



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

Εξαγωγή και Επανατοποθέτηση Επικεφαλίδας Οπτικών Πακέτων Πληροφορίας με Αμιγώς Οπτικό Τρόπο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παρασκευάς Γ. Μπακόπουλος

Επιβλέπων : Η. Αβραμόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2003



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

Εξαγωγή και Επανατοποθέτηση Επικεφαλίδας Οπτικών Πακέτων Πληροφορίας με Αμιγώς Οπτικό Τρόπο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παρασκευάς Γ. Μπακόπουλος

Επιβλέπων : Η. Αβραμόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16η Οκτωβρίου 2003.

.....
Η. Αβραμόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Βενιέρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2003

.....
Παρασκευάς Γ. Μπακόπουλος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παρασκευάς Γ. Μπακόπουλος, 2003

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 Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	σελ.	6
Λέξεις Κλειδιά		6
Abstract		7
KeyWords		7

Κεφάλαιο Πρώτο: Εισαγωγή στα Οπτικά Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς

1.0 Εισαγωγή	8
1.1 Μορφές Δικτύων	10
1.2 Τύποι Δικτυακής Υποδομής – Μεταγωγή Κυκλώματος, Μεταγωγή Πακέτου	11
1.3 Απαιτούμενες Παράμετροι	14
1.4 Οπτικά Δίκτυα	15
1.5 Τεχνικές Πολυπλεξίας	17
1.6 Οπτική Μεταγωγή Πακέτου	18
1.7 Κύκλωμα Αφαίρεσης/Επαναεισαγωγής Επικεφαλίδας	20

Κεφάλαιο Δεύτερο: Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλής Ταχύτητας: Θεωρητική Ανάλυση – Εφαρμογές

2.0 Εισαγωγή	22
2.1 Αρχή λειτουργίας του UNI	23
2.2 Μαθηματική ανάλυση του UNI	26
2.3 Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (SOA)	29
Α. Κορεσμός του κέρδους του ενισχυτή από βραχύ οπτικό παλμό	31
Β Ανάκαμψη του κέρδους του ενισχυτή	32

Γ Εφαρμογή CW σήματος στον ενισχυτή	32
2.4 Υλοποίηση οπτικών πυλών ΚΑΙ (AND) –	
Αποκλειστικού Ή (XOR)	37
Α. Αρχή λειτουργίας οπτικής πύλης AND	37
Β. Αρχή λειτουργίας οπτικής πύλης XOR	38
2.5 Κύκλωμα οπτικής ανάκτησης ρολογιού	
από πακέτο πληροφορίας	41
2.5.0 Εισαγωγή	41
2.5.1 Αρχή Λειτουργίας του Κυκλώματος Ανάκτησης	
Ρολογιού	42
2.5.2 Συμβολόμετρο Fabry-Perot	44
Εισαγωγή	44
Λειτουργία και χαρακτηριστικά	45
Το φίλτρο Fabry-Perot στο κύκλωμα	
ανάκτησης ρολογιού	47
2.5.3 Το UNI στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού	49
Εισαγωγή	49
Μαθηματική Ανάλυση	50
2.6 Κύκλωμα 2×2 Διακόπτη Οπτικής Μεταγωγής.	51
2.6.1 Εισαγωγή	51
2.6.2 Λειτουργία του 2×2 διακόπτη	55
Κατάσταση Μη Μεταγωγής	56
Κατάσταση Μεταγωγής	58

Κεφάλαιο Τρίτο: Κύκλωμα Αφαίρεσης/Επαναεισαγωγής Επικεφαλίδας

3.0 Εισαγωγή	62
3.1 Αρχή Λειτουργίας	63

3.2 Η πειραματική διάταξη	67
3.2.1 Παραγωγή των Σημάτων	69
Παραγωγή Παλμών με Δίοδο Laser DFB ...	70
Συμπίεση παλμών με DCF ίνα	71
Διαμόρφωση Σήματος Από	
Ακολουθία PRBS	72
Οκταπλασιασμός Συχνότητας	73
Δημιουργία των Πακέτων Πληροφορίας	
με Διαμόρφωση	75
3.2.2 Κύκλωμα Ανάκτησης Ρολογιού	77
3.2.3 Κύκλωμα 2×2 Διακόπτη Οπτικής Μεταγωγής	80
3.3 Αποτελέσματα του Πειράματος	84
3.3.1 Γεννήτρια οπτικών πακέτων	84
3.3.2 Κύκλωμα Ανάκτησης Ρολογιού	89
3.3.3 2×2 Οπτικός Διακόπτης Μεταγωγής	91

Κεφάλαιο Τέταρτο: Εφαρμογές του Κυκλώματος Αφαίρεσης /
Επαναεισαγωγής Επικεφαλίδας στα Οπτικά Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς

4.0 Εισαγωγή	96
4.1 Πιθανές Εφαρμογές της Διάταξης Αφαίρεσης/	
Επαναεισαγωγής Επικεφαλίδας	97
4.1.0 Η Δρομολόγηση-με-Εκτροπή	
(Deflection Routing)	98
4.1.1 Το πρωτόκολλο Εκτροπής Εικονικών	
Κυκλωμάτων (VCD)	100
4.1.2 Εφαρμογή του VCD στα Αμιγώς Οπτικά	
Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτου	103
4.2 Συμπεράσματα	105
Βιβλιογραφία	107

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός ενός αμιγώς οπτικού κυκλώματος αφαίρεσης / επαναεισαγωγής της επικεφαλίδας πακέτων πληροφορίας. Η αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος αποτελεί την τάση στα δίκτυα του μέλλοντος. Έτσι, στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς που εξελίσσονται στις μέρες μας, θα είναι δυνατή η μεταγωγή πακέτου απειθείας σε οπτικό επίπεδο, επιτυγχάνοντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και αποφεύγοντας το ηλεκτρονικό ‘μποτιλιάρισμα’.

Η διάταξη που προέκυψε υλοποιήθηκε πειραματικά και εκτιμήθηκε η απόδοσή της. Το κύκλωμα αποτελείται από ένα υποσύστημα ανάκτησης ρολογιού και έναν 2×2 διακόπτη μεταγωγής που βασίζονται και τα δύο στο Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλών Ταχυτήτων (Ultrafast Nonlinear Interferometer – UNI). Το δομικό κομμάτι του στοιχείου αυτού είναι ο Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) του οποίου τη μη γραμμική λειτουργία εκμεταλλευόμαστε.

Το κύκλωμα που κατασκευάστηκε έχει σαν εισόδους το πακέτο και την καινούρια επικεφαλίδα, ενώ εμφανίζει στις εξόδους την παλιά επικεφαλίδα και το πακέτο με την καινούρια. Η λειτουργία του είναι αμιγώς οπτική και δεν εξαρτάται από το μήκος των πακέτων, τα οποία μπορεί να είναι οσοδήποτε μικρά, ενώ δεν γίνεται χρήση προσωρινής μνήμης (buffer). Τα χαρακτηριστικά αυτά το καθιστούν κατάλληλο για αρχιτεκτονικές δρομολόγησης-με-εκτροπή (deflection routing), όπως το πρωτόκολλο VCD (Virtual Circuit Deflection).

Λέξεις κλειδιά

Αμιγώς οπτικά δίκτυα, οπτική μεταγωγή πακέτου, Δρομολόγηση με Εκτροπή, πρωτόκολλο Εκτροπής Εικονικών Κυκλωμάτων (VCD), ηλεκτρονικό ‘μποτιλιάρισμα’, επεξεργασία επικεφαλίδας, Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλών Ταχυτήτων (UNI), Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (SOA), οπτική ανάκτηση ρολογιού, 2×2 οπτικός διακόπτης μεταγωγής.

Abstract

The scope of this thesis was the design of an all-optical circuit that performs header extraction / reinsertion for optical data packets. All-Optical signal processing is the trend for future networks. As a result, in the second generation of optical networks that is being currently developed, packet switching will be feasible directly in the optical domain, allowing very high bit rates and avoiding the electronic bottleneck.

The setup that was designed was experimentally tested so as to assess its performance. The circuit consists of a clock recovery subsystem and a 2×2 exchange bypass switch, that are both based on the Ultrafast Nonlinear Interferometer (UNI). The structural element of this Interferometer is the Semiconductor Optical Amplifier (SOA), the nonlinearity of which is being exploited.

The experimental setup features inputs for the incoming data packet and the new header, while the old header and the packet with the new one appear in the two outputs. Its function is all-optical and does not depend on the packet length, enabling the use of very short packets. Moreover, no buffer is requested for this implementation, which performs on-the-fly. These features establish this setup suitable for deflection routing architectures, such as the Virtual Circuit Deflection protocol (VCD).

KeyWords

All-Optical networks, optical packet switching, deflection routing, Virtual Circuit Deflection protocol, electronic bottleneck, header processing, Ultrafast Nonlinear Interferometer (UNI), Semiconductor Optical Amplifier (SOA), optical clock recovery, 2×2 optical exchange bypass switch.

Κεφάλαιο Πρώτο

Εισαγωγή στα Οπτικά Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς

1.0 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η ανθρωπότητα βίωσε τη ραγδαία ανάπτυξη της επιστήμης των υπολογιστών, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού. Η γενίκευση της χρήσης τους σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές καθώς και η συνεχής βελτίωση των χαρακτηριστικών τους από τη μία πλευρά παρείχε τη δυνατότητα για παραγωγή και διαχείριση πρωτοφανούς όγκου πληροφορίας, από την άλλη όμως έφερε στην επιφάνεια την επιτακτική ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ των υπολογιστών, όχι πλέον απλά σε επίπεδο διασύνδεσης μερικών συσκευών αλλά με τη μορφή ενός παγκόσμιου δικτύου από διασυνδεδεμένους υπολογιστές.

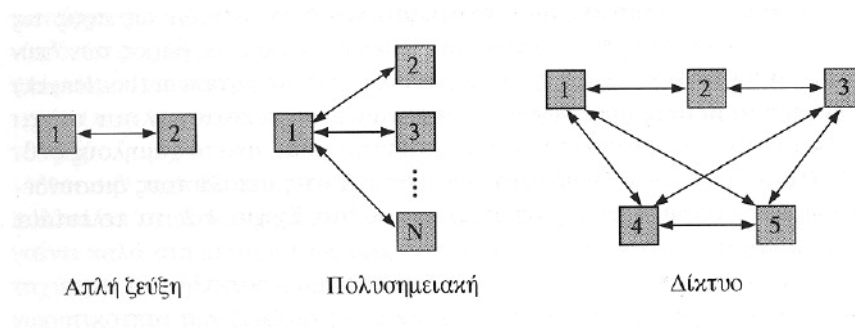
Η υπάρχουσα υποδομή του τηλεφωνικού δικτύου με τα παραδοσιακά χάλκινα καλώδια (δυσύρματες γραμμές μεταφοράς και ομοαξονικά καλώδια) έχει αρχίσει να εξαντλεί τις δυνατότητές της. Αιτία η αλματώδης ανάπτυξη του Internet και του www που έχει σαν αποτέλεσμα διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης που δεσμεύεται για μεταφορά αρχείων, video και άλλων εφαρμογών πολυμέσων. Η τεχνολογική απάντηση στην πρόκληση αυτή είναι τα φωτονικά δίκτυα. Η οπτική ίνα ως μέσο διάδοσης είναι πολύ ανώτερη από το χαλκό. Με διαθέσιμο εύρος ζώνης περισσότερο από 50000 GHz στην περιοχή των 1,5 μm σε συνδυασμό με την πολύ μικρή απόσβεση της τάξης των 0,2 dB/Km που εισάγει στο σήμα [1,2], μας δίνει τη δυνατότητα να επιτύχουμε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης (της τάξης των Tbps με εφαρμογή τεχνικών πολυπλεξίας όπως η Optical Time Division Multiplexing – OTDM και Wavelength Division Multiplexing – WDM) με ιδιαίτερα χαμηλό ρυθμό εμφάνισης λαθών και ανταγωνιστικό κόστος.

Οι φωτονικές επικοινωνίες αποτελούν μια ιδιαίτερα πρόσφατη τεχνολογία. Η ιστορία τους, που ξεκινά από τα μέσα της δεκαετίας του 60, υπήρξε μία διαρκής πρόοδος σε όλα τα μέτωπα. Η μία εφεύρεση μετά την άλλη προώθησαν τις οπτικές ίνες στη σημερινή τους θέση, ως της επίλεκτης τεχνολογίας για όλα τα συστήματα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν σταθερές διαδρομές μήκους πάνω από μερικά μέτρα. Έτσι, στο μελλοντικό κόσμο των επικοινωνιών μπορεί κανείς να διακρίνει την ανάδειξη δύο κατευθύνσεων. Η μία αφορά τις επικοινωνίες μεταξύ σταθερών σημείων, οι οποίες θα γίνονται μάλλον αποκλειστικά με οπτικές ίνες, ενώ η δεύτερη θα αποτελείται από τον ασύρματο κόσμο της κινητής ραδιομετάδοσης και των υπέρυθρων επικοινωνιών, και θα συνεργάζεται με τη βασική σταθερή υποδομή.

Μέχρι πρότινος, η σύγκριση της αφθονίας των υπολογιστικών δυνατοτήτων ως προς τις δυνατότητες των επικοινωνιών απέβαινε συνήθως εντελώς σε βάρος των δεύτερων. Πράγματι, η επίδοση των επιμέρους τμημάτων (μεταγωγών, τερματικών, υπολογιστών κ.λ.π.) υπερείχε κατά πολύ από αυτή των μεταξύ τους διασυνδέσεων μέσω των ζευξέων, όσον αφορά την ταχύτητα και το ρυθμό σφαλμάτων. Ακόμα περισσότερο, η πρόοδος στις επικοινωνίες ήταν ελάχιστη, σε αντίθεση με την αλματώδη ανάπτυξη των υπολογιστών. Τα παραπάνω είχαν σαν αποτέλεσμα τα όρια σε ένα δίκτυο να τίθενται από τους περιορισμούς των συστημάτων επικοινωνιών. Με την έλευση όμως της οπτικής ίνας, η κατάσταση άλλαξε άρδην. Το τεράστιο εύρος ζώνης της επιτρέπει θεωρητικά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, ρυθμούς που δεν είναι δυνατόν να προσεγγίσουν τα σύγχρονα ηλεκτρονικά. Μία περαιτέρω σημαντική αύξηση στην ταχύτητα των ηλεκτρονικών καθίσταται όλο και πιο δύσκολη. Έτσι, τώρα πια οι επικοινωνίες είναι το λιγότερο προβληματικό κομμάτι στη σχεδίαση ενός συστήματος. Η διαφορά όμως των οπτικών ινών από τα παραδοσιακά χάλκινα καλώδια είναι τόσο τεράστια, που πλέον για την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους είναι απαραίτητη η επανεξέταση όλων των επιμέρους τμημάτων που συνθέτουν ένα δίκτυο. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε κάποια γενικά χαρακτηριστικά των δικτύων, ώστε να παρουσιάσουμε κατόπιν τα φωτονικά δίκτυα με έμφαση στην οπτική μεταγωγή πακέτου, με τις ιδιαιτερότητες και τα πλεονεκτήματά τους.

1.1 Μορφές Δικτύων

Τα συστήματα επικοινωνίας γενικά διασυνδέουν κόμβους (nodes), που μπορεί να είναι τηλέφωνα, τερματικά, υπολογιστές, μεταγωγείς, θέσεις εργασίας κ.λ.π. Από τοπολογική άποψη, μπορούμε να κατατάξουμε τα συστήματα αυτά σε τρεις γενικές κατηγορίες, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.1*. Αριστερά παρουσιάζεται μία απλή ζεύξη ‘από σημείο σε σημείο’, που μπορεί να είναι μονόδρομη ή αμφίδρομη. Στην περίπτωση αυτή, ένας πομπός στο ένα άκρο στέλνει μηνύματα σε ένα δέκτη στο άλλο άκρο και το αντίθετο, επομένως στο δίκτυο υπάρχουν δύο μόνο μέρη. Στο μέσο παρουσιάζεται μία τοπολογία ‘από ένα προς πολλά σημεία’, που μπορούμε να την πούμε πολυσημειακή. Εδώ έχουμε N μέρη τα οποία όμως δεν είναι όλα ισότιμα. Ένα από αυτά μπορεί να μεταδίδει σε ένα υποσύνολο από $N-1$ άλλα, και αυτά ίσως να μπορούν να αποκρίνονται. Ένα παράδειγμα τέτοιου πολυσημειακού συστήματος είναι η τηλεόραση, όπου ένας σταθμός μπορεί να μεταδίδει (broadcast) σε ένα ολόκληρο πλήθος συνδρομητών.



Σχήμα 1.1: Τρεις βασικές τοπολογίες: απλή ζεύξη, πολυσημειακή και δίκτυο

Στα δεξιά του σχήματος παρουσιάζεται η δομή του δικτύου, όπου καθένας από τους N κόμβους μπορεί να συνδεθεί με όλους τους υπόλοιπους. Οι δύο προηγούμενες περιπτώσεις αποτελούν υποσύνολο αυτής της τοπολογίας. Για να αποκτήσει το δίκτυο τη μέγιστη χρησιμότητά του θα πρέπει να παρέχει αυτή τη δυνατότητα διασύνδεσης οποιουδήποτε-με-οποιονδήποτε.

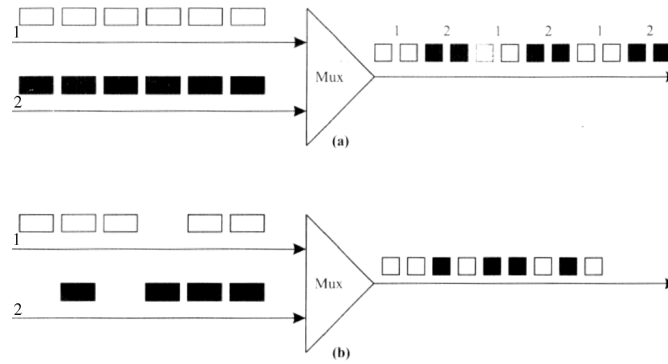
Στις πρώτες δεκαετίες της ζωής των οπτικών επικοινωνιών τα ενδιαφέροντά μας εστιάζονταν στη βελτίωση των ζεύξεων ‘από σημείο σε σημείο’. Το ζητούμενο ήταν η

κατασκευή τέτοιου είδους τμημάτων διασύνδεσης που να μπορούν να αντιμετωπίσουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις στον αριθμό των τηλεφώνων που έπρεπε να συνδεθούν. Δεν αύξανε δηλαδή ο ψηφιακός ρυθμός ανά τηλέφωνο, αλλά το πλήθος των συνδέσεων. Σήμερα, ρυθμοί της τάξης των 1,2 ή 2,4 Gbps αποτελούν τυποποιημένες τιμές για επικοινωνίες με οπτική ίνα, πράγμα που αντιπροσωπεύει περίπου 25,000 τηλεφωνικές επικοινωνίες των 64 kbps η κάθε μία [2].

Μία πολύ ενδιαφέρουσα εξέλιξη στο χώρο των οπτικών επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια είναι ότι τα ενδιαφέροντά μας μετατοπίστηκαν από τις ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων προς τις πολυσημειακές ζεύξεις και τα δίκτυα. Η έρευνα εστιάζεται λιγότερο στο πώς να αυξήσουμε το ρυθμό bit και την απόσταση των επαναληπτών σε μια απλή ζεύξη, και περισσότερο στη δυνατότητα διασύνδεσης, στο πόσες δέσμες bits σε διαφορετικά μήκη κύματος μπορεί το σύστημα να υποστηρίξει, πόσο αποδοτικά μπορούν να λειτουργήσουν τα επιμέρους στοιχεία που βρίσκονται στην πορεία του σήματος (ενισχυτές, πομποί, δέκτες), πόσο γρήγορα μπορεί να λειτουργήσει ένα πρωτόκολλο και ένα πλήθος από άλλα τέτοια θέματα σχετικά με τα προβλήματα της πολυκομβικής σύνδεσης των πολυσημειακών ζεύξεων και δικτύων.

1.2 Τύποι Δικτυακής Υποδομής – Μεταγωγή Κυκλώματος, Μεταγωγή Πακέτου

Στα σημερινά δίκτυα επικοινωνιών, οι εταιρίες, που ονομάζονται και φορείς δικτύου, παρέχουν ένα πλήθος από υπηρεσίες στους πελάτες τους. Ανάλογα με τη φύση και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των υπηρεσιών αυτών έχουν αναπτυχθεί δύο βασικοί τύποι δικτυακής υποδομής, που διαφέρουν στον τρόπο που η κίνηση πολυπλέκεται και μεταάγεται μέσα στο δίκτυο: Η μεταγωγή κυκλώματος και η μεταγωγή πακέτου. Στο *Σχήμα 1.2* φαίνονται οι διαφορές στον τύπο πολυπλεξίας που εφαρμόζεται σε καθεμιά από τις παραπάνω περιπτώσεις.



Σχήμα 1.2: Διαφορετικά είδη πολυπλεξίας (α) σταθερή, (β) στατιστική

Σε ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος, ένα εγγυημένο σταθερό εύρος ζώνης παρέχεται σε κάθε σύνδεση και είναι διαθέσιμο στη σύνδεση αυτή καθόλη τη διάρκεια που η σύνδεση αυτή είναι ενεργή. Συνεπώς, το άθροισμα των ευρών ζώνης όλων των νοητών κυκλωμάτων (συνδέσεων) σε μία ζεύξη θα πρέπει να είναι μικρότερη από το συνολικό εύρος της ζεύξης αυτής. Το πιο κοινό παράδειγμα ενός δικτύου μεταγωγής κυκλώματος είναι το δίκτυο τηλεφωνίας (PSTN), το οποίο προσφέρει στους χρήστες μια μόνιμη σύνδεση με σταθερό εύρος ζώνης (τυπικά 4 kHz) από τη στιγμή εγκαθίδρυσης της ζεύξης. Το δίκτυο αυτό έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής και είναι απόλυτα κατάλληλο για την εφαρμογή αυτή.

Σήμερα, οι υπηρεσίες μεταγωγής δικτύου που παρέχονται από τους φορείς αφορούν συνδέσεις σε ρυθμούς που κυμαίνονται από 64 kbps έως αρκετά Gbps. Οι συνδέσεις αυτές (ιδιωτικές γραμμές) ενοικιάζονται από το φορέα προς τον πελάτη για αρκετά μεγάλες χρονικές περιόδους, από μερικές μέρες έως μήνες και χρόνια. Το δίκτυο τηλεφωνίας PSTN ανήκει στην ίδια κατηγορία, με τη διαφορά ότι στο PSTN οι χρήστες καλούν τον αριθμό για να εγκαθιδρύσουν μία σύνδεση μεταξύ τους, ενώ στις ιδιωτικές γραμμές ο φορέας δημιουργεί τη σύνδεση χρησιμοποιώντας κάποιο σύστημα διαχείρισης.

Αν και η μεταγωγή κυκλώματος έχει σαν πλεονέκτημα την υπάρχουσα υποδομή του τηλεφωνικού δικτύου, παρουσιάζει ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα: Δε μπορεί να χειριστεί 'εκρηκτική' κίνηση δεδομένων (bursty data traffic). Ένα παράδειγμα τέτοιου είδους κίνησης είναι η πλοήγηση στο διαδίκτυο. Όταν ένας χρήστης κοιτάζει μία σελίδα

που έχει πρόσφατα κατεβάσει, είναι ανενεργός και δεν δημιουργεί σχεδόν καθόλου κίνηση. Όταν όμως κάνει 'κλικ' σε μία διεύθυνση, τότε μία νέα σελίδα πρέπει να κατέβει όσο το δυνατόν γρηγορότερα από το δίκτυο. Σύμφωνα με τα παραπάνω, μία εκρηκτική κίνηση απαιτεί ένα μεγάλο εύρος ζώνης από το δίκτυο όταν είναι ενεργή και πολύ μικρό στην αντίθετη περίπτωση. Έτσι η κίνηση αυτού του είδους χαρακτηρίζεται από ένα μακροπρόθεσμο εύρος ζώνης (average bandwidth) και από ένα βραχυπρόθεσμο εύρος ζώνης κορυφής (peak bandwidth). Σε ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος, για να διαχειριστούμε τέτοιου είδους κίνηση θα πρέπει να δεσμεύουμε κάθε φορά εύρος ζώνης ανάλογο με το εύρος ζώνης κορυφής. Σαν αποτέλεσμα, για ένα μεγάλο ποσοστό του χρόνου το εύρος του δικτύου παραμένει ανεκμετάλλευτο.

Τη λύση στο πρόβλημα της μεταφοράς εκρηκτικής κίνησης παρέχει η μεταγωγή πακέτου. Στα δίκτυα μεταγωγής πακέτου, η ροή των δεδομένων (data stream) διασπάται σε μικρά πακέτα δεδομένων. Τα πακέτα αυτά πολυπλέκονται μαζί με άλλα πακέτα από άλλες ροές δεδομένων μέσα στο δίκτυο, και μετάγονται στο δίκτυο με βάση τον προορισμό τους. Για να καταστεί δυνατή αυτή η μεταγωγή, μία επικεφαλίδα (header) επικολλάται στα δεδομένα (payload) του κάθε πακέτου. Η επικεφαλίδα μεταφέρει πληροφορίες διευθυνσιοδότησης, όπως τη διεύθυνση του προορισμού ή τον επόμενο κόμβο της διαδρομής. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι του δικτύου διαβάζουν τις επικεφαλίδες των πακέτων και τα δρομολογούν ανάλογα. Στον προορισμό, τα πακέτα επανασυνδέονται για να σχηματίσουν την αρχική ροή δεδομένων. Το κύριο παράδειγμα ενός δικτύου μεταγωγής πακέτου είναι το διαδίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο IP (Internet Protocol) για να μετάγει τα πακέτα από την πηγή στον προορισμό.

Στη μεταγωγή πακέτου χρησιμοποιείται η τεχνική της στατιστικής πλυπλεξίας για τη μεταφορά πολλών εκρηκτικών ροών δεδομένων ταυτόχρονα σε μία ζεύξη. Εφόσον κάθε ροή είναι εκρηκτική, είναι πιθανό ότι σε κάποια δεδομένη στιγμή μόνο κάποιες από αυτές είναι ενεργές, ενώ κάποιες όχι. Η πιθανότητα να είναι όλες ενεργές ταυτόχρονα είναι πολύ μικρή. Συνεπώς, το εύρος που απαιτείται σε κάθε ζεύξη μπορεί να μειωθεί σημαντικά σε σχέση με αυτό που θα χρειαζόταν αν όλες οι ροές δεδομένων ήταν ταυτόχρονα ενεργές. Έτσι γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση των πόρων του δικτύου ενώ μπορούν να εξυπηρετηθούν περισσότεροι χρήστες ταυτόχρονα.

Η στατιστική πολυπλεξία βελτιώνει τη χρησιμοποίηση του δικτύου αλλά οδηγεί και σε κάποια σημαντικά αποτελέσματα. Σε περίπτωση που είναι ενεργές περισσότερες ροές δεδομένων από όσες μπορεί να εξυπηρετήσει το διαθέσιμο εύρος ζώνης, κάποια από τα πακέτα πρέπει να αποθηκευτούν προσωρινά (buffering) έως ότου απελευθερωθεί εύρος ζώνης. Έτσι, η καθυστέρηση ενός πακέτου εξαρτάται από τη θέση του στην ουρά αναμονής, και αποτελεί τυχαία παράμετρο. Εάν δε η κίνηση είναι τόσο υψηλή που υπερχειλίσουν οι προσωρινές μνήμες, κάποια πακέτα πρέπει να απορριφθούν από το δίκτυο και να επανεκπεμφθούν αργότερα. Επίσης, ένα παραδοσιακό δίκτυο μεταγωγής πακέτου δεν υποστηρίζει την έννοια της σύνδεσης. Σαν αποτέλεσμα, πακέτα που ανήκουν στην ίδια σύνδεση μπορεί να ακολουθήσουν διαφορετικές διαδρομές μέσα στο δίκτυο, προκαλώντας ακόμα μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις καθυστερήσεις των πακέτων, τα οποία φτάνουν στον προορισμό τους σε λάθος σειρά.

Για τους παραπάνω λόγους, τα δίκτυα μεταγωγής πακέτου παρέχουν εξυπηρέτηση βέλτιστης προσπάθειας (best effort service). Το δίκτυο προσπαθεί τα βέλτιστα να μεταφέρει τα δεδομένα από την πηγή στον προορισμό, αλλά δεν προσφέρει εγγυήσεις. Αυτού του είδους η εξυπηρέτηση είναι κατάλληλη για έναν αριθμό εφαρμογών, όπως πλοήγηση στο διαδίκτυο και μεταφορά αρχείων, που δεν είναι ευαίσθητες σε χρονική καθυστέρηση. Όμως, εφαρμογές όπως μετάδοση βίντεο ή φωνής σε πραγματικό χρόνο (real time video/voice) δε μπορούν να ανεχτούν τυχαίες καθυστερήσεις πακέτων. Για το λόγο αυτό γίνεται σήμερα μια προσπάθεια για το σχεδιασμό δικτύων μεταγωγής πακέτου που να προσφέρουν εγγυήσεις για την ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) που παρέχουν. Παραδείγματα ποιότητας υπηρεσιών αποτελούν συγκεκριμένες εγγυήσεις για τη μέγιστη χρονική καθυστέρηση πακέτου, για τη μεταβολή της καθυστέρησης αυτής και για την εξασφάλιση ενός ελάχιστου εύρους ζώνης για κάθε σύνδεση.

1.3 Απαιτούμενες Παράμετροι

Καθώς τα δίκτυα και οι τεχνολογίες διαρκώς εξελίσσονται, οι υπηρεσίες που παρέχονται από τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς αλλάζουν δραστικά ενώ ο ανταγωνισμός μεταξύ τους γίνεται όλο και πιο έντονος. Το εύρος ζώνης που παρέχεται

αυξάνεται και είναι πλέον επιτακτικό οι νέες συνδέσεις να μπορούν να πραγματοποιηθούν εντός λεπτών ή ωρών από τη στιγμή που θα ζητηθούν και όχι εντός μηνών όπως παλαιότερα. Επίσης, είναι πλέον προτιμότερο να μην υπογράφονται μακροπρόθεσμα αλλά μικρής διάρκειας συμβόλαια, ανάλογα με τις ανάγκες του πελάτη.

Πέρα όμως από τα παραπάνω, ένα σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο καλείται να εξυπηρετήσει μία σειρά από εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις. Ο χαμηλός ρυθμός σφάλματος είναι απαραίτητη προϋπόθεση σε εφαρμογές όπως η τηλεϊατρική, και περιορίζεται κυρίως από τις ιδιότητες του φυσικού μέσου καθώς και τη χρησιμοποιούμενη κωδικοποίηση. Επίσης, πολλές εφαρμογές παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στο χρόνο αναμονής (π.χ. οπτική απεικόνιση), οπότε απαιτείται ο περιορισμός των ‘κύκλων επανάληψης χειραψιών μεταξύ πρωτοκόλλων’ (round-trip protocol handshakes). Η διεισδυτικότητα και η ικανότητα πρόσβασης σε απλές ή πολυσημιακές ζεύξεις είναι επίσης απαραίτητες ώστε, στην ιδανική περίπτωση, να είναι δυνατή η σύνδεση οποιουδήποτε χρήστη με οποιονδήποτε άλλον ή και με περισσότερους από έναν ταυτόχρονα. Και όλα αυτά θα πρέπει να είναι διαθέσιμα διαρκώς, χωρίς διακοπές. Οι τηλεπικοινωνιακοί φορείς παρέχουν τυπικά 99,999% διαθεσιμότητα, η οποία αντιστοιχεί σε ‘νεκρό’ χρόνο ίσο με 5 λεπτά το χρόνο. Αυτό με τη σειρά του καθιστά αναγκαίο το δίκτυο να έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να αποκατασταθεί η υπηρεσία σε περίπτωση βλάβης. Τέλος, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα σύγχρονο δίκτυο πρέπει να μπορεί να εγγυηθεί υψηλό βαθμό ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service). Το χαμηλό κόστος και η συμβατότητα με διαφορετικά πρωτόκολλα είναι επίσης απαραίτητα, ώστε όλοι οι διαφορετικοί τύποι υπηρεσιών να μπορούν να προσφερθούν από ένα και μόνο δίκτυο ανταγωνιστικά.

1.4 Οπτικά Δίκτυα

Τα οπτικά δίκτυα υπόσχονται να επιλύσουν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Εκτός από την τεράστια χωρητικότητα που παρέχουν στο δίκτυο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μία κοινή υποδομή για πολλαπλές υπηρεσίες, ενώ γίνονται όλο και περισσότερο ικανά να παρέχουν εύρος ζώνης όπου και όποτε χρειάζεται. Οι οπτικές ίνες έχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης από το χαλκό, ενώ είναι πολύ λιγότερο ευάλωτες

στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και σε άλλες ανεπιθύμητες επιδράσεις, οπότε επιτυγχάνουν χαμηλότερο ρυθμό σφαλμάτων (Bit Error Rate). Σαν αποτέλεσμα, αποτελούν σαφώς προτιμότερο μέσο μετάδοσης όταν πρόκειται για δεδομένα μεγαλύτερου ρυθμού από μερικές δεκάδες Mbps και αποστάσεις πάνω από 1 km.

Η πρώτη εφαρμογή των οπτικών ινών ήταν η αντικατάσταση των χάλκινων καλωδίων σε ζεύξεις 'από σημείο σε σημείο' στα υπάρχοντα δίκτυα και πρωτόκολλα επικοινωνίας. Έτσι οδηγηθήκαμε στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς, στα οποία τα οπτικά χρησιμοποιούνται κατά βάση μόνο ως φυσικό μέσον για μετάδοση. Παράδειγμα της πρώτης γενιάς των οπτικών δικτύων αποτελεί το SONET και το παρόμοιο SDH [3]. Το σήμα που μεταδίδεται από κόμβο σε κόμβο οπτικά μετατρέπεται σε ηλεκτρικό, το ηλεκτρικό σήμα υφίσταται επεξεργασία της επικεφαλίδας του και, αν προκύψει ανάγκη επανεκπομπής, το ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται πάλι σε οπτικό και οδηγείται στην ίνα (o/e/o conversion). Η διαδικασία αυτή επιβάλλει περιορισμούς στην απόδοση του όλου συστήματος, καθώς τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα δεν μπορούν να επιτύχουν τις επιθυμητές ταχύτητες με λογικό κόστος, ακόμα κι αν φτάσουν στα όρια της εξέλιξής τους. Αποτέλεσμα είναι η περίφημη 'ηλεκτρονική συμφόρηση' (electronic bottleneck) που προκύπτει από το ότι η ταχύτητα που διαθέτουν τα ηλεκτρονικά είναι δυσανάλογα μικρή σχετικά με την ολική ρυθμοδότηση του δικτύου που απαιτούν οι νέες εφαρμογές, ενώ το εύρος ζώνης των ηλεκτρονικών είναι κι αυτό με τη σειρά του πολύ μικρότερο σχετικά με εκείνο της οπτικής ίνας. Επίσης, όσο αυξάνεται η ταχύτητα των ηλεκτρονικών, τόσο πιο επιτακτική γίνεται η ανάγκη για την απαγωγή των μεγάλων ποσών θερμότητας που εκλύονται, ενώ εντείνεται και το πρόβλημα της ολοκλήρωσης, καθώς αυξάνεται πολύ το μέγεθος των κυκλωμάτων αυτών. Το κόστος επίσης των ηλεκτρονικών διατάξεων μεγαλώνει δυσανάλογα με την ταχύτητα.

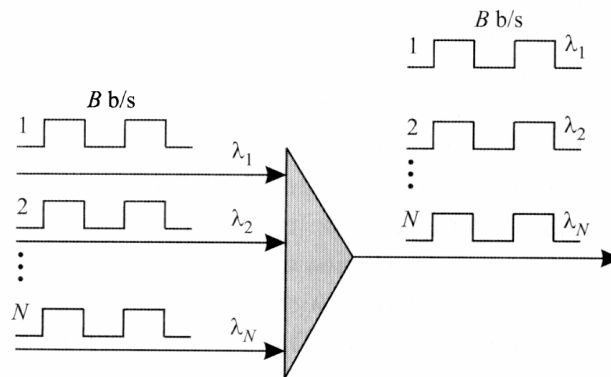
Από τα παραπάνω, είναι προφανής η ανάγκη για αποδοτικότερη χρήση των οπτικών δικτύων. Σημαντική έρευνα γίνεται ώστε να αντικατασταθούν τα ηλεκτρονικά μέσα, τα οποία δε μπορούν να υπερβούν τα 80Gbps, από οπτικές διατάξεις. Με τον τρόπο αυτό η επεξεργασία του σήματος θα γίνεται σε οπτικό επίπεδο και δεν θα χρειάζεται πλέον η οπτο-ηλεκτρονική μετατροπή του. Το αποτέλεσμα θα είναι τα αμιγώς οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς, τα οποία αναπτύσσονται ήδη στις μέρες μας και θα μπορούν να εκμεταλλεύονται πλήρως τις ιδιαίτερες δυνατότητες της οπτικής ίνας. Στα δίκτυα πρώτης

γενιάς, τα ηλεκτρονικά σε έναν κόμβο του δικτύου έπρεπε να χειριστούν όχι μόνο τα δεδομένα που προορίζονταν για τον κόμβο αυτό, αλλά και όλα τα υπόλοιπα τα οποία περνούσαν από εκεί, κατευθυνόμενα προς άλλους κόμβους του δικτύου. Αν τα τελευταία μπορούσαν να δρομολογηθούν μέσω του οπτικού επιπέδου, ο φόρτος εργασίας για τα ηλεκτρονικά του κόμβου αυτού θα μειωνόταν κατά πολύ. Μελέτες έχουν δείξει ότι στα σημερινά δίκτυα δεδομένων κορμού, μόνο το 20% της πληροφορίας που φτάνει σε έναν οποιονδήποτε κόμβο τερματίζει και σε αυτόν. Αυτή η διαπίστωση είναι από τις βασικότερες που οδήγησαν στην υλοποίηση των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς.

1.5 Τεχνικές Πολυπλεξίας

Η ανάγκη για πολυπλεξία προκύπτει από το γεγονός ότι η μετάδοση μέσω μίας ίνας σε υψηλούς ρυθμούς είναι πολύ πιο οικονομική από τη μετάδοση με περισσότερες ίνες και σε χαμηλότερους ρυθμούς. Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές πολυπλεξίας στα οπτικά δίκτυα, ανάλογες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα αντίστοιχα ηλεκτρονικά: Η πολυπλεξία στο μήκος κύματος (WDM – Wavelength Division Multiplexing) και η πολυπλεξία στο χρόνο (OTDM – Optical Time Division Multiplexing).

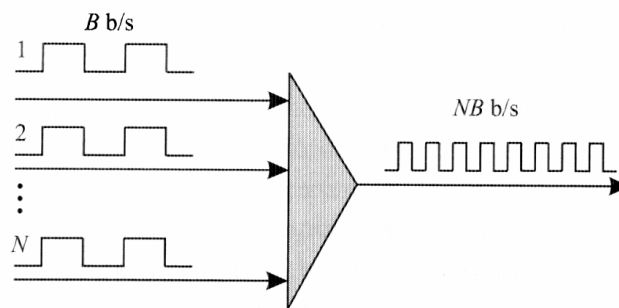
Στην περίπτωση της τεχνικής WDM πολυπλέκονται σε μία ίνα πολλά μήκη κύματος φωτός (χρώματα) ταυτόχρονα. Με αυτό τον τρόπο οι δυναμικά διαθέσιμες συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου χρησιμοποιούν διαφορετικά μήκη κύματος για τη μετάδοση πολλών πληροφοριών σε παράλληλη μορφή μέσα από μια οπτική ίνα. Αυτό φαίνεται στο *Σχήμα 1.3* όπου απεικονίζεται η λειτουργία ενός πολυπλέκτη WDM.



Σχήμα 1.3: Πολυπλεξία μήκους κύματος

Η μέθοδος WDM ουσιαστικά παρέχει στο δίκτυο πολλαπλά νοητά κυκλώματα ανάμεσα στους κόμβους. Για το λόγο αυτό είναι κατάλληλη για αρχιτεκτονικές μεταγωγής κυκλώματος.

Αντίθετα, στην περίπτωση της τεχνικής OTDM πολλές ροές πληροφορίας (data streams) χαμηλής ταχύτητας πολυπλέκονται σε μία ροή υψηλού ρυθμού μετάδοσης. Ο χρόνος διαιρείται σε σταθερά υποδιαστήματα ('χρονοθυρίδες'). Κάθε ροή πληροφορίας χρησιμοποιεί διαφορετική χρονοθυρίδα. Η αρχή της πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου φαίνεται στο *Σχήμα 1.4*.



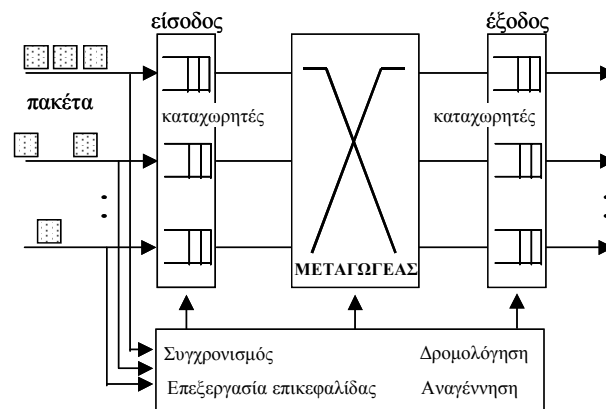
Σχήμα 1.4: Πολυπλεξία Χρόνου

Και οι δύο τεχνικές WDM και OTDM παρέχουν τρόπους για να αυξηθεί η χωρητικότητα μιας μετάδοσης, και είναι συμπληρωματικές μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο τα σημερινά δίκτυα χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό των δύο, όπου τα σήματα πολυπλέκονται στο μήκος κύματος και επιπλέον το κάθε μήκος κύματος πολυπλέκεται στο χρόνο. Με τον τρόπο αυτό εκμεταλλευόμαστε ακόμα καλύτερα τη μεγάλη χωρητικότητα που προσφέρει η ίνα ως μέσο μετάδοσης και βελτιώνουμε αρκετά τη διέλευση πληροφορίας (throughput) μέσα από το οπτικό δίκτυο.

1.6 Οπτική Μεταγωγή Πακέτου

Η εξέλιξη των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς οδηγεί στην προοπτική για πραγματοποίηση της μεταγωγής πακέτου στο οπτικό επίπεδο. Αυτό σημαίνει δυνατότητα παροχής υπηρεσιών εικονικού κυκλώματος (virtual circuits services) ή αυτοδύναμων πακέτων (datagram services), όπως τα δίκτυα ATM και IP. Με τα εικονικά κυκλώματα,

το δίκτυο προσφέρει συνδέσεις που μοιάζουν με μεταγωγής κυκλώματος μεταξύ δύο κόμβων, οι οποίες όμως μπορεί να μη χρησιμοποιούν όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης της γραμμής. Για παράδειγμα, μπορεί οι επιμέρους συνδέσεις να λειτουργούν στα 10 Gbps, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης της γραμμής να είναι 100 Gbps για κάθε μήκος κύματος. Για το λόγο αυτό στο δίκτυο πρέπει να υποστηρίζεται και κάποιο είδος πολυπλεξίας χρόνου, ώστε να συνδυάζονται πολλαπλές συνδέσεις στο ρυθμό μετάδοσης. Στους ρυθμούς αυτούς, θα ήταν ευκολότερο η πολυπλεξία να γίνεται σε οπτικό επίπεδο παρά με χρήση ηλεκτρονικών. Επίσης, ο τύπος της πολυπλεξίας χρόνου μπορεί να είναι σταθερός ή στατιστικός. Τα δίκτυα που υποστηρίζουν στατιστική πολυπλεξία χρόνου ονομάζονται δίκτυα οπτικής μεταγωγής πακέτου. Τα δίκτυα OTDM αποτελούν μία ειδική περίπτωση οπτικής μεταγωγής πακέτου όπου η πολυπλεξία είναι σταθερή [3].



Σχήμα 1.5: Κόμβος Δρομολόγησης σε ένα δίκτυο οπτικής μεταγωγής

Η γενική μορφή ενός κόμβου δρομολόγησης για δίκτυο οπτικής μεταγωγής φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Σκοπός είναι η δημιουργία κόμβων μεταγωγής πακέτου με πολύ μεγαλύτερες χωρητικότητες από αυτές που θα μπορούσαν να επιτευχθούν με την ηλεκτρονική μεταγωγή πακέτου. Ένας τέτοιος κόμβος διαβάζει την επικεφαλίδα του εισερχόμενου πακέτου και το κατευθύνει στην κατάλληλη θύρα εξόδου. Είναι δυνατόν επίσης να αντικαθιστά την επικεφαλίδα αυτή ώστε να επιτευχθεί η περαιτέρω δρομολόγηση του πακέτου. Ο κόμβος επίσης πρέπει να μπορεί να χειρίζεται τις συγκρούσεις που προκύπτουν όταν δύο πακέτα που προέρχονται από διαφορετικές θύρες

εισόδου πρέπει να εξέλθουν από την ίδια θύρα εξόδου ταυτόχρονα. Το θέμα αυτό θα συζητηθεί στο κεφάλαιο 4.

Ιδανικά, όλες οι λειτουργίες εντός του κόμβου πρέπει να εκτελούνται σε οπτικό επίπεδο. Οι λειτουργίες αυτές περιλαμβάνουν τη δρομολόγηση (γνώση της τοπολογίας του δικτύου άρα και της αντίστοιχης θύρας που πρέπει να εξέλθει το κάθε πακέτο), την προώθηση (επεξεργασία και αντικατάσταση επικεφαλίδας), τη μεταγωγή (αποστολή του πακέτου στην κατάλληλη θύρα εξόδου), την καταχώρηση (αποθήκευση των πακέτων που έχουν κοινό προορισμό για την αποφυγή συγκρούσεων), την πολυπλεξία (αφαίρεση των δεδομένων με τελικό προορισμό τον κόμβο και προσθήκη νέων με προορισμούς μετέπειτα κόμβους), το συγχρονισμό των εισερχόμενων πακέτων με το εσωτερικό του ρολοί και την αναγέννηση των σημάτων στην είσοδο, ώστε να μπορεί να γίνει επεξεργασία τους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Δυστυχώς όμως οι περιορισμοί που υπάρχουν ακόμα όσον αφορά την επεξεργασία σημάτων σε οπτικό επίπεδο μας αναγκάζουν να χρησιμοποιούμε παραδοσιακά ηλεκτρονικά για κάποιες από αυτές τις λειτουργίες. Η αδυναμία υλοποίησης οπτικών μνημών άμεσης προσπέλασης αποτελεί τροχοπέδη στην κατασκευή αμιγώς οπτικών διατάξεων. Οι προσωρινές μνήμες (buffers) που έχουν κατασκευαστεί κάνουν χρήση οπτικών γραμμών καθυστέρησης (Optical Delay Lines – ODL) και παρουσιάζουν σημαντικές αδυναμίες, όπως θα περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, διατάξεις επεξεργασίας επικεφαλίδας που βασίζονται σε αρχές συσχέτισης (correlation principles) εντός ενισχυτών ημιαγωγού έχουν κατασκευαστεί [20], αλλά έχουν σαν μειονέκτημα τον μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας.

1.7 Κύκλωμα Αφαίρεσης/Επαναεισαγωγής Επικεφαλίδας

Σκοπός της οπτικής μεταγωγής πακέτου είναι να επιτρέψει τις δυνατότητες της μεταγωγής πακέτου σε ρυθμούς που δε μπορούν να επιτευχθούν με χρήση ηλεκτρονικών. Η αμιγώς οπτική επεξεργασία του σήματος είναι το ζητούμενο και στην κατεύθυνση αυτή γίνεται σημαντική έρευνα. Το πρώτο βήμα ήταν η υλοποίηση των οπτικών λογικών πυλών AND και XOR [5, 7]. Η επιτυχής λειτουργία τους άνοιξε το δρόμο για την κατασκευή μιας σειράς από συνθετότερες διατάξεις. Το κύκλωμα οπτικής ανάκτησης ρολογιού [10] είναι μία από αυτές, και μας δίνει τη δυνατότητα να συγχρονίσουμε το

σύστημά μας στη συχνότητα λειτουργίας του δικτύου ώστε να μπορέσουμε να επεξεργαστούμε τα εισερχόμενα δεδομένα. Οι οπτικοί ενισχυτές καθιστούν δυνατή την από άκρο σε άκρο οπτική λειτουργία του συστήματος χωρίς την ανάγκη οπτο-ηλεκτρονικής μετατροπής και αναγέννησης του σήματος. Επίσης οι οπτικοί μεταγωγείς που κατασκευάστηκαν μπορούν να χρησιμεύσουν ως δομικά στοιχεία για τους δρομολογητές των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς. Τέλος, οπτικές μνήμες έχουν παρουσιαστεί σε αρκετές παραλλαγές, με περιορισμένες όμως δυνατότητες και μεγάλη πολυπλοκότητα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Η κατασκευή κυκλώματος αφαίρεσης/επαναεισαγωγής επικεφαλίδας εντάσσεται στο πλαίσιο πειραμάτων οπτικής λογικής που έχουν σαν τελικό στόχο την υλοποίηση ενός αμιγώς οπτικού δρομολογητή, κατάλληλου για τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς. Η διάταξη που παρουσιάζεται στη συνέχεια, επιτυγχάνει τη λειτουργία αυτή χρησιμοποιώντας δύο δομικά στοιχεία: Το υποσύστημα ανάκτησης ρολογιού που εξάγει το ρολόι του εισερχόμενου πακέτου και τον 2×2 οπτικό διακόπτη μεταγωγής όπου εκτελείται η αντικατάσταση της επικεφαλίδας.

Η διάρθρωση του κειμένου έχει τη μορφή:

- Κεφάλαιο 1: Περιγραφή των οπτικών δικτύων με έμφαση στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς και την οπτική μεταγωγή πακέτου.
- Κεφάλαιο 2: Θεωρητική ανάλυση οπτικών διατάξεων. Περιγραφή του Μη Γραμμικού Συμβολόμετρου Υπερυψηλής Ταχύτητας (Ultrafast Nonlinear Interferometer - UNI) με έμφαση στο φαινόμενο της Ετεροδιαμόρφωσης Φάσης (Cross Phase Modulation – XPM). Περιγραφή οπτικών πυλών και διακοπών που βασίζονται στο UNI.
- Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση του κυκλώματος αφαίρεσης/επαναεισαγωγής επικεφαλίδας και ανάλυση της λειτουργίας του. Περιγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Κεφάλαιο 4: Πιθανές εφαρμογές του κυκλώματος αφαίρεσης/επαναεισαγωγής επικεφαλίδας σε ένα οπτικό δίκτυο δεύτερης γενιάς.

Κεφάλαιο Δεύτερο

Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλής Ταχύτητας:

Θεωρητική Ανάλυση - Εφαρμογές

2.0 Εισαγωγή

Η ανάγκη για αποδοτικότερη χρήση των σύγχρονων δικτύων επικοινωνιών και για ολοένα και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας οδήγησε στην εξέλιξη των αμιγώς οπτικών μέσων. Πλήθος διατάξεων που επιτελούν λογικές λειτουργίες έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία [5,6,7]. Οι διατάξεις αυτές αποτελούν τους οπτικούς διακόπτες και βασίζουν τη λειτουργία τους στα γρήγορα μη γραμμικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε υλικά όπως η οπτική ίνα και στοιχεία όπως ο Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) [8]. Ένα τέτοιο φαινόμενο είναι η ετεροδιαμόρφωση φάσης (Cross Phase Modulation – XPM) [1, 2]. Σαν αποτέλεσμα οι ταχύτητες επεξεργασίας που επιτυγχάνουν τα οπτικά κυκλώματα είναι πολύ υψηλότερες από αυτές των αντίστοιχων ηλεκτρονικών.

Έχουν παρουσιαστεί αρκετές συμβολομετρικές διατάξεις που εκμεταλλεύονται το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι το συμβολόμετρο Mach – Zehnder, η διάταξη TOAD (SLALOM) (οπτικός ασύμμετρος αποπολυπλέκτης σε ρυθμό Terahertz – Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer και ενισχυτής laser ημιαγωγού σε καθρέπτη βρόχου – Semiconductor Laser Amplifier in a Loop Mirror) καθώς και το Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλών Ταχυτήτων (Ultrafast Nonlinear Interferometer – UNI). Στο πείραμά μας χρησιμοποιήθηκε το UNI, το οποίο αποτελείται από έναν μόνο οπτικό ενισχυτή ημιαγωγού και είναι αρκετά απλό στην υλοποίηση. Με το UNI έχουν υλοποιηθεί όλες οι λογικές συναρτήσεις – ΚΑΙ (AND), Ή (OR), Αντιστροφή (Invert), Αποκλειστικό Ή (XOR) – καθώς και τα

συμπληρώματά τους [5, 7]. Μία ακόμα σπουδαία ιδιότητα του UNI είναι η δυνατότητα ολοκλήρωσης και, ενδεχομένως, μαζικής παραγωγής του. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τη διασυνδεσιμότητα (cascadability) μεταξύ των οπτικών πυλών που βασίζονται σε αυτό, καθιστά το UNI βασικό υποψήφιο για διατάξεις οπτικής λογικής.

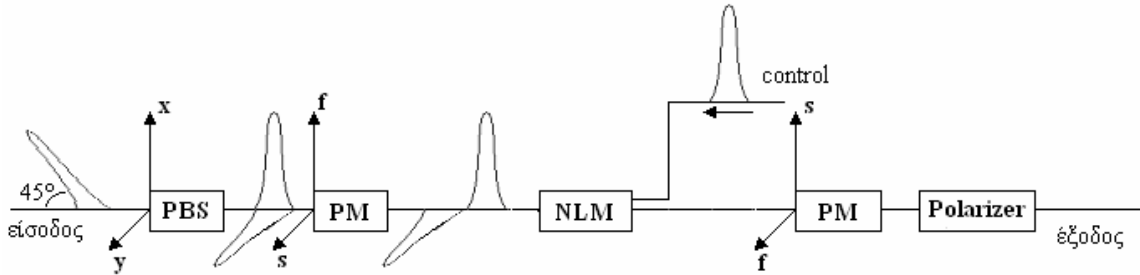
Στη συνέχεια θα περιγράψουμε την αρχή λειτουργίας του UNI, τον τρόπο που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο καθώς και τη θεωρία των μη γραμμικών φαινομένων σε οπτικούς ενισχυτές. Ο οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού είναι το βασικότερο στοιχείο της διάταξης του UNI και από αυτόν πηγάζουν τα μη γραμμικά φαινόμενα.

2.1 Αρχή λειτουργίας του UNI

Στο Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλών Ταχυτήτων εισέρχονται και αλληλεπιδρούν δύο σήματα. Το ένα είναι το σήμα εισόδου και το άλλο το σήμα ελέγχου. Το UNI είναι μία διάταξη που εκμεταλλεύεται την πολωτική κατάσταση του φωτός για να λειτουργήσει. Η βασική ιδέα είναι η εξής: το σήμα εισόδου αναλύεται σε δύο ίσες και κάθετες συνιστώσες. Το σήμα ελέγχου επιδρά με κατάλληλο τρόπο μόνο στη μία από αυτές, επιβάλλοντας ή όχι στροφή φάσης 180° (στην ιδανική περίπτωση). Κατόπιν οι δύο συνιστώσες συντίθενται και πάλι. Αν είχε πραγματοποιηθεί στροφή φάσης, η συνισταμένη θα έχει στραφεί κατά 90° , αλλιώς θα έχει παραμείνει αμετάβλητη. Τέλος, ο διαχωρισμός της διεύθυνσης της συνισταμένης γίνεται με έναν απλό πολωτή.

Η γενική μορφή της διάταξης UNI φαίνεται στο *Σχήμα 2.1*. Το σήμα εισέρχεται στον Πολωτικό Διαχωριστή Δέσμης (Polarization Beam Splitter – PBS) ο οποίος χωρίζει τη δέσμη σε δύο κάθετες συνιστώσες. Με τον τρόπο αυτό σε κάθε έξοδο του PBS έχουμε γραμμικά πολωμένο φως. Σε μία από τις δύο εξόδους ακολουθεί κόλληση (splice) 45° με PM ίνα, ενώ η άλλη έξοδος δεν χρησιμοποιείται. Η PM ίνα είναι ίνα με διαφορετικό δείκτη διάθλασης στους δύο κάθετους άξονες, στους οποίους αναλύεται το γραμμικά πολωμένο φως αν προσπέσει πάνω στην ίνα. Έτσι, με το splice 45° χωρίζουμε το φως σε δύο ίσες κάθετες συνιστώσες οι οποίες διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες φάσης. Συγκεκριμένα, το πεδίο με πόλωση παράλληλη στον άξονα με το μικρότερο δείκτη διάθλασης θα διαδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα φάσης από την πόλωση με τη διεύθυνση του άξονα με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης. Τελικό αποτέλεσμα της

διέλευσης του σήματος από την PM ίνα είναι η εμφάνιση στο άκρο της ίνας δύο γραμμικών πολώσεων ίσου πλάτους, οι οποίες είναι χρονικά μετατοπισμένες η μία ως προς την άλλη, αλλά αποτελούν και οι δύο συνιστώσες του αρχικού σήματος εισόδου. Η χρονική μετατόπιση των δύο διανυσμάτων εξαρτάται από το μήκος της ίνας και, όπως φαίνεται στο σχήμα, επιλέγεται να είναι ίση με τη μισή περίοδο της παλμοσειράς, ώστε να έχουμε τη μέγιστη δυνατή ανεξαρτησία μεταξύ των δύο πολώσεων.



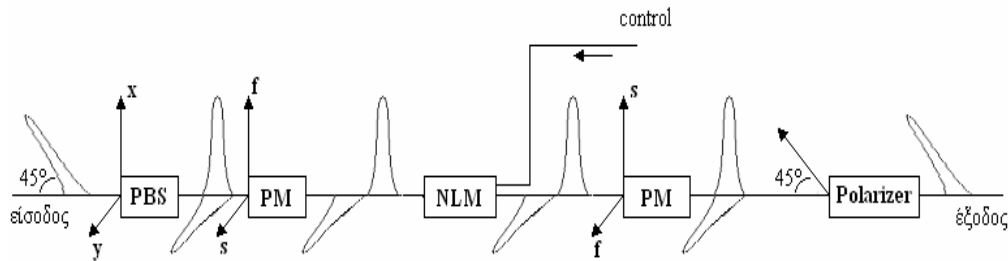
Σχήμα 2.1: Η γενική μορφή του UNI

Οι χρονικά διαχωρισμένες συνιστώσες του σήματος εισόδου εισέρχονται στη συνέχεια στο Μη Γραμμικό Στοιχείο. Ο διαχωρισμός αυτός των δύο συνιστωσών μας δίνει τη δυνατότητα να συγχρονίσουμε το σήμα ελέγχου με τη μία από αυτές, έτσι ώστε όταν υπάρχει σήμα ελέγχου να προκαλείται στροφή φάσης στη μία μόνο συνιστώσα. Το σήμα ελέγχου είναι ένα οπτικό σήμα του οποίου ο ρόλος συνίσταται στο να διεγείρει το μη γραμμικό φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης. Πρόκειται για ένα μη γραμμικό φαινόμενο κατά το οποίο ένα ισχυρό σήμα στρέφει τη φάση ενός ασθενέστερου, λόγω της εξάρτησης του δείκτη διάθλασης του Μη Γραμμικού Στοιχείου από την υφιστάμενη οπτική ισχύ. Όταν λοιπόν έχουμε σήμα ελέγχου, τότε η οπτική ισχύς που δέχεται το Μη Γραμμικό Στοιχείο διεγείρει το φαινόμενο και προκαλεί στροφή φάσης στη συγχρονισμένη συνιστώσα, σε αντίθεση με την ασυγχρόνιστη που παραμένει αμετάβλητη. Όταν δεν υπάρχει παλμός στο σήμα ελέγχου, δεν επηρεάζεται ούτε η συγχρονισμένη συνιστώσα.

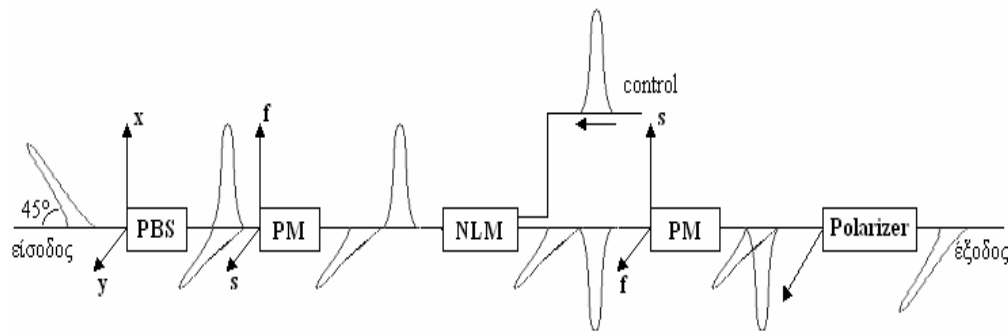
Μετά το Μη Γραμμικό Στοιχείο οι δύο πολώσεις εισέρχονται σε PM ίνα ίδιου μήκους με πριν, με ανεστραμμένους όμως τον γρήγορο και τον αργό άξονα. Σαν αποτέλεσμα, οι δύο συνιστώσες θα επανενωθούν χρονικά. Η συνισταμένη τους θα είναι ίδια με του

σήματος εισόδου, αν δεν υπήρχε σήμα ελέγχου, ή θα έχει στραφεί κατά 90° (στροφή φάσης της συγχρονισμένης πόλωσης 180°). Ο τελικός διαχωρισμός μπορεί να γίνει με έναν πολωτή ρυθμισμένο στη σωστή διεύθυνση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 .

α)



β)



Σχήμα 2.2: Η εξέλιξη των δύο πολώσεων στο UNI χωρίς (α) και με σήμα ελέγχου (β)

Το σήμα ελέγχου στη διάταξη του UNI διαδίδεται κατά την αντίθετη φορά από το σήμα εισόδου μέσα στο Μη Γραμμικό Στοιχείο. Η αντίθετη φορά είναι προτιμότερη, καθώς αν τα δύο σήματα διαδίδονταν παράλληλα θα ήταν απαραίτητο ένα επιπλέον φίλτρο στην έξοδο του UNI για να απορριφθεί το ανεπιθύμητο σήμα ελέγχου. Εξάλλου, αν χρησιμοποιούνταν φίλτρο τα σήματα εισόδου και ελέγχου θα έπρεπε να είναι σε διαφορετικά μήκη κύματος, περιορισμός που γενικά είναι ανεπιθύμητος.

Το κυριότερο στοιχείο του UNI είναι το Μη Γραμμικό Στοιχείο. Εκτός από αυτό όμως, στα προηγούμενα σχήματα συναντήσαμε και άλλες μονάδες που υλοποιούνται μέσω διαφόρων εργαστηριακών στοιχείων, όπως τα ακόλουθα:

- PC – Polarization Controller (Ελεγκτής Πόλωσης). Οι Ελεγκτές Πόλωσης είναι στοιχεία τριών βαθμών ελευθερίας που μας επιτρέπουν να στρέφουμε με συστηματικό τρόπο τη γωνία πόλωσης του πολωμένου φωτός που προσπίπτει σε αυτόν.
- PBS – Polarization Beam Splitter (Πολωτικός Διαχωριστής Δέσμης). Ο Πολωτικός Διαχωριστής Δέσμης είναι ένας κατευθυντικός συζεύκτης ευαίσθητος στην πόλωση. Χρησιμοποιείται για πολυπλεξία ή αποπολυπλεξία πολώσεων ή μηκών κύματος. Έχει την ιδιότητα να αναλύει το σήμα εισόδου σε δύο κάθετες μεταξύ τους πολώσεις και να εμφανίζει την κάθε μία από αυτές σε ξεχωριστή έξοδο.
- PM ίνα – Polarization Maintaining Fiber (Ίνα που διατηρεί την Πόλωση). Αυτού του είδους οι ίνες διατηρούν την πόλωση του φωτός. Κατασκευάζονται από δύο είδη γυαλιού με διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής, με αποτέλεσμα κατά τη θέρμανση της ίνας στη διαδικασία παραγωγής της να χάνεται η κυκλική συμμετρία. Έτσι, αν γραμμικά πολωμένο φως πέσει σε μία τέτοια ίνα, θα αναλυθεί σε δύο κάθετους άξονες και, λόγω της διπλοθλαστικότητας, θα εμφανιστεί στο άκρο της ίνας ως δύο γραμμικές πολώσεις χρονικά μετατοπισμένες μεταξύ τους.

2.2 Μαθηματική ανάλυση του UNI

Το φως που εισέρχεται στην πύλη UNI είναι γραμμικά πολωμένο με κλίση 45° ως προς τους δύο άξονες της PM ίνας. Έτσι, αν θεωρήσουμε σήμα της μορφής $\vec{E}_{in} = E_{in} e^{-j\alpha} \hat{p}$, αυτό κατά την είσοδό του στην PM ίνα θα αναλυθεί σε δύο γραμμικές πολώσεις E_x και E_y ίσου πλάτους κάθετες μεταξύ τους και παράλληλες στους άξονες της ίνας. Οι συνιστώσες αυτές θα είναι της μορφής:

$$E_{in}^x = E_{in}^y = E_{in} \cos(45^\circ) = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-j\alpha}$$

Λόγω της διάδοσής τους σε μήκος L της διπλοθλαστικής ίνας, οι δύο συνιστώσες του σήματος πριν εισέλθουν στο Μη Γραμμικό Στοιχείο θα έχουν αποκτήσει μια διαφορά φάσης ανάλογη του δείκτη διάθλασης σε κάθε άξονα της PM ίνας. Τα πλάτη τους όμως παραμένουν ίσα:

$$E^x = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_x \cdot L)] \quad \text{και} \quad E^y = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_y \cdot L)]$$

Στη συνέχεια οι δύο συνιστώσες εισάγονται στο Μη Γραμμικό Στοιχείο, στο οποίο στρέφονται κατά ϕ_x και ϕ_y αντίστοιχα. Εκτός όμως από διαφορετική στροφή φάσης, σε κάθε πόλωση αντιστοιχεί και διαφορετικό κέρδος, έστω G_x και G_y , αφού το control σήμα που είναι συγχρονισμένο με τη μία συνιστώσα ενδέχεται να έχει μεταβάλλει το κέρδος του Μη Γραμμικού Στοιχείου. Έτσι παίρνουμε τα πεδία:

$$E^x = G_x \cdot E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_x \cdot L + \phi_x)] \quad \text{και}$$

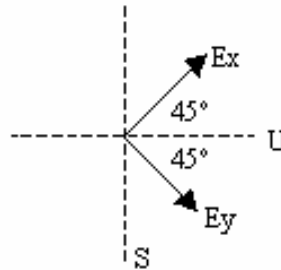
$$E^y = G_y \cdot E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_y \cdot L + \phi_y)]$$

Μετά το Μη Γραμμικό Στοιχείο ακολουθεί η δεύτερη PM ίνα, η οποία εισάγει τις αντίστροφες καθυστερήσεις, έτσι ώστε οι δύο συνιστώσες να επανενωθούν χρονικά:

$$E^x = G_x \cdot E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_x \cdot L - \beta_y \cdot L + \phi_x)] \quad \text{και}$$

$$E^y = G_y \cdot E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-j(\omega t - \beta_y \cdot L - \beta_x \cdot L + \phi_y)]$$

Στην έξοδο της διάταξης έχουμε τις θύρες U (unswitched port) και S (switched port), που είναι κάθετες μεταξύ τους και σχηματίζουν γωνία 45° με τις δύο συνιστώσες του φωτός στην PM ίνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Η θύρα U έχει τη διεύθυνση που είχε το πεδίο στην είσοδο. Όταν δεν υπάρχει σήμα ελέγχου, το σήμα εισόδου δε μεταβάλλεται, οπότε βγαίνει από τη θύρα U, αλλιώς στρέφεται κατά 90° και βγαίνει από τη θύρα S.



Σχήμα 2.3: Συνιστώσες του σήματος πριν τις θύρες εξόδου

Από το Σχήμα 2.3 προκύπτει ότι το πεδίο στη θύρα S είναι:

$$E^S = E^x \frac{\sqrt{2}}{2} - E^y \frac{\sqrt{2}}{2}$$

ενώ η ισχύς του ισούται με:

$$P_S = |E^S|^2 = \left| E^x \frac{\sqrt{2}}{2} - E^y \frac{\sqrt{2}}{2} \right|^2 = \frac{1}{2} (E^x - E^y) \cdot (E^x - E^y)^*$$

Αντίστοιχα για τη θύρα U ισχύει:

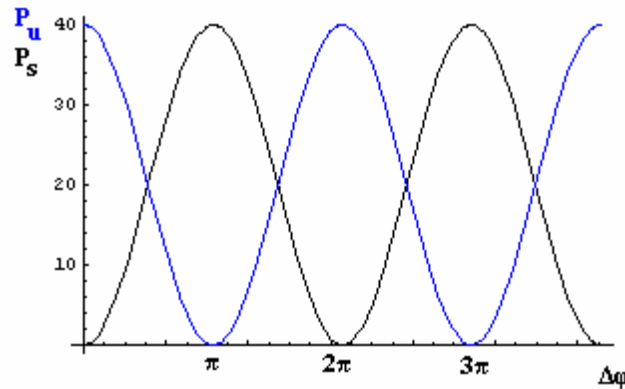
$$E^U = E^x \frac{\sqrt{2}}{2} + E^y \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \text{και}$$

$$P_U = |E^U|^2 = \left| E^x \frac{\sqrt{2}}{2} + E^y \frac{\sqrt{2}}{2} \right|^2 = \frac{1}{2} (E^x + E^y) \cdot (E^x + E^y)^*$$

Αν αντικαταστήσουμε στις σχέσεις αυτές τις τιμές που υπολογίσαμε παραπάνω για τα E_x και E_y και ορίσουμε $\Delta\phi = \phi_x - \phi_y$ προκύπτει τελικά:

$$\text{Ισχύς στη θύρα S: } P_S = \frac{1}{4} E_{in}^2 \left[(G_x - G_y)^2 + 4G_x G_y \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \right]$$

$$\text{Ισχύς στη θύρα U: } P_U = \frac{1}{4} E_{in}^2 \left[(G_x - G_y)^2 + 4G_x G_y \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \right]$$



Σχήμα 2.4: Ισχείς στις θύρες S και U συναρτήσει του $\Delta\phi$

Παρατηρώντας τη μεταβολή της ισχύος στις θύρες S και U συναρτήσει του $\Delta\phi$, συμπεραίνουμε ότι η ισχύς μετατοπίζεται από τη μία θύρα στην άλλη. Οι δύο θύρες δηλαδή είναι συμπληρωματικές. Έτσι για την περίπτωση που $G_x = G_y$, όταν $\Delta\phi = 0^\circ$ το σήμα μετάγεται εξολοκλήρου στη θύρα U, ενώ όταν $\Delta\phi = 180^\circ$ το σήμα μετάγεται στη θύρα S.

2.3 Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (SOA)

Ο Οπτικός Ενισχυτής Ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) είναι ένας ενισχυτής οδεύοντος κύματος που κατασκευάζεται από κράμα InGaAsP – InP. Στη διάταξη UNI χρησιμοποιείται ως το Μη Γραμμικό Στοιχείο, στο οποίο πραγματοποιείται η στροφή φάσης.

Τα μη γραμμικά φαινόμενα στους Οπτικούς Ενισχυτές Ημιαγωγού περιγράφονται μαθηματικά με τη βοήθεια των δύο βασικών εξισώσεων ρυθμών:

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = \frac{I}{e \cdot V} - \frac{N(z,t)}{\tau_e} - \frac{P(z,t) \cdot \Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T]}{h\nu \cdot A} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial P(z,t)}{\partial t} = P(z,t) \cdot \Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T] - P(z,t) \cdot a_D \quad (2.2)$$

όπου $N(z,t)$: χωρική πυκνότητα φορέων στο εσωτερικό του ενισχυτή

$P(z,t)$: οπτική ισχύς

I : ρεύμα παροχής στον SOA

τ_e : χρονική σταθερά αυθόρμητης επανασύνδεσης φορέων

Γ : ποσοστό εγκάρσιας συγκέντρωσης φωτεινής ροής στο εσωτερικό της ενεργού περιοχής (παράγοντας σύμπτυξης)

g : συντελεστής κέρδους της κοιλότητας

A : εμβαδό διατομής της ενεργού περιοχής

a_D : συντελεστής απωλειών

e : φορτίο ηλεκτρονίου

V : όγκος ενεργού περιοχής

Η πρώτη εξίσωση περιγράφει τη χρονική μεταβολή της χωρικής πυκνότητας των φορέων $N(z,t)$ στον ενισχυτή. Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος όρος στο δεύτερο μέλος της περιγράφει την αύξηση των φορέων στον όγκο V του ημιαγωγού λόγω του ρεύματος τροφοδοσίας I . Ο δεύτερος όρος παριστάνει τη μείωση των φορέων λόγω του φαινομένου της αυθόρμητης εκπομπής που συμβαίνει με σταθερά χρόνου τ_e , ενώ ο τρίτος περιγράφει τη μείωση των φορέων λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση του οπτικού σήματος. Το κέρδος του ενισχυτή δίνεται από τον παράγοντα $\Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T]$ από τον οποίο παρατηρούμε ότι έχουμε ενίσχυση όταν η συγκέντρωση φορέων ξεπεράσει ένα κατώφλι N_T .

Η δεύτερη σχέση περιγράφει τη χρονική μεταβολή της οπτικής ισχύος $P(z,t)$ του οπτικού σήματος. Ο πρώτος όρος εκφράζει την αύξηση της οπτικής ισχύος λόγω εξαναγκασμένης επανασύνδεσης φορέων, ενώ ο δεύτερος παριστάνει τη μείωση της οπτικής ισχύος λόγω διάδοσης σε περιβάλλον με συντελεστή απωλειών a_D .

Ζητάμε να επιλύσουμε τις δύο σχέσεις (2.1) και (2.2) ώστε να βρούμε μία έκφραση του κέρδους του ενισχυτή καθώς διαδίδεται ένας παλμός μέσα από αυτόν. Ορίζουμε το κέρδος μικρού σήματος του ενισχυτή ως

$$G_0 = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp[\Gamma \cdot g \cdot (N_s - N_T) \cdot L - a_D \cdot L]$$

όπου $N_s = \frac{I\tau_e}{eV_s}$ είναι η πυκνότητα φορέων στη μόνιμη κατάσταση για μικρό σήμα και

L το μήκος του ενισχυτικού μέσου. Επίσης ορίζουμε και το συνολικό αριθμό φορέων

ανά διατομή που είναι διαθέσιμοι προς ενίσχυση ως $N_{tot}(t) = \int_{z=0}^{z=L} [N(z,t) - N_T] \cdot dz$.

Στη συνέχεια ολοκληρώνουμε τη σχέση (2.2) και αντικαθιστούμε το συνολικό αριθμό φορέων από την παραπάνω σχέση, για να καταλήξουμε στην εξίσωση του κέρδους που βλέπει ένας παλμός διαδιδόμενος στον ενισχυτή:

$$G(t) = \frac{P(L,t)}{P(0,t)} = \exp[\Gamma \cdot g \cdot N_{tot}(t) - a_D \cdot L] \quad (2.3)$$

Με βάση τα παραπάνω θα διερευνήσουμε τη μεταβολή του κέρδους του ενισχυτή σε τρεις ενδιαφέρουσες περιπτώσεις.

A. Κορεσμός του κέρδους του ενισχυτή από βραχύ οπτικό παλμό

Θα μελετήσουμε το βραχυχρόνιο κορεσμό του κέρδους του ενισχυτή, από βραχείς παλμούς εύρους μερικών picoseconds. Στην ανάλυσή μας αυτή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η μεταβολή της πυκνότητας των φορέων οφείλεται μόνο στην ενίσχυση του οπτικού σήματος, καθώς η αυθόρμητη επανασύνδεση των φορέων έχει μια σταθερά χρόνου τ_e της τάξεως των μερικών εκατοντάδων picoseconds. Συνεπώς μπορούμε να παραλείψουμε τους δύο πρώτους όρους της εξίσωσης (2.1). Ολοκληρώνοντας τη σχέση που προκύπτει έχουμε:

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

Η σχέση αυτή επιλύεται [10] και δίνει το κέρδος του ενισχυτή συναρτήσει του χρόνου:

$$G(t) = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{G_0}\right) \cdot \exp\left(-\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}}\right)} \quad (2.4)$$

όπου $U_{sat} = \frac{h\nu \cdot A}{\Gamma \cdot g \cdot \left(1 + \frac{a_D \cdot L}{\ln G_0}\right)}$ είναι η ενέργεια κορεσμού του SOA και

$U_{in}(t) = \int_0^t P_{in}(\tau) \cdot d\tau$ είναι η συσσωρευμένη ενέργεια του παλμού ως τη χρονική στιγμή t .

Από τη σχέση (2.4) συμπεραίνουμε ότι καθώς ο παλμός εισχωρεί στον SOA και αυξάνεται το U_{in} , το κέρδος του ενισχυτή μειώνεται πολύ γρήγορα. Όταν ολόκληρος ο παλμός βρίσκεται μέσα στον SOA το U_{in} παίρνει τη μέγιστη τιμή του και ο ενισχυτής κοραίνεται. Συνεπώς ο χρόνος κορεσμού του SOA είναι μερικά picoseconds.

Β Ανάκαμψη του κέρδους του ενισχυτή

Μετά τη διέλευση του στενού παλμού, ο ενισχυτής έχει κορεστεί όπως περιγράφηκε παραπάνω και το κέρδος του έχει πάρει μια τιμή έστω G_s . Στη συνέχεια το κέρδος ανακάμπτει, καθώς το μόνο που επιδρά τώρα στον SOA είναι το ρεύμα τροφοδοσίας I , το οποίο προκαλεί έγχυση φορέων στον ημιαγωγό. Θεωρούμε ότι δεν εισάγεται νέος παλμός στον ενισχυτή, άρα μπορούμε να παραλείψουμε τους δύο πρώτους όρους της σχέσης (2.1). Ολοκληρώνοντας ως προς z τη σχέση αυτή προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{d}{dt} N_{tot}(t) = \left(\frac{I}{e \cdot V} - \frac{N_T}{\tau_e} \right) \cdot L - \frac{N_{tot}(t)}{\tau_e}$$

Λύνοντας τη διαφορική αυτή εξίσωση προκύπτει η παρακάτω έκφραση για το κέρδος του ενισχυτή:

$$G(t) = G_0 \cdot \left[\frac{G_s}{G_0} \right]^{\exp\left(-\frac{t-t_s}{\tau_e}\right)} \quad (2.5)$$

όπου θεωρούμε ότι τη χρονική στιγμή $t = t_s$ ο ενισχυτής έχει κορεστεί στο ελάχιστο και από εκείνη τη στιγμή αρχίζει να ανακάμπτει το κέρδος του. Από τη σχέση (2.5) συμπεραίνουμε ότι η ανάκαμψη του κέρδους του ενισχυτή γίνεται με σταθερά χρόνου τ_e , τυπική τιμή της οποίας είναι λίγες εκατοντάδες picoseconds.

Γ Εφαρμογή CW σήματος στον ενισχυτή

Η εφαρμογή ενός σταθερού CW σήματος στον SOA έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέγιστου κέρδους που μπορεί να φτάσει ο ενισχυτής.

Η μεταβολή των φορέων του SOA δίνεται από τη σχέση (2.1), την οποία ξαναγράφουμε για διευκόλυνση:

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial t} = \frac{I}{e \cdot V} - \frac{N(z, t)}{\tau_e} - \frac{P(z, t) \cdot \Gamma \cdot g \cdot [N(z, t) - N_T]}{h\nu \cdot A}$$

Λύνοντας τη σχέση αυτή για τη μόνιμη κατάσταση και αγνοώντας τις απώλειες λόγω κυματοδότησης μέσα στον ενισχυτή, αποδεικνύεται [10] ότι το κέρδος στην περίπτωση αυτή παίρνει την τιμή:

$$G_{CW} = G_0 = \exp \left[\Gamma \cdot g \cdot \frac{(N_s - N_T) \cdot L}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}} \right]$$

Στη συνέχεια, θεωρούμε ότι μαζί με το CW εφαρμόζεται στον SOA και ένας βραχύς αλλά ισχυρός οπτικός παλμός. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως και πριν για τον κορεσμό του ενισχυτή, παρατηρούμε ότι το κέρδος του SOA αρχίζει να μειώνεται κατά τον ίδιο τρόπο, με αλλαγμένο όμως το G_0 , αφού και ο αριθμός των φορέων έχει μειωθεί. Η εξίσωση στην οποία καταλήγουμε είναι η εξής:

$$G(t) = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{G_{CW}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}}\right)} \quad (2.6)$$

Μετά τη διέλευση του παλμού ξεκινά η διαδικασία ανάκαμψης του κέρδους του ενισχυτή, παρά την ύπαρξη του CW. Η ανάκαμψη αρχίζει από την ελάχιστη τιμή $N_{tot}(0)$ που είναι ο αριθμός των φορέων αμέσως μετά το πέρασμα του παλμού. Η χρονική μεταβολή του N_{tot} δίνεται από τη διαφορική εξίσωση:

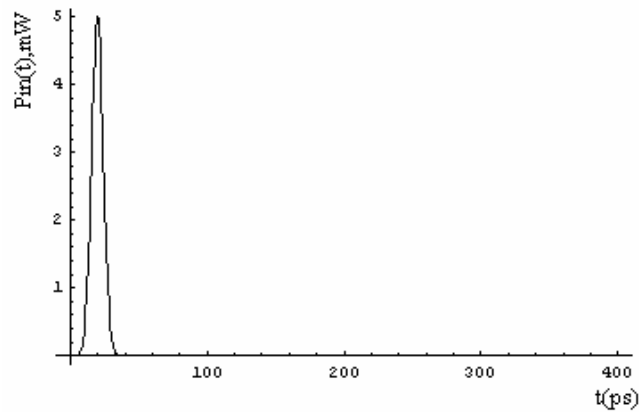
$$\frac{dN_{tot}}{dt} + \frac{N_{tot}}{\tau_e} + \frac{\Gamma \cdot g \cdot N_{tot} \cdot P_{in}}{A \cdot h\nu} - \frac{(N_s - N_T) \cdot L}{\tau_e} = 0$$

από την οποία με επίλυση μπορεί να προκύψει η ακόλουθη σχέση για το κέρδος του SOA στη διαδικασία της ανάκαμψης:

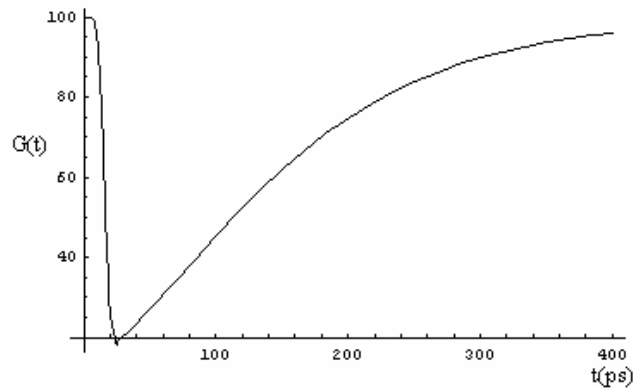
$$G(t) = G_0 \cdot \left[\frac{G_s}{G_0} \right]^{\exp\left(-\frac{t-t_s}{\tau_e / (1 + P_{in} / P_{sat})}\right)} \quad (2.7)$$

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή η σταθερά χρόνου είναι μικρότερη, με αποτέλεσμα ο ενισχυτής να φτάνει γρηγορότερα τη μέγιστη τιμή του κέρδους του G_{CW} . Συμπερασματικά, η εφαρμογή ενός CW σήματος στον SOA έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μεγίστου κέρδους του ενισχυτή, καθώς κατά κάποιον τρόπο τον κοραίνει σταθερά αντλώντας από αυτόν ενέργεια, και τη γρηγορότερη ανάκαμψη του κέρδους.

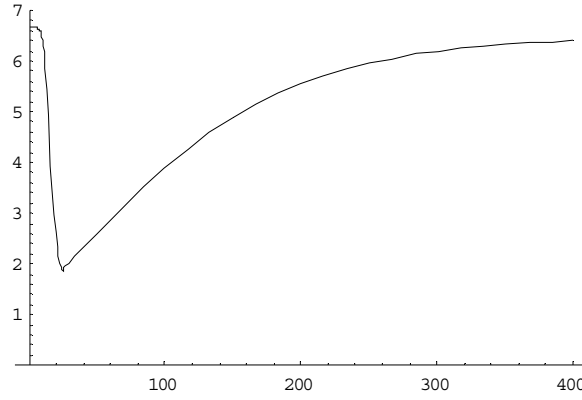
Στη συνέχεια παραθέτουμε ενδεικτικά την απόκριση κέρδους του ενισχυτή με ή χωρίς CW, για παλμό γκαουσιανής μορφής με εύρος 20 ps και ενέργεια $U_{in} = 50$ fJ. Οι σταθερές του SOA που χρησιμοποιήσαμε είναι $G_0 = 100$, $U_{sat} = 1000$ fJ και $\tau_e = 100$ ps. Οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν πιο συνοπτικά όσα αναφέρθηκαν παραπάνω:



Σχήμα 2.5: Παλμός εισόδου



Σχήμα 2.6: Κέρδος ενισχυτή χωρίς CW



Σχήμα 2.7: Κέρδος ενισχυτή με CW

Στις προηγούμενες παραγράφους περιγράψαμε πώς μεταβάλλεται το κέρδος του SOA όταν περνά μέσα από αυτόν ένας ισχυρός οπτικός παλμός. Στη διάταξη του UNI, το σήμα εισόδου είναι αρκετά ασθενές ώστε να μη μπορεί να διεγείρει το μη γραμμικό φαινόμενο. Αντίθετα, το σήμα ελέγχου είναι ισχυρό. Έτσι, η συνιστώσα του σήματος που είναι συγχρονισμένη με το σήμα ελέγχου διαδίδεται σε ένα περιβάλλον ισχυρά κορεσμένο, ενώ η ασυγχρόνιστη συνιστώσα διαδίδεται αφού ο ενισχυτής έχει προλάβει να ανακτήσει μερικώς το κέρδος του.

Η μεταβολή του κέρδους του ενισχυτή συνεπάγεται και τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης του ημιαγωγού, ο οποίος εξαρτάται από τη συγκέντρωση των φορέων στο εσωτερικό του. Αυτή η μεταβολή του δείκτη διάθλασης έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της φάσης του οπτικού σήματος, όπως υποδηλώνει η επόμενη σχέση:

$$\frac{\partial \phi(z, t)}{\partial z} = -\frac{1}{2} a_N \cdot \Gamma \cdot g \cdot [N(z, t) - N_0]$$

Ολοκληρώνοντας τα δύο άκρα ως προς z βρίσκουμε τη φάση του παλμού αφού περάσει από τον SOA:

$$\phi(z, t) - \phi_{in} = -\frac{a_N}{2} \ln G(t)$$

όπου ϕ_{in} είναι η αρχική φάση του παλμού πριν εισέλθει στον ενισχυτή και a_N σταθερά που ονομάζεται παράγοντας διεύρυνσης του εύρους γραμμής. Η σταθερά αυτή

εκφράζει το γεγονός ότι διακυμάνσεις της έντασης ενός σήματος (άρα και του κέρδους του ενισχυτή) προκαλούν διακυμάνσεις στο δείκτη διάθλασης στο εσωτερικό του SOA και με τον τρόπο αυτό εισάγεται κάποια στροφή φάσης. Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τα κέρδη G_1 και G_2 που αντιστοιχούν σε κάθε κατάσταση κορεσμού, καταλήγουμε στην εξίσωση (2.8) που δίνει τη διαφορά στην φάση για δύο διαφορετικές καταστάσεις κορεσμού του SOA:

$$\phi_1(z, t) - \phi_2(z, t) = -\frac{a_N}{2} \ln \frac{G_1(t)}{G_2(t)} \quad (2.8)$$

Από την τελευταία σχέση συμπεραίνουμε ότι η στροφή φάσης μπορεί να εισαχθεί με δύο τρόπους: Σύμφωνα με τον πρώτο προκαλούμε διαφορετικό κέρδος G_1 και G_2 μεταξύ των δύο οπτικών σημάτων, χρησιμοποιώντας σήμα ελέγχου και εισόδου στο ίδιο μήκος κύματος, κοντά στο μέγιστο της απολαβής του ενισχυτή. Επειδή η ισχύς του σήματος ελέγχου είναι μεγάλη, η συγχρονισμένη συνιστώσα του σήματος εισόδου βλέπει τον SOA κορεσμένο, άρα με μικρότερο κέρδος από ότι η ασυγχρόνιστη, οπότε εισάγεται η σχετική στροφή φάσης μεταξύ των συνιστωσών. Εξαιτίας όμως της διαφοράς στο κέρδος που βλέπουν οι δύο συνιστώσες, η έξοδος του διακόπτη παρουσιάζει ένα ποσοστό διαμόρφωσης που δεν είναι επιθυμητό. Το φαινόμενο που περιγράφηκε παραπάνω ονομάζεται ετεροδιαμόρφωση κέρδους (Cross Gain Modulation – XGM).

Ο δεύτερος τρόπος για να επιτύχουμε τη στροφή φάσης είναι να εκμεταλλευτούμε την εξάρτηση του παράγοντα διεύρυνσης από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας κορεσμού. Συγκεκριμένα, επιλέγουμε το μήκος κύματος του σήματος ελέγχου να βρίσκεται κοντά στο μέγιστο της απολαβής του ενισχυτή, ενώ το σήμα εισόδου λειτουργεί σε μήκος κύματος στις παρυφές της καμπύλης κέρδους του ενισχυτή. Έτσι, και οι δύο συνιστώσες βλέπουν σχεδόν το ίδιο κέρδος, αλλά μόνο η συγχρονισμένη διαδίδεται σε ισχυρά κορεσμένο περιβάλλον. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί την ετεροδιαμόρφωση φάσης και η λειτουργία του UNI με αυτόν τον τρόπο είναι επιθυμητή, αφού ελαχιστοποιείται η διαμόρφωση πλάτους στην έξοδο του διακόπτη.

Συμπερασματικά, δίνοντας κατάλληλες τιμές ισχύος στα σήματα ελέγχου και εισόδου του SOA και συγχρονίζοντας τις πολώσεις στον ημιαγωγό, μπορούμε να πετύχουμε την

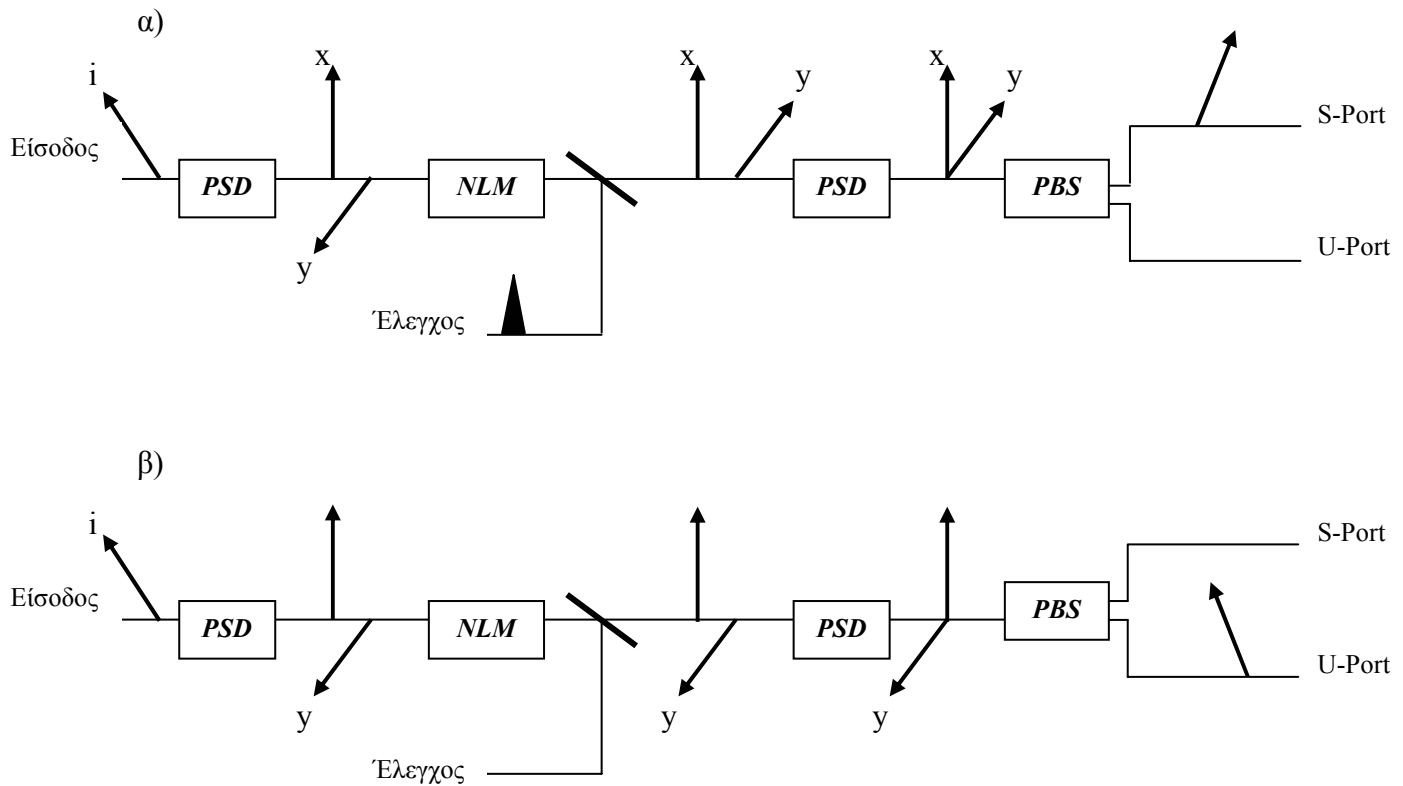
ιδανική στροφή φάσης 180° της συγχρονισμένης συνιστώσας του ασθενούς σήματος εισόδου.

2.4 Υλοποίηση οπτικών πυλών ΚΑΙ (AND) – Αποκλειστικού Ή (XOR)

Η προσπάθεια για όσο το δυνατόν αποδοτικότερη εκμετάλλευση του τεράστιου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας υποδεικνύει την ανάγκη για επεξεργασία του σήματος με αμιγώς οπτικό τρόπο και σε υπερυψηλές ταχύτητες. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν παρουσιαστεί αρκετές διατάξεις που εκμεταλλεύονται τη μη γραμμική δυναμική των οπτικών ενισχυτών ημιαγωγού [5,7,11]. Για την επεξεργασία σήματος σε υπερυψηλές ταχύτητες, είναι απαραίτητες δυαδικές λειτουργίες όπως η AND και η XOR με τις οποίες μπορούμε να συνθέσουμε αθροιστές [12], συγκριτές, κωδικοποιητές, κυκλώματα εξαγωγής επικεφαλίδας [13] και κυκλώματα κρυπτογράφησης. Στη συνέχεια περιγράφουμε την αρχή λειτουργίας οπτικών πυλών AND και XOR που βασίζονται στο UNI.

A. Αρχή λειτουργίας οπτικής πύλης AND

Μπορούμε να επιτελέσουμε λειτουργία λογικού ΚΑΙ (AND) μεταξύ δύο οπτικών σημάτων χρησιμοποιώντας τη διάταξη του UNI που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.1, όπου το ένα σήμα θα είναι η είσοδος του συμβολομέτρου και το άλλο θα έχει το ρόλο του σήματος ελέγχου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.8, το σήμα εισόδου στρέφει ή όχι την πόλωσή του κατά 90° ανάλογα με την παρουσία του ισχυρού σήματος ελέγχου. Έτσι, τοποθετώντας έναν πολωτικό διαχωριστή δέσμης (Polarization Beam Splitter – PBS) στην έξοδο της πύλης, θα πάρουμε στη μία έξοδο του διαχωριστή τους παλμούς που δεν έχουν στραφεί (unswitched port) και στην άλλη αυτούς που έχουν στραφεί (switched port). Παρατηρούμε ότι στο switched port εμφανίζεται το αποτέλεσμα της λογικής πράξης AND ενώ στο unswitched port παίρνουμε το αποτέλεσμα της NAND

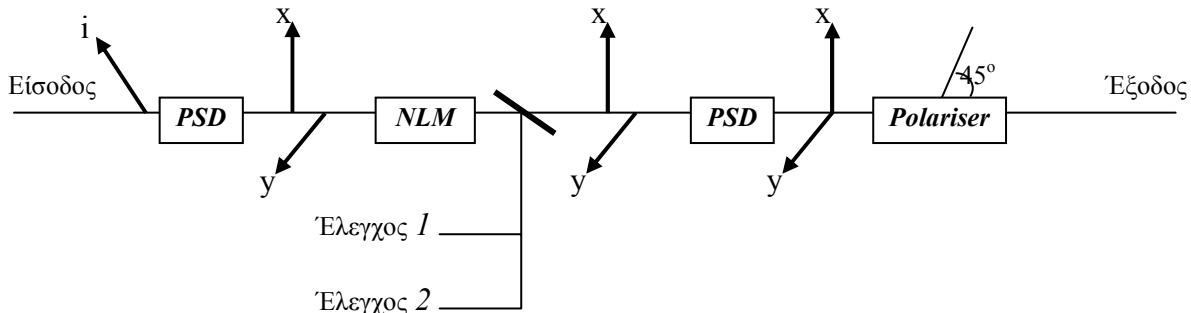


Σχήμα 2.8: Λειτουργία AND (α) και NAND (β)

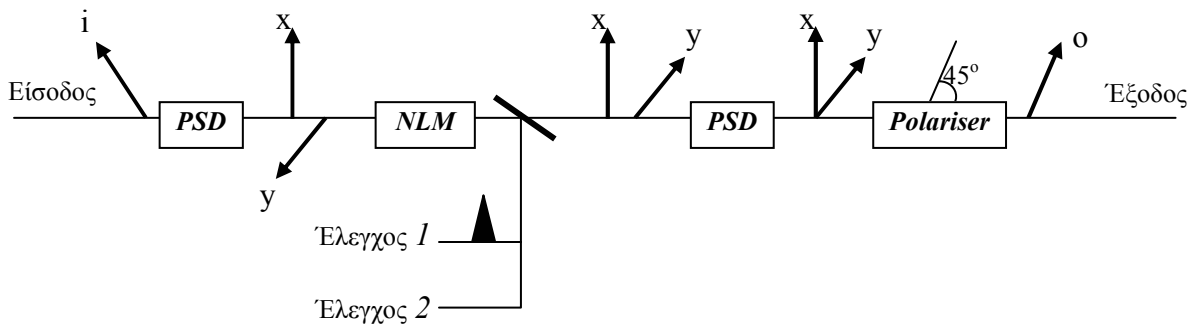
B. Αρχή λειτουργίας οπτικής πύλης XOR

Η λογική πράξη XOR, από τον ορισμό της, παράγεται με τη βοήθεια δύο πράξεων AND: $f(x, y) = x \oplus y = x \cdot \bar{y} + \bar{x} \cdot y$. Έτσι, για να επιτελέσουμε την πράξη αυτή με τη βοήθεια του UNI, απαιτείται η δυνατότητα στροφής φάσης όχι μόνο της μίας συνιστώσας του σήματος εισόδου, όπως στην AND, αλλά και των δύο. Για το λόγο αυτό εισάγουμε στο UNI μία ακολουθία λογικών '1', που στην ουσία αποτελεί το ρολόι του συστήματος, και τη διαμορφώνουμε ως προς τη φάση της με τη βοήθεια και των δύο Σημάτων Ελέγχου που εισάγονται στο Μη Γραμμικό Μέσο (SOA). Πιο συγκεκριμένα, αφού αναλύσουμε το σήμα εισόδου σε δύο κάθετες συνιστώσες που η μία προπορεύεται της άλλης χρονικά, συγχρονίζουμε το πρώτο Σήμα Ελέγχου με την προπορευόμενη συνιστώσα και το δεύτερο με την υστερούσα. Στη συνέχεια σε κάθε συνιστώσα επιβάλλεται ή όχι στροφή φάσης όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.3. Με τον τρόπο

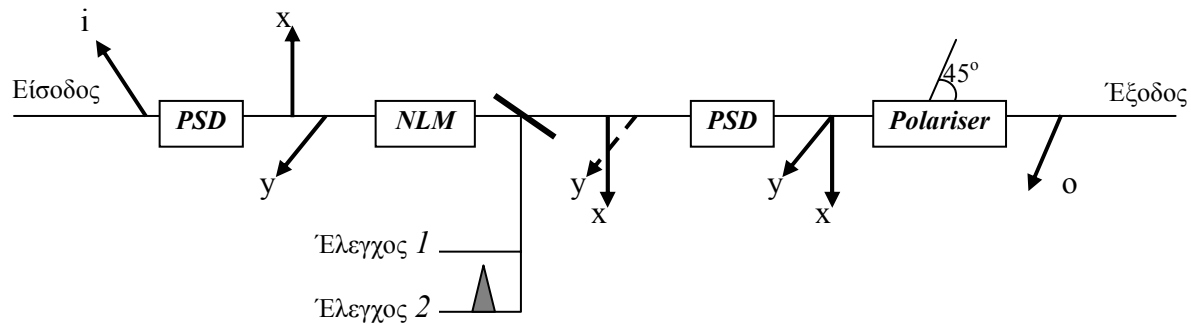
αυτό η κάθε συνιστώσα αντιμετωπίζει μία λειτουργία AND ξεχωριστά από την άλλη. Στο Σχήμα 2.9 αναλύεται η εξέλιξη των δύο πολώσεων για τις τέσσερις δυνατές καταστάσεις Σημάτων Ελέγχου.



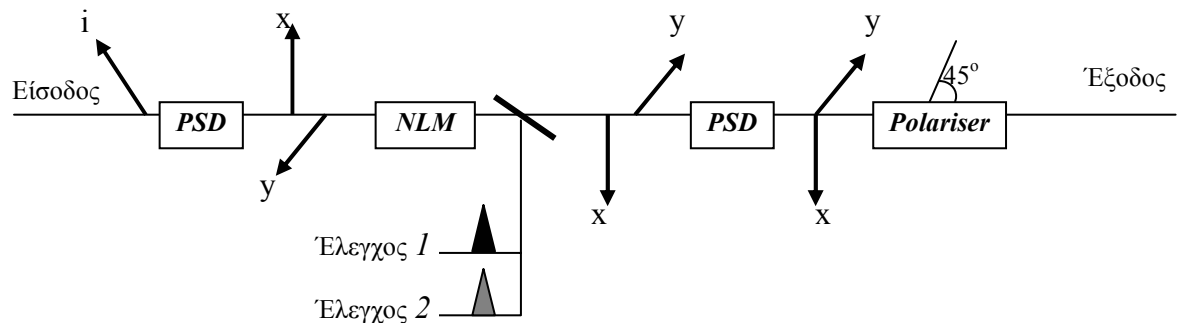
Σχήμα 2.9 (α): Εξέλιξη των πολώσεων απουσία σημάτων ελέγχου



Σχήμα 2.9 (β): Εξέλιξη των πολώσεων παρουσία Σήματος Ελέγχου 1



Σχήμα 2.9 (γ): Εξέλιξη των πολώσεων παρουσία Σήματος Ελέγχου 2



Σχήμα 2.9 (δ): Εξέλιξη των πολώσεων παρουσία Σημάτων Ελέγχου 1 και 2

Από το Σχήμα 2.9 παρατηρούμε ότι αν στραφεί μόνο η μία πόλωση του Σήματος Εισόδου, το σήμα στον πολωτή εξόδου είναι ευθυγραμμισμένο με τον άξονα διάδοσής του. Αντίθετα, αν δεν στραφεί καμία πόλωση ή αν στραφούν και οι δύο, το σήμα εξόδου εισέρχεται στον πολωτή κάθετα στον άξονά του, με αποτέλεσμα την απόρριψη του σήματος. Τα παραπάνω φαίνονται πιο παραστατικά στον Πίνακα I.

Σήμα Ελέγχου 1	Σήμα Ελέγχου 2	Έξοδος Πύλης
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Πίνακας I: Ο πίνακας αληθείας της λογικής συνάρτησης XOR

Με την παραπάνω διάταξη είναι δυνατόν να παράγουμε και το συμπλήρωμα της πύλης XOR, απλά στρέφοντας τον άξονα του πολωτή κατά 90° . Εναλλακτικά, μπορούμε αντί για πολωτή να χρησιμοποιήσουμε διαχωριστή πόλωσης (PBS), οπότε στη μία θύρα του θα πάρουμε το αποτέλεσμα της XOR ενώ στην άλλη το συμπλήρωμά της.

Πειραματικές διατάξεις που βασίζονται στις αρχές λειτουργίας που περιγράψαμε παραπάνω έχουν υλοποιηθεί [5,7] στο πρόσφατο παρελθόν. Ακόμα περισσότερο, έχουν χρησιμοποιηθεί σε πιο σύνθετα κυκλώματα [13] με πολύ καλά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί πολύ ευοίωνες προβλέψεις για το μέλλον της οπτικής επεξεργασίας σήματος και των αμιγώς οπτικών δικτύων τρίτης γενιάς.

2.5 Κύκλωμα οπτικής ανάκτησης ρολογιού από πακέτο πληροφορίας

2.5.0 Εισαγωγή

Μία πολύ σημαντική λειτουργία που επίσης μπορεί να επιτελεστεί στο οπτικό επίπεδο, είναι η ανάκτηση του ρολογιού του συστήματος (clock recovery). Το ρολόι είναι ουσιαστικά η συχνότητα λειτουργίας μίας ψηφιακής επικοινωνίας και η ανάκτησή του είναι απαραίτητη για το συγχρονισμό των ψηφιακών κυκλωμάτων, για τη λειτουργία στοιχείων όπως τα flip-flops, καθώς και για συνθετότερες λειτουργίες, όπως η δρομολόγηση πακέτων σε έναν κόμβο δικτύου.

Το ρολόι μιας επικοινωνίας περιέχεται σαν πληροφορία στο σήμα που στέλνεται από τον πομπό. Τα δεδομένα που αποστέλλονται αποτελούνται από μια ακολουθία λογικών '1' και '0', τα οποία απέχουν χρονικά μεταξύ τους κατά την περίοδο του ρολογιού. Έτσι, για συστήματα που χρησιμοποιούν την RZ (Return to Zero) κωδικοποίηση ψηφίων, η ανάκτηση του ρολογιού συνίσταται στη μετατροπή των '0' σε '1'.

Γενικά, ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού χρειάζεται ένα καθορισμένο χρόνο για να συγχρονιστεί με την ακολουθία των δεδομένων (rise time). Αυτό σημαίνει ότι τα πρώτα bits κάθε πακέτου που εκπέμπεται δε μπορούν να περιέχουν πληροφορία, αλλά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για το συγχρονισμό του κυκλώματος. Επίσης, το ρολόι που παράγεται από ένα τέτοιο κύκλωμα έχει κάποιο χρόνο ζωής (lifetime), που συνίσταται στο χρονικό διάστημα που το κύκλωμα παραμένει 'κλειδωμένο' μετά το πέρας του πακέτου. Έτσι, προκειμένου να διαχειριστούμε ασύγχρονη κίνηση, είμαστε υποχρεωμένοι να διατηρούμε ανάμεσα στα πακέτα χρονικά διαστήματα απραξίας ίσα με αυτό το χρόνο ζωής. Αποτέλεσμα είναι η σπατάλη εύρους ζώνης, που γίνεται αρκετά υπολογίσιμη όσο πιο μικρά πακέτα χρησιμοποιούνται, οπότε ο λόγος guardbands/δεδομένα μεγαλώνει. Από τα παραπάνω προκύπτουν οι απαιτήσεις από ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού: γρήγορος συγχρονισμός και μικρός χρόνος ζωής. Ιδανικά, το ρολόι θα πρέπει να έχει το μέγεθος του πακέτου που το παρήγαγε.

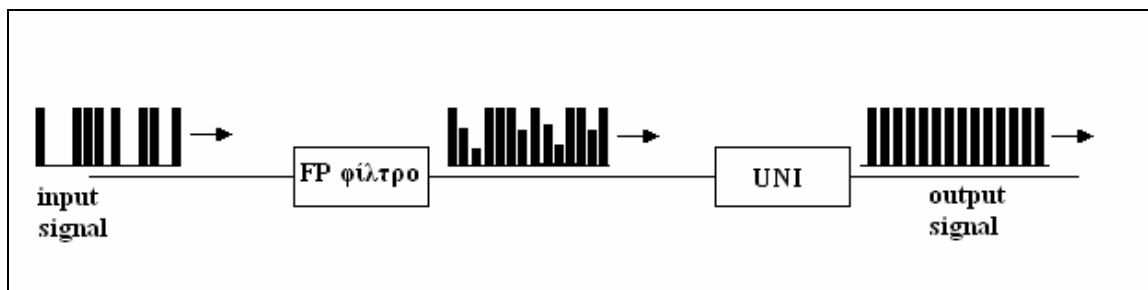
Στην οπτική τεχνολογία έχουν εφαρμοστεί πολλές τεχνικές για την ανάκτηση ρολογιού. Πολλές από αυτές χρησιμοποιούσαν και ηλεκτρονικά μέσα, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα, καθώς η περιορισμένη ταχύτητά τους δεν επιτρέπει την πλήρη

εκμετάλλευση του τεράστιου εύρους ζώνης των οπτικών διατάξεων. Τέτοιες τεχνικές είναι τα συγχρονισμένα lasers δακτυλίου [14], οι ηλεκτρονικοί βρόχοι κλειδώματος φάσης [15] και τα αυτο-παλλόμενα DFB lasers [16]. Αυτές απαιτούν μεγάλα χρονικά περιθώρια μεταξύ των πακέτων, οπότε δεν είναι κατάλληλες για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ή μικρό μήκος πακέτων. Αντίθετα, ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού που πετυχαίνει μικρό χρόνο ανύψωσης και παράγει ρολόι στο μήκος περίπου του οπτικού πακέτου, μπορεί να υλοποιηθεί με συνδυασμό ενός φίλτρου Fabry-Perot και ενός Μη Γραμμικού Συμβολομέτρου Υπερυψηλών Ταχυτήτων (UNI) [10,17]. Το κύκλωμα αυτό θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

2.5.1 Αρχή Λειτουργίας του Κυκλώματος Ανάκτησης Ρολογιού

Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού που θα μελετήσουμε λειτουργεί αποκλειστικά στο οπτικό επίπεδο, ώστε να μπορεί να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες των οπτικών μέσων και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα μελλοντικά δίκτυα τρίτης γενιάς. Βασικό πλεονεκτήματά του είναι ότι παράγει ρολόι μήκους περίπου ίσου με το μήκος του οπτικού πακέτου, οπότε μας δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας σημάτων και εφαρμογής πράξεων μέσα στο πακέτο, προκειμένου να αναγνωρίσουμε ή και να αντικαταστήσουμε την επικεφαλίδα του. Επίσης το κύκλωμα αυτό πετυχαίνει συγχρονισμό ρολογιού με σταθερό αριθμό bits, ο οποίος είναι και ιδιαίτερα μικρός. Το γεγονός αυτό αποτελεί ιδιαίτερο προσόν απέναντι σε κυκλώματα που απαιτούν σταθερό χρόνο “κλειδώματος”, καθώς όσο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης τόσο ο χρόνος αυτός μεταφράζεται σε περισσότερα bits που σπαταλώνται.

Τα βασικά στοιχεία της διάταξης ανάκτησης ρολογιού είναι το φίλτρο Fabry-Perot και το Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλών Ταχυτήτων (UNI). Η λειτουργία του καθενός θα αναλυθεί διεξοδικά στις επόμενες παραγράφους. Εδώ θα αναφερθεί απλά ο ρόλος τους στο κύκλωμα, όπως παρουσιάζεται παραστατικά στο Σχήμα 2.10 .



Σχήμα 2.10: Λειτουργία του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού

Το φίλτρο Fabry-Perot είναι ένα παθητικό στοιχείο με το χαρακτηριστικό ότι η απόκρισή του στο χρόνο είναι περιοδική παλμοσειρά, το πλάτος της οποίας είναι φθίνουσα εκθετική συνάρτηση. Επιλέγοντας κατάλληλα τις παραμέτρους του φίλτρου προσαρμόζουμε την περίοδο της παλμοσειράς ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης. Σαν αποτέλεσμα, αν ένα RZ σήμα δεδομένων εισέλθει στο φίλτρο, τότε στη θέση των μηδενικών της ακολουθίας δεδομένων θα δημιουργηθούν άσσοι. Το σήμα που θα προκύψει θα είναι μία ακολουθία από άσσους στο ρυθμό μετάδοσης, η οποία όμως θα παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στο πλάτος.

Το ανομοιόμορφο αυτό σήμα εισέρχεται στο UNI, το οποίο όπως έχει αναφερθεί αποτελεί έναν οπτικό διακόπτη με μη γραμμική συμπεριφορά. Αυτή τη μη γραμμικότητα εκμεταλλευόμαστε ώστε να εξομαλύνουμε την έξοδο του Fabry-Perot. Εφαρμόζοντας ένα CW στο Μη Γραμμικό Μέσο (SOA) του UNI, φροντίζουμε ώστε ακόμα και οι ασθενείς παλμοί να κοραίνουν τον ενισχυτή και να πετυχαίνουν στροφή φάσης 180° . Σαν αποτέλεσμα πετυχαίνουμε να ‘γράψουμε’ το ανομοιόμορφο σήμα πάνω στο CW, παίρνοντας στην έξοδο ένα ρολόι με σχεδόν ισοϋψή πλάτη, μεγέθους περίπου ίσου με το αρχικό οπτικό πακέτο.

2.5.2 Συμβολόμετρο Fabry-Perot

Εισαγωγή

Το συμβολόμετρο Fabry-Perot (FPI: Fabry-Perot Interferometer) ή πρότυπο, αποτελείται από μία συντονισμένη κοιλότητα που σχηματίζεται από δύο παράλληλα κάτοπτρα. Το φως εισέρχεται από μία ίνα εισόδου και αφού γίνει κάθετο στα κάτοπτρα με τη βοήθεια κατάλληλου φακού, περνά μέσα από την κοιλότητα και τέλος εστιάζεται ξανά με άλλον ένα φακό στο άκρο της ίνας εξόδου. Η λειτουργία του FPI βασίζεται στη συμβολή με διαίρεση πλάτους. Στη συνέχεια θα μας απασχολήσουν μόνο τα φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στην κοιλότητα και θα παραλείψουμε τις ίνες εισόδου και εξόδου καθώς και τους φακούς και τις απώλειες που εισάγουν στο σήμα.

Στο *Σχήμα 2.11* βλέπουμε τη μορφή ενός συμβολομέτρου Fabry-Perot. Στην πράξη, για να μην παρουσιάζονται ανεπιθύμητοι συντονισμοί από ανακλάσεις μεταξύ των δύο εξωτερικών πλευρών των κατόπτρων, οι εξωτερικές τους επιφάνειες βρίσκονται υπό ελαφριά κλίση και συχνά φέρουν αντανakλαστική επίστρωση. Ωστόσο, οι εσωτερικές επιφάνειες των κατόπτρων βρίσκονται σε πλήρη παραλληλισμό.

Το εισερχόμενο φως ανακλάται πολλαπλά μέσα στην κοιλότητα και αν το μήκος L της κοιλότητας είναι ακριβώς:

$$L = \frac{i\lambda}{2n} = \frac{ic}{2nf} \quad (2.9)$$

(όπου n ο δείκτης διάθλασης μέσα στην κοιλότητα και i η τάξη συντονισμού), τότε πριν η φωτεινή ένταση εξασθενίσει στο $1/e$ της αρχικής της τιμής, το φως εκτελεί έναν αριθμό διαδοχικών ανακλάσεων μέσα στην κοιλότητα, ανάλογο προς μία ποσότητα που ονομάζεται λεπτότητα (finesse). Όλο σχεδόν το φως περνάει στην έξοδο. Αντίθετα, αν το μήκος της κοιλότητας αποκλίνει από την παραπάνω τιμή, η συμβολή δεν είναι εντελώς θετική, οπότε η ισχύς εξόδου περιορίζεται.

Λειτουργία και χαρακτηριστικά

Υποθέτουμε ότι ο συντελεστής απωλειών λόγω απορρόφησης κατά τη διέλευση του φωτός μέσα από κάθε κάτοπτρο είναι A και έστω R η ανακλαστικότητα ισχύος του κάθε κατόπτρου. Αν το προσπίπτον πεδίο στο συμβολόμετρο είναι:

$$\vec{E}_{in} = E_{in} e^{-j\alpha x}$$

τότε περνώντας από το πρώτο κάτοπτρο, το διαδιδόμενο πεδίο γίνεται

$$E = \sqrt{1 - R - A} E_{in} e^{-j\alpha x}$$

Στο δεύτερο κάτοπτρο, το φως έχει διανύσει απόσταση L , οπότε το διαδιδόμενο πεδίο θα έχει την τιμή:

$$E_{1T} = (1 - R - A) E_{in} e^{-j\alpha x} e^{-j\beta L}$$

(όπου β η σταθερά διάδοσης) ενώ αυτό που ανακλάται προς τα πίσω θα ισούται με:

$$E_{1R} = \sqrt{R} \sqrt{1 - R - A} E_{in} e^{-j\alpha x} e^{-j\beta L}$$

Το πεδίο αυτό αφού διανύσει απόσταση L θα ανακλαστεί και πάλι στο πρώτο κάτοπτρο και μετά από ακόμα L θα διαδοθεί μέσα από το δεύτερο κάτοπτρο, παίρνοντας την τιμή:

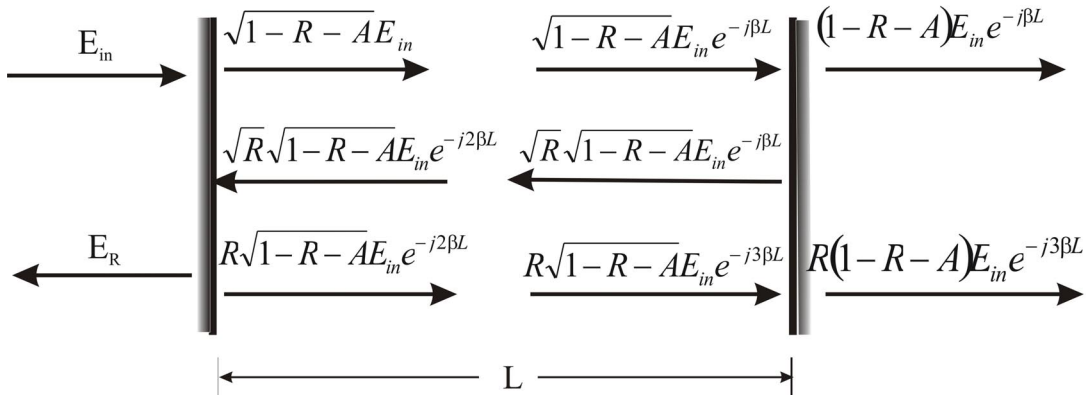
$$E_{2T} = R(1 - R - A) E_{in} e^{-j\alpha x} e^{-3j\beta L} = R \cdot e^{-2j\beta L} E_{1T}$$

Κατά τον ίδιο τρόπο καταλήγουμε ότι:

$$E_{NT} = (R \cdot e^{-2j\beta L})^N \cdot E_{1T}$$

δηλαδή το πεδίο φθίνει εκθετικά με τον αριθμό των ανακλάσεων που έχει υποστεί.

Οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου και ο μηχανισμός των ανακλάσεων φαίνονται στο *Σχήμα 2.11*.



Σχήμα 2.11: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου των διαδοχικών ανακλάσεων

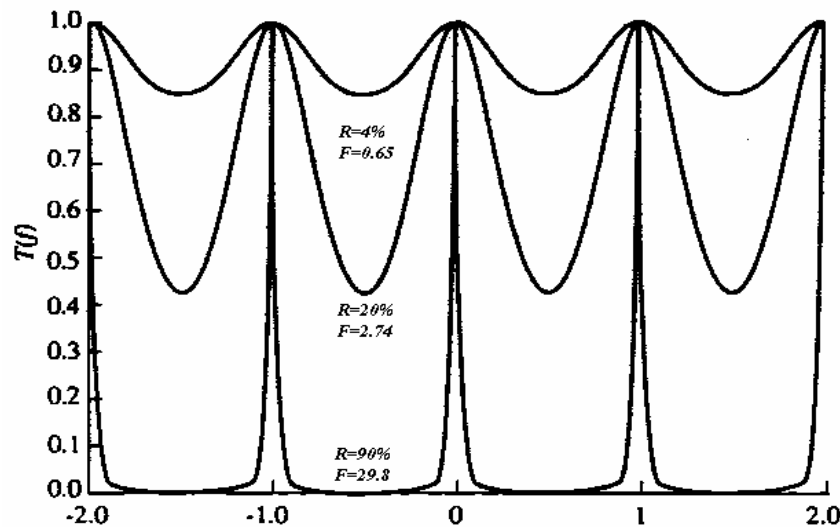
Προσθέτοντας όλες τις συνεισφορές στην ένταση εξόδου και χρησιμοποιώντας τη σχέση $\beta x = 2\pi f\tau$ καταλήγουμε στη μιγαδική συνάρτηση μεταφοράς της έντασης του πεδίου:

$$H(f) = \frac{E_o(f)}{E_i(f)} = (1 - A - R) \cdot e^{-j2\pi f\tau} \sum_{m=0}^{\infty} R^m \cdot e^{-j4\pi m f\tau} = \frac{1 - A - R}{1 - R \cdot e^{-j4\pi f\tau}} \cdot e^{-j2\pi f\tau} \quad (2.10)$$

Επομένως η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος $T(f) = H^2(f)$ θα είναι:

$$T(f) = \left(1 - \frac{A}{1 - R}\right)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1 - R} \cdot \sin \frac{4\pi f\tau}{2}\right)^2\right]^{-1} \quad (2.11)$$

και η γραφική της παράσταση φαίνεται στο Σχήμα 2.12 .



Σχήμα 2.12: Η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος (ή συνάρτηση του Airy) για απλά 'πρότυπα' συμβολόμετρα (etalon) με διαφορετική λεπτότητα

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι έχουμε ενισχυτική συμβολή για συχνότητες $f = \frac{m \cdot c}{2nL}$, $m = 1, 2, 3, \dots$ η οποία προσδίδει στο συμβολόμετρο Fabry-Perot συμπεριφορά φίλτρου που επιτρέπει την προσπέλαση μόνο επιλεγμένων συχνοτήτων. Η περιοδικότητα με την οποία επαναλαμβάνεται η ενισχυτική συμβολή ονομάζεται 'Ελεύθερη Φασματική

Περιοχή (Free Spectral Range – FSR), αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος του φίλτρου Fabry-Perot και δίνεται από τη σχέση:

$$FSR = \frac{c}{2nL}$$

εξαρτάται δηλαδή από το μήκος L της κοιλότητας.

Σε ένα δίκτυο με διαίρεση συχνότητας μέσα στην ελεύθερη φασματική περιοχή τοποθετούνται N ισαπέχοντα κανάλια. Το εύρος ημίσειας ισχύος της κάθε κορυφής (Full Width at Half Maximum – FWHM) δίνεται από τον τύπο:

$$FWHM = \frac{c}{2nL} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}$$

Η πιο σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει ένα φίλτρο Fabry-Perot είναι η ‘λεπτότητα’ F (Finesse). Η λεπτότητα είναι ίση με το πηλίκο της FSR προς το FWHM και εκφράζει την οξύτητα του φίλτρου ως προς την περίοδο επανάληψης, επομένως συνδέεται στενά με το μέγιστο αριθμό καναλιών που μπορούν να υποστηριχθούν.

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.12 το εύρος ημίσειας ισχύος της κάθε κορυφής μικραίνει όσο αυξάνεται η ανακλαστικότητα, άρα και το Finesse. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη διακριτική ευχέρεια για το φίλτρο καθώς συμπιέζονται οι πλευρικοί λοβοί και είναι γενικά επιθυμητό.

Το φίλτρο Fabry-Perot στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού

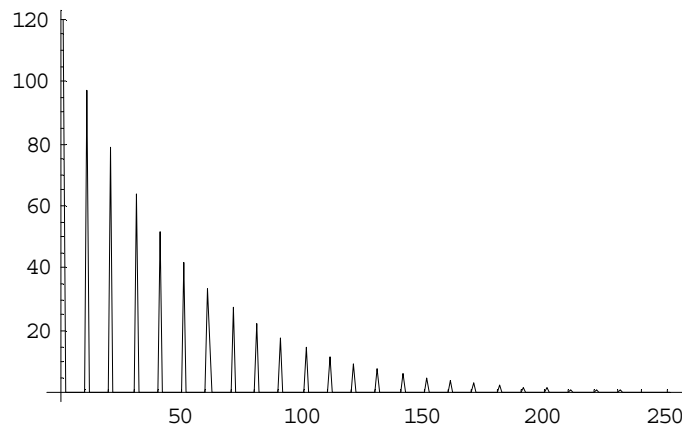
Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού όπως περιγράφηκε παραπάνω, σκοπός του Fabry-Perot είναι η δημιουργία λογικών ‘1’ στη θέση των μηδενικών της αρχικής ακολουθίας των δεδομένων. Ο τρόπος που το επιτυγχάνει προκύπτει αν αναλύσουμε τη λειτουργία του συμβολομέτρου στο πεδίο του χρόνου.

Όταν ένας παλμός εισέλθει στο φίλτρο, ένα μεγάλο μέρος της ισχύος του εμφανίζεται στην έξοδο. Η υπόλοιπη όμως ισχύς εγκλωβίζεται ανάμεσα στα κάτοπτρα και, έχοντας

υποστεί διαδοχικές ανακλάσεις κατά τον ίδιο τρόπο, διαπερνά τελικά την κοιλότητα σχηματίζοντας δευτερογενείς παλμούς. Η χρονική διαφορά ανάμεσα στους παλμούς αυτούς ισούται με το χρόνο που χρειάζεται το φως για να διανύσει δύο φορές την απόσταση ανάμεσα στα δύο κάτοπτρα, δηλαδή $t = \frac{2nL}{c}$ ή στο πεδίο της συχνότητας

$f = \frac{c}{2nL}$. Παρατηρούμε ότι η έκφραση αυτή ισούται με τη τιμή της ελεύθερης φασματικής περιοχής (FSR). Συνεπώς, αν θέλουμε να ανακτήσουμε ένα ρολόι με συγκεκριμένη συχνότητα, επιλέγουμε ένα φίλτρο Fabry-Perot με την κατάλληλη τιμή FSR, ή ισοδύναμα με το αντίστοιχο μήκος της κοιλότητας.

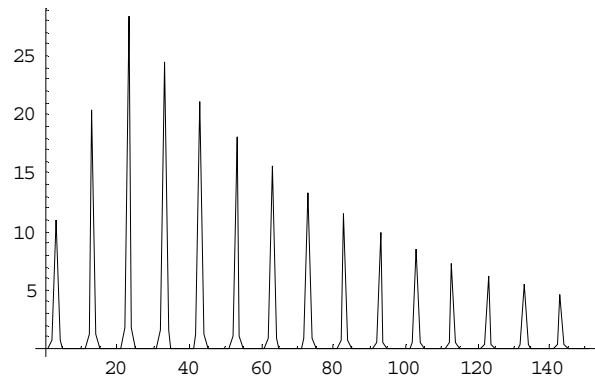
Είδαμε λοιπόν ότι αν κάποια χρονική στιγμή εισέλθει ένας παλμός στο συμβολόμετρο και δεν ακολουθήσει άλλος, θα πάρουμε στην έξοδο μία ακολουθία παλμών που τα πλάτη τους θα φθίνουν εκθετικά, όπως βλέπουμε στο *Σχήμα 2.13*. Ο χρόνος μέχρι να μηδενιστούν οι δευτερογενείς παλμοί καθορίζεται από την τιμή της λεπτότητας (Finesse) του φίλτρου, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ανακλαστικότητα των κατόπτρων. Τα πλάτη φθίνουν στην έξοδο γιατί κάθε παλμός αποτελείται από ένα ποσοστό της ισχύος που βρίσκεται εγκλωβισμένη στην κοιλότητα, η οποία και μειώνεται διαρκώς.



Σχήμα 2.13: Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο ενός παλμού

Στην περίπτωση που έχουμε περισσότερους από έναν παλμό, η έξοδος του φίλτρου θα προκύπτει από την επαλληλία των εξόδων του κάθε παλμού χωριστά, χρονικά

μετατοπισμένες μεταξύ τους. Σαν παράδειγμα παρουσιάζουμε την έξοδο του φίλτρου αν στην είσοδο έχουμε τρεις διαδοχικούς παλμούς.



Σχήμα 2.14: Έξοδος του Fabry-Perot στο πεδίο του χρόνου για είσοδο τριών διαδοχικών παλμών

Παρατηρούμε ότι το αποτέλεσμα που παίρνουμε από το φίλτρο Fabry-Perot είναι μεν το ζητούμενο ρολόι, αλλά παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στα πλάτη των παλμών. Εκ πρώτης όψεως το πρόβλημα δείχνει να βελτιώνεται αν επιλέξουμε μεγάλη τιμή ανακλαστικότητας για τα κάτοπτρα. Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνουμε πολύ πιο αργή μεταβολή στο πλάτος των παλμών, αλλά μεγαλώνει η ‘ουρά’ μετά το πέρας του πακέτου. Έτσι στην πράξη αυτό που τελικά επιδιώκουμε είναι μία ισορροπία ανάμεσα στα δύο αυτά αντικρουόμενα χαρακτηριστικά, ώστε και να περιορίσουμε την ‘ουρά’ και η διακύμανση του πλάτους να είναι εντός των ορίων ανοχής της επόμενης βαθμίδας (UNI), για να μπορεί να λειτουργήσει κι αυτή ικανοποιητικά.

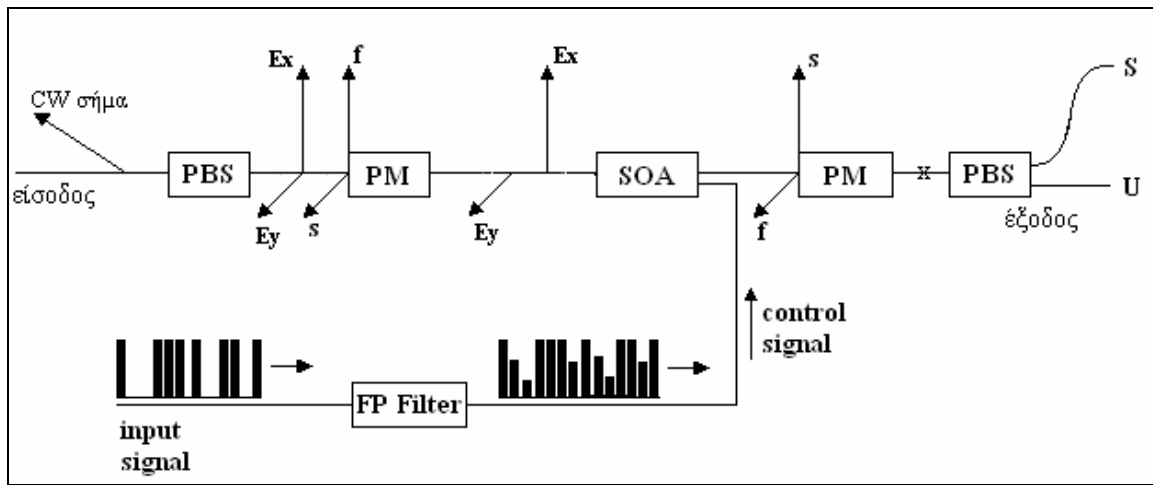
2.5.3 Το UNI στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού

Εισαγωγή

Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.1 όπου και παρουσιάστηκε, το Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλών Ταχυτήτων υλοποιεί έναν οπτικό κύκλωμα με πολλές δυνατές εφαρμογές. Στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, το UNI δεν χρησιμοποιείται σαν λογική πύλη αλλά έχει το ρόλο ενός ιδιόμορφου οπτικού διακόπτη. Σκοπός της ύπαρξής

του είναι η μετατροπή των έντονα ασύμμετρων στο πλάτος παλμών που παράγει το Fabry-Perot σε όσο το δυνατόν πιο ισοϋψείς, ώστε να παραχθεί τελικά το επιθυμητό ρολόι.

Το κλειδί στη λειτουργία του UNI είναι και εδώ τα μη γραμμικά φαινόμενα που χαρακτηρίζουν το δομικό του στοιχείο, τον SOA, καθώς και η προσεκτική επιλογή των σημάτων που αλληλεπιδρούν. Πιο συγκεκριμένα, σαν σήμα εισόδου χρησιμοποιούμε ένα σήμα σταθερής ισχύος (Continuous Wave – CW) ενώ σαν σήμα ελέγχου εισάγουμε την έξοδο του φίλτρου Fabry-Perot. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο *Σχήμα 2.15*.



Σχήμα 2.15: Διάταξη του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού

Η αρχή λειτουργίας του κυκλώματος αυτού είναι το ‘γράψιμο’ του ρολογιού πάνω στο CW. Ουσιαστικά επιθυμούμε όταν δεν υπάρχει σήμα ελέγχου το CW να εμφανίζεται στο unswitched port, ενώ ακόμα και οι πιο αδύναμοι παλμοί να μπορούν να το μετάγουν στο switched port.

Μαθηματική Ανάλυση

Στην παράγραφο 2.2 υπολογίσαμε τις εξισώσεις ισχύος για τις δύο εξόδους της πύλης. Για πρακτικούς λόγους τις παραθέτουμε και πάλι:

$$\text{Ισχύς στη θύρα S: } P_S = \frac{1}{4} E_{in}^2 \left[(G_x - G_y)^2 + 4G_x G_y \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \right] \quad (2.12)$$

$$\text{Ισχύς στη θύρα U: } P_U = \frac{1}{4} E_{in}^2 \left[(G_x - G_y)^2 + 4G_x G_y \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \right] \quad (2.13)$$

όπου G_x , G_y είναι το κέρδος που βλέπει η κάθε συνιστώσα. Υποθέτουμε ότι η εξάρτηση του κέρδους του ενισχυτή από την ισχύ είναι ίδια και για τις δύο πολώσεις, δηλαδή $G_{0x} = G_{0y}$. Το σήμα ελέγχου είναι συγχρονισμένο με τη μία συνιστώσα, έστω την y . Τότε θα υπάρχει μεταβολή μόνο στο κέρδος της συγχρονισμένης συνιστώσας, ενώ εκείνο της ασυγχρόνιστης θα παραμένει σταθερό: $G_x = G_{0x}$

Όπως δείξαμε στην παράγραφο 2.3(γ), η ύπαρξη διαφορετικών τιμών κέρδους σε κάθε άξονα έχει σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή μίας διαφοράς φάσης ανάμεσα στις δύο συνιστώσες. Η τιμή της έχει υπολογιστεί και δίνεται από τον τύπο 2.8, που επαναλαμβάνεται για ευκολία:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{a_N}{2} \ln \frac{G_x}{G_y(t)} \quad (2.14)$$

Όταν δεν εισέρχεται στον SOA σήμα ελέγχου, τότε το κέρδος της y συνιστώσας δε μεταβάλλεται και παραμένει ίσο με της x . Συνεπώς, από την προηγούμενη σχέση η διαφορά φάσης είναι μηδέν, ενώ από τη (2.12) και η ισχύς στη θύρα S μηδενίζεται.

Όταν εισέρχεται παλμός στον SOA, τότε το κέρδος στην y συνιστώσα μειώνεται μέχρι να φτάσει σε μία ελάχιστη τιμή G_{ymin} . Από τη (2.14), αυτή η μεταβολή του κέρδους οδηγεί σε μία αύξηση της διαφοράς φάσης, οπότε αυξάνει με τη σειρά της και η ισχύς στη θύρα S από την (2.12).

Αποδείξαμε λοιπόν μέχρι στιγμής ότι όταν υπάρχει παλμός στο σήμα ελέγχου τότε εμφανίζεται παλμός και στην έξοδο. Αυτό που μας ενδιαφέρει όμως είναι να έχουν όλοι οι παλμοί της εξόδου σταθερό πλάτος, άρα και σταθερή τη μέγιστη ισχύ τους. Από τη σχέση (2.12) προκύπτει ότι για να συμβαίνει αυτό πρέπει όλοι οι παλμοί να δίνουν διαφορά φάσης 180° , οπότε ο λόγος των κερδών τους θα πρέπει να είναι:

$$\frac{G_x}{G_{ymin}} = e^{-\frac{2\pi}{a_N}} \quad (2.15)$$

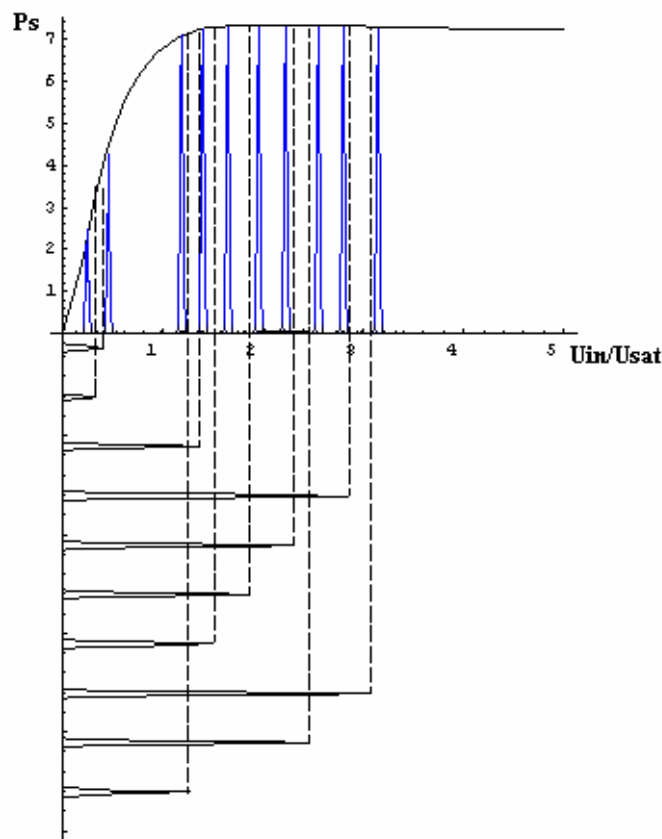
Το G_x , όπως είπαμε παραπάνω, παραμένει σταθερό. Το G_{ymin} μεταβάλλεται από παλμό σε παλμό ανάλογα με τη μέγιστη ισχύ στο σήμα ελέγχου. Έτσι ισχυρότεροι παλμοί κοραίνουν περισσότερο τον ενισχυτή, με αποτέλεσμα μικρότερο G_{ymin} . Για να επιτύχουμε σταθερό λόγο κερδών $\frac{G_x}{G_{ymin}}$ πρέπει με κάποιον τρόπο να εξομαλύνουμε τις τιμές που παίρνει το G_{ymin} .

Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει το κέρδος του ενισχυτή είναι η μονάδα. Πρόκειται για το σημείο διαφάνειας του ενισχυτή. Έτσι, αν ρυθμίσουμε κατάλληλα τον SOA ώστε οι ασθενείς παλμοί να μπορούν να τον κορέσουν κοντά στη μονάδα, τότε και οι ισχυρότεροι παλμοί δεν θα μπορούν να τον κορέσουν περισσότερο. Συνεπώς τελικά θα έχουμε για κάθε παλμό $G_{ymin} \approx 1$.

Ο τρόπος με τον οποίο πετυχαίνουμε βαθύ κορεσμό του ενισχυτή από όλους τους παλμούς συνίσταται στη ρύθμιση του αρχικού κέρδους G_0 χαμηλά, ώστε ακόμα και ασθενείς παλμοί να μπορούν να τον κορέσουν αρκετά και να φτάσουν το κέρδος του κοντά στη μονάδα. Στην παράγραφο 2.3(γ) περιγράψαμε τη μέθοδο με την οποία μπορούμε να μειώσουμε το μέγιστο κέρδος του ενισχυτή στη μόνιμη κατάσταση, εφαρμόζοντας ένα κατάλληλο CW σήμα. Από τη σχέση (2.15) για $G_{ymin} \approx 1$ βρίσκουμε

$$\text{ότι } G_{0x} = G_{0y} = G_0 = e^{\frac{2\pi}{a_N}}.$$

Στη συνέχεια παραθέτουμε τη χαρακτηριστική εξόδου του UNI ως προς την ισχύ του Σήματος Ελέγχου. Θεωρήσαμε ότι $a_N=6$, οπότε $G_0 = e^{-\pi/3}$. Η μη γραμμικότητα στη συμπεριφορά του SOA είναι φανερή. Από μία τιμή – κατώφλι της ισχύος εισόδου και έπειτα, η ισχύς εξόδου σταθεροποιείται σε μια στάθμη P_{out} . Με τον τρόπο αυτό, κάθε παλμός που εισέρχεται στο UNI και έχει ισχύ μεγαλύτερη από το κατώφλι αυτό, εξέρχεται με το ίδιο πλάτος που καθορίζει η P_{out} . Αντίθετα, οι πολύ ασθενείς παλμοί δε μπορούν να ‘σηκωθούν’, αλλά όμως και αυτοί υπόκεινται σε μια ενίσχυση. Αποτέλεσμα είναι οι παλμοί εξόδου του UNI να παρουσιάζουν πολύ μικρότερη διαμόρφωση στο πλάτος από ότι η είσοδος της πύλης.

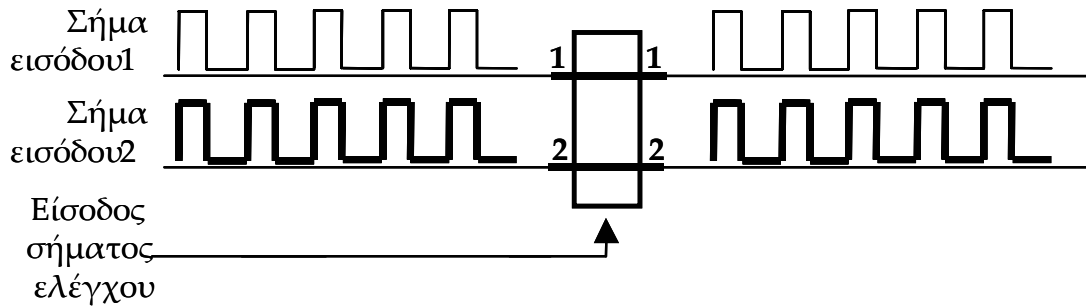


Σχήμα 2.16: Χαρακτηριστική εξόδου του UNI (switched port) ως προς την ισχύ του Σήματος Ελέγχου

2.6 Κύκλωμα 2×2 Διακόπτη Οπτικής Μεταγωγής.

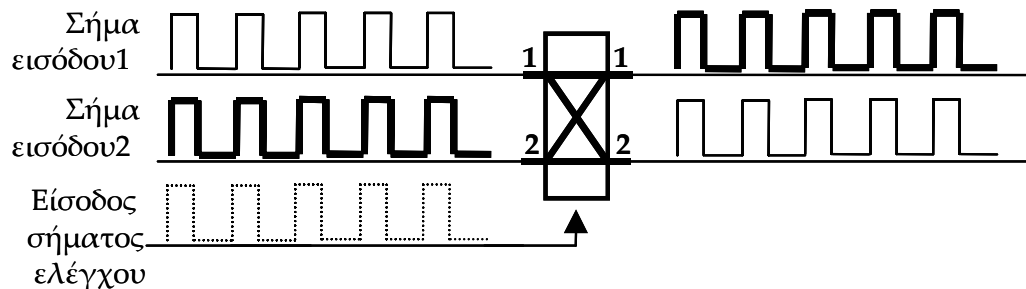
2.6.1 Εισαγωγή

Ένα ακόμα αμιγώς οπτικό κύκλωμα που θα μελετήσουμε, με μεγάλη σημασία στην οπτική μεταγωγή πακέτου (optical packet switching), είναι ο 2×2 διακόπτης μεταγωγής. Πρόκειται για ένα στοιχείο με δύο εισόδους, δύο εξόδους και ένα Σήμα Ελέγχου. Απουσία του Σήματος Ελέγχου, ο διακόπτης λειτουργεί στην κατάσταση μη μεταγωγής (bar state) – Σχήμα 2.17. Στην περίπτωση αυτή, τα σήματα εισόδου που εισέρχονται στις εισόδους 1 και 2, εξέρχονται ανεπηρέαστα από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου.



Σχήμα 2.17: Λειτουργία του 2×2 διακόπτη μεταγωγής σε κατάσταση μη μεταγωγής

Παρουσία Σήματος Ελέγχου, τα σήματα εισόδου που συμπίπτουν χρονικά με αυτό, εναλλάσσονται στην έξοδο. Πρόκειται για την κατάσταση μεταγωγής (cross state) που περιγράφεται στο επόμενο Σχήμα:



Σχήμα 2.18: Λειτουργία του 2×2 διακόπτη μεταγωγής σε κατάσταση μεταγωγής

Αν συμβολίσουμε με A το Σήμα Εισόδου 1, με B το Σήμα Εισόδου 2 και με C το Σήμα Ελέγχου, τότε μπορούμε να πούμε ότι ο 2×2 διακόπτης μεταγωγής υλοποιεί στην ουσία δύο λογικές συναρτήσεις, μία για κάθε έξοδο:

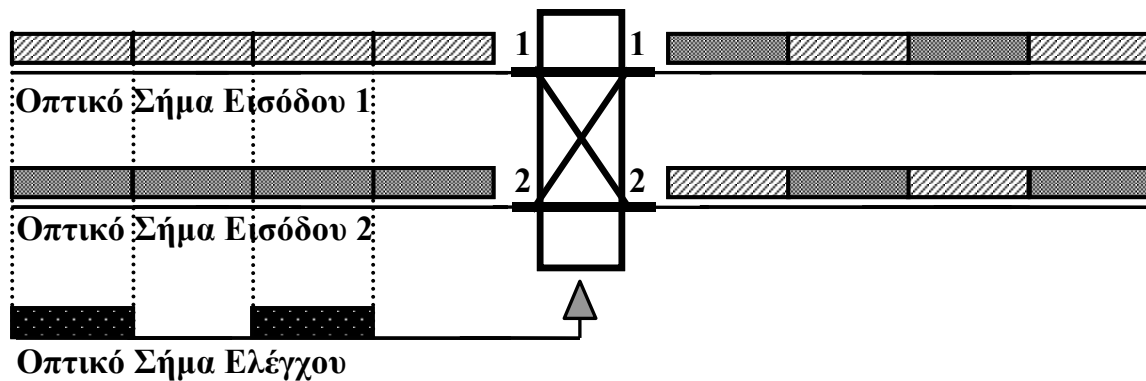
$$\text{Έξοδος 1} = A\bar{C} + BC$$

$$\text{Έξοδος 2} = AC + B\bar{C}$$

Ο πίνακας αληθείας των συναρτήσεων αυτών είναι ο ακόλουθος:

Σήμα Εισόδου 1 (A)	Σήμα Εισόδου 2 (B)	Σήμα Ελέγχου (C)	Έξοδος 1	Έξοδος 2
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Η λογική του 2×2_διακόπτη περιγράφεται πιο παραστατικά στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.19: Η λογική του 2×2 διακόπτη

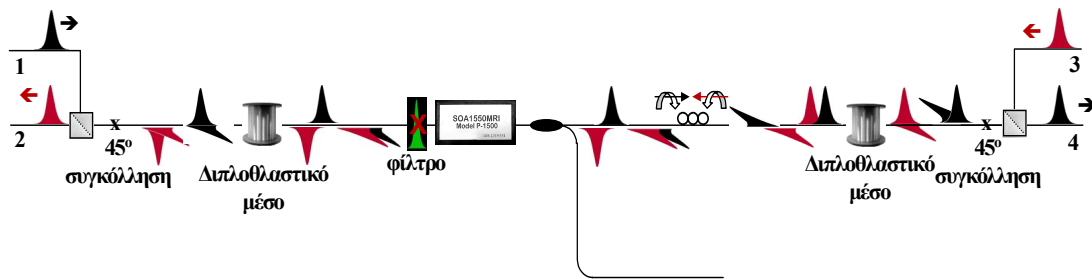
2.6.2 Λειτουργία του 2×2 διακόπτη

Ο 2×2 οπτικός διακόπτης που υλοποιήθηκε βασίζεται στο Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλής Ταχύτητας (UNI) που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.1. Η κυριότερη διαφοροποίηση έγκειται στην ύπαρξη δύο σημάτων εισόδου, τα οποία διαδίδονται με αντίθετη φορά. Για να γίνει δυνατόν κάτι τέτοιο, στη διάταξη του Σχήματος 2.1 έχουν προστεθεί δύο στοιχεία: Ένας διαχωριστής πόλωσης στο αριστερό μέρος και ένα ζωνοπερατό φίλτρο στην αριστερή πλευρά του SOA. Στη συνέχεια θα

περιγράψουμε τη λειτουργία του 2×2 διακόπτη για καθεμιά από τις δύο δυνατές καταστάσεις.

Κατάσταση Μη Μεταγωγής

Στην κατάσταση μη μεταγωγής (bar state) δεν υπάρχει παλμός ελέγχου και τα σήματα εισόδου εξέρχονται ανεπηρρέαστα από τις αντίστοιχες θύρες εξόδου. Η λειτουργία του διακόπτη στην περίπτωση αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 2.20 .

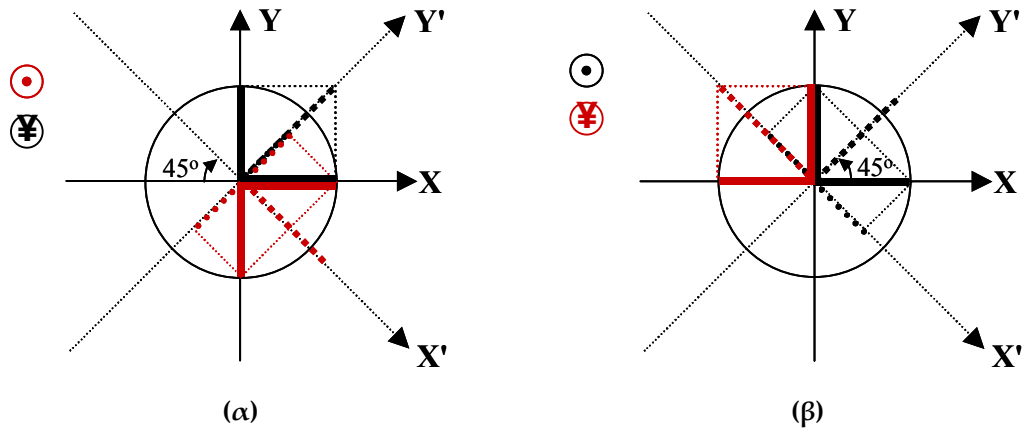


Σχήμα 2.20: Κατάσταση μη μεταγωγής. Η είσοδος της θύρας 1 εξέρχεται από τη θύρα 4 ενώ η είσοδος της θύρας 3 εξέρχεται από τη θύρα 2

Ο διακόπτης λειτουργεί όπως ακριβώς το Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλής Ταχύτητας σε κατάσταση Μη Μεταγωγής, για καθένα από τα αντίθετα διαδιδόμενα σήματα εισόδου. Πιο συγκεκριμένα, το σήμα εισόδου 1 εισέρχεται από τη θύρα 1 του διαχωριστή πόλωσης και διαδίδεται προς τα δεξιά, ενώ το σήμα εισόδου 2 εισέρχεται από τη θύρα 3 του άλλου διαχωριστή πόλωσης και διαδίδεται προς τα αριστερά. Τα δύο σήματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και εισέρχονται ταυτόχρονα στον διακόπτη. Το φίλτρο έχει κεντρική συχνότητα ίδια με το φέρον των δύο σημάτων και χρησιμεύει μόνο για την κατάσταση μεταγωγής.

Η χρησιμότητα του αναλυτή πόλωσης συνίσταται στη συμβολή των δύο κάθετων συνιστωσών που εξέρχονται από το διπλοθλαστικό μέσο καθώς και για την ανάλυση του κάθε σήματος εισόδου σε δύο κάθετες συνιστώσες κατά την είσοδό του στο ίδιο μέσο. Στο Σχήμα 2.21 (α) βλέπουμε τα σήματα στον αριστερό διαχωριστή πόλωσης από επίπεδο κάθετο στον άξονα της ίνας και με κατεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά. Με X και Y συμβολίζονται οι άξονες του διπλοθλαστικού μέσου ενώ με X' και Y' οι άξονες

της εισόδου του διαχωριστή πόλωσης. Το σήμα εισόδου 1 απεικονίζεται με μαύρη διακεκομμένη γραμμή και εισέρχεται παράλληλα στον άξονα Y' , για να αναλυθεί σε δύο κάθετες ίσες συνιστώσες (συμπαγείς μαύρες γραμμές). Οι συμπαγείς κόκκινες γραμμές συμβολίζουν τις συνιστώσες του σήματος εισόδου 2 οι οποίες έχουν ενωθεί χρονικά μετά το διπλοθλαστικό μέσο και συμβάλλουν στο διαχωριστή πόλωσης. Η συνισταμένη τους βρίσκεται στη διεύθυνση του άξονα X' , επομένως ο παλμός εμφανίζεται στη θύρα εξόδου του διαχωριστή πόλωσης που αντιστοιχεί στον άξονα αυτόν, δηλαδή στη θύρα 2. Αντίθετα, στη θύρα 1 δεν εμφανίζεται παλμός αφού στον άξονα Y' έχουμε αναιρετική συμβολή.



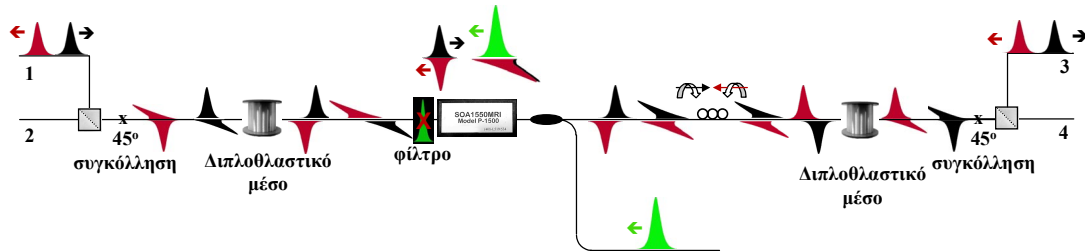
Σχήμα 2.21: Οι συνιστώσες των δύο σημάτων εισόδου (α) στον αριστερό διαχωριστή πόλωσης και (β) στο δεξιό διαχωριστή πόλωσης

Ακριβώς ανάλογα συμβαίνουν και στον δεξιό διαχωριστή πόλωσης του 2×2 διακόπτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21 (β). Εδώ βλέπουμε τα σήματα πάλι από επίπεδο κάθετο στον άξονα της ίνας, αλλά με κατεύθυνση από δεξιά προς τα αριστερά. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή συμβολίζει το σήμα εισόδου 2, που αναλύεται σε δύο κάθετες συνιστώσες (συμπαγείς κόκκινες γραμμές), ενώ οι συμπαγείς μαύρες γραμμές συμβολίζουν τις συνιστώσες του σήματος εισόδου 1 που συμβάλλουν στο διαχωριστή πόλωσης. Η συνισταμένη τους βρίσκεται στον άξονα Y' , άρα ο παλμός εμφανίζεται στη θύρα εξόδου του διαχωριστή πόλωσης που αντιστοιχεί στον άξονα αυτόν, δηλαδή στη

θύρα 4. Αντίθετα, στη θύρα 3 δεν εμφανίζεται παλμός αφού στον άξονα X' έχουμε αναιρετική συμβολή.

Κατάσταση Μεταγωγής

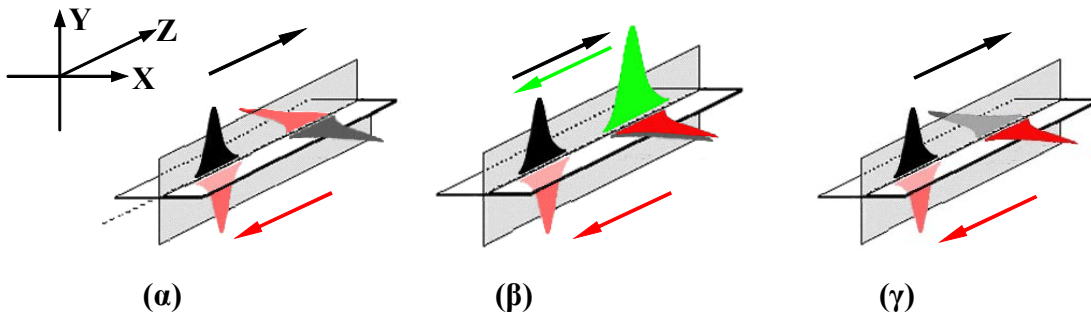
Στην κατάσταση μεταγωγής (cross state) ο διακόπτης λειτουργεί όπως ακριβώς το Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλής Ταχύτητας για καθένα από τα αντίθετα διαδιδόμενα σήματα εισόδου. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ένας παλμός ελέγχου κοινός και για τα δύο σήματα εισόδου τα οποία είναι συγχρονισμένα με αυτόν. Η λειτουργία του διακόπτη στην περίπτωση αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 2.22 .



Σχήμα 2.22: Κατάσταση μεταγωγής. Η είσοδος της θύρας 1 εξέρχεται από τη θύρα 3 ενώ η είσοδος της θύρας 3 εξέρχεται από τη θύρα 1

Πιο συγκεκριμένα, το σήμα ελέγχου διαδίδεται στην ίδια κατεύθυνση με το σήμα εισόδου 2 και αντίθετα από το σήμα εισόδου 1. Για το λόγο αυτό έχει τοποθετηθεί το ζωνοπερατό φίλτρο αριστερά από τον SOA, ώστε να αποκόπτει το σήμα ελέγχου και να μην εξέρχεται από τις θύρες 1 και 2. Είναι λοιπόν απαραίτητο το σήμα ελέγχου να βρίσκεται σε διαφορετικό μήκος κύματος από τα σήματα εισόδου.

Στη συνέχεια θα παρακολουθήσουμε την πορεία των δύο αντίθετα διαδιδόμενων παλμών. Στο Σχήμα 2.23 (α) απεικονίζεται το σημείο δεξιά του πρώτου διπλοθλαστικού μέσου, στο (β) το εσωτερικό του ημιαγωγού και στο (γ) το σημείο δεξιά από τον ημιαγωγό, δηλαδή αριστερά από το δεύτερο διπλοθλαστικό μέσο.



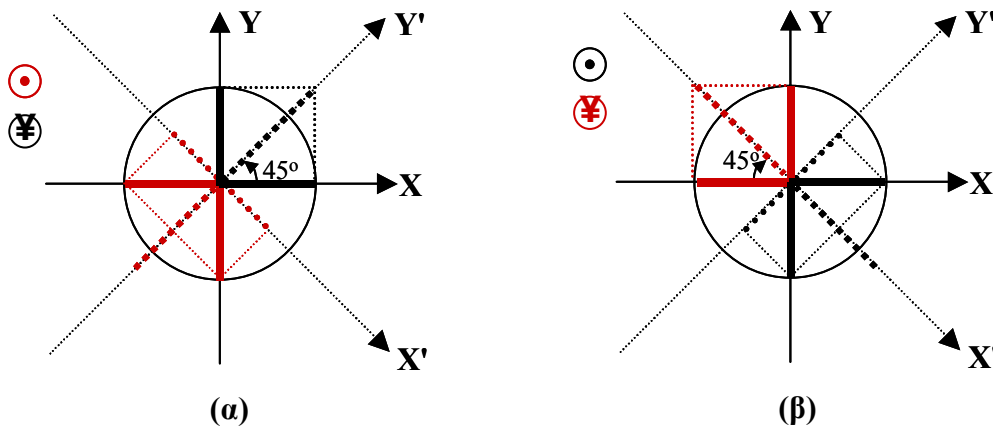
Σχήμα 2.23: Χωρική κατανομή των συνιστωσών (α) μετά το πρώτο διπλοθλαστικό μέσο, (β) στο εσωτερικό του ημιαγωγού και (γ) στο σημείο δεξιά από τον ημιαγωγό.

Το σήμα εισόδου 1 εισέρχεται στο διπλοθλαστικό μέσο όπου αναλύεται σε δύο κάθετες συνιστώσες. Μετά από μήκος L του μέσου αυτού οι συνιστώσες αυτές έχουν αποκτήσει μεταξύ τους μια χρονική καθυστέρηση ίση με $T_{bit}/2$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23 (α), όπου απεικονίζονται με μαύρο και γκρι χρώμα. Οι παλμοί που φαίνονται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα ανήκουν στο σήμα εισόδου 2, διαδίδονται προς τα αριστερά και η σχετική τους θέση στο σχήμα με τις συνιστώσες του σήματος 1 είναι τυχαία. Στο Σχήμα 2.23 (β) βλέπουμε τις συνιστώσες του σήματος εισόδου 1 μέσα στον ημιαγωγό, παρουσία του σήματος ελέγχου (πράσινο χρώμα). Η οριζόντια συνιστώσα πρέπει να είναι συγχρονισμένη με το σήμα ελέγχου, έτσι ώστε να στρέφει τη φάση της κατά 180° λόγω της ετεροδιαμόρφωσης φάσης. Η σχετική θέση των συνιστωσών των δύο σημάτων εισόδου όπως παριστάνεται στο Σχήμα 2.23 (β) δεν είναι τυχαία, καθώς υπαγορεύεται από το συγχρονισμό των σημάτων. Το αποτέλεσμα της στροφής φάσης που εισάγει ο ημιαγωγός στην οριζόντια συνιστώσα του σήματος εισόδου 1 φαίνεται στο Σχήμα 2.23 (γ). Η σχετική θέση των συνιστωσών των δύο σημάτων εισόδου όπως παριστάνεται στο σχήμα αυτό είναι τυχαία.

Το σήμα εισόδου 2 διαδίδεται από δεξιά προς τα αριστερά. Έτσι στο Σχήμα 2.23 (γ) απεικονίζονται οι δύο συνιστώσες του με σκούρο και ανοιχτό κόκκινο χρώμα, αφού έχουν περάσει από το δεύτερο διπλοθλαστικό μέσο και έχουν αποκτήσει μεταξύ τους μια χρονική καθυστέρηση ίση με $T_{bit}/2$. Στη συνέχεια, οι παλμοί εισέρχονται στον ημιαγωγό,

όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23 (β). Η οριζόντια συνιστώσα πρέπει να είναι συγχρονισμένη με το σήμα ελέγχου, έτσι ώστε να στρέφει τη φάση της κατά 180° λόγω της ετεροδιαμόρφωσης φάσης, όπως περιγράφηκε και για την αντίστοιχη συνιστώσα του σήματος εισόδου 1. Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο παλμός ελέγχου συμπίπτει χρονικά και με τα δύο σήματα εισόδου και τους στρέφει ταυτόχρονα τη φάση. Ο συγχρονισμός αυτός είναι απαραίτητος για τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος. Το αποτέλεσμα της στροφής φάσης που εισάγει ο ημιαγωγός στην οριζόντια συνιστώσα του σήματος εισόδου 2 φαίνεται στο Σχήμα 2.23 (α). Η άλλη συνιστώσα παραμένει και εδώ ανεπηρρέαστη.

Μετά τη στροφή φάσης των οριζόντιων συνιστωσών τους, τα σήματα κατευθύνονται προς τους δύο διαχωριστές πόλωσης, η λειτουργία των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 2.24 . Ο τρόπος που γίνεται η συμβολή είναι ίδιος με την περίπτωση της μη μεταγωγής, μόνο που τώρα η θετική και αναιρετική συμβολή γίνονται αντίστροφα. Πιο συγκεκριμένα, για το Σχήμα 2.24 (α) που αντιστοιχεί στον αριστερό διαχωριστή πόλωσης, έχουμε προσθετική συμβολή στον άξονα Y' και αναιρετική στον X' , οπότε ο αντίστοιχος παλμός εξέρχεται από τη θύρα 1. Αντίστοιχα, στον δεξιό διαχωριστή πόλωσης (Σχήμα 2.24 (β)) συμβαίνει προσθετική συμβολή στον άξονα X' και αναιρετική στον Y' , με αποτέλεσμα την έξοδο του αντίστοιχου παλμού από τη θύρα 4.



Σχήμα 2.24: Οι συνιστώσες των δύο σημάτων εισόδου (α) στον αριστερό διαχωριστή πόλωσης και (β) στο δεξιό διαχωριστή πόλωσης

Παρατηρούμε ότι οι 4 θύρες των διαχωριστών πόλωσης δε συμπίπτουν με τις 4 θύρες του 2×2 διακόπτη οπτικής μεταγωγής. Όμως, υπάρχει τρόπος με κατάλληλη συνδεσμολογία των θυρών των διαχωριστών πόλωσης, να λειτουργήσει ο διακόπτης ακριβώς ακριβώς σαν 2×2 διακόπτης μεταγωγής. Η μέθοδος αυτή θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο, όπου θα παρουσιαστεί η πειραματική διάταξη.

Συμπερασματικά, παρουσιάσαμε έναν αμιγώς οπτικό 2×2 μεταγωγέα που βασίζεται στο Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερυψηλών Ταχυτήτων. Η διάταξη αυτή για να υλοποιηθεί απαιτεί μόνο μία οπτική πύλη, σε αντίθεση με τις ηλεκτρονικές διατάξεις που χρειάζονται οκτώ. Δεδομένου ότι το UNI μπορεί να φτάσει τα 40 Gbps, άρα και η ταχύτητα του 2×2 διακόπτη οπτικής μεταγωγής μπορεί να αναβαθμιστεί τουλάχιστον μέχρι αυτή την ταχύτητα.

Κεφάλαιο Τρίτο

Κύκλωμα Αφαίρεσης/Επαναεισαγωγής Επικεφαλίδας

3.0 Εισαγωγή

Η οπτική μεταγωγή πακέτων αποτελεί την τεχνολογική απάντηση στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για αποδοτικότερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η έρευνα κατευθύνεται όλο και περισσότερο στην αμιγώς οπτική λογική, η οποία απαλλάσσει τους κόμβους από το ηλεκτρονικό ‘μποτιλιάρισμα’, προσφέροντας τη δυνατότητα για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης και επεξεργασίας στη μεταγωγή οπτικών πακέτων. Η λογική αυτή ελαχιστοποιεί τις ανεπιθύμητες οπτικό-ηλεκτρονικές και ηλεκτρο-οπτικές μετατροπές που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό ενός κόμβου και μειώνουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος.

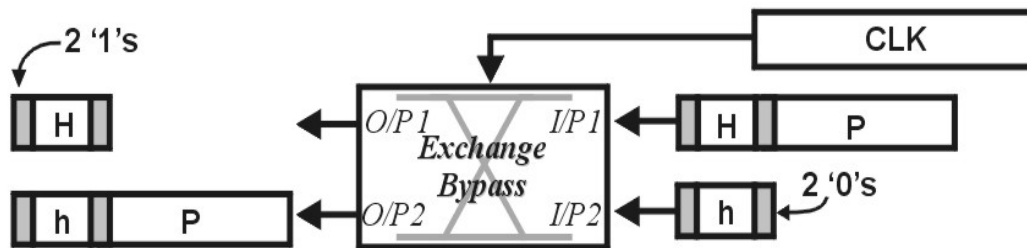
Προκειμένου να υλοποιηθούν τέτοιου είδους δίκτυα οπτικής μεταγωγής, πολλές λειτουργίες που επιτελούνται από τους κόμβους του δικτύου οφείλουν να εκτελούνται σε οπτικό επίπεδο. Τέτοιες λειτουργίες περιλαμβάνουν την ανάκτηση του ρολογιού του συστήματος, την επεξεργασία της επικεφαλίδας των πακέτων, την προσωρινή αποθήκευση (buffering) καθώς και τη δρομολόγησή τους. Ακόμα περισσότερο, η ίδια η δομή των δικτύων και ο σχεδιασμός των κόμβων είναι θέματα ανοιχτά προς συζήτηση, καθώς η ιδιαιτερότητα των οπτικών διατάξεων δεν επιτρέπει την απευθείας εφαρμογή σε αυτές μεθόδων που προέρχονται από τα ηλεκτρονικά.

Το κύκλωμα που θα παρουσιάσουμε αποτελεί μία εξολοκλήρου οπτική διάταξη, η οποία μπορεί να βρεί ευρεία εφαρμογή στα φωτονικά δίκτυα τρίτης γενιάς. Η λειτουργία του συνίσταται στην αφαίρεση της επικεφαλίδας των πακέτων πληροφορίας και την αντικατάστασή της από νέα. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητο να εκτελείται από κάθε

κόμβο καθώς το πακέτο μεταφέρεται από την πηγή προς τον προορισμό του, για την επιτυχία του δρομολόγησης.

3.1 Αρχή Λειτουργίας

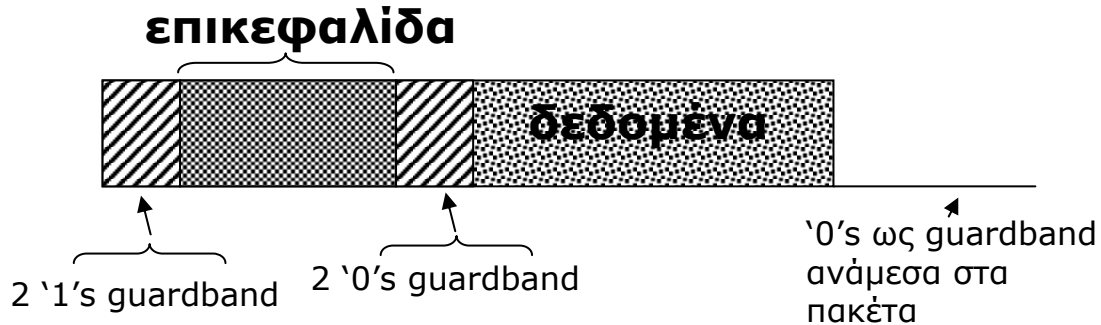
Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε αποτελείται από τρία μέρη τοποθετημένα σε σειρά μεταξύ τους. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει την παραγωγή του σήματος εισόδου, δηλαδή των πακέτων με την ψευδο-τυχαία ακολουθία bits. Η διαδικασία της αφαίρεσης και επανεισαγωγής της επικεφαλίδας επιτελείται ουσιαστικά στα άλλα δύο τμήματα της διάταξης. Στο δεύτερο κατά σειρά μέρος χρησιμοποιούμε το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού του προηγούμενου κεφαλαίου ώστε να κατασκευάσουμε ρολόι από κάθε πακέτο, στο μήκος περίπου του πακέτου αυτού. Τέλος, στο τρίτο κομμάτι του κυκλώματος χρησιμοποιούμε το ρολόι αυτό για να οδηγήσουμε έναν 2×2 οπτικό διακόπτη (παράγραφος 2.6) που έχει σαν εισόδους το πακέτο και την καινούρια επικεφαλίδα και σαν εξόδους τη παλιά επικεφαλίδα και το πακέτο με την καινούρια επικεφαλίδα στη θέση της παλιάς. Τα παραπάνω φαίνονται καλύτερα στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3.1: Αρχή Λειτουργίας της διάταξης

Η λειτουργία του κυκλώματος ελέγχθηκε για διάφορα μήκη πακέτων με τα ίδια αποτελέσματα, καθώς η λογική του δουλεύει σε επίπεδο bits. Η γενική μορφή του κάθε πακέτου φαίνεται στο Σχήμα 3.2 . Θεωρήσαμε έναν συγκεκριμένο αριθμό bits από την αρχή του κάθε πακέτου ως επικεφαλίδα και τα υπόλοιπα bits σαν πληροφορία. Επίσης,

τόσο στην επικεφαλίδα όσο και στην πληροφορία θεωρήσαμε από μία περιοχή guardband, της οποίας τη χρησιμότητα θα εξηγήσουμε παρακάτω.



Σχήμα 3.2: Η μορφή των πακέτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

Από το Σχήμα 3.1 παρατηρούμε πως η αντικατάσταση της παλιάς επικεφαλίδας από τη νέα εκτελείται μέσα στον 2×2 οπτικό διακόπτη μεταγωγής. Το αρχικό πακέτο πληροφορίας εισάγεται στη θύρα εισόδου 1 του διακόπτη, ενώ στη θύρα εισόδου 2 εισάγεται η καινούρια επικεφαλίδα. Με κατάλληλο Σήμα Ελέγχου (ακολουθία λογικών '0') φροντίζουμε ώστε ο διακόπτης να λειτουργεί σε κατάσταση Μη Μεταγωγής κατά τη διέλευση των δύο επικεφαλίδων, ώστε να εμφανιστεί στη θύρα εξόδου 1 η παλιά και στη θύρα εξόδου 2 η καινούρια. Στη συνέχεια, κατά τη διέλευση της πληροφορίας (payload), το Σήμα Ελέγχου παίρνει τη μορφή ακολουθίας λογικών '1', οδηγώντας τον 2×2 διακόπτη σε κατάσταση μεταγωγής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πληροφορία να εμφανιστεί στη θύρα εξόδου 2, ακριβώς 'πίσω' από την καινούρια επικεφαλίδα, σχηματίζοντας το επιθυμητό πακέτο. Θα μπορούσε κανείς να παρατηρήσει ότι η ακολουθία των '1' που χρησιμοποιείται ως Σήμα Ελέγχου για τον οπτικό διακόπτη αποτελεί ουσιαστικά ένα 'πακέτο' ρολογιού, μετατοπισμένο χρονικά κατά το μήκος της επικεφαλίδας. Η κατασκευή των πακέτων ρολογιού εκτελείται στο δεύτερο κατά σειρά τμήμα της διάταξής μας, το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, με τον τρόπο ακριβώς που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.5 .

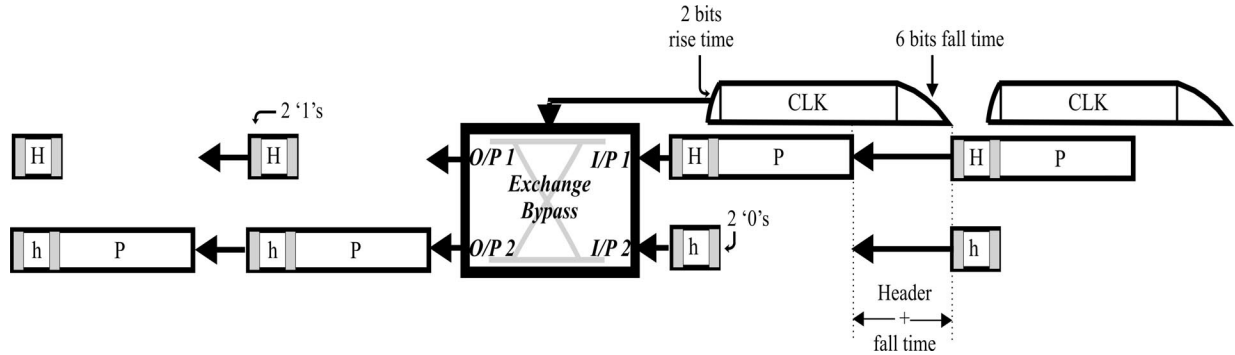
Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι για αν επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα με το κύκλωμά μας, είναι απαραίτητο να επιτευχθεί ο κατάλληλος συγχρονισμός ανάμεσα στα

Σήματα Εισόδου και Ελέγχου. Όπως υποδηλώνεται και στο Σχήμα 3.1, το αρχικό πακέτο και η καινούρια επικεφαλίδα πρέπει να εισαχθούν ταυτόχρονα στον 2×2 οπτικό διακόπτη μεταγωγής, ενώ το ρολόι που στο μεταξύ έχει παραχθεί από το αρχικό πακέτο πρέπει να υποστεί καθυστέρηση ίση ακριβώς με το μήκος της επικεφαλίδας αυτού ώστε να παίζει το ρόλο του Σήματος Ελέγχου. Το ‘πακέτο ρολογιού’ όμως που παράγεται με τη βοήθεια του συμβολομέτρου Fabry-Perot και της πύλης δε μπορεί να είναι τέλειο, αλλά έχει απαραίτητα κάποιο χρόνο ανύψωσης και πτώσης (rise and fall time – παράγραφος 2.5.0). Συγκεκριμένα, από μετρήσεις που έγιναν στο κύκλωμά μας, ο χρόνος ανύψωσης για την ανάκτηση του ρολογιού ήταν 2 bits ενώ ο χρόνος πτώσης περίπου 8 bits. Προκειμένου να επιτύχουμε μικρό χρόνο ανύψωσης πρέπει τα πρώτα bits της επικεφαλίδας να είναι όλα ‘1’, ώστε το Fabry-Perot να ‘ανεβάσει’ πιο γρήγορα την έξοδό του (βλέπε και Σχήμα 2.14). Για να εξασφαλίσουμε μια τέτοια ακολουθία από ‘1’, ορίζουμε μία περιοχή guardband με ‘1’ στην αρχή κάθε πακέτου, με μήκος που εξαρτάται από το χρόνο ανύψωσης του κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού.

Επίσης, ο χρόνος ανύψωσης του παραγόμενου ρολογιού, έχει αντίκτυπο και στη διαδικασία της μεταγωγής. Οι πρώτοι ασθενέστεροι άσσοι που γεννιούνται, όταν εισάγονται στον 2×2 διακόπτη δεν προκαλούν την επιθυμητή στροφή φάσης των 180° στη συγχρονισμένη συνιστώσα των Σημάτων Εισόδου (παράγραφος 2.6.2). Έτσι, για να αρχίσει να γίνεται σωστά η μεταγωγή πρέπει να παρέλθει χρόνος περίπου ίσος με το χρόνο ανύψωσης. Στο διάστημα αυτό, επειδή η έξοδος του διακόπτη σε τυχαία είσοδο δεν είναι ντετερμινιστική, φροντίζουμε ώστε να υπάρχει μία ακολουθία από ‘0’, οπότε και η έξοδος στη θύρα εξόδου 2 θα είναι ‘0’. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενός guardband από μηδενικά αμέσως πριν τα bits των δεδομένων στο πακέτο. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουμε και την αποφυγή απώλειας των πρώτων bits της πληροφορίας (payload).

Τέλος, η χρονική ολίσθηση του ‘πακέτου ρολογιού’ κατά το μήκος της επικεφαλίδας καθώς και ο χρόνος πτώσης του ρολογιού λόγω των ανακλάσεων στο Fabry-Perot που εξακολουθούν να συμβαίνουν και μετά το πέρας του πακέτου εισόδου, υπαγορεύουν κάποιο χρονικό διάστημα απραξίας ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πακέτα εισόδου. Το χρονικό αυτό διάστημα απαιτείται για να ‘ξε-κλειδώσει’ το κύκλωμα από το ρολόι του προηγούμενου πακέτου και να μπορεί να συγχρονιστεί με το επόμενο, και ισούται με το

χρόνο που αντιστοιχεί στο μήκος της επικεφαλίδας συν το χρόνο πτώσης του ρολογιού. Τα παραπάνω φαίνονται πιο παραστατικά στο Σχήμα 3.3 .



Σχήμα 3.3: Οι απαραίτητοι συγχρονισμοί και τα διαστήματα guardbands

Στο κύκλωμα που υλοποιήσαμε εισάγαμε πακέτα διάρκειας 4.4 ns και 6.6 ns, με διάστημα 6.4 ns ανάμεσά τους. Ο ρυθμός μετάδοσης ήταν 10 Gbps, με αποτέλεσμα κάθε bit να αντιστοιχεί σε 0.1 ns. Όπως περιγράφηκε παραπάνω, το κάθε πακέτο περιείχε δύο άσσους στην αρχή και δύο μηδενικά πριν τα δεδομένα (payload), αποτέλεσμα του πολύ μικρού χρόνου ανύψωσης και πτώσης του παραγόμενου ρολογιού. Αυτή η πολύ καλή επίδοση της διάταξης ανάκτησης ρολογιού που κατασκευάσαμε μας έδωσε τη δυνατότητα να υλοποιήσουμε το κύκλωμα επανεισαγωγής επικεφαλίδας χωρίς την ανάγκη μεγάλων guardbands, που θα είχαν σαν αποτέλεσμα την σπατάλη εύρους ζώνης.

- PC – Polarization Controller (Ελεγκτής Πόλωσης) . Πρόκειται για ένα στοιχείο που μας επιτρέπει να στρέφουμε με συστηματικό τρόπο τη γωνία πόλωσης του πολωμένου φωτός που προσπίπτει σε αυτό. Αποτελείται από συνδυασμό πλακιδίων καθυστέρησης φάσης $\lambda/2$ και $\lambda/4$. Στα πλακίδια αυτά οι συνιστώσες του φωτός αποκτούν διαφορετική καθυστέρηση, ανάλογα με τον άξονα διάδοσης που τους αντιστοιχεί. Η διαφορά φάσης που εισάγεται φτάνει τις 180° και 90° αντίστοιχα. Στρέφοντας τα πλακίδια αλλάζουμε τη γωνία με την οποία το φως προσπίπτει πάνω τους, μεταβάλλοντας αντίστοιχα τις δύο συνιστώσες και ρυθμίζοντας άρα τη διαφορά φάσης που θα αποκτήσουν. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλουμε την πολωτική κατάσταση του φωτός.

- PBS – Polarization Beam Splitter (Πολωτικός Διαχωριστής Δέσμης) . Ο Πολωτικός Διαχωριστής Δέσμης είναι ένας κατευθυντικός συζεύκτης ευαίσθητος στην πόλωση. Έχει την ιδιότητα να αναλύει το σήμα εισόδου σε δύο κάθετες μεταξύ τους πολώσεις και να εμφανίζει την κάθε μία από αυτές σε ξεχωριστή έξοδο.

- EDFA – Ενισχυτής Ερβίου . Ο EDFA είναι ένας ενισχυτής κατασκευασμένος από ένα νοθευμένη με ιόντα ερβίου. Το φαινόμενο στο οποίο βασίζει τη λειτουργία του είναι η Απορρόφηση Διεγερμένων Καταστάσεων (ESA – Excited State Absorption). Σύμφωνα με αυτό, η ισχύς άντλησης απορροφάται από κάποια ανεπιθύμητη μετάπτωση που συμβαίνει να βρίσκεται ακριβώς ή πολύ κοντά στο κατάλληλο μήκος κύματος. Συγκεκριμένα, το ιόν Ερβίου απορροφά ένα φωτόνιο άντλησης και μεταβαίνει σε διεγερμένη στάθμη, όπου όμως αντί να αποδιεγερθεί εξαναγκασμένα από φωτόνιο σήματος, απορροφά ένα ακόμα φωτόνιο άντλησης και μεταβαίνει σε ακόμα υψηλότερη στάθμη, οπότε και τελικά αποδιεγείρεται δίνοντας φωτόνια μικρότερου μήκους κύματος. Η άντληση γίνεται στα 980nm ή στα 1480 nm.

Η κυριότερη συνιστώσα θορύβου στους Ενισχυτές Ερβίου είναι η Ενισχυμένη Αυθόρμητη Εκπομπή (ASE – Amplified Spontaneous Emission). Κατά το φαινόμενο αυτό ένα διεγερμένο ιόν αποδιεγείρεται εξαναγκασμένα χωρίς την πρόσπτωση φωτονίου σήματος. Το ασύμφωνο φωτόνιο που παράγεται ενισχύεται κινούμενο και προς τα δύο τερματικά άκρα, με αποτέλεσμα στην έξοδο να έχουμε σήμα άσχετο με το πραγματικό,

που μπορεί και να μην υπάρχει. Για την αποκοπή του θορύβου πάντα στην έξοδο του ενισχυτή χρησιμοποιούμε φίλτρο.

- Φίλτρο . Αποκόπτει όλες τις συχνότητες πέρα από ένα εύρος γύρω από τη φέρουσα του σήματος.

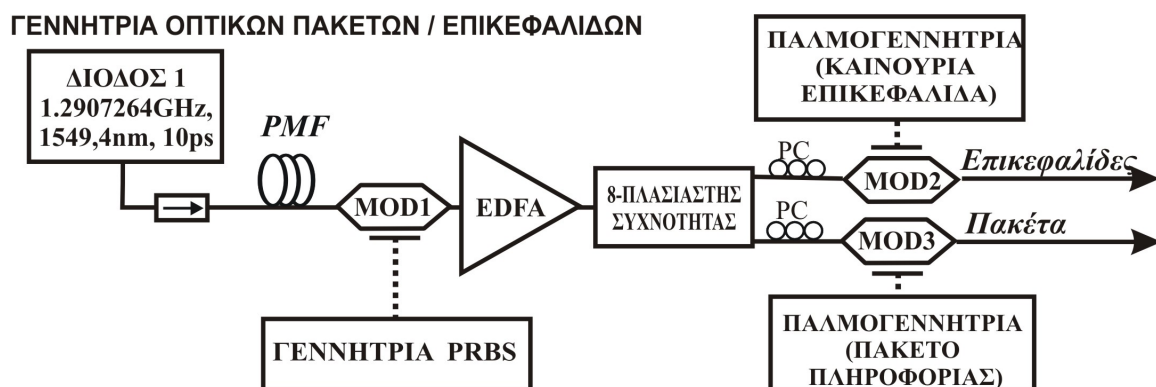
- Εξασθενητής . Χρησιμοποιείται για να μειώσει την οπτική ισχύ του σήματος. Μεγάλη ισχύς μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα σε κάποιες διατάξεις.

- Απομονωτής . Επιτρέπει τη διέλευση του φωτός μόνο προς μία κατεύθυνση. Η λειτουργία του στηρίζεται στη στροφή Faraday, δηλαδή τη μεταβολή της πολωτικής κατάστασης ενός κύματος όταν αυτό διαδίδεται σε κατάλληλο υλικό. Το φως πρώτα περνάει από έναν πολωτή, και στη συνέχεια αφού διαδοθεί στο υλικό, η πόλωσή του στρέφεται κατά 45° . Αν ξαναδιαδοθεί με την αντίθετη κατεύθυνση, τότε στρέφεται άλλες 45° προς την ίδια φορά, οπότε συναντά κάθετα τον πολωτή και δεν μπορεί να τον διαπεράσει.

- Συζεύκτης ^{50:50} . Πρόκειται για παθητικά στοιχεία που μετάνευσαν με διάφορους τρόπους την ισχύ που τους εισάγεται. Έχουν τέσσερις θύρες και η ισχύς που εισέρχεται από τη μία θύρα εξέρχεται από δύο άλλες σε συγκεκριμένο ποσοστό, που είναι χαρακτηριστικό του κάθε συζεύκτη.

3.2.1 Παραγωγή των Σημάτων

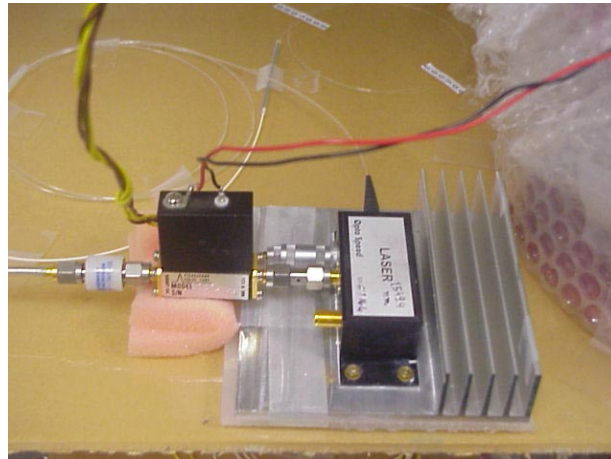
Η διάταξη της οπτικής πηγής που χρησιμοποιήσαμε φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 3.5: Η διάταξη της πηγής

Παραγωγή Παλμών με Δίοδο Laser DFB

Για την παραγωγή της παλμοσειράς εισόδου χρησιμοποιήσαμε μία δίοδο laser κατανεμημένης ανάδρασης (Distributed Feedback Semiconductor Diode – DFB). Η δίοδος αυτή εκπέμπει σε μήκος κύματος 1549.4 nm και για να παράγει παλμούς λειτουργεί με τη μέθοδο της διαμόρφωσης απολαβής (Gain Switching). Η τεχνική αυτή συνίσταται στην υπέρθεση ενός RF ημιτονικού σήματος στο DC ρεύμα τροφοδοσίας της δίοδου. Το DC ρεύμα ρυθμίζεται έτσι ώστε να πολώνει τη δίοδο στη στάθμη έναρξης εκπομπής της σύμφωνης ακτινοβολίας (lasing threshold). Ο ρόλος του ημιτονικού σήματος είναι η αυξομείωση του συνολικού ρεύματος γύρω από το κατώφλι αυτό, με αποτέλεσμα η δίοδος να μην εκπέμπει όταν βρίσκεται κάτω από αυτό. Λόγω της μη γραμμικής χαρακτηριστικής της δίοδου, η ημιτονική μεταβολή του ρεύματος τροφοδοσίας διαμορφώνει την περιβάλλουσα της οπτικής ακτινοβολίας σε παλμούς Gauss με περίοδο ίση με εκείνη του RF σήματος. Το σήμα RF που χρησιμοποιήθηκε είχε συχνότητα 1.2907264 GHz λόγω περιορισμών στα χαρακτηριστικά της δίοδου. Οι παλμοί που παρήχθησαν στη συχνότητα αυτή πέρασαν από έναν οκταπλασιαστή συχνότητας, ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης. Η τιμή του DC ρεύματος ήταν 6.3 mA ενώ η ισχύς του RF ήταν 8 dBm.



Σχήμα 3.6: Η Δίοδος Laser DFB που χρησιμοποιήθηκε

Η υπέρθεση των δύο σημάτων DC και RF στη δίοδο γίνεται με τη βοήθεια του Bias-T. Πρόκειται για ένα στοιχείο με δύο εισόδους και μία έξοδο, το οποίο με τη βοήθεια ενός

πηνίου αποκόπτει ενδεχόμενη RF συνιστώσα από το τροφοδοτικό ενώ με χρήση ενός πυκνωτή απορρίπτει ενδεχόμενη DC συνιστώσα από την RF γεννήτρια. Επίσης, στην έξοδο της γεννήτριας έχει τοποθετηθεί ένας απομονωτής για την προστασία της διόδου. Η τοποθέτησή του εκεί είναι επιβεβλημένη, γιατί οποιαδήποτε ανεπιθύμητη ανάκλαση από τη διάταξη διαδοθεί στο εσωτερικό της διόδου μπορεί να την οδηγήσει σε ανεξέλεγκτες ταλαντώσεις με αποτέλεσμα την καταστροφή της.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διόδος DFB πρέπει απαραίτητα να συνδέεται με έναν ελεγκτή θερμοκρασίας, για την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται επάνω της μέσω του φαινομένου Peltie. Έτσι ρυθμίζουμε τη θερμοκρασία στους 20°C, διότι αν ξεπεραστεί αυτό το επίπεδο αφενός αυξάνεται το ρεύμα κατωφλίου της διόδου, αφετέρου προκαλείται πρόωρη γήρανσή της.

Συμπίεση παλμών με DCF ίνα

Δυστυχώς η διόδος DFB δε μπορεί από μόνη της να ανταποκριθεί στη ζήτηση για στενούς οπτικούς παλμούς που υπαγορεύεται από τις υψηλές ταχύτητες λειτουργίας των οπτικών διατάξεων. Δεδομένου ότι οι πηγές laser παράγουν παλμούς ευρύτερους από το επιθυμητό, συνήθως χρησιμοποιούνται διατάξεις συμπίεσης παλμών. Μία τέτοια διάταξη βασίζεται σε ίνα DCF, η οποία έχει την ιδιότητα να παρουσιάζει αρνητική διασπορά στο μήκος κύματος λειτουργίας της διόδου laser.

Η αρχή λειτουργίας της συμπίεσης των παλμών προκύπτει με τη βοήθεια της μη γραμμικής εξίσωσης του Schrödinger:

$$i \cdot \frac{\partial U(z,T)}{\partial z} = \frac{1}{2} \cdot \beta_2 \cdot \frac{\partial^2 U(z,T)}{\partial T^2} \quad (1)$$

όπου $U(z,T)$ είναι το κανονικοποιημένο πλάτος του παλμού και β_2 η διασπορά της ίνας. Η μεταβλητή z εκφράζει το διανυόμενο μήκος, ενώ η μεταβλητή T ορίζεται ως

$T = t - \frac{z}{v_g}$, δηλαδή εκφράζει το χρόνο όπως φαίνεται από ένα σύστημα αναφοράς που

ταξιδεύει παράλληλα με τον παλμό με ταχύτητα ομάδας v_g . Η λύση της (1) για Gaussian παλμούς μπορεί να αποδειχθεί [7] ότι έχει τη μορφή:

$$U(z, Y) = \exp\left(-\frac{1+iC}{2} \cdot \frac{T^2}{T_0^2 - i \cdot \beta_2 \cdot z \cdot (1+iC)}\right)$$

όπου το C αναπαριστά το chirp του παλμού.

Άρα το χρονικό εύρος του παλμού σε απόσταση z είναι:

$$T(z) = T_0 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{C \cdot \beta_2 \cdot z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 \cdot z}{T_0^2}\right)^2} \quad (2)$$

Από τη σχέση (2) φαίνεται πως όταν το γινόμενο $C \cdot \beta_2 < 0$, τότε ο παλμός συμπιέζεται χρονικά. Το C για δίοδο laser DFB είναι αρνητικό, επομένως με χρήση DCF ίνας, όπου $\beta_2 > 0$, επιτυγχάνουμε συμπίεση του παλμού. Το ελάχιστο χρονικό εύρος που μπορεί να

επιτευχθεί καθορίζεται από τη σχέση $\Delta\omega \cdot \Delta T_{\min} = 1$ και είναι $T_{\min} = \frac{T_0}{\sqrt{1+C^2}}$, για

$$\text{αντίστοιχο μήκος ίνας } z_{\min} = \frac{C}{1+C^2} \cdot \frac{T_0^2}{|\beta_2|}.$$

Στην πειραματική διάταξη καταφέραμε να συμπιέσουμε τους παλμούς στα 10 ps, όπως μετρήθηκε στον οπτικό συσχετιστή. Το μήκος της DCF ίνας που χρησιμοποιήθηκε ήταν 550 m.

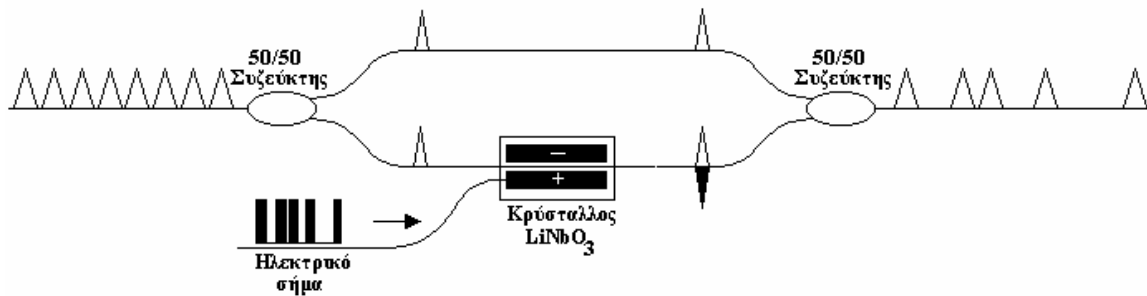
Διαμόρφωση Σήματος Από Ακολουθία PRBS

Μετά την DCF ίνα, έχουμε κατασκευάσει μία παλμοσειρά στα 1.2907264 GHz, δηλαδή μία απλή ακολουθία από άσσους. Επιθυμούμε πάνω στο σήμα αυτό να ‘γράψουμε’ μία συγκεκριμένη ακολουθία από bits, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να προσομοιάζει ένα τυχαίο πακέτο πληροφορίας. Η λειτουργία αυτή μπορεί να επιτελεστεί με τη βοήθεια του ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή.

Ο ηλεκτροοπτικός διαμορφωτής είναι ένα στοιχείο κατασκευασμένο από έναν κρύσταλλο Li:NbO_3 . Το υλικό αυτό έχει την ιδιότητα να μεταβάλλει τη φάση του φωτός που το διατρέχει ανάλογα με την ηλεκτρική τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του.

Η λειτουργία του ηλεκτροοπτικού διαμορφωτή βασίζεται στο φαινόμενο της συμβολής. Συγκεκριμένα, το φως εισάγεται πρώτα σε έναν συζεύκτη 50/50, όπου χωρίζεται σε δύο ίσες συνιστώσες. Το στοιχείο Li:NbO_3 τοποθετείται στον ένα κλάδο του συμβολομέτρου.

Ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται στο στοιχείο, είναι δυνατό να ρυθμιστεί η στροφή φάσης που θα υποστεί η αντίστοιχη συνιστώσα του φωτός. Συνεπώς μπορούμε για κάποια τιμή της τάσης να προκαλέσουμε είτε προσθετική συμβολή των δύο συνιστωσών (το σήμα εισόδου παρουσιάζεται και στην έξοδο) στον δεξιό συζεύκτη (Σχήμα 3.7) είτε αναιρετική (στην έξοδο παρουσιάζονται λογικά '0').



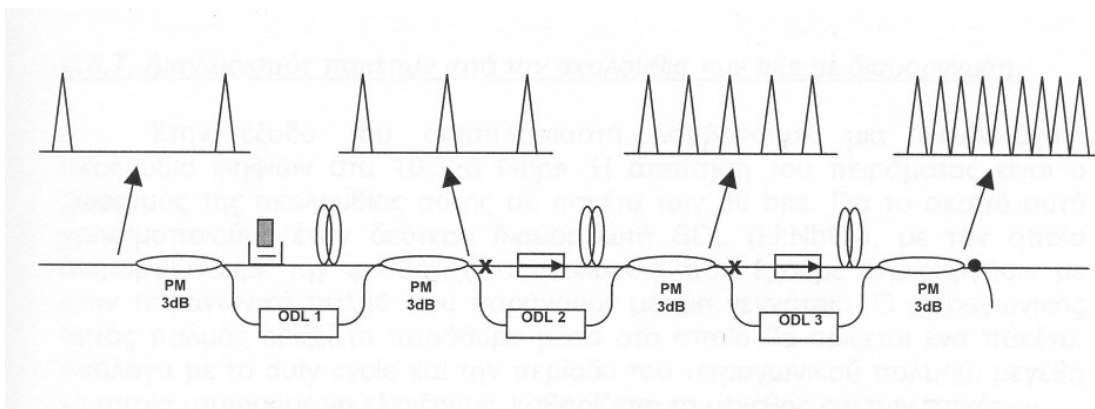
Σχήμα 3.7: Ηλεκτροοπτικός Διαμορφωτής

Με τη διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω μπορούμε να ‘γράψουμε’ τα μηδενικά μίας οποιασδήποτε ακολουθίας από bits πάνω στην αρχική παλμοσειρά.

Στην πειραματική διάταξη σαν είσοδος επελέγη μία Ψευδο-Τυχαία Ακολουθία (Pseudo-Random Bit Sequence – PRBS) 2^7-1 που παρήχθη από κατάλληλο όργανο PRBS Generator. Έτσι καταφέραμε να κατασκευάσουμε ένα οπτικό σήμα PRBS στα 1.2907264 GHz, το οποίο στη συνέχεια ενισχύθηκε από έναν ενισχυτή EDFA.

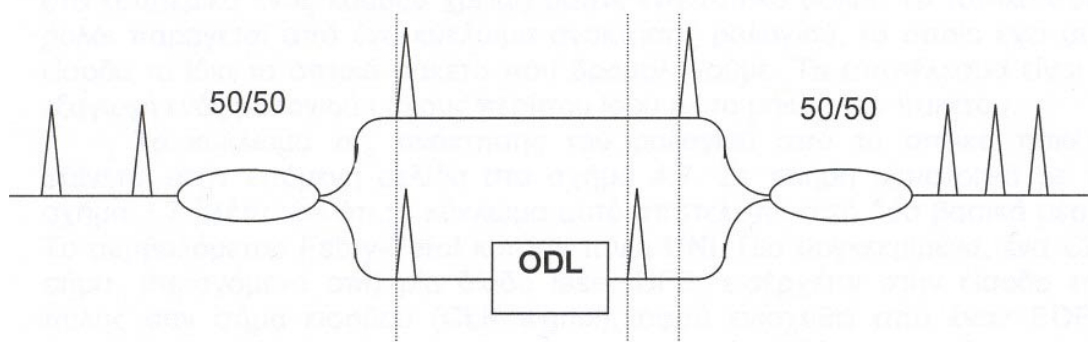
Οκταπλασιασμός Συχνότητας

Τα οπτικά πακέτα που θέλουμε να δημιουργήσουμε έχουν συχνότητα 10 Gbps. Η Ψευδο-Τυχαία Ακολουθία όμως που προκύπτει από τον διαμορφωτή έχει συχνότητα 1.2907264 GHz. Συνεπώς πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια διάταξη που να πολλαπλασιάζει το ρυθμό μετάδοσης. Μία τέτοια διάταξη είναι ο οκταπλασιαστής συχνότητας που έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο. Κάνοντας χρήση κατευθυντικών συζευκτών και οπτικών γραμμών καθυστέρησης (optical delay lines – ODL), ο οκταπλασιαστής διπλασιάζει κάθε φορά τη συχνότητα της ακολουθίας. Η εξέλιξη του σήματος εισόδου φαίνεται στο Σχήμα 3.8 .



Σχήμα 3.8: Η μορφή των παλμών στον οκταπλασιαστή

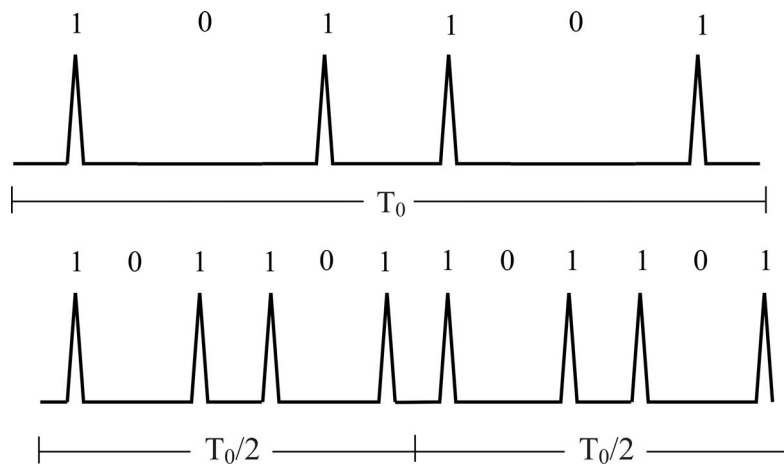
Στην ουσία, ένας οκταπλασιαστής αποτελείται από τρεις διπλασιαστές σε σειρά. Η μορφή του διπλασιαστή φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Το αρχικό σήμα εισάγεται σε ένα συζεύκτη 50/50, όπου χωρίζεται σε δύο ίσες συνιστώσες. Η μία από αυτές υφίσταται μεταβλητή καθυστέρηση καθώς διαδίδεται μέσω της ODL, ενώ η άλλη διαδίδεται κανονικά χωρίς να υποστεί καμία καθυστέρηση. Έτσι, όταν οι δύο συνιστώσες συμβάλλουν στον δεξιό συζεύκτη (Σχήμα 3.9) τότε στην έξοδο αυτού εμφανίζονται δύο αντίγραφα του αρχικού παλμού με επιθυμητή χρονική απόσταση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο διπλασιασμός της συχνότητας.



Σχήμα 3.9: Μορφή διπλασιαστή

Ο οπτικός χρονικός καθυστερητής (ODL) είναι ένα παθητικό στοιχείο που έχει στο εσωτερικό του διάφορους καθρέφτες. Το φως ανακλάται στους καθρέφτες και έτσι αυξάνεται η απόσταση που διανύει, οπότε προστίθεται μια χρονική καθυστέρηση στο οπτικό σήμα. Με ένα ρυθμιστή μπορούμε να ελέγξουμε της γωνίες των καθρεπτών αυτών και επομένως να μεταβάλλουμε τον οπτικό δρόμο που θα διανύσει ο παλμός στον ODL λόγω ανακλάσεων, άρα και τη χρονική καθυστέρηση που θα εισαχθεί τελικά.

Στη διάταξη του διπλασιαστή εισάγεται μία ψευδοτυχαία ακολουθία PRBS με συγκεκριμένη περίοδο, που στην περίπτωση μας ήταν $2^7-1=127$ bits. Η παραγόμενη ακολουθία ακολουθεί το ίδιο πρότυπο, είναι δηλαδή και αυτή PRBS 2^7-1 , σε διπλάσια όμως συχνότητα. Αυτό επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας κατάλληλα τις καθυστερήσεις στις οπτικές γραμμές ODL. Θα εξηγήσουμε τη λειτουργία του διπλασιαστή χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα. Έστω ότι θέλουμε να διπλασιάσουμε ένα σήμα συχνότητας 1,25 GHz (περίοδος 800 psec) που ακολουθεί πρότυπο περιόδου 6 bits (διάρκεια $T_0 = 4,8$ nsec), όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Το επιθυμητό αποτέλεσμα θα έχει συχνότητα 2,5 GHz, οπότε σε μία περίοδο T_0 της εισόδου το πρότυπο θα επαναλαμβάνεται 2 φορές. Συνδέοντας άλλους δύο τέτοιους διπλασιαστές επιτυγχάνουμε τελικά τον οκταπλασιασμό της συχνότητας.

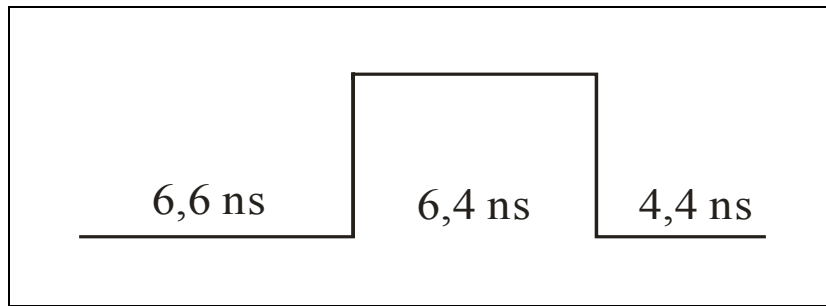


Σχήμα 3.10: Διπλασιασμός συχνότητας μιας ακολουθίας 6 bit περιόδου T_0

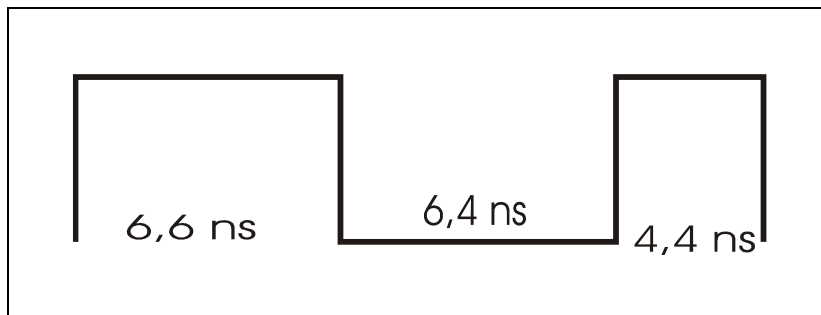
Δημιουργία των Πακέτων Πληροφορίας με Διαμόρφωση

Στην έξοδο του οκταπλασιαστή συχνότητας εμφανίζεται μία οπτική PRBS σε ρυθμό 10.3258112 GHz. Αυτό που χρειαζόμαστε όμως στο πείραμα είναι να χωριστεί η

ακολουθία αυτή σε πακέτα μεταβλητού μήκους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε ένα δεύτερο διαμορφωτή Li:NbO_3 με τον οποίο διαμορφώνουμε την ψευδοτυχαία ακολουθία που έχουμε δημιουργήσει, με έναν κατάλληλο παλμό που παράγουμε με τη βοήθεια ειδικής γεννήτριας pattern generator. Η γεννήτρια αυτή μπορεί να κατασκευάσει ένα σήμα περιόδου T_{Π} το οποίο περιέχει έναν παλμό, το πλάτος T_{PL} και η θέση του οποίου μπορούν να ρυθμιστούν κατά βούληση. Η μορφή του σήματος αυτού φαίνεται στο *Σχήμα 3.11 α)*. Παίρνοντας το συμπλήρωμά του από την έξοδο Invert προκύπτει το επιθυμητό σήμα – *Σχήμα 3.11 β)*.

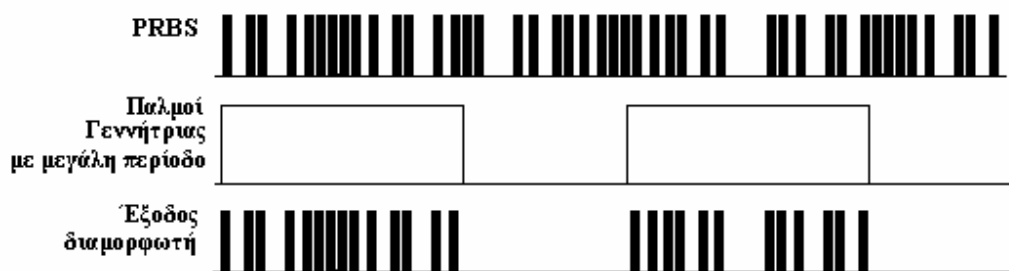


Σχήμα 3.11 α): Το σήμα που κατασκευάστηκε στην pattern generator



Σχήμα 3.11 β): Η είσοδος του δεύτερου διαμορφωτή

Οι παλμοί αυτοί ορίζουν το παράθυρο μέσα στο οποίο θα υπάρχει ένα πακέτο. Έξω από αυτό το παράθυρο το σήμα μηδενίζεται. Ανάλογα με τις παραμέτρους που εισάγουμε στη γεννήτρια καθορίζεται το μήκος του κάθε πακέτου καθώς και η θέση του σε διαφορετικά χρονικά σημεία της ακολουθίας.



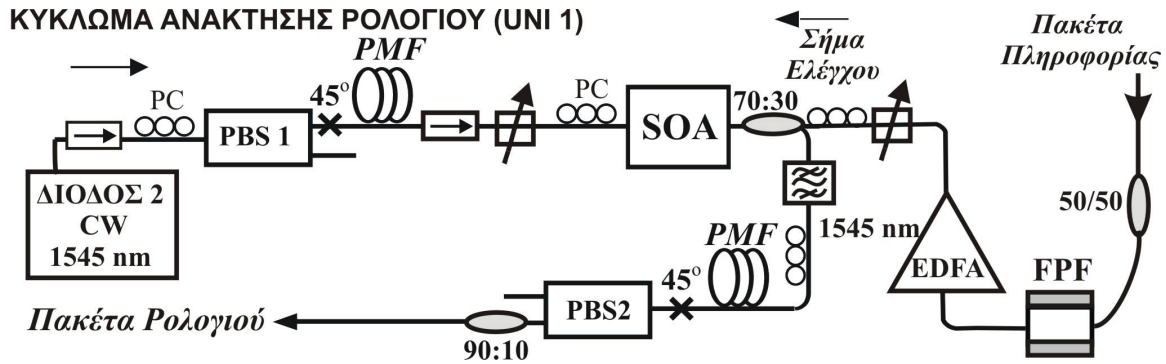
Σχήμα 3.12: Η λειτουργία του δεύτερου διαμορφωτή

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο κατασκευάζουμε και τα ‘πακέτα’ που αντιπροσωπεύουν την καινούρια επικεφαλίδα, χρησιμοποιώντας και τρίτο διαμορφωτή, στον οποίο εισάγεται η ίδια PRBS που έχει όμως υποστεί διαφορετική καθυστέρηση.

Το σήμα που προκύπτει τελικά αποτελεί επαλληλία της παλμοσειράς, της ψευδοτυχαίας ακολουθίας PRBS και του σήματος που ορίζει τα πακέτα (Σχήμα 3.11 β). Προκειμένου να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε το αποτέλεσμα στον παλμογράφο, η συχνότητα που χρησιμοποιούμε για να κάνουμε trigger πρέπει να είναι υποπολλαπλάσια της συχνότητας καθενός από τα παραπάνω σήματα. Συνεπώς οι τρεις αυτές συχνότητες πρέπει να είναι πολλαπλάσια η μια της άλλης. Αυτό το κριτήριο μας οδήγησε στην επιλογή του ρυθμού των 10.3258112 GHz.

3.2.2 Κύκλωμα Ανάκτησης Ρολογιού

Προκειμένου να επιτύχουμε την αφαίρεση και επανεισαγωγή της επικεφαλίδας των πακέτων, χρειαζόμαστε ένα τοπικό ρολόι. Το ρολόι αυτό παράγεται από ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού. Έτσι τα οπτικά πακέτα αφού κατασκευαστούν οδηγούνται σε έναν συζεύκτη 50/50, για να καταλήξουν και στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και στον 2×2 διακόπτη μεταγωγής (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού

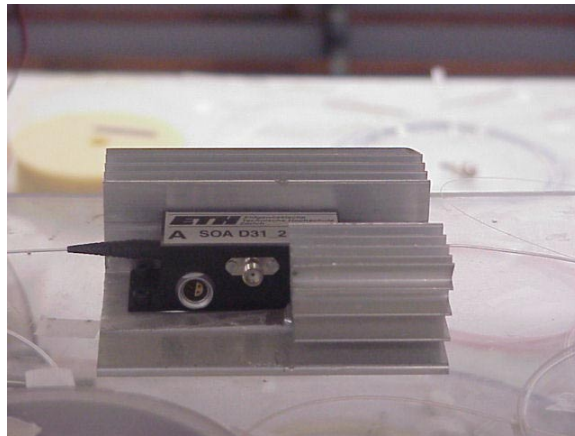
Όπως φαίνεται και στο προηγούμενο σχήμα, το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού αποτελείται από δύο βασικά μέρη, το συμβολόμετρο Fabry-Perot και την πύλη UNI. Η λειτουργία της διάταξης clock recovery έχει περιγραφεί εκτενώς στην παράγραφο 2.5.0 . Το φίλτρο Fabry-Perot που χρησιμοποιήθηκε είχε finesse 20.7 και FSR ίσο με τη συχνότητα λειτουργίας, ενώ εισάγει επιπλέον απώλειες 12 dB. Για το λόγο αυτό η εξοδός του επανενισχύεται με τη βοήθεια ενός ενισχυτή EDFA και οδηγείται μέσω ενός εξασθενητή και ενός ελεγκτή πόλωσης σε έναν coupler 70/30. Το 30% της ισχύος κατευθύνεται στον SOA, ενώ το άλλο 70% χρησιμεύει σαν monitor. Ο εξασθενητής είναι απαραίτητος ώστε να μπορούμε να ελέγξουμε την ισχύ που εισέρχεται σε ένα ευαίσθητο στοιχείο όπως ο SOA.

Η πύλη UNI χρειάστηκε να ρυθμιστεί έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργήσει στη συχνότητα των 10 Gbps. Έτσι υπολογίστηκε κατάλληλα το μήκος της PM ίνας, που είναι υπεύθυνη για το χρονικό διαχωρισμό των δύο συνιστωσών του σήματος. Οι δύο συνιστώσες πρέπει να απέχουν μεταξύ τους μισή περίοδο, δηλαδή 50 ps. Με δεδομένο ότι η διπλοθλαστικότητα της PM ίνας που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1,87 ps/m, χρειάστηκαν 28 m ίνας.

Η πύλη έχει σαν είσοδο ένα σήμα CW που παράγεται από ένα DFB laser στα 1545 nm και ενισχύεται από έναν ενισχυτή ίνας ερβίου. Στη συνέχεια το σήμα εισέρχεται σε έναν πολωτικό διαχωριστή δέσμης (PBS) που στην είσοδό του έχει έναν ελεγκτή πόλωσης (PC) ώστε να γίνει παράλληλο με τον άξονα του PBS. Η διάταξη αυτή έχει σαν σκοπό να στρέψει την πόλωση του σήματος CW σε έναν συγκεκριμένο άξονα, καθώς ακολουθεί το

splice των 45° . Κατόπιν έχουν συνδεθεί ένας απομονωτής και ένας εξασθενητής ώστε να καταπιέζονται τυχόν ανακλάσεις αλλά και να ελέγχεται η ισχύς που εισέρχεται στον SOA, για την προστασία του. Η ύπαρξη ενός ακόμα ελεγκτή πόλωσης στο σημείο αυτό είναι απαραίτητη, ώστε να μπορεί να διεγερθεί κατάλληλα στον SOA το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει από την αλληλεπίδραση κυμάτων ίδιου μήκους κύματος και κάθετων πολώσεων ή ίδιας πόλωσης και διαφορετικού μήκους κύματος. Έτσι πειραματικά χρειάζεται ο ελεγκτής πόλωσης ως δυναμικός τρόπος μεταβολής της πόλωσης του Σήματος Ελέγχου, ώστε για δεδομένη ισχύ του σήματος αυτού να μεγιστοποιείται η στροφή φάσης που επιτυγχάνεται.

Στο σημείο αυτό, το σήμα CW εισέρχεται πλέον στο ενεργό στοιχείο του UNI, τον SOA. Πρόκειται για έναν οπτικό ενισχυτή InGaAsP/InP, μήκους 1,5 mm και κέρδους ασθενούς σήματος 27 dB σε μήκος κύματος 1549,4 nm. Το κέρδος του παρουσιάζει μια διακύμανση της τάξης των 3 dB στους δύο άξονες (πολωτική εξάρτηση). Τέλος, ο ενισχυτής έχει σταθερά χρόνου ανάκαμψης κέρδους 100 ps όταν τροφοδοτείται με ρεύμα 700mA.



Σχήμα 3.14: Ο Ημιαγώγιμος Οπτικός Ενισχυτής (SOA) που χρησιμοποιήθηκε

Μετά τον SOA έχει τοποθετηθεί απομονωτής ώστε να αποκόπτονται τυχόν ανακλάσεις, καθώς και φίλτρο εύρους 2 nm το οποίο απορρίπτει τον θόρυβο του ενισχυτή. Ακολουθεί πάλι PM ίνα ίδιου μήκους με πριν αλλά με τους άξονές της ανεστραμμένους, και ένα PBS που μετά το splice των 45° διαχωρίζει το σήμα στις δύο

νέες κάθετες πολωτικές διευθύνσεις κατευθύνοντάς το στις δύο εξόδους (switched και unswitched port).

Οι παλμοί στην έξοδο της οπτικής πύλης UNI έχουν εύρος περίπου 40 ps, λόγω της αργής ανάκτησης κέρδους του ενισχυτή. Όμως, εξαιτίας της διαδικασίας παραγωγής τους με βαθμιαία στροφή φάσης λόγω μεταβολής του δείκτη διάθλασης του ημιαγωγού, οι παλμοί αυτοί εμφανίζουν μία ολίσθηση συχνότητας (chirp). Έτσι είναι δυνατή η συμπίεσή τους με χρήση DCF ίνας, όπως περιγράφηκε και στην προηγούμενη παράγραφο. Τοποθετώντας μήκος DCF ίνας 1 km πήραμε στην έξοδο παλμούς χρονικού εύρους 27 ps.

3.2.3 Κύκλωμα 2×2 Διακόπτη Οπτικής Μεταγωγής

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος του κυκλώματος που υλοποιήσαμε πραγματοποιείται η αντικατάσταση της παλιάς επικεφαλίδας των πακέτων από τη νέα, με τη βοήθεια του 2×2 Διακόπτη Οπτικής Μεταγωγής, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.1 . Η διάταξη που κατασκευάσαμε φαίνεται στο *Σχήμα 3.15* . Το ενεργό στοιχείο είναι και εδώ το UNI, τροποποιημένο ώστε να δέχεται δύο αντίθετα διαδιδόμενα σήματα εισόδου.

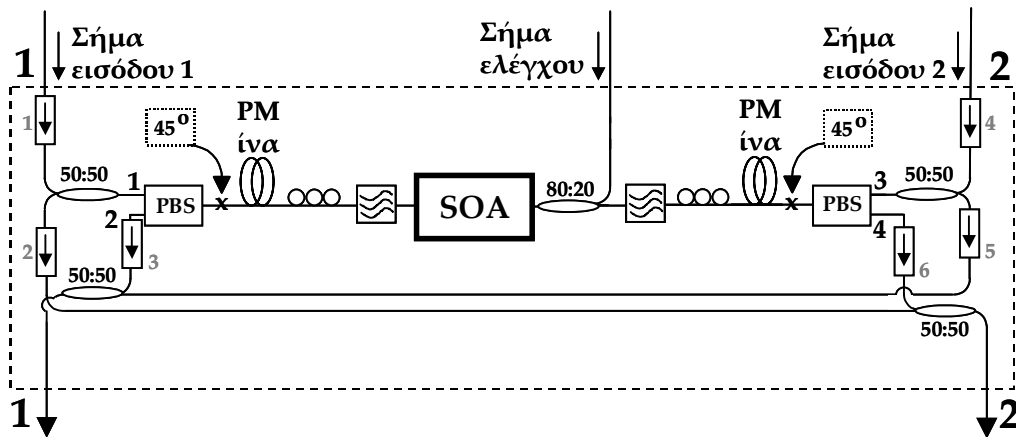


Σχήμα 3.15: Εργαστηριακή Υλοποίηση του UNI

Η λειτουργία του 2×2 Διακόπτη Οπτικής Μεταγωγής έχει περιγραφεί λεπτομερώς στην παράγραφο 2.6 . Στο *Σχήμα 2.22* παρατηρούμε ότι οι 4 θύρες των διαχωριστών πόλωσης

δε συμπίπτουν με τις 4 θύρες του 2×2 διακόπτη οπτικής μεταγωγής. Όμως, υπάρχει τρόπος με κατάλληλη συνδεσμολογία των θυρών των διαχωριστών πόλωσης με συζεύκτες 50/50, να λειτουργήσει ο διακόπτης ακριβώς σαν 2×2 διακόπτης μεταγωγής. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.16 . Αναφερόμενοι στις θύρες των διαχωριστών πόλωσης ισχύει ο παρακάτω πίνακας:

Κατάσταση Διακόπτη	Θύρα από την οποία εξέρχεται το Σήμα Εισόδου 1	Θύρα από την οποία εξέρχεται το Σήμα Εισόδου 2
Μη Μεταγωγής	4	2
Μεταγωγής	3	1



Σχήμα 3.16: Η διάταξη του 2×2 Διακόπτη Οπτικής Μεταγωγής

Όμως για να λειτουργεί ο διακόπτης αυτός ως 2×2 διακόπτης οπτικής μεταγωγής, πρέπει το Σήμα Εισόδου 1 στην κατάσταση μη μεταγωγής και το Σήμα Εισόδου 2 στην κατάσταση μεταγωγής να εξέρχονται από την ίδια θύρα. Αντίστοιχα το Σήμα Εισόδου 1 στην κατάσταση μεταγωγής και το Σήμα Εισόδου 2 στην κατάσταση μη μεταγωγής πρέπει να εξέρχονται από την άλλη θύρα. Για το σκοπό αυτό ενώθηκε η θύρα 1 με τη θύρα 4 καθώς και η θύρα 2 με τη θύρα 3. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν άλλοι δύο συζεύκτες 50/50 πριν τις θύρες 1 και 3 των διαχωριστών πόλωσης έτσι ώστε, σε κατάσταση

μεταγωγής, να συνδυάζεται η είσοδος των σημάτων εισόδου 1 και 2 με την έξοδο των σημάτων 2 και 1 αντίστοιχα, από τις ίδιες θύρες. Για τον ίδιο λόγο προστέθηκαν και οι απομονωτές 1 και 4, έτσι ώστε, όταν ο διακόπτης λειτουργεί σε κατάσταση μεταγωγής, να μην εξέρχονται από τις θύρες εισόδου του διακόπτη 1 και 2 τα μεταγόμενα σήματα. Οι υπόλοιποι 4 απομονωτές (2, 3, 5 και 6 στο Σχήμα 3.16) χρησιμεύουν για την αποκοπή τυχόν ανακλάσεων από τις εξόδους 1 και 2 του διακόπτη.

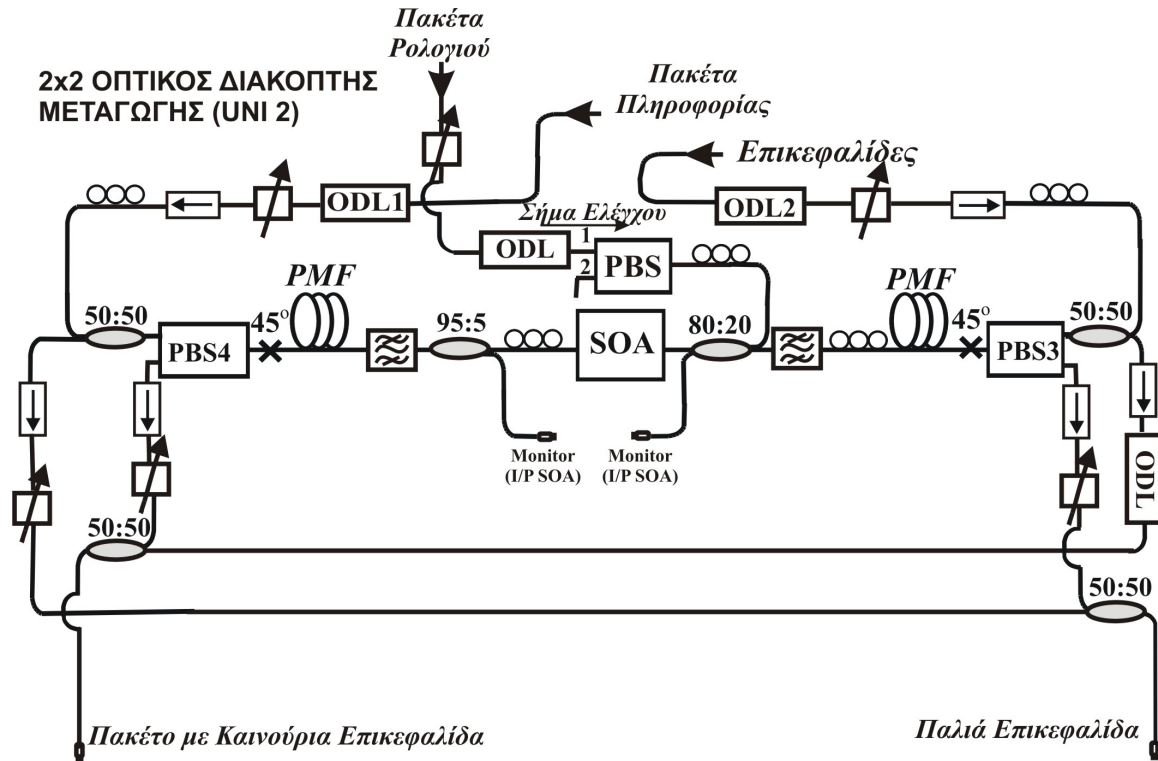
Στην κατάσταση μη μεταγωγής, το σήμα εισόδου 1 εξέρχεται από τη θύρα 4 του δεξιού διαχωριστή πόλωσης και μέσω του συζεύκτη 50/50 από τη θύρα εξόδου 1 του διακόπτη, ενώ το σήμα εισόδου 2 εξέρχεται από τη θύρα 2 του αριστερού διαχωριστή πόλωσης και μέσω του συζεύκτη 50/50 από τη θύρα εξόδου 2 του διακόπτη.

Στην κατάσταση μεταγωγής, το σήμα εισόδου 1 εξέρχεται από τη θύρα 3 του δεξιού διαχωριστή πόλωσης και μέσω του άλλου συζεύκτη 50/50 από τη θύρα εξόδου 2 του διακόπτη, ενώ το σήμα εισόδου 2 εξέρχεται από τη θύρα 1 του αριστερού διαχωριστή πόλωσης και μέσω του συζεύκτη 50/50 από τη θύρα εξόδου 1 του διακόπτη.

Με τη βοήθεια των συζευκτών ο προηγούμενος πίνακας μπορεί να μετατραπεί ως εξής:

Κατάσταση Διακόπτη	Θύρα από την οποία εξέρχεται το Σήμα Εισόδου 1	Θύρα στην οποία εμφανίζεται το Σήμα Εισόδου 1	Θύρα από την οποία εξέρχεται το Σήμα Εισόδου 2	Θύρα από την οποία εμφανίζεται το Σήμα Εισόδου 2
Μη Μεταγωγής	4	4	2	2
Μεταγωγής	3	2	1	4

Στο Σχήμα 3.17 φαίνεται το κύκλωμα του 2×2 διακόπτη οπτικής μεταγωγής όπως ακριβώς υλοποιήθηκε στο εργαστήριο. Τα σήματα εισόδου 1 και 2 έχουν αντίθετη φορά διάδοσης. Η ομοιότητα στην υλοποίηση του UNI με αυτήν του προηγούμενου κυκλώματος ανάκτησης ρολογιού είναι φανερή. Οι πολωτικοί διαχωριστές δέσμης σε συνδυασμό με τους ελεγκτές πόλωσης έχουν και εδώ το ρόλο της στροφής των σημάτων σε συγκεκριμένη πόλωση, ενώ οι εξασθενητές ελέγχουν την ισχύ που εισέρχεται στον SOA. Τα φίλτρα έχουν διπλό ρόλο: και εδώ καταπιέζουν το θόρυβο που παράγει ο ενισχυτής, ενώ το αριστερό χρησιμεύει και για να αποκόπτει το σήμα ελέγχου που διαδίδεται στην ίδια κατεύθυνση με το σήμα εισόδου 2.



Σχήμα 3.17: Το κύκλωμα του 2×2 διακόπτη οπτικής μεταγωγής
όπως υλοποιήθηκε στο εργαστήριο

Ο ρόλος των οπτικών γραμμών καθυστέρησης είναι η επίτευξη του συγχρονισμού των δύο σημάτων εισόδου και του σήματος ελέγχου. Μέσω των ODL, η λειτουργία των οποίων έχει αναλυθεί στην παράγραφο 3.2.1, μπορούμε να εισάγουμε καθυστέρηση έως και 300 ps, δηλαδή όσο 3 παλμοί, αφού η περίοδος του σήματός μας είναι περίπου 100 ps. Δεδομένου ότι ο δείκτης διάθλασης μέσα στην ίνα είναι περίπου $n = 1,5$ η ταχύτητα των παλμών μέσα στην οπτική ίνα θα είναι:

$$u = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,5} = 2 \cdot 10^8 \text{ m / sec}$$

οπότε τα 300 ps χρονικής καθυστέρησης του ODL αντιστοιχούν σε μήκος ίνας:

$$d = u \cdot t = 2 \cdot 10^8 \cdot 300 \cdot 10^{-12} = 6 \text{ cm}$$

Όμως, η διαφορά στον οπτικό δρόμο που διανύουν τα πακέτα από τη διάταξη της πηγής έως τον 2×2 διακόπτη σε σχέση με τα ρολόγια που παράγονται από αυτά είναι

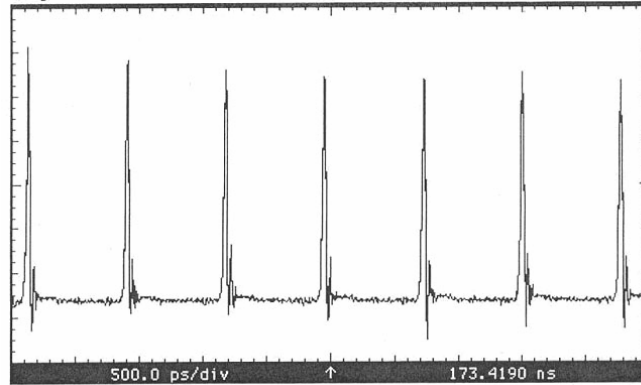
μεγαλύτερη από 6 cm, καθώς στη μία διαδρομή παρεμβάλλεται και το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού. Σαν αποτέλεσμα, η διαδικασία συγχρονισμού του ρολογιού με το οπτικό πακέτο δε μπορεί να περιοριστεί στη ρύθμιση του ODL, αλλά επιβάλλεται να προσθέσουμε οπτική ίνα στην είσοδο της πύλης UNI, ώστε η χρονική διαφορά που επιβάλλει το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού να αντισταθμίζεται εν μέρει από την καθυστέρηση που προσθέτει η επιπλέον ίνα. Τελικά πρέπει η σχετική καθυστέρηση του ρολογιού ως προς τα δύο σήματα εισόδου να είναι τόση, όσα και τα bits της επικεφαλίδας, όπως ακριβώς περιγράφηκε ο συγχρονισμός στην παράγραφο 3.1 .

3.3 Αποτελέσματα του Πειράματος

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε και θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα που πήραμε από την πειραματική διάταξη αφαίρεσης/επαναισισαγωγής επικεφαλίδας στα 10 Gbps. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, το κύκλωμα που κατασκευάστηκε αποτελείται από τρία μέρη. Τη γεννήτρια των σημάτων, το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και τον 2×2 Διακόπτη Οπτικής Μεταγωγής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ξεχωριστά για το κάθε κομμάτι.

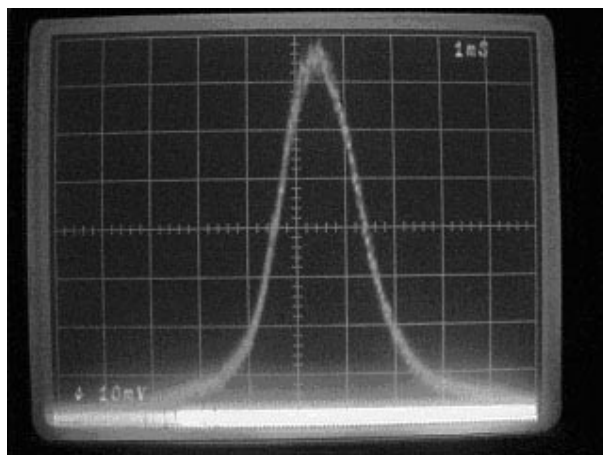
3.3.1 Γεννήτρια οπτικών πακέτων

Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2.1 , η δίοδος DFB στα 1549.4 nm οδηγείται από συνδυασμό DC ρεύματος και RF στα 1.2907264 GHz. Η μορφή του σήματος που παράγεται φαίνεται στο *Σχήμα 3.18* , μετά τη διάταξη του συμπίεστή.



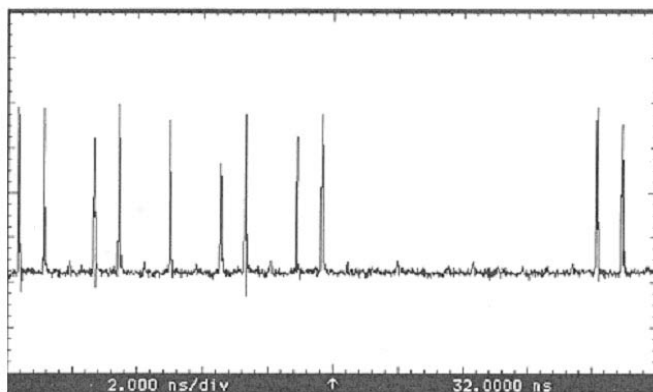
Σχήμα 3.18: Η έξοδος της διόδου (παλμοσειρά στα 1.2907264 GHz) μετά το συμπίεστή (κλίμακα παλμογράφου 500 ps/div)

Η διακριτική ικανότητα του παλμογράφου δεν είναι επαρκής ώστε να μπορούμε να δούμε με λεπτομέρεια το σχήμα των παλμών. Για την παρατήρηση πολύ στενών παλμών χρησιμοποιείται ο αυτοσυσχετιστής. Το όργανο αυτό χρησιμοποιεί τη διαδικασία της παραγωγής της δεύτερης αρμονικής (Second Harmonic Generation – SHG) για τον υπολογισμό με αμιγώς οπτικό τρόπο της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης των προς μέτρηση παλμών. Η συνάρτηση αυτή μπορεί στη συνέχεια να αποσυνελιχθεί για τον υπολογισμό της πραγματικής διάρκειας των παλμών. Για παλμούς Gauss, δηλαδή της μορφής $\exp\left[-\left(t/T\right)^2\right]$ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ισχύος είναι $\exp\left[-\left(t/\sqrt{2} \cdot T\right)^2\right]$. Ο λόγος μεταξύ του εύρους ημισείας ισχύος του αυτοσυσχετισμένου παλμού Gauss σε σχέση με το εύρος ημισείας ισχύος του αρχικού παλμού είναι 1,414. Έτσι μπορούμε από την ένδειξη του αυτοσυσχετιστή να υπολογίσουμε το πραγματικό πλάτος του παλμού. Η εικόνα που είδαμε στον αυτοσυσχετιστή φαίνεται στο Σχήμα 3.19 .



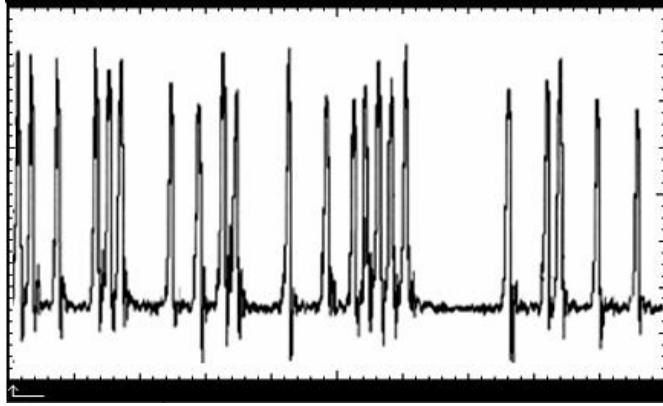
Σχήμα 3.19: Η αυτοσυσχέτιση των παλμών που παρήγαγε η δίοδος DFB. Η κλίμακα του παλμογράφου είναι 5,88 psec/div.

Στη συνέχεια, η παλμοσειρά αυτή εισέρχεται στον διαμορφωτή Li:NbO_3 όπου μετατρέπεται σε PRBS 2^7-1 . Η διαμορφωμένη ακολουθία φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



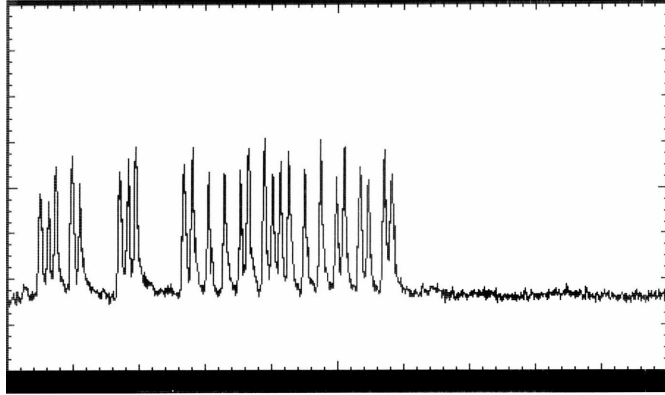
Σχήμα 3.20: Η διαμορφωμένη PRBS 2^7-1 στα 1.2907264 GHz (κλίμακα παλμογράφου 2 ns/div)

Η διαμορφωμένη ακολουθία στα 1.2907264 GHz εισέρχεται στον οκταπλασιαστή συχνότητας, όπου με τη βοήθεια συζευκτών και γραμμών καθυστέρησης μετατρέπεται σε οπτική PRBS με ρυθμό 10.3258112 GHz. Η μορφή της στον παλμογράφο φαίνεται στο Σχήμα 3.21 .

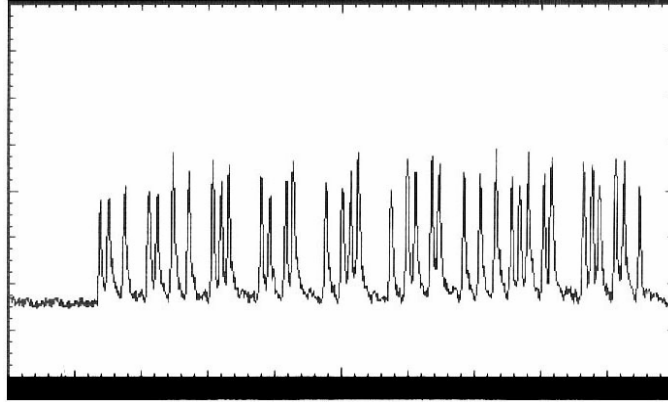


*Σχήμα 3.21: Η διαμορφωμένη PRBS 2^7-1 στα 10.3258112 GHz
(κλίμακα παλμογράφου 500 ps/div)*

Κατόπιν, το σήμα περνάει από το δεύτερο διαμορφωτή Li:NbO_3 , με τη βοήθεια του οποίου δημιουργούνται τα πακέτα. Κατακευάσαμε δύο ανισομεγέθη πακέτα, διάρκειας το ένα 4,4 ns και το άλλο 6,6 ns, με διάστημα 6.4 ns μεταξύ τους. Τα τελικά πακέτα φαίνονται παρακάτω.

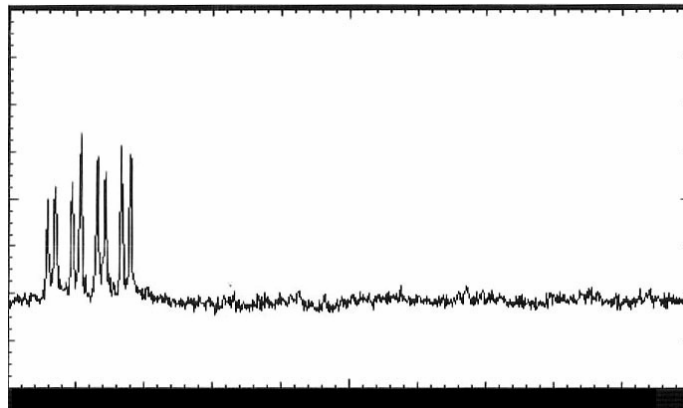


Σχήμα 3.22: Το 'μικρό' πακέτο (κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)

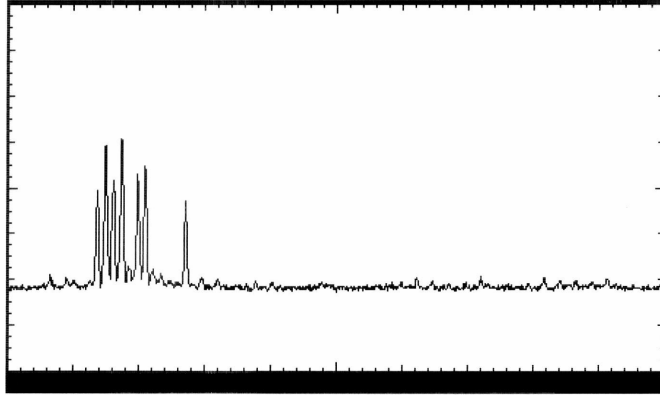


Σχήμα 3.23: Το 'μεγάλο' πακέτο (κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.1 , στο κύκλωμα της γεννήτριας παράγονται και οι καινούριες επικεφαλίδες, που θα αντικαταστήσουν τις παλιές στον 2×2 οπτικό διακόπτη.



Σχήμα 3.24: Η καινούρια επικεφαλίδα του 'μικρού' πακέτου
(κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)

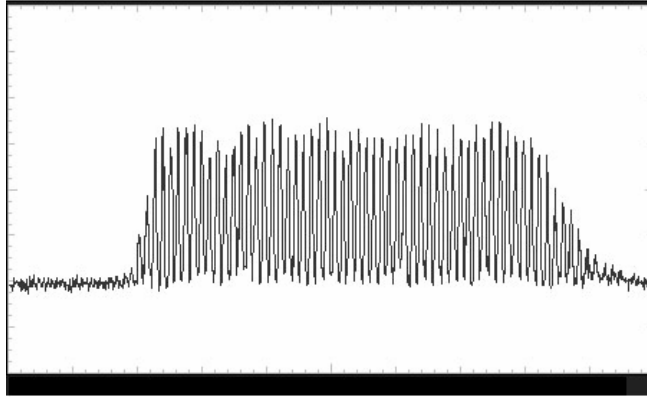


*Σχήμα 3.25: Η καινούρια επικεφαλίδα του ‘μεγάλου’ πακέτου
(κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)*

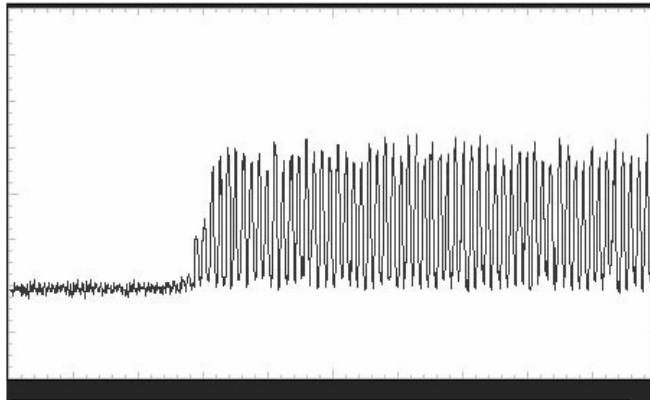
Τα παραπάνω σήματα που κατασκευάστηκαν στο τμήμα της γεννήτριας οπτικών πακέτων οδηγούνται, μέσω ενός συζεύκτη 50/50, στο κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού και στον 2×2 οπτικό διακόπτη μεταγωγής. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που πήραμε από αυτά τα δύο κομμάτια της διάταξης.

3.3.2 Κύκλωμα Ανάκτησης Ρολογιού

Τα πακέτα που κατασκευάστηκαν από τη οπτική γεννήτρια διέρχονται από ένα φίλτρο Fabry-Perot και στη συνέχεια εισέρχονται ως σήμα ελέγχου σε μία διάταξη UNI. Το σήμα εισόδου του UNI είναι ένα συνεχές σήμα CW στα 1545 nm, πάνω στο οποίο ‘γράφεται’ το σήμα ελέγχου. Τα ‘πακέτα ρολογιού’ που παρήχθησαν από κάθε πακέτο πληροφορίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.



*Σχήμα 3.26: Το ρολόι που ανακτήθηκε από το 'μικρό' πακέτο
(κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)*



*Σχήμα 3.27: Το ρολόι που ανακτήθηκε από το 'μεγάλο' πακέτο
(κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)*

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε τη διαδικασία ανάκτησης του ρολογιού από το οπτικό πακέτο. Στη θέση των μηδενικών έχουν δημιουργηθεί άσσοι με τη βοήθεια του συμβολομέτρου Fabry-Perot, οι οποίοι στη συνέχεια εξομαλύνονται ως προς το πλάτος τους περνώντας από το UNI. Ο χρόνος ανύψωσης (rise time) του φίλτρου είναι εμφανής στα σχήματα και ισούται με 2 bits. Ο χρόνος πτώσης (fall time) στο $1/e$ λόγω των συνεχών ανακλάσεων στο φίλτρο και μετά το πέρας του οπτικού πακέτου, είναι περίπου 8 bits, ενώ η μέγιστη διαμόρφωση πλάτους δεν ξεπερνά το 1,5 dB. Η οπτική ισχύς του σήματος CW που απαιτήθηκε για το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού ήταν 0,8 mW και η μέση ενέργεια του σήματος ελέγχου ανά παλμό ήταν 120 fJ. Αυτές οι δύο παράμετροι

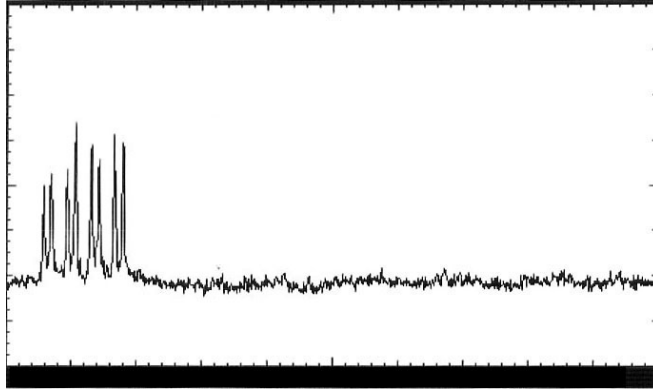
καθορίζουν το βαθμό κορεσμού του SOA, προκειμένου να επιτύχουν οι παλμοί του σήματος ελέγχου να επιβάλλουν μία διαφορά φάσης περίπου 180° μεταξύ των δύο συνιστωσών του σήματος CW.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος ανύψωσης του ρολογιού είναι μικρότερος από το χρόνο ζωής του φίλτρου Fabry-Perot. Αυτό οφείλεται στις ιδιότητες κορεσμού που εμφανίζει ο οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού (SOA). Ο SOA είναι λιγότερο κορεσμένος στην αρχή οπότε μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερο κέρδος στα πρώτα bits του πακέτου. Με αυτόν τον τρόπο, ακόμα και παλμοί μικρής ενέργειας στην αρχή του πακέτου προκαλούν αρκετή στροφή φάσης στις συνιστώσες του CW.

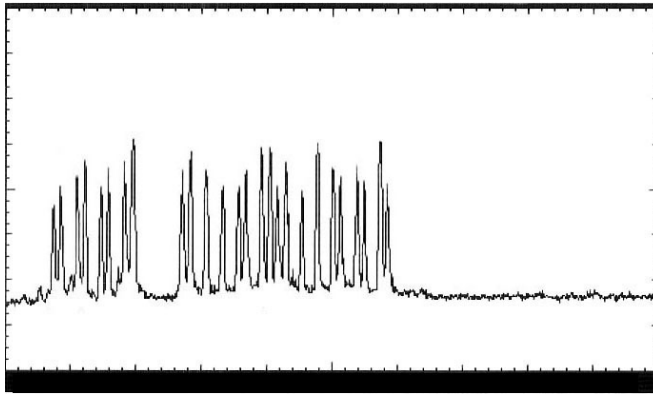
Έχοντας παράγει πολύ ικανοποιητικά ρολόγια από τα δύο πακέτα, τα χρησιμοποιούμε για να ελέγξουμε τον 2×2 διακόπτη οπτικής μεταγωγής, στον οποίο αντικαθιστούμε την παλιά επικεφαλίδα των πακέτων με καινούρια.

3.3.3 2×2 Οπτικός Διακόπτης Μεταγωγής

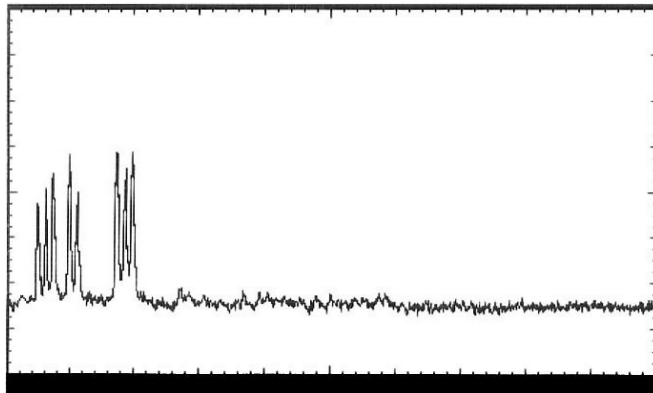
Στον 2×2 Οπτικό Διακόπτη Μεταγωγής εισέρχονται από τη μία είσοδο τα πακέτα της πληροφορίας και από την άλλη οι καινούριες επικεφαλίδες. Το σήμα ελέγχου είναι το ρολόι που κατασκευάστηκε προηγουμένως και έχει υποστεί την κατάλληλη χρονική καθυστέρηση (παράγραφος 3.1).



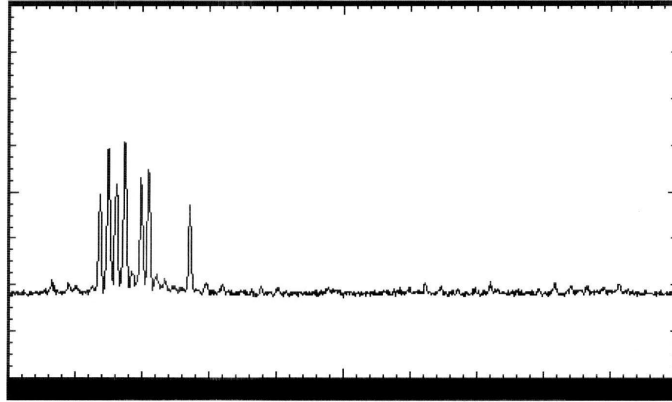
Σχήμα 3.28: Η νέα επικεφαλίδα του 'μικρού' πακέτου όπως εισέρχεται στον 2×2 διακόπτη (κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)



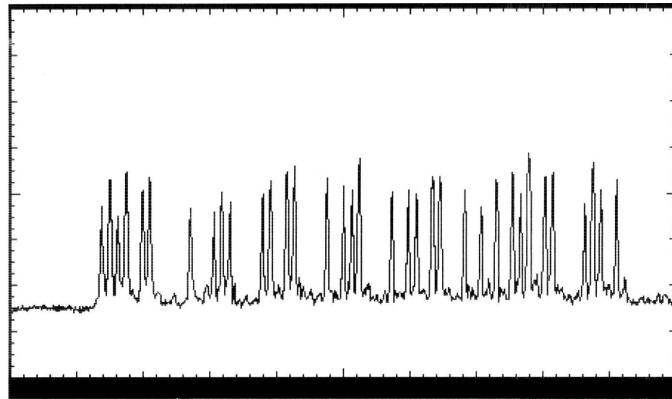
Σχήμα 3.29: Το 'μικρό' πακέτο με την καινούρια επικεφαλίδα (κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)



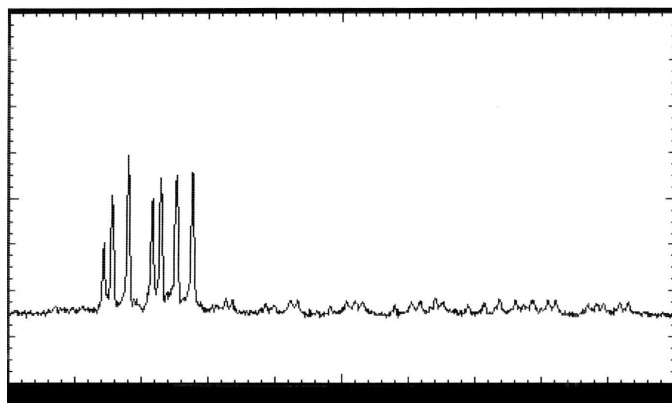
Σχήμα 3.30: Η παλιά επικεφαλίδα του 'μικρού' πακέτου όπως εξέρχεται από τον 2×2 διακόπτη (κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)



Σχήμα 3.31: Η νέα επικεφαλίδα του 'μεγάλου' πακέτου όπως εισέρχεται στον 2×2 διακόπτη (κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)



Σχήμα 3.32: Το 'μεγάλο' πακέτο με την καινούρια επικεφαλίδα (κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)



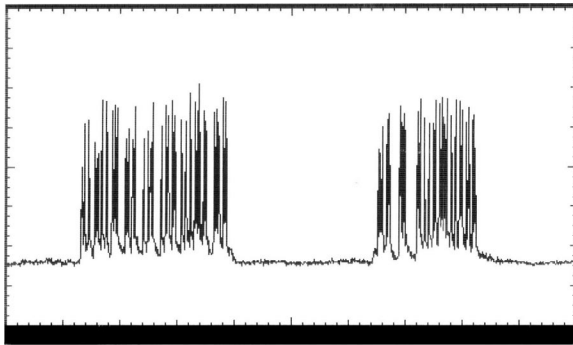
Σχήμα 3.33: Η παλιά επικεφαλίδα του 'μεγάλου' πακέτου όπως εξέρχεται από τον 2×2 διακόπτη (κλίμακα παλμογράφου 800 ps/div)

Η διαφωνία (crosstalk) στις δύο θύρες εξόδου του διακόπτη για την κατάσταση μεταγωγής (cross state) και μή μεταγωγής (bar state) υπολογίστηκε στα -8 dB και -10 dB αντίστοιχα. Η διακύμανση στο πλάτος των παλμών στην έξοδο του κυκλώματος ήταν 1 dB και ήταν όμοια με τη διακύμανση των αρχικών πακέτων. Υπεύθυνες για τη διακύμανση αυτή ήταν ατέλειες στο κύκλωμα του οκταπλασιαστή συχνότητας. Ο 2×2 Οπτικός Διακόπτης Μεταγωγής (exchange bypass switch) λειτουργούσε με μέση ενέργεια παλμών 4 fJ για τα σήματα εισόδου και 28 fJ για το σήμα ελέγχου.

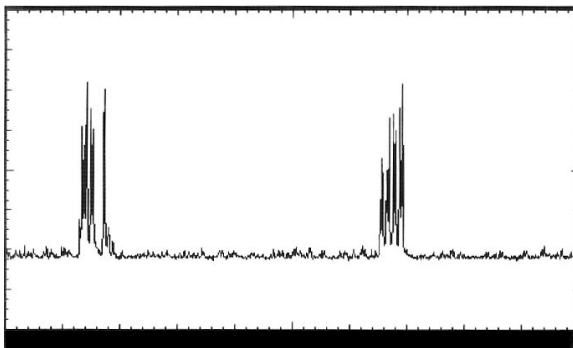
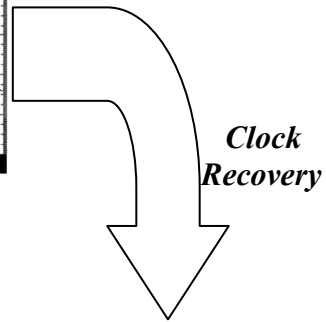
Το κύκλωμα αφαίρεσης/επαναεισαγωγής επικεφαλίδας που κατασκευάστηκε μπορεί να λειτουργήσει και για μεγαλύτερα πακέτα με παρόμοια αποτελέσματα, δεδομένου ότι όλα τα τμήματα της διάταξης λειτουργούν σε επίπεδο bit. Το γεγονός αυτό είναι ένα πλεονέκτημα της υλοποίησής μας, η οποία είναι ανεξάρτητη του μήκους των πακέτων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη πολύ μικρών διαστημάτων guardbands (λόγω του πολύ γρήγορου rise και fall time του ρολογιού μας) μας επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των αποστάσεων ανάμεσα στα πακέτα, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα του δικτύου. Αποτέλεσμα είναι η αποδοτικότερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

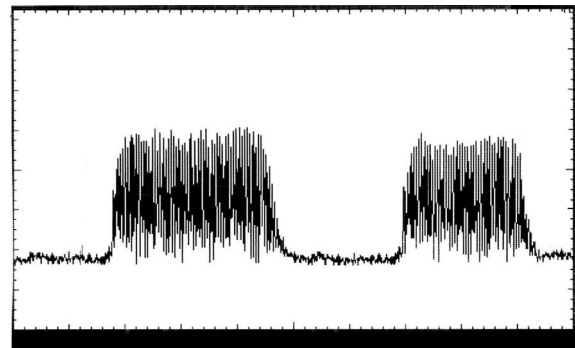
Τέλος, παραθέτουμε κάποιες ακόμα εικόνες από την οθόνη του παλμογράφου σε κλίμακα 2,5 ns/div, όπου φαίνονται και τα δύο πακέτα. Τα στιγμιότυπα αυτά αν και στερούνται πολλές λεπτομέρειες δίνουν μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργίας του κυκλώματος με είσοδο διαδοχικά ανισομεγέθη πακέτα.



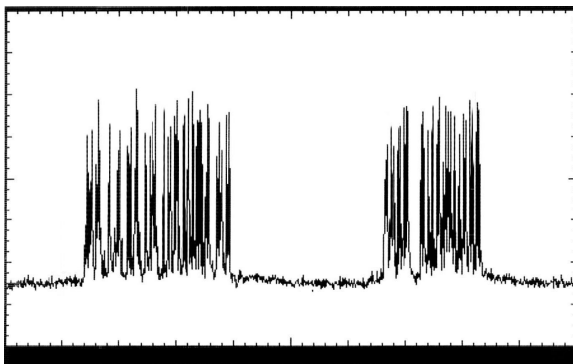
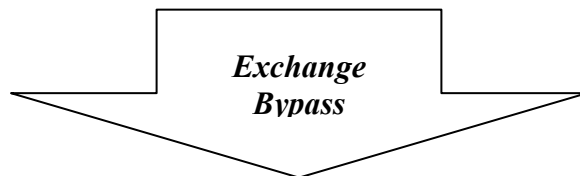
Τα δύο πακέτα εισόδου



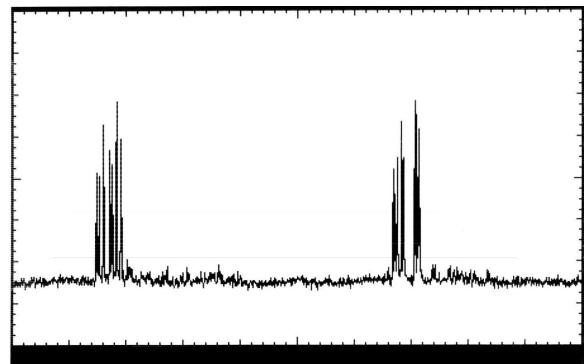
Οι καινούριες επικεφαλίδες



Το ρολόι που ανακτήθηκε



Το πακέτο με την καινούρια επικεφαλίδα



Η παλιά επικεφαλίδα

Κεφάλαιο Τέταρτο

Εφαρμογές του Κυκλώματος Αφαίρεσης / Επαναεισαγωγής

Επικεφαλίδας στα Οπτικά Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς

4.0 Εισαγωγή

Η αλματώδης ανάπτυξη του Internet που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια είχε σαν αποτέλεσμα τις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης που δεσμεύεται για μεταφορά αρχείων, video και άλλων εφαρμογών πολυμέσων. Η κατάσταση αυτή οδήγησε στη χρήση της οπτικής ίνας ως του αποτελεσματικότερου μέσου διασύνδεσης στα σύγχρονα δίκτυα gigabit, ενώ στη συνέχεια επέβαλλε την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των φωτονικών δικτύων. Στην κατεύθυνση αυτή στρέφονται οι ερευνητές σήμερα, προσπαθώντας να σχεδιάσουν και να αναπτύξουν τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής δεύτερης γενιάς.

Η οπτική μεταγωγή πακέτου επιτυγχάνει την αποδοτικότερη χρήση του εύρους ζώνης που είναι διαθέσιμο στο δίκτυο, απαλλάσσοντας τους κόμβους από το ηλεκτρονικό ‘μποτιλιάρισμα’ (bottleneck) με την έξυπνη μετατόπιση λειτουργιών στο οπτικό επίπεδο. Προκειμένου όμως να υλοποιηθεί ένα τέτοιο δίκτυο οπτικής μεταγωγής, αρκετές απαραίτητες λειτουργίες που επιτελεί ένας κόμβος δικτύου πρέπει να επιτελούνται ιδανικά σε οπτικό πεδίο. Τέτοιου είδους λειτουργίες περιλαμβάνουν την οπτική ανάκτηση ρολογιού (optical clock recovery), την επεξεργασία της επικεφαλίδας των πακέτων (header processing – extraction/reinsertion), την προσωρινή αποθήκευση (buffering) και τη δρομολόγησή τους με βάση ειδικούς πίνακες (routing tables). Σχετικές διατάξεις έχουν υλοποιηθεί σε εργαστηριακό επίπεδο [13, 14, 15, 19] και επιδεικνύουν αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και κάποια προβλήματα.

Το βασικότερο πρόβλημα στο σχεδιασμό ενός κόμβου οπτικής μεταγωγής είναι η δυσκολία στην υιοθέτηση τεχνικών δανεισμένων από τα παραδοσιακά ηλεκτρονικά

απευθείας στο οπτικό επίπεδο. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί η οπτική μνήμη. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει διαθέσιμο οπτικό στοιχείο ανάλογο με την ηλεκτρονική Μνήμη Τυχαίας Προσπέλασης (Random Access Memory – RAM). Διάφορες οπτικές διατάξεις που έχουν παρουσιαστεί λειτουργούν μόνο ως προσωρινή μνήμη (buffer) χρησιμοποιώντας γραμμές καθυστέρησης (delay lines) από σταθερά μήκη ίνας. Από τη στιγμή που εισέρχεται ένα πακέτο πληροφορίας στην ίνα, μπορεί να εμφανιστεί στην έξοδο μετά από ένα σταθερό χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στο μήκος της ίνας. Συνεπώς δεν υπάρχει τρόπος να ανακτηθεί το πακέτο νωρίτερα. Επίσης, οι διαδοχικές ανακυκλώσεις που υφίσταται το σήμα μέσα στην ίνα οδηγούν σε ελάττωση της ισχύος του και καθιστούν απαραίτητη την περιοδική ενίσχυσή του με οπτικό ενισχυτή. Αποτέλεσμα είναι η προσθήκη θορύβου και ο υποβιβασμός του σηματοθορυβικού λόγου του αρχικού σήματος. Τέλος, αυτές οι τεχνικές προσωρινής μνήμης που χρησιμοποιούν γραμμές καθυστέρησης έχουν μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας, ενώ είναι αδύνατο να υλοποιηθούν πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες μνήμες με χρήση ρεαλιστικών μηκών ίνας.

Οι δυσκολίες που περιγράφηκαν παραπάνω δημιουργούν μία φιλολογία σχετικά με την τελική μορφή που θα πρέπει να έχει ένας κόμβος οπτικής μεταγωγής πακέτου αλλά και η ίδια η κατασκευή του δικτύου. Τα θέματα αυτά παραμένουν ακόμα ανοικτά, καθώς εναλλακτικές λύσεις που προέκυψαν με γνώμονα τις ιδιαιτερότητες των οπτικών στοιχείων έχουν παρουσιαστεί και αξιολογηθεί με ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Θα δείξουμε στη συνέχεια ότι το κύκλωμα που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα μπορούσε να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμο σε μια τέτοιου είδους αρχιτεκτονική.

4.1 Πιθανές Εφαρμογές της Διάταξης Αφαίρεσης/Επαναεισαγωγής Επικεφαλίδας

Το κύκλωμα που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, εκτελεί ταυτόχρονα τον διαχωρισμό της παλιάς επικεφαλίδας (header) από τα δεδομένα (payload) και την εισαγωγή της νέας επικεφαλίδας. Η αμιγώς οπτική λειτουργία του μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιούμε ίδιους ρυθμούς εκπομπής για την επικεφαλίδα και τα δεδομένα, αντίθετα με αντίστοιχα ηλεκτρο-οπτικά συστήματα και τεχνικές που κάνουν χρήση υπό-φέροντος (subcarrier) [4, 25].

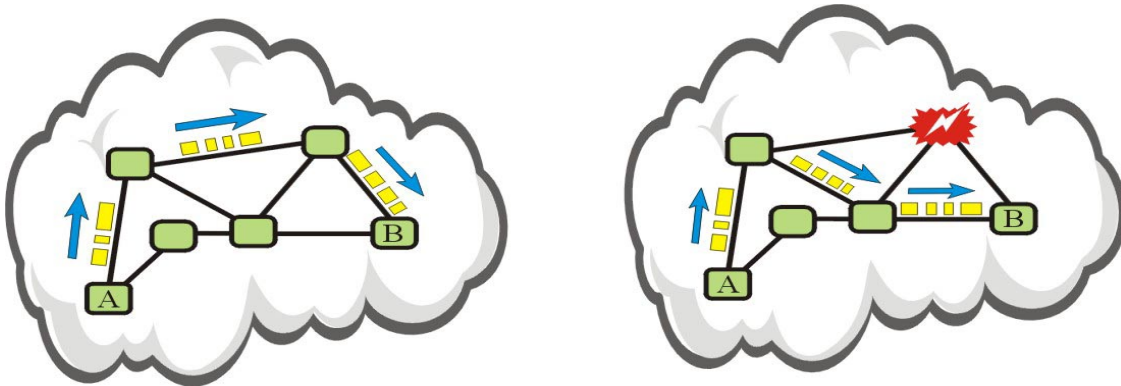
Ένα ακόμη πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του κυκλώματος που κατασκευάσαμε είναι η ικανότητά του να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο (on the fly), σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις που αποθηκεύουν το payload καθώς η επικεφαλίδα υφίσταται επεξεργασία [20]. Αυτή η ιδιότητα έχει σαν αποτέλεσμα την απουσία του απαραίτητου χρόνου επεξεργασίας ώστε να παραχθεί η καινούρια επικεφαλίδα. Συνεπώς, το κύκλωμά μας απαιτεί την εκ των προτέρων γνώση της, γεγονός που δυσκολεύει την εφαρμογή του σε παραδοσιακές αρχιτεκτονικές δικτύων αλλά το καθιστά ιδανικό για περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος της δρομολόγησης-με-εκτροπή (deflection routing).

4.1.0 Η Δρομολόγηση-με-Εκτροπή (Deflection Routing)

Η Δρομολόγηση-με-Εκτροπή (Deflection Routing) αποτελεί μια εναλλακτική λύση στο πρόβλημα της επίλυσης των συγκρούσεων που συμβαίνουν μέσα σε έναν κόμβο (contention resolution). Το πρόβλημα έχει ως εξής: Σε ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτου, κάθε πακέτο πρέπει να διέλθει από έναν αριθμό κόμβων έως ότου φτάσει στον προορισμό του. Έτσι, σε κάθε κόμβο κάθε στιγμή εισέρχονται πακέτα από διαφορετικές θύρες εισόδου, καθένα από τα οποία κατευθύνεται προς μία θύρα εξόδου. Όταν δύο ή περισσότερα πακέτα προσπαθούν να εξέλθουν από τον κόμβο μέσω της ίδιας θύρας εξόδου την ίδια χρονική στιγμή, τότε συμβαίνει σύγκρουση (contention) [21]. Η μέθοδος επίλυσης των συγκρούσεων επιδρά σημαντικά στην απόδοση του δικτύου.

Παραδοσιακά, στους ηλεκτρονικούς κόμβους, η επίλυση των συγκρούσεων γινόταν με τεχνικές αποθήκευσης-και-προώθησης (store-and-forward). Σύμφωνα με αυτές, όλα τα πακέτα που συγκρούονται μεταξύ τους τοποθετούνται σε μία ουρά, και κατόπιν στέλνονται ένα προς ένα. Αυτό είναι εφικτό χάρη στην ύπαρξη διαθέσιμης μνήμης RAM. Σε έναν οπτικό κόμβο όμως είναι δύσκολο να ακολουθηθεί η ίδια προσέγγιση, εξαιτίας της ανωριμότητας της τεχνολογίας οπτικών μνημών. Οι περιορισμοί που υπάρχουν στην απόδοση των διατάξεων αυτών συζητήθηκαν ήδη στην προηγούμενη παράγραφο. Θέματα όπως ρυθμός απώλειας πακέτων, υποβιβασμός του σηματοθορυβικού λόγου, καθυστέρηση, κόστος υλικού, πολυπλοκότητα και αποδοτική επανατοποθέτηση των πακέτων στη σωστή σειρά στον προορισμό είναι σημαντικά θέματα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά το σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος.

Αρκετοί από τους παραπάνω περιορισμούς μπορούν να ξεπεραστούν με τη βοήθεια της Δρομολόγησης-με-Εκτροπή (Deflection Routing). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, όπως υποδηλώνεται και από την ονομασία της, οι συγκρούσεις επιλύονται ως εξής: εάν δύο ή περισσότερα πακέτα πρέπει να χρησιμοποιήσουν την ίδια θύρα εξόδου ώστε να επιτευχθεί δρομολόγηση ελάχιστης διαδρομής, τότε μόνο ένα θα δρομολογηθεί στην επιθυμητή θύρα εξόδου, ενώ τα υπόλοιπα προωθούνται σε άλλες διαδρομές που μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα δρομολόγηση διαδρομής μεγαλύτερης από την ελάχιστη. Συνεπώς, για κάθε ζευγάρι πηγής – προορισμού ο αριθμός των βημάτων (number of hops) που θα ακολουθήσει το πακέτο δεν είναι πλέον σταθερός. Η μέθοδος Deflection Routing δεν αποκλείει γενικά την ύπαρξη οπτικών μνημών. Σκοπός της όμως είναι η υιοθέτηση όσο το δυνατό μικρότερων προσωρινών μνημών (buffers) σε κάθε κόμβο και η χρήση του ιδίου του οπτικού δικτύου σαν buffer.



Σχήμα 4.1: Εκτροπή στη δρομολόγηση στη μέθοδο deflection routing

Με τον τρόπο αυτό, μπορεί ακόμα να επιτευχθεί επικοινωνία χωρίς απώλειες. Έτσι, όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος δε μπορεί να διαχειριστεί την εισερχόμενη κίνηση, επιλέγεται μια εναλλακτική διαδρομή για κάποιο τμήμα αυτής. Η εναλλακτική αυτή διαδρομή μπορεί να εκχωρείται με καθορισμένο τρόπο (ντετερμινιστικά), οπότε στην περίπτωση αυτή μία νέα, αλλά γνωστή εκ των προτέρων επικεφαλίδα πρέπει να τοποθετηθεί στα πακέτα αντικαθιστώντας την παλιά. Η επικεφαλίδα αυτή (header, “tag”) θα μπορούσε να αποτελείται από λίγα bits και να περιέχει πληροφορίες απαραίτητες για

τη δρομολόγηση. Αυτές τις επεξεργάζονται οι σχετικοί δρομολογητές, οι οποίοι διατηρούν a priori πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του δικτύου. Μία τέτοια αρχιτεκτονική δρομολόγησης-με-εκτροπή δε χρειάζεται πολύπλοκες τεχνικές επεξεργασίας επικεφαλίδας και καταχώρησης σε προσωρινή μνήμη, αλλά απαιτεί αντικατάσταση επικεφαλίδας σε πραγματικό χρόνο (“on the fly”). Διάφορες μέθοδοι που είχαν παρουσιαστεί στο παρελθόν περιελάμβαναν επεξεργασία επικεφαλίδας με ηλεκτρονικά μέσα, χρησιμοποιούσαν χαμηλότερου ρυθμού επικεφαλίδες καθώς και τεχνικές πολυπλεξίας με υπο-φέρον (subcarrier) [22, 23]. Αντίθετα, το κύκλωμα που παρουσιάσαμε εκτελεί την αντικατάσταση της επικεφαλίδας απευθείας σε οπτικό επίπεδο, χωρίς τη χρήση πολύπλοκων ηλεκτρονικών. Έτσι, είναι ιδανικό για αρχιτεκτονικές τύπου deflection routing, όπως το πρωτόκολλο Εκτροπής Εικονικών Κυκλωμάτων (Virtual Circuit Deflection protocol – VCD) που θα περιγραφεί στη συνέχεια.

4.1.1 Το πρωτόκολλο Εκτροπής Εικονικών Κυκλωμάτων (VCD)

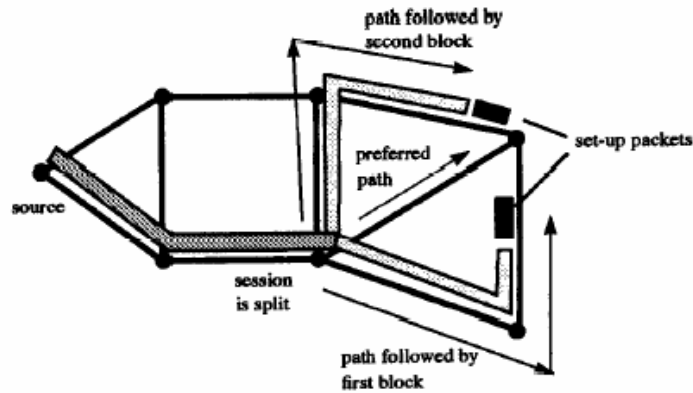
Το πρωτόκολλο Εκτροπής Εικονικών Κυκλωμάτων (Virtual Circuit Deflection protocol – VCD) είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που επιχειρεί να συνδυάσει χαρακτηριστικά τόσο της μεταγωγής εικονικών κυκλωμάτων (virtual circuit switching) όσο και της δρομολόγησης-με-εκτροπή (deflection routing). Σχεδιάστηκε σε μία προσπάθεια να συγκεραστούν αντικρουόμενες απαιτήσεις που χαρακτηρίζουν τα σύγχρονα δίκτυα gigabit, όπως η μετάδοση χωρίς απώλειες, η αποτελεσματική χρησιμοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου, η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης πριν τη μετάδοση (pretransmission delay), οι μικρές απαιτήσεις σε μνήμη και η άφιξη των πακέτων στη σωστή σειρά. Η κάθε μέθοδος παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σχετικά με τις παραπάνω απαιτήσεις. Για παράδειγμα, όταν δεν γίνονται εκ των προτέρων κρατήσεις σε εύρος ζώνης (ώστε να ελαχιστοποιείται η καθυστέρηση πριν τη μετάδοση), η μέθοδος deflection routing εμφανίζεται ως ο μοναδικός τρόπος ώστε να επιτυγχάνεται μετάδοση χωρίς απώλειες κάνοντας αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης και χωρίς να απαιτείται η χρήση επιπρόσθετων μνημών. Όμως, οι τεχνικές εκτροπής δεν

εξασφαλίζουν τη διατήρηση της σειράς των πακέτων στον προορισμό και αυτό είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα.

Το πρωτόκολλο VCD υλοποιεί τη μεταγωγή εικονικών κυκλωμάτων και ανήκει στην κατηγορία tell-and-go. Αυτό σημαίνει ότι η εκπομπή των δεδομένων ξεκινά λίγο μετά από την αποστολή του πακέτου εγκατάστασης της σύνδεσης. Συγκεκριμένα, το χρονικό περιθώριο ανάμεσα στο πακέτο εγκατάστασης της σύνδεσης και στο πρώτο πακέτο δεδομένων πρέπει να ισούται με τον αριθμό των βημάτων (hops) από την πηγή προς τον προορισμό, επί το χρόνο επεξεργασίας του πακέτου εγκατάστασης σε κάθε κόμβο. Έτσι εξασφαλίζεται ότι τα πακέτα των δεδομένων δεν θα ξεπεράσουν το αντίστοιχο πακέτο εγκατάστασης της σύνδεσης.

Στην περίπτωση που το πακέτο εγκατάστασης της σύνδεσης επιτύχει την κράτηση χωρητικότητας σε όλους τους κόμβους από την πηγή στον προορισμό, το πρωτόκολλο VCD μοιάζει με τα συνηθισμένα πρωτόκολλα εικονικών κυκλωμάτων. Εάν όμως η διαθέσιμη χωρητικότητα σε έναν κόμβο της βέλτιστης διαδρομής δεν είναι αρκετή για να εξυπηρετήσει τη ζεύξη, το πακέτο εγκατάστασης καθώς και τα πακέτα δεδομένων που το ακολουθούν ίσως χρειαστεί να δρομολογηθούν σε μία νέα, μακρύτερη διαδρομή. Τότε η ζεύξη εκτρέπεται. Δεδομένου ότι όταν ένα πακέτο εγκατάστασης φτάσει στη θύρα εισόδου ενός κόμβου έχει ήδη κρατήσει χωρητικότητα r για τη διαδρομή έως τον κόμβο στον οποίο κατέληξε, αποδεικνύεται [24] ότι σίγουρα θα εξασφαλίσει χωρητικότητα r από τις εξερχόμενες ζεύξεις του κόμβου αυτού. Για να επιτευχθεί αυτό όμως, ίσως απαιτηθεί η διακοπή μίας ή περισσότερων από τις υπάρχουσες ζεύξεις που ξεκινούν από αυτόν, ώστε να απελευθερωθεί η χωρητικότητα που χρησιμοποιούσαν και να αποδοθεί στην καινούρια ζεύξη. Είναι δυνατόν η χωρητικότητα που εξασφαλίστηκε τελικά να μην ανήκει εξολοκλήρου στην ίδια θύρα εξόδου του κόμβου. Στην περίπτωση αυτή, η ζεύξη μπορεί να χρειαστεί να διαιρεθεί σε δύο ή περισσότερες υποζεύξεις χαμηλότερων ρυθμών, κάθε μία από τις οποίες δρομολογείται μέσω διαφορετικής διαδρομής στον προορισμό. Οι ζεύξεις που διακόπηκαν μπορούν να συνεχίσουν τη μετάδοση όταν τελειώσει η ζεύξη που τις διέκοψε. Η διαδικασία διαίρεσης μιας ζεύξης σε υποζεύξεις απεικονίζεται στο *Σχήμα 4.2*. Στο παράδειγμα του σχήματος, και οι δύο υποζεύξεις εκτρέπονται λόγω έλλειψης επαρκούς χωρητικότητας στην προτιμητέα διαδρομή. Η

περίπτωση όπου μόνο η μία υποζεύξη εκτρέπεται ενώ η άλλη ακολουθεί τη βέλτιστη διαδρομή, είναι επίσης δυνατή.



Σχήμα 4.2: Διαίρεση μίας ζεύξης σε υποζεύξεις και δρομολόγησή τους με εκτροπή

Όταν μία ζεύξη χωρίζεται σε ένα πλήθος από έστω k υποζεύξεις, τα πακέτα που ανήκουν σε διαφορετικές υποζεύξεις είναι πιθανό να φτάσουν στον προορισμό εκτός σειράς. Ωστόσο, τα πακέτα που ανήκουν στην ίδια υποζεύξη θα φτάνουν πάντα στη σωστή σειρά. Η επανατοποθέτηση στον προορισμό k κομματιών από δεδομένα στη σειρά, καθένα από τα οποία είναι ήδη στη σωστή σειρά, είναι πολύ πιο εύκολη από την περίπτωση όπου έχουμε να κάνουμε με ξεχωριστά πακέτα. Αυτό είναι ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου VCD απέναντι σε άλλα πρωτόκολλα εκτροπής. Αυτή άλλωστε είναι και η βασικότερη διαφορά του από τα πρωτόκολλα αυτά: Οι εκτροπές εδώ γίνονται σε επίπεδο ζεύξης (ή υποζεύξης αν χρειαστεί να διαιρεθούν οι ζεύξεις ώστε να εξασφαλιστεί αρκετό εύρος ζώνης) και όχι σε επίπεδο πακέτου.

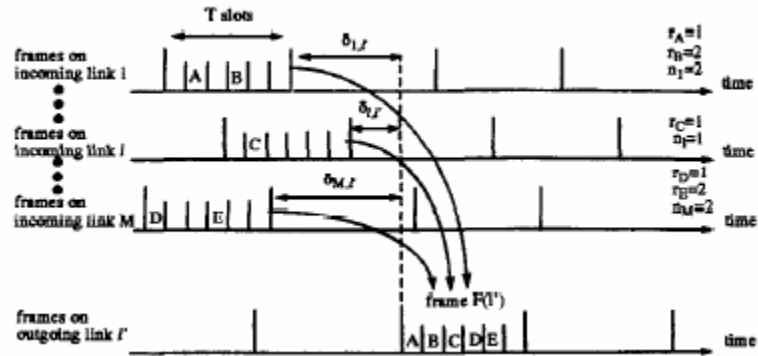
Ειδική πρόνοια μπορεί να ληφθεί ώστε να αντιμετωπιστούν προβλήματα όπως η δημιουργία κλειστών βρόχων καθώς και η ανεξέλεγκτη αύξηση του μήκους μίας ζεύξης μετά από διαδοχικές εκτροπές. Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το θέμα της δικαιοσύνης, το οποίο λύνεται μόνο τμηματικά [24]. Οι ζεύξεις που προέρχονται από γειτονικούς κόμβους έχουν προτεραιότητα έναντι αυτών που επιθυμούν να ξεκινήσουν από τον ίδιο τον κόμβο. Έτσι είναι δυνατόν ένας κόμβος να αποκτά όση χωρητικότητα χρειάζεται, ενώ ο γειτονικός του μπορεί να εκμεταλλευτεί μόνο όση έμεινε ελεύθερη. Πέρα από αυτό όμως, τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από τη θεωρητική μελέτη του πρωτοκόλλου όσο και από προσομοίωση σχετικά με τη διέλευση (throughput) και

άλλες παραμέτρους απόδοσης του δικτύου, είναι πολύ ενθαρρυντικά και αποδεικνύουν ότι το VCD είναι μία βιώσιμη λύση για τα μελλοντικά δίκτυα gigabit.

4.1.2 Εφαρμογή του VCD στα Αμιγώς Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτου

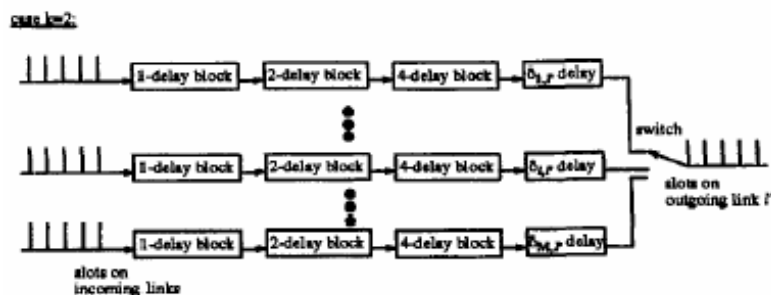
Η οπτική μεταγωγή πακέτου προσφέρει τη δυνατότητα μετάδοσης σε ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες. Η δυσκολία υλοποίησης κατάλληλων διατάξεων οπτικής μνήμης με την τρέχουσα τεχνολογία όμως έχει οδηγήσει πολλούς μελετητές στην άποψη ότι η μεταγωγή κυκλώματος είναι πιο κατάλληλη από τη μεταγωγή πακέτου για δίκτυα οπτικής μεταγωγής. Δεδομένου ότι το πρωτόκολλο VCD, που συνδυάζει γνωρίσματα και από τις δύο προσεγγίσεις, έχει μικρές απαιτήσεις ως προς τη μνήμη των κόμβων, θα ήταν σκόπιμο να εξετάσουμε τη δυνατότητα υλοποίησής του σε ένα δίκτυο οπτικής μεταγωγής.

Στη συνέχεια, θα θεωρήσουμε ότι η λειτουργία της αποθήκευσης γίνεται με τη βοήθεια ενός μικρού αριθμού από οπτικές γραμμές καθυστέρησης (optical delay lines). Στη σχεδίαση που περιγράφουμε, ο χρόνος χωρίζεται σε πλαίσια (frames) καθένα από τα οποία έχει διάρκεια ίση με T θυρίδες πακέτου (packet slots). Σε όλες τις ζεύξεις εκχωρείται ρυθμός μετάδοσης που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του C/T , όπου C η χωρητικότητα του κόμβου. Με αυτό τον τρόπο, μια ζεύξη με ρυθμό μετάδοσης iC/T , $i = 1, 2, \dots, T$ μπορεί να μεταδίδει έως i πακέτα σε ένα χρονικό πλαίσιο. Τα πλαίσια στις εισερχόμενες και εξερχόμενες ζεύξεις ενός κόμβου δεν είναι γενικά συγχρονισμένα. Έστω $\delta_{l, l'}$ η διαφορά φάσης ανάμεσα στην αρχή των πλαισίων στη θύρα εισόδου l και στη θύρα εξόδου l' . Για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα των πλαισίων, απαιτούμε ότι τα πακέτα που φτάνουν στο πλαίσιο $F(l)$ του κόμβου l και κατευθύνονται στον κόμβο l' θα μεταδίδονται στο πρώτο πλαίσιο $F(l')$ του κόμβου l' που ξεκινά μετά το τέλος του $F(l)$ (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Εισερχόμενα και εξερχόμενα πλαίσια σε ένα κόμβο. Απεικονίζονται μόνο τα πακέτα που προορίζονται για τον κόμβο l' .

Όπως έχει περιγραφεί και στην προηγούμενη παράγραφο, για κάθε αριθμό πακέτων που εισέρχονται σε έναν κόμβο εντός ενός πλαισίου $F(l)$, θα υπάρχουν αρκετές θυρίδες πακέτων (packet slots) στο πλαίσιο εξόδου $F(l')$ ώστε να εξυπηρετηθούν όλα τα πακέτα που πρέπει να μεταδοθούν στη διάρκειά του. Ωστόσο, για να συμβεί αυτό, είναι απαραίτητο να επιβληθεί μια καθυστέρηση στο εισερχόμενο πακέτο έως τη στιγμή της μετάδοσής του. Η απαιτούμενη καθυστέρηση μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 1 και $2T - 1$ θυρίδες (slots), και μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση $2T - 1$ οπτικών γραμμών καθυστέρησης με μεταβλητό μήκος που κυμαίνεται από 1 έως $2T - 1$ θυρίδες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μπλόκ γραμμών καθυστέρησης i σταδίων, με καθυστέρηση το καθένα ίση με 2^i . Η κάθε γραμμή μπορεί να είναι σε κατάσταση 0 ή 1, οπότε εισάγει ή δεν εισάγει καθυστέρηση αντίστοιχα. Έτσι, όλες οι επιθυμητές τιμές καθυστέρησης μπορούν να επιτευχθούν, επιλέγοντας κατάλληλα την κατάσταση κάθε γραμμής για κάθε πακέτο. Τα προηγούμενα απεικονίζονται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Η έξοδος μιας συγκεκριμένης θύρας l'

Προκειμένου να λειτουργήσει σωστά η μέθοδος που περιγράφηκε, είναι απαραίτητο να μην εμφανίζονται ταυτόχρονα δύο πακέτα στην ίδια θυρίδα στο τμήμα εξόδου. Συνεπώς, απαιτείται μια συγκεκριμένη μέθοδος απόδοσης θυρίδων εξόδου στα εισερχόμενα πακέτα. Μία τέτοια μέθοδος περιγράφεται στο [24] (the packing rule). Αποδεικνύεται ότι όταν η μέθοδος αυτή ακολουθείται, ποτέ δεν θα εμφανιστούν δύο πακέτα ταυτόχρονα στην ίδια θυρίδα στο τμήμα εξόδου.

Από τα παραπάνω, είναι προφανές ότι το πρωτόκολλο VCD μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα δίκτυο οπτικής μεταγωγής, καταργώντας την ανάγκη για οπτο-ηλεκτρονική και ηλεκτρο-οπτική μετατροπή (o/e/o conversion) και εκμηδενίζοντας το ηλεκτρονικό μπουτιλιάρισμα (electronic bottleneck). Για τη μεταγωγή πακέτου όμως, είναι απαραίτητη η αλλαγή της επικεφαλίδας των πακέτων με μία μέθοδο που να μην εισάγει πρόσθετη καθυστέρηση ούτε να απαιτεί o/e/o μετατροπή για την επικεφαλίδα. Στο σημείο αυτό ακριβώς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το κύκλωμα αφαίρεσης/επαναεισαγωγής επικεφαλίδας που παρουσιάσαμε στα προηγούμενα. Η αμιγώς οπτική δομή του και η λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο το καθιστούν ιδανικό για μία τέτοια εφαρμογή.

4.2 Συμπεράσματα

Καθώς η ανάγκη για υψηλότερες ταχύτητες από τα σύγχρονα δίκτυα γίνεται όλο και πιο επιτακτική, οι φωτονικές επικοινωνίες προβάλλουν ως η αδιαφιλονίκητη λύση στο πρόβλημα της εξασφάλισης εύρους ζώνης και ποιότητας υπηρεσίας. Προκειμένου να εκμεταλλευτούμε πλήρως τις τεράστιες δυνατότητες της οπτικής ίνας, οδηγηθήκαμε στην έρευνα γύρω από τα οπτικά δίκτυα οπτικής μεταγωγής και την αμιγώς οπτική επεξεργασία σήματος.

Στην κατεύθυνση αυτή κινείται και το κύκλωμα αφαίρεσης/επαναεισαγωγής επικεφαλίδας στα 10 Gbps που παρουσιάσαμε. Το κύκλωμα αποτελείται από ένα υποσύστημα ανάκτησης ρολογιού και έναν 2×2 διακόπτη μεταγωγής που βασίζονται και τα δύο στη μη γραμμική πύλη UNI. Η λειτουργία του είναι αμιγώς οπτική και δεν εξαρτάται από το μήκος των πακέτων, καθώς το κύκλωμα εργάζεται σε επίπεδο bit (bitwise). Έτσι μπορεί να χειριστεί και πολύ μικρά πακέτα. Τα διαστήματα guardband που απαιτούνται είναι πολύ μικρά. Επίσης, δεν χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά υψηλής

ταχύτητας, ενώ η πολυπλοκότητα είναι ανεξάρτητη του μήκους των πακέτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν είναι πολύ ενθαρρυντικά, με διαμόρφωση πλάτους στην έξοδο ίδια με αυτή της εισόδου και χαμηλή διαφωνία (crosstalk) στις δύο θύρες εξόδου.

Το κύκλωμα αυτό είναι κατάλληλο για την επανεισαγωγή επικεφαλίδας σε αμιγώς οπτικά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούν αρχιτεκτονικές δρομολόγησης-με-εκτροπή (deflection routing), όπως το πρωτόκολλο VCD. Η εφαρμογή του εκεί είναι καταλυτική και μπορεί να έχει σαν τελικό αποτέλεσμα την υλοποίηση ενός αμιγώς οπτικού δικτύου επικοινωνιών.

Βιβλιογραφία

- [1] Η. Αβραμόπουλου, “Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [2] P.E. Green, “Δίκτυα Οπτικών Ινών”, Παπασωτηρίου, 1994.
- [3] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, "Optical Networks. A Practical Perspective", Second Edition, Academic Press, 2002.
- [4] Daniel J. Blumenthal, Bengt-Erik Olsson, Giammarco Rossi, Timothy E. Dimmick, Lavanya Rau, Milan Majsanovic', Olga Lavrova, Roopesh Doshi, Olivier Jerphagnon, John E. Bowers, Volkan Kaman, Larry A. Coldren and John Barton, “All-Optical Label Swapping Networks and Technologies”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 12, December 2000.
- [5] C. Bintjas, M. Kalyvas, G. Theophilopoulos, T. Stathopoulos, H. Avramopoulos, L. Occhi, L. Schares, G. Guekos, S. Hansmann, and R. Dall'Ara, “20 Gb/s All-Optical XOR with UNI Gate”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No. 7, July 2000.
- [6] Naimish S.Patel, Kathrine L. Hall, and Kristin A. Rauschenbach, “Interferometric all-optical switches for ultrafast signal processing”, Applied Optics Vol. 37 No. 14 May 10, 1998.
- [7] Κ. Γιαννόπουλου, “Υλοποίηση Οπτικής Πύλης XOR στα 20Gbit/s”, Διπλωματική Εργασία.
- [8] G.P. Agrawal, “Nonlinear fiber optics”, Boston: Academic Press, 1989.
- [9] Christian Hentschel, “Fiber Optics Handbook”, Hewlett Packard GmbH.
- [10] Γ. Κανέλλου, “Αμιγώς Οπτική Ανάκτηση Ρολογιού σε Ταχύτητα Μετάδοσης 10 Gbit/sec”, Διπλωματική Εργασία.
- [11] K.L. Hall and K.A. Rauchenbach, ”100-Gbit/s bitwise logic”, Applied Optics Vol. 13 No. 16 August 15,1998.

- [12] A. J. Poustie, K. J. Blow, R. J. Manning, A. E. Kelly, "All-optical full adder with bit-differential delay", *Optics Communications* 168 (1999) 89-93
- [13] N. Pleros, C. Bintzas, K. Yiannopoulos, G. Theophilopoulos, M. Kalyvas, H. Avramopoulos and G. Guekos, "All-Optical Header Extraction at 10Gb/s".
- [14] K. Vlachos, G. Theophilopoulos, A. Hatziefremidis and H. Avramopoulos, "30 Gbps all-optical clock recovery circuit", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.12, pp 705-707, 2000.
- [15] I.D. Philips et.al., "100Gbit/s optical clock recovery using electrical phase-locked loop consisting of commercially available components", *Electron. Lett.*, Vol. 36, pp 650-652, 2000.
- [16] C. Bornholdt, B. Sartorius, S. Schelhase, M. Moehrle and S. Bauer, "Self-Pulsating DFB laser for all-optical clock recovery at 40 Gbit/s", *Electron. Lett.*, Vol. 36, pp 327-328, 2000.
- [17] C. Bintzas, K. Yiannopoulos, N. Pleros, G. Theophilopoulos, M. Kalyvas, H. Avramopoulos and G. Guekos, "Clock Recovery Circuit for Optical Packets", accepted in *PTL*.
- [18] Γ. Θεοφιλόπουλος, "Αμειγρώς Οπτική Μεταγωγή Πακέτων για Ψηφιακά Δίκτυα Υπερυψηλών Ταχυτήτων", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2003.
- [19] M. Kalyvas, C. Bintzas, K. Zoiros, T. Houbavlis, H. Avramopoulos, L. Occhi, L. Schares, G. Guekos, S. Hansmann and R. Dall'Ara, "All Optical Write/Read Memory for 20 Gb/s Data Packets", *Optics Letters*.
- [20] H. J. S. Dorren, M. T. Hill, Y. Liu, N. Calabretta, A. Srivatsa, F. M. Huijskens, H. de Waardt, and G. D. Khoe, "Optical Packet Switching and Buffering by Using All-Optical Signal Processing Methods", *Journal of Lightwave Technology*, Vol 21, No. 1, January 2003.
- [21] Shun Yao, Sudhir Dixit, Biswanath Mukherjee, "Advances in Photonic Packet Switching: An Overview" *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 38, pp. 84-94, Feb. 2000.
- [22] B. E. Olsson et al., "Wavelength Routing of 40 Gbit/s packets with 2.5 Gbit/s header erasure/rewriting using all-fiber wavelength converter", *Electron. Lett.*, Vol. 31, no 4, pp 345-347, Feb. 2000.

- [23] D. J. Blumenthal, A. Carena, L. Rau, V. Curri and S. Humphries, "All-Optical Label Swapping with Wavelength Conversion for WDM-IP Networks with Subcarrier Multiplexed Addressing", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 11, pp. 1497-1499, Nov. 1999 .
- [24] Emmanouel A. Varvarigos and Jonathan P. Lang, "A Virtual Circuit Deflection Protocol", IEEE/ACM Transactions On Networking, Vol. 7, No. 3, June 1999.
- [26] Daniel J. Blumenthal, John E. Bowers, Lavanya Rau, Hsu-Feng Chou, Suresh Rangarajan, Wei Wang and Henrik N. Poulsen, "Optical Signal Processing for Optical Packet Switching Networks", IEEE Optical Communications, pp. 523-529, February 2003.