



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

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ
ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αλέξανδρος Γ. Μαζιώτης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



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

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αλέξανδρος Γ. Μαζιώτης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ηρακλής Αβραμόπουλος

Νικόλαος Ουζούνου

Νικόλαος Πλέρος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Οκτωβρίου 2012.

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

.....
Νικόλαος Ουζούνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Πλέρος
Λέκτορας Αριστ. Παν. Θεσ.

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

.....
Εμμανουήλ Βαρβαρίγος
Καθηγητής Παν/μίου Πατρών

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Γιαννόπουλος
Λέκτορας Παν/μίου Πελοποννήσου

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

.....

Αλέξανδρος Γ. Μαζιώτης

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

Copyright © Αλέξανδρος Γ. Μαζιώτης, 2012.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Στους γονείς μου, Γιώργο και Φρόσω

Στην αδερφή μου, Μαρία

“Let the future tell the truth and evaluate each one according to his work and accomplishments“

Nicola Tesla

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη τεχνικών και υποσυστημάτων προσαρμοσμένων στις απαιτήσεις των οπτικών δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς. Σε αυτό το πλαίσιο, η διατριβή εστιάζει στη μελέτη, ανάπτυξη και πειραματική υλοποίηση πρωτότυπων λύσεων στη σχεδίαση των δομών του χρήστη, τη μετάδοση δεδομένων ανάμεσα στους χρήστες και την κινητικότητά τους. Οι υλοποιήσεις καλύπτουν μεγάλο εύρος και συνεισφέρουν σημαντικά στην ανάπτυξη φωτονικών δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς, καθώς είναι βελτιστοποιημένες όσον αφορά την επίδοση μετάδοσης, την ενεργειακή αποδοτικότητα, το κόστος και τη δυνατότητα ολοκλήρωσής τους.

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μία τεχνική αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας βασισμένη σε παθητικό οπτικό φιλτράρισμα, για επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος και επαναδιαμόρφωση σε δίκτυα πρόσβασης. Η τεχνική εφαρμόζεται σε πλήρως αμφίδρομα δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος, με μονάδες οπτικού δικτύου που βασίζονται σε ημιαγωγικούς ανακλαστικούς οπτικούς ενισχυτές, ενώ αποδεικνύεται ότι είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε διαφορετικού τύπου συρρευματικά σήματα, επιδεικνύοντας υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Επιπλέον, υλοποιείται μία διαφανής στο μήκος κύματος μονάδα οπτικού δικτύου, που αποτελείται από ένα φίλτρο Fabry–Pérot και έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή, για αμιγώς οπτική ανάκτηση του ρολογιού του συρρευματικού σήματος και επαναδιαμόρφωσή του, για μετάδοση του αντιρρευματικού σήματος, η οποία εφαρμόζεται σε πλήρως αμφίδρομα δίκτυα με συμμετρική ταχύτητα 10 Gb/s. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται και για την αποφυγή του θορύβου σκέδασης Rayleigh μέσω μετατόπισης του μήκους κύματος. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται μέθοδος για οπτική μετάδοση δεδομένων ανάμεσα σε χρήστες μέσω επιλεκτικής στο μήκος κύματος δρομολόγησης. Αυτή η τεχνική παρέχει τη δυνατότητα εγκατάστασής της σε μητροπολιτικά δίκτυα και σε δίκτυα πρόσβασης. Τέλος, σε radio-over-fiber δίκτυα παρουσιάζεται μέθοδος δυναμικής ανάθεσης μήκους κύματος για διαχείριση των μεταβάσεων των χρηστών σε διαφορετικές κυψέλες και χρησιμοποιείται η τεχνική του οπτικού πολλαπλασιασμού συχνότητας για μετάδοση ετερογενών υπηρεσιών μέσω μίας οπτικής φέρουσας προς δύο χρήστες.

Λέξεις Κλειδιά

Δίκτυα πρόσβασης, παθητικά οπτικά δίκτυα, συρρευματικό (downstream), αντιρρευματικό (upstream), κέντρο μεταγωγής (central office), επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος, ανάκτηση φέρουσας, φίλτρο Fabry-Pérot, μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), τερματικό οπτικών γραμμών (OLT), ημιαγώγιμοι ανακλαστικοί οπτικοί ενισχυτές, ψευδοτυχαία ακολουθία δυφίων (PRBS), τρέμουλο φάσης (chirp), πολυπλεξία μήκους κύματος, ανάκτηση ρολογιού, μετατόπιση μήκους κύματος, οπισθοσκέδαση Rayleigh, αμιγώς οπτική μεταγωγή, δρομολόγηση, οπτικές μονάδες μνήμης, οπτικές συσκευές μεταγωγής, υβριδικά ασύρματα - οπτικά δίκτυα (radio-over-fiber), πικο-κυψελοειδή δίκτυα, μικρο-ηλεκτρο-μηχανικός διακόπτης (MEMS), προβιβασμός συχνότητας (frequency up-conversion), υποβιβασμός συχνότητας (frequency down-conversion), δυναμική ανάθεση χωρητικότητας, μεταπομπή, οπτικός πολλαπλασιασμός συχνότητας.

Abstract

The objective of the present PhD thesis is the development of techniques and subsystems adapted to the requirements of next generation optical access networks. Within this framework, the thesis focuses on the study, development and experimental demonstration of novel solutions regarding the design of customer premises, data transmission between users and user mobility. The implementations span over a wide range and contribute greatly to the fulfillment of next-generation photonic networks, since they are optimized in terms of transmission performance, energy efficiency, cost and integration capability.

An all-optical carrier recovery technique, based on a passive resonating circuit for wavelength reuse and remodulation, in loopback access networks is demonstrated. The technique is applied in WDM-PONs with RSOA-based optical network units (ONU), showing that it is efficient and flexible to be applied to different downstream signals (non-/chirped ASK and multilevel signals) with full-duplex high data rate transmission. Moreover, a colorless ONU comprised of a Fabry–Pérot filter (FPF) and a semiconductor optical amplifier (SOA) for all-optical clock recovery of the downstream signal is proposed, which allows wavelength reuse of the downstream signal for upstream remodulation, achieving full-duplex 10 Gb/s symmetrical data rate with extended reach. This technique is further used to avoid in-band Rayleigh backscattering through wavelength shifting. Furthermore, a technique for optical intra-network data transmission between different users, through cognitive wavelength routing, in metro-access networks is presented. Finally, in radio-over-fiber networks, an optical dynamic capacity allocation scheme for handoff, using moving extended cells, is demonstrated and also a technique of optical frequency multiplication, for delivery of wireless heterogeneous services over a single optical carrier to two users, is proposed.

Keywords

Access networks, passive optical networks, downstream, upstream, central office, wavelength reuse, carrier recovery, fabry-pérot filter, optical network unit, optical line terminal, reflective semiconductor optical amplifier, pseudo random binary sequence, chirp, wavelength division multiplexing, clock recovery, wavelength shifting, Rayleigh backscattering, all-optical switching, routing, optical flip-flop, optical switching devices, radio-over-fiber, picocellular networks, micro-electro-mechanical switch, frequency up-conversion, frequency down-conversion, dynamic capacity allocation, handoff, optical frequency multiplication.

Αντί προλόγου

Φτάνοντας στο τέλος της διαδρομής, μετά από τέσσερα χρόνια στο εργαστήριο, έρχονται στο μυαλό μου στιγμές δυνατές. “Όταν έρχεσαι αντιμέτωπος με ένα πρόβλημα, έχεις δύο επιλογές: είτε απογοητεύεσαι και χτυπάς το κεφάλι σου στον τοίχο, είτε βρίσκεις λύσεις, ώστε να το αντιμετωπίσεις”. Το νόημα της φράσης του Δασκάλου μας αναδυόταν, καθώς ο χρόνος κυλούσε, όλο και πιο συχνά. Η έρευνα συνυφαίνεται με καταστάσεις προβληματικές που σε δοκιμάζουν, σε φέρνουν στο όριο. Ως εκ τούτου, η έρευνα υπήρξε καταλύτης για την προσωπική μου εξέλιξη. Η επιμονή, η ακρίβεια και η συστηματικότητα της δουλειάς αποτελούν μερικά μόνο από τα βέλη της φαρέτρας με τα οποία πορεύτηκα ως τώρα και θα πορεύομαι στο εξής. Η εργαστηριακή πορεία μου απέδειξε την αναγκαιότητα αρετών, όπως η υπομονή και η συνεργατικότητα.

Δυνατές στιγμές συνδυάστηκαν με δυνατές προσωπικότητες. Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους και καθέναν ξεχωριστά για τη γνωριμία μου μαζί τους και τη σύμπλευσή μας. Η εκπόνηση της διατριβής δε θα ήταν δυνατή χωρίς τη συμβολή τους.

Θέλω από καρδιάς να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο, για τη δυνατότητα που μου παρείχε να γίνω μέλος του εργαστηρίου του, τις συμβουλές που μου προσέφερε και την επιστημονική του καθοδήγηση. Δάσκαλος που φωτίζει τους συνεργάτες του τόσο με τις γνώσεις όσο και με τις αξίες που διαπερνούν το έργο του, ο κ. Αβραμόπουλος αφιέρωσε πολλάκις τον εαυτό του, ώστε να αντιμετωπίσουμε και εν τέλει να ξεπερνούμε τα όποια εμπόδια. Η αριστεία και η αυτονομία αποτελούσαν τους πυλώνες της διδασκαλίας του. Δεν είναι, επομένως, περίεργο που ακούγοντας για τις νησίδες αριστείας των ελληνικών πανεπιστημίων, η σκέψη μου οδηγείται στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ), το οποίο ίδρυσε το 1995 και από τότε διευθύνει.

Θερμό ευχαριστώ σε όλους τους φίλους και συνεργάτες με τους οποίους πορευτήκαμε αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ το Στράτο Κεχαγιά και τον Παρασκευά Μπακόπουλο, το πείραμα με τους οποίους στο Πολυτεχνείο της Καταλονίας έδωσε το έναυσμα για τη διατριβή μου. Ιδιαίτερη ήταν η συμβολή του Χρήστου Κουλουμέντα με τις κάθε είδους συζητήσεις - “προνομιακές” αντικριστές θέσεις- και την υποστήριξη την οποία παρείχε σε ένα από τα πρώτα μου πειράματα στο εργαστήριο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Μάριο Μπουγιούκο με τον οποίο είμαστε στην ίδια γενιά, φέραμε σε πέρας πλήθος πειραμάτων και αντιμετωπίσαμε παρόμοιες δυσκολίες. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τους Δ. Αποστολόπουλο, Κ. Βυρσωκυνό, Γ. Γιαννούλη, Π. Γκρούμα, Σ. Δρη, Π. Ζακυνθινό, Δ. Καλαβρουζιώτη, Β. Κατοπώδη, Ι. Λαζάρου, Δ. Πετραντωνάκη, Μ. Σπυροπούλου, Χ. Σταματιάδη, Λ. Σταμπουλίδη και Κ. Χριστογιάννη που αποτελούν ή αποτέλεσαν μέλη της ομάδας μας, η οποία εργάστηκε με στόχο την πρόοδο του εργαστηρίου.

Τα ταξίδια ήταν ένα ιδιαίτερο και ξεχωριστό κομμάτι της ερευνητικής μου διαδρομής. Ξεκινώντας από το πρώτο μου πειραματικό ταξίδι στο Πολυτεχνείο της Καταλονίας, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Bernhard Schrenk, με τον οποίο συνεργαστήκαμε επιτυχώς τόσο στη Βαρκελώνη όσο και στην Αθήνα, αλλά και τους καθηγητές Josep Prat και Jose Lazaro για τη θερμή φιλοξενία τους. Ακόμη, ευχαριστώ την Claudia Reis, με την οποία συνεργαστήκαμε αρμονικά δύο φορές, μία στο ΕΦΕ και τη δεύτερη στο εργαστήριο στο Aveiro καθώς και τον καθηγητή της A. Teixeira.

Ξεχωριστά θα ήθελα να αναφερθώ στον καθηγητή του Πανεπιστημίου Πατρών, κ. Μάνο Βαρβαρίγο, και να τον ευχαριστήσω θερμά για τη συμβολή του στην ερευνητική μου πορεία και την προτροπή του να γίνω μέλος του ΕΦΕ.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ θέλω να το πω στην αγαπημένη μου οικογένεια, τους γονείς μου, Γιώργο και Φρόσω, και την αδερφή μου, Μαρία, που είναι πάντα δίπλα μου και τους αφιερώνω με ευγνωμοσύνη την παρούσα διατριβή. Χωρίς την αμέριστη συμπαράστασή τους και την αγάπη τους δε θα είχε ολοκληρωθεί η διατριβή αυτή.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους και τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου αυτά τα χρόνια, για το ειλικρινές ενδιαφέρον και τη συμπαράστασή τους.

Αλέξανδρος Μαζιώτης,

Οκτώβριος 2012

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Λέξεις Κλειδιά.....	8
Abstract	9
Keywords.....	10
Αντί προλόγου.....	11
Περιεχόμενα.....	14
Κεφάλαιο 1.....	19
Εισαγωγή και σκοπός της έρευνας.....	19
1.1 Εισαγωγή.....	20
1.2 Η ανάγκη για επιπλέον εύρος ζώνης	24
1.3 Διείσδυση οπτικών δικτύων πρόσβασης παγκοσμίως.....	28
1.4 Η οπτική ίνα σε ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης.....	31
Οπτική ίνα στη γειτονιά- Fiber To The Neighbourhood (FTTN):.....	32
Οπτική ίνα στο πεζοδρόμιο- Fiber To The Curb (FTTC):.....	32
Οπτική ίνα στο Κτίριο - Fiber To The Premises (FTTP)/ Οπτική ίνα στο Σπίτι - Fiber To The Home (FTTH):.....	32
1.5 Μετρικές αξιολόγησης οπτικών δικτύων πρόσβασης.....	33
1.5.1 Βαθμός διαχωρισμού χρηστών	33
1.5.2 Ισολογισμός απωλειών οπτικής ισχύος (loss budget)	34
1.5.3 Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.....	35
1.5.4 Ενεργειακή αποδοτικότητα	36
1.5.5 Εύρος διείσδυσης.....	36
1.5.6 Κόστος.....	37
1.6 Κατηγοριοποιήσεις οπτικών δικτύων πρόσβασης	37

1.6.1 Ενεργητικά και παθητικά δίκτυα πρόσβασης.....	37
1.6.2 Συνδέσεις σημείου-προς-σημείο και σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία....	39
1.6.3 Τεχνικές πολυπλεξίας.....	41
1.6.4 Κινητικότητα χρηστών στα οπτικά δίκτυα πρόσβασης.....	47
1.6.5 Πρότυπα οπτικών δικτύων πρόσβασης	49
1.7 Κίνητρο και στόχοι της διατριβής	51
1.8 Δομή της διατριβής.....	52
Αναφορές	55
Κεφάλαιο 2.....	65
Ανάκτηση φέρουσας για επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος.....	65
2.1 Το φίλτρο Fabry - Péro.....	66
2.2 Τεχνικές ανάκτησης φέρουσας και θεωρητική ανάλυση.....	71
2.3 Πειραματική σύγκριση τεχνικών ανάκτησης φέρουσας	78
2.4 Πειραματική αξιολόγηση της αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας	85
2.5 Εφαρμογή αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας σε συμμετρικά, 10 Gb/s, παθητικά οπτικά δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος	91
2.6 Επαναδιαμόρφωση διαφορετικού τύπου συρρευματικών σημάτων, μέσω αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας, σε παθητικά οπτικά δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος	98
2.7 Σύνοψη - Συμπεράσματα	112
Αναφορές	114
Κεφάλαιο 3.....	121
Αμιγώς οπτική ανάκτηση ρολογιού για επαναχρησιμοποίηση και μετατόπιση μήκους κύματος	121
3.1 Κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού με φίλτρο Fabry-Péro.....	122
3.2 Εφαρμογή ανάκτησης ρολογιού σε συμμετρικά (10Gb/s) παθητικά οπτικά δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος.....	125
3.3 Ανοχή σημάτων στο θόρυβο λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh.....	134
3.4 Σύνοψη -Συμπεράσματα	142
Αναφορές	143
Κεφάλαιο 4.....	145

Μετάδοση δεδομένων μεταξύ χρηστών και αμιγώς οπτικά flip-flop 145

4.1 Μετάδοση δεδομένων μεταξύ χρηστών χωρίς τη μεσολάβηση του κέντρου μεταγωγής.....	146
4.1.1 Αρχιτεκτονική δικτύου και μεταγωγή πακέτων δεδομένων.....	146
4.1.2 Πειραματική παρουσίαση και ανάλυση	150
4.1.3 Δυνατότητα επέκτασης του δικτύου.....	158
4.2 Αμιγώς οπτικά S-R και D flip-flop.....	161
4.2.1 Εισαγωγή	161
4.2.2 Αρχή λειτουργίας των flip-flop και πειραματικά αποτελέσματα	162
4.3 Σύνοψη -Συμπεράσματα	170
Αναφορές	172

Κεφάλαιο 5.....177

Δυναμική ανάθεση χωρητικότητας και οπτικός πολλαπλασιασμός

συχνότητας σε RoF δίκτυα177

5.1 Οπτική δυναμική ανάθεση χωρητικότητας, προς επίτευξη καλύτερων υπηρεσιών μεταπομπής (handoff), σε Radio-over-Fiber δίκτυα	178
5.2 Οπτικός πολλαπλασιασμός συχνότητας σε Radio-over-Fiber δίκτυα.....	190
5.2.1 Βασική ιδέα και πειραματική διάταξη	191
5.2.2 Πειραματικά αποτελέσματα	192
5.3 Σύνοψη - Συμπεράσματα	196
Αναφορές	197

Κεφάλαιο 6.....199

Σύνοψη αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα199

6.1 Ανασκόπηση200

6.2 Σύνοψη200

6.2.1 Ανάπτυξη δομών χρήστη σε παθητικά οπτικά δίκτυα.....	201
6.2.2 Διατάξεις βασισμένες σε SOA-MZI, για μετάδοση δεδομένων μεταξύ χρηστών και υλοποίηση αμιγώς οπτικών flip-flop.....	202
6.2.3 Υλοποίηση τεχνικών σε Radio-over-Fiber δίκτυα	203

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα204

6.3.1 Ολοκλήρωση.....204

6.3.2 Σύμφωνη λήψη σε οπτικά δίκτυα πρόσβασης205

Αναφορές207

**Παράρτημα: Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και
συνέδρια με κρίση209**

Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά209

Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά συνέδρια με κρίση.....211

Λίστα Συντμήσεων215

Λίστα Εικόνων217

Λίστα Πινάκων.....223

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή και σκοπός της έρευνας

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών τηλεπικοινωνιών διευκολύνουν την καθημερινή ζωή παρόλο που δεν είναι ευδιάκριτα στο χρήστη, καθώς εντοπίζονται κυρίως στα δίκτυα κορμού και επομένως δε βρίσκονται σε άμεση επαφή με αυτόν. Η παγκόσμια διείσδυση της οπτικής ίνας στα τελευταία κομμάτια των δικτύων επικοινωνιών, το επονομαζόμενο δίκτυα πρόσβασης, είναι ιδιαίτερα χαμηλή και διαδεδομένη σε λίγες μόνο χώρες. Ωστόσο, με την αναμενόμενη εγκατάσταση οπτικών ινών έως το χρήστη τα επόμενα χρόνια, αυτό το αρχικά μικρό πεδίο των τηλεπικοινωνιών έχει προσελκύσει ερευνητική δραστηριότητα.

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μία σύντομη περιγραφή της εξέλιξης των οπτικών δικτύων πρόσβασης, των τρεχουσών ερευνητικών δραστηριοτήτων, της προτυποποίησης και των διαφορετικών αρχιτεκτονικών και κατηγοριοποιήσεων των δικτύων πρόσβασης.

1.1 Εισαγωγή

Τα δίκτυα οπτικών ινών είναι ικανά να παρέχουν ευρυζωνικές υπηρεσίες στον τελικό χρήστη των σημερινών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, τα οποία θα είναι στη συνέχεια ικανά να επεκταθούν σε ευρύτερες γεωγραφικές περιοχές. Σε αντιστοιχία με την έκταση των συνδέσεων μετάδοσης, υπάρχουν δίκτυα κορμού, μητροπολιτικά και πρόσβασης [1.1]. Η οπτική ίνα χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης καθώς παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα καλώδια χαλκού, όπως τα παραδοσιακά συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων (twisted pair cables) και τα ομοαξονικά καλώδια (coaxial cables).

Τα δίκτυα πρόσβασης οπτικών ινών (FTTx solutions) είναι υλοποιήσεις που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του μήκους του χάλκινου βρόχου, φέρνοντας το ευρυζωνικό μέσο μετάδοσης (οπτική ίνα) κοντά στο συνδρομητή [1.2]. Τα τελευταία χρόνια, η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει παρουσιάσει αλματώδεις ρυθμούς ανάπτυξης λόγω του πολύ μεγάλου ρυθμού μετάδοσης που μπορεί να διαθέσει στους χρήστες (Πίνακας 1), αλλά και της μακροπρόθεσμης αντοχής της τεχνολογίας στις αυξανόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης.

Πιο συγκεκριμένα, η οπτική ίνα (SSMF) έχει ένα γινόμενο εύρους ζώνης-απόστασης ($B \times D$) πολύ μεγαλύτερο των $10 \text{ GHz} \times \text{km}$ ενώ τα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων έχουν αντίστοιχο γινόμενο περίπου $25 \text{ MHz} \times \text{km}$ και τα ομοαξονικά καλώδια πλησιάζουν την τιμή του $1 \text{ GHz} \times \text{km}$. Επίσης, η οπτική ίνα SSMF επιδεικνύει πολύ χαμηλές απώλειες, $0,2 \text{ dB/km}$ σε συχνότητα $193,1 \text{ THz}$ (1550 nm) ενώ τα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων και τα ομοαξονικά καλώδια έχουν απώλειες 30 dB/km σε συχνότητα 1 MHz και 1 GHz , αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, η οπτική ίνα δεν επηρεάζεται και δεν δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI), και εάν πολλές ίνες τοποθετηθούν η μία δίπλα στην άλλη, δεν παρατηρείται καμία παρεμβολή. Επιπλέον, στις οπτικές τεχνολογίες, οι ταχύτητες οπτικής επεξεργασίας σήματος και μεταγωγής μπορούν να ξεπεράσουν τις αντίστοιχες του ηλεκτρικού πεδίου, απαιτώντας χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας ανά ψηφίο [1.3]. Τέλος, η φωτονική τεχνολογία επιτρέπει την ολοκλήρωση αρκετών οπτικών λειτουργιών σε ένα πλινθίο, προσφέροντας επομένως δυνατότητα μαζικής παραγωγής τους.

Πίνακας 1: Τυπικοί χρόνοι λήψης (download) και μεταφόρτωσης (upload) αρχείων εικόνας και ήχου για διαφορετικούς τύπους σύνδεσης του χρήστη στο διαδίκτυο [1.4].

	Απαιτούμενος χρόνος για:	Φωτογραφικό άλμπουμ 1GB	4,7 GB βίντεο απλής ανάλυσης	25 GB βίντεο υψηλής ευκρίνειας
FTTH	1 Gb/s download 1 Gb/s upload	9 δευτερόλεπτα	39 δευτερόλεπτα	3 λεπτά και 28 δευτερόλεπτα
FTTH	100 Mb/s download 100 Mb/s upload	1 λεπτό και 23 δευτερόλεπτα	6 λεπτά και 31 δευτερόλεπτα	34 λεπτά και 40 δευτερόλεπτα
CATV	50 Mb/s download	2 λεπτά και 46 δευτερόλεπτα	13 λεπτά και 2 δευτερόλεπτα	1 ώρα και 9 λεπτά
	10 Mb/s upload	13 λεπτά και 52 δευτερόλεπτα	1 ώρα και 5 λεπτά	5 ώρες και 47 λεπτά
VDSL	8 Mb/s download	19 λεπτά	1 ώρα και 29 λεπτά	7 ώρες και 55 λεπτά
	1 Mb/s upload	2 ώρες και 32 λεπτά	11 ώρες και 54 λεπτά	-

Παρά τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά, η εισαγωγή οπτικών ινών στα δίκτυα πρόσβασης απαιτεί σημαντική αναβάθμιση του δικτύου εξ ολοκλήρου, συμπεριλαμβανομένου του μέσου μετάδοσης, εκτός από τους κόμβους. Επομένως, ένα μεγάλο μέρος της επένδυσης απαιτείται για την εγκατάσταση των οπτικών ινών, καθώς το σκάψιμο αποτελεί μεγάλο μέρος του συνολικού κόστους εγκατάστασης [1.5]. Πρόσφατα παρατηρείται ότι υπάρχει τάση εγκατάστασης οπτικών δικτύων πρόσβασης είτε αντικαθιστώντας υπάρχουσα υποδομή, είτε σε περιοχές όπου δεν υπήρχε πρότερη δικτυακή υποδομή (green-field) [1.6], λόγω της προβλεπόμενης μεγαλύτερης εξοικονόμησης (μακροπρόθεσμα) σε σύγκριση με τις δαπάνες λειτουργίας και τις δαπάνες κεφαλαίου (OpEx/CapEx) ενός «παραδοσιακού» δικτύου πρόσβασης.

Απαρχές οπτικών επικοινωνιών

Οι Αρχαίοι Έλληνες εισήγαγαν τρόπους και μεθόδους τηλεπικοινωνιών, μερικοί των οποίων είναι πρόγονοι σημερινών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων όπως οι φρυκτωρίες. Οι φρυκτωρίες ήταν ένα σύστημα συνεννόησης με σημάδια που

μεταβιβάζονταν από περιοχή σε περιοχή με τη χρήση πυρσών στη διάρκεια της νύκτας που χρησιμοποιήθηκε για πολλούς αιώνες μέχρι το 1850.



Απεικόνιση Φρυκτωριών.

Από τα γνωστότερα και αρχαιότερα παραδείγματα μετάδοσης μηνύματος με φρυκτωρίες, είναι η είδηση της πτώσης της Τροίας. Ο Αγαμέμνων μετέδωσε την πολύ σημαντική πληροφορία της κυρίευσης της Τροίας σε απόσταση 600 χλμ στο Άργος με αναμετάδοση σημάτων από βουνό σε βουνό. Αξίζει να παραθέσουμε το απόσπασμα από το έργο Αγαμέμνων του Αισχύλου που περιγράφει αναλυτικά το γεγονός στους στίχους 280-316 ως εξής:

ΧΟΡΟΣ

καὶ τίς τόδ' ἐξίκοιτ' ἄν ἀγγέλων τάχος;

ΚΛΥΤΑΙΜΗΣΤΡΑ

*Ἥφαιστος Ἴδης λαμπρὸν ἐκπέμπων σέλας,
φρυκτὸς δὲ φρυκτὸν δεῦρ' ἀπ' ἀγγάρου πυρὸς
ἔπεμπεν· Ἴδη μὲν πρὸς Ἑρμαῖον λέπας
Λήμνου· μέγαν δὲ πανὸν ἐκ νήσου τρίτον
Ἀθῶν αἵπος Ζηνὸς ἐξεδέξατο,*

ὑπερτελής τε, πόντον ὥστε νοτίσαι
 ἰχθύς πορευτοῦ λαμπάδος πρὸς ἠδονήν,
 πεύκη τὸ χρυσοφεγγές, ὡς τις ἥλιος,
 σέλας παραγγείλασα Μακίστου σκοπαῖς·
 ὁ δ' οὔτι μέλλων οὐδ' ἀφρασμόνως ὕπνω
 νικώμενος παρήκεν ἀγγέλου μέρος·
 ἐκάς δὲ φρυκτοῦ φῶς ἐπ' Εὐρίπου ῥοὰς
 Μεσσαπίου φύλαξι σημαίνει μολόν.
 οἱ δ' ἀντέλαμψαν καὶ παρήγγειλαν πρόσω
 γραίας ἐρείκης θωμὸν ἄψαντες πυρί.
 σθένουσα λαμπὰς δ' οὐδέπω μαυρουμένη,
 ὑπερθοροῦσα πεδίον Ἀσωποῦ, δίκην
 φαιδρᾶς σελήνης, πρὸς Κιθαιρῶνος λέπας,
 ἠγειρεν ἄλλην ἐκδοχὴν πομποῦ πυρός.
 φάος δὲ τηλέπομπον οὐκ ἠναίνετο
 φρουρά, πλέον καίουσα τῶν εἰρημένων,
 λίμνην δ' ὑπὲρ Γοργῶπιν ἔσκηψεν φάος,
 ὄρος τ' ἐπ' Αἰγίπλαγκτον ἐζικνούμενον
 ὠτρυνε θεσμὸν μὴ χατίζεσθαι πυρός.
 πέμπουσι δ' ἀνδαιόντες ἀφθόνῳ μένει
 φλογὸς μέγαν πάγωνα, καὶ Σαρωνικοῦ
 πορθμοῦ κάτοπτον πρῶν' ὑπερβάλλειν πρόσω
 φλέγουσαν· εἴτ' ἔσκηψεν, εὗτ' ἀφίκετο
 Ἀραχναῖον αἶπος, ἀστυγείτονας σκοπᾶς·
 κάπειτ' Ἄτρειδῶν ἐς τόδε σκίπτει στέγος
 φάος τόδ' οὐκ ἄπαππον Ἰδαίου πυρός.
 τοιοῖδε τοί μοι λαμπαδηφόρων νομοί,
 ἄλλος παρ' ἄλλου διαδοχαῖς πληρούμενοι·
 νικᾷ δ' ὁ πρῶτος καὶ τελευταῖος δραμῶν.
 τέκμαρ τοιοῦτον σύμβολόν τε σοὶ λέγω
 ἀνδρὸς παραγγείλαντος ἐκ Τροίας ἐμοί.

Το κείμενο αυτό αποτελεί την παλαιότερη αναφορά στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών και έμεινε γνωστό σαν «φρυκτοί του Αγαμέμνονα». Χρονολογικά δεν μπορεί να καταχωρηθεί απλά και μόνο στον 5ο π.χ. αιώνα, οπότε και γράφτηκε, αλλά στον 12 π.χ. αιώνα, όταν συνέβη το γεγονός που περιγράφεται.

[Πηγή: Μουσείο τηλεπικοινωνιών ΟΤΕ]

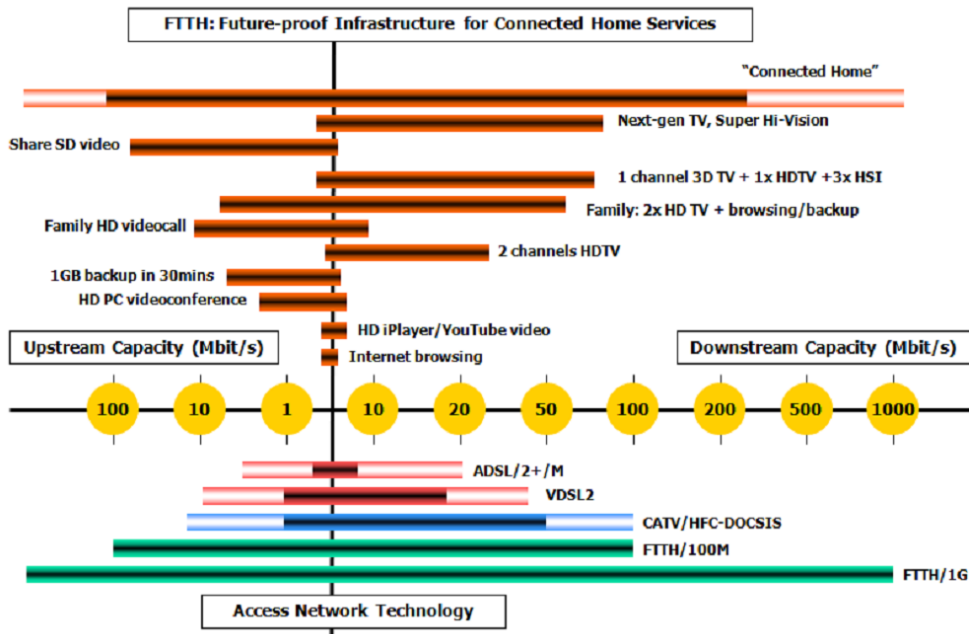
1.2 Η ανάγκη για επιπλέον εύρος ζώνης

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, οι ταχύτητες σύνδεσης στο διαδίκτυο αυξάνονται σταθερά λόγω του συνδυασμού της ανάπτυξης του υλικού και του λογισμικού στους υπολογιστές, η οποία με τη σειρά της τροφοδοτεί την αντικατάσταση κειμένου από εικόνες, ήχο και βίντεο.

Ο νόμος του Νίλσεν (Nielsen) [1.7] σχετικά με το εύρος ζώνης του διαδικτύου αποτελεί μία εμπειρική παρατήρηση και δηλώνει ότι η ταχύτητα σύνδεσης του κάθε χρήστη αυξάνεται κατά 50% το χρόνο, ή διπλασιάζεται κάθε 21 μήνες. Αυτός ο νόμος παρατηρείται από το 1984 έως σήμερα και η ακολουθία δεδομένων του για το 2012 δίνει ταχύτητα σύνδεσης 69 Mb/s, η οποία είναι μια ταχύτητα ήδη οικεία σε μερικούς, αλλά όχι η υψηλότερη διαθέσιμη στους καταναλωτές παγκοσμίως.

Μία επισκόπηση των υπάρχουσών και αναδυόμενων υπηρεσιών φαίνεται στην Εικόνα 1, περιλαμβάνοντας την απαίτησή τους σε εύρος ζώνης. Επίσης απεικονίζονται οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης σε εμπορικά διαθέσιμες λύσεις σε ενσύρματα δίκτυα πρόσβασης για συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων, ομοαξονικά καλώδια και οπτικές ίνες. Φαίνεται ότι οι πιο απαιτητικές εφαρμογές, είναι όποιες χρησιμοποιούν εικόνες υψηλής ανάλυσης, είτε στατικά (π.χ. φωτογραφίες), είτε δυναμικά (π.χ. βίντεο), όπως ο διαμοιρασμός μεγάλων αρχείων (file sharing) και η νέας γενιάς υψηλής ανάλυσης τηλεόραση (HDTV). Είναι προφανές ότι οι διαθέσιμες εμπορικές λύσεις μέσω συνεστραμμένων ζευγών καλωδίων και ομοαξονικών καλωδίων, δεν ανταποκρίνονται στις μελλοντικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, ενώ παράλληλα παρατηρείται υψηλή ασυμμετρία ανάμεσα στο προσφερόμενο

συρρευματικό και αντιρρευματικό εύρος ζώνης. Το τελευταίο επιβεβαιώνεται από μία μέτρηση μεγάλης κλίμακας των εμπορικών δικτύων πρόσβασης στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη [1.8].



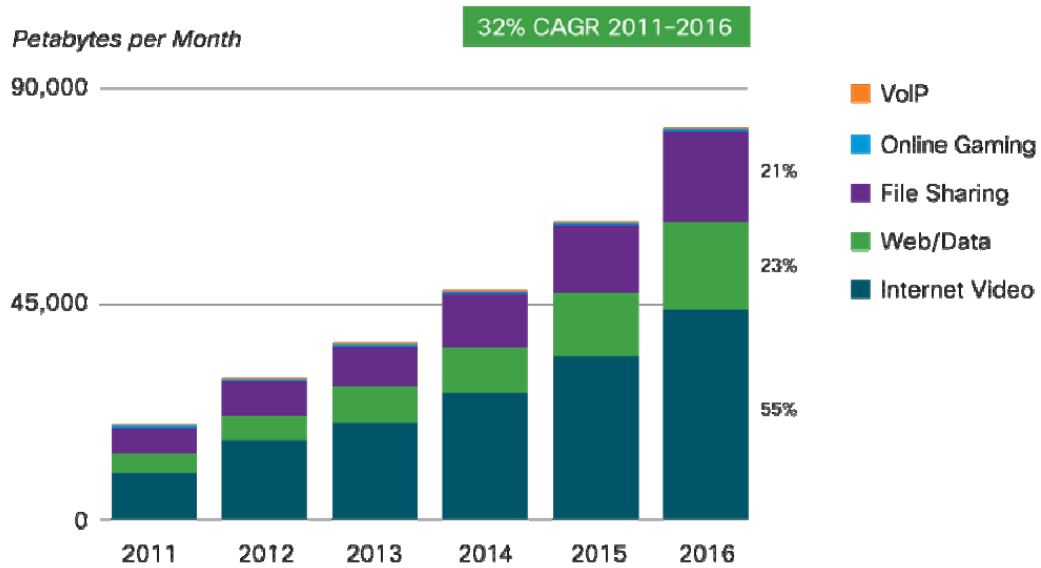
Εικόνα 1: Χωρητικότητα δικτύου πρόσβασης ανά εφαρμογή και τεχνολογία [1.4].

Όπως προκύπτει από τις υπηρεσίες που φαίνονται στην Εικόνα 1, το εύρος ζώνης του αντιρρευματικού σήματος γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό, παρόλο που οι διαφημίσεις σχετικά με την ευρυζωνικότητα εστιάζουν συνήθως στο εύρος ζώνης του συρρευματικού σήματος. Λόγω του αυξανόμενου όγκου δεδομένων που παράγονται από τους χρήστες και διακινούνται στο δίκτυο [1.9], η συμμετρία αποτελεί πολύ σημαντική προϋπόθεση στα δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς (next-generation access networks).

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 2 οι υπηρεσίες που παρέχουν βίντεο αναμένεται να συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση της παγκόσμιας διαδικτυακής κίνησης δεδομένων. Το 2010 ξεπέρασαν την αντίστοιχη κίνηση που δημιουργείται από εφαρμογές διαμοιρασμού δεδομένων και έγιναν ο μεγαλύτερος παράγοντας στην παγκόσμια διακίνηση δεδομένων. Πολλές διαδικτυακές εφαρμογές βασίζονται ήδη στο βίντεο, όπως:

- Υπηρεσίες catch-up TV (π.χ. BBC iplayer), όπου απαιτούν εύρος ζώνης 3,5Mb/s για μετάδοση υψηλής ευκρίνειας [1.10].
- Υπηρεσίες ενοικιάσεως DVD (π.χ. Amazon) που προσφέρουν ταινίες προς τους χρήστες διαδικτυακά [1.11]. Οι χρήστες αναμένεται να επιθυμούν να τις έχουν διαθέσιμες σε λεπτά παρά σε ώρες. Το απαιτούμενο εύρος ζώνης ανέρχεται σε εκατοντάδες Mb/s.
- Κλήση βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD video calling). Για παράδειγμα, η Skype παρέχει από τον Ιανουάριο του 2010 αυτήν την υπηρεσία που απαιτεί 1 Mb/s εύρος ζώνης για το συρρευματικό και το αντιρρευματικό σήμα [1.12].
- Συσκευές που παρέχουν υπηρεσίες τηλεόρασης μέσω διαδικτύου (π.χ. Google TV, Apple TV, Boxee Box και Roku), πλατφόρμες παιχνιδιών, αλλά και τηλεοράσεις που παρέχουν δυνατότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο, μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες βίντεο από το διαδίκτυο όπως YouTube, Amazon, iTunes και Netflix. Η υψηλής ευκρίνειας μετάδοση απαιτεί εύρος ζώνης 4Mb/s ή και περισσότερο [1.13].
- Τον Οκτώβριο του 2010 η Cisco παρουσίασε υπηρεσία τηλεπαρουσίας στο σπίτι (ūmi home telepresence). Αυτό είναι ένα σύστημα τηλε-διασκέψεων ευρείας χρήσης, που συνδυάζεται με τηλεοράσεις υψηλής ευκρίνειας. Το απαιτούμενο εύρος ζώνης φτάνει τα 5Mb/s για το συρρευματικό και το αντιρρευματικό σήμα [1.14].

Πέραν των υπηρεσιών που προαναφέρθηκαν, στο προσκήνιο έχουν έρθει εφαρμογές όπου οι χρήστες ανεβάζουν πολλά αρχεία μεγάλου όγκου όπως φωτογραφίες ή βίντεο υψηλής ανάλυσης σε διαδικτυακές εφαρμογές όπως το Flickr [1.15], το YouTube [1.16] ή προσωπικά blogs ενώ οι υπηρεσίες που βασίζονται στο σύννεφο (cloud-based), όπως το iCloud της Apple, πολλαπλασιάζονται. Η αρχιτεκτονική FTTH όχι μόνο προσφέρει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του αντιρρευματικού σήματος, αλλά ανοίγει και το δρόμο για συμμετρικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.



Εικόνα 2: Διακίνηση δεδομένων στο διαδίκτυο παγκοσμίως [1.17].

Επιπλέον, στο μέλλον, η αυξανόμενη δημοφιλία των υπαρχουσών υπηρεσιών, η εισαγωγή νέων υπηρεσιών, η τάση για διαμοιρασμό μιας ευρυζωνικής σύνδεσης σε πολλούς χρήστες εντός ενός σπιτιού και οι ταυτόχρονες απαιτήσεις πολλών εφαρμογών, θα συνεχίσουν να εντείνουν τις απαιτήσεις για εύρος ζώνης. Καθώς όλο και περισσότερη πληροφορία γίνεται διαθέσιμη ψηφιακά, τα δεδομένα θα είναι αναγκαίο να ανακτώνται ταχύτερα. Συνεπώς, και η ανάπτυξη νέων εφαρμογών θα ανατροφοδοτηθεί από τις βελτιωμένες δυνατότητες του δικτύου.

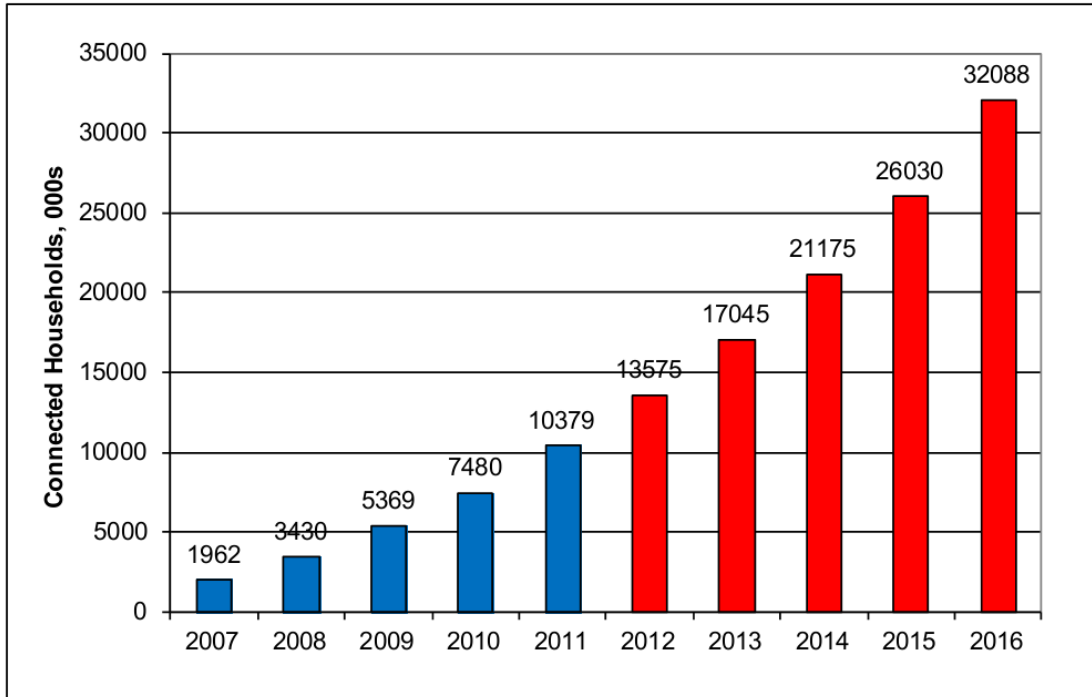
Το βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD video) θα κινηθεί προς ανώτερη ποιότητα, όταν οι ταχύτητες σύνδεσης των χρηστών το επιτρέψουν. Για παράδειγμα, η ποιότητα μετάδοσης υψηλής ευκρίνειας τηλεοπτικού σήματος μέσω επίγειων, καλωδιακών ή δορυφορικών ζεύξεων απαιτεί πολύ υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, της τάξης των 20 Mb/s. Επιπλέον, στον ορίζοντα βρίσκεται η τρισδιάστατη τηλεόραση (3DTV) [1.18], [1.19]. Οι πρώτες τηλεοράσεις που επιτρέπουν τη τρισδιάστατη μετάδοση έγιναν διαθέσιμες στα καταστήματα στα μέσα του 2010 και καθώς παράγονται ήδη τρισδιάστατες ταινίες, οι τηλεοπτικοί φορείς ετοιμάζονται να ακολουθήσουν. Το BBC πραγματοποίησε την πρώτη στην ιστορία μετάδοση υψηλής ευκρίνειας τρισδιάστατου σήματος (3D HD) το 2008, και το 2010 στο Ηνωμένο Βασίλειο ο δορυφορικός πάροχος τηλεοπτικού σήματος Sky [1.20] ξεκίνησε τη μετάδοση του

πρώτου τρισδιάστατου καναλιού στην πλατφόρμα υψηλής ευκρίνειας που διαθέτει. Η διείσδυση της τρισδιάστατης τηλεόρασης στην αγορά φαίνεται αρκετά δυναμική, καθώς το BBC μετέδωσε τόσο τους Ολυμπιακούς Αγώνες του Λονδίνου (Αύγουστος 2012) όσο και τους αγώνες του τουρνουά τένις Wimbledon το καλοκαίρι του 2012, σε τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση. Επιπροσθέτως, πέραν της ποιότητας υψηλής ευκρίνειας (HD), είναι η ποιότητα “Super Hi-Vision” [1.21], η οποία παρουσιάστηκε πρώτη φορά ζωντανά το 2008 από το BBC σε συνδυασμό με το ιαπωνικό NHK [1.22] και προτυποποιήθηκε τον Αύγουστο του 2012 από την ITU. Είναι ένα σύστημα 33 εκατομμυρίων εικονοστοιχείων (pixel) (7680 x 4320), που προσφέρει 32 φορές την πυκνότητα πληροφορίας της HDTV και έχει ήδη διεισδύσει στην αγορά, καθώς οι πάροχοι NHK και BBC, μετέδωσαν του Ολυμπιακούς Αγώνες του Λονδίνου (Αύγουστος 2012) σε “Super Hi-Vision” ποιότητα. Το σύστημα αναμένεται να εισέλθει μαζικά στην αγορά έως το 2020 με προβλεπόμενο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης 65Mb/s, αναδεικνύοντας το FTTH ως τη μοναδική λύση που μπορεί να το υποστηρίξει.

1.3 Διείσδυση οπτικών δικτύων πρόσβασης παγκοσμίως

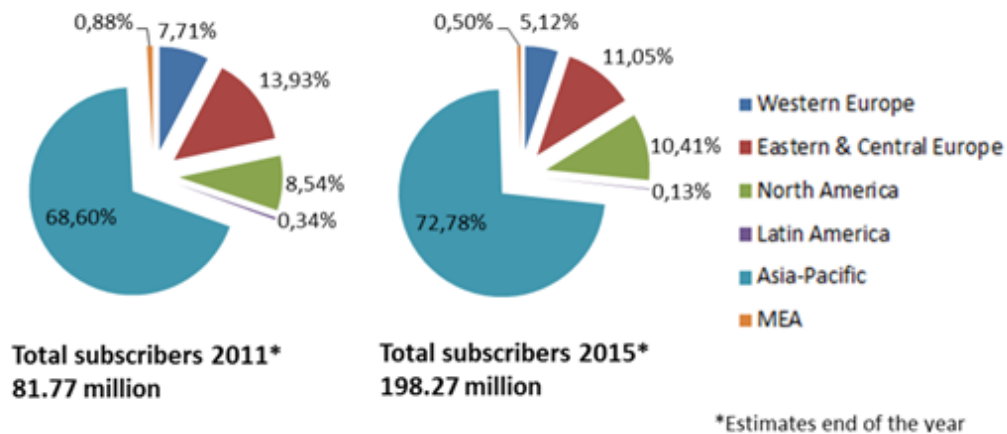
Σε αυτήν την ενότητα αναφέρονται οι πρόσφατες εξελίξεις στα Fiber-to-the-Home (FTTH) δίκτυα. Επίσης παρουσιάζονται προβλέψεις σχετικά με την παγκόσμια διείσδυση της ευρυζωνικότητας.

Η τρέχουσα κατάσταση και οι προβλέψεις της εγκατάστασης FTTH/FTTB στην Ευρώπη φαίνονται στην Εικόνα 3. Αυτή τη στιγμή, η κύρια δραστηριότητα σε FTTH δίκτυα παρατηρείται στη Σουηδία, τη Γαλλία, την Ολλανδία και τη Δανία. Η εικόνα παρουσιάζει, επίσης, μία πρόβλεψη για τη διείσδυση του FTTH/FTTB στην Ευρώπη. Φαίνεται ότι το FTTH θα παίξει σημαντικό ρόλο τα επόμενα χρόνια, παρόλο που ο βαθμός διείσδυσής του στην αγορά εξαρτάται και από εξωγενείς παράγοντες, που δεν σχετίζονται με την τεχνολογία, όπως την πρόοδο στη νομοθεσία και τους κανονισμούς, την προώθηση από την αγορά και τον ανταγωνισμό μεταξύ των κρατών [1.23].



Εικόνα 3: Συνδεδεμένα νοικοκυριά σε δίκτυα FTTH/FTTB στην Ευρώπη και πρόβλεψη για το μέλλον [1.24].

Τέλος, η Εικόνα 4 δείχνει πρόσφατα και μελλοντικά ποσοστά διείσδυσης του FTTx παγκοσμίως. Στο τέλος του 2011 οι συνολικοί χρήστες παγκοσμίως ήταν 81,77 εκατομμύρια, με τον αριθμό τους να αναμένεται να φτάσει τα 198,27 εκατομμύρια



Εικόνα 4: Πρόσφατα και μελλοντικά ποσοστά διείσδυσης του FTTx παγκοσμίως [1.25].

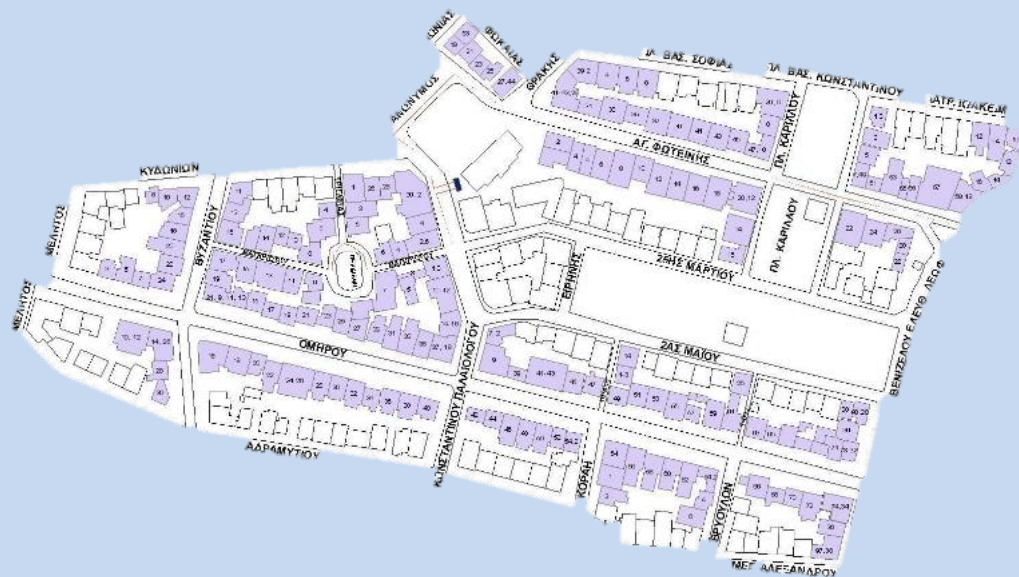
παγκοσμίως στο τέλος του 2015. Αυτή τη στιγμή, η κύρια δραστηριότητα σε FTTx δίκτυα παρατηρείται στη Βόρειο Αμερική (ΗΠΑ, Καναδά), στην Ευρώπη (Σουηδία, Γαλλία, Ολλανδία και Δανία) και στην Ασία (Ιαπωνία, Κίνα, Ν. Κορέα, Χονγκ Κονγκ,

Ταιβάν και προσφάτως Ινδία). Όσον αφορά την Ασία, η δραστηριότητα εστιάζεται σε συγκεκριμένες χώρες συγκεντρώνοντας την πλειοψηφία των παγκοσμίων συνδέσεων, 56 εκατομμύρια, η διείδυση ωστόσο εξακολουθεί να είναι σε χαμηλό επίπεδο συγκριτικά με το συνολικό πληθυσμό. Η Β. Αμερική δείχνει αυξανόμενη δυναμικότητα στην πρόβλεψη για το 2015, ενώ παρατηρείται μία κάμψη στη δυναμική στην Ευρώπη λόγω εξωγενών παραγόντων (π.χ. οικονομική κρίση).

FTTH στην Ελλάδα

Ο Όμιλος Forthnet ανακοίνωσε στις 10 Ιουλίου 2012 ότι ξεκινά άμεσα την υλοποίηση πιλοτικού δικτύου οπτικών ινών μέχρι το σπίτι του συνδρομητή. Στην πρώτη φάση, η οπτική ίνα θα εγγυάται ταχύτητα ευρυζωνικής πρόσβασης που μπορεί να φτάσει το 1Gb/s download και τα 100Mb/s upload.

Η οπτική ίνα που «μπαίνει» στο σπίτι, θα φτάσει σε δύο χιλιάδες σπίτια στη Νέα Σμύρνη, και στους συνδρομητές θα παρέχονται υπηρεσίες φωνής, γρήγορου ίντερνετ, τηλεόρασης, gaming, cloud και άλλες. Σημαντικός παράγοντας στην επιτυχία του έργου είναι η συνεργασία με τις τοπικές δημοτικές αρχές.

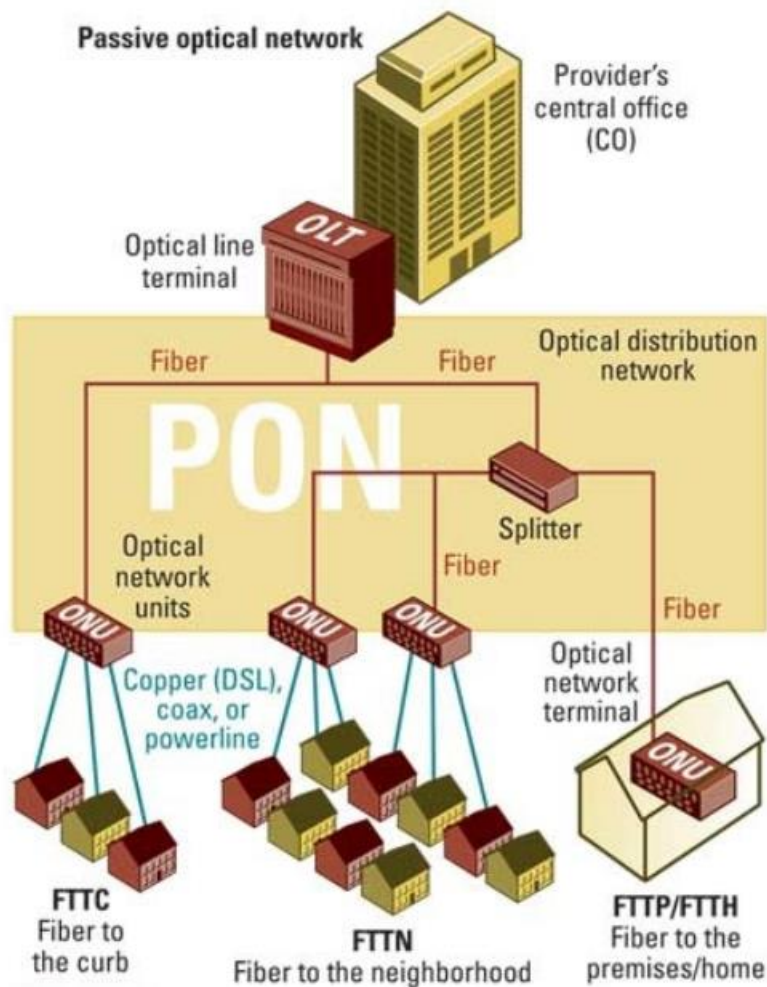


Δίκτυο FTTH στη Νέα Σμύρνη.

[Πηγή: Δελτίο τύπου Forthnet 12/7/2012]

1.4 Η οπτική ίνα σε ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης

Ο βασικός στόχος των δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς είναι να φτάσει η οπτική ίνα στον οικιακό χρήστη και να αντικαταστήσει τα υπάρχοντα καλώδια χαλκού. Επομένως, η αναβάθμιση του δικτύου θα περιοριστεί στο τμήμα που πηγαίνει από το κέντρο μεταγωγής (central office) στον οικιακό χρήστη. Σε ένα οπτικό δίκτυο πρόσβασης, το κέντρο μεταγωγής (CO) περιλαμβάνει ένα τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) που παρέχει τη διεπαφή του δικτύου (network interface) με μία ή περισσότερες μονάδες οπτικού δικτύου (ONU), όπως φαίνεται σε μία απλή σχεδίαση του συστήματος στην Εικόνα 5. Η αντικατάσταση των συνδέσεων σε ένα δίκτυο πρόσβασης από οπτικές ίνες, οδηγεί σε πολλές πιθανές τοπολογίες που αναπαριστώνται από το ακρωνύμιο FTTx.



Εικόνα 5: Διαφορετικοί τύποι FTTx.

Το 'x' μπορεί να υποδηλώνει το Curb, Node, Building, Premises ή οποιαδήποτε άλλη υλοποίηση του FTTX [1.26].

Η Fiber-to-the-X (FTTX) τεχνολογία έχει μελετηθεί αναλυτικά παγκοσμίως, καθώς μπορεί αποδεδειγμένα να εξαλείψει τη συμφόρηση στα δίκτυα πρόσβασης, επιτυγχάνοντας παροχή υψηλού εύρους ζώνης στους χρήστες και σύγκλιση των ασυρμάτων με τις ενσύρματες επικοινωνίες. Ανάλογα με το βαθμό προσέγγισης του συνδρομητή με την οπτική ίνα, οι ενσύρματες λύσεις που υπάρχουν χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες (Εικόνα 5):

Οπτική Ίνα στη γειτονιά- Fiber To The Neighbourhood (FTTN):

Η οπτική ίνα φτάνει μέχρι τη γειτονιά και εξυπηρετεί τους χρήστες της γύρω περιοχής μέσω συνεστραμμένων ζευγών καλωδίων ή ομοαξονικών καλωδίων. Η περίπτωση αυτή περιορίζει το μήκος του χαλκού μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα, επιτρέποντας ταχύτητες πρόσβασης μέχρι μερικές δεκάδες Mb/s, π.χ. χρησιμοποιώντας συστήματα VDSL. Η λύση αυτή έχει θεωρηθεί κατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού συνδρομητών, οι οποίοι είναι συγκεντρωμένοι σε μία μικρή περιοχή (π.χ. οικοδομικό τετράγωνο), και έχουν σχετικά μικρές απαιτήσεις ταχύτητας πρόσβασης.

Οπτική Ίνα στο πεζοδρόμιο- Fiber To The Curb (FTTC):

Σε αυτήν την περίπτωση, η οπτική ίνα φτάνει μέχρι το κράσπεδο του πεζοδρομίου δίπλα από τα σπίτια των συνδρομητών. Τα τελευταία δεκάδες μέτρα της ζεύξης μεταξύ κτιρίων και κατανεμητή καλύπτονται μέσω δικτύου χαλκού. Στους συνδρομητές του δικτύου παρέχεται ευρυζωνική κάλυψη με χρήση της τεχνολογίας ADSL 2+ και η μέγιστη ταχύτητα τις υπηρεσίας εξαρτάται από την απόσταση του συνδρομητή από τον κατανεμητή και την παλαιότητα των καλωδίων. Τυπικές τιμές είναι από 24 έως 50 Mb/s.

Οπτική Ίνα στο Κτίριο - Fiber To The Premises (FTTP)/ Οπτική Ίνα στο Σπίτι - Fiber To The Home (FTTH):

Σε αυτήν την τοπολογία, η οπτική ίνα φτάνει μέχρι και το κτίριο του χρήστη και ο ενεργός εξοπλισμός δικτύου τοποθετείται εσωτερικά μέσα στο κτίριο εξυπηρετώντας τους συνδρομητές του κτιρίου. Το μήκος του χαλκού είτε εξαλείφεται (FTTH), είτε περιορίζεται σε αυτό της δομημένης καλωδίωσης του κτιρίου (FTTP), επιτρέποντας

πρακτικά οποιαδήποτε ταχύτητα πρόσβασης. Με χρήση οπτό-ηλεκτρονικού εξοπλισμού, το σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό και ενώνεται με το εσωτερικό δίκτυο του σπιτιού, που μπορεί να είναι το τηλεφωνικό ή ακόμα και CAT5, CAT6 δομημένη καλωδίωση.

1.5 Μετρικές αξιολόγησης οπτικών δικτύων πρόσβασης

Σε αυτήν την ενότητα, προτού παρουσιαστούν οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές των οπτικών δικτύων πρόσβασης, παρατίθενται οι παράμετροι αξιολόγησης των αρχιτεκτονικών αυτών.

1.5.1 Βαθμός διαχωρισμού χρηστών

Ο βαθμός διαχωρισμού των χρηστών επηρεάζει το βαθμό διαμοίρασης του δικτυακού εξοπλισμού και συνεπώς έχει επίδραση στις κεφαλαιακές δαπάνες [1.27]. Όσο περισσότεροι χρήστες εξυπηρετούνται από το δίκτυο, τόσο λιγότερο αυξάνεται το κόστος όταν απαιτούνται επιπλέον στοιχεία (π.χ. ενισχυτές) στην υποδομή του δικτύου. Εάν επίσης μπορεί να καλυφθεί μεγαλύτερη απόσταση από το δίκτυο πρόσβασης, οι κεντρικές υποδομές του μπορούν να βρεθούν πιο κοντά στο δίκτυο κορμού, απλοποιώντας την ιεραρχία του δικτύου και εξοικονομώντας κόστος.

Αναλόγως της τεχνικής πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται, διαφορετικά υποσυστήματα του δικτύου διαμοιράζονται ανάμεσα στους χρήστες. Ενώ το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT), που βρίσκεται στις υποδομές του παρόχου, διαμοιράζεται πάντα ανάμεσα στους πελάτες, οι κόμβοι του δικτύου (network nodes) μπορούν να διατεθούν σε ένα μικρότερο υποσύνολο χρηστών, επιτυγχάνοντας επομένως υψηλότερη εξοικονόμηση κόστους. Επιπλέον, οι μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να επιτρέπουν την εξυπηρέτηση περισσότερων του ενός χρηστών, εξασφαλίζοντας ακόμη μεγαλύτερη εξοικονόμηση κόστους ανά χρήστη. Όσον αφορά το κόστος λειτουργίας (OpEx), που καθορίζεται από την κατανάλωση ισχύος και το κόστος λειτουργίας των στοιχείων του δικτύου που απαιτούν ηλεκτρική ισχύ, η επίδραση του βαθμού διαχωρισμού των χρηστών του

δικτύου είναι μειωμένη. Ωστόσο, και σε αυτήν την περίπτωση το κόστος λειτουργίας είναι μειωμένο σε πυκνά δίκτυα, λόγω του υψηλότερου βαθμού διαμοιρασμού των υποδομών του δικτύου.

1.5.2 Ισολογισμός απωλειών οπτικής ισχύος (loss budget)

Ο ισολογισμός απωλειών οπτικής ισχύος του δικτύου καθορίζεται από τις απώλειες που συμβαίνουν ανάμεσα στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) και στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), περιλαμβάνοντας τις ενδογενείς απώλειες της μεθόδου πολυπλεξίας που απαιτείται για να αυξηθεί η πυκνότητα των χρηστών (π.χ. τις απώλειες διαχωρισμού της οπτικής ισχύος ανάμεσα στους χρήστες, ή τις απώλειες εισόδου των πολυπλεκτών μήκους κύματος), επιπλέον απώλειες που αναμένονται κατά τη διάρκεια ζωής του δικτύου (π.χ. επανασύνδεση κομμένων ινών), και τέλος τις απώλειες που υφίσταται το οπτικό σήμα κατά τη διάδοσή του στην οπτική ίνα από το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) μέχρι τον τελικό χρήστη.

Ειδική περίπτωση αποτελούν τα δίκτυα αμφίδρομης μετάδοσης, καθώς σε αυτήν την περίπτωση, ο συνολικός ισολογισμός απωλειών καθορίζεται από την κατεύθυνση με τις περισσότερες απώλειες. Ειδικά η λήψη του αντιρρευματικού σήματος, μπορεί να δημιουργήσει αυστηρούς περιορισμούς, παρόλο που η λήψη του μπορεί να επωφεληθεί από τη χρήση οπτικών ενισχυτών σε σχέση με τη λήψη του συρρευματικού σήματος. Λόγω της υποχρεωτικής χρήσης στοιχείων χαμηλού κόστους στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), π.χ. χρήση ανακλαστικών διαμορφωτών, απαιτείται συγκεκριμένη ποιότητα στο σήμα εισόδου, έχοντας ως αποτέλεσμα έναν επιπλέον περιορισμό στο συνολικό ισολογισμό απωλειών οπτικής ισχύος του δικτύου [1.28].

1.5.3 Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων

Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων δεν εξαρτάται μόνο από τα υποσυστήματα του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT) και της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU), αλλά και από τις παραμορφώσεις που υφίσταται το σήμα κατά τη μετάδοσή του. Καθώς το φασματικό παράθυρο στις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών περιορίζεται από τις απώλειες της οπτικής ίνας και από τη δυνατότητα οπτικής ενίσχυσης σε συγκεκριμένο εύρος φάσματος, ένας συγκεκριμένος αριθμός μηκών κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αν ληφθεί υπόψη το τρίτο τηλεπικοινωνιακό παράθυρο, γύρω από τα 1550 nm, όπου οι απώλειες ισχύος είναι χαμηλές, περίπου 80 μήκη κύματος στη συμβατική (C - conventional) και στη μακρά (L – long) ζώνη μηκών κύματος είναι συμβατά με την απόκριση κέρδους των οπτικών ενισχυτών ίνας ερβίου (EDFA) [1.29], [1.30].

Για την παροχή των υπηρεσιών στο χρήστη, η τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται παίζει μεγάλο ρόλο στο ρυθμό δεδομένων που μπορεί να του διατεθεί. Παρόλο που προκύπτει ένας περιορισμός για το βαθμό διαχωρισμού των χρηστών του δικτύου, ένα κανάλι σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων μπορεί να ανατεθεί σε κάθε ένα από τους χρήστες σύμφωνα με τη βασική ιδέα των οπτικών δικτύων πρόσβασης [1.31].

Αντιθέτως, όταν ένα κανάλι ενός μήκους κύματος διαμοιράζεται σε ένα συγκεκριμένο αριθμό χρηστών, στην περίπτωση της πολυπλεξίας του σήματος στο πεδίο του χρόνου [1.32], η χρονοθυρίδα που διατίθεται σε κάθε ένα χρήστη μπορεί να έχει μικρή διάρκεια, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την πυκνότητα των χρηστών του δικτύου. Αυτό έχει ως συνέπεια, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε κάθε χρήστη να είναι ένα κλάσμα (αναλόγως του βαθμού πολυπλεξίας που εφαρμόζεται) του αρχικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, για τον οποίο είναι σχεδιασμένα τα υποσυστήματα του δικτύου. Συνεπώς ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του κάθε χρήστη έρχεται σε σύγκρουση με την πυκνότητα των χρηστών του δικτύου.

1.5.4 Ενεργειακή αποδοτικότητα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκπονήσει το σχέδιο 20-20-20, για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής [1.33]. Το σχέδιο έχει τρεις στόχους:

- Μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα κατά 20% έως το 2020, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990.
- Χρήση 20% της ενέργειας στην Ευρώπη από ανανεώσιμες πηγές.
- Μείωση χρήσης ενέργειας κατά 20%, μέσω ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών.

Στον τρίτο στόχο, ο οποίος έως τώρα υστερεί περισσότερο από τους άλλους δύο, ειδική προσοχή έχει δοθεί στις τηλεπικοινωνιακές δομές όπου παρατηρείται συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ισχύος, και κατ' επέκταση στα δίκτυα πρόσβασης που προσβλέπουν στη μαζική εγκατάστασή τους. Ένας βασικός στόχος κατά την εγκατάσταση των δικτύων είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρικών υποσυστημάτων της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU). Αυτά περιλαμβάνουν τα κυκλώματα οδήγησης των διαμορφωτών ή άλλων ενεργών στοιχείων, αλλά επίσης και υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται για ηλεκτρική επεξεργασία σήματος σε πραγματικό χρόνο, έλεγχο πρόσβασης μέσου (MAC) [1.34] και πολυπλεξία με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (OFDM) [1.35] – [1.40].

1.5.5 Εύρος διεύθυνσης

Καθώς τα δίκτυα πρόσβασης έχουν αυξήσει την έκτασή τους και ενδεχομένως να απορροφήσουν το κομμάτι των μητροπολιτικών δικτύων [1.41], ο όρος «δίκτυο πρόσβασης» είναι πλέον κοινός και για δίκτυα μεγάλης έκτασης. Η πυκνότητα των χρηστών, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις ισχύος του δικτύου, καθορίζουν το εύρος της γεωγραφικής κάλυψης ενός τερματικού οπτικών γραμμών (OLT). Τα βασικά GPON συστήματα υποστηρίζουν μέγιστο φυσικό εύρος έκτασης 20 χλμ για βαθμό διαχωρισμού χρηστών 32 ή 10 χλμ για βαθμό διαχωρισμού 64. Παρόλο που αυτό το εύρος φαίνεται αρκετό, υπάρχει ερευνητική δραστηριότητα για την αύξηση του εύρους διεύθυνσης του δικτύου είτε στα 50 χλμ (extended reach) ή ακόμη και τα 100 χλμ (long reach). Το εύρος του δικτύου πρακτικά μπορεί να αυξηθεί μέσω

περιορισμού των απωλειών ισχύος που συμβαίνουν κατά τη σύνδεση του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT) με τη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU). Στόχος είναι πλέον η συγκέντρωση πολλών κέντρων μεταγωγής (CO) σε μία τοποθεσία ή η επέκταση των δικτύων πρόσβασης σε περιοχές όπου μέχρι τώρα δεν υφίσταται κάποια τηλεπικοινωνιακή δομή [1.42]. Ως εκ τούτου, η αρχιτεκτονική του δικτύου μπορεί να απλοποιηθεί και να μειωθεί το κόστος λειτουργίας του.

1.5.6 Κόστος

Μία κρίσιμη παράμετρος των δικτύων FTTH είναι η δυνατότητα για ανάπτυξη ευρυζωνικών δικτύων με χαμηλό λειτουργικό κόστος και κόστος εγκατάστασης. Καθώς οι χρήστες-πελάτες ενός δικτύου δεν είναι πρόθυμοι να πληρώσουν περισσότερο για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, το κόστος ανά χρήστη μπορεί να αυξηθεί μόνο οριακά. Όπως προαναφέρθηκε, μία μεγάλη επένδυση πρέπει να γίνει στο φυσικό επίπεδο του δικτύου πρόσβασης, συνεπώς η ερευνητική δραστηριότητα εστιάζει στην ανάπτυξη χαμηλού κόστους αρχιτεκτονικών, τεχνικών μετάδοσης ή ακόμη και σε πρωτοποριακές μεθόδους σκαψίματος, καθώς αποτελεί μεγάλο μέρος του συνολικού κόστους εγκατάστασης [1.43]. Πολλές προτάσεις έχουν παρουσιαστεί ώστε πολλοί χρήστες να εξυπηρετούνται σε μεγάλες περιοχές με μία μόνο υποδομή [1.44].

1.6 Κατηγοριοποιήσεις οπτικών δικτύων πρόσβασης

Οι επόμενες ενότητες τονίζουν τις αρχιτεκτονικές των δικτύων πρόσβασης, τις τεχνικές πολυπλεξίας και τα πρότυπα, ενώ οι παραπομπές εμβαθύνουν σε βασικές έννοιες και την πρόσφατη βιβλιογραφία.

1.6.1 Ενεργητικά και παθητικά δίκτυα πρόσβασης

Με βάση τις δυνατότητες που παρέχει ο απομακρυσμένος κόμβος (remote node), ο οποίος είναι εγκατεστημένος ανάμεσα στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) και τη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), οι αρχιτεκτονικές των οπτικών δικτύων πρόσβασης

ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, αναλόγως της χρήσης παθητικών ή ενεργητικών στοιχείων:

Πλήρως παθητικά

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON) δεν απαιτούν χρήση ενεργητικών στοιχείων ανάμεσα στον πάροχο και τους χρήστες [1.45] – [1.47]. Μόνο παθητικά στοιχεία είναι εγκατεστημένα στους απομακρυσμένους κόμβους, όπως διαχωριστές οπτικής ισχύος ή μήκους κύματος (AWG). Η μετάδοση δεδομένων και ο έλεγχός τους πραγματοποιείται διαφανώς στον απομακρυσμένο κόμβο. Με αυτόν τον τρόπο, το κόστος λόγω της συντήρησης των ενεργών συσκευών διατηρείται χαμηλό, καθώς αυτές βρίσκονται είτε στα κέντρα μεταγωγής (CO) του παρόχου ή στις εγκαταστάσεις του χρήστη.

Ενεργητικά

Τα ενεργητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης (AON) παρουσιάζουν επιπλέον λειτουργικότητες, όπως οπτική ενίσχυση, δρομολόγηση μήκους κύματος [1.48] – [1.50], ηλεκτρο-οπτική αναγέννηση και διακόπτες για αύξηση της έκτασής τους (reach extenders) στον ενεργό κόμβο, στον οποίο τα σήματα διαχωρίζονται για να διανεμηθούν στους απομακρυσμένους κόμβους (RN). Αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα και συνεπώς το κόστος του συστήματος, επειδή ο ενεργός κόμβος απαιτεί ηλεκτρική ισχύ και εγκατάσταση των στοιχείων του. Επιπλέον, εισάγεται ένας επιπρόσθετος παράγοντας ενδεχόμενης αστοχίας του συστήματος λόγω των ενεργών στοιχείων που χρησιμοποιούνται.

Ήμι-παθητικά

Ένα τρίτο είδος δικτύων πρόσβασης βρίσκεται ανάμεσα στα παθητικά και τα ενεργητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης. Οι εγκαταστάσεις οπτικών ινών βασίζονται κατά κύριο λόγο σε παθητικά στοιχεία και επιπλέον στους απομακρυσμένους κόμβους συμπεριλαμβάνονται ενεργά οπτικά στοιχεία που απαιτούν παροχή ηλεκτρικής ισχύος, όπως ενισχυτές [1.51] – [1.54]. Τα δίκτυα αυτά επίσης μπορούν

να ονομαστούν παθητικά οπτικά δίκτυα (PON), λόγω της απουσίας υψηλότερου επιπέδου λειτουργικότητας στους τοπικούς κόμβους του δικτύου.

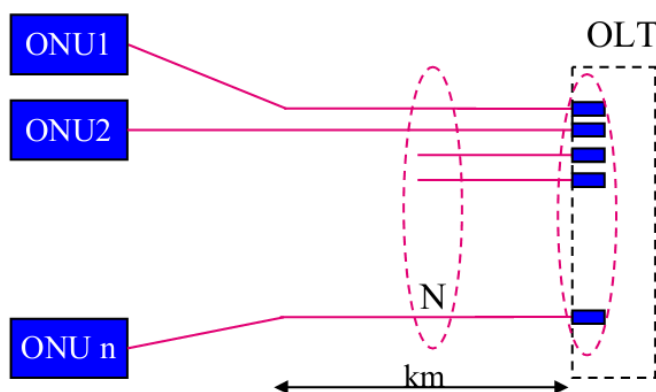
Γενικά, οι δαπάνες κεφαλαίου και λειτουργίας (Capex / Opex), που μπορούν να ληφθούν υπόψη ως ο συντελεστής κέρδους μίας αρχιτεκτονικής δικτύου από τη σκοπιά του παρόχου, είναι χαμηλότερες στην περίπτωση των πραγματικά παθητικών PON σε σύγκριση με τα AON ή τα PON που συμπεριλαμβάνουν στοιχεία που απαιτούν ηλεκτρική ισχύ στο οπτικό δίκτυο διανομής (ODN) [1.55].

1.6.2 Συνδέσεις σημείου-προς-σημείο και σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των οπτικών δικτύων πρόσβασης αναλόγως της τοπολογίας τους.

Σύνδεση σημείου-προς-σημείο (Point-to-Point)

Σε αντιστοιχία με τα δίκτυα πλέγματος που εντοπίζονται στα δίκτυα κορμού, οι συνδέσεις σημείου-προς-σημείο (point-to-point) στα δίκτυα πρόσβασης απαιτούν σύνδεση αποκλειστικής ίνας ανάμεσα στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) και στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) (Εικόνα 6). Αυτό αντιστοιχεί στην ακραία περίπτωση όπου οι υποδομές του δικτύου δεν μοιράζονται καθόλου στους χρήστες, ούτε στο κέντρο μεταγωγής (CO), ούτε στην υποδομή των οπτικών ινών.

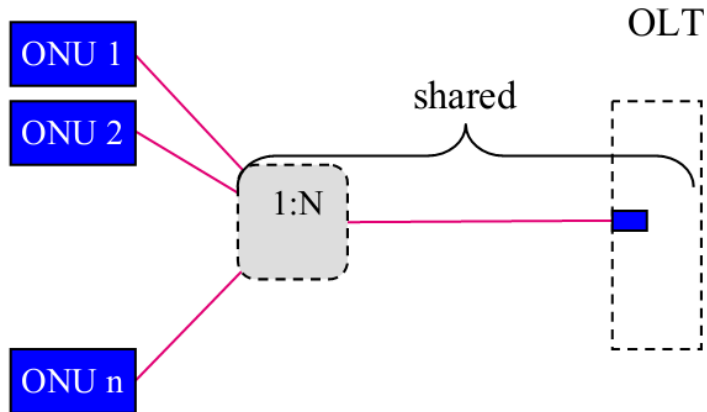


Εικόνα 6: Τοπολογία σημείου-προς-σημείο.

Αυτή η αποκλειστική σύνδεση, η οποία χρησιμοποιεί ένα ή δύο μήκη κύματος για ήμι- ή πλήρως- αμφίδρομη μετάδοση δεδομένων στον τελικό χρήστη, επιτρέπει υψηλές χωρητικότητες μετάδοσης με απλούς πομπούς και δέκτες, όπως είναι τα οπτικά συστήματα μετάδοσης διαμόρφωσης πλάτους με απευθείας λήψη (intensity modulation / direct detection - IM/DD). Όμως, πρακτικά είναι μία ακριβή λύση όσον αφορά τις απαιτούμενες οπτικές ίνες και τον εξοπλισμό, καθώς έχει αποδειχθεί ότι η σύνδεση σημείου-προς-σημείο έχει υψηλότερο κόστος εγκατάστασης απ' ό, τι μία αρχιτεκτονική σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία (PTMP), για δεδομένο μήκος οπτικής ίνας και αριθμό απομακρυσμένων κόμβων (RN) [1.56]. Καθώς αυτές οι λύσεις δεν θεωρούνται αποτελεσματικές ως προς το κόστος τους στα δίκτυα πρόσβασης, αυτός ο τύπος τοπολογίας δεν αναλύεται περαιτέρω στα πλαίσια αυτής της διατριβής.

Σύνδεση σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία (Point-to-Multi-Point)

Μία απλή λύση για να ξεπεραστεί το υψηλό κόστος των συνδέσεων σημείου-προς-σημείο, είναι ο διαμοιρασμός του δικτύου οπτικών ινών σε υψηλότερο αριθμό χρηστών (Εικόνα 7). Οι εγκατάσταση οπτικών ινών χρησιμοποιείται με αυτόν τον τρόπο για τη σύνδεση πολλών μονάδων οπτικού δικτύου (ONU) προς ένα τερματικό οπτικών γραμμών (OLT), διαμοιράζοντας το σήμα σε ένα σύνολο χρηστών αντί μόλις ενός [1.32], [1.57]. Το δίκτυο πρόσβασης αυτής της δομής μπορεί να είναι είτε ενεργητικό, είτε παθητικό. Οι υποδομές του δικτύου διαμοιράζονται στους χρήστες μέσω τεχνικών πολυπλεξίας. Όσον αφορά το απαιτούμενο κόστος, σημειώνεται ότι η εξοικονόμηση κόστους που επιτυγχάνεται γίνεται μεγαλύτερη όταν το μήκος ή/και ο αριθμός των απομακρυσμένων κόμβων (RN) αυξάνεται.



Εικόνα 7: Τοπολογία σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία.

Επίσης, τα οπτικά δίκτυα τοπολογίας σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία μπορεί να συνδεθούν με σημεία ασύρματης πρόσβασης, ώστε οι ευρυζωνικές υπηρεσίες να μπορούν να παραδοθούν στο χρήστη ανεξαρτήτως της θέσης του. Τεχνικές radio-over-fiber μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτραπεί η ομαλή μετάβαση από το οπτικό στο ασύρματο πεδίο. Οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης ελέγχου και διαχείρισης του ασύρματου συστήματος στο κέντρο μεταγωγής (CO) και τη διαφανή μεταφορά ραδιο-σημάτων μέσω οπτικής ίνας.

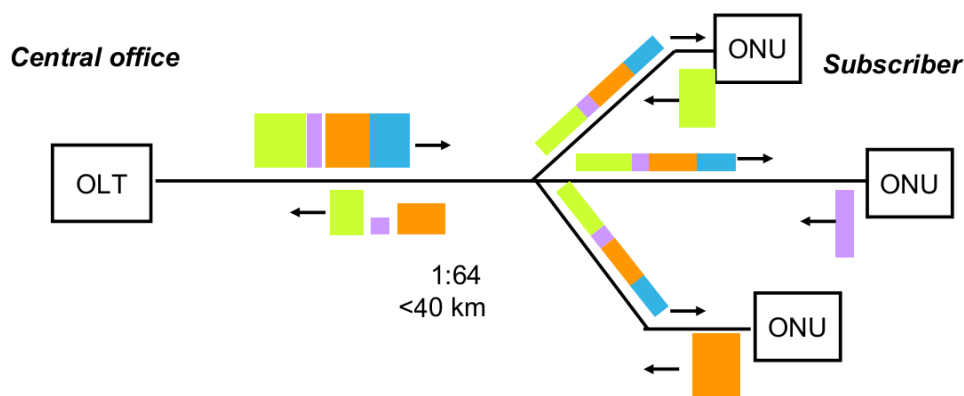
1.6.3 Τεχνικές πολυπλεξίας

Τεχνικές πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου ή του μήκους κύματος χρησιμοποιούνται στα οπτικά δίκτυα πρόσβασης, ώστε να επιτευχθεί σύνδεση σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία στο δίκτυο, ανεξαρτήτως αν το δίκτυο είναι ενεργητικό ή όχι.

Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM-PON)

Σε μία σχεδίαση πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (TDM) κάθε χρήστης αποκτάει μία χρονοθυρίδα, η οποία αντιστοιχεί στη μετάδοση δεδομένων του (Εικόνα 8). Η κατανομή των χρονοθυρίδων στους χρήστες ποικίλλει με το χρόνο, ενσωματώνοντας

μηχανισμό δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης (dynamic bandwidth allocation) ανάμεσα στους χρήστες [1.58]. Επίσης, μέσω διαχείρισης από το επίπεδο MAC του δικτύου, αποφεύγονται οι παρεμβολές ανάμεσα στα κανάλια διαφορετικών χρηστών που συμβαίνουν λόγω των διαφορετικών αποστάσεων των χρηστών από το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT).



Εικόνα 8: Τεχνική πολυπλεξίας TDM.

Παρόλο που αυτή η τεχνική οδηγεί σε μείωση του διαθέσιμου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του κάθε χρήστη, οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν από τους οπτικούς πομπούς διασφαλίζουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε κάθε χρήστη υψηλότερους από αυτούς που παρέχουν τα συμβατικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα (π.χ. VDSL), ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν το βαθμό διείσδυσης του δικτύου.

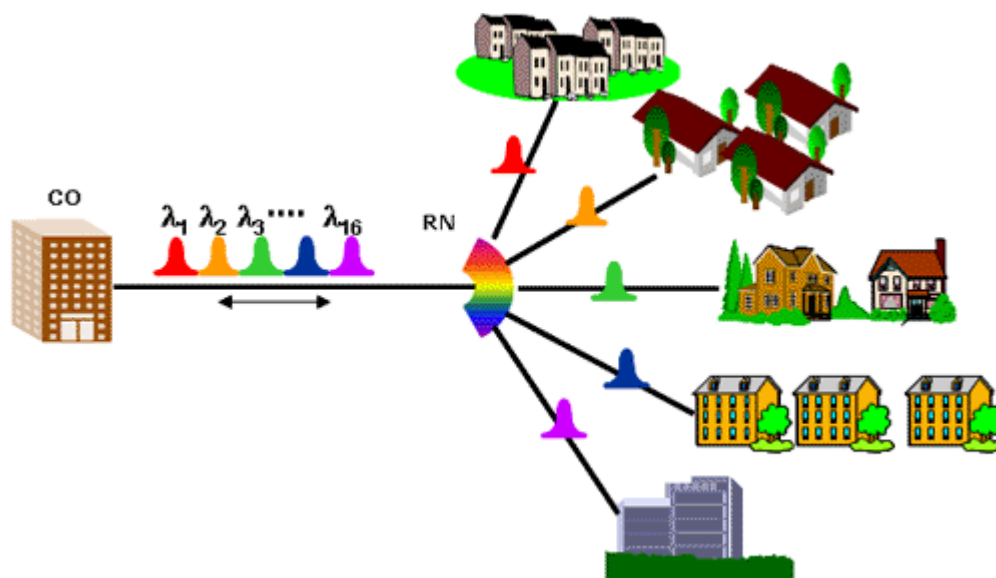
Τυπικοί λόγοι διαχωρισμού του σήματος είναι της τάξεως 1:32, ωστόσο πολύ υψηλότεροι, έως 1:4000 έχουν αναφερθεί στην επιστημονική βιβλιογραφία [1.59] – [1.61]. Παρόλο που αυτός ο λόγος μπορεί να είναι πρακτικά άχρηστος, λόγω του χαμηλού διαθέσιμου εύρους ζώνης προς τον κάθε χρήστη, τέτοιες απώλειες διαχωρισμού μπορούν να συμβούν όταν επεκτείνεται η εξάπλωση του δικτύου. Η ιδέα σε αυτήν την περίπτωση είναι η τοποθέτηση του διαχωριστή όσο πιο κοντά γίνεται σε ένα σύνολο χρηστών που συνδέονται με αυτόν, με ίνες μήκους έως 10 χλμ, ενώ η ίνα κορμού μπορεί να εκτείνεται έως τα 100 χλμ. Η μεγιστοποίηση του μήκους της διαμοιραζόμενης οπτικής ίνας οδηγεί σε υψηλότερο βαθμό διαμοιρασμού του

εξοπλισμού και επομένως σε υψηλότερη αποτελεσματικότητα ως προς το κόστος. Λόγω φαινομένων οπισθοσκέδασης (backscattering) στην οπτική ίνα, η εγκατάσταση μερικές φορές αποτελείται από δύο ίνες, μία για συρρευματική και μία για αντιρρευματική μετάδοση, ιδιαίτερα στην περίπτωση που επιδιώκονται μεγαλύτερα μήκη ινών και μικρότερες απώλειες στο δίκτυο. Ωστόσο, για εγκατάσταση ινών σε περιοχή που δεν υπάρχει προηγουμένως κάποια υποδομή, το κόστος της επιπλέον ίνας είναι αμελητέο καθώς συγκρίνεται με το κόστος σκαψίματος για την τοποθέτηση των ινών.

Διαφορετικά πρότυπα, όπως το Ethernet PON (EPON) και το Gigabit PON (GPON), δημιουργήθηκαν για να ορίσουν μία βέλτιστη TDM δομή για τα δίκτυα πρόσβασης. Με τη σημερινή εξέλιξη στην έρευνα, δεν είναι ξεκάθαρο αν η TDM δομή θα υιοθετηθεί από τα πρότυπα των οπτικών δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς.

Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM-PON)

Μία άλλη προσέγγιση για την αύξηση του βαθμού διαμοιρασμού της υποδομής του δικτύου είναι η πολυπλεξία στο πεδίο του μήκους κύματος [1.31], [1.57], [1.63], [1.64]. Ο οπτικός διαχωριστής ισχύος των TDM-PON αντικαθίσταται σε αυτήν την περίπτωση από έναν WDM πολυπλέκτη (Εικόνα 9). Παράλληλα με τις μειωμένες οπτικές απώλειες του σταδίου πολυπλεξίας, το WDM-PON βελτιώνει τη φασματική αξιοποίηση του δικτύου πρόσβασης, καθώς εκμεταλλεύεται το υψηλό εύρος ζώνης των οπτικών ινών. Αντί να στέλνεται ένα μήκος κύματος στους χρήστες που είναι συνδεδεμένοι με το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT), το διαθέσιμο εύρος ζώνης μετάδοσης της οπτικής ίνας συμπληρώνεται με σήματα δεδομένων.



Εικόνα 9: Τεχνική πολυπλεξίας WDM.

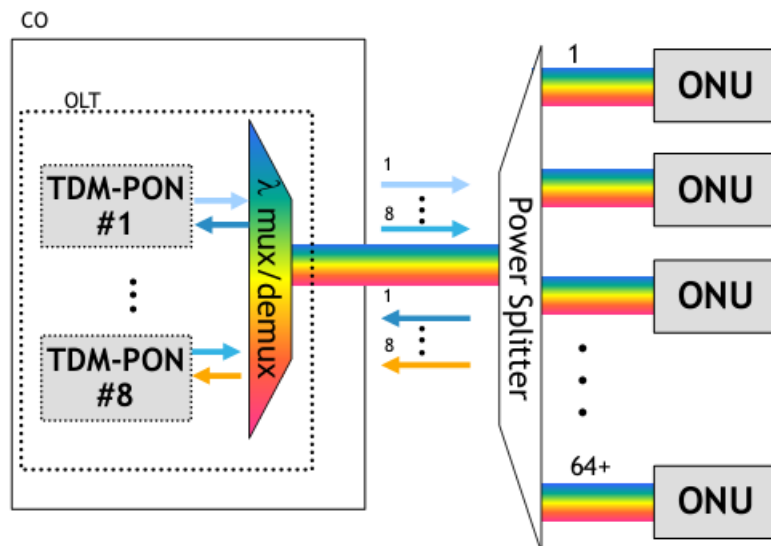
Παρόλο που αυτή η διανομή των μηκών κύματος μπορεί να μην είναι συμβατή με ήδη υπάρχοντα πρότυπα, όπως η μετάδοση αναλογικού ενσύρματου βίντεο, λόγω της χαμηλής εμπορικής διείσδυσης αυτών των προτύπων, δεν προβλέπεται να δημιουργηθεί ισχυρό πρόβλημα στην ανάπτυξη WDM-PON στο μέλλον. Επίσης, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μπορεί να φτάσει έως τα 10 Gb/s, χωρίς τη βοήθεια του MAC επιπέδου του δικτύου, λόγω της αποκλειστικής ανάθεσης ενός καναλιού μήκους κύματος σε κάθε χρήση.

Όσον αφορά την πυκνότητα των χρηστών, μία τυπική τιμή είναι 40 για το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας, ενώ επίσης 3 μπάντες μηκών κύματος (S-, C-, και L-) μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά διατηρώντας χαμηλές οπτικές απώλειες στην ίνα διανομής. Ο βαθμός του διαχωρισμού του δικτύου μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω σε UDWDM, μειώνοντας ωστόσο το διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά χρήστη [1.65], [1.66]. Η απαίτηση για διαφάνεια στο μήκος κύματος στις μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) που εμπεριέχουν ανακλαστικούς διαμορφωτές μπορεί να περιορίσει περαιτέρω το φασματικό παράθυρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, λόγω της φασματικής απόκρισης κέρδους των στοιχείων χαμηλού κόστους που χρησιμοποιούνται στις μονάδες οπτικού δικτύου (ONU). Επιπλέον, η διακριτική ικανότητα των εμπορικών WDM πολυπλεκτών είναι περιορισμένη, δυσχεραίνοντας την ιδανική δομή καναλιών

μηκών κύματος ανά μπάντα μηκών κύματος. Ένας τυπικός διαχωρισμός μηκών κύματος είναι τα 100 GHz, αλλά αυτό αναμένεται να μειωθεί, καθώς αποστάσεις καναλιών έως 1 GHz έχουν παρουσιαστεί ερευνητικά [1.67], [1.68]. Ως συνέπεια, σε αντίθεση με τα TDM-PON, θα απαιτούνται ισχυρότεροι οπτικοί ενισχυτές εντός του οπτικού δικτύου διανομής (ODN), που με τη σειρά τους θα απαιτούν παροχή ηλεκτρικής ισχύος, ώστε να καταστεί εφικτή η μετάδοση ενός μεγαλύτερου αριθμού καναλιών δεδομένων.

Υβριδική πολυπλεξία WDM/TDM

Μία υβριδική αρχιτεκτονική PON μπορεί να μεγιστοποιήσει την πυκνότητα των χρηστών ενσωματώνοντας WDM και TDM τεχνικές [1.45], [1.47], [1.52], [1.53], [1.57], [1.60]. Ένα σύνολο μηκών κύματος οδηγείται σε μία κοινή ίνα κορμού, συνήθως μεγάλου μήκους, και στη συνέχεια ένας WDM αποπολυπλέκτης μοιράζει κάθε κανάλι δεδομένων σε ένα σύνολο TDM δέντρων, το καθένα εκ των οποίων περιέχει μία ίνα τροφοδότησης, έναν διαχωριστή ισχύος και μία μικρού μήκους ίνα που καταλήγει στο χρήστη (Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Υβριδική αρχιτεκτονική WDM/TDM.

Με αυτόν τον τρόπο, οι βαθμοί πολυπλεξίας των WDM και TDM τεχνικών πολλαπλασιάζονται και ένας πολύ υψηλός αριθμός πελατών μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον πάροχο. Ένα υβριδικό PON μπορεί να φανεί ως μία υπέρθεση TDM-PON, τα οποία μοιράζονται το ίδιο κομμάτι του κορμού μέσω μίας κοινής οπτικής ίνας.

Ο ισολογισμός απωλειών των υβριδικών PON ξεπερνάει τις αντίστοιχες των TDM-PON, καθώς επιτυγχάνεται ταυτόχρονα η συνένωση μητροπολιτικών δικτύων και δικτύων πρόσβασης. Λόγω των απωλειών που συμβαίνουν μακριά από το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT), μέσω της τοποθέτησης διαχωριστή ισχύος κοντά στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), προβλήματα είναι πιθανό να προκύψουν λόγω της οπισθοσκέδασης Rayleigh στις ίνες τροφοδότησης (feeder fiber), όταν το ίδιο μήκος κύματος χρησιμοποιείται για συρρευματική και αντιρρευματική μετάδοση. Το παρεχόμενο εύρος ζώνης των υβριδικών PON ισούται με αυτό των TDM-PON, απαιτώντας ωστόσο πιο σύνθετες δομές ηλεκτρονικών.

Το σημείο σύνδεσης μεταξύ του τμήματος WDM και TDM συχνά χρησιμοποιείται για ενσωμάτωση ευελιξίας του δικτύου ή για λόγους ενίσχυσης. Ενώ σε δίκτυα που περιέχουν εξοπλισμό που απαιτεί παροχή ηλεκτρικής ισχύος, αυτοί οι απομακρυσμένοι κόμβοι (remote nodes) εμπεριέχουν δρομολογητές [1.43], [1.49] ή διαχειριστές πρωτοκόλλων [1.50], άλλες προσεγγίσεις, που περιλαμβάνουν ενίσχυση υποβοηθούμενη από απομακρυσμένη πηγή λέιζερ έχουν παρουσιαστεί [1.45], [1.47].

Σύνοψη

Στον Πίνακα 2 συνοψίζονται τα τυπικά χαρακτηριστικά των τριών τεχνικών πολυπλεξίας που προαναφέρθηκαν, αναδεικνύοντας τα θετικά και τα αρνητικά τους [1.69]. Όσον αφορά τα WDM-PON στα οποία θα εστιάσουν τα δύο επόμενα κεφάλαια, παρατηρείται ότι μπορούν να επιτύχουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης, ισολογισμό απωλειών οπτικής ισχύος, βαθμό διαχωρισμού και εύρος διείσδυσης, χωρίς να αποφεύγουν ωστόσο, το υψηλότερο κόστος συγκριτικά με τις άλλες τεχνικές.

Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά τεχνικών πολυπλεξίας σε οπτικά δίκτυα πρόσβασης.

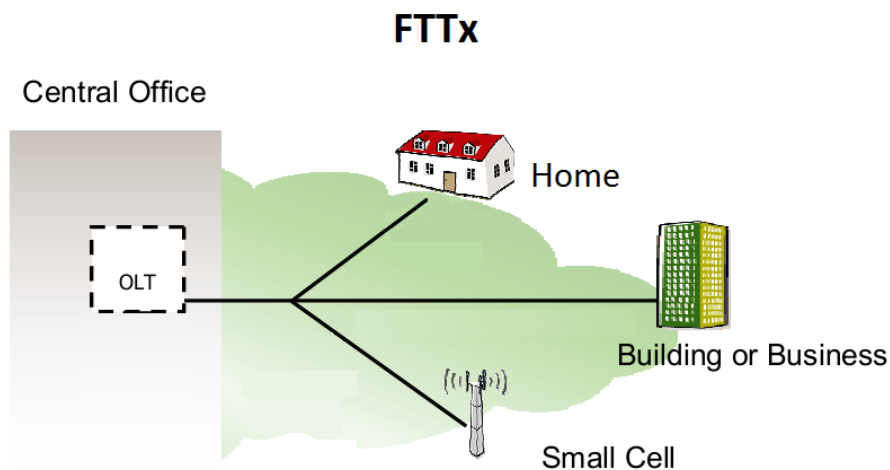
	TDM-PON	WDM-PON	Hybrid WDM/TDM PON
Ρυθμός μετάδοσης (συρρευματικά/αντιρρευματικά)	40/10 G	N x (1/1G)	4 x (10/2,5G)
Ισολογισμός απωλειών οπτικής ισχύος	31dB	29-43 dB	37,5 dB
Βαθμός διαχωρισμού	64	80	64
Μέγιστη διεύθυνση	40 χλμ	20-60 χλμ	40 χλμ
Κόστος	Μικρό / μεγάλο	Μεσαίο / μεγάλο	Μικρό / μεσαίο
Απαιτούμενη ισχύς (OLT/ONU)	Χαμηλή / μεσαία	Υψηλή / χαμηλή	Χαμηλή / μεσαία

1.6.4 Κινητικότητα χρηστών στα οπτικά δίκτυα πρόσβασης

Μία ασύρματη σύνδεση προς το χρήστη μπορεί να υλοποιηθεί στους τελικούς κόμβους του PON, ώστε να επιτραπεί η κινητικότητα του χρήστη (Εικόνα 11). Σε αυτήν την περίπτωση, οι ενεργοί τελικοί κόμβοι αναφέρονται ως σταθμοί βάσης (BS) και παρέχουν τη λειτουργικότητα ανάμεσα στο οπτικό και το RF πεδίο. Τα κινητά δίκτυα σήμερα διακρίνονται ανάλογα με την εμβέλειά τους και το μέγεθος της κυψέλης. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερο το διαθέσιμο εύρος ζώνης για συγκεκριμένη ισχύ μετάδοσης, τόσο μικρότερο είναι το κελί, το οποίο πολλές φορές δεν αποτελεί θεμελιώδη περιορισμό, αλλά αποτέλεσμα της νομοθεσίας. Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η ζήτηση υψηλού εύρους ζώνης στα κινητά δίκτυα οδηγεί σε πυκνά κατανομημένους σταθμούς βάσης και κατ' επέκταση υψηλό κόστος, ώστε να επιτευχθεί πλήρη ευρυζωνική κάλυψη σε μία συγκεκριμένη περιοχή.

Οι τεχνικές RoF επιτρέπουν την κεντρική επεξεργασία του RF σήματος στο κέντρο μεταγωγής (CO), το οποίο συνεπάγεται ότι τα κόστη μπορούν να διαμοιραστούν στους χρήστες του δικτύου. Επιπροσθέτως, απλοποιεί δραστικά τα ασύρματα σημεία πρόσβασης (RAP), έχοντας ως αποτέλεσμα χαμηλότερους κόστους ασύρματο δίκτυο διανομής. Σε αυτήν την περίπτωση, τα ασύρματα σημεία πρόσβασης (RAP) απλώς μεταφέρουν τα δεδομένα από το οπτικό στο RF πεδίο, και από αυτήν τη σκοπιά ο χρήστης του ασύρματου δικτύου λαμβάνει τα δεδομένα του κατευθείαν από την οπτική ίνα. Σε γενικές γραμμές, η ίνα φτάνει έως το ασύρματο δίκτυο, επομένως το

ασύρματο δίκτυο ("wireless network") μπορεί να αντικαταστήσει το "x" στο FTTx, παράγοντας το fiber-to-the-wireless network (FTTWN).



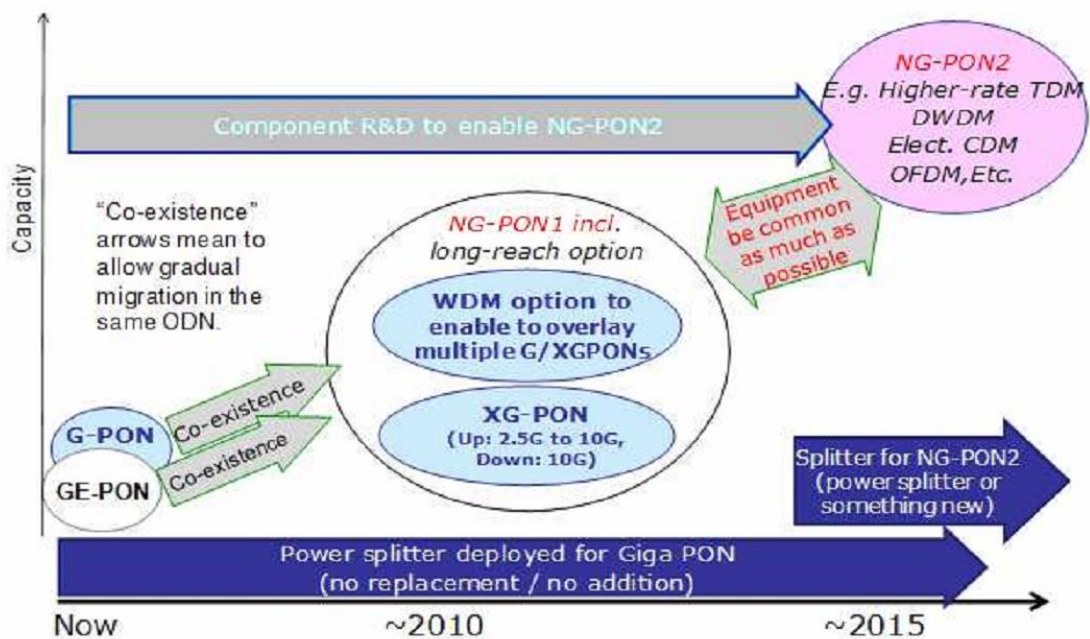
Εικόνα 11: Ασύρματη σύνδεση σε FTTx δίκτυο.

Η υποστήριξη υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και κινητικότητας των χρηστών του δικτύου χωρίς απώλειες κατά τη μετάδοση δεδομένων αποτελούν σημαντικά ζητήματα στα FTTWN δίκτυα. Οι οπτο-ηλεκτρονικές μετατροπές σήματος προκαλούν καθυστερήσεις και αποτελούν τον μεγαλύτερο παράγοντα συμφόρησης του δικτύου. Λύσεις εστιάζουν στη δυναμική ανάθεση χωρητικότητας στους χρήστες, που διατηρούν τη συνδεσιμότητα του χρήστη και επιτρέπουν υψηλής ταχύτητας κίνησή του εντός του δικτύου.

Συμπερασματικά, η τοπολογία PON και η τροφοδοσία ασυρμάτου δικτύου χρησιμοποιώντας RoF τεχνικές έχουν ως κοινό ότι οι λειτουργίες παρέχονται από το κέντρο μεταγωγής (CO). Χρησιμοποιώντας RoF σε PON αρχιτεκτονικές, η οπτική διαφάνεια επεκτείνεται στο ασύρματο πεδίο μέσω του FTTWN.

1.6.5 Πρότυπα οπτικών δικτύων πρόσβασης

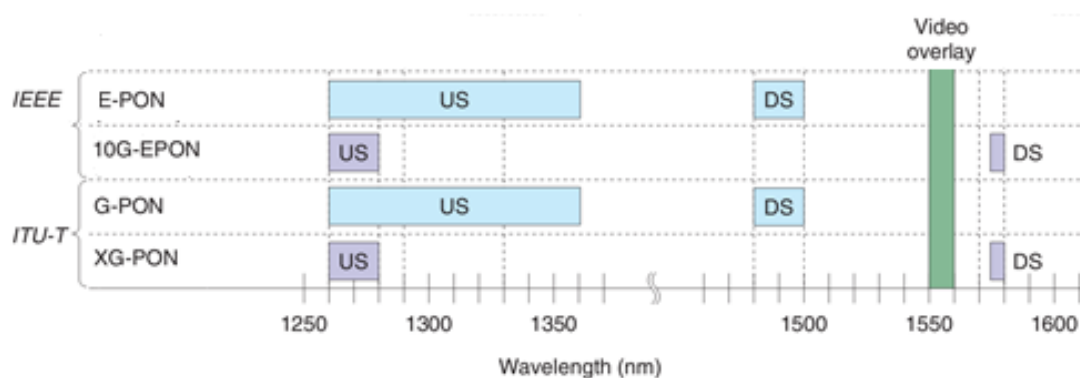
Όσον αφορά τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης, δύο βασικά πρότυπα δικτύων πρόσβασης έχουν αναδειχθεί από την εξέλιξή τους. Το EPON (IEEE 802.3ah) [1.70] που προέρχεται από το πεδίο του Ethernet και παρέχει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 1 Gb/s, και το GPON (ITU-T G.984) [1.71] που παρέχει ευρύτερη λειτουργικότητα όσον αφορά το επίπεδο MAC αλλά και υψηλότερα επίπεδα του δικτύου, ενώ παρέχει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 2,5 και 1,25 Gb/s για συρρευματική και αντιρρευματική μετάδοση αντίστοιχα.



Εικόνα 12: Εξέλιξη προτύπων δικτύων πρόσβασης.

Η αυξανόμενη ζήτηση ευρυζωνικών υπηρεσιών, χωρίς να οδηγεί σε απώλεια του διαμοιρασμού των οπτικών ινών στους χρήστες - ο οποίος αποτελεί περιοριστικό παράγοντα σχετικά με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων - οδήγησε στους διαδόχους 10G-EPON (IEEE 802.3av) [1.72] και XGPON [1.73], πρότυπα που προβλέπεται να παρέχουν ρυθμό μετάδοσης στο χρήστη της τάξεως των 10 Gb/s (Εικόνα 12). Και τα δύο πρότυπα αποσκοπούν σε συμμετρικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ενώ το

πρότυπο 10G-EPON επικυρώθηκε τον Σεπτέμβριο του 2009, το πρότυπο XGPON βρίσκεται σε εξέλιξη και δεν έχει εγκριθεί ακόμα. Και τα δύο πρότυπα κατοχυρώνουν διαφορετική περιοχή μηκών κύματος (παράθυρο των 1577 nm για συρρευματική μετάδοση και το παράθυρο των 1270 nm για αντιρρευματική μετάδοση) από τα πρότυπα EPON και GPON (παράθυρο των 1490 nm για συρρευματική μετάδοση, και το παράθυρο των 1310 nm για αντιρρευματική μετάδοση) που προαναφέρθηκαν, επιτρέποντας την συνύπαρξη τους στην ίδια οπτική ίνα, ενώ διασφαλίζουν και συμβατότητα με παράλληλη μετάδοση βίντεο στην περιοχή των 1550 nm (Εικόνα 13).



Εικόνα 13: Κατανομή μηκών κύματος στα πρότυπα (DS: downstream, US: upstream).

Ο Πίνακας 3 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των προτύπων των δικτύων πρόσβασης που προαναφέρθηκαν. Αναφέρεται ο ρυθμός μετάδοσής τους, ο βαθμός διαχωρισμού, οι κατανεμημένες περιοχές μηκών κύματος, η μέγιστη απόσταση που τα σήματα μπορούν να φτάσουν και τέλος ο αποδεκτός ισολογισμός απωλειών ισχύος.

Πίνακας 3: Βασικά χαρακτηριστικά των προτύπων των οπτικών δικτύων πρόσβασης.

	EPON	GPON	10G EPON	10G GPON (XG-PON)
Πρότυπο	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x	IEEE 802.3av	ITU-T Q2/SG15, G.987 series
Ρυθμός μετάδοσης	1G DS/1G US	2,5G DS/ 1,25G US	10G DS/10G US	10G DS/10G US
Βαθμός διαχωρισμού	1:32	1:16/32	1:16/32	≥1:64
Εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC)	RS(255, 239), επιλεκτικά	RS(255,239), υποχρεωτικά	RS(255,223), υποχρεωτικά	-
Ανάθεση μηκών κύματος	1480-1500nm DS/1260- 1360nm US	1480-1500nm DS/1260- 1360nm US	1575-1580nm DS/1260- 1280nm US	1575-1580nm DS/1260- 1280nm US
Μέγιστη απόσταση	20χλμ	20χλμ	20χλμ	≥20χλμ
Ισολογισμός απωλειών ισχύος	PX 10/20	Class B+, Class C, Class C++	PR 10/20/30	Class B+, Class C+

1.7 Κίνητρο και στόχοι της διατριβής

Από την ανάλυση των παραγράφων που προηγήθηκαν, αναδύεται η αδυναμία των σημερινών δικτύων πρόσβασης να ανταποκριθούν στις μελλοντικές ανάγκες εύρους ζώνης.

Κατά συνέπεια, οι ερευνητικές προσπάθειες κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής ήταν στην κατεύθυνση της ανάπτυξης τεχνικών και υποσυστημάτων που αντιμετωπίζουν την παροχή ανεπαρκούς εύρους ζώνης στο χρήστη, η οποία δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με τα σημερινά συστήματα και τεχνολογίες.

Η συνεισφορά της διατριβής συνίσταται στη μελέτη, ανάπτυξη και πειραματική υλοποίηση πρωτότυπων λύσεων κατάλληλων για εφαρμογή στα φωτονικά δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς. Οι υλοποιήσεις συντείνουν στην αύξηση του βαθμού διαφάνειας των δικτύων πρόσβασης και είναι βελτιστοποιημένες όσον αφορά την

επίδοση μετάδοσης, την ενεργειακή αποδοτικότητα, το κόστος και τη δυνατότητα ολοκλήρωσής τους.

Ως εκ τούτου, οι ακόλουθες ερευνητικές προσπάθειες διενεργήθηκαν κατά την εκπόνηση της διατριβής:

- Αμιγώς οπτική ανάκτηση φέρουσας για επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος σε διαφανή, ανακλαστική μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), με διαφορετικούς τύπους διαμόρφωσης σε WDM PON.
- Αμιγώς οπτική ανάκτηση ρολογιού για επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος από διαφανή μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) σε WDM PON.
- Οπτικό δίκτυο πρόσβασης ανεκτικό σε θόρυβο λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh, μέσω μετατόπισης μήκους κύματος.
- Απευθείας επικοινωνία χρηστών σε δίκτυα πρόσβασης και μητροπολιτικά δίκτυα, μέσω SOA-MZI διακόπτη.
- Οπτικά flip-flop βασισμένα σε SOA-MZI διακόπτη.
- Οπτική δυναμική ανάθεση χωρητικότητας για διαχείριση μεταπομπών (handoff) σε Radio-over-Fiber δίκτυα.
- Οπτικός πολλαπλασιασμός συχνότητας για μετάδοση ασύρματων ετερογενών υπηρεσιών σε Radio-over-Fiber δίκτυα.

1.8 Δομή της διατριβής

Το υπόλοιπο της διατριβής οργανώνεται ως ακολούθως:

Στο κεφάλαιο 2 [1.74] – [1.78] παρουσιάζεται μία αμιγώς οπτική τεχνική επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος σε πλήρως αμφίδρομα WDM-PON. Χρησιμοποιείται το φαινόμενο της οπτικής μνήμης που εμφανίζεται στα φίλτρα Fabry-Pérot για να ανακτηθεί η οπτική φέρουσα του συρρευματικού σήματος. Αυτό όχι μόνο παρέχει αποτελεσματικά την καταπίεση της διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος, αλλά επίσης, αποτελεί μία «πράσινη» λύση, καθώς ο ηλεκτρο-οπτικός διαμορφωτής του αντιρρευματικού σήματος οδηγείται μόνο από το

αντιρρευματικό σήμα δεδομένων. Η τεχνική αξιολογείται με διαφορετικούς τύπους διαμόρφωσης (ASK, 4-PAM, OFDM).

Στο κεφάλαιο 3 [1.79] – [1.81] υλοποιείται μία διαφορετική τεχνική επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος μέσω μίας μονάδας ανάκτησης οπτικού ρολογιού. Το οπτικό ρολόι, που ανακτάται από το συρρευματικό σήμα, λειτουργεί ως είσοδος για το διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος και στη συνέχεια επαναδιαμορφώνεται. Η διαδικασία ανάκτησης ρολογιού βασίζεται στη συγχρονισμένη ανακύκλωση οπτικών παλμών μέσα σε μία κοιλότητα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη συμπλήρωση των κενών στην ακολουθία οπτικών παλμών δεδομένων. Για τη δημιουργία των στοιχείων του ρολογιού, παλμοί δημιουργούνται στον πομπό, το οποίο οδηγεί σε RZ κωδικοποίηση στο συρρευματικό σήμα. Επίσης, χρησιμοποιείται η ίδια τεχνική για το σκοπό της υλοποίησης οπτικού δικτύου πρόσβασης ανεκτικού σε θόρυβο λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh μέσω μετατόπισης μήκους κύματος. Δεδομένου ότι μέσω της ανάκτησης ρολογιού μπορεί να ανακτηθεί μία αρχικά καταπιεσμένη αρμονική του RZ συρρευματικού σήματος, γίνεται εφικτή – παράλληλα με την εξαγωγή της ίδιας αρμονικής ρολογιού μετά τη διαδικασία ανάκτησης ρολογιού – η ανοχή έναντι στο θόρυβο λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh στο αντιρρευματικό σήμα, που συμβαίνει λόγω της διάδοσης του συρρευματικού σήματος. Το πλεονέκτημα έγκειται στην απλότητα της τεχνικής, καθώς επιπροσθέτως με την τεχνική επαναδιαμόρφωσης που παρουσιάζεται στην προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου, μόνο παθητικό οπτικό φιλτράρισμα εφαρμόζεται επιπλέον για να αποκτηθεί το επιθυμητό μετατοπισμένο μήκος κύματος για το αντιρρευματικό σήμα.

Στο κεφάλαιο 4 [1.82] – [1.89], παρουσιάζεται μία αρχιτεκτονική που επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων από χρήστη σε χρήστη. Η μέθοδος βασίζεται στην επιλεκτική στο μήκος κύματος δρομολόγηση δεδομένων σε ένα δίκτυο πρόσβασης δομής δακτυλίου-δέντρου, με κόμβους δικτύου ικανούς να επιτύχουν συμβολομετρική μεταγωγή. Η επεκτασιμότητα της τεχνικής αξιολογείται όσον αφορά την πυκνότητα των χρηστών και τη συσσώρευση θορύβου και αποδεικνύεται ότι είναι εφικτή η υλοποίησή της για υψηλές απώλειες ισχύος και υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου (OSNR). Επιπλέον, παρουσιάζονται αρχιτεκτονικές υλοποίησης οπτικών

μονάδων μνήμης (flip-flop) βασισμένες στους διακόπτες SOA-MZI, οι οποίες αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο των δρομολογητών.

Στο κεφάλαιο 5 [1.90] – [1.91] παρουσιάζεται ένας οπτικός μηχανισμός δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας που είναι ικανός να υλοποιήσει την τεχνική των κινούμενων εκτεταμένων κελιών (MEC) και να υποστηρίξει τη διαδικασία των μεταπομπών (handoff) σε πικο-κυψελοειδή (picocellular) radio-over-fiber δίκτυα. Η λειτουργία της δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας παρέχεται από ένα μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό διακόπτη (MEMS) που εδράζεται στο κέντρο μεταγωγής (CO), ο οποίος μπορεί να δρομολογήσει ένα σύνολο μηκών κύματος στις αντίστοιχες απομακρυσμένες μονάδες πρόσβασης (RAU), αναδιαμορφώνοντας δυναμικά τα συγκεκριμένα μήκη κύματος που ανήκουν στην ομάδα των δρομολογούμενων καναλιών, μόλις ο χρήστης εισέρχεται σε νέο κελί. Η αρχιτεκτονική παρουσιάζεται για μικροκυματικές υπο-φέρουσες συχνότητας 8,5 GHz, αλλά μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε 60 GHz μέσω της χρησιμοποίησης της απλής τεχνικής του οπτικού φιλτραρίσματος ενός λοβού (SSB) για επιτυχή μετάδοση και λήψη του 60 GHz radio-over-fiber σήματος. Στη δεύτερη ενότητα του κεφαλαίου, παρουσιάζεται η τεχνική του οπτικού πολλαπλασιασμού συχνότητας σε radio-over-fiber δίκτυα. Με χρήση της τεχνικής αυτής, παρουσιάζεται πειραματικά η μετάδοση σήματος σε 25 χλμ οπτικής ίνας, χρησιμοποιώντας δύο υπο-φέρουσες διαμορφωμένες στη φάση (PSK) που αποδιαμορφώνονται από ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης στην περιοχή της κεραίας.

Στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της διατριβής, γίνεται αποτίμησή τους και προτείνονται περαιτέρω ερευνητικές δραστηριότητες στα οπτικά δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς.

Τέλος, στο Παράρτημα αναφέρονται οι δημοσιεύσεις σε διεθνή έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και οι παρουσιάσεις σε διεθνή έγκριτα συνέδρια, που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διατριβής.

Αναφορές

[1.1] O. Gerstel, "Optical Networking: A Practical Perspective", IEEE Hot Interconnects, Aug. 2000.

[1.2] A. Tompkins and J. R. Jacobs, "Bridging The Last Mile, Access Network Wireline Architectures" Corning White Paper, WP6300, January 2001

[1.3] H. J. S. Dorren, Y. S. Oei, X. J. M. Leijtens, M. K. Smit, G. D. Khoe, Y. Liu, E. Tangdiongga, M. T. Hill, J. H. den Besten, J. H. C. van Zantvoort, E. Smalbrugge, T. de Vries, and J. J. M. Binsma. All optical packet switching above 80 Gb/s. In Proc. ECOC2006, paper Tu4.6.1 (invited), September 2006, Cannes, France.

[1.4] FTTH Business Guide 2012, Edition 3, Business Committee Revision date: 07/02/2012, Fiber to the Home Council Europe.

[1.5] N. J. Frigo, P. P. Iannone, and K. C. Reichmann. A view of fiber to the home economics. IEEE Commun. Mag., 42(8):S16{S23, August 2004

[1.6] P. Chanclou, S. Gosselin, J. Fernandez Palacios, V. Lopez Alvarez and E. Zouganeli. Overview of the optical broadband access evolution: a joint article by operators in the IST Network of Excellence e-Photon/ONE. IEEE Commun. Mag., 44(8):29{35, August 2006.

[1.7] Nielsen's Law of Internet Bandwidth, Wikipedia

[1.8] M. Dischinger, A. Haeberlen, K. P. Gummadi, and S. Saroiu. Characterizing residential broadband networks. In Proc. IMC2007, October 2007, San Diego, CA, USA.

[1.9] K. Cho, K. Fukuda, H. Esaki, and A. Kato. The impact and implications of the growth in residential user-to-user traffic. In Proc. SIGCOMM2006, September 2006, Pisa, Italy.

[1.10]<http://www.bbc.co.uk/iplayer/radio>

[1.11]<http://www.amazon.com/dvds-used-hd-action-comedy-oscar/b?ie=UTF8&node=2625373011>

[1.12] Home page of Skype, <http://www.skype.com>

[1.13] James Crawshaw, "Internet TV, Over-the-Top Video, & the Future of IPTV Services", Heavyreading

[1.14] Cisco ūmi Product, <http://home.cisco.com/en-us/telepresence/umi/meet-umi>

[1.15] Home page of Flickr - foto sharing. Available (February 2008): <http://www.flickr.com/>.

[1.16] Home page of YouTube - broadcast yourself. Available (February 2008): <http://www.youtube.com/>.

[1.17] Cisco, "The Zettabyte Era", white paper, May 2012

[1.18] Standards, Technologies, and Services for the Emerging 3D TV Market, Research report, ABI Research

[1.19] "A 'Summer of 3D' on the BBC", 4/7/2012, BBC

[1.20] Home page of Sky, <http://www.sky.com/>

[1.21] Ito, T., "Future television — Super Hi-Vision and beyond", Solid State Circuits Conference (A-SSCC), 2010 IEEE Asian, 8-10 Nov. 2010, Sci. & Technol. Res. Labs., Japan Broadcasting Corp. (NHK), Tokyo, Japan, Page(s): 1 - 4

[1.22] Home page of NHK, <http://www.nhk.or.jp/>

[1.23] G. Finnie. FTTH in Europe: forecast & prognosis, 2006-2011. Heavy Reading, pages 1{28, December 2006.

[1.24] Graham Finnie, "European FTTH Forecast, 2011-2016", FTTH Council Europe Conference, 16 February, 2012

[1.25] World FTTX Market – a research solution of the Digiworld Institute by IDATE

[1.26] Fiber_to_the_x, Wikipedia

[1.27] S. Chatzi, "Techno-economic study of high-splitting ratio PONs and comparison with conventional FTTH-PONs/FTTH-P2P/FTTB and FTTC deployments", OFC 2011

[1.28] B. Schrenk, G. de Valicourt, M. Omella, J.A. Lazaro, R. Brenot, and J. Prat, "Direct 10 Gb/s Modulation of a Single-Section RSOA in PONs with High Optical Budget", IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 22, pp. 392:394, Mar. 2010.

[1.29] Y. Sun, J.L. Zyskind and A.K. Srivastava, "Average inversion level, modeling, and physics of erbium-doped fiber amplifiers", IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 3, pp. 991:1007, Aug. 1997.

[1.30] R.E. Neuhauser et al., "New remote pump scheme enabling high-capacity (3.2 Tb/s) unrepeated C + L band transmission over 220 km", in Proc. OFC'02, TuR2, Anaheim (CA), United States, Mar. 2002.

[1.31] A. Banerjee et al., "Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM:PON) technologies for broadband access: a review", OSA J. Optical Netw., vol. 4, pp. 737:758, 2005.

[1.32] J.R. Stern, J.W. Balance, D.W. Faulkner, S. Hornung, D. Payne and K. Oakley, "Passive optical local networks for telephony applications and beyond", IEE Electron. Lett., vol. 23, pp.1255:1256, 1987.

[1.33] EU Climate Action Policies

http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm

[1.34] J. Baliga, R. Ayre, W.V. Sorin, K. Hinton, and R.S. Tucker, "Energy Consumption in Access Networks", in Proc. OFC'08, OThT6, San Diego (CA), United States, Feb. 2008.

[1.35] J. Armstrong, "OFDM for Optical Communications", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 27, pp. 189:204, Feb. 2009.

[1.36] A. Barbieri, G. Colavolpe, T. Foggi, E. Forestieri, and G. Prati, "OFDM versus Single-Carrier Transmission for 100 Gbps Optical Communication," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 28, pp. 2537:2551, Sept. 2010.

[1.37] T. Duong, N. Genay, P. Chanclou, B. Charbonnier, A. Pizzinat, and R. Brenot "Experimental demonstration of 10 Gbit/s upstream transmission by remote

modulation of 1 GHz RSOA using Adaptively Modulated Optical OFDM for WDM:PON single fibre architecture”, in Proc. ECOC’08, Th.3.F.1, Brussels, Belgium, Sept. 2008.

[1.38] D. Qian, J. Hu, P.N. Ji, T. Wang, “10.8:Gb/s OFDMA:PON Transmission Performance Study”, in Proc. OFC’09, NME6, San Diego (CA), United States, Mar. 2009.

[1.39] D. Qian, T. Kwok, N. Cvijetic, J. Hu, and T. Wang, “41.25 Gb/s Real:Time OFDM Receiver for Variable Rate WDM:OFDMA:PON Transmission”, in Proc. OFC’10, PDPD9, San Diego (CA), United States, Mar. 2010.

[1.40] D. Hillerkuss et al., “Single Source Optical OFDM Transmitter and Optical FFT Receiver Demonstrated at Line Rates of 5.4 and 10.8 Tbit/s”, in Proc. OFC’10, PDPC1, San Diego (CA), United States, Mar. 2010.

[1.41] S.M. Lee, S.G. Mun, M.H. Kim, and C.H. Lee, “Demonstration of a Long:Reach DWDM: PON for Consolidation of Metro and Access Networks”, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 25, pp. 271:277, Jan. 2007.

[1.42] P. P. Iannone and K. C. Reichmann, “Strategic and Tactical Uses for Extended PON”, in Proc. OFC’08, Workshop Presentation, Feb. 2008.

[1.43] J.J. Lepley, M.P. Thakur, I. Tsalamanis, C. Bock, C. Arellano, J. Prat, S.D. Walker, “VDSL Transmission over a Fibre Extended Access Network”, OSA J. Optical Netw., vol. 4, pp. 517:523, 2005.

[1.44] D. P. Shae and J. E. Mitchell. Long-reach optical access technologies. IEEE Network, 21(5):5{11, September/October 2007.

[1.45] F.T. An et al., “SUCCESS: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture,” IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 22, pp. 2557:2569, Nov. 2004.

[1.46] J.M. Oh, S.G. Koo, D. Lee, and S.J. Park, “Enhancement of the Performance of a Reflective SOA-Based Hybrid WDM/TDM PON System With a Remotely Pumped Erbium-Doped Fiber Amplifier”, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 26, pp. 144:149, Jan. 2008.

- [1.47] J.A. Lazaro, C. Bock, V. Polo, R.I. Martinez, and J. Prat, "Remotely amplified combined ring:tree dense access network architecture using reflective RSOA-based ONU", *OSA J. of Optical Netw.*, vol. 6, pp. 801:807, Jun. 2007.
- [1.48] R. P. Davey et al., "DWDM Reach Extension of a GPON to 135 km", *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 24, pp. 29:31, Jan. 2006.
- [1.49] M. Maier and M. Herzog, "STARGATE: The Next Evolutionary Step toward Unleashing the Potential of WDM EPONs", *IEEE Comm. Mag.*, vol. 45, pp. 50:56, May 2007.
- [1.50] J.H. Lee et al., "First Commercial Deployment of a Colorless Gigabit WDM/TDM Hybrid PON System Using Remote Protocol Terminator", *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 28, pp. 344:351, Feb. 2010.
- [1.51] C. Martin, "Realization of a SuperPON Demonstrator", in *Proc. NOC'97*, Antwerp, Belgium, pp. 188:193, Jun. 1997.
- [1.52] M. O. van Deventer et al., "Architecture for 100 km 2048 split bidirectional SuperPONs from ACTS:PLANET", *Proc. SPIE*, vol. 2919, pp. 245:251, Nov. 1996.
- [1.53] D.P. Shea and J.E. Mitchell, "A 10 Gb/s 1024-Way Split 100-km Long Reach Optical Access Network", *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 25, pp. 685:693, Mar. 2007.
- [1.54] K.I. Suzuki, Y. Fukada, D. Nasset, and R. Davey, "Amplified gigabit PON systems", *OSA J. Optical Netw.*, vol. 6, pp. 422:433, May 2007.
- [1.55] A. Lovric, and S. Aleksic, "Power Efficiency of Extended Reach 10G-EPON and TDM/WDM PON", in *Proc. OFC'10, NMC4*, San Diego (CA), United States, Mar. 2010.
- [1.56] A. M. J. Koonen. "Fiber to the home/fiber to the premises: what, where, and when?" *Proc. IEEE*, 94(5):911{934, May 2006 (invited)
- [1.57] L.G. Kazovsky, W. Shaw, D. Gutierrez, N. Cheng, and S. Wong, "Next-Generation Optical Access Networks", *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 25, pp. 3428:3442, Nov. 2007.

[1.58] J. Bauwelinck, B. Schrenk, C. Kazmierski, J.A. Lazaro, J. Prat, and X.Z. Qiu, "Multi-Operability and Dynamic Bandwidth Allocation in PONs with Electrically Reconfigurable SOA/REAM-Based ONUs", in Proc. ECOC'10, Th.10.B.4, Torino, Italy, Sept. 2010.

[1.59] I. Van de Voorde, C.M. Martin, J. Vandewege, and X.Z. Qiu, "The superPON demonstrator: an exploration of possible evolution paths for optical access networks", IEEE Comm. Mag., vol. 38, pp. 74:82, Feb. 2000.

[1.60] J. Bauwelinck et al., "Full-Duplex 10 Gb/s Transmission in Ultra-Dense PONs With Tree Splits >1:1k and Noise-Powered Extender Box", in Proc. ECOC'10, Tu.5.B.4, Torino, Italy, Sept. 2010.

[1.61] C. Antony et al., "Demonstration of a Carrier Distributed, 8192:Split Hybrid DWDM: TDMA PON over 124km Field-Installed Fibers", in Proc. OFC'10, PDPD8, San Diego (CA), United States, Mar. 2010.

[1.62] R. Kjaer, I. T. Monroy, L. K. Oxenløwe, P. Jeppesen, and B. Palsdottir, "Bi-directional 120 km Long-reach PON Link Based on Distributed Raman Amplification", in Proc. LEOS'06, WEE3, Montreal, Canada, Oct. 2006.

[1.63] R.D. Feldman, E.E. Harstead, S. Jiang, T.H. Wood, and M. Zirngibl, "An Evaluation of Architectures Incorporating Wavelength Division Multiplexing for Broad-Band Fiber Access", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 16, pp. 1546:1559, Sept. 1998.

[1.64] S.J. Park, C.H. Lee, K.T. Jeong, H.J. Park, J.G. Ahn, and K.H. Song, "Fiber-to-the-Home Services Based on Wavelength-Division-Multiplexing Passive Optical Network", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 22, pp. 2582:2591, Nov. 2004.

[1.65] H. Rohde, S. Smolorz, E. Gottwald, and K. Kloppe "Next Generation Optical Access: 1 Gbit/s for Everyone", in Proc. ECOC'09, Th.10.5.5, Vienna, Austria, Sept. 2009.

[1.66] C. Bock, J.M. Fabrega, and J. Prat, "Ultra-Dense WDM PON based on Homodyne Detection and Local Oscillator Reuse for Upstream Transmission", in Proc. ECOC'06, We3.P.168, Cannes, France, Sept. 2006.

- [1.67] K. Takada, M. Abe, T. Shibata, and K. Okamoto, "1-GHz-Spaced 16-Channel Arrayed Waveguide Grating for a Wavelength Reference Standard in DWDM Network Systems", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 20, pp. 822:825, May 2002.
- [1.68] W. Jiang, K. Okamoto, F.M. Soares, F. Olsson, S. Lourdudoss, and S.J.B. Yoo, "5 GHz Channel Spacing InP-Based 32-Channel Arrayed-Waveguide Grating", in Proc. OFC'09, OWO2, San Diego (CA), United States, Mar. 2009.
- [1.69] Peter Vetter, "Next Generation Optical Access Technologies", ECOC 2012, Amsterdam, September 2012.
- [1.70] IEEE 802.3ah, EPON standard, 2004.
- [1.71] Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G:PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification, ITU:T Recommendation G.984.2, 2003.
- [1.72] IEEE 802.3av, 10G-EPON standard, 2009.
- [1.73] 10-Gigabit capable passive optical networks (XG:PON), ITU:T Recommendation G.987, 2010.
- [1.74] B. Schrenk, P. Bakopoulos, E. Kehayas, A. Maziotis, J.A. Lazaro, H. Avramopoulos, and J. Prat "An All-Optical Carrier Recovery Scheme for Access Networks With Simple ASK Modulation" IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 3, Issue: 8
- [1.75] J. Lazaro, B. Schrenk, A. Maziotis, I. Cano, P. Bakopoulos, J. Prat and H. Avramopoulos, "Full-Duplex 20/10 Gb/s WDM-PON with Remodulation of Chirped ASK and Multi-level Quaternary PAM and OFDM", accepted for publication in OFC 2012.
- [1.76] E. Kehayas, B. Schrenk, P. Bakopoulos, J.A. Lazaro, A. Maziotis, J. Prat and H. Avramopoulos, "All-optical carrier recovery with periodic optical filtering for wavelength reuse in RSOA-based colorless optical network units in full-duplex 10Gbps WDM-PONs", OFC 2010, Tech. Dig. OWG4, San Diego, USA, 2010

[1.77] B. Schrenk, J. Bauwelinck, M. Omella, E. Kehayas, P. Bakopoulos, A. Maziotis, C. Kazmierski, D. Klonidis, X. Qiu, J. Prat, I. Tomkos, H. Avramopoulos and J. A. Lazaro , “User-Terminal Subsystems of Next-Generation Access Networks: Trends and Challenges”, Access Networks and In-house Communications (ANIC), Karlsruhe, Germany, 21-24 June 2010, Next Generation Access Networks (AWA4)

[1.78] J. Bauwelinck, C. Antony, F. Bonada, A. Caballero, S. Chatzi, A. M. Clarke, L. N. Costa, M. Forzati, J. A. Lazaro, A. Maziotis, M. Mestre, I. T. Monroy, P. Ossieur, V. Polo, J. Prat, X.-Z. Qiu, P.-J. Rigole, B. Schrenk, R. Soila, A. Teixeira, I. Tomkos, P. D. Townsend, X. Yin, and H. Avramopoulos , “Optical Line Terminal and Remote Node Sub-Systems of Next-Generation Access Networks”, Access Networks and In-house Communications (ANIC), Karlsruhe, Germany, 21-24 June 2010, Next Generation Access Networks (AWA5)

[1.79] A. Maziotis, B. Schrenk, P. Bakopoulos, M. Spyropoulou, J.A. Lazaro, J. Prat and H. Avramopoulos, “Colorless ONU with All-Optical Clock Recovery for Full-Duplex Dense WDM PONs”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 23, Issue 20, pp. 1433-1435, 2011.

[1.80] A. Maziotis, B. Schrenk, P. Bakopoulos, M. Spyropoulou, J.A. Lazaro, J. Prat, and H. Avramopoulos , “Wavelength reuse in a colorless ONU with all-optical clock recovery for full-duplex dense WDM PONs”, in Proc. ICTON 2011, Stockholm, Sweden, Jun. 2011, Tu.C6.7.

[1.81] B. Schrenk, A. Maziotis, M. Spyropoulou, P. Bakopoulos, J.A. Lazaro, J. Prat, and H. Avramopoulos , “Rayleigh Scattering Robust Access Network by Wavelength-Shifting through Extraction of Suppressed RZ Clock Harmonic”, in Proc. ECOC 2011, Mo.2.C.4, Geneva, Switzerland, Sept. 2011.

[1.82] A. Maziotis, B. Schrenk, M. Bougioukos, H. Avramopoulos., “Cognitive Routing in Converged Access-Metro Environment via λ -Selective SOA-MZI Switch”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 23, Issue 23, pp. 1820-1822, 2011

[1.83] B. Schrenk, A. Maziotis, M. Bougioukos, M. Moehrle, L. Moerl and H. Avramopoulos, “WDM-PON Overlay for Inter- and Intra-Network Routing”, OFC 2012.

[1.84] C. Reis, A. Maziotis, Ch. Kouloumentas, C. Stamatiadis, M. Bougioukos, N. Calabretta, P. Andre, R. Dionisio, B. Neto, H.J.S. Dorren, H. Avramopoulos and A. Teixeira, "All-optical synchronous S-R flip-flop based on active interferometric devices" *Electronics Letters*, Vol. 46 , Issue 10 , Pages: 709 - 710, 2010.

[1.85] C. Reis, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis, M. Bougioukos, N. Calabretta, P. André, R. Dionisio, B. Neto, H. J. S. Dorren, H. Avramopoulos, A. Teixeira, "All-optical clocked D flip-flop memory using a hybrid integrated S-R latch", *Microwave and Optical Technology Letters*, Volume 53, Issue 6, pages 1201–1204, June 2011

[1.86] C. Reis, A. Maziotis, C. Kouloumentas, N. Calabretta, T. Chattopadhyay, P. André, H. J. S. Dorren, H. Avramopoulos and A. Teixeira, "Performance Comparison Of All-Optical Clocked S-R And D Flip-Flops", *Optical Society of Japan, Optical Review*, submitted

[1.87] C. Reis, L. Costa, A. Bogoni, A. Maziotis, A. Teixeira, C. Kouloumentas, C. Schubert, D. Apostolopoulos, D. Erasme, E. Tangdiongga, G. Berretini, G. Meloni, H. Brahmi, H. J. S. Dorren, I. Tomkos, L. Poti, N. Calabretta, P. S. André, P. Zakynthinos, T. Chattopadhyay, H. Avramopoulos, "Roadmap of All-Optical Flip-Flops for Optical Communications Networks", *IET Optoelectronics*, submitted

[1.88] C. Reis, P. Andre, R. Dionisio, B. Neto, A. Teixeira, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis, M. Bougioukos, H. Avramopoulos, N. Calabretta, H.J.S Dorren, "Experimental evaluation of all-optical asynchronous and synchronous memories ", *Computer Engineering Conference (ICENCO)*, 2010 International

[1.89] C. Reis, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis, N. Calabretta, P.S. André, R.P. Dionísio, B. Neto, H.J.S Dorren, H. Avromopoulos, and A. Teixeira, "Comparison of Optical Synchronous S-R Flip-Flops Techniques," in *Proceedings of Symposium on Enabling Optical Networks - SEON*, Porto, Portugal, June 2010.

[1.90] K. Vyrsoinos, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis and N. Pleros, "An optical MEMS-based dynamic capacity allocation scheme for handoff using moving

extended cells in radio-over-fiber networks”, Optics Communications 284 (19), pp. 4390-4393, Elsevier B.V, 2011

[1.91] A. Maziotis, C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, K. Vyrsoinos and N. Pleros, “Dual-User Wireless Heterogeneous Services over a Single Optical Carrier using Optical Frequency Multiplication”, LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. LEOS '09. IEEE 4-8 Oct. 2009 Page(s):691 – 692

Κεφάλαιο 2

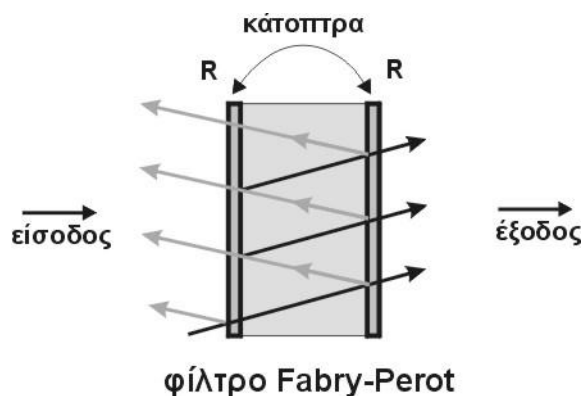
Ανάκτηση φέρουσας για επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος

Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), η οποία ως βασικό συστατικό των δικτύων πρόσβασης, έχει μεγάλη επίδραση στην επίδοση μετάδοσης του σήματος, και στην αποτελεσματικότητα κόστους και ενέργειας των παθητικών οπτικών δικτύων (PON). Παρουσιάζονται υλοποιήσεις του πομπού του αντιρρευματικού σήματος οι οποίες επαναχρησιμοποιούν το συρρευματικό σήμα για μετάδοση, χωρίς να απαιτούν πηγές φωτός στις εγκαταστάσεις του χρήστη.

Οι δομές που ακολουθούν εστιάζουν σε απλές υλοποιήσεις των αρχιτεκτονικών της μονάδας οπτικού δικτύου, καθώς μέσα φωτονικής ολοκλήρωσης δεν ήταν διαθέσιμα. Παρόλο που σήμερα τα εμπορικά προϊόντα βασίζονται στη μικρο-οπτική, πρόοδος έχει σημειωθεί σε ερευνητικό επίπεδο, ιδιαίτερα στο πεδίο των οπτικών διασυνδέσεων (optical interconnects) [2.1], και αναμένεται ότι σύντομα η επιπλέον πολυπλοκότητα που θα επιτρέπει περαιτέρω λειτουργικότητα δεν θα είναι απαγορευτικά ακριβή. Ωστόσο, έως σήμερα διακριτά στοιχεία χρησιμοποιούνται στα υποσυστήματα πομπού και δέκτη των τερματικών οπτικών γραμμών (OLT) και των μονάδων οπτικού δικτύου (ONU).

2.1 Το φίλτρο Fabry - Pérot

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται το φίλτρο, ή αλλιώς συμβολόμετρο, Fabry-Pérot το οποίο αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο των αρχιτεκτονικών που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες. Το φίλτρο Fabry-Pérot αποτελείται από μία κοιλότητα, η οποία σχηματίζεται μεταξύ δύο παράλληλων ανακλαστικών επιφανειών (καθρεπτών), όπως φαίνεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Το φίλτρο Fabry-Pérot.

Η αρχή λειτουργίας του συμβολομέτρου βασίζεται στην προσθετική συμβολή των ανακλώμενων οπτικών δεσμών της αρχικής δέσμης φωτός. Πιο συγκεκριμένα, η αρχική προσπίπτουσα οπτική δέσμη εισέρχεται στο διηλεκτρικό της κοιλότητας Fabry-Pérot και υφίσταται διαδοχικές ανακλάσεις στις εσωτερικές επιφάνειες των καθρεπτών. Θεωρώντας ότι το οπτικό πεδίο του προσπίπτοντος σήματος εισόδου είναι της μορφής

$$\tilde{E}_{in} = E_{in} \cdot e^{-j\omega t} \quad (2.1)$$

και ότι κάθε ανακλαστική επιφάνεια έχει συντελεστή ανακλαστικότητας ίσο με R , τότε το ποσοστό του πεδίου που εισέρχεται στο συμβολόμετρο μέσω της πρώτης ανακλαστικής επιφάνειας, είναι

$$\tilde{E} = \sqrt{1-R} \cdot E_{in} \cdot e^{-j\omega t} \quad (2.2)$$

Το πεδίο αυτό ταξιδεύει μέσα στην κοιλότητα μήκους L του φίλτρου μέχρι να συναντήσει το δεύτερο κάτοπτρο, οπότε τότε ένα ποσοστό του εξέρχεται του

φίλτρου, ενώ το υπόλοιπο οπτικό πεδίο ανακλάται από το κάτοπτρο πίσω και μέσα ξανά στην κοιλότητα. Το πεδίο που εξέρχεται μετά από αυτήν την πρώτη διέλευση μέσα από την κοιλότητα είναι

$$\tilde{E}_0 = (1 - R) \cdot E_{in} \cdot e^{-(j\omega t + kL)} \quad (2.3)$$

όπου k η σταθερά διάδοσης μέσα από το διηλεκτρικό υλικό της κοιλότητας του φίλτρου. Το υπόλοιπο τμήμα του οπτικού πεδίου, το οποίο ανακλάται ξανά μέσα στην κοιλότητα, υφίσταται συνολικά δύο διαδοχικές ανακλάσεις μέχρι να ξαναφτάσει στο κάτοπτρο εξόδου, οπότε το πεδίο που προκύπτει στην έξοδο από τη δύο φορές ανακλώμενη δέσμη, είναι

$$\tilde{E}_1 = (1 - R) \cdot R \cdot E_{in} \cdot e^{-(j\omega t + kL + 2kL)} \quad (2.4)$$

Με αντίστοιχη διαδικασία, το πεδίο εξόδου που προκύπτει από την n -ιοστή ανακλώμενη δέσμη φωτός, βρίσκεται ότι είναι

$$\tilde{E}_n = (1 - R) \cdot R^n \cdot E_{in} \cdot e^{-(j\omega t + kL + n \cdot 2kL)} \quad (2.5)$$

Η σταθερά διάδοσης k , ως γνωστόν, γράφεται ως συνάρτηση της συχνότητας f του

πεδίου σύμφωνα με τη σχέση $k = \frac{2\pi n}{c} f$, όπου n σ' αυτή τη σχέση είναι ο δείκτης διάθλασης του διηλεκτρικού του φίλτρου. Κάνοντας χρήση αυτής της σχέσης, η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος ως προς τη συχνότητα του φίλτρου Fabry-Pérot δίνεται από την έκφραση

$$T(f) = \left| \frac{\tilde{E}_{out}}{\tilde{E}_{in}} \right|^2 = \left| (1 - R) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} R^n \cdot e^{-n \cdot \frac{4\pi n L}{c} \cdot f} \right|^2 = \left| \frac{1 - R}{1 - R \cdot e^{-\frac{4\pi n L}{c} \cdot f}} \right|^2 \quad (2.6)$$

Ορίζοντας την παράμετρο της ελεύθερης φασματικής περιοχής του φίλτρου ως $FSR = c/2nL$, η τελευταία σχέση ξαναγράφεται ως

$$T(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot \sqrt{R}}{1 - R} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot f}{FSR}\right) \right)^2} \quad (2.7)$$

Η τελευταία σχέση ορίζει τη συνθήκη πλήρους προσθετικής συμβολής των δεσμών φωτός στην έξοδο του φίλτρου, η οποία λαμβάνει χώρα όταν το διπλάσιο του οπτικού δρόμου μεταξύ των δύο κατόπτρων είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος της οπτικής δέσμης. Σε αυτήν την περίπτωση, στην έξοδο του φίλτρου εξέρχεται το σύνολο της ισχύος του αρχικά προσπίπτοντος οπτικού πεδίου. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, η συμβολή δεν είναι πλήρως προσθετική, οπότε μόνο ένα ποσοστό του αρχικού οπτικού πεδίου εξέρχεται του φίλτρου.

Η σχέση 2.7 περιγράφει, επομένως, μια περιοδική συνάρτηση ως προς τη συχνότητα, η οποία εμφανίζει κορυφές μετάδοσης σε κάθε τιμή συχνότητας, στην οποία υπάρχει πλήρως προσθετική συμβολή στην έξοδο του φίλτρου. Το φασματικό 3-dB εύρος κάθε φασματικής κορυφής της σχέσης 2.7 βρίσκεται ότι είναι ίσο με

$$B = \frac{2 \cdot FSR}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{1 - R}{2\sqrt{R}}\right) \quad (2.8),$$

που δείχνει ότι το εύρος ζώνης μειώνεται, καθώς αυξάνει η ανακλαστικότητα των κατόπτρων. Μια βασική παράμετρος του φίλτρου, η οποία συνδέει την ελεύθερη φασματική περιοχή με το εύρος ζώνης κάθε κορυφής, είναι η λεπτότητα (finesse – F) του φίλτρου, η οποία δίνεται από τη σχέση

$$F = \frac{FSR}{B} = \frac{\pi}{2 \cdot \arcsin\left(\frac{1 - R}{2\sqrt{R}}\right)} \quad (2.9)$$

Για μεγάλες τιμές ανακλαστικότητας η λεπτότητα προσεγγίζεται από τη σχέση

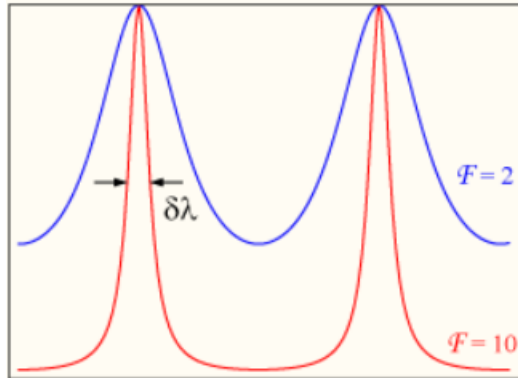
$$F \cong \frac{\pi\sqrt{R}}{1 - R} \quad (2.10)$$

Η λεπτότητα σχετίζεται άμεσα με το παράγοντα Q, ο οποίος χαρακτηρίζει κάθε στοιχείο φιλτραρίσματος και υποδεικνύει την ικανότητά του να απομονώνει και να

φιλτράρει το επιθυμητό φασματικό περιεχόμενο. Η σχέση που συνδέει τη λεπτότητα με τον παράγοντα Q είναι

$$Q \cong \frac{F}{\sqrt{3}} \quad (2.11)$$

και δείχνει ότι τα δύο μεγέθη είναι ευθέως ανάλογα.



Εικόνα 15: Συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου Fabry-Pérot για διαφορετικές τιμές λεπτότητας.

Τα παραπάνω γίνονται περισσότερο σαφή με τη βοήθεια της Εικόνα 15, η οποία απεικονίζει τη μορφή της συνάρτησης μεταφοράς ως προς τη συχνότητα, που δίνεται από τη σχέση 2.7, για διάφορες τιμές λεπτότητας του φίλτρου.

Όπως εύκολα φαίνεται, όσο αυξάνει η λεπτότητα του φίλτρου, τόσο στενεύει το εύρος ζώνης των κορυφών μετάδοσης, οπότε επιτυγχάνεται καλύτερη απομόνωση φασματικών συνιστωσών (φιλτράρισμα). Επίσης, η περιοδικότητα της συνάρτησης μεταφοράς ως προς τη συχνότητα σημαίνει ότι το στοιχείο έχει ιδιότητες μνήμης. Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό από την αντίστοιχη χρονική ανάλυση της απόκρισης του φίλτρου Fabry-Pérot.

Συγκεκριμένα, η χρονική έξοδος του φίλτρου Fabry-Pérot σε είσοδο μιας κρουστικής διέγερσης της μορφής $E(t)=\delta(t)$, δίνεται από την έκφραση

$$h(t) = (1 - R) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} R^n \cdot \delta\left(t - \frac{n}{FSR}\right) \quad (2.12)$$

Οι παραγόμενοι παλμοί έχουν σταθερή περίοδο ίση με το αντίστροφο της ελεύθερης φασματικής περιοχής.

Η σχέση μεταξύ της λεπτότητας του φίλτρου και των παλμών, που αυτό παράγει όταν εισαχθεί στο φίλτρο ένας μόνο παλμός, προκύπτει, επίσης, σε αναλυτική μορφή. Θεωρώντας ότι η ισχύς κορυφής του εισερχόμενου παλμού είναι P_{in} , τότε το πλάτος του n -οστού παλμού εξόδου του φίλτρου θα είναι $R^{2n}P_{in}$. Αν θεωρηθεί ότι ο n -οστός παλμός αποτελεί ένα ποσοστό ισχύος A του αρχικού παλμού εισόδου, τότε προκύπτει ότι

$$R^{2n} P_{in} = A \cdot P_{in} \Rightarrow R = \exp(\ln A/2n) \quad (2.13)$$

Αντικαθιστώντας στην προηγούμενη σχέση το R με την έκφρασή του ως προς τη λεπτότητα F από τη σχέση (2.10), προκύπτει ότι

$$F = \frac{\pi \cdot e^{\frac{\ln A}{4n}}}{1 - e^{\frac{\ln A}{2n}}} \quad (2.14)$$

και κάνοντας χρήση της προσέγγισης

$$e^{\frac{a}{x}} = \frac{a}{x} + 1 \quad (2.15)$$

καταλήγουμε σε μια γραμμική σχέση ανάμεσα στη λεπτότητα F και τον αριθμό των n παλμών που παράγονται μέχρι ο n -οστός παλμός να είναι ένα ποσοστό A του αρχικού. Η σχέση αυτή είναι

$$F = \frac{2\pi}{\ln A} n + \frac{\pi}{2} \quad (2.16)$$

Τα φίλτρα Fabry-Pérot έχουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών σε πολλούς τομείς της οπτικής. Ιδιαίτερα όσον αφορά τον τομέα των φωτονικών τηλεπικοινωνιών, τα φίλτρα Fabry-Pérot έχουν χρησιμοποιηθεί για αποπολυπλεξία μήκους κύματος [2.2] – [2.4], για την καταπίεση ανεπιθύμητων αρμονικών [2.7], όπως θα φανεί και στη συνέχεια του κεφαλαίου, για την ανάκτηση σήματος ρολογιού [2.5], [2.6], όπως θα

περιγραφεί στο κεφάλαιο 3, για τον πολλαπλασιασμό του ρυθμού μετάδοσης οπτικών παλμικών πηγών [2.8] – [2.11], καθώς και για την παραγωγή σημάτων ελέγχου-απόφασης από επικεφαλίδες σε κόμβους μεταγωγής πακέτων [2.12].

2.2 Τεχνικές ανάκτησης φέρουσας και θεωρητική ανάλυση

Στα WDM-PON είναι πολύ σημαντική η αποτελεσματική χρησιμοποίηση των διαθέσιμων μηκών κύματος για την υποστήριξη της πλήρως αμφίδρομης μετάδοσης, καθώς γενικά δεν έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν υψηλή πυκνότητα πελατών συγκριτικά με τα υβριδικά WDM/TDM-PON [2.13]. Για αυτό το σκοπό, παρουσιάζεται η τεχνική ανακύκλωσης των οπτικών φερουσών [2.14].

Λόγω της επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος, το δίκτυο εκμεταλλεύεται αποτελεσματικά το φάσμα, καθώς δεν απαιτεί δεύτερο μήκος κύματος για τη μετάδοση αντιρρευματικού σήματος, πέραν του ενός που διατίθεται για την μετάδοση του συρρευματικού. Αυτό το σήμα όχι μόνο μεταφέρει τα συρρευματικά δεδομένα, αλλά επαναχρησιμοποιείται για το σκοπό της αντιρρευματικής μετάδοσης.

Η επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος, μέσω της επαναδιαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος, επιτυγχάνεται μέσω τεχνικών καταπίεσης της διαμόρφωσης του σήματος που στέλνεται συρρευματικά, προτού η οπτική φέρουσα διαμορφωθεί ξανά με δεδομένα για αντιρρευματική μετάδοση. Αποτελεί μία αποτελεσματική και ταυτοχρόνως απλή λύση για την δομή του χρήστη και, σε αυτό το κεφάλαιο, υλοποιείται μέσω της χρήσης ανακλαστικών διαμορφωτών [2.15]. Η κεντρική παραγωγή φωτός όχι μόνο συγκεντρώνει τη διαχείριση των μηκών κύματος στο κέντρο μεταγωγής (CO), αλλά διευκολύνει τη συντήρηση των πηγών φωτός. Επιπροσθέτως, η μονάδα οπτικού δικτύου, η οποία συμπεριλαμβάνει έναν ημιαγώγιμο διαμορφωτή [2.16], είναι διαφανής στο μήκος κύματος. Αυτό με τη σειρά του επιτρέπει τη μεταφορά της μονάδας οπτικού δικτύου σε άλλο σημείο του δικτύου χωρίς να είναι απαραίτητη η επαναρρύθμισή της, όπως θα ήταν απαραίτητο στην περίπτωση που είχε ρυθμιζόμενο λέιζερ [2.17] – [2.19] ως πηγή φωτός για το διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος.

Η επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος, σε συστήματα μετάδοσης με ASK τύπο διαμόρφωσης στα συρρευματικά και αντιρρευματικά σήματα, προϋποθέτει μειωμένο λόγο σβέσης (ER) του δυφίου '1' προς το δυφίο '0' για το συρρευματικό σήμα [2.14]. Ο λόγος σβέσης, ER_{DS} , του συρρευματικού σήματος επηρεάζει την ποινή ισχύος λήψης του, η οποία αντιστοιχεί στην επιπλέον οπτική ισχύ που απαιτείται σε σχέση με την περίπτωση που ο λόγος σβέσης του συρρευματικού σήματος ήταν άπειρος. Η λογαριθμική του τιμή ορίζεται ως

$$\xi = 10 \log \left(\frac{1 + 1/ER_{DS}}{1 - 1/ER_{DS}} \right) \quad (2.17)$$

Οι τεχνικές ανάκτησης φέρουσας στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), που αποσκοπούν στην καταπίεση της διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος, μπορούν να μειώσουν την ποινή ισχύος λήψης του αντιρρευματικού σήματος, χωρίς την ανάγκη αλλαγής του λόγου σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος, ενισχύοντας τη συνολική επίδοση του συστήματος. Με άλλα λόγια, αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν τη χρήση υψηλότερου λόγου σβέσης (ER) στο συρρευματικό σήμα, χωρίς να εισάγουν επιπλέον ποινή ισχύος λήψης στο αντιρρευματικό σήμα.

Η πιο απλή μέθοδος για καταπίεση της διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος, προτού επαναδιαμορφωθεί, είναι η εκμετάλλευση του κορεσμού κέρδους του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (SOA) [2.14] (Εικόνα 16(α)). Η καταπίεση της πληροφορίας διαμόρφωσης προκαλείται λόγω του υψηλότερου κέρδους που υπόκεινται τα δυφία που φέρουν το '0' σε σχέση με τα δυφία που φέρουν την πληροφορία '1'. Ωστόσο, αυτή η τεχνική έχει ως αρνητικό το σχετικά υψηλής ισχύος σήμα εισόδου που απαιτεί ώστε να λειτουργήσει ο ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής (SOA) στην περιοχή κορεσμού και δεν μπορεί να εφαρμοστεί πάντοτε.

Μία δεύτερη προσέγγιση (feed-forward injection), όπου τα δεδομένα καταπιέζονται ενεργητικά από συγχρονισμένη διαμόρφωση με απώλειες ή κέρδος στο διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος, μπορεί να παρέχει υψηλότερη αποτελεσματικότητα [2.20], [2.21] (Εικόνα 16(β)). Το συρρευματικό σήμα προωθείται στον ανακλαστικό ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (RSOA), ο οποίος λειτουργεί στη γραμμική περιοχή, όπου η ισχύς εξόδου του, p_{out} , ακολουθεί αυτήν της εισόδου, p_{in} , ανάλογα με το

ρεύμα λειτουργίας (bias current), I_{dc} , και το ρεύμα διαμόρφωσης, i_{mod} , μέσω μίας γραμμικής σχέσης κέρδους-ρεύματος dG/dI

$$p_{out}(t) = p_{in}(t) \left[G(I_{dc}) + \frac{dG}{dI} i_{mod}(t) \right] \quad (2.18)$$

Η οπτική είσοδος του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA) αποτελείται από το συρρευματικό σήμα και χαρακτηρίζεται από το λόγο σβέσης του, ER_{DS} , τη μέση τιμή ισχύος του, \bar{P} , και τη μορφή των δεδομένων του, π_{DS} . Για αποκλειστική ανάκτηση της φέρουσας, χωρίς μετάδοση του αντιρρευματικού σήματος, το ρεύμα διαμόρφωσης, i_{mod} , καθορίζεται από το συρρευματικό σήμα που προωθείται με ρεύμα I_{ff}

$$p_{DS}(t) = \frac{2\bar{P}}{ER_{DS}+1} [1 + (ER_{DS} - 1) \pi_{DS}(\tau)] \quad (2.19)$$

$$p_{out}(t) = p_{DS}(t) \left[G(I_{dc}) + \frac{dG}{dI} I_{ff} (h_{e/o} * \bar{\pi}_{DS})(t) \right] \quad (2.20)$$

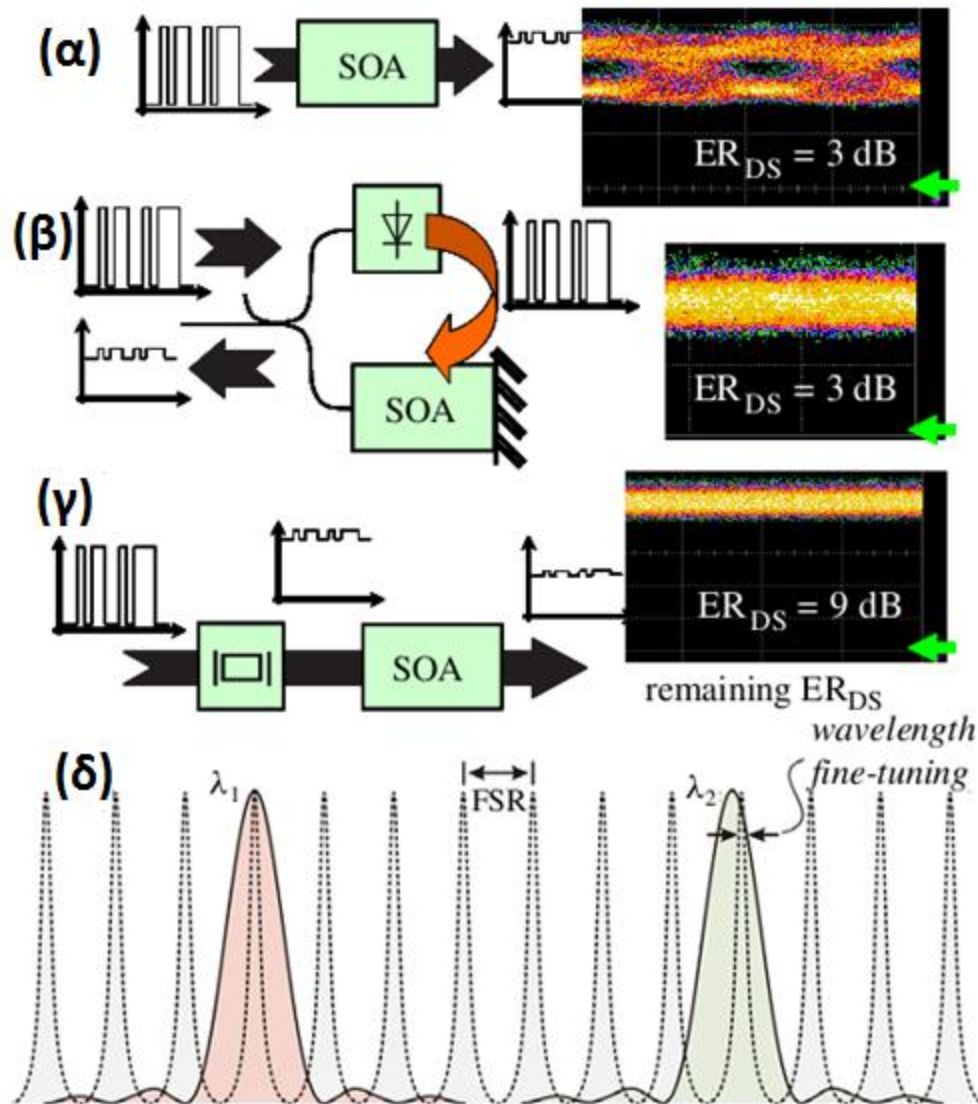
Το περιορισμένο ηλεκτρο-οπτικό εύρος ζώνης του διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος λαμβάνεται υπόψη, μέσω της συνέλιξης της κρουστικής απόκρισης $h_{e/o}$ και των δεδομένων του συρρευματικού σήματος που προωθούνται. Με κατάλληλη ρύθμιση του I_{ff} , σύμφωνα με τις συνθήκες της [2.20], η ανακτημένη οπτική φέρουσα στην έξοδο του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA) είναι

$$p_{out}(t) = G(I_{de}) \frac{2\bar{P}}{ER_{DS}+1} \times \left[1 + (ER_{DS} - 1) \left(\pi_{DS}(t) + (h_{e/o} * \bar{\pi}_{DS})(t) \right) \right] \quad (2.21)$$

και περιορίζεται κυρίως από το ηλεκτρο-οπτικό εύρος ζώνης διαμόρφωσης, εάν δεν ληφθεί υπόψη η επίπτωση που έχει η συγκεκριμένη ακολουθία δεδομένων, λόγω του πεπερασμένου χρόνου ανάκτησης κέρδους του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA) [2.22].

Η τρίτη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιήθηκε στη διατριβή, για την αποτελεσματική καταπίεση των δεδομένων του συρρευματικού σήματος, είναι μία αμιγώς οπτική τεχνική. Παρουσιάζει διαφανή λειτουργία ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, όπως συμβαίνει συνήθως σε αμιγώς οπτικά υποσυστήματα (π.χ. επειδή το κέρδος ενός ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (SOA) δεν εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης

του σήματος). Επιπροσθέτως, η χρήση κβαντικών ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών (QD-SOA) μπορεί να αναβαθμίσει το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων έως τα 40 Gb/s [2.23].



Εικόνα 16: Τεχνικές καταπίεσης διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος βασισμένες σε (α) κορεσμό οπτικού κέρδους του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (SOA), (β) feed forward injection και (γ) παθητικό οπτικό κύκλωμα φιλτραρίσματος. Τα ένθετα δεξιά δείχνουν τις ανακτημένες οπτικές φέρουσες στο χρόνο, για τις οποίες τα βέλη υποδηλώνουν το επίπεδο αναφοράς. (δ) WDM λειτουργία της αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας με φίλτρο Fabry-Pérot. Οι περιοδικές κορυφές του φίλτρου (γραμμές με κουκίδες) συμπίπτουν με το πλέγμα μηκών κύματος του συρρευματικού σήματος.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί το φαινόμενο της οπτικής μνήμης, που εμφανίζεται στους παθητικούς οπτικούς συντονιστές, για την ανάκτηση της οπτικής φέρουσας του συρρευματικού σήματος με διαφορετικούς τύπους διαμόρφωσης (Εικόνα 16(γ)). Αυτό, όχι μόνο παρέχει αποτελεσματικά την καταπίεση της διαμόρφωσης, όπως θα φανεί, αλλά επίσης αποτελεί μία «πράσινη» λύση, καθώς ο ηλεκτρο-οπτικός διαμορφωτής του αντιρρευματικού σήματος οδηγείται μόνο από το αντιρρευματικό σήμα δεδομένων[2.24].

Ως ανακλαστικοί διαμορφωτές που επαναδιαμορφώνουν το σήμα χρησιμοποιούνται ανακλαστικοί ημιαγώγιμοι οπτικοί ενισχυτές (RSOA). Αυτά τα στοιχεία μπορούν να υλοποιηθούν μέσω Indium-Phosphide ημιαγωγικών υλικών. Συγκρινόμενα με λύσεις βασισμένες σε Lithium-Niobate, όπως οι Mach-Zehnder διαμορφωτές (MZM), τα III-V ημιαγωγικά στοιχεία παρέχουν πολύ υψηλότερο βαθμό ολοκλήρωσης, και επομένως βοηθούν στη σμίκρυνση των μελλοντικών υποδομών του χρήστη [2.25]. Ωστόσο, παρασιτικά παράπλευρα φαινόμενα κατά τη διαμόρφωση, όπως το τρέμουλο φάσης (chirp) αλλά και το περιορισμένο ηλεκτρο-οπτικό εύρος ζώνης τους, εισάγουν περαιτέρω ποινή ισχύος κατά τη λήψη του σήματος που προέρχεται από τους φθηνότερους και μικρότερους ημιαγώγιμους διαμορφωτές. Επομένως, συχνά απαιτείται η αντιστάθμιση αυτών των ανεπιθύμητων φαινομένων, είτε μέσω επιπλέον ηλεκτρονικών, όπως παθητικούς ή προσαρμοστικούς ηλεκτρονικούς ισοσταθμιστές [2.26] – [2.27] είτε μέσω οπτικής επεξεργασίας σήματος [2.28], χωρίς ωστόσο με αυτές τις μεθόδους να επιτυγχάνεται ισολογισμός απωλειών συμβατός με το πρότυπο GPON.

Η αμιγώς οπτική τεχνική βασίζεται στη χρήση ενός παθητικού οπτικού φίλτρου που ρυθμίζεται στο μήκος κύματος της φέρουσας [2.6], [2.24] (Εικόνα 16(γ)). Ο οπτικός συντονιστής, που λειτουργεί ως φασματικό περιοδικό φίλτρο, ανακτά μερικώς το μήκος κύματος της φέρουσας και καταπιέζει αποτελεσματικά τις αρμονικές δεδομένων του συρρευματικού σήματος. Παρόλο που αυτή η προσέγγιση είναι γνωστή για σκοπούς ανάκτησης ρολογιού [2.29], [2.30], η εφαρμογή της για ανάκτηση φέρουσας σε πλήρως αμφίδρομη μετάδοση δεν έχει μελετηθεί. Στη συνέχεια, ένας οπτικός ημιαγώγιμος ενισχυτής (SOA), που είναι μέρος του πομπού

του αντιρρευματικού σήματος, καταπιέζει περαιτέρω τις διακυμάνσεις της οπτικής ισχύος, λόγω της λειτουργίας του στην περιοχή του κορεσμού [2.31].

Ένα οπτικό φίλτρο με περιοδική συνάρτηση μεταφοράς, όπως το φίλτρο Fabry–Pérot (FPF), χρησιμοποιήθηκε για να παρέχει τη λειτουργικότητά του ως στοιχείο οπτικής μνήμης και ταυτοχρόνως επιτρέπει διαφανή στο μήκος κύματος λειτουργία, λόγω της περιοδικότητάς του στο φάσμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16(δ). Για να διασφαλιστεί ανοχή σε πιθανές μετατοπίσεις μήκους κύματος του λέιζερ του συρρευματικού σήματος, το φίλτρο Fabry–Pérot (FPF) ευθυγραμμίζεται με το εισερχόμενο σήμα δεδομένων, μέσω ειδικής ρύθμισης, στις φασματικές κορυφές μετάδοσης εντός του FSR, παρά σε όλο το εύρος μηκών κύματος λειτουργίας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 16(δ), η μετάδοση του φίλτρου Fabry–Pérot (FPF) είναι σχεδιασμένη επί της αρχής, ώστε να ταιριάζει με το πλέγμα μηκών κύματος του συρρευματικού σήματος. Ενώ, μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένο για το σήμα στο λ_1 , μία μικρή μετατόπιση από το μήκος κύματος του λέιζερ του συρρευματικού σήματος λ_2 , θα απαιτούσε εκ νέου ρύθμιση ώστε να ευθυγραμμιστούν τα φάσματα. Ωστόσο, αυτή η ρύθμιση απαιτείται στο κομμάτι του WDM δικτύου που μεταδίδεται το λ_2 , ώστε η κορυφή μετάδοσης του φίλτρου Fabry–Pérot (FPF) να ευθυγραμμιστεί με την οπτική φέρουσα του εισερχόμενου σήματος δεδομένων λ_2 . Με αυτή τη λογική, τα φίλτρα Fabry–Pérot (FPF), που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά κομμάτια του δικτύου, ρυθμίζονται στο εισερχόμενο σήμα δεδομένων, παρά σε όλες τις κορυφές μετάδοσης του WDM.

Στο πεδίο του χρόνου, το φαινόμενο της κοιλότητας οδηγεί σε γέμισμα των κενών δυφίων '0' με φως. Το πεδίο εξόδου E_{out} σχετίζεται με αυτό της εισόδου E_{in} , μέσω της ανακλαστικότητας R του φίλτρου Fabry–Pérot και του χρόνου μετ' επιστροφής T_{rtt} του σήματος μέσα στην κοιλότητα

$$E_{out} = (1 - R) \sum_{k=0}^{\infty} E_{in} (t - kT_{rtt}) R^k \quad (2.22)$$

Ο χρόνος εξασθένισης του φωτός εντός της κοιλότητας δίνεται από το εύρος ζώνης του φίλτρου, και επομένως από τη λεπτότητα F του φίλτρου και την οπτική διαδρομή, η οποία ορίζεται από το δείκτη διάθλασης n του μέσου εντός της κοιλότητας μήκους L

$$\tau = \frac{1}{2\pi\delta f} = \frac{nLF}{\pi c} = \frac{nL\sqrt{R}}{c(1-R)} \approx \frac{nL}{c(1-R)} \quad \delta f = \frac{FSR}{F} \quad (2.23)$$

όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό. Η ισχύς εξόδου P_{out} μεταβάλλεται ανάλογα με την εκθετική μείωση και εξαρτάται από την ακολουθία δεδομένων του συρρευματικού σήματος. Ειδικές περιπτώσεις αποτελούν οι μεγάλες ακολουθίες μηδενικών που εμφανίζονται τη χρονική στιγμή t_0 και διαρκούν χρονικό διάστημα δt . Αν αυτές οι ακολουθίες είναι αρκετά μεγάλες, θα μειώσουν σταδιακά την εναπομένουσα ισχύ κατά τη μετάδοση από το φίλτρο. Η εναπομένουσα ισχύς ορίζεται από τη μέγιστη ισχύ εξόδου P_{max} στην έξοδο του φίλτρου Fabry-Pérot (FPF) και το λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος

$$P_{out}(t_0 + \delta t) = \Delta P \exp\left(-\delta t/\tau\right) + \frac{P_{max}}{ER_{DS}} \quad (2.24)$$

Στη περίπτωση όπου στο φίλτρο Fabry-Pérot (FPF) εισέρχεται φως από ίσα κατανεμημένα δυφία '1' και '0', η μέγιστη ισχύς ΔP , που χαρακτηρίζει την μείωση, καθορίζεται από τη διαφορά του μέσου επιπέδου ισχύος με την εναπομένουσα ισχύ στα δυφία '0' μετά τη μετάδοση από το φίλτρο Fabry-Pérot (FPF), των οποίων η μέγιστη μετάδοση T_{max} από την ανακλαστικότητα και τις απώλειες στην κοιλότητα είναι

$$\Delta P = \overline{P_{avg}} - \frac{P_{max}}{ER_{DS}} \overline{P_{avg}} = \overline{P_{in}} T_{max}, P_{max} = 2 \overline{P_{in}} \frac{ER_{DS}}{ER_{DS}+1} T_{max} \quad (2.25)$$

$$T_{max} = \frac{(1-R_1)(1-R_2)a}{(1-\sqrt{R_1 R_2} a)^2}, \text{ για } R_1 = R_2 \quad T_{max} = \frac{(1-R)^2 a}{(1-Ra)^2} \quad (2.26)$$

Με παρόμοιο τρόπο, συνεχόμενα δυφία '1' θα οδηγήσουν σε μέγιστη τιμή εξόδου στο φίλτρο Fabry-Pérot (FPF). Ο εναπομένων λόγος διακύμανσης του δυφίου '1' του σήματος για PRBS μήκους 2^z-1 υπολογίζεται από τη μείωση, μετά από z συνεχόμενα δυφία '0', στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του συρρευματικού σήματος R_b και σχετίζεται με το μέγιστο και ελάχιστο επίπεδο ισχύος σύμφωνα με τις μεταβολές που προκαλούνται από τα συνεχόμενα δυφία '0' ή '1'.

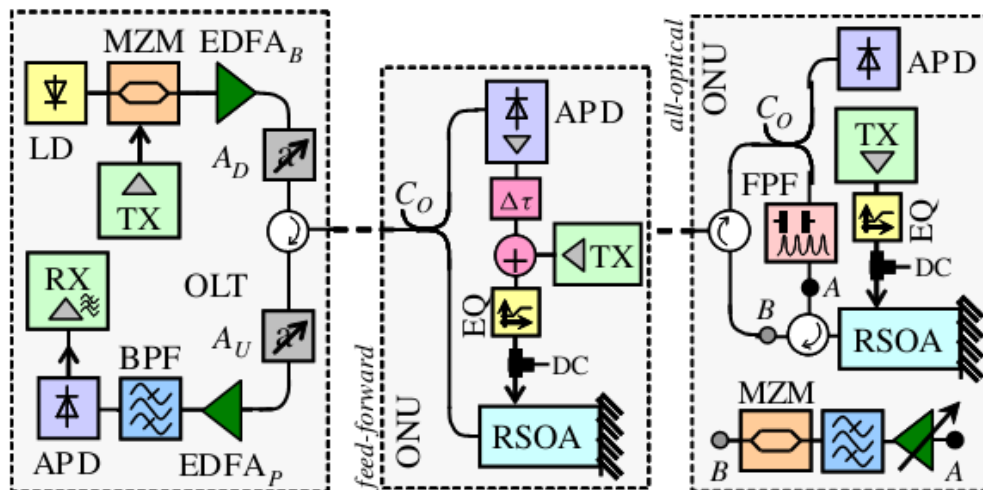
$$ER_{out} = \frac{P_{max,z}(t_1 + z/R_b)}{P(t_0 + z/R_b)} = ER_{DS} \frac{1 - \frac{1}{2ER_{DS}}(ER_{DS}-1)\exp(-z\pi c/nLFR_b)}{1 + \frac{1}{2}(ER_{DS}-1)\exp(-z\pi c/nLFR_b)} \quad (2.27)$$

Με λεπτότητα ικανή να καταπιέσει τα δεδομένα αποτελεσματικά, η οπτική φέρουσα ανακτάται και είναι κατάλληλη για επαναδιαμόρφωση με τα αντιρρευματικά δεδομένα. Σημειώνεται ότι ο λόγος διακύμανσης του δυφίου '1' του σήματος (ER_{out}) στην εξίσωση 2.27 αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή για το συγκεκριμένο λόγο σβέσης του συρρευματικού σήματος, το οποίο συμβαίνει μόνο στη χειρότερη περίπτωση όπου z συνεχόμενα δυφία '0' εμφανίζονται με πιθανότητα 2^{-z} εντός της PRBS [2.32]. Μία μέση τιμή λόγου σβέσης για τη PRBS δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς η χειρότερη περίπτωση πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη. Αυτή είναι η περίπτωση όπου λίγα λάθη μπορούν να εισαχθούν, προκαλώντας κάτω όριο (error floor) στο ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων.

2.3 Πειραματική σύγκριση τεχνικών ανάκτησης φέρουσας

Οι διαφορετικές τεχνικές καταπίεσης της διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος αξιολογήθηκαν με μία απλή πειραματική διάταξη (Εικόνα 17), όσον αφορά την επίδοση τους στην εμφάνιση λαθών. Το συρρευματικό σήμα διαμορφώνεται σε μήκος κύματος 1551,72 nm με ένα Mach-Zehnder διαμορφωτή (MZM), σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s και PRBS μήκους 2^7-1 . Το τελευταίο, διασφαλίζει ότι φαινόμενα λόγω της ακολουθίας δεδομένων δεν θα επηρεάσουν τη μετάδοση από τον ανακλαστικό ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (RSOA), λόγω του δυναμικού του κέρδους. Ένας οπτικός ενισχυτής ίνας ερβίου (EDFA) χρησιμοποιήθηκε για να αντισταθμίσει τις απώλειες του MZM και η ισχύς εισόδου της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) ήταν σταθερή στα -7,5 dBm. Αυτή η ισχύς εισόδου είναι εφικτή ως άνω όριο σε δίκτυα πρόσβασης, δηλαδή, με δεδομένες τις απώλειες ισχύος στο οπτικό δίκτυο διανομής, η οπτική ισχύς στην είσοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) δεν ξεπερνάει αυτήν την τιμή. Ο δέκτης του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT) αποτελείται από έναν οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου (EDFA) και μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (APD).

Οι μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) περιείχαν έναν εμπορικό (Alcatel-Thales III-V Lab) ανακλαστικό ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (RSOA), ως πομπό του αντιρρευματικού σήματος. Ο ανακλαστικός ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής (RSOA) είχε κέρδος, για σήμα μικρής ισχύος, 13 dB και φάσμα κέρδους, σε 3 dB εύρος ζώνης, 58 nm γύρω από τα 1550 nm. Ο δείκτης θορύβου (noise figure) ήταν 9,2 dB. Το ηλεκτρο-οπτικό εύρος ζώνης επεκτάθηκε στα 5,8 GHz, μέσω ισοστάθμισης με παθητικό φίλτρο και κατάλληλη μετατόπιση κατά 100 GHz του οπτικού ζωνοπερατού φίλτρου στο δέκτη. Λόγος σβέσης 6,4 dB προέκυψε για το 10 Gb/s αντιρρευματικό σήμα. Ο λόγος διαχωρισμού του οπτικού διαζεύκτη (C_0) ήταν 10/90 για να ευνοεί το αντιρρευματικό σήμα, ώστε να αποφεύγεται η υποβάθμιση λόγω θορύβου κατά την επαναδιαμόρφωση.



Εικόνα 17: Πειραματική διάταξη αξιολόγησης τεχνικών ανάκτησης φέρουσας.

Σύμφωνα με την feed-forward τεχνική, το συρρευματικό σήμα που λαμβάνεται, προωθείται από τη φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (APD), με ρυθμισμένη καθυστέρηση $\Delta\tau$ (της τάξης των λίγων nsec για συγχρονισμό των δυφίων), προς τον ανακλαστικό ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (RSOA). Αυτή η τεχνική χρησιμοποιήθηκε, για να συγκριθούν τα αποτελέσματα, με την περίπτωση που εκμεταλλευόμαστε αποκλειστικά τον κορεσμό κέρδους του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA) ώστε να καταπιεστεί η διαμόρφωση του συρρευματικού σήματος [2.33].

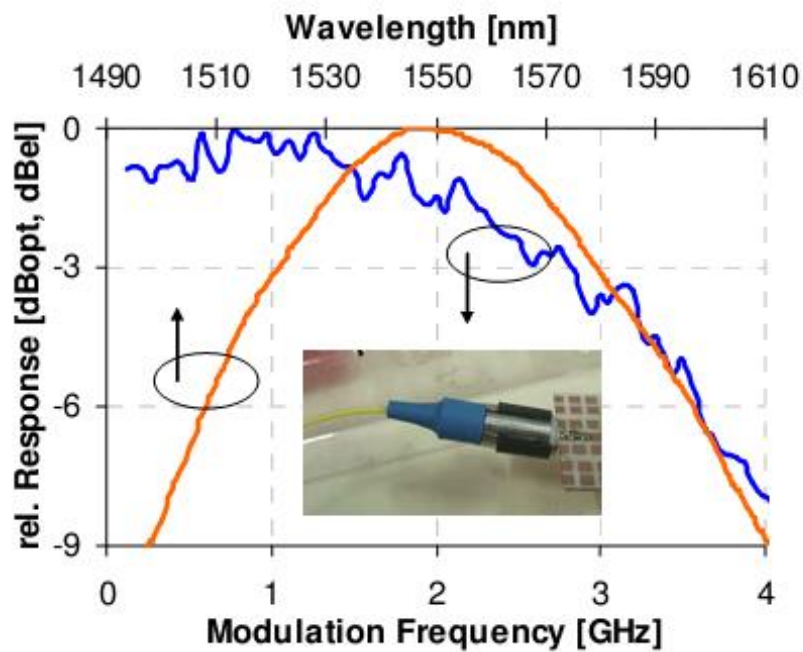
Η τεχνική της αμιγώς οπτικής καταπίεσης της διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος περιλαμβάνει ένα φίλτρο Fabry-Pérot (FPF), με FSR 10 GHz, λεπτότητα 47 και απώλειες εισόδου 2,7 dB. Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα βασισμένο σε ριζο χρησιμοποιήθηκε, ώστε να ευθυγραμμιστούν οι κορυφές της συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου Fabry-Pérot (FPF) με τη φέρουσα του συρρευματικού σήματος. Για τον ίδιο σκοπό, μπορεί κάποιος να μεταβάλλει το μήκος κύματος του λέιζερ, από το οποίο προέρχεται το συρρευματικό σήμα. (Εικόνα 16(δ)). Ένας ελεγκτής πόλωσης συμπεριλήφθηκε με το φίλτρο Fabry-Pérot (FPF), ώστε να διαχειρίζεται την ευαισθησία του στην πόλωση. Το τελευταίο, μπορεί να αποφευχθεί μέσω μίας ολοκληρωμένης σχεδίασης, που χρησιμοποιεί κατάλληλα στοιχεία, όπως φίλτρα δακτυλίου (ring resonators) [2.34].

Ο ανακλαστικός ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής (RSOA) που χρησιμοποιήθηκε, έχει ενδογενή απόκριση διαμόρφωσης ικανοποιητική για μετάδοση δεδομένων 2,5 Gb/s, Εικόνα 18 [2.35], [2.36]. Η οπτική ισχύς στην είσοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) διατηρήθηκε σταθερή στα -10 dBm [2.37].

Η αποτελεσματικότητα της καταπίεσης, που φαίνεται στην Εικόνα 19, μπορεί να φανεί με σύγκριση του σήματος ανάμεσα στην είσοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) και την έξοδο του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA). Για την απλή σχεδίαση της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) χωρίς φίλτρο Fabry-Pérot, το φαινόμενο κορεσμού κέρδους του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA) οδηγεί σε καταπίεση της υπάρχουσας ακολουθίας δεδομένων με αποτελεσματικότητα ~50%. Στην περίπτωση που ο λόγος σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος είναι 3 dB, η ακολουθία εμφανίζει λόγο διακύμανσης του δυφίου '1' του σήματος, 1,5 dB και προκαλεί αρκετές παρεμβολές (crosstalk) στο αντιρρευματικό σήμα [2.38].

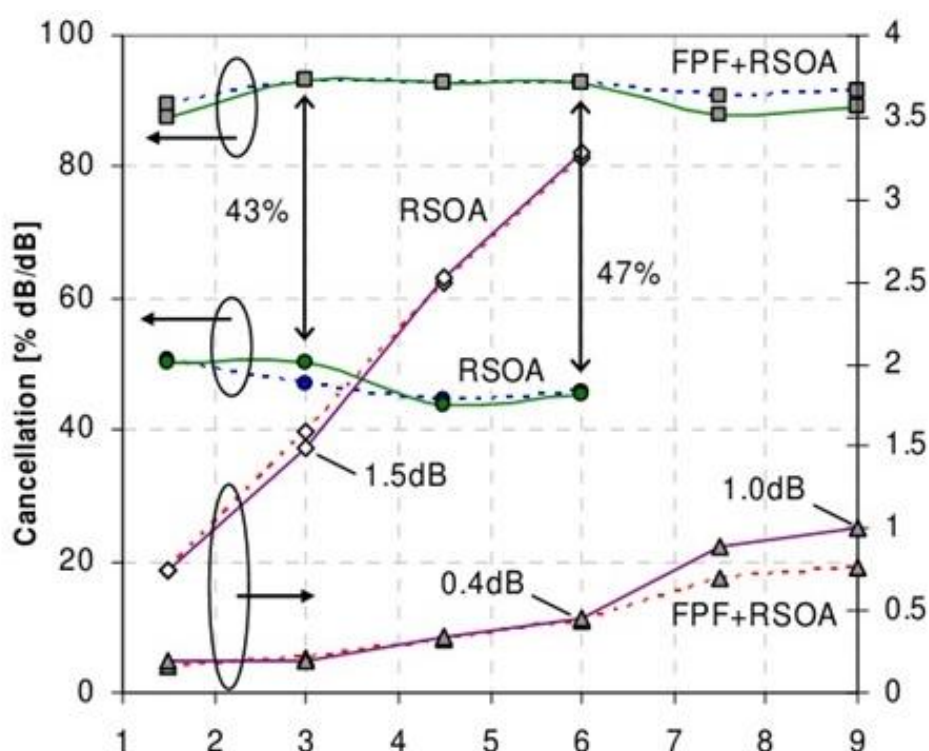
Όταν το φίλτρο Fabry-Pérot χρησιμοποιείται στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), το συρρευματικό σήμα καταπιέζεται περαιτέρω και στο ανακτημένο οπτικό φέρον απομένει μόνο 0,2 dB διακύμανση για την ίδια τιμή λόγου σβέσης (ER), αντιστοιχώντας σε αποτελεσματικότητα 93%. Για υψηλότερους λόγους σβέσης (ER), το μήκος της PRBS αρχίζει να επηρεάζει την καταπίεση του σήματος, λόγω του

μεγάλου αριθμού των συνεχόμενων μηδενικών και της περιορισμένης επίδρασης του φαινομένου μνήμης του φίλτρου για δεδομένη τιμή λεπτότητας. Αυτό παρατηρείται για λόγο σβέσης (ER) υψηλότερο των 6 dB και PRBS μήκους $2^{31}-1$, που απεικονίζεται με συνεχόμενες γραμμές στην Εικόνα 19, καθώς παρουσιάζει ανεπαίσθητα μειωμένη δυνατότητα καταπίεσης, αν συγκριθεί με τη μικρότερου μήκους PRBS, 2^7-1 (διακεκομμένες γραμμές). Ωστόσο αυτή η διαφορά είναι μικρή (<3%) και αποδεικνύει ότι αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε GPON συστήματα.



Εικόνα 18: Οπτικό φάσμα κέρδους και ηλεκτρο-οπτικής απόκρισης του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA) για ισχύ εισόδου -10 dBm.

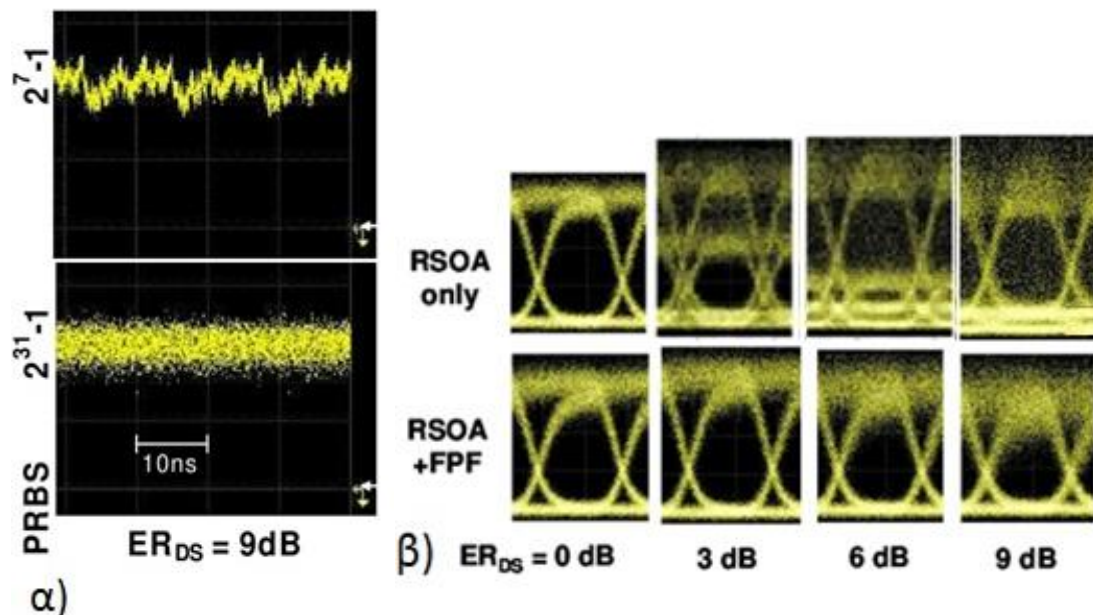
Με υψηλότερη λεπτότητα του φίλτρου Fabry-Pérot, που μεταφράζεται σε ισχυρότερη παρουσία του φαινομένου μνήμης, αυτή η ευαισθησία στο μήκος της PRBS, μπορεί να μειωθεί [2.39]. Αν συνυπολογιστεί ο κορεσμός κέρδους του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA), η καταπίεση του συρρευματικού σήματος μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και για υψηλές τιμές λόγου σβέσης (ER), 6 και 9 dB, για τις οποίες ο λόγος διακύμανσης του δυφίου '1' του σήματος, για PRBS μήκους $2^{31}-1$, είναι σε χαμηλά επίπεδα, 0,4 και 1 dB, αντίστοιχα. Η Εικόνα 20(α) δείχνει τα ανακτημένα οπτικά φέροντα στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) με το φίλτρο Fabry-Pérot, για αρχικό λόγο σβέσης (ER) 9 dB του συρρευματικού σήματος και PRBS μήκους 2^7-1 and $2^{31}-1$. Το φίλτρο Fabry-Pérot έχει 2 dB απώλεια εισόδου, ενώ μία επιπρόσθετη απώλεια μεταξύ 0,3 και 1 dB για λόγο σβέσης (ER) από 3 μέχρι 9 dB εισάχθηκε λόγω του φιλτραρίσματος του Fabry-Pérot. Αυτή η διαφορά στην επίδοση των δύο μονάδων οπτικού δικτύου (ONU) είναι επίσης φανερή από τα διαγράμματα οφθαλμού των αντιρρευματικών σημάτων, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 20(β).



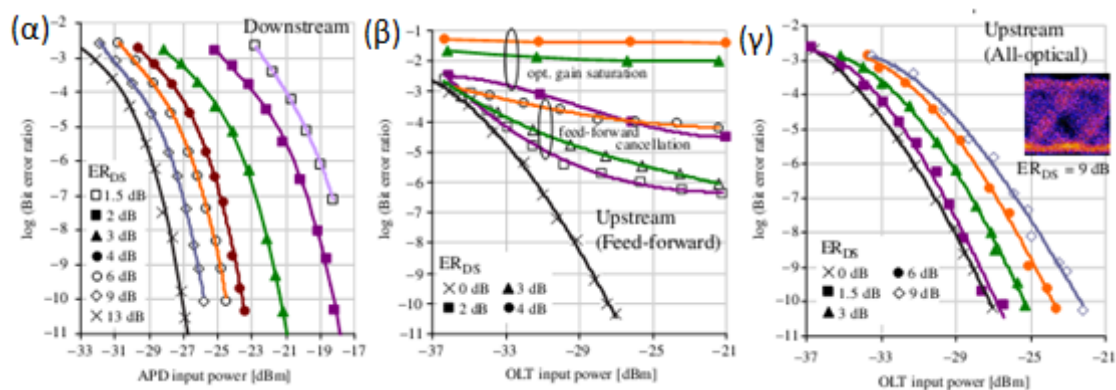
Εικόνα 19: Αποτελεσματικότητα καταπίεσης του λόγου διακύμανσης του δυφίου '1' του σήματος ως συνάρτηση του λόγου σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος. Συνεχόμενες και διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν σε PRBS μήκους $2^{31}-1$ και 2^7-1 , αντίστοιχα. Η τιμές που σημειώνονται αντιστοιχούν στις μεγάλες PRBS.

Η ευαισθησία λήψης του συρρευματικού σήματος είναι πολύ σημαντική, καθώς οπτικοί ενισχυτές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), λόγω κόστους. Ο λόγος σβέσης του συρρευματικού σήματος έχει μεγάλη επίδραση στον ASK/ASK τύπο διαμόρφωσης δεδομένων, όπου ένας μειωμένος λόγος σβέσης 3 dB προκαλεί ποινή ισχύος λήψης 5,8 dB για ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων (BER) 10^{-10} . Αντίθετα, η ποινή ισχύος είναι μόλις 1,2 dB για λόγο σβέσης (ER) 9 dB (Εικόνα 21(α)).

Από την άλλη μεριά, υψηλότεροι λόγοι σβέσης προκαλούν ισχυρότερες παραμορφώσεις στο αντιρρευματικό σήμα. Για λόγο σβέσης (ER) 3 dB του συρρευματικού σήματος, το αντιρρευματικό σήμα ήδη παρουσιάζει διακύμανση πλάτους λόγω της εναπομένουσας διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος. Αυτή η διακύμανση πλάτους στο δυφίο '1' είναι ίση με 2,3 και 1,5 dB στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται αποκλειστικά κορεσμός οπτικού κέρδους και επιπλέον feed-forward καταπίεση, αντίστοιχα (Εικόνα 16). Αυτή η υψηλή παραμόρφωση στο αντιρρευματικό σήμα προκαλεί όριο λαθών (BER floor) πάνω από το επίπεδο ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων 10^{-10} (Εικόνα 21(β)).



Εικόνα 20: α) Ανακτημένη οπτική φέρουσα στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) με φίλτρο Fabry-Pérot, για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος 9 dB. Τα βελάκια από δεξιά απεικονίζουν το επίπεδο αναφοράς του PIN δέκτη. (β) Διαγράμματα οφθαλμού του αντιρρευματικού σήματος για τις δύο υλοποιήσεις της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) και διαφορετικούς λόγους σβέσης (ER).



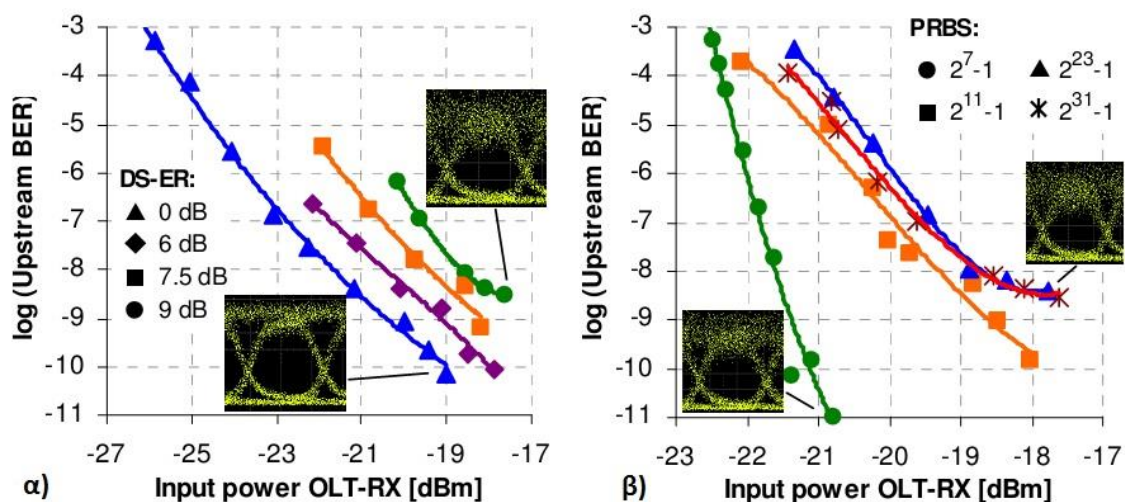
Εικόνα 21: Επίδοση ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) για (α) το συρρευματικό και (β) το αντιρρευματικό σήμα συμπεριλαμβάνοντας την τεχνική ανάκτησης φέρουσας feed-forward και (γ) την αμιγώς οπτική.

Παρ' όλα αυτά, η feed-forward καταπίεση επιτρέπει λήψη με εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) Reed–Solomon (255, 239) σε επίπεδο ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) 10^{-4} , ενώ η οπτική καταπίεση κέρδους δεν επιτρέπει, για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος 2 dB. Ωστόσο, αποτελεσματική καταπίεση του συρρευματικού σήματος επιτεύχθηκε μόνο όταν υπήρχε ένα οπτικό σήμα αρκετά ισχυρό ώστε να φτάνει ο ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής στον κορεσμό, ή πιο ευνοϊκός λόγος ανάμεσα στο εύρος ζώνης διαμόρφωσης και στο ρυθμό μετάδοσης του αντιρρευματικού σήματος. Σε αντίθεση με αυτό, η αμιγώς οπτική τεχνική καταπίεσης επιτρέπει πολύ υψηλότερους λόγους σβέσης του συρρευματικού σήματος (9 dB), καθώς επιτυγχάνεται η καταπίεση παρουσιάζοντας διακύμανση πλάτους μόνο 0,85 dB. Αυτή η χαμηλή υποβάθμιση επιτρέπει να φτάσουμε σε ρυθμούς εμφάνισης σφαλμάτων τάξης 10^{-10} ακόμη και για λόγο σβέσης του συρρευματικού σήματος 9 dB. Η ποινή λήψης είναι τότε μόλις 4,9 dB συγκρινόμενη με την ιδανική περίπτωση, όπου το συρρευματικό σήμα δεν είναι διαμορφωμένο (Εικόνα 21(γ)).

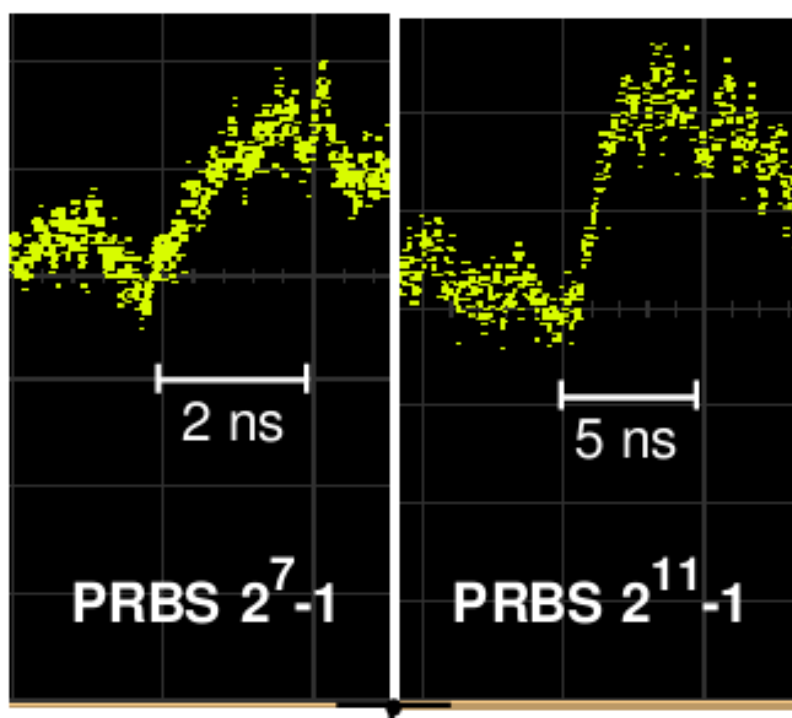
2.4 Πειραματική αξιολόγηση της αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας

Για την αξιολόγηση της επίδοσης της αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας και τη διερεύνηση του εύρους λειτουργίας της, μία περαιτέρω πειραματική αξιολόγηση ως προς το μήκος της PRBS και το φασματικό εύρος ζώνης του φίλτρου Fabry-Pérot διενεργήθηκε. Για αυτή τη μελέτη, όπου θεωρείται η ποινή ισχύος λήψης του αντιρρευματικού σήματος ως αξιολογικό κριτήριο, ο ανακλαστικός ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής (RSOA) στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), στην Εικόνα 17, αντικαθίσταται από ένα συνδυασμό MZM και οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου (EDFA), προς αποφυγή επιπλέον φαινομένων, λόγω της συγκεκριμένης ακολουθίας δεδομένων, στο διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος. Οι συνθήκες οδήγησης του MZM, η ισχύς εισόδου και το κέρδος του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου (EDFA), ρυθμίστηκαν για να έχουμε σταθερό λόγο σβέσης (ER) στο αντιρρευματικό σήμα, σταθερό κέρδος στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) και σταθερό σηματοθορυβικό λόγο (OSNR) στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU). Σημειώνεται ότι για αυτήν την πειραματική μελέτη, ο δέκτης στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) αντικαταστάθηκε από P-I-N φωτοδίοδο, καθώς οι απώλειες που εισάγονται είναι λιγότερες, λόγω της χρήσης του MZM.

Η Εικόνα 22(α) δείχνει την επίδοση της λήψης του αντιρρευματικού σήματος, με PRBS $2^{31}-1$ στα δεδομένα του συρρευματικού και του αντιρρευματικού σήματος. Συγκριτικά με την περίπτωση της PRBS 2^7-1 , το φαινόμενο της οπτικής μνήμης από το φίλτρο Fabry-Pérot δεν είναι αρκετά ισχυρό πλέον, για να εμποδιστούν οι διακυμάνσεις στο πλάτος της ανακτημένης οπτικής φέρουσας και συνεπώς η μεγαλύτερη ακολουθία συνεχόμενων δυφίων '0' προκαλεί κατώφλι λαθών λίγο πάνω από το επίπεδο ρυθμού σφαλμάτων 10^{-9} , στην περίπτωση που ο λόγος σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος είναι 9 dB.



Εικόνα 22 Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) του αντιρρευματικού σήματος για (α) PRBS $2^{31}-1$ και διαφορετικούς λόγους σθέσης (ER) του συρρευματικού σήματος, και (β) για δεδομένο λόγο σθέσης (ER) του συρρευματικού σήματος και διαφορετικά μήκη PRBS.



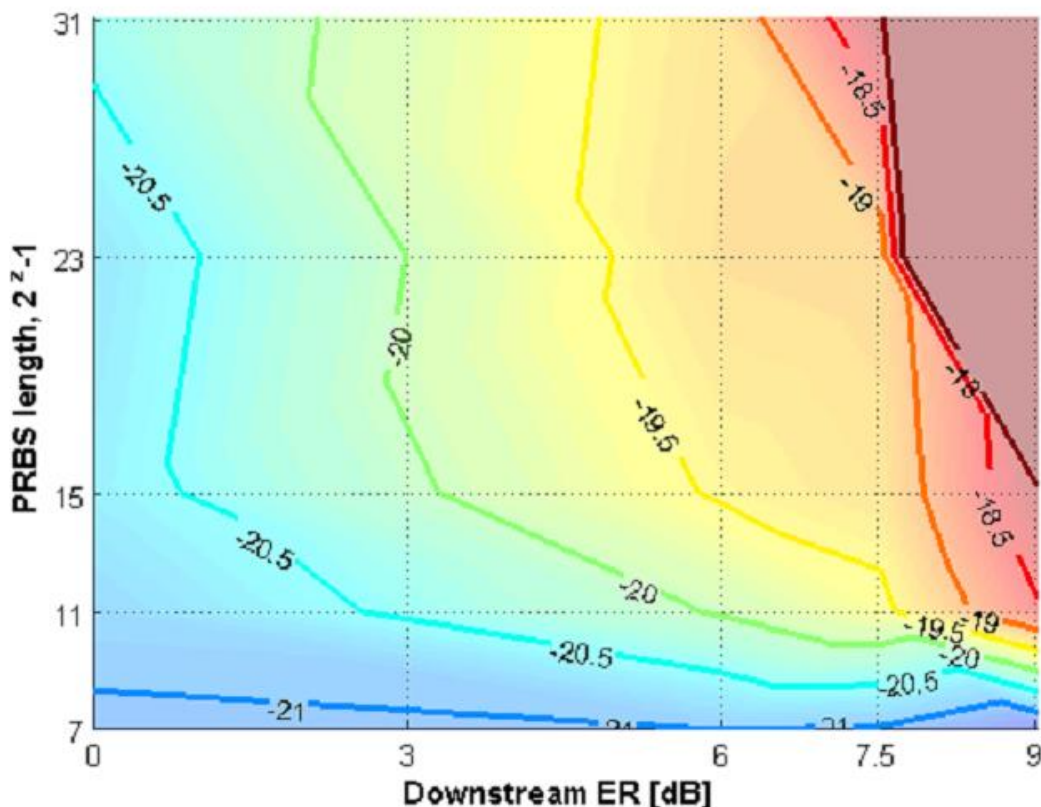
Εικόνα 23: Ανακτημένη οπτική φέρουσα μετά το φίλτρο Fabry-Pérot για την περίπτωση των μέγιστων συνεχόμενων δυφίων '0' στα PRBS δεδομένα.

Όπως προκύπτει επίσης από την εξίσωση 2.18, η επίδοση ρυθμού εμφάνισης λαθών μπορεί να βελτιωθεί επιλέγοντας είτε υψηλότερη λεπτότητα F ή, σε περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό, όπως στο πείραμα που παρουσιάζεται, επειδή δεν υπήρχε

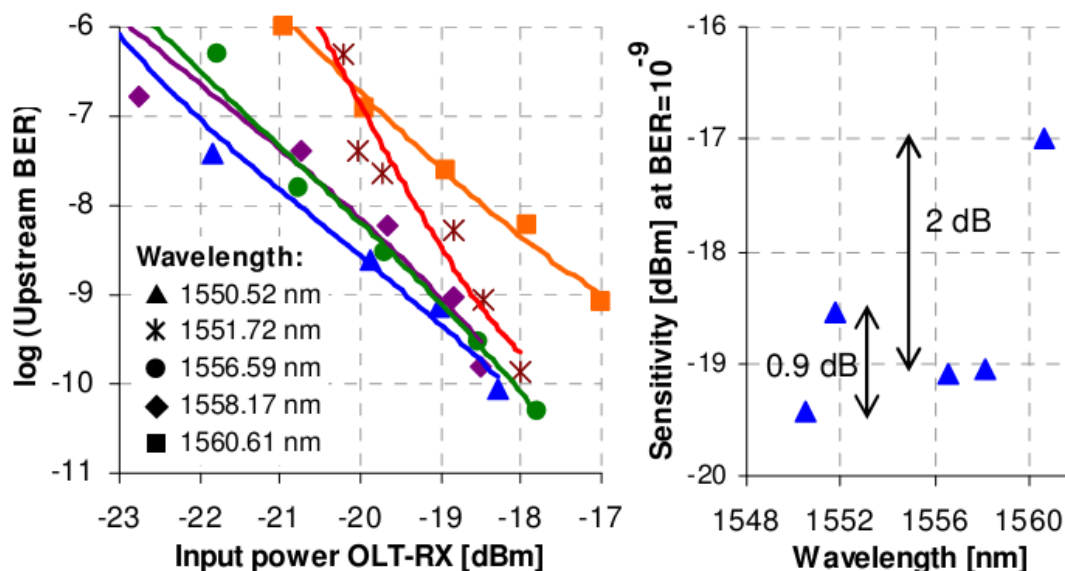
διαθέσιμο φίλτρο Fabry-Pérot, με χαμηλότερο λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος. Η διακύμανση του πλάτους μειώνεται, όσο μειώνεται ο λόγος σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος, και για λόγο σβέσης (ER) 7,5 dB, ρυθμός εμφάνισης λαθών (BER) στο επίπεδο του 10^{-9} μπορεί να ληφθεί, αφήνοντας απλώς μία ποινή ισχύος 2,3 dB, σε σύγκριση με την περίπτωση επαναδιαμόρφωσης της οπτικής φέρουσας, χωρίς την παρουσία διαμορφωμένων δεδομένων στο συρρευματικό σήμα. Σημειώνεται ότι αυτή η μείωση του λόγου σβέσης (ER), οδηγεί θεωρητικά στην αύξηση της ποινής ισχύος λήψης του συρρευματικού σήματος κατά 0,46 dB.

Η εξάρτηση της επίδοσης του αντιρρευματικού σήματος από το μήκος της PRBS, για δεδομένο λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος στα 9 dB, παρουσιάζεται στην Εικόνα 22(β). Όπως είναι φανερό, κάτω όριο λαθών εμφανίζεται για μεγαλύτερα μήκη PRBS, $2^{23}-1$ και $2^{31}-1$. Η Εικόνα 23, δείχνει την εναπομένουσα διαμόρφωση δεδομένων του συρρευματικού σήματος, με λόγο σβέσης (ER) 9 dB, σε συνεχόμενα δυφία '0', για περίπτωση PRBS 2^7-1 και $2^{11}-1$. Η δεύτερη, προκαλεί μία ελαφρώς υψηλότερη διακύμανση στο πλάτος της ανακτημένης οπτικής φέρουσας

Η Εικόνα 24 δείχνει την ευαισθησία λήψης του αντιρρευματικού σήματος σε επίπεδο ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-9} , για διαφορετικά μήκη PRBS και διαφορετικούς λόγους σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος. Για χαμηλές και ενδιάμεσες τιμές του λόγου σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος, δεν παρατηρείται ισχυρή ποινή ισχύος λήψης για μεγάλα μήκη PRBS, καθώς η λεπτότητα του διαθεσίμου φίλτρου Fabry-Pérot είναι επαρκώς υψηλή για να εμποδίσει την ύπαρξη ορίου λαθών, ξεπερνώντας το προαναφερθέν επίπεδο ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER). Όταν ο λόγος σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος αυξάνεται σε 7,5 dB και παραπάνω, επιπλέον ποινή ισχύος λήψης εισάγεται για μεγάλα μήκη PRBS. Για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος 9 dB, δεν καθίσταται δυνατή η λειτουργία χωρίς σφάλματα για ακολουθίες δεδομένων με μήκος PRBS $2^{23}-1$ ή μεγαλύτερο.



Εικόνα 24: Ευαισθησία λήψης του αντιρρευματικού σήματος για ρυθμό εμφάνισης λαθών (BER) επιπέδου 10^{-9} ως συνάρτηση του λόγου σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος και του μήκους της PRBS. Η σκοτεινή περιοχή πάνω δεξιά δείχνει την περιοχή όπου το όριο λαθών είναι πιο ψηλά από 10^{-9} .



Εικόνα 25: Ρυθμός εμφάνισης λαθών (BER) του αντιρρευματικού σήματος για διαφορετικά μήκη κύματος του συρρευματικού σήματος και αντίστοιχο φάσμα ευαισθησίας λήψης για ρυθμό εμφάνισης λαθών 10^{-9} .

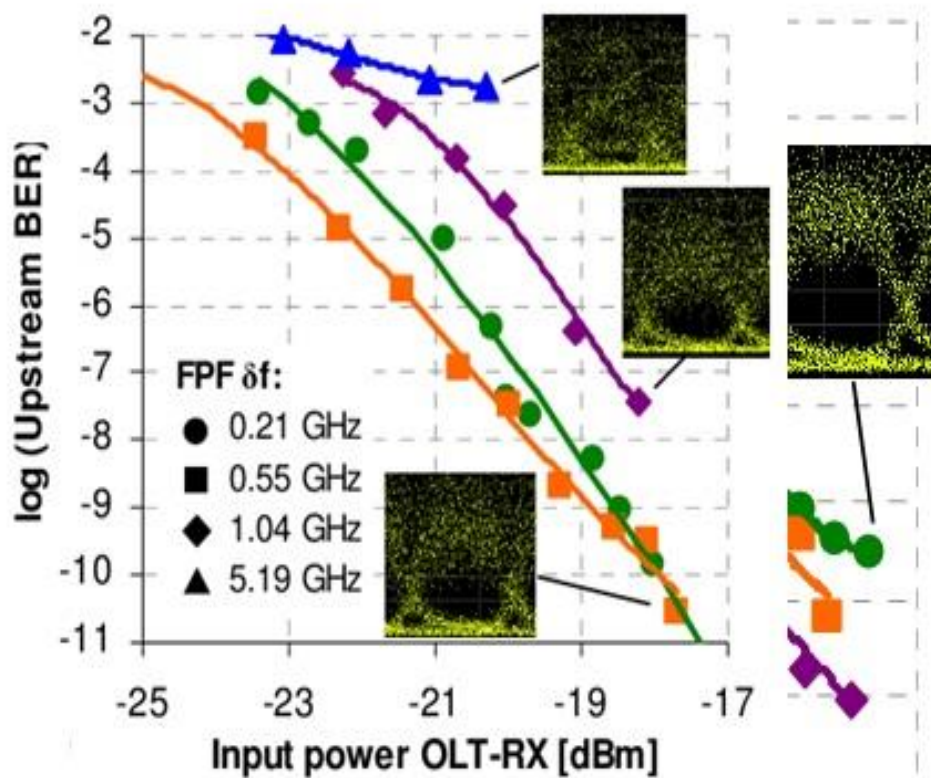
Καθώς το φίλτρο Fabry-Pérot έχει περιοδική συνάρτηση μεταφοράς, παρέχει μία λύση διαφανή στο μήκος κύματος και είναι συμβατό με WDM συστήματα μετάδοσης. Για να παρουσιαστεί η διαφανή στο μήκος κύματος λειτουργία της αμιγώς οπτικής καταπίεσης της διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος, μετρήθηκε το αντιρρευματικό σήμα για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος 9 dB, εύρος ζώνης του φίλτρου 0,21 GHz και PRBS $2^{11}-1$, για διαφορετικά μήκη κύματος. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 25, η ευαισθησία λήψης στο επίπεδο ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-9} , διαφέρει μόλις κατά 0,9 dB. Η μεγαλύτερη ποινή ισχύος λήψης των ~2 dB για μήκος κύματος 1560,61 nm αποδίδεται στο προφίλ κέρδους του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου (EDFA) στη C-Band, καθώς το μήκος κύματος του συρρευματικού σήματος βρισκόταν ήδη στη περιοχή υψηλού κέρδους.

Η επίδραση της λεπτότητας του φίλτρου Fabry-Pérot, η οποία εξαρτάται από το εύρος ζώνης του φίλτρου δf , απεικονίζεται στην Εικόνα 26, η οποία δείχνει την επίδοση του αντιρρευματικού σήματος, για λόγο σβέσης (ER) 9 dB του συρρευματικού σήματος. Καθώς η υψηλότερη διαθέσιμη λεπτότητα φίλτρου ήταν 47, τα αποτελέσματα είναι για δεδομένα PRBS $2^{11}-1$, και η λεπτότητα σταδιακά μειώνεται, για να εξεταστεί η επίδρασή της στις μετρήσεις σφαλμάτων.

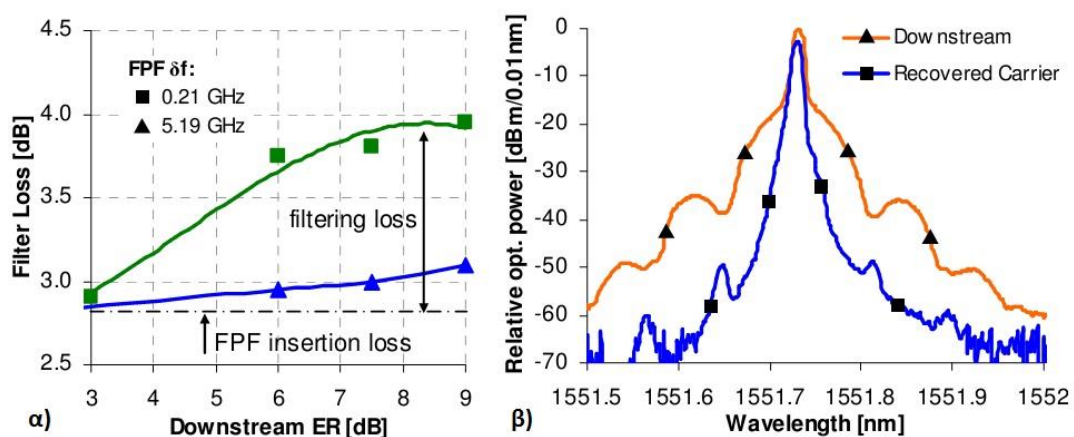
Η ευαισθησία λήψης του αρχικού φίλτρου Fabry-Pérot με $\delta f = 0,21$ GHz μπορεί να διατηρηθεί με ελάχιστα μεγαλύτερο εύρος ζώνης 0,55 GHz. Ωστόσο, με περαιτέρω αύξηση του εύρους ζώνης, εισάγονται επιπλέον λάθη και εμφανίζεται όριο λαθών (BER floor), καθώς η αποτελεσματικότητα της καταπίεσης του συρρευματικού σήματος ελαττώνεται. Ως αποτέλεσμα, με φίλτρο εύρους ζώνης περίπου ίσο με το μισό του ρυθμού μετάδοσης, δεν είναι εφικτή η μετάδοση στο επίπεδο της επιτυχούς εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC).

Η καταπίεση του συρρευματικού σήματος με στενό φίλτρο υπόκειται σε απώλειες καθώς η πληροφορία διαμόρφωσης του σήματος απορρίπτεται. Αυτές οι απώλειες φαίνονται στην Εικόνα 27(α) για τις δύο ακραίες περιπτώσεις όπου $\delta f = 0,21$ και 5,19 GHz. Οι επιπλέον απώλειες 1,2 dB που παρατηρούνται για το στενού εύρους φίλτρο, για λόγο σβέσης (ER) 9 dB του συρρευματικού σήματος, είναι σχετικά μικρές, συγκρινόμενες με τις απώλειες εισόδου που αναπόφευκτα θα παρουσιάζονταν κατά

την είσοδο μίας αδιαμόρφωτης φέρουσας στο φίλτρο Fabry-Pérot. Τα φάσματα του συρρευματικού σήματος και της ανακτημένης οπτικής φέρουσας φαίνονται στην Εικόνα 27(β), όπου η καταπίεση των πλευρικών λοβών είναι εμφανής.



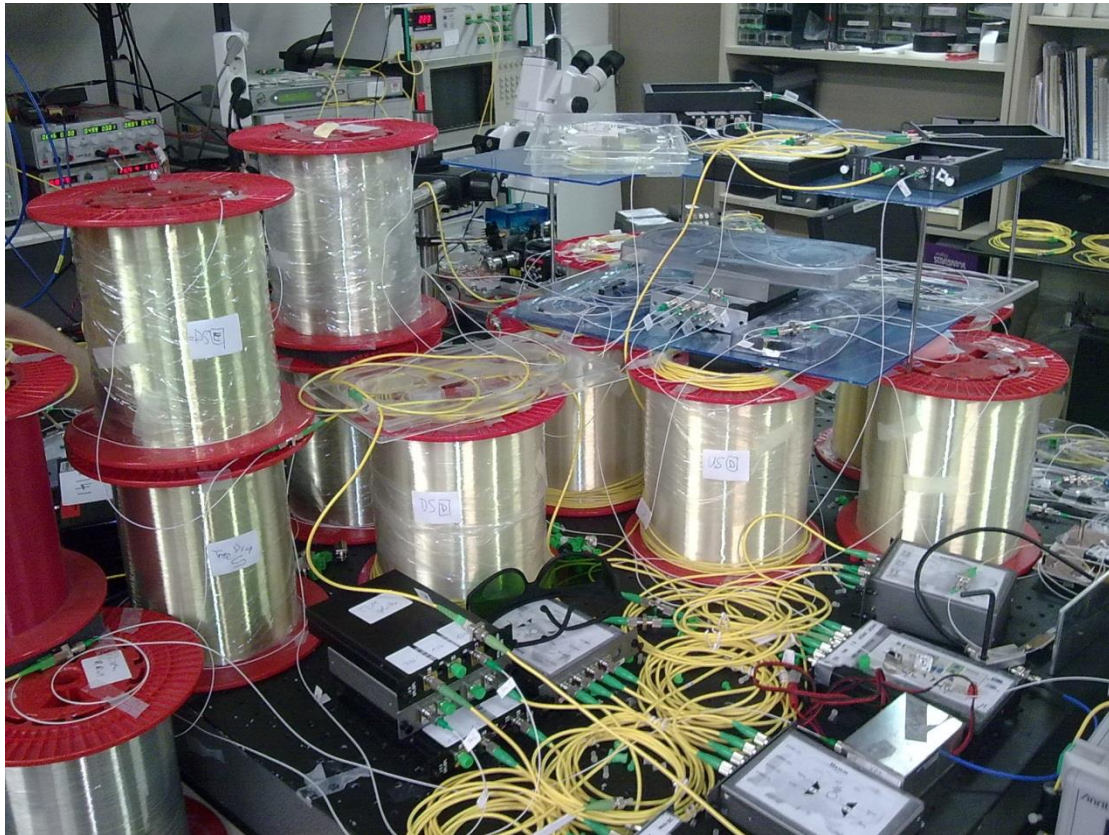
Εικόνα 26: Ρυθμός εμφάνισης λαθών (BER) του αντιρρευματικού σήματος για PRBS $2^{11}-1$ και λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος 9 dB για διαφορετικά εύρη ζώνης του φίλτρου Fabry-Pérot.



Εικόνα 27: (α) Απώλειες του φίλτρου Fabry-Pérot και (β) φάσματα του συρρευματικού σήματος και της ανακτηθείσας φέρουσας, των οποίων η οπτική ισχύς είναι κανονικοποιημένη με βάση τη μέγιστη τιμή.

2.5 Εφαρμογή αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας σε συμμετρικά, 10 Gb/s, παθητικά οπτικά δίκτυα πολυπλεξιάς μήκους κύματος

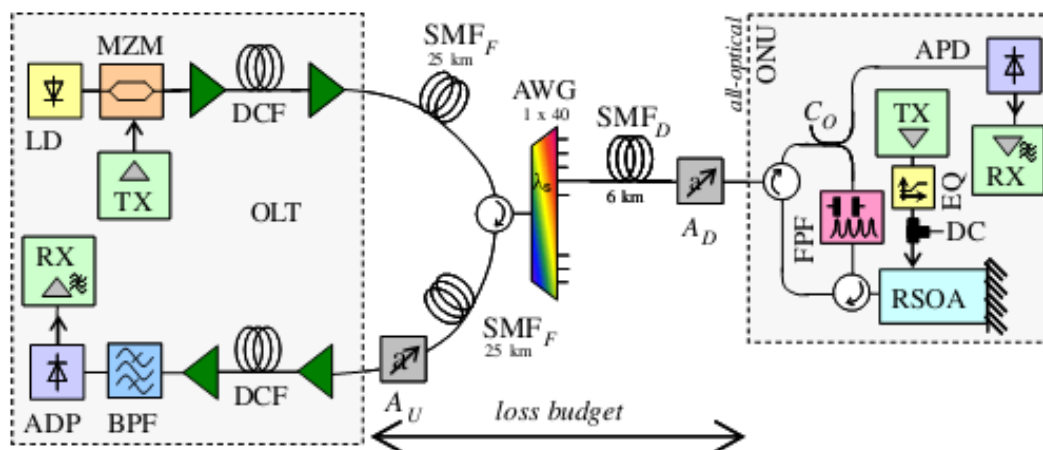
Οι δομές μονάδων οπτικού δικτύου που παρουσιάστηκαν, ενσωματώθηκαν, για περαιτέρω αξιολόγηση, σε WDM-PON δίκτυο (Εικόνα 29), που αποτελείται από διπλή ίνα τροφοδότησης και τελική ίνα στο χρήστη μήκους 25 και 6 χλμ, αντίστοιχα. Η πειραματική διάταξη υλοποιήθηκε στο Πολυτεχνείο της Καταλονίας (Εικόνα 28). Ένα ρυθμισμένο κατάλληλα ζωνοπερατό φίλτρο (BPF) χρησιμοποιήθηκε, όπως στη feed-forward τεχνική, ώστε να επιτευχθεί 10 Gb/s λειτουργία του ανακλαστικού ημιαγωγίου οπτικού ενισχυτή. Ίνες αντιστάθμισης διασποράς τοποθετήθηκαν στο τερματικό οπτικών γραμμών, για ακύρωση ανεπιθύμητων φαινομένων κατά τη μετάδοση. Ο λόγος του οπτικού διαζεύκτη (C_0), εντός της μονάδας οπτικού δικτύου, ήταν 10/90, ώστε να ευνοηθεί το αντιρρευματικό σήμα, εμποδίζοντας την υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου κατά την επαναδιαμόρφωση.



Εικόνα 28: Εργαστηριακή απεικόνιση της πειραματικής διάταξης στο Πολυτεχνείο της Καταλονίας.

Το συρρευματικό σήμα στην έξοδο του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT) είχε ισχύ 6 dBm. Ο σηματοθορυβικός λόγος (OSNR) ήταν 46,8 dB, για λόγο σβέσης (ER) 3 dB, μετά τον ενισχυτή του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT), και 40 dB μετά την επαναδιαμόρφωση από τον ανακλαστικό ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (RSOA) στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), του οποίου το κέρδος περιοριζόταν στα 5,8 dB, λόγω του μικρού κέρδους χαμηλής ισχύος σήματος του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA). Το OSRR ήταν >29 dB για το συρρευματικό και αντιρρευματικό σήμα και συνεπώς δεν αναμένεται καμία υποβάθμιση από την ίνα τροφοδότησης λόγω της οπισθοσκέδασης Rayleigh.

Η επίδοση μετάδοσης του PON αποτιμήθηκε σε σχέση με την ευαισθησία λήψης του συρρευματικού και του αντιρρευματικού σήματος σε δύο αντιπροσωπευτικά επίπεδα ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER): ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων (BER) τάξης 10^{-10} , το οποίο θεωρείται αρκετά χαμηλό ώστε να επιτρέπει λειτουργία χωρίς λάθη, δίχως να απαιτεί κάποια επιπλέον κωδικοποίηση των δεδομένων, και ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων (BER) τάξης 10^{-4} , που επιτρέπει τη μετάδοση σε συνδυασμό με Reed–Solomon (255, 239) εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) [2.40], όπως έχει προταθεί για gigabit PON συστήματα [2.41].



Εικόνα 29: Πειραματική διάταξη αξιολόγησης της τεχνικής αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας σε WDM-PON, αμφίδρομης μετάδοσης δεδομένων 10 Gb/s, σε ένα μήκος κύματος.

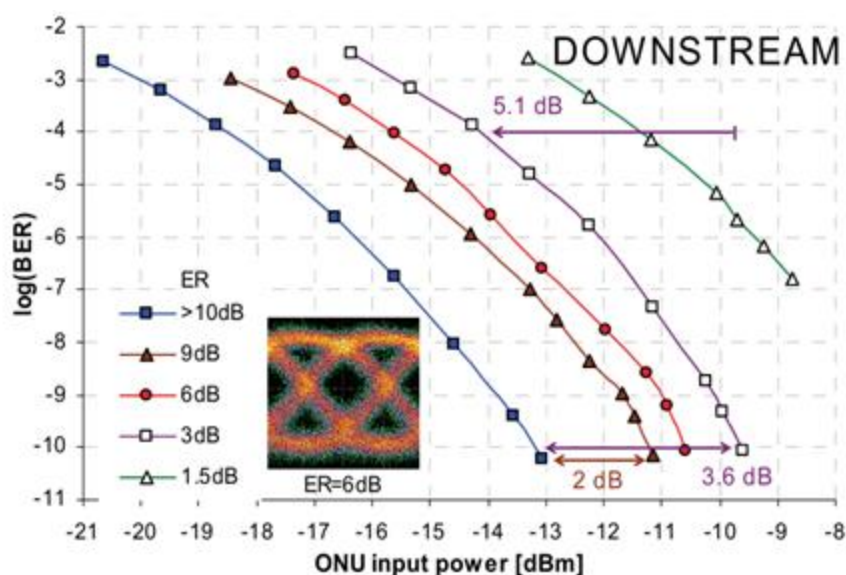
Ως μετρική αξιολόγησης της μετάδοσης, ορίζεται το περιθώριο ισχύος (power margin), το οποίο υπολογίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στην ισχύ που φτάνει στο δέκτη και την ευαισθησία λήψης. Η ισχύς που φτάνει στο δέκτη υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ του συρρευματικού και του αντιρρευματικού σήματος στην έξοδο του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT) και της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) αντίστοιχα, και τον ισολογισμό απωλειών του PON, εκτός των απωλειών των ρυθμιζόμενων εξασθενητών (A_D , A_U). Το περιθώριο ισχύος μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω στην συρρευματική και αντιρρευματική μετάδοση, μέσω χρήσης εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC), κατά τιμή που αντιστοιχεί στη διαφορά ανάμεσα στην ευαισθησία λήψης σε επίπεδα ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) 10^{-10} και 10^{-4} .

Πίνακας 4: Βέλτιστος λόγος σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος και αντίστοιχες διαφορές ισχύος.

	Χωρίς εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC)	Εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) για συρρευματικό σήμα	Εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) και για το αντιρρευματικό σήμα
Βέλτιστος λόγος σβέσης (ER) [dB]	9	9	9
Περιθώριο ισχύος συρρευματικού σήματος [dB]	5.0	9.0	9.0
Περιθώριο ισχύος αντιρρευματικού σήματος [dB]	7.1	7.1	15
Ανισοκατανομή [dB]	2.1	1.9	6.0

Ο βέλτιστος λόγος σβέσης (ER) για το συρρευματικό σήμα ορίζεται για τις πιο ισορροπημένες διαφορές ισχύος (ανισοκατανομή) για τη λήψη του συρρευματικού και αντιρρευματικού σήματος. Ο Πίνακας 4 συνοψίζει το βέλτιστο λόγο σβέσης (ER) που βρέθηκε για διαφορετικά μήκη PRBS και επίπεδα ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων

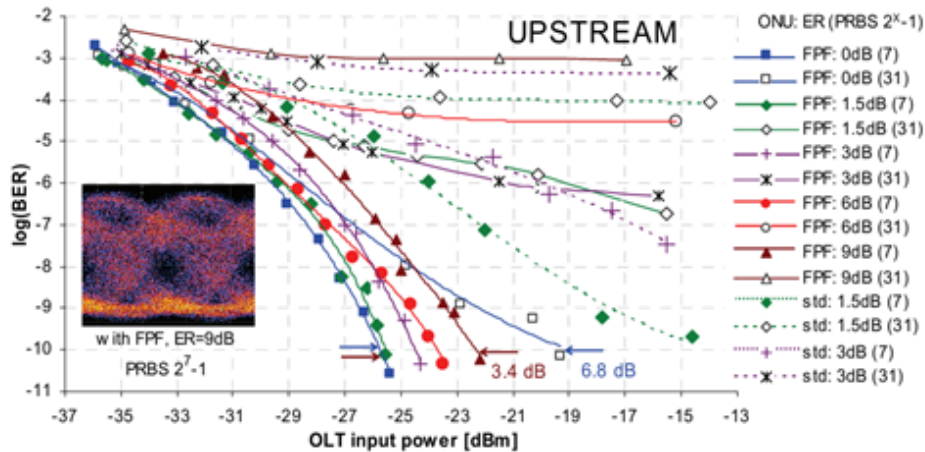
(BER), και αναφέρει τις διαφορές ισχύος που αντιστοιχούν σε κάθε περίπτωση. Για να αποφευχθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα από τον ανακλαστικό ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (RSOA), η μικρού μήκους PRBS 2^7-1 επιλέχθηκε για αυτή τη διερεύνηση, παρόλο που δεν προσομοιώνει καλά την κίνηση δεδομένων στα νέας γενιάς πρότυπα των PON. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιήθηκαν μακρύτερες PRBS, το δυναμικό κέρδος του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA) προκάλεσε αρκετές παραμορφώσεις στην ακολουθία δεδομένων του αντιρρευματικού σήματος και επιδείνωσε την επίδοση μετάδοσης περαιτέρω από ότι παρατηρήθηκε προηγουμένως, ακόμη και για την περίπτωση όπου οπτικά σήματα συνεχούς κύματος (CW) εισέρχονταν στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU).



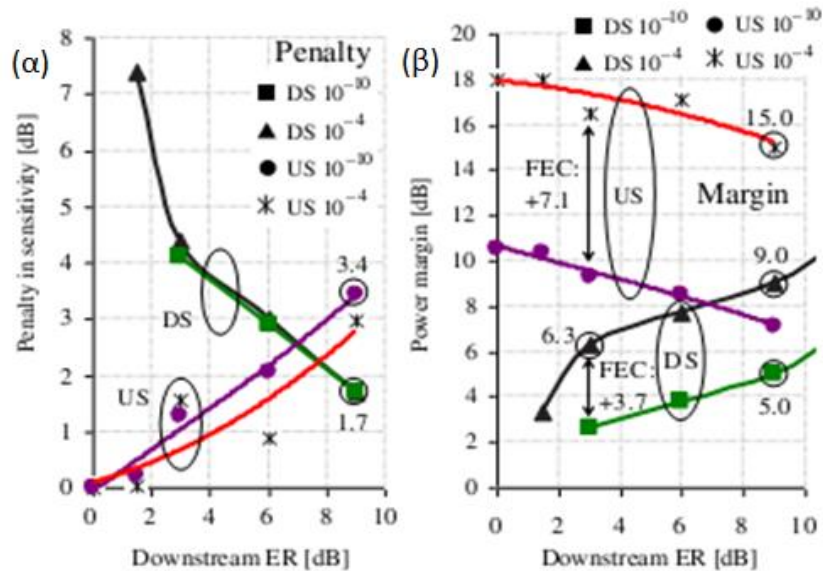
Εικόνα 30: Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) για το συρρευματικό σήμα με PRBS $2^{31}-1$, για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος από 0 έως >10 dB.

Ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων (BER) του συρρευματικού σήματος για την απλή μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), ο οποίος για λόγους συντομίας δεν περιλαμβάνεται στην Εικόνα 30, επωφελείται από την απουσία του κυκλοφορητή, η οποία μειώνει τις απώλειες. Ωστόσο, λόγοι σβέσης (ER) υψηλότεροι των 3 dB δεν είναι συμβατοί με τη διαμόρφωση του αντιρρευματικού σήματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 31. Εν αντιθέσει, η μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) με φίλτρο Fabry-Pérot (FPF), επιτρέπει λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος έως 6 dB, για αντιρρευματική μετάδοση στο επίπεδο της επιτυχούς εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC), με PRBS μήκους $2^{31}-1$. Για λόγο σβέσης (ER) 9 dB, υπάρχει ποινή ισχύος μόλις 3,4 dB, σε ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων (BER) 10^{-10} , για PRBS μήκους 2^7-1 , αν συγκριθεί με την

περίπτωση όπου δεν υπάρχει διαμόρφωση στο συρρευματικό σήμα. Η ποινή ισχύος λήψης για μεγάλη PRBS μήκους $2^{31}-1$ ανέρχεται σε 6,8 dB για ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων (BER) 10^{-10} . Όπως μπορεί να φανεί από τις μετρήσεις για την απλή μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), αυτή η εξάρτηση στην PRBS δεν οφείλεται στο φίλτρο Fabry-Pérot (FPF), αλλά στο δυναμικό κέρδος του ανακλαστικού ημιαγωγίου οπτικού ενισχυτή (RSOA).



Εικόνα 31: Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) για το αντIRRευματικό σήμα, για λόγο σθέσης (ER) του συρρευματικού σήματος από 0 έως 9 dB. Οι συνεχόμενες γραμμές απεικονίζουν τη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) με αμιγώς οπτική καταπίεση συρρευματικού σήματος (φίλτρο Fabry-Pérot), ενώ οι διακεκομμένες δείχνουν την απλή σχεδίαση της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU). Τα γεμισμένα σημεία αντιστοιχούν σε PRBS 2^7-1 , ενώ τα κενά, σε PRBS $2^{31}-1$.



Εικόνα 32: (α) Ποινές ισχύος λήψης σε σύγκριση με λόγο σθέσης (ER) 13 dB στο συρρευματικό σήμα και 0 dB στο αντIRRευματικό σήμα (ιδανική περίπτωση), (β) Διαφορές ισχύος με και χωρίς εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC).

Η ποινή ισχύος λήψης του συρρευματικού σήματος, η οποία συγκρίνεται με την περίπτωση λόγου σβέσης του συρρευματικού σήματος 13 dB, είναι ~4,3 dB για λόγο σβέσης (ER) 3 dB (Εικόνα 32(α)). Η βελτίωση που παρέχει η εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) είναι 3,7 dB (Εικόνα 32(β)). Χάρη στην αμιγώς οπτική ανάκτηση φέρουσας, για λόγο σβέσης (ER) 9dB του συρρευματικού σήματος, η ποινή φτάνει μόλις στα 1,7 dB, ενώ η βελτίωση που παρέχει η εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) για αυτό το λόγο σβέσης (ER) αυξάνεται ελαφρά στα 4 dB, λόγω διαφορετικής κλίσης της καμπύλης ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER), σε αυτήν την υψηλή τιμή λόγου σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος.

Για το αντιρρευματικό σήμα, λαμβάνεται ποινή ισχύος μόλις 3,4 dB για ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων (BER) 10^{-10} , για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος 9 dB, συγκριτικά με την περίπτωση όπου οπτικό σήμα συνεχούς κύματος (CW) εισέρχεται στον ανακλαστικό ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή (RSOA) (δηλαδή λόγος διακύμανσης πλάτους στο δυφίο '1' του συρρευματικού σήματος, 0 dB). Το κέρδος λόγω εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC) για το αντιρρευματικό σήμα είναι 7,5 και 7,9 dB, για λόγους σβέσης (ER) 0 και 9 dB, αντίστοιχα. Οι ποινές λήψης (Εικόνα 32(α)) μεταφράζονται επίσης σε διαφορές ισχύος (Εικόνα 32(β)). Η εκπομπή υψηλών λόγων σβέσης (ER) για το συρρευματικό σήμα, όπου ούτε η ποινή ισχύος λήψης του συρρευματικού σήματος, ούτε του αντιρρευματικού σήματος είναι μεγάλες, επιτρέπει να εξισοροποιηθούν οι διαφορές ισχύος και στις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης. Αν συμπεριληφθεί εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) στην πιο κρίσιμη λήψη του συρρευματικού σήματος, οι διαφορές ισχύος για υψηλότερο λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος (9 dB) αυξάνονται στα 9 και 7,1 dB για το συρρευματικό και αντιρρευματικό σήμα, αντίστοιχα. Αυτό οδηγεί σε συμβατές απώλειες στο δίκτυο PON, στα 22,5 και 20,7 dB. Ο ισολογισμός απωλειών ισχύος μπορεί να υπολογιστεί από την ισχύ κατά την έξοδο από τον πομπό και την ευαισθησία λήψης, δηλαδή, σε αυτήν την περίπτωση, η ισχύς εξόδου του συρρευματικού σήματος από το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) ήταν 6 dBm και η ευαισθησία λήψης στην είσοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) είναι -16,5 dBm, ενώ η ισχύς εξόδου του αντιρρευματικού σήματος από τη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) ήταν -1,7 dBm και η ευαισθησία λήψης στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT)

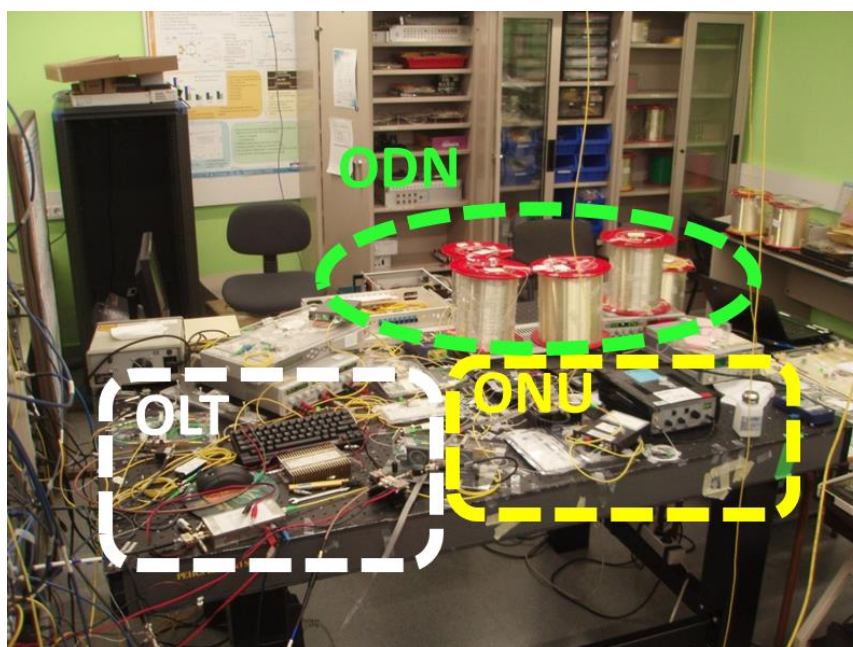
ήταν $-22,4$ dBm. Σημειώνεται ότι αναλόγως της χρήσης εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC), ο λόγος σύζευξης του διαχωριστή ισχύος C_0 εντός της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) μπορεί να μεταβληθεί ώστε να εξισορροπηθούν οι διαφορές ισχύος. Σε σύγκριση με μία τυπική τιμή λόγου σβέσης (ER) 3 dB, για τις συμβατικές τεχνικές ανάκτησης φέρουσας [2.42], όπου οι διαφορές ισχύος λήψης του συρρευματικού και αντιρρευματικού σήματος είναι 2,6 και 9,3 dB αντίστοιχα, στην περίπτωση της πιο αποτελεσματικής αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας, επιπρόσθετη βελτίωση στην εξισορρόπηση διαφοράς ισχύος επιτυγχάνεται, λόγω του υψηλότερου βέλτιστου λόγου σβέσης (ER) των 9 dB, χάρη στη σημαντική μείωση της ποινής ισχύος λήψης του συρρευματικού σήματος. Επομένως, η αμιγώς οπτική ανάκτηση φέρουσας πλησιάζει τις επιδόσεις των ορθογώνιων τύπων διαμόρφωσης [2.43] – [2.44], που επωφελούνται από την ενδογενή μικρή ποινή ισχύος επαναδιαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος, που είναι διαμορφωμένο στη συχνότητα ή στη φάση, φτάνοντας το 1 dB [2.45] – [2.46]. Ωστόσο, με χρήση διαμόρφωσης πλάτους για το συρρευματικό σήμα, πολύπλοκοι διαμορφωτές στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) αποφεύγονται.

Εάν επιπλέον εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) χρησιμοποιηθεί στη λήψη του αντιρρευματικού σήματος, το περιθώριο ισχύος αυξάνεται στα 15 dB, για συρρευματικό σήμα με λόγο σβέσης (ER) 9 dB, αφήνοντας το περιθώριο ισχύος του συρρευματικού σήματος, που είναι 9 dB, ως περιοριστικό παράγοντα. Σημειώνεται ότι, λόγω της δομής του δικτύου WDM-PON, η απαιτούμενη ισχύς εισόδου του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA) πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ισολογισμός απωλειών θα περιοριζόταν στα 13,5 dB, προκύπτοντας από την ισχύ του συρρευματικού σήματος και την ισχύ εισόδου στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), που ανήλθε στην υψηλή τιμή των $-7,5$ dBm, λόγω του χαμηλού κέρδους του ανακλαστικού ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (RSOA). Ωστόσο, δομές με υψηλού κέρδους ανακλαστικούς ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές (RSOA), ικανές να λειτουργήσουν σε επίπεδα οπτικής ισχύος πιο χαμηλά, -20 dBm, έχουν ήδη παρουσιαστεί [2.47].

2.6 Επαναδιαμόρφωση διαφορετικού τύπου συρρευματικών σημάτων, μέσω αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας, σε παθητικά οπτικά δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος

Συσκευές χαμηλού κόστους για την υποδομή του χρήστη, όπως οι ανακλαστικοί ημιαγωγίμοι οπτικοί ενισχυτές (RSOA), παρουσιάστηκαν ήδη στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο, η τεχνική δεν διερευνήθηκε ως προς συρρευματικά σήματα με οπτικές μορφές διαμόρφωσης πολλαπλών σταθμών.

Σε αυτήν την ενότητα, αξιολογείται η επίδοση της αμιγώς οπτικής τεχνικής επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος σε ένα πλήρως αμφίδρομο, συμμετρικό, 10 Gb/s και σε ένα ασύμμετρο, 20/10 Gb/s, WDM-PON, σε πειραματική διαδικασία που διενεργήθηκε στο Πολυτεχνείο της Καταλονίας (Εικόνα 33). Η τεχνική επαναδιαμόρφωσης εφαρμόζεται σε chirped ASK και 4-PAM σήματα, με λόγο σβέσης (ER) έως 10,5 dB, και επίσης διερευνάται η χρήση OFDM. Ενώ η μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) υλοποιήθηκε με χρήση εμπορικών στοιχείων, για την επικύρωση της λειτουργίας της ιδέας, μία ολοκληρωμένη, ενεργειακά αποδοτική σχεδίαση της μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) είναι επίσης δυνατή.

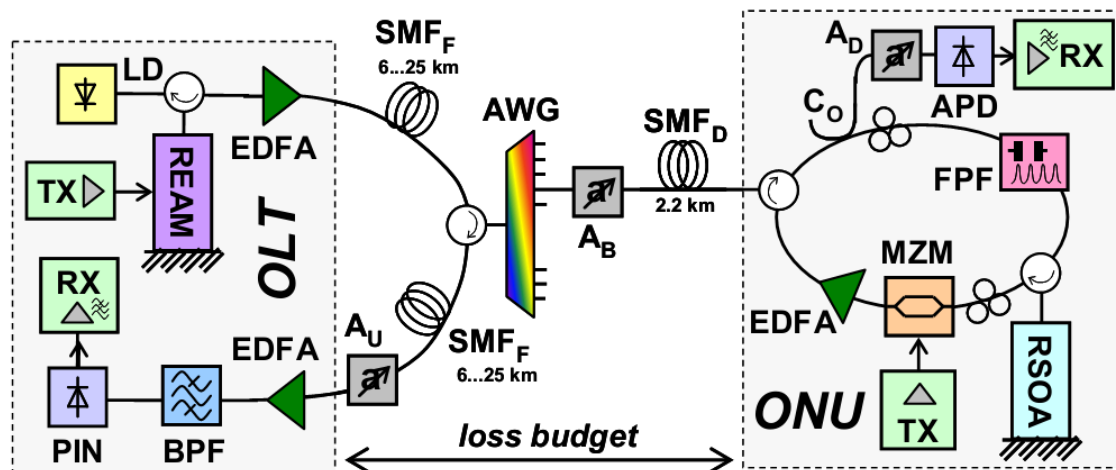


Εικόνα 33: Εργαστηριακή απεικόνιση του πειράματος στο Πολυτεχνείο της Καταλονίας.

Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, η τεχνική επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος υποστηρίζεται από παθητικό φιλτράρισμα στην ανακλαστική μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), η οποία εκμεταλλεύεται το φαινόμενο μνήμης για να ανακτήσει την οπτική φέρουσα του σήματος δεδομένων, που διαμορφώθηκε με μειωμένο λόγο σβέσης (ER). Ένα φίλτρο Fabry-Pérot (FPF), χρησιμοποιήθηκε ως στοιχείο παθητικού φιλτραρίσματος, έχοντας ελεύθερη φασματική περιοχή 10 GHz, λεπτότητα 47 και απώλειες εισόδου 2,7 dB. Όπως και προηγουμένως, ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα βασισμένο σε ριέζο διασφαλίζει ότι η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου Fabry-Pérot, ευθυγραμμίζεται αυτομάτως με το εισερχόμενο συρρευματικό σήμα, επιτρέποντας τη λειτουργία του συστήματος.

Το σήμα πολλαπλών σταθμών του συρρευματικού σήματος παράχθηκε από μία γεννήτρια τυχαίων κυματομορφών (arbitrary waveform generator - Tektronix AWG7122B) και είχε RF πλάτος έως 1,4 V_{p-p}. Αυτό είναι επαρκές ώστε ο λόγος σβέσης (ER) του διαμορφωμένου σήματος να ξεπεράσει τα 13 dB, σε συνδυασμό με έναν διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (EAM), που παρέχει επίσης μία ενεργειακά αποδοτική λύση για τον πομπό του συρρευματικού σήματος. Το συρρευματικό σήμα, μήκους κύματος 1560,2 nm, εξήλθε με ισχύ 10 dBm από το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT), και μεταδόθηκε στο οπτικό δίκτυο διανομής (ODN), που αποτελούταν από διπλή ίνα τροφοδότησης, μήκους από 6 έως 25 χλμ, μία 1 x 40 συστοιχία φραγμάτων περίθλασης (AWG) και 2,2 χλμ οπτική ίνα που κατέληγε στο χρήστη (Εικόνα 34).

Ο ισολογισμός απωλειών του WDM-PON, που ορίζεται ανάμεσα στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) και στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), διατηρήθηκε σταθερός στα 20 dB, μέσω ρυθμίσεως του εξασθενητή A_B, με αποτέλεσμα, η είσοδος στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) να έχει ισχύ -10 dBm. Ο εξασθενητής A_B ορίζει τις απώλειες κατά την πορεία του σήματος προς τη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), ως ένας περιοριστικός παράγοντας για το ισολογισμό απωλειών σε ένα δίκτυο PON.



Εικόνα 34: Πειραματική διάταξη για το πλήρως αμφίδρομο, 10/10 και 20/10 Gb/s WDM-PON.

Το συρρευματικό σήμα λαμβάνεται στην ανακλαστική μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) από μία φωτοδίοδο τύπου χιονοστιβάδας (APD). Ένας παλμογράφος πραγματικού χρόνου (Tektronix DPO71254B) χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια, για αποδιαμόρφωση και εκτίμηση του ρυθμού σφαλμάτων. Η επίδοση λήψης του συρρευματικού σήματος αξιολογήθηκε με τη βοήθεια του εξασθενητή A_D , που βρισκόταν ακριβώς πριν την φωτοδίοδο τύπου χιονοστιβάδας (APD), και καθορίζει τον ισολογισμό απωλειών για το συρρευματικό σήμα. Η επαναδιαμόρφωση του συρρευματικού σήματος με τα δεδομένα του αντιρρευματικού σήματος, διενεργείται αφού το οπτικό σήμα έχει περάσει από το φίλτρο Fabry-Pérot, το οποίο σε συνδυασμό με τον ανακλαστικό ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (RSOA), ανακτά την οπτική φέρουσα του συρρευματικού σήματος. Ο ανακλαστικός ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής (RSOA), με μικρό κέρδος σήματος (18 dB), λειτουργεί ως στοιχείο κέρδους του πομπού, ο οποίος υλοποιείται από ένα Mach-Zehnder διαμορφωτή (MZM) για λόγους απλότητας. Τέλος, ένας οπτικός ενισχυτής ίνας ερβίου (EDFA) χρησιμοποιείται, για να επιτευχθεί ένα λογικό κέρδος εντός της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) της τάξεως των 10 dB, διατηρώντας την ισχύ εξόδου του αντιρρευματικού σήματος από τη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) στα 0 dBm. Ο σηματοθρομβικός λόγος (OSNR) στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) είναι 26,5 dB. Σημειώνεται ότι η επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος απαιτεί διαχωρισμό του εισερχόμενου συρρευματικού σήματος στη μονάδα οπτικού δικτύου

(ONU) για λήψη και επαναδιαμόρφωση, η οποία επιτεύχθηκε, μέσω της χρήσης ενός 50/50 διαζεύκτη (C_0) στην είσοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU).

Το διαμορφωμένο σε πλάτος αντιρρευματικό σήμα, στη συνέχεια, λαμβάνεται από το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT), μέσω ενός δέκτη βασισμένου σε συνδυασμό οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου (EDFA) και PIN φωτοδιόδου, και εξετάστηκε όσον αφορά τον ισολογισμό απωλειών του αντιρρευματικού σήματος, με τη βοήθεια ενός επιπλέον εξασθενητή (A_U).

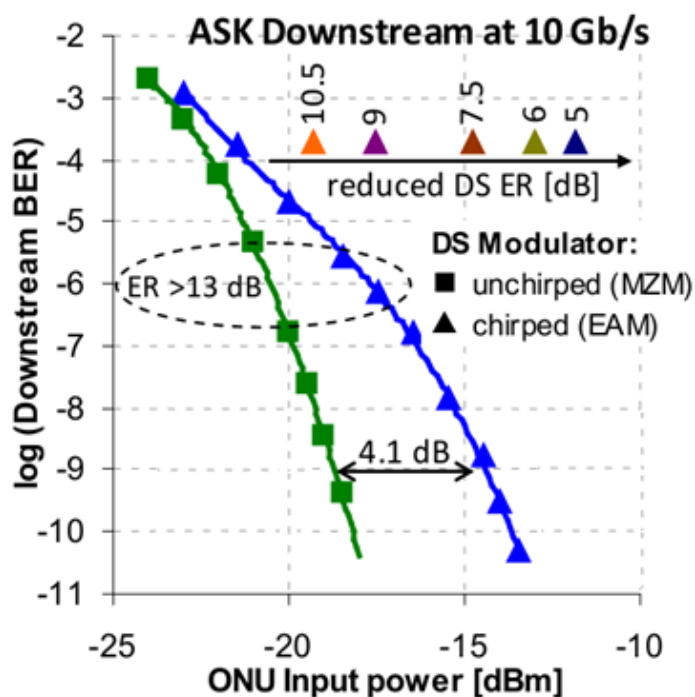
Η επίδοση του WDM-PON αξιολογήθηκε αρχικώς για unchirped και chirped ASK συρρευματικά σήματα. Επιπλέον, συρρευματικά σήματα πολλαπλών σταθμών, 4-PAM και OFDM, μελετώνται σε συνδυασμό με αμιγώς οπτική καταπίεση της διαμόρφωσης του σήματος. Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τον ισολογισμό απωλειών για διαφορετικές μορφές διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος.

Πίνακας 5: Ισολογισμός απωλειών για ASK και 4-PAM με επαναδιαμόρφωση σε WDM-PON.

Διαμόρφωση συρρευματικού σήματος	ASK (MZM)		chirped ASK (EAM)		4-PAM (EAM)
Λόγος σβέσης (ER) συρρευματικού σήματος [dB]	10,5	>13	10,5	>13	10
Ισολογισμός απωλειών τροφοδότησης του διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος [dB]	20	20	20	20	20
Ισολογισμός απωλειών συρρευματικού σήματος [dB]	-	32,6	29,3	31,5	30,2
Ισολογισμός απωλειών αντιρρευματικού σήματος [dB]	39,3	39,8	35,8	39,8	34,7

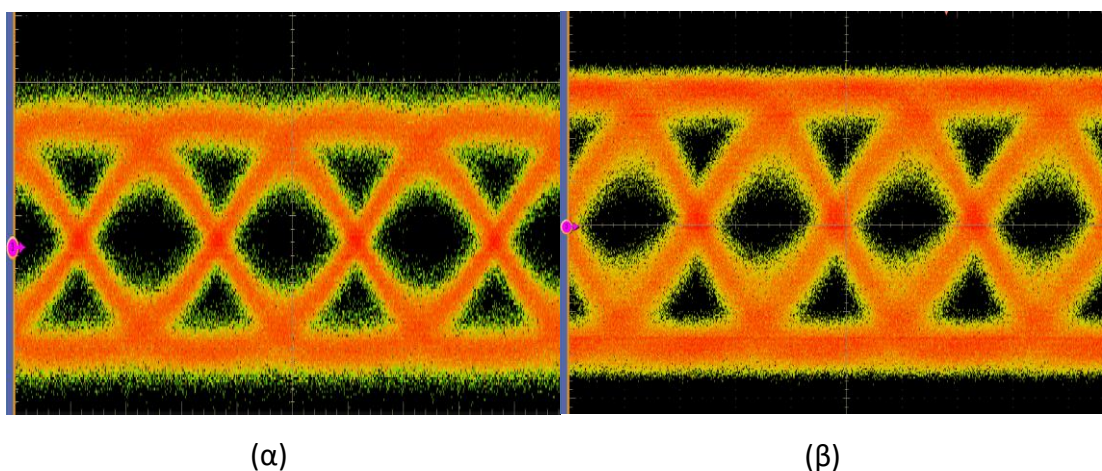
Η επίδοση του ASK συρρευματικού σήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 35 για ίνα τροφοδότησης 25 χλμ. Η chirped μετάδοση με EAM και λόγο σβέσης (ER) μεγαλύτερο των 13 dB, εμφανίζει ποινή ισχύος 4,1 dB, σε ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων τάξης 10^{-9} , σε σύγκριση με την περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκε Mach-Zehnder διαμορφωτής, λόγω της αυξημένης ευαισθησίας σε φαινόμενα διασποράς. Σε περίπτωση μειωμένου λόγου σβέσης (ER), της τάξης των 10,5 dB, ένας ισολογισμός

απωλειών 29,3 dB για το συρρευματικό σήμα, είναι συμβατός με την επιτυχή εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) Reed-Solomon (255,239).



Εικόνα 35: Καμπύλη ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) του chirped ASK συρρευματικού σήματος, για μήκος δικτύου 25 χλμ.

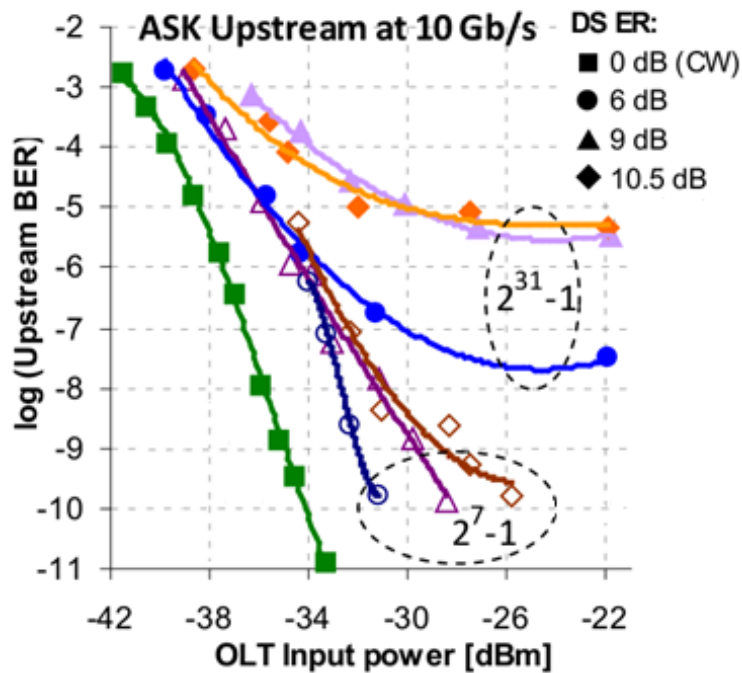
Παρακάτω (Εικόνα 36), φαίνονται τα διαγράμματα οφθαλμού για το συρρευματικό σήμα που δημιουργήθηκε από Mach-Zehnder και ηλεκτρο-απορροφητικό διαμορφωτή, αντίστοιχα.



Εικόνα 36: Διαγράμματα οφθαλμού του συρρευματικού σήματος, διαμορφωμένου με (α) Mach-Zehnder διαμορφωτή και (β) ηλεκτροαπορροφητικό διαμορφωτή.

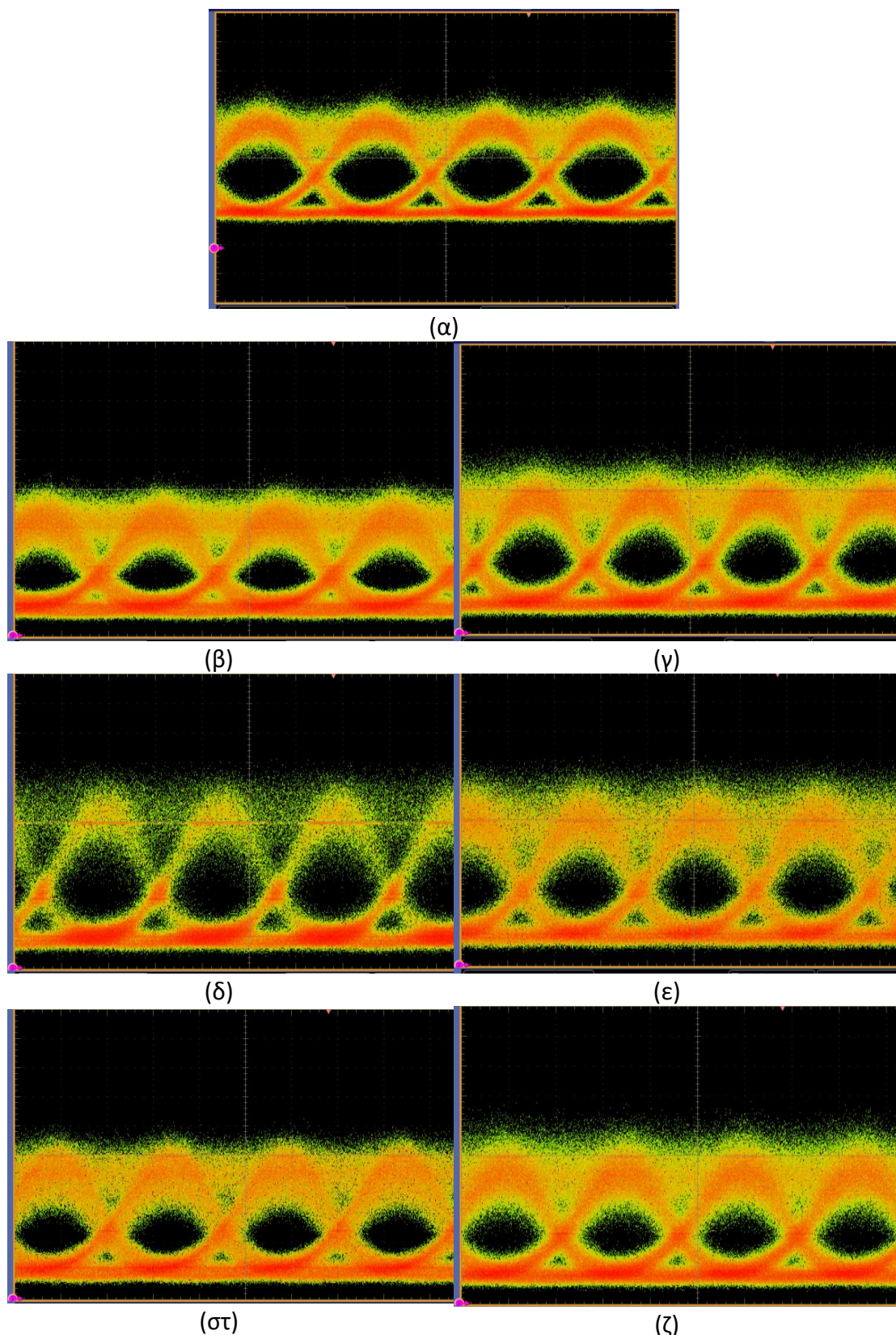
Η επίδραση της εισόδου ενός chirped ASK στην ανάκτηση της οπτικής φέρουσας, για χρήση στην αντιρρευματική μετάδοση, παρουσιάζεται στην Εικόνα 37, όπου φαίνεται

η επίδοση του 10 Gb/s ASK αντιρρευματικού σήματος μετά την επαναδιαμόρφωση. Για μικρού μήκους PRBS (2^7-1), η ποιότη ισχύος σε σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν γίνεται μετάδοση συρρευματικού σήματος (δηλ. οπτικό σήμα συνεχούς κύματος (CW) εισέρχεται στη μονάδα οπτικού δικτύου) είναι 3,1 και 6,3 dB, για χαμηλό ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων (BER) 10^{-9} , και για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος 6 και 10,5 dB, αντίστοιχα. Όπως αναμένεται από το θεωρητικό μοντέλο [2.48], μία μεγαλύτερη PRBS, $2^{31}-1$, δημιουργεί κάτω όριο σφαλμάτων για τη συγκεκριμένη λεπτότητα του φίλτρου Fabry-Pérot, ωστόσο το επίπεδο για επιτυχή εμπρόσθια διόρθωση των λαθών (FEC) μπορεί και σε αυτήν την περίπτωση να επιτευχθεί.



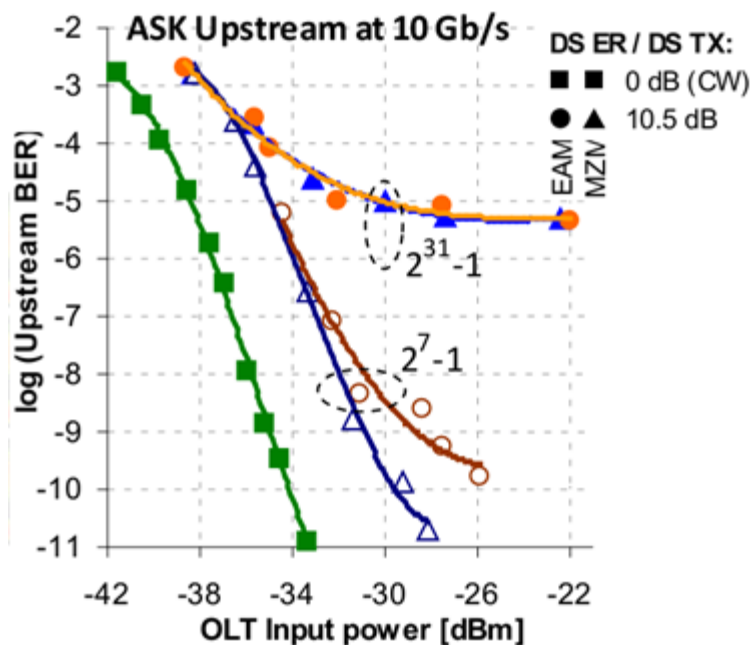
Εικόνα 37: Λήψη αντιρρευματικού σήματος, για chirped συρρευματικό σήμα διαφορετικών λόγων σβέσης (ER).

Στη συνέχεια, παραθέτονται τα διαγράμματα οφθαλμού που προέκυψαν κατά τη λήψη του αντιρρευματικού σήματος, για διαφορετικές περιπτώσεις λόγου σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος, αλλά και διαφορετικές PRBS.



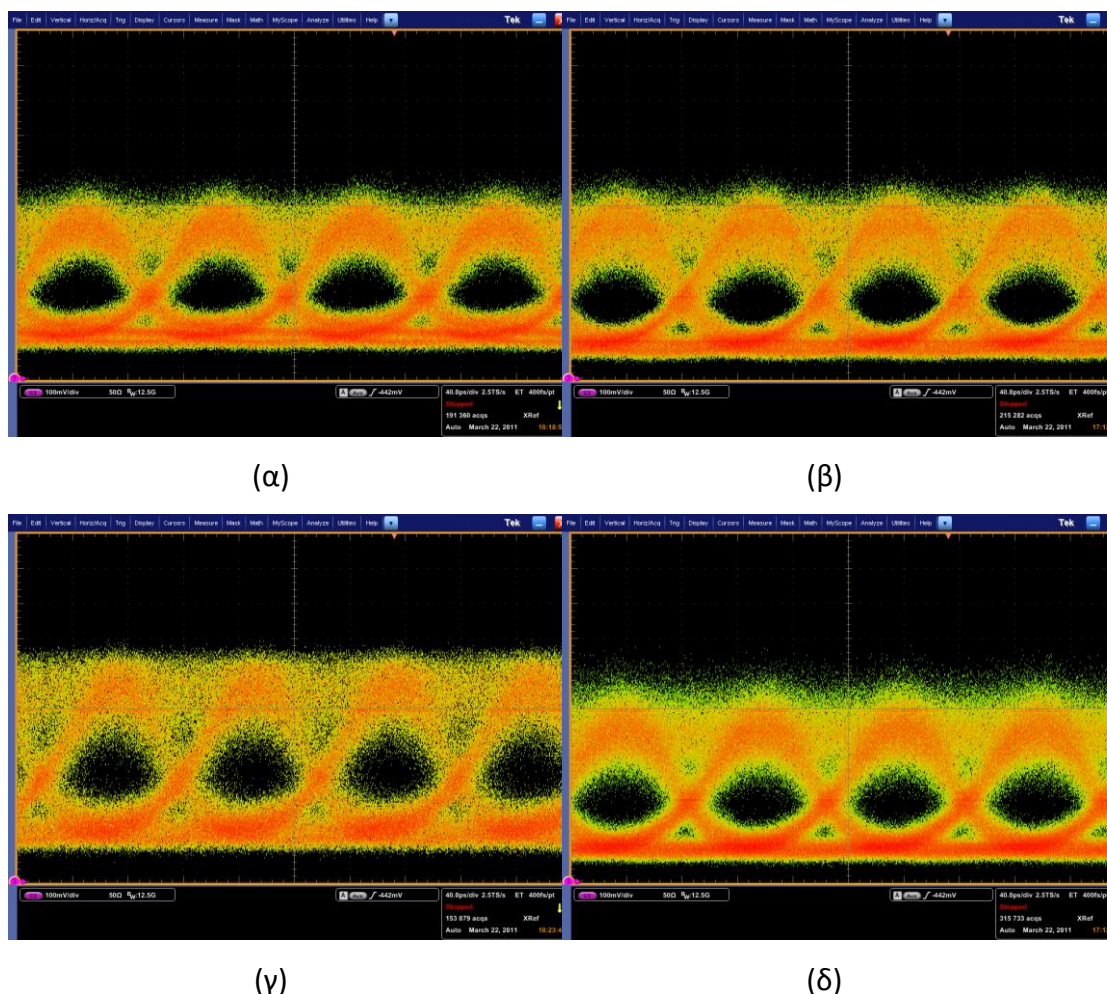
Εικόνα 38: Διαγράμματα οφθαλμού του αντιρρευματικού σήματος, για λόγο σβέσης του συρρευματικού σήματος (α) 0 dB και PRBS $2^{31}-1$, (β) 6dB και PRBS 2^7-1 , (γ) 6dB και PRBS $2^{31}-1$, (δ) 9dB και PRBS 2^7-1 , (ε) 9dB και PRBS $2^{31}-1$, (στ) 10,5 dB και PRBS 2^7-1 και (ζ) 10,5 dB και PRBS $2^{31}-1$.

Συγκρινόμενο με το πομπό βασισμένο σε Mach-Zehnder διαμορφωτή του συρρευματικού σήματος (Εικόνα 39), υπήρχε μία ποινή 2,2 dB για τη δομή με ηλεκτρο-απορροφητικό διαμορφωτή και τύπο δεδομένων PRBS 2^7-1 . Αυτό οφείλεται στην chirped είσοδο στο κύκλωμα καταπίεσης της διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την ανάκτηση του οπτικού σήματος συνεχούς κύματος (CW). Με μεγαλύτερη PRBS $2^{31}-1$, αυτή η διαφορά εξαφανίζεται, αποδεικνύοντας ότι η chirped είσοδος έχει αμελητέα επίδραση όσον αφορά την υποβάθμιση του σήματος λόγω μεγαλύτερης PRBS.



Εικόνα 39: Σύγκριση καμπυλών ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων για το αντιρρευματικό σήμα, στην περίπτωση όπου chirped ή μη-chirped συρρευματικό σήμα χρησιμοποιείται ως είσοδος στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU).

Στη συνέχεια παραθέτονται τα διαγράμματα οφθαλμού που προέκυψαν κατά τη λήψη του αντιρρευματικού σήματος για διαφορετικές PRBS του συρρευματικού σήματος, αλλά και χρήση chirped και unchirped σήματος.



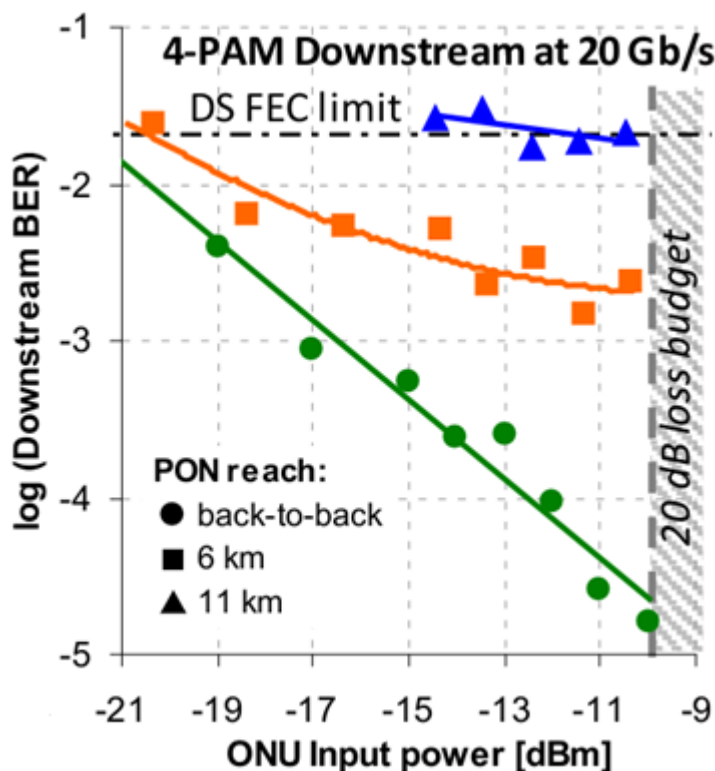
Εικόνα 40: Διαγράμματα οφθαλμού του αντιρρευματικού σήματος για συρρευματικό σήμα (α) διαμορφωμένο με Mach-Zehnder διαμορφωτή και PRBS 2^7-1 , (β) διαμορφωμένο με ηλεκτροαπορροφητικό διαμορφωτή και PRBS 2^7-1 , (γ) διαμορφωμένο με Mach Zehnder διαμορφωτή και PRBS $2^{31}-1$ και (δ) διαμορφωμένο με ηλεκτροαπορροφητικό διαμορφωτή και PRBS $2^{31}-1$.

Λόγω του ευαίσθητου δέκτη του αντιρρευματικού σήματος, η υψηλότερη τιμή του λόγου σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος των 10,5 dB βρέθηκε ως βέλτιστη. Ο ισολογισμός απωλειών του αντιρρευματικού σήματος είναι τότε υψηλότερος από 30 dB με εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC), για κάθε μήκος της PRBS που χρησιμοποιήθηκε.

Στον Πίνακα 5 απεικονίζεται ο ισολογισμός απωλειών για ASK και 4-PAM επαναδιαμόρφωση σε WDM-PON. Οι τιμές λαμβάνουν υπόψη τους τη χρήση εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC), και έκταση του δικτύου 25 χλμ για την περίπτωση του ASK και 6 χλμ για την περίπτωση του 4-PAM.

Ανεξαρτήτως του τύπου του πομπού του συρρευματικού σήματος, ο συνολικός ισολογισμός απωλειών περιορίζεται από την ισχύ εισόδου σε 20 dB, και μεγάλα περιθώρια ισχύος, υψηλότερα των 9 dB, είναι διαθέσιμα για πλήρως αμφίδρομη μετάδοση 10 Gb/s.

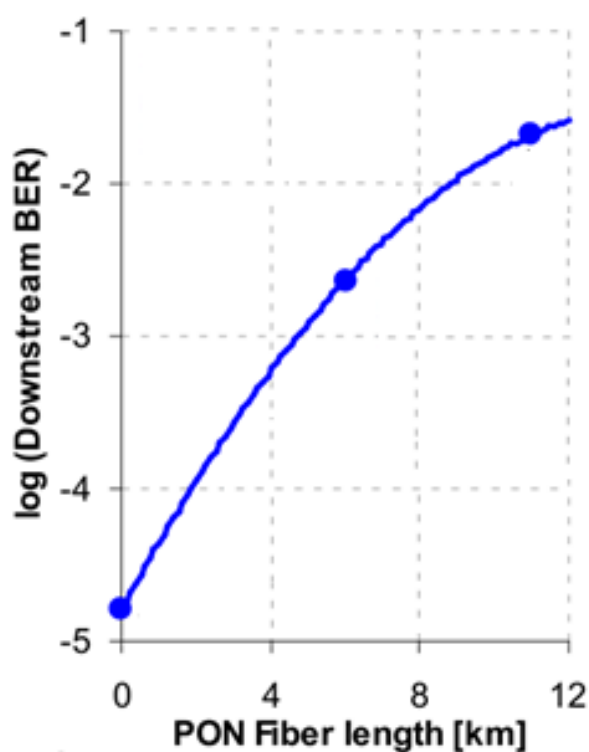
Στην περίπτωση που έχουμε chirped 4-PAM ως συρρευματικό σήμα με 10 Gbaud, δηλαδή ένα ρυθμό δεδομένων 20 Gb/s, δεν χρησιμοποιήθηκε Gray κώδικας για την παραγωγή του σήματος πολλαπλών σταθμών με PRBS $2^{15}-1$. Ο λόγος σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος ήταν σταθερός, στα 10 dB. Καθώς δεν χρησιμοποιήθηκε εκ των υστέρων ισοστάθμιση (post-equalization) κατά τη διαδικασία εκτίμησης του ρυθμού σφαλμάτων, φαινόμενα διασποράς είχαν σημαντική επίδραση στο chirped 4-PAM, όπως φαίνεται και από το απότομο κλείσιμο, του ήδη μικρού ανοίγματος, του διαγράμματος οφθαλμού. Σε συνδυασμό με υποβοήθηση ισχυρότερου turbo-κώδικα (turbo-code) εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC) [2.49], ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει έως ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων 2×10^{-2} , ο ισολογισμός απωλειών οπτικής ισχύος του συρρευματικού σήματος ήταν 31,6 και 30,2



Εικόνα 41: Καμπύλη ρυθμού σφαλμάτων του chirped 4-PAM συρρευματικού σήματος.

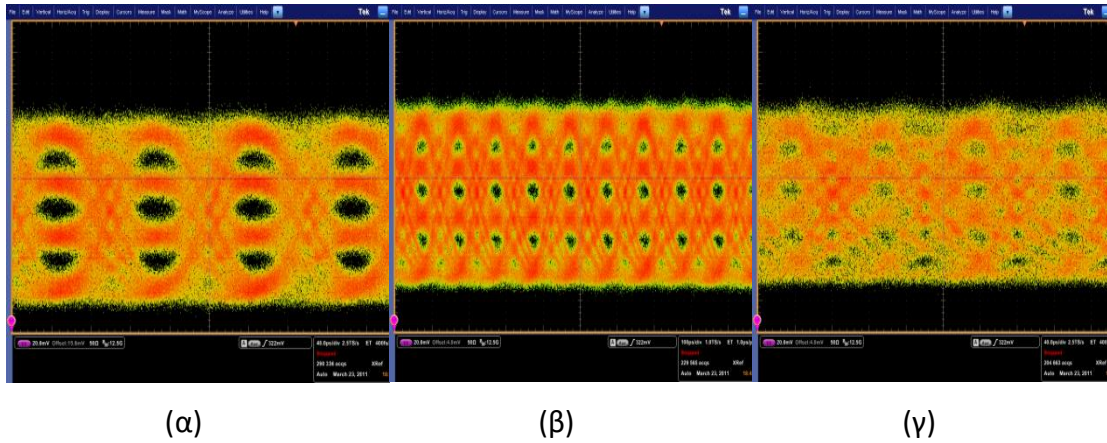
dB, και παραμένει αποδεκτός για την περίπτωση που δε συμβαίνει μετάδοση στην ίνα τροφοδότησης (back-to-back), και για την περίπτωση μετάδοσης σε 6 χλμ, αντίστοιχα (Εικόνα 41).

Επιτυχή λήψη μπορεί να εγγυηθεί για μήκη ίνας έως ~11 χλμ, ισολογισμός απωλειών 20 dB (Εικόνα 42), όπου το περιθώριο ισχύος από τον αρχικό ισολογισμό, έχει σχεδόν εξαλειφθεί.



Εικόνα 42: Ελάχιστη τιμή ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER), για ισολογισμό απωλειών 20 dB και διαφορετικό μήκος δικτύου.

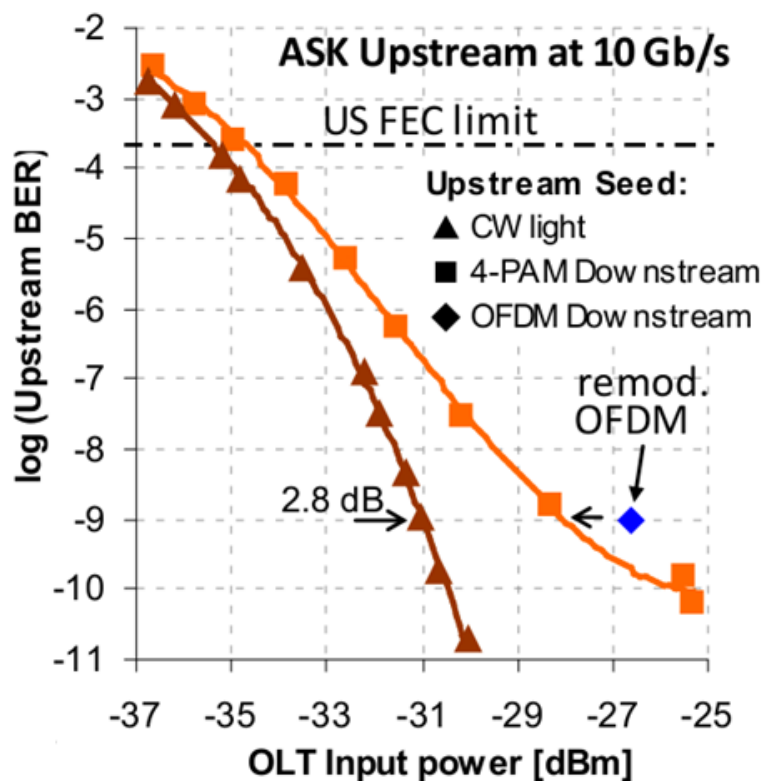
Στη συνέχεια παραθέτονται τα αντίστοιχα διαγράμματα οφθαλμού των 4-PAM σημάτων, για διαφορετικό εύρος διεύθυνσης του δικτύου. Είναι φανερό το αυξανόμενο κλείσιμο του ανοίγματος του οφθαλμού, όσο το εύρος του δικτύου μεγαλώνει.



Εικόνα 43: Διαγράμματα οφθαλμού 4-PAM, για μήκος δικτύου (α) 0 χλμ, (β) 6 χλμ και (γ) 11 χλμ.

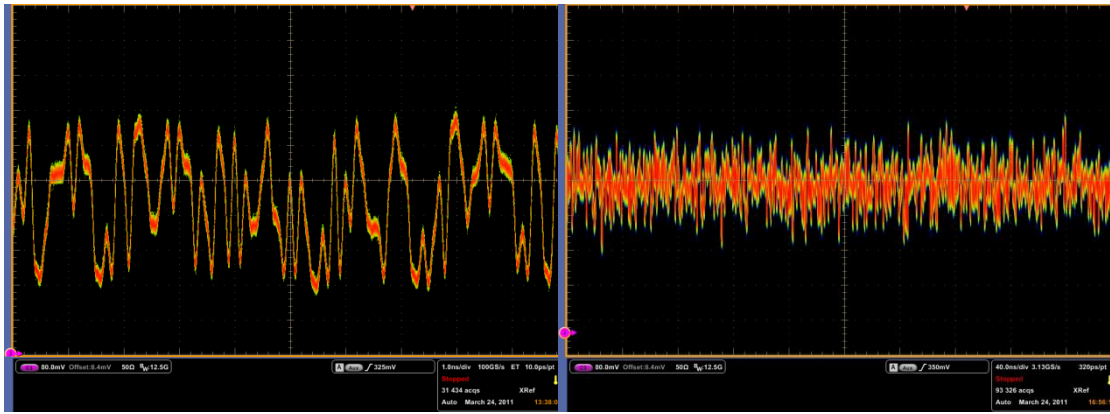
Το αντιρρευματικό ASK σήμα ρυθμού 10 Gb/s μετά από 4-PAM επαναδιαμόρφωση, επιτυγχάνει λειτουργία χωρίς σφάλματα και ο ισολογισμός απωλειών οπτικής ισχύος που προκύπτει είναι 34,7 dB για μήκος ίνας 6 χλμ και εφαρμογή RS(255,239) εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC) (Εικόνα 44). Ποινή ισχύος μόλις 2,8 dB προστίθεται, λόγω της παρουσίας του 4-PAM συρρευματικού σήματος, για ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων τάξης 10^{-9} . Όπως και στην περίπτωση της πιο απλής ASK διαμόρφωσης, ο συνολικός ισολογισμός απωλειών του δικτύου PON, που χρησιμοποιεί 4-PAM, περιορίζεται από τις απώλειες του συρρευματικού σήματος που οδηγείται στην είσοδο του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT).

Ως επιπλέον διερεύνηση της τεχνικής, ένα OFDM σήμα παράχθηκε από τη γεννήτρια τυχαίων κυματομορφών (arbitrary waveform generator). Το σήμα αποτελούταν από 217 τυχαία bits αντιστοιχισμένα σε 4-QAM διαμόρφωση, που μετασχηματίστηκαν στο πεδίο του χρόνου μέσω iFFT 256-υπο-φερουσών (subcarriers) με ερμιτιανή (Hermitian) συμμετρία, ώστε να προκύψει το σήμα με τις πραγματικές τιμές. Με αυτό το OFDM συρρευματικό σήμα, η ποινή ισχύος για την επαναδιαμόρφωση του αντιρρευματικού σήματος, αυξάνεται ανεπαίσθητα κατά 1,5 dB. Παρόλο που η επίδοση του συρρευματικού σήματος δεν διερευνήθηκε για την περίπτωση που ήταν OFDM, το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει ότι αυτή η τεχνική αμιγώς οπτικής επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος, μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε OFDM συρρευματικά σήματα.



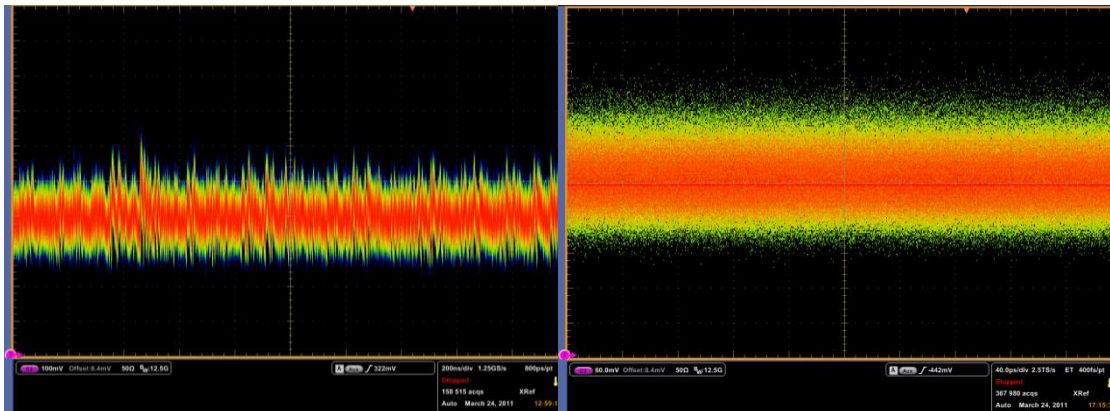
Εικόνα 44: Ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων για το αντιρρευματικό σήμα, στην περίπτωση όπου chirped 4-PAM ή OFDM χρησιμοποιείται ως συρρευματικό σήμα.

Η Εικόνα 45 δείχνει τα χρονικά ίχνη της μετάδοσης πολλαπλών σταθμών και τα αντίστοιχα ανακτημένα οπτικά σήματα συνεχούς κύματος (CW) μετά την ακύρωση της συρρευματικής διαμόρφωσης.



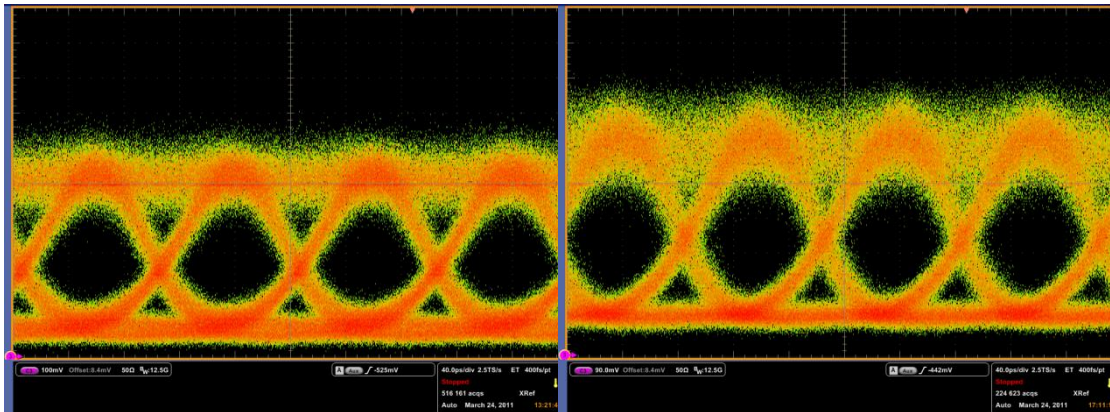
(α)

(β)



(γ)

(δ)



(ε)

(στ)

Εικόνα 45: Χρονικά ίχνη της μετάδοσης πολλαπλών σταθμών (α) 4PAM και (β) OFDM. Ανακτημένο οπτικό σήμα συνεχούς κύματος (CW) μετά την ακύρωση της συρρευματικής (γ) 4-PAM και (δ) OFDM διαμόρφωσης. Διαγράμματα οφθαλμού του αντιρρευματικού σήματος που προέκυψαν από επαναδιαμόρφωση (ε) 4-PAM και (στ) OFDM συρρευματικού σήματος.

2.7 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Μελετήθηκε λεπτομερώς μία διαφανής στο μήκος κύματος σχεδίαση μονάδας οπτικού δικτύου για πλήρως αμφίδρομη μετάδοση. Η επίδοση της τεχνικής αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας που χρησιμοποιείται, αξιολογήθηκε για διαφορετικούς τύπους δεδομένων. Η πειραματική λειτουργία σε WDM-PON περιβάλλον της αμιγώς οπτικής καταπίεσης της συρρευματικής διαμόρφωσης, με επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος σε πλήρως αμφίδρομη 10 Gb/s μετάδοση, έδειξε ότι περιθώρια ισχύος τουλάχιστον 9 dB, επιπλέον του ισολογισμού ισχύος 20 dB, είναι διαθέσιμα αν ληφθεί υπόψη εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) κατά τη λήψη του συρρευματικού σήματος. Επίσης πραγματοποιήθηκε σύγκριση της τεχνικής με άλλες τεχνικές καταπίεσης της διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος. Ενώ η ηλεκτρο-οπτική feed-forward ανάκτηση φέρουσας επιτρέπει πλήρως αμφίδρομη μετάδοση με τη βοήθεια της εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC), η αμιγώς οπτική καταπίεση του συρρευματικού σήματος, που χρησιμοποιεί παθητικό φιλτράρισμα, μειώνει την ποινή ισχύος λήψης σημαντικά (δηλαδή, επιτρέπει υψηλότερο ισολογισμό απωλειών στην περίπτωση της εγκατάστασης των δικτύων πρόσβασης). Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική παρουσιάζει ποινή λήψης 3,4 dB για υψηλό (9dB) λόγο σβέσης του συρρευματικού σήματος, ενώ στην αντίστοιχη περίπτωση των συμβατικών μονάδων οπτικού δικτύου (ONU), η πλήρως αμφίδρομη μετάδοση δεν είναι εφικτή. Εκτός του ότι η τεχνική αυτή είναι ενεργειακά αποδοτικότερη, η ποινή ισχύος είναι σημαντικά μικρότερη από ότι στη συμβατική μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), καθώς μειώνεται, για λόγο σβέσης (ER) 3 dB του συρρευματικού σήματος, από 4,6 σε 1,3 dB για το επίπεδο της επιτυχούς εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC). Το περιθώριο ισχύος σε πλήρως αμφίδρομο 10 Gb/s WDM-PON παρουσιάστηκε μεγαλύτερο των 7 dB, όταν εφαρμόζεται εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) στην λήψη του συρρευματικού σήματος.

Στο τελευταίο κομμάτι του κεφαλαίου εφαρμόστηκε η ίδια τεχνική σε ένα πλήρως αμφίδρομο WDM-PON με επαναδιαμόρφωση chirped, non-chirped ASK και 4-PAM συρρευματικών σημάτων, επιτυγχάνοντας ισολογισμό απωλειών 20 dB και έχοντας επιπλέον 9 dB ως περιθώριο ισχύος. Αποδείχτηκε ότι αυτή η τεχνική είναι

αποτελεσματική και διαφανής, και στο chirp και στον τύπο διαμόρφωσης (ASK, 4-PAM και OFDM), για χρήση σε πλήρως αμφίδρομα PONs. Όσον αφορά την 4-PAM διαμόρφωση, παρόλο που το επιτρεπόμενο μήκος του δικτύου PON μειώνεται λόγω της διαμόρφωσης πολλαπλών σταθμών του συρρευματικού σήματος, αυτός ο τύπος διαμόρφωσης είναι εφικτός σε δίκτυα εντός του ιστού της πόλης. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με μία αρχιτεκτονική διαφορετικών διαμορφώσεων, η οποία θα μεγιστοποιεί το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του δικτύου PON, μέσω της παρουσίας ενός πιο πολύπλοκου τύπου διαμόρφωσης σε περιοχές του δικτύου που βρίσκονται κοντά στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT). Τέλος, σημειώνεται, ότι ο ασύμμετρος ρυθμός δεδομένων (20/10 Gb/s) που επιτυγχάνει, ευνοώντας το ρυθμό του συρρευματικού σήματος, έχει ιδιαίτερη σημασία, π.χ. για εφαρμογές όπως η μετάδοση 3DTV [2.50].

Αναφορές

- [2.1] M.J.R. Heck, H.W. Chen, A.W. Fang, B.R. Koch, D. Liang, H. Park, M.N. Sysak, and J.E. Bowers, "Hybrid Silicon Photonics for Optical Interconnects", IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., DOI 10.1109 / JSTQE.2010.2051798 (forthcoming)
- [2.2] P. E. Green, Jr., "Fiber optic networks", Prentice-Hall Inc., NJ, Μετάφραση Κ. Καρούμπαλος, Ed. Α. Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο. Ε., 1993.
- [2.3] T. Augustsson, "Proposal of a DMUX with a Fabry-Pérot all-reflection filter-based MMIMI configuration", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, No. 3, pp. 215-217, 2001.
- [2.4] M. M. Freire et al., "Performance assessment of two-channel dispersion-supported transmission systems using single- and double-cavity Fabry-Pérot filters as demultiplexers", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, No. 11, pp. 1360-1362, 1995.
- [2.5] M. Jinno et al., "Optical tank circuits used for all-optical timing recovery", IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, No. 4, pp. 895-900, 1992.
- [2.6] Xiang Zhou et al., "A performance analysis of an all-optical clock extraction circuit based on Fabry-Pérot filter", J. Lightwave Technol., vol. 19, No. 5, pp. 603-613, 2001.
- [2.7] T. Wang et al., "Comb-like filter preprocessing to reduce the pattern effect in the clock recovery based on SOA", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 14, No. 6, pp. 855-857, 2002.
- [2.8] K. Yiannopoulos et al., "Pulse Repetition Frequency Multiplication With Spectral Selection in Fabry-Pérot Filters", IEEE J. Quantum Electron., vol. 40, No. 2, pp. 157-165, 2004.
- [2.9] Κ. Γιαννόπουλος, "Κυκλώματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Ψηφιακά Οπτικά Δίκτυα", Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004

- [2.10] T. Sizer, "Increase in laser repetition rate by spectral selection," IEEE J. Quantum Electron., vol. 25, pp. 97–103, 1989.
- [2.11] D. K. Serkland et al., "Rate multiplication of a 59-GHz soliton source at 1550 nm," J. Lightwave Technol., vol. 16, pp. 670–677, 1998.
- [2.12] K. Yiannopoulos et al., "Generation of 40-GHz control signals from flag pulses for switching all-optical gates for use with optical packets", Opt. Lett., vol. 29, No. 3, pp. 241-243, 2004.
- [2.13] N. J. Frigo et al., "A wavelength-division multiplexed passive optical network with cost-shared components," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, pp. 1365-1367, 1994.
- [2.14] H. Takesue and T. Sugie, "Wavelength channel data rewriter using semiconductor optical saturator/modulator," J. Lightwave Technol., vol. 24, pp. 2347–2354, June 2006.
- [2.15] J.H. Lee et al., "First Commercial Service of a Colorless Gigabit WDM/TDM Hybrid PON System", in Proc. OFC'09, PDPD9, San Diego (CA), United States, Mar. 2009.
- [2.16] R.G. Walker, "High-speed III:V Semiconductor Intensity Modulators", IEEE J. Quantum Electron., vol. 27, pp. 654:667, Mar. 1991.
- [2.17] J. Buus, and E.J Murphy, "Tunable lasers in optical networks", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 24, pp. 5:11, Jan. 2006.
- [2.18] M. Mestre et al., "Tuning Characteristics and Switching Speed of a Modulated Grating Y Structure Laser for Wavelength Routed PONs", in Proc. ANIC'10, AthC2, Karlsruhe, Germany, Jun. 2010.
- [2.19] C.J. Chang-Hasnain, "Tunable VCSEL", IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 6, pp. 978:987, Nov. 2006.

[2.20] K. C. Reichmann, N. J. Frigo, and P. P. Iannone, "Wavelength registration in WDM ring networks by reconstitution of dropped optical carriers," in 25th European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept. 1999, vol. 1, pp. 136–137.

[2.21] W. Lee, S. H. Cho, M. Y. Park, J. H. Lee, C. Kim, G. Jeong, and B. W. Kim, "Optical transceiver employing an RSOA with feed-forward current injection," in Optical Fiber Communication Conf. and Expo. and the Nat. Fiber Optic Engineers Conf., Anaheim, CA, Mar. 2007, OTuH1.

[2.22] X. Wei, Y. Su, X. Liu, J. Leuthold, and S. Chandrasekhar, "10-Gb/s RZ-DPSK transmitter using a saturated SOA as a power booster and limiting amplifier," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, pp. 1582–1584, June 2004.

[2.23] D. Apostolopoulos, E. Kehayas, L. Stampoulidis, P. Bakopoulos, and H. Avramopoulos, "All-Optical Contention Resolution in Space and Wavelength Domain with Ultra-Fast Packet Envelope Detection and Integrated Optical Gates", in Proc. ECOC'06, We.1.4.2, Cannes, France, Sept. 2006.

[2.24] E. Kehayas, B. Schrenk, P. Bakopoulos, J. A. Lazaro, A. Maziotis, J. Prat, and H. Avramopoulos, "All-optical carrier recovery with periodic optical filtering for wavelength reuse in RSOA-based colorless optical network units in full-duplex 10 Gbps WDM-PONs," in Optical Fiber Communication Conf., San Diego, CA, Mar. 2010, OWG4.

[2.25] O. Leclerc et al., "Polarisation-independent InP push-pull Mach-Zehnder modulator for 20 Gbit/s soliton regeneration", IEE Electron. Lett., vol. 34, pp. 1011:1013, May 1998.

[2.26] K.Y. Cho, Y. Takushima, and Y. C. Chung, "10:Gb/s Operation of RSOA for WDM PON", IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 20, pp. 1533:1535, Sept. 2008.

[2.27] I. Papagiannakis et al., "Investigation of 10:Gb/s RSOA-Based Upstream Transmission in WDM:PONs Utilizing Optical Filtering and Electronic Equalization", IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 20, pp. 2168:2170, Dec. 2008.

- [2.28] J. Leuthold, et al, "All-Optical Wavelength Conversion Using a Pulse Reformatting Optical Filter," J. Lightwave Tech 22, 186-192 (2004).
- [2.29] M. Jinno and T. Matsumoto, "Optical tank circuits used for all-optical timing recovery," IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, pp. 895–900, Apr. 1992.
- [2.30] E. Kehayas, L. Stampoulidis, H. Avramopoulos, Y. Liu, E. Tang-diongga, and H. Dorren, "40 Gb/s all-optical packet clock recovery with ultrafast lock-in time and low inter-packet guardbands," Opt. Express, vol. 13, pp. 475–480, Jan. 2005.
- [2.31] N. Genay, P. Chanclou, T. Duong, N. Brochier, and E. Pincemin, "Bidirectional WDM/TDM-PON access networks integrating downstream 10 Gbit/s DPSK and upstream 2.5 Gbit/s OOK on the same wavelength," in European Conf. on Optical Communication (ECOC), Cannes, France, Sept. 2006, Th.3.6.6.
- [2.32] I. Glover, and P. Grant, "Digital Communications", Essex, Prentice Hall, 1998.
- [2.33] K.Y. Cho, Y. Takushima, Y.C. Chung, "10-Gb/s Operation of RSOA for WDM PON," Phot. Tech. Lett. 20, 1533-1535 (2008).
- [2.34] M. Geng, L. Jia, L. Zhang, L. Yang, Y. Liu, and F. Li, "Polarization-independent micro-ring resonator on silicon-on-insulator," in 2nd IEEE Int. Nanoelectronics Conf. (INEC), Shanghai, China, Mar. 2008, pp. 624–626.
- [2.35] G. de Valicourt et al., "High Gain (30 dB) and High Saturation Power (11 dBm) RSOA Devices as Colorless ONU Sources in Long-Reach Hybrid WDM/TDM:PON Architecture", IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 22, pp. 191:193, Feb. 2010.
- [2.36] H.S. Kim, B.S. Choi, K.S. Kim, D.C. Kim, O.K. Kwon, and D.K. Oh, "Improvement of modulation bandwidth in multisection RSOA for colorless WDM-PON", OSA Optics Expr., vol. 17, pp. 16372:16378, Sept. 2009.
- [2.37] F. Payoux, P. Chanclou, T. Soret, N. Genay, R. Brenot, "Demonstration of a RSOA-based Wavelength Remodulation Scheme in 1.25 Gbit/s Bidirectional Hybrid WDM-TDM PON," Proc. OFC'06, OTuC4 (2006).

[2.38] B. Schrenk, F. Bonada, J.A. Lazaro, and J. Prat, "Remotely Pumped Long-Reach Hybrid PON with Wavelength Reuse in RSOA-based ONUs," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 29, pp. 635-641, 2011.

[2.39] X. Zhou, C. Lu, P. Shum, H.H.M. Shalaby, T.H. Cheng, and P. Ye, "A Performance Analysis of an All-Optical Clock Extraction Circuit Based on Fabry-Pérot Filter," *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, pp. 603-613, 2001.

[2.40] S. Yamamoto, H. Takahira, and M. Tanaka, "5 Gbit/s optical transmission terminal equipment using forward error correcting code and optical amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 254–255, Feb. 1994.

[2.41] "Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission Convergence Layer Specification," ITU-T Recommendation G.984.3, 2003.

[2.42] B. Schrenk, F. Bonada, J. A. Lazaro, and J. Prat, "Remotely pumped long-reach hybrid PON with wavelength reuse in RSOA-based ONUs," *J. Lightwave Technol.*, vol. 29, pp. 635–641, Mar. 2011.

[2.43] Y. Zhang, N. Deng, C.K. Chan, and L.K. Chen, "A Multicast WDM:PON Architecture Using DPSK/NRZ Orthogonal Modulation", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 20, pp. 1479: 1481, Sept. 2008.

[2.44] C.W. Chow, "Wavelength Remodulation Using DPSK Down-and-Upstream With High Extinction Ratio for 10-Gb/s DWDM:Passive Optical Networks", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 20, pp. 12:14, Jan. 2008.

[2.45] N. Deng, C.-K. Chan, L.-K. Chen, and F. Tong, "Date remod-ulation on downstream OFSK signal for upstream transmiss-ion in WDM passive optical network," *Electron. Lett.*, vol. 39, pp. 1741–1743, Nov. 2003.

[2.46] J. Prat, V. Polo, C. Bock, and C. Arellano, "Full-duplex single fiber transmission using FSK downstream and IM remote upstream modulations for fiber-to-the-home," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 702–704, Mar. 2005.

- [2.47] B. Schrenk, G. de Valicourt, M. Omella, J. A. Lazaro, R. Brenot, and J. Prat, "Direct 10 Gb/s modulation of a single-section RSOA in PONs with high optical budget," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 392–394, Mar. 2010.
- [2.48] B. Schrenk, P. Bakopoulos, E. Kehayas, A. Maziotis, J.A. Lazaro, H. Avramopoulos, and J. Prat, "All-Optical Carrier Recovery Scheme for Access Networks with Simple ASK Modulation," *J. of Opt. Comm. and Netw.* 3, 704 (2011)
- [2.49] T. Mizuochi et al., "Forward error correction based on block turbo code with 3-bit soft decision for 10-Gb/s optical communication systems," *J. of Sel. Topics in Quantum Electron.* 10, 376 (2004)
- [2.50] M. Forzati, and C.P. Larsen, "On the symmetry requirements for tomorrow's fibre access networks," *Proc. ICTON 2009*, Tu.B5.3 (2009)

Κεφάλαιο 3

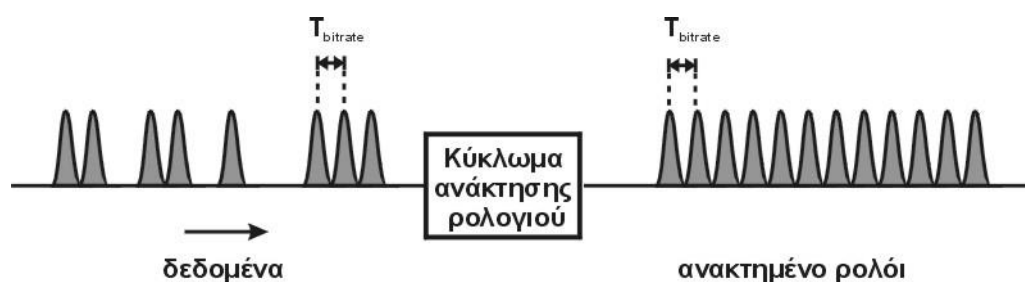
Αμιγώς οπτική ανάκτηση ρολογιού για επαναχρησιμοποίηση και μετατόπιση μήκους κύματος

Μία άλλη τεχνική ανάκτησης της οπτικής φέρουσας μπορεί να πραγματοποιηθεί, μέσω μίας μονάδας ανάκτησης οπτικού ρολογιού. Ωστόσο, ο όρος της ανάκτησης φέρουσας είναι καταχρηστικός, καθώς στην πραγματικότητα δεν συμβαίνει ανάκτηση της φέρουσας. Το οπτικό ρολόι που αποκτάται από το συρρευματικό σήμα, λειτουργεί ως είσοδος για το διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος και στη συνέχεια επαναδιαμορφώνεται.

Η αμιγώς οπτική τεχνική επαναδιαμόρφωσης του ρολογιού χρησιμοποιείται επίσης για το σκοπό της υλοποίησης οπτικού δικτύου πρόσβασης ανεκτικού σε θόρυβο λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh, μέσω μετατόπισης μήκους κύματος. Δεδομένου ότι μέσω της ανάκτησης ρολογιού μπορεί να ανακτηθεί μία αρχικά καταπιεσμένη αρμονική του συρρευματικού σήματος, γίνεται εφικτή – παράλληλα με την εξαγωγή της ίδιας αρμονικής ρολογιού μετά τη διαδικασία ανάκτησης ρολογιού – η ανοχή έναντι στην υποβάθμιση του αντιρρευματικού σήματος, που συμβαίνει λόγω της οπισθοσκέδασης Rayleigh. Η τεχνική εμφανίζει ως πλεονέκτημα την απλότητά της, καθώς επιπροσθέτως με την τεχνική επαναδιαμόρφωσης που παρουσιάστηκε στην

προηγούμενη ενότητα, μόνο παθητικό οπτικό φιλτράρισμα εφαρμόζεται επιπλέον, για να αποκτηθεί το επιθυμητό μετατοπισμένο μήκος κύματος για το αντιρρευματικό σήμα.

3.1 Κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού με φίλτρο Fabry-Pérot

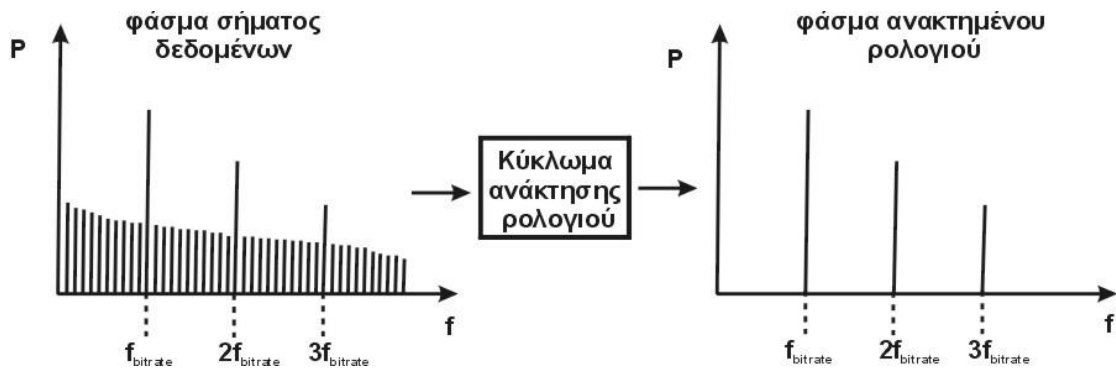


Εικόνα 46: Λειτουργία ενός κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού στο πεδίο του χρόνου.

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, το οποίο αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο των μονάδων οπτικού δικτύου (ONU) που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

Η διαδικασία δημιουργίας του σήματος ρολογιού στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του σήματος, ονομάζεται ανάκτηση ρολογιού [3.1]. Στόχος του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού είναι η αναγνώριση του ρυθμού μετάδοσης των εισερχόμενων δεδομένων και η παραγωγή ενός σήματος ρολογιού σε αυτόν τον ρυθμό μετάδοσης με μοναδική είσοδο στο κύκλωμα το αρχικό σήμα δεδομένων. Στην έξοδο του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού εμφανίζεται, επομένως, μία ακολουθία διαδοχικών άσων με περίοδο παλμών ίση με την περίοδο των δυφίων δεδομένων. Η λειτουργία αυτή απεικονίζεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 46.

Η ανάκτηση ρολογιού βρίσκει εφαρμογή στο συγχρονισμό των υποσυστημάτων ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, αλλά και στην αναγέννηση σήματος [3.2], [3.3].



Εικόνα 47: Λειτουργία ενός κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού στο πεδίο της συχνότητας.

Η απόκριση του κυκλώματος στο πεδίο της συχνότητας φαίνεται στην Εικόνα 47. Η πληροφορία για το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων περιέχεται στις αρμονικές συνιστώσες ρολογιού. Οι υπόλοιπες συχνотικές συνιστώσες αποτελούν το φασματικό περιεχόμενο της πληροφορίας των δεδομένων. Με την εισαγωγή του σήματος δεδομένων στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, οι φασματικές συνιστώσες των δεδομένων καταπιέζονται και το ανακτημένο ρολόι, που παράγεται στην έξοδο του κυκλώματος, αποτελείται μόνο από τις αρμονικές συνιστώσες ρολογιού, όπως δείχνει η Εικόνα 47.

Η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας υποδεικνύει, ότι η ανάκτηση ρολογιού επιτυγχάνεται στη γενική περίπτωση με χρήση ενός κατάλληλου στοιχείου, το οποίο επιτρέπει τη μετάδοση μόνο των αρμονικών ρολογιού του σήματος δεδομένων, ενώ απαγορεύει τη μετάδοση των αρμονικών δεδομένων. Η διαδικασία αυτή είναι μια απλή διαδικασία φιλτραρίσματος του αρχικού σήματος, στην οποία η ιδανική συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού είναι περιοδική ως προς τη συχνότητα, με κορυφές μετάδοσης στις συχνότητες $n \cdot f_{\text{bitrate}}$ και μηδενική μετάδοση σε οποιαδήποτε άλλη συχνότητα.

Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού είναι, επομένως, στη γενική του περίπτωση ένα στοιχείο φιλτραρίσματος με περιοδική συνάρτηση μεταφοράς ως προς τη συχνότητα. Η περιοδικότητα της συνάρτησης μεταφοράς ως προς τη συχνότητα μεταφράζεται σε διακριτή συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου, το οποίο σημαίνει ότι το στοιχείο έχει μνήμη. Αυτό επιβεβαιώνεται από την Εικόνα 46, η οποία δείχνει ότι το κύκλωμα,

ουσιαστικά, αποθηκεύει την ισχύ κάθε άσσου του αρχικού σήματος δεδομένων και την αποδίδει ανά χρονικά διαστήματα ίσα με την περίοδο του σήματος, παράγοντας κατά αυτόν τον τρόπο παλμούς στις θέσεις των μηδενικών της αρχικής ακολουθίας δεδομένων.

Η ανάκτηση του ρολογιού μπορεί να επιτευχθεί από απλά παθητικά στοιχεία φιλτραρίσματος, αρκεί αυτά να έχουν την επιθυμητή, περιοδική ως προς τη συχνότητα, συνάρτηση μεταφοράς. Τέτοια οπτικά φίλτρα είναι τα φίλτρα τύπου Fabry-Pérot [3.4] – [3.6].



Εικόνα 48: Φίλτρο Fabry-Pérot.

Το φίλτρο Fabry-Pérot (Εικόνα 48) αποτελείται από μια κοιλότητα, η οποία σχηματίζεται από δύο απλά κάτοπτρα. Το εισερχόμενο πεδίο υφίσταται διαδοχικές ανακλάσεις μέσα στην κοιλότητα και το συνολικό εξερχόμενο πεδίο προκύπτει από τη συμβολή των ανακλώμενων πεδίων στην έξοδο της κοιλότητας. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα, που παρέχουν τα φίλτρα Fabry-Pérot στη λειτουργία τους ως κυκλώματα ανάκτησης ρολογιού, είναι το γεγονός, ότι είναι απλές και πλήρως παθητικές διατάξεις. Επίσης, τα φίλτρα αυτά προσφέρουν τη δυνατότητα για πολυκυματική ανάκτηση ρολογιού, καθώς η περιοδικότητα της φασματικής συνάρτησης μεταφοράς τους ως προς τη συχνότητα και το μεγάλο εύρος ζώνης

λειτουργίας τους επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάκτηση ρολογιού από σήματα δεδομένων σε διαφορετικά μήκη κύματος.

Καθώς, για κατασκευαστικούς λόγους, τα φίλτρα Fabry-Pérot δεν επιτυγχάνουν την ιδανική συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφηκε, επιπρόσθετα στοιχεία (π.χ. ημιαγώγιμοι οπτικοί ενισχυτές), όπως θα φανεί και στις επόμενες ενότητες, μπορούν να υποστηρίξουν τη λειτουργία ανάκτησης ρολογιού

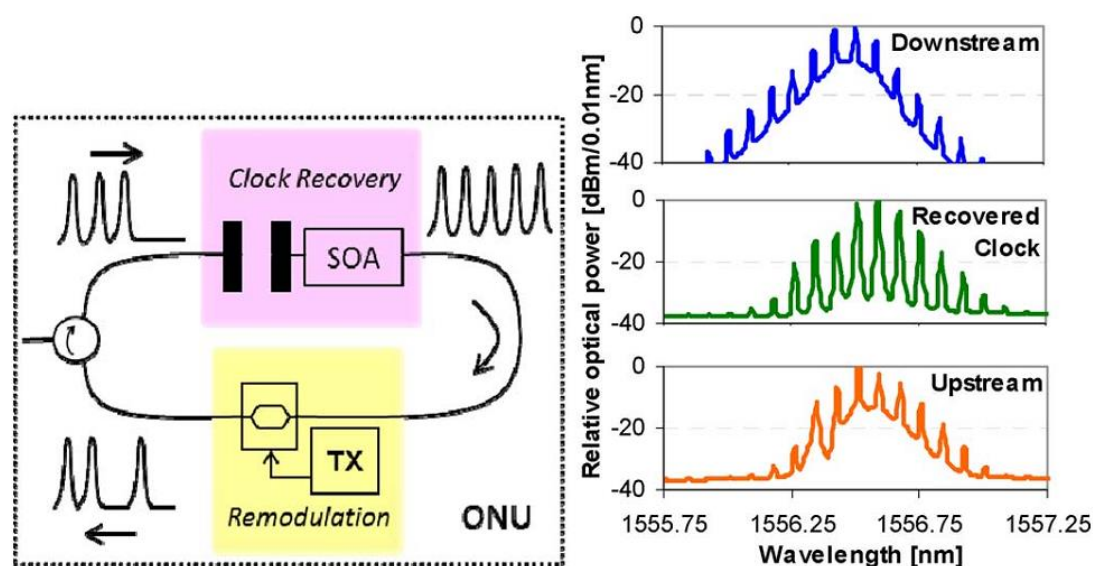
3.2 Εφαρμογή ανάκτησης ρολογιού σε συμμετρικά (10Gb/s) παθητικά οπτικά δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος

Η χρήση της μονάδας ανάκτησης του ρολογιού για σκοπό της επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος σε δίκτυα πρόσβασης παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα: Καταρχάς, οι παλμοί που παρέχει η μονάδα για διαμόρφωση του αντιρρευματικού σήματος, καθιστούν την ποιότητα των δεδομένων μετάδοσης λιγότερο εξαρτημένη από το εύρος ζώνης διαμόρφωσης του χαμηλού κόστους διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος. Επιπλέον, το συρρευματικό σήμα διαμορφώνεται με υψηλό λόγο σβέσης (ER) για να υποβοηθήσει την ανάκτηση του ρολογιού. Αυτό ευνοεί τη λήψη του συρρευματικού σήματος, καθώς ποινή ισχύος λόγω του μειωμένου βαθμού διαμόρφωσης αποφεύγεται [3.7].

Παρόλο που τα προαναφερθέντα είναι ισχυρά επιχειρήματα υπέρ αυτής της μεθόδου επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος, η υλοποίηση ενέχει κάποια πολυπλοκότητα. Για τη δημιουργία των στοιχείων του ρολογιού, παλμοί δημιουργούνται στον πομπό, το οποίο οδηγεί σε RZ κωδικοποίηση του συρρευματικού σήματος. Επιπλέον, για την επαναχρησιμοποίηση του οπτικού ρολογιού στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), συμμετρικοί ρυθμοί δεδομένων πρέπει να επιλεγούν για τα συρρευματικά και αντιρρευματικά σήματα, καθώς διαφορετικά κάθε δυφίο στο αντιρρευματικό σήμα θα αποτελείται από πολλούς παλμούς [3.8] – [3.11].

Η αρχική απόδειξη της μεθόδου επαναδιαμόρφωσης του οπτικού ρολογιού διενεργήθηκε σε περιβάλλον WDM-PON [3.12]. Η Εικόνα 49 απεικονίζει τη σχεδίαση της μονάδας του οπτικού δικτύου, ενώ η Εικόνα 50 την συνολική πειραματική διάταξη και η Εικόνα 51 την εργαστηριακή υλοποίηση.

Το συρρευματικό σήμα τύπου RZ δημιουργήθηκε σε μήκος κύματος 1556,55 nm με έναν ηλεκτρο-απορροφητικό διαμορφωτή (EAM), συγχρονισμένο με ηλεκτρο-οπτικό Mach-Zehnder διαμορφωτή στα 10 Gb/s. Ο λόγος σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος ήταν μεγαλύτερος των 13 dB.

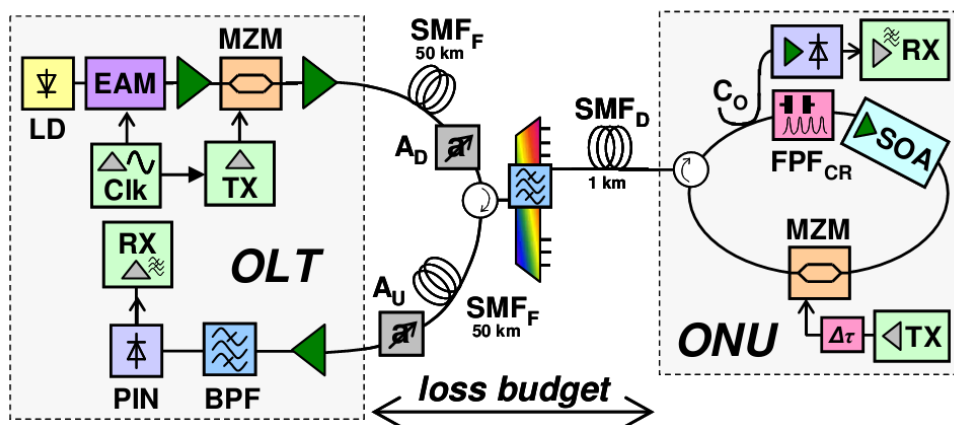


Εικόνα 49: Σχεδίαση μονάδας οπτικού δικτύου (ONU), που βασίζεται στην επαναδιαμόρφωση του ανακτημένου ρολογιού από τη μετάδοση του συρρευματικού σήματος, σε δίκτυα πρόσβασης και φάσματα σημάτων στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), με την οπτική τους ισχύ να είναι κανονικοποιημένη στη μέγιστη τιμή ισχύος.

Στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), το συρρευματικό σήμα διαχωρίζεται από ένα 50/50 διαζεύκτη (C_0), για να πραγματοποιηθεί η λήψη του σήματος, αλλά και η επαναδιαμόρφωση. Ένας συνδυασμός χαμηλού κέρδους οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου (EDFA) και 10 Gb/s P-I-N φωτοδιόδου χρησιμοποιήθηκε ως δέκτης.

Η ανάκτηση του ρολογιού αποτελείται από ένα φίλτρο Fabry-Pérot με ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) 10,2278 GHz και λεπτότητα 40, και έναν ημιαγωγικό οπτικό

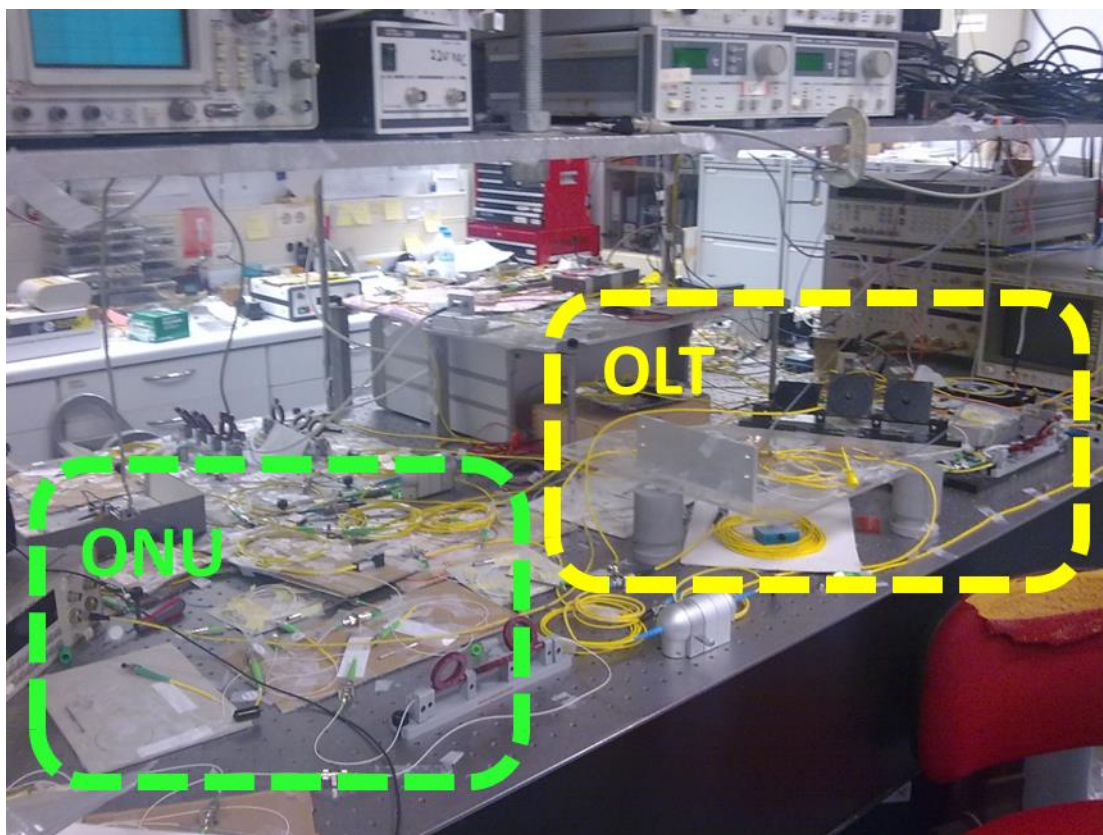
ενισχυτή (SOA). Ο ρυθμός μετάδοσης του συρρευματικού σήματος ταυτίστηκε με την ακριβή τιμή της ελεύθερης φασματικής περιοχής, ώστε να βελτιστοποιηθεί η επίδοση της ανάκτησης ρολογιού. Ένας μικρού κέρδους (10dB) οπτικός ενισχυτής ίνας ερβίου (EDFA) προστέθηκε πριν τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (SOA), καθώς το κέρδος του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (SOA) εμπόδιζε τη λειτουργία του στην περιοχή κορεσμού. Με αυτό το συνδυασμό ενισχυτών, γίνεται εφικτή επαρκής καταπίεση της εναπομένουσας διακύμανσης πλάτους στο δυφίο '1' μετά το φίλτρο Fabry-Pérot. Σε ένα πραγματικό σύστημα, ο ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής μπορεί να επανασχεδιαστεί για να ικανοποιεί τις προϋποθέσεις, έτσι ώστε να μην είναι απαραίτητη η χρήση του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου. Ο ηλεκτρο-οπτικός διαμορφωτής Mach-Zehnder εισάγει τότε τα δεδομένα ρυθμού 10 Gb/s στο αντιρρευματικό σήμα, συγχρονισμένα στους ανακτημένους παλμούς ρολογιού, με τη βοήθεια γραμμής οπτικής καθυστέρησης ($\Delta\tau$).



Εικόνα 50 Πειραματική διάταξη επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος μέσω οπτικής επαναδιαμόρφωσης ρολογιού με τη βοήθεια φίλτρου Fabry-Pérot.

Οι ισολογισμένες απώλειες του οπτικού δικτύου διανομής καθορίστηκαν εξ αρχής στα 20 dB μέσω των εξασθενητών A_D και A_U . Η ισχύς του συρρευματικού σήματος ήταν 10 dBm, έχοντας ως συνέπεια ισχύ εισόδου στη μονάδα οπτικού δικτύου -10 dBm. Στην είσοδο του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου, που υποβοηθάει τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή στο υποσύστημα ανάκτησης ρολογιού της μονάδας οπτικού δικτύου, το σήμα φτάνει με ισχύ -22 dBm. Ο σηματοθρομβικός λόγος (OSNR), για λεπτομέρεια ανάλυσης φάσματος 0,1 nm, είναι 41,5 dB μετά τον πομπό του τερματικού οπτικών

γραμμών (OLT) και 29,4 dB στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου, και η ισχύς του αντιρρευματικού σήματος είναι 0,5 dBm στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου.

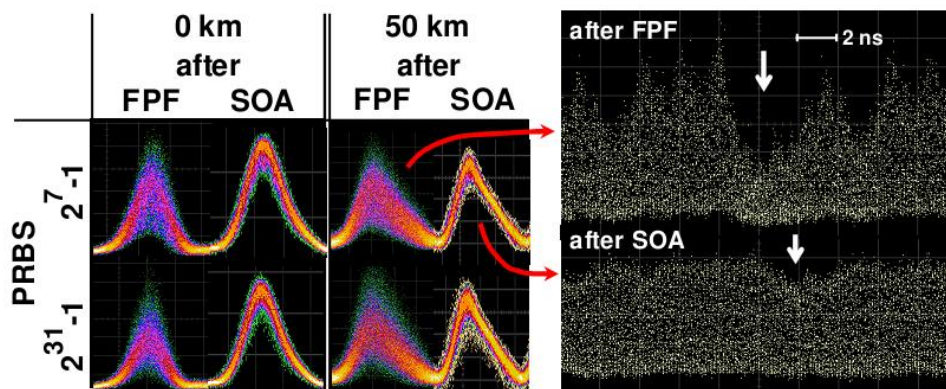


Εικόνα 51: Εργαστηριακή διάταξη ανάκτησης ρολογιού που υλοποιήθηκε στο ΕΦΕ, για επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος σε παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης.

Η δυνατότητα της διάταξης ανάκτησης ρολογιού, στη μονάδα οπτικού δικτύου, να παρέχει κατάλληλο οπτικό σήμα για το διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος [3.13], αξιολογήθηκε με κριτήριο τη διακύμανση πλάτους του δυφίου '1'. Τα αντίστοιχα διαγράμματα οφθαλμού για το ανακτημένο οπτικό ρολόι, φαίνονται στην Εικόνα 52.

Σε συνθήκες χωρίς μετάδοση σε οπτική ίνα (back-to-back), η μέγιστη διακύμανση πλάτους του δυφίου '1' είναι 6,5 και 6,8 dB μετά το φίλτρο Fabry-Pérot για PRBS 2^7-1 και $2^{31}-1$, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές λόγω σβέσης μειώνονται σημαντικά μετά και τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (SOA), ο οποίος λειτουργεί στην περιοχή του κορεσμού, όπου τα σήματα στην έξοδό του παρουσιάζουν μέγιστη τιμή διακύμανσης πλάτους του δυφίου '1', 1,7 και 1,9 dB, αντίστοιχα.

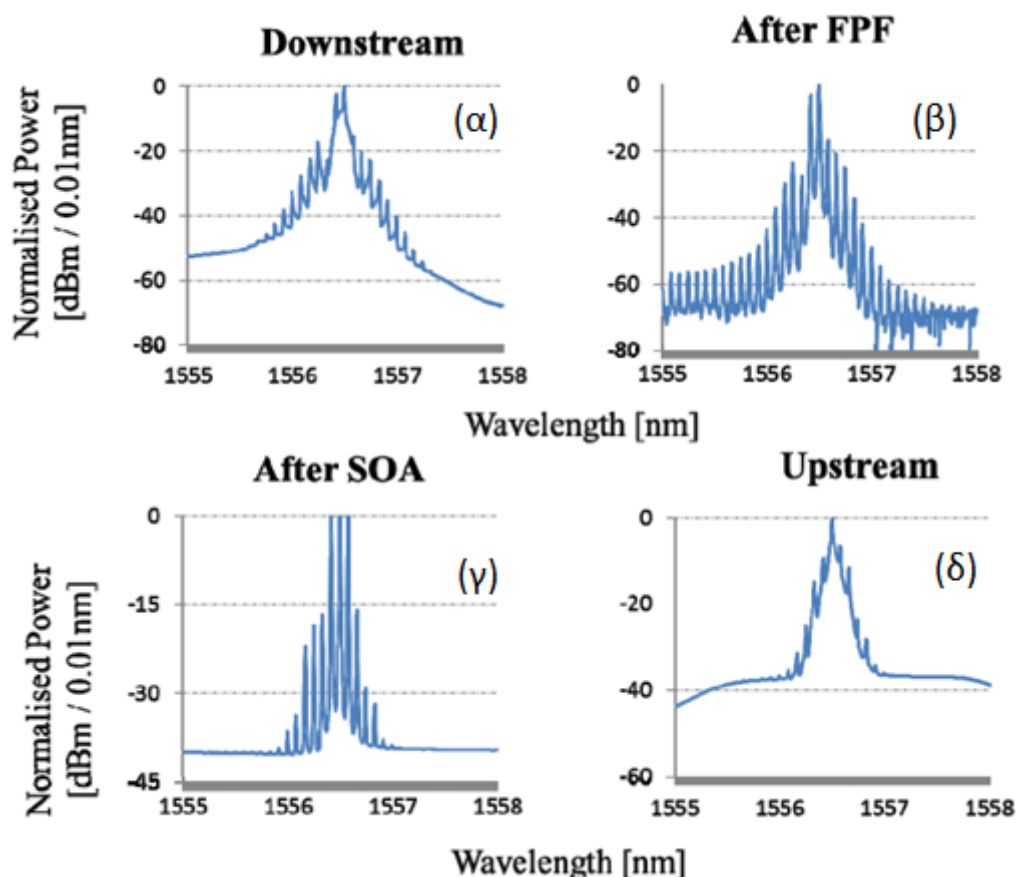
Η εισαγωγή 50 χλμ οπτικής ίνας ανάμεσα στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) και την μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) επιδεινώνει την επίδοση της ανάκτησης ρολογιού. Τα κενά δυφία στις ακολουθίες δεδομένων εξακολουθούν να συμπληρώνονται με οπτικούς παλμούς από το φίλτρο Fabry-Pérot, παρατηρούνται ωστόσο ισχυρότερες διακυμάνσεις πλάτους, καθώς το συρρευματικό σήμα επηρεάζεται από τη χρωματική διασπορά. Αυτό οδηγεί σε αυξημένη διακύμανση πλάτους του δυφίου '1', που σε αυτήν την περίπτωση είναι 2,2 και 3,2 dB αντίστοιχα, μετά τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή.



Εικόνα 52: Διαγράμματα οφθαλμού και ακολουθίας δεδομένων του ανακτημένου ρολογιού. Τα βελάκια δείχνουν το σημείο της ακολουθίας με τα περισσότερα συνεχόμενα δυφία '0' εντός της ακολουθίας δεδομένων.

Στην περίπτωση του αντιρρευματικού σήματος, η επίδοση του συστήματος αξιολογήθηκε πρώτα στην περίπτωση όπου το συρρευματικό σήμα δεν ήταν διαμορφωμένο (back-to-back), δηλαδή έχοντας ένα οπτικό σήμα συνεχούς κύματος (CW) ως είσοδο στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) και NRZ αντιρρευματικό σήμα. Στη συνέχεια, ενεργοποιήθηκε η διαμόρφωση στο συρρευματικό σήμα και το RZ αντιρρευματικό σήμα που προκύπτει από τη διαμόρφωση του ανακτημένου ρολογιού, χαρακτηρίστηκε για διαφορετικά μήκη PRBS του αντιρρευματικού σήματος.

Τα φάσματα σε διαφορετικά σημεία της μονάδας οπτικού δικτύου φαίνονται στην Εικόνα 53, μετά από μετάδοση 50 χλμ. Το επίπεδο οπτικής ισχύος σε κάθε φάσμα είναι κανονικοποιημένο προς τη συνιστώσα υψηλότερης ισχύος. Από αριστερά προς τα δεξιά, απεικονίζονται το συρρευματικό σήμα, το ανακτημένο σήμα ρολογιού πριν και μετά τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή και τέλος το επαναδιαμορφωμένο αντιρρευματικό σήμα.

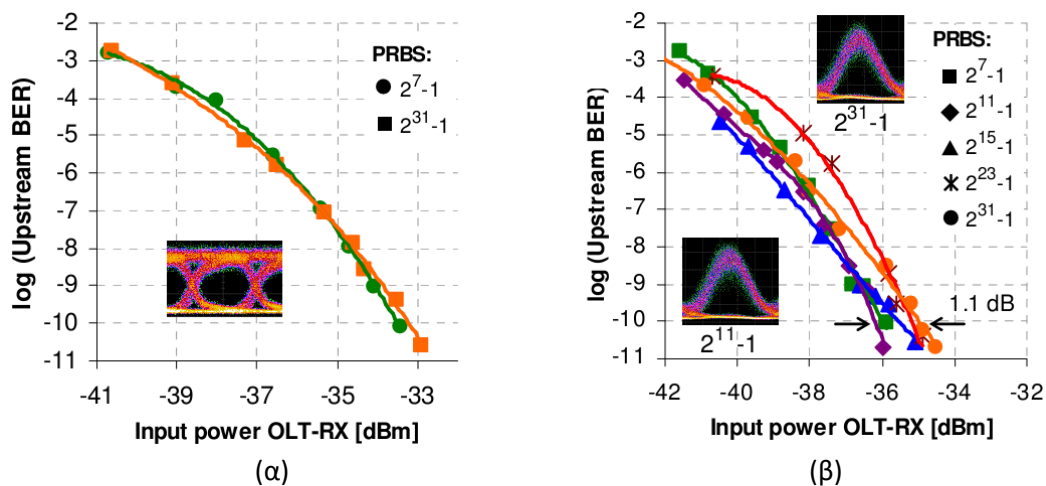


Εικόνα 53: Φάσματα σημάτων στη μονάδα οπτικού δικτύου μετά από 50 χλμ μετάδοση. α) Συρρευματικό σήμα, β) μετά το φίλτρο Fabry-Pérot, γ) μετά τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή και δ) αντιρρευματικό σήμα.

Η Εικόνα 54(α) δείχνει μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) για NRZ αντιρρευματικό σήμα και οπτικό σήμα συνεχούς κύματος (CW) ως είσοδο στον διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος, ενώ η Εικόνα 54(β) δείχνει την επίδοση του RZ αντιρρευματικού σήματος, που προκύπτει από διαμόρφωση του ανακτημένου ρολογιού.

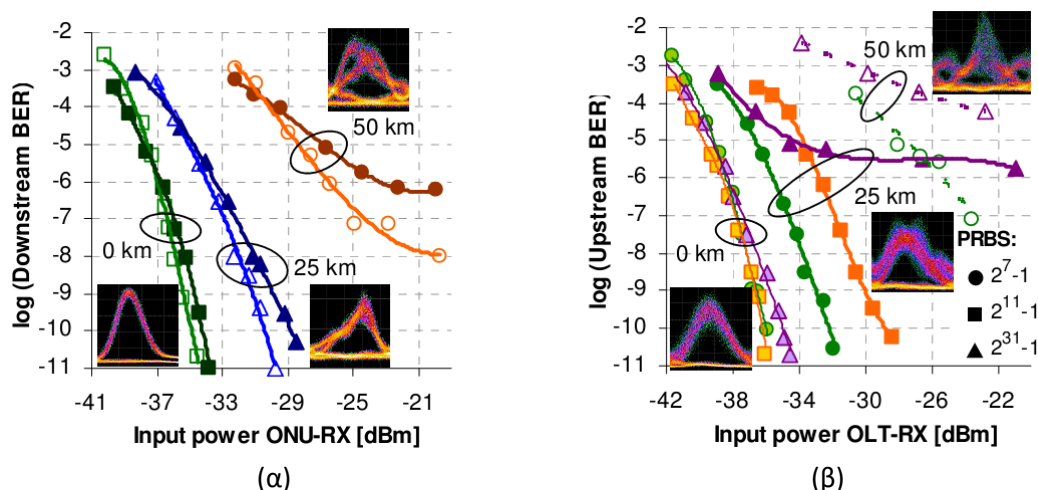
Και στις δύο περιπτώσεις, δεν παρατηρείται ισχυρή ποινή ισχύος με την αύξηση του μήκους της PRBS του συρρευματικού σήματος. Ποινή ισχύος 1,1 dB παρατηρείται για το RZ αντιρρευματικό σήμα, η οποία οφείλεται σε φαινόμενα που παρουσιάζονται λόγω της ανάκτησης ρολογιού της δεδομένης ακολουθίας δεδομένων, μην επιτρέποντας την πλήρη καταπίεση της διακύμανσης πλάτους των παλμών από τον οπτικό ημιαγωγίμο ενισχυτή. Ωστόσο αυτά τα φαινόμενα μπορούν να ελαττωθούν χρησιμοποιώντας φίλτρο Fabry-Pérot υψηλότερης λεπτότητας [3.14].

Η φαινομενικά καλύτερη ευαισθησία του RZ αντιρρευματικού σήματος συγκρινόμενη με το NRZ, προκαλείται λόγω του duty cycle του RZ σήματος, που ανάγεται σε μείωση της ισχύος λήψης του κατά 5,6 dB. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, παρατηρείται μία λογική ποινή ισχύος λήψης $\sim 3,4$ dB σε επίπεδο ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-10} ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή του ιδανικού οπτικού σήματος και του ανακτημένου οπτικού ρολογιού ως είσοδο στον διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος. Αυτή η ποινή ισχύος αντικατοπτρίζει την απόσταση από την ιδανική περίπτωση όπου το συρρευματικό σήμα έχει άπειρο λόγο σβέσης (ER) και συνεπώς δεν προκύπτει ποινή ισχύος λόγω του μειωμένου βαθμού διαμόρφωσης.



Εικόνα 54: Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) αντιρρευματικού σήματος, χωρίς μετάδοση σε οπτική ίνα (back-to-back), για (α) NRZ διαμόρφωση με είσοδο ιδανικού οπτικού σήματος συνεχούς κύματος (CW), (β) μετάδοση RZ συρρευματικού σήματος και επαναδιαμόρφωση του ανακτημένου ρολογιού.

Η επίδοση του συστήματος για διαφορετικά μήκη PRBS φαίνεται στην Εικόνα 55. Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) του συρρευματικού σήματος φαίνονται στην Εικόνα 55(α). Οπτική ίνα μήκους 25 χλμ προκαλεί ποινή ισχύος λήψης ~ 5 dB λόγω των φαινομένων διασποράς, ωστόσο ρυθμός εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-10} μπορεί ακόμη να επιτευχθεί. Υψηλό περιθώριο ισχύος, 35 dB, υπολογίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στην αρχική ισχύ του συρρευματικού σήματος και την ευαισθησία λήψης του, στο επίπεδο της εισόδου της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU), και είναι συμβατό καθώς ξεπερνά την τυπική τιμή των 20 dB. Όταν το μήκος μετάδοσης αυξάνεται περαιτέρω, στα 50 χλμ, επιτυχής λήψη είναι ακόμη δυνατή με χρήση εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC), με ποινή ισχύος ~ 9 dB σε σύγκριση με την back-to-back περίπτωση.

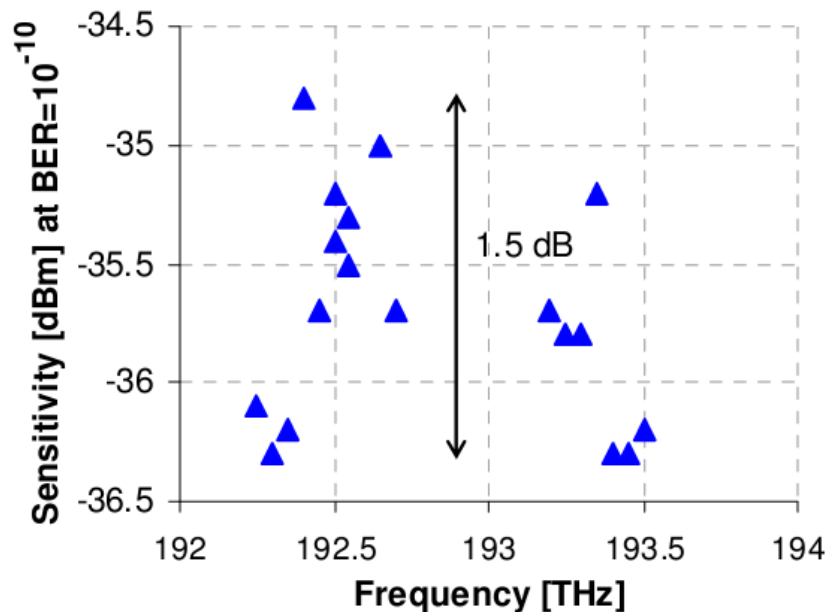


Εικόνα 55: Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) για μετάδοση σε οπτική ίνα διαφορετικού μήκους (α) του συρρευματικού σήματος (γεμισμένα και κενά σημεία απεικονίζουν PRBS μήκους $2^{31}-1$ και 2^7-1 , αντίστοιχα), και (β) του αντιρρευματικού σήματος.

Για το RZ αντιρρευματικό σήμα, που χρησιμοποιεί το συρρευματικό σήμα με διευρυμένους παλμούς λόγω διασποράς ως είσοδο για την οπτική ανάκτηση ρολογιού, τα φαινόμενα διασποράς εμφανίζονται και στο αντιρρευματικό σήμα, λόγω της αμφίδρομης δομής του δικτύου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 55(β), όπου επίσης αποτελέσματα από την Εικόνα 54(β) υπάρχουν, για σύγκριση με την περίπτωση χωρίς μετάδοση σε οπτική ίνα (back-to-back), η ποινή ισχύος λόγω του μήκους της PRBS αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο υποβαθμισμένο σήμα ρολογιού και προκαλεί ήδη όριο σφαλμάτων για μεγάλου μήκους PRBS ($2^{31}-1$) σε συνδυασμό με

25 χλμ μήκος ίνας. Για μικρότερου μήκους PRBS (2^7-1 και $2^{11}-1$), οι ποινές ισχύος λήψης για ρυθμό εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-10} σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς μετάδοση σε ίνα (back-to-back) είναι 5 και 9 dB, αντίστοιχα. Ο ισολογισμός ισχύος για PRBS μήκους $2^{11}-1$ είναι 28,3 dB και κατά πολύ πάνω από τον τυπικά απαιτούμενο ισολογισμό ισχύος ενός δικτύου PON (20 dB). Όπως και για το συρρευματικό σήμα, η λήψη του αντιρρευματικού σήματος είναι δυνατή με εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) μετά από μετάδοση σε 50 χλμ. Ωστόσο, το περιθώριο ισχύος μειώνεται περισσότερο από 10 dB, φανερώνοντας την ανάγκη για αντιστάθμιση της διασποράς.

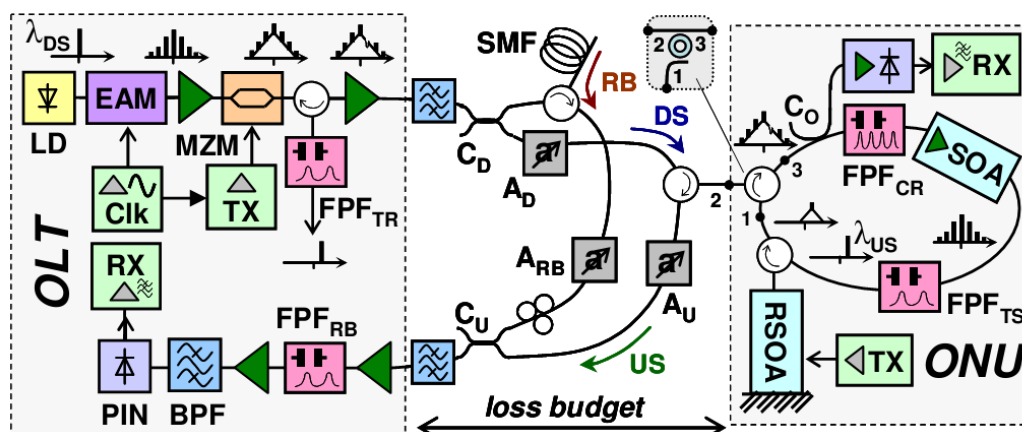
Τέλος, η μέθοδος επαναδιαμόρφωσης του ρολογιού αξιολογήθηκε για διαφορετικά μήκη κύματος του συρρευματικού σήματος. Η Εικόνα 56 δείχνει το φάσμα ευαισθησίας του αντιρρευματικού σήματος για την περίπτωση χωρίς μετάδοσης σε ίνα (back-to-back) του συρρευματικού σήματος, με PRBS μήκους $2^{11}-1$. Καθώς η ευαισθησία διαφέρει μόνο κατά μέγιστο 1,5 dB ανάμεσα σε όλα τα μήκη κύματος, γίνεται φανερό ότι η διαφανής στο μήκος κύματος λειτουργία μπορεί να εγγυηθεί.



Εικόνα 56: Ευαισθησία λήψης του αντιρρευματικού σήματος, χωρίς μετάδοση του (back-to-back), για διαφορετικές συχνότητες.

3.3 Ανοχή σημάτων στο θόρυβο λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh

Η ανάκτηση ρολογιού στη μονάδα οπτικού δικτύου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπλέον του σκοπού της επαναδιαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος. Δεδομένου ότι μπορεί να ανακτηθεί μία αρχικά καταπιεσμένη αρμονική του RZ συρρευματικού σήματος, επιτρέπει - παράλληλα με την εξαγωγή της ίδιας αρμονικής ρολογιού μετά τη διαδικασία ανάκτησης ρολογιού - την ανοχή των αντιρρευματικών δεδομένων έναντι της οπισθοσκέδασης Rayleigh, λόγω του συρρευματικού σήματος [3.15]. Το πλεονέκτημα της έναντι άλλων τεχνικών που έχουν προταθεί [3.16], [3.17] έγκειται στην απλότητα της τεχνικής: επιπροσθέτως της μεθόδου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, μόνο παθητικό οπτικό φιλτράρισμα εφαρμόζεται επιπλέον για να αποκτηθεί το επιθυμητό, μετατοπισμένο σε μήκος κύματος, αντιρρευματικό σήμα.

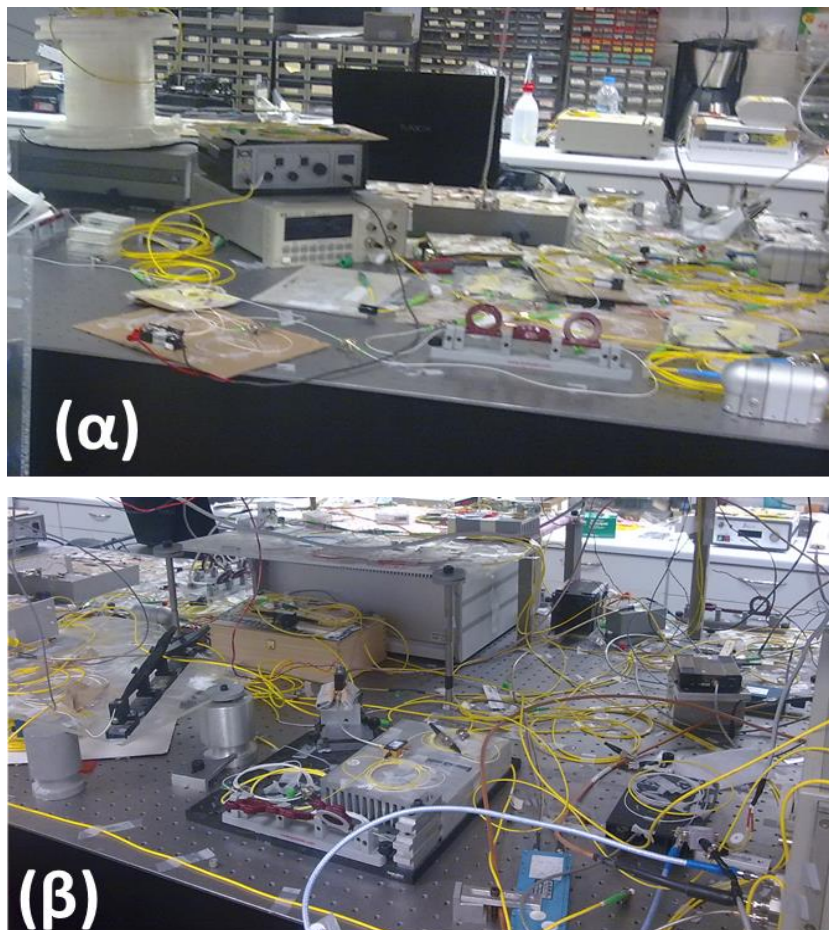


Εικόνα 57 Πειραματική διάταξη τεχνικής μετατόπισης μήκους κύματος.

Το RZ συρρευματικό σήμα διέρχεται ένα φίλτρο στενού εύρους φάσματος, για να αφαιρεθεί μία από τις αρμονικές του ρολογιού. Λόγω αυτού, η οπισθοσκέδαση Rayleigh που εμφανίζεται στην αμφίδρομη ίνα, δεν περιέχει κάποιο φασματικό περιεχόμενο στο μήκος κύματος της καταπιεσμένης αρμονικής του ρολογιού. Επομένως, αν το αντιρρευματικό σήμα μεταδοθεί σε αυτό ακριβώς το μήκος κύματος, δεν θα ανακύψει κάποια υποβάθμιση του σήματος λόγω της οπισθοσκέδασης Rayleigh. Για την παραγωγή της οπτικής φέρουσας στο επιθυμητό μήκος κύματος, αμιγώς οπτική ανάκτηση ρολογιού χρησιμοποιείται μαζί με ένα στενό ζωνοπερατό οπτικό φίλτρο, έτσι ώστε μόνο μία οπτική φέρουσα να παραμένει

στην είσοδο του διαμορφωτή του αντιρρευματικού σήματος. Αναλόγως σε ποια αρμονική του ρολογιού διαμορφώνεται το αντιρρευματικό σήμα, μία μετατόπιση μήκους κύματος κατά ακέραιο πολλαπλάσιο του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του συρρευματικού σήματος, R_{DS} , προκύπτει. Στο δέκτη του αντιρρευματικού σήματος, τα φασματικά περιεχόμενα που προκύπτουν λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh μπορούν να φιλτραριστούν από ένα οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο, ρυθμισμένο στο μήκος κύματος του αντιρρευματικού σήματος.

Η τεχνική εφαρμόστηκε σε δίκτυο PON, με ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης 10 και 1 Gb/s για συρρευματικά και αντιρρευματικά σήματα, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην πειραματική διάταξη της Εικόνα 57, αλλά και στην εργαστηριακή διαδικασία (Εικόνα 58), που πραγματοποιήθηκε στο ΕΦΕ.



Εικόνα 58: Εργαστηριακή διάταξη, που υλοποιήθηκε στο ΕΦΕ, της (α) μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) και (β) του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT).

Τα οπτικά φίλτρα για την ανάκτηση ρολογιού και το στενό φιλτράρισμα ήταν Fabry-Pérot. Για την καταπίεση της αρμονικής του RZ, στον πομπό του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT), και την εξαγωγή της αρμονικής μετά την ανάκτηση ρολογιού στη μονάδα οπτικού δικτύου, φίλτρα Fabry-Pérot εύρους ζώνης 0,55 και 0,29 GHz χρησιμοποιήθηκαν. Η μονάδα ανάκτησης ρολογιού είναι ίδια με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στο δέκτη του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT), ένα ευρύ φίλτρο Fabry-Pérot, εύρους ζώνης 5 GHz, χρησιμοποιήθηκε εσωτερικά ενός οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου δύο σταδίων (EDFA), για να φιλτραριστεί ο θόρυβος που προέρχεται από την οπισθοσκέδαση Rayleigh.

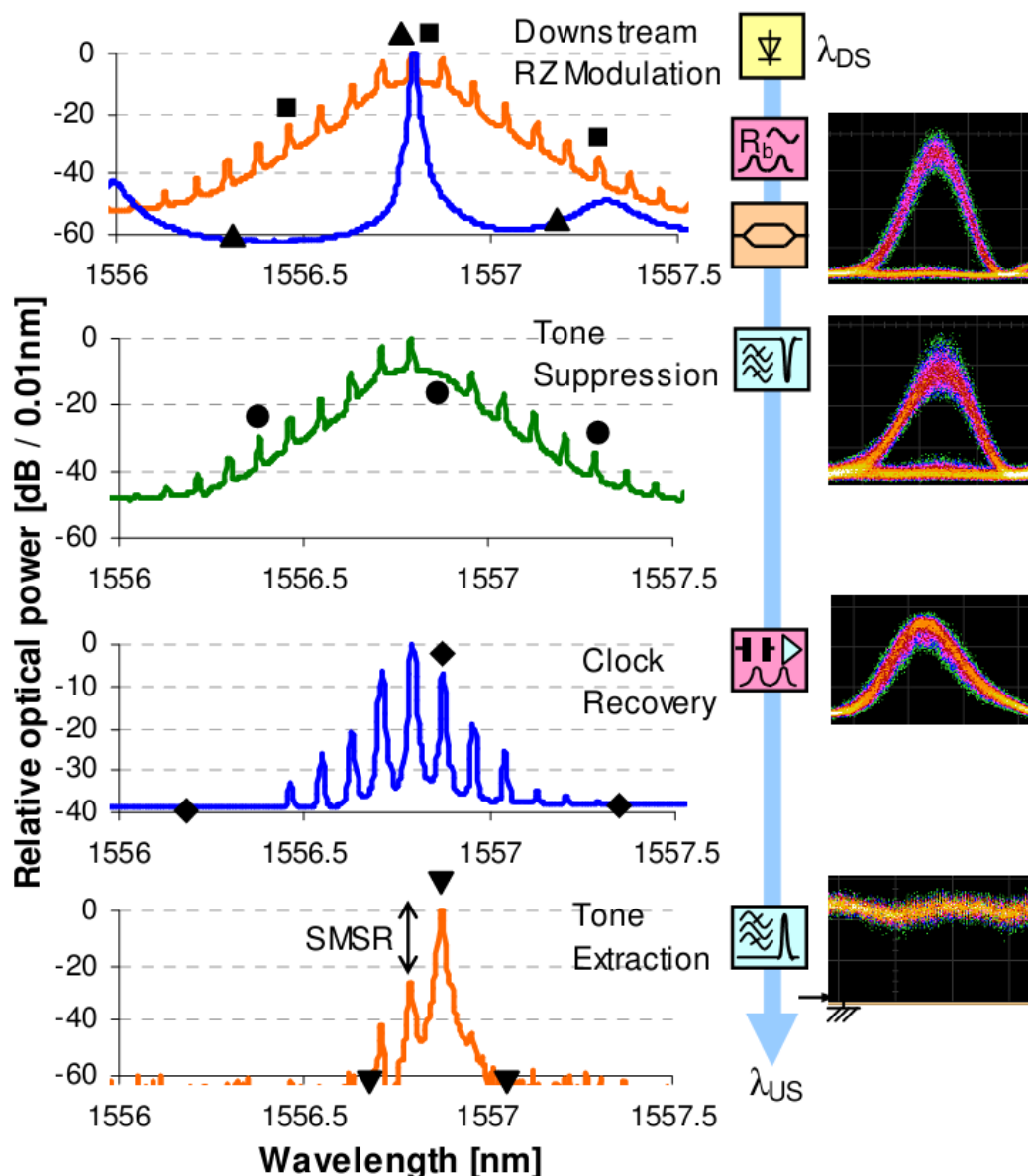
Η οπισθοσκέδαση Rayleigh σημειώθηκε σε οπτική ίνα μήκους 25 χλμ, όπου το οπισθοσκεδαζόμενο φως προστέθηκε στο υπάρχον αντιρρευματικό σήμα. Οι εξασθενητές A_D και A_U ρυθμίστηκαν, ώστε να υπάρχει ένας προκαθορισμένος ισολογισμός ισχύος 20 dB μεταξύ του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT) και της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) (loss budget), δηλαδή, με αρχική ισχύ συρρευματικού σήματος 10 dBm, από τον πομπό του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT), η είσοδος στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) ήταν -10 dBm. Ο τρίτος εξασθενητής, A_{RB} , χρησιμοποιήθηκε για να ρυθμίζεται το OSRR του αντιρρευματικού σήματος. Δύο ευρεία (3 nm) ζωνοπερατά φίλτρα συμπεριλήφθηκαν στο δίκτυο διανομής, προσομοιώνοντας τον πολυπλέκτη που χρησιμοποιείται σε WDM-PON δίκτυα.

Ένας 50/50 διαζεύκτης (C_0) στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) διαχωρίζει το προσπίπτον συρρευματικό σήμα, για επαναδιαμόρφωση και λήψη του σήματος. Για τη λήψη του σήματος, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός P-I-N φωτοδίοδου και TIA. Ένας υψηλού κέρδους ανακλαστικός ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής (RSOA) [3.18], με χαμηλό ηλεκτρο-οπτικό εύρος ζώνης, αποτέλεσε τον πομπό του αντιρρευματικού σήματος και τροφοδοτήθηκε από δεδομένα τύπου PRBS $2^{31}-1$. Στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU), το αντιρρευματικό σήμα είχε ισχύ 2,5 dBm, δηλαδή το κέρδος εντός της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) ήταν 12,5 dB. Σε περίπτωση απλού ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή, ο κυκλοφορητής στην αμφίδρομη είσοδο του ανακλαστικού ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή (RSOA) μπορεί να αφαιρεθεί.

Η φασματική εξέλιξη του συρρευματικού σήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 59, όπου η οπτική ισχύς είναι κανονικοποιημένη στο φασματικό στοιχείο υψηλότερης ισχύος. Η φέρουσα του συρρευματικού σήματος (\blacktriangle) βρίσκεται σε μήκος κύματος 1556,8 nm και απεικονίζονται επιπλέον δύο πλευρικοί λοβοί που προκύπτουν από το λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης που χρησιμοποιείται. Μετά την RZ διαμόρφωση (\blacksquare) με δεδομένα τύπου PRBS 2^7-1 και καταπίεση της αρμονικής του ρολογιού με φίλτρο Fabry-Pérot (FPF) (\bullet), η πρώτη (+1) αρμονική καταπιέζεται κατά περισσότερο από 13 dB. Αυτή η τιμή μπορεί να αυξηθεί με χρήση μη ανακλαστικών φίλτρων, όπως τα φίλτρα δακτυλίου. Η καταπιεσμένη αρμονική αναδημιουργείται εκ νέου, μετά την ανάκτηση ρολογιού στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) (\blacklozenge). Επιπλέον της μετατόπισης μήκους κύματος, κατά R_{DS} σε σχέση με την οπτική φέρουσα του συρρευματικού σήματος, το SMSR μετά την εξαγωγή της αρμονικής από το φίλτρο Fabry-Pérot (\blacktriangledown), βρίσκεται ήδη στα 25 dB.

Η απόσταση από τον ισχυρότερο πλευρικό λοβό, ο οποίος προέρχεται από την φέρουσα του συρρευματικού σήματος, μήκους κύματος λ_{DS} , αντιστοιχεί στο ρυθμό μετάδοσης του συρρευματικού σήματος, R_{DS} , και είναι μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης του φίλτρου Fabry-Pérot στο δέκτη του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT), με αποτέλεσμα το SMSR να βελτιώνεται περαιτέρω κατά τη λήψη του αντιρρευματικού σήματος.

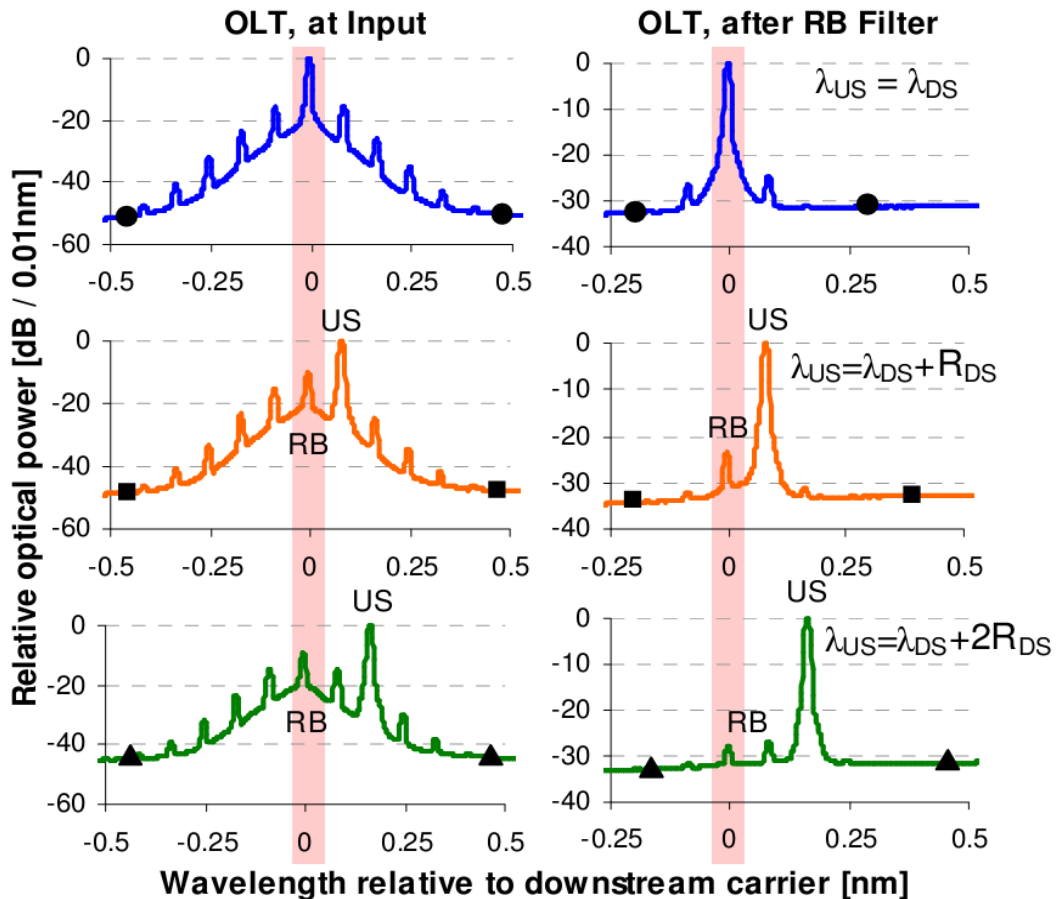
Αυτό είναι φανερό από τα φάσματα στην Εικόνα 60, που δείχνει τα ληφθέντα αντιρρευματικά σήματα, μετά την προσθήκη του θορύβου που προέρχεται από την οπισθοσκέδαση Rayleigh, στην είσοδο του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT) και μετά το φίλτρο Fabry-Pérot που φιλτράρει το αντιρρευματικό σήμα. Παρόλο που το SMSR είναι υψηλό για το αντιρρευματικό σήμα χωρίς μετατόπιση μήκους κύματος (\bullet), υπάρχει σημαντικός θόρυβος λόγω της οπισθοσκέδασης Rayleigh εντός του εύρους ζώνης του σήματος. Αντιθέτως, για το μετατοπισμένο αντιρρευματικό σήμα δεν παρατηρείται θόρυβος εντός του εύρους ζώνης του σήματος, λόγω της καταπίεσης της αντίστοιχης αρμονικής του ρολογιού στον πομπό του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT). Για το αντιρρευματικό σήμα που βρίσκεται στις αρμονικές '+1' (\blacksquare) και '+2' (\blacktriangle), το SMSR καθορίζει την επίδοση της λήψης. Όπως φαίνεται, το SMSR κινείται στην περιοχή των 25 dB.



Εικόνα 59: Οπτικά φάσματα που απεικονίζουν την εξέλιξη του RZ συρρευματικού σήματος, που μετατρέπεται σε μετατοπισμένο στο μήκος κύματος αντιρρευματικό σήμα και αντίστοιχα διαγράμματα οφθαλμού.

Η υψηλή τιμή του SMSR προέρχεται από την επαρκή καταπίεση των υπολοίπων αρμονικών του ρολογιού από το φίλτρο Fabry-Pérot, κατά την εξαγωγή της φέρουσας του αντιρρευματικού σήματος. Η Εικόνα 61, δείχνει το SMSR που προκύπτει και τις απώλειες φιλτραρίσματος της εξαγωγής της φέρουσας. Είναι προφανές, ότι το φιλτράρισμα περαιτέρω αρμονικών του ρολογιού, π.χ. η αρμονική '+3' ή '-3', υπόκειται σε επιπλέον απώλειες.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα οφθαλμού στην Εικόνα 59, δεν παρατηρείται ισχυρή παραμόρφωση στο συρρευματικό σήμα, στην περίπτωση που η αρμονική '+1' καταπιέζεται, ενώ είναι ακόμη μικρότερη στις περιπτώσεις όπου καταπιέζονται αρμονικές υψηλότερης τάξης. Σημειώνεται, ότι για μεγαλύτερου μήκους PRBS του συρρευματικού σήματος, η λεπτότητα του φίλτρου Fabry-Pérot που χρησιμοποιείται στην ανάκτηση ρολογιού πρέπει να αυξηθεί ανάλογα.

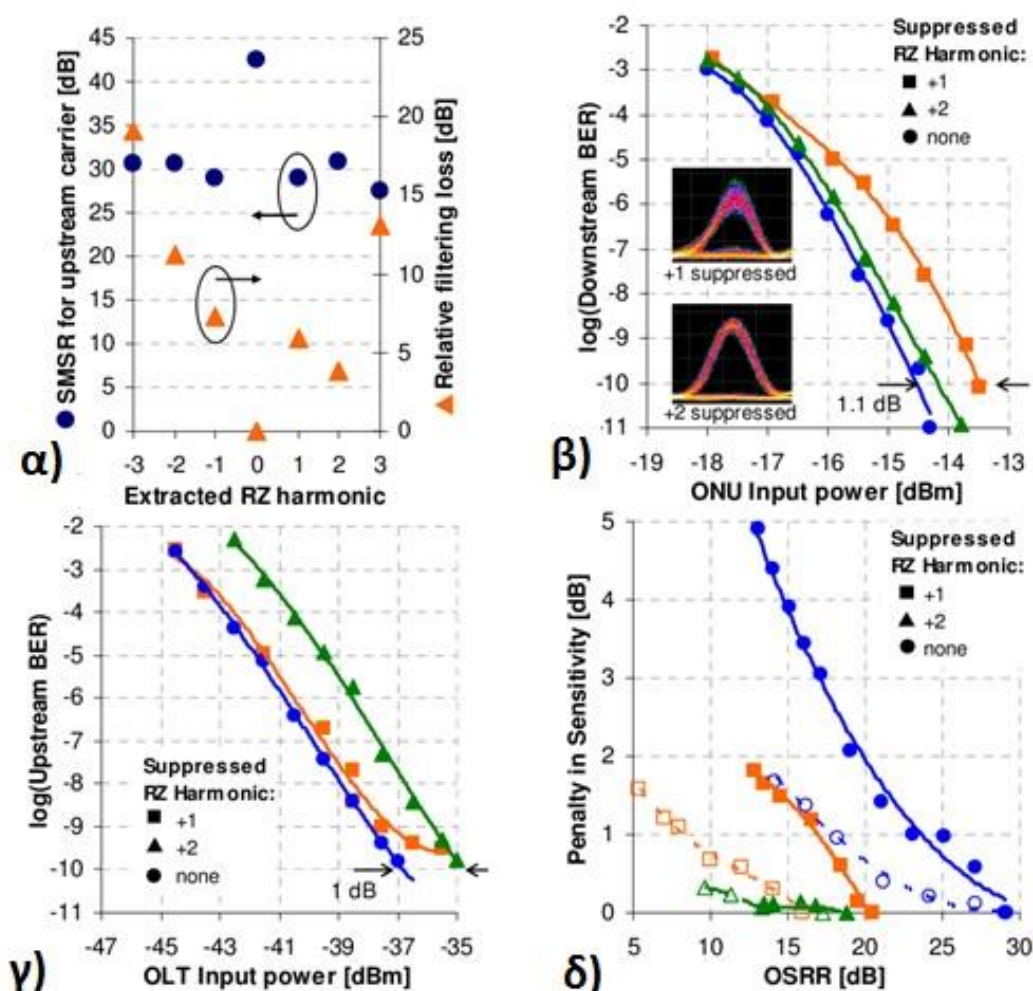


Εικόνα 60: Επίδραση του φιλτραρίσματος της οπισθοσκέδασης Rayleigh στα αντιρρευματικά σήματα στο δέκτη του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT), για διαφορετικές μετατοπίσεις μήκους κύματος, οι οποίες αντιστοιχούν: στο μήκος κύματος της φέρουσας (πρώτη γραμμή), στη πρώτη αρμονική (δεύτερη γραμμή) και στη δεύτερη αρμονική (τρίτη γραμμή).

Η επίδοση μετάδοσης για τα δύο σήματα παρουσιάζεται στην Εικόνα 61(β) και στην Εικόνα 61(δ). Ενώ για την καταπίεση της '+1' αρμονικής του RZ συρρευματικού σήματος, ποινή ισχύος 1,1 dB προκύπτει σε επίπεδο ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-10} , σε σύγκριση με το RZ συρρευματικό σήμα που περιέχει όλες τις αρμονικές (Εικόνα 61(β)), αυτή η ποινή ισχύος μειώνεται σε λιγότερο από 0,5 dB για την

περίπτωση καταπίεσης της '+2' αρμονικής. Περιθώριο ισχύος 3,8 dB βρέθηκε, λαμβάνοντας υπόψη τον τυπικό ισολογισμό ισχύος των 20 dB.

Στην περίπτωση λήψης του αντιρρευματικού σήματος χωρίς επιπλέον θόρυβο λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh, Εικόνα 61(γ), η ποινή ισχύος που οφείλεται αποκλειστικά στις απώλειες φιλτραρίσματος της τεχνικής μετατόπισης μήκους κύματος στη μονάδα οπτικού δικτύου, είναι 1 dB για ρυθμό εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-10} , στη χειρότερη περίπτωση της εξαγωγής της '+2' αρμονικής ως οπτικής φέρουσας. Αυτό δείχνει, ότι με ικανοποιητική οπτική ενίσχυση εντός της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU), οι εγγενείς απώλειες φιλτραρίσματος της τεχνικής μπορούν να ξεπεραστούν.



Εικόνα 61: (α) Προκύπτουν SMSR και απώλεια φιλτραρίσματος μετά την εξαγωγή της φέρουσας του αντιρρευματικού σήματος στη μονάδα οπτικού δικτύου. Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) για (β) το RZ συρρευματικό σήμα και (γ) το αντιρρευματικό σήμα. (δ) Ποινή ισχύος λήψης ως συνάρτηση του OSRR για το ληφθέν αντιρρευματικό σήμα. Τα γεμισμένα σημεία αντικατοπτρίζουν ρυθμό εμφάνισης λαθών (BER) τάξεως 10^{-9} , ενώ τα κενά σημεία αντιστοιχούν στο επίπεδο ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-4} .

Όταν προστίθεται ο θόρυβος λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh που προκύπτει από το συρρευματικό σήμα, οι θετικές συνέπειες της μετατόπισης μήκους κύματος είναι εμφανείς και επικρατούν έναντι της επίδρασης της απώλειας φιλτραρίσματος στη μονάδα οπτικού δικτύου. Η Εικόνα 61(δ) δείχνει την επιπλέον οπτική ισχύ που απαιτείται για να προκύψει το ίδιο επίπεδο ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER), ανάλογα με την υποβάθμιση του OSRR του αντιρρευματικού σήματος. Ενώ χωρίς καταπίεση αρμονικής, το επαναδιαμορφωμένο RZ συρρευματικό σήμα παρουσιάζει υψηλές ποινές ισχύος, ακόμη και για υψηλές τιμές OSRR, τα μετατοπισμένα αντιρρευματικά σήματα επιδεικνύουν υψηλότερη ανοχή έναντι στο θόρυβο λόγω οπισθοσκέδασης Rayleigh. Ειδικά το αντιρρευματικό σήμα που μεταδίδεται στην '+2' αρμονική του συρρευματικού σήματος δεν παρουσιάζει υψηλή ποινή ισχύος, η οποία παραμένει μικρότερη από 0,5 dB ακόμη και για χαμηλές τιμές OSRR (περίπου 10 dB).

Με 1dB ποινή ισχύος λήψης ως αναφορά, οι αντίστοιχες τιμές OSRR για επίπεδο ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) 10^{-9} είναι 23,5 dB χωρίς μετατόπιση του μήκους κύματος, 18,7 dB για μετατοπισμένο αντιρρευματικό σήμα στην '+1' αρμονική και <13 dB για την '+2' αρμονική. Επίσης, για επίπεδο ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων 10^{-4} , οι αντίστοιχες τιμές OSRR είναι 17,7 dB χωρίς μετατόπιση μήκους κύματος, 8,2 dB για μετατοπισμένο αντιρρευματικό σήμα στην '+1' αρμονική και <9,5 dB για τη '+2' αρμονική.

Καθώς η επίδοση της μετάδοσης βελτιώνεται και για τα δύο μετατοπισμένα αντιρρευματικά σήματα, σε σύγκριση με την απλή περίπτωση επαναδιαμόρφωσης του εισερχόμενου RZ συρρευματικού σήματος, μία δομή δικτύου πρόσβασης όπου εισέρχονται διαφορετικοί χρήστες είναι δυνατή. Ενώ αυτοί οι χρήστες μοιράζονται κοινό, υψηλού ρυθμού μετάδοσης, συρρευματικό σήμα μέσω μίας TDM δομής, τα αντιρρευματικά σήματά τους μπορούν να διατεθούν σε διαφορετικές αρμονικές του RZ ρολογιού. Αυτό επιτρέπει μία μίξη ανάμεσα σε WDM και TDM, ή ακόμη και εισαγωγή μίας UDWDM προσέγγισης στο αντιρρευματικό σήμα.

3.4 Σύνοψη -Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε μία τεχνική επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος για παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης, εύρους διεύθυνσης έως 50 χλμ και ισολογισμού απωλειών 20 dB, η οποία υλοποιήθηκε μέσω αμιγούς οπτικής ανάκτησης ρολογιού, που βασίστηκε σε φίλτρο Fabry-Pérot. Ένα επιπλέον περιθώριο ισχύος 6 dB φάνηκε πειραματικά με εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) για PRBS $2^{31}-1$, σε πλήρως αμφίδρομο, συμμετρικό δίκτυο, ρυθμού μετάδοσης δεδομένων 10 Gb/s, που χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος για συρρευματική και αντιρρευματική μετάδοση.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε μία απλή τεχνική μετατόπισης μήκους κύματος, κατάλληλη για φωτονική ολοκλήρωση λόγω της παθητικής της φύσης. Παρουσιάστηκε επιτυχής μετάδοση του αντιρρευματικού σήματος, για ισολογισμό απωλειών 20 dB, στην περίπτωση της επαναδιαμόρφωσης της δεύτερης αρμονικής του RZ συρρευματικού σήματος, παρά το χαμηλό OSRR (<10 dB) και τις απώλειες φιλτραρίσματος. Η σχεδίαση της μονάδας οπτικού δικτύου είναι κατάλληλη για ολοκλήρωση, καθώς τα φίλτρα Fabry-Pérot μπορούν να αντικατασταθούν από ολοκληρωμένα φίλτρα δακτυλίου και ο κυκλοφορητής στην είσοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) μπορεί να αντικατασταθεί από έναν οπτικό πολυπλέκτη προσθήκης-αφαίρεσης (OADM), που μπορεί επίσης να υλοποιηθεί από το φίλτρο δακτυλίου (ring resonator), έχοντας τη θύρα αφαίρεσης συνδεδεμένη με τον πομπό του αντιρρευματικού σήματος (RSOA), ενώ η θύρα προσθήκης μεταβιβάζει το συρρευματικό σήμα στη μονάδα ανάκτησης ρολογιού.

Αναφορές

- [3.1] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Optical networks: A practical perspective", Academic Press Inc., NY, 2nd Ed., 2002.
- [3.2] B. Sartorius, "All-Optical clock recovery for 3R optical regeneration", in Optical Fiber Communication Conf., 2001, MG7
- [3.3] B. Lavigne et al., "All-optical regeneration", IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, Vol. 2 , pp. 407 – 408, Nov. 2000.
- [3.4] M. Jinno and T. Matsutomo, "Optical tank circuits used for all-optical timing recovery", J. Quantum Electron., vol. 28, pp. 895-900, April 1992.
- [3.5] M. Jinno et al., "All-optical timing extraction using an optical tank circuit", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, No. 3, pp 203-204, March 1990
- [3.6] Xiang Zhou et al, "A performance analysis of an all-optical clock extraction circuit based on Fabry-Pérot filter", J. Lightwave Tech., Vol. 19, pp 603-613, 2001
- [3.7] B. Schrenk, F. Bonada, J.A. Lazaro, J. Prat, "Remotely pumped long-reach hybrid PON with wavelength reuse in RSOA-based ONUs," Journal of Lightwave Technology, vol. 29, pp. 635, 2011.
- [3.8] C. Bintjas et al., "Clock recovery circuit for optical packets," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 14, pp. 1363-1365, 2002.
- [3.9] G. Contestabile et al., "40-GHz all-optical clock extraction using a semiconductor-assisted Fabry-Pérot filter," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 16, pp. 2523-2525, 2004.
- [3.10] B. Schrenk, G. de Valicourt, M. Omella, J.A. Lazaro, R. Brenot, J. Prat, "Direct 10-Gb/s modulation of a single-section RSOA in PONs with high optical budget", Photonics Technology Letters, vol. 22, pp. 392, 2010.
- [3.11] M. Omella et al., "Full-duplex bidirectional transmission at 10 Gbps in WDM PONs with RSOA-Based ONU using offset optical filtering and electronic equalization", Proc. OFC '09, San Diego, USA, OThA7, 2009.

[3.12] N. J. Frigo et al., "A wavelength-division multiplexed passive optical network with cost-shared components," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 1365-1367, 1994.

[3.13] V. Roncin et al., "Patterning Effects in All-Optical Clock Recovery: Novel Analysis Using a Clock Remodulation Technique", *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.*, vol. 16, pp. 1495:1502, Sept. 2010.

[3.14] X. Zhou, C. Lu, P. Shum, H.H.M. Shalaby, T.H. Cheng, P. Ye, "A performance analysis of an all-optical clock extraction circuit based on Fabry-Pérot filter," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, pp. 603, 2001.

[3.15] R. Staubli et al, "Crosstalk Penalties Due to Coherent Rayleigh Noise in Bidirectional Optical Communication Systems", *JLT* 9, 375, 1991.

[3.16] B. Schrenk et al, "Rayleigh Scattering Tolerant PON Assisted by Four-Wave Mixing in SOA-based ONUs," *JLT* 28, 3364, 2010.

[3.17] M. Omella et al, "Driving Requirements for Wavelength Shifting in Colorless ONU With Dual-Arm Modulator," *JLT* 27, 3912, 2009

[3.18] M. D. Feuer et al., "Single-port laser-amplifier modulators for local access," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 8, pp. 1175-1177, 1996.

Κεφάλαιο 4

Μετάδοση δεδομένων μεταξύ χρηστών και αμιγώς οπτικά flip-flop

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται μία μέθοδος για μετάδοση δεδομένων ανάμεσα στους χρήστες ενός δικτύου πρόσβασης δομής δακτυλίου – δέντρου, με κόμβους δικτύου ικανούς να επιτύχουν μεταγωγή. Αξιολογείται η επεκτασιμότητα της αρχιτεκτονικής σε σχέση με την πυκνότητα των χρηστών στο δίκτυο και τη συσσώρευση του θορύβου. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου, παρουσιάζονται αρχιτεκτονικές αμιγώς οπτικών flip-flop, τα οποία αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο των δρομολογητών. Και οι δύο διατάξεις βασίζονται σε SOA-MZI διακόπτες.

4.1 Μετάδοση δεδομένων μεταξύ χρηστών χωρίς τη μεσολάβηση του κέντρου μεταγωγής

Στην κατεύθυνση της περαιτέρω συγχώνευσης των δικτύων πρόσβασης με τα μητροπολιτικά δίκτυα, τοπολογίες δακτυλίου μητροπολιτικών δικτύων μπορούν πλέον να συλλέγουν την κίνηση των τοπικών τμημάτων δομών δέντρου των δικτύων πρόσβασης [4.1] – [4.3]. Σε αυτήν την περίπτωση, παρέχεται δυνατότητα απευθείας δικτυακής δρομολόγησης δεδομένων ανάμεσα στις μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) που προέρχονται από διαφορετικά δέντρα. Επομένως, η συνολική αποτελεσματικότητα του δικτύου βελτιώνεται, καθώς αποφεύγονται οι ενεργειακά απαιτητικές μετατροπές του σήματος από το οπτικό στο ηλεκτρικό πεδίο, που συμβαίνουν στα τερματικά οπτικών γραμμών (OLT), αλλά και μέρος της κίνησης στα κέντρα μεταγωγής (CO) [4.10], [4.11].

4.1.1 Αρχιτεκτονική δικτύου και μεταγωγή πακέτων δεδομένων

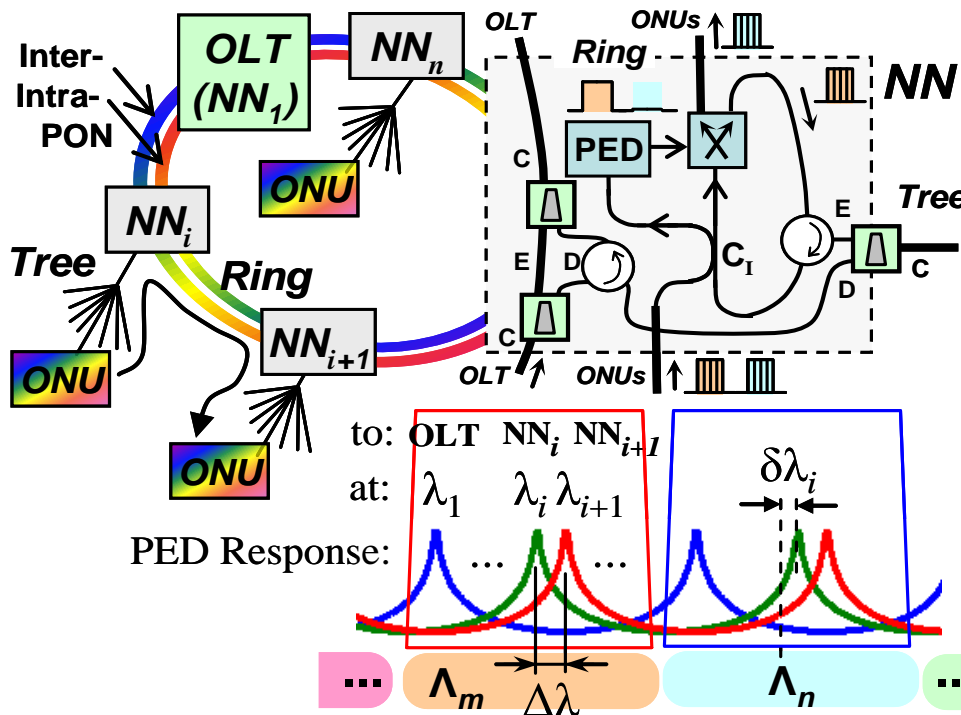
Η αρχιτεκτονική του δικτύου βασίζεται σε ένα διπλό δακτύλιο που επιτρέπει τόσο την επικοινωνία διαφορετικών δικτύων PON, όσο και την επικοινωνία εντός ενός δικτύου PON. Ο πρώτος δακτύλιος υποστηρίζει τη μετάδοση ανάμεσα στο τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) και τις μονάδες οπτικού δικτύου (ONU). Ο δεύτερος επιτρέπει την απευθείας επικοινωνία ανάμεσα στις μονάδες οπτικού δικτύου (ONU), χωρίς την μεσολάβηση του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT).

Βασικά στοιχεία της δρομολόγησης δεδομένων είναι οι κόμβοι του δικτύου (NN), οι οποίοι βρίσκονται κατά μήκος του δακτυλίου και είναι υπεύθυνοι για την προσθήκη και αφαίρεση δεδομένων από τα δέντρα (Εικόνα 62).

Η δρομολόγηση πακέτων ανάμεσα στις μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) διαφορετικών δέντρων βασίζεται σε ένα συμβολομετρικό διακόπτη SOA-MZI, ο οποίος ελέγχεται από το μήκος κύματος του εισερχόμενου πακέτου δεδομένων σε κάθε κόμβο του δικτύου (NN). Αυτός ο διακόπτης, εκμεταλλευόμενος το μη-γραμμικό φαινόμενο της ετερο-διαμόρφωσης φάσης (XPM) ανάμεσα στο σήμα δεδομένων και

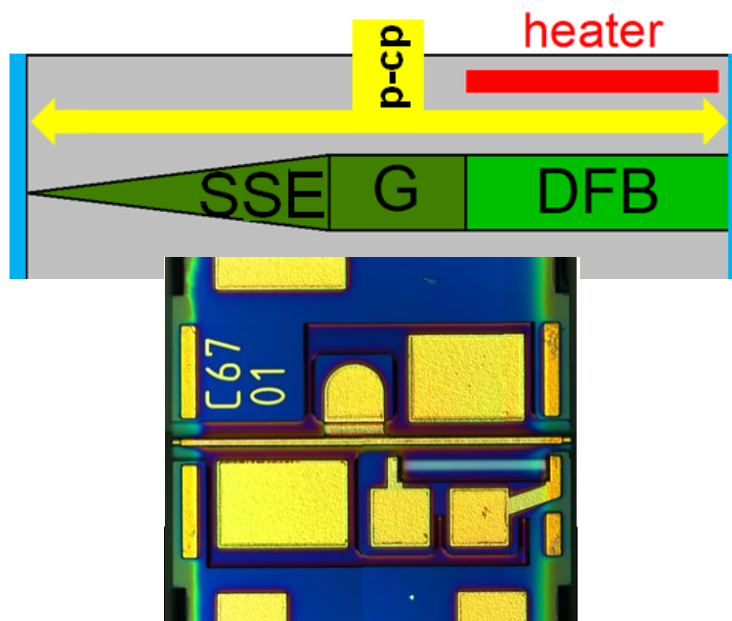
τον παλμό ελέγχου, χρησιμοποιείται για τη μεταγωγή των δεδομένων στη μία από τις δύο εξόδους του διακόπτη. Διαφορετικοί διακόπτες βασισμένοι σε SOA- ή SOA-MZI έχουν παρουσιαστεί ευρέως στη βιβλιογραφία, όπως μεταγωγή ετικετών με επικεφαλίδες ή σημάτων σε βοηθητικά μήκη κύματος [4.4] – [4.7], δείχνοντας λειτουργία σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αλλά και δυνατότητα διαδοχικής σύνδεσής τους (cascadability) [4.8].

Η ύπαρξη ενός δακτυλίου θα ήταν επαρκής αν αντιμετωπιζόταν το κάθε τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) ως ένας κόμβος του δικτύου (NN), ωστόσο η πιθανότητα εμπλοκής της κίνησης ανάμεσα στα δίκτυα πρόσβασης (PON) μειώνεται όταν ανατεθεί ένας δακτύλιος αποκλειστικά για την επικοινωνία εντός του δικτύου πρόσβασης (PON).



Εικόνα 62: Αρχιτεκτονική δικτύου, σχεδίαση των κόμβων του δικτύου και κατανομή των μηκών κύματος.

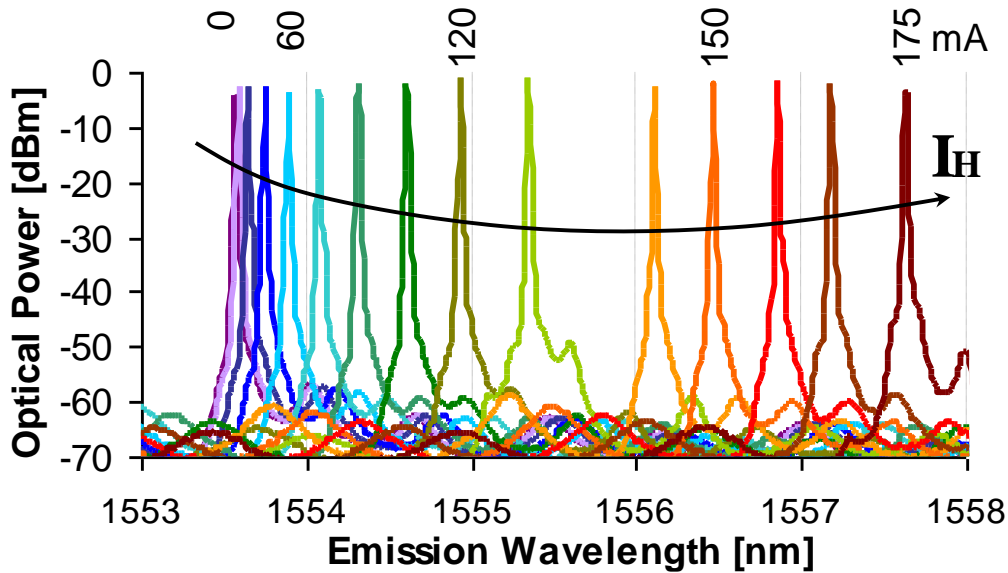
Σκοπός της αρχιτεκτονικής είναι η μείωση της πολυπλοκότητας των υποσυστημάτων και του αριθμού των δομικών στοιχείων τους, συνεπώς, λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας του κόστους των δικτύων πρόσβασης.



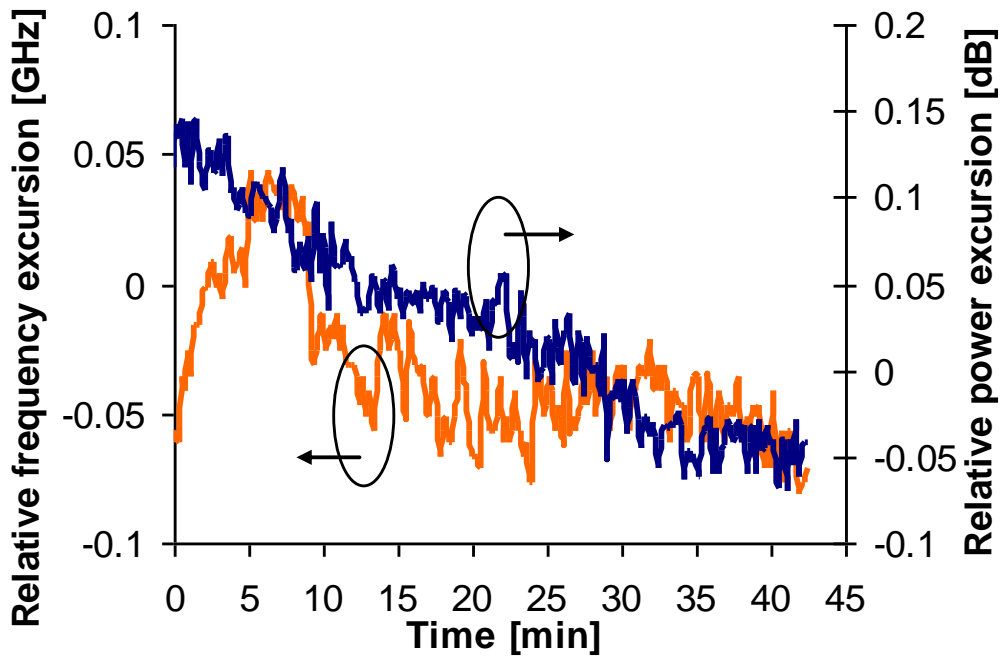
Εικόνα 63: Δομή λέιζερ τύπου κατανεμημένης ανάδρασης (DFB).

Η δρομολόγηση ανάμεσα στα δέντρα εντός ενός δικτύου (PON) επιτυγχάνεται ως εξής. Τα δεδομένα τύπου ριπών από τις μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) μεταδίδονται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος λ_i μέσα σε ένα DWDM κανάλι Λ , όπως φαίνεται και στην Εικόνα 62, για την ακρίβεια, με μία προκαθορισμένη μετατόπιση μήκους κύματος, $\delta\lambda_i$, από το ονομαστικό μήκος κύματος του καναλιού. Η απόκλιση $\delta\lambda_i$ μέσα στο κανάλι Λ καθορίζει τον κόμβο δικτύου (NN) προορισμού του πακέτου δεδομένων. Η πηγή φωτός της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) είναι ένα λέιζερ τύπου κατανεμημένης ανάδρασης (DFB), που είναι ολοκληρωμένο μαζί με μία περιοχή θέρμανσης (heater stripe) (Εικόνα 63), η οποία δεν απαιτεί πολύπλοκο μηχανισμό ρύθμισης. Μπορεί να ρυθμιστεί εντός μίας περιοχής 4 nm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 64, και διατηρεί εκπομπή σταθερού μήκους κύματος, αλλά και ισχύος (Εικόνα 65), επιδεικνύοντας παράλληλα SMSR υψηλότερο των 40 dB. Ρύθμιση σε ευρύτερη περιοχή φάσματος μπορεί να επιτευχθεί μέσω χρήσης μίας διάταξης αποτελούμενης από πολλαπλά λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης. Οι κόμβοι του δικτύου (NN) περιλαμβάνουν επίσης έναν ανιχνευτή περιβάλλουσας πακέτων (PED), ο οποίος αποκρίνεται, λόγω της αρχικής του ρύθμισης, μόνο σε εισερχόμενα σήματα με απόκλιση μήκους κύματος $\delta\lambda$, και είναι υπεύθυνος για την παραγωγή του σήματος ελέγχου του SOA-MZI διακόπτη, το οποίο προέρχεται από το πακέτο δεδομένων του συγκεκριμένου μήκους κύματος. Ένα εισερχόμενο πακέτο του οποίου το μήκος

κύματος συμπίπτει με την φασματική απόκριση του ανιχνευτή περιβάλλουσας πακέτων (PED), ανεξαρτήτως σε ποιο κανάλι λ_i λαμβάνεται, αφαιρείται από το δακτύλιο από το διακόπτη SOA-MZI, ενώ τα άλλα πακέτα, που δεν ταιριάζουν στην απόκλιση $\delta\lambda$, προωθούνται προς τον επόμενο κόμβο του δικτύου (NN).



Εικόνα 64: Ρυθμιζόμενο μήκος κύματος εκπομπής του λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης.



Εικόνα 65: Σταθερότητα εκπομπής μήκους κύματος και ισχύος εξόδου του λέιζερ στο χρόνο.

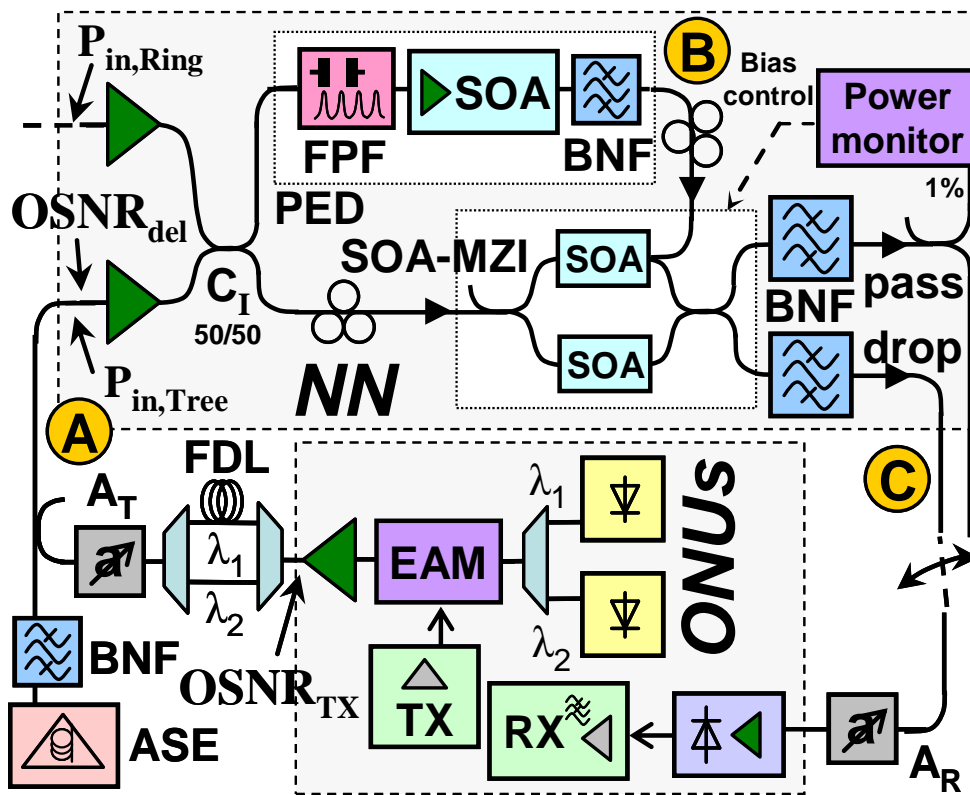
Ταυτόχρονη λειτουργία για περισσότερα από ένα μήκη κύματος μπορεί να επιτευχθεί, λόγω της φασματικής περιοδικότητας του ανιχνευτή περιβάλλουσας πακέτων (PED, Εικόνα 62). Αυτό επιτρέπει επίσης την αντικατάσταση των απλών TDM δέντρων με WDM/TDM δέντρα, διευκολύνοντας επιπλέον διαδικτυακή δρομολόγηση ανάμεσα σε ίδια μήκη κύματος (π.χ. υποδίκτυα), σε διαφορετικά δέντρα του δικτύου. Τέλος, μπορεί να επιτευχθεί λειτουργία σε διαφορετική ομάδα DWDM καναλιών λ_i , τα οποία διατηρούν την ίδια απόσταση, $\delta\lambda$, μεταξύ τους.

Όσον αφορά την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών δικτύων (PON), μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία συμβατική διεπαφή στους κόμβους του δικτύου (NN), αποτελούμενη από φίλτρα προσθήκης/αφαίρεσης. Για να ολοκληρωθεί η σχεδίαση των κόμβων του δικτύου (NN), τα εισερχόμενα πακέτα είτε από τον ανατολικό δακτύλιο, είτε από τη θύρα-προσθήκης (add-port) του δέντρου, εισάγονται ταυτόχρονα στον ανιχνευτή περιβάλλουσας πακέτων (PED) και στο διακόπτη SOA-MZI, για να παράγουν τα σήματα ελέγχου που θα οδηγήσουν στη διαδικασία της μεταγωγής στο διακόπτη SOA-MZI. Ο ανιχνευτής περιβάλλουσας πακέτων (PED) αποκρίνεται, είτε λόγω της κίνησης πακέτων εντός του PON, είτε λόγω πακέτων που προστέθηκαν από ένα δέντρο του δικτύου. Το σήμα εξέρχεται τότε, είτε από τη θύρα αφαίρεσης (drop port) του δέντρου, είτε από το δυτικό δακτύλιο του κόμβου του δικτύου (NN), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι τα πακέτα δεδομένων που εξέρχονται ενός δέντρου, μπορούν να προστεθούν στη συνέχεια στο δέντρο προέλευσής τους, αναλόγως του επιλεγμένου $\delta\lambda$. Τέλος, παρόλο που οι κόμβοι του δικτύου (NN) απαιτούν παροχή ηλεκτρικής ισχύος, αποφεύγονται ηλεκτρο-οπτικές μετατροπές και πολύπλοκη επεξεργασία σήματος και μπορούν ταυτοχρόνως να λειτουργήσουν ως εξωτερικές δομές (extender box), οι οποίες βελτιώνουν τον ισολογισμό απωλειών του δικτύου.

4.1.2 Πειραματική παρουσίαση και ανάλυση

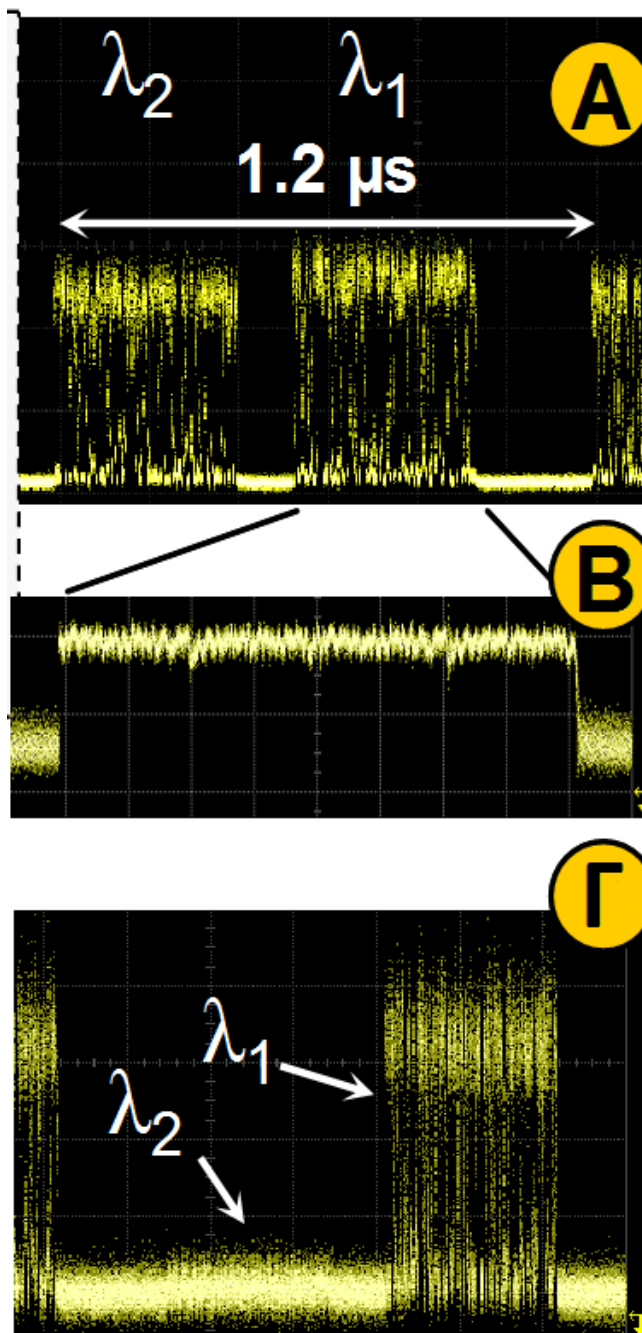
Για την πειραματική επικύρωση της ιδέας, (Εικόνα 66), δύο πομποί των μονάδων οπτικού δικτύου (ONU) αναπαραστάθηκαν από δύο λέιζερ μηκών κύματος $\lambda_1=1556.65$ nm και $\lambda_2=1559.79$ nm και ένα εμπορικό διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (EAM). Οι ριπές δεδομένων ρυθμού 10 Gb/s διαμορφώθηκαν με

ψευδοτυχαία ακολουθία τύπου PRBS $2^{11}-1$. Τα πακέτα δεδομένων μήκους 0.4 μs είχαν περιοδικότητα 1.2 μs (Εικόνα 67). Ένας οπτικός ενισχυτής ίνας ερβίου (EDFA) έθεσε την ισχύ εξόδου της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) στα 0 dBm/λ. Τα πακέτα διαφορετικών μηκών κύματος πολυπλέχθηκαν στο χρόνο με τη βοήθεια WDM πολυπλεκτών. Οι απώλειες στο δέντρο ρυθμίστηκαν από τους εξασθενητές A_T και A_R και επιπλέον θόρυβος προστέθηκε στα σήματα στο οπτικό εύρος ζώνης τους, αφενός μεν για να εξεταστεί η περίπτωση όπου το σήμα παρουσιάζει μειωμένο σηματοθορυβικό λόγο (OSNR) στην είσοδο του κόμβου του δικτύου (NN), αφετέρου δε για να επικυρωθεί η επεκτασιμότητα της ιδέας.



Εικόνα 66: Πειραματική διάταξη της μεταγωγής πακέτων σε ένα κόμβο δικτύου πρόσβασης.

Στην Εικόνα 67 φαίνονται τα ίχνη στο χρόνο, των πακέτων στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου, ένθετο (Α), της ανακτημένης περιβάλλουσας του πακέτου, ένθετο (Β), και του αφαιρούμενου πακέτου μήκους κύματος λ_1 (με καταπιεσμένο το μήκος κύματος λ_2), ένθετο (Γ). Ο παλμός ελέγχου είχε διακυμάνσεις στο δυψίο '1', που αντιστοιχούν σε λόγο διακύμανσης μόλις 1,2 dB, ενώ ο λόγος σβέσης του δυψίου '1' προς το δυψίο '0' ήταν μεγαλύτερος των 6 dB.



Εικόνα 67: Ήχνη στο χρόνο: (Α) στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου, (Β) μετά την ανάκτηση περιβάλλουσας του πακέτου, και (Γ) του πακέτου μήκους κύματος λ_1 που αφαιρείται, ενώ το πακέτο μήκους κύματος λ_2 καταπιέζεται.

Η χρήση πομπού με τρέμουλο φάσης (chirped) στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) επιβεβαιώνει την επιτυχή λειτουργία του ανιχνευτή περιβάλλουσας πακέτων (PED) στον κόμβο του δικτύου (NN), ο οποίος αποτελείται από ένα φίλτρο Fabry-Pérot ακολουθούμενο από έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (SOA). Ενώ, λόγω του φαινομένου της οπτικής μνήμης του φίλτρου Fabry-Pérot, συμπληρώνονται τα κενά δυφία με φως, ο κορεσμένος ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής (SOA) καταπιέζει τις

υπολειπόμενες διακυμάνσεις πλάτους του δυφίου '1', παράγοντας την περιβάλλουσα του πακέτου ως παλμό ελέγχου.

Ένας οπτικός ενισχυτής ίνας ερβίου (EDFA) χαμηλού κέρδους, 10 dB, προστέθηκε πριν τον ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (SOA) για να αντισταθμίσει το χαμηλό κέρδος του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (16,4 dB). Το φίλτρο Fabry-Pérot είχε λεπτότητα 1350 και ελεύθερη φασματική περιοχή 396 GHz, συμβατή με τα δύο επιλεγμένα μήκη κύματος των καναλιών, η περιοδικότητα του οποίου στο φάσμα προσφέρει τη δυνατότητα για περαιτέρω εισαγωγή δέντρων στη δομή. Η κορυφές της συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου Fabry-Pérot συντονίστηκαν στα -12 GHz σε σχέση με το κέντρο των καναλιών λ_1 και λ_2 , για να αφαιρεθεί το πακέτο στο λ_1 (Εικόνα 68).

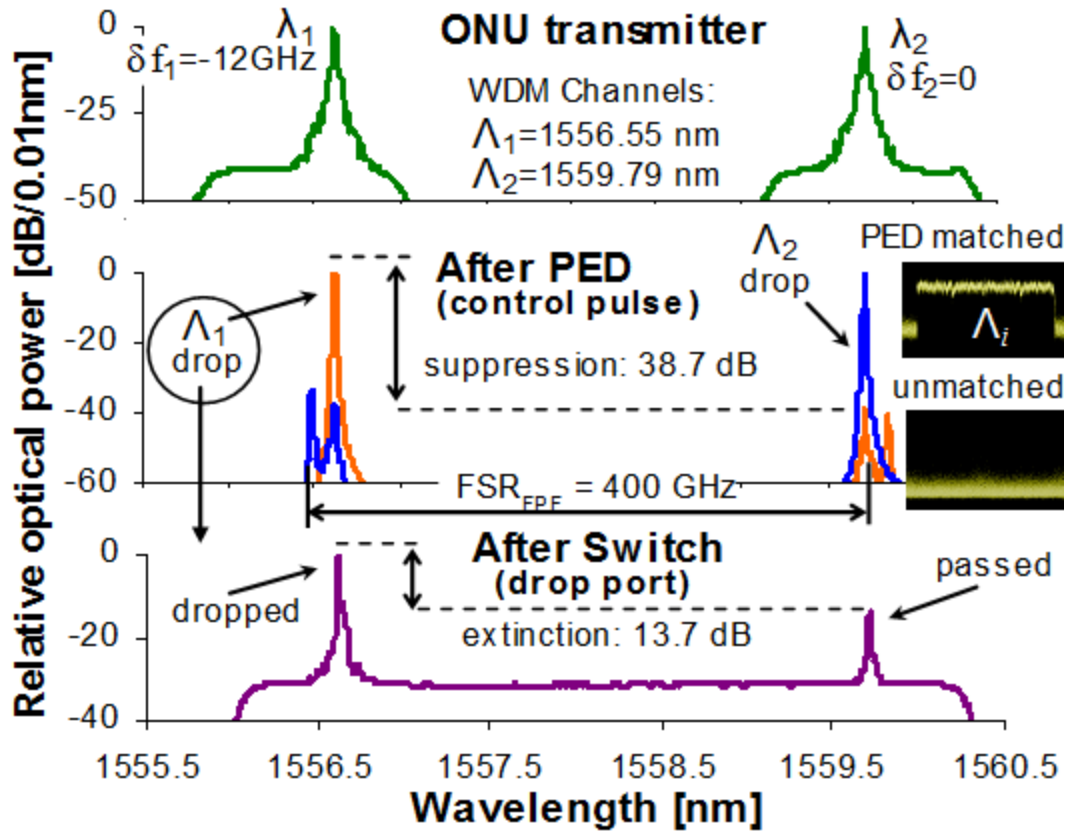
Ο διακόπτης SOA-MZI ρυθμίστηκε για ταυτόχρονη λειτουργία και των δύο καναλιών μηκών κύματος, ώστε να διέρχονται τα εισερχόμενα πακέτα στη θύρα προώθησης (through port) του διακόπτη SOA-MZI, κατά μήκος του δακτυλίου. Η κοινή ρύθμιση του διακόπτη για τα δύο μήκη κύματος, δεν προκάλεσε υποβαθμισμένη λειτουργία για κάποιο από τα μήκη κύματος. Ο χρόνος ανάκτησης κέρδους του ημιαγωγικού οπτικού ενισχυτή (SOA) των 20 psec είναι ικανοποιητικός για λειτουργία μεταγωγής σε ρυθμό 10 Gb/s, χωρίς χρήση επιπλέον σήματος ελέγχου, γεγονός το οποίο απλοποιεί τους κόμβους του δικτύου (NN). Ο καθένας από τους ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές τροφοδοτήθηκε με ρεύμα 260 mA.

Το σήμα ελέγχου από τον ανιχνευτή περιβάλλουσας πακέτων (PED), που χρησιμοποιείται για τη μεταγωγή του πακέτου στη θύρα αφαίρεσης (drop port) του MZI, τροφοδοτήθηκε με ανάποδη φορά μετάδοσης σε σχέση με τα πακέτα δεδομένων, καθώς βρίσκεται στο ίδιο μήκος κύματος και θα μπορούσε να προκαλέσει παρεμβολές (crosstalk). Στην είσοδο του κόμβου του δικτύου (NN), ένας 2x2 50/50 συζεύκτης (C_1) διαβιβάζει τα εισερχόμενα πακέτα δεδομένων στον ανιχνευτή περιβάλλουσας πακέτων (PED) και στον SOA-MZI διακόπτη, ενώ επιτρέπει την είσοδο στον κόμβο του δικτύου, είτε ενός πακέτου που προστίθεται από το δέντρο, είτε ενός που λαμβάνεται από το δακτύλιο. Για να επιτευχθεί σωστή λειτουργία μεταγωγής, μόνο ένα πακέτο, σε ένα μήκος κύματος και σε μία από τις θύρες, πρέπει να είναι παρόν σε μία δεδομένη χρονική στιγμή. Αυτό προϋποθέτει ότι

το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) παρέχει επαρκείς κενές χρονικές στιγμές και λειτουργικότητα ελέγχου των σημάτων σε υψηλότερο επίπεδο, για να επιτρέπει και να συγχρονίζει την επικοινωνία μεταξύ των μονάδων οπτικού δικτύου (ONU).

Στις εισόδους των κόμβων του δικτύου (NN) προστέθηκαν οπτικοί ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA), για να εξισορροπηθούν οι απώλειες ισχύος κατά μήκος των δακτυλίων, και να αντισταθμιστούν οι απώλειες που συμβαίνουν στο διακόπτη κατά τη σύζευξη της ίνας με το πλινθίο. Κατόπιν αυτών, το κέρδος εντός του κόμβου του δικτύου (NN) ήταν ~ 7 dB. Σημειώνεται ότι, κόμβοι δικτύου με οπτικούς ενισχυτές ίνας ερβίου είναι αποδεκτοί και συναντώνται συχνά σε οπτικά δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς [4.9]. Ζωνοπερατά φίλτρα αποκοπής θορύβου (BNF), ρυθμισμένα στο μήκος κύματος 1558,17 nm και εύρος ζώνης 4 nm, συμπεριλήφθηκαν ως επιπλέον στοιχεία φιλτραρίσματος, διαφανή στο μήκος κύματος, για να καταπιέσουν την εκπομπή θορύβου των οπτικών ενισχυτών ίνας ερβίου και των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών. Η πρακτική ανάπτυξη των κόμβων του δικτύου (NN) απαιτεί πλήρως ολοκληρωμένη σχεδίαση, χωρίς απώλειες λόγω πόλωσης, και ευρύτερα ζωνοπερατά φίλτρα αποκοπής θορύβου (BNF), που θα επιτρέπουν λειτουργία περισσότερων μηκών κύματος.

Ο δέκτης της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) στηρίχθηκε στο συνδυασμό οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου και P-I-N φωτοδιόδου, τα οποία ισοδυναμούν με μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (APD). Η ευαισθησία του δέκτη κανονικοποιήθηκε σε ισχύ -28 dBm, για ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων (BER) 10^{-10} .

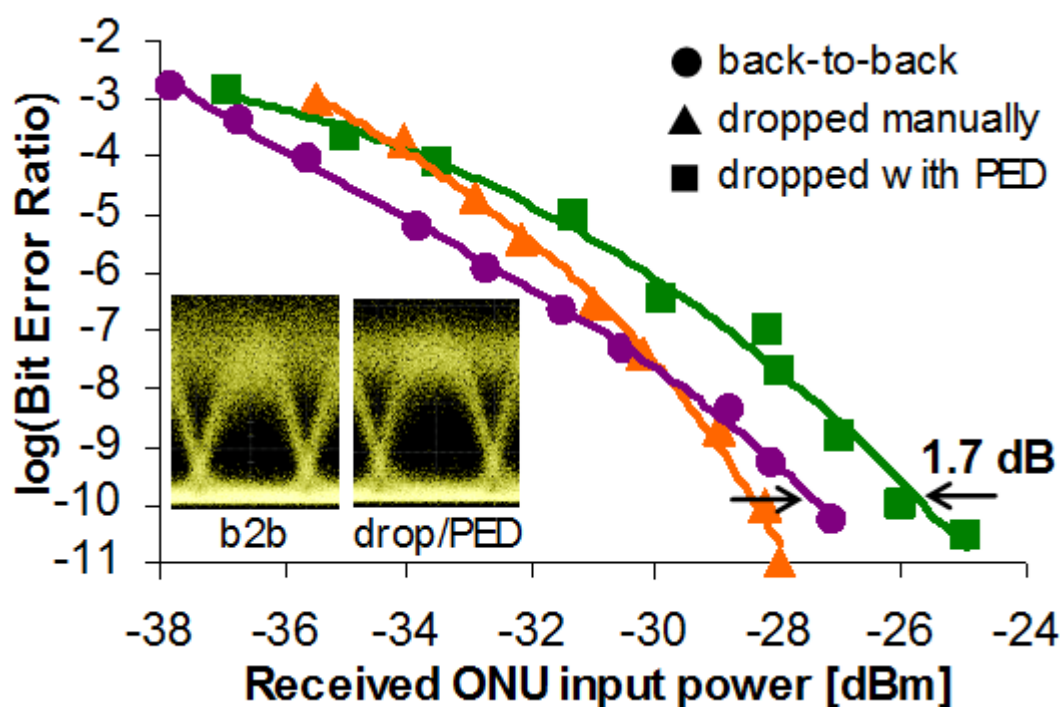


Εικόνα 68: Φάσματα σημάτων μετά τον πομπό της μονάδας οπτικού δικτύου (πάνω), τον ανιχνευτή περιβάλλουσας (μέση) και το διακόπτη SOA-MZI (κάτω).

Τα φάσματα των σημάτων φαίνονται στην Εικόνα 68. Λόγω της υψηλής λεπτότητας του φίλτρου Fabry-Pérot, ο ανιχνευτής περιβάλλουσας πακέτων (PED) καταπιέζει το δεύτερο μήκος κύματος κατά 38,7 dB. Ο λόγος σβέσης του ανακτημένου πακέτου σε σχέση με το δεύτερο πακέτο, μετά τη μεταγωγή από το SOA-MZI, μπορεί να χαρακτηριστεί υψηλός, πιο συγκεκριμένα στα 13,7 dB (Εικόνα 68).

Για να αξιολογηθεί η ποιότητα ισχύος μεταγωγής στον κόμβο του δικτύου (NN), οι απώλειες του δέντρου παρέμειναν σταθερές, στα 10 dB, και δεν προστέθηκε επιπλέον θόρυβος στην είσοδο του κόμβου του δικτύου (NN). Ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων (BER) μετρήθηκε με τη βοήθεια του εξασθενητή A_R . Όπως φαίνεται στην Εικόνα 69, στην περίπτωση που το πακέτο μεταγεται μέσω χειροκίνητης ρύθμισης του SOA-MZI, δεν παρατηρείται ποιότητα σε σχέση με την μετάδοση χωρίς εισαγωγή του διακόπτη SOA-MZI (back-to-back). Το πακέτο που προωθείται στη δεύτερη θύρα του MZI παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά. Όταν ο ανιχνευτής περιβάλλουσας

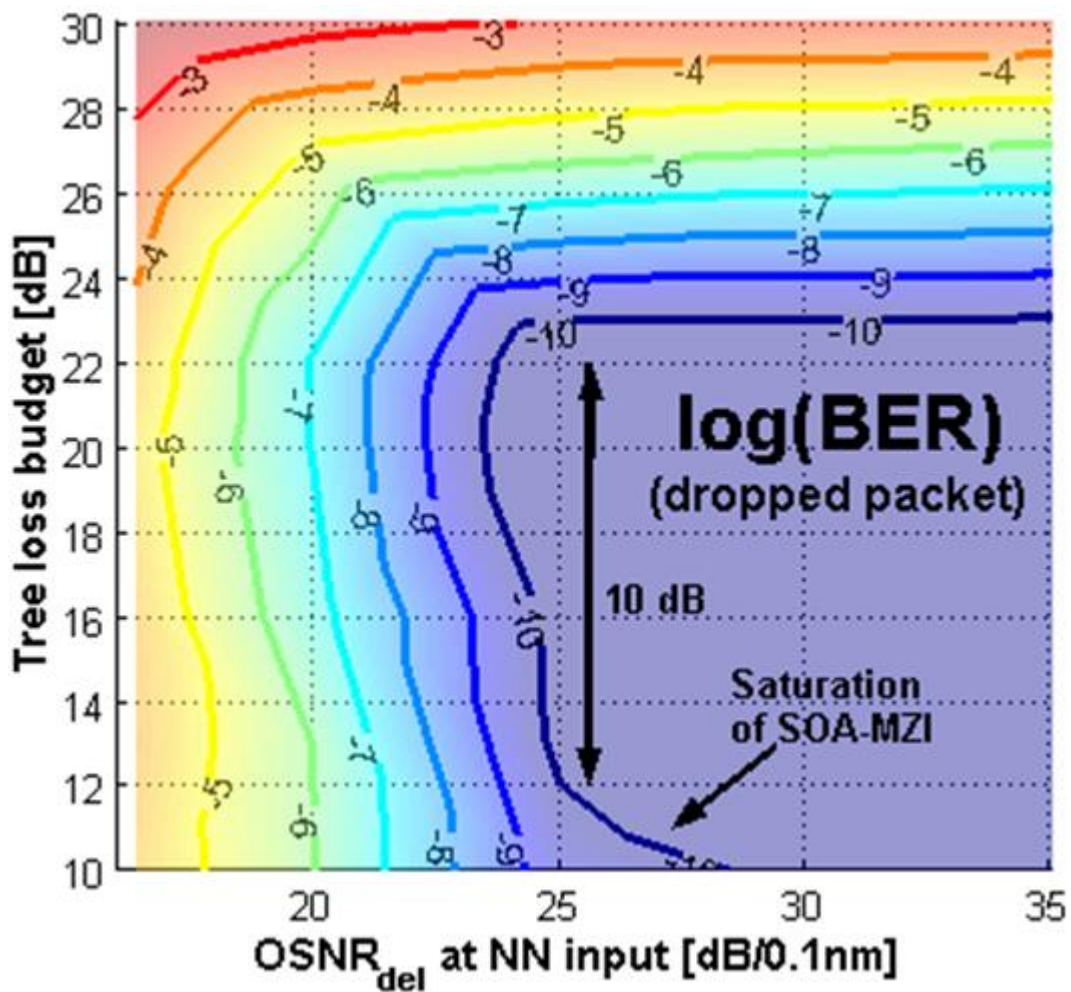
πακέτων (PED) χρησιμοποιείται, για να παραχθεί αυτόματα ο παλμός ελέγχου για το διακόπτη SOA-MZI από το εισερχόμενο πακέτο, η ποινή είναι 1,7 dB για ρυθμό εμφάνισης λαθών 10^{-10} . Αυτή η υποβάθμιση προκύπτει κυρίως από ανάκλαση του σήματος ελέγχου, κατά τη διάδοση του σήματος, στην είσοδο του πλινθίου. Αυτή η ανάκλαση ήταν -21 dB σε σύγκριση με την ισχύ του σήματος διάδοσης, οδηγώντας σε μειωμένο λόγο σήματος-παρεμβολών (signal-to-crosstalk), περίπου 18 dB.



Εικόνα 69: Ρυθμός σφαλμάτων κατά τη διαδικασία μεταγωγής στον κόμβο του δικτύου.

Θεωρώντας ότι οι οπτικές απώλειες ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου εξισορροπούνται από το κέρδος, η Εικόνα 70 αποτιμά τη δυνατότητα επέκτασης του δικτύου, όσον αφορά τις απώλειες οπτικής ισχύος στο δέντρο (ανάμεσα στη μονάδα οπτικού δικτύου και τον κόμβο του δικτύου, και αντιστρόφως) και την υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου (OSNR) στην είσοδο του κόμβου του δικτύου. Οι μετρήσεις ρυθμού σφαλμάτων που παρουσιάζονται, πραγματοποιήθηκαν για τα πακέτα δεδομένων που μεταγονται από τον ανακτημένο παλμό ελέγχου, περιλαμβάνοντας επίσης τις ατέλειες που παρουσιάζονται στον ανιχνευτή περιβάλλουσας πακέτων, όπως την περίπτωση όπου ο ημιαγωγικός οπτικός

ενισχυτής δεν λειτουργούσε στην περιοχή κορεσμού, λόγω χαμηλής ισχύος των πακέτων. Καθώς δεν υπήρχε διαθέσιμος βρόχος ανακυκλοφορίας, για την αξιολόγηση αυτού του δικτυακού σεναρίου, μία σύντομη θεωρητική ανάλυση ακολουθεί στην επόμενη ενότητα, για να διαπιστωθεί η εξάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου (OSNR) στην είσοδο του κόμβου του δικτύου, σε συνάρτηση με τον αριθμό των προωθήσεων του σήματος δεδομένων κατά μήκος του δακτυλίου.



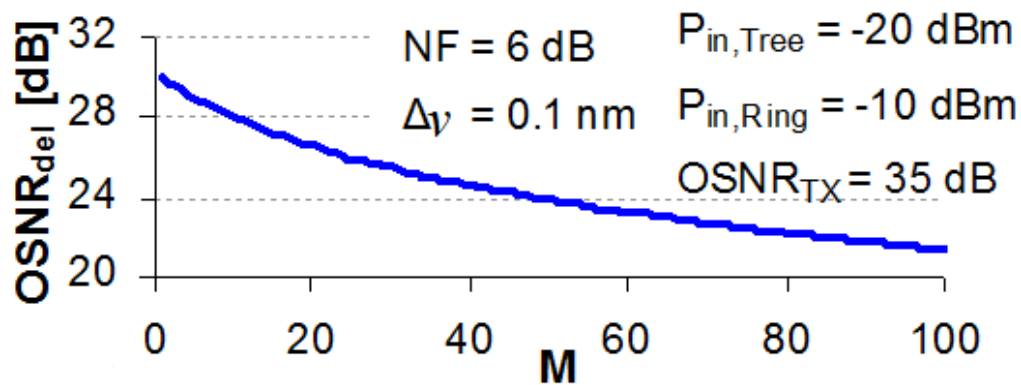
Εικόνα 70: Ρυθμός σφαλμάτων αναλόγως των απωλειών οπτικής ισχύος στο δέντρο και του σηματοθορυβικού λόγου (OSNR) του σήματος στην είσοδο του κόμβου του δικτύου.

4.1.3 Δυνατότητα επέκτασης του δικτύου

Μετά τη συσσώρευση θορύβου ύστερα από πολλαπλά (M) περάσματα από τους κόμβους του δικτύου (NN), ο τελικός σηματοθρομβικός λόγος, $OSNR_{del}$, στον κόμβο του δικτύου όπου το σήμα αφαιρείται, μπορεί να υπολογιστεί ως

$$\frac{1}{OSNR_{del}} = \frac{1}{OSNR_{TX}} + \frac{NF \cdot h\nu\Delta\nu}{P_{in,Tree}} + M \frac{NF \cdot h\nu\Delta\nu}{P_{in,Ring}} \quad (1)$$

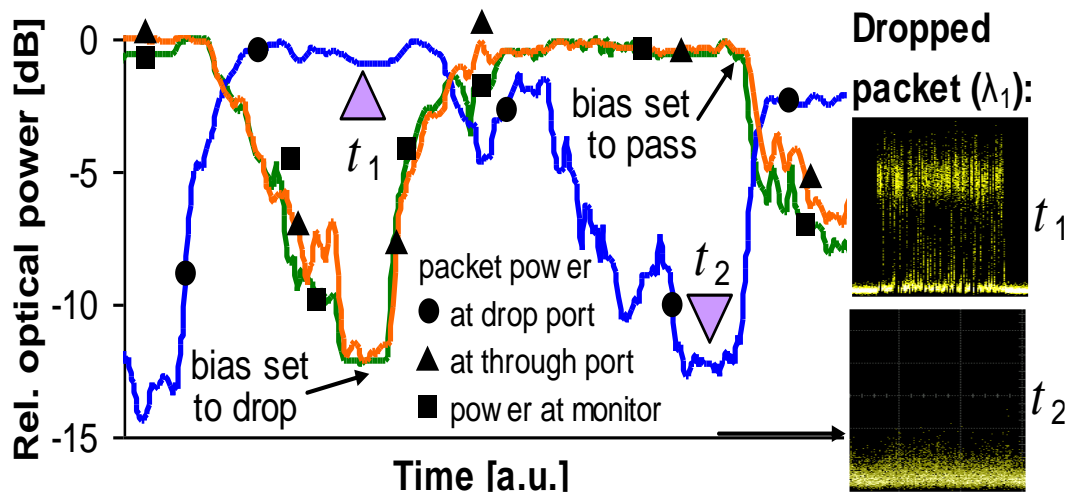
όπου το $OSNR_{TX}$ αναφέρεται στο σηματοθρομβικό λόγο στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου, NF είναι ο δείκτης θορύβου κατά την ενίσχυση στον κόμβο του δικτύου (NN), $h\nu\Delta\nu$ είναι η συσσωρευμένη φασματική πυκνότητα ισχύος (-58 dBm για λεπτομέρεια ανάλυσης φάσματος $\Delta\nu = 0,1$ nm), M , ο αριθμός των διαδοχικών κόμβων του δικτύου από τους οποίους περνά το σήμα, $P_{in,Tree}$ και $P_{in,Ring}$ είναι η ισχύς εισόδου στον κόμβο του δικτύου από τις θύρες δέντρου και δακτυλίου, αντίστοιχα (Εικόνα 66).



Εικόνα 71: Προσομοιωμένη υποβάθμιση του σηματοθρομβικού λόγου ($OSNR$), λόγω πολλαπλών περασμάτων (M) από τους κόμβους του δικτύου.

Για παράδειγμα, για NF 6 dB και 10 περάσματα κατά μήκος του δακτυλίου, με $P_{in,Tree} = -20$ dBm και $P_{in,Ring} = -10$ dBm, ο σηματοθρομβικός λόγος $OSNR_{del}$ υπολογίζεται 28,2 dB, για λεπτομέρεια ανάλυσης φάσματος $\Delta\nu = 0,1$ nm (Εικόνα 71), και είναι αποδεκτός όσον αφορά την επίδοση του ρυθμού μέτρησης σφαλμάτων, όπως

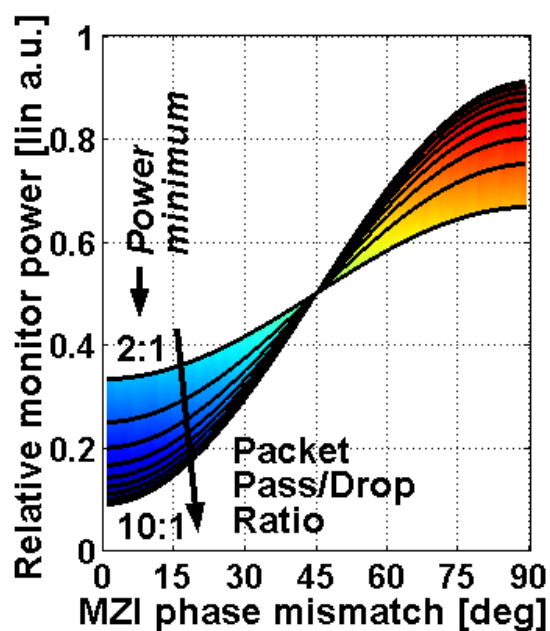
φαίνεται από το γράφημα της Εικόνα 70. Καθώς για την τελευταία περίπτωση οι συνθήκες εισόδου στον κόμβο του δικτύου ($P_{in,Tree}$ και $OSNR_{del}$) έχουν χειροτερεύσει ταυτοχρόνως, το πείραμα δείχνει ένα σενάριο χειρότερης περίπτωσης, διότι σε ένα πραγματικό σενάριο, τα σήματα θα έφταναν κυρίως με ισχυρότερη οπτική ισχύ στον κόμβο του δικτύου (δηλ. από τη μεριά του δακτυλίου με $P_{in, Ring} > P_{in, Tree}$, λόγω εξισορρόπησης απωλειών στο δακτύλιο) παρά με ένα υποβαθμισμένο σηματοθορυβικό λόγο ($OSNR$) και χαμηλό $P_{in, Tree}$ ταυτοχρόνως. Παρ' όλα αυτά, ένας ισολογισμός απωλειών δέντρου 22 dB, που σημαίνει δυνατότητα διαχωρισμού 1:128, είναι συμβατός με σηματοθορυβικό λόγο, $OSNR_{del}$, 23 dB, το οποίο σημαίνει $M \approx 65$ περάσματα από κόμβους του δικτύου. Λειτουργία χωρίς σφάλματα μπορεί να διατηρηθεί σε ένα εύρος ισχύος ~ 10 dB, ως προς τον ισολογισμό απωλειών ισχύος (loss budget) του δέντρου (Εικόνα 70).



Εικόνα 72: Βελτιστοποίηση λειτουργίας του διακόπτη SOA-MZI, μέσω παρακολούθησης της ισχύος. Η τιμή ισχύος είναι κανονικοποιημένη στην μέγιστη τιμή της.

Η ρύθμιση του διακόπτη SOA-MZI μπορεί να σταθεροποιηθεί, μέσω παρακολούθησης της ισχύος των θυρών μεταγωγής (Εικόνα 66). Θεωρώντας ότι η πλειοψηφία των πακέτων θα προωθηθεί, δηλαδή ένας λόγος πακέτων pass/drop μεγαλύτερος του 1:1 (Εικόνα 73), ελαχιστοποίηση της ισχύος στη θύρα απόρριψης (drop) οδηγεί σε μεγιστοποίηση του επιπέδου ισχύος στη θύρα προώθησης (through) και, συνεπώς, σε ελαχιστοποίηση της παρεμβολής (crosstalk), από τα διερχόμενα

πακέτα, στη θύρα απόρριψης (drop). Ένας βρόχος ελέγχου μπορεί να εφαρμοστεί προς σταθεροποίηση της ρύθμισης του διακόπτη SOA-MZI, όπως πιστοποιήθηκε επί της αρχής πειραματικά. Η Εικόνα 72 δείχνει πως η αναντιστοιχία φάσης στο MZI σχετίζεται με την οπτική ισχύ. Πρακτικά, η κανονικοποιημένη ισχύς πακέτου στη θύρα προώθησης (through) (\blacktriangle) ακολουθεί την ισχύ που παρακολουθείται (monitor) (\blacksquare), ενώ τα πακέτα στη θύρα απόρριψης (drop) εξαφανίζονται (\bullet).



Εικόνα 73: Λόγος πακέτων που προωθούνται και απορρίπτονται, σε συνάρτηση με τη ρύθμιση του διακόπτη SOA-MZI.

4.2 Αμιγώς οπτικά S-R και D flip-flop

Σε αυτήν την ενότητα χρησιμοποιούνται εκ νέου τα συμβολόμετρα SOA-MZI, ώστε να παρουσιαστεί πειραματικά η λειτουργία αμιγώς οπτικού S-R μανταλωτή, αμιγώς οπτικού S-R flip-flop και αμιγώς οπτικού σύγχρονου flip-flop τύπου D, που έχει ως δομικό του στοιχείο τον S-R μανταλωτή. Η ανάλυση της πειραματικής λειτουργίας δείχνει τη λειτουργικότητά τους και τις επιδόσεις τους, ως προς το λόγο σβέσης στην έξοδο και το χρόνο μεταγωγής που επιτυγχάνουν.

4.2.1 Εισαγωγή

Οι σημερινοί ηλεκτρονικοί δρομολογητές που βασίζονται στη CMOS τεχνολογία, μπορούν να φτάσουν έως ταχύτητα 1Tb/s. Ωστόσο, με την αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης εύρους ζώνης, ηλεκτρονικοί δρομολογητές σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης θα παρουσιάζουν αρκετές δυσκολίες, κυρίως λόγω την υψηλής σπατάλης ισχύος και της ενεργειακής κατανάλωσης [4.12].

Η αμιγώς οπτική δρομολόγηση πακέτων αποτελεί μία ελκυστική λύση, για να αυξηθεί η χωρητικότητα προώθησης δεδομένων από τους δρομολογητές, διατηρώντας την αποτελεσματικότητα και την ευελιξία του δικτύου. Καθώς αυτή η τεχνική υλοποιεί λειτουργίες μεταγωγής και δρομολόγησης στο φυσικό επίπεδο, θα επιτραπεί να αυξηθεί ο ρυθμός πληροφορίας των δεδομένων, με μικρή κατανάλωση ισχύος [4.20].

Η βασική δομική μονάδα του κάθε δρομολογητή, ηλεκτρικού ή οπτικού, είναι η μονάδα μνήμης. Είναι βασική για την προσωρινή αποθήκευση της πληροφορίας επικεφαλίδας ενός πακέτου και για την επίλυση του προβλήματος της σύγκρουσης πακέτων, που συμβαίνει όταν αρκετά πακέτα φτάνουν στην ίδια θύρα, την ίδια χρονική στιγμή [4.13].

Μία από τις πιο σημαντικές οπτικές συσκευές για προσωρινή αποθήκευση αποφάσεων είναι το αμιγώς οπτικό flip-flop (AOFF). Οι έξοδοι των AOFF εξαρτώνται όχι μόνο από τις τιμές εισόδου κάθε στιγμή, αλλά επίσης και από την προηγούμενή του κατάσταση [4.23] – [4.25].

Οι περισσότερες από τις συσκευές που έχουν προταθεί είναι ασύγχρονοι

μανταλωτές, και οποιαδήποτε αλλαγή της πληροφορίας στις εισόδους, μεταδίδεται άμεσα στις εξόδους, σύμφωνα με τον αντίστοιχο πίνακα αληθείας [4.14] – [4.18], [4.20] – [4.22]. Ωστόσο, αν τα S (set) και R (reset) παρουσιάσουν ανεπιθύμητη μεταβολή και χρησιμοποιούνται ασύγχρονες συσκευές, μπορεί να αποθηκευτεί μία μη επιθυμητή πληροφορία. Σε κάποιες εφαρμογές όμως, είναι πολύ σημαντική η ύπαρξη σήματος συγχρονισμού, υπεύθυνου για τον έλεγχο της ενεργοποίησης της λειτουργίας του μανταλωτή. Επομένως, είναι σημαντικό ένα ρολόι εισόδου υψηλής προτεραιότητας να υπάρχει, ώστε να ελέγχει τη λειτουργία του μανταλωτή, κάνοντας τον ευαίσθητο ή όχι στις εισόδους που βρίσκονται στα set/reset. Συνεπώς, αν ο μανταλωτής λειτουργεί με σήμα συγχρονισμού, είναι δυνατός ο έλεγχος της πληροφορίας που αποθηκεύεται. Σε αυτήν την περίπτωση, αν συμβεί μία αλλαγή στις εισόδους όταν το ρολόι βρίσκεται στο δυφίο '0', η έξοδος (Q) θα διατηρήσει την τελευταία της τιμή, αλλάζοντας μόνο στον επόμενο παλμό ρολογιού.

Σε μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων (FSM), σύγχρονα flip-flop τύπου D επιλέγονται συνήθως για να υλοποιούν τη μονάδα μνήμης, επειδή η είσοδός τους παρουσιάζει την ίδια τιμή με τις μεταβλητές στην επόμενη κατάσταση. Ωστόσο, καθώς έχει μόνο είσοδο δεδομένων, απαιτεί πιο πολύπλοκη δομική σχεδίαση.

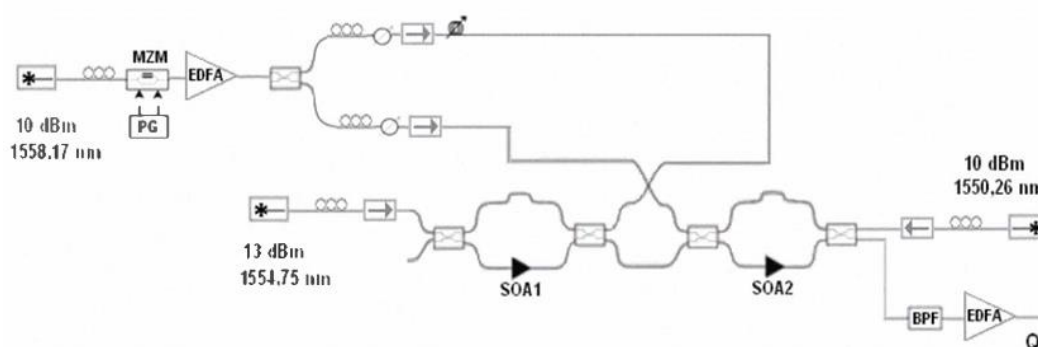
4.2.2 Αρχή λειτουργίας των flip-flop και πειραματικά αποτελέσματα

Αμιγώς οπτικός S-R μανταλωτής

Στους ασύγχρονους S-R μανταλωτές, κάθε αλλαγή στην πληροφορία των εισόδων μεταδίδεται άμεσα στην έξοδο, σύμφωνα με τον πίνακα αληθείας τους (Πίνακας 6). Η Εικόνα 74 απεικονίζει την πειραματική διάταξη του οπτικού S-R μανταλωτή. Η ολοκληρωμένη συσκευή αποτελείται από δύο συζευγμένα SOA-MZI, που τροφοδοτούνται από δύο οπτικά σήματα συνεχούς κύματος (CW), ως σήματα εισόδου, σε διαφορετικά μήκη κύματος. Το λογικό επίπεδο που λαμβάνεται στην έξοδο, καθορίζεται από το κυρίαρχο μήκος κύματος. Εισάγοντας set και reset οπτικούς παλμούς, επιτυγχάνεται δυναμική λειτουργία και ο μανταλωτής εναλλάσσει τη λογική κατάσταση [4.19].

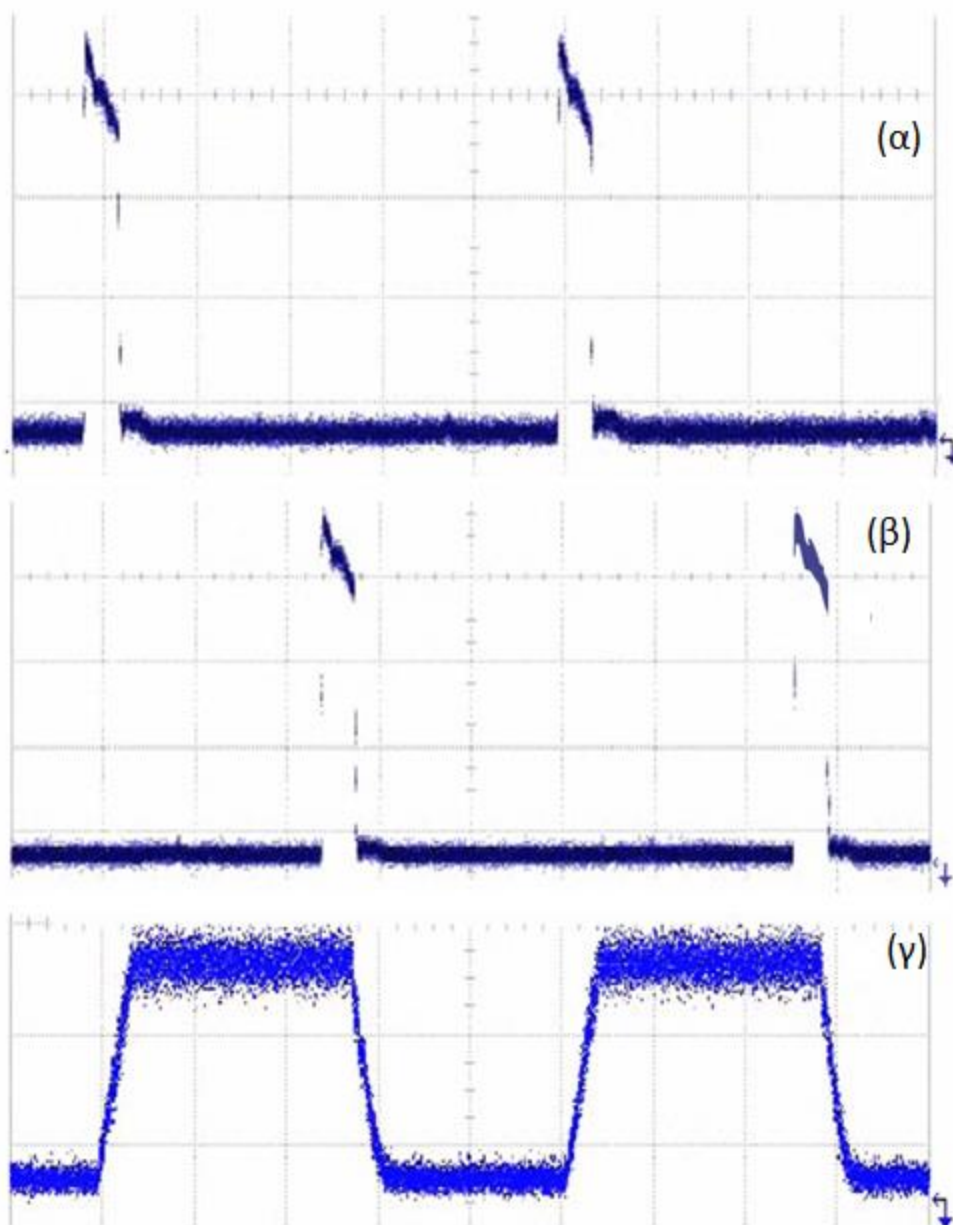
Πίνακας 6: Πίνακας αληθείας του S-R μανταλωτή

R	S	Q
0	0	τελευταία τιμή Q
0	1	1
1	0	0
1	1	Δεν επιτρέπεται



Εικόνα 74: Πειραματική διάταξη οπτικού ασύγχρονου S-R μανταλωτή.

Για να δημιουργηθούν οι set και reset οπτικοί παλμοί, ένα λέιζερ μήκους κύματος 1558,17 nm χρησιμοποιήθηκε, ακολουθούμενο από έναν ελεγκτή πόλωσης και έναν Mach-Zehnder ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή. Το σήμα (NRZ), που δημιουργήθηκε από τη γεννήτρια δεδομένων (PPG - Anritsu MP 1763C), εισάχθηκε σε έναν οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου και διαχωρίστηκε σε δύο ίσης ισχύος σήματα, μέσω ενός 50/50 διαζεύκτη. Τα set και reset σήματα δημιουργήθηκαν μέσω καθυστέρησης του ενός από το άλλο κατά 11,6ns. Η δυναμική λειτουργία του S-R μανταλωτή φάνηκε πειραματικά, μέσω της εναλλαγής της κατάστασης του, κατά τη τροφοδότηση set και reset οπτικών παλμών (Εικόνα 75). Τα αποτελέσματα στον παλμογράφο είναι σε συμφωνία με τον πίνακα αληθείας του ασύγχρονου S-R μανταλωτή.

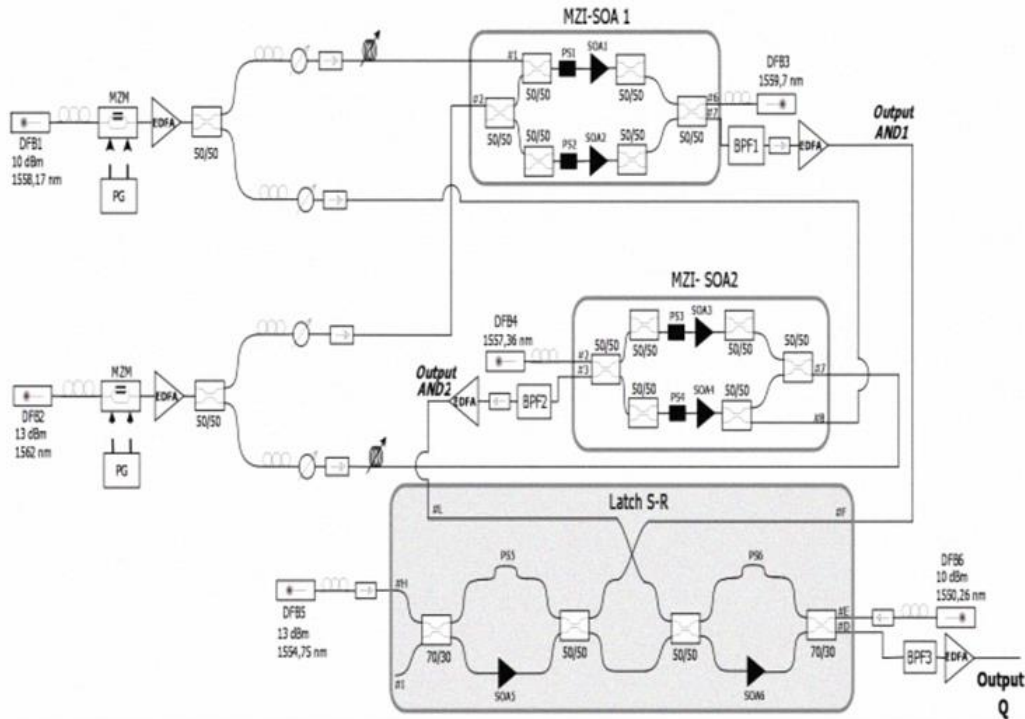


Εικόνα 75: Ίχνη σήματος στο χρόνο για τον ασύγχρονο S-R μανταλωτή: α) σήμα set, β) σήμα reset, γ) έξοδος του μανταλωτή.

Αμιγώς οπτικό S-R flip-flop

Το σύγχρονο αμιγώς οπτικό S-R flip-flop, που φαίνεται στην Εικόνα 76, υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας λογικές πύλες οι οποίες εκμεταλλεύονται τα μη-γραμμικά φαινόμενα των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών (SOA). Η λειτουργία της λογικής πύλης AND υλοποιήθηκε μέσω χρήσης ολοκληρωμένων Mach-Zehnder συμβολομέτρων, που βασίζονται σε ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές (SOA). Το

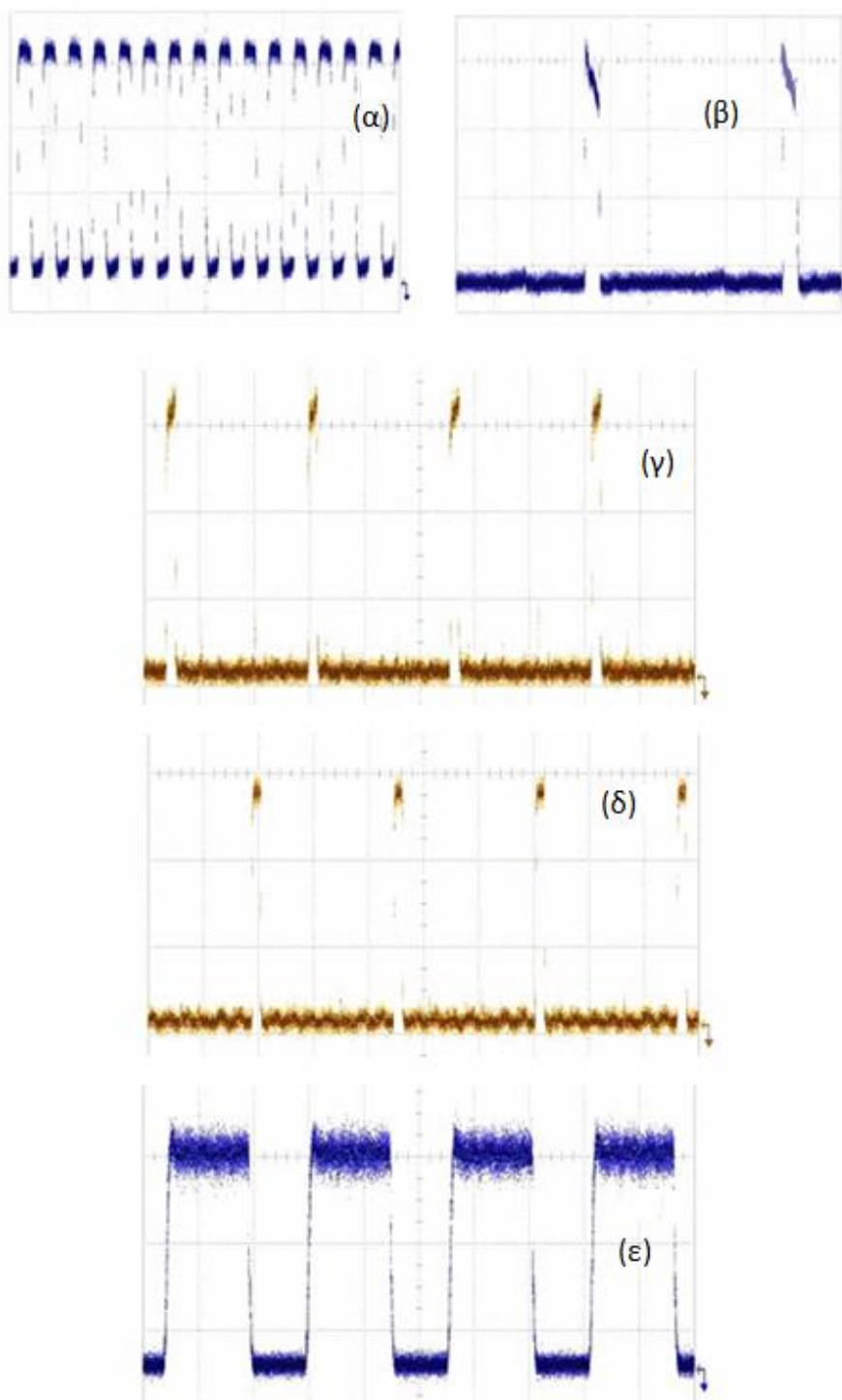
επίπεδο ισχύος των οπτικών σημάτων συνεχούς κύματος (CW) που χρησιμοποιούνται στα MZI-SOA1 και MZI-SOA2, ρυθμίστηκε με κριτήριο την απόκριση κέρδους των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών (SOA), ενώ οι έξοδοι των λογικών πυλών AND1 και AND2 λήφθηκαν στις θύρες μεταγωγής των MZI-SOA.



Εικόνα 76: Πειραματική διάταξη σύγχρονου S-R flip-flop.

Ο πίνακας αληθείας του σύγχρονου S-R flip-flop είναι ίδιος με αυτόν του ασύγχρονου S-R μανταλωτή, με τη διαφορά ότι η πληροφορία των εισόδων επηρεάζει την έξοδο, μόνο κατά τη διάρκεια που το σήμα ρολογιού βρίσκεται στο δυφίο '1'. Εάν το σήμα ρολογιού βρίσκεται στο δυφίο '0', η έξοδος του flip-flop διατηρεί την προηγούμενη του κατάσταση (την τελευταία τιμή του Q). Το σήμα ρολογιού δημιουργήθηκε από ένα λέιζερ μήκους κύματος 1562 nm και οπτικής ισχύος 13 dBm, ακολουθούμενο από ένα Mach-Zehnder ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή (MZM). Τα set και reset σήματα εισόδου ήταν τα ίδια που χρησιμοποιήθηκαν στη διάταξη του ασύγχρονου μανταλωτή. Στην Εικόνα 76, απεικονίζεται η πειραματική διάταξη λειτουργίας του σύγχρονου αμιγώς οπτικού Set-Reset (S-R) flip-flop. Η Εικόνα 77 δείχνει πειραματικά ότι μόνο όταν το σήμα ρολογιού βρίσκεται στο δυφίο '1', το

σύγχρονο S-R flip-flop αλλάζει την κατάστασή του - σε διαφορετική περίπτωση η έξοδος του flip-flop διατηρεί την προηγούμενή της τιμή.



Εικόνα 77: Ίχνη στο χρόνο που προέκυψαν από το σύγχρονο S-R flip-flop: α) σήμα ρολογιού, β) σήμα reset, γ) έξοδος πύλης AND για εισόδους τα σήματα set και ρολογιού, δ) έξοδος πύλης AND για εισόδους τα σήματα reset και ρολογιού και ε) έξοδος του flip-flop.

Αμιγώς οπτικό D flip-flop

Το σύγχρονο flip-flop που παρουσιάζεται σε αυτήν την ενότητα, βασίζεται στον αμιγώς οπτικό ολοκληρωμένο S-R μανταλωτή που παρουσιάστηκε προηγουμένως [4.19]. Ο S-R μανταλωτής αποτελείται από δύο συζευγμένα MZI-SOA, τα οποία τροφοδοτούνται από δύο οπτικά σήματα συνεχούς κύματος (CW), σε διαφορετικό μήκος κύματος. Το λογικό επίπεδο που λαμβάνεται στην έξοδο, καθορίζεται από το κυρίαρχο μήκος κύματος. Εισάγοντας set και reset οπτικούς παλμούς, πραγματοποιείται δυναμική λειτουργία και ο μανταλωτής S-R εναλλάσσει τη λογική του κατάσταση.

Το σύγχρονο D flip-flop υλοποιήθηκε, μέσω χρήσης δύο AND πυλών στις εισόδους του μανταλωτή S-R. Και οι δύο AND πύλες χρησιμοποιούνται ως σήματα ελέγχου του μανταλωτή, ώστε η πληροφορία που βρίσκεται στις εισόδους του flip-flop, να επηρεάζει την έξοδο, μόνο κατά τη διάρκεια που το σήμα ρολογιού βρίσκεται στο δυψίο '1'. Οι AND πύλες υλοποιήθηκαν με MZI-SOA και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μη γραμμική στρόφη φάσης που επιφέρουν στο σήμα οι ημιαγωγικοί οπτικοί ενισχυτές (SOA) [4.26].

Καθώς το σύγχρονο flip-flop τύπου D έχει ως είσοδο μόνο ένα σήμα δεδομένων, μία πύλη NOT, που υλοποιήθηκε από έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (SOA), χρειαζόταν, ώστε να δημιουργηθεί το συμπληρωματικό σήμα (\bar{D}).

Η αρχή λειτουργίας του σύγχρονου flip-flop τύπου D φαίνεται στον Πίνακας 7. Το σύγχρονο D flip-flop αλλάζει τη λογική του κατάσταση μόνο όταν το σήμα ρολογιού βρίσκεται στην υψηλή στάθμη. Εάν το σήμα ρολογιού είναι στη χαμηλή στάθμη όταν μία αλλαγή στις εισόδους παρατηρείται, η έξοδος Q θα αλλάξει μόνο τη στιγμή που θα φτάσει ο επόμενος παλμός ρολογιού.

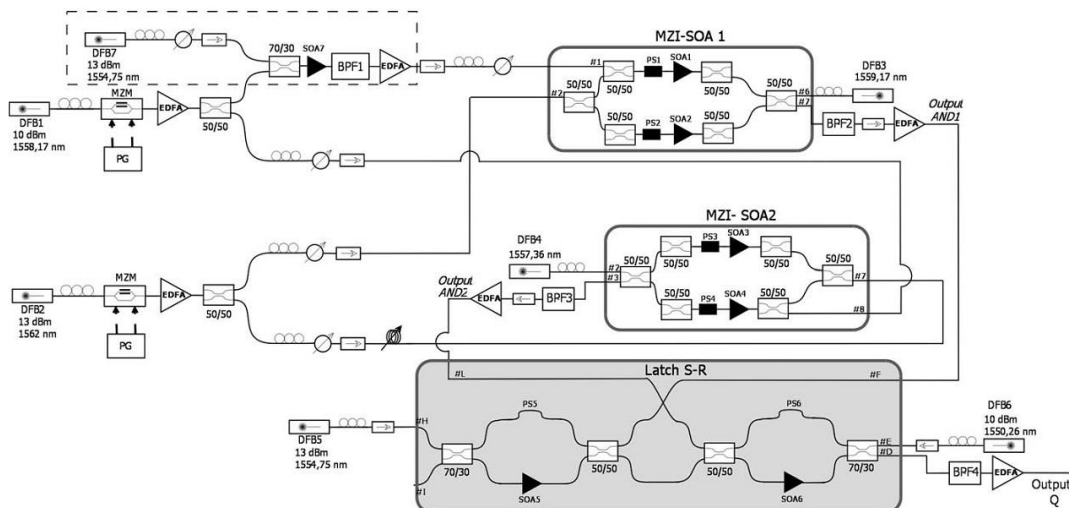
Η πειραματική διάταξη της Εικόνα 78 χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η λειτουργία του σύγχρονου D flip-flop. Το σήμα ρολογιού δημιουργήθηκε από ένα λέιζερ, μήκους κύματος εκπομπής 1562 nm και οπτικής ισχύος 13 dBm, το οποίο ακολουθείται από ένα Mach-Zehnder ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή (MZM). Η πόλωση

του σήματος ρολογιού ελέγχεται, καθώς ο MZM είναι ευαίσθητος στην πόλωση, και στη συνέχεια εισάγεται στις πύλες AND.

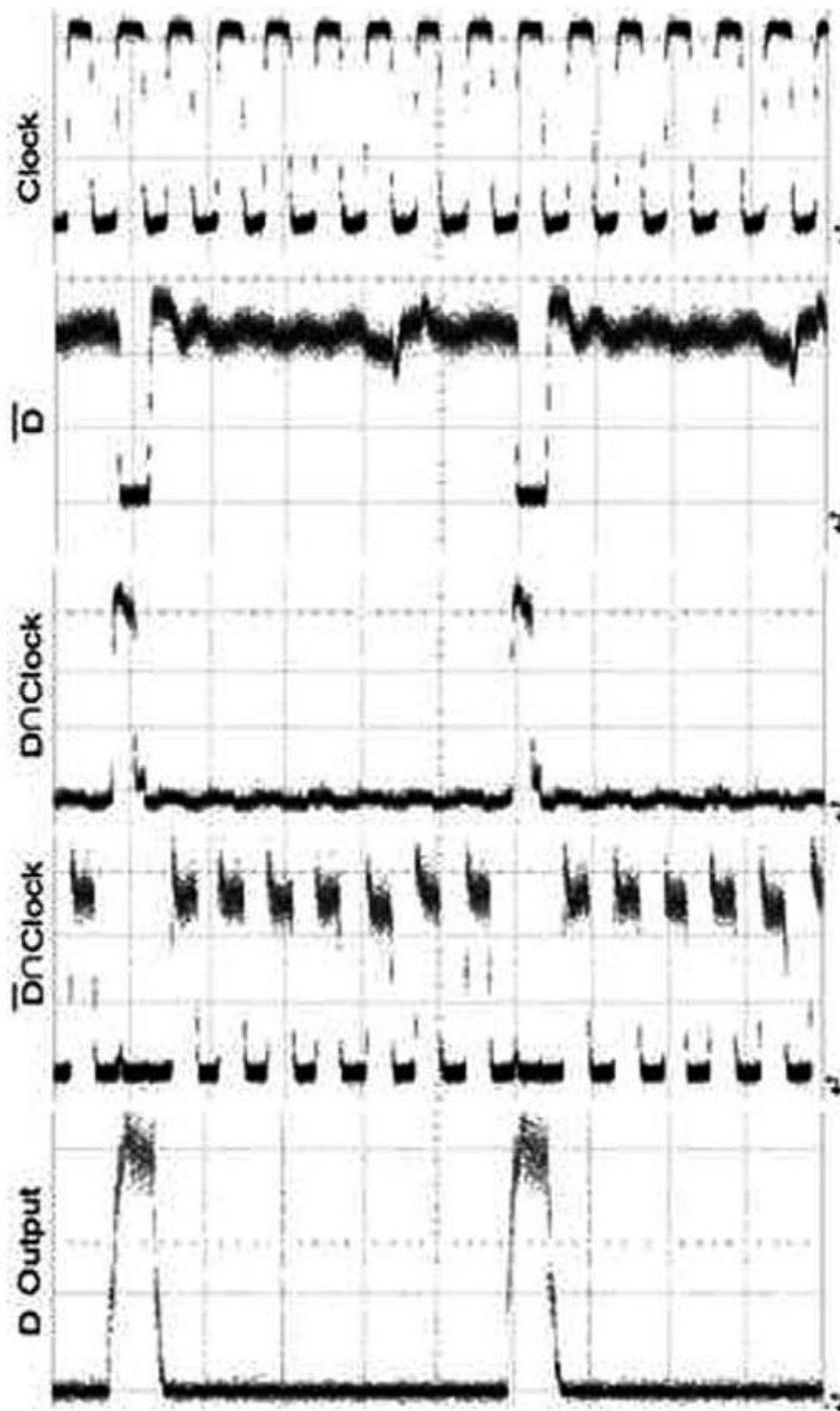
Πίνακας 7: Πίνακας αληθείας του σύγχρονου D flip-flop.

Ρολοί	D	Q
1	0	0
1	1	1
0	X	Τελευταία τιμή Q

Ένας δεύτερος Mach-Zehnder διαμορφωτής (MZM) χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του σήματος λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης (DFB), που εκπέμπει σε μήκος κύματος 1558,17 nm. Το σήμα δεδομένων εισόδου, D, παράγεται από μία γεννήτρια δεδομένων (PPG). Μετά από έναν οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου (EDFA), το σήμα εισόδου, D, διαχωρίζεται σε δύο ίσης ισχύος μέρη, εκ των οποίων το ένα εισέρχεται στη θύρα #8 του MZI-SOA2 (AND2) και το άλλο κατευθύνεται σε ένα 70/30 διαζεύκτη. Ύστερα από το διαζεύκτη, το σήμα εισέρχεται σε έναν ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή (SOA) και στη συνέχεια φιλτράρεται, ώστε να προκύψει το συμπληρωματικό σήμα εισόδου (\bar{D}). Το MZI-SOA1 υλοποιεί τη λογική πύλη AND, ανάμεσα στο σήμα ελέγχου D και το σήμα ρολογιού.



Εικόνα 78: Πειραματική διάταξη του σύγχρονου D flip-flop.



Εικόνα 79: Ίχνη των σημάτων στο χρόνο, σε διαφορετικά σημεία της διάταξης.

Η οπτική ισχύς των σημάτων συνεχούς κύματος (CW), που εισάγονται στα MZI-SOA1 και MZI-SOA2, ρυθμίστηκε ανάλογα με το κέρδος των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών και οι έξοδοι των λογικών πυλών AND1 και AND2 εμφανίζονται στις θύρες μεταγωγής του κάθε MZI-SOA.

Η δυναμική λειτουργία του σύγχρονου D flip-flop δείχτηκε πειραματικά μέσω της εναλλαγής των καταστάσεων του flip-flop, λόγω της τροφοδότησης με οπτικούς παλμούς. Η Εικόνα 79 δείχνει τα ίχνη στο χρόνο που προέκυψαν από το σύγχρονο D flip-flop. Το σήμα εισόδου D, έχει συχνότητα 40 MHz και εύρος παλμού 2 ns, ενώ, το σήμα ρολογιού, έχει συχνότητα 300 MHz και εύρος παλμού 1,67 ns. Στην έξοδο του flip-flop, επιβεβαιώνεται ότι όταν το σήμα ρολογιού είναι στο δυφίο '1', η τιμή εξόδου Q του flip-flop είναι ίση με το σήμα δεδομένων εισόδου D. Τα πειραματικά αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με την αρχή λειτουργίας του flip-flop, όπως αυτή παρουσιάστηκε στον Πίνακα 7. Η ταχύτητα μεταγωγής ήταν 290 και 379 psec για το χρόνο ανόδου και καθόδου, αντίστοιχα. Η αξιολόγηση επίδοσης του προτεινόμενου σύγχρονου D flip-flop έδειξε ότι ο λόγος σβέσης που προέκυψε ήταν 12,5 dB.

Σύνοψη αποτελεσμάτων

Ο Πίνακας 8, συνοψίζει τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν, ώστε να μπορούν να συγκριθούν οι τρεις διατάξεις που παρουσιάστηκαν. Παρατηρείται ότι η είσοδος set και reset σημάτων, στη περίπτωση του σύγχρονου αμιγώς οπτικού D flip-flop, παρουσιάζει μειωμένο χρόνο ανόδου και καθόδου, της τάξης των εκατοντάδων psec, ενώ το αμιγώς οπτικό S-R flip-flop επιτυγχάνει τον καλύτερο λόγο σβέσης.

Πίνακας 8: Σύγκριση ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους μονάδων μνήμης.

	S-R μανταλωτής	S-R flip-flop	D Flip-Flop
Χρονική διάρκεια ανόδου [psec]	1.029	430	290
Χρονική διάρκεια καθόδου [psec]	857	420	379
Λόγος σβέσης [dB]	12,7	18	12,5

4.3 Σύνοψη -Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε μία αρχιτεκτονική μετάδοσης δεδομένων από χρήστη σε χρήστη σε ένα δίκτυο πρόσβασης δακτυλίου-δέντρου, παρακάμπτοντας τα κέντρα μεταγωγής (CO) του παρόχου, η οποία βασίζεται σε διακόπτες SOA-MZI. Αποδείχτηκε ότι είναι εφικτή η επιτυχής εφαρμογή της, για απώλειες ισχύος στο δέντρο, της τάξης των 22 dB και υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου (OSNR) κατά μήκος των κόμβων του δακτυλίου.

Επίσης, παρουσιάστηκαν πειραματικά και αξιολογήθηκαν, αμιγώς οπτικές διατάξεις ενός ασύγχρονου S-R μανταλωτή, ενός σύγχρονου S-R flip-flop και ενός σύγχρονου D flip-flop που βασίζονται επίσης σε MZI διακόπτες. Η πειραματική υλοποίηση έδειξε ότι υπάρχουν δυνατότητες λειτουργίας σε υψηλή ταχύτητα, με λόγους σβέσης επίσης υψηλούς (έως 18 dB).

Αναφορές

- [4.1] B. Schrenk, F. Bonada, J.A. Lazaro, and J. Prat, "Remotely Pumped Long-Reach Hybrid PON with Wavelength Reuse in RSOA-based ONUs," *J. Lightwave Technol.*, vol. 29, pp. 635-641, 2011.
- [4.2] M. Maier and M. Herzog "STARGATE: The next evolutionary step toward unleashing the potential of WDM EPONs," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, pp. 50-56, 2007.
- [4.3] J.M. Fabrega *et al.*, "Modulated Grating Y-Structure Tunable Laser for λ -Routed Networks and Optical Access", *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electr.*, to be published, DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2151833.
- [4.4] E. Kehayas *et al.*, "ARTEMIS: 40-Gb/s All-Optical Self-Routing Node and Network Architecture Employing Asynchronous Bit and Packet-Level Optical Signal Processing," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, pp. 2967-2977, 2006.
- [4.5] N. Calabretta *et al.*, "All-Optical Label Swapping of Scalable In-Band Address Labels and 160-Gb/s Data Packets," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, pp. 214-223, 2009.
- [4.6] A. Albores-Mejia *et al.*, "Monolithic Multistage Optoelectronic Switch Circuit Routing 160 Gb/s Line-Rate Data," *J. Lightwave Technol.*, vol.28, pp.2984-2992, 2010.
- [4.7] M. Baldi *et al.*, "Scalable Fractional Lambda Switching: A Testbed," *J. Opt. Comm. and Netw.*, vol. 3, pp.447-457, 2011.
- [4.8] D. Apostolopoulos *et al.*, "Cascadability Performance Evaluation of a New NRZ SOA-MZI Wavelength Converter," *IEEE Phot. Technol. Lett.*, vol. 21, pp. 1341-1343, 2009.

[4.9] P. Ossieur *et al.*, "A 135-km 8192-Split Carrier Distributed DWDM-TDMA PON With 2 x 32 x 10 Gb/s Capacity," *J. Lightwave Technol.*, vol. 29, pp. 463-474, 2011.

[4.10] A. Maziotis *et al.*, "Cognitive Routing in Converged Access-Metro Environment via λ -Selective SOA-MZI Switch," PTL, DOI:2011.2169398

[4.11] B. Schrenk, A. Maziotis, M. Bougioukos, L. Moerl and H. Avramopoulos, "WDM-PON Overlay for Inter- and Intra-Network Routing", OFC 2012

D.T. Neilson, "Photonics for switching and routing", *IEEE J. Quantum Electron.*, 12(2006), No. 4.

[4.12] N. Calabretta, H. Jung, J.Llorente, E. Tangdiongga, T. Koonen, H. Dorren, "All-optical techniques enabling packet switching with label processing and label rewriting", *J. Telecommunications and Information Technology*, (2009).

[4.13] C. Reis, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis, N. Calabretta, P.S. André, R.P. Dionísio, B. Neto, H.J.S Dorren, H.Avrromopoulos, A.T. Teixeira; "All-optical synchronous S-R flip-flop based on active interferometric devices", *Electron. Letters*, 46(2010), No. 10.

[4.14] J. Wang, G. Meloni, G. Berrettini, L. Poti, A. Bogoni, "All-optical clocked flip-flops and binary counting operation using SOA-based SR latch and logic gates", *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 16 (2010).

[4.15] M. Zaitso, K. Takeda, M. Takenaka, T. Tanemura, Y. Nakano, "All-optical flip-flop with optical clock signal using Mach-Zehnder interferometer bistable laser diode", *Proc. Photonics in Switching 2010*.

[4.16] C. Reis, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis, N. Calabretta, P.S. André, R.P. Dionísio, B. Neto, H.J.S Dorren, H.Avrromopoulos, A.T. Teixeira; "All-optical clocked D flip-flop memory using a hybrid integrated S-R latch", to be published in *Microwave Op. Tech. Letters*.

[4.17] T. Chattopadhyay, "All-optical clocked delay flip-flop using a single terahertz optical asymmetric demultiplexer-based switch: a theoretical study", *Appl. Opt.*, Vol. 49, pp. 5226-5235, 2010.

[4.18] Y. Liu et al., "Packaged and hybrid integrated all-optical flip-flop memory", *Electron. Lett.*, vol. 42, No. 24, pp. 1399-1400, November 2006.

[4.19] R. Clavero et al., "All-optical flip-flop based on an active Mach-Zehnder interferometer with a feedback loop", *Optics Letters*, vol. 30, no. 21, pp. 2861-2863, November 2005.

[4.20] M.T. Hill et al., "All-optical flip-flop based on coupled lasers diodes", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, n03, pp. 405-413, March 2001.

[4.21] L. Li et al., "A Novel Fiber Delay Line Buffering Architecture for Optical Packet Switching", *IEEE GLOBECOM*, pp. 2809-2813, December 2003.

[4.22] K. Takeda, M. Takenaka, T. Tanemura, and Y. Nakano, All-optical flip-flop based on Mach-Zehnder interferometer bistable laser diode, In: *European Conference on Optical Communication*, paper 1.2.5, 2009.

[4.23] M.T. Hill, A. Sritvatsa, N. Calabretta, Y. Liu, H. de Waardt, G.D. Khoe, and H.J.S. Dorren, 1 2 optical packet switch using all-optical header processing, *Electron Lett* 37 (2001), 774–775.

[4.24] L. Liu, R. Kumar, K. Huybrechts, T. Spuesens, G. Roelkens, E. Geluk, T. Vries, P. Regreny, D. Thourhout, R. Baets, and G. Morthier, An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip, *Nat Photon* 4 (2010), 182–187.

[4.25] J.M. Martinez, F. Ramos, and J. Martí, 10 Gb/s reconfigurable optical logic gate using a single hybrid-integrated SOA-MZI, *Fiber Integr Opt* 27 (2008), 15–23.

Κεφάλαιο 5

Δυναμική ανάθεση χωρητικότητας και οπτικός πολλαπλασιασμός συχνότητας σε RoF δίκτυα

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται δύο μέθοδοι που υλοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διατριβής σε δίκτυα πρόσβασης Radio-over-Fiber. Οι Radio-over-Fiber πλατφόρμες αναδεικνύονται σε ευέλικτες και δυναμικές λύσεις για τα δίκτυα πρόσβασης, λόγω της δυνατότητάς τους να διανείμουν ευρυζωνικές ετερογενείς υπηρεσίες σε δικτυακή ασύρματη ή ενσύρματη υποδομή.

Στην αρχή του κεφαλαίου, παρουσιάζεται μία δομή δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας (DCA), που υλοποιεί την ιδέα των κινούμενων εκτεταμένων κελιών (MEC) σε Radio-over-Fiber δίκτυα και αντιμετωπίζει επιτυχώς τις μεταπομπές (handoff), κατά τη μετάβαση των χρηστών από κελί σε κελί. Η αρχιτεκτονική, μέσω ενός αναπροσαρμόσιμου κέντρου μεταγωγής (CO), που βασίζεται σε ένα μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό διακόπτη (MEMS), πραγματοποιεί δρομολόγηση και μεταγωγή ανάμεσα σε έξι μήκη κύματος που μεταφέρουν δεδομένα, σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο υποσύνολα που μεταδίδουν το ίδιο περιεχόμενο πληροφορίας και

μπορούν να κινηθούν μαζί με το χρήστη. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζεται μετάδοση ετερογενούς ασύρματου σήματος, χρησιμοποιώντας οπτικό πολλαπλασιασμό συχνότητας διπλής-υπο-φέρουσας (OFM), με μετάδοση διαμόρφωσης φάσης (PSK) και αποδιαμόρφωση από ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης (DI) στην κεραία.

5.1 Οπτική δυναμική ανάθεση χωρητικότητας, προς επίτευξη καλύτερων υπηρεσιών μεταπομπής (handoff), σε Radio-over-Fiber δίκτυα

Η ανάγκη για ύπαρξη αποτελεσματικών και διαφανών ευρυζωνικών ασυρμάτων υπηρεσιών από άκρη-σε-άκρη (end-to-end) στα δίκτυα νέας γενιάς, έχει αναδείξει τη σημασία της σύγκλισης των οπτικών και ασυρμάτων δικτύων. Η Radio-over-Fiber (RoF) αρχιτεκτονική αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη λύση, για τη σύνδεση του τελευταίου μέτρου ασύρματης επικοινωνίας, με τους πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης των οπτικών ινών, σχηματίζοντας μία αξιόπιστη πλατφόρμα υψηλών ρυθμών μετάδοσης, σε ήδη εγκατεστημένες ασύρματες επικοινωνίες [5.1]. Επιπλέον, έχει εισάγει νέες αρχιτεκτονικές ενσύρματων-ασύρματων υπηρεσιών, μέσω της χρησιμοποίησης ενός κοινού δικτύου κορμού για ετερογενείς τεχνολογίες, οδηγώντας σε σημαντική πρόοδο σε mm-waveband picocellular δίκτυα, παράγοντας ασύρματα σήματα, ρυθμού δεδομένων αρκετών Gb/s, σε συχνότητες έως 60GHz, με χαμηλό κόστος [5.2], φτάνοντας σε αποστάσεις μέχρι μερικές δεκάδες χιλιόμετρα [5.3], συχνά συνδυαζόμενη με FTTx υπηρεσίες στην ίδια υποδομή [5.4].

Ωστόσο, ο απώτερος προορισμός της συνένωσης των πλεονεκτημάτων των ασυρμάτων και οπτικών επικοινωνιών μέσω ενός RoF δικτύου, φέρνει στην επιφάνεια ένα σύνολο προκλήσεων στο πεδίο των οπτικών δικτύων. Η κινητικότητα του χρήστη, αλλά και η συνδεσιμότητα πολλών χρηστών, είναι άμεσα συνδεδεμένες με σχεδόν κάθε τύπο ασύρματων συνδέσεων, συνιστώντας ένα νέο λειτουργικό πλαίσιο, καθώς το δίκτυο εκτείνεται όχι μόνο σε ασύρματο αλλά και σε ενσύρματο μέσω διάδοσης. Η κατάσταση γίνεται ακόμη δυσκολότερη, όταν οι ραγδαία

αναπτυσσόμενες mm-wave τεχνολογίες, χρησιμοποιούνται στο ασύρματο μέρος του δικτύου, όπου περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων λειτουργικών λύσεων της ασύρματης βιομηχανίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πιθανή λύση [5.5] – [5.7]. Κατόπιν τούτου, η έρευνα σε πολλαπλών χρηστών, τοπικού δικτύου, RoF αρχιτεκτονικές, είναι ακόμη στην αρχή [5.8], ενώ η κινητικότητα του τελικού χρήστη σε picocellular RoF δίκτυα απαιτεί νέες αρχιτεκτονικές δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας (DCA) στο οπτικό πεδίο, που θα υποστηρίζουν τη διαδικασία των μεταπομπών (handoff). Έως τώρα, μόνο ένας μικρός αριθμός τεχνικών έχουν αντιμετωπίσει το ζήτημα της κινητικότητας [5.9] – [5.11] σε RoF δίκτυα, αναδεικνύοντας την προτεινόμενη πλατφόρμα κινούμενων εκτεταμένων κελιών (MEC), για διαχείριση μεταπομπών (handoff) σε picocellular RoF δίκτυα, σε υποσχόμενη λύση, καθώς αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τους περιορισμούς κινητικότητας που συνδέονται με τις περιορισμένες διαστάσεις των επικαλυπτόμενων περιοχών [5.11].

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται πειραματικά ένας οπτικός μηχανισμός δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας (DCA), που υλοποιεί την ιδέα των κινούμενων εκτεταμένων κελιών (MEC) σε RoF δίκτυα, ο οποίος επιτρέπει την επιτυχή διαχείριση των μεταπομπών (handoff), κατά την κίνηση του χρήστη στα κελιά [5.11]. Η αρχιτεκτονική οπτικής δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας (DCA) βασίζεται σε ένα 48x48 μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό διακόπτη (MEMS) (Εικόνα 80) [5.12], που βρίσκεται στο κέντρο μεταγωγής (CO) και είναι υπεύθυνος για τη δρομολόγηση του συνόλου των μηκών κύματος που μεταφέρουν τα δεδομένα, στα κελιά που περιβάλλουν τον τελικό χρήστη. Ο διακόπτης παρείχε τις λειτουργίες του μέσω του λογισμικού διεπαφής (Εικόνα 81). Η μετατόπιση του χρήστη σε νέο κελί προκαλεί την αναπροσαρμογή του μικρο-ηλεκτρο-μηχανικού διακόπτη (MEMS), έτσι ώστε να αφαιρεθεί ένα μήκος κύματος από το σύνολο των δρομολογημένων καναλιών, ενώ προστίθεται ένα καινούριο. Αυτό οδηγεί στην ανασύνθεση του εκτεταμένου κελιού (EC), ώστε αυτό να μπορεί να ακολουθήσει την κινητικότητα του χρήστη, επιτρέποντας τη σύνδεση του δίχως διακοπές με το δίκτυο.


Στις επόμενες παραγράφους, παρουσιάζεται πειραματικά ο προτεινόμενος οπτικός μηχανισμός δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας (DCA) για εκτεταμένα κελιά (MEC),

που σχηματίζονται από μία ομάδα 5 κελιών, και για ένα συνολικό αριθμό έξι διαθέσιμων καναλιών μηκών κύματος, κάθε ένα εκ των οποίων μεταφέρει δεδομένα ρυθμού 500 Mb/s, διαμορφωμένα σε υπο-φέρουσα συχνότητας 8,5 GHz. Παρουσιάζεται μετάδοση χωρίς λάθη, με ποινή ισχύος μικρότερη των 1,4 dB για όλα τα κανάλια, σε σύνδεσμο μετάδοσης οπτικής ίνας (SMF) μήκους 25 χλμ, πριν, αλλά και μετά, τη μετακίνηση του χρήστη στο νέο κελί.




Εικόνα 80: Glimmerglass 48x48 μικρο-ηλεκτρο-μηχανικός διακόπτης (MEMS).

Port: input 10009 Peer: output 20016
 Comment: Comment:
 Power: ▶1.2 dbm Power: ▶-0.3 dbm
 Signal Type: 1550 User: admin
 Connection:



GLIMMERGLASS

[Fiber](#) [Topology](#) [Reports](#) [Configure](#) [User Management](#) [System](#)

Alarms
 37.0°C

Photonic Multicast

A	A1	A2	B	B1	B2	B3	B4
24	27	28	31	33	34	10	11

Input

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
48	8	25	13	14	16	17	18																26	A							
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48																

Output

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32

Signal Type: 1550 Confirm Duplex Lock

R05.00p004 Copyright © 2003-2008 Glimmerglass Networks, Inc. All Rights Reserved.
 [Last updated: 12:09:03 AM] [admin][Sign out]

Εικόνα 81: Λογισμικό διεπαφής του μικρο-ηλεκτρο-μηχανικού διακόπτη (MEMS).

5.1.1 Αρχιτεκτονική και πειραματική διάταξη

Η Εικόνα 82 απεικονίζει τη βασική ιδέα των εκτεταμένων κελιών (MEC). Σε κάθε ένα κελί ανατίθεται ένα μήκος κύματος, με όλα τα κανάλια μηκών κύματος να παρέχονται από το κέντρο μεταγωγής (CO). Το εκτεταμένο κελί περιλαμβάνει το κελί του χρήστη και τα έξι περιβάλλοντα κελιά, συνεπώς τα επτά κανάλια μηκών κύματος που αντιστοιχούν στο εκτεταμένο κελί μεταδίδουν το ίδιο περιεχόμενο πληροφορίας. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης διατηρεί τη σύνδεσή του με το δίκτυο, καθώς εισέρχεται σε νέο κελί και διασφαλίζεται η επικοινωνία χωρίς διακοπές για όλες τις πιθανές επόμενες κινήσεις του [5.11]. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 82(α), όπου ο χρήστης αρχικά βρίσκεται στο κελί #1 και το εκτεταμένο κελί αποτελείται από τα κελιά #1, #2, #3, #4, #5, #9, #10. Καθώς ο χρήστης μετακινείται από το κελί #1 και εισέρχεται στο κελί #4, όπως φαίνεται στην Εικόνα 82(β), το εκτεταμένο κελί επανακαθορίζεται, έτσι ώστε το νέο εκτεταμένο κελί να σχηματίζεται γύρω από το κελί #4, περιλαμβάνοντας τα κελιά #1, #2, #4, #5, #6, #7, #8. Ο μηχανισμός επανακαθορισμού του εκτεταμένου κελιού πραγματοποιείται στο κέντρο μεταγωγής (CO), μέσω ενός πίνακα οπτικής μεταγωγής [5.11], έτσι ώστε τα μήκη κύματος που ανατίθενται στα κελιά #3, #9 και #10 να απενεργοποιούνται και η μετάδοση πληροφορίας δεδομένων να μεταφέρεται στα αντίστοιχα μήκη κύματος των νέων κελιών #6, #7, #8.

Η Εικόνα 82(γ) δείχνει την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για να παρουσιαστεί η ιδέα των εκτεταμένων κελιών (MEC), χρησιμοποιώντας δομές εκτεταμένων κελιών που αποτελούνται από πέντε κελιά. Μία WDM πηγή έξι καναλιών, με 200 GHz απόσταση μεταξύ τους, παρέχει τα έξι μήκη κύματος που ανατίθενται στις απομακρυσμένες μονάδες πρόσβασης (RAU) των κελιών #1 (1552.0 nm), #2 (1553.6 nm), #3 (1555.2 nm), #4 (1556.8 nm), #5 (1558.4 nm) και #6 (1560.0 nm). Τα έξι κανάλια εισέρχονται στον οπτικό 48x48 μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό διακόπτη (MEMS - Intelligent Optical System- IOS 100) [5.12], που είναι υπεύθυνος να παρέχει την απαιτούμενη λειτουργία της δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας (DCA), ώστε να καταστεί δυνατός ο επανακαθορισμός του εκτεταμένου κελιού. Πέντε θύρες εξόδου του διακόπτη πολυπλέκονται στη συνέχεια σε κοινή οπτική ίνα μέσω μίας συστοιχίας φραγμάτων περίθλασης (AWG) δεκαέξι καναλιών, με 100 GHz

απόσταση μεταξύ τους, και εύρος ζώνης 12,5 GHz και 43 GHz, για 1 dB και 3 dB διαφορά ισχύος από τη μέγιστη τιμή, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, το παραγόμενο σήμα των πολυπλεγμένων μηκών κύματος διαμορφώνεται στην υπο-φέρουσα σε ένα LiNbO_3 διαμορφωτή, που οδηγείται από δεδομένα 500 Mb/s, τα οποία εισάγονται στην μικροκυματική φέρουσα συχνότητας 8,5 GHz. Μετά την έξοδο από το διαμορφωτή, τα κανάλια δεδομένων ενισχύονται σε έναν οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου και μεταδίδονται σε 25 χλμ οπτικής ίνας (SMF), πριν την αποπολυπλεξία τους σε ξεχωριστά κανάλια, μέσω μίας επιπρόσθετης συστοιχίας φραγμάτων περίθλασης (AWG), που είναι παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για την πολυπλεξία στο κέντρο μεταγωγής (CO). Κάθε θύρα εξόδου του αποπολυπλέκτη αντιστοιχεί σε μία απομακρυσμένη μονάδα πρόσβασης (RAU), που εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο κελί. Η ισχύς καθενός οπτικού καναλιού στην έξοδο της πηγής ήταν 7 dBm, ενώ οι απώλειες κατά τη διέλευση του σήματος από το μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό διακόπτη (MEMS), τη συστοιχία φραγμάτων περίθλασης και το διαμορφωτή ήταν 1,7 dB, 2,8 dB και 5 dB, αντίστοιχα.

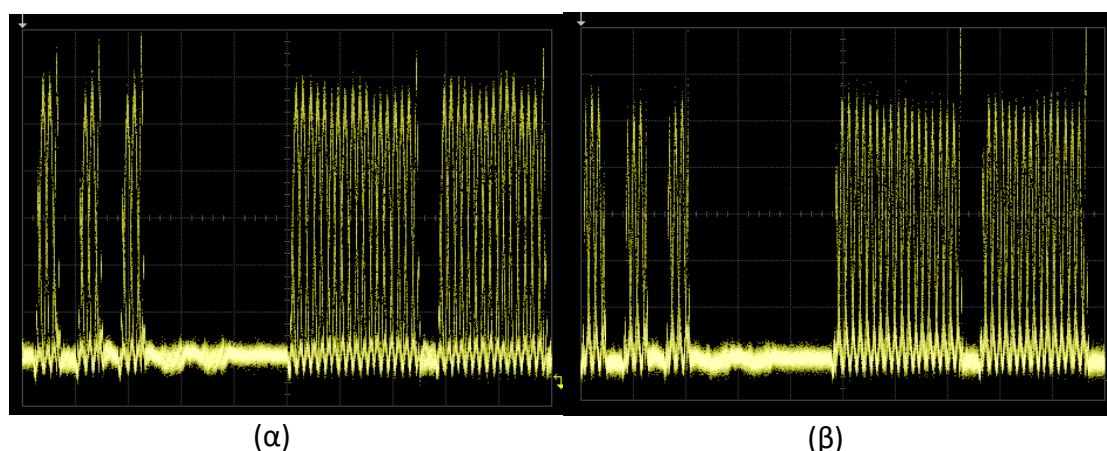
Η αξιολόγηση του σήματος σε κάθε έξοδο του αποπολυπλέκτη πραγματοποιείται από το δέκτη (Rx), που φαίνεται ως ένθετο στην Εικόνα 82(γ). Το κανάλι που εισέρχεται στο δέκτη, μετατρέπεται από οπτικό σε ηλεκτρικό, μέσω μίας φωτοδιόδου με 10 GHz 3-dB εύρος ζώνης, και στη συνέχεια ενισχύεται μέσω ενός RF ενισχυτή. Ο υποβιβασμός συχνότητας (down-conversion) πραγματοποιείται σε ένα κύκλωμα μικροκυματικού μίκτη, που οδηγείται από ένα ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 8,5 GHz. Ο συγχρονισμός του τοπικού ταλαντωτή του δέκτη με την υπο-φέρουσα επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός ρυθμιζόμενου μετατοπιστή φάσης (tunable phase shifter). Ένα κατωπερατό φίλτρο (LPF), με 3-dB εύρος ζώνης 600 MHz, χρησιμοποιείται στη συνέχεια, για απομόνωση της πληροφορίας βασικής ζώνης, η οποία στη συνέχεια εισέρχεται στον ανιχνευτή λαθών, στο μικροκυματικό φασματικό αναλυτή (microwave spectrum analyzer) και στον παλμογράφο. Για τη διαδικασία λήψης των αρχικών μετρήσεων ρυθμού σφαλμάτων (back-to-back), το σήμα εξετάστηκε αμέσως μετά την έξοδο του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου και επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ένα πρόσθετο ρυθμιζόμενο οπτικό ζωνοπερατό φίλτρο (OBPF), εύρους ζώνης 0,6 nm, ώστε να απομονωθεί το κανάλι πληροφορίας. Παρόλο που

5.1.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Όσο ο χρήστης βρίσκεται στο κελί #1, ο μικρο-ηλεκτρο-μηχανικός διακόπτης (MEMS) δρομολογεί μόνο τα κανάλια #1 έως #5 στις θύρες εισόδου του πολυπλέκτη (συστοιχία φραγμάτων περίθλασης), ενώ εμποδίζει το κανάλι #6. Με αυτόν τον τρόπο, μόνο τα κανάλια #1 έως #5 διαμορφώνονται, το καθένα με δεδομένα ρυθμού 500 Mb/s, σχηματίζοντας τη δομή πέντε κελιών του εκτεταμένου κελιού, γύρω από το χρήστη. Μόλις ο χρήστης μετακινείται στο κελί #4, ο μικρο-ηλεκτρο-μηχανικός διακόπτης (MEMS) αναδιαμορφώνεται, για να απορρίψει το κανάλι #3, επιτρέποντας πλέον τη μετάδοση του καναλιού #6 στην είσοδο του πολυπλέκτη (συστοιχία φραγμάτων περίθλασης), έτσι ώστε να σχηματιστεί το νέο εκτεταμένο κελί γύρω από τη νέα θέση του χρήστη.

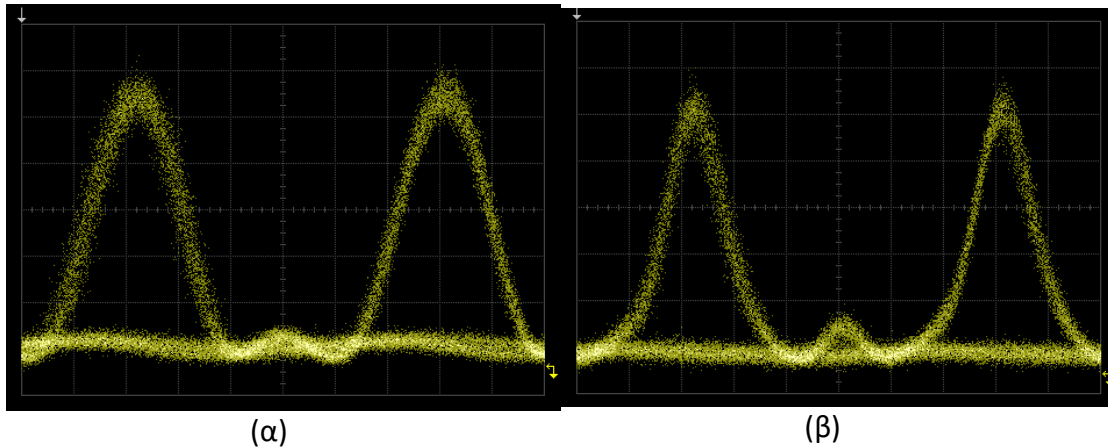
Οι Εικόνα 83-85 δείχνουν τα ίχνη και τα διαγράμματα οφθαλμού του καναλιού #1, μήκους κύματος 1552,0 nm, όταν το κανάλι #6 είναι απενεργοποιημένο και τα κανάλια #1 έως #5 περνούν στο στάδιο πολυπλεξίας, μέσω της συστοιχίας φραγμάτων περίθλασης (AWG) - αντιστοιχώντας την τρέχουσα θέση του χρήστη στο κελί #1.

Η Εικόνα 83 απεικονίζει τα ίχνη στο χρόνο του σήματος δεδομένων, ρυθμού 500 Mb/s, στην έξοδο του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου και στο στάδιο της αποπολυπλεξίας.



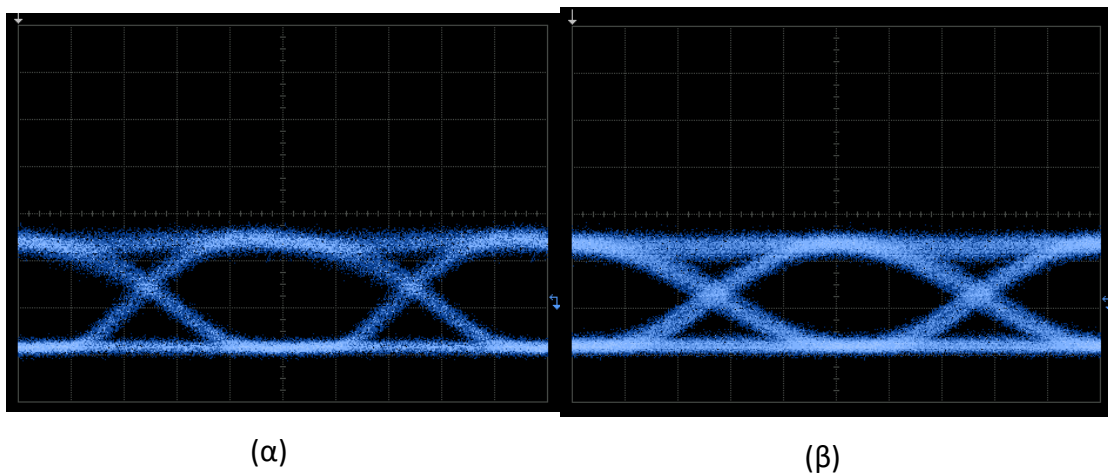
Εικόνα 83: Ίχνη στο χρόνο του προβιβασμένου (*up converted*) σήματος (α) μετά τον οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου και (β) μετά το στάδιο της αποπολυπλεξίας.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα οφθαλμού παρουσιάζονται στην Εικόνα 84.



Εικόνα 84: Διαγράμματα οφθαλμού του προβιβασμένου σήματος (α) μετά τον οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου και (β) μετά το στάδιο της αποπολυπλεξίας.

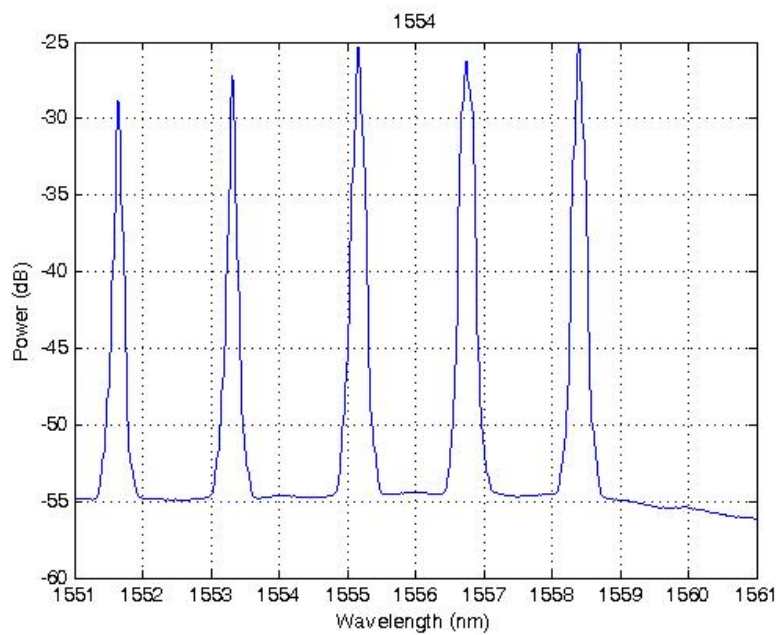
Τέλος, τα διαγράμματα οφθαλμού των αντίστοιχων σημάτων μετά από υποβιβασμό συχνότητας (downconverted) απεικονίζονται στην Εικόνα 85.



Εικόνα 85: Διαγράμματα οφθαλμού σήματος βασικής ζώνης (α) μετά τον οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου και (β) μετά το στάδιο της αποπολυπλεξίας.

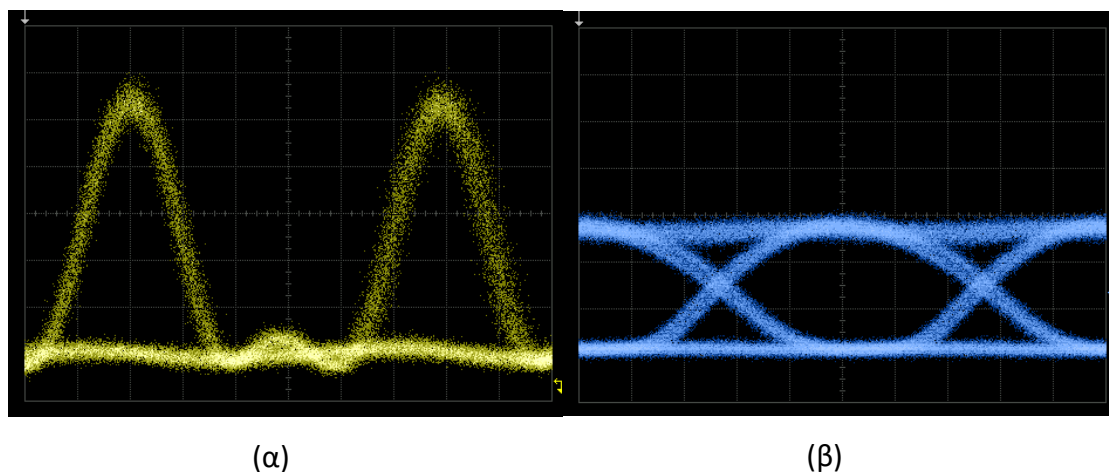
Οι Εικόνα 86-91 απεικονίζουν τα φάσματα και τα διαγράμματα οφθαλμού για το κανάλι #3, στην περίπτωση όπου η τοποθεσία του χρήστη είναι στο κελί #1, και για το κανάλι #6, αφού ο χρήστης έχει εισέλθει στο κελί #4.

Η Εικόνα 86 δείχνει το φάσμα των πολυπλεγμένων καναλιών δεδομένων, #1 έως #5, στην είσοδο του σταδίου αποπολυπλεξίας, όταν ο χρήστης βρίσκεται στο κελί #1.



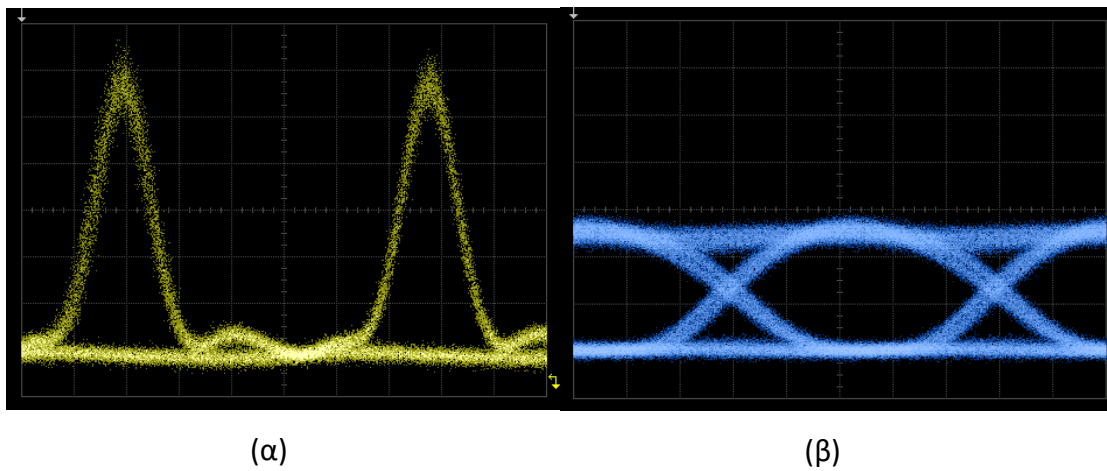
Εικόνα 86: Φάσμα του σήματος πριν την είσοδο στη συστοιχία φραγμάτων περίθλασης, όταν ο χρήστης βρίσκεται στο κελί #1.

Η Εικόνα 87 παρουσιάζει τα διαγράμματα οφθαλμού του προβιβασμένου σήματος (upconverted) και του σήματος βασικής ζώνης (baseband) του καναλιού #3, όταν το κανάλι #6 είναι απενεργοποιημένο.



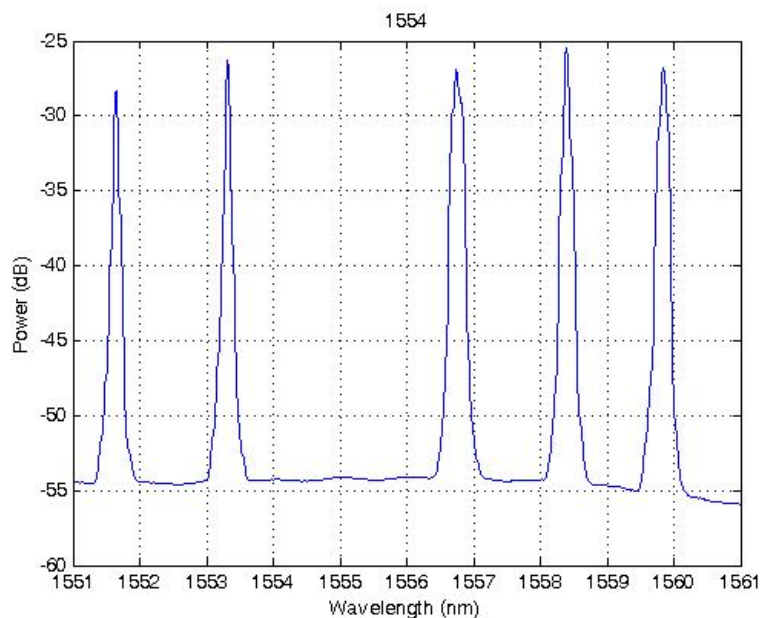
Εικόνα 87: Διαγράμματα οφθαλμού (α) του αρχικού προβιβασμένου σήματος (upconverted) του καναλιού #3, όταν το κανάλι #6 είναι απενεργοποιημένο και (β) αντίστοιχο διάγραμμα βασικής ζώνης.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα οφθαλμού για το κανάλι #3, μετά τη μετάδοση και την αποπολυπλεξία, φαίνονται στην Εικόνα 88.



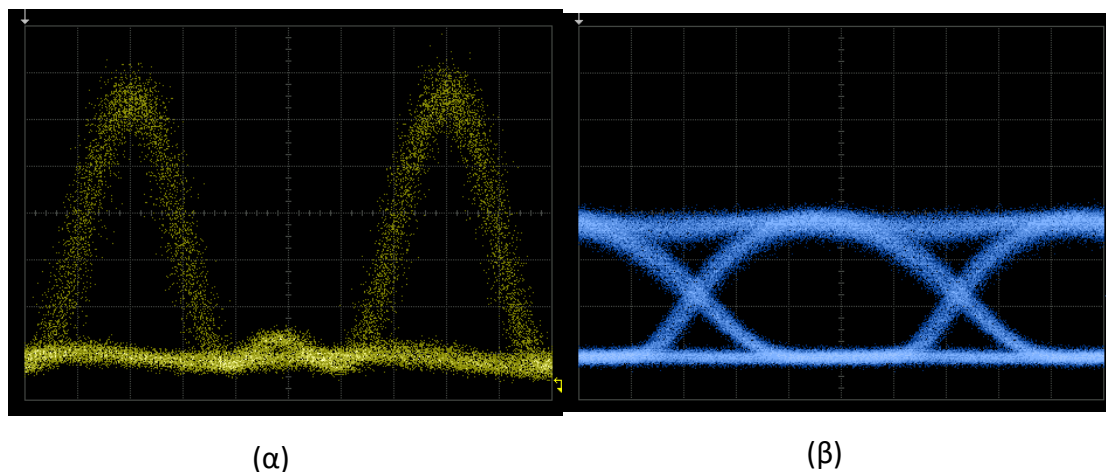
Εικόνα 88: Διαγράμματα οφθαλμού μετά από μετάδοση (α) του προβιβασμένου (upconverted) σήματος του καναλιού #3, όταν το κανάλι #6 είναι απενεργοποιημένο και (β) αντίστοιχο διάγραμμα βασικής ζώνης.

Η Εικόνα 89 απεικονίζει το φάσμα του πολυπλεγμένου σήματος αφού ο χρήστης έχει εισέλθει στο κελί #4, αποκαλύπτοντας ξεκάθαρα την απουσία του καναλιού #3, μήκους κύματος 1555,2 nm, και την παρουσία του νέου καναλιού #6, μήκους κύματος 1560,0 nm.



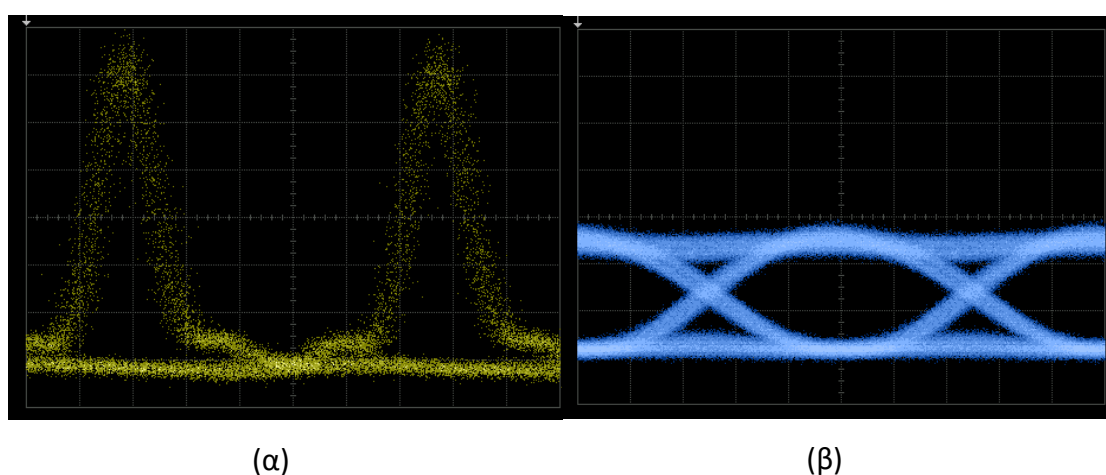
Εικόνα 89: Φάσμα του σήματος πριν τη συστοιχία φραγμάτων περίθλασης, όταν ο χρήστης βρίσκεται στο κελί #4.

Το διάγραμμα οφθαλμού του προβιβασμένου σήματος του καναλιού #6 (upconverted) και το αντίστοιχο της βασικής ζώνης (baseband), στην έξοδο του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου, φαίνονται στην Εικόνα 90.



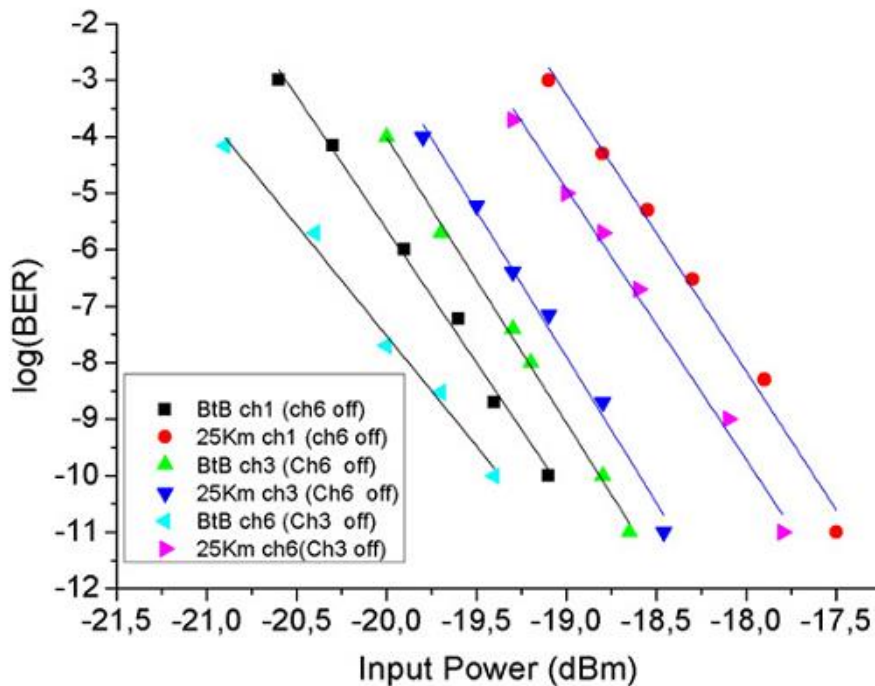
Εικόνα 90: Διάγραμμα οφθαλμού (α) μετά τον οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου του προβιβασμένου (upconverted) σήματος του καναλιού #6, όταν το κανάλι #3 είναι απενεργοποιημένο και (β) αντίστοιχο διάγραμμα βασικής ζώνης.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα οφθαλμού που προκύπτουν μετά από μετάδοση σε οπτική ίνα μήκους 25 χλμ, στην έξοδο του σταδίου αποπολυπλεξίας, δίνονται στην Εικόνα 91.



Εικόνα 91: Διάγραμμα οφθαλμού του προβιβασμένου (upconverted) σήματος, (α) μετά από μετάδοση σε 25 χλμ οπτικής ίνας και (β) το αντίστοιχο διάγραμμα βασικής ζώνης.

Οι μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) για τα κανάλια #1, #3 και #6, πριν και μετά την κίνηση του χρήστη στο κελί #4, απεικονίζονται στην Εικόνα 92.



Εικόνα 92: Μετρήσεις ρυθμού σφαλμάτων.

Λειτουργία χωρίς σφάλματα επιτεύχθηκε για όλα τα κανάλια με ποινή ισχύος κυμαινόμενη από 0,2 dB για το κανάλι #3, έως 1,4 dB για το κανάλι #1 και το κανάλι #6. Η αιτία της διακύμανσης έγκειται στην εξαρτημένη στο μήκος κύματος συμπεριφορά του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου, που οδηγεί σε διαφορετικές τιμές σηματοθορυβικού λόγου (OSNR) για κάθε κανάλι. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η διακύμανση, ένας βελτιστοποιημένος οπτικός ενισχυτής ίνας ερβίου, με ένα φίλτρο εξομάλυνσης κέρδους στην έξοδό του, μπορεί χρησιμοποιηθεί.

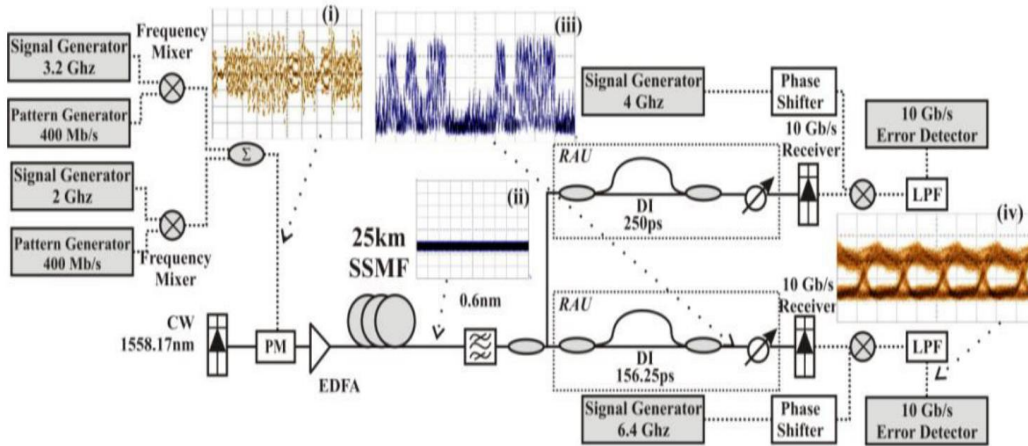
5.2 Οπτικός πολλαπλασιασμός συχνότητας σε Radio-over-Fiber δίκτυα

Στα Radio-over-Fiber δίκτυα, η πολυπλεξία των υπο-φερουσών είναι μία από τις βασικές τεχνικές, που επιτρέπουν τη διανομή πολλαπλών, ετερογενών, ασυρμάτων σημάτων από ένα οπτικό κανάλι [5.13]. Η ιδέα του οπτικού πολλαπλασιασμού συχνότητας (OFM) έχει αποδειχτεί ότι είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στη δημιουργία πολλαπλών υπο-φερουσών υψηλών συχνοτήτων, σε ένα μήκος κύματος [5.14], χρησιμοποιώντας διαμόρφωση φάσης (PSK) στη μικροκυματική φέρουσα χαμηλής συχνότητας, και μετατροπή της διαμόρφωσης από φάση σε πλάτος, με ταυτόχρονο πολλαπλασιασμό της μικροκυματικής συχνότητας, μέσω ενός συμβολομέτρου καθυστέρησης (DI), στην περιοχή της κεραίας. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής μόνο για πολλαπλασιασμό μίας μικροκυματικής συχνότητας [5.15], παρέχοντας μετάδοση δεδομένων ενός χρήστη σε πολλαπλάσια της αρχικής μικροκυματικής φέρουσας.

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται παραγωγή δεδομένων δύο χρηστών και πολλαπλασιασμός συχνότητας δυο υπο-φερουσών σε ένα οπτικό κανάλι, χρησιμοποιώντας την τεχνική του οπτικού πολλαπλασιασμού συχνότητας. Η διάταξη χρησιμοποιεί δεδομένα 400Mb/s στις μικροκυματικές υπο-φέρουσες, συχνοτήτων 2 GHz και 3,2 GHz, με διαμόρφωση φάσης στο οπτικό μήκος κύματος. Το PSK σήμα των δύο υπο-φερουσών στέλνεται στη συνέχεια στη radio-over-fiber σύνδεση, αφού πρώτα μεταδοθεί από 25 χλμ οπτικής ίνας (SSMF). Η μετατροπή της διαμόρφωσης από φάση σε πλάτος, με ταυτόχρονο διπλασιασμό της συχνότητας, επιτυγχάνεται στην περιοχή της κεραίας, μέσω του κατάλληλου συμβολομέτρου καθυστέρησης (DI). Έτσι, προκύπτει ρυθμός δεδομένων 400Mb/s για δύο χρήστες, με διαμόρφωση πλάτους, στις μικροκυματικές συχνότητες των 4GHz και 6,4GHz, η καθεμία εκ των οποίων εξυπηρετεί ένα διαφορετικό κινούμενο χρήστη.

5.2.1 Βασική ιδέα και πειραματική διάταξη

Η Εικόνα 93 απεικονίζει την πειραματική διάταξη της μετάδοσης πολυπλεγμένου PSK σήματος δύο υπο-φερουσών, δείχνοντας επίσης την ιδέα της παραγωγής φέρουσας σε πολλαπλάσια μικροκυματική συχνότητα.



Εικόνα 93: Πειραματική διάταξη για αξιολόγηση της επίδοσης μετάδοσης δύο PSK υποφερουσών.

Δύο διαφορετικά σήματα, ρυθμού δεδομένων 400 Mb/s, διαμορφωμένα με ψευδοτυχαία ακολουθία δεδομένων τύπου PRBS 2^7-1 , προβιβάζονται (up conversion), με χρήση RF τοπικών ταλαντωτών στα 2 GHz και 3,2 GHz, αντίστοιχα. Αυτά τα ηλεκτρικά σήματα συνδυάζονται, για να σχηματίσουν το RF σήμα που φαίνεται στο πρώτο ένθετο της Εικόνα 93. Το τελικό οπτικό PSK σήμα δύο υπο-φερουσών παράγεται από ένα διαμορφωτή φάσης, όπως φαίνεται στο δεύτερο ένθετο. Μετά από 25 χλμ μετάδοσης σε οπτική ίνα (SSMF) και διαχωρισμό του σήματος προς δύο αντίστοιχες μονάδες κεραιών, η τεχνική του οπτικού πολλαπλασιασμού συχνότητας εφαρμόζεται σε κάθε κεραία, μέσω ενός συμβολομέτρου καθυστέρησης (DI), το οποίο εκτελεί διπλασιασμό συχνότητας, με ταυτόχρονη μετατροπή της διαμόρφωσης από PSK σε OOK. Η σχετική καθυστέρηση για το κάθε συμβολόμετρο ήταν 250 psec και 156,25 psec για τις κεραιές των 4GHz και 6,4GHz, αντίστοιχα. Μετά τον πολλαπλασιασμό συχνότητας και τη μετατροπή του

τύπου διαμόρφωσης, τα δύο οπτικά σήματα ανιχνεύονται ξεχωριστά από P-I-N φωτοδιόδους. Τα RF σήματα αποδιαμορφώνονται μέσω μικτών, προτού περάσουν από κατωπερατά φίλτρα εύρους 600 MHz.

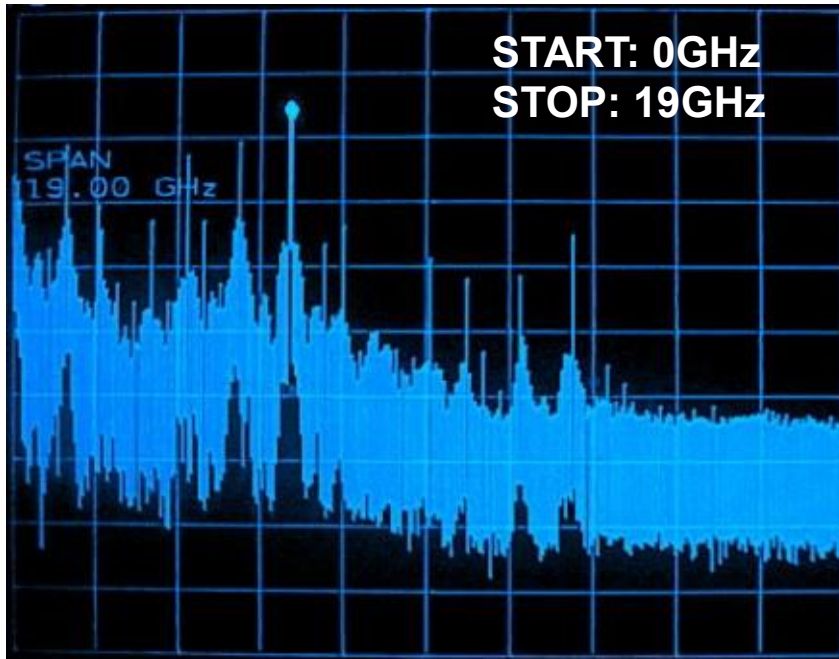
5.2.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Η Εικόνα 94 απεικονίζει το RF φάσμα του πολυπλεγμένου σήματος που εισέρχεται στο διαμορφωτή φάσης.



Εικόνα 94: Ηλεκτρικό φάσμα μετά από προβιβασμό συχνότητας των δύο σημάτων και συνδυασμό τους.

Η Εικόνα 95 δείχνει το RF φάσμα του σήματος στο δέκτη, μετά την μετάδοσή του, και την PSK-σε-OOK μετατροπή από το συμβολόμετρο καθυστέρησης (156.25 psec).



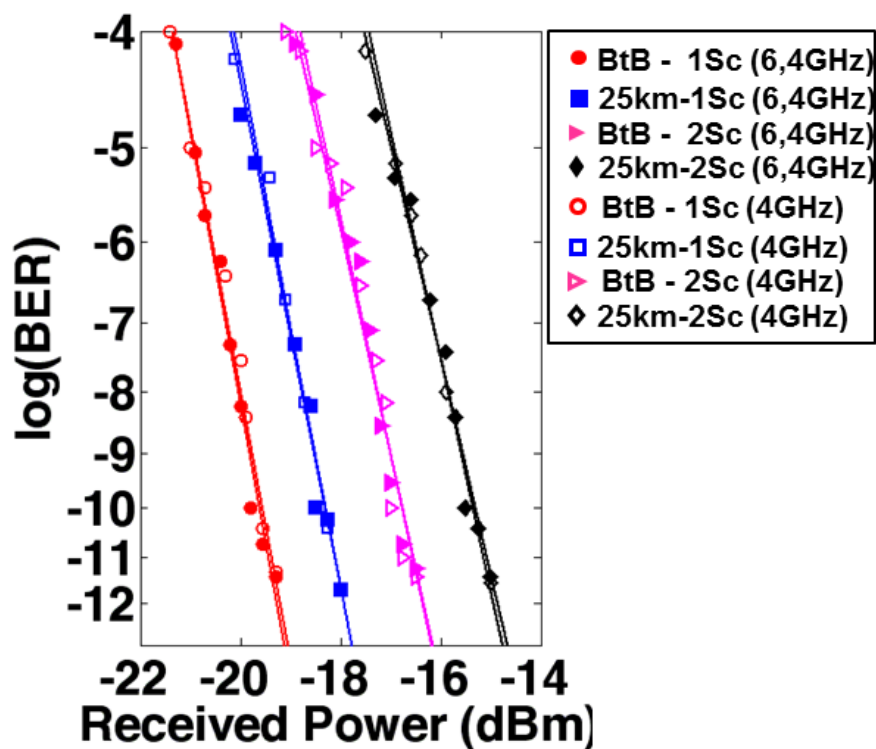
Εικόνα 95: Ηλεκτρικό φάσμα σήματος μετά το δέκτη.

Τέλος, η Εικόνα 96 απεικονίζει το RF φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος μετά τη μίξη με έναν τοπικό ταλαντωτή, συχνότητας 6,4 GHz, και το πέρασμα από το κατωπερατό φίλτρο.



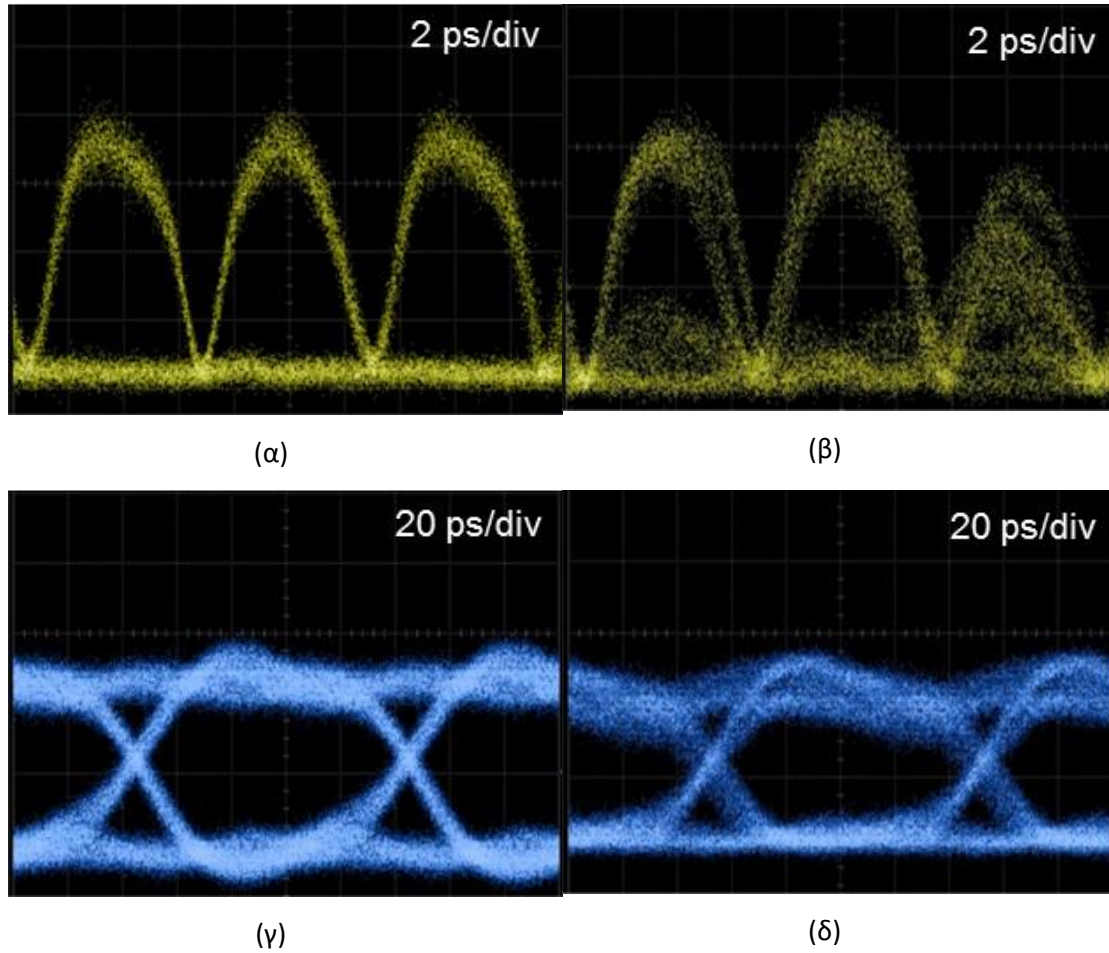
Εικόνα 96: Ηλεκτρικό φάσμα σήματος μετά το κατωπερατό φίλτρο.

Η Εικόνα 97 δείχνει τις καμπύλες ρυθμού σφαλμάτων για τα σήματα δεδομένων με τελική φέρουσα συχνότητα 4 GHz και 6,4 GHz. Πιο συγκεκριμένα, η Εικόνα 97 δείχνει τις καμπύλες ρυθμού σφαλμάτων του σήματος μετά από μετάδοση σε οπτική ίνα μήκους 25 χλμ (SSMF), με μία αλλά και με δύο υπο-φέρουσες (Subcarrier - Sc) παρούσες, και τις αντίστοιχες μετρήσεις χωρίς μετάδοση του σήματος στην οπτική ίνα 25 χλμ (back-to-back). Λειτουργία χωρίς λάθη επιτυγχάνεται σε όλες τις περιπτώσεις. Στις μετρήσεις χωρίς μετάδοση του σήματος σε οπτική ίνα μήκους 25 χλμ, η ποινή ισχύος για λειτουργία με δύο πολυπλεγμένες υπο-φέρουσες ήταν λιγότερο από 2,8 dB, σε σχέση με την περίπτωση όπου μία υπο-φέρουσα ήταν παρούσα. Η ποινή ισχύος λόγω της μετάδοσης ήταν λιγότερο από 1,5 dB, ανεξαρτήτως του αριθμού των υπο-φερουσών.



Εικόνα 97: Καμπύλες ρυθμού σφαλμάτων για περίπτωση χωρίς (Back-to-Back) αλλά και με μετάδοση σε οπτική ίνα μήκους 25 χλμ, για μία υπο-φέρουσα παρούσα και πολυπλεξία δύο υποφερουσών.

Η Εικόνα 98 δείχνει τα διαγράμματα οφθαλμού μετά από το συμβολόμετρο καθυστέρησης, 156,25 psec, για την περίπτωση όπου μία ή δύο υποφέρουσες πολυπλέκονται, και τα τελικά αποδιαμορφωμένα σήματα.



Εικόνα 98: Διαγράμματα οφθαλμού για 25 χλμ μετάδοση, (α) για περίπτωση μετάδοσης μίας υπο-φέρουσας, (β) για πολυπλεξία δύο υπο-φερουσών και (γ), (δ), αντίστοιχα αποδιαμορφωμένα ηλεκτρικά σήματα.

5.3 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου, παρουσιάστηκε ένας πρωτότυπος οπτικός μηχανισμός δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας (DCA), που είναι ικανός να πραγματοποιήσει την ιδέα των εκτεταμένων κελιών, και να υποστηρίξει τη διαδικασία των μεταπομπών (handoff) σε πικοκυψελοειδή Radio-over-Fiber δίκτυα. Η λειτουργία του οπτικού μηχανισμού ανάθεσης χωρητικότητας (DCA) παρέχεται από έναν οπτικό διακόπτη βασισμένο σε μικρο-ηλεκτρο-μηχανικά στοιχεία, που εδράζεται στο κέντρο μεταγωγής (CO), ο οποίος μπορεί να δρομολογήσει ένα σύνολο μηκών κύματος στις αντίστοιχες απομακρυσμένες μονάδες κεραιών (RAU), επανακαθορίζοντας δυναμικά αυτά τα μήκη κύματος, καθώς ο χρήστης εισέρχεται σε νέο κελί. Λειτουργία χωρίς σφάλματα παρουσιάστηκε σε δομές εκτεταμένων κελιών για τα 6 διαθέσιμα μήκη κύματος, μετά από σύνδεσμο οπτικής ίνας 25 χλμ, χρησιμοποιώντας οπτικά σήματα δεδομένων 500 Mb/s. Η αρχιτεκτονική παρουσιάστηκε για μικροκυματικές υπο-φέρουσες συχνότητας 8,5 GHz, αλλά μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε υπο-φέρουσες 60 GHz, μέσω της χρησιμοποίησης της απλής τεχνικής του οπτικού φιλτραρίσματος ενός λοβού (SSB), για επιτυχή μετάδοση και λήψη του ασύρματου σήματος.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάστηκε PSK μετάδοση δύο πολυπλεγμένων υπο-φερουσών σε οπτική ίνα μήκους 25 χλμ (SSMF), χρησιμοποιώντας την τεχνική του οπτικού πολλαπλασιασμού συχνότητας (OFM), για ταυτόχρονη δημιουργία πολλαπλών ενδιάμεσων μικροκυματικών συχνοτήτων. Λειτουργία χωρίς λάθη επιτεύχθηκε και για τα δύο κανάλια, με ποινή ισχύος λιγότερη από 2,8 dB σε σχέση με την περίπτωση όπου μόνο μία υπο-φέρουσα ήταν παρούσα.

Αναφορές

- [5.1] M.J. Crisp, S. Li, A. Watts, R.V. Penty, I.H. White, IEEE/OSA J. of Lightwave Technol. 25 (11) (Nov. 2007) 3388.
- [5.2] D. Wake, A. Nkansah, N.J. Gomes, IEEE/OSA J. of Lightwave Technol. 28 (16) (Aug. 2010) 2456.
- [5.3] C. Lim, et al., IEEE/OSA J. of Lightwa Technol. 28 (4) (Feb. 2010) 390.
- [5.4] S.-H. Fao, H.-C. Chien, Y.-T. Hsueh, A. Chowdhury, J. Yu, G.-K. Chang, IEEE Phot. Technol. Lett. 21 (16) (Aug. 15 2009) 1127.
- [5.5] Wireless Gigabit Alliance, <http://wirelessgigabitalliance.org/>.
- [5.6] C.-T. Lin, J. Chen, P.-T. Shih, W. Jiang Jr., S. Chi, IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 28, (16) (Aug. 2010) 2296.
- [5.7] W. Jiang Jr., et al., IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 28 (16) (Aug. 2010) 2238.
- [5.8] G. Kalfas, N. Pleros, IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 28 (16) (Aug. 2010) 2315.
- [5.9] J.J. Vegas Olmos, T. Kuri, K. Kitayama, IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 25 (11) (Nov. 2007) 3374.
- [5.10] B.L. Dang, M. Garcia Larrode, R. Venkatesha Prasad, I. Niemegeers, A.M.J. Koonen, Comp. Comm. 30 (2007) 3598.
- [5.11] N. Pleros, K. Vyrsoinos, K. Tsagkaris, N.D. Tselikas, IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 27 (12) (June 2009) 1957.
- [5.12] <http://www.glimmerglass.com/products/intelligent-optical-system-100>
- [5.13] Rongqing Hui, Benyuan Zhu, Renxiang Huang, Christopher T. Allen, Kenneth R. Demarest, and Douglas Richards, "Subcarrier Multiplexing for high speed transmission", Journal of Lightwave Technology, 20, 417-427 (2002).

[5.14] M. Garcia Larrode, A.M.J. Koonen, J.J. Vegas Olmos and A. Ng'Oma, "Fiber-Based Broadband Wireless Access Employing Optical Frequency Multiplication", *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 12, pp. 875-881 (2006).

[5.15] A.M.J Koonen, A. Ng'Oma, M. Garcia Larrode, Frans Huijskens, Idelfonso Tafur Monroy, Giok-Djan Khoe, "Novel cost-efficient techniques for microwave signal delivery in fibre-wireless networks, in Proc. ECOC '04, Stockholm, paper Th1.1.1, 2004.

Κεφάλαιο 6

Σύνοψη αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα που προέκυψαν από το σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη μελέτη της λειτουργίας των διατάξεων των προηγούμενων κεφαλαίων, ενώ στο δεύτερο κομμάτι του κεφαλαίου, προτείνονται περαιτέρω ερευνητικές δραστηριότητες στα οπτικά δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς.

6.1 Ανασκόπηση

Η ανάπτυξη των διατάξεων στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής έγινε στην κατεύθυνση της βελτιστοποίησης της διαφάνειας, του κόστους, του ρυθμού μετάδοσης, της κατανάλωσης ενέργειας, της αποτελεσματικότητας και της λειτουργικότητας του δικτύου. Μία επισκόπηση, σχετικά με τη συνεισφορά της διατριβής σε κάθε ένα τομέα ξεχωριστά, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 99: Αξονες έρευνας στο πλαίσιο της διατριβής.

6.2 Σύνοψη

Στις επόμενες ενότητες αναφέρονται η συνεισφορά και τα κυριότερα αποτελέσματα της διατριβής σε τρεις επιμέρους τομείς: στη σχεδίαση των δομών του χρήστη σε παθητικά οπτικά δίκτυα, στη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των χρηστών, και σε μεθόδους που εφαρμόστηκαν σε Radio-over-Fiber δίκτυα.

6.2.1 Ανάπτυξη δομών χρήστη σε παθητικά οπτικά δίκτυα

Παρουσιάστηκε τεχνική αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας, για εφαρμογή στις εγκαταστάσεις του χρήστη. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με άλλες τεχνικές καταπίεσης της διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις των οπτικών δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς. Ενώ, η ηλεκτρο-οπτική feed-forward ανάκτηση φέρουσας απαιτεί εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC), ώστε να επιτευχθεί πλήρως αμφίδρομη μετάδοση, η τεχνική της αμιγώς οπτικής καταπίεσης του συρρευματικού σήματος, που χρησιμοποιεί παθητικά στοιχεία φιλτραρίσματος, μειώνει την ποινή ισχύος λήψης σημαντικά, καθώς αποφεύγει προβλήματα λόγω του μειωμένου εύρους διαμόρφωσης, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την υποχρεωτική χρήση της εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC) για τη λήψη του αντιρρευματικού σήματος. Επιπλέον, καθώς με τη χρήση της τεχνικής μπορεί να μειωθεί ο λόγος σβέσης του δυφίου '1' προς το '0' του συρρευματικού σήματος, η ποινή ισχύος μειώνεται κατά περισσότερο από 3 dB σε σύγκριση με τη συμβατική μονάδα οπτικού δικτύου (ONU).

Η πειραματική λειτουργία της τεχνικής της επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος σε πλήρως αμφίδρομο ASK/ASK 10 Gb/s WDM-PON δίκτυο, έδειξε ότι περιθώριο ισχύος τουλάχιστον 9 dB, επιπλέον του ισολογισμού απωλειών (20 dB), είναι διαθέσιμο, αν ληφθεί υπόψη η εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC) κατά τη λήψη του συρρευματικού σήματος.

Επίσης, η ίδια τεχνική εφαρμόστηκε για επαναδιαμόρφωση του συρρευματικού σήματος, σε πλήρως αμφίδρομο WDM-PON, για συρρευματικά σήματα chirped και non-chirped, διαμόρφωσης ASK και 4-PAM, επιτυγχάνοντας συνολικό ισολογισμό απωλειών 20 dB. Φάνηκε ότι η τεχνική είναι αποτελεσματική και διαφανής στο τρέμουλο φάσης και στον τύπο διαμόρφωσης (ASK, 4-PAM και OFDM), για επαναδιαμόρφωση σε πλήρως αμφίδρομο PON.

Επιπροσθέτως, παρουσιάστηκε μία διαφορετική αμιγώς οπτική τεχνική επαναδιαμόρφωσης (με χρησιμοποίηση ίδιου μήκους κύματος για συρρευματική και αντιρρευματική μετάδοση) σε παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης, που υλοποιήθηκε

μέσω αμιγούς οπτικής ανάκτησης ρολογιού, η οποία βασίζεται σε φίλτρο Fabry–Pérot (FPF) και ημιανώγιμο οπτικό ενισχυτή. Ισολογισμός απωλειών 20 dB λήφθηκε υπόψη και φάνηκε ότι η διείσδυση μπορεί να φτάσει σε εύρος 50 χλμ σε πλήρως αμφίδρομο, συμμετρικό (10 Gb/s) WDM-PON. Επιπλέον περιθώριο ισχύος 6 dB φάνηκε πειραματικά με εφαρμογή εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (FEC) για PRBS μήκους $2^{31}-1$.

Στη συνέχεια, η προαναφερθείσα τεχνική επεκτάθηκε για το σκοπό της αντιμετώπισης του θορύβου που προέρχεται από την οπισθοσκέδαση Rayleigh. Η αντιμετώπιση του θορύβου επιτυγχάνεται μέσω μετατόπισης του μήκους κύματος του αντιρρευματικού σήματος σε σχέση με το μήκος κύματος του συρρευματικού σήματος. Δείχτηκε επιτυχής μετάδοση του αντιρρευματικού σήματος, για ισολογισμό απωλειών 20 dB, στην περίπτωση της επαναδιαμόρφωσης της δεύτερης αρμονικής του RZ συρρευματικού σήματος, παρά το χαμηλό OSRR (<10 dB) και τις απώλειες φιλτραρίσματος.

6.2.2 Διατάξεις βασισμένες σε SOA-MZI, για μετάδοση δεδομένων μεταξύ χρηστών και υλοποίηση αμιγώς οπτικών flip-flop

Στην κατεύθυνση της αύξησης της διαφάνειας των δικτύων και της συγχώνευσης των δικτύων πρόσβασης με τα μητροπολιτικά δίκτυα, παρουσιάστηκε μία αρχιτεκτονική μετάδοσης δεδομένων από χρήστη σε χρήστη σε ένα δίκτυο πρόσβασης δακτυλίου-δέντρου, βασισμένη σε διακόπτες SOA-MZI, χωρίς τη μεσολάβηση των κέντρων μεταγωγής. Οι τοπολογίες δακτυλίου των μητροπολιτικών δικτύων συλλέγουν και δρομολογούν την κίνηση δεδομένων ανάμεσα σε διαφορετικά δέντρα δικτύων πρόσβασης, παρακάμπτοντας το τερματικό οπτικών γραμμών (OLT) και τις ενεργειακά απαιτητικές μετατροπές του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό. Μέσω αυτής της τεχνικής, η λειτουργικότητα των κέντρων μεταγωγής (CO) μεταφέρεται στους απομακρυσμένους κόμβους (RN) του δικτύου, ανακουφίζοντάς τα από ένα μέρος της κίνησης δεδομένων του δικτύου. Αποδείχτηκε ότι είναι εφικτή η εφαρμογή της

τεχνικής, για απώλειες ισχύος 22 dB στο δέντρο και υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου (OSNR) κατά μήκος των κόμβων του δακτυλίου.

Επιπλέον, παρουσιάστηκαν πειραματικά και αξιολογήθηκαν αμιγώς οπτικές διατάξεις οπτικών μνημών, βασισμένες επίσης σε SOA-MZI, οι οποίες αποτελούν δομικά στοιχεία των δρομολογητών ενός δικτύου. Παρουσιάστηκαν, ένας ασύγχρονος S-R μανταλωτής, ένα σύγχρονο S-R flip-flop και ένα σύγχρονο D flip-flop που βασίζονται σε MZI δομές. Η πειραματική υλοποίηση έδειξε ότι υπάρχουν δυνατότητες λειτουργίας σε υψηλή ταχύτητα και οι λόγοι σβέσης ήταν επίσης υψηλοί.

6.2.3 Υλοποίηση τεχνικών σε Radio-over-Fiber δίκτυα

Παρουσιάστηκε ένας πρωτότυπος οπτικός μηχανισμός δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας (DCA), που είναι ικανός να υλοποιήσει την ιδέα των κινούμενων εκτεταμένων κελιών (MEC) και να υποστηρίξει τη διαδικασία των μεταπομπών (handoff) που συμβαίνουν κατά την κίνηση του χρήστη σε πικοκυψελοειδή RoF δίκτυα. Η λειτουργία της δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας (DCA) παρέχεται από ένα οπτικό μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό διακόπτη (MEMS), που εδράζεται στο κέντρο μεταγωγής (CO). Ο διακόπτης δρομολογεί ένα σύνολο μηκών κύματος στις αντίστοιχες απομακρυσμένες μονάδες πρόσβασης (RAU), αναδιαμορφώνοντας δυναμικά τα μήκη κύματος που ανήκουν στην ομάδα των δρομολογούμενων καναλιών, μόλις ο χρήστης μετακινείται σε νέο κελί. Λειτουργία χωρίς σφάλματα παρουσιάστηκε σε δομές κινούμενων εκτεταμένων 5-κελιών (MEC) και για τα 6 διαθέσιμα μήκη κύματος, μετά από μετάδοση σε σύνδεσμο οπτικής ίνας 25 χλμ, χρησιμοποιώντας οπτικά σήματα ρυθμού δεδομένων 500 Mb/s, διαμορφωμένα σε μικροκυματική υπο-φέρουσα συχνότητας 8,5 GHz. Η αρχιτεκτονική μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε διαμόρφωση υπο-φέρουσας συχνότητας 60 GHz, μέσω της χρησιμοποίησης της απλής τεχνικής του οπτικού φιλτραρίσματος ενός λοβού (SSB), που εξασφαλίζει επιτυχή μετάδοση και λήψη του 60 GHz RoF σήματος.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε PSK μετάδοση δύο πολυπλεγμένων υπο-φερουσών σε 25 χλμ οπτικής ίνας (SSMF), χρησιμοποιώντας την τεχνική του οπτικού πολλαπλασιασμού συχνότητας (OFM), για ταυτόχρονη δημιουργία πολλαπλών ενδιάμεσων μικροκυματικών συχνοτήτων. Λειτουργία χωρίς λάθη επιτεύχθηκε και για τα δύο κανάλια, με ποινή ισχύος μικρότερη από 2,8 dB σε σχέση με την περίπτωση όπου μόνο μία υπο-φέρουσα ήταν παρούσα.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η περαιτέρω εξέλιξη των συστημάτων που παρουσιάστηκαν, προϋποθέτει κατά μεγάλο βαθμό την πρόοδο στην έρευνα των τεχνολογιών οπτικής ολοκλήρωσης και επίσης, την υιοθέτηση νέων τεχνικών σχεδίασης συστημάτων μετάδοσης της οπτικής πληροφορίας.

6.3.1 Ολοκλήρωση

Όπως για τις ηλεκτρονικές συσκευές, στις οποίες η ολοκλήρωση μεγάλης κλίμακας (VLSI) σε πυρίτιο είναι εδραιωμένη τις τελευταίες δεκαετίες, οι ερευνητικές προσπάθειες στην κατεύθυνση της ανάπτυξης φωτονικών δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς εστιάζονται ώστε οι οπτικές συσκευές να μπορούν να ολοκληρωθούν στο ίδιο πλινθίο [6.1], [6.2]. Σήμερα, η έκταση στην οποία οι οπτικές διατάξεις μπορούν να ολοκληρωθούν στο ίδιο πλινθίο είναι περιορισμένη, καθώς διαφορετικά υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, αναλόγως της λειτουργίας που επιτελούν. Επιπροσθέτως, τα υλικά, τα μεγέθη και η διαδικασία κατασκευής των οπτικών συσκευών διαφέρουν από τις αντίστοιχες των ηλεκτρονικών, καθιστώντας τη μονολιθική ολοκλήρωση οπτικών και ηλεκτρονικών συσκευών δύσκολη.

Η τεχνολογία ολοκλήρωσης σε πυρίτιο (silicon photonics) και III-V ημιαγωγούς θα συνεχίσει να λαμβάνει ιδιαίτερα υψηλή προσοχή, προς το δρόμο της σύζευξης μεταξύ ηλεκτρονικών και φωτονικών τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (PIC) βασισμένες σε III-V ημιαγωγούς, πυρίτιο και άλλα

υλικά διασφαλίζουν όχι μόνο αποτελεσματικές στο κόστος λύσεις, αλλά επίσης βελτιώνουν τις επιδόσεις των προτεινόμενων υποσυστημάτων και διατάξεων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Επιπλέον, μπορεί να γίνει εφικτή η ολοκλήρωση όχι μόνο οπτικών συσκευών, αλλά και συνδυασμού οπτικών και ηλεκτρονικών συσκευών, όπως η υβριδική ολοκλήρωση III-V ημιαγωγίων φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (PIC) με συμπληρωματικές τεχνολογίες ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (IC), στο ίδιο πλινθίο. Καθώς τα υλικά και οι διαστάσεις των οπτικών συσκευών θα είναι συμβατά με SI-LSI διαδικασίες, παρέχονται παράλληλα δυνατότητες υλοποίησης τεχνικών κατασκευής που θα διευκολύνουν τη μαζική παραγωγή τους.

Ένα παράδειγμα δομικών στοιχείων που μπορούν να ολοκληρωθούν μαζί με ηλεκτρο-οπτικά στοιχεία, αποτελούν τα φίλτρα δακτυλίου (ring resonators), τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν, στις διατάξεις που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, τα φίλτρα Fabry–Pérot (FPF), ως φασματικά περιοδικά στοιχεία φιλτραρίσματος, αλλά και τους κυκλοφορητές, ως οπτικοί πολυπλέκτες προσθήκης-αφαίρεσης (OADM).

6.3.2 Σύμφωνη λήψη σε οπτικά δίκτυα πρόσβασης

Λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης εύρους ζώνης από τους χρήστες, θα υπάρξει ανάγκη ώστε ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στα μελλοντικά παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης να αυξηθεί περαιτέρω. Ωστόσο, καθώς η διαθέσιμη ισχύς εντός του δικτύου πρόσβασης είναι περιορισμένη, γίνεται επιτακτική η ανάγκη χρήσης δεκτών υψηλής ευαισθησίας, ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα αλλά και η έκταση του δικτύου.

Μία ελκυστική λύση αποτελεί η σύμφωνη λήψη, η οποία πάντα προσέλκυε ενδιαφέρον στο πεδίο των οπτικών επικοινωνιών, λόγω της υψηλής ευαισθησίας ισχύος, επιλεκτικότητας στο μήκος κύματος και της δυνατότητας που παρέχει για λήψη ολόκληρου του οπτικού πεδίου [6.3], [6.4].

Παρόλο που οι σύμφωνοι δέκτες προσφέρουν ενδογενώς πλεονέκτημα στην ευαισθησία σε σχέση με την άμεση λήψη, η ευαισθησία τους μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, μέσω τύπων διαμόρφωσης πολλαπλών σταθμών (π.χ. QPSK, M-PAM, M-QAM), που χρησιμοποιούν και τις δύο ορθογώνιες πολώσεις του οπτικού πεδίου.

Όταν ένα WDM-PON συνδυαστεί με σύμφωνη λήψη, προκύπτουν σημαντικά πλεονεκτήματα από τη χρήση τύπων διαμόρφωσης καλύτερης εκμετάλλευσης του φάσματος, στους οποίους κάθε σύμβολο μεταφέρει πολλαπλά ψηφία πληροφορίας. Για ένα δεδομένο ρυθμό δεδομένων, τέτοιοι τύποι διαμόρφωσης μειώνουν τις απαιτήσεις των στοιχείων σε ηλεκτρικό εύρος ζώνης, και καθώς το φάσμα που καλύπτεται μειώνεται, επιτρέπουν την εξυπηρέτηση μεγαλύτερου αριθμού χρηστών. Και τα δύο χαρακτηριστικά είναι πολύ ελκυστικά για ένα WDM-PON δίκτυο. Για παράδειγμα, ο τύπος διαμόρφωσης PDM-8QAM προσφέρει έξι φορές μείωση στο οπτικό και ηλεκτρικό φάσμα σε σύγκριση με την απλή διαμόρφωση πλάτους (ASK), καθώς κάθε σύμβολο μεταφέρει έξι ψηφία πληροφορίας. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί, ότι η πολυπλοκότητα του δικτύου, για υποστήριξη αυτού του τύπου διαμόρφωσης, είναι αυξημένη σε σχέση με την απλή περίπτωση.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής τύπων διαμόρφωσης πολλαπλών σταθμών σε WDM-PON μπορεί να αποτελέσει η τεχνική της αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας, που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Η τεχνική είναι διαφανής στον τύπο διαμόρφωσης, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί τέτοιος τύπος διαμόρφωσης και στο συρρευματικό και στο αντιρρευματικό σήμα, εκμεταλλεύοντας τα πλεονεκτήματα της σύμφωνης λήψης.

Αναφορές

- [6.1] Tai Tsuchizawa, Hidetaka Nishi, Rai Kou, Toshifumi Watanabe, Hiroyuki Shinojima, Koji Yamada, and Sei-ichi Itabashi, “Monolithic Integration of Silicon Photonics Devices for Telecommunications Applications”, Vol. 9 No. 5 May 2012
- [6.2] “Next Generation Optical Networks Enabler for Future Wireless and Wireline Applications”, Photonics 21, Net!Works, November 2011
- [6.3] Smolorz, S., Gottwald, E. , Rohde, H. , Smith, D. , Poustie, A. “Demonstration of a coherent UDWDM-PON with real-time processing”, OFC 2012
- [6.4] Wong, E. “Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies“, Journal of Lightwave Technology, VOL. 30, Issue 4, 15 Feb 2012,

Παράρτημα: Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια με κρίση

Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά

1. A. Maziotis, B. Schrenk, P. Bakopoulos, M. Spyropoulou, J.A. Lazaro, J. Prat and H. Avramopoulos, "Colorless ONU with All-Optical Clock Recovery for Full-Duplex Dense WDM PONs", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 23, Issue 20, pp. 1433-1435, 2011.
2. A. Maziotis, B. Schrenk, M. Bougioukos, H. Avramopoulos., "Cognitive Routing in Converged Access-Metro Environment via λ -Selective SOA-MZI Switch", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 23, Issue 23, pp. 1820-1822, 2011
3. C. Reis, A. Maziotis, Ch. Kouloumentas, C. Stamatiadis, M. Bougioukos, N. Calabretta, P. Andre, R. Dionisio, B. Neto, H.J.S. Dorren, H. Avramopoulos and A. Teixeira, "All-optical synchronous S-R flip-flop based on active interferometric devices" Electronics Letters, Vol. 46 , Issue 10 , Pages: 709 - 710, 2010.
4. K. Vyrsoinos, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis and N. Pleros, "An optical MEMS-based dynamic capacity allocation scheme for handoff using moving extended cells in radio-over-fiber networks", Optics Communications 284 (19), pp. 4390-4393, Elsevier B.V, 2011
5. C. Reis, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis, M. Bougioukos, N. Calabretta, P. André, R. Dionisio, B. Neto, H. J. S. Dorren, H. Avramopoulos, A. Teixeira, "All-optical clocked D flip-flop memory using a hybrid integrated S-R latch", Microwave and Optical Technology Letters, Volume 53, Issue 6, pages 1201–1204, June 2011
6. Ch. Kouloumentas, M. Bougioukos, A. Maziotis, H. Avramopoulos , "DPSK Regeneration at 40 Gb/s and Beyond Using a Fiber-Sagnac Interferometer ", IEEE Photonics Technology Letters, VOL. 22, NO. 16, August 15, 2010
7. B. Schrenk, P. Bakopoulos, E. Kehayas, A. Maziotis, J.A. Lazaro, H. Avramopoulos, and J. Prat "An All-Optical Carrier Recovery Scheme for Access Networks With Simple ASK Modulation" IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 3, Issue: 8
8. C. Stamatiadis, K. Vyrsoinos, L. Stampoulidis, I. Lazarou, A. Maziotis, J. Bolten, M. Karl, T. Wahlbrink, P. De Heyn, Z. Sheng, D. Van. Thourhout and H. Avramopoulos , "Silicon-on-Insulator Nanowire Resonators for Compact and Ultra-high speed All-optical Wavelength Converters", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 29, Issue 20, pp. 3054-3060, 2011
9. M. Bougioukos, Ch. Kouloumentas, M. Spyropoulou, G. Giannoulis, D.Kalavrouziotis, A. Maziotis, P. Bakopoulos, R. Harmon, D. Rogers, J. Harrison, A. Poustie, G. Maxwell, H. Avramopoulos, "Multi-format all-optical processing based on a large-scale, hybridly integrated photonic circuit", Optics Express, Vol. 19, Issue 12, pp. 11479-11489 (2011)
10. C. Reis, A. Maziotis, C. Kouloumentas, N. Calabretta, T. Chattopadhyay, P. André, H. J. S. Dorren, H. Avramopoulos and A. Teixeira, "Performance

- Comparison Of All-Optical Clocked S-R And D Flip-Flops”, Optical Society of Japan, Optical Review, submitted
11. C. Reis, L. Costa, A. Bogoni, A. Maziotis, A. Teixeira, C. Kouloumentas, C. Schubert, D. Apostolopoulos, D. Erasme, E. Tangdionga, G. Berretini, G. Meloni, H. Brahmi, H. J. S. Dorren, I. Tomkos, L. Poti, N. Calabretta, P. S.André, P. Zakyntinos, T. Chattopadhyay, H. Avramopoulos, “Roadmap of All-Optical Flip-Flops for Optical Communications Networks”, IET Optoelectronics, submitted
 12. A. Maziotis, D. Klonidis, C. Schubert, R. Nejabati, J. Lazaro, D. Erasme, M. Forzati, E. Tangdionga, P.O. Hedekvist, J. Leuthold, A. Carena, B. Manning, F. Fresi, P.P. Millan, X.-Z. Qiu, A. Teixeira, J. Seoane, Ch. Kouloumentas and H. Avramopoulos, “EURO-FOS: Integrating Europe’s Expertise on Photonic Subsystems in a Pan-European Photonics Network”, invited article for SPIE Professional magazine, accepted for publication.

Δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά συνέδρια με κρίση

1. A. Maziotis, B. Schrenk, P. Bakopoulos, M. Spyropoulou, J.A. Lazaro, J. Prat, and H. Avramopoulos , “Wavelength reuse in a colorless ONU with all-optical clock recovery for full-duplex dense WDM PONs”, in Proc. ICTON 2011, Stockholm, Sweden, Jun. 2011, Tu.C6.7.
2. A. Maziotis, C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, K. Vyrsoinos and N. Pleros, “Dual-User Wireless Heterogeneous Services over a Single Optical Carrier using Optical Frequency Multiplication”, LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. LEOS '09. IEEE 4-8 Oct. 2009 Page(s):691 – 692
3. B. Schrenk, A. Maziotis, M. Spyropoulou, P. Bakopoulos, J.A. Lazaro, J. Prat, and H. Avramopoulos , “Rayleigh Scattering Robust Access Network by Wavelength-Shifting through Extraction of Suppressed RZ Clock Harmonic”, in Proc. ECOC 2011, Mo.2.C.4, Geneva, Switzerland, Sept. 2011.
4. B. Schrenk, A. Maziotis, M. Bougioukos, M. Moehle, L. Moerl and H. Avramopoulos, “WDM-PON Overlay for Inter- and Intra-Network Routing”, OFC 2012.
5. M. Bougioukos, B. Schrenk, A. Maziotis, C. Kouloumentas, K.-O. Velthaus, R. Kaiser, A. Poustie, G. Maxwell, K. Boustedt, R. Magri and H. Avramopoulos, “Dense WDM-PON with 23(46) Gb/s/λ D(Q)PSK Aggregation in the Feeder and Micro-Ring Resonator Assisted ONUs”, OFC 2012.
6. J. Lazaro, B. Schrenk, A. Maziotis, I. Cano, P. Bakopoulos, J. Prat and H. Avramopoulos, “Full-Duplex 20/10 Gb/s WDM-PON with Remodulation of Chirped ASK and Multi-level Quaternary PAM and OFDM”, accepted for publication in OFC 2012.
7. Ch. Kouloumentas, M. Bougioukos, A. Maziotis and H. Avramopoulos, “Phase-Incoherent DPSK Regeneration Using a Fiber-Sagnac Interferometer”, OFC 2010, Tech. Dig. OMT5, San Diego, USA, 2010
8. M. Bougioukos, D. Klondis, A. Maziotis, M. Spyropoulou, P. Gkroumas, D. Apostolopoulos, C. Kouloumentas, P. Bakopoulos, R. Harmon, D. Rogers, J. Harrison, A. Poustie, G. Maxwell, I. Tomkos, H. Avramopoulos, “Simultaneous Multi-Format Regeneration In A Large-Scale Photonic Integrated Circuit”, in Proc. ECOC 2011, We.10.P1.38, Geneva, Switzerland, Sept. 2011.
9. C. Stamatiadis, M. Bougioukos, A. Maziotis, P. Bakopoulos, L. Stampoulidis and H. Avramopoulos, “All-optical contention resolution using a single optical flipflop and two stage all-optical wavelength conversion” , OFC 2010, Tech. Dig. OThN5, San Diego, USA, 2010
10. H. Brahmi, M. Bougioukos, M. Menif, A. Maziotis, C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos and D. Erasme , “Experimental Demonstration of an All-Optical Packet Forwarding Gate Based on a Single SOA-MZI at 40 Gb/s”, OFC 2011, OSA Tech. Dig. OMK5, Los Angeles, CA, USA

11. B. Schrenk, C. Stamatiadis, I. Lazarou, A. Maziotis, G. de Valicourt, J.A. Lazaro, J. Prat and Hercules Avramopoulos, “On an ONU for Full-Duplex 10.5 Gbps/λ with Shared Delay Interferometer for Format Conversion and Chirp Filtering”, In Proc. OFC'11, Los Angeles, California (United States), Mar. 2011, OThB7
12. C. Stamatiadis, K. Vyrsokinos, L. Stampoulidis, A. Maziotis, Z. Sheng, D. Van Thourhout, J. Bolten, M. Karl, T. Wahlbrink, H. Avramopoulos, “All-optical wavelength conversion at 160Gb/s using an SOA and a 3rd order SOI nanowire periodic filter”, 2010 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, 7-11 Nov. 2010, Denver, Colorado, USA.
13. E. Kehayas, B. Schrenk, P. Bakopoulos, J.A. Lazaro, A. Maziotis, J. Prat and H. Avramopoulos, “All-optical carrier recovery with periodic optical filtering for wavelength reuse in RSOA-based colorless optical network units in full-duplex 10Gbps WDM-PONs”, OFC 2010, Tech. Dig. OWG4, San Diego, USA, 2010
14. M. Spyropoulou, M. Bougioukos, G. Giannoulis, C. Kouloumentas, D. Kalavrouziotis, A. Maziotis, P. Bakopoulos, R. Harmon, D. Rogers, J. Harrison, A. Poustie, G. Maxwell, and Hercules Avramopoulos, “Large-Scale Photonic Integrated Circuit for Multi-Format Regeneration and Wavelength Conversion”, OFC 2011, OSA Tech. Dig. OThY2, Los Angeles, CA, USA
15. C. Reis, P. Andre, R. Dionisio, B. Neto, A. Teixeira, A. Maziotis, C. Kouloumentas, C. Stamatiadis, M. Bougioukos, H. Avramopoulos, N. Calabretta, H.J.S Dorren, “Experimental evaluation of all-optical asynchronous and synchronous memories”, Computer Engineering Conference (ICENCO), 2010 International
16. B. Schrenk, J. Bauwelinck, M. Omella, E. Kehayas, P. Bakopoulos, A. Maziotis, C. Kazmierski, D. Klondis, X. Qiu, J. Prat, I. Tomkos, H. Avramopoulos and J. A. Lazaro, “User-Terminal Subsystems of Next-Generation Access Networks: Trends and Challenges”, Access Networks and In-house Communications (ANIC), Karlsruhe, Germany, 21-24 June 2010, Next Generation Access Networks (AWA4)
17. C. Kouloumentas, M. Bougioukos, M. Spyropoulou, D. Klondis, G. Giannoulis, D. Kalavrouziotis, A. Maziotis, P. Gkroumas, D. Apostolopoulos, P. Bakopoulos, A. Poustie, G. Maxwell, K.O. Velthaus, R. Kaiser, L. Moerl, I. Tomkos, H. Avramopoulos, “Agile photonic integrated systems-on-chip enabling WDM terabit networks”, in Proc. ICTON 2011, Stockholm, Sweden, Jun. 2011, Tu.C6.7.
18. J. Bauwelinck, C. Antony, F. Bonada, A. Caballero, S. Chatzi, A. M. Clarke, L. N. Costa, M. Forzati, J. A. Lazaro, A. Maziotis, M. Mestre, I. T. Monroy, P. Ossieur, V. Polo, J. Prat, X.-Z. Qiu, P.-J. Rigole, B. Schrenk, R. Soila, A. Teixeira, I. Tomkos, P. D. Townsend, X. Yin, and H. Avramopoulos, “Optical Line Terminal and Remote Node Sub-Systems of Next-Generation Access Networks”, Access Networks and In-house Communications (ANIC), Karlsruhe, Germany, 21-24 June 2010, Next Generation Access Networks (AWA5)
19. P. Bakopoulos, P. Zakynthinos, E. Kehayas, L. Stampoulidis, F. Fresi, C. Porzi, N. Calabretta, Ch. Kouloumentas, D. Petrantonakis, A. Maziotis, C.

Stamatiadis, D. Apostolopoulos, M. Guina, D. Klonidis, L. Potì, E. Tangdionga, A. Poustie, G. Maxwell, I. Tomkos, A. Bogoni, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, "160 Gb/s All-Optical Contention Resolution with Prioritization using Integrated Photonic Components", ECOC 2009, 20-24 September, 2009, Vienna, Austria Paper 6.3.5

Λίστα Συντμήσεων

Ακρωνύμιο	Περιγραφή
AOFF	All-Optical Flip-Flop
AON	Active Optical Network
APD	Avalanche Photodiode
ASK	Amplitude Shift Keying
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BER	Bit Error Rate
BNF	Broadband Noise Filter
BPF	Band Pass Filter
BS	Base Station
CAPEX	Capital Expenditures
CO	Central Office
CW	Continuous Wave
DCA	Dynamic Capacity Allocation
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DFB	Distributed Feedback
DI	Delay Interferometer
(D)WDM	(Dense) Wavelength Division Multiplexing
EAM	Electro-Absorption Modulator
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EMI	Electro-Magnetic Interference
ER	Extinction Ratio
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transformation
FPF	Fabry - Pérot Filter
FSK	Frequency Shift Keying
FSM	Finite State Machines
FSR	Free Spectral Range
FTTx	Fiber-to-the-x
HDTV	High Definition TV
LAN	Local Area Network
LPF	Low Pass Filter
MAC	Medium Access Control
MEC	Moving Extended Cells
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Switch
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
MZM	Mach-Zehnder Modulator
NF	Noise Figure
NN	Network Node
(N)RZ	(Non)- Return to Zero
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
(O)BPF	(Optical) BandPass Filter
ODN	Optical Distribution Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

συνέχεια στην επόμενη σελίδα

συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα

Ακρωνύμιο	Περιγραφή
OFM	Optical Frequency Multiplication
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
OOK	On-Off Keying
OPEX	Operational Expenditures
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio
OSRR	Optical Signal-to-RB Ratio
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PED	Packet Envelope Detection
(P)IC	(Photonic) Integrated Circuit
PON	Passive Optical Network
PPG	Pulse Pattern Generator
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence
PSK	Phase Shift Keying
PTP	Point-To-Point
PTMP	Point-To-Multi-Point
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RAP	Radio Access Point
RAU	Remote Antenna Unit
RB	Rayleigh Backscattering
RF	Radio Frequency
RN	Remote Node
RoF	Radio-over-Fiber
RS	Reed-Solomon
(R)SOA	(Reflective) Semiconductor Optical Amplifier
SMSR	Side Mode Suppression Ratio
SSB	Single-Side Band
(S)SMF	(Standard) Single Mode Fiber
TDM	Time Division Multiplexing
TIA	Transimpedance Amplifier
UDWDM	Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing
VDSL	Very high speed Digital Subscriber Line
(V)LSI	(Very) Large-Scale Integrated Circuit
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XPM	Cross-Phase Modulation

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Χωρητικότητα δικτύου πρόσβασης ανά εφαρμογή και τεχνολογία [1.4]. ...25	25
Εικόνα 2: Διακίνηση δεδομένων στο διαδίκτυο παγκοσμίως [1.17].27	27
Εικόνα 3: Συνδεδεμένα νοικοκυριά σε δίκτυα FTTH/FTTB στην Ευρώπη και πρόβλεψη για το μέλλον [1.24].29	29
Εικόνα 4: Πρόσφατα και μελλοντικά ποσοστά διείσδυσης του FTTx παγκοσμίως [1.25].29	29
Εικόνα 5: Διαφορετικοί τύποι FTTx.....31	31
Εικόνα 6: Τοπολογία σημείου-προς-σημείο.39	39
Εικόνα 7: Τοπολογία σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία.41	41
Εικόνα 8: Τεχνική πολυπλεξίας TDM.42	42
Εικόνα 9: Τεχνική πολυπλεξίας WDM.44	44
Εικόνα 10: Υβριδική αρχιτεκτονική WDM/TDM.45	45
Εικόνα 11: Ασύρματη σύνδεση σε FTTx δίκτυο.48	48
Εικόνα 12: Εξέλιξη προτύπων δικτύων πρόσβασης.49	49
Εικόνα 13: Κατανομή μηκών κύματος στα πρότυπα (DS: downstream, US: upstream).50	50
Εικόνα 14: Το φίλτρο Fabry-Pérot.....66	66
Εικόνα 15: Συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου Fabry-Pérot για διαφορετικές τιμές λεπτότητας.69	69
Εικόνα 16: Τεχνικές καταπίεσης διαμόρφωσης του συρρευματικού σήματος βασισμένες σε (α) κορεσμό οπτικού κέρδους του ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή (SOA), (β) feed forward injection και (γ) παθητικό οπτικό κύκλωμα φιλτραρίσματος. Τα ένθετα δεξιά δείχνουν τις ανακτημένες οπτικές φέρουσες στο χρόνο, για τις οποίες τα βέλη υποδηλώνουν το επίπεδο αναφοράς. (δ) WDM λειτουργία της αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας με φίλτρο Fabry-Pérot. Οι περιοδικές κορυφές του φίλτρου (γραμμές με κουκίδες) συμπίπτουν με το πλέγμα μηκών κύματος του συρρευματικού σήματος.74	74
Εικόνα 17: Πειραματική διάταξη αξιολόγησης τεχνικών ανάκτησης φέρουσας.79	79
Εικόνα 18: Οπτικό φάσμα κέρδους και ηλεκτρο-οπτικής απόκρισης του ανακλαστικού ημιαγωγίμου οπτικού ενισχυτή (RSOA) για ισχύ εισόδου -10 dBm.81	81
Εικόνα 19: Αποτελεσματικότητα καταπίεσης του λόγου διακύμανσης του δυφίου '1' του σήματος ως συνάρτηση του λόγου σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος. Συνεχόμενες και διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν σε PRBS μήκους $2^{31}-1$ και 2^7-1 , αντίστοιχα. Η τιμές που σημειώνονται αντιστοιχούν στις μεγάλες PRBS.82	82
Εικόνα 20: α) Ανακτημένη οπτική φέρουσα στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) με φίλτρο Fabry-Pérot, για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος 9 dB. Τα βελάκια από δεξιά απεικονίζουν το επίπεδο αναφοράς του PIN δέκτη. (β) Διαγράμματα οφθαλμού του αντιρρευματικού σήματος για τις δύο υλοποιήσεις της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) και διαφορετικούς λόγους σβέσης (ER).83	83

Εικόνα 21: Επίδοση ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) για (α) το συρρευματικό και (β) το αντιρρευματικό σήμα συμπεριλαμβάνοντας την τεχνική ανάκτησης φέρουσας <i>feed-forward</i> και (γ) την αμιγώς οπτική.....	84
Εικόνα 22 Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) του αντιρρευματικού σήματος για (α) PRBS $2^{31}-1$ και διαφορετικούς λόγους σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος, και (β) για δεδομένο λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος και διαφορετικά μήκη PRBS.....	86
Εικόνα 23: Ανακτημένη οπτική φέρουσα μετά το φίλτρο <i>Fabry-Pérot</i> για την περίπτωση των μέγιστων συνεχόμενων δυφίων '0' στα PRBS δεδομένα.	86
Εικόνα 24: Ευαισθησία λήψης του αντιρρευματικού σήματος για ρυθμό εμφάνισης λαθών (BER) επιπέδου 10^{-9} ως συνάρτηση του λόγου σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος και του μήκους της PRBS. Η σκοτεινή περιοχή πάνω δεξιά δείχνει την περιοχή όπου το όριο λαθών είναι πιο ψηλά από 10^{-9}	88
Εικόνα 25: Ρυθμός εμφάνισης λαθών (BER) του αντιρρευματικού σήματος για διαφορετικά μήκη κύματος του συρρευματικού σήματος και αντίστοιχο φάσμα ευαισθησίας λήψης για ρυθμό εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-9}	88
Εικόνα 26: Ρυθμός εμφάνισης λαθών (BER) του αντιρρευματικού σήματος για PRBS $2^{11}-1$ και λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος 9 dB για διαφορετικά εύρη ζώνης του φίλτρου <i>Fabry-Pérot</i>	90
Εικόνα 27: (α) Απώλειες του φίλτρου <i>Fabry-Pérot</i> και (β) φάσματα του συρρευματικού σήματος και της ανακτηθείσας φέρουσας, των οποίων η οπτική ισχύς είναι κανονικοποιημένη με βάση τη μέγιστη τιμή.....	90
Εικόνα 28: Εργαστηριακή απεικόνιση της πειραματικής διάταξης στο Πολυτεχνείο της Καταλονίας.	91
Εικόνα 29: Πειραματική διάταξη αξιολόγησης της τεχνικής αμιγώς οπτικής ανάκτησης φέρουσας σε WDM-PON, αμφίδρομης μετάδοσης δεδομένων 10 Gb/s, σε ένα μήκος κύματος.....	92
Εικόνα 30: Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) για το συρρευματικό σήμα με PRBS $2^{31}-1$, για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος από 0 έως >10 dB.	94
Εικόνα 31: Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) για το αντιρρευματικό σήμα, για λόγο σβέσης (ER) του συρρευματικού σήματος από 0 έως 9 dB. Οι συνεχόμενες γραμμές απεικονίζουν τη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) με αμιγώς οπτική καταπίεση συρρευματικού σήματος (φίλτρο <i>Fabry-Pérot</i>), ενώ οι διακεκομμένες δείχνουν την απλή σχεδίαση της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU). Τα γεμισμένα σημεία αντιστοιχούν σε PRBS 2^7-1 , ενώ τα κενά, σε PRBS $2^{31}-1$	95
Εικόνα 32: (α) Ποινές ισχύος λήψης σε σύγκριση με λόγο σβέσης (ER) 13 dB στο συρρευματικό σήμα και 0 dB στο αντιρρευματικό σήμα (ιδανική περίπτωση), (β) Διαφορές ισχύος με και χωρίς εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC).	95
Εικόνα 33: Εργαστηριακή απεικόνιση του πειράματος στο Πολυτεχνείο της Καταλονίας.....	98

Εικόνα 34: Πειραματική διάταξη για το πλήρως αμφίδρομο, 10/10 και 20/10 Gb/s WDM-PON.....	100
Εικόνα 35: Καμπύλη ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER) του chirped ASK συρρευματικού σήματος, για μήκος δικτύου 25 χλμ.	102
Εικόνα 36: Διαγράμματα οφθαλμού του συρρευματικού σήματος, διαμορφωμένου με (α) Mach-Zehnder διαμορφωτή και (β) ηλεκτροαπορροφητικό διαμορφωτή.....	102
Εικόνα 37: Λήψη αντιρρευματικού σήματος, για chirped συρρευματικό σήμα διαφορετικών λόγων σβέσης (ER).....	103
Εικόνα 38: Διαγράμματα οφθαλμού του αντιρρευματικού σήματος, για λόγο σβέσης του συρρευματικού σήματος (α) 0 dB και PRBS $2^{31}-1$, (β) 6dB και PRBS 2^7-1 , (γ) 6dB και PRBS $2^{31}-1$, (δ) 9dB και PRBS 2^7-1 , (ε) 9dB και PRBS $2^{31}-1$, (στ) 10,5 dB και PRBS 2^7-1 και (ζ) 10,5 dB και PRBS $2^{31}-1$	104
Εικόνα 39: Σύγκριση καμπυλών ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων για το αντιρρευματικό σήμα, στην περίπτωση όπου chirped ή μη-chirped συρρευματικό σήμα χρησιμοποιείται ως είσοδος στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU).	105
Εικόνα 40: Διαγράμματα οφθαλμού του αντιρρευματικού σήματος για συρρευματικό σήμα (α) διαμορφωμένο με Mach-Zehnder διαμορφωτή και PRBS 2^7-1 , (β) διαμορφωμένο με ηλεκτροαπορροφητικό διαμορφωτή και PRBS 2^7-1 , (γ) διαμορφωμένο με Mach Zehnder διαμορφωτή και PRBS $2^{31}-1$ και (δ) διαμορφωμένο με ηλεκτροαπορροφητικό διαμορφωτή και PRBS $2^{31}-1$	106
Εικόνα 41: Καμπύλη ρυθμού σφαλμάτων του chirped 4-PAM συρρευματικού σήματος.....	107
Εικόνα 42: Ελάχιστη τιμή ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων (BER), για ισολογισμό απωλειών 20 dB και διαφορετικό μήκος δικτύου.	108
Εικόνα 43: Διαγράμματα οφθαλμού 4-PAM, για μήκος δικτύου (α) 0 χλμ, (β) 6 χλμ και (γ) 11 χλμ.....	109
Εικόνα 44: Ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων για το αντιρρευματικό σήμα, στην περίπτωση όπου chirped 4-PAM ή OFDM χρησιμοποιείται ως συρρευματικό σήμα.	110
Εικόνα 45: Χρονικά ίχνη της μετάδοσης πολλαπλών σταθμών (α) 4PAM και (β) OFDM. Ανακτημένο οπτικό σήμα συνεχούς κύματος (CW) μετά την ακύρωση της συρρευματικής (γ) 4-PAM και (δ) OFDM διαμόρφωσης. Διαγράμματα οφθαλμού του αντιρρευματικού σήματος που προέκυψαν από επαναδιαμόρφωση (ε) 4-PAM και (στ) OFDM συρρευματικού σήματος.	111
Εικόνα 46: Λειτουργία ενός κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού στο πεδίο του χρόνου.	122
Εικόνα 47: Λειτουργία ενός κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού στο πεδίο της συχνότητας.....	123
Εικόνα 48: Φίλτρο Fabry-Pérot.	124
Εικόνα 49: Σχεδίαση μονάδας οπτικού δικτύου (ONU), που βασίζεται στην επαναδιαμόρφωση του ανακτημένου ρολογιού από τη μετάδοση του	

συρρευματικού σήματος, σε δίκτυα πρόσβασης και φάσματα σημάτων στη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU), με την οπτική τους ισχύ να είναι κανονικοποιημένη στη μέγιστη τιμή ισχύος.	126
Εικόνα 50 Πειραματική διάταξη επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος μέσω οπτικής επαναδιαμόρφωσης ρολογιού με τη βοήθεια φίλτρου Fabry-Pérot.....	127
Εικόνα 51: Εργαστηριακή διάταξη ανάκτησης ρολογιού που υλοποιήθηκε στο ΕΦΕ, για επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος σε παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης.	128
Εικόνα 52: Διαγράμματα οφθαλμού και ακολουθίας δεδομένων του ανακτημένου ρολογιού. Τα βελάκια δείχνουν το σημείο της ακολουθίας με τα περισσότερα συνεχόμενα δυφία '0' εντός της ακολουθίας δεδομένων.	129
Εικόνα 53: Φάσματα σημάτων στη μονάδα οπτικού δικτύου μετά από 50 χλμ μετάδοση. α) Συρρευματικό σήμα, β) μετά το φίλτρο Fabry-Pérot, γ) μετά τον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή και δ) αντιρρευματικό σήμα.	130
Εικόνα 54: Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) αντιρρευματικού σήματος, χωρίς μετάδοση σε οπτική ίνα (back-to-back), για (α) NRZ διαμόρφωση με είσοδο ιδανικού οπτικού σήματος συνεχούς κύματος (CW), (β) μετάδοση RZ συρρευματικού σήματος και επαναδιαμόρφωση του ανακτημένου ρολογιού.	131
Εικόνα 55: Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) για μετάδοση σε οπτική ίνα διαφορετικού μήκους (α) του συρρευματικού σήματος (γεμισμένα και κενά σημεία απεικονίζουν PRBS μήκους $2^{31}-1$ και 2^7-1 , αντίστοιχα), και (β) του αντιρρευματικού σήματος.	132
Εικόνα 56: Ευαισθησία λήψης του αντιρρευματικού σήματος, χωρίς μετάδοση του (back-to-back), για διαφορετικές συχνότητες.	133
Εικόνα 57 Πειραματική διάταξη τεχνικής μετατόπισης μήκους κύματος.	134
Εικόνα 58: Εργαστηριακή διάταξη, που υλοποιήθηκε στο ΕΦΕ, της (α) μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) και (β) του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT).	135
Εικόνα 59: Οπτικά φάσματα που απεικονίζουν την εξέλιξη του RZ συρρευματικού σήματος, που μετατρέπεται σε μετατοπισμένο στο μήκος κύματος αντιρρευματικό σήμα και αντίστοιχα διαγράμματα οφθαλμού.	138
Εικόνα 60: Επίδραση του φιλτραρίσματος της οπισθοσκέδασης Rayleigh στα αντιρρευματικά σήματα στο δέκτη του τερματικού οπτικών γραμμών (OLT), για διαφορετικές μετατοπίσεις μήκους κύματος, οι οποίες αντιστοιχούν: στο μήκος κύματος της φέρουσας (πρώτη γραμμή), στη πρώτη αρμονική (δεύτερη γραμμή) και στη δεύτερη αρμονική (τρίτη γραμμή).	139
Εικόνα 61: (α) Προκύπτων SMSR και απώλεια φιλτραρίσματος μετά την εξαγωγή της φέρουσας του αντιρρευματικού σήματος στη μονάδα οπτικού δικτύου. Μετρήσεις ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) για (β) το RZ συρρευματικό σήμα και (γ) το αντιρρευματικό σήμα. (δ) Ποινή ισχύος λήψης ως συνάρτηση του OSRR για το ληφθέν αντιρρευματικό σήμα. Τα γεμισμένα σημεία αντικατοπτρίζουν ρυθμό	

εμφάνισης λαθών (BER) τάξεως 10^{-9} , ενώ τα κενά σημεία αντιστοιχούν στο επίπεδο ρυθμού εμφάνισης λαθών (BER) 10^{-4}	140
Εικόνα 62: Αρχιτεκτονική δικτύου, σχεδίαση των κόμβων του δικτύου και κατανομή των μηκών κύματος.	147
Εικόνα 63: Δομή λέιζερ τύπου κατανεμημένης ανάδρασης (DFB).....	148
Εικόνα 64: Ρυθμιζόμενο μήκος κύματος εκπομπής του λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης.....	149
Εικόνα 65: Σταθερότητα εκπομπής μήκους κύματος και ισχύος εξόδου του λέιζερ στο χρόνο.	149
Εικόνα 66: Πειραματική διάταξη της μεταγωγής πακέτων σε ένα κόμβο δικτύου πρόσβασης.....	151
Εικόνα 67: Ίχνη στο χρόνο: (Α) στην έξοδο της μονάδας οπτικού δικτύου, (Β) μετά την ανάκτηση περιβάλλουσας του πακέτου, και (Γ) του πακέτου μήκους κύματος λ_1 που αφαιρείται, ενώ το πακέτο μήκους κύματος λ_2 καταπιέζεται.	152
Εικόνα 68: Φάσματα σημάτων μετά τον πομπό της μονάδας οπτικού δικτύου (πάνω), τον ανιχνευτή περιβάλλουσας (μέση) και το διακόπτη SOA-MZI (κάτω).	155
Εικόνα 69: Ρυθμός σφαλμάτων κατά τη διαδικασία μεταγωγής στον κόμβο του δικτύου.....	156
Εικόνα 70: Ρυθμός σφαλμάτων αναλόγως των απωλειών οπτικής ισχύος στο δέντρο και του σηματοθορυβικού λόγου (OSNR) του σήματος στην είσοδο του κόμβου του δικτύου.....	157
Εικόνα 71: Προσομοιωμένη υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου (OSNR), λόγω πολλαπλών περασμάτων (M) από τους κόμβους του δικτύου.	158
Εικόνα 72: Βελτιστοποίηση λειτουργίας του διακόπτη SOA-MZI, μέσω παρακολούθησης της ισχύος. Η τιμή ισχύος είναι κανονικοποιημένη στην μέγιστη τιμή της.	159
Εικόνα 73: Λόγος πακέτων που προωθούνται και απορρίπτονται, σε συνάρτηση με τη ρύθμιση του διακόπτη SOA-MZI.	160
Εικόνα 74: Πειραματική διάταξη οπτικού ασύγχρονου S-R μανταλωτή.	163
Εικόνα 75: Ίχνη σήματος στο χρόνο για τον ασύγχρονο S-R μανταλωτή: α) σήμα set, β) σήμα reset, γ) έξοδος του μανταλωτή.	164
Εικόνα 76: Πειραματική διάταξη σύγχρονου S-R flip-flop.	165
Εικόνα 77: Ίχνη στο χρόνο που προέκυψαν από το σύγχρονο S-R flip-flop: α) σήμα ρολογιού, β) σήμα reset, γ) έξοδος πύλης AND για εισόδους τα σήματα set και ρολογιού, δ) έξοδος πύλης AND για εισόδους τα σήματα reset και ρολογιού και ε) έξοδος του flip-flop.	166
Εικόνα 78: Πειραματική διάταξη του σύγχρονου D flip-flop.	168
Εικόνα 79: Ίχνη των σημάτων στο χρόνο, σε διαφορετικά σημεία της διάταξης.....	169
Εικόνα 80: Glimmerglass 48x48 μικρο-ηλεκτρο-μηχανικός διακόπτης (MEMS).....	180
Εικόνα 81: Λογισμικό διεπαφής του μικρο-ηλεκτρο-μηχανικού διακόπτη (MEMS).	180

Εικόνα 82: Σχηματική αναπαράσταση της ιδέας των εκτεταμένων κελιών με το χρήστη (α) να βρίσκεται στο κελί #1, (β) να εισέρχεται στο κελί #4. (γ) Πειραματική διάταξη.....	183
Εικόνα 83: Ίχνη στο χρόνο του προβιβασμένου (up converted) σήματος (α) μετά τον οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου και (β) μετά το στάδιο της αποπολυπλεξίας.	184
Εικόνα 84: Διαγράμματα οφθαλμού του προβιβασμένου σήματος (α) μετά τον οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου και (β) μετά το στάδιο της αποπολυπλεξίας.	185
Εικόνα 85: Διαγράμματα οφθαλμού σήματος βασικής ζώνης (α) μετά τον οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου και (β) μετά το στάδιο της αποπολυπλεξίας.	185
Εικόνα 86: Φάσμα του σήματος πριν την είσοδο στη συστοιχία φραγμάτων περίθλασης, όταν ο χρήστης βρίσκεται στο κελί #1.....	186
Εικόνα 87: Διαγράμματα οφθαλμού (α) του αρχικού προβιβασμένου σήματος (upconverted) του καναλιού #3, όταν το κανάλι #6 είναι απενεργοποιημένο και (β) αντίστοιχο διάγραμμα βασικής ζώνης.....	186
Εικόνα 88: Διαγράμματα οφθαλμού μετά από μετάδοση (α) του προβιβασμένου (upconverted) σήματος του καναλιού #3, όταν το κανάλι #6 είναι απενεργοποιημένο και (β) αντίστοιχο διάγραμμα βασικής ζώνης.	187
Εικόνα 89: Φάσμα του σήματος πριν τη συστοιχία φραγμάτων περίθλασης, όταν ο χρήστης βρίσκεται στο κελί #4.	187
Εικόνα 90: Διάγραμμα οφθαλμού (α) μετά τον οπτικό ενισχυτή ίνας ερβίου του προβιβασμένου (upconverted) σήματος του καναλιού #6, όταν το κανάλι #3 είναι απενεργοποιημένο και (β) αντίστοιχο διάγραμμα βασικής ζώνης.	188
Εικόνα 91: Διάγραμμα οφθαλμού του προβιβασμένου (upconverted) σήματος, (α) μετά από μετάδοση σε 25 χλμ οπτικής ίνας και (β) το αντίστοιχο διάγραμμα βασικής ζώνης.	188
Εικόνα 92: Μετρήσεις ρυθμού σφαλμάτων.	189
Εικόνα 93: Πειραματική διάταξη για αξιολόγηση της επίδοσης μετάδοσης δύο PSK υποφερουσών.....	191
Εικόνα 94: Ηλεκτρικό φάσμα μετά από προβιβασμό συχνότητας των δύο σημάτων και συνδυασμό τους.	192
Εικόνα 95: Ηλεκτρικό φάσμα σήματος μετά το δέκτη.	193
Εικόνα 96: Ηλεκτρικό φάσμα σήματος μετά το κατωπερατό φίλτρο.	193
Εικόνα 97: Καμπύλες ρυθμού σφαλμάτων για περίπτωση χωρίς (Back-to-Back) αλλά και με μετάδοση σε οπτική ίνα μήκους 25 χλμ, για μία υπο-φέρουσα παρούσα και πολυπλεξία δύο υποφερουσών.....	194
Εικόνα 98: Διαγράμματα οφθαλμού για 25 χλμ μετάδοση, (α) για περίπτωση μετάδοσης μίας υπο-φέρουσας, (β) για πολυπλεξία δύο υπο-φερουσών και (γ), (δ), αντίστοιχα αποδιαμορφωμένα ηλεκτρικά σήματα.	195
Εικόνα 99: Άξονες έρευνας στο πλαίσιο της διατριβής.....	200

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Τυπικοί χρόνοι λήψης (<i>download</i>) και μεταφόρτωσης (<i>upload</i>) αρχείων εικόνας και ήχου για διαφορετικούς τύπους σύνδεσης του χρήστη στο διαδίκτυο [1.4].	21
Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά τεχνικών πολυπλεξίας σε οπτικά δίκτυα πρόσβασης.	47
Πίνακας 3: Βασικά χαρακτηριστικά των προτύπων των οπτικών δικτύων πρόσβασης.	51
Πίνακας 4: Βέλτιστος λόγος σβέσης (<i>ER</i>) του συρρευματικού σήματος και αντίστοιχες διαφορές ισχύος.	93
Πίνακας 5: Ισολογισμός απωλειών για <i>ASK</i> και <i>4-PAM</i> με επαναδιαμόρφωση σε <i>WDM-PON</i>	101
Πίνακας 6: Πίνακας αληθείας του <i>S-R</i> μανταλωτή.	163
Πίνακας 7: Πίνακας αληθείας του σύγχρονου <i>D flip-flop</i>	168
Πίνακας 8: Σύγκριση ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους μονάδων μνήμης.	170

