμετροι οι οποίες μεταξύ τους έχουν αντίστροφη εξάρτηση από το ποσοστό έγχυσης. Επομένως, για να διατηρήσουμε τη συμπίεση θορύβου σε σχετικά υψηλά

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρου ρυθμίων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

επίπεδα θυσιάζουμε το εύρος ζώνης εγκλειδωσης αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη μετατροπή της διαμόρφωσης φάσης σε πλάτος και περιορίζοντας το μέγιστο ρυθμό πληροφορίας που μπορεί να αναπαράγει το εγκλειδωμένο laser. Έτσι λοιπόν, η επίδραση του αθροίσματος των δύο αυτών θορύβων είναι σε γενικές γραμμές μεγαλύτερη στην έξοδο ενός εγκλειδωμένου Fabry-Pérot laser σε αντίθεση με ένα μονότροπο.



Σχήμα 5-38: Διαγράμματα οφθαλμού του επιβαρυνμένου από θόρυβο πλάτους 10 Gb/s DPSK σήματος (β,δ,στ) και του αναγεννημένου σήματος (α,γ,ε) για εγκλειδωση στα 1538.89 nm (α, β), 1548.09 nm (γ, δ) και 1555.29 nm (ε, στ). Το οπτικό SNR του εγχεόμενου σήματος διατηρείται σταθερό και ίσο με 23 dB.

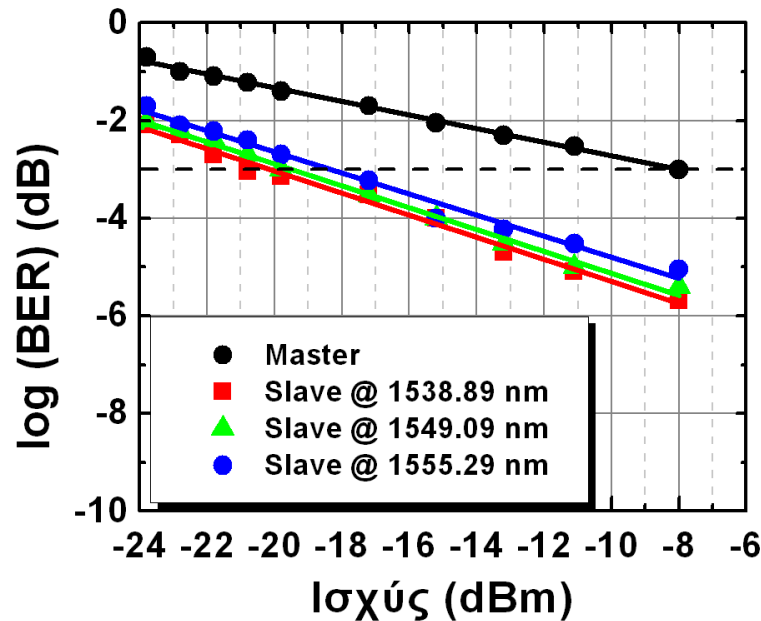
Η φασματική συμπεριφορά που μόλις περιγράψαμε μεταφράζεται σε αύξηση του jitter των αναγεννημένων παλμών καθώς επίσης και σε μικρές διαταραχές του πλάτους τους. Οι επιπτώσεις αυτές στην ποιότητα των παλμών μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν στα διαγράμματα οφθαλμού του σχήματος 5-38, στα οποία απεικονίζεται το υποβαθμισμένο από θόρυβο πλάτους 10 Gb/s DPSK σήμα και το αντίστοιχο αναγεννημένο σήμα για τα τρία μήκη κύματος τα οποία μελετάμε.

Για κάθε μήκος κύματος, το επίπεδο του θορύβου ρυθμίστηκε κατάλληλα ώστε το SNR του εγχεόμενου οπτικού σήματος να διατηρείται σταθερό και ίσο με 23 dB. Παρά λοιπόν

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

τη χαμηλότερη συμπίεση θορύβου που παρουσιάζει το εγκλειδωμένο Fabry-Pérot laser έναντι ενός μονότροπου ημιαγωγικού laser, είναι ξεκάθαρο, ότι οι αναγεννητικές του επιδόσεις παραμένουν εξαιρετικές. Όπως είναι εμφανές από τα διαγράμματα οφθαλμού του σχήματος 5-38, το Fabry-Pérot όχι μόνο βελτιώνει σε σημαντικά το υποβαθμισμένο σήμα αλλά παρουσιάζει παρόμοιες επιδόσεις για όλη την περιοχή των 16.4 nm. Η εγκλειδωση φάσης είναι σαφώς εφικτή και πέραν της περιοχής που μελετάμε, το αυξημένο όμως ποσοστό έγχυσης που απαιτείται σε αυτή την περίπτωση περιορίζει σημαντικά τις αναγεννητικές επιδόσεις του συστήματος.

Για να αξιολογήσουμε ποσοτικά τις επιδόσεις του προτεινόμενου συστήματος πραγματοποιούμε μία σειρά μετρήσεων του ρυθμού σφαλμάτων για τα τρία μήκη κύματος εγκλειδωσης διατηρώντας το οπτικό SNR του σήματος και για τις τρεις περιπτώσεις σταθερό και ίσο με 23 dB.



Σχήμα 5-39: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει της ισχύος λήψης στον DPSK δέκτη για υποβαθμισμένο 10 Gb/s DPSK σήμα οπτικού SNR 23 dB (μαύρη γραμμή) και για το αντίστοιχο αναγεννημένο σήμα στα μήκη κύματος των 1538.89 nm (μπλέ γραμμή), 1549.09 nm (πράσινη γραμμή) και 1555.29 nm (κόκκινη γραμμή).

Το σχήμα 5-39 αποδεικνύει την σχεδόν σταθερή απόκριση του συστήματος σε όλο το εύρος των 16.4 nm και τον αξιοσημείωτο βαθμό βελτίωσης του αναγεννημένου σήματος που προσφέρει η εγκλειδωση φάσης, μέσω της συμπίεσης θορύβου ακόμα και υπό καθεστώς υψηλού ποσοστού έγχυσης (-11 dB). Για τον ελάχιστο ρυθμό σφαλμάτων της τάξης του 10^{-3} , όριο το οποίο με τη χρήση εμπρόσθιας διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction, FEC) οδηγεί σε δίχως σφάλματα (error-free) μετάδοση, παρατηρούμε ότι το στάδιο εγκλειδωσης φάσης προσφέρει αύξησης της ευαισθησίας του DPSK δέκτη κατά περίπου 12 dB.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω αποτελέσματα, το εγκλειδωμένο Fabry-Pérot laser διαθέτει την ικανότητα πλήρους αναγέννησης σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση παρέχοντας υψηλό βαθμό συμπίεσης του θορύβου πλάτους, συντελεστή ενίσχυσης της τάξεως των 11 dB και ένα εύρος ζώνης λειτουργίας που φθάνει τα 16.4 nm. Τα χαρακτηριστικά αυτά μαζί με το χαμηλό κόστος κατασκευής, το μικρό μέγεθος και την μικρή ενεργειακή κατανάλωση των διατάξεων αυτών καθιστούν ιδιαίτερως ελκυστική την χρήση του συστήματος αυτού σε ένα αριθμό εφαρμογών.

5.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάσαμε μία καινοτόμα αρχιτεκτονική για την αμιγώς οπτική ενίσχυση και αναγέννηση DPSK και DQPSK σημάτων η οποία στηρίζεται στην εγκλείδωση φάσης μονότροπων και Fabry-Pérot ημιαγωγικών laser. Το προτεινόμενο σύστημα επέδειξε αξιοσημείωτες επιδόσεις ως προς τη βελτίωση υποβαθμισμένων σημάτων κυρίως από θόρυβο μόνο στο πλάτος. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το σύστημα μπορεί να διαχειριστεί με εξαιρετική επιτυχία ρυθμούς δεδομένων που φθάνουν τα 10 Gb/s, προσφέροντας ενίσχυση που φθάνει μέχρι και τα 17 dB. Ως αναγεννητής προσφέρει βελτίωση του OSNR του υποβαθμισμένου σήματος κατά 1.5 dB, ενώ στην πλευρά του δέκτη μπορεί να προσφέρει αύξηση της ευαισθησίας του έως και 12 dB για περιπτώσεις σημάτων υποβαθμισμένων από θόρυβο μόνο στο πλάτος. Η αριθμητική μελέτη του συστήματος αποδεικνύει τη δυνατότητα του να διαχειριστεί σήματα έως και 25 Gb/s για την περίπτωση της δυαδικής διαμόρφωσης (DPSK) και 50 Gb/s για την περίπτωση της ορθογωνικής διαμόρφωσης (DQPSK).

Ο προτεινόμενος αμιγώς οπτικός ενισχυτής-αναγεννητής μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί είτε για τον περιοδικό περιορισμό του θορύβου πλάτους σημάτων διαμορφωμένων κατά φάση συμπιέζοντας έτσι την επίδραση του μη γραμμικού θορύβου φάσης, είτε ως μονάδα εισόδου για την αναβάθμιση των ήδη υπαρχόντων DPSK και DQPSK δεκτών αλλά και ως επιπρόσθετη βαθμίδα εξόδου στους PSA περιορίζοντας τον θόρυβο πλάτους που παρουσιάζεται στην έξοδό τους οδηγώντας σε συμπίεση του συνολικού θορύβου. Αν κανείς αναλογιστεί το χαμηλό κόστος υλοποίησης, την εξαιρετική απλότητα, το μικρό μέγεθος, τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση καθώς επίσης και τη δυνατότητα διαφάνειας μήκους κύματος (Fabry-Pérot) τότε καταλήγουμε σε μία ιδιαίτερος ενδιαφέρουσα και άκρως ελκυστική λύση για τη βελτίωση της απόδοσης των σύμφωνων οπτικών συστημάτων.

6. Εφαρμογή των εγκλειδωμένων ημιαγωγικών laser για την αποδιαμόρφωση DPSK/ASK σημάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται εν συντομία όλα τα τρέχοντα και προτεινόμενα σχήματα διαμόρφωσης σαν συνάρτηση της φασματικής τους απόδοσης και των επιδόσεών τους για την αξιοποίησή τους στα μελλοντικά οπτικά δίκτυα των 100 G και 400 G. Από την παρουσίαση αυτή προκύπτει η επιτακτική ανάγκη του σχεδιασμού νέων σχημάτων διαμόρφωσης τα οποία θα προσφέρουν μία απλή, οικονομική και ενεργειακά αποδοτικότερη λύση για την αναβάθμιση των δικτύων πρόσβασης αλλά και των μητροπολιτικών δικτύων σε υψηλότερους ρυθμούς. Για το σκοπό αυτό προτείνεται μία νέα προσέγγιση για την αποδιαμόρφωση του ήδη γνωστού σχήματος ορθογωνίας διαμόρφωσης DPSK/ASK, η οποία βασίζεται στη χρήση του εγκλειδωμένου ημιαγωγικού ενισχυτή που προτείνουμε και μελετήσαμε διεξοδικά στο 5^ο κεφάλαιο. Ο προτεινόμενος πομποδέκτης αυξάνει δραματικά τις επιδόσεις του DPSK/ASK σήματος και επεκτείνει την χρήση του σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών καθιστώντας το σε εξαιρετικό υποψήφιο για τα δίκτυα επόμενης γενιάς.



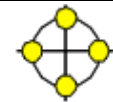
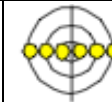
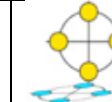
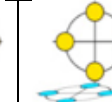
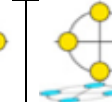
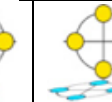
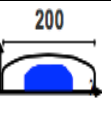
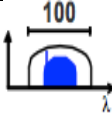
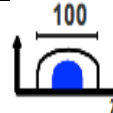
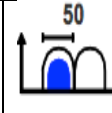
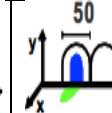
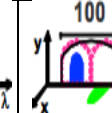
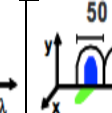
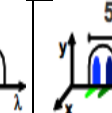
6.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με τα όσα έχουμε αναφέρει μέχρι στιγμής στην παρούσα διδακτορική διατριβή, ο αναγνώστης έχει καταλάβει ότι η τάση της νέας εποχής των οπτικών επικοινωνιών είναι η αύξηση της χωρητικότητας των διαφόρων επιπέδων των σύγχρονων οπτικών δικτύων διατηρώντας ταυτόχρονα την ποιότητα των μεταδόσεων σε υψηλά επίπεδα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου έχει δοθεί ιδιαίτερη προσπάθεια στον σχεδιασμό νέων σχημάτων διαμόρφωσης με σκοπό τη μεταφορά δεδομένων που θα ξεπερνούν τους ρυθμούς των 100 Gb/s και 400 Gb/s ενώ ταυτόχρονα θα διατηρούν το εύρος ζώνης των καναλιών εντός των ορίων που επιβάλλονται από τα πρότυπα των WDM μεταδόσεων. Επιπλέον, τα σήματα θα πρέπει να είναι συμβατά με τα εμπορικά διαθέσιμα και ήδη εγκατεστημένα ηλεκτρονικά συστήματα των 10 Gb/s, 25 Gb/s και 40 Gb/s αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να σχεδιάζονται με γνώμονα τις χαμηλότερες απαιτήσεις ώστε να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα η ενεργειακή κατανάλωση, παράγοντας ο οποίος φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο για τις μελλοντικές εγκαταστάσεις. Με βάση αυτή τη σχεδιαστική πρόκληση, μέχρι στιγμής, έχει προταθεί μία σειρά τεχνικών διαμόρφωσης με αυξημένη φασματική απόδοση, οι οποίες βασίζονται στην πολυπλεξία με διαίρεση ορθογωνίων συχνοτήτων (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) [175], στη σύμφωνη λήψη πολύπλοκων πολυεπίπεδων διαμορφώσεων φάσης όπως είναι το M-PSK και το M-QAM (multi-level quadrature amplitude modulation) [176], ή ακόμα και στον συνδυασμό περισσοτέρων της μιας διαμορφώσεων όπως είναι η διαμόρφωση πόλωσης με ορθογωνική διαμόρφωση φάσης και διαίρεση ορθογωνίων συχνοτήτων (PM-OFDM-QPSK) [177], [178] καθώς επίσης και η διαμόρφωση πόλωσης με διαφορική ορθογωνική διαμόρφωση στη φάση (PM-DQPSK) [177]-[179]. Στον πίνακα 6-1 παρουσιάζονται όλες οι προτεινόμενες τεχνικές διαμόρφωσης για κανάλια των 100 Gb/s και παρέχονται πληροφορίες αναφορικά με τον αστερισμό της κάθε διαμόρφωσης, το απαιτούμενο φάσμα, τη φασματική απόδοση, τη μέγιστη απόσταση διάδοσης και το σύστημα λήψης.

Τα παρακάτω σχήματα διαμόρφωσης αν και όπως παρατηρούμε προσφέρουν βελτιωμένη φασματική απόδοση έναντι των απλών OOK και PSK διαμορφώσεων, παρόλα αυτά αυξάνουν την πολυπλοκότητα, την ενεργειακή κατανάλωση και το κόστος του δέκτη κάνοντας καταλληλότερη τη αξιοποίησή τους κυρίως στα δίκτυα ευρείας έκτασης (long haul networks) και λιγότερο στα μητροπολιτικά δίκτυα (metro networks).

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Πίνακας 6-1: Χαρακτηριστικά των 100 Gb/s σχημάτων διαμόρφωσης

Σχήμα διαμόρφωσης	OOK	OOK-VSB	DQPSK	RZ-DPSK-3ASK	PM-DQPSK	OP-FDM-RZ-DQPSK	PM-QPSK	PM-OFDM-QPSK
Λήψη	Μη συμφ.	Μη συμφ.	Μη συμφ.	Μη συμφ.	Μη συμφ.	Μη συμφ.	Συμφ.	Συμφ.
Bits/σύμβ.	1	1	2	2.5	2x2	2x2	2x2	2x2x2
Ρυθμός Συμβόλων (Gbd)	112	112	56	44	28	28	28	14
Αστερισμός								 x2
DWDM Πλέγμα (GHz)								
Φασματική απόδοση (bits/s/Hz)	0.5	1	1	2	2	1	2	2
Απόσταση διάδοσης (km)	< 500	< 500	1000	< 500	600	1500	1500	2000

Πρόσφατα, νέα σχήματα διαμόρφωσης, τα οποία βασίζονται στη χρήση ορθογώνιων διαμορφώσεων όπως το DPSK/ASK [180] και το RZ-DPSK/3ASK [181], προτάθηκαν ως εναλλακτικές λύσεις για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού προσφέροντας επιπλέον λειτουργικότητες όπως η αλλαγή ετικετών (label swapping) [182] και η επιλεκτική μετάδοση (selective broadcasting) [180]. Ταυτόχρονα η απλούστερη υλοποίηση του πομπού και του δέκτη επιτρέπουν την αξιοποίηση των συγκεκριμένων διαμορφώσεων σε μητροπολιτικά δίκτυα αλλά και σε δίκτυα κοντινής απόστασης.

Αν και η διπλή ορθογώνια διαμόρφωση φάσης και πλάτους προσφέρει καλύτερη φασματική και ενεργειακή απόδοση από το τυπικό ASK, το οποίο όπως αναφέραμε αποτελεί την κυρίαρχη διαμόρφωση για τα δίκτυα κοντινής έκτασης και τα μητροπολιτικά δίκτυα, ωστόσο επιβάλλει έναν σημαντικό περιορισμό στις επιδόσεις της. Το σύστημα λήψης για την αποδιαμόρφωση του DPSK/ASK σήματος αποτελείται από έναν δέκτη άμεσης φώρασης για το ASK σήμα και έναν δέκτη διαφορικής λήψης για την φώραση του DPSK σήματος. Παρόλη την απλότητα του συστήματος λήψης, το αποδιαμορφωμένο DPSK σήμα υποφέρει από τις διαταραχές πλάτους που εισάγονται σε αυτό λόγω της πληροφορίας πλάτους που υπάρχει στο αρχικό σήμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο λόγος σβέσης (ER) του ASK σήματος να διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (κάτω των 3 dB) ώστε να περιορίσει τις διαταραχές πλάτους που εισάγονται

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψηλών συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

κατά την αποδιαμόρφωση του DPSK σήματος και με αυτό τον τρόπο να διασφαλίσει τον πλήρη διαχωρισμό των δύο ροών πληροφορίας και την επιτυχή αποδιαμόρφωσή τους.

Ο περιορισμός αυτός στον λόγο σβέσης του ASK σήματος το κάνει περισσότερο επιρρεπές στον θόρυβο ASE που εισάγεται κατά τα ενδιάμεσα στάδια ενίσχυσης μιας οπτικής ζεύξης και ταυτόχρονα περιορίζει το μέγιστο μήκος διάδοσης του DPSK/ASK σήματος. Για το σκοπό αυτό, σε αυτό το κεφάλαιο, προτείνεται η προσθήκη ενός slave laser πριν τον δέκτη του DPSK σήματος, το οποίο θα αναλάβει τη συμπίεση της πληροφορίας πλάτους και του θορύβου του DPSK/ASK σήματος και με αυτό τον τρόπο θα επιτρέψει τον σαφή διαχωρισμό των δύο ροών πληροφορίας ακόμα και για λόγους σβέσης του ASK σήματος που φθάνουν έως και τα 8 dB βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις επιδόσεις και των δύο σημάτων.

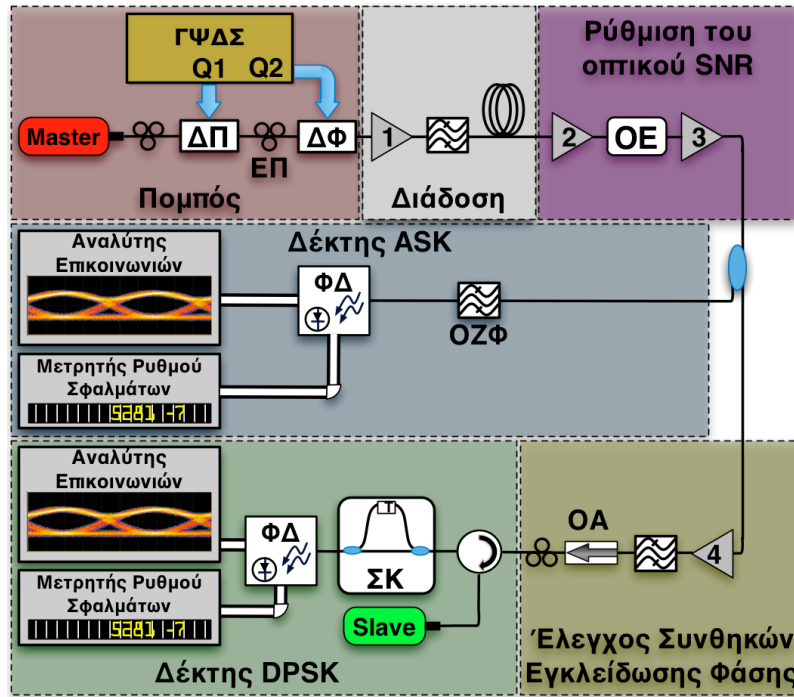
Στις παραγράφους που ακολουθούν θα περιγράψουμε την πειραματική διάταξη του προτεινόμενου δέκτη και θα παρουσιάσουμε εκτενή αποτελέσματα για τις επιδόσεις του συστήματος για διάδοση 20 Gb/s DPSK/ASK σήματος σε απόσταση 50 km. Τέλος, λόγω του περιορισμού στον εργαστηριακό εξοπλισμό, θα παραθέσουμε μία αριθμητική μελέτη των επιδόσεων του συστήματος για διάδοση μεγάλων αποστάσεων 10 WDM καναλιών. Η μελέτη πραγματοποιείται για ρυθμούς 20 Gb/s και 50 Gb/s και επιδεικνύει πραγματικά εντυπωσιακά αποτελέσματα.

6.2 Πειραματική μελέτη

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάσαμε τις εντυπωσιακές ικανότητες υψηλής συμπίεσης των διαταραχών πλάτους και μεγάλου εύρους διαμόρφωσης που προσφέρει ένα εγκλειδωμένο ημιαγωγικό laser. Εκμεταλλευόμενοι αυτές τις πολύ σημαντικές ιδιότητες, όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο, θα εισάγουμε το slave laser ως μία επιπρόσθετη βαθμίδα στην είσοδο του DPSK δέκτη για να βελτιστοποιήσουμε την ανάκτηση του DPSK σήματος μέσω της ολοκληρωτικής διαγραφής της διαμόρφωσης πλάτους του αρχικού DPSK/ASK σήματος.

Στο σχήμα 6-1 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη τους προς μελέτη πομποδέκτη. Το master laser είναι ένα μονότροπο laser εξωτερικής κοιλότητας το οποίο τροφοδοτείται με ρεύμα πόλωσης 80 mA ώστε να εκπέμπει 6 mW ισχύος. Η ένταση του οπτικού σήματος στην έξοδο του laser διαμορφώνεται με πληροφορία 10 Gb/s (Q1), μέσω ενός Mach-Zender εξωτερικού διαμορφωτή πλάτους, η οποία παράγεται από μία γεννήτρια ψευδοτυχαίων ακολουθιών ηλεκτρικών παλμών με μορφή μη-επιστροφής-στο-μηδέν (non-return-to-zero, NRZ) και περιοδικότητα $2^{31}-1$. Το διαμορφωμένο κατά πλάτος σήμα στη συνέχεια διέρχεται μέσω ενός εξωτερικού διαμορφωτή φάσης, ο οποίος φορτώνει στο σήμα μία δεύτερη ροή πληροφορίας ρυθμού 10 Gb/s (Q2). Πριν από κάθε διαμορφωτή χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής πόλωσης ώστε να ευθυγραμμιστεί ο οπτικός άξονας του σήματος με τον αντίστοιχο του κάθε διαμορφωτή και έτσι να ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες και να μεγιστοποιήσουμε τη μεταφορά της διαμόρφωσης στο σήμα. Ο πρώτος οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται μόνο για την πειραματική μελέτη της διάδοσης και αναλαμβάνει το ρόλο του βοηθητικού ενισχυτή (booster) για την ρύθμιση του επιπέδου της ισχύος διάδοσης του σήματος. Ο δεύτερος EDFA παίζει το ρόλο του ενισχυτή γραμμής και ενισχύει το DPSK/ASK σήμα η εξασθένηση του οποίου έχει προέλθει είτε από τα επάλληλα στάδια διαμόρφωσης (πείραμα χωρίς διάδοση, back-to-back) είτε από τη διάδοση. Ο τρίτος ενισχυτής αποτελεί τον προ-ενισχυτή λήψης με σταθερή έξοδο στα 2 dBm, ο οποίος σε συνδυασμό με τον οπτικό εξασθενητή στην είσοδό του ρυθμίζει τον λόγο του οπτικού σήματος-προς-θόρυβο του σήματος πριν την λήψη. Στη συνέχεια το σήμα χωρίζεται σε δύο οπτικές διαδρομές μέσω ενός οπτικού συζεύκτη 3 dB και οδεύει προς τους δύο επιμέρους δέκτες για την αποδιαμόρφωση του ASK και του DPSK σήματος.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



Σχήμα 6-1: Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης ενός DPSK/ASK δέκτη. ΓΨΔΣ: Γεννήτρια ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας, ΔΠ: Διαμορφωτής πλάτους, ΔΦ: Διαμορφωτής φάσης, ΕΠ: Ελεγκτής πόλωσης, EDFA 1: Προ-ενισχυτής διάδοσης, EDFA 2: Προ-ενισχυτής για ισοστάθμιση απωλειών ισχύος, EDFA 3: Ενισχυτής γραμμής σταθερής ισχύος εξόδου για τη ρύθμιση οπτικού SNR, EDFA 4: Ρύθμιση ποσοστού έγχυσης, ΟΖΦ: Οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΟΕ: Οπτικός εξασθενητής, ΟΑ: Οπτικός απομονωτής, ΣΚ: Συμβολόμετρο καθυστέρησης και ΦΔ: Φωτοδίοδος.

Ο ASK δέκτης είναι ένας τυπικός δέκτης άμεσης φώραση ο οποίος αποτελείται από ένα οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο εύρους ζώνης 1 nm για τον περιορισμό του συσσωρευμένου θορύβου ASE που προστίθεται στο σήμα μέσω των ενδιάμεσων σταδίων ενίσχυσης και μία φωτοδίοδο η οποία αναλαμβάνει την άμεση φώραση της πληροφορίας πλάτους.

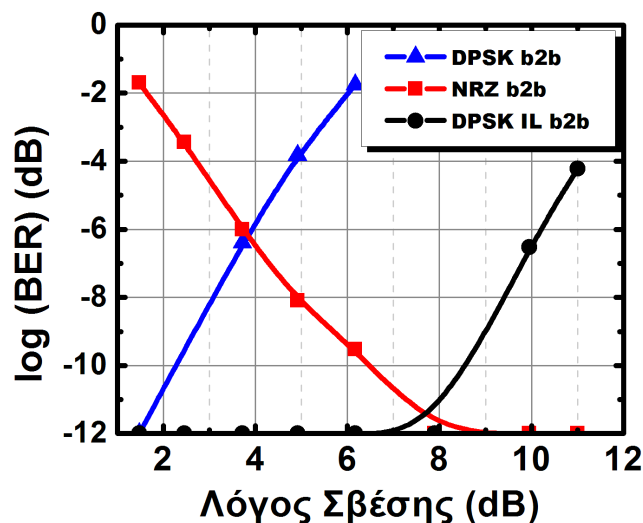
Στην πλευρά του DPSK δέκτη, το σήμα αφού διέλθει μέσω του τέταρτου ενισχυτή, ο οποίος μαζί με τον ελεγκτή πόλωσης που ακολουθεί ρυθμίζει τις συνθήκες εγκλειδωσης, φιλτράρεται από ένα οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο εύρους ζώνης 1 nm και εισέρχεται στο slave laser μέσω ενός οπτικού κυκλοφορητή. Ένα οπτικός απομονωτής εισάγεται πριν τον κυκλοφορητή ώστε να περιορίσει κατά περίπου 60 dB το οπισθοσκεδαζόμενο φως, εμποδίζοντας με αυτό τον τρόπο τις αστάθειες που μπορεί να προκύψουν στο σύστημα. Το καθαρό από διαταραχές πλάτους DPSK σήμα στην έξοδο του slave laser εξέρχεται μέσω της τρίτης πόρτας του κυκλοφορητή και οδεύει σε ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης 10 ps, το οποίο μαζί με τη φωτοδίοδο που ακολουθεί αναλαμβάνουν την αποδιαμόρφωση και τη φώραση του σήματος. Η έξοδος της φωτοδίοδου κάθε δέκτη συνδέεται σε έναν αναλύτη επικοινωνιών εύρους ζώνης 12 GHz για την παρατήρηση και τη μέτρηση των χρονικών χαρακτηριστικών του ηλεκτρικού σήματος (jitter, άνοιγμα διαγραμμάτων οφθαλμού, παράγοντα Q) και σε ένα 12 GHz μετρητή ρυθμού σφαλμάτων για την τελική αξιολόγηση των επιδόσεων του συστήματος. Οι φωτοδιόδοι που χρησιμοποιούνται και στους δύο δέκτες έχουν εύρος ζώνης 12 GHz.

Αρχικά, για να αξιολογήσουμε την ικανότητα του DPSK δέκτη να διαχωρίσει τις δύο διαμορφώσεις του DPSK/ASK σήματος, παραλείπουμε το στάδιο της διάδοσης (σχ.Σχήμα 6-1) και συνδέουμε άμεσα το master με το slave laser (back-to-back διασύνδεση). Με κατάλληλη ρύθμιση της πόλωσης και της ισχύος του εγχεόμενου σήματος επιτυγχάνεται η βέλτιστη εγκλειδωση του slave laser με ποσοστό έγχυσης $R = -9.12$ dB. Το ποσοστό αυτό, όπως εξηγήσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ισχύος του ελεύθερα ταλαντούμενου slave laser,

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψηλού ρυθμού συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι 8.2 dBm, και του αθροίσματος της ισχύος του εγχεόμενου σήματος μετά τον κυκλοφορητή (6.88 dBm) και των απωλειών σύζευξης, οι οποίες έχουν μία τυπική τιμή ίση με 8 dB.

Διατηρώντας στα -5 dBm την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος στην είσοδο της φωτοδιόδου του κάθε δέκτη, πραγματοποιούμε μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων για τα αποδιαμορφωμένα ASK και DPSK σήματα για διάφορες τιμές του ER του αρχικού ASK σήματος (σχ. 6-2). Με απενεργοποιημένη τη βαθμίδα της εγκλειδωσης φάσης παρατηρούμε ότι ο DPSK δέκτης μπορεί να αποδιαμορφώσει επιτυχώς το σήμα για τιμές του ER μικρότερες των 4 dB όπως ακριβώς αποδεικνύει και ο Yin Zhang στην αντίστοιχη δουλειά του [180]. Καθώς όμως ο λόγος σβέσης αυξάνεται, το DPSK σήμα υποβαθμίζεται δραματικά έως τα 6 dB όπου πλέον είναι αδύνατη η αποδιαμόρφωσή του. Ωστόσο, όταν ενεργοποιηθεί η βαθμίδα της εγκλειδωσης φάσης παρατηρούμε ότι το DPSK σήμα αποδιαμορφώνεται χωρίς την παρουσία σφαλμάτων ($BER \sim 10^{-12}$) για λόγο σβέσης που φθάνει έως και τα 8 dB. Ταυτόχρονα λόγω του υψηλού ER βελτιώνεται και η λήψη του ASK σήματος.

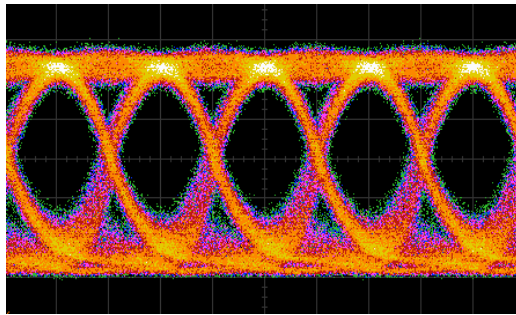


Σχήμα 6-2: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων για 10 Gb/s ASK σήμα μετά την άμεση αποδιαμόρφωσή του (κόκκινα τετράγωνα) και 10 Gb/s DPSK σήμα αποδιαμορφωμένο με (μαύρες κουκίδες) και χωρίς εγκλειδωση φάσης (μπλέ τρίγωνα).

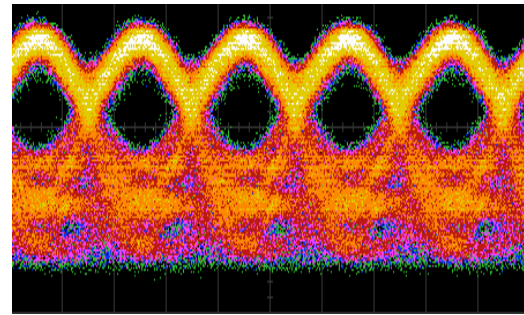
Η αξιοσημείωτη ικανότητα του εγκλειδωμένου laser να συμπιέζει σε μεγάλο βαθμό το πλάτος του εγχεόμενου σήματος ενώ παράλληλα αναπαράγει πλήρως την πληροφορία φάσης απεικονίζεται ξεκάθαρα στα διαγράμματα οφθαλμού των σχημάτων 6-3 και 6-4, τα οποία αντιστοιχούν σε λόγους σβέσης του ASK σήματος 5 dB και 8 dB, αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τα παρακάτω διαγράμματα οφθαλμού παρατηρούμε τη ραγδαία υποβάθμιση που επιφέρει στο DPSK σήμα (σχ. 6-3β και σχ. 6-4β) η αύξηση του λόγου σβέσης του ASK σήματος (σχ. 6-3α και σχ. 6-4α) λόγω των διαταραχών πλάτους που επιβάλλει σε αυτό. Αντιθέτως, όταν ενεργοποιηθεί η βαθμίδα της εγκλειδωσης φάσης, η συμπίεση της πληροφορίας πλάτους φθάνει τα 8 dB, επιτρέποντας την πλήρη ανάκτηση του DPSK σήματος (σχ. 6-3δ και σχ. 6-4δ) χωρίς την εμφάνιση σφαλμάτων. Αν και η συμπίεση αυτή είναι αρκετά υψηλή παρόλα αυτά στο πλάτος του σήματος στην έξοδο του slave laser παρατηρείται μία διαταραχή η οποία προκύπτει από την υπέρθεση της εναπομείνουσας διαμόρφωσης ASK και των ταλαντώσεων αποκατάστασης που προκαλούνται κατά την απώλεια εγκλειδωσης στη διάρκεια των φασικών μεταβάσεων. Οι διαταραχές αυτές ωστόσο δεν είναι αρκετά σημαντικές ώστε να υποβαθμίσουν το DPSK σήμα και παραμένουν αμελητέες για λόγους σβέσης μικρότερους των 8 dB και για σχετικά χαμηλά ποσοστά έγχυσης.

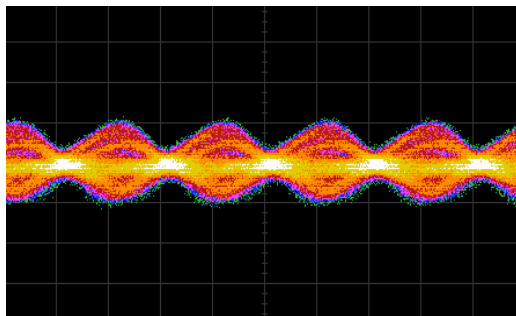
Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών



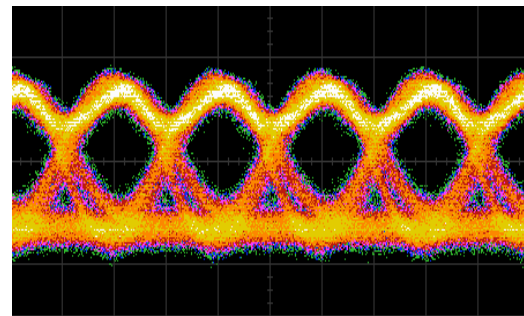
(α)



(β)

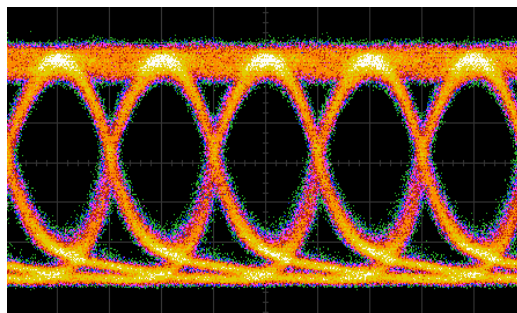


(γ)

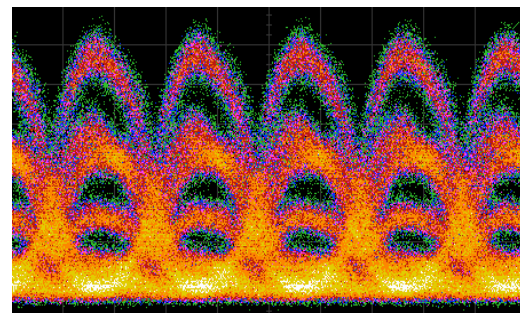


(δ)

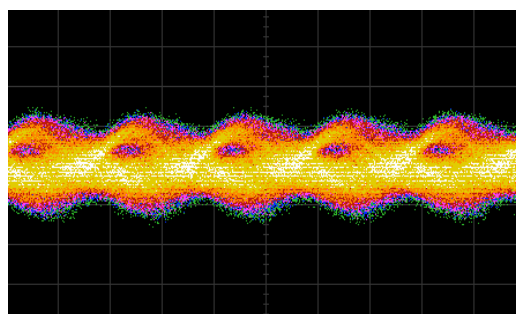
Σχήμα 6-3: Διαγράμματα οφθαλμού για το αποδιαμορφωμένο ASK σήμα με $ER=5$ dB (α), το υποβαθμισμένο DPSK σήμα με απενεργοποιημένη τη βαθμίδα εγκλείδωσης (β), το συμπιεσμένο ASK σήμα στην έξοδο του slave laser (γ) και το πλήρως ανεκτημένο DPSK σήμα με ενεργοποιημένη τη βαθμίδα εγκλείδωσης (δ).



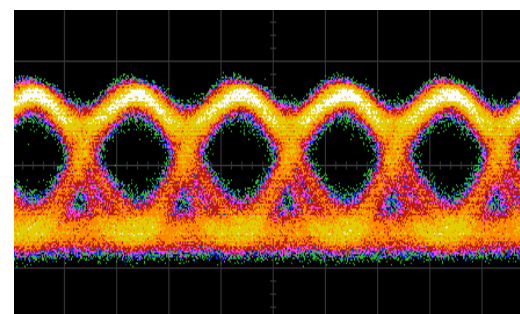
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 6-4: Διαγράμματα οφθαλμού για το αποδιαμορφωμένο ASK σήμα με $ER=8$ dB (α), το υποβαθμισμένο DPSK σήμα με απενεργοποιημένη τη βαθμίδα εγκλείδωσης (β), το συμπιεσμένο ASK σήμα στην έξοδο του slave laser (γ) και το πλήρως ανεκτημένο DPSK σήμα με ενεργοποιημένη τη βαθμίδα εγκλείδωσης (δ).

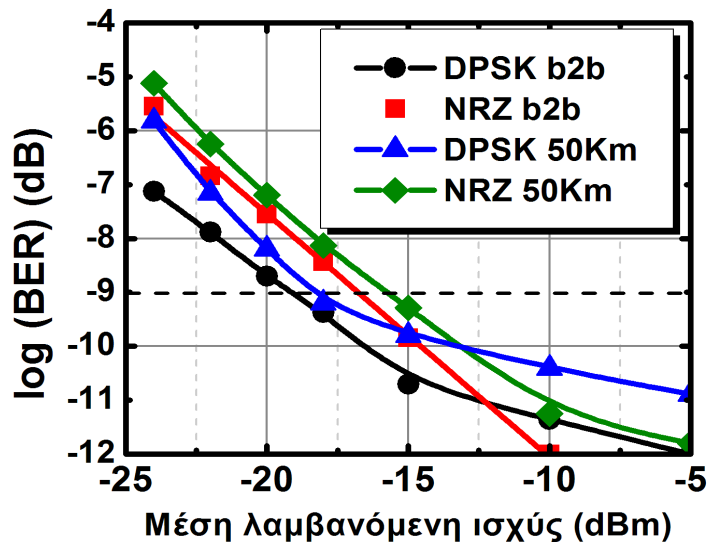
Για να αξιολογήσουμε πλήρως τις επιδόσεις του προτεινόμενου δέκτη, πραγματοποιούμε μία σειρά μετρήσεων του ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει της λαμβανόμενης στην είσοδο του τρίτου ενισχυτή ισχύος, για διάδοση του DPSK/ASK σήματος σε απόσταση 50 km και λόγω σβέσης του ASK σήματος ίσο με 8 dB. Η τιμή

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψηλού ρυθμού συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

αυτή του ER επιλέγεται καθώς, σύμφωνα με το σχήμα 6-2, προσφέρει παρόμοιες επιδόσεις στο DPSK και το ASK σήμα.

Το σήμα πριν τη διάδοσή του διέρχεται μέσω ενός οπτικού ενισχυτή (πρώτος ενισχυτής) ώστε να αντισταθμιστούν οι απώλειες που έχουν εισαχθεί μέσω των επάλληλων σταδίων διαμόρφωσης, οι οποίες έχουν υποβαθμίσει την ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος στα -11 dBm, και να ρυθμιστεί η ισχύς του διαδιδόμενου σήματος στα 2 dBm. Στην έξοδο της μονότροπης ίνας (SMF) τοποθετείται μία ίνα αντιστάθμισης διασποράς (DCF) μήκους 6 km ώστε να “μαζέψει” τη χρονική διεύρυνση που υπέστη το DPSK/ASK σήμα κατά τη διάδοσή του. Τέλος, οι απώλειες διάδοσης, οι οποίες έχουν εξασθενήσει το σήμα κατά 15 dB, αντισταθμίζονται από τον δεύτερο οπτικό ενισχυτή στην έξοδο της οπτικής ζεύξης.

Στο σχήμα 6-5 παραθέτουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ρυθμού σφαλμάτων των αποδιαμορφωμένων ASK και DPSK σημάτων με και χωρίς διάδοση, για τη συγκριτική μελέτη των επιδόσεων του συστήματος λήψης.



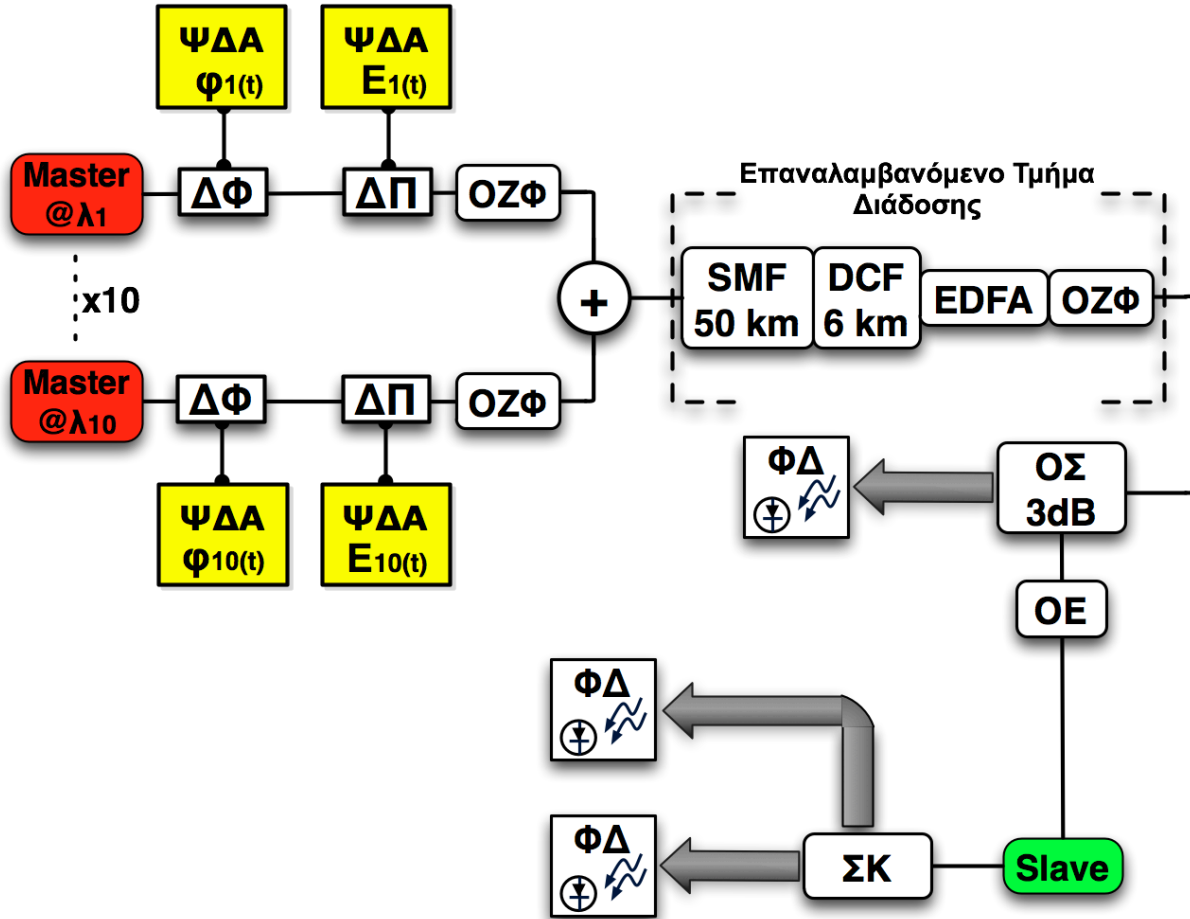
Σχήμα 6-5: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων για το αποδιαμορφωμένο 10 Gb/s ASK σήμα με (πράσινοι ρόμβοι) και χωρίς διάδοση (κόκκινα τετράγωνα) και για το αποδιαμορφωμένο 10 Gb/s DPSK σήμα με (μπλέ τρίγωνα) και χωρίς διάδοση (μαύρες κουκίδες).

Όπως παρατηρούμε, οι επιδόσεις του συστήματος είναι πραγματικά εντυπωσιακές προσφέροντας διάδοση χωρίς σφάλματα ($BER < 10^{-9}$) για τιμές της λαμβανόμενης ισχύος έως και -15 dBm, ενώ η επιβάρυνση της ισχύος μεταξύ του σήματος με και χωρίς διάδοση, και για τις δύο ροές δεδομένων, είναι περίπου ίσο με 1 dB. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά και προβάλλουν την αξιοποίηση του συγκεκριμένου δέκτη ως μία οικονομική, απλή και ενεργειακά αποδοτική εναλλακτική για την αύξηση της χωρητικότητας καναλιού κυρίως για τις ζεύξεις κοντινής απόστασης. Ωστόσο, το σύστημα επιδέχεται βελτίωση και όπως θα δούμε παρακάτω μπορεί όχι μόνο να παρουσιάσει αυξημένες επιδόσεις αλλά να οδηγήσει στο σχεδιασμό φασματικά αποδοτικότερων σχημάτων διαμόρφωσης, τα οποία θα ωθήσουν τη χωρητικότητα καναλιού πέραν των 100 Gb/s.

Λόγω του περιορισμού του εργαστηριακού εξοπλισμού, η μελέτη των επιδόσεων του προτεινόμενου συστήματος δεν κατάφερε να επεκταθεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις και υψηλότερους ρυθμούς, ωστόσο στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζεται μία εκτενής αριθμητική μελέτη του μοντέλου του DPSK/ASK πομποδέκτη, η οποία μας δίνει μία εκτίμηση των δυνατοτήτων του.

6.3 Αριθμητική μελέτη

Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιούμε μία αριθμητική επίλυση του μοντέλου του DPSK/ASK πομποδέκτη, το οποίο υλοποιούμε με βάση το διάγραμμα του σχήματος 6-6, ώστε να αξιολογήσουμε τις επιδόσεις του συστήματος για διάδοση 10 WDM καναλιών σε αποστάσεις εντός των ορίων ενός μητροπολιτικού δικτύου.



Σχήμα 6-6: Διάγραμμα διασύνδεσης των δομικών μοντέλων για την αριθμητική μελέτη του DPSK/ASK πομποδέκτη. ΔΦ: διαμορφωτής φάσης, ΔΠ: διαμορφωτής πλάτους, ΟΖΦ: οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ΨΔΑ: ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία, SMF: μονότροπη ίνα, DCF: ίνα αντιστάθμισης διασποράς, EDFA: ενισχυτής γραμμής, ΟΣ: οπτικός συζεύκτης 3 dB, ΟΕ: οπτική εξασθένιση, ΣΚ: συμβολόμετρο καθυστέρησης και ΦΔ: φωτοδίοδος.

Ως οπτικές πηγές στη μεριά του πομπού χρησιμοποιούμε μοντέλα laser τα οποία υλοποιούνται με βάση τις εξισώσεις ροής των σχέσεων 5.2 και 5.3.

$$E_{n(t)} = E_{0,n(t)} \exp[-j(\omega_n - \omega_0)t] \quad (6.1)$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει το οπτικό πεδίο κάθε μίας πηγής laser, και αποτελείται από το μιγαδικό οπτικό πεδίο που παράγεται από τις εξισώσεις ροής, $E_{0,n}$, και τον εκθετικό παράγοντα $\exp[-j(\omega_n - \omega_0)t]$, ο οποίος προσδίδει τη συχνότητα εκπομπής, ω_n , στην κάθε πηγή. Η συχνότητα ω_0 αντιστοιχεί στο μήκος κύματος μηδενικής διασποράς το οποίο για τις κλασικές μονότροπες ίνες ισούται με τα 1330 nm. Τα λοιπά χαρακτηριστικά του laser (εύρος γραμμής, RIN) καθορίζονται από τις μεταβλητές του πίνακα 5-1, οι οποίες όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε η δυναμική συμπεριφορά του master και του slave laser να προσεγγίζει αυτή των πειραματικών. Το ρεύμα πόλωσης του κάθε laser επιλέγεται στα 40 mA με την ισχύ εκπομπής να είναι 3 mW. Τα 10 μήκη κύματος εκπομπής τοποθετούνται συμμετρικά γύρω από το μήκος κύματος αναφοράς των 1550 nm και

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

διαχωρίζονται με 50 GHz φασματική απόσταση, η οποία επιλέγεται σύμφωνα με τα πρότυπα της ITU για την πολυκάναλη WDM μετάδοση.

Στην φάση του οπτικού πεδίου κάθε πηγής φορτώνεται μία ψευδοτυχαία ροή δεδομένων μέσω ενός εξωτερικού διαμορφωτή, ο οποίος υλοποιείται με βάση την εξίσωση 5.11. Τα δεδομένα κωδικοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε το σήμα που θα προκύψει να είναι DPSK. Στη συνέχεια, ένας εξωτερικός διαμορφωτής πλάτους, ο οποίος μοντελοποιείται με βάση την εξίσωση 3.1, διαμορφώνει την ένταση του πεδίου της κάθε πηγής με ψευδοτυχαία παλμοσειρά μορφής NRZ. Το DPSK/ASK σήμα της κάθε πηγής φιλτράρεται μέσω ενός στενού οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου με εύρος ζώνης 10 GHz μεγαλύτερο του εκάστοτε ρυθμού δεδομένων και στη συνέχεια τα τελικά σήματα πολυπλέκονται μέσω ενός αθροιστή, ο οποίος παίζει το ρόλο οπτικού πολυπλέκτη AWG (arrayed waveguide grating, φράγμα περίθλασης παρατεταγμένων κυματοδηγών). Ο λόγος που το κάθε σήμα φιλτράρεται πριν την WDM εκπομπή είναι για να περιοριστεί η επίδραση της αλληλοπαρεμβολής συμβόλων (ISI), η οποία προκύπτει από την αλληλοεπικάλυψη των φασμάτων των γειτονικών καναλιών λόγω της χρωματικής διασποράς. Ο λόγος σβέσης της πληροφορίας πλάτους κάθε καναλιού ρυθμίζεται, μέσω των τάσεων (V_{bias} , V_{π} και V_{pp}) που οδηγούν τον διαμορφωτή πλάτους, στα 8 dB και η οπτική ισχύς διάδοσης επιλέγεται στα 0 dBm ανά κανάλι.

Η οπτική ζεύξη χωρίζεται σε τμήματα, κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από μία μονότροπη ίνα (SMF) μήκους 50 km, μία ίνα αντιστάθμισης διασποράς (DCF) μήκους 6 km, έναν οπτικό ενισχυτή ερβίου και ένα οπτικό φίλτρο εύρους ζώνης 1 nm. Το μοντέλο της διάδοσης στην ίνα βασίζεται στην επίλυση της μη γραμμικής εξίσωσης Schrödinger 2.27 μέσω της μεθόδου Split Step Fourier που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2. Οι χαρακτηριστικές παράμετροι των δύο ινών έχουν επιλεγεί ώστε να είναι ίδιες με τις αντίστοιχες πειραματικές. Έτσι λοιπόν, η μονότροπη ίνα έχει 0.2 dB/km απώλειες, μη γραμμικότητα η οποία ισούται με $1.3 W^{-1} km^{-1}$ και χρωματική διασπορά 15.6 ps/nm/km, ενώ η ίνα αντιστάθμισης διασποράς έχει 0.67 dB/km απώλειες, μη γραμμικότητα $4 W^{-1} km^{-1}$ και διασπορά που ισούται με -130 ps/nm/km. Ο οπτικός ενισχυτής παίζει το ρόλο του ενισχυτή γραμμής ώστε να αντισταθμίζει τις απώλειες που εισάγονται κατά τη διάδοση του σήματος και χαρακτηρίζεται από θόρυβο ASE με φασματική πυκνότητα ισχύος η οποία δίνεται από τη σχέση 5.13. Στην έξοδο της ζεύξης ένα στενό οπτικό φίλτρο με εύρος ζώνης όσο το εύρος ζώνης του κάθε WDM καναλιού επιλέγει το προς επεξεργασία σήμα, το οποίο μέσω ενός οπτικού συζεύκτη των 3 dB οδηγείται στον ASK και τον DPSK δέκτη.

Ο ASK δέκτης αποτελείται από μία φωτοδίοδο 40 GHz η οποία αναλαμβάνει την άμεση φώραση του σήματος και χαρακτηρίζεται από θόρυβο βολής και θερμικό θόρυβο με φασματικές πυκνότητες ισχύος, οι οποίες περιγράφονται από τις σχέσεις 3.3 και 3.4, αντίστοιχα.

Στην είσοδο του DPSK δέκτη το slave laser, μέσω της εγκλειδωσης φάσης, αναλαμβάνει τη συμπίεση της περιττής πληροφορίας πλάτους και το ανεκτενόμενο DPSK σήμα στη συνέχεια οδηγείται σε ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης, το οποίο υλοποιείται με βάση τη μήτρα σκέδασης που αναφέραμε στο κεφάλαιο 3 (εξ. 3.9).

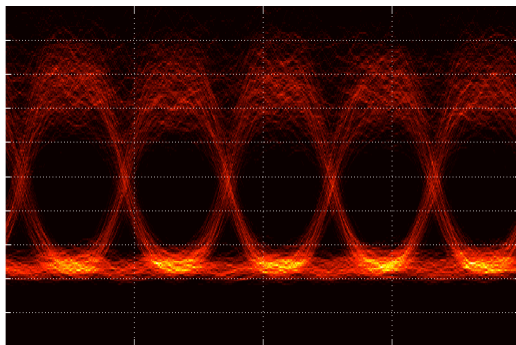
Στην έξοδο του συμβολομέτρου ένας ισοσταθμισμένος δέκτης, ο οποίος αποτελείται από δύο φωτοδιόδους με χαρακτηριστικά όμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται στον ASK δέκτη, αναλαμβάνει τη φώραση του DPSK σήματος. Ο συγκεκριμένος δέκτης όπως είναι αναμενόμενο από τα όσα αναφέραμε και στο κεφάλαιο 3, προσφέρει 3 dB μεγαλύτερη ευαισθησία κατά τη λήψη του DPSK σήματος, επομένως τα αποτελέσματα θα είναι σαφέστερα πιο βελτιωμένα συγκριτικά με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υπέρυθρων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

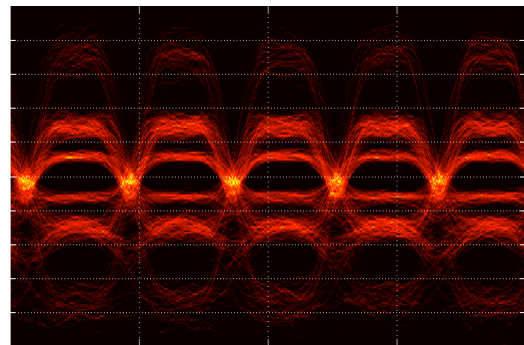
Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος στην είσοδο κάθε δέκτη ρυθμίζεται στα -5 dBm, έτσι ώστε να μπορούμε να συγκρίνουμε τις επιδόσεις του κάθε δέκτη. Στο ηλεκτρικό σήμα που προκύπτει πραγματοποιείται μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων μέσω της τυπικής μεθόδου Monte Carlo. Λόγω του ότι η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτητική σε επεξεργαστική ισχύ και επειδή οι απαιτήσεις αυτές κλιμακώνονται εκθετικά με την τάξη του αριθμού των παλμών αλλά και το μήκος διάδοσης, η μέτρηση των σφαλμάτων περιορίστηκε σε ρυθμούς όχι μικρότερους από 10^{-5} , ρυθμός ο οποίος αντιστοιχεί σε αριθμό 10^6 bits.

Έτσι λοιπόν, με βάση τα όσα αναφέραμε παραπάνω, πραγματοποιήσαμε μία σειρά μετρήσεων ρυθμού σφαλμάτων συναρτήσει της απόστασης για -5 dBm ισχύ στο λαμβανόμενο στον κάθε δέκτη σήμα, για ρυθμούς δεδομένων 20 Gb/s και 50 Gb/s ανά κανάλι, τα οποία μεταφράζονται σε δεκαπλάσιο συνολικό ρυθμό πληροφορίας του WDM καναλιού.

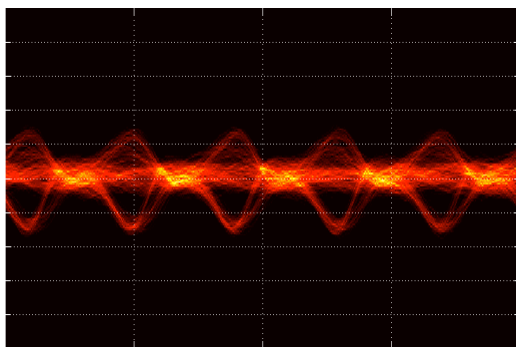
Στα διαγράμματα οφθαλμού που ακολουθούν (σχ. 6-7 και σχ. 6-8) απεικονίζεται η απόκριση του DPSK/ASK δέκτη για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις ρυθμού δεδομένων και για συνολική διάδοση 112 km.



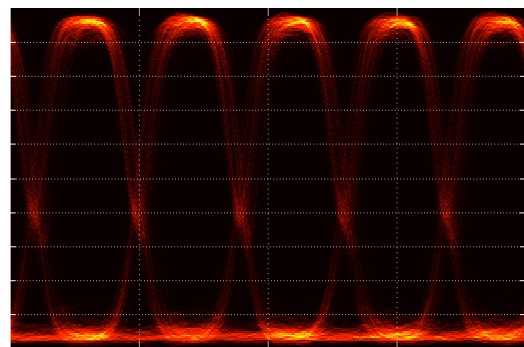
(α)



(β)

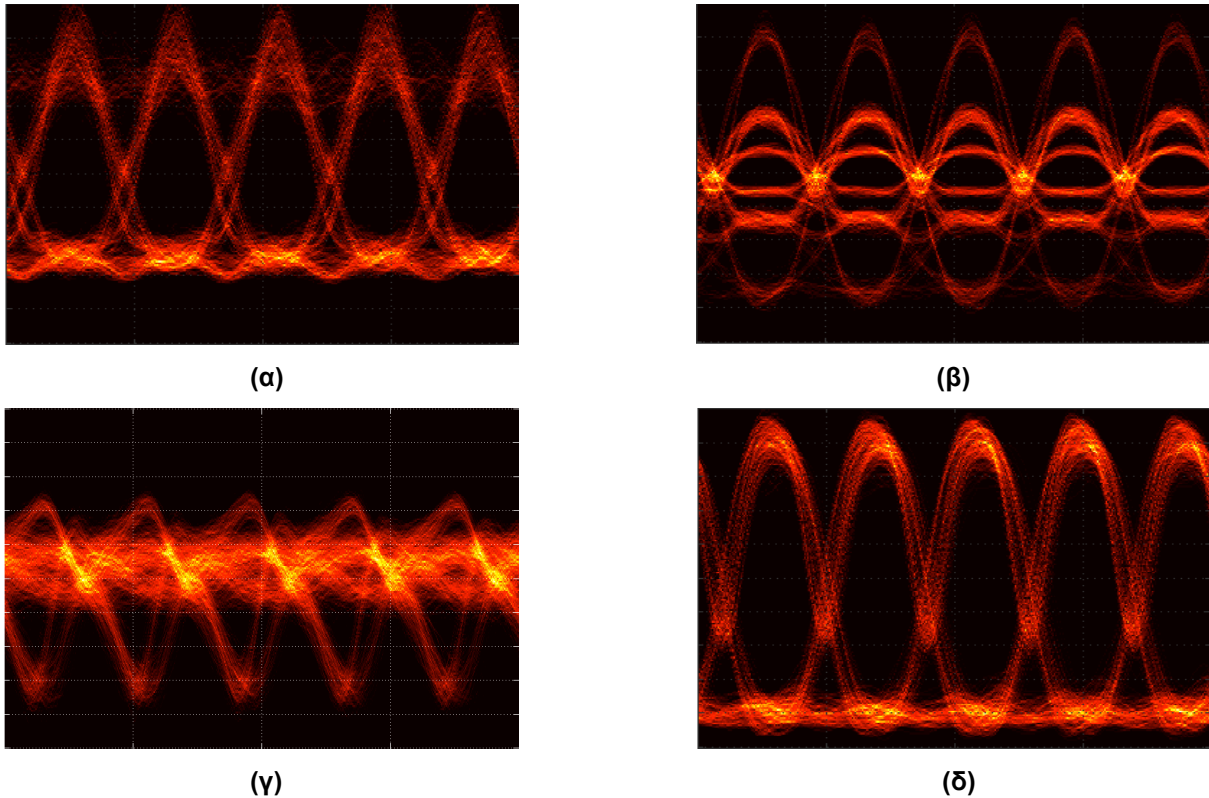


(γ)



(δ)

Σχήμα 6-7: Διαγράμματα οφθαλμού για αποδιαμορφωμένο 20 Gb/s DPSK/ASK σήμα. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται το αποδιαμορφωμένο ASK σήμα στην έξοδο του ASK δέκτη, στα σχήματα (β) και (δ) απεικονίζεται το αποδιαμορφωμένο DPSK σήμα με και χωρίς τη βαθμίδα της εγκλείδωσης φάσης και στο σχήμα (γ) απεικονίζεται το πλάτος του σήματος στην έξοδο του slave laser.



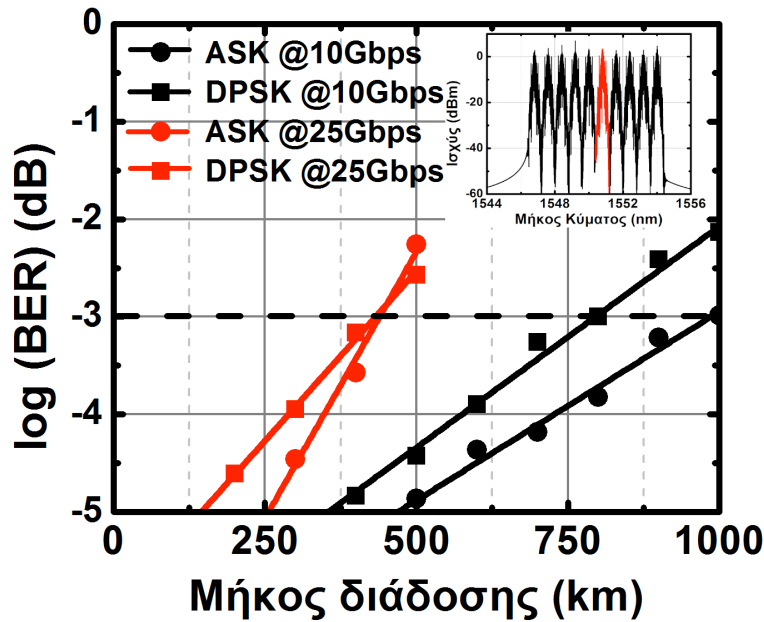
Σχήμα 6-8: Διαγράμματα οφθαλμού για αποδιαμορφωμένο 50 Gb/s DPSK/ASK σήμα. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται το αποδιαμορφωμένο ASK σήμα στην έξοδο του ASK δέκτη, στα σχήματα (β) και (δ) απεικονίζεται το αποδιαμορφωμένο DPSK σήμα με και χωρίς τη βαθμίδα της εγκλειδωσης φάσης και στο σχήμα (γ) απεικονίζεται το πλάτος του σήματος στην έξοδο του slave laser.

Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα οφθαλμού, η συμπεριφορά του μοντέλου του DPSK/ASK πομποδέκτη που υλοποιήσαμε είναι παρόμοια με αυτή που μελετήσαμε πειραματικά με τη μόνη διαφορά ότι το διάγραμμα οφθαλμού του αποδιαμορφωμένου DPSK χωρίς τη βαθμίδα της εγκλειδωσης φάσης είναι εμφανώς βελτιωμένο λόγω του ισοσταθμισμένου δέκτη που χρησιμοποιούμε στην αριθμητική μελέτη.

Για την περίπτωση του 20 Gb/s DPSK/ASK σήματος το ποσοστό έγχυσης είναι ίσο με -10 dB, τιμή παρόμοια με την αντίστοιχη πειραματική, ενώ για 50 Gb/s σήμα το ποσοστό αυτό αυξάνεται στα -5 dB. Το ρεύμα πόλωσης του slave laser και για τις δύο περιπτώσεις παραμένει σταθερό στα 120 mA έτσι ώστε να προσφέρει επιπλέον συμπίεση πλάτους αφού οι συνθήκες εγκλειδωσης απαιτούν μεγαλύτερα ποσοστά έγχυσης.

Οι επιδόσεις του συστήματος λήψης μελετήθηκαν διεξοδικά για τους δύο ρυθμούς δεδομένων και για όλα τα κανάλια της WDM μετάδοσης ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται στο σχήμα 6-9, στο οποίο, για μεγαλύτερη ευκολία ανάγνωσης, απεικονίζεται ο ρυθμός σφαλμάτων για το κανάλι στα 1550.8 nm, συναρτήσει της απόστασης διάδοσης.

Όπως παρατηρούμε, για το όριο των 1×10^3 σφαλμάτων/sec, το οποίο αποτελεί το όριο για error-free διάδοση με χρήση FEC, επιτυγχάνεται διάδοση συνολικού ρυθμού 500 Gb/s για μία απόσταση μήκους περίπου 400 km, ενώ για ρυθμό 200 Gb/s το συνολικό μήκος διάδοσης εκτοξεύεται στα 800 km. Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα, ο προτεινόμενος πομποδέκτης επιδεικνύει αξιοσημείωτες επιδόσεις για διάδοση σε αποστάσεις εντός των ορίων ενός μητροπολιτικού δικτύου δεδομένων που φθάνουν έως και τα 50 Gb/s ανά κανάλι. Οι επιδόσεις αυτές είναι ιδιαίτερως σημαντικές αν σκεφτεί κανείς την απλότητα υλοποίησης του συγκεκριμένου συστήματος.



Σχήμα 6-9: Μέτρηση ρυθμού σφαλμάτων για 20 Gb/s (μαύρες γραμμές) και 50 Gb/s (κόκκινες γραμμές) DPSK/ASK σήμα συναρτήσεως του μήκους διάδοσης.

6.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό εκμεταλλευτήκαμε την ιδιότητα του εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser να συμπιέζει τις διαταραχές πλάτους του εγχεόμενου σήματος ώστε να το χρησιμοποιήσουμε για τον διαχωρισμό των δύο ροών δεδομένων που φέρει ένα DPSK/ASK σήμα. Από την πειραματική και αριθμητική μελέτη που πραγματοποιήσαμε παρατηρούμε ότι ο νέος δέκτης επιδεικνύει αξιοσημείωτες επιδόσεις αφού επιτρέπει την ανάκτηση του DPSK σήματος ακόμα και για λόγο σβέσης του ASK που φθάνει τα 8 dB.

Έτσι λοιπόν, ο προτεινόμενος πομποδέκτης προσφέρει μία οικονομική, απλή και ενεργειακά αποδοτική λύση για την αύξηση της χωρητικότητας και τη βελτίωση της ποιότητας των οπτικών μεταδόσεων του μητροπολιτικού δικτύου, ενώ ταυτόχρονα είναι συμβατός με την υπάρχουσα διαίρεση του φάσματος σε WDM κανάλια των 25 GHz, 50 GHz και 100 GHz και δεν απαιτεί υψήρρυθμα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα ωθούν την αξιοποίηση του DPSK/ASK πομποδέκτη σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, από επιλεκτική μετάδοση σε παθητικά οπτικά δίκτυα έως και οπτική ανταλλαγή ετικετών σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Επίσης, το συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης είναι κατάλληλο για την χαμηλού κόστους αναβάθμιση των WDM μητροπολιτικών δικτύων και δικτύων πρόσβασης αφού όχι μόνο μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς συμβόλων της τάξεως των 25 Gbaud αλλά ταυτόχρονα μπορεί τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να υποστηρίξει διαμόρφωση διπλής πόλωσης επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο τετραπλάσια χωρητικότητα καναλιού διατηρώντας το κόστος υλοποίησης σε χαμηλά επίπεδα.

7. Σύνοψη και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάσαμε μία γενική εικόνα της τρέχουσας κατάστασης των οπτικών δικτύων από την πλευρά των συστημάτων εκπομπής και λήψης και αναδείξαμε την βασική ανάγκη των σύγχρονων οπτικών δικτύων για αύξηση της συνολικής χωρητικότητας αλλά και ανάπτυξη νέων αποδοτικότερων συστημάτων μετάδοσης. Μονόδρομο φαίνεται να αποτελεί η εδραίωση των σύμφωνων συστημάτων επικοινωνιών, τα οποία θα ωθήσουν σε υψηλότερα επίπεδα την ποιότητα και τους ρυθμούς των μελλοντικών μεταδόσεων και θα αποτελέσουν τη ραχοκοκαλιά του οπτικού δικτύου. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να αναπτυχθεί μία ολόκληρη τεχνολογία διατάξεων για την ολοκληρωμένη επεξεργασία των κατά φάση διαμορφωμένων σημάτων, οι οποίες θα πρέπει να προσφέρουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης, χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, υψηλές επιδόσεις και αυξημένη ευελιξία. Μέχρι στιγμής η αυξημένη πολυπλοκότητα των εμπορικά διαθέσιμων σύμφωνων ψηφιακών δεκτών καθώς επίσης και η έλλειψη αποδοτικών διατάξεων αναγέννησης (αναγέννηση βασισμένη σε ΟΕΟ επαναλήπτες) περιορίζει την αξιοποίηση των σύμφωνων οπτικών συστημάτων σε ευρεία κλίμακα.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήσαμε διεξοδικά την περιοχή της αμιγώς οπτικής αναγέννησης βασιζόμενοι στις οπτικές ιδιότητες των διαδικασιών της ευαίσθητης στη φάση παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έγχυση οπτικής ισχύος.

Έτσι λοιπόν, προτάθηκε και μελετήθηκε διεξοδικά ως προς τις επιδόσεις του ένας αμιγώς οπτικός αναγεννητής RZ-DPSK σημάτων ο οποίος βασίζεται στην τοπολογία του PSA μονής άντλησης και σύμφωνα με τα όσα γνωρίζουμε αποτελεί τη μοναδική ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική η οποία προσφέρει μία ρεαλιστική λύση για την γένεση σύμφωνου, ως προς το σήμα, συζυγούς. Η διάταξη αν και προσφέρει αξιοσημείωτες επιδόσεις, ωστόσο παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα ενώ στην παρούσα υλοποίησή της αδυνατεί να διαχειριστεί πολυ-κάναλες WDM μεταδόσεις. Βέβαια προτείνονται λύσεις και για τα δύο προαναφερθέντα προβλήματα οι οποίες χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η πειραματική υλοποίηση και μελέτη του συστήματος ώστε να επιβεβαιωθούν οι επιδόσεις του.

Η διεξοδική διερεύνηση των ιδιοτήτων του εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser οδήγησε στην υλοποίηση ενός αναγεννητή ο οποίος στηρίζεται στην τεχνική της εγκλειδωσης φάσης και ο οποίος αποτελεί μία φθηνή και ευέλικτη βαθμίδα συμπίεσης του θορύβου πλάτους. Ο προτεινόμενος αναγεννητής μπορεί να τοποθετηθεί είτε κατά μήκος της οπτικής ζεύξης είτε ως βαθμίδα λήψης στην είσοδο σύμφωνων δεκτών είτε ως επιπρόσθετη βαθμίδα στην έξοδο ενός PSA προσφέροντας αξιοσημείωτη βελτίωση της ποιότητας του σήματος. Το χαμηλό κόστος υλοποίησης σε συνδυασμό με τις αρκετά υψηλές επιδόσεις συμπίεσης θορύβου και ενίσχυσης, τη δυνατότητα λειτουργίας με διαφάνεια ως προς το μήκος κύματος (χρήση Fabry-Pérot slave laser) που προσφέρει το συγκεκριμένο σύστημα αλλά και της άμεσα εμπορικής διαθεσιμότητάς του το καθιστούν ως μία ιδιαίτερος ελκυστική λύση για την αναβάθμιση των σύμφωνων οπτικών συστημάτων.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ιδιότητες του εγκλειδωμένου ημιαγωγικού laser, επεκτείναμε την χρήση του ως μία επιπλέον βαθμίδα στην πλευρά του δέκτη για τον διαχωρισμό των διαφορετικών ροών που φέρει ένα DPSK/ASK σήμα. Η νέα αυτή αρχιτεκτονική, προσφέρει βελτίωση του λαμβανόμενου σήματος και αύξηση του μήκους διάδοσης αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τις επιδόσεις του συγκεκριμένου συστήματος μετάδοσης. Έτσι λοιπόν, η εγκλειδωση φάσης αποδεικνύεται μία ιδιαίτερος ενδιαφέρουσα τεχνική, η οποία μπορεί να προσφέρει μία σειρά εναλλακτικών

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψίρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

εφαρμογών συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στη βελτίωση των επιδόσεων των συστημάτων σύμφωνης λήψης. Επιπρόσθετες βελτιώσεις που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν στο σύστημα DPSK/ASK και χρήζουν άμεσης διερεύνησης είναι η χρήση Fabry-Pérot ως μονάδα διαχωρισμού πληροφορίας στην πλευρά του δέκτη αλλά και η επέκταση του DPSK/ASK σήματος σε δύο πολώσεις, γεγονός το οποίο θα τετραπλασιάσει τη φασματική απόδοση του σήματος οδηγώντας σε ευέλικτη αύξηση της χωρητικότητας καναλιού.

Συνοψίζοντας λοιπόν, μπορούμε να πούμε ότι οι οπτικές διατάξεις που σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής ανέδειξαν τις πραγματικά εντυπωσιακές ιδιότητες και επιδόσεις της παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλείδωσης φάσης επιτρέποντας την αξιοποίησή τους σε ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών ανοίγοντας τον δρόμο στην αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος και την εδραίωση των σύμφωνων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών. Νέες τοπολογίες δεκτών και αναγεννητών βασιζόμενες στις παραπάνω τεχνικές και νέα σχήματα διαμόρφωσης μπορούν να επωφεληθούν των ιδιοτήτων τους οδηγώντας στη νέα εποχή των υψίρρυθμων οπτικών μεταδόσεων των 100G και 400G.

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
WDM	Wavelength Division Multiplexing
IM	Intensity Modulation
DD	Direct Modulation
SOP	State of Polarisation
LO	Local Oscillator
PSK	Phase Shift Keying
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
QPSK	Quadratic Phase Shift Keying
IF	Intermediate Frequency
WAN	Wide Area Networks
PM-QPSK	Polarization Multiplexing Quadratic Phase Shift Keying
OEO	Optical-Electrical-Optical Conversion
ASE	Amplified Spontaneous Emission
XGM	Cross-Gain Modulation
XPM	Cross-Phase Modulation
SPM	Self-Phase Modulation
FWM	Four Wave Mixing
OTDM	Optical Time Division Multiplexing
RZ-OOK	Return-to-Zero On-Off Keying
NRZ	Non-Return-to-Zero On-Off Keying
FOPA	Fiber Optic Parametric Amplification
DPSK	Differential Phase Shift Keying
ASK	Amplitude Shift Keying
SMF	Single Mode Fiber
MMF	Multi Mode Fiber
GVD	Group Velocity Dispersion
DSF	Dispersion Shifted Fiber
DCF	Dispersion Compensated Fiber
DFF	Dispersion Flattened Fiber
DGD	Differential Group Delay

CW	Continuous Wave
PMD	Polarization Mode Disersion
PDF	Probability Density Function
SRS	Stimulated Raman Scattering
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
FBG	Fiber Bragg Grating
NZDSF	Non Zero Dispersion Shifted Fiber
LEAF	Large Effective Area Fiber
NLSE	Non Linear Schrödinger Equation
MZM	Mach-Zender Modulator
PLL	Phase Locked Loop
OPLL	Optical Phase Locked Loop
VCO	Voltage Control Oscillator
ADC	Analog to Digital Conversion
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PIA	Phase Insensitive Amplifier
PSA	Phase Sensitive Amplifier
HNLF	Highly Non Linear Fiber
MI	Modulation Instability
BS	Bragg Scattering
PC	Phase Conjugation
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
FM	Frequency Modulation
LED	Light Emitting Diode
DFB	Distributed Feedback
DBR	Distributed Bragg Grating
IL	Injection Locking
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
RIN	Relative Intensity Noise
SMSR	Side Mode Suppression Ratio
PON	Passive Optical Networks
BER	Bit Error Rate
VSB	Versatile Side Band

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] O. E. Delange, "Wideband optical communication systems. Part II. Frequency division multiplexing," *IEEE Proceedings*, 58, pp. 1683-1696, 1970.
- [2] B. Glance, "Polarization Independent Coherent Optical Receiver," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology* LT-5274-276, 1987
- [3] S. Norimatsu, K. Iwashita, K. Sato, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 2, pp. 374, 1990.
- [4] S. L. Hansen, K. Dybdal, and C. C. Larsen, "Gain limit in erbium-doped fiber amplifiers due to internal rayleigh backscattering," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, no. 6, pp. 559-561, 1992.
- [5] R. I. Laming, M. N. Zervas, and D. N. Payne, "Erbium-doped fiber with 54 db gain and 3.1 db noise figures," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, no. 12, pp. 1345-1347, 1992.
- [6] B. K. Nayar et al. "All-optical switching in 200-m twin-core fiber nonlinear Mach-Zehnder interferometer," *IEEE Optics Letters*, vol. 6, p. 408-410, 1991.
- [7] J. H. Lee, T. Tanemura, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, N. Sugimoto, and K. Kikuchi, "Use of 1-m Bi2O3 nonlinear fiber for 160 Gb/s optical time-division demultiplexing based on polarization rotation and a wavelength shift induced by cross-phase modulation," *Optics Letters*, vol. 30, pp. 1267-1269, 2005.
- [8] S. H. Lee, K. K. Chow, and C. Shu, "Spectral filtering from a cross-hase modulated signal for RZ to NRZ format and wavelength conversion," *Optics Express*, vol. 413, no. 5, pp. 1710-1715, 2005.
- [9] J. Yu, and P. Jeppesen, "80-Gb/s wavelength conversion based on cross-phase modulation in high-nonlinearity dispersion-shifted fiber and optical filtering," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 8, pp. 883-835, 2001.
- [10] T. Thomas, A. A. Peter, O. Bengt-Erik, "Ultra high gain fiber optical parametric amplifier," *Proceedings of the 2006 Optical Fiber Communication Conference (OFC/NFOEC, OFH6, 2006*.
- [11] K. K. Y. Wong, M. E. Marhic, and L. G. Kazovsky, "Phase-conjugate pump dithering for high-quality idler generation in a fiber optical parametric amplifier," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 33-35, 2003.
- [12] M. E. Marhic, *Fiber Optical Parametric Amplifiers, Oscillators and Related Devices*, 2007.
- [13] M. Matsumoto, and Yasutaka Morioka, "Fiber-based all-optical regeneration of DPSK signals degraded by transmission in a fiber," *Optics Express*, vol. 17. No. 8, pp. 6913-6919, 2009.
- [14] F. Permigiani, R. Slavik, J. Kakande, L. Gruner-Nielsen, D. Jakobsen, S. Herstrom, R. Weerasuriya, S. Sygletos, A. D. Ellis, P. Petropoulos, and D. J. Richardson, "All-Optical Phase and amplitude regeneration properties of a 40 Gbit/s DPSK black-box phase sensitive amplifier," *IEEE ECOC 2010, Mo.2.A.1*, 2010.
- [15] J. Kakande, R. Slavik, F. Permigiani, A. Bogris, D. Syvridis, L. Gruner-Nielsen, R. Phelan, P. Petropoulos and D. J. Richardson, "Multi-level quantization of optical phase in a novel coherent parametric mixer architecture," *Nature Photonics*, vol. 5, no. 12, pp. 748-752, 2011.
- [16] M. Salsi, H. Mardoyan, P. Tran, C. Koebele, E. Dutisseuil, G. Charlet, and S. Bigo, "155x100gbps coherent qdm-qpsk transmission over 7,200km," *Proceedings of the 35th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pp. 1-2, 2009.
- [17] R. Lang and K. Kobayashi, "External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 16, no. 3, pp. 347-355, 1980.
- [18] P. Pepeljugoski, J. Schaub, J. Tierno, J. Kash, S. Gowda, B. Wilson, H. Wu, A. Hajimiri, "Improved performance of 10 Gb/s multimode fiber llnks using equalization," *OFC 2003, Th13-15*, 2003.
- [19] M. Ming, K. Liu, "Principles and applications of optical communications," Irwin, 1992.
- [20] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, San Diego, CA: Academic, 1995.
- [21] C. D. Angelis, A. Galtarossa, G. Gianello, M. Matera, M. Schiano, "Time evolution of polarization mode dispersion in long terrestrial links," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 552, 1992.
- [22] F. Curti, B. Daino, G. de Marchis, F. Matera, "Statistical treatment of the evolution of the principal states of polarization in the single-mode fibers," *IEEE Journal of Lightwave Technology* vol. 8, no. 8, pp. 1162, 1990.
- [23] C. D. Poole, J. H. Winters, J. A. Nagel, "Dynamical equation for polarization dispersion," *Optics Letters*, vol. 16, pp. 372, 1991.
- [24] F. Matera, "Evolution of polarization mode dispersion in single mode fibres", *EFOC/LAN '92*, paper 5, pp. 16, June 1992.
- [25] I. P. Kaminow, "Polarization in optical fibers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 17, pp. 15, 1981.
- [26] N. Gisin, J.-P. Von der Weid, J.-P. Pellaux, "Polarization mode dispersion of short and long single-mode fibers," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, no.7, pp. 821, 1991.
- [27] G. J. Foschini, C. D. Poole, "Statistical theory of polarization dispersion in single- mode fibers," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, pp. 1439, 1991.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψηρών συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

- [28] P. K. A. Wai, C. R. Menyuk, "Polarization mode dispersion, decorrelation and diffusion in optical fibers with randomly varying birefringence," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no.2, pp. 148, 1996.
- [29] A. Carena, V. Curri, R. Gaudino, P. Poggiolini, S. Benedetto, "A time-domain optical transmission system simulation package accounting for nonlinear and polarization-related effects in fiber," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 751, 1997.
- [30] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, pp. 1548, 1990.
- [31] R. G. Smith, "Optical power handling capacity of low-loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering," *Applied Optics*, vol. 11, pp. 2489, 1972.
- [32] Y. Sun, J. W. Sulhoff, A. K. Srivastava, A. Abramov, T. A. Strasser, P. F. Wysocki, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, R. P. Espindola, C. Wolf, J. L. Zyskind, A. M. Vengsarkar, J. Zhou, "A gain-flattened ultra wide band EDFA for high capacity WDM optical communications systems," *Tech. Dig. ECOC '98*, vol. 1, pp.53, Madrid, Spain, 1998.
- [33] M. C. Ho, K. Uesaka, M. Marhic, Y. Akasaka, and L. G. Kazovsky, "200-nm-bandwidth fiber optical amplifier combining parametric and Raman gain," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, pp. 977, 2001.
- [34] T. Naito, N. Shimojoh, T. Tanaka, H. Nakamoto, M. Doi, T. Ueki, M. Suyama, "1 Terabit/s WDM transmission over 10,000Km," *Tech. Dig. ECOC '99*, paper PD2-1, pp. 24, Nice, France, 1999.
- [35] L. Spiekman, J. M. Wiesenfeld, A. H. Gnauck, L. D. Garrett, G. N. Van Den Hoven, T. Van Dongen, M. J. H. Sander-Jochem, J. J. M. Binsma, "160Gbit/s (8x20Gbit/s) DWDM transmission over 160Km of standard fiber using a cascade of semiconductor optical amplifiers," *Tech. Dig. ECOC '99*, paper PD2-7, pp. 36, Nice, France, 1999.
- [36] A. Sano, S. Kuwahara, Y. Miyamoto, M. Yoneyama, K. Noguchi, "Long amplifier spacing 4x40Gbit/s WDM transmission with SPM/XPM suppression by pre-chirping and dispersion management," *Tech. Dig. ECOC '99*, vol. 1, pp. 32, Nice, France, 1999.
- [37] J. X. Cai, K. M. Feng, A. E. Willner, V. Grubsky, D. S. Starodudov, J. Feinberg, "Sampled nonlinearly-chirped fiber-Bragg-grating for the tunable dispersion compensation of many WDM channels simultaneously," *OFC '99*, paper FA7-1, pp. 20, 1999.
- [38] A. J. Lowery, P. C. R. Gurney, "270-Km 10Gbit/s WDM dispersion compensation using a chirped AWGM," *OFC '99*, paper FD5-1, pp. 74, 1999.
- [39] C. K. Madsen, E. J. Laskowski, J. Bailey, M. A. Cappuzzo, S. Chandrasekhar, L. T. Gomez, A. Griffin, P. Oswald, L. W. Stulz, "The application of integrated ring resonators to dynamic dispersion compensation," 2002 IEEE/LEOS Summer Topi 15-17 July 2002 Page(s): TuJ2-29 - TuJ2-30, 2002.
- [40] A. T. Clausen, A. Buxens, H. N. Poulsen, L. Oxenlove, P. Jeppesen, "Polarization-independent bi-directional four wave mixing for mid span spectral inversion," *Tech. Dig. ECOC '99*, vol. 1, p.p 32, Nice, France, 1999.
- [41] C. J. McKinstrie, S. Radic and C. Xie, "Reduction of soliton phase jitter by in-line phase conjugation," *Optics Letters*, vol. 28, pp. 1519-1521, 2003.
- [42] F. Heismann, "Polarization mode dispersion: fundamentals and impact on optical communication systems," *Tech. Dig. ECOC '98*, vol. 2, pp. 51, Madrid, Spain, 1998.
- [43] F. Heismann, D. A. Fishman, D. L. Wilson, "Automatic compensation of first-order polarization mode dispersion in a 10Gb/s transmission system," *Tech. Dig. ECOC '98*, vol. 1, pp. 529, Madrid, Spain, 1998.
- [44] Y. M. Liu, A. J. Antos, "Dispersion-shifted large-effective-area fiber for amplified high-capacity long-distance systems," *Optical Fiber Communication '97*, pp. 69, 1997.
- [45] S. Arai, Y. Akasaka, Y. Suzuki, T. Kamiya, "Low nonlinear dispersion-shifted fiber," *Optical Fiber Communication '97*, pp. 65, 1997.
- [46] A. J. Lucero, S. Tsuda, V. L. da Silva, "320Gbits/sec WDM transmission over 450Km of LEAF optical fiber," *Optical Fiber Communication '99*, paper ThO2-1, pp. 215, 1999.
- [47] I. Neokosmidis, T. Kamalakis, A. Chipouras, and T. Sphicopoulos, "New techniques for the suppression of the four-wave mixing-induced distortion in nonzero dispersion fiber WDM systems," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, pp. 1137, 2005.
- [48] F. Forghieri, R. W. Tkach, and A. R. Chraplyvy, "WDM systems with unequally spaced channels," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, pp. 889, 1995.
- [49] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, *Optical Networks: A practical perspective*, Morgan Kaufmann Publishers, Second Edition, 2002.
- [50] P. K. Wai, C. R. Menyuk, H. H. Chen, "Stability of solitons in randomly varying birefringent fibers," *Optics Letters*, vol. 16, pp. 1231, 1991.
- [51] M. Matsumoto, Y. Akagi, and A. Hasegawa, "Propagation of solitons with randomly varying birefringence: effects of soliton transmission control," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, pp. 584, 1997.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υπέρυθρων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

- [52] M. D. Feit, J. A. Fleck, Jr., "Beam nonparaxiality, filament formation, and beam breakup in the self-focusing of optical beams," *Journal of Optic Society of America B.*, vol. 5, pp. 633, 1988.
- [53] Jochen Leibrich, Christoph Wree, and Werner Rosenkranz, "Phase shift keying (PSK & DPSK) techniques for long-haul wavelength division multiplexing systems over standard single-mode fiber," *SPIE Proceedings*, vol. 4906, 2002.
- [54] Paul E. Green, *Fiber Optic Networks*, Prentice-Hall, 1993.
- [55] D. J. McCarron, "A guide to acousto-optic modulators," Dec. 7, 2007; <http://massey.dur.ac.uk/resources/slcornish/AOMGuide.pdf>
- [56] Peter Hertel, "Pockels effect," October/November 2011; <http://teda.nankai.edu.cn/aps/english/apslecture/Peter/pockels.pdf>
- [57] P. Krehlik, "Characterization of semiconductor laser frequency chirp based on signal distortion in dispersive optical fiber," *Opto-Electronics Review*, vol. 14, no. 2, pp. 123-128, 2006.
- [58] Z. Al-Qazwini, and K. Hoon, "Symmetric 10-Gb/s WDM-PON using directly modulated lasers for downlink and RSOAs for uplink," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, pp. 1891-1899, 2012.
- [59] M. Moghaddasi, and S. B. A. Rahman, "Comparison between NRZ and RZ OOK modulation format in chromatic dispersion compensation in both electrical and optical compensator," *IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications*, pp. 494-497, 2011.
- [60] J. G. Proakis, and M. Salehi, *Communication System Engineering*, 2nd Ed., 2001.
- [61] A. Ramaswamy, L. A. Johansson, J. Klamkin, C. Sheldon, H. F. Chou, M. J. Rodwell, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, "Coherent receiver based on a broadband optical phase-lock loop," *Optical Society of America*, 2007.
- [62] A. Chiuchiarelli, M. J. Fice, E. Ciaramella, and A. J. Seeds, "Effective homodyne optical phase locking to PSK signal by means of 8b10b line coding," *Optical Society of America*, vol. 19, no. 3, pp. 1707-1712, 2011.
- [63] B. Slater, S. Boscolo, S. K. Turitsyn, T. Broderick, R. Freund, L. Molle, C. Caspar, J. Schwartz, and S. Barnes, "Performance analysis of 20 Gbit/s RZ-DPSK non-slope matched transoceanic submarine links," *IEEE CLEOE-IQEC 2007*, 2007.
- [64] J. X. Cai, et al., "RZ-DPSK field trial over 13,100km of installed non slope-matched submarine fibers," *Optical Fiber Communication Conference 2004*, 2004.
- [65] L. G. Kazovsky, "Phase- and polarization-diversity coherent optical techniques," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, pp. 279-292, 1989.
- [66] A. W. Davis, M. J. Pettitt, J. P. King, and S. Wright, "Phase diversity techniques for coherent optical receivers," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 5, pp. 561-572, 1987.
- [67] K. Kikuchi, "Phase-diversity homodyne detection of multilevel optical modulation with digital carrier phase estimation," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, pp. 563-570, 2006.
- [68] H. G. Weber, S. Ferber, M. Kroh, C. Schmidt-Langhorst, R. Ludwig, V. Marembert, C. Boerner, F. Futami, S. Watanabe, and C. Schubert, "Single channel 1.28 Tbit/s and 2.56 Tbit/s DQPSK transmission," *ECOC 2005*, vol. 6, pp. 3-4, 2005.
- [69] R. A. Griffin, R. I. Johnstone, R. G. Walker, J. Hall, S. D. Wadsworth, K. Berry, A. C. Carter, M. J. Wale, J. Hughes, P. A. Jerram, and N. J. Parsons, "10Gb/s optical differential quadrature phase shift key (DQPSK) transmission using GaAs/AlGaAs integration," *OFC 2002*, pp. FD6-1-FD6-3, 2002.
- [70] Xiang Zhou, Jianjun Yu, Dayou Qian, Ting Wang, Guodong Zhang, and Peter Magill, "8x114 Gb/s, 25 GHz-spaced, PolMux-RZ-8PSK transmission over 640 km of SSMF employing digital coherent detection and EDFA-only amplification," *OFC 2008*.
- [71] Dayou Qian, Neda Cvijetic, Junqiang Hu, and Ting Wang, "A novel OFDMA-PON architecture with source-free ONUs for next-generation optical access networks," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 17, pp. 1265-1267, 2009.
- [72] Alan H. Gnauck, Gabriel Charlet, Patrice Tran, Peter Winzer, Chris Doerr, Joe Centanni, Ellsworth Burrows, Tetsuya Kawanishi, Takanide Sakamoto, and Kaoru Higuma, "25.6-Tb/s WDM transmission of polarization-multiplexed RZ-DQPSK signals," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, pp. 79.84, 2008.
- [73] D. LY-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 12-21, 2006.
- [74] Pak. S. Cho, V. S. Grigoryan, Y. A. Godin, A. Salamon, and Yaakov Achiam, "Transmission of 25-Gb/s RZ-DQPSK signals with 25-GHz channel spacing over 1000 km of SMF-28 fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, pp. 473-475, 2003.
- [75] S. J. Savory, G. Gavioli, R. I. Killey, and P. Bayvel, "Transmission of 42.8 Gbit/s polarization multiplexed NRZ-QPSK over 6400km of standard fiber with no optical dispersion compensation," *OFC 2007*, 2007.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρουθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

- [76] Christophe Peucheret, Michael Lorenzen, Jorge Seoane, Danny Noordegraaf, Carsten Vandel Nielsen, Lars Gruner-Nielsen, and Karsten Rottwitz, "Amplitude regeneration of RZ-DPSK signals in single-pump fiber-optic parametric amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 13, pp. 872-874, 2009.
- [77] C. Porzi, A. Bogoni, and G. Contestabile, "Regeneration of DPSK signals in a saturated SOA," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, pp. 1597-1599, 2012.
- [78] R. H. Stolen and J. E. Bjorkholm, "Parametric amplification and frequency conversion in optical fibers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-18, pp. 1062-1072, 1982.
- [79] G. Cappellini and S. Trillo, "Third order three-wave mixing in single-mode fibers: Exact solutions and spatial instability effects," *Journal of Optical Society of America B*, vol. 8, pp. 824-838, 1991.
- [80] A. Vatarescu, "Light conversion in nonlinear single-mode optical fibers," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 5, pp. 1652-1659, 1987.
- [81] K. Inoue and T. Mukai, "Signal wavelength dependence of gain saturation in a fiber optical parametric amplifier," *Optics Letters*, vol. 26, pp. 10-12, 2001.
- [82] M. Matsumoto, "Simultaneous reshaping of OOK and DPSK signals by a fiber-based all-optical regenerator," *Optics Express*, vol. 14, pp. 1430-1438, 2006.
- [83] M. -C. Ho, M. A. Marhic, Y. Akasaka, and L. G. Kazovsky, "Fiber optical parametric amplifier and wavelength converter with 208-nm gain bandwidth," *CLEO 2000*, pp. 401-402, 2000.
- [84] Yuhua Li, and Guifang Li, "2R Regeneration and Simultaneous Wavelength Conversion Using a Fiber Parametric Amplifier and a Semiconductor Optical Amplifier," *OFC 2003, WG3*, 2003.
- [85] J. B. Fernandez, A. Ayotte, S. LaRochelle, and L. A. Rusch, "A Single All-Optical Processor for Multiple Spectral Amplitude Code Label Recognition Using Four Wave Mixing," *ECOC 2006*, pp. 1-2, 2006.
- [86] R. Tang, P. Devgan, V. S. Grigoryan, and P. Kumar, "Inline frequency-non-degenerate phase-sensitive fibre parametric amplifier for fibre-optic communication," *Electronics Letters*, vol. 41, no. 19, pp. 1072-1074, 2005.
- [87] R. Tang, J. Lasri, P. S. Devgan, V. Grigoryan, P. Kumar, and M. Vasilyev, "Gain characteristics of a frequency nondegenerate phase-sensitive fiber-optic parametric amplifier with phase self-stabilized input," *Optics Express*, vol. 13, no. 26, pp. 10 483-10 493, 2005.
- [88] Z. Tong, C. J. McKinstrie, C. Lundstrm, M. Karlsson, and P. A. Andrekson, "Noise performance of optical fiber transmission links that use non-degenerate cascaded phase-sensitive amplifiers," *Optics Express*, vol. 18, no. 15, pp. 15 426-15 439, 2010.
- [89] K. Inoue, "Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, pp. 1553-1561, Nov. 1992.
- [90] A. Lattes, H. Haus, F. Leonberger, and E. Ippen, "An ultrafast all-optical gate," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 19, no. 11, pp. 1718-1723, 1983.
- [91] N. Schunk, and K. Petermann, "Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-24, pp. 1242-1247, 1988.
- [92] K. Kikuchi, T. Taira, and N. Sugimoto, "Highly-nonlinear bismuth oxide-based glass fibers for all-optical signal processing," *OFC 2002*, pp. 567-568, 2002.
- [93] Heike Ebendorff-Heidepriem, Periklis Petropoulos, Vittoria Finazzi, Ken Frampton, Roger C. Moore, David J. Richardson, and Tanya M. Monro, "Highly nonlinear bismuth-oxide-based glass holey fiber," *OFC 2004, ThA4*, 2004.
- [94] Julie Y. Leomng, Periklis Petropoulos, Symeon Asimakis, Heike Ebendorff-Heidepriem, Roger C. Moore, Ken Frampton, Vittoria Finazzi, Xian Feng, Jonathan H. Price, Tanya M. Monro, and David J. Richardson, "A lead holey fiber with $\gamma=1820W^{-1}km^{-1}$ at 1550 nm," *OFC 2005, PDP22*, 2005.
- [95] Dawei Wang, Tee-Hiang, Yong-Kee Yeo, Zhaowen Xu, Yixin Wang, Gaoxi Xiao, and Jianguo Liu, "Performance comparison of using SOA and HNLF as FWM medium in a wavelength multicasting scheme with reduced polarization sensitivity," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 3497-3505, 2010.
- [96] S. Diez, C. Schmidt, R. Ludwig, H. G. Weber, K. Obermann, S. Kindt, I. Koltchanov, and K. Petermann, " *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol.3, pp. 1131-1145, 1997.
- [97] San -Liang Lee, Pei-Miin Gong, and Chin-Tien Yang, "Performance enhancement on SOA-based four-wave-mixing wavelength conversion using an assisted beam," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, pp. 1713-1715, 2002.
- [98] Motoharu Matsuura, and Naoto Kishi, "40-Gbit/s RZ-DPSK wavelength vonversion using four-wave mixing in a quantum dot SOA," *OFC/NFOEC 2011, JThA24*, 2011.
- [99] M. E. Marhic, N. Kagi, T.-K. Chiang, and L. G. Kazovsky, "Broadband fiber optical parametric amplifiers," *Optics Letters*, vol. 21, pp. 573-575, 1996.
- [100] M. Yu, C. J. McKinstrie, and G. P. Agrawal, "Modulation instabilities in dispersion-flattened fibers," *Physics Review E*, vol. 52, no. 1, pp. 1072-1080, 1995.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υπέρυθρων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

- [101] M. Karlsson, "Four-wave mixing in fibers with randomly varying zero-dispersion wavelength," *Journal of Optical Society of America B*, vol. 15, pp. 2269–2275, 1998.
- [102] H. Onaka, K. Otsuka, H. Miyata, and T. Chikama, "Measuring the longitudinal distribution of four-wave mixing efficiency in dispersion-shifted fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, pp. 1454–1456, Dec. 1994.
- [103] K. Inoue, "Arrangement of fiber pieces for a wide wavelength conversion range by fiber four-wave mixing," *Optics Letters*, vol. 19, pp. 1189–1191, 1994.
- [104] Y. Su, L. Wang, A. Agrawal, and P. Kumar, "All-optical limiter using gain flattened fiber parametric amplifier," *Electronics Letters*, vol. 36, pp. 1103–1104, 2000.
- [105] L. Provino, A. Mussot, E. Lantz, T. Sylvestre, and H. Mailotte, "Broadband and flat parametric gain with a single low-power pump in a multisection fiber arrangement," in *Proceedings Optical Fiber Communication Conference*, CA, 2002.
- [106] R. M. Jopson and R. E. Tench, "Polarization-independent phase conjugation of lightwave signals," *Electronics Letters*, vol. 29, pp. 2216–2217, 1993.
- [107] O. Aso, Y. Tashiro, M. Tadakuma, and S. Namiki, "Effect of modulation instability on broadband wavelength conversion using four-wave mixing in optical fiber," in *Proceedings Optical Fiber Communication Conference*, vol. 3, Baltimore, MD, 2000, pp. 187–189, ThL6, 2000.
- [108] Q. Lin, and G. P. Agrawal, "Effects of polarization-mode dispersion on fiber-based parametric amplification and wavelength conversion," *Optics Letters*, vol. 29, pp. 1114–1116, 2004.
- [109] M. E. Marhic, F. S. Yang, M. C. Ho, and L. G. Kazovsky, "High-nonlinearity fiber optical parametric amplifier with periodic dispersion compensation," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, pp. 210–215, 1999.
- [110] M. E. Marhic, Y. Park, F. S. Yang, and L. G. Kazovsky, "Broadband fiber-optical parametric amplifiers and wavelength converters with low ripple Chebyshev gain spectra," *Optics Letters*, vol. 21, pp. 1354–1356, 1996.
- [111] S. Radic, C. J. McKinstrie, A. R. Chraplyvy, G. Raybon, J. C. Centanni, C. G. Jorgensen, K. Brar, and C. Headley, "New class of continuous wave parametric amplifiers," in *Proceedings Optical Fiber Communication Conference*, CA, 2002, Postdeadline Paper FB5, 2002.
- [112] S. Radic, C. J. McKinstrie, A. R. Chraplyvy, G. Raybon, J. C. Centanni, C. G. Jorgensen, K. Brar, and C. Headley, "Continuous-wave parametric gain synthesis using nondegenerate pump four-wave mixing," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, pp. 1406–1408, Oct. 2002.
- [113] C. J. McKinstrie, S. Radic, and A. R. Chraplyvy, "Parametric amplifiers driven by two pump waves," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, pp. 538–547, May/June 2002.
- [114] K. Inoue, "Tunable and selective wavelength conversion using fiber four-wave mixing with two pump lights," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, pp. 1451–1453, 1994.
- [115] T. Tanemura and K. Kikuchi, "Highly efficient arbitrary wavelength conversion within entire C-band based on nondegenerate fiber four-wave mixing," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, pp. 551–553, 2004.
- [116] K. K. Y. Wong, M. E. Marhic, K. Uesaka, and L. G. Kazovsky, "Polarization-independent two-pump fiber optical parametric amplifier," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, pp. 911–913, 2002.
- [117] F. Parmigiani, R. Slvik, J. Kakande, L. Gruner-Nielsen, D. Jakobsen, S. Herstrom, R. Weerasuriya, S. Sygletos, A. D. Ellis, P. Petropoulos, and D. J. Richardson, "All-optical phase and amplitude regeneration properties of a 40 Gbit/s DPSK black-box phase sensitive amplifier," *ECOC 2010*, Mo.2.A.1, September 2010.
- [118] J. C. Boggio, S. Moro, J. R. Windmiller, S. Zlatanovic, E. Myslivets, N. Alic, and S. Radic, "Optical frequency comb generated by four-wave mixing in highly nonlinear fibers," *CLEO/QELS 2009*, pp. 1–2, June 2009.
- [119] M. Matsumoto, "Performance improvement of phase-shift-keying signal transmission by means of optical limiters using four-wave mixing in fibers," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 9, pp. 2696–2701, 2005.
- [120] S. H. Lee, K. K. Chow, and C. Shu, "All-optical RZ-to-NRZ data format conversion using spectral broadening effect in a dispersion-shifted fiber," *Optics Communications*, pp. 152–155, 2006.
- [121] T. Solveira, A. Ferreira, D. Fonseca, A. Teixeira, and P. Monteiro, "40 Gb/s all-optical RZ to NRZ format converter based on SOA and detuned filtering," 11th International Conference on Transparent Optical Networks 2009, pp. 1–4, June 2009.
- [122] K. Mishina, A. Maruta, S. Mitani, T. Miyahara, K. Ishida, K. Shimizu, T. Hatta, K. Motoshima, and K. Kitayama, "NRZ-OOK-to-RZ-BPSK modulation-format conversion using SOA-MZI wavelength converter," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 10, pp. 3751–3757, 2006.
- [123] A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths, and B. Chirikov, "Synchronization: A universal concept in nonlinear sciences," in *Cambridge Nonlinear Science Series*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2003.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψηρών συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

- [124] J. H. Vincent, "On some experiments in which two neighboring maintained oscillator circuits affect a resonating circuit," *Proceedings of the Royal Society*, vol. 32, no. 2, pp. 84-91, 1919-1920.
- [125] E. V. Appleton, "The automatic synchronization of triode oscillators," *Proceedings of the Cambridge Society*, vol. 21, pp. 231-248, 1922-1923.
- [126] R. Adler, "A study of locking phenomena in oscillators," *Proceedings of IRE*, vol. 34, pp. 351-357, 1946.
- [127] R. H. Pantell, "The laser oscillator with an external signal," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, pp. 474-477, 1965.
- [128] C. J. Buczek and R. J. Freiberg, "Hybrid injection locking of higher power CO₂ lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 8, pp. 641-650, 1972.
- [129] S. Kobayashi, and T. Kimura, "Coherence on injection phase-locked AlGaAs semiconductor laser," *Electronics Letters*, vol. 16, pp. 668-670, 1980.
- [130] R. Lang, "Injection locking properties of a semiconductor laser," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, pp. 976-983, 1982.
- [131] Y. Yamamoto, "Receiver performance evaluation of various digital optical modulation-demodulation systems in the 0.5-1.0 μm wavelength region," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 16, pp. 1251-1259, 1980.
- [132] S. Kimura, and T. Kimura, "Optical phase modulation in an injection locked AlGaAs semiconductor laser," *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, vol. 30, pp. 1650-1657, 1982.
- [133] S. Kobayashi, and T. Kimura, "Optical FM signal amplification by injection locked and resonant type semiconductor laser amplifiers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, no. 4, pp. 575-581, 1982.
- [134] S. Kasapi, S. Lathi, and Y. Yamamoto, "Sub-shot-noise frequency-modulation spectroscopy by use of amplitude-squeezed light from semiconductor lasers," *Journal of Optical Society of America B*, vol. 17, no. 2, pp. 275-279, 2000.
- [135] A. A. Salles, and J. R. Forrest, "Initial observations of optical injection locking of GaAs metal semiconductor field effect transistor oscillators," *Applied Physics Letters*, vol. 38, no. 5, pp. 392-394, 1981.
- [136] A. Seeds, J. Singleton, S. Brunt, and J. Forrest, "The optical control of IMPATT oscillators," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 403-411, 1987.
- [137] R. D. Esman, L. Goldberg, and J. F. Weller, "Optical phase control of an optically injection-locked FET microwave oscillator," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 37, no. 10, pp. 1512-1518, 1989.
- [138] A. J. Seeds, I. D. Blanchflower, N. J. Gomes, G. King, and S. J. Flynn, "New developments in optical control techniques for phased array radar," *Proceedings in IEEE MTT International Microwave Symposium Digest*, pp. 905-908, 1988.
- [139] L. Goldberg, H. F. Taylor, and J. F. Weller, "FM sideband injection locking of diode lasers," *Electronics Letters*, vol. 18, no. 23, pp. 1019-1020, 1982.
- [140] C. Lin, and F. Mengel, "Reduction of frequency chirping and dynamic linewidth in high-speed directly modulated semiconductor lasers by injection locking," *Electronics Letters*, vol. 20, pp. 370-371, 1984.
- [141] X. J. Meng, T. Chau, and M. C. Wu, "Improved intrinsic dynamic distortions in directly modulated semiconductor lasers by optical injection locking," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, pp. 1172-1176, 1999.
- [142] L. Chrostowski, C. Chih-Hao, and C. J. Chang-Hasnain, "Enhancement of dynamic range in 1.55-μm VCSELs using injection locking," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, pp. 498-500, 2003.
- [143] J. H. Seo, Y. K. Seo, and W. Y. Choi, "Nonlinear distortion suppression in directly modulated DFB lasers by sidemode optical injection," 2001.
- [144] L. Chrostowski, C. H. Chang, and C. Chang-Hasnain, "Reduction of relative intensity noise and improvement of spur-free dynamic range of an injection locked VCSEL," *IEEE Proceedings in 16th Annual Meeting in Lasers and Electro-Optics Society*, vol. 2, pp. 706-707, 2003.
- [145] N. Schunk, and K. Petermann, "Noise analysis of injection-locked semiconductor injection lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 22, no. 5, pp. 642-650, 1986.
- [146] F. Morgensen, H. Olesen, and G. Jacobsen, "FM noise suppression and linewidth reduction in an injection-locked semiconductor laser," *Electronics Letters*, vol. 21, no. 16, pp. 696-697, 1985.
- [147] F. Morgensen, H. Olesen, and G. Jacobsen, "Locking conditions and stability properties for a semiconductor laser with external light injection," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 21, no. 7, pp. 784-793, 1985.
- [148] C. H. Henry, N. A. Olsson, and N. K. Dutta, "Locking range and stability of injection locked 1.54 μm InGaAsP semiconductor lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 21, no. 8, pp. 1152-1156, 1985.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υψήρρυθμων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

- [149] T. B. Simpson, J. M. Liu, and A. Gavrielides, "Bandwidth enhancement and broadband noise reduction in injection-locked semiconductor lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, no. 7, pp. 709–711, 1995.
- [150] A. Einstein, "Strahlungs-emission und absorption nach der quantentheorie," *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gessellschaft*, XVIII, NR. 13/14. Braunschweig: VIEWEG, 1916.
- [151] I. Burak, Y. Noter, A. M. Ronn, and A. Szoke, "Tea chemical lasers from $H_2 + Cl_2$ and $H_2 + Br_2$," *Chemical Physics Letters*, vol. 13, pp. 322-324, 1972.
- [152] A. Ikesue, T. Kinoshita, K. Kamata, and K. Yoshida, "Fabrication and Optical Properties of High-Performance Polycrystalline Nd:YAG Ceramics for Solid-State Lasers," *Journal of the Americal Ceramic Society*, vol. 78, pp. 1033-1040, 1995.
- [153] M. Berggren, A. Dodabalapur, R. E. Slusher, A. Timko, and O. Nalamasu, "Organic solid-state lasers with imprinted gratings on plastic substrates," *Applied Physics Letters*, vol. 72, pp. 410-411, 1998.
- [154] K. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt, F. Roser, T. Schreiber, A. Tunnermann, S. Ermeneux, P. Yvernault, and F. Salin, "Extended single-mode photonic crystal fiber lasers," *Optics Express*, vol. 14, pp. 2715-2720, 2006.
- [155] R. Lang, "Injection locking properties of a semiconductor laser," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, no. 16, pp. 976-983, 1982.
- [156] C. H. Henry, N. A. Olsson, and N. K. Dutta, "Locking range and stability of injection locked $1.54 \mu m$ InGaAsP semiconductor lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 21, no. 8, pp. 1152-1156, 1985.
- [157] A. Murakami, K. Kawashima, and K. Atsuki, "Cavity resonance shift and bandwidth enhancement in semiconductor lasers with strong light injection," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 39, no. 10, pp. 1196–1204, Oct. 2003
- [158] X. Jin, and S. L. Chuang, "Relative intensity noise characteristics of injection-locked semiconductor lasers," *Applied Physics Letters*, vol. 77, no. 9, pp. 1250-1252, 2000.
- [159] F. Mogensen, H. Olesen, and G. Jacobsen, "FM noise suppression and linewidth reduction in an injection-locked semiconductor laser," *Electronics Letters*, vol. 21, pp. 696-697, 1985.
- [160] N. H. Zhu, W. Han, W. Li, W. Chen, J. M. Wen, Y. Liu, and L. Xie, "Single Mode Operation of a Fabry-Perot Laser Locked by a Tunable Laser," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 50, no. 7, 2008.
- [161] I. Petibon, P. Gallion, G. Debarge, and C. Chabran, "Locking bandwidth and relaxation oscillations of an injection-locked semiconductor laser," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 24, no. 2, pp. 148-154, 1988.
- [162] E. K. Lau, H. -K. Sung, and M. C. Wu, "Ultra-high, 72 GHz resonance frequency and 44 GHz bandwidth of injection-locked $1.55 \mu m$ DFB lasers," *OFC/NFOEC 2006*, 2006.
- [163] H. L. T. Lee, R. J. Ram, O. Kjebon, and R. Schatz, "Bandwidth enhancement and chir reduction in DBR lasers by strong optical injection," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000)*, Technical Digest. Postconference Edition. TOPS vol. 39. Optical Society of America, pp. 99-100, 2000.
- [164] A. Kuramoto, and S. Yamashita, "All-optical regeneration using a side-mode injection-locked semiconductor laser," *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 1283-1287, 2003.
- [165] E. K. Lau, L. J. Wong, X. Zhao, Y. -K. Chen, C. J. Chang-Hasnain, and M. C. Wu, "Bandwidth enhancement by master modulation of optical injection-locked lasers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 15, pp. 2584-2593, 2008.
- [166] N. Kashima, "Injection-locked Fabry-Perot laser diode transmitters with semiconductor optical amplifier for WDM-PON," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, pp. 2132-2139, 2009.
- [167] A. Shen, D. Make, F. Poingt, L. Legouezigou, F. Pommereau, O. Legouezigou, J. Landreau, B. Rousseau, F. Lelarge, and G. -H. Duan, "Polarisation insensitive injection locked Fabry-Perot laser diodes for 2.5 Gb/s WDM access applications," *ECOC 2008*, pp. 1-2, September 2008.
- [168] W. Han, N. -H. Zhu, L. Xie, M. Ren, K. Sun, B. -H. Zhang, L. Li, and H. -G. Zhang, "Injection locked Fabry-Perot laser diodes for WDM passive optical network spare function," *Optics Communications*, pp. 3553-3557, 2009.
- [169] M. K. Haldar, J. C. Coetzee, and K. B. Gan, "Optical frequency modulation and intensity modulation suppression in a master-slave semiconductor laser system with direct modulation of the master laser," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 41, no. 3, pp. 280-286, 2005.
- [170] E. K. Lau, L. J. Wong, and C. Wu, "Enhanced modulation characteristics of optical injection-locked lasers: A Tutorial," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, no. 3, pp. 618-633, 2009.
- [171] E. K. Lau, H. -K. Sung, and M. C. Wu, "Frequency response enhancement of optical injection-locked lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 90-99, 2008.

Μελέτη της οπτικής παραμετρικής ενίσχυσης και της εγκλειδωσης φάσης με έμφαση σε εφαρμογές υπέρυθρων συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

- [172] N. H. Zhu, W. Han, W. Li, W. Chen, J. M. Wen, Y. Liu, and L. Xie, "Single mode operation of a Fabry-Perot lasers locked by a tunable laser," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 50, no. 7, pp. 1888-1892, 2008.
- [173] X. Cheng, Y. J. Wen, Y. Dong, Z. Xu, X. Shao, Y. Wang, and C. Lu, "Optimization of spectrum-sliced ASE source for injection-locking a Fabry-Perot Laser Diode," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, pp. 1961-1963, 2006.
- [174] H. -C. Ji, I. Yamashita, and K. -I. Kitayama, "Cost-effective colorless WDM-PON delivering up/down-stream data and broadcast services on a single wavelength using mutually injected Fabry-Perot laser diodes," *Optics Express*, vol. 16, no. 7, pp. 4520-4528, 2008.
- [175] J. Armstrong, "OFDM for optical communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 189-204, Feb. 1, 2009.
- [176] M. Nakazawa, "Optical quadrature amplitude modulation (QAM) with coherent detection up to 128 states," in *Proceedings OFC/NFOEC*, pp. 1-3, March 2009.
- [177] E. Lach, and W. Idler, "Modulation formats for 100G and beyond," *Elsevier optical fiber technology*, vol. 17, pp. 377-386, 2011.
- [178] K. Roberts et al., "100G and beyond with digital coherent signal processing," *IEEE Communication Magazine*, pp. 62-69, 2010.
- [179] J. D. Downie, J. Hurley, J. Cartledge, S. Bickham, and S. Mishra, "112 Gb/s PM-QPSK transmission up to 6000 km with 200 km amplifier spacing and a hybrid fiber span configuration," *Optics Express*, vol. 19, no. 26, pp. 96-101, 2011.
- [180] Y. Zhang, N. Deng, C. K. Chan, and L. K. Chen, "A multicast WDM-PON architecture using DPSK/NRZ orthogonal modulation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 17, pp. 1479-1481, Sep. 1, 2008.
- [181] M. H. Eiselt and B. T. Teipen, "DPSK-3ASK transmission optimization by adapting modulation levels," *Proceedings in SPIE*, vol. 7136, no. 2, pp. 1-7, 2008.
- [182] C. W. Chow, C. S. Wong, and H. K. Tsang, "All-optical ASK/DPSK label-swapping and buffering using Fabry-Perot laser diodes," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 10, no. 2, pp. 363-370, 2004.