



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

ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΟΠΤΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Λεόντιος Α. Σταμπουλίδης

Αθήνα, Ιούνιος 2009



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

ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΟΠΤΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Λεόντιος Α. Σταμπουλίδης

Συμβουλευτική Επιτροπή: Ηρακλής Αβραμόπουλος
Ιάκωβος Βενιέρης
Νικόλαος Ουζούνογλου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Ιουνίου 2009.

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

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

.....
Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

.....
Νικόλαος Πλέρος
Λέκτορας Α.Π.Θ.

Αθήνα, Ιούνιος 2009

.....
Λεόντιος Α. Σταμπουλίδης

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

Copyright Λεόντιος Α. Σταμπουλίδης, 2009.

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.

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Μυστήριο πράμα αυτά τα ρημάδια τα photonics. Ειδικά όταν πρόκειται να είσαι κλεισμένος επί εικοσιτετράωρα σε ένα δωμάτιο και να κάνεις πείραμα παρέα με SOAs, οπτικά flip-flops, οπτικές πύλες και άλλα περίεργα πλάσματα του φωτονικού οικοσυστήματος, πρέπει να είσαι ψυχολογικά (και σωματικά) έτοιμος για όλα. Κι αυτή βέβαια είναι όλη η ομορφιά των photonics... πώς να το πω, αααα ναι... λοιπόν:

“Η ομορφιά των photonics είναι σαν την ομορφιά του ποδοσφαίρου”. Αυτό είναι. Πώς γίνεται; Φανταστείτε κάπως έτσι...

Φανταστείτε λοιπόν ότι είστε προπονητής της Manchester United και αντιμετωπίζετε την ερασιτεχνική Rushden&Diamonds στο Old Trafford, για τον πρώτο γύρο του κυπέλλου Αγγλίας. Η ομάδα είναι πλήρης: Christiano Ronaldo, Tevez, Rooney, Scholes, Giggs, Ferdinand, όλοι είναι στη διάθεση του προπονητή και ο κόσμος πανέτοιμος για αυτό που αποκαλούν οι Άγγλοι “an entertaining football evening”. «Κρίμα στους αντιπάλους», ψιθυρίζουν όλοι στις κερκίδες και περιμένουν με αγωνία να δουν αν η αγαπημένη τους United θα καταφέρει κόντρα στο θηρίο που λέγεται Rushden να σπάσει το ρεκόρ των 23 γκολ που κρατάει από το '56 σε έναν παρόμοιο αγώνα κατά της Stoke City. Άλλωστε ποιος την υπολογίζει την άμοιρη τη Rusden; 10 χρόνια τώρα παλεύει να ανέβει από την τέταρτη κατηγορία, ενώ ο πιο διάσημος ποδοσφαιριστής στο ρόστερ είναι ο παγκοσμίως άγνωστος (και σχολικός τροχονόμος στο επάγγελμα) Mickey Quinn, ο οποίος όταν σπριντάρει είναι λίγο πιο αργός από ιπποπόταμο σε κατάσταση εγκυμοσύνης. Ξεκινάει λοιπόν ο αγών και η θρυλική United αντί να σπάσει το ρεκόρ γκολ, σπάει τα δοκάρια. 10 δοκάρια στο πρώτο ημίχρονο και 0-0 για τα πρώτα 45 λεπτά. Από τις περιπτώσεις που λέμε ότι ο Θεός όχι μόνο κοιμήθηκε, αλλά άφησε και το τηλέφωνο ανοιχτό για να μην τον ενοχλήσει κανείς...

Τι κάνετε λοιπόν σαν καλός κόουτς; Ενισχύετε την επίθεση με τρίτο striker και.. «Full επίθεση lads να τους λιώσουμε, μόλις φάνε το πρώτο θα σπάσουν». Έλα όμως που ο χρόνος περνάει και οι “lads” δε λένε να σκοράρουν. Ο τερματοφύλακας της Rushden

(αλκοολικός και συνομήλικος του Mick Jagger) – Nial McKeown – ο οποίος σε full φόρμα δεν μπορούσε να πιάσει ούτε βαλσαμωμένο πουλί, κάνει στο δεύτερο ημίχρονο το παιχνίδι της ζωής του. Και φτάνουμε στο 90'... Κόρνερ η United και όλοι μπροστά για γκολ μπας και αποφύγουμε την ντροπή. Ο McKeown κάνει έξοδο και με ό,τι δυνάμεις του έχουν απομείνει από την υπερκατανάλωση αλκοόλ, ρίχνει μία δυνατή σφαλίára στην μπάλα. Αυτή καταλήγει στον ξεχασμένο από όλους (πιθανότατα και από τον ίδιο το Θεό) Mickey Quinn, ο οποίος ξεκινά την κούρσα της ζωής του προς τα αντίπαλα καρέ. Ο κακομοίρης ο Mickey φτάνει ασθμαίνοντας απέναντι στο Van der Sar, σουτάρει και πέφτει κάτω λιπόθυμος. Ο τερματοφύλακας αποκρούει αλλά η μπάλα γκελάρει πάνω στην υπερμεγέθη κοιλιά του αναίσθητου Quinn και καταλήγει στα δίχτυα. Manchester United – Rushden & Diamonds 0-1. Η απόλυτη ταπείνωση...

Φανταστείτε λοιπόν κάτι ανάλογο στα φωτονικά. Έχεις την κατάλληλη ιδέα, η οποία φαίνεται ότι θα παίξει με την πρώτη - είσαι δηλαδή το απόλυτο φαβορί. Τι χρειάζεσαι άλλωστε; Ένα Fabry-Pérot φίλτρο, κάνα-δυο controllers και μία οπτική πύλη – απλά πράγματα. Σαν καλός κόουτς στήνεις τη διάταξη. “Η ομάδα πλήρης”: BERT 40άρης, παλμογράφος 70 GHz, spectrum analyzer, όλα τα “αστέρια” στη διάθεση σας και... «πάμε να τους λιώσουμε lads». Και εκεί που όλα δείχνουν ότι πας “για ρεκόρ γκολ”, φτάνεις στο Mach-Zehnder... Του βάζεις input, του βάζεις και data για control αλλά τζίφος... Τι push-pull, τι counter CW, τι τσίτα τα ρεύματα, τα έχεις δοκιμάσει όλα, αλλά συνέχεια “η μπάλα στο δοκάρι” - ο SOA δε λέει να λυγίσει και το πείραμα πάει κατά διαόλου. Αποκαμωμένος, σταματάς για ημίχρονο και αποσύρεσαι στο γραφείο του Ηρακλή, στο ναό της αυτοσυγκέντρωσης, στο χώρο όπου όλα τα προβλήματα βρίσκουν τη λύση τους. Ο στρατηγός δίνει οδηγίες για “full επίθεση”. Βομβαρδισμός του SOA μέχρι να σπάσει. Έτοιμος για το δεύτερο ημίχρονο. Ρίχνεις στο SOA οπτική ισχύ λίγο μεγαλύτερη από αυτή που εκπέμπει ο ήλιος και... “τα gain στον πάτο”. Τίποτα όμως. Είναι φανερό ότι η ομάδα δεν είναι στη μέρα της, ο SOA αποδεικνύεται πολύ σκληρός για να πεθάνει (σαν τον τερματοφύλακα McKeown) και εσύ καταλήγεις στις 5:00 το πρωί να τρως το σουβλάκι της παρηγοριάς στον «Κουκ», κάπου κοντά στα σύνορα Ζωγράφου με Παγκράτι. Ταπείνωση...

Με την ίδια ευκολία όμως μπορεί να βρεθείς και στην αντίπερα όχθη, στη θέση του προπονητή της Rushden & Diamonds. Να είσαι το απόλυτο αουτσάιντερ, να δουλεύεις δηλαδή σε ένα πείραμα τελείως hopeless και παρόλα αυτά - ως δια μαγείας – όλα τα κυκλώματα δουλεύουν ρολόι και τα αποτελέσματα ξεφουρνίζονται το ένα μετά το άλλο. Οι SOAs υποκύπτουν και στην πιο τρελή σου επιθυμία και από τον παλμογράφο ξεπηδούν παππάδες με εξαπτέρυγα και λιβανιστήρια. Ο BERT σταματάει να σφυρίζει λάθη και εσύ ουρλιάζεις “error-free!, error-free!” - και τότε είναι που σαν άλλος Mickey Quinn σκοράρεις σημαίνοντας το θρίαμβο. Αυτά που θα “παρακολουθήσετε” στις επόμενες σελίδες είναι βγαλμένα από τέτοιες μέρες (ή μάλλον νύχτες) θριάμβου. Νύχτες στις οποίες ο γέρο-Mickey Quinn με ανεπανάληπτα χατ-τρικ σκόρπιζε τον τρόμο στις αντίπαλες άμυνες, οδηγώντας επάξια την άσημη αλλά σκληροτράχηλη Rushden & Diamonds ως την κατάκτηση του PhD... εεεε.... συγγνώμη... του κυπέλλου Αγγλίας εννοούσα...

Καλή προβολή.

*Στη μητέρα μου Χρυσούλα, στον πατέρα μου Τάσο
και στην αδερφή μου Ευδοκία,*

Στα ανιψάκια μου Ανδρέα και Αναστάση,

Στο θείο Γιάννη,

Στη σύντροφο της ζωής μου Σταματία

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	12
ABSTRACT.....	13
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ.....	14
1. Το ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ Ο ΣΚΟΠΟΣ	15
1.1 ΤΟ IP ΚΑΤΑΚΤΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ (ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ)	15
1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΕΣ ΠΑΚΕΤΩΝ: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ, ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	17
1.3 CISCO CRS-1: Η ΠΙΟ ΠΡΟΗΓΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ	20
1.4 ΦΩΤΟΝΙΚΟΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΕΣ	23
1.5 ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ: ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ	27
1.5.1 Οπτοηλεκτρονικό chip Ανίχνευσης Περιβάλλουσας Οπτικών Πακέτων.....	27
1.5.2 Ολοκληρωμένος Μεταγωγέας Μήκους Κύματος – AWGR	28
1.5.3 Οπτικό chip προώθησης πακέτων	29
1.5.4 Μονολιθικά ολοκληρωμένος 2 x 8 ενεργός μεταγωγέας μήκους κύματος..	29
1.5.5 Υβριδικά ολοκληρωμένες συστοιχίες οπτικών διακοπών	30
1.6 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ: ΟΙ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΝΤΑΣΜΑ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ RAM	33
1.7 Ο ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	39
1.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	41
2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ	43
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
2.2. ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑΣ	44
2.3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ PED ΣΤΑ 10 Gb/s NRZ	46
2.3.1. Πλατφόρμα μοντελοποίησης	46
2.3.2. Αποτελέσματα ανίχνευσης περιβάλλουσας για ομόρροπη και αντίρροπη συνδεσμολογία	50
2.3.3. Αποτελέσματα χωρικής μεταγωγής με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου.....	53
2.3.4. Αποτελέσματα μετατροπής μήκους κύματος με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου	56

2.4.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ PED ΣΤΑ 40 Gb/s RZ	59
2.4.1.	Πλατφόρμα μοντελοποίησης	59
2.4.2.	Αποτελέσματα ανίχνευσης περιβάλλουσας για ομόρροπη και αντίρροπη συνδεσμολογία	61
2.4.3.	Αποτελέσματα χωρικής μεταγωγής με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου.....	64
2.4.4.	Αποτελέσματα μετατροπής μήκους κύματος με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου	66
2.5.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΙΞΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ PED.....	70
2.5.1.	Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα στα 10 Gb/s NRZ.....	70
2.5.2.	Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα στα 40 Gb/s RZ	74
2.6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	79
3.	ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ	80
3.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	80
3.2.	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ.....	81
3.3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΑ 10 Gb/s NRZ	82
3.3.1.	Επίλυση συγκρούσεων με εκτροπή πακέτων στο πεδίο του χώρου	82
3.3.2.	Επίλυση συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος.....	84
3.4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΑ 40 Gb/s RZ	89
3.4.1.	Επίλυση συγκρούσεων με εκτροπή πακέτων στο πεδίο του χώρου	89
3.4.2.	Επίλυση συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος.....	91
3.5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
3.6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96
4.	ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	97
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	97
4.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	98
4.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	101
4.3.1	Μηχανισμός οπτικής μανδάλωσης	101
4.3.1	Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα	102
4.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	106
4.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

5. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ ΣΕ ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΟΥΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΕΣ	108
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	108
5.2 Ο ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΗΣ LASAGNE	109
5.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ.....	113
5.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	118
5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	119
5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	122
5.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	124
 6. ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	125
6.1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	125
6.2. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	127
6.3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	131
 7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΓΚΡΙΤΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ,	133

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ερευνητικό έργο της παρούσας διατριβής είναι αφιερωμένο στην ανάπτυξη οπτικών κυκλωμάτων δρομολόγησης πληροφοριών, εστιάζοντας στο σύνθετο πρόβλημα των συγκρούσεων στους φωτονικούς δρομολογητές. Για την επίλυση του προβλήματος προτείνεται μία σειρά κυκλωμάτων για τη διαχείριση των συγκρούσεων οπτικών πακέτων σε όλα τα πιθανά πεδία: το πεδίο του μήκους κύματος, το πεδίο του χώρου και το πεδίο του χρόνου. Τα κυκλώματα μοντελοποιήθηκαν και υλοποιήθηκαν συνδυάζοντας υβριδικά ολοκληρωμένους οπτικούς διακόπτες, μετατροπείς μήκους κύματος και οπτικά στοιχεία μνήμης. Πρώτο κατά σειρά υλοποιήθηκε κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας συμβατό τόσο με 10 Gb/s όσο και με 40 Gb/s οπτικά πακέτα. Το κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με οπτικούς διακόπτες και μετατροπείς μήκους κύματος για την επίδειξη κυκλώματος επίλυσης της σύγκρουσης σύγχρονων οπτικών πακέτων στο πεδίο του χώρου και του μήκους κύματος. Επίσης σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα οπτικό κύκλωμα μεγάλης κλίμακας ικανό να δρομολογεί ασύγχρονα πακέτα μεταβλητού μήκους με αποφυγή συγκρούσεων. Το κύκλωμα περιλαμβάνει έναν πρωτότυπο μηχανισμό οπτικού μανδαλωτή και λειτουργεί σε First-in-first-out (FIFO) λογική. Τέλος σχεδιάστηκε και μοντελοποιήθηκε πρωτότυπο κύκλωμα ανίχνευσης συγκρούσεων και αποθήκευσης οπτικών πακέτων συμβατό με αμιγώς οπτικούς δρομολογητές. Το κύκλωμα περιλαμβάνει ένα οπτικά ελεγχόμενο σύστημα αποθήκευσης πακέτων αποτελούμενο από οπτικούς χωρικούς διακόπτες, πύλες AND και XOR καθώς και μία οπτική γραμμή καθυστέρησης.

Λέξεις κλειδιά

Οπτικά δίκτυα, φωτονικοί δρομολογητές, οπτική επεξεργασία σήματος, οπτικοί μανδαλωτές, οπτικοί διακόπτες, μετατροπή μήκους κύματος, επίλυση συγκρούσεων, μεταγωγή πακέτων, μνήμες γραμμών καθυστέρησης.

ABSTRACT

This PhD thesis is dedicated to the development of photonic routing systems and focuses on the issue of optical contention resolution. In order to address the contention resolution problem, this thesis proposes a number of optical systems capable to handle the congestion of optical packets in the time, wavelength and space domains. The subsystems were simulated and implemented using hybrid integrated all-optical switches, wavelength converters and optical flip-flops. The first subsystem that was demonstrated was a packet envelope detection circuit compatible with both 10 and 40 Gb/s optical packets. This circuit was used in combination with optical switches to demonstrate deflection and wavelength conversion-based contention resolution for synchronous optical packets. In addition, a large scale optical system capable to resolve the contention between bursty packets was designed and demonstrated experimentally. The circuit operates on a FIFO mode and incorporates an all-optical latching mechanism to sort out contenting packets avoiding burst segmentation. Finally, a novel optical buffering system compatible with all-optical routers was designed and simulated. The system incorporated an optically controlled optical buffer and involved optical AND and XOR logic operations to control the state of a recirculating optical buffer utilizing all-optical space switches.

Keywords

Optical networks, photonic routers, optical signal processing, optical flip-flops, optical switches, all-optical wavelength conversion, contention resolution, packet switching, fiber delay line buffers.

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

AOWC	All-optical wavelength converter	Αμιγώς οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Θόρυβος αυθόρμητης εκπομπής
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Συστοιχία φράγματος περίθλασης
BER	Bit Error Ratio	Ρυθμός σφαλμάτων
CRC	Contention Resolution Circuit	Κύκλωμα επίλυσης συγκρούσεων
CW	Continuous Wave	Συνεχές κύμα
DFB	Distributed Feedback Laser	Δίοδος κατανεμημένης ανάδρασης
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Ενισχυτής ίνας ερβίου
FDL	Fiber Delay Line	Γραμμή καθυστέρησης
FPF	Fabry-Pérot Filter	Φίλτρο Fabry-Pérot
FSR	Free Spectrum Region	Ελεύθερη φασματική περιοχή
LD	Laser Diode	Δίοδος λέιζερ
NRZ	Non-Return-to-Zero	Χωρίς επιστροφή στο μηδέν
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio	Οπτικός σηματοθορυβικός λόγος
PED	Packet Envelope Detection	ανίχνευση περιβάλλουσας οπτικών πακέτων
RZ	Return-to-Zero	Επιστροφή στο μηδέν
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	Ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής
SOA-MZI	Semiconductor Optical Amplifier Mach-Sender Interferometer	Συμβολόμετρο Mach-Zehnder

1. ΤΟ ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ Ο ΣΚΟΠΟΣ

«Έν ἀρχῇ ἦν ὁ router»

1.1 ΤΟ IP ΚΑΤΑΚΤΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ (ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ)

Θεωρείται πλέον φράση κλισέ η αναφορά σε «εκρηκτική» ή “exponential” αύξηση της κίνησης των δεδομένων στο Internet. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες η κίνηση στο Internet στις ΗΠΑ θα ξεπεράσει το 1 Pb/s μέχρι το 2012. Κατά βάση αυτή η αλματώδης αύξηση οφείλεται στην εξέλιξη και την επιτυχία του IP (Internet Protocol). Το IP αποτελεί έναν εξαιρετικό τρόπο για να ανταλλάξει κάποιος δεδομένα και λόγω της ευελιξίας και της απλότητας που προσφέρει, έχει αρχίσει να υιοθετείται από την τηλεπικοινωνιακή βιομηχανία και για άλλες υπηρεσίες. Οι φράσεις “voice-over-IP”, “video-over-IP”, “data-over-IP” δεν είναι καθόλου «μυστήριες» για τον πολύ κόσμο, τα ακρωνύμια “VoIP”, “IPTV” και “Triple-Play”, έχουν κάνει την εμφάνισή τους στις συσκευασίες εμπορικά διαθέσιμων προϊόντων και όλα αυτά υποδηλώνουν την εμφάνιση νέων εφαρμογών

καθώς και τη σύγκλιση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων σε μία κοινή IP πλατφόρμα. Οι νέες εφαρμογές έχουν επιφέρει σχεδόν το διπλασιασμό της τηλεπικοινωνιακής κίνησης ανά χρόνο και το ενδιαφέρον μετατοπίζεται στο αν ο διαθέσιμος τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός επαρκεί για να φέρει σε πέρας αυτό το βαρύ τηλεπικοινωνιακό φορτίο.

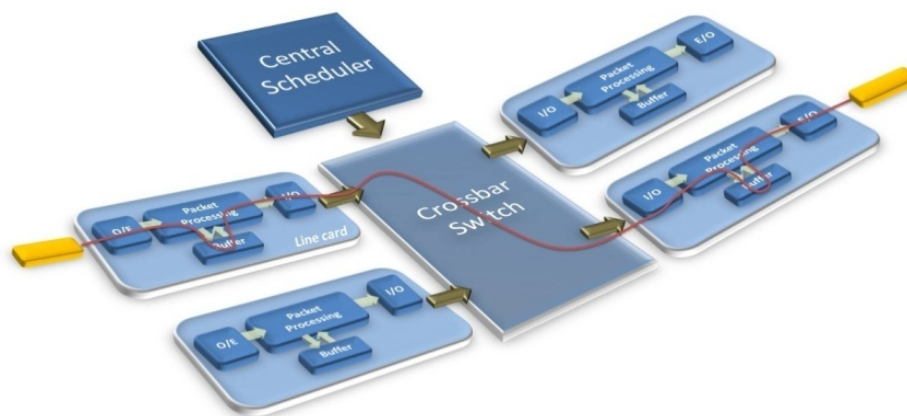
Η μεγάλη αύξηση της ζήτησης για χωρητικότητα στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή WDM τεχνολογίας, η οποία χρησιμοποιεί μεταγωγή κυκλώματος. Το σημερινό οπτικό δίκτυο περιλαμβάνει συστήματα πολυπλεξίας στο χρόνο (time-domain multiplexing – TDM) όπως π.χ. τα σύγχρονα δίκτυα SONET και SDH, τα οποία είναι υπεύθυνα για την παροχή των συνδέσεων επικοινωνίας μεταξύ των δρομολογητών (routers). Ο δρομολογητής αποτελεί την πιο σημαντική μηχανή μεταγωγής στο δίκτυο και στην περίπτωση των σύγχρονων δικτύων μεταγωγής κυκλώματος χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση της χρήσης αυτών των κυκλωμάτων επιτελώντας στατιστική πολυπλεξία. Παρόλα αυτά, η γρήγορη αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα δίκτυα επιφέρει προκλήσεις τόσο στα συστήματα μεταφοράς όσο και στα συστήματα μεταγωγής στο δίκτυο: και τα δύο πρέπει να μπορούν να αναβαθμίζονται γρήγορα σε μεγαλύτερες ταχύτητες χωρίς όμως να αυξάνεται δραματικά το μέγεθος και το κόστος. Επίσης, η εισαγωγή του IP (το οποίο βασίζεται εγγενώς στη μεταφορά δεδομένων με τη μορφή πακέτων) καθώς και η ανάγκη για μεγαλύτερη χρήση του δικτύου και των καναλιών επιβάλλουν τη μεταπήδηση από τη μεταγωγή κυκλώματος σε μεταγωγή πακέτου (packet switching).

Η λύση για το οπτικό δίκτυο της επόμενης γενιάς είναι και πάλι έτοιμη: η πολυπλεξία DWDM σε συνδυασμό με την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης συνεχίζει να επιτρέπει την ομαλή αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που μπορεί να μεταφερθεί με τα διαθέσιμα multiterabit/s/fiber συστήματα. Επίσης, η χρήση ROADMs και OXCs επιτρέπει τη δημιουργία φυσικών κυκλωμάτων (συνδέσεων) σε οπτικό επίπεδο για τη μεταφορά πακέτων πληροφορίας και εξαλείφεται (ή τουλάχιστον περιορίζεται σημαντικά) η ανάγκη για υψηλής χωρητικότητας SONET/SDH TDM κυκλωμάτων. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μία πολυκυματική, οπτική IP-over-DWDM πλατφόρμα ικανή να υποστηρίζει τη μετάδοση πακέτων σε ένα αμιγώς οπτικό δίκτυο. Προκειμένου να ολοκληρωθεί η εικόνα του δικτύου πρέπει να εξασφαλίσουμε επίσης και τη μεταγωγή και

δρομολόγηση των πακέτων – πρέπει επομένως να διαθέτουμε τους ανάλογους packet-mode δρομολογητές.

1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΕΣ ΠΑΚΕΤΩΝ: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ, ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Οι ηλεκτρονικοί δρομολογητές πακέτων (packet routers) αποτελούν τις πιο σημαντικές δικτυακές μηχανές για την πραγματοποίηση των βασικών λειτουργιών του «φωτονικού Internet» - την προώθηση των πακέτων προς τον προορισμό τους (βάση της πληροφορίας που βρίσκεται στις επικεφαλίδες των πακέτων) και τη δρομολόγηση με βάση lookup tables. Επίσης, οι δρομολογητές εξασφαλίζουν υψηλά επίπεδα χρήσης των καναλιών του δικτύου με την επιτέλεση στατιστικής πολυπλεξίας.



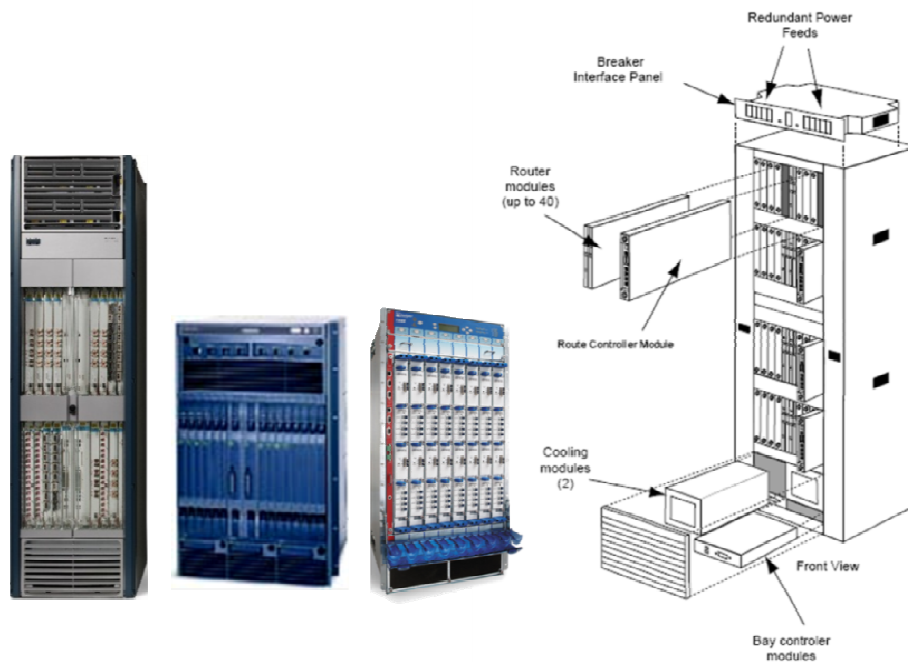
Σχήμα 1.1 Αρχιτεκτονική ενός ηλεκτρονικού δρομολογητή πακέτων.

Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η δομή ενός ηλεκτρονικού δρομολογητή, ο οποίος αποτελείται από τρία βασικά δομικά στοιχεία:

- Line cards (LCs): Τα LCs μεταχειρίζονται την εισερχόμενη και εξερχόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση και συνδέονται με το οπτικό δίκτυο μέσω οπτοηλεκτρονικών (O/E) και ηλεκτρο-οπτικών (E/O) διεπαφών υποστηρίζοντας διάφορα πρωτόκολλα και

ρυθμούς μετάδοσης. Τα LCs διαβάζουν τις επικεφαλίδες των πακέτων και αποφασίζουν που θα στείλουν τα πακέτα ενώ περιέχουν και τις απαιτούμενες μνήμες εισόδου και εξόδου (buffers).

- Κεντρική μονάδα μεταγωγής (Central crossbar switch): Τα LCs διασυνδέονται μέσω ενός ηλεκτρονικού πίνακα μεταγωγής, ο οποίος αναλαμβάνει τη μεταγωγή των πακέτων από το LC εισόδου στο κατάλληλο LC εξόδου.
- Scheduler: Ο Scheduler, ο οποίος μπορεί να είναι κεντρικός ή κατανεμημένος στις LCs, αναλαμβάνει να επιτύχει μεγιστοποίηση της ροής με βάση τις αιτήσεις δρομολόγησης που δέχεται από τα LCs για κάθε ένα πακέτο.



Σχήμα 1.2 Η νέα γενιά ηλεκτρονικών Tb/s δρομολογητών (από αριστερά προς τα δεξιά):

CISCO-CRS-1, Alcatel 7670 και Juniper T640.

Η λειτουργία των ηλεκτρονικών δρομολογητών βασίζεται σε σύγχρονη, store-and-forward μεταγωγή πακέτων. Κάθε LC περιλαμβάνει μία μεγάλη μεγέθους ηλεκτρονική μνήμη RAM, ώστε το LC να μπορεί να δέχεται ασύγχρονα, μεταβλητού μήκους πακέτα, να τα αποθηκεύει, και να τα ομαδοποιεί σε frames σταθερού μήκους. Ο ρυθμός των frames ισούται με το ρυθμό στον οποίο ο scheduler μπορεί να σετάρει τη μονάδα μεταγωγής. Τα frames παραμένουν αποθηκευμένα στους buffers εισόδου (προτού σταλούν στη

μονάδα μεταγωγής) για όσο χρόνο διαρκεί η επεξεργασία των επικεφαλίδων και ο scheduler κάνει τη σύνδεση με την κατάλληλη LC εξόδου. Η LC εξόδου με την αντίστοιχη RAM θα αποσυνθέσει τα frames σταθερού μήκους στα πακέτα μεταβλητού μήκους (όπως αυτά είχαν εισέλθει στο δρομολογητή) και θα τα αποστείλει στο δίκτυο.

Η ηλεκτρονική μνήμη RAM παρέχει μεγάλη ευελιξία στην ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτου. Πρωταρχικά με τη RAM υλοποιείται έλεγχος των συγκρούσεων (contention resolution) αποκλειστικά στο πεδίο του χρόνου – τα πακέτα διατηρούνται στη RAM ωσότου βρεθεί «ανοιχτή» χρονοθυρίδα και έπειτα προωθούνται στην έξοδο του δρομολογητή. Επίσης λόγω της δυνατότητας για αποθήκευση, η ταχύτητα της μονάδας μεταγωγής δε χρειάζεται να είναι μεγαλύτερη από το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων και επομένως δε χρειάζονται κενά διαστήματα (guardbands) μεταξύ των πακέτων. Τέλος ο δρομολογητής μπορεί να επιτελέσει όλη την απαραίτητη ηλεκτρονική επεξεργασία (header processing, queuing, etc.) όσο τα πακέτα είναι αποθηκευμένα.

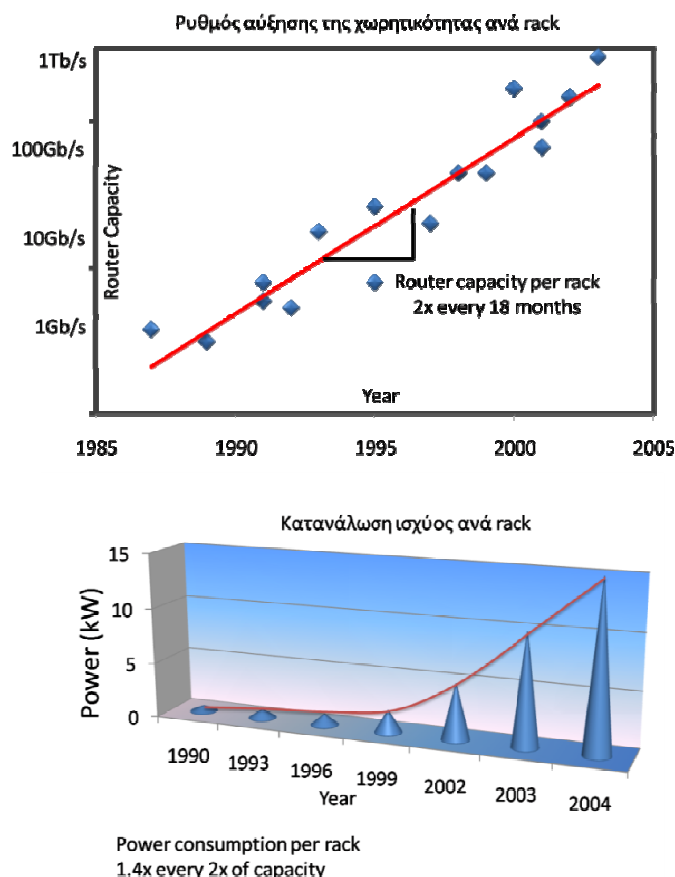
Η store-and-forward προσέγγιση έχει και τα μειονεκτήματά της, τα οποία σχετίζονται άμεσα με τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων να μεταχειρίζονται πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Πρώτον τα LCs θα πρέπει να αποθηκεύουν και να προωθούν κάθε bit σε ένα πακέτο. Κατά συνέπεια, η δομή και τα κυκλώματα στα LCs γίνονται πολύπλοκα, απαιτούν μεγάλη ενέργεια λειτουργίας και θέτουν αυστηρά όρια στη ρυθμοδότηση των πακέτων. Επιπρόσθετα η επέκταση της ταχύτητας του δρομολογητή περιορίζεται από την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής μνήμης RAM, της οποίας οι χρόνοι προσπέλασης μειώνονται με ρυθμό μόλις 7% κάθε χρόνο.

Μέχρι πρόσφατα οι ηλεκτρονικοί δρομολογητές ανταποκρίνονταν στην αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Παρόλα αυτά, η τεράστια αύξηση των απαιτήσεων σε χωρητικότητα στο δίκτυο, οδήγησε τις εταιρείες τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού να σχεδιάσουν μία καινούρια γενιά ηλεκτρονικών συστημάτων δρομολόγησης και να προετοιμάσουν τα ευρυζωνικά δίκτυα επόμενης γενιάς. Ο στόχος είναι η επίτευξη ρυθμών μετάδοσης ίσων με 40 Gb/s, με αντίστοιχα υψηλά στάνταρ διαδικτύωσης. Η πρόσφατη ανάπτυξη και εισαγωγή συστημάτων όπως τα CISCO CRS-1, Juniper T640, Alcatel-Lucent 7670 και Avici SSR, φανερώνει την πραγματική ανάγκη της αγοράς για προηγμένους Tb/s δρομολογητές. Η εγκατάσταση και λειτουργία αυτών των

συστημάτων έχει αποκαλύψει τις μεγάλες τους δυνατότητες αλλά και κάποια σημαντικά ελαττώματα. Τα κυριότερα πρακτικά προβλήματα αφορούν το μεγάλο μέγεθος που καταλαμβάνουν, την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνουν αλλά και τα ποσά θερμότητας που παράγουν τα ηλεκτρονικά συστήματα δρομολόγησης. Το τρίπτυχο μέγεθος, ισχύς και θερμότητα αποτελεί βασικό κανόνα στην ανάπτυξη συστημάτων δρομολόγησης, ειδικά τώρα που τα central offices των παρόχων προβλέπουν περιορισμένο χώρο, δυνατότητα τροφοδοσίας και ικανότητα για απομάκρυνση της θερμότητας από τα racks τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού. Ο αριθμός του joker είναι το «10»: αυτή είναι η ισχύς σε kW την οποία μπορεί ένα central office να παρέχει σε ένα και μόνο rack εξοπλισμού με αντίστοιχη ικανοποιητική απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας. Είναι ακριβώς η ισχύς που απαιτεί μία επιδαπέδια κοιτοπουλιέρα με 9 σούβλες και χωρητικότητα 30 κοτόπουλα, η οποία καταλαμβάνει χώρο ίσο με $132 \times 57 \times 180 \text{ cm}^3$. Δρομολογητής ή “grilling machine”; Ας δούμε τι από τα δύο έχουμε σε αριθμούς, αναφερόμενοι στο CISCO CRS-1: το πιο προηγμένο, εμπορικά διαθέσιμο ηλεκτρονικό σύστημα δρομολόγησης.

1.3 CISCO CRS-1: Η ΠΙΟ ΠΡΟΗΓΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

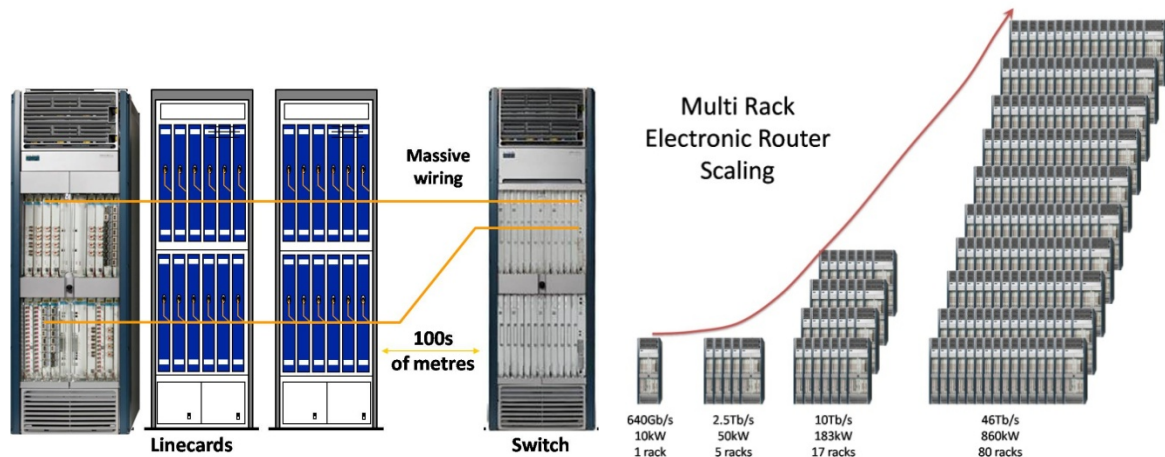
Το 1996 η CISCO επένδυσε 500 Μ\$ σε ένα πενταετές πρόγραμμα με στόχο την κατασκευή του πιο γρήγορου ηλεκτρονικού δρομολογητή, με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα που θα μπορούσε να υπάρξει σε ένα και μόνο rack. Το αποτέλεσμα ήταν πραγματικά εντυπωσιακό: το 2001 η CISCO ανακοίνωσε την ολοκλήρωση της κατασκευής του CRS-1, ενός single-rack δρομολογητή ο οποίος προσφέρει 640 Gb/s χωρητικότητα και περιλαμβάνει 16 LCs με δυνατότητα επεξεργασίας IP πακέτων με ρυθμό 40 Gb/s η κάθε μία.



Σχήμα 1.3 Αύξηση της χωρητικότητας και κατανάλωση ισχύος των ηλεκτρονικών δρομολογητών ανά rack συναρτήσει της χρονιάς εισαγωγής στην αγορά των αντίστοιχων ηλεκτρονικών συστημάτων.

Η απάντηση στην ερώτηση «καφέ ψήνει;» είναι μάλλον απλή. Βέβαια ψήνει καφέ και πολύ πιθανόν να μπορεί να ψήσει και ένα κοπάδι κοτόπουλα, αφού ο CRS-1 καταναλώνει ισχύ ίση με 10.92 kW, ενώ καταλαμβάνει χώρο ίσο με $213 \times 60 \times 91 \text{ cm}^3$ και ζυγίζει 723 kg. Με αυτά τα δεδομένα είναι φανερό ότι οι τεράστιες δυνατότητες του μηχανήματος έρχονται με το ανάλογο κόστος και με δεδομένο ότι έχουμε πιάσει ήδη το “grilling limit” των 10 kW, η πρώτη απορία είναι πώς επεκτείνεται η χωρητικότητα του δρομολογητή με δεδομένη την υψηλή κατανάλωση ισχύος του.

Ιστορικά, και μέχρι να φτάσουμε στον CRS-1, η χωρητικότητα των single-rack δρομολογητών διπλασιάζεται κάθε 18 μήνες (σχήμα 1.3). Με μία θεωρητική προεκβολή της καμπύλης του σχήματος 1.3 θα παρατηρούσαμε ότι – θεωρητικά τουλάχιστον – ως το 2012 η χωρητικότητα που θα μπορούσαμε να έχουμε ανά rack θα έφτανε τα 100 Tb/s.



Σχήμα 1.4 Αρχιτεκτονική και επεκτασιμότητα για multi-rack συστήματα δρομολόγησης.

Στο σχήμα 1.3 φαίνεται και κάτι ακόμα: η κατανάλωση ισχύος σύμφωνα με την οποία συστήματα άνω του 1 Tb/s δεν μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά, αφού απαιτούν ισχύ κοντά στα 15 kW. Η παρατήρηση ότι η κατανάλωση ισχύος αυξάνεται κατά ένα συντελεστή $\times 1.4$ για κάθε διπλασιασμό της διαθέσιμης χωρητικότητας απλά επισφραγίζει το συμπέρασμα ότι δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν single-rack δρομολογητές με χωρητικότητες άνω του 1 Tb/s, από τη στιγμή μάλιστα που τα central offices μπορούν να υποστηρίξουν (τροφοδοσία και ψύξη) racks με μέγιστη κατανάλωση ισχύος ίση με 10 kW. Η ανάγκη για κάλυψη των προβλεπόμενων απαιτήσεων σε χωρητικότητα οδηγεί σε multirack λύσεις – η επέκταση της χωρητικότητας γίνεται με διασύνδεση πολλαπλών single-rack δρομολογητών.

Το σύστημα CRS-1 περιλαμβάνει και multiself διάταξη (σχ. 1.4). Στη multiself διάταξη τα LCs βρίσκονται κατανεμημένα στα racks, τα οποία διασυνδέονται μέσω ενός κεντρικού μεταγωγέα (cross-bar switch), ο οποίος αποτελεί ένα ξεχωριστό rack. Ο κεντρικός μεταγωγέας υπόκειται και αυτός στους περιορισμούς της κατανάλωσης ισχύος και της θερμότητας. Ένα cross-bar switch το οποίο καταναλώνει περίπου 9 kW μπορεί να διασύνδεει ένα μέγιστο αριθμό από 9 LC racks. Με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται ο καταμερισμός της ισχύος και της θερμότητας επιτρέποντας την αύξηση της χωρητικότητας. Με αυτήν τη μέθοδο το σύστημα CRS-1 μπορεί να φτάσει σε διαθέσιμη χωρητικότητα ίση με 46 Tb/s, με τη διασύνδεση 72 line-card racks μέσω 8 switching fabric

racks. Σε αυτή τη διάταξη, 1152 LCs (72 racks x 16 slots/rack) διασυνδέονται μέσω των 8 switching fabric racks με τη συνολική κατανάλωση ισχύος του συστήματος να φτάνει τα 860 kW. Ο προφανής λόγος για τον οποίο οι ηλεκτρονικοί δρομολογητές δε θεωρούνται επεκτάσιμοι είναι η κατανάλωση ισχύος, η οποία αυξάνεται μη γραμμικά όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Λιγότερο προφανείς αλλά εξίσου σημαντικοί λόγοι για την προβληματική επεκτασιμότητα των ηλεκτρονικών δρομολογητών είναι η αυξημένη απόσταση μεταξύ LCs και μονάδων μεταγωγής, η μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρικών καλωδιώσεων που απαιτείται για τη διασύνδεση των LCs με τις κεντρικές μονάδες μεταγωγής και η αυξημένη πολυπλοκότητα στην επιτέλεση του κεντρικού ελέγχου και του scheduling σε ένα τόσο σύνθετο σύστημα. Στα παραπάνω προσθέστε και τη σχεδόν αδύνατη επέκταση του ρυθμού μετάδοσης πέραν των 40 Gb/s, λόγω της αποκλειστικής χρήσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ώστε να συμπληρωθεί το παζλ της προβληματικής επεκτασιμότητας των ηλεκτρονικών δρομολογητών.

1.4 ΦΩΤΟΝΙΚΟΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΕΣ

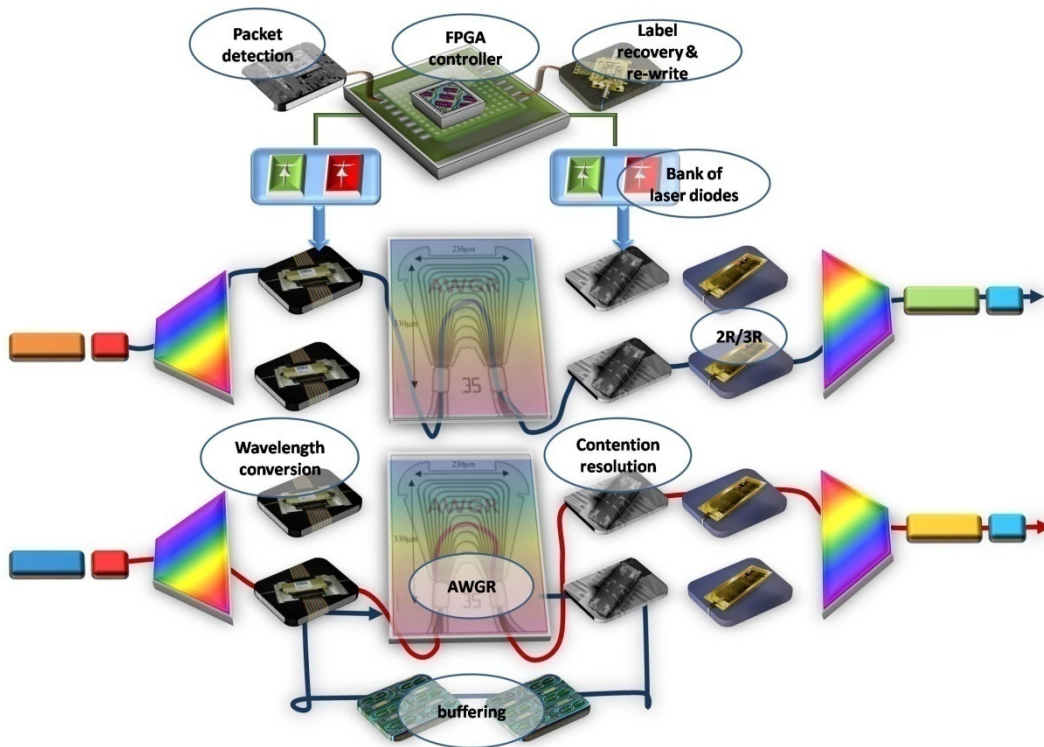
Με δεδομένες τις βασικές αδυναμίες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στην κατασκευή επεκτάσιμων Tb/s συστημάτων δρομολόγησης, η στροφή προς τη φωτονική τεχνολογία μοιάζει αναπόφευκτη. Σε συνδυασμό μάλιστα με τη ραγδαία ανάπτυξη και επένδυση στις τεχνικές φωτονικής ολοκλήρωσης (photonic integration), η δυνατότητα για τη διείσδυση ολοκληρωμένων οπτικών κυκλωμάτων στα συστήματα δρομολόγησης γίνεται ολοένα και πιο ελκυστική. Άλλωστε η δύναμη των φωτονικών κυκλωμάτων είναι ορατή εδώ και πολλά χρόνια – πολύ πριν την ολοκλήρωση των πρώτων οπτικών διακοπών. Από τις αρχές της δεκαετίας του '90 έχουν αναφερθεί οπτικά κυκλώματα τα οποία επιτελούν: λογικές πράξεις¹, διαμόρφωση δεδομένων², μετάδοση δεδομένων³, από-πολυπλεξία⁴, μεταγωγή⁵, αναγέννηση δεδομένων⁶ και άλλες λειτουργίες σε υπερυψηλές ταχύτητες άνω των 100 Gb/s και με χαμηλές απαιτήσεις σε ότι αφορά την οπτική ισχύ λειτουργίας καθώς και την κατανάλωση ενέργειας. Η σταδιακή εφαρμογή των κυκλωμάτων αυτών για την επιτέλεση δικτυακών λειτουργιών⁷, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη μονολιθικής και υβριδικής φωτονικής ολοκλήρωσης στις αρχές του 2000,

δημιούργησε την ιδέα της φωτονικής δρομολόγησης – δηλαδή της μεταφοράς, επεξεργασίας και μεταγωγής δεδομένων στο οπτικό επίπεδο, αποφεύγοντας Ο/Ε/Ο μετατροπές (σικ) με τη χρήση αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων.

Τη στιγμή της συγγραφής αυτού του κειμένου παρατηρείται μία πρωτοφανής επένδυση σε ερευνητικά προγράμματα παγκοσμίως⁸, τα οποία ως στόχο έχουν την κατασκευή του φωτονικού δρομολογητή – μίας οπτικής (ή οπτοηλεκτρονικής) πλατφόρμας, η οποία θα δρομολογεί πακέτα δεδομένων σε υπερυψηλές ταχύτητες χρησιμοποιώντας οπτικές επικεφαλίδες, που θα περιέχουν την πληροφορία της δρομολόγησης. Οι οπτικές επικεφαλίδες βρίσκονται σε ρυθμούς μετάδοσης «εύκολους» για τα ηλεκτρονικά κυκλώματα (από 155 Mb/s ως 3 Gb/s), ενώ τα δεδομένα βρίσκονται σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (>40 Gb/s) και διατηρούνται αποκλειστικά στο οπτικό επίπεδο. Ένας οπτικός δρομολογητής διαχωρίζεται σε δύο επίπεδα:

1. Το επίπεδο ελέγχου (control plane), όπου απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα (π.χ. FPGAs) επεξεργάζονται την πληροφορία των επικεφαλίδων.
2. Το επίπεδο της μεταφοράς δεδομένων (data plane), στο οποίο δεν υπάρχουν ηλεκτρονικά παρά μόνο οπτικά κυκλώματα, τα οποία μετάγουν τα δεδομένα με «διαφάνεια» (transparency).

Το σχήμα 1.5 δείχνει την αρχιτεκτονική ενός φωτονικού δρομολογητή με όλα τα δομικά στοιχεία και τις απαραίτητες λειτουργίες για τη δρομολόγηση των δεδομένων.



Σχήμα 1.5 Βασική αρχιτεκτονική ενός φωτονικού δρομολογητή.

Το επίπεδο μεταφοράς δεδομένων αποτελείται από τα εξής οπτικά στοιχεία:

- Μία μονάδα αποπολυπλεξίας DWDM στην είσοδο του δρομολογητή για την αποπολυπλεξία των «χρωματισμένων» οπτικών πακέτων που εισέρχονται από τις διάφορες εισόδους του συστήματος.
- Τη μονάδα δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength routing stage), η οποία αποτελείται από συστοιχίες μετατροπών μήκους κύματος (Wavelength Converters) και τη μονάδα μεταγωγής μήκους κύματος (Arrayed Waveguide Grating Router).
- Ένα στάδιο ελέγχου/επίλυσης των συγκρούσεων μεταξύ πακέτων (contention resolution), το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει οπτικά στοιχεία μνήμης, οπτικούς διακόπτες και μετατροπείς μήκους κύματος για την επίλυση των συγκρούσεων σε τρεις διαστάσεις: χρόνο (optical buffering), μήκος κύματος (wavelength conversion) και χώρο (deflection routing).

- Ένα στάδιο αναγέννησης των δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει το «φρεσκάρισμα» των οπτικών πακέτων και την (μερική ή ολική) αναίρεση των επιδράσεων λόγω της οπτικής μετάδοσης και μεταγωγής (π.χ. jitter, OSNR degradation, amplitude modulation, dispersion, attenuation, etc.).
- Μία μονάδα πολυπλεξίας DWDM στην έξοδο του δρομολογητή για την πολυπλεξία των πακέτων που εξέρχονται από τις διάφορες εξόδους του συστήματος.

Στο φωτονικό δρομολογητή (όπως αναφέρθηκε και παραπάνω) η επεξεργασία των επικεφαλίδων για τη λήψη των αποφάσεων και τη δρομολόγηση των πακέτων από την είσοδο στην έξοδο του συστήματος γίνεται από ηλεκτρονικούς (FPGA) προγραμματιζόμενους controllers. Η διεπαφή μεταξύ του οπτικού επιπέδου μεταφοράς δεδομένων και του ηλεκτρονικού επιπέδου ελέγχου περιλαμβάνει ακόμα δύο λειτουργίες, οι οποίες μπορούν να εκτελεστούν με αμιγώς οπτικά κυκλώματα: 1) διαχωρισμό επικεφαλίδας-φορτίου (header/payload separation) και 2) ανίχνευση περιβάλλουσας οπτικών πακέτων (packet envelope detection).

Για την υλοποίηση του φωτονικού δρομολογητή έχουν προταθεί διάφορες παραλλαγές των παραπάνω υποσυστημάτων όπως: 1) αμιγώς οπτική επεξεργασία των επικεφαλίδων με οπτική λογική AND ή XOR⁹, 2) μεταγωγή χώρου (αντί μήκους κύματος) στη μονάδα μεταγωγής¹⁰, 3) οπτικές διασυνδέσεις (optical interconnects) και καταναμεμημένοι schedulers για την rack-to-rack διασύνδεση του δρομολογητή¹¹ και 4) οπτικά flip-flops για την αμιγώς οπτική παραγωγή των σημάτων ελέγχου και δρομολόγησης¹². Ανεξάρτητα από το ποια αρχιτεκτονική (ή συνδυασμός αρχιτεκτονικών) είναι η βέλτιστη, αυτό που προέχει για την επίτευξη του βασικού στόχου (αύξηση της χωρητικότητας του δρομολογητή με ταυτόχρονη μείωση του κόστους και της κατανάλωσης ισχύος) είναι: 1) η ύπαρξη τεχνολογίας, η οποία μπορεί να προσφέρει “micro-photonic components” - δηλαδή ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα κατάλληλα για την υλοποίηση των λειτουργιών που απαιτούνται στο δρομολογητή και 2) το ανάλογο “optical system/sub-system design” – ο σχεδιασμός συστημάτων, τα οποία βασιζόμενα σε οπτική επεξεργασία σήματος να μπορούν (με τη μικρότερη δυνατή επίδραση στην ποιότητα του σήματος) να πραγματοποιούν από τις πιο απλές έως τις πιο σύνθετες λειτουργίες.

1.5 ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ: ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΦΩΤΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

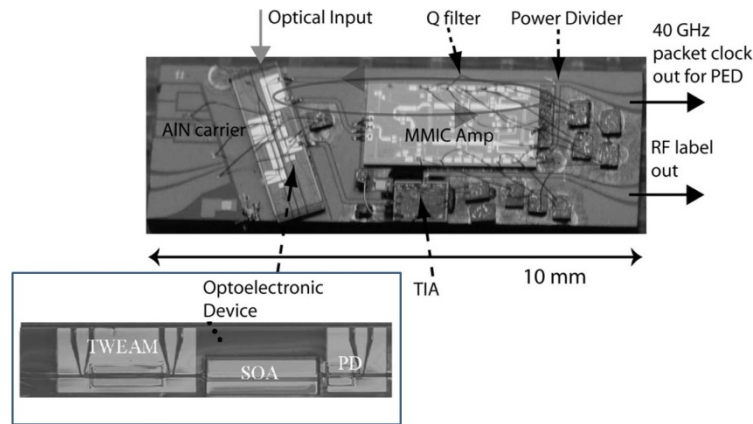
Πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στο σχεδιασμό και την ολοκλήρωση λειτουργικών οπτικών κυκλωμάτων, με πρωταρχικό στόχο την ανάπτυξη των πρώτων οπτικών Line Cards και με τελικό στόχο την κατασκευή ενός επεκτάσιμου, Tb/s φωτονικού δρομολογητή. Με σημείο αναφοράς το δρομολογητή του σχήματος 1.5 αναφέρονται τα πιο σημαντικά ερευνητικά αποτελέσματα για την υλοποίηση των βασικών δικτυακών λειτουργιών με ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα.

1.5.1 Οπτοηλεκτρονικό chip Ανίχνευσης Περιβάλλουσας Οπτικών Πακέτων

Η ανίχνευση της περιβάλλουσας απαιτείται για το χρονικό προσδιορισμό ενός οπτικού πακέτου κατά την είσοδό του στο δρομολογητή. Έτσι ανακτούμε το «χρονικό ίχνος» του πακέτου, προσδιορίζοντας το χρόνο άφιξης καθώς και τη διάρκειά του, διευκολύνοντας τη διαδικασία εξαγωγής/επανεισαγωγής της επικεφαλίδας (η οποία χρονικά προηγείται του πακέτου). Επίσης, η περιβάλλουσα χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό μεταξύ οπτικού και ηλεκτρονικού επιπέδου και για την ακρίβεια για την επίτευξη σωστού χρονισμού μεταξύ των οπτικών πακέτων και της ηλεκτρονικής επεξεργασίας για την παραγωγή των σημάτων έλεγχου. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι πολύπλοκη λόγω των εγγενών χρονικών αβεβαιοτήτων μεταξύ των οπτικών και ηλεκτρονικών επιπέδων, εκτός κι αν υπάρχει η τεχνική για τον προσδιορισμό της θέσης και του μεγέθους των εισερχόμενων οπτικών πακέτων.

Στο σχήμα 1.6 απεικονίζεται το πρώτο οπτοηλεκτρονικό chip σε InP κατασκευασμένο από ερευνητές στο UCSB (University of California Santa Barbara), το οποίο ανιχνεύει περιβάλλουσες οπτικών πακέτων σε ρυθμούς 40 Gb/s. Η συσκευή περιλαμβάνει ένα οπτοηλεκτρονικό κύκλωμα αποτελούμενο από: έναν ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή απώλειας (electroabsorption modulator - EAM) για την εξαγωγή της περιβάλλουσας, έναν ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή (semiconductor optical amplifier – SOA) για ενίσχυση και μία 10 Gb/s φωτοδίοδο (PD) για την ανίχνευση της επικεφαλίδας του πακέτου. Ο EAM ακολουθούμενος από ένα στενής ζώνης MMIC ενισχυτή και ένα high Q φίλτρο αποτελούν ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, η έξοδος του οποίου τροφοδοτεί ένα ηλεκτρονικό

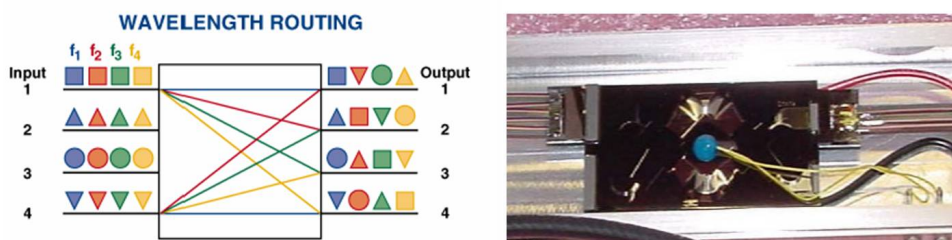
κύκλωμα Schottky, το οποίο παράγει την ανάστροφη περιβάλλουσα του σήματος ρολογιού.



Σχήμα 1.6 Μονολιθικά ολοκληρωμένο κύκλωμα ανίχνευσης περιβάλλουσας πακέτων σε InP.

1.5.2 Ολοκληρωμένος Μεταγωγέας Μήκους Κύματος – AWGR

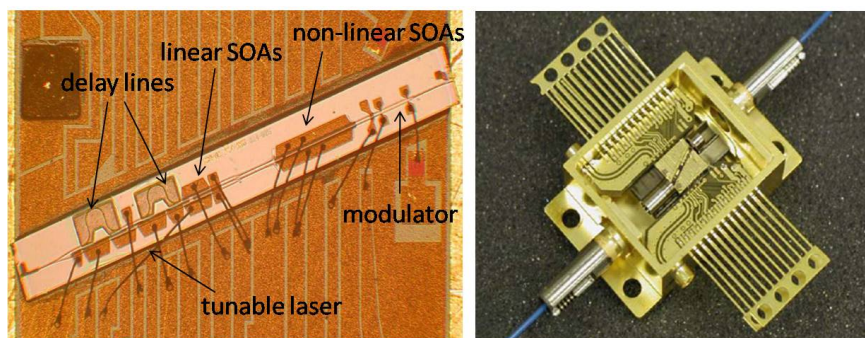
Η μονάδα μεταγωγής αποτελεί την «καρδιά» κάθε δρομολογητή. Στην περίπτωση δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength routing), η μονάδα μεταγωγής θα πρέπει να υποστηρίζει τη διάδοση σημάτων σε ρυθμούς > 40 Gb/s, να παρέχει μεγάλο αριθμό καναλιών για αυξημένη χωρητικότητα και να παρέχει δυνατότητα σύνδεσης από οποιαδήποτε θύρα εισόδου σε οποιαδήποτε θύρα εξόδου (any port – to – any port connectivity). Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας ενός AWGR καθώς και η συσκευή, η οποία ολοκληρώθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος IRIS από τη Lucent Technologies. Πρόκειται για έναν AWGR που υποστηρίζει τη μεταγωγή 40 καναλιών στη C-band, χωρίς εσωτερικές συγκρούσεις και έχει διαστάσεις μόλις 5×2.5 cm².



Σχήμα 1.7 Αρχή λειτουργίας και ολοκληρωμένη συσκευή ενός AWGR 40 καναλιών.

1.5.3 Οπτικό chip προώθησης πακέτων

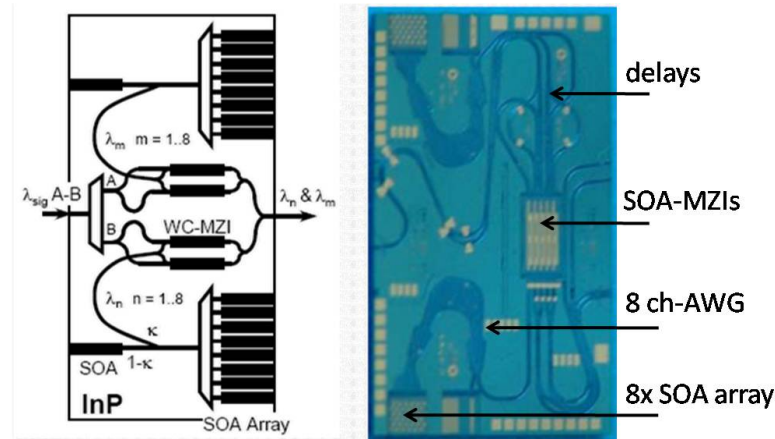
Το σχήμα 1.8 απεικονίζει το πρώτο οπτικό, μονολιθικά ολοκληρωμένο σε InP chip, το οποίο πραγματοποιεί τις λειτουργίες προώθησης οπτικών πακέτων - δηλαδή μετατροπή μήκους κύματος σε ρυθμό 40 Gb/s και επανεγγραφή οπτικών επικεφαλίδων σε ρυθμό 10 Gb/s. Για την επιτέλεση αυτών των λειτουργιών το chip περιλαμβάνει τα εξής: 1) ένα 40 Gb/s SOA-MZI μετατροπέα μήκους κύματος, 2) ολοκληρωμένες γραμμές καθυστέρησης ώστε να είναι δυνατή η διαφορική (push-pull) λειτουργία του SOA-MZI, 3) ένα ευρέως μεταβαλλόμενο SGDBR (sampled grating distributed Bragg reflector) laser για την κάλυψη όλης της C-band, 4) γραμμικούς SOAs για on-chip ενίσχυση των push-pull σημάτων και 5) έναν Mach-Zehnder, 10 Gb/s διαμορφωτή για τη διαμόρφωση των σημάτων των επικεφαλίδων.



Σχήμα 1.8 Μονολιθικά ολοκληρωμένο κύκλωμα προώθησης πακέτων σε InP.

1.5.4 Μονολιθικά ολοκληρωμένος 2 x 8 ενεργός μεταγωγέας μήκους κύματος

Ο μονολιθικά ολοκληρωμένος 2 x 8 ενεργός μεταγωγέας μήκους κύματος της Lucent Technologies αποτελεί ίσως την καλύτερη απόδειξη για τις μεγάλες δυνατότητες της φωτονικής τεχνολογίας ως προς την ολοκλήρωση ενός αριθμού από ενεργά στοιχεία σε ένα οπτικό chip. Το chip το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 1.9 περιέχει 2 πολυκυματικά lasers των 8 καναλιών το καθένα, 2 SOA-MZI μετατροπείς μήκους κύματος και έναν αποπολυπλέκτη 2 καναλιών με ολοκληρωμένες γραμμές καθυστέρησης για δυνατότητα “push-pull” λειτουργίας των SOA-MZIs. Το chip μπορεί να δρομολογήσει δύο κανάλια μετατρέποντας το μήκος κύματός τους σε ένα από τα 8 διαθέσιμα κανάλια, τα οποία έχουν απόσταση (channel spacing) 100 GHz.



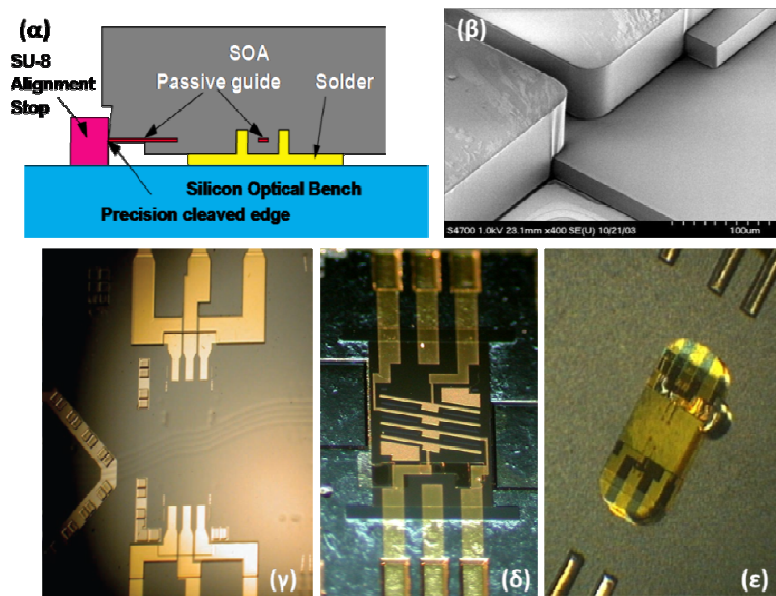
Σχήμα 1.9 Ενεργός μεταγωγέας 2 x 8 μήκους κύματος σε InP.

1.5.5 Υβριδικά ολοκληρωμένες συστοιχίες οπτικών διακοπών

Για τη δημιουργία μίας συμπαγούς και ολοκληρωμένης μονάδας δρομολόγησης και αναγέννησης των δεδομένων απαιτείται η ύπαρξη ολοκληρωμένων συστοιχιών από μετατροπείς μήκους κύματος. Στο ΕΦΕ, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος IST-MUFINS¹³, έγινε προσπάθεια για την ανάπτυξη τέτοιων συσκευών σε συνεργασία με την εταιρεία CIP Technologies αξιοποιώντας τη “silica-on-silicon” τεχνική υβριδικής ολοκλήρωσης. Η τεχνική αυτή έχει αναπτυχθεί από τη CIP για την ολοκλήρωση προκατασκευασμένων InP και InGaAsP στοιχείων (όπως SOAs και EAMs) σε silicon πλατφόρμες, οι οποίες περιέχουν silica κυματοδηγούς με χαμηλές απώλειες¹⁴. Επομένως, η υβριδική αυτή προσέγγιση μπορεί να συνδυάζει τη δυνατότητα για επεξεργασία σήματος σε υψηλές ταχύτητες που προσφέρει η InP μονολιθική ολοκλήρωση, με το χαμηλό κόστος και την υψηλή δυνατότητα ολοκλήρωσης του silicon. Η τεχνική είχε εφαρμοστεί στο παρελθόν επιτυχώς για την ανάπτυξη οπτικών αναγεννητών ενός στοιχείου και λόγω της δυνατότητας για παθητική συναρμολόγηση (passive assembly) των συσκευών, ήταν ελκυστική για την ανάπτυξη μεγαλύτερων ενεργών, μη γραμμικών οπτικών συστημάτων.

Σε ότι αφορά την εφαρμογή της σε συστήματα δρομολόγησης, η τεχνική “silica-on-silicon” θα έπρεπε να αναβαθμιστεί ώστε να μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερα στοιχεία (και επομένως και περισσότερες λειτουργίες) σε όσο το δυνατό μικρότερο μέγεθος και με μικρότερο δυνατό κόστος. Σε αυτά τα πλαίσια το πρώτο λογικό βήμα για

την αναβάθμιση της τεχνικής ήταν η παράλληλη ολοκλήρωση: η ολοκλήρωση παράλληλων οπτικών SOA-MZI πυλών με στόχο την αύξηση της δυνατότητας επεξεργασίας ανά photonic chip και ταυτόχρονο τη μείωση του packaging κόστους.



Σχήμα 1.10 Κατασκευή silica-on-silicon υβριδικών κυκλωμάτων.

Η βασική αρχή της “silica-on-silicon” ολοκλήρωσης θυμίζει κατά πολύ την αντίστοιχη του ηλεκτρονικού PCB στο οποίο τοποθετούνται όλα τα επί μέρους στοιχεία. Τα βασικά δομικά στοιχεία είναι: 1) τα μονολιθικά InP στοιχεία, 2) οι θυγατρικές silicon πλακέτες (daughterboards) και 3) η μητρική πλακέτα ή αλλιώς το PLC (photonic lightwave circuit) το οποίο περιέχει silica κυματοδηγούς σε silicon υπόστρωμα. Οι θυγατρικές πλακέτες χρησιμοποιούνται για τη μηχανική τοποθέτηση σε αυτές των ενεργών στοιχείων και στη συνέχεια για την ολοκλήρωση της συσκευής, οι πλακέτες τοποθετούνται πάνω στο PLC. Στο σχήμα 1.10 παρουσιάζεται η βασική διαδικασία συναρμολόγησης για τον υβριδικό τετραπλό SOA-MZI αναγεννητή.

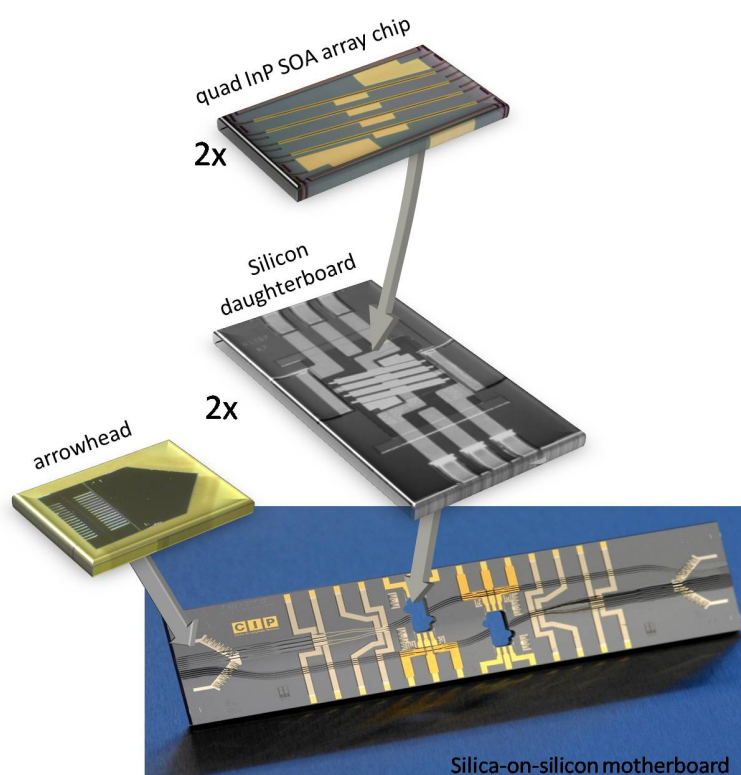
Τα δύο μονολιθικά chips των 4 SOAs περιέχουν μετατροπείς των οπτικών ρυθμών (mode expanders) για τη μείωση των απωλειών λόγω μη βέλτιστης ευθυγράμμισης της θυγατρικής πλακέτας. Η ανοχή σε ότι αφορά την ευθυγράμμιση είναι της τάξης του 1 μm , η οποία αντιστοιχεί σε απώλεια σύζευξης ίση με 1 dB. Η εικόνα 1.10 (δ) απεικονίζει τη θυγατρική πλακέτα με τοποθετημένο το μονολιθικό chip, τις δομές μηχανικής

ευθυγράμμισης για οριζόντια και κάθετη τοποθέτηση καθώς και τους ηλεκτρικούς κυματοδηγούς για τις ηλεκτρικές συνδέσεις.

Η πρώτη συναρμολόγηση περιλαμβάνει το «σπρώξιμο» του μονολιθικού chip στις δομές ευθυγράμμισης της θυγατρικής πλακέτας (σχήμα 1.10α) και β)) και τη ροή του υλικού της κόλλησης. Μετά την τοποθέτηση το πίσω μέρος του SOA chip συνδέεται με την ηλεκτρική επαφή της γείωσης (σχήμα 1.10ε)). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει πρώτα τη δοκιμή των μονολιθικών chips πριν την τελική συναρμολόγηση.

Το σχήμα 1.11 απεικονίζει τη μητρική πλακέτα με τους παθητικούς silica κυματοδηγούς. Εκτός από το «δίκτυο» των κυματοδηγών, η μητρική πλακέτα περιλαμβάνει μηχανικές δομές για την «προσγείωση» του daughterboard ώστε να είναι δυνατή η παθητική συναρμολόγηση.

Η αναβάθμιση της τεχνικής ολοκλήρωσης περιελάμβανε όλους τους απαραίτητους επανασχεδιασμούς των daughterboards και motherboards καθώς και την ολοκλήρωση μεγαλύτερων συστοιχιών από InP SOA chips.

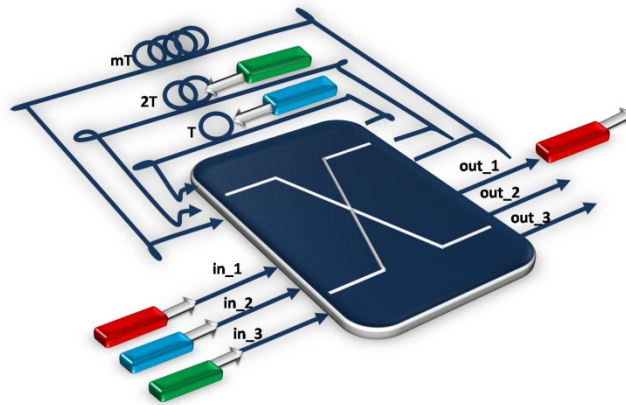


Σχήμα 1.11 Η διαδικασία της υβριδικής “silica-on-silicon” ολοκλήρωσης.

1.6 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ: ΟΙ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΝΤΑΣΜΑ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ RAM

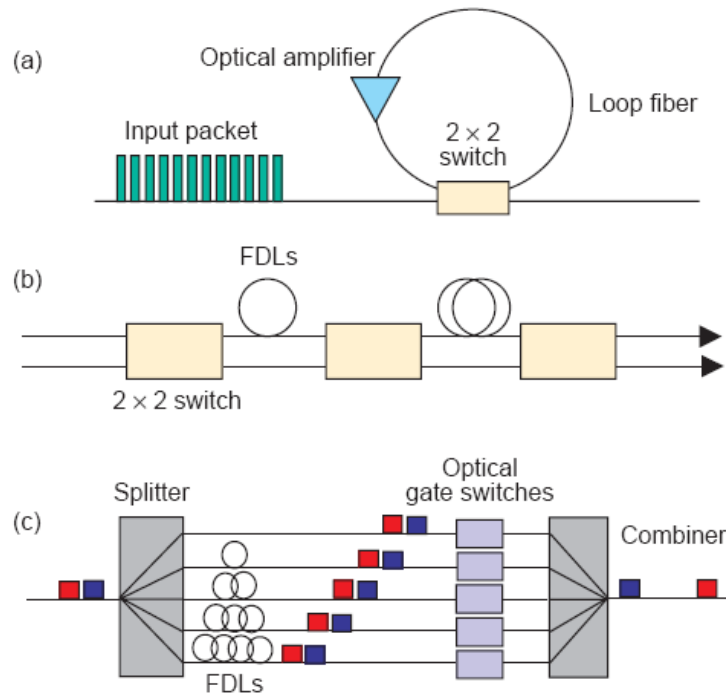
Η παρουσίαση των παραπάνω συσκευών αποδεικνύει την ύπαρξη τεχνολογίας ικανής να οδηγήσει σε ολοκληρωμένους, Tb/s φωτονικούς δρομολογητές, υποσχόμενη χαμηλό κόστος, μέγεθος και κατανάλωση ισχύος. Με τα οπτικά chips που παρουσιάστηκαν είναι δυνατή η πραγματοποίηση μίας σειράς από διεργασίες, οι οποίες απαιτούνται για τη δρομολόγηση οπτικών πακέτων σε έναν οπτικό δρομολογητή. Οι διεργασίες αυτές σχετίζονται κυρίως με την ανίχνευση των πακέτων, την εξαγωγή και επανεισαγωγή των οπτικών επικεφαλίδων, τη μεταβολή του μήκους κύματος των πακέτων και τη δρομολόγησή τους μέσα από οπτικούς πίνακες μεταγωγής. Ο «κινούμενος στόχος» είναι η ολοκλήρωση ολοένα και περισσότερων στοιχείων σε ένα φωτονικό chip με στόχο την διεύρυνση των διεργασιών οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν με οπτικές τεχνικές.

Η πιο πολύπλοκη από τις διεργασίες ενός δρομολογητή, η οποία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με οπτική επεξεργασία σήματος, είναι ο έλεγχος και η επίλυση των συγκρούσεων οπτικών πακέτων. Η σύγκρουση σε ένα φωτονικό δρομολογητή συμβαίνει όταν δύο οπτικά πακέτα του ίδιου μήκους κύματος «ζητούν» την ίδια θύρα εξόδου, την ίδια χρονική στιγμή. Στους συμβατικούς ηλεκτρονικούς δρομολογητές η επίλυση των συγκρούσεων γίνεται στο πεδίο του χρόνου με την εφαρμογή της “store-and-forward” προσέγγισης, η οποία περιλαμβάνει την αποθήκευση των πακέτων σε μνήμες RAM. Καθώς οπτική μνήμη τυχαίας προσπέλασης δεν υφίσταται, η μοναδική εφαρμόσιμη τεχνική για αποθήκευση στο πεδίο του χρόνου είναι η χρησιμοποίηση γραμμών καθυστέρησης (Fiber Delay Lines - FDLs).¹⁵ Τα πακέτα που συγκρούονται αποστέλλονται κατά μήκος μιας πρόσθετης ίνας, οπότε καθυστερούνται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στο Σχήμα 1.12 απεικονίζεται η βασική λειτουργία: Ένα από τα συγκρουόμενα πακέτα προωθείται απευθείας στην έξοδο 1, ενώ τα υπόλοιπα αποστέλλονται σε διαφορετικού μήκους FDLs (μήκος T και 2T αντίστοιχα), προτού προωθηθούν και αυτά στη συνέχεια στην ίδια έξοδο.



Σχήμα 1.12 Δρομολόγηση με χρήση οπτικών γραμμών καθυστέρησης.

Η λειτουργία βασίζεται σε ουρές First-in First-out (FIFO) με καθορισμένες καθυστερήσεις. Οι μηνύες γραμμών καθυστέρησης διακρίνονται σε δύο τύπους: ανάδρασης (feedback-based) και προώθησης (feed-forward). Μια μνήμη ανάδρασης αποτελείται κυρίως από ένα βρόχο ανακύκλωσης, έναν οπτικό διακόπτη 2×2 και έναν οπτικό ενισχυτή που εξισορροπεί τις απώλειες της διαδρομής (Σχήμα 1.13(α)). Μία μνήμη προώθησης περιλαμβάνει 2×2 διακόπτες πολλαπλών βαθμίδων με γραμμές καθυστέρησης (Σχήμα 1.13(β)) ή ένα διαιρέτη, γραμμές καθυστέρησης, οπτικές πύλες και ένα συζεύκτη (broadcast-and-select type) (Σχήμα 1.13(γ)). Επίσης, μπορεί να παρέχει συγκεκριμένο πλήθος από οπτικές διαδρομές με ξεχωριστά μήκη. Συνεπώς, και οι δύο τύποι περιορίζουν το πακέτο σε καθορισμένο μήκος ή πολλαπλάσιο αυτού. Επίσης, οι μνήμες γραμμών καθυστέρησης δε διαθέτουν χαρακτηριστικά της μνήμης RAM. Είναι ογκώδεις, και δεν παρέχουν μεγάλη χωρητικότητα, μακροπρόθεσμη αποθήκευση και τυχαία προσπέλαση σε αυθαίρετο χρόνο. Επίσης, υστερούν λόγω της μεγάλης απώλειας από τα πολλά οπτικά εξαρτήματα (συζεύκτες, κλπ) και της συσσώρευσης θορύβου από τους ενισχυτές στους βρόχους ινών. Αυτό μειώνει την ικανότητα διασύνδεσης πολλαπλών κόμβων (τυπικά 10-20 κόμβοι στα backbone δίκτυα), επειδή ο θόρυβος υποβαθμίζει την ποιότητα του οπτικού σήματος. Οι μνήμες γραμμών καθυστέρησης απαιτούν επίσης πολύπλοκους αλγορίθμους ελέγχου.



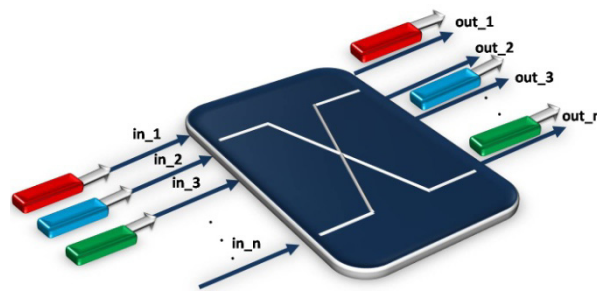
Σχήμα 1.13 Μνήμες γραμμών καθυστέρησης.

(α) Μνήμη βρόχου ανακύκλωσης, (β) Μνήμη γραμμών καθυστέρησης πολλών βαθμίδων,
(γ) Μνήμη τύπου *broadcast-and-select*.

Η δρομολόγηση εκτροπής είναι μία εναλλακτική τεχνική που επιλύει τη σύγκρουση οπτικών πακέτων στο πεδίο του χώρου.¹⁶ Αν δύο ή περισσότερα πακέτα προορίζονται στην ίδια θύρα εξόδου την ίδια χρονική στιγμή, μόνο ένα από αυτά επιτρέπεται να προχωρήσει προς την επιθυμητή θύρα εξόδου, ενώ τα υπόλοιπα προωθούνται σε διαφορετικές πορείες. Τα πακέτα που έχουν εκτραπεί υφίστανται μεγαλύτερη καθυστέρηση από ότι στη λύση της αποθήκευσης. Επίσης, αυτή η προσέγγιση πιθανόν να διαταράσσει την ακολουθία των πακέτων, να προκαλεί βρόχους δρομολόγησης (γεγονός που αυξάνει την καθυστέρηση και υποβαθμίζει την ποιότητα του σήματος) και να αυξάνει το φορτίο του δικτύου ως προς την απόδοση, την καθυστέρηση και την πιθανότητα απώλειας πακέτων. Εντούτοις, παραμένει ελκυστική προσέγγιση, καθώς δεν απαιτεί χρησιμοποίηση μνημών γραμμών καθυστέρησης, πολύπλοκων εξαρτημάτων και αλγορίθμων ελέγχου. Για να διατηρείται η επίδραση των μειονεκτημάτων αυτών

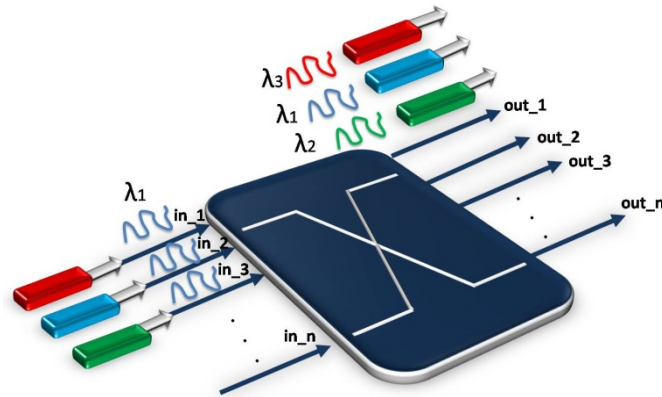
επαρκώς χαμηλή, είναι χρήσιμη η εφαρμογή έξυπνων αλγορίθμων ή η χρησιμοποίηση τεχνικών όπως η χρήση TTL (time to live) πληροφορίας στις επικεφαλίδες των πακέτων.

Στο σχήμα 1.14 παριστάνεται γραφικά η τεχνική της δρομολόγησης με εκτροπή. Τα πακέτα που εισέρχονται στον κόμβο από τις εισόδους 1, 2 και 3 κατευθύνονται όλα προς την έξοδο 1 δημιουργώντας σύγκρουση. Για την αποφυγή της σύγκρουσης μόνο ένα από τα πακέτα προωθείται τελικά στην έξοδο 1, ενώ τα άλλα δύο εκτρέπονται σε διαφορετικές εξόδους του κόμβου (έξοδος 3 και η αντίστοιχα).



Σχήμα 1.14 Δρομολόγηση με εκτροπή σε οπτικό κόμβο μεταγωγής πακέτου.

Το πεδίο του μήκους κύματος είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση της σύγκρουσης¹⁷. Τα πακέτα με το ίδιο μήκος κύματος που συγκρούονται, εκτός από ένα, μετατρέπονται σε μη χρησιμοποιούμενα μήκη κύματος μέσω ρυθμιζόμενων οπτικών μετατροπών μήκους κύματος (Tunable Wavelength Converters - TWC). Έτσι, κατανέμεται το φορτίο σε διάφορα κανάλια και εφαρμόζοντας στο δίκτυο σύγχρονο τρόπο λειτουργίας, η ανάγκη για οπτική αποθήκευση περιορίζεται ή πιθανώς εξαλείφεται. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να ενσωματωθεί, επίσης, σε ένα ασύγχρονο δίκτυο. Ωστόσο, αυτό απαιτεί περισσότερους ρυθμιζόμενους οπτικούς μετατροπείς μήκους κύματος, καθώς χρειάζεται ένας ρυθμιζόμενος οπτικός μετατροπέας μήκους κύματος (TOWC) για κάθε κανάλι μήκους κύματος σε ένα διακόπτη εισόδου. Στο σχήμα 1.15 παριστάνεται γραφικά η χρήση της μετατροπής μήκους κύματος για την επίλυση της σύγκρουσης οπτικών πακέτων. Τα πακέτα από τις εισόδους 1, 2 και 3 κατευθύνονται προς την έξοδο 1 στο ίδιο μήκος κύματος λ_1 . Όλα τα πακέτα προωθούνται στην ίδια έξοδο, αλλά σε δύο από αυτά έχει μεταβληθεί το μήκος κύματος (λ_2 και λ_3 αντίστοιχα).



Σχήμα 1.15 Δρομολόγηση με μεταβολή του μήκους κύματος σε οπτικό κόμβο μεταγωγής πακέτου.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η επίλυση των συγκρούσεων στο οπτικό επίπεδο είναι εφικτή και μάλιστα έχουμε διαθέσιμες τρεις διαστάσεις: το χρόνο (buffering), το χώρο (deflection routing) και το μήκος κύματος (wavelength conversion).

Η υλοποίηση συστημάτων επίλυσης των συγκρούσεων στο φυσικό επίπεδο βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο. Μέχρι στιγμής η μεγαλύτερη προσπάθεια έχει επικεντρωθεί σε υψηλότερα επίπεδα διαδυσκτίωσης με το σχεδιασμό πρωτοκόλλων για την πρόληψη συμφόρησης στους δρομολογητές. Πρωτόκολλα όπως τα Just-in-Time (JIT), Just-enough-Time (JET), Efficient Resource Reservation Protocol (ERVC), Ready-to-Go (RGVC) και το Efficient Burst Reservation Protocol (EBRP), σχεδιάστηκαν με κύρια λειτουργία τη δέσμευση πόρων από το δίκτυο για την ελάττωση της απώλειας πακέτων (packet loss). Η δέσμευση πόρων περιλαμβάνει μηχανισμούς σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων, εξασφάλιση συγκεκριμένης χωρητικότητας στα link μετάδοσης, καθώς και επαναμετάδοση της πληροφορίας σε περίπτωση απώλειας της σύνδεσης. Έτσι εξασκείται ο κατάλληλος έλεγχος ώστε η ζητούμενη χωρητικότητα να μην υπερβαίνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα σε κάθε link του δικτύου. Παρόλα αυτά, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας δεν μπορούν να εξασφαλίσουν υψηλά στάνταρ διαδυσκτίωσης χωρίς την κατάλληλη υποδομή φυσικού επιπέδου στους φωτονικούς δρομολογητές. Η ύπαρξη κυκλωμάτων τα οποία θα διαχειρίζονται τις περιπτώσεις των συγκρούσεων σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη για την απορρόφηση των συγκρούσεων μεταξύ πακέτων και την ορθή διάταξή τους στους φωτονικούς δρομολογητές.

Σε φυσικό επίπεδο η προσπάθεια μέχρι στιγμής αφορά την υλοποίηση στρατηγικής επίλυσης των συγκρούσεων ανάλογης με αυτή που χρησιμοποιείται στους ηλεκτρονικούς δρομολογητές - δηλαδή την υλοποίηση κυκλωμάτων αποθήκευσης της πληροφορίας. Η πραγματοποίηση όμως τέτοιας στρατηγικής μόνο απλή δεν είναι. Η απουσία οπτικής μνήμης RAM καθιστά ως μοναδική λύση τη χρήση FDLs για τη χρονική καθυστέρηση των πακέτων. Τα μειονεκτήματα στην προσπάθεια δημιουργίας ενός πρακτικού συστήματος βασισμένο σε FDLs προκύπτουν με μία απλή σύγκριση ενός FDL-based οπτικού συστήματος με τον CRS-1. Ένας 100 Tb/s CRS-1 (2.500 ports @ 40 Gb/s) προσφέρει 250 ms buffering/port (=10 Gb/port) δηλαδή συνολική buffering χωρητικότητα ίση με 25 Tb με τη χρήση RAM chips. Για την υλοποίηση αντίστοιχου οπτικού δρομολογητή το συνολικό μήκος ίνας που απαιτείται (αν θεωρήσουμε storage density 1 bit / mm) είναι 100 Gm, δηλαδή όσο η απόσταση μεταξύ γης – ήλιου! Με υποστήριξη από κατάλληλα πρωτόκολλα επικοινωνίας αποδεικνύεται ότι ένας οπτικός δρομολογητής μπορεί να λειτουργήσει και με 1 ms buffering/port δηλαδή ένα μήκος ίνας ίσο με 200 km/port και συνολικά 500 Mm, δηλαδή όσο η απόσταση γης – σελήνης! Στα παραπάνω προσθέστε και το γεγονός ότι οι μνήμες βασιζόμενες σε FDLs δεν είναι Random Access, άρα υπολείπονται και σε δυνατότητα προσπέλασης των αντίστοιχων ηλεκτρονικών RAM. Με αυτά τα δεδομένα είναι φανερό ότι πρακτικά φωτονικά συστήματα δρομολόγησης δεν μπορούν να υλοποιηθούν βασισμένα μόνο στην αποθήκευση πακέτων. Επιπρόσθετα κυκλώματα τα οποία μπορούν να επιτελέσουν επίλυση των συγκρούσεων σε εναλλακτικά πεδία (χώρος – χρόνος) είναι απαραίτητα για την πραγματοποίηση πρακτικών φωτονικών δρομολογητών.

Συμπερασματικά, αναφερόμενοι στην αρχιτεκτονική του σχήματος 1.5, τα κυκλώματα επίλυσης των συγκρούσεων είναι απαραίτητα για τη συμπλήρωση του παζλ της οπτικής πλατφόρμας δρομολόγησης. Επιθυμητά χαρακτηριστικά αυτών των κυκλωμάτων αποτελούν: η διαφάνεια στον τρόπο διαμόρφωσης και ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η υλοποίηση με μη-εξειδικευμένα φωτονικά κυκλώματα και τέλος η δυνατότητα ολοκλήρωσης είτε με III-V μονολιθική είτε με υβριδική silicon-based τεχνολογία.

1.7 Ο ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η εργασία είναι αφιερωμένη στην ανάπτυξη οπτικών κυκλωμάτων δρομολόγησης πληροφοριών, εστιάζοντας στο σύνθετο πρόβλημα των συγκρούσεων στους φωτονικούς δρομολογητές. Για την επίλυση του προβλήματος προτείνεται μία σειρά κυκλωμάτων για τη διαχείριση των συγκρούσεων οπτικών πακέτων, εκμεταλλευόμενοι όλα τα πιθανά πεδία “δράσης” (το πεδίο του μήκους κύματος, το πεδίο του χώρου και το πεδίο του χρόνου). Τα κυκλώματα μοντελοποιήθηκαν και υλοποιήθηκαν συνδυάζοντας υβριδικά ολοκληρωμένους οπτικούς διακόπτες, μετατροπείς μήκους κύματος και οπτικά flip-flops.

Συγκεκριμένα η πορεία της εργασίας έχει ως εξής:

1. Στο πρώτο στάδιο αναπτύχθηκε **θεωρητικό μοντέλο για διάταξη ανίχνευσης της περιβάλλουσας οπτικών πακέτων (Packet Envelope Detection – PED)** με χρήση οπτικών φίλτρων και οπτικών διακοπών. Βασικός σκοπός της προσομοίωσης ήταν ο σχεδιασμός μίας διάταξης με διαφάνεια λειτουργίας (transparency) τόσο στον τύπο διαμόρφωσης (modulation format) όσο και στο ρυθμό μετάδοσης (bit rate) των δεδομένων. Για αυτό το λόγο οι προσομοιώσεις περιελάμβαναν δοκιμές με σήματα διαμόρφωσης με επιστροφή (Return-to-Zero RZ) και χωρίς επιστροφή (Non-Return-to-Zero NRZ) στο μηδέν και σε ρυθμούς μετάδοσης 10 Gb/s και 40 Gb/s. Επίσης, μελετήθηκε και η δυνατότητα διασύνδεσης του κυκλώματος ανίχνευσης της περιβάλλουσας με υποσυστήματα χωρικής μεταγωγής (space switching) και μετατροπής μήκους κύματος (wavelength conversion) ώστε να εκτιμηθεί η δυνατότητα κατασκευής μεγαλύτερων κυκλωμάτων ικανών να εκτελέσουν πιο σύνθετες λειτουργίες.

2. Στο δεύτερο στάδιο έγινε η **πειραματική υλοποίηση του κυκλώματος ανίχνευσης της περιβάλλουσας** βάση της θεωρητικής μελέτης που προηγήθηκε. Οι βασικοί κανόνες για την υλοποίηση του κυκλώματος ήταν:

- Η διαφάνεια στον τύπο διαμόρφωσης
- Η διαφάνεια στη ρυθμοδότηση και η δυνατότητα για λειτουργία σε ρυθμό >100 Gb/s
- Η ευκολία στην υλοποίηση με χρήση εμπορικά διαθέσιμων κυκλωμάτων

- Η δυνατότητα για πλήρη ολοκλήρωση

Σε αυτά τα πλαίσια επιδείχτηκε πειραματικά διάταξη ανίχνευσης της περιβάλλουσας αποτελούμενης από παθητικό φίλτρο Fabry-Pérot και οπτικό διακόπτη. Στη συνέχεια η περιβάλλουσα χρησιμοποιήθηκε ως σήμα ελέγχου σε ένα μεταγωγέα MZI για τη χωρική μεταγωγή οπτικών πακέτων καθώς και ως σήμα εισόδου σε ένα μετατροπέα μήκους κύματος για τη μεταβολή του μήκους κύματος οπτικών πακέτων.

3. Στο τρίτο στάδιο έγινε η διασύνδεση όλων των λειτουργιών, οι οποίες μελετήθηκαν και πραγματοποιήθηκαν στο πρώτο και δεύτερο στάδιο, με σκοπό την επίδειξη ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος. Η συναρμολόγηση της διάταξης περιελάμβανε τη διασύνδεση του κυκλώματος ανίχνευσης της περιβάλλουσας, του χωρικού διακόπτη και του μετατροπέα μήκους κύματος με σκοπό την **πειραματική επίδειξη κυκλώματος ικανού να επιλύσει τις συγκρούσεις οπτικών πακέτων στο πεδίο του χώρου και του μήκους κύματος**. Το κύκλωμα λειτούργησε επιτυχώς για σύγχρονα δεδομένα, σε ρυθμούς 10 και 40 Gb/s και με NRZ και RZ τύπους διαμόρφωσης.

4. Στο τέταρτο στάδιο έγινε ο σχεδιασμός και η πειραματική υλοποίηση **κυκλώματος επίλυσης των συγκρούσεων για ασύγχρονα πακέτα δεδομένων**. Χρησιμοποιήθηκε κωδικοποίηση NRZ και ρυθμοί μετάδοσης 10 Gb/s. Για την επίτευξη ασύγχρονης λειτουργίας σχεδιάστηκε ειδικός μηχανισμός μανδάλωσης (latching operation) με τη χρήση οπτικών flip-flops. Εκτός από τα οπτικά flip-flops το κύκλωμα περιελάμβανε το κύκλωμα ανίχνευσης περιβάλλουσας, οπτικούς χωρικούς διακόπτες και μετατροπείς μήκους κύματος.

5. Στο τελευταίο στάδιο έγινε **ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση οπτικού συστήματος ανίχνευσης συγκρούσεων και αποθήκευσης οπτικών πακέτων για αμιγώς οπτικούς δρομολογητές πακέτων**. Το σύστημα περιλαμβάνει οπτικές πύλες για την υλοποίηση λογικών πράξεων XOR και AND και ένα buffering κύκλωμα αποτελούμενο από χωρικούς διακόπτες και μία γραμμή καθυστέρησης. Το κύκλωμα σχεδιάστηκε για τον αμιγώς οπτικό δρομολογητή LASAGNE, η υλοποίηση του οποίου αποτέλεσε το κύριο αντικείμενο του ομώνυμου ερευνητικού προγράμματος (IST-LASAGNE).¹⁸

1.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. E. Kehayas et al., "40-Gb/s All-Optical Processing Systems using Hybrid Photonic Integration Technology", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 24, No. 12, Dec. 2006.
2. J. M. Martinez et al., "All-optical address recognition scheme for label-swapping networks," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, no. 1, pp. 151–153, Jan. 2006.
3. Y. Liu et al., "Demonstration of a Variable Optical Delay for a Recirculating Buffer by Using All-Optical Signal Processing," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, pp. 1748-1750, Jul. 2004.
4. S. Rangarajan, H.N. Poulsen, D.J. Blumenthal, "All-optical packet compression of variable length packets from 40 to 1500 B using a gated fiber loop," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, pp. 322-324, Jan. 2006.
5. P. Bakopoulos, D. Tsiokos, H. Avramopoulos, A. Poustie and G. Maxwell, " Jitter Reduction in a 40 Gb/s All-Optical Packet-Mode 3R Regenerator Using Integrated MZI-SOA Switches", paper We 1.3.4., European Conference on Optical Communications (ECOC) 2006, Cannes, France.
6. B. Xiang, Z. Zhu, H. Yang, W. Jiang, D. L. Harris, K. Ikezawa, R. Umeda, and S. J. B. Yoo, "First Field Trial of OLS Network Testbed with All-Optical Contention Resolution of Asynchronous, Variable-Length Optical Packets," in Technical Digest of IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, paper no. OMJ6, 2007.
7. A. Al Amin et al., "40/10Gbps Bit-rate Transparent Burst Switching and Contention Resolving Wavelength Conversion in an Optical Router Prototype", post-deadline paper Th4.1.6, European Conference on Optical Communication (ECOC) 2006, Cannes, France.
8. L. Stampoulidis, et al.: "Enabling Tb/s Photonic Routing", JSTQE, vol. 14, pp. 849-860, May/June 2008.
9. J. M. Martinez et al., "All-optical address recognition scheme for label-swapping networks," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, no. 1, pp. 151–153, Jan. 2006.

-
10. 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", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 24, No. 8, pp. 2967-2977, pp. 2993-3011, Aug. 2006.
 11. Jürgen Gripp, "The IRIS Optical Packet Router: A DARPA / MTO Project", International Workshop on the Future of Optical Networking (FON), Optical Fiber Communications Conference (OFC 2006), Anaheim, USA.
 12. J. M. Martinez et al, "All-Optical Processing Based on a Logic XOR Gate and a Flip-Flop Memory for Packet-Switched Networks," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, no. 17, pp. 1316–1318, Sep. 2007.
 13. *online: muffins.cti.gr*
 14. G. Maxwell, "Low-cost hybrid photonic integrated circuits using passive alignment techniques", invited paper MJ2, IEEE-LEOS Annual Meeting, Montreal, Canada (2006).
 15. R. S. Tucker, "The Role of Optics and Electronics in High-Capacity Routers", J. Lightwave Technol., Vol 26, No12, Dec 2006, pp. 4655-4673.
 16. Abdullah Al Amin, et al. "Demonstration of Deflection Routing With Layer-2 Evaluation at 40 Gb/s in a Three-Node Optical Burst Switching Testbed," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 3, pp. 178–180, Feb. 2008.
 17. S. Rangarajan, et. al., "All-Optical Contention Resolution With Wavelength Conversion for Asynchronous Variable-Length 40 Gb/s Optical Packets," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, pp. 689-691, Feb. 2004.
 18. F. Ramos, et al., "IST-LASAGNE: Towards All-Optical Label Swapping Employing Optical Logic Gates and Optical Flip-Flops", Journal of Lightwave Technology, Vol. 23 , No. 10 , October 2005.

2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ

«Καὶ ἔγένετο PED»

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο 2^ο Κεφάλαιο περιγράφεται ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση του κυκλώματος ανίχνευσης της περιβάλλουσας οπτικών πακέτων (Packet Envelope Detection - PED). Με το κύκλωμα PED μπορούμε να προσδιορίσουμε την ύπαρξη ή όχι ενός οπτικού πακέτου σε ένα συγκεκριμένο timeslot, προσδιορίζοντας τόσο το χρονικό του ίχνος (δηλαδή το ακριβές χρονικό σημείο έναρξής του) όσο και το μήκος του. Οι λειτουργίες αυτές μας προσφέρουν χρήσιμη πληροφορία για τη μεταγωγή ενός πακέτου, καθώς και την ανίχνευση πιθανών συγκρούσεων με άλλα πακέτα στις εξόδους ενός δρομολογητή. Οι απαιτήσεις από ένα PED κύκλωμα αφορούν:

- δυνατότητα λειτουργίας με πολλαπλά formats και ρυθμούς μετάδοσης (format and bit rate transparency).
- παραγωγή σημάτων τα οποία να έχουν ίδιο μέγεθος με τα πακέτα δεδομένων ώστε να μειώνονται οι απαιτήσεις σε guardbands.
- παραγωγή PED σημάτων υψηλής ποιότητας, τα οποία να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σήματα ελέγχου σε οπτικούς διακόπτες ή probe σήματα σε μετατροπείς μήκους κύματος.
- λειτουργία με χαμηλές απαιτήσεις σε οπτική αλλά και ηλεκτρική ισχύ.
- υλοποίηση με μη εξειδικευμένα οπτικά κυκλώματα.
- δυνατότητα ολοκλήρωσης σε μεμονωμένο φωτονικό chip.

2.2. ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑΣ

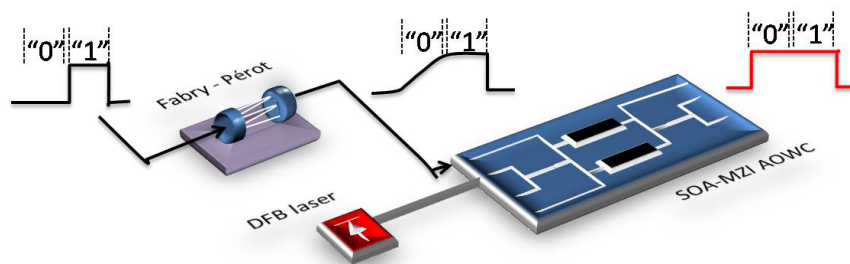
Το κύκλωμα ανίχνευσης περιβάλλουσας βασίζεται στη χρήση ενός και μόνο οπτικού μετατροπέα μήκους κύματος (all-optical wavelength converter – AOWC). Στην κλασσική λειτουργία ενός AOWC, ένα CW σήμα χρησιμοποιείται ως σήμα εισόδου (probe signal), ενώ τα δεδομένα (ή πακέτα δεδομένων) χρησιμοποιούνται ως σήματα ελέγχου (pump/control) signal. Μέσω του φαινομένου ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross Phase Modulation – XPM) το σήμα ελέγχου “εγγράφεται” στο CW σήμα εισόδου και εμφανίζεται σε μία από τις θύρες εξόδου του AOWC. Στη λειτουργία μετατροπής μήκους κύματος οι SOAs του AOWC θα πρέπει να δουλεύουν “full-speed”, ώστε ο χρόνος ανάκαμψης τους να μην προκαλεί φαινόμενα διασυμβολικής παρεμβολής μεταξύ διαδοχικών παλμών. Για αυτό το σκοπό, τα ρεύματα έκχυσης των SOAs είναι τα μέγιστα δυνατά (συνήθως της τάξης των 300-500mA) για την ταχύτερη αναστροφή των φορέων στον ενισχυτή. Επίσης, η ισχύς του CW σήματος είναι η μέγιστη δυνατή διότι η χρήση “CW holding beams” επιταχύνει τους χρόνους ανάκαμψης των SOAs.

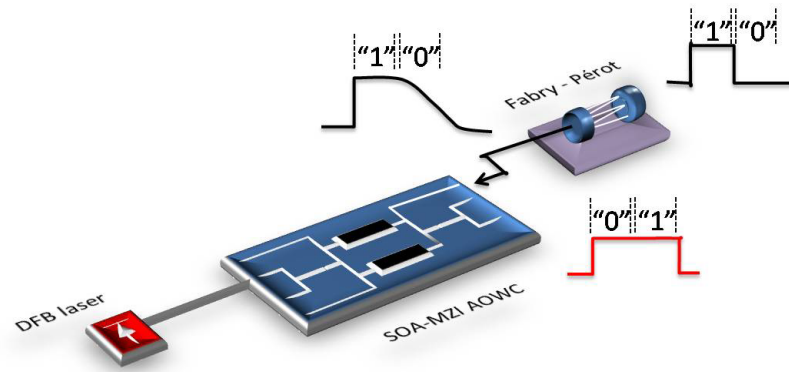
Στην περίπτωση όμως της ανίχνευσης περιβάλλουσας επιζητούμε εντελώς διαφορετική λειτουργία από τον AOWC. Στην πραγματικότητα θέλουμε να επιτύχουμε μέγιστη διασυμβολική παρεμβολή στο σήμα εξόδου, η οποία τελικά να οδηγεί στην

“καταστροφή” των οπτικών παλμών και τη δημιουργία ενός συνεχούς οπτικού σήματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε δύο βασικές τεχνικές:

- χρήση οπτικού κυκλώματος με “μνήμη”. Ένα οπτικό φίλτρο Fabry-Pérot χρησιμοποιείται για να ισοσταθμίσει την ισχύ του σήματος πληροφορίας αποδίδοντας μέρος της ισχύος κάθε εισερχόμενου παλμού σε επόμενες χρονικές στιγμές. Με αυτήν την τεχνική στα σημεία στα οποία έχουμε “0” στο πακέτο πληροφορίας (και στα οποία ο SOA έχει τη δυνατότητα να ανακάμψει) εμφανίζονται παλμοί οι οποίοι θα διατηρήσουν τον κορεσμό του SOA σε υψηλά επίπεδα.
- περιορισμένο ρεύμα έκχυσης. Το ρεύμα έκχυσης των SOAs, που διατηρεί τη συγκέντρωση των φορέων, διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (50-150 mA). Στην περίπτωση που η τροφοδοσία παραμένει σε χαμηλά επίπεδα η άντληση μέσω της έκχυσης του ρεύματος δεν προλαβαίνει να επαναδιεγείρει τους απαιτούμενους φορείς για την ενίσχυση των φωτονίων. Επομένως, όσο λιγότεροι οι φορείς τόσο μεγάλος ο χρόνος ανάκτησης κέρδους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες ο ενισχυτής μπορεί να χαρακτηριστεί «αργός», μια κατάσταση αναγκαία για τη δημιουργία της περιβάλλουσας των οπτικών πακέτων.

Το σχήμα 2.1 απεικονίζει τη διάταξη PED σε δύο συνδεσμολογίες: την ομόρροπη, στην οποία pump και probe εισέρχονται με κοινή φορά μέσα στον AOWC και την αντίρροπη στην οποία pump και probe εισέρχονται με αντίθετη φορά μέσα στον AOWC.





Σχήμα 2.1 Διάταξη ανίχνευσης περιβάλλουσας σε ομόρροπη και αντίρροπη συνδεσμολογία.

Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν αφορούν την ανίχνευση περιβάλλουσας πακέτων NRZ στα 10 Gb/s και πακέτων RZ στα 40 Gb/s. Αυτοί οι τύποι διαμόρφωσης επιλέχθηκαν διότι ήταν διαθέσιμοι στο εργαστήριο, οπότε και ήταν δυνατή μετέπειτα η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Επίσης μελετήθηκε και η καταλληλότητα του σήματος PED για πραγματοποίηση μεταγωγής και μετατροπής του μήκους κύματος οπτικών δεδομένων. Παρουσιάζονται και αποτελέσματα οπτικής χωρικής μεταγωγής και μετατροπής μήκους κύματος σε οπτικούς διακόπτες και AOWCs χρησιμοποιώντας τα σήματα περιβάλλουσας ως probes καθώς και ως σήματα ελέγχου. Οι προσομοιώσεις έγιναν με χρήση του πακέτου μοντελοποίησης οπτικών κυκλωμάτων *VPI Transmission Maker*.

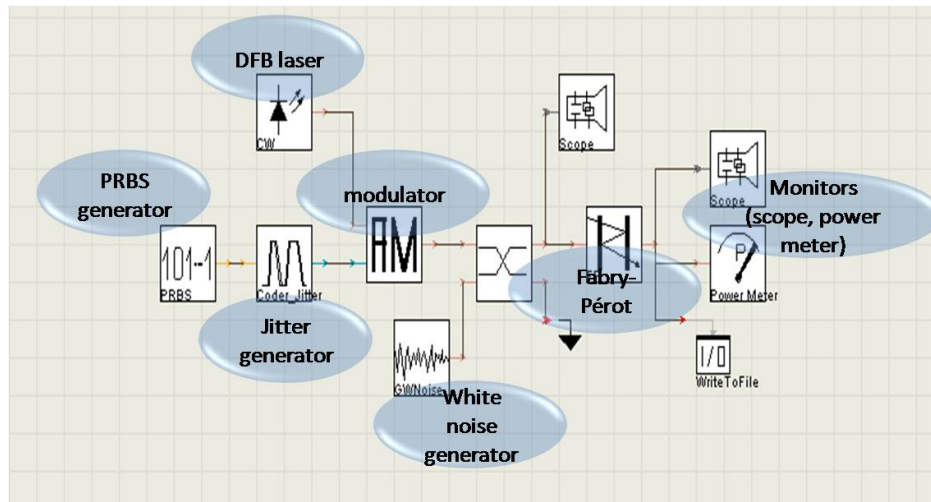
2.3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ PED ΣΤΑ 10 Gb/s NRZ

2.3.1. Πλατφόρμα μοντελοποίησης

Η διάταξη του VPI που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τρία μέρη:

- τη γεννήτρια του σήματος δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει και θόρυβο.
- το Fabry-Pérot φίλτρο.
- το SOA-MZI AOWC.

Το μοντέλο χωρίστηκε σε δύο μέρη: στο πρώτο μέρος μελετήθηκε η παραγωγή των δεδομένων και η επίδραση της διέλευσής τους από το Fabry-Pérot και στο δεύτερο μέρος μελετήθηκε αποκλειστικά η λειτουργία του AOWC, εστιάζοντας στις απαραίτητες παραμέτρους για την παραγωγή PED σημάτων.



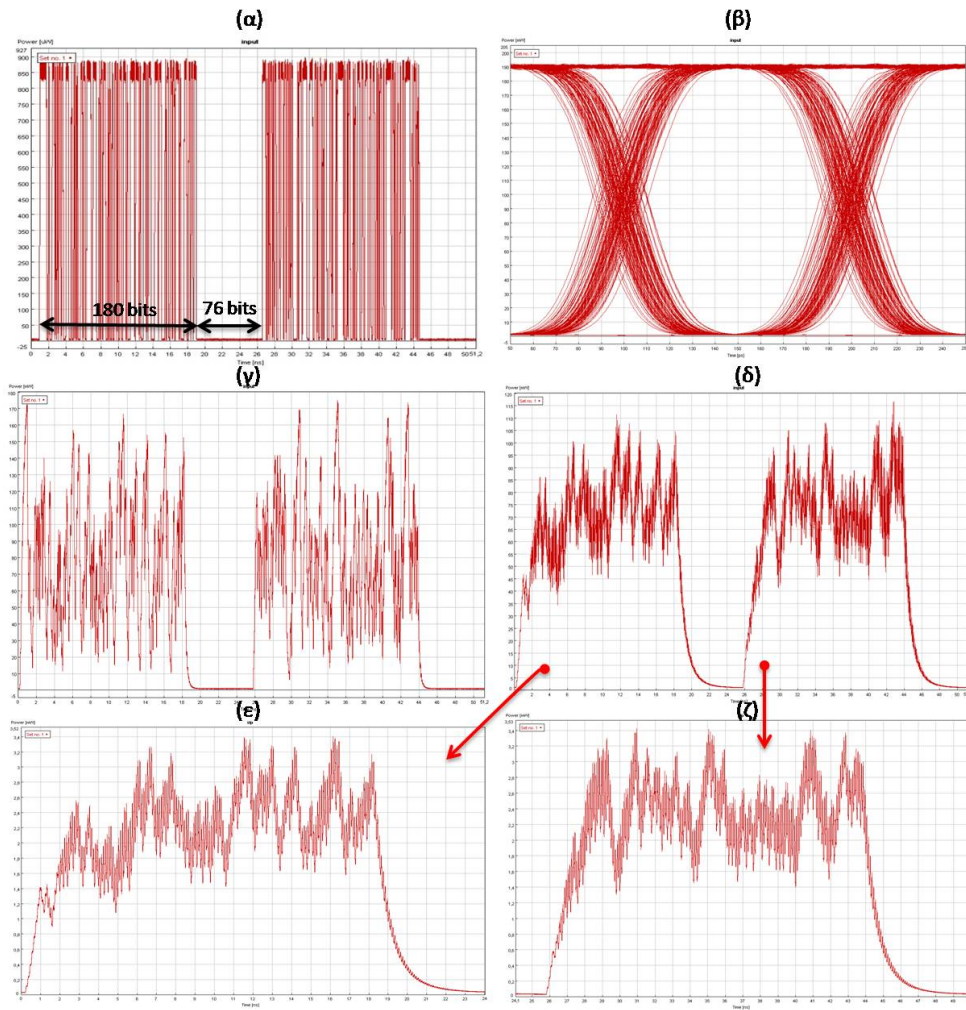
Σχήμα 2.2 1^ο μέρος μοντελοποίησης: μοντέλο VPI για την προσομοίωση της γεννήτριας δεδομένων και του Fabry-Pérot.

Το σχήμα 2.2. απεικονίζει το πρώτο μέρος της μοντελοποίησης. Στο σήμα δεδομένων έχουμε προσθέσει, θόρυβο ώστε να ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες μετάδοσης, οπότε και οι παλμοί εμφανίζουν χρονικό jitter όπως ακριβώς και οι παλμοί που παράγονται από μία γεννήτρια δεδομένων. Το χρονικό jitter που παρουσιάζει το σήμα έχει μέση τιμή 1ps και το noise density του προστιθέμενου θορύβου είναι 20×10^{-18} W. Επίσης ο λόγος αντίθεσης του διαμορφωτή θεωρήθηκε 23 dB ώστε να προσομοιώνει το extinction εμπορικά διαθέσιμων 10 Gb/s διαμορφωτών. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η ισχύς του σήματος δεδομένων και η λεπτότητα (finesse) του Fabry-Pérot φίλτρου. Ο πίνακας 2.1 απεικονίζει τα χαρακτηριστικά του σήματος δεδομένων:

Πίνακας 2.1 Παράμετροι του σήματος δεδομένων και του φίλτρου Fabry-Pérot.

Παράμετρος	Τιμή
Ρυθμοδότηση (Gb/s)	10
Περίοδος σήματος (bits)	512
Τύπος διαμόρφωσης	NRZ
Μήκος κύματος φέρουσας (nm)	1553.59
Οπτική Ισχύς κορυφής (mW)	400
Jitter rms (ps)	1
Noise density (W)	20×10^{-18}
Extinction (dB)	23
Fabry-Pérot FSR (GHz)	10
Fabry-Pérot Finesse	43.28

Η μορφή του σήματος δεδομένων φαίνεται στο σχήμα 2.3. Τα δεδομένα διέρχονται από το οπτικό φίλτρο Fabry-Pérot, το οποίο έχει ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) ίση με το ρυθμό μετάδοσης (10GHz) ενώ ο δείκτης λεπτότητας (Finesse) του φίλτρου μεταβάλλεται κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Ο ρόλος του φίλτρου είναι να “αποθηκεύει” οπτική ενέργεια και να την αποδίδει τμηματικά στα bit slots του πακέτου. Η λεπτότητα του φίλτρου μεταβλήθηκε σε ένα εύρος τιμών ($F= 61,24$, $F=50,76$, $F=43,28$, $F=37,6$, $F=29,8$, $F=19,31$, $F=14,05$ και τέλος $F=8,76$).



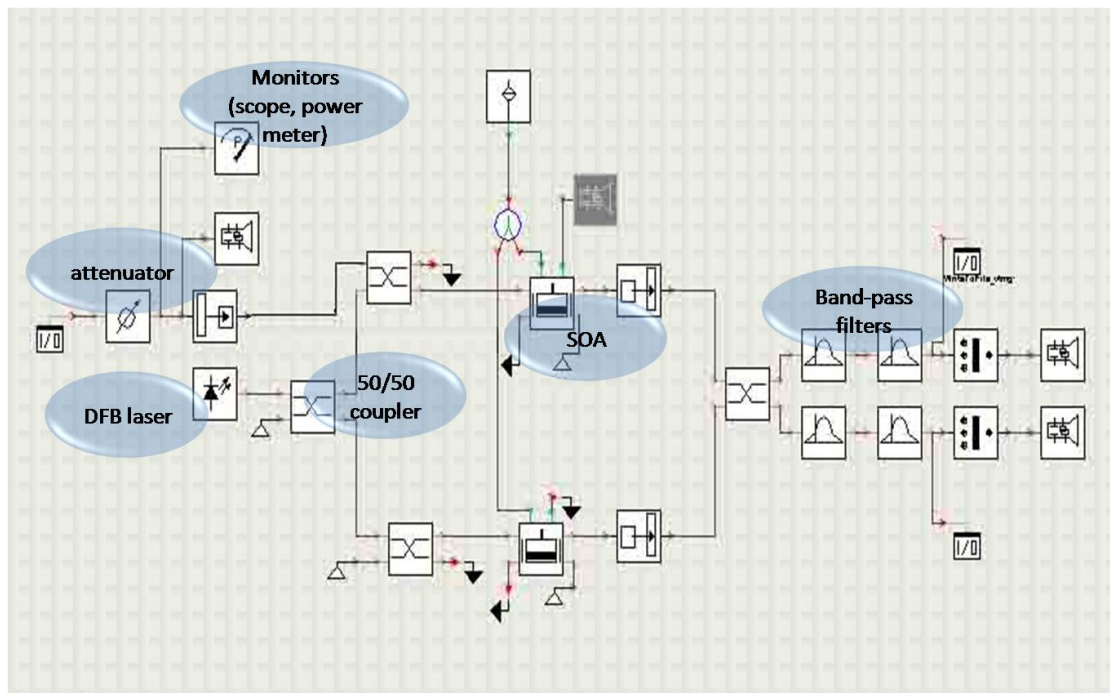
Σχήμα 2.3 Αποτελέσματα: (α) χρονικό ίχνος (*pulse trace*) και (β) διάγραμμα ματιού του σήματος δεδομένων, (γ) χρονικό ίχνος του σήματος στην έξοδο του FPF με *finesse* 8.76 και δ) χρονικό ίχνος του σήματος στην έξοδο του FPF με *finesse* 43.28, ε), ζ) χρονικό ζουμ των πακέτων στην έξοδο του FPF.

Από τις προσομοιώσεις παρατηρήθηκε ότι ικανοποιητικά αποτελέσματα προέκυψαν για τιμές μεταξύ $F = 61,24$ και $F = 29,8$. Συγκεκριμένα η ιδανική συμπεριφορά παρατηρήθηκε για $F = 43,28$. Για αυτήν την τιμή παρατηρήθηκε ικανοποιητική αύξηση της διαμόρφωσης εντός των πακέτων με χαμηλούς χρόνους ανύψωσης και σβέσης.

Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις επόμενες υποενότητες ελήφθησαν για αυτήν την τιμή λεπτότητας του Fabry-Pérot φίλτρου. Η μέση ισχύς στην είσοδο του Fabry-Pérot μετρήθηκε ίση με 49,16 mW. Πριν την είσοδο στον AOWC προσομοιώθηκε οπτικός εξασθενητής ώστε να ρυθμίζεται η οπτική ισχύς στα επιθυμητά επίπεδα.

2.3.2. Αποτελέσματα ανίχνευσης περιβάλλουσας για ομόρροπη και αντίρροπη συνδεσμολογία

Η διάταξη σε ομόρροπη συνδεσμολογία της προσομοίωσης για την ανίχνευση της περιβάλλουσας στο VPI φαίνεται στο σχήμα 2.4. Το σήμα ελέγχου όπως προέκυψε μετά την διέλευσή του από το Fabry Perot φίλτρο εισέρχεται από τη θύρα ελέγχου (control port) στον AOWC ενώ στην είσοδο μετατροπέα συνδέεται το CW σήμα.



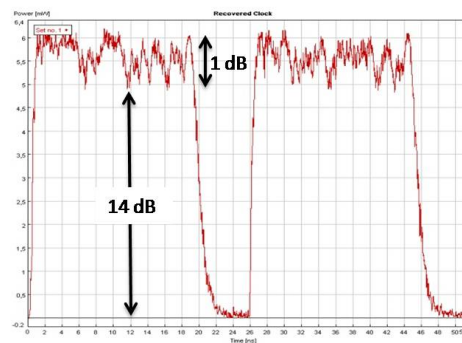
Σχήμα 2.4 2^ο μέρος μοντελοποίησης: μοντέλο VPI για την προσομοίωση του AOWC σε ομόρροπη συνδεσμολογία.

Το σήμα ελέγχου είναι στα 1553.59 nm ενώ το CW σήμα έχει συχνότητα 192.5 THz (1558.4 nm). Λόγω της κοινής φοράς των δύο σημάτων, σε κάθε έξοδο του AOWC έχουν τοποθετηθεί δύο ζωνοπερατά οπτικά φίλτρα για την απόρριψη του σήματος ελέγχου. Τα φίλτρα είναι συντονισμένα στην κεντρική συχνότητα του CW (192.5 THz) με εύρος 50 GHz (0.4 nm). Τα μεγέθη που μεταβλήθηκαν κατά την προσομοίωση είναι η ισχύς του σήματος ελέγχου, η ισχύς του σήματος εισόδου και το ρεύμα έκχυσης των ενισχυτών SOAs του AOWC ώστε να προκύψει στην έξοδο της διάταξης το βέλτιστο σήμα περιβάλλουσας. Το σχήμα 2.5 απεικονίζει το βέλτιστο αποτέλεσμα στις δύο θύρες

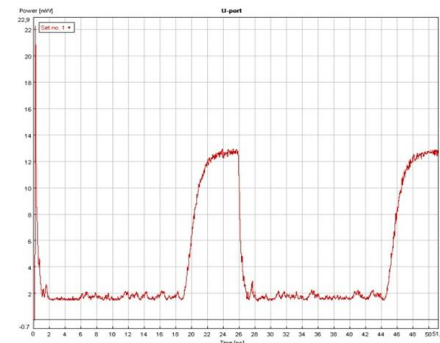
εξόδου του AOWC. Ο πίνακας 2.2 απεικονίζει τις βασικές παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά ποιότητας της ανακτώμενης περιβάλλουσας για την επιτυχημένη λειτουργία του κυκλώματος:

Πίνακας 2.2 Παράμετροι κυκλώματος AOWC και ποιοτικά χαρακτηριστικά του σήματος PED.

Παράμετρος	Τιμή
Ισχύς σήματος εισόδου (CW) (mW)	0.5
Ισχύς σήματος ελέγχου (έξοδος FPF) (mW)	1.55
Μήκος κύματος CW (nm)	1558.4
Ρεύμα έκχυσης (mA)	150
Λόγος σβέσης περιβάλλουσας (extinction ratio) (dB)	14
Κυμάτωση σήματος στην έξοδο (dB)	1



(α)



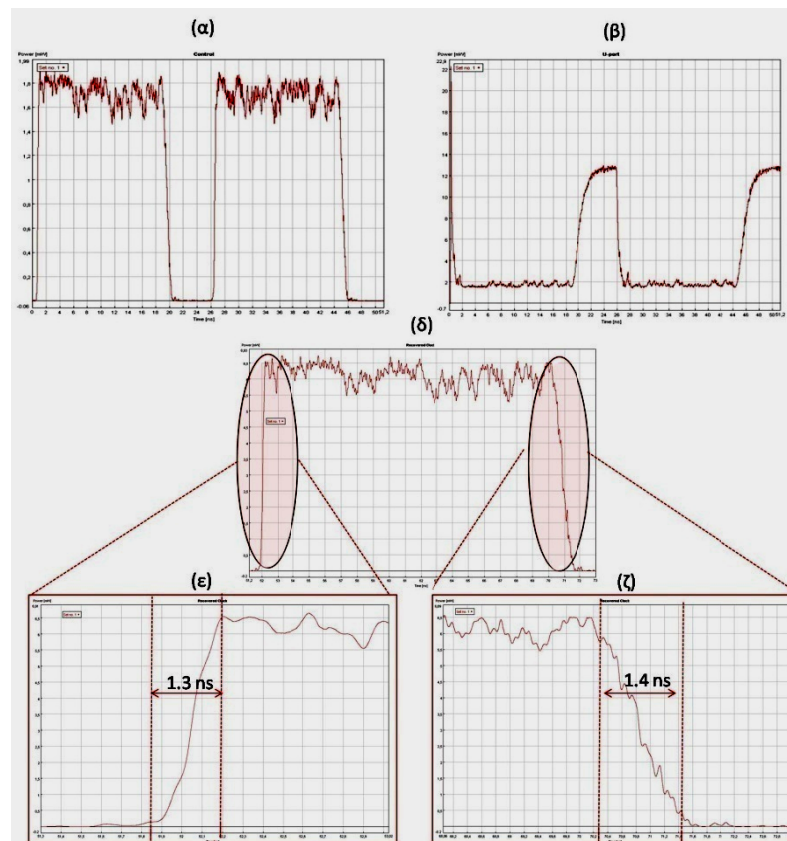
(β)

Σχήμα 2.5 Αποτελέσματα: α) περιβάλλουσα και β) ανάστροφη περιβάλλουσα στις δύο θύρες εξόδου του AOWC για ομόρροπη συνδεσμολογία.

Η ισχύ κορυφής της περιβάλλουσας μετρήθηκε στα 6 mW ενώ για την ανάστροφη περιβάλλουσα η ισχύς έχει ελάχιστη τιμή αντί του μηδενός τα 2 mW και μέγιστη τιμή στην κορυφή της τα 12 mW. Η εμφάνιση υπόβαθρου στην έξοδο με την ανάστροφη περιβάλλουσα συμβαίνει επειδή στους δύο κλάδους του AOWC οι SOAs δεν έχουν το ίδιο κέρδος όταν το συμβολόμετρο λειτουργεί στην κατάσταση ON, (δηλαδή όταν έχουμε

σήμα ελέγχου), με αποτέλεσμα η ανααιρετική συμβολή στην έξοδο να μην είναι πλήρης. Σημαντικά στοιχεία για το σήμα περιβάλλουσας είναι η απουσία υποβάθρου, ο μεγάλος λόγος σβέσης (>13 dB) και η διατήρηση της διαμόρφωσης σε επίπεδα <1 dB.

Στο σχήμα 2.6 δίνονται τα αποτελέσματα της διάταξης σε αντίρροπη συνδεσμολογία.

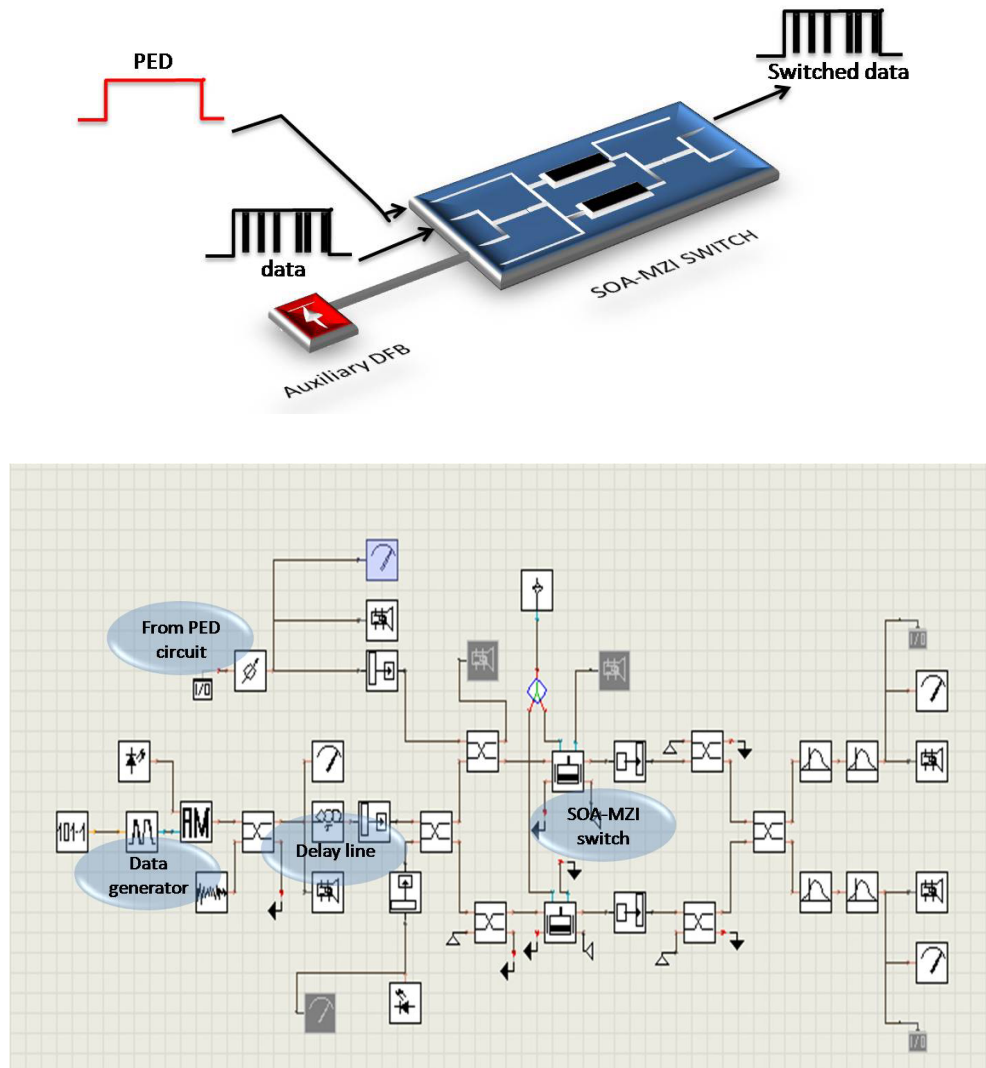


Σχήμα 2.6 Αποτελέσματα: α) περιβάλλουσα και β) ανάστροφη περιβάλλουσα στις δύο θύρες εξόδου του AOWC για αντίρροπη συνδεσμολογία, (δ) χρονικό ζουμ στην πρώτη περιβάλλουσα, (ε), (ζ) χρονικό ζουμ στην ανύψωση και σβέση της περιβάλλουσας.

Και στην περίπτωση αυτή η κυμάτωση που εμφανίζεται στην περιβάλλουσα δεν υπερβαίνει τα 0,7 dB. Επίσης ο χρόνος ανύψωσης και σβέσης της περιβάλλουσας υπολογίστηκε σε 1.3 και 1.4 ns αντίστοιχα (σχ. 2.6). Πλεονέκτημα έχει πάντως η αντίρροπη έναντι της ομόρροπης συνδεσμολογίας καθώς σε πειραματικό επίπεδο δε χρειάζεται να τοποθετηθούν στην έξοδο του AOWC επιπλέον φίλτρα για την απόρριψη του σήματος ελέγχου. Επιπλέον απαιτείται σε αυτή την συνδεσμολογία χαμηλότερη τιμή ισχύος για το σήμα ελέγχου.

2.3.3. Αποτελέσματα χωρικής μεταγωγής με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου

Σκοπός είναι να μελετήσουμε τη δυνατότητα χωρικής μεταγωγής πακέτων σε οπτικό διακόπτη SOA-MZI με χρήση της ανακτημένης περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου. Το σχήμα 2.7 απεικονίζει τη βασική διάταξη και το αντίστοιχο μοντέλο VPI.



Σχήμα 2.7 Διάταξη και μοντέλο VPI για την προσομοίωσης χωρικής μεταγωγής με χρήση περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου.

Τα δεδομένα εισέρχονται από τη θύρα εισόδου του SOA-MZI σε συχνότητα φέρουσας 193.1 THz (1553.59 nm). Το σήμα αυτό παρουσιάζει ίδια χαρακτηριστικά με το σήμα που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της περιβάλλουσας (βλ. πίνακα 2.1). Το σήμα

ελέγχου είναι το σήμα της περιβάλλουσας που προέκυψε από τη διαδικασία εξαγωγής της περιβάλλουσας (βλ. πίνακα 2.2). Για τον κορεσμό των SOAs και τη μείωση του θορύβου στα κενά διαστήματα των πακέτων, χρησιμοποιείται CW σήμα με συχνότητα 194.1 THz, (1545.59 nm). Με τη διατήρηση του κορεσμού των SOAs αποφεύγεται επίσης και η εμφάνιση υπερπήδησης (overshoot) κατά την είσοδο των πρώτων bits των πακέτων. Τέλος στις δύο εξόδους του SOA-MZI έχουν τοποθετηθεί σε σειρά δύο φίλτρα συντονισμένα στην κεντρική συχνότητα των δεδομένων και με εύρος 100 GHz. Οι μορφές των σημάτων εισόδου και ελέγχου στο διακόπτη φαίνονται στο σχήμα 2.8 α) και β). Η περιβάλλουσα φορτώνεται από τα αρχεία στα οποία είχαν αποθηκευτεί τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ανίχνευσης της περιβάλλουσας (βλ. σχήμα 2.6).

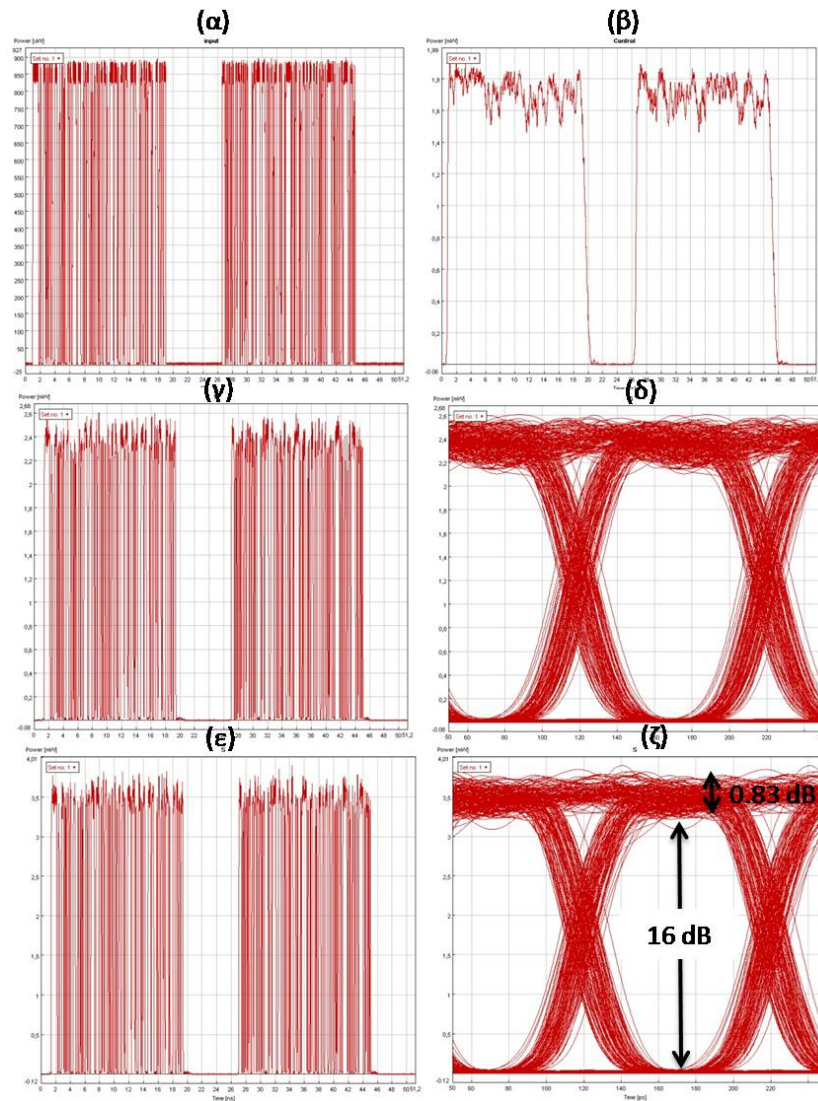
Κατά την προσομοίωση υπολογίστηκαν οι απαραίτητες τιμές ισχύος των σημάτων δεδομένων, ελέγχου και του βοηθητικού σήματος, ενώ μεταβλήθηκε το ρεύμα έκχυσης των SOAs και η καθυστέρηση του σήματος δεδομένων σε σχέση με το σήμα ελέγχου.

Πίνακας 2.3 Παράμετροι λειτουργίας του κυκλώματος χωρικής μεταγωγής με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου.

Παράμετρος	Τιμή
Ισχύς σήματος εισόδου (δεδομένα) (mW)	0.345
Ισχύς σήματος ελέγχου (PED) (mW)	1.25
Ισχύς βοηθητικού CW (mW)	1.1
Ρεύμα έκχυσης (mA)	200
Λόγος αντίθεσης μεταξύ των εξόδων του διακόπτη (extinction ratio) (dB)	9.55
Χρονική καθυστέρηση μεταξύ input και control (ns)	1
Διαμόρφωση πλάτους σήματος εξόδου (dB)	0.83
Eye opening σήματος εξόδου (dB)	16

Στον πίνακα 2.3 δίνονται οι ιδανικές παράμετροι λειτουργίας του κυκλώματος χωρικής μεταγωγής με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου. Η χρονική καθυστέρηση του 1 ns μεταξύ σήματος εισόδου και ελέγχου αντιστοιχεί στο χρόνο ανύψωσης του σήματος της περιβάλλουσας. Το σήμα εισόδου καθυστερείται κατά 1 ns ώστε τα πρώτα bit του πακέτου δεδομένων να συμπέσουν χρονικά με σημείο στο οποίο η περιβάλλουσα

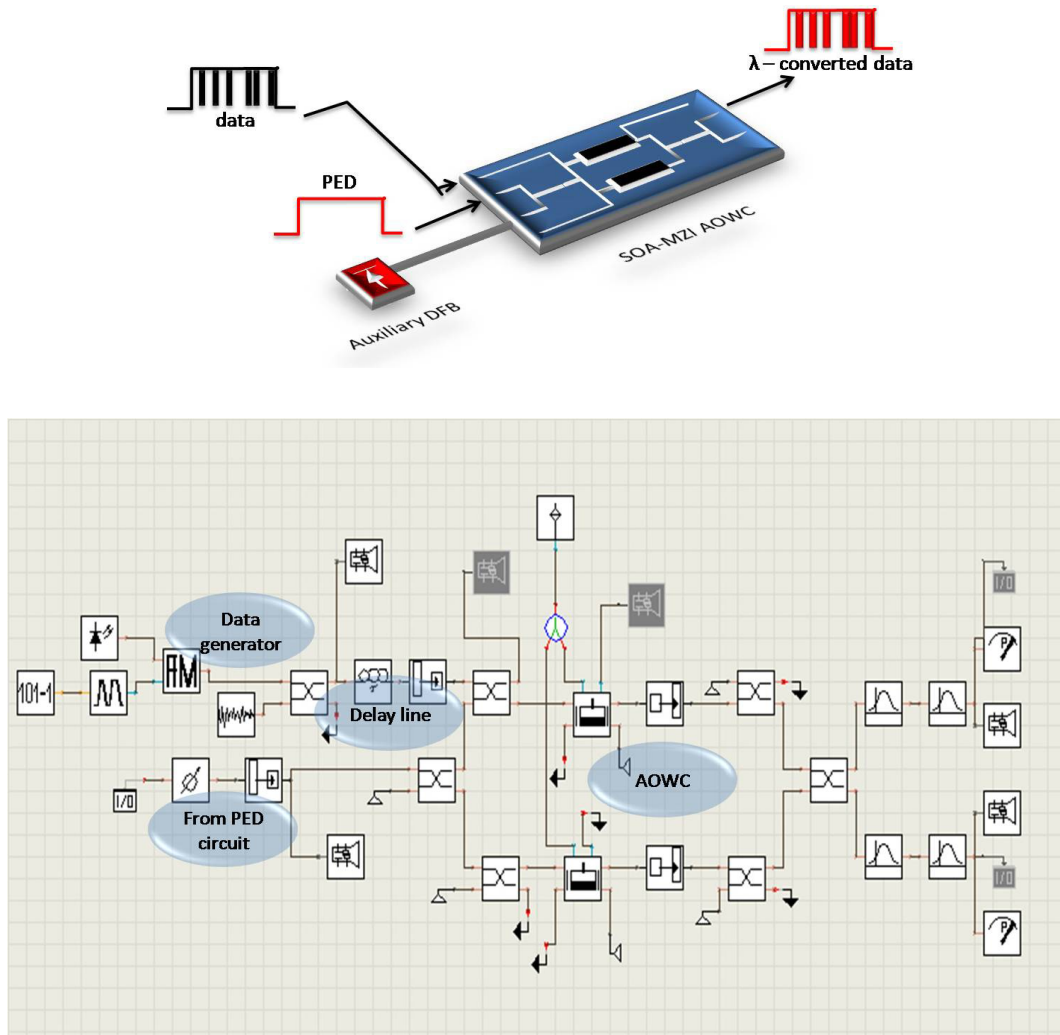
εμφανίζει σταθερή στάθμη ισχύος. Το σχήμα 2.8 απεικονίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ενδεικτικά παρουσιάζονται αποτελέσματα στην έξοδο του SOA-MZI διακόπτη για δύο τιμές ρεύματος έκχυσης 200 και 300 mA. Χαρακτηριστικό της καλής ποιότητας του σήματος εξόδου αποτελεί το μεγάλο άνοιγμα ματιού (eye opening) (16 dB) καθώς και η χαμηλή διαμόρφωση πλάτους (<1 dB).



Σχήμα 2.8 Αποτελέσματα: α) Χρονικό ίχνος σήματος εισόδου στο διακόπτη SOA-MZI, β) χρονικό ίχνος σήματος ελέγχου στο διακόπτη SOA-MZI, γ), δ) Χρονικό ίχνος και διάγραμμα ματιού σήματος εξόδου στο διακόπτη SOA-MZI για ρεύμα έκχυσης 200 mA, ε), ζ) Χρονικό ίχνος και διάγραμμα ματιού σήματος εξόδου στο διακόπτη SOA-MZI για ρεύμα έκχυσης 300 mA.

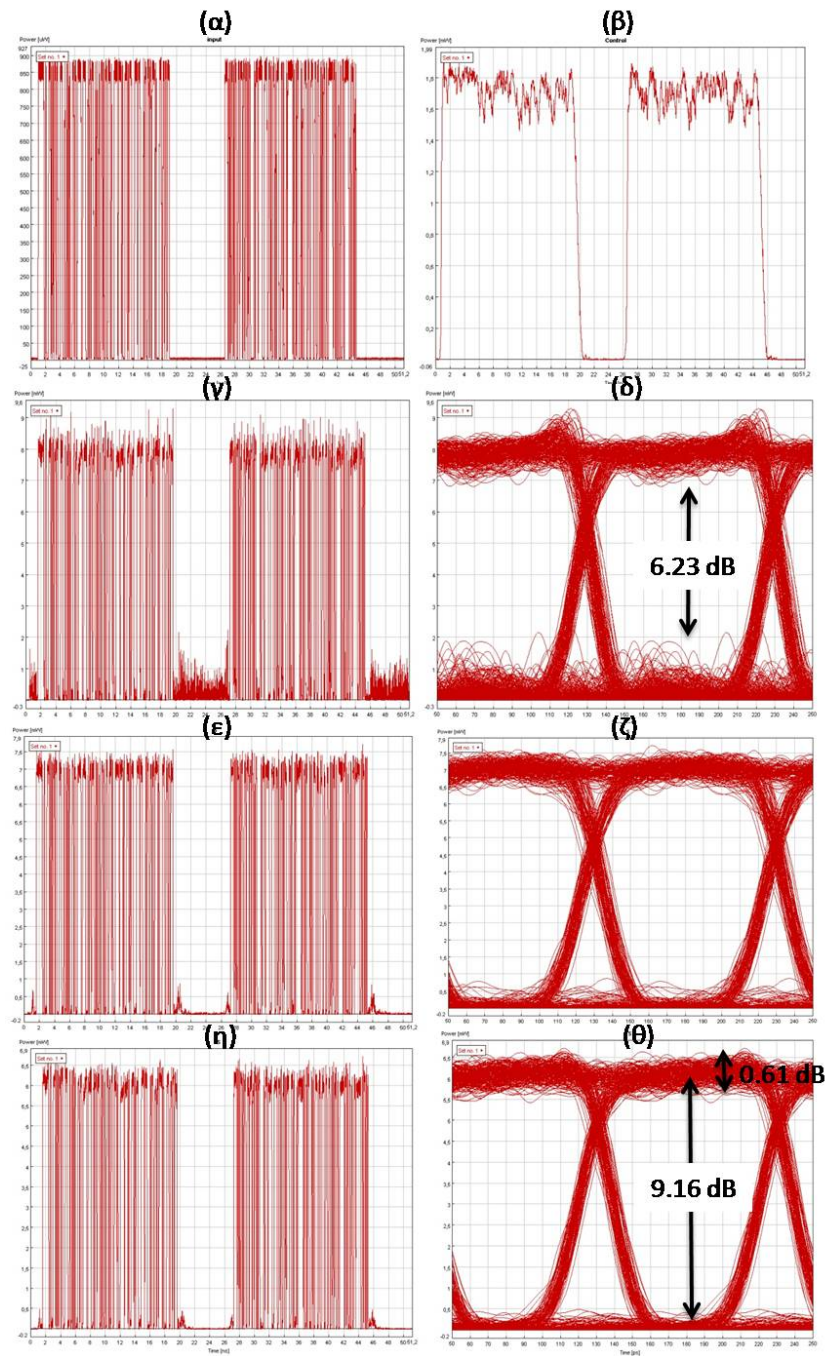
2.3.4. Αποτελέσματα μετατροπής μήκους κύματος με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου

Σκοπός είναι να μελετήσουμε τη δυνατότητα μετατροπής του μήκους κύματος πακέτων σε AOWC με χρήση της ανακτημένης περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου (probe). Το σχήμα 2.9 απεικονίζει τη βασική διάταξη και το αντίστοιχο μοντέλο VPI.



Σχήμα 2.9 Διάταξη προσομοίωσης της μετατροπής μήκους κύματος σε ομόρροπη συνδεσμολογία.

Το σήμα πληροφορίας (1553.59 nm) χρησιμοποιείται αυτή τη φορά ως σήμα ελέγχου και έχει τα χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στον πίνακα 2.1. Το σήμα της περιβάλλουσας χρησιμοποιείται ως είσοδος στον AOWC (βλ. πίνακα 2.2). Επίσης χρησιμοποιήθηκε βοηθητικό σήμα CW για τον κορεσμό των SOAs σε συχνότητα 194.1 THz (1545.59 nm).



Σχήμα 2.10 Αποτελέσματα: α) Χρονικό ίχνος σήματος ελέγχου στον AOWC, β) χρονικό ίχνος σήματος εισόδου στον AOWC, γ), δ) Χρονικό ίχνος και διάγραμμα ματιού σήματος εξόδου στον AWC χωρίς χρήση βοηθητικού CW, ε), ζ) Χρονικό ίχνος και διάγραμμα ματιού σήματος εξόδου στον AOWC με 0.5 mW βοηθητικού CW η), θ) Χρονικό ίχνος και διάγραμμα ματιού σήματος εξόδου στον AOWC με 1 mW βοηθητικού CW.

Στις δύο εξόδους του AOWC έχουν τοποθετηθεί σε σειρά δύο φίλτρα συντονισμένα στην κεντρική συχνότητα 192.5 THz και με εύρος συχνοτήτων 100 GHz ενώ για την ρύθμιση της ισχύος του σήματος εισόδου μοντελοποιήθηκε οπτικός εξασθενητής. Το σχήμα 2.10 απεικονίζει τα σήματα εισόδου και ελέγχου στον AOWC. Η περιβάλλουσα φορτώνεται από τα αρχεία που είχαν αποθηκευτεί κατά την προσομοίωση του κυκλώματος ανίχνευσης της περιβάλλουσας.

Κατά την προσομοίωση υπολογίστηκαν οι απαραίτητες τιμές ισχύος των σημάτων δεδομένων, ελέγχου και του βοηθητικού σήματος. Ο πίνακας 2.4 απεικονίζει τις ιδανικές παραμέτρους λειτουργίας του κυκλώματος μετατροπής μήκους κύματος με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου.

Πίνακας 2.4 Παράμετροι λειτουργίας του κυκλώματος μετατροπής μήκους κύματος με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου.

Παράμετρος	Τιμή
Ισχύς σήματος εισόδου (PED) (mW)	1.4
Ισχύς σήματος ελέγχου (data) (mW)	2
Ισχύς βοηθητικού CW (mW)	1
Ρεύμα έκχυσης (mA)	300
Χρονική καθυστέρηση μεταξύ input και control (ns)	1
Διαμόρφωση πλάτους σήματος εξόδου (dB)	0.61
Eye opening σήματος εξόδου (dB)	9.16

Το σχήμα 2.8 γ)-(θ) απεικονίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι κυματομορφές στην έξοδο του AOWC χωρίς την παρουσία βοηθητικού CW όπου και παρατηρούνται υψηλά επίπεδα θορύβου λόγω της εκπομπής ASE από τους SOAs κατά τα κενά διαστήματα μεταξύ των πακέτων. Επίσης παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα (ε)-(θ) όταν στη διάταξη ενεργοποιείται το βοηθητικό CW, όπου και είναι φανερή η μείωση των επιπέδων του θορύβου. Και στην περίπτωση της μετατροπής μήκους κύματος το σήμα εξόδου διατηρεί μεγάλο άνοιγμα ματιού (eye opening) (9,16 dB) καθώς και χαμηλή διαμόρφωση πλάτους (<1 dB). Η μείωση της τιμής του eye opening συγκριτικά με την περίπτωση της μεταγωγής, οφείλεται στο γεγονός ότι

κατά τη μετατροπή του μήκους κύματος τα δεδομένα εγγράφονται στην περιβάλλουσα και «κληρονομούν» τα χαρακτηριστικά της (eye opening, κυμάτωση).

2.4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ PED ΣΤΑ 40 Gb/s RZ

Οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα ακολουθούν τη λογική της μοντελοποίησης της ενότητας 2.3 για τα 10 Gb/s.

2.4.1. Πλατφόρμα μοντελοποίησης

Η διάταξη του VPI που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τρία μέρη:

- τη γεννήτρια του σήματος δεδομένων η οποία περιλαμβάνει και θόρυβο.
- το Fabry-Pérot φίλτρο.
- το SOA-MZI AOWC.

Το μοντέλο χωρίστηκε σε δύο μέρη: στο πρώτο μέρος μελετήθηκε η παραγωγή των δεδομένων και η επίδραση της διέλευσής τους από το Fabry-Pérot και στο δεύτερο μέρος μελετήθηκε αποκλειστικά η λειτουργία του AOWC, εστιάζοντας στις απαραίτητες παραμέτρους για την παραγωγή PED σημάτων.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ως σήμα δεδομένων παλμοσειρά μήκους 1024 bits, η οποία αποτελείται από δύο πακέτα των 312 bits με ενδιάμεσο κενό μήκους 200 bits. Η μορφή των παλμών είναι RZ (επιστροφή στο μηδέν) όπου το δυαδικό ψηφίο “1” αναπαριστάται με έναν παλμό Gauss.

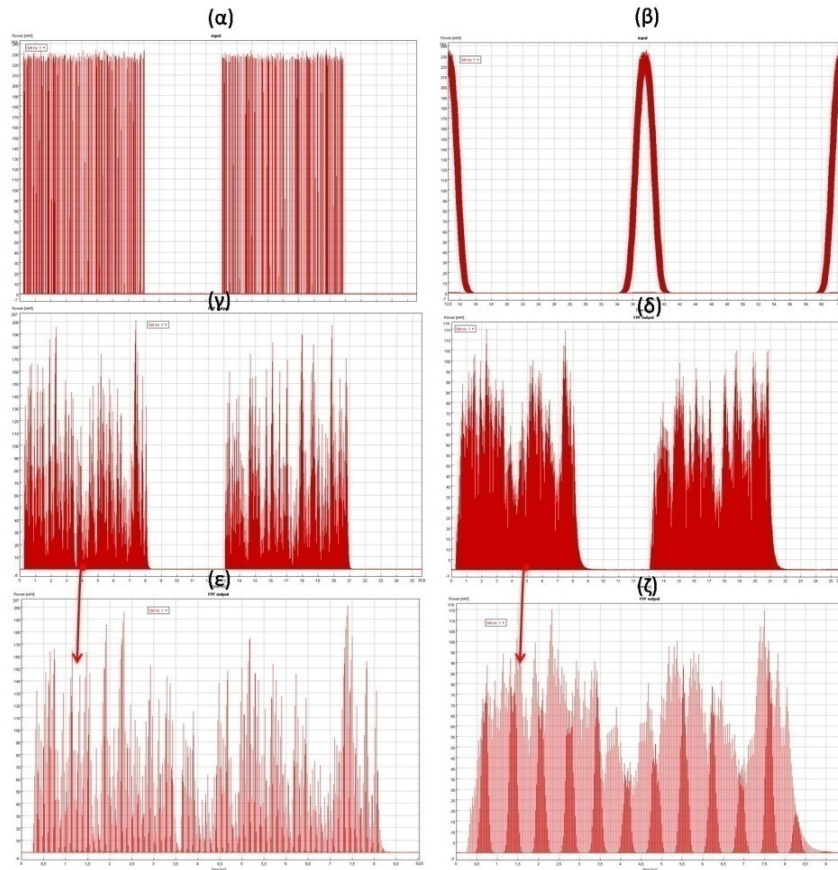
Η διαδικασία λήψης της περιβάλλουσας στα 40 Gb/s ακολουθεί την ίδια λογική με αυτήν που ακολουθήθηκε στα 10 Gb/s. Επομένως οι διατάξεις είναι ίδιες με αυτές που παρατέθηκαν στην ενότητα 2.3, οπότε τα σχήματα των διατάξεων δεν επαναλαμβάνονται και σε αυτήν την ενότητα. Σε ότι αφορά το σήμα δεδομένων, τα χαρακτηριστικά του απεικονίζονται στον πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5 Παράμετροι του σήματος δεδομένων και του φίλτρου Fabry-Pérot

Παράμετρος	Τιμή
Ρυθμοδότηση (Gb/s)	40
Περίοδος σήματος (bits)	1024
Τύπος διαμόρφωσης	RZ
Μήκος κύματος φέρουσας (nm)	1553.59
Οπτική Ισχύς κορυφής (mW)	800
Jitter rms (ps)	0.25
Noise density (W)	10×10^{-18}
Extinction (dB)	23
Fabry-Pérot FSR (GHz)	40
Fabry-Pérot Finesse	37.6

Οι παράγοντες που μελετήθηκαν ήταν η ισχύς του σήματος δεδομένων και η λεπτότητα (finesse) του Fabry-Pérot φίλτρου. Η μορφή των δεδομένων φαίνεται στο σχήμα 2.11.

Το σήμα διέρχεται από το οπτικό φίλτρο Fabry-Pérot, το οποίο έχει ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) ίση με 40 GHz ενώ ο δείκτης λεπτότητας (Finesse) του φίλτρου μεταβάλλεται κατά την διαδικασία της προσομοίωσης. Σε αυτήν την περίπτωση το φίλτρο παράγει από έναν παλμό Gauss μία σειρά από αντίγραφα του παλμού αυτού με φθίνουσα οπτική ισχύ κορυφής. Έτσι τα μηδενικά bits στο πακέτο γεμίζουν από Gaussian παλμούς και το πακέτο μετατρέπεται σε μία συνεχή παλμοσειρά από “1” με ισχυρή διακύμανση. Η διακύμανση εξαρτάται από τη λεπτότητα του φίλτρου και η τιμή της λεπτότητας μεταβλήθηκε σε ένα εύρος τιμών ($F=61,24$, $F=50,76$, $F=43,28$, $F=37,6$, $F=29,8$, $F=19,31$, $F=14,05$ και τέλος $F=8,76$). Από τις προσομοιώσεις παρατηρήθηκε ότι ικανοποιητικά αποτελέσματα προέκυψαν για τιμές μεταξύ $F=50,76$ και $F=29,8$ ενώ εν τέλει χρησιμοποιήθηκε η τιμή $F=43,28$. Για αυτήν την τιμή παρατηρήθηκε ικανοποιητική διαμόρφωση εντός των πακέτων με δυνατότητα απαλοιφής της από έναν AOWC (σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11 Αποτελέσματα: (α) χρονικό ίχνος (*pulse trace*) και (β) διάγραμμα ματιού του σήματος εισόδου, (γ) χρονικό ίχνος του σήματος στην έξοδο του FPF με *finesse* 8.76 και δ) χρονικό ίχνος του σήματος στην έξοδο του FPF με *finesse* 43.28, (ε), (ζ) χρονικό ζουμ των αποτελεσμάτων (γ) και (δ).

2.4.2. Αποτελέσματα ανίχνευσης περιβάλλουσας για ομόρροπη και αντίρροπη συνδεσμολογία

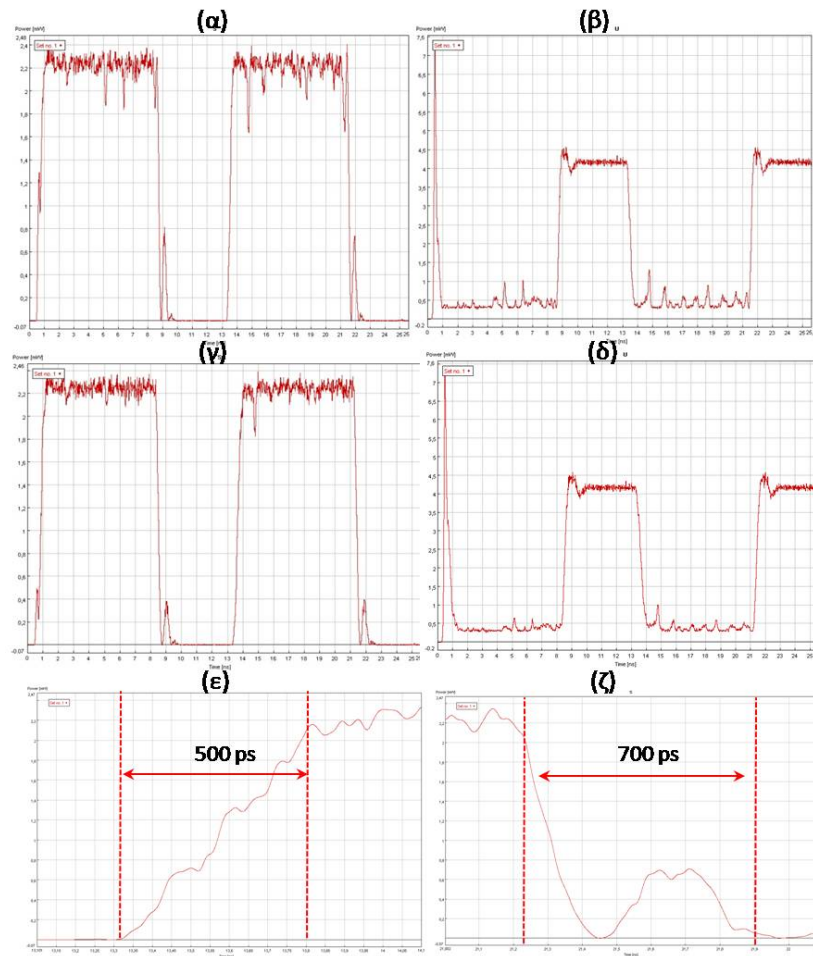
Το σήμα ελέγχου (δεδομένα) είναι σε συχνότητα 193.1 THz ενώ το σήμα εισόδου (CW) είναι σε συχνότητα 192.5 THz (1558.4 nm). Στην κάθε έξοδο του AOWC έχουν τοποθετηθεί, δύο φίλτρα σε σειρά συντονισμένα στην κεντρική συχνότητα 192.5 THz με εύρος 50 GHz. Τα μεγέθη που μεταβλήθηκαν και εδώ είναι η ισχύς του σήματος ελέγχου, η ισχύς του σήματος εισόδου και το ρεύμα έκχυσης των SOAs. Ο πίνακας 2.6 απεικονίζει

τις βέλτιστες παραμέτρους του AOWC και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σήματος περιβάλλουσας που προέκυψε.

Πίνακας 2.6 Παράμετροι κυκλώματος AOWC και ποιοτικά χαρακτηριστικά του σήματος PED σε αντίρροπη συνδεσμολογία.

Παράμετρος	Τιμή
Ισχύς σήματος εισόδου (CW) (mW)	1.2
Ισχύς σήματος ελέγχου (έξοδος FPF) (mW)	2.55
Μήκος κύματος CW (nm)	1558.4
Ρεύμα έκχυσης (mA)	90
Λόγος σβέσης περιβάλλουσας (extinction ratio) (dB)	16
Μέγιστη κυμάτωση σήματος στην έξοδο (dB)	0.87

Τα σχήματα 2.12.α) και β) απεικονίζουν τα αποτελέσματα της διάταξης σε ομόρροπη συνδεσμολογία.



Σχήμα 2.12 Αποτελέσματα: α), β) περιβάλλουσα στη θύρα μεταγωγής και μη μεταγωγής του AOWC για ομόρροπη συνδεσμολογία, γ) δ) περιβάλλουσα στη θύρα μεταγωγής και μη μεταγωγής του AOWC για αντίρροπη συνδεσμολογία, ε), ζ) χρονικά σημεία ανύψωσης και σβέσης.

Η ισχύ κορυφής της περιβάλλουσας μετρήθηκε στα 2.2 mW ενώ για την ανάστροφη περιβάλλουσα η ισχύς έχει ελάχιστη τιμή αντί του μηδενός τα 0.5 mW και μέγιστη τιμή στην κορυφή της τα 4 mW. Μία σημαντική παρατήρηση που προέκυψε κατά τη διάρκεια και αυτής της προσομοίωσης, είναι ότι μειώνοντας την ισχύ του σήματος ελέγχου πετυχαίνουμε σε κάποιο σημείο μείωση της κυμάτωσης που εμφανίζεται στην κορυφή της περιβάλλουσας, ενώ παράλληλα εμφανίζεται σημαντική μείωση στην ισχύ της περιβάλλουσας που αντιστοιχεί στα πρώτα bits. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα πρώτα bits λόγω της διέλευσής τους από το Fabry-Pérot έχουν μικρότερη ισχύ από τα επόμενα και με την περαιτέρω μείωση της ισχύος τους από τον εξασθενητή δεν έχουν

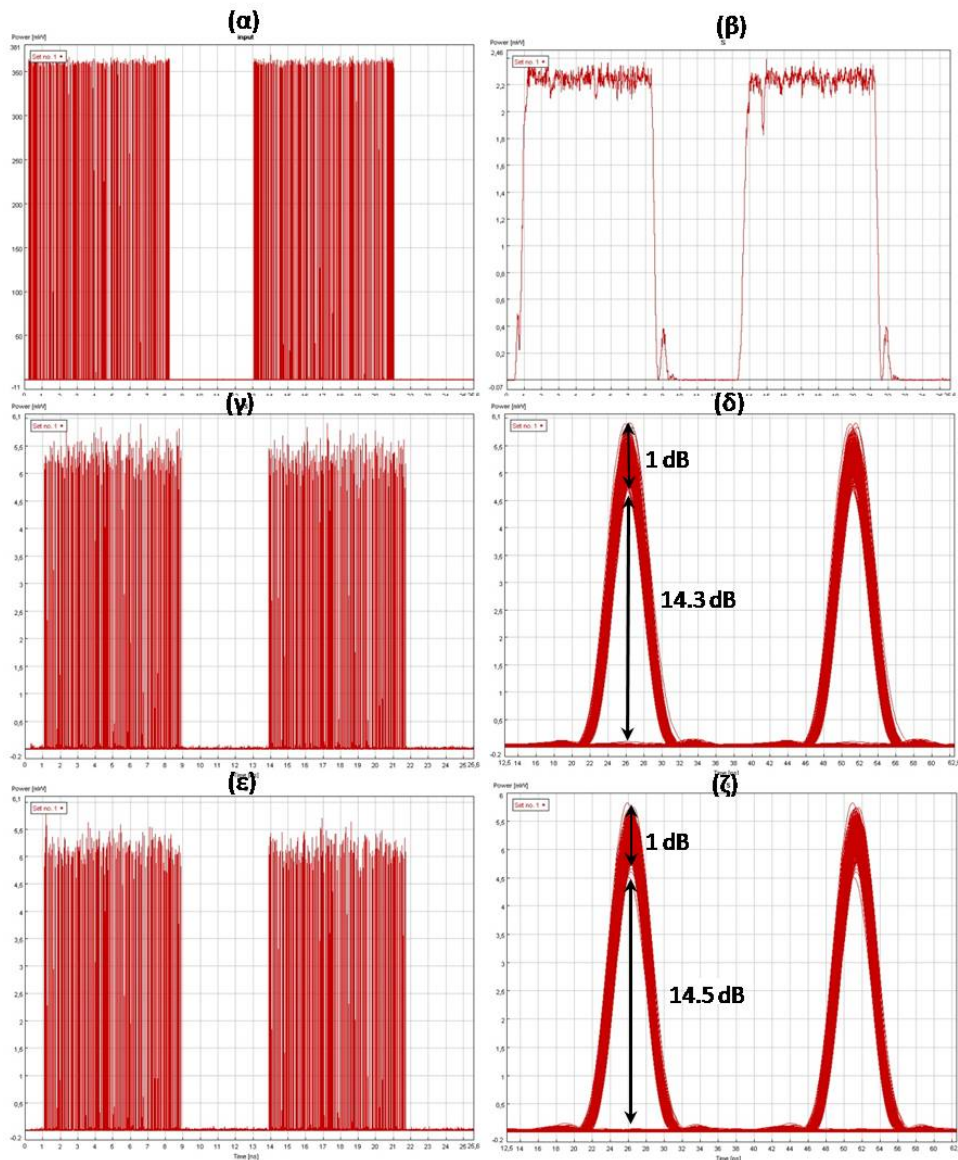
τελικά την απαιτούμενη ισχύ για να κορέσουν τον SOA με αποτέλεσμα ο AOWC να λειτουργεί ως ψαλιδιστής.

Τα σχήματα 2.12.γ) και δ) απεικονίζουν τα αποτελέσματα της διάταξης σε αντίρροπη συνδεσμολογία. Η βασική διαφορά που εμφανίζουν οι δύο συνδεσμολογίες σε ότι αφορά τις κυματομορφές των σημάτων περιβάλλουσας είναι ότι η κυμάτωση που εμφανίζεται στη περιβάλλουσα για ομόρροπη συνδεσμολογία είναι της τάξης των 0.87 dB ενώ η αντίστοιχη κυμάτωση για αντίρροπη συνδεσμολογία είναι αρκετά μικρότερη. Η δεύτερη διαφορά είναι ότι στην αντίρροπη συνδεσμολογία οι αλλαγές μεταξύ κορυφής και ελάχιστης τιμής είναι πιο απότομες τόσο για το σήμα της περιβάλλουσας όσο και για το σήμα της ανάστροφης περιβάλλουσας κάτι ιδιαίτερα επιθυμητό για τις ανάγκες των επόμενων προσομοιώσεων. Οι διαφορές αυτές προκύπτουν κυρίως από το γεγονός ότι στην αντίρροπη συνδεσμολογία οι SOAs έχουν ακόμη πιο αργή απόκριση λόγω του περιορισμένου χρόνου αλληλεπίδρασης των σημάτων μέσα στο ενεργό υλικό. Τέλος, οι χρόνοι ανύψωσης και σβέσης μετρήθηκαν ίσοι με 500 και 700 ps αντίστοιχα.

2.4.3. Αποτελέσματα χωρικής μεταγωγής με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου

Ομοίως, με την ενότητα 2.33, σκοπός είναι να μελετηθεί η δυνατότητα μετατροπής του μήκους κύματος 40 Gb/s πακέτων σε AOWC με χρήση της ανακτημένης περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου (probe). Τα σχήματα και οι διατάξεις είναι όμοια με της ενότητας 2.33 και δεν επαναλαμβάνονται.

Το σήμα εισόδου (δεδομένα) έχει συχνότητα 193.1 THz (1553.59 nm). Το σήμα παρουσιάζει χρονική ολίσθηση (jitter) με μέση τιμή 1 ps ενώ έχει επιπλέον προστεθεί θόρυβος μέσης ισχύος 10×10^{-18} W. Το σήμα ελέγχου (περιβάλλουσα) έχει συχνότητα 192.5 THz (1558.4 nm). Ως βοηθητικό σήμα για τον κορεσμό των SOAs, χρησιμοποιείται CW ρυθμισμένο στα 194 THz (1546.39 nm). Τα δύο φίλτρα στις εξόδους του AOWC είναι συντονισμένα στην κεντρική συχνότητα των δεδομένων με εύρος ζώνης 200 GHz.



Σχήμα 2.13 Αποτελέσματα: α), β) σήμα εισόδου και ελέγχου, γ), δ) χρονικό ίχνος και διάγραμμα ματιού μεταγώμενου σήματος όταν το σήμα ελέγχου είναι η περιβάλλουσα, ε), ζ) χρονικό ίχνος και διάγραμμα ματιού μεταγώμενου σήματος όταν το σήμα ελέγχου είναι CW σήμα.

Το σχήμα 2.13 απεικονίζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Κατά την προσομοίωση υπολογίστηκαν οι απαραίτητες τιμές ισχύος των σημάτων δεδομένων, ελέγχου και του βοηθητικού σήματος. Ο πίνακας 2.7 απεικονίζει τις ιδανικές παραμέτρους λειτουργίας του κυκλώματος χωρικής μεταγωγής με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου.

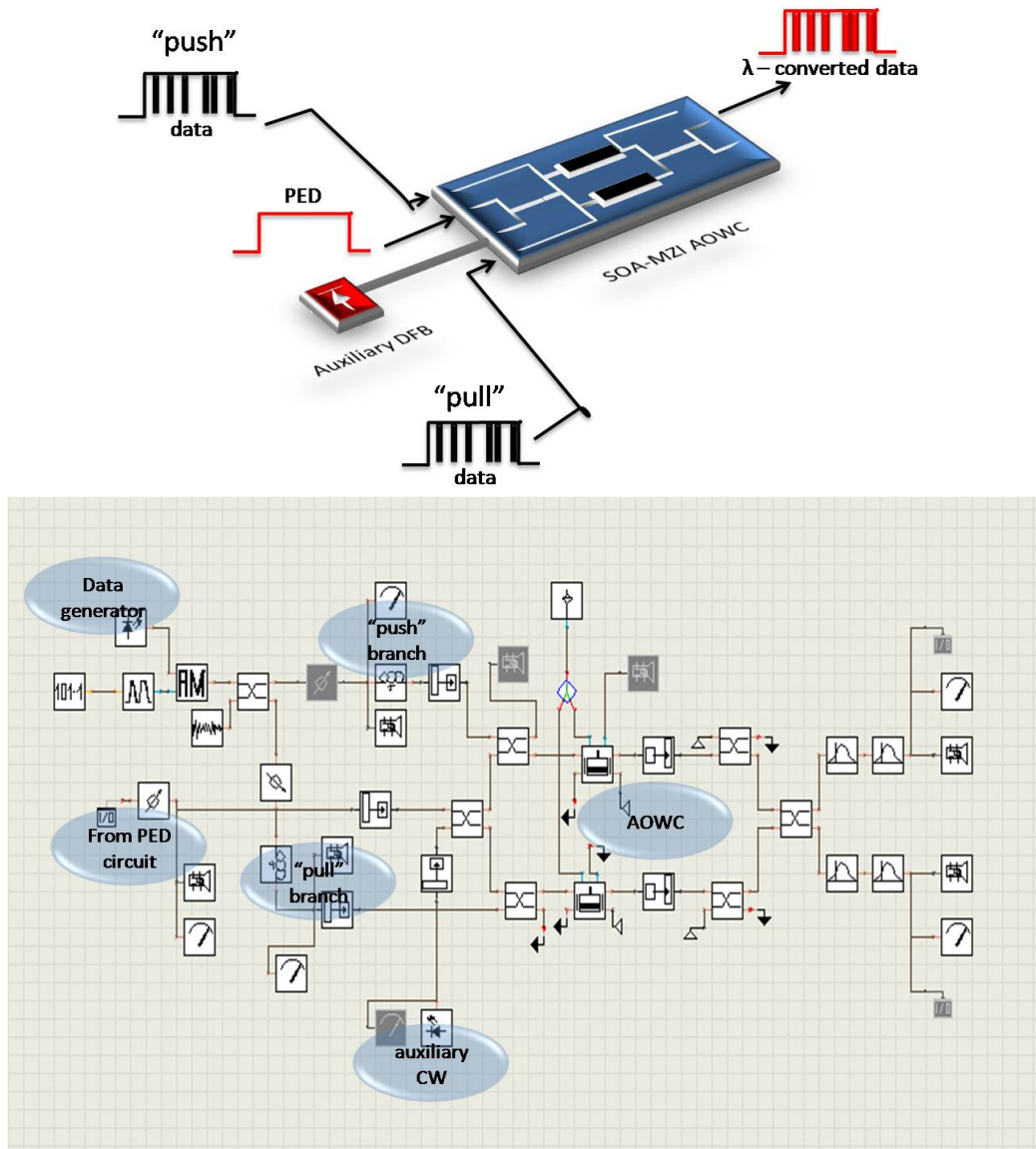
Πίνακας 2.7 Παράμετροι λειτουργίας του κυκλώματος χωρικής μεταγωγής με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου.

Παράμετρος	Τιμή
Ισχύς σήματος εισόδου (δεδομένα) (mW)	0.131
Ισχύς σήματος ελέγχου (PED) (mW)	0.352
Ισχύς βοηθητικού CW (mW)	0.4
Ρεύμα έκχυσης (mA)	200
Λόγος αντίθεσης μεταξύ των εξόδων του διακόπτη (extinction ratio) (dB)	11.63
Χρονική καθυστέρηση μεταξύ input και control (ps)	500
Διαμόρφωση πλάτους σήματος εξόδου (dB)	1
Eye opening σήματος εξόδου (dB)	14.31

Για την καλύτερη αξιολόγηση της ποιότητας της μεταγωγής με χρήση της περιβάλλουσας, έγινε ακόμη μία προσομοίωση. Αυτή περιελάμβανε τη χρήση ως σήματος ελέγχου, ενός CW του οποίου η ισχύς είναι ίδια με την ισχύ κορυφής του σήματος της περιβάλλουσας. Τα υπόλοιπα μεγέθη παραμένουν αμετάβλητα. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης (σχ. 2.13 ε), ζ)) υποδηλώνουν όμοια συμπεριφορά των δύο συνδεσμολογιών αφού: η διαμόρφωση πλάτους παρέμεινε στα επίπεδα του 1 dB, ο λόγος σβέσης του διακόπτη μετρήθηκε ίσος με 12.3 dB και το άνοιγμα ματιού ίσο με 14.49 dB.

2.4.4. Αποτελέσματα μετατροπής μήκους κύματος με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου

Σκοπός είναι να μελετήσουμε τη δυνατότητα μετατροπής του μήκους κύματος πακέτων σε AOWC με χρήση της ανακτημένης περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου (probe). Το σχήμα 2.14 απεικονίζει τη βασική διάταξη και το αντίστοιχο μοντέλο VPI.



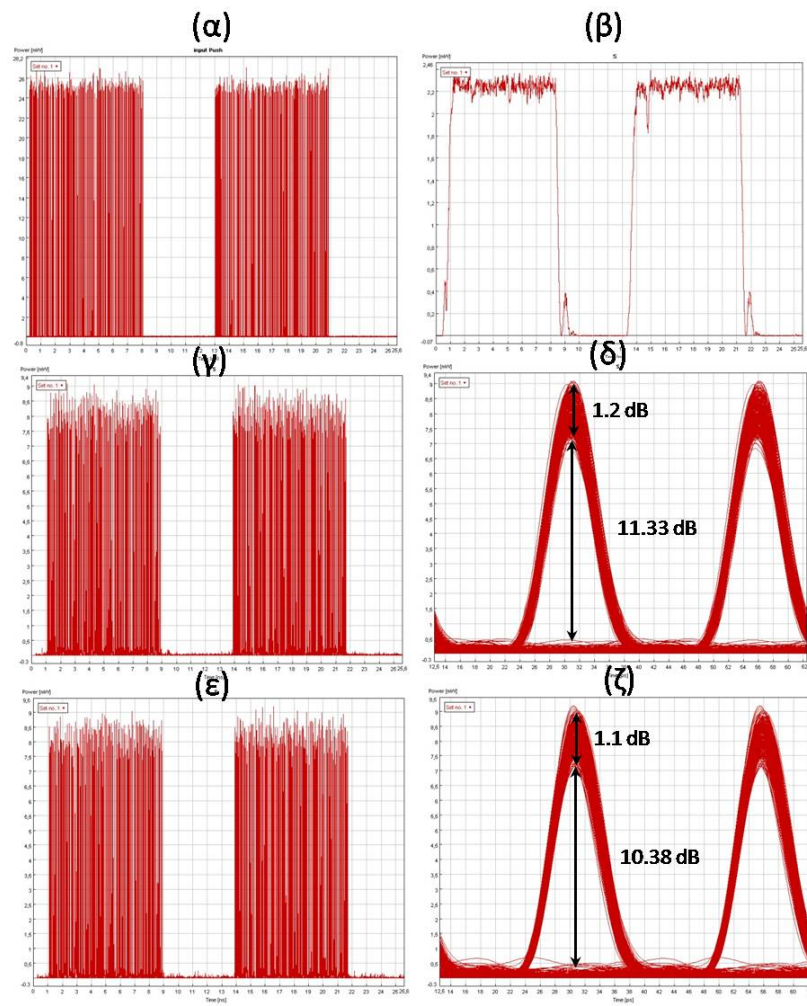
Σχήμα 2.14 Διάταξη προσομοίωσης της μετατροπής μήκους κύματος με χρήση της τεχνικής “push-pull”.

Η κύρια διαφορά σε σχέση με τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τα 10 Gb/s NRZ (ενότητα 2.3.4)), βρίσκεται στη χρήση δύο control σημάτων (push-pull) για την ταχύτερη απόκριση του AOWC [push-pull]. Τα μεγέθη που μεταβλήθηκαν είναι: η ισχύς της περιβάλλουσας, η ισχύς του σήματος “push”, η ισχύς του σήματος “pull”, η διαφορική καθυστέρηση μεταξύ “push” και “pull” και η ισχύς του βοηθητικού CW.

Πίνακας 2.8 Παράμετροι λειτουργίας του κυκλώματος μετατροπής μήκους κύματος με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα εισόδου και χαρακτηριστικά σήματος εξόδου.

Παράμετρος	Τιμή
Ισχύς σήματος εισόδου (PED) (mW)	0.89
Ισχύς σήματος ελέγχου (push-pull) (mW)	0.9 – 0.18
Ισχύς βοηθητικού CW (mW)	0.5
Ρεύμα έκχυσης (mA)	300
Χρονική καθυστέρηση μεταξύ input και push (ps)	500
Χρονική καθυστέρηση μεταξύ push και pull (ps)	10
Διαμόρφωση πλάτους σήματος εξόδου (dB)	1. 1
Eye opening σήματος εξόδου (dB)	11.33

Ο πίνακας 2.8 απεικονίζει τις παραμέτρους λειτουργίας του κυκλώματος καθώς και τα χαρακτηριστικά του σήματος που προκύπτει στην έξοδο του AOWC. Τα αποτελέσματα του κυκλώματος απεικονίζονται στο σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15 Αποτελέσματα: α), β) σήμα ελέγχου και εισόδου, γ), δ) χρονικό ίχνος και διάγραμμα ματιού μετατρεπόμενου σήματος όταν το σήμα εισόδου είναι η περιβάλλουσα, ε), ζ) χρονικό ίχνος και διάγραμμα ματιού μετατρεπόμενου σήματος όταν το σήμα εισόδου είναι CW σήμα.

Το σήμα ελέγχου είναι στα 193.1 THz (1553,59 nm) με χρονικό jitter 0.25 ps και θόρυβο μέσης ισχύος 0.5×10^{-18} W. Η περιβάλλουσα είναι στα 192.5 THz (1558.4 nm). Το βοηθητικό CW για τον κορεσμό των SOAs έχει συχνότητα 194.1 THz (1545.59 nm). Τέλος στις δύο εξόδους του AOWC, έχουν τοποθετηθεί σε σειρά δύο φίλτρα συντονισμένα στην κεντρική συχνότητα της περιβάλλουσας με εύρος ζώνης 200 GHz.

Για την καλύτερη αξιολόγηση της ποιότητας της μετατροπής μήκους κύματος με χρήση της περιβάλλουσας, έγινε ακόμη μία προσομοίωση. Αυτή περιελάμβανε τη χρήση ως σήματος εισόδου, ενός CW του οποίου η ισχύς είναι ίδια με την ισχύ κορυφής του

σήματος της περιβάλλουσας. Τα υπόλοιπα μεγέθη παραμένουν αμετάβλητα. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την καταλληλότητα του σήματος της περιβάλλουσας για μετατροπή μήκους κύματος με πολύ καλή ποιότητα μετατρεπόμενων σημάτων.

Τα γενικά συμπεράσματα όλων των παραπάνω προσομοιώσεων είναι:

1. τα σήματα περιβάλλουσας που προκύπτουν από κύκλωμα φίλτρου FPF και οπτικού AOWC παρουσιάζουν χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να θεωρείται δυνατή η χρήση τους για περαιτέρω οπτική επεξεργασία σήματος σε ρυθμούς μετάδοσης ως 40 Gb/s.
2. τα σήματα περιβάλλουσας είναι δυνατό να μετάγουν χωρικά καθώς και να μετατρέψουν το μήκος κύματος οπτικών πακέτων αποδίδοντας σήματα υψηλής ποιότητας.
3. το κύκλωμα περιβάλλουσας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατάλληλη αρχιτεκτονική για την ανίχνευση και επίλυση συγκρούσεων οπτικών πακέτων.

Επειδή τα παραπάνω συμπεράσματα βασίζονται μόνο σε θεωρητική μελέτη, το επόμενο βήμα είναι η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Στην παρακάτω ενότητα.

2.5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΙΞΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ PED

2.5.1. Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα στα 10 Gb/s NRZ

Το σχήμα 2.16 απεικονίζει την πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για την ανίχνευση περιβάλλουσας 10 Gb/s NRZ οπτικών πακέτων. Η διάταξη αποτελείται από δύο βασικά μέρη:

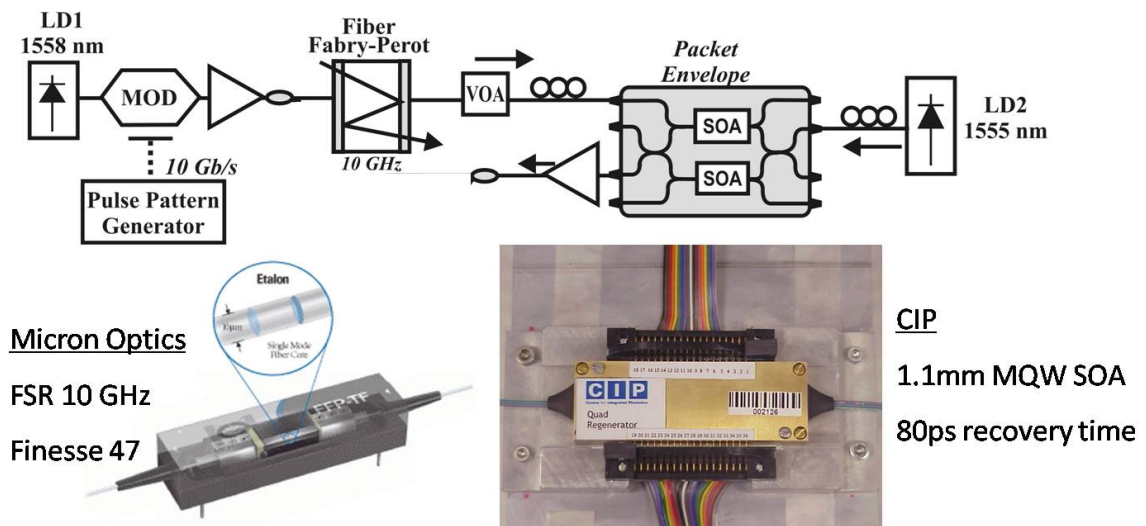
- *την οπτική πηγή δεδομένων:* περιλαμβάνει ένα DFB CW laser στα 1558 nm, το οποίο διαμορφώνεται εξωτερικά με έναν LiNbO₃. Ο διαμορφωτής οδηγείται ηλεκτρικά από έναν 10 Gb/s ηλεκτρονικό transmitter. Τα δεδομένα ενισχύονται από έναν EDFA.
- *το κύκλωμα ανίχνευσης περιβάλλουσας:* περιλαμβάνει ένα fiber Fabry-Pérot φίλτρο (Micron Optics), ένα SOA-MZI (CIP) οπτικό διακόπτη και ένα DFB CW laser στα 1555 nm.

Το κύκλωμα περιλαμβάνει ελεγκτές πόλωσης και οπτικούς εξασθενητές για τη μεταβολή της πόλωσης και της ισχύος των οπτικών σημάτων που εισέρχονται στο SOA-MZI.

Οι βασικές παράμετροι του κυκλώματος απεικονίζονται στον πίνακα 2.9:

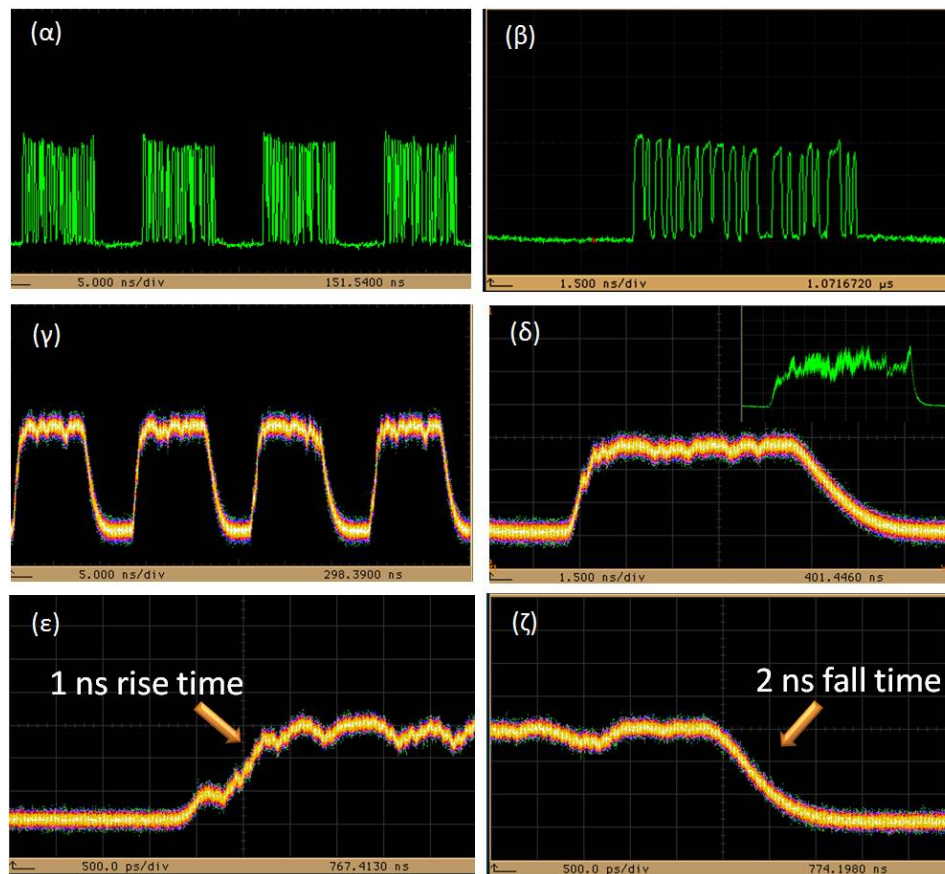
Πίνακας 2.9 Παράμετροι πειραματικής διάταξης ανίχνευσης περιβάλλουσας 10Gb/s NRZ οπτικών πακέτων.

Παράμετρος	Τιμή
Ρυθμοδότηση (Gb/s)	10
Κωδικοποίηση δεδομένων	NRZ
Είδος ακολουθίας	PRBS 2^7-1
Μήκος πακέτων (bits)	75
Ισχύς σήματος εισόδου (CW) (mW)	0.6
Ισχύς σήματος ελέγχου (έξοδος FPF) (mW)	1.7
Μήκος κύματος δεδομένων (nm)	1558
Μήκος κύματος CW (nm)	1555
Ρεύμα έκχυσης (mA)	120
Fabry-Pérot FSR (GHz) - Finesse	10 - 47



Σχήμα 2.16 Πειραματική διάταξη και βασικά δομικά στοιχεία του κυκλώματος ανίχνευσης περιβάλλουσας στα 10 Gb/s NRZ.

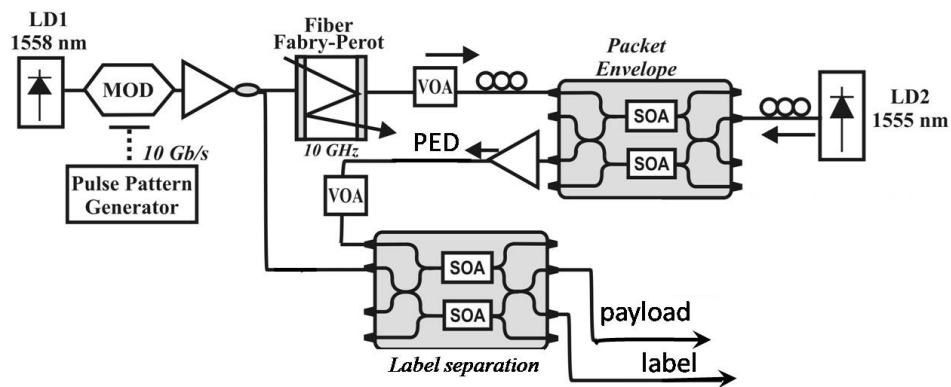
Το σχήμα 2.17 απεικονίζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Το στιγμιότυπο α) απεικονίζει το σήμα δεδομένων αποτελούμενο από τέσσερα πακέτα των 75 bits με ενδιάμεσα κενά των 5 ns. Στο στιγμιότυπο β) απεικονίζεται σε χρονική μεγέθυνση το τρίτο πακέτο. Στα στιγμιότυπα γ) και δ) απεικονίζονται οι αντίστοιχες περιβάλλουσες οι οποίες εμφανίζουν πολύ μικρή διακύμανση και χρόνους ανύψωσης και σβέσης (σχ. 2.17 ε) και ζ)) 1 ns και 2 ns αντίστοιχα. Το inset στο σχήμα 2.17 δ) απεικονίζει το σήμα στην έξοδο του Fabry-Pérot φίλτρου. Τόσο οι παράμετροι λειτουργίας του κυκλώματος όσο και τα χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας των πακέτων είναι σε απόλυτη συμφωνία με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.



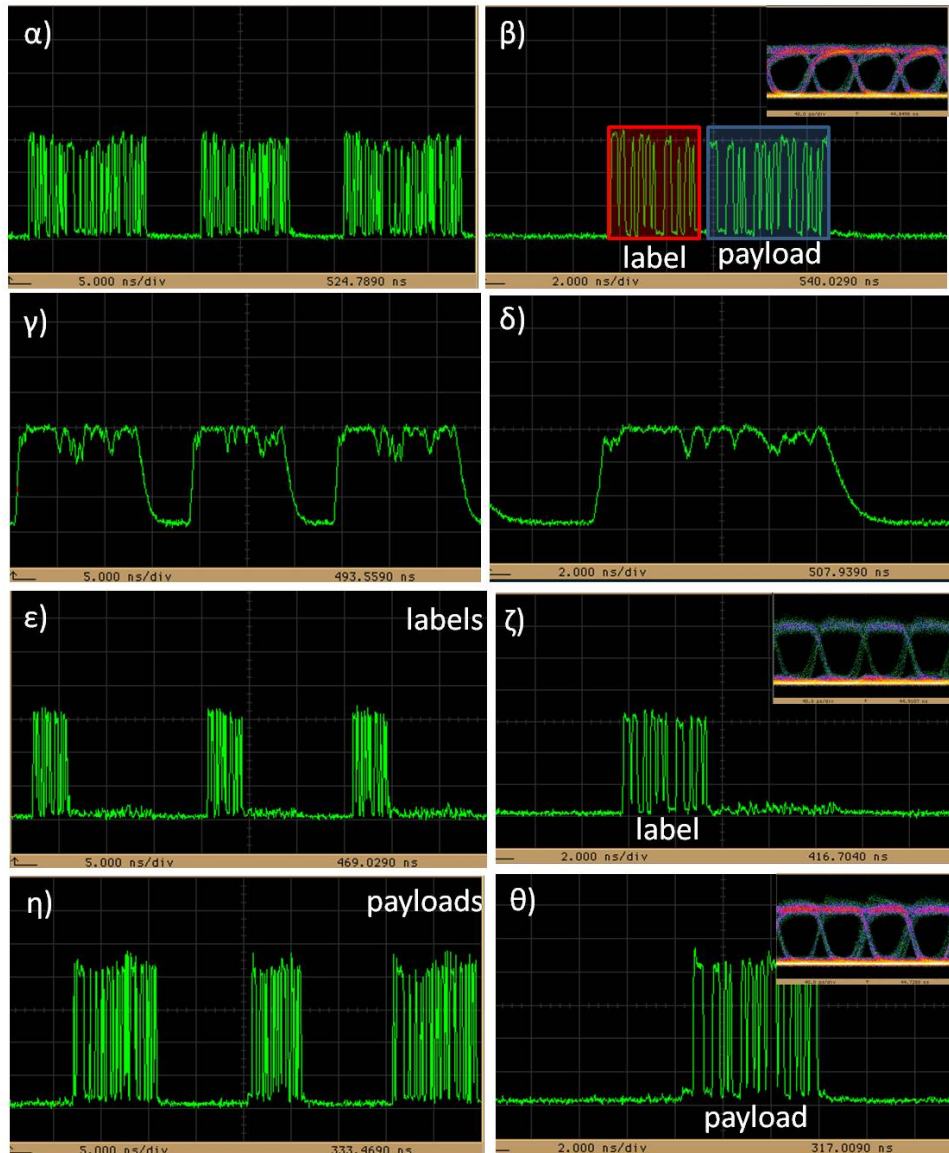
Σχήμα 2.17 Πειραματικά αποτελέσματα: α), β) χρονικό ίχνος πακέτων δεδομένων και χρονικό ζουμ στο 3ο πακέτο, γ), δ) χρονικό ίχνος από τις περιβάλλουσες των πακέτων ε), ζ) ανύψωση και σβέση της περιβάλλουσας.

Μετά την επιτυχημένη επίδειξη του κυκλώματος ανίχνευσης περιβάλλουσας, το επόμενο πείραμα “στήθηκε” με κύριο στόχο την επίδειξη μίας απλής λειτουργίας. Συγκεκριμένα,

στο κύκλωμα του σχήματος 2.18 προστέθηκε ακόμη ένας χωρικός διακόπτης SOA-MZI για την επιτέλεση της λειτουργίας αφαίρεσης της επικεφαλίδας από τα οπτικά πακέτα. Με αυτό το πείραμα έγινε μία πρώτη αξιολόγηση για τη δυνατότητα μεταγωγής δεδομένων χρησιμοποιώντας την περιβάλλουσα ως σήμα ελέγχου. Το σχήμα 2.18 απεικονίζει την πειραματική συνδεσμολογία και το σχήμα 2.19 τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι επικεφαλίδες και το φορτίο (payload) διαχωρίζονται και εμφανίζονται στις δύο εξόδους του χωρικού διακόπτη. Τα διαγράμματα ματιού αποκαλύπτουν την καλή ποιότητα των σημάτων στην έξοδο του κυκλώματος. Το κύκλωμα απαιτεί ένα κενό διάστημα μεταξύ επικεφαλίδας και φορτίου ίσο με το χρόνο ανύψωσης της περιβάλλουσας (1 ns) καθώς και κενό διάστημα μεταξύ διαδοχικών πακέτων ίσο με το χρόνο σβέσης (2 ns).



Σχήμα 2.18 Πειραματική διάταξη για ανάκτηση οπτικών επικεφαλίδων με χρήση της περιβάλλουσας ως σήμα μεταγωγής.

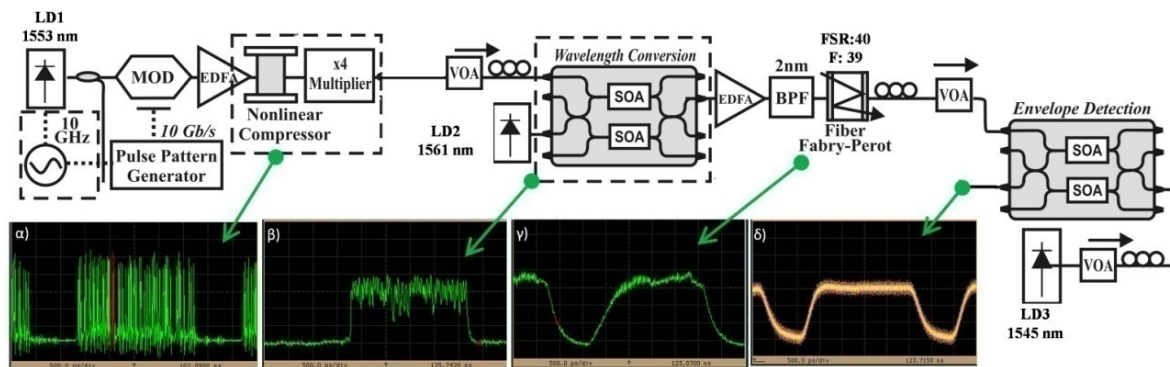


Σχήμα 2.19 Πειραματικά αποτελέσματα: α), β) πακέτα δεδομένων, γ), δ) περιβάλλουσες πακέτων, ε), ζ) ανακτημένα labels, η), θ) ανακτημένο φορτίο (payload). Τα inset απεικονίζουν τα αντίστοιχα διαγράμματα ματιού.

2.5.2. Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα στα 40 Gb/s RZ

Το σχήμα 2.20 απεικονίζει την πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για την ανίχνευση περιβάλλουσας 40 Gb/s RZ οπτικών πακέτων. Η διάταξη αποτελείται από δύο βασικά μέρη:

- *την οπτική πηγή δεδομένων:* περιλαμβάνει ένα DFB CW laser στα 1553 nm, το οποίο παράγει παλμούς clock στα 10 GHz με διαμόρφωση απολαβής (gain switching). Ένα stream δεδομένων στα 10 Gb/s προκύπτει με διαμόρφωση σε έναν ηλεκτροοπτικό LiNbO₃ διαμορφωτή και στη συνέχεια οι οπτικοί παλμοί συμπιέζονται χρονικά με τη χρήση μη γραμμικού οπτικού συμπίεστη. Με τη χρήση κατάλληλου pattern και ενός παθητικού τετραπλασιαστή προκύπτουν οπτικά πακέτα μήκους 96 bit σε ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s.
- *το κύκλωμα ανίχνευσης περιβάλλουσας:* περιλαμβάνει ένα fiber Fabry-Pérot φίλτρο (Micron Optics), ένα SOA-MZI (CIP) οπτικό διακόπτη και ένα DFB CW laser στα 1553 nm, όπως και στο πείραμα με 10 Gb/s NRZ δεδομένα. Για την περίπτωση των 40 Gb/s προστίθεται ακόμη ένα SOA-MZI στην είσοδο του κυκλώματος. Το SOA-MZI λειτουργεί ως “αργός” single-control μετατροπέας μήκους κύματος και ο ρόλος του είναι διπλός: 1) χρησιμοποιείται για την αποφυγή coherence φαινομένων στο Fabry-Pérot φίλτρο λόγω συμβολής παλμών με διαφορά φάσης, οι οποίοι προκύπτουν από τη διαδικασία παθητικής πολυπλεξίας στον τετραπλασιαστή και 2) βοηθά στη διαπλάτυνση των RZ παλμών ώστε στο δεύτερο SOA-MZI να προκύπτει όσο το δυνατόν μικρότερη διαμόρφωση πλάτους στην περιβάλλουσα.

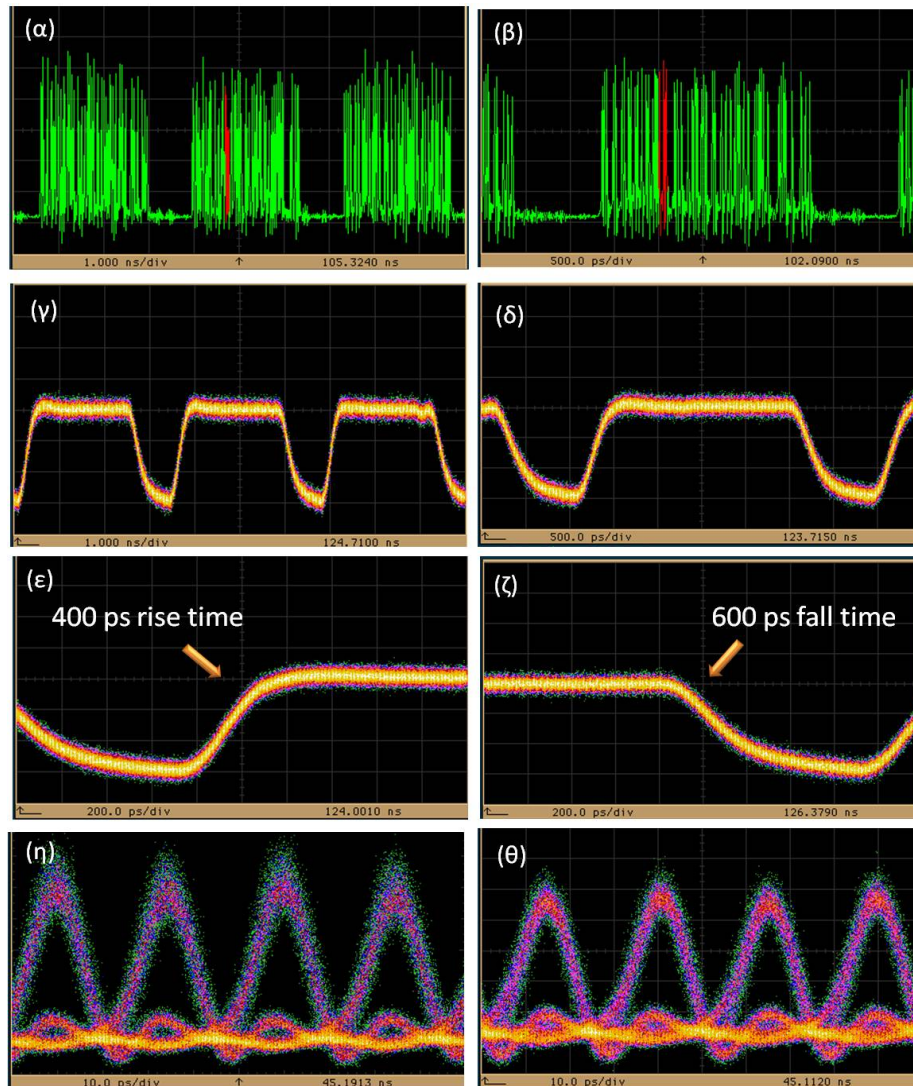


Σχήμα 2.20 Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα του κυκλώματος ανίχνευσης περιβάλλουσας στα 40 Gb/s RZ: α) πακέτο δεδομένων, β) έξοδος πρώτου SOA-MZI, γ) έξοδος Fabry-Pérot, δ) έξοδος δεύτερου SOA-MZI.

Οι βασικές παράμετροι του κυκλώματος απεικονίζονται στον πίνακα 2.10.

Πίνακας 2.10 Παράμετροι πειραματικής διάταξης ανίχνευσης περιβάλλουσας 40 Gb/s RZ οπτικών πακέτων.

Παράμετρος	Τιμή
Ρυθμοδότηση (Gb/s)	40
Κωδικοποίηση δεδομένων	RZ
Χρονικό Εύρος οπτικών παλμών - FWHM (ps)	2.7
Είδος ακολουθίας	PRBS 2^7-1
Μήκος πακέτων (bits)	96
Ισχύς σήματος εισόδου (CW) (mW)	0.45
Ισχύς σήματος ελέγχου (έξοδος FPF) (mW)	1.5
Μήκος κύματος δεδομένων (nm)	1553
Μήκος κύματος 1 ^{ου} CW (nm)	1561
Μήκος κύματος 2 ^{ου} CW (nm)	1545
Ρεύμα έκχυσης (mA)	110
Fabry-Pérot FSR (GHz) - Finesse	40 - 39

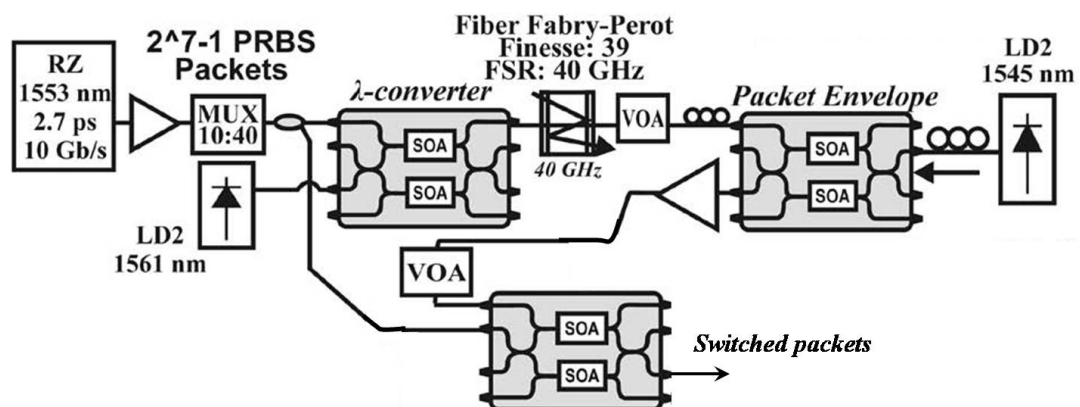


Σχήμα 2.21 Πειραματικά αποτελέσματα του κυκλώματος ανίχνευσης περιβάλλουσας και μεταγωγής δεδομένων με χρήση της περιβάλλουσας στα 40 Gb/s RZ: α), β) πακέτα δεδομένων, γ), δ) περιβάλλουσες πακέτων, ε), ζ) ανύψωση και σθέση περιβάλλουσας, η) διάγραμμα ματιού σήματος δεδομένων, θ) διάγραμμα ματιού μεταγώμενων δεδομένων.

Τα σχήματα 2.20 α) – δ) απεικονίζουν την πορεία ενός οπτικού πακέτου 40 Gb/s μέσα στο κύκλωμα ανίχνευσης περιβάλλουσας. Στο σχήμα 2.20 β) είναι εμφανής η διεύρυνση των οπτικών παλμών και η έντονη διασυμβολική παρεμβολή η οποία επιτυγχάνεται στο 1^ο SOA-MZI. Το σχήμα 2.10 γ) απεικονίζει την έξοδο του Fabry-Pérot φίλτρου με το πακέτο να εμφανίζει μία μικρή διαμόρφωση πλάτους, η οποία εξαλείφεται πλήρως στη συνέχεια λόγω της διέλευσης του σήματος από το 2^ο SOA-MZI. Από το σχήμα 2.21 είναι εμφανής

και οι σύντομοι χρόνοι ανύψωσης και σβέσης της περιβάλλουσας οι οποίοι είναι 400 και 600 ps αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε και η δυνατότητα χωρικής μεταγωγής δεδομένων με τη χρήση της ανακτώμενης περιβάλλουσας. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο σχήμα 2.22. Η διαφορά με τη διάταξη του σχήματος 2.20 είναι η προσθήκη ενός οπτικού διακόπτη SOA-MZI, του οποίου η κατάσταση μεταγωγής ελέγχεται από την περιβάλλουσα. Τα πακέτα δεδομένων συγχρονίζονται κατάλληλα με τις αντίστοιχες περιβάλλουσες και εισάγονται στη είσοδο του διακόπτη με αποτέλεσμα τη χωρική μεταγωγή τους. Τα σχήματα 2.21 η) και θ) απεικονίζουν τα διαγράμματα ματιού για τα δεδομένα στην είσοδο και έξοδο του χωρικού διακόπτη. Από τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνεται φανερά η δυνατότητα οπτικής μεταγωγής δεδομένων με χρήση της περιβάλλουσας με ελάχιστη παραμόρφωση των οπτικών παλμών.



Σχήμα 2.22 Πειραματική διάταξη μεταγωγής πακέτων με χρήση περιβάλλουσας ως σήμα ελέγχου σε χωρικό οπτικό διακόπτη.

2.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο συνδυασμός ενός οπτικού φίλτρου Fabry-Pérot και οπτικών μετατροπών μήκους κύματος SOA-MZI καθιστά δυνατή την ανίχνευση οπτικών πακέτων – δηλαδή τον προσδιορισμό του χρονικού ίχνους και του μήκους τους με την εξαγωγή του σήματος περιβάλλουσας. Το κύκλωμα λειτουργεί τόσο για NRZ όσο και RZ τύπους διαμόρφωσης και για ρυθμούς μετάδοσης ως 40 Gb/s. Η ποιότητα των σημάτων περιβάλλουσας που προκύπτουν είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατή η χωρική μεταγωγή αλλά και η μετατροπή μήκους κύματος πακέτων πληροφορίας με ελάχιστη παραμόρφωση του σήματος. Επομένως το κύκλωμα μπορεί να αποτελέσει βασικό υποσύστημα αρχιτεκτονικής για ανίχνευση και επίλυση της σύγκρουσης οπτικών πακέτων.

3. ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ

ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ

*“You know the law: Two men enter. One man leaves”**

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός και η πειραματική επίδειξη του κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων (contention resolution circuit – CRC) για σύγχρονα οπτικά πακέτα. Το αμιγώς οπτικό υποσύστημα, επιλύει τις συγκρούσεις πακέτων σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας τόσο το πεδίο του χώρου (deflection routing), όσο και το πεδίο του μήκους κύματος (wavelength-based contention resolution). Το κύκλωμα είναι ικανό να λειτουργεί με δύο διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης: διαμόρφωση χωρίς επιστροφή στο μηδέν (Non-Return-to-Zero-NRZ) και διαμόρφωση με επιστροφή στο μηδέν (Return-to-Zero-RZ). Η αρχιτεκτονική του συστήματος περιλαμβάνει το οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης περιβάλλουσας πακέτου και πρόσθετες οπτικές πύλες, ώστε να ανιχνεύονται τα συγκρουόμενα πακέτα και να μεταγόνται σε διαφορετικές θύρες ή να μετατρέπεται το μήκος κύματός τους. Η λειτουργία του κυκλώματος παρουσιάζεται για πακέτα δεδομένων με ρυθμοδότηση 10 Gb/s και 40 Gb/s.^{1,2}

* Από την ταινία: Mad Max III; Beyond Thunderdome

3.2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ

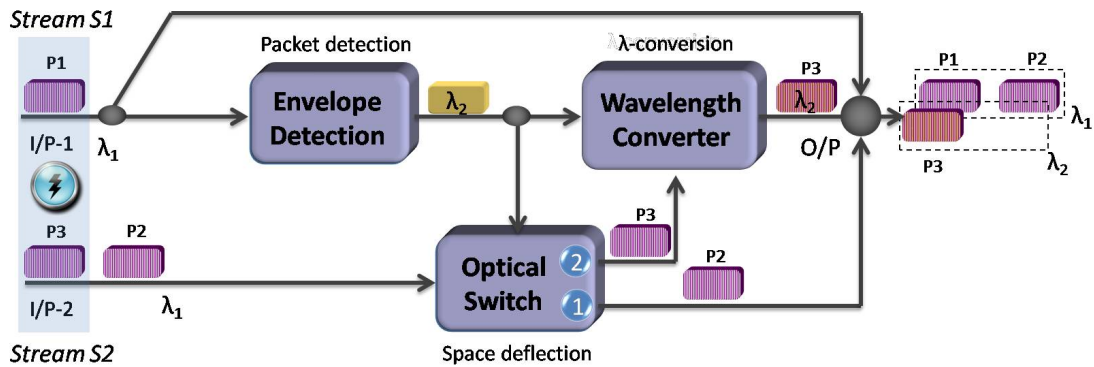
Το σχήμα 3.1 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του CRC κυκλώματος. Το κύκλωμα έχει δύο θύρες εισόδου (I/P-1 και I/P-2) και μία κοινή θύρα εξόδου (O/P). Το σύστημα επιλύει τις συγκρούσεις μεταξύ δύο ροών από πακέτα ($S1$ και $S2$), τα οποία βρίσκονται στο ίδιο μήκος κύματος (λ_1) και θεωρούμε ότι τα πακέτα τα οποία εισέρχονται από τη θύρα I/P-1 έχουν προτεραιότητα. Το σύστημα περιλαμβάνει:

- Ανίχνευση της περιβάλλουσας των πακέτων της ροής $S1$.
- Έναν 1x2 οπτικό διακόπτη για τη μεταγωγή πακέτων της ροής $S2$ στο χώρο.
- Έναν SOA-MZI μετατροπέα μήκους κύματος για τη μετατροπή μήκους κύματος οπτικών πακέτων της ροής $S2$.

Το κύκλωμα ανίχνευσης της περιβάλλουσας αποτελείται από ένα Fabry-Pérot φίλτρο και ένα SOA-MZI και το αντίστοιχο σήμα περιβάλλουσας υποδεικνύει την παρουσία ή μη ενός πακέτου σε κάθε χρονοθυρίδα [time (packet) – slot] της ροής $S1$. Η περιβάλλουσα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κατάστασης μεταγωγής του 1x2 διακόπτη στον οποίο εισέρχονται τα πακέτα της ροής $S2$. Έτσι η επίλυση των συγκρούσεων επιτυγχάνεται ελέγχοντας τη δρομολόγηση των πακέτων της ροής $S2$ σύμφωνα με τις περιβάλλουσες της ροής πακέτων $S1$.

Στο σχήμα 3.1 παρατηρείται ο διαχωρισμός των πακέτων $P2$ και $P3$ στον οπτικό διακόπτη. Αυτό οφείλεται στη χρονική σύμπτωση του πακέτου $P1$ με το $P3$ (περίπτωση σύγκρουσης) και τη μεταγωγή του $P3$ από την περιβάλλουσα του $P1$. Το $P2$, το οποίο προηγείται χρονικά, μετάγεται στη θύρα 1 του οπτικού διακόπτη και προωθείται στην έξοδο του συστήματος.

Το $P1$ εμφανίζεται στο αμέσως επόμενο slot, προωθείται απευθείας στην έξοδο και πολυπλέκεται χρονικά με το $P2$. Το πακέτο $P3$ μετάγεται στη θύρα 2 του οπτικού διακόπτη, η οποία είναι συνδεδεμένη στη θύρα ελέγχου του μετατροπέα μήκους κύματος SOA-MZI. Το σήμα περιβάλλουσας έχει διπλό ρόλο: εκτός από τον έλεγχο της κατάστασης μεταγωγής του οπτικού διακόπτη, το PED χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και ως σήμα εισόδου στο μετατροπέα μήκους κύματος.



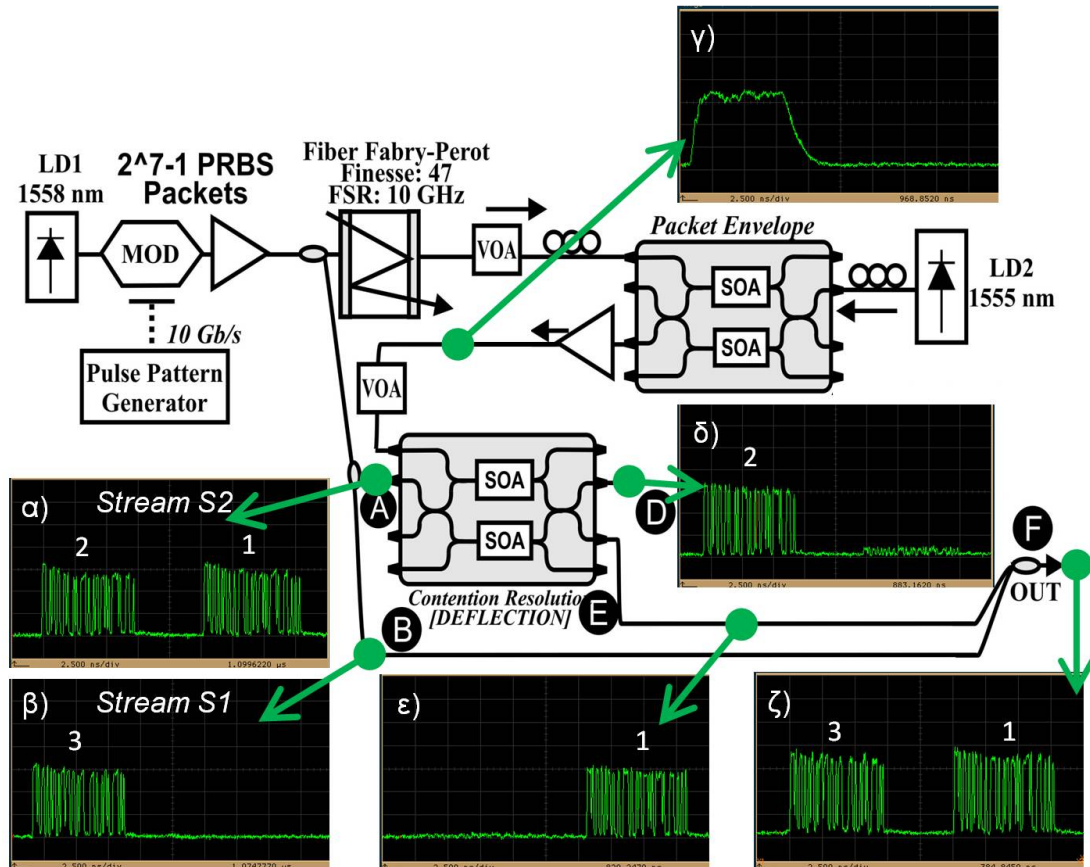
Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονική του συστήματος CRC.

Το πακέτο P3 “εγγράφεται” στην περιβάλλουσα οπότε και αλλάζει το μήκος κύματος σε λ_2 . Τελικά όλα τα πακέτα προωθούνται στην έξοδο χωρίς συγκρούσεις αφού τα P1 και P2 βρίσκονται σε διαδοχικά packet slots και το P3 το οποίο συμπίπτει χρονικά με το P1 βρίσκεται σε διαφορετικό μήκος κύματος. Συμπερασματικά, τα πακέτα που εισέρχονται από την είσοδο I/P-2 τα οποία δε συγκρούονται με πακέτα από την είσοδο I/P-1 προωθούνται απευθείας στην έξοδο του κυκλώματος. Αντίστοιχα πακέτα από την είσοδο I/P-2, τα οποία εμφανίζονται σε κοινές χρονοθυρίδες με πακέτα από την είσοδο I/P-1 προωθούνται στην κοινή έξοδο αφού πρώτα μετατραπεί το μήκος κύματός τους.

3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΑ 10 Gb/s NRZ

3.3.1. Επίλυση συγκρούσεων με εκτροπή πακέτων στο πεδίο του χώρου

Το πρώτο πείραμα αφορά στην υλοποίηση του κυκλώματος επίλυσης των συγκρούσεων με χωρική εκτροπή των συγκρουόμενων πακέτων. Τα εκτρεπόμενα πακέτα μπορούν να οδηγηθούν σε μία εναλλακτική θύρα εξόδου (deflection routing), να εισέλθουν σε έναν οπτικό buffer ανάδρασης ή να μετατραπεί το μήκος κύματός τους. Το Σχήμα 3.2 δείχνει την πειραματική διάταξη και τα αποτελέσματα για το πείραμα στα 10 Gb/s NRZ.



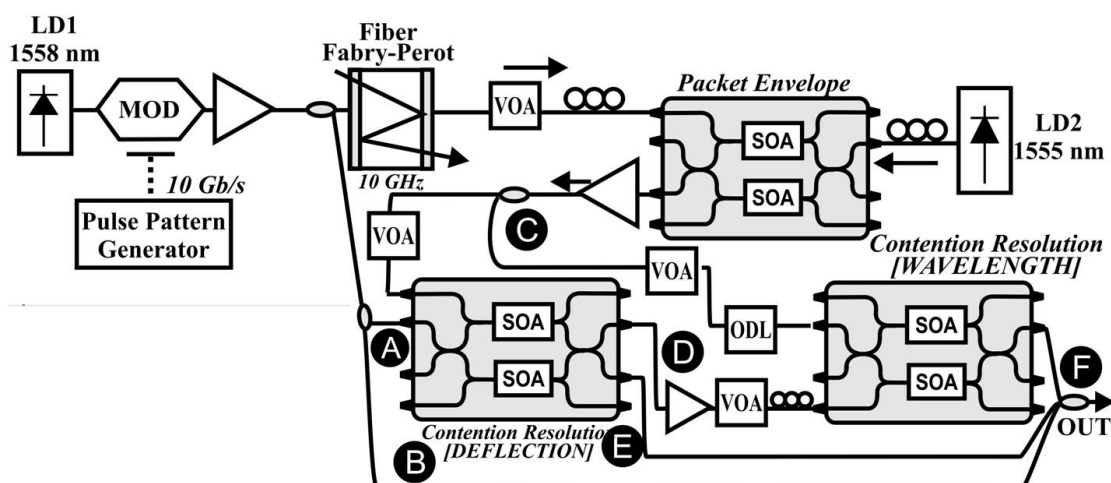
Σχήμα 3.2 Πειραματική διάταξη κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων για λειτουργία 10 Gb/s NRZ.

Η δίοδος laser LD1 εκπέμπει ένα συνεχές φως στα 1558 nm με μέση ισχύ 10 mW. Το συνεχές φως διαμορφώνεται σε πακέτα δεδομένων σε έναν ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή ο οποίος οδηγείται από μία ηλεκτρονική γεννήτρια ψευδοτυχαίων ακολουθιών στα 10 Gb/s. Με κατάλληλη επιλογή του pattern, προκύπτουν στην έξοδο του διαμορφωτή πακέτα δεδομένων στα 10 Gb/s NRZ (σχήμα 3.2 (α)-(β)). Η ροή πακέτων S1, που αποτελείται από το πακέτο 3, εισέρχεται στο κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας. Αυτό αποτελείται από ένα φίλτρο Fabry-Pérot με ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) ίση με τη ρυθμοδότηση και λεπτότητα (Finesse) ίση με 47 και ένα SOA-MZI σε ρόλο εξισωτή. Για τον κορεσμό του SOA-MZI χρησιμοποιείται CW σήμα από δίοδο laser (LD2) στα 1555 nm. Το αποτέλεσμα είναι στην έξοδο του εξισωτή να προκύπτει η περιβάλλουσα του πακέτου 3 (σχήμα 3.2γ) σε μήκος κύματος διαφορετικό από αυτό των δεδομένων (1555 nm). Με κατάλληλη ενίσχυση η περιβάλλουσα χρησιμοποιείται ως σήμα ελέγχου μετάγοντας το πακέτο 2 της ροής S2, η οποία εισέρχεται στην πύλη από τη θέση Α. Έτσι η ροή S2

διασπάται στην έξοδο του οπτικού διακόπτη όπως φαίνεται στα σχήματα 3.2ε) – δ). Το πακέτο 1 πολυπλέκεται χρονικά μέσω ενός οπτικού συζεύκτη με το πακέτο 3 της ροής S1 επιτυγχάνοντας 100% χρήση του καναλιού. Για το πακέτο 2 οι επιλογές είναι η αποθήκευση σε οπτικό buffer (γραμμή καθυστέρησης), η μεταγωγή σε άλλη θύρα εξόδου ή η μετατροπή μήκους κύματος ώστε να είναι δυνατή η πολυπλεξία του με τα υπόλοιπα πακέτα χωρίς σύγκρουση. Στην ενότητα που ακολουθεί περιγράφεται η υλοποίηση κυκλώματος για μετατροπή του μήκους κύματος των συγκρουόμενων πακέτων.

3.3.2. Επίλυση συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η διάταξη που υλοποιήθηκε για την επίλυση των συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος των συγκρουόμενων πακέτων. Η διάταξη απεικονίζεται στο σχήμα 3.3 και αποτελεί μία επέκταση του κυκλώματος του σχήματος 3.2.

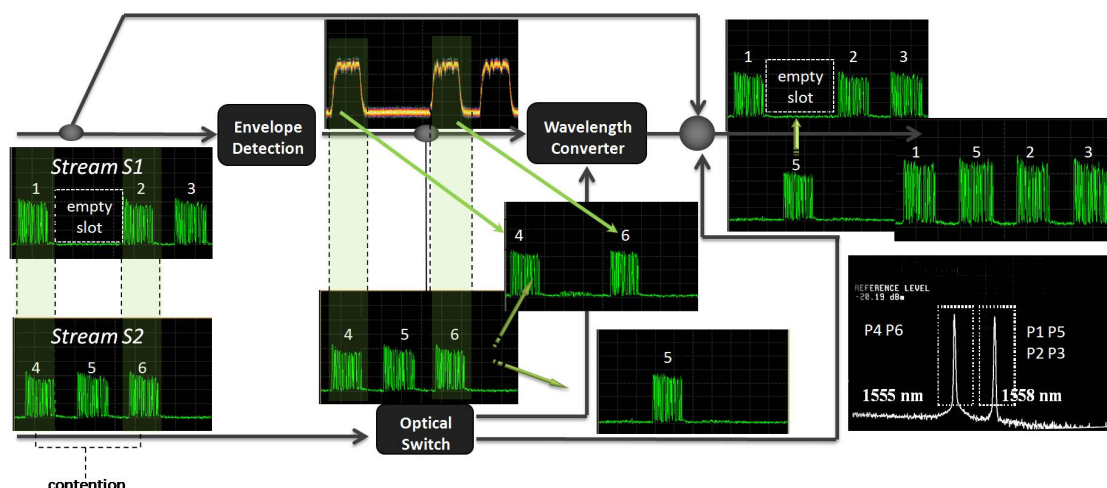


Σχήμα 3.3 Πειραματική διάταξη κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος για λειτουργία 10 Gb/s NRZ.

Η διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο κύκλωμα εστιάζεται στην προσθήκη ενός μετατροπέα μήκους κύματος, ο οποίος συνδέεται σειριακά τόσο με τον οπτικό διακόπτη όσο και με το κύκλωμα ανάκτησης της περιβάλλουσας. Συγκεκριμένα, η μία θύρα εισόδου και η μία θύρα ελέγχου του WC συνδέονται με την έξοδο του κυκλώματος PED και τη μία από τις δύο εξόδους του space switch αντίστοιχα. Αναφερόμενοι στο σχήμα

3.3, τα συγκρουόμενα πακέτα τα οποία μεταγόνται στη θύρα D του οπτικού διακόπτη προωθούνται στο control port του μετατροπέα μήκους κύματος. Τελικά τα εκτρεπόμενα πακέτα εμφανίζονται στη θύρα F του WC στο μήκος κύματος της περιβάλλουσας. Επομένως όλα τα πακέτα των δύο εισερχόμενων ροών προωθούνται στην κοινή έξοδο χωρίς την εμφάνιση συγκρούσεων.

Το σχήμα 3.4 απεικονίζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Δύο ροές πακέτων αποτελούμενες από πακέτα των 75 bit εισέρχονται στο κύκλωμα. Η ροή S1 αποτελείται από τα πακέτα 1, 2 και 3 με ένα κενό packet slot μεταξύ των 1 και 2. Στη ροή S2 εμφανίζονται διαδοχικά τα πακέτα 4, 5 και 6, με τα 4, 6 να βρίσκονται σε επικαλυπτόμενα packet slots με τα πακέτα 1 και 2 της ροής S1. Σε αυτό το σενάριο προκύπτουν δύο περιπτώσεις συγκρούσεων.

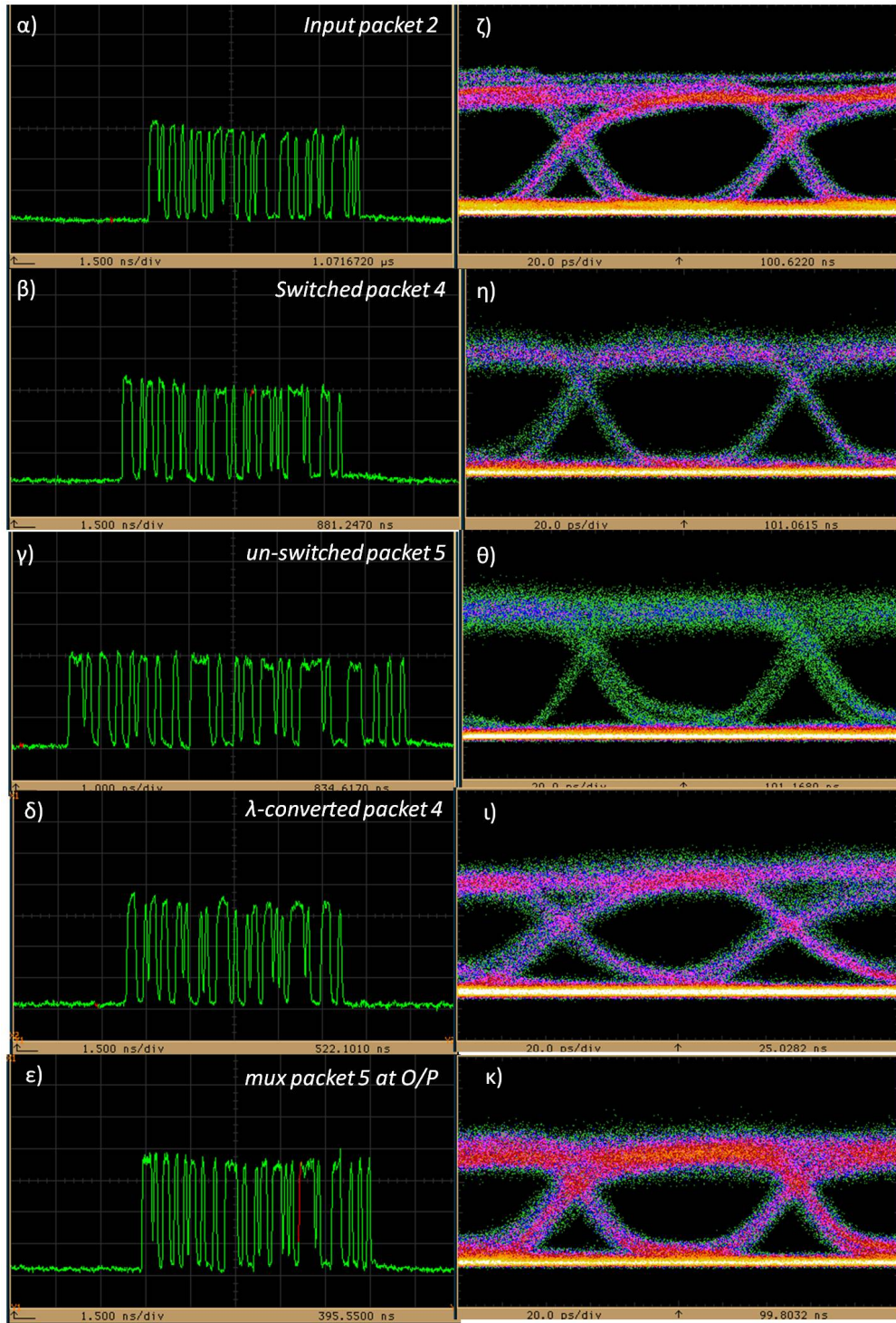


Σχήμα 3.4 Πειραματικά αποτελέσματα κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος για λειτουργία 10 Gb/s NRZ.

Η ροή S1 εισέρχεται στο κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας και προκύπτουν οι περιβάλλουσες των πακέτων 1, 2 και 3, οι οποίες χρησιμοποιούνται σαν control στον οπτικό διακόπτη. Αντίστοιχα η ροή S2 εισέρχεται από τη θύρα εισόδου στον οπτικό διακόπτη και οι περιβάλλουσες μεταγόνουν τα πακέτα 4 και 6, ενώ το πακέτο 5 συνεχίζει στη θύρα μη-μεταγωγής. Το πακέτο 5 συναντά τα πακέτα 1, 2 και 3 στην έξοδο του κυκλώματος και “γεμίζοντας” το κενό packet slot, προκύπτει μία πολυπλεγμένη στο χρόνο ροή πακέτων αποτελούμενη από τα πακέτα 1, 5, 2 και 3. Όπως φαίνεται από το

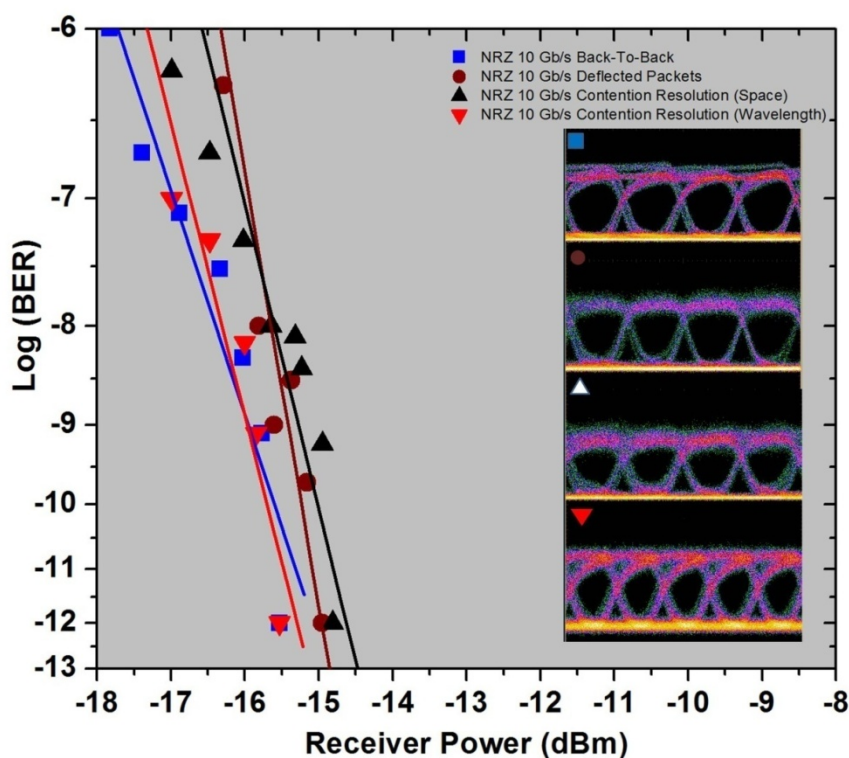
οπτικό φάσμα η ροή αυτή διατηρεί το αρχικό μήκος κύματος 1558 nm. Τα πακέτα 4, 6 εισέρχονται σαν control στο WC συγχρονισμένα με τις περιβάλλουσες των πακέτων 1, 2 και μετατρέπεται το μήκος κύματος τους στο μήκος κύματος της περιβάλλουσας. Η έξοδος του WC πολυπλέκεται στην κοινή έξοδο του κυκλώματος στην οποία εμφανίζονται δύο μήκη κύματος – 1555 nm για τα συγκρουόμενα πακέτα και 1558 nm για τα πακέτα με προτεραιότητα και τα πακέτα που δεν εμφανίζονται σε επικαλυπτόμενα packet slots.

Το σχήμα 3.5 απεικονίζει τις πειραματικές μετρήσεις που καταγράφηκαν για το χαρακτηρισμό των σημάτων σε διάφορα σημεία του κυκλώματος. Από τα χρονικά ίχνη των πακέτων και τα διαγράμματα ματιού προκύπτει ότι τα σήματα στις δύο εξόδους του οπτικού διακόπτη, στην έξοδο του WC και στην έξοδο του κυκλώματος είναι πολύ καλής ποιότητας. Για τον πλήρη χαρακτηρισμό της διάταξης πραγματοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες μετρήσεις σφαλμάτων (bit error ratio – BER).



Σχήμα 3.5 Πειραματικά αποτελέσματα: α) – ε) χρονικό ίχνος πακέτων στην είσοδο α), στις εξόδους του οπτικού διακόπτη β, γ), στην έξοδο του WC δ) και στην έξοδο του κυκλώματος ε). ζ) – κ) διαγράμματα ματιού σημάτων στα αντίστοιχα σημεία του κυκλώματος.

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται οι μετρήσεις BER για το κύκλωμα. Σύμφωνα με τις καμπύλες BER τα πακέτα που μεταγονται στον οπτικό διακόπτη (πακέτα 4 και 6) παρουσιάζουν power penalty της τάξης του 1 dB. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επιδείνωση του OSNR του σήματος λόγω της μετάδοσης μέσα από το διακόπτη κατά τη διαδικασία της μεταγωγής από τις περιβάλλουσες. Τα πολυπλεγμένα πακέτα στην έξοδο εμφανίζουν το ίδιο power penalty, γεγονός που φανερώνει ότι η παθητική πολυπλεξία των πακέτων δεν προκαλεί κάποια παραμόρφωση στο οπτικό σήμα. Τα πακέτα των οποίων το μήκος κύματος έχει μετατραπεί παρουσιάζουν το μικρότερο power penalty φανερώνοντας τις αναγεννητικές ιδιότητες της διαδικασίας. Συγκεκριμένα, τα μεταγόμενα πακέτα στην έξοδο του οπτικού διακόπτη “εγγράφονται” στο νέο CW των περιβαλλουσών, με αποτέλεσμα να λαμβάνει χώρα μία διαδικασία 2R αναγέννησης.

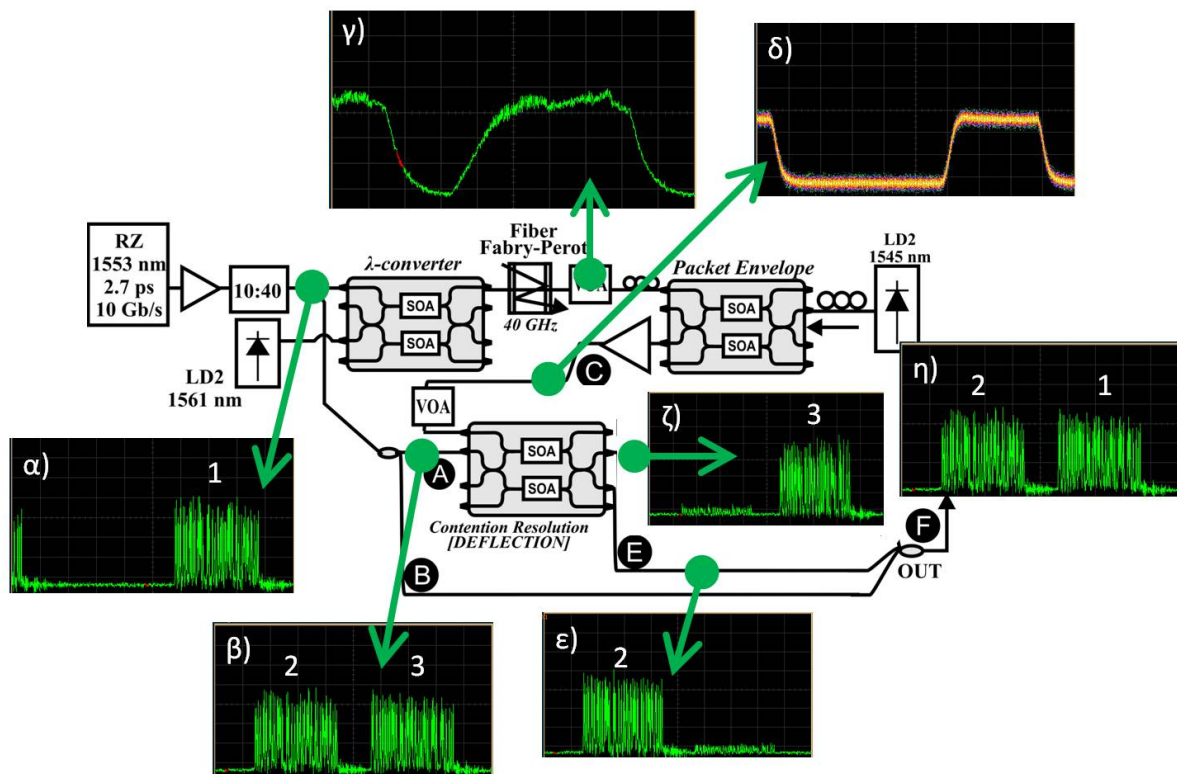


Σχήμα 3.6 Καμπύλες BER για το κύκλωμα επίλυσης συγκρούσεων πακέτων με μετατροπή μήκους κύματος για 10 Gb/s NRZ.

3.4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΑ 40 Gb/s RZ

3.4.1. Επίλυση συγκρούσεων με εκτροπή πακέτων στο πεδίο του χώρου

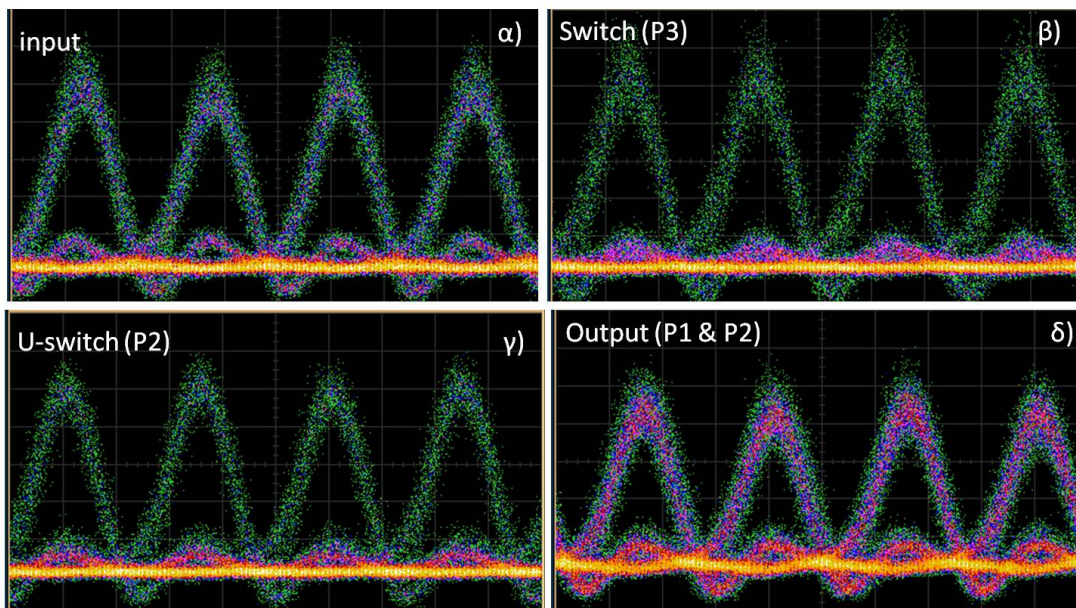
Όμοια με την παράγραφο 3.3.1 το πρώτο πείραμα αφορά την επίλυση των συγκρούσεων στο πεδίο του χώρου. Το Σχήμα 3.7 δείχνει την πειραματική διάταξη και τα αποτελέσματα για το πείραμα στα 40 Gb/s RZ.



Σχήμα 3.7 Πειραματική διάταξη κυκλώματος και χρονικά ίχνη πακέτων για επίλυση συγκρούσεων στο πεδίο του χώρου για λειτουργία 40 Gb/s RZ.

Μία δίοδος laser διαμορφώνεται και έπειτα από ένα στάδιο συμπίεσης εκπέμπει παλμούς εύρους 2.7 ps στα 1553 nm και σε ρυθμό 10 GHz. Οι παλμοί διαμορφώνονται σε έναν ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή και κατόπιν η 10 Gb/s PRBS ακολουθία πολυπλέκεται σε έναν τετραπλασιαστή για την παραγωγή 40 Gb/s PRBS σήματος. Με κατάλληλη επιλογή του μορφοτύπου, προκύπτουν στην έξοδο του διαμορφωτή πακέτα δεδομένων στα 40 Gb/s RZ (σχήμα 3.7 (α)-(β)). Η ροή πακέτων α), που αποτελείται από το πακέτο 1, εισέρχεται στο κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας. Αυτό αποτελείται από ένα φίλτρο

Fabry-Pérot με ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) ίση με τη ρυθμοδότηση και λεπτότητα (Finesse) ίση με 39 και δύο SOA-MZIs. Για τον κορεσμό των SOA-MZIs χρησιμοποιούνται δύο δίοδοι laser στα 1561 nm και 1545 nm αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα είναι στην έξοδο του πρώτου SOA-MZI να προκύπτει το σήμα του σχήματος 3.7γ), ενώ στην έξοδο του δεύτερου εξισωτή προκύπτει η περιβάλλουσα του πακέτου 1 (σχήμα 3.7δ) σε μήκος κύματος διαφορετικό από αυτό των δεδομένων (1545 nm). Με κατάλληλη ενίσχυση η περιβάλλουσα χρησιμοποιείται ως σήμα ελέγχου μετάνοντας το πακέτο 3 της ροής β), η οποία εισέρχεται στην πύλη από τη θέση Α. Με αυτόν τον τρόπο, η ροή β) διασπάται στην έξοδο του οπτικού διακόπτη όπως φαίνεται στα σχήματα 3.7ε) – ζ). Το πακέτο 2 πολυπλέκεται χρονικά μέσω ενός οπτικού συζεύκτη με το πακέτο 1 επιτυγχάνοντας 100% χρήση του καναλιού. Το σχήμα 3.8 απεικονίζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Από το σχήμα προκύπτουν ανοιχτά τα διαγράμματα ματιού για το εκτρεπόμενο πακέτο 3 (3.8β), το μη εκτρεπόμενο πακέτο 2 (3.8γ) αλλά και τα πολυπλεγμένα πακέτα 1 και 2 στην έξοδο του κυκλώματος (3.8δ).

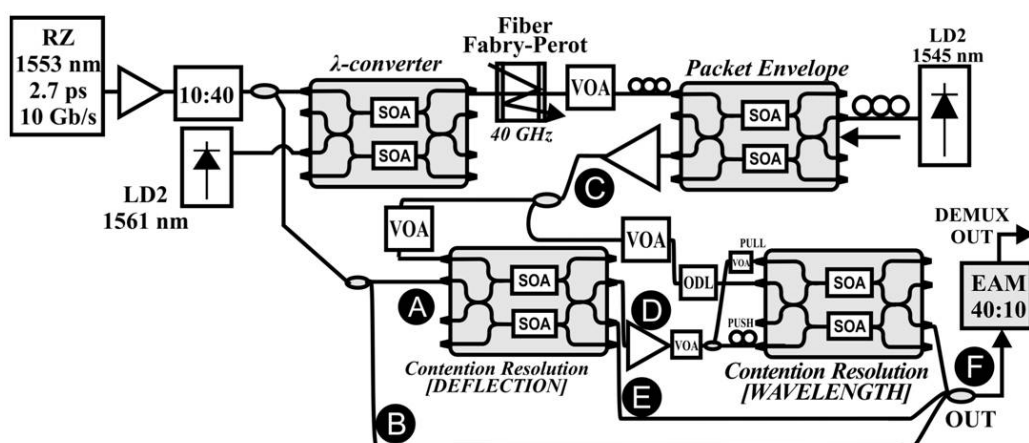


Σχήμα 3.8 Πειραματικά αποτελέσματα κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων στο πεδίο του χώρου για λειτουργία 40 Gb/s RZ.

Για το εκτρεπόμενο πακέτο 3 οι επιλογές είναι η αποθήκευση σε οπτική γραμμή καθυστέρησης, η μεταγωγή σε άλλη θύρα εξόδου ή η μετατροπή μήκους κύματος ώστε να είναι δυνατή η πολυπλεξία του με τα υπόλοιπα πακέτα χωρίς σύγκρουση. Στην ενότητα που ακολουθεί περιγράφεται η υλοποίηση κυκλώματος για μετατροπή του μήκους κύματος των συγκρουόμενων πακέτων.

3.4.2. Επίλυση συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η διάταξη που υλοποιήθηκε για την επίλυση των συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος των συγκρουόμενων πακέτων. Η διάταξη απεικονίζεται στο σχήμα 3.9 και αποτελεί μία επέκταση του κυκλώματος του σχήματος 3.7.

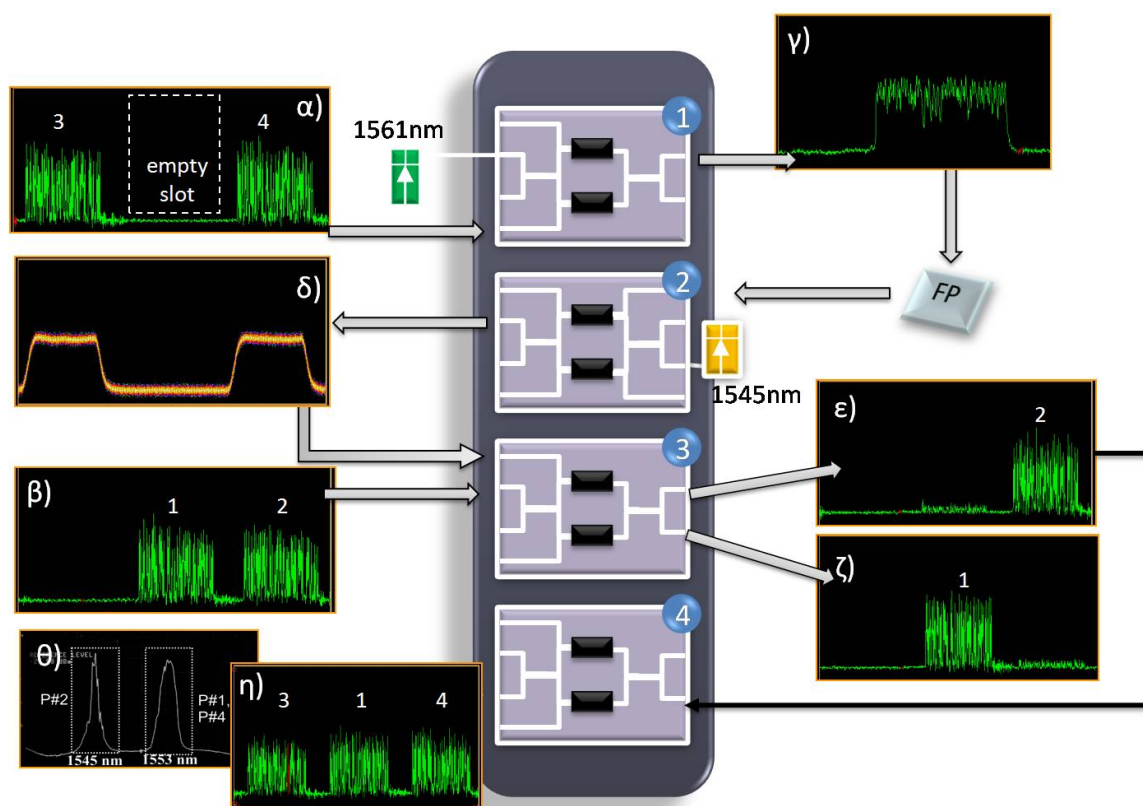


Σχήμα 3.9 Πειραματική διάταξη κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος για λειτουργία 10 Gb/s NRZ.

Όμοια με το πείραμα στα 10 Gb/s NRZ, η διαφορά σε σχέση με το κύκλωμα επίλυσης συγκρούσεων στο πεδίο του χώρου εστιάζεται στην προσθήκη ενός μετατροπέα μήκους κύματος, ο οποίος συνδέεται σειριακά τόσο με τον οπτικό διακόπτη όσο και με το κύκλωμα ανάκτησης της περιβάλλουσας.

Το σχήμα 3.10 απεικονίζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Δύο ροές πακέτων αποτελούμενες από πακέτα των 96 bit εισέρχονται στο κύκλωμα. Η ροή α) αποτελείται από τα πακέτα 3 και 4. Στη ροή β) εμφανίζονται διαδοχικά τα πακέτα 2 και 1 με το πακέτο

2 να συμπίπτει χρονικά με το πακέτο 4. Σε αυτό το σενάριο προκύπτουν δύο περιπτώσεις συγκρούσεων.

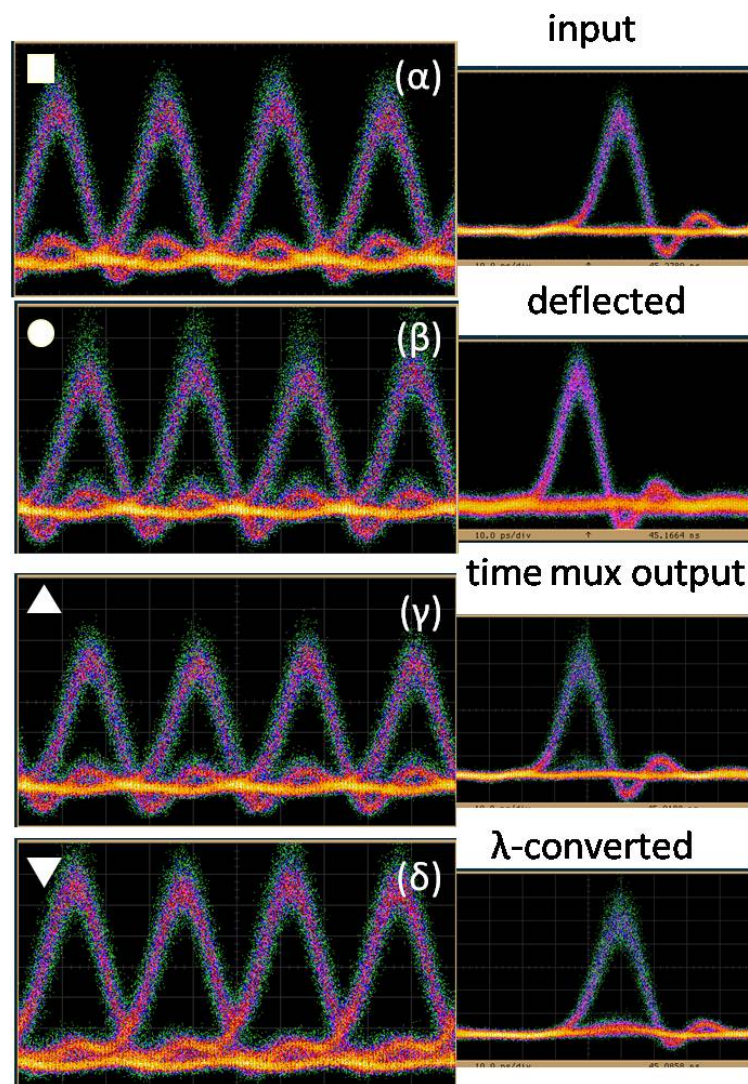


Σχήμα 3.10 Πειραματικά αποτελέσματα κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος για λειτουργία 40 Gb/s RZ.

Η ροή α) εισέρχεται στο κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας (SOA-MZI 1,2 και FPF) και προκύπτουν οι περιβάλλουσες των πακέτων 3 και 4, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως σήμα ελέγχου στον οπτικό διακόπτη 3. Αντίστοιχα η ροή β) εισέρχεται από τη θύρα εισόδου του ίδιου οπτικού διακόπτη και οι περιβάλλουσες 4 μετάγει το πακέτο 2 ενώ το πακέτο 1 συνεχίζει στη θύρα μη-μεταγωγής. Έτσι το πακέτο 1 συναντά τα πακέτα 3 και 4 στην έξοδο του κυκλώματος και “γεμίζοντας” το κενό packet slot, προκύπτει μία πολυπλεγμένη στο χρόνο ροή πακέτων αποτελούμενη από τα πακέτα 4, 1 και 3 (σχήμα 3.10η). Όπως φαίνεται από το οπτικό φάσμα (σχήμα 3.10θ) η ροή αυτή διατηρεί το αρχικό μήκος κύματος 1553 nm. Το πακέτο 2 εισέρχεται ως σήμα ελέγχου στο WC 4 συγχρονισμένο με την περιβάλλουσα του πακέτου 4 και μετατρέπεται το μήκος κύματος του στο μήκος κύματος της περιβάλλουσας. Η έξοδος του WC πολυπλέκεται στην κοινή έξοδο του κυκλώματος στην οποία εμφανίζονται δύο μήκη κύματος – 1545 nm για τα

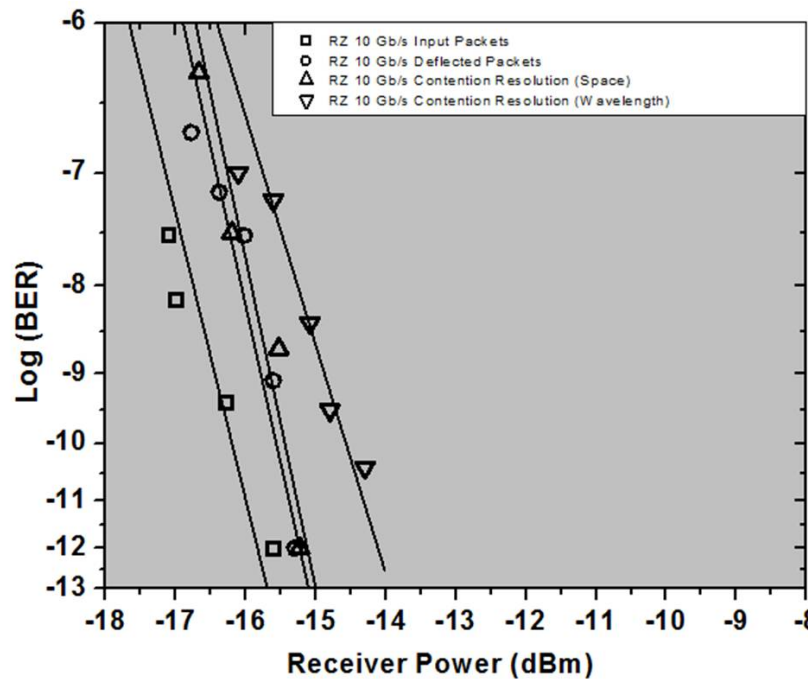
συγκρουόμενα πακέτα και 1553 nm για τα πακέτα με προτεραιότητα και τα πακέτα που δεν εμφανίζονται σε επικαλυπτόμενα packet slots.

Το σχήμα 3.11 απεικονίζει τις πειραματικές μετρήσεις. Από τα διαγράμματα ματιού στα 40 Gb/s (αριστερά) και τα αποπολυπλεγμένα διαγράμματα ματιού στα 10 Gb/s (δεξιά) προκύπτει ότι τα σήματα στις δύο εξόδους του οπτικού διακόπτη (σχήμα 3.11β), στην έξοδο του μετατροπέα μήκους κύματος (σχήμα 3.11γ) και στην έξοδο του κυκλώματος (σχήμα 3.11δ) είναι πολύ καλής ποιότητας. Για τον πλήρη χαρακτηρισμό της διάταξης πραγματοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες μετρήσεις σφαλμάτων (bit error ratio – BER).



Σχήμα 3.11 Πειραματικά αποτελέσματα κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων με μετατροπή μήκους κύματος για λειτουργία 40 Gb/s.

Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζονται οι μετρήσεις BER για το κύκλωμα. Σύμφωνα με τις καμπύλες BER το πακέτο που μεταγεται στον οπτικό διακόπτη (πακέτο 2) παρουσιάζει power penalty της τάξης του 1 dB. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επιδείνωση του OSNR του σήματος λόγω της μετάδοσης μέσα από το διακόπτη κατά τη διαδικασία της μεταγωγής από τις περιβάλλουσες. Τα πολυπλεγμένα πακέτα στην έξοδο εμφανίζουν το ίδιο power penalty, γεγονός που φανερώνει ότι η παθητική πολυπλεξία των πακέτων δεν προκαλεί κάποια παραμόρφωση στο οπτικό σήμα. Τα πακέτα των οποίων το μήκος κύματος έχει μετατραπεί παρουσιάζουν το power penalty της τάξης των 2 dB, το οποίο οφείλεται στη συσσώρευση θορύβου στο κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας από την λειτουργία δύο συνεχόμενων SOA-MZIs.



Σχήμα 3.12 Καμπύλες BER για το κύκλωμα επίλυσης συγκρούσεων πακέτων με μετατροπή μήκους κύματος για 40 Gb/s RZ.

3.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας σε συνδυασμό με ένα χωρικό οπτικό μεταγωγέα και ένα μετατροπέα μήκους κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση και

επίλυση των συγκρούσεων οπτικών πακέτων σε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 40 Gb/s. Το κύκλωμα είναι συμβατό με σύγχρονα οπτικά πακέτα (slotted operation) και μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει και αναγνώριση της προτεραιότητας των οπτικών πακέτων προτού αυτά προωθηθούν στα κυκλώματα μεταγωγής και μετατροπής μήκους κύματος. Για ασύγχρονα οπτικά πακέτα (asynchronous transfer mode - ATM) είναι απαραίτητη η υλοποίηση κυκλώματος οπτικού μανδαλωτή (latch) με χρήση οπτικών flip-flops.

3.6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

-
1. L. Stampoulidis, E. Kehayas, D. Apostolopoulos, P. Bakopoulos, K. Vysokinos, and H. Avramopoulos, "On-the-Fly All-Optical Contention Resolution for NRZ and RZ Data Formats Using Packet Envelope Detection and Integrated Optical Switches", IEEE Photon. Technol. Lett., VOL. 19, NO. 8, pp. 538-541, APRIL 15, 2007.
 2. 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", presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2006, We1.4.2, Cannes France.

4. ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ

ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ

ΡΟΗΣ

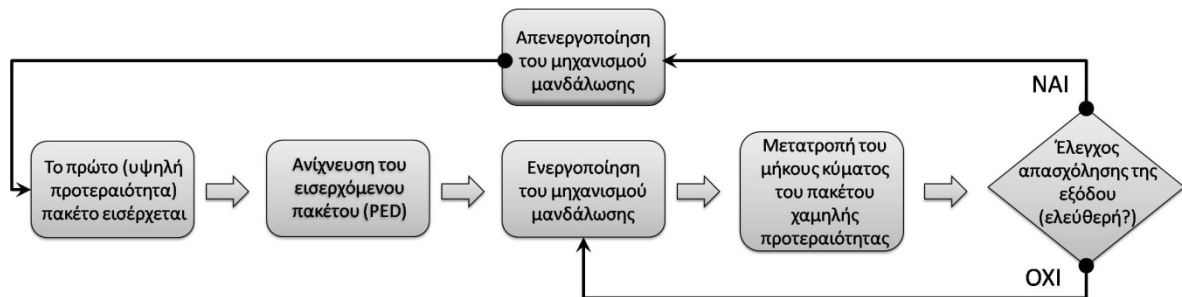
“Put the packet down slowly...”

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός και η πειραματική επίδειξη του κυκλώματος επίλυσης συγκρούσεων (contention resolution circuit – CRC) για οπτικά πακέτα εκρηκτικής ροής (burst-mode). Το κύκλωμα υλοποιήθηκε με τη χρήση των υβριδικά ολοκληρωμένων συστοιχιών SOA-MZIs και ενός διπλού υβριδικά ολοκληρωμένου flip-flop βασισμένο σε συζευγμένα SOA-MZIs. Το κύκλωμα επιλύει τις συγκρούσεις μεταξύ ασύγχρονων οπτικών πακέτων μεταβλητού μήκους συνδυάζοντας δύο κυκλώματα ανίχνευσης περιβάλλουσας, οπτική χωρική μεταγωγή και μετατροπή μήκους κύματος. Τα flip-flops υλοποιούν μία λειτουργία οπτικής μανδάλωσης, η οποία εγγυάται την ακεραιότητα των οπτικών πακέτων. Το κύκλωμα λειτουργεί σε first-come-first-served (FIFO) βάση: τα πακέτα τα οποία φτάνουν πρώτα στο σύστημα προωθούνται στην έξοδο διατηρώντας το μήκος κύματός τους, ενώ τα πακέτα τα οποία έπονται από διαφορετική θύρα εισόδου και τα οποία βρίσκονται σε επικαλυπτόμενες χρονοθυρίδες μετατρέπονται σε νέο μήκος κύματος με αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος.^{1,2}

4.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η βασική ιδέα του burst-mode κυκλώματος επίλυσης των συγκρούσεων απεικονίζεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Αλγόριθμος.

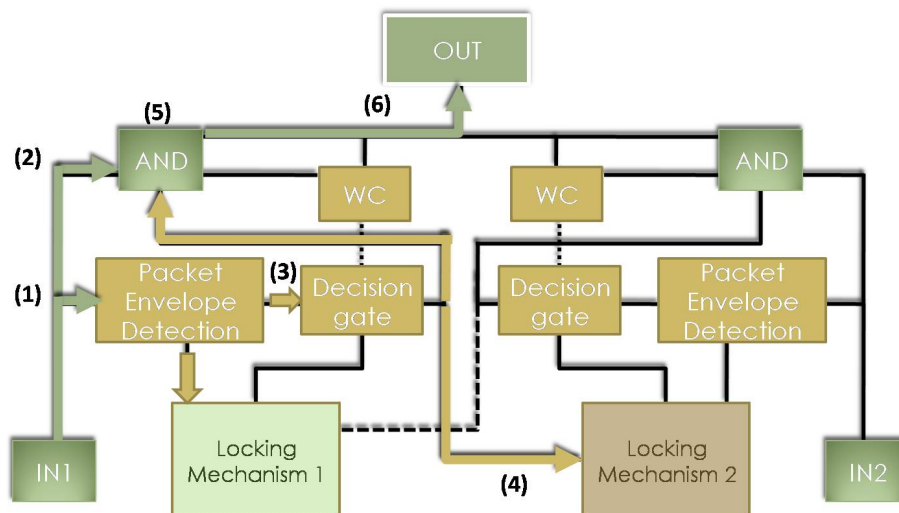
Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.1 οι συγκρούσεις επιλύονται σε πέντε διαδοχικά βήματα:

1. Πρώτα γίνεται ανίχνευση του πακέτου το οποίο φτάνει πρώτο στο σύστημα με εξαγωγή της περιβάλλουσας του. Το πακέτο αυτό αποκτά αυτόματα υψηλή προτεραιότητα.
2. Η περιβάλλουσα του πακέτου ενεργοποιεί έναν μηχανισμό μανδάλωσης, ο οποίος αποτρέπει τα πακέτα τα οποία εισέρχονται από διαφορετική θύρα να χρησιμοποιήσουν την ίδια θύρα εξόδου.
3. Τα πακέτα τα οποία ζητούν την ίδια θύρα εξόδου και τα οποία είναι επικαλυπτόμενα στο χρόνο με το πακέτο υψηλής προτεραιότητας μετατρέπονται σε ένα νέο μήκος κύματος.
4. Ο μηχανισμός μανδάλωσης παραμένει ενεργός για όλο το χρονικό διάστημα για το οποίο το πακέτο υψηλής προτεραιότητας «απασχολεί» τη θύρα εξόδου.
5. Όταν η έξοδος του κυκλώματος απελευθερωθεί, ο μηχανισμός μανδάλωσης απενεργοποιείται αυτόματα και το σύστημα ανιχνεύει το επόμενο εισερχόμενο πακέτο.

Το block διάγραμμα και η αρχή λειτουργίας του κυκλώματος απεικονίζονται στο σχήμα 4.2. Το κύκλωμα αποτελείται από δύο όμοια υποσυστήματα καθένα από τα οποία περιλαμβάνει: α) ανίχνευση περιβάλλουσας, β) ένα κύκλωμα απόφασης, γ) ένα μηχανισμό μανδάλωσης, δ) μία οπτική πύλη AND και ε) ένα μετατροπέα μήκους κύματος.

Το κύκλωμα ανίχνευσης περιβάλλουσας ελέγχει το κύκλωμα απόφασης το οποίο με τη σειρά του ενεργοποιεί το μηχανισμό μανδάλωσης αλλά και την πύλη AND.

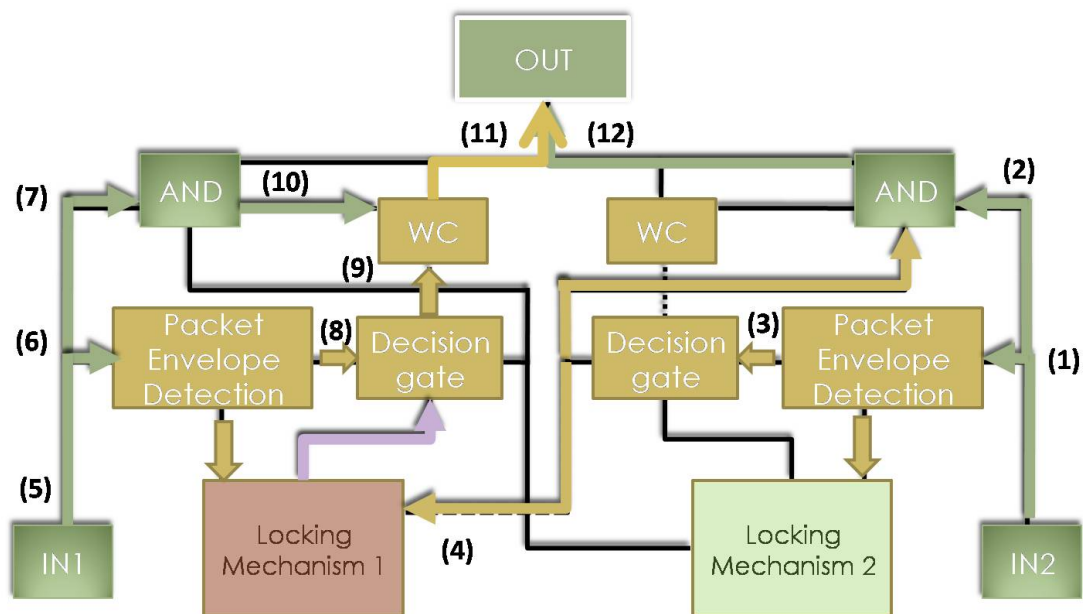
Στο σχήμα 4.2 απεικονίζεται η λειτουργία του κυκλώματος στην περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει σύγκρουση πακέτων. Σε αυτό το σενάριο το κύκλωμα λειτουργεί ως εξής. Υποθέτουμε ότι μόνο ένα πακέτο εισέρχεται από την είσοδο 1 (IN 1) του κυκλώματος (θέση 1). Το πακέτο προωθείται στην είσοδο της AND (θέση 2) ενώ ένα τμήμα του εισέρχεται στο κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας. Η περιβάλλουσα «τριγκάρει» το κύκλωμα απόφασης (decision gate) (θέση 3), το οποίο με απενεργοποιημένο το μανδαλωτή 1 (locking 1) προωθεί την περιβάλλουσα στο μανδαλωτή 2 (locking 2) (θέση 4) καθώς και στην οπτική πύλη AND (θέση 5). Με την πύλη AND «on» το πακέτο μεταγεται στην έξοδο του κυκλώματος (θέση 6) παρακάμπτοντας το μετατροπέα μήκους κύματος και διατηρώντας το αρχικό μήκος κύματος.



Σχήμα 4.2 Αρχή λειτουργίας του κυκλώματος σε περίπτωση που δεν παρατηρείται σύγκρουση πακέτων.

Το σχήμα 4.3 απεικονίζει την αρχή λειτουργίας του κυκλώματος σε περίπτωση σύγκρουσης. Ας υποθέσουμε ότι ένα πακέτο εισέρχεται πρώτο από την είσοδο 2 (IN 2) του κυκλώματος. Το πακέτο προωθείται στο κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας (θέση 1) και στην οπτική πύλη AND (θέση 2). Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση η περιβάλλουσα προωθείται στην πύλη AND (θέση 3) αλλά και στο μανδαλωτή 1 (θέση 4).

Ας υποθέσουμε ότι εκείνη τη χρονική στιγμή εισέρχεται πακέτο από την είσοδο 2 (IN2) (θέση 5). Το πακέτο προωθείται στη θέση 6 και 7 αντίστοιχα. Η ανακτώμενη περιβάλλουσα ενεργοποιεί το κύκλωμα απόφασης το οποίο όμως υπό την επίδραση του μανδαλωτή (ο οποίος είναι «on») εκτρέπει την περιβάλλουσα προς τον μετατροπέα μήκους κύματος (θέση 9). Απουσία σήματος ελέγχου στην οπτική πύλη AND, το πακέτο από τη θέση 7 εκτρέπεται στη θέση 10 προς τον οπτικό μετατροπέα μήκους κύματος, όπου - συγχρονισμένο με την περιβάλλουσα - μετατρέπεται το μήκος κύματός του. Τελικά το πακέτο προωθείται στην έξοδο (θέση 11) μαζί με το πακέτο υψηλής προτεραιότητας (θέση 12) χωρίς την εμφάνιση συγκρούσεων. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο μανδαλωτής παραμένει ενεργός για όσο διαρκεί το πακέτο υψηλής προτεραιότητας. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα πακέτα τα οποία εισέρχονται από τη θύρα IN 1 θα μετατρέπονται στο μήκος κύματος της περιβάλλουσας τους όσο χρόνο διαρκεί το πακέτο υψηλής προτεραιότητας. Ο μηχανισμός μανδάλωσης απενεργοποιείται μόνο όταν το πακέτο υψηλής προτεραιότητας απελευθερώσει την έξοδο του κυκλώματος. Έτσι το κύκλωμα διατηρεί την ακεραιότητα όλων των πακέτων και αποφεύγεται η τμηματοποίηση τους (burst segmentation).

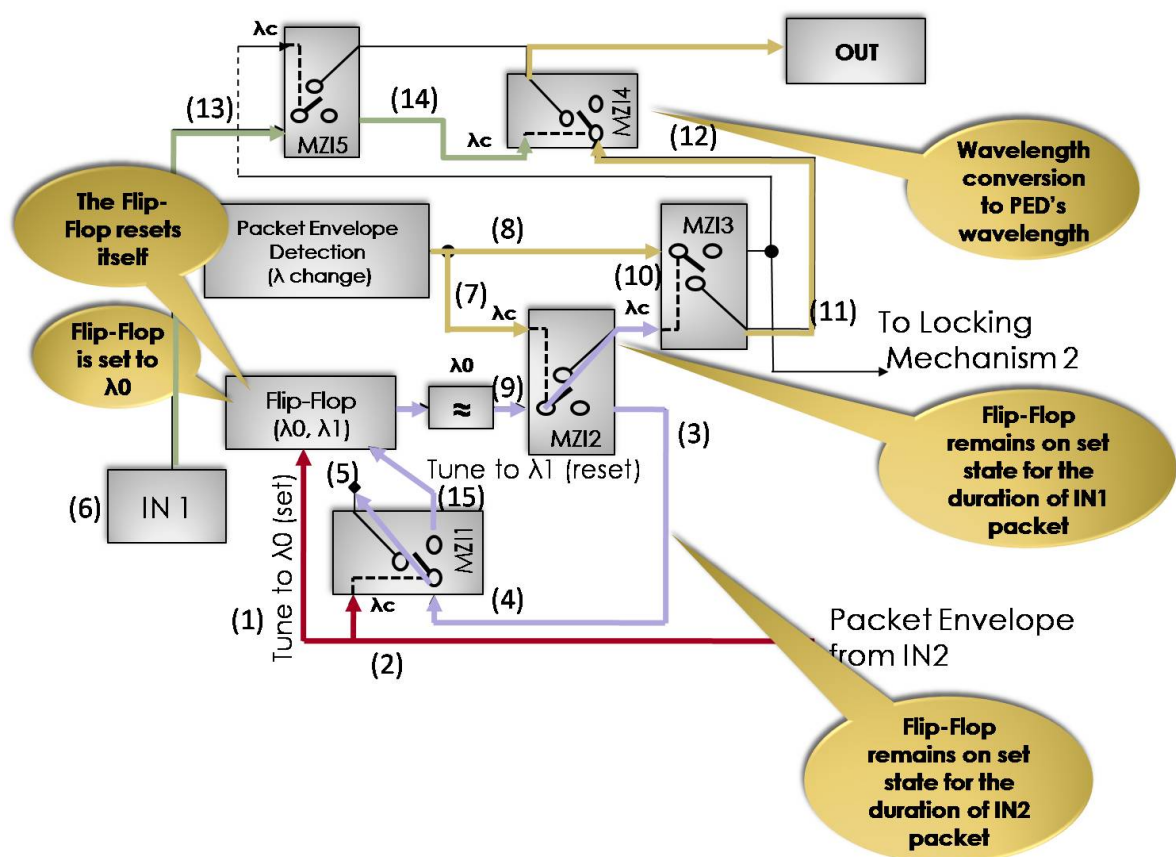


Σχήμα 4.3 Αρχή λειτουργίας του κυκλώματος σε περίπτωση σύγκρουσης πακέτων.

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.3.1 Μηχανισμός οπτικής μανδάλωσης

Το σχήμα 4.4 απεικονίζει το μηχανισμό «κλειδί» του κυκλώματος – το κύκλωμα το οποίο υλοποιεί την οπτική μανδάλωση. Το κύκλωμα αποτελείται από ένα οπτικά ελεγχόμενο flip-flop και τρεις πύλες AND (MZI 1, 2, 3). Υποθέτουμε ότι το flip-flop εκπέμπει στη idle κατάστασή του μήκος κύματος λ_1 το οποίο απορρίπτεται από το οπτικό φίλτρο το οποίο είναι τοποθετημένο στην έξοδο του.



Σχήμα 4.4 Κύκλωμα οπτικής μανδάλωσης.

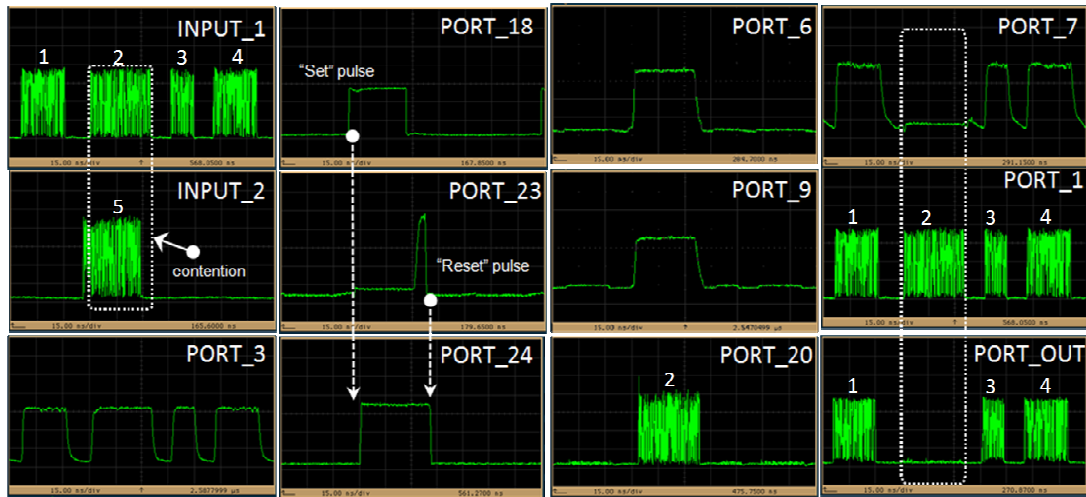
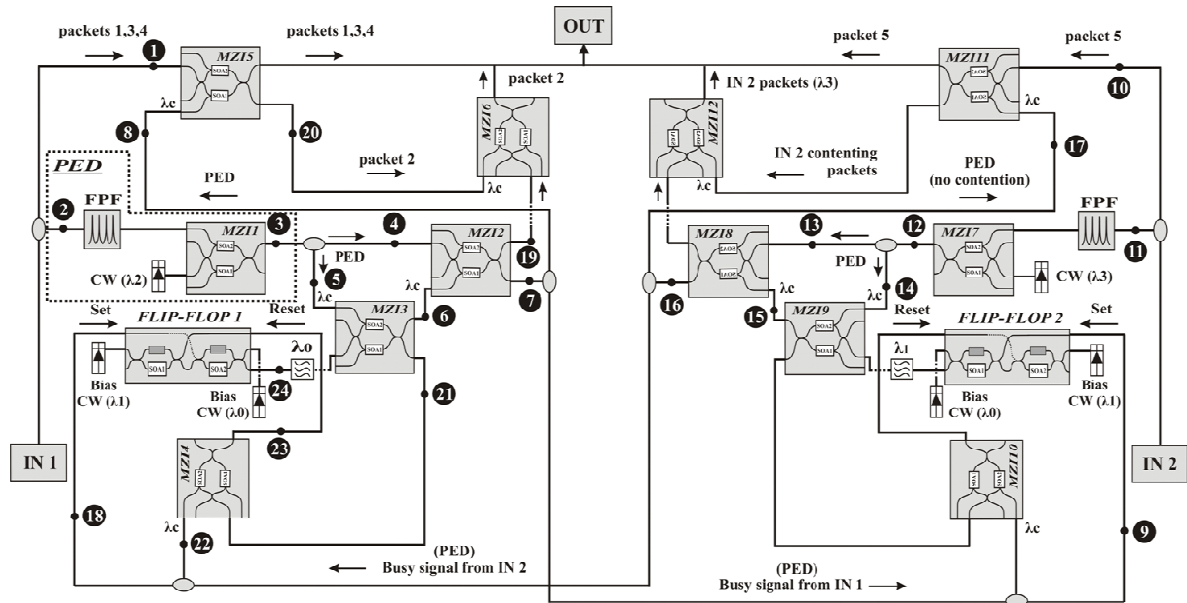
Η λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής. Ας υποθέσουμε ότι η περιβάλλουσα του πακέτου υψηλής προτεραιότητας έχει ενεργοποιήσει το flip-flop 1 (θέση 1). «Ενεργοποίηση» του flip-flop σημαίνει ότι το flip-flop - δεχόμενο οπτικό trigger παλμό - εκπέμπει μήκος κύματος λ_0 το οποίο «περνάει» από το οπτικό φίλτρο. Η περιβάλλουσα η οποία θέτει το flip-flop σε κατάσταση «on» χρησιμοποιείται και στο MZI 1 ως σήμα ελέγχου (θέση 2). Σε αυτή την περίπτωση – και απουσία σήματος ελέγχου στο MZI 2 – το

«φως» από το flip-flop διέρχεται από τη θέση 3 προς την είσοδο του MZI 1 (θέση 4), με στόχο την απενεργοποίηση του flip-flop. Η ύπαρξη όμως της περιβάλλουσας στη θέση 2 εκτρέπει το σήμα από το flip-flop στη θέση 5 και ο μανδαλωτής παραμένει σε κατάσταση «on». Αν εκείνη τη στιγμή εισέλθει πακέτο από τη θύρα IN 1 (θέση 6) τότε αυτό «γεννάει» μία περιβάλλουσα στις θέσεις 7 και 8. Η περιβάλλουσα στη θέση 7 μετάγει το σήμα του flip-flop από τη θέση 9 στη θέση 10. Στη συνέχεια, το σήμα στη θέση 10 μετάγει την περιβάλλουσα από τη θέση 8 στη θέση 11 στο MZI 3 και από εκεί στη θέση 12 (είσοδος MZI 4). Αυτομάτως με την παρέλευση της περιβάλλουσας από τη θέση 7, το MZI 2 αλλάζει κατάσταση μεταγωγής και ξαναστέλνει το σήμα από το flip-flop προς τη θέση 4. Το πακέτο από τη θέση 6 προωθείται στη θέση 13 (είσοδος MZI 5) και απουσία σήματος ελέγχου μετάγεται στη θέση 14 όπου μετατρέπεται το μήκος κύματός του στο μήκος κύματος της περιβάλλουσας. Με την παρέλευση της περιβάλλουσας από τη θύρα 2, ο MZI 1 αλλάζει κατάσταση μεταγωγής και επιτρέποντας το σήμα από το flip-flop να διέλθει από τη θέση 5 στη θέση 15 απενεργοποιεί το flip-flop. Η απενεργοποίηση του flip-flop σημαίνει την επαναφορά του σε κατάσταση idle με εκπομπή σήματος σε λ1 το οποίο «κόβεται» από το οπτικό φίλτρο και τελικά ο μηχανισμός μανδάλωσης απενεργοποιείται.

4.3.1 Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα

Το σχήμα 4.5 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του συστήματος και τα πειραματικά αποτελέσματα. Το μήκος κύματος των δεδομένων είναι στα 1558 nm και ο ρυθμός μετάδοσης 10 Gb/s με παλμούς NRZ. Τα μήκη κύματος για το flip-flop είναι λ0 1556 nm και λ1 1561 nm. Το CW που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της περιβάλλουσας είναι στα 1554 nm. Τα πακέτα 1 – 4 εισέρχονται από την είσοδο IN1 ενώ το πακέτο 5 εισέρχεται από την είσοδο IN2. Το πρώτο πακέτο που εισέρχεται στο σύστημα (πακέτο 1) διαιρείται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα εισέρχεται στο MZI 5 από τη θέση 1, ενώ το δεύτερο τμήμα εισέρχεται στο κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας από τη θέση 2. Το κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας αποτελείται από ένα Fabry-Pérot φίλτρο και ένα SOA-MZI (MZI 1). Η περιβάλλουσα εμφανίζεται στη θέση 3 και χωρίζεται σε δύο τμήματα: το πρώτο τμήμα εισέρχεται στο MZI 2 από τη θέση 4, ενώ το δεύτερο τμήμα

ελέγχει την κατάσταση μεταγωγής του MZI 3 εισερχόμενο από τη θέση 5. Καθώς δεν υπάρχει εισερχόμενο πακέτο από την είσοδο IN2, το flip-flop 1 παραμένει idle (εκπέμποντας σε λ1 το οποίο «κόβεται» από το οπτικό φίλτρο) και το MZI 3 δεν εκπέμπει σήμα ελέγχου στη θέση 6. Η απουσία σήματος ελέγχου στο MZI 2 αναγκάζει την περιβάλλουσα να μεταδοθεί από τη θέση 4 στη θέση 7. Τότε η περιβάλλουσα χωρίζεται σε δύο τμήματα: το ένα τμήμα ελέγχει την κατάσταση μεταγωγής του MZI 5 (θέση 8) και μετάγει το πακέτο 1 από τη θέση 1 στην έξοδο του κυκλώματος, ενώ το δεύτερο τμήμα εισέρχεται στο MZI 10 από τη θέση 9 τριγκάροντας το flip-flop 2 και ενεργοποιώντας το μηχανισμό μανδάλωσης. Αυτός ο μηχανισμός θα αναγκάσει όλα τα πακέτα τα οποία θα εισέρχονται από τη θύρα IN 2 να μετατραπούν σε νέο μήκος κύματος (1554 nm – περιβάλλουσα) πριν προωθηθούν στην έξοδο, μέχρι η έξοδος να απελευθερωθεί από το πακέτο 1.



Σχήμα 4.5 Αρχιτεκτονική και πειραματικά αποτελέσματα.

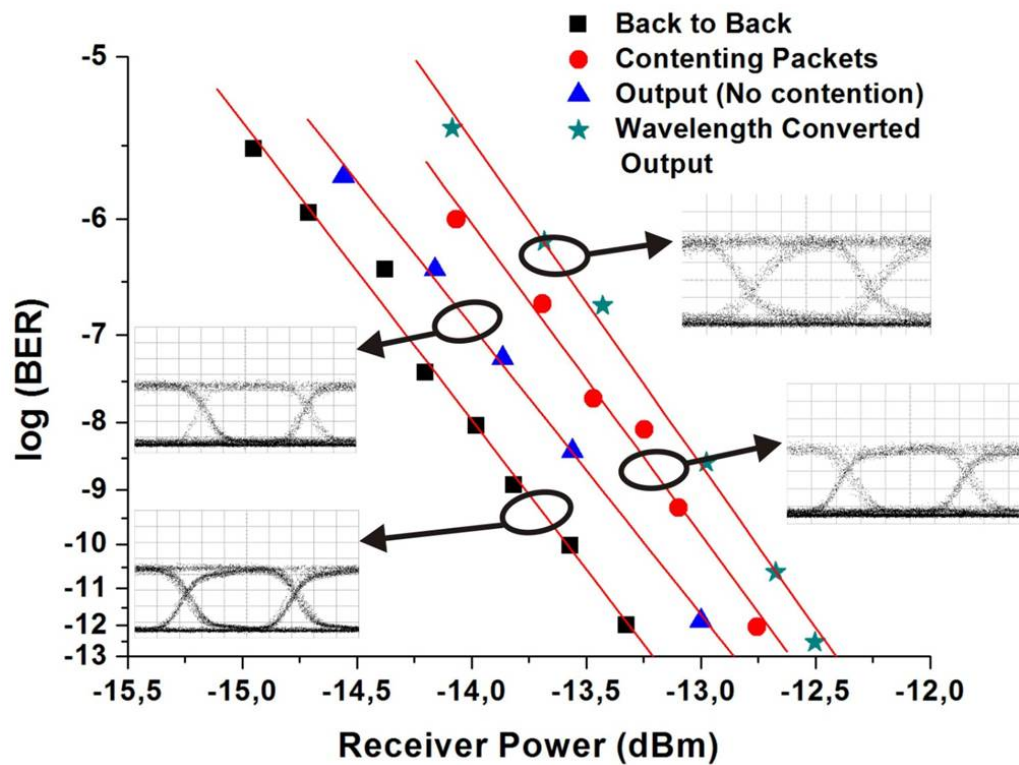
Στη συνέχεια το πακέτο 5 καταφθάνει πρώτο από την είσοδο IN 2, ενώ το πακέτο 2 εισέρχεται μετά από μία μικρή καθυστέρηση από τη θύρα IN 1. Το πακέτο 5 χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα εισέρχεται στο MZI 11 από τη θέση 10 ενώ το άλλο τμήμα εισέρχεται στο κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας από τη θέση 11. Η περιβάλλουσα η οποία δημιουργείται στη θέση 12 χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα εισέρχεται στο MZI 8 από τη θέση 13, ενώ το δεύτερο τμήμα ελέγχει την κατάσταση μεταγωγής του διακόπτη MZI 9 (θέση 14). Και σε αυτήν την περίπτωση η απουσία σήματος ελέγχου οδηγεί την περιβάλλουσα από τη θέση 14 στη θέση 16 όπου και χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα ελέγχει την κατάσταση μεταγωγής του MZI 11 από τη θέση 17 και επομένως μετάνι το πακέτο 5 από τη θέση 10 στην έξοδο του κυκλώματος. Το

δεύτερο τμήμα της περιβάλλουσας τριγκάρει το flip-flop 2 (εισερχόμενο από τη θέση 18) και έτσι το flip-flop ξεκινά να εκπέμπει φως σε μήκος κύματος λ_0 το οποίο «περνά» από το οπτικό φίλτρο. Στο μεταξύ το πακέτο 2 εισέρχεται από τη θύρα IN 1 και δημιουργεί μία περιβάλλουσα στη θέση 3.

Η περιβάλλουσα στη θέση 5 μετάνει το σήμα από το flip-flop 1 στο MZI 3, δημιουργώντας ένα σήμα ελέγχου στη θέση 6. Αυτό το σήμα ελέγχου μετάνει την περιβάλλουσα από τη θέση 4 στη θέση 19. Επομένως το πακέτο 2 στη θέση 1 μετάζεται στη θέση 20 και μετατρέπεται στο μήκος κύματος της περιβάλλουσας, η οποία εισέρχεται στο μετατροπέα μήκους κύματος MZI 16 από τη θέση 19. Έτσι το πακέτο 2 πολυπλέκεται στην έξοδο χωρίς σύγκρουση με το πακέτο 5. Όταν η περιβάλλουσα στη θέση 5 παρέλθει, η κατάσταση μεταγωγής του MZI 3 αλλάζει και η έξοδος του flip-flop μετάζεται στη θέση 21 φτάνοντας στο MZI 4. Στην περίπτωση που το πακέτο 5 είχε μεγαλύτερη διάρκεια από αυτή του πακέτου 2 τότε το “busy signal” (περιβάλλουσα) θα διατηρούσε το flip-flop 1 σε κατάσταση «on», οπότε κάθε επακόλουθο πακέτο από την είσοδο IN 1 θα μετατρεπόταν σε ένα νέο μήκος κύματος.

Με αυτόν τον τρόπο ο μηχανισμός μανδάλωσης διατηρεί την ακεραιότητα των οπτικών πακέτων και επιτρέπει την FIFO λειτουργία. Στην περίπτωση του σχήματος 4.5 το πακέτο 5 έχει διάρκεια μικρότερη από το πακέτο 2. Επομένως το σήμα στη θέση 21 μετάζεται στη θέση 23 θέτοντας το flip-flop σε κατάσταση idle. Τα πακέτα 3 και 4 τα οποία έπονται μετάζονται στην έξοδο του κυκλώματος ακολουθώντας πορεία ανάλογη με αυτή του πακέτου 1. Για τη σωστή packet-by-packet λειτουργία θα πρέπει ανάμεσα στα πακέτα να υπάρχει μία ελάχιστη απόσταση ασφαλείας (guardband). Αυτή η απόσταση ισούται με το χρόνο μετάδοσης του σήματος reset από τη θέση 21 στο reset του flip-flop.

Το σχήμα 4.6 απεικονίζει τις μετρήσεις BER. Ένα πέναλτυ μικρότερο από 0.5 dB μετρήθηκε για τα πακέτα υψηλής προτεραιότητας στην έξοδο του κυκλώματος, 0.75 dB για τα πακέτα τα οποία μετάζονται λόγω σύγκρουσης και 1 dB για τα πακέτα τα οποία μετατρέπονται στο μήκος κύματος της περιβάλλουσας.



Σχήμα 4.6 Καμπύλες BER και διαγράμματα ματιού.

4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε ένα φωτονικό σύστημα δρομολόγησης το οποίο επιλύει τις συγκρούσεις μεταξύ 10 Gb/s πακέτων εκρηκτικής ροής. Συνολικά απαιτούνται 14 ενεργά στοιχεία (12 SOA-MZI και 2 flip-flops) και στην περίπτωση μας το σύστημα υλοποιήθηκε με ένα συνολικό αριθμό από 4 συσκευές λόγω της ύπαρξης τετραπλών ολοκληρωμένων πυλών και διπλών ολοκληρωμένων flip-flops.

4.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

-
1. D. Apostolopoulos, P. Zakyntinos, L. Stampoulidis, E. Kehayas, R. McDougall, R. Harmon, A. Poustie, G. Maxwell, R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, E. Tangdionga, H. J. S. Dorren, and H. Avramopoulos, "Contention Resolution for Burst-Mode Traffic Using Integrated SOA-MZI Gate Arrays and Self-Resetting Optical Flip-Flops", IEEE Photon. Technol. Lett., VOL. 20, NO. 24, pp. 2024-2026, DECEMBER 15, 2008.
 2. P. Zakyntinos, D. Apostolopoulos, L. Stampoulidis, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell, R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, E. Tangdionga, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, "Successful Interconnection of SOA-MZI Arrays and Flip-Flops to Realize Intelligent, All-optical Routing", presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2008, Brussels, Belgium, We.2.D.2, VOL. 3, pp. 113-114.

5. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ ΣΕ ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΟΥΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΕΣ

“Carpe diem: Seize the day... and the buffer”

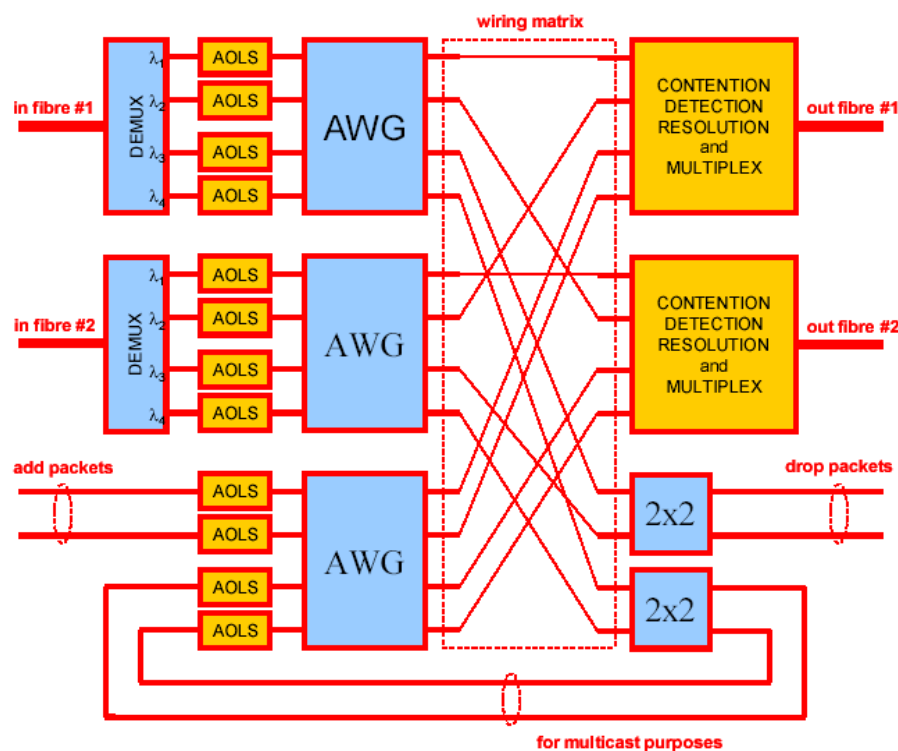
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση κυκλώματος ανίχνευσης και επίλυσης συγκρούσεων στο πεδίο του χρόνου για αμιγώς οπτικούς δρομολογητές, οι οποίοι περιλαμβάνουν αμιγώς οπτική αναγνώριση επικεφαλίδων. Το σύστημα παρέχει όλα τα απαραίτητα σήματα ελέγχου τα οποία απαιτούνται για τον έλεγχο ενός οπτικού συστήματος αποθήκευσης πακέτων (buffer). Ο buffer αποτελείται από 1x2 οπτικούς χωρικούς διακόπτες SOA-MZI και μία γραμμή καθυστέρησης (FDL). Η κατάσταση του buffer ελέγχεται δυναμικά σε κάθε χρονοθυρίδα, ενώ όλες οι αποφάσεις

για την προώθηση ή αποθήκευση των πακέτων γίνεται με αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος. Το κύκλωμα είναι κατάλληλο για output-buffered αρχιτεκτονικές και το σύστημα το οποίο θεωρήθηκε είναι ο αμιγώς οπτικός κόμβος LASAGNE, ο οποίος σχεδιάστηκε στα πλαίσια του ομώνυμου Ευρωπαϊκού προγράμματος.^{1,2,3}

5.2 Ο ΑΜΙΓΩΣ ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΗΣ LASAGNE

Η δομή του κόμβου LASAGNE απεικονίζεται στο σχήμα 5.1:



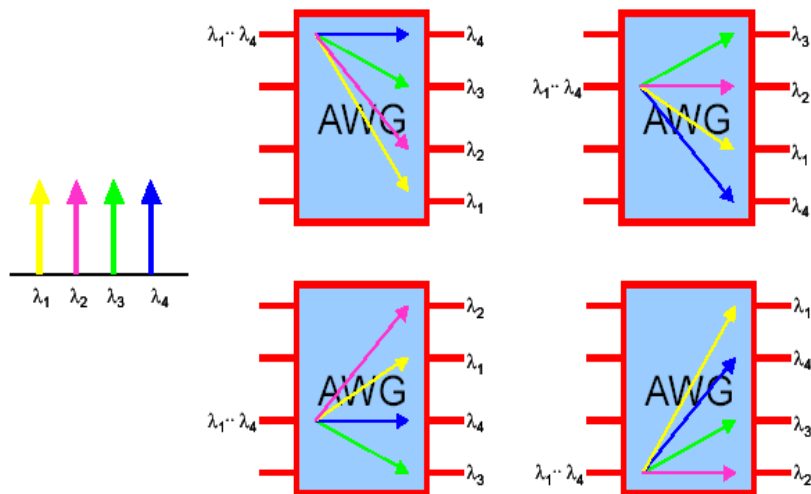
Σχήμα 5.1 Αρχιτεκτονική του δρομολογητή LASAGNE.

Στο δρομολογητή LASAGNE η φυσική μεταγωγή επιτυγχάνεται μέσω δρομολόγησης μήκους κύματος σε συστοιχίες φραγμάτων περίθλασης (Arrayed Waveguide Gratings - AWG). Για το σκοπό αυτό, κάθε αμιγώς οπτικός κόμβος μεταγωγής ετικέτας AOLS, ανάλογα με την ετικέτα του πακέτου, επιλέγει από τον πίνακα δρομολόγησης το αντίστοιχο μήκος κύματος, καθώς και τη νέα ετικέτα του πακέτου, για να φτάσει στην επιθυμητή έξοδο του AWG, επομένως και στην ίνα εξόδου. Κατά συνέπεια, η

συμπεριφορά δρομολόγησης του δρομολογητή LASAGNE καθορίζεται πλήρως από τους AWGs και την καλωδίωση μεταξύ των AWG και των ινών εξόδου.

Η συμπεριφορά των AWGs είναι μια συνάρτηση των ινών εισόδου και του μήκους κύματος και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2. Η συμπεριφορά (wiring matrix) του AWG είναι τέτοια που εξασφαλίζει λειτουργία χωρίς σύγκρουση μεταξύ κόμβων AOLS οι οποίοι τροφοδοτούνται από την ίδια θύρα εισόδου (internally non-blocking). Το τμήμα επίλυσης των συγκρούσεων επιλύει καταστάσεις κατά τις οποίες δύο πακέτα προορίζονται προς την ίδια ίνα την ίδια χρονική στιγμή, επιτελώντας τις εξής λειτουργίες:

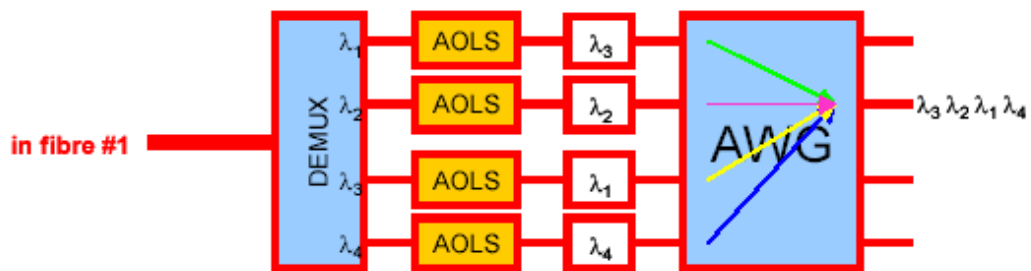
- Ανίχνευση των συγκρούσεων (contention detection)
- Επίλυση των συγκρούσεων με αποθήκευση πακέτων (contention resolution)
- Πολυπλεξία των πακέτων (multiplex)



Σχήμα 5.2 Συμπεριφορά AWG ως συνάρτηση των ινών εισόδου και του μήκους κύματος.

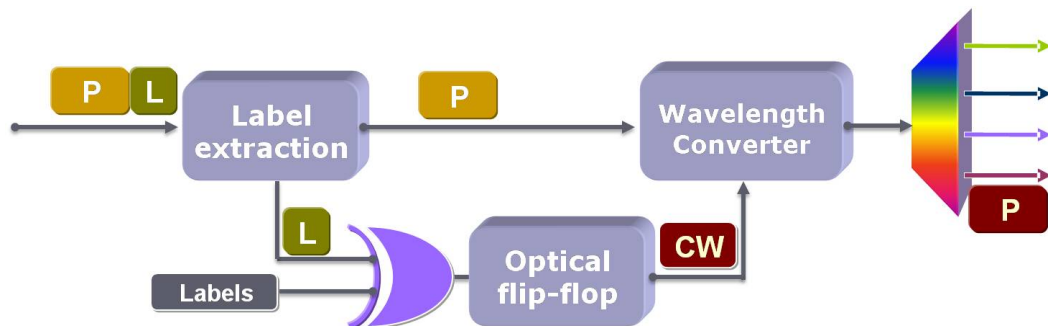
Μια διαδικασία μεταγωγής απεικονίζεται στο σχήμα 5.3, δηλαδή η πορεία των πακέτων από την ίνα #1 προς στην ίνα #2 και τα απαιτούμενα μήκη κύματος στην έξοδο των AOLS. Γίνεται φανερό ότι ποτέ δε συμβαίνει σύγκρουση στην έξοδο του AWG λόγω της συμπεριφοράς του AWG όπως περιγράφεται στο σχήμα 5.2. Η χρήση των AWG συνεπάγεται ότι για μια επιθυμητή φυσική μεταγωγή μια συγκεκριμένη δρομολόγηση

μήκους κύματος επιτυγχάνεται στην έξοδο του AWG (π.χ. η μεταγωγή ενός πακέτου μήκους κύματος #1 από την ίνα #1 στην ίνα #2 οδηγεί στο πακέτο μήκους κύματος #3). Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.3, ακόμη και στην περίπτωση που 4 πακέτα ζητούν την ίδια έξοδο του AWG την ίδια χρονική στιγμή, δε θα υπάρξει σύγκρουση, αφού όλα τα πακέτα θα είναι σε διαφορετικά μήκη κύματος. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται εσωτερικά στον κόμβο συγκρούσεις πακέτων, το οποίο σημαίνει ότι ανά είσοδο του κόμβου δε θα υπάρξουν ποτέ συγκρούσεις στις εξόδους των αντίστοιχων AWGs.



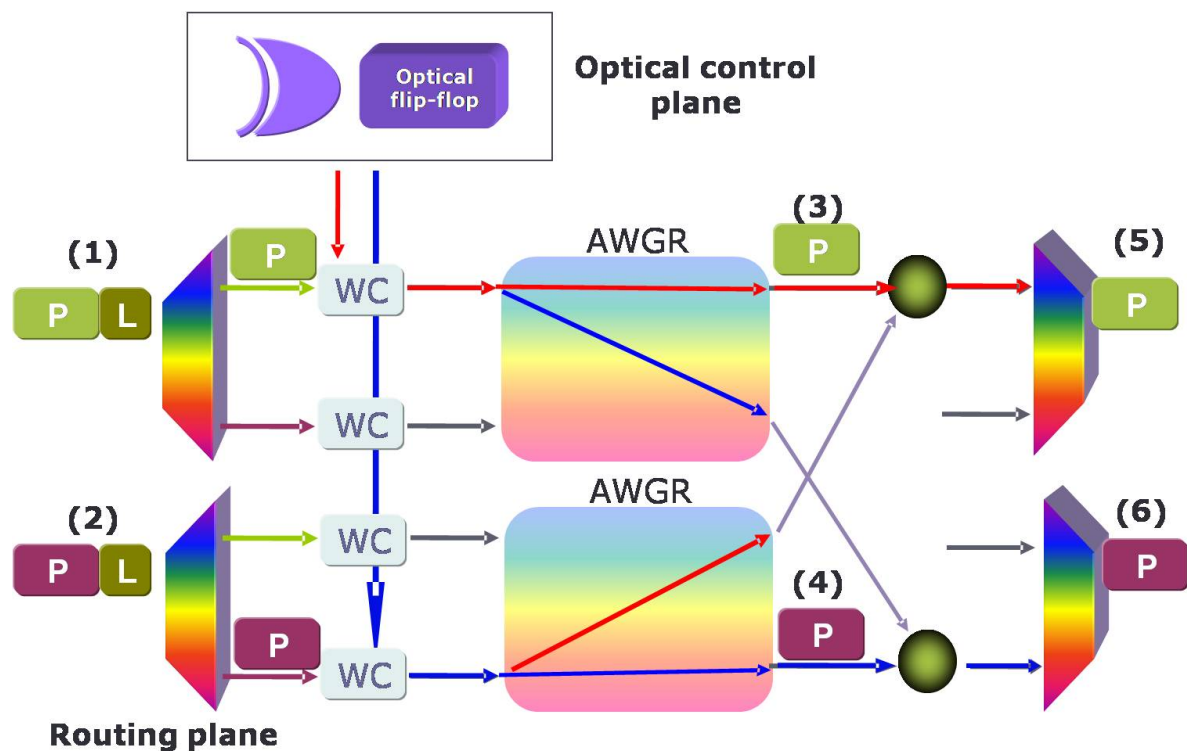
Σχήμα 5.3 Συμπεριφορά AOLS και AWG για μεταγωγή πακέτων από την ίνα #1 στην ίνα #2.

Η κύρια καινοτομία που εισάγει ο δρομολογητής LASAGNE είναι η χρήση συσχέτισης XOR για την αποκωδικοποίηση των επικεφαλίδων. Όταν ένα πακέτο εισέρχεται στο δρομολογητή, διαχωρίζεται από την επικεφαλίδα του, η οποία συγκρίνεται με έναν αριθμό από τοπικά patterns. Το αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης καθορίζει σε ποιο μήκος κύματος καθώς και από ποια θύρα εξόδου το πακέτο θα εξέλθει από το δρομολογητή (σχήμα 5.4). Κατά συνέπεια, για κάθε μήκος κύματος εισόδου υπάρχει μία συστοιχία από XOR και flip-flops τα οποία θα δώσουν το κατάλληλο μήκος κύματος για τη δρομολόγηση του πακέτου.



Σχήμα 5.4 Αμιγώς οπτική επεξεργασία επικεφαλίδας και μεταγωγή πακέτων.

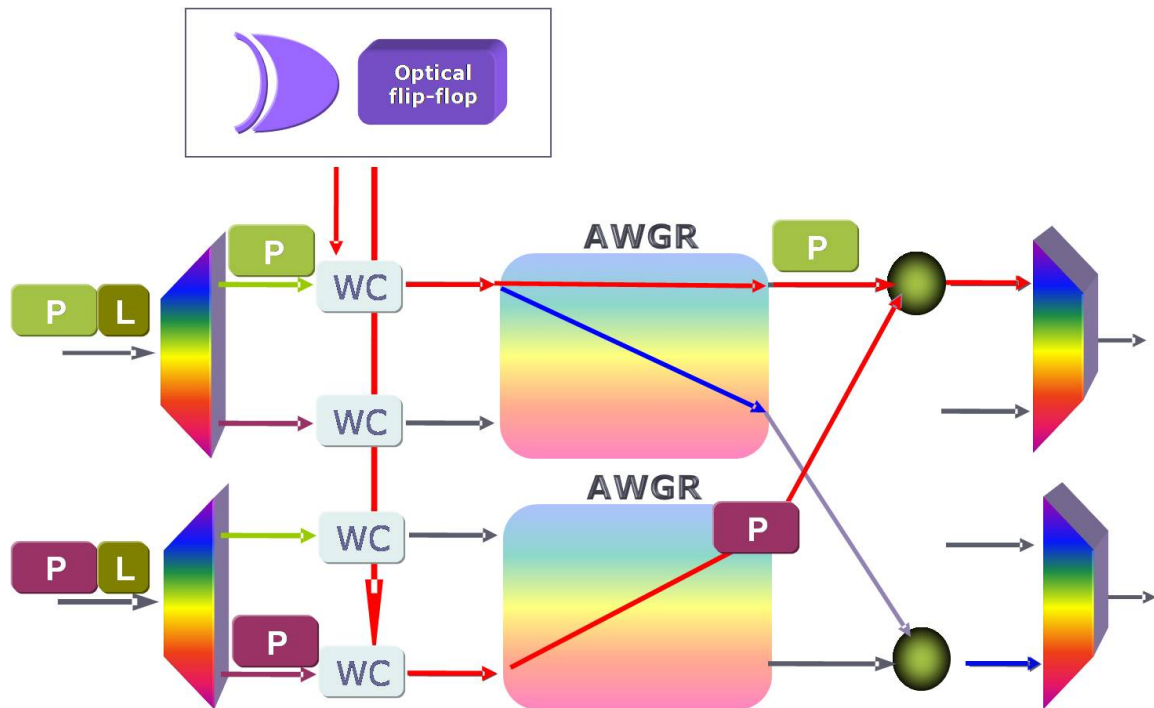
Για παράδειγμα στο σχήμα 5.5 απεικονίζεται η κατάσταση δρομολόγησης δύο πακέτων χωρίς σύγκρουση στο δρομολογητή LASAGNE. Τα δύο πακέτα εισέρχονται από τις θέσεις 1 και 2 και οι επικεφαλίδες τους αποκωδικοποιούνται από τις πύλες XOR (optical control plane). Συστοιχίες από flip-flops χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή των σημάτων ελέγχου σε οπτικά σήματα μήκους όσο τα οπτικά πακέτα. Μετά την αποκωδικοποίηση των επικεφαλίδων προκύπτουν δύο διαφορετικά μήκη κύματος (μπλε και κόκκινο) από τη μονάδα ελέγχου για τα δύο οπτικά πακέτα. Σύμφωνα με τη συμπεριφορά του AWG (η οποία περιγράφηκε και παραπάνω) το πακέτο από τη θέση 1, μετατρέπόμενο στο κόκκινο μήκος κύματος, θα προωθηθεί στη θέση 3 και στη συνέχεια στην έξοδο 5 του δρομολογητή. Αντίστοιχα, το πακέτο από τη θέση 2, μετατρέπόμενο στο μπλε μήκος κύματος, θα προωθηθεί στη θέση 4 και στη συνέχεια στην έξοδο 6 του δρομολογητή.



Σχήμα 5.5 Δρομολόγηση χωρίς σύγκρουση στο δρομολογητή LASAGNE.

Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η περίπτωση σύγκρουσης στο δρομολογητή LASAGNE. Στην περίπτωση αυτή και τα δύο πακέτα μετατρέπονται στο ίδιο (κόκκινο) μήκος κύματος και προωθούνται σε κοινή έξοδο προκαλώντας σύγκρουση. Το ζητούμενο σε αυτήν την

περίπτωση είναι η χρήση των σημάτων αποκωδικοποίησης των επικεφαλίδων για την επίλυση των συγκρούσεων των οπτικών πακέτων με απλή οπτική επεξεργασία σήματος.



Σχήμα 5.6 Δρομολόγηση με σύγκρουση στο δρομολογητή LASAGNE.

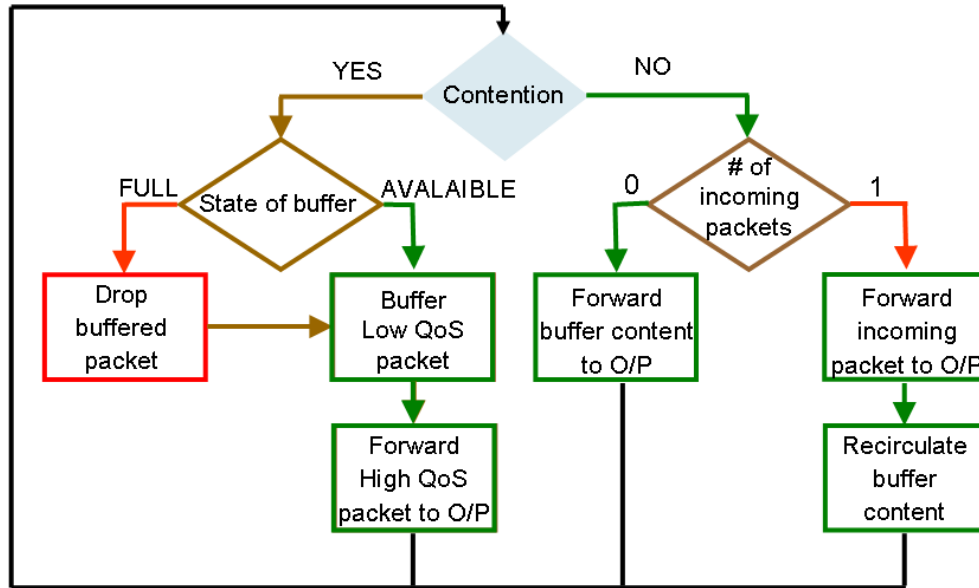
5.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται το σύστημα το οποίο επιτελεί δύο βασικές λειτουργίες που σχετίζονται με την αποθήκευση και προώθηση οπτικών πακέτων στο δρομολογητή LASAGNE:

- αμιγώς οπτική ανίχνευση σύγκρουσης πακέτων
- επίλυση της σύγκρουσης στο πεδίο του χρόνου

Το υποσύστημα ανίχνευσης σύγκρουσης παρέχει τα απαιτούμενα σήματα ελέγχου για να οδηγήσουν ένα οπτικά ελεγχόμενο buffer, ο οποίος περιλαμβάνει 1×2 οπτικά στοιχεία μεταγωγής και μία οπτική γραμμή καθυστέρησης. Η κατάσταση της μνήμης ελέγχεται

δυναμικά, ενώ όλες οι αποφάσεις και η λογική επεξεργασία εκτελούνται στο οπτικό πεδίο. Το σχήμα 5.7 απεικονίζει τον αλγόριθμο του συστήματος.



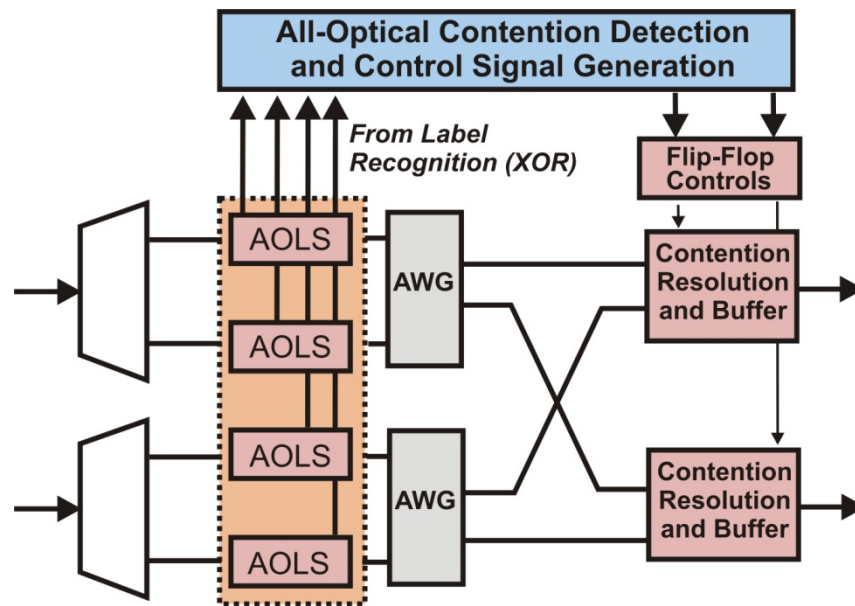
Σχήμα 5.7 Ο αλγόριθμος επίλυσης των συγκρούσεων.

Όταν δύο οπτικά πακέτα (Contention = YES) εισέρχονται στο σύστημα, το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος της κατάστασης της μνήμης. Αν είναι απασχολημένη (State of buffer = FULL), το περιεχόμενό της απορρίπτεται πριν την είσοδο του πακέτου με τη χαμηλότερη προτεραιότητα (low QoS) στη γραμμή καθυστέρησης. Αν υπάρχει διαθέσιμος χώρος στη μνήμη (State of buffer = AVAILABLE), το πακέτο με τη χαμηλότερη προτεραιότητα εισέρχεται στη γραμμή καθυστέρησης, ενώ το πακέτο με την υψηλότερη προτεραιότητα προωθείται στην έξοδο.

Όταν δεν υπάρχει σύγκρουση (Contention = NO), το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος του αριθμού των εισερχόμενων πακέτων. Σε περίπτωση κενής σχισμής (number of incoming packets = 0), το περιεχόμενο της μνήμης προωθείται στην έξοδο, ενώ, όταν ανιχνεύεται ένα πακέτο στην είσοδο, τότε αυτό το πακέτο προωθείται στην έξοδο και το περιεχόμενο της μνήμης συνεχίζει να ανακυκλώνεται.

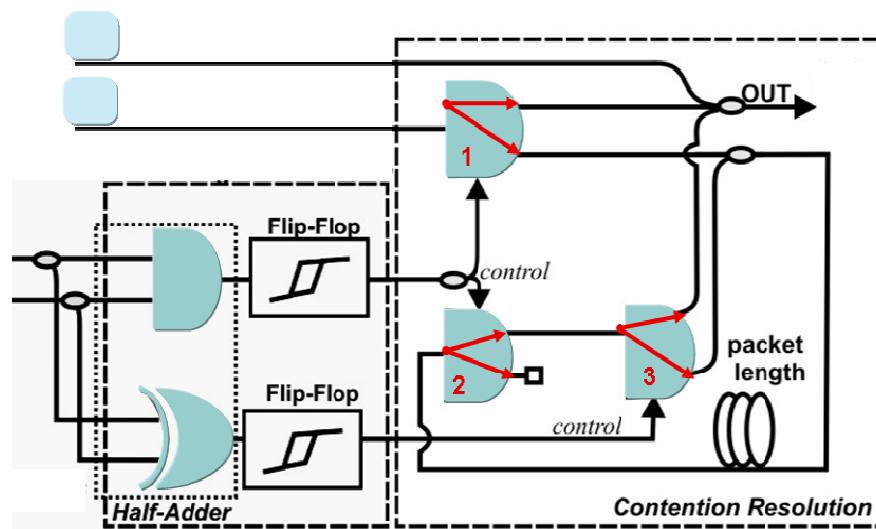
Στο σχήμα 5.8 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός 2x2 κόμβου AOLS: όταν ένα πακέτο εισέρχεται στον κόμβο AOLS, η ετικέτα του εξάγεται οπτικά και συγκρίνεται με τις τοπικά

δημιουργημένες ετικέτες για να καθοριστούν το μήκος κύματος και η θύρα εξόδου, μέσω της οποίας το πακέτο εξέρχεται από τον κόμβο. Η σύγκριση αυτή γίνεται αμιγώς οπτικά με οπτικές πύλες XOR όπως περιγράφεται αναλυτικά παραπάνω. Ο στόχος είναι να χρησιμοποιήσουμε το αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης όχι μόνο για την εξαγωγή της πληροφορίας δρομολόγησης αλλά και για την ανίχνευση και επίλυση των συγκρούσεων στην έξοδο του κόμβου.



Σχήμα 5.8 Αρχιτεκτονική ενός 2x2 κόμβου AOLS με αμιγώς οπτική επίλυση των συγκρούσεων και αποθήκευση πακέτων.

Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η λογική σχεδίαση του συστήματος. Η σύγκρουση λύνεται σε δύο στάδια. Αρχικά η σύγκρουση ανιχνεύεται με χρήση αμιγώς οπτικής λογικής και το αποτέλεσμα ελέγχει μια αμιγώς οπτική μνήμη ανακύκλωσης για να διευθετήσει τα συγκρουόμενα πακέτα.



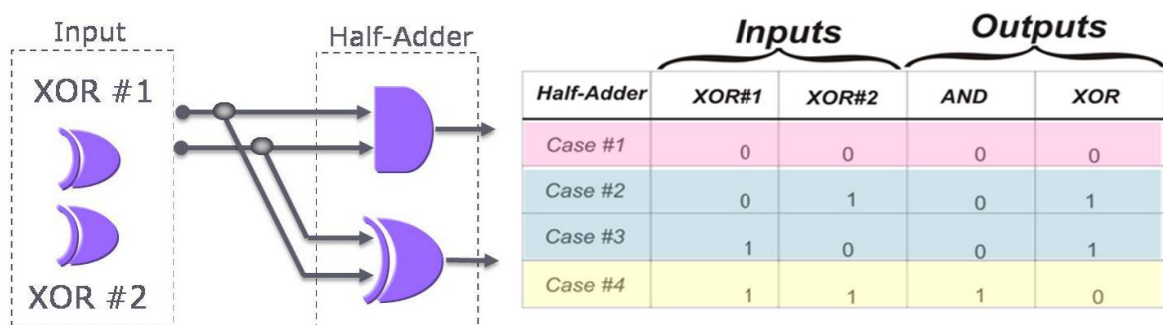
Σχήμα 5.9 Αρχιτεκτονική του κυκλώματος για επίλυση των συγκρούσεων στο πεδίο του χρόνου.

Το τμήμα επίλυσης της σύγκρουσης αποτελείται από μία γραμμή καθυστέρησης και τρεις οπτικές πύλες σχεδιασμένες να λειτουργούν ως διακόπτες 1×2. Η πύλη #1 χρησιμοποιείται για την εκτροπή του πακέτου με τη χαμηλότερη προτεραιότητα μέσα στη μνήμη, η πύλη #2 αποφασίζει αν το περιεχόμενο της μνήμης πρέπει να απορριφθεί ή όχι, ενώ η πύλη #3 αποφασίζει αν το πακέτο πρέπει να εξέλθει από τη μνήμη ή να συνεχίσει να ανακυκλώνεται (Πίνακας 5.1). Υποθέτουμε μνήμη μήκους ενός πακέτου. Ο πίνακας 5.1 δείχνει ότι όταν δεν υπάρχει σύγκρουση και μόνο ένα πακέτο εμφανίζεται στην είσοδο του συστήματος (περιπτώσεις 3-6), το πακέτο προωθείται άμεσα στην έξοδο και το περιεχόμενο της μνήμης παραμένει ανεπηρέαστο. Αν δεν υπάρχουν πακέτα στην είσοδο (περίπτωση 2), το περιεχόμενο της μνήμης προωθείται στην έξοδο. Στην περίπτωση σύγκρουσης (περίπτωση 7 και 8) το P2 προωθείται, η μνήμη αδειάζει και το P1 αποθηκεύεται.

Πίνακας 5.1 Πίνακας αληθείας για το κύκλωμα επίλυσης των συγκρούσεων.

	Packet 1	Packet 2	Packet 3 (buffer content)	Pass	Buffer	Drop
1	0	0	0			
2	0	0	1	Packet 3	0	0
3	0	1	0	Packet 2	0	0
4	0	1	1	Packet 2	Packet 3	0
5	1	0	0	Packet 1	0	0
6	1	0	1	Packet 1	Packet 3	0
7	1	1	0	Packet 1	Packet 2	0
8	1	1	1	Packet 1	Packet 2	Packet 3

Για να πραγματοποιηθούν αυτές οι λειτουργίες, το τμήμα ανίχνευσης σύγκρουσης παρέχει τα σήματα ελέγχου. Πρόκειται για έναν ημιαθροιστή (Half-adder), που χρησιμοποιεί το αποτέλεσμα των συγκρίσεων XOR των P1 και P2, ενώ δύο flip-flops χρησιμοποιούνται για παροχή σημάτων ελέγχου σε μήκος πακέτου. Ο Πίνακας 5.2 είναι ο αντίστοιχος πίνακας αληθείας.

Πίνακας 5.2 Πίνακας αληθείας για το κύκλωμα ανίχνευσης των συγκρούσεων.

Από τον πίνακα προκύπτει ότι το κύκλωμα παρέχει τρεις διαφορετικές εξόδους (00, 01, 10) για τρεις διαφορετικές καταστάσεις πραγματοποιώντας τις εξής λειτουργίες:

- Ανίχνευση κενής σχισμής (περίπτωση 1): Και οι δύο έξοδοι του ημιαθροιστή (HA) είναι '0' και το περιεχόμενο της μνήμης προωθείται στην έξοδο.

- Ανίχνευση ενός εισερχόμενου πακέτου (περιπτώσεις 2,3): Το περιεχόμενο της μνήμης δε μεταβάλλεται και το εισερχόμενο πακέτο προωθείται άμεσα στην έξοδο. Το αποτέλεσμα της XOR του HA είναι '1' και το περιεχόμενο της μνήμης ανακυκλώνεται.
- Ανίχνευση σύγκρουσης (περίπτωση 4): Η πύλη #2 απορρίπτει το περιεχόμενο της μνήμης, το P2 προωθείται στην έξοδο και το P1 αποθηκεύεται.

5.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

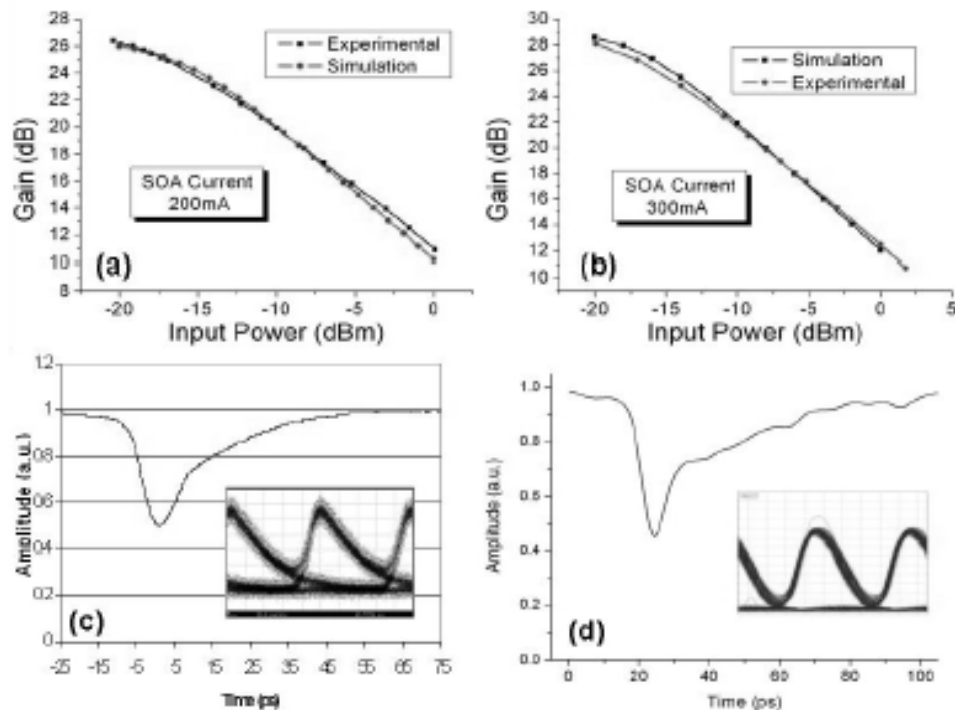
Το πλήρες αμιγώς οπτικό σύστημα προσομοιώθηκε στο φυσικό επίπεδο με το εμπορικά διαθέσιμο εργαλείο προσομοιώσεων VPI Transmission Maker. Αρχικά ο σκοπός ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου για την πύλη SOA-MZI ώστε να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια και συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου για το SOA-MZI.

Πίνακας 5.3 Παράμετροι SOA για το μοντέλο προσομοίωσης.

Parameter	CIP SOA parameters	Unit
LaserChipLength	1600.0e-06*	m
ActiveRegionWidth	1.2e-06 *	m
ActiveRegionThickness	0.1e-06 *	m
ConfinementFactor	0.17 *	
OpticalCouplingEfficiency	0.5*	
MaterialLinewidthEnhancementFactor	6 *	

Στο σχήμα 5.10 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά. Τα σχήματα 5.10(α) και (β) απεικονίζουν μετρήσεις κέρδους των SOAs που χρησιμοποιήθηκαν στις οπτικές πύλες με δύο διαφορετικά ρεύματα έγχυσης (200 mA και 300 mA) ενώ τα 5.10 (γ) και (δ) δείχνουν το χρόνο ανάκαμψης κέρδους των SOAs. Ο

χρόνος απόκρισης μετρήθηκε στα 25 ps πειραματικά και 23 ps χρησιμοποιώντας το μοντέλο προσομοίωσης.

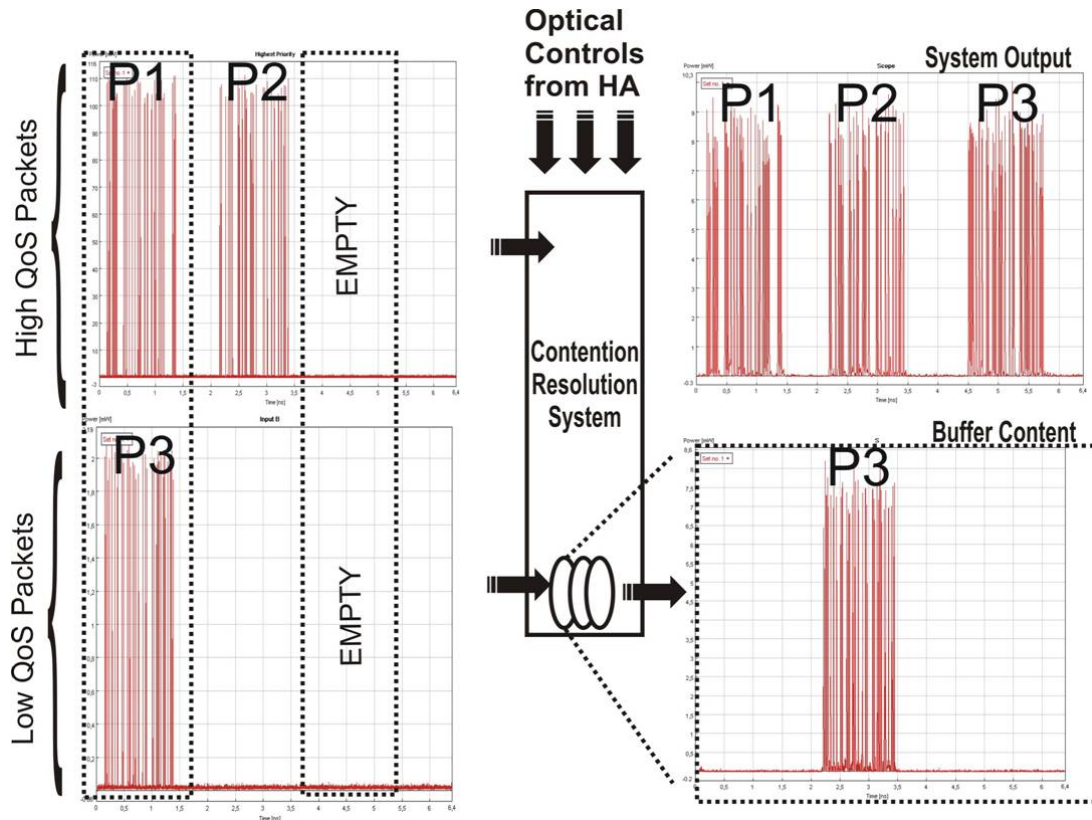


Σχήμα 5.10 Σύγκριση μεταξύ αποτελεσμάτων προσομοίωσης και αντίστοιχων πειραματικών. Απόκριση κέρδους SOA όταν λειτουργεί στα (α) 200 mA και στα (β) 300 mA. Μετρήσεις χρόνου ανάκαμψης (γ) από τροφοδοσία και (δ) από μοντέλο προσομοίωσης. (Τα ένθετα δείχνουν αντίστοιχη μετατροπή μήκους κύματος στα 10 Gb/s)

5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

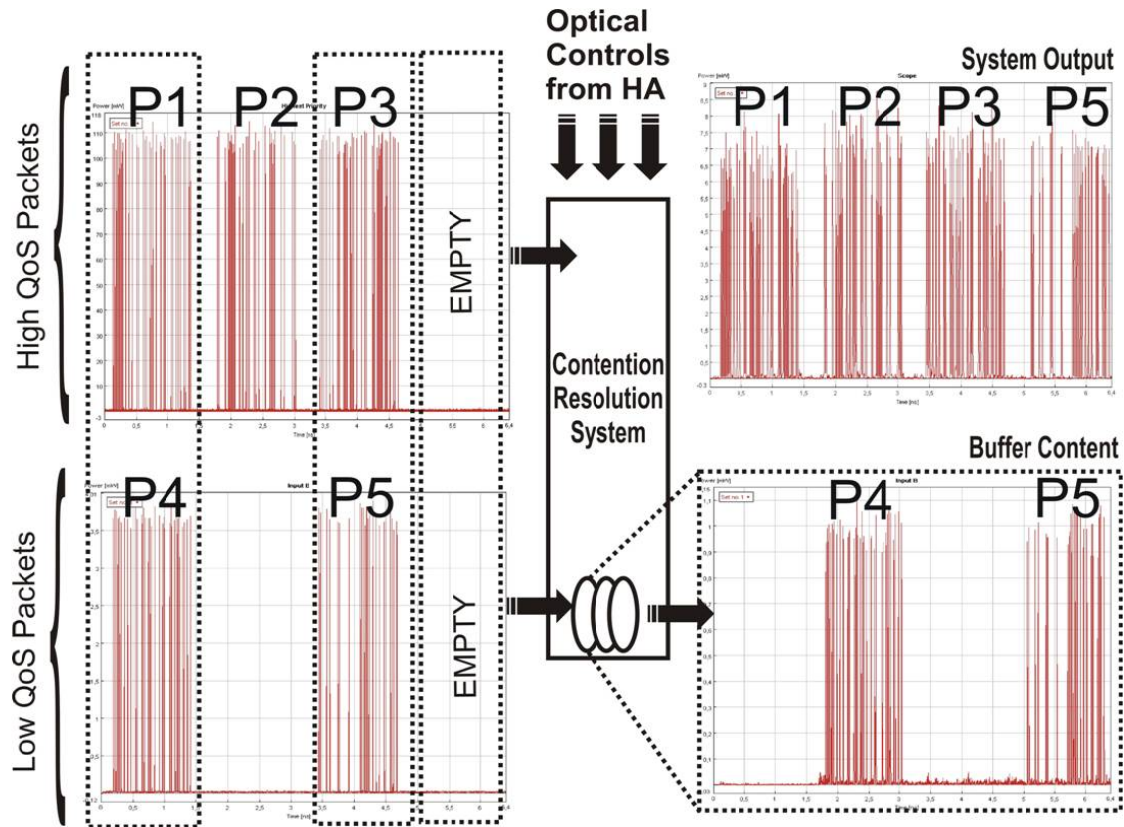
Δύο σενάρια προσομοιώθηκαν για την επίδειξη της λειτουργίας του κυκλώματος στα 40 Gb/s. Το σχήμα 5.11 απεικονίζει τα αποτελέσματα στο πεδίο του χρόνου για το σενάριο A. Στην περίπτωση A τα πακέτα P1 και P3 εισέρχονται ταυτόχρονα στο τμήμα λύσης σύγκρουσης με το P1 να έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα. Η πύλη #1 οδηγεί το P3 στη μνήμη, λόγω του αποτελέσματος της πύλης AND του ημιαθροιστή, ενώ το P1 προωθείται στην έξοδο του κυκλώματος. Στο επόμενο στιγμιότυπο, το πακέτο P2 εμφανίζεται σε μία από τις εισόδους του κυκλώματος. Το αποτέλεσμα του λογικού AND του ημιαθροιστή είναι τώρα '0', οπότε η πύλη #2 προωθεί το P3 στην πύλη #3. Η πύλη #3, λόγω του

αποτελέσματος '1' του λογικού XOR του ημιαθροιστή, οδηγεί το P3 σε ανακύκλωση στη γραμμή καθυστέρησης, επομένως το P2 μπορεί να προωθηθεί στην έξοδο χωρίς σύγκρουση. Στο επόμενο στιγμιότυπο, ανιχνεύεται μια κενή σχισμή και το P3 εμφανίζεται στην έξοδο.



Σχήμα 5.11 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το σενάριο Α.

Παρομοίως, στο σενάριο Β (σχήμα 5.12) η σύγκρουση των πακέτων P1 και P4 οδηγεί στην αποθήκευση του P4 στη γραμμή καθυστέρησης, ενώ στη συνέχεια, λόγω της ανίχνευσης ενός πακέτου (P2) στην είσοδο του κυκλώματος, το P4 οδηγείται σε ανακύκλωση. Στο επόμενο στιγμιότυπο, δύο πακέτα κάνουν την εμφάνισή τους στις εισόδους του κυκλώματος, οπότε το P4 γίνεται drop, εφόσον υποθέσαμε γραμμή καθυστέρησης ίση σε μέγεθος με το μήκος πακέτου. Το P5 εισέρχεται στη μνήμη, ενώ το P3 προωθείται στην έξοδο και, όταν ανιχνευθεί μια κενή σχισμή, το P5 εμφανίζεται στην έξοδο.

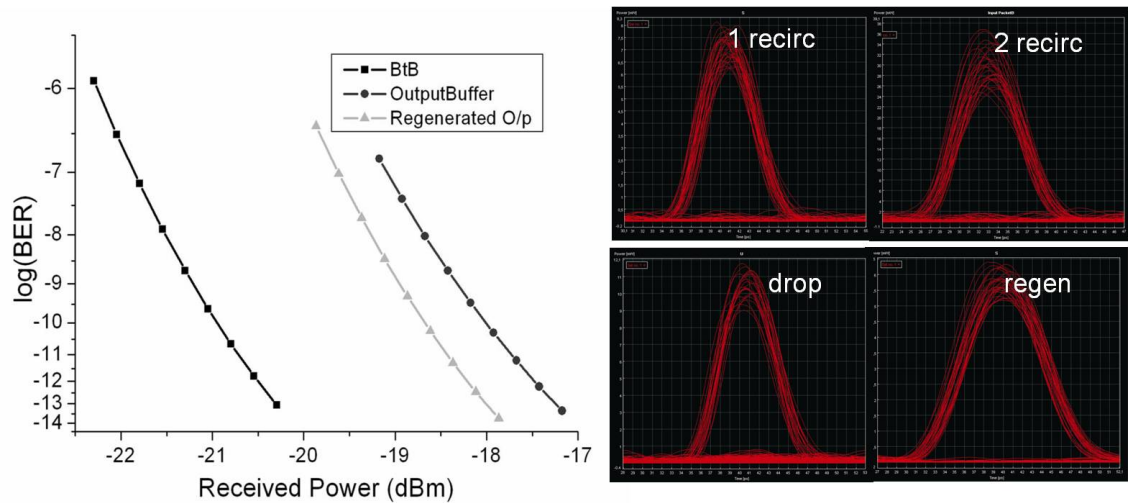


Σχήμα 5.12 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το σενάριο B

Στο σχήμα 5.13 απεικονίζονται θεωρητικές μετρήσεις Bit Error Rate (BER) και διαγράμματα ματιού. Η θεωρητική μέτρηση του BER γίνεται με βάση τη σχέση BER και Q:

$$BER = \frac{e^{-\left(\frac{Q^2}{2}\right)}}{Q\sqrt{2\pi}}, \quad Q = \frac{I_{1min} - I_{0max}}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

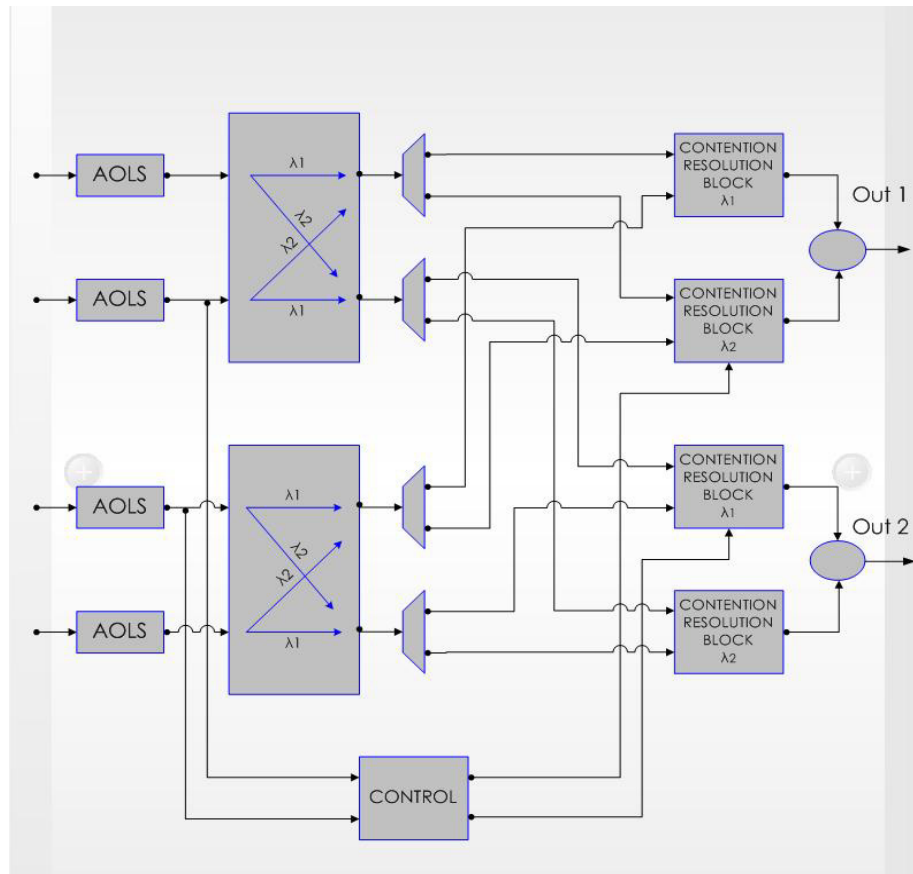
Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στο σενάριο A για το πακέτο που έχει εκτελέσει 2 ανακυκλώσεις στη γραμμή καθυστέρησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν πέναλτι 3 dB στην έξοδο του συστήματος, η οποία μειώνεται στα 2 dB μετά από αναγέννηση 2R στην έξοδο.



Σχήμα 5.13 Μετρήσεις Bit Error Rate και διαγράμματα ματιού

5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε ένα κύκλωμα για αμιγώς οπτική ανίχνευση και επίλυση σύγκρουσης σε αμιγώς οπτικούς δρομολογητές, που χρησιμοποιούν οπτικές πύλες για λογική επεξεργασία. Το σύστημα αποθήκευσης που προκύπτει απαιτεί μόνο το αποτέλεσμα της σύγκρισης ετικέτας για να λειτουργήσει, οπότε δεν απαιτείται επιπρόσθετη σηματοδότηση στις ετικέτες των πακέτων για την επίλυση των συγκρούσεων. Στο σχήμα 5.14 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός 2x2 LASAGNE δρομολογητή με 2 μήκη κύματος ανά είσοδο (λ_1 και λ_2). Τα πακέτα μετά την αποπολυπλεξία οδηγούνται στα τμήματα AOLS. Στη συνέχεια η δρομολόγηση γίνεται στους AWGR των οποίων η συμπεριφορά αποκλείει την περίπτωση συγκρούσεων πριν τα πακέτα οδηγηθούν στις εξόδους του κόμβου. Για την επίλυση των συγκρούσεων ο κόμβος περιλαμβάνει ένα τμήμα επίλυσης συγκρούσεων για κάθε ένα από τα μήκη κύματος στις εξόδους του κόμβου.



Σχήμα 5.14 Αρχιτεκτονική του LASAGNE κόμβου με επίλυση συγκρούσεων.

5.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

-
1. L. Stampoulidis, E. Kehayas, K. Vysokinos, D. Apostolopoulos, and H. Avramopoulos, "Design of All-Optical Contention Detection and Resolution for 40-Gb/s Label-Switched Routers", IEEE Photon. Technol. Lett., VOL. 18, NO. 23, pp. 2478-2480, DECEMBER 1, 2006.
 2. E. Kehayas, L. Stampoulidis, K. Vysokinos, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, "Architecture, design and physical layer modelling of an all-optical buffering system for all-optical label switched routers", presented at the International Conference on Photonics in Switching (PS) 2006, Paper 11.3, Heraclion, Greece.
 3. K. Vysokinos, L. Stampoulidis, E. Kehayas, H. Avramopoulos, "Architecture, Design and Modeling of an Optically-Controlled Recirculating Buffer for 40 Gb/s Label-Switched Routers", presented at the 11th European Conference on Networks & Optical Communications (NOC) July 2006, Berlin, Germany.

6. ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

“...and God has sent silicon”

6.1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Πρόσφατα στατιστικά για την παγκόσμια τηλεπικοινωνιακή κίνηση επιδεικνύουν μία ραγδαία αύξησή της καθώς και μία αλλαγή στον τύπο των δεδομένων τα οποία «κυκλοφορούν» στο δίκτυο, η οποία δεν μπορεί να υποστηριχθεί από την κλασσική συνταγή της WDM μεταγωγής κυκλώματος. Η μεταγωγή πακέτου προτάθηκε ως μία αξιόπιστη λύση και ήδη η σύγκλιση σε μία IP πλατφόρμα επικοινωνίας καθιστά την ύπαρξη packet-mode δρομολογητών απαραίτητη.

Το internet εμφανίζεται ως ένας από τους πιο σημαντικούς καταναλωτές ενέργειας στις μέρες μας. Σύμφωνα με μελέτες, το Google και μόνο απαιτεί περίπου 1.8 δισεκατομμύρια Wh για να μπορέσει να εξυπηρετήσει 400 εκατομμύρια queries καθημερινά. Υπολογίζεται ότι περίπου το 50% της κατανάλωσης του internet οφείλεται στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα δρομολόγησης, τα οποία εμφανίζουν μεγάλη κατανάλωση ισχύος και προβληματική επεκτασιμότητα.

Η στροφή προς τη φωτονική τεχνολογία είναι αναπόφευκτη. Είναι ήδη ευρέως αποδεκτό ότι τα φωτονικά κυκλώματα μπορούν και πρέπει να αποτελέσουν σημαντικό κομμάτι του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού της νέας γενιάς. Η επένδυση σε φωτονικές μεθόδους ολοκλήρωσης και η ανάπτυξη ολοκληρωμένων και αξιόπιστων οπτικών συστημάτων μετάδοσης είναι πλέον γεγονός. Άλλωστε μόνο τυχαία δεν είναι η εμπορική επιτυχία εταιρειών όπως η Infinera, η Luxtera και η Kotura.

Η μετάβαση από οπτικά συστήματα μετάδοσης σε οπτικά συστήματα δρομολόγησης βρίσκεται σε προχωρημένο ερευνητικό στάδιο. Το επίκεντρο είναι η πραγματοποίηση ενός φωτονικού δρομολογητή ο οποίος δύναται να δρομολογεί Tb/s πληροφορίας μέσα από mm-scale οπτικά chips. Η υλοποίηση φωτονικών κυκλωμάτων δρομολόγησης με μονολιθικές και υβριδικές μεθόδους αποτελεί το “enabling technology” για τη μετάβαση σε φωτονικούς Tb/s δρομολογητές. Τα συστήματα αυτά απαιτούν μικρή ποσότητα οπτικής και ηλεκτρικής ισχύος για να λειτουργήσουν καθώς και μικρό χώρο αφού υλοποιούνται με μεθόδους μικρο-νανο ολοκλήρωσης.

Παρόλα αυτά ένα από τα δισεπίλυτα προβλήματα στη φωτονική δρομολόγηση αποτελεί η επίλυση των συγκρούσεων οπτικών πακέτων. Η προσπάθεια μίμησης των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, δηλαδή η αποθήκευση πακέτων, δεν αποτελεί πρακτική λύση για τα φωτονικά κυκλώματα. Η μη ύπαρξη οπτικής RAM καθιστά αναγκαία τη χρήση ενός μεγάλου μήκους οπτικής ίνας για την προσωρινή «αποθήκευση» των δεδομένων σε μνήμες γραμμών καθυστέρησης, οι οποίες αλλοιώνουν το σήμα και δεν προσφέρουν το στοιχείο της τυχαίας προσπέλασης της ηλεκτρονικής RAM. Οι υπάρχουσες ολοκληρωμένες γραμμές καθυστέρησης δεν μπορούν να προσφέρουν μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης, παρουσιάζουν απώλειες και απαιτούν πολύπλοκο έλεγχο για την αποθήκευση-προώθηση των οπτικών πακέτων.

Σε αυτά τα πλαίσια είναι φανερό ότι απαιτούνται εναλλακτικές μέθοδοι για την επίλυση των συγκρούσεων. Αυτές οι μέθοδοι θα πρέπει να προσφέρουν δρομολόγηση χωρίς συγκρούσεις με τα εξής χαρακτηριστικά: α) τον απλούστερο δυνατό έλεγχο, β) τη μικρότερη επιβάρυνση στα σήματα, γ) να είναι υλοποιήσιμες με ολοκληρωμένα οπτικά στοιχεία και δ) να λειτουργούν με διαφάνεια στον τύπο των δεδομένων. Η ερευνητική

εργασία κινήθηκε σε αυτούς τους άξονες και πρότεινε μία σειρά από κυκλώματα για την επίλυση των συγκρούσεων σε φωτονικούς δρομολογητές υψηλής χωρητικότητας.

Στο αρχικό στάδιο υλοποιήθηκε κύκλωμα ανάκτησης περιβάλλουσας συμβατό τόσο με 10 Gb/s όσο και με 40 Gb/s οπτικά πακέτα. Το κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με οπτικούς διακόπτες και μετατροπείς μήκους κύματος για την επίδειξη κυκλώματος επίλυσης της σύγκρουσης σύγχρονων οπτικών πακέτων στο πεδίο του χώρου και του μήκους κύματος. Επίσης σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα οπτικό κύκλωμα μεγάλης κλίμακας ικανό να δρομολογεί ασύγχρονα πακέτα μεταβλητού μήκους με αποφυγή συγκρούσεων. Το κύκλωμα περιλαμβάνει έναν πρωτότυπο μηχανισμό οπτικού μανδαλωτή και λειτουργεί σε First-in-first-out (FIFO) λογική. Τέλος, σχεδιάστηκε και μοντελοποιήθηκε πρωτότυπο κύκλωμα ανίχνευσης συγκρούσεων και αποθήκευσης οπτικών πακέτων συμβατό με αμιγώς οπτικούς δρομολογητές. Το κύκλωμα περιλαμβάνει ένα οπτικά ελεγχόμενο σύστημα αποθήκευσης πακέτων αποτελούμενο από οπτικούς χωρικούς διακόπτες, πύλες AND και XOR καθώς και μία οπτική γραμμή καθυστέρησης.

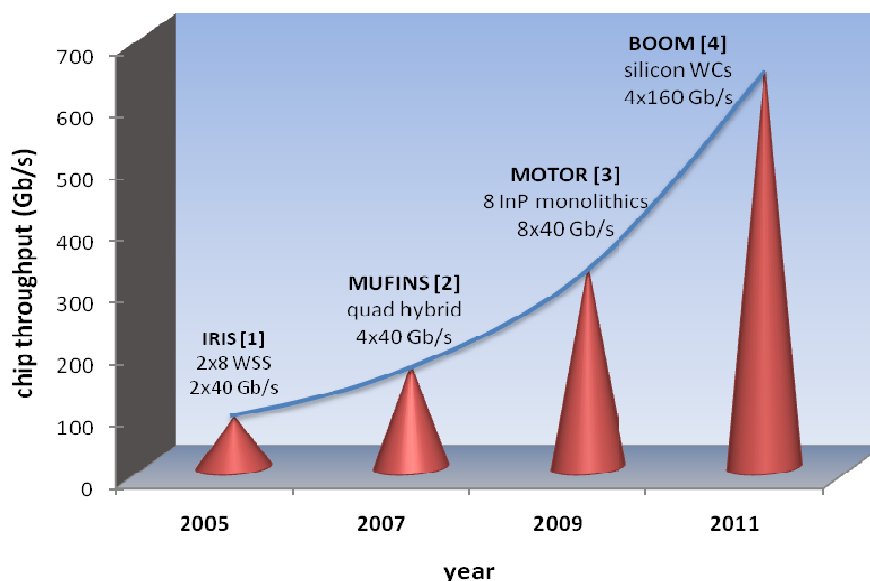
6.2. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Τα τελευταία χρόνια συντελείται μία πρωτοφανής επένδυση σε ολοκληρωμένα φωτονικά συστήματα δρομολόγησης. Η μετάβαση από bulk οπτικές πύλες σε ολοκληρωμένα οπτικά chips πολλών στοιχείων είναι γεγονός. Τη μετάβαση αυτή την έζησα στο εργαστήριο “live”. Η παρακάτω εικόνα (αριστερά) απεικονίζει μία οπτική πύλη UNI κατασκευασμένη κυριολεκτικά «στο χέρι» συγκολλώντας εμπορικά διαθέσιμα οπτικά στοιχεία. Με αυτή τη «συσκευή» επιδείχτηκαν μία σειρά από κυκλώματα όπως ανάκτηση ρολογιού¹, ανάκτηση δεδομένων², οπτικός ημιαθροιστής³ και διαχωρισμός επικεφαλίδας φορτίου⁴. Η υλοποίηση των συστημάτων αυτών με τα UNIs κάθε άλλο παρά πρακτική θεωρήθηκε λόγω του μεγάλου όγκου και της ευαισθησίας των διατάξεων στη μεταβολή της πόλωσης. Παρόλα αυτά, τα πειράματα με τα UNIs αποδείκνυαν ότι τα φωτονικά κυκλώματα – αν ολοκληρώνονταν - θα μπορούν να λειτουργήσουν εξαιρετικά καλά.



Σχήμα 6.1 Από τα *bulk UNIs* (αριστερά) στα φωτονικά “*super-chips*” (δεξιά).

Η μετάβαση ήρθε στο εργαστήριο με το ερευνητικό πρόγραμμα IST-MUFINS. Μέσω του προγράμματος είχαμε την ευκαιρία να σχεδιάσουμε και σε συνεργασία με την εταιρεία φωτονικής ολοκλήρωσης CIP Technologies να υλοποιήσουμε τις πρώτες συστοιχίες οπτικών πυλών SOA-MZI⁵. Η ύπαρξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έδωσε το έναυσμα για την πραγματοποίηση πολύπλοκων λειτουργιών - πέρα της αναγέννησης δεδομένων - όπως είναι η επίλυση των συγκρούσεων σε φωτονικούς δρομολογητές. Η υλοποίηση αυτών των κυκλωμάτων έχει επιφέρει μία νέα τάση στην ολοκλήρωση των οπτικών κυκλωμάτων δρομολόγησης. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την εξέλιξη των ολοκληρωμένων οπτικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με το διάγραμμα, από το 2004 και έπειτα, παρατηρείται ένας διπλασιασμός της χωρητικότητας των οπτικών συστημάτων δρομολόγησης κάθε δύο χρόνια με το τωρινό state-of-the-art chip⁶ να παρέχει 320 Gb/s σε ένα chip area ίσο με $4.25 \times 14.5 \text{ mm}^2$.

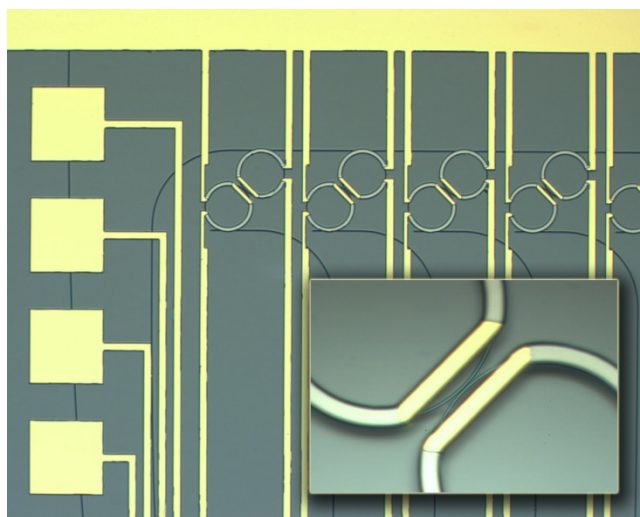


Σχήμα 6.2 Ανάπτυξη ολοκληρωμένων φωτονικών συστημάτων δρομολόγησης.

Το ερώτημα είναι πως θα μπορέσουμε να διατηρήσουμε αυτό το ρυθμό ανάπτυξης ώστε να δημιουργηθούν ακόμη μικρότερα, φθηνότερα, πιο γρήγορα και πιο «πράσινα» οπτικά κυκλώματα δρομολόγησης. Για να πραγματοποιηθεί αυτός ο στόχος θα πρέπει να υπάρχει μία πλατφόρμα ολοκλήρωσης η οποία να είναι ικανή για μεγάλης κλίμακας, επεκτάσιμα και λειτουργικά οπτικά κυκλώματα. Με αυτά τα κυκλώματα θα είναι δυνατή η πραγματοποίηση ακόμη πιο πολύπλοκων λειτουργιών με απώτερο στόχο την υλοποίηση ενός ολόκληρου φωτονικού δρομολογητή σε ένα και μόνο chip. Τα θέματα τα οποία βρίσκονται αυτή τη στιγμή στη «φωτονική ατζέντα» περιλαμβάνουν ζητήματα θερμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των ενεργών κυκλωμάτων μέσα στο φωτονικό chip, κατανάλωσης ισχύος, περαιτέρω αύξησης της χωρητικότητας, περαιτέρω μείωσης του μεγέθους των διατάξεων και πιθανής υλοποίησης με CMOS τεχνικές για βέλτιστο κόστος.

Για το εργαστήριο το επόμενο αποφασιστικό βήμα θα γίνει μέσω του ερευνητικού προγράμματος ICT-BOOM.⁷ Το πρόγραμμα αυτό έχει ως στόχο την ανάπτυξη της silicon-on-insulator (SOI) τεχνολογίας ως μίας ιδανικής πλατφόρμας ολοκλήρωσης φωτονικών συστημάτων δρομολόγησης. Τα SOI wafers αποτελούν μία ιδανική βάση για την ολοκλήρωση μικρο- και νανο- οπτικών κυματοδηγών χρησιμοποιώντας μάλιστα CMOS τεχνικές. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη αντίθεση του δείκτη διάθλασης μεταξύ του SiO₂ υποστρώματος (~1.45) και του top Si στρώματος (~3.8) με αποτέλεσμα την πολύ δυνατή

συγκέντρωση (confinement) του φωτός μέσα στους κυματοδηγούς και τη δυνατότητα ολοκλήρωσης πολύ μικρών στοιχείων όπως ταλαντωτές μικρο-δακτυλίου.



Σχήμα 6.3 Συστοιχία ολοκληρωμένων ταλαντωτών μικρο-δακτυλίου σε *silicon* υπόστρωμα. Η διάμετρος κάθε δακτυλίου είναι 50 μm .

Το πρόγραμμα BOOM σκοπεύει στην ολοκλήρωση οπτικών κυκλωμάτων σε SOI υποστρώματα με την ανάπτυξη CMOS-compatible τεχνικών και την υβριδική ολοκλήρωση ενεργών στοιχείων (SOAs, lasers, detectors) πάνω σε silicon. Ένας από τους βασικούς στόχους είναι η ανάπτυξη μίας νέας γενιάς από συστοιχίες μετατροπών μήκους κύματος, οι οποίοι καταναλώνοντας λιγότερο από το ένα τέταρτο της ισχύος την οποία καταναλώνουν οι συστοιχίες SOA-MZIs, θα είναι σε θέση να μετάγουν τετραπλάσια χωρητικότητα (640 Gb/s). Ο απώτερος στόχος του προγράμματος είναι η τελική ανάπτυξη ενός 640 Gb/s δρομολογητή ο οποίος θα καταναλώνει μόλις μερικές δεκάδες Watt και θα καταλαμβάνει χώρο ίσο με ένα 4U rack mount case.

6.3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. L. Stampoulidis, E. Kehayas, Y. Liu, E. Tangdionga, H. J. S. Dorren and H. Avramopoulos, "40 Gb/s Fast-Locking All-Optical Packet Clock Recovery", presented at Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2005, OThE2, Anaheim, USA.
2. L. Stampoulidis, G. T. Kanellos, N. Pleros, E. Kehayas, D. Tsiokos, C. Bintjas, G. Guekos and H. Avramopoulos, "Clock and Data Recovery with SOA-based Optical Gates", presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2003, We. 1.5.4, Rimini, Italy, 2003.
3. D. Tsiokos, E. Kehayas, K. Vysokinos, T. Houbavlis, L. Stampoulidis, G.T. Kanellos, N. Pleros, G. Guekos, and H. Avramopoulos, "10-Gb/s All-Optical Half-Adder With Interferometric SOA Gates", *Photon. Technol. Lett.*, VOL. 16, NO. 1, pp. 284-286, JANUARY 2004.
4. D. Tsiokos, E. Kehayas, G.T. Kanellos, L. Stampoulidis, G. Guekos, and H. Avramopoulos, "All-Optical 10 Gb/s Header Replacement for Variable Length Data Packets", presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2003, We4. P83, Rimini, Italy, 2003.
5. L. Stampoulidis, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, P. Zakynthinos, P. Bakopoulos, O. Zouraraki, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, "Enabling Tb/s Photonic Routing: Development of Advanced Hybrid Integrated Photonic Devices to Realize High-Speed, All-Optical Packet Switching", *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, VOL. 14, NO. 3, pp. 849-860, MAY/JUNE 2008 (special issue on nonlinear optical signal processing).
6. S. C. Nicholes, et al., "The World's First InP 8x8 Monolithic Tunable Optical Router (MOTOR) Operating at 40 Gbps Line Rate per Port", presented at the OFC/NFOEC 2009, San Diego, USA, paper PDPB1.
7. L. Stampoulidis, "The European ICT-BOOM project: Photonic Tb/s routers made of silicon", (invited) to be presented at the International Conference on Photonics in Switching (PS) 2009, 15-19 September 2009, Pisa Italy.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΓΚΡΙΤΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

«ρε, πάρ'το αυτό... είναι δημοσιεύσιμο»

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΓΚΡΙΤΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

1. **L. Stampoulidis**, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, E. Kehayas, P. Bakopoulos, Ch. Kouloumentas, P. Zakynthinos, R. Dekker, E. J. Klein and H. Avramopoulos, “Micro-ring resonator assisted, all-optical wavelength conversion using a single SOA and a 2nd order Si₃N₄–SiO₂ ROADM”, (invited paper) to appear in J. of Lightwave Technol., special issue, January 2010.
2. D. Apostolopoulos, P. Zakynthinos, **L. Stampoulidis**, E. Kehayas, R. McDougall, R. Harmon, A. Poustie, G. Maxwell, R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, E. Tangdiongga, H. J. S. Dorren, and H. Avramopoulos, “Contention Resolution for Burst-Mode Traffic Using Integrated SOA-MZI Gate Arrays and Self-Resetting Optical Flip-Flops”, IEEE Photon. Technol. Lett., VOL. 20, NO. 24, pp. 2024-2026, DECEMBER 15, 2008.
3. Hassan Teimoori, Dimitrios Apostolopoulos, Kyriakos G. Vlachos, Cédric Ware, Dimitrios Petrantonakis, **Leontios Stampoulidis**, Hercules Avramopoulos, and Didier Erasme, “Optical-Logic-Gate Aided Packet-Switching in Transparent Optical Networks”, J. of Lightwave Technol., VOL. 26, NO. 16, pp. 2848-2856, AUGUST 15, 2008.
4. **L. Stampoulidis**, D. Apostolopoulos, D. Petrantonakis, P. Zakynthinos, P. Bakopoulos, O. Zouraraki, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos, “Enabling Tb/s Photonic Routing: Development of Advanced Hybrid Integrated Photonic Devices to Realize High-Speed, All-Optical Packet Switching”, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., VOL. 14, NO. 3, pp. 849-860, MAY/JUNE 2008 (special issue on nonlinear optical signal processing).
5. R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, P. Demeester, K. Christodouloupoulos, K. Vlachos, and E. Varvarigos, **L. Stampoulidis**, D. Roccato and R. Vilar, “The Design of an All-Optical Packet Switching Network”, IEEE Comm.Magazine, pp. 52-61, NOVEMBER 2007.
6. **L. Stampoulidis**, E. Kehayas, D. Apostolopoulos, P. Bakopoulos, K. Vysokinos, and H. Avramopoulos, “On-the-Fly All-Optical Contention Resolution for NRZ and RZ Data

- Formats Using Packet Envelope Detection and Integrated Optical Switches”, IEEE Photon. Technol. Lett., VOL. 19, NO. 8, pp. 538-541, APRIL 15, 2007.
7. Efstratios Kehayas, Dimitris Tsiokos, Paraskevas Bakopoulos, Dimitris Apostolopoulos, Dimitrios Petrantonakis, **Leontios Stampoulidis**, Alistair Poustie, Rob McDougall, Graeme Maxwell, Yong Liu, Shaoxian Zhang, Harmen J. S. Dorren, Jorge Seoane, Pablo Van Holm-Nielsen, Palle Jeppesen, and Hercules Avramopoulos, “40-Gb/s All-Optical Processing Systems Using Hybrid Photonic Integration Technology”, J. of Lightwave Technol., VOL. 24, NO. 12, pp. 4903-4911, DECEMBER 2006.
 8. **L. Stampoulidis**, E. Kehayas, K. Vyrsoinos, D. Apostolopoulos, and H. Avramopoulos, “Design of All-Optical Contention Detection and Resolution for 40-Gb/s Label-Switched Routers”, IEEE Photon. Technol. Lett., VOL. 18, NO. 23, pp. 2478-2480, DECEMBER 1, 2006.
 9. Efstratios Kehayas, Konstantinos Vyrsoinos, **Leontios Stampoulidis**, Kostas Christodoulopoulos, Kyriakos Vlachos, and Hercules Avramopoulos, “ARTEMIS: 40-Gb/s All-Optical Self-Routing Node and Network Architecture Employing Asynchronous Bit and Packet-Level Optical Signal Processing”, J. of Lightwave Technol., VOL. 24, NO. 8, pp. 2967-2977, AUGUST 2006.
 10. K. Christodoulopoulos, K. Vlachos, **L. Stampoulidis**, E. Kehayas and Emmanouel Varvarigos, “Efficient burst reservation protocol: a hybrid signaling protocol for efficient burst-level reservations and quality-of-service differentiation in optical burst switching networks”, OSA J. of Opt. Networking, Vol. 5, No. 3, pp. 147-158, MARCH 2006.
 11. F. Ramos, E. Kehayas, J. M. Martinez, R. Clavero, J. Marti, **L. Stampoulidis**, D. Tsiokos, H. Avramopoulos, J. Zhang, P. V. Holm-Nielsen, N. Chi, P. Jeppesen, N. Yan, I. Tafur Monroy, A. M. J. Koonen, M. T. Hill, Y. Liu, H. J. S. Dorren, R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, and B. Riposati, “IST-LASAGNE: Towards All-Optical Label Swapping Employing Optical Logic Gates and Optical Flip-Flops”, J. of Lightwave Technol., VOL. 23, NO. 10, pp. 2993-3011, OCTOBER 2005.

12. A. Hatziefremidis, E. Kehayas, D. Tsiokos, G. T. Kanellos, **L. Stampoulidis**, and H. Avramopoulos, "Header separation and reinsertion for 10-Gbit/s variable-length optical packets" SPIE J. Opt. Eng., Vol. 44, Issue 3, March 2005.
13. E. Kehayas, **L. Stampoulidis**, H. Avramopoulos, Y. Liu, E. Tangdiongga and H. J. S. Dorren, "40 Gb/s all-optical packet clock recovery with ultrafast lock-in time and low inter-packet guardbands", OSA Opt. exp., Vol. 13, No. 2, pp. 475-480, JANUARY 2005.
14. E. Kehayas, G. T. Kanellos, **L. Stampoulidis**, D. Tsiokos, N. Pleros, G. Guekos, H. Avramopoulos," Packet-Format and Network-Traffic Transparent Optical Signal Processing", J. of Lightwave Technol., VOL. 22, NO. 11, pp. 2548-2556, NOVEMBER 2004 (special issue on Metro and Access networks).
15. **L. Stampoulidis**, K. Vyrsoinos, P. Bakopoulos, G. Guekos, H. Avramopoulos, "Optical pulse compression in a polarization insensitive non-linear loop mirror", Optics Comms., 238 (2004) pp. 105–111.
16. K. Yiannopoulos, **L. Stampoulidis**, T. Houbavlis, H. Avramopoulos, "Generation of 40-GHz control signals from flag pulses for switching all-optical gates for use with optical packets", OSA Opt. Lett., Vol. 29 , No. 3, pp. 241-243, February 2004.
17. **L. Stampoulidis**, K. Yiannopoulos, T. Houbavlis and H. Avramopoulos, "Generation of 40-GHz all-optical gate control signals from flag pulses", SPIE J. Opt. Eng., Vol. 43, Issue 1, pp. 14-15, Jan. 2004
18. D. Tsiokos, E. Kehayas, K. Vyrsoinos, T. Houbavlis, **L. Stampoulidis**, G.T. Kanellos, N. Pleros, G. Guekos, and H. Avramopoulos, "10-Gb/s All-Optical Half-Adder With Interferometric SOA Gates", Photon. Technol. Lett., VOL. 16, NO. 1, pp. 284-286, JANUARY 2004.
19. G.T. Kanellos, **L. Stampoulidis**, N. Pleros, T. Houbavlis, D. Tsiokos, E. Kehayas, H. Avramopoulos, and G. Guekos, "Clock and Data Recovery Circuit for 10-Gb/s Asynchronous Optical Packets", Photon. Technol. Lett., VOL. 15, NO. 11, pp. 1666-1668, NOVEMBER 2003.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΓΚΡΙΤΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

1. K. Vysokinos, **L. Stampoulidis**, Z. Sheng, E. Kehayas, P. Bakopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, P. Zakynthinos, R. Dekker, E. J. Klein, D. V. Thourhout, M. T. Korthorst and H. Avramopoulos, “High-order micro-ring resonator assisted wavelength converters for scalable and power efficient photonic routers”, 35^h European Conf. On Optical Communication (ECOC) 2009, Vienna, Austria.
2. 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”, 35^h European Conf. On Optical Communication (ECOC) 2009, Vienna, Austria.
3. **L. Stampoulidis**, “The European ICT-BOOM project: Photonic Tb/s routers made of silicon”, (invited) to be presented at the International Conference on Photonics in Switching (PS) 2009, 15-19 September 2009, Pisa Italy.
4. C. Stamatiadis, D. Petrantonakis, P. Bakopoulos, E. Kehayas, P. Zakynthinos, Ch. Kouloumentas, **L. Stampoulidis**, R. Dekker, E. J. Klein and H. Avramopoulos “First Demonstration of WDM-enabled All-Optical Wavelength Conversion with a SOA and a 2nd Order Microring Resonator ROADM”, (post-deadline paper) presented at Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2009, PDPA8, San Diego, USA.
5. P. Zakynthinos, D. Apostolopoulos, **L. Stampoulidis**, E. Kehayas, A. Poustie, G. Maxwell, R. Van Caenegem, D. Colle, M. Pickavet, E. Tangdionga, H.J.S. Dorren and H. Avramopoulos, “Successful Interconnection of SOA-MZI Arrays and Flip-Flops to Realize Intelligent, All-optical Routing”, presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2008, Brussels, Belgium, We.2.D.2, VOL. 3, pp. 113-114.
6. **Leontios Stampoulidis**, Efstratios Kehayas, Panagiotis Zakynthinos, Dimitrios Apostolopoulos, Dimitrios Petrantonakis, Paraskevas Bakopoulos, Olga Zouraraki and Hercules Avramopoulos, “New generation integrated photonic systems-on-chip

enabling Tb/s-capacity Photonic Routers” (invited) presented at 13th European Conference on Networks and Optical Communications (NOC), June 30th – July 3rd, 2008, Krems, Austria.

7. **Leontios Stampoulidis**, Efstratios Kehayas, Paraskevas Bakopoulos, Panagiotis Zakynthinos, Dimitrios Petrantonakis, Dimitrios Apostolopoulos, Olga Zouraraki and Hercules Avramopoulos, “Enabling Tb/s Photonic Routing: Development of Advanced Hybrid Integrated Photonic Devices to Realize High-Speed, All-Optical Networking”, (invited) presented at the 10th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks ICTON 2008, Athens Greece, Tu.D4.1, pp. 110-113.
8. H. Teimoori, D. Apostolopoulos, K. Vlachos, C. Ware, D. Petrantonakis, K. Yiannopoulos, **L. Stampoulidis**, H. Avramopoulos and D. Erasme, “Physical Architectures for Packet-Switching Network Nodes Based on Nonlinear Logic Gates;”, presented at the 6th Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP08) 2008, Gratz, Austria, pp. 676-679.
9. H. Avramopoulos, E. Kehayas, G. T. Kanellos, **L. Stampoulidis**, “Progress in system design using integrated multi-element interferometric switches”, (invited) presented at Asia-Pacific Optical Communications (APOC) 2007, Wuhan, China, 6783-107.
10. E. Kehayas, **L. Stampoulidis**, K. Vyrsoinos, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, “Architecture, design and physical layer modelling of an all-optical buffering system for all-optical label switched routers”, presented at the International Conference on Photonics in Switching (PS) 2006, Paper 11.3, Heraclion, Greece.
11. K. Vyrsoinos, **L. Stampoulidis**, E. Kehayas, H. Avramopoulos, “Architecture, Design and Modeling of an Optically-Controlled Recirculating Buffer for 40 Gb/s Label-Switched Routers”, presented at the 11th European Conference on Networks & Optical Communications (NOC) July 2006, Berlin, Germany.
12. 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”, presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2006, We1.4.2, Cannes France.

13. **L. Stampoulidis**, E. Kehayas, Y. Liu, E. Tangdiongga, H. J. S. Dorren and H. Avramopoulos, “40 Gb/s Fast-Locking All-Optical Packet Clock Recovery”, presented at Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2005, OThE2, Anaheim, USA.
14. K. Vysokinos, K. Christodoulopoulos, E. Kehayas, **L. Stampoulidis**, K. Vlachos, E. A. Varvarigos and H. Avramopoulos, “ARTEMIS: A New Architecture for All-Optical Asynchronous Self-Routing Network with Efficient Contention Protection and QoS Differentiation”, presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2005, We4.P.083, Glasgow, Scotland, 2005.
15. **L. Stampoulidis**, E. Kehayas, K. Vysokinos, K. Christodoulopoulos, D. Tsiokos, P. Bakopoulos, G. T. Kanellos, K. Vlachos, E. A. Varvarigos and H. Avramopoulos, “ARTEMIS: A 40 Gb/s All-Optical Self-Router using Asynchronous Bit and Packet-Level Optical Signal Processing”, presented at IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom) 2005, St. Louis, USA, PTO6.8, pp. 2035- 2040, Dec 2005.
16. J. Marti, F. Ramos, J.M. Martinez, R. Clavero, J. Herrera, J. Seoane, P.V. Holm-Nielsen, Y. Liu, M.T. Hill, A.M.J. Koonen, H.J.S. Dorren, R. Van Caenegem, E. Kehayas, **L. Stampoulidis**, D. Tsiokos, P. Bakopoulos, and H. Avramopoulos, “IST-LASAGNE: Demonstration of alloptical label-swapping functionalities employing optical logic gates and optical flip-flops”, (invited) presented at the European Conference on Networks and Optical Communications (NOC), July 2005.
17. E. Kehayas , G. T. Kanellos, **L. Stampoulidis** , P. Bakopoulos , N. Pleros , G. Guekos and H. Avramopoulos, “All-Optical Burst-Mode Receiver at 10 Gb/s”, presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2004, Tu. 1.5.4, Stockholm, Sweden.
18. K. Vysokinos, **L. Stampoulidis**, P. Bakopoulos, G. Guekos and H. Avramopoulos, “Polarization Insensitive NOLM employing a Faraday Rotator Mirror”, presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2004, We 4.P014, Stockholm, Sweden.
19. **L. Stampoulidis**, K. Yiannopoulos, M. Kalyvas, G. Theophilopoulos and H. Avramopoulos, and G. Guekos, “All-Optical Control Signal Generation to Drive Optical

Gates for Packet Switching Applications”, presented at the Opt.Amplifiers and their App. Conference, JWB15, San Francisco, USA, 2004.

20. E. Kehayas, D. Tsiokos, K. Vysokinos, **L. Stampoulidis**, G.T. Kanellos, C. Bintiass, G. Guekos, H. Avramopoulos, “All-optical half adder using two cascaded UNI gates”, presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2003, We4. P83, Rimini, Italy, 2003.
21. **L. Stampoulidis**, G. T. Kanellos, N. Pleros, E. Kehayas, D. Tsiokos, C. Bintiass, G. Guekos and H. Avramopoulos, “Clock and Data Recovery with SOA-based Optical Gates”, presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2003, We. 1.5.4, Rimini, Italy, 2003.
22. D. Tsiokos, E. Kehayas, G.T. Kanellos, **L. Stampoulidis**, G. Guekos, and H. Avramopoulos, “All-Optical 10 Gb/s Header Replacement for Variable Length Data Packets”, presented at the European Conference on Optical Communication (ECOC) 2003, We4. P83, Rimini, Italy, 2003.

ΑΡΘΡΑ ΥΠΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΡΙΣΗΣ

1. **Leontios Stampoulidis**, Efstratios Kehayas, Paraskevas Bakopoulos, Dimitrios Apostolopoulos, Panagiotis Zakynthinos, Dimitrios Petrantonakis, A. Poustie, G. Maxwell and Hercules Avramopoulos, “Photonic Routing Systems Using All-optical, Hybrid Integrated Wavelength Converter Arrays”, (invited), to appear in Journal of Networks, (special issue on Transparent Optical Networking).
2. K. Vysokinos, **L. Stampoulidis**, Z. Sheng, E. Kehayas, P. Bakopoulos, D. Petrantonakis, C. Stamatiadis, Ch. Kouloumentas, P. Zakynthinos, R. Dekker, E. J. Klein, D. V. Thourhout, M. T. Korthorst and H. Avramopoulos, “High-order micro-ring resonator assisted wavelength converters for scalable and power efficient photonic routers”, 35th European Conf. On Optical Communication (ECOC) 2009, Vienna, Austria.
3. 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”, 35^h European Conf. On Optical Communication (ECOC) 2009, Vienna, Austria.
4. K. Voigt, L. Zimmermann, G. Winzer, T. Mitze, K. Petermann, J. Kreissl, E. Tangdiongga, K. Vysokinos and **L. Stampoulidis**, “SOI platform for high speed all optical wavelength conversion”, submitted to IEEE LEOS 6th International Conference on Group IV Photonics.