



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## **Υλοποίηση οπτικού αντιμεταθέτη χρονοσχισμών (TSI) με χρήση οπτικών συμβολόμετρων τύπου MZI**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΩΝ

**ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ Ι. ΤΖΟΜΠΑΝΑΚΗ  
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑΣ Ν. ΜΑΥΡΟΔΗΜΗΤΡΑΚΗ**

**Επιβλέπων :** Αβραμόπουλος Ηρακλής  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2008





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

## Υλοποίηση οπτικού αντιμεταθέτη χρονοσχισμών (TSI) με χρήση οπτικών συμβολόμετρων τύπου MZI

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΩΝ

**ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ Ι. ΤΖΟΜΠΑΝΑΚΗ**  
**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑΣ Ν. ΜΑΥΡΟΔΗΜΗΤΡΑΚΗ**

**Επιβλέπων :** Αβραμόπουλος Ηρακλής  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

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

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

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

Αθήνα, Μάρτιος 2008



.....

**Τζομπανάκη Αικατερίνη**

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

**Μαυροδημητράκη Κωνσταντίνα**

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

© Αικατερίνη Ι. Τζομπανάκη , Κωνσταντίνα Ν. Μαυροδημητράκη 2007

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## **Ευχαριστίες**

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο που μας έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθούμε με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, εκπονώντας την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία καθώς επίσης και για τη διάθεσή του να μας βοηθήσει όποτε χρειαζόταν. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την υποψήφιο διδάκτορα Όλγα Ζουραράκη για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις της σχετικά με την εργασία αυτή καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μας αφιέρωσε. Τέλος ευχαριστούμε τις οικογένειες μας που μας συμπαραστέκονται όλο αυτό τον καιρό.







## Περίληψη

Καθώς τα σύγχρονα δίκτυα αντιμετωπίζουν όλο ένα και αυξανόμενη ζήτηση σε εύρος ζώνης το οποίο όμως είναι περιορισμένο, οι πάροχοι κινούνται προς μια κρίσιμη καμπή στην ιστορία της εξέλιξης των δικτύων: το οπτικό δίκτυο. Τα οπτικά δίκτυα παρέχουν μεγαλύτερες χωρητικότητες σε πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης απ' ό τι τα συμβατικά δίκτυα από καλώδια χαλκού. Για να εκμεταλλευτούμε στο έπακρον όμως το εύρος ζώνης που προσφέρουν οι οπτικές ίνες είναι αναγκαία τα ικανοποιητικά αποτελέσματα στον τομέα της οπτικής επεξεργασίας σήματος, ο οποίος ακόμα δεν έχει αναπτυχθεί όσο θα έπρεπε. Εστιάζοντας σε αυτόν τομέα, αυτή η εργασία υλοποιείται σε καθαρά οπτικό επίπεδο, όσον αφορά την επεξεργασία σήματος και επιδεικνύει ένα Οπτικό Αντιμεταθέτη Χρονοσχιμών (TSI) που βασίζει την κύρια λειτουργία του στην διαδικασία μετατροπής μήκους κύματος. Το κύκλωμα αποτελείται από τέσσερα κλιμακούμενα στάδια και χρησιμοποιεί συμβολόμετρα τύπου MZI (Mach-Zehnder Interferometer). Το σύνολο των MZI που χρησιμοποιούνται αποτελεί την πρώτη υβριδικά ολοκληρωμένη μήτρα συμβολόμετρων MZI σε ένα chip. Ο αριθμός των απαιτούμενων σταδίων και μηκών κύματος καθώς και οι καθυστερήσεις εξαρτώνται από έναν αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει τον αριθμό των σταδίων σε συνάρτηση με τα απαιτούμενα μήκη κύματος. Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε επέδειξε λειτουργία χωρίς σφάλματα για πακέτα NRZ στα 10 Gb/s με ποιινή ενέργειας 1.8 dB. Το κύκλωμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη λύση διενέξεων και μορφοποίηση της κίνησης στους κόμβους μεταγωγείς όπως επίσης και στην κατασκευή οπτικών ενταμιευτών στο εγγύς μέλλον.

Λέξεις κλειδιά: Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI), Αντιμεταθέτης Χρονοσχιμών (TSI), Οπτική Ενταμίευση, Οπτική Μεταγωγή, Γραμμή Καθυστέρησης, Δίκτυα Οπτικής Μεταγωγής (OPSN) .





## **Abstract**

As networks face increasing bandwidth demand and diminishing availability, network providers are moving towards a crucial milestone in network evolution: the optical network. Optical networks provide higher capacity in an enormous transmission rate. In order to exploit the available capacity we need to have efficient results on the department of optical signal processing where little is done. Focusing on that area this project is implemented in an all optical level, as far as the signal processing is concerned and demonstrates an Optical Time Slot Interchanger which bases its basic function on wavelength conversion. The circuit consists of four cascaded stages and employs the first hybrid integrated, on a chip, quadruple array of semiconductor optical amplifier Mach-Zehnder Interferometer. The number of stages and wavelengths required, as well as the delays depend on an algorithm which calculates the number of stages in connection with the number of the required wavelengths. It exhibited a good performance (error free) with NPZ packets at 10Gb/s with a power penalty of 1.8 dB. This circuit can be used in contention resolution and traffic shaping in OPS networks as well as in the formation of optical buffers used on switching nodes in the near future.

**Keywords:** Mach Zehnder Interferometer (MZI), Time Slot Interchanger (TSI), Optical Buffering, Optical Switching, Delay Line, Optical Switching (OPS) Networks

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>1</b> .....	<b>1</b>
<b>Εισαγωγικά στοιχεία</b> .....	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Μοντέλο αναφοράς OSI .....	3
1.3 Ενσύρματα μέσα μετάδοσης.....	5
1.4 Ανασκόπηση τεχνολογιών δικτύου.....	8
1.5 Ασυνδεδειστροφής (connectionless) και συνδεδειστροφής (connection-oriented) υπηρεσία και προδιαγραφές ενός ιδανικού δικτύου.....	11
1.6 Είδη μεταγωγής.....	12
1.6.1 Μεταγωγή κυκλώματος.....	12
1.6.2 Μεταγωγή πακέτου .....	15
1.7 Δίκτυα ευρείας ζώνης οπτικών ινών .....	18
1.7.1 Γενικά – Ιστορική αναδρομή .....	18
1.7.2 Μέθοδοι πολύπλεξης .....	23
1.7.3 Η δεύτερη γενιά οπτικών δικτύων .....	29
1.7.4 Οι μελλοντικές γενιές οπτικών δικτύων .....	30
1.8 Δομή Διπλωματικής.....	31
1.9 Βιβλιογραφία .....	33
<b>2</b> .....	<b>34</b>
<b>Οπτικό συμβολόμετρο Mach-Zehnder</b> .....	<b>34</b>
<b>(MZI - Mach-Zehnder Interferometer) με ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή-SOA</b> .....	<b>34</b>
2.1 Εισαγωγή .....	34
2.2 Ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής - SOA .....	36
2.3 Οπτικοί διακόπτες και SOA .....	37
2.4 Οπτικός συμβολομετρικός διακόπτης .....	40

2.5	Είδη, εφαρμογές και γενικά χαρακτηριστικά των οπτικών συμβολομετρικών διακοπών .....	43
2.6	Οπτικό συμβολόμετρο MZI (Mach Zehnder Interferometer) με ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή SOA .....	47
2.7	Μετατροπή μήκους κύματος με συμβολόμετρο MZI .....	58
2.8	Βιβλιογραφία .....	63

### **3 ..... 64**

## **Αντιμεταθέτης Χρονοσχισμών TSI ..... 64**

3.1	Εισαγωγικά στοιχεία για τη μεταγωγή πακέτου .....	64
3.1.1	<i>Μεταγωγείς διαίρεσης χώρου .....</i>	<i>65</i>
3.1.2	<i>Μεταγωγείς διαίρεσης μήκους κύματος .....</i>	<i>66</i>
3.1.3	<i>Μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου .....</i>	<i>67</i>
3.1.4	<i>Βασικότερα προβλήματα μεταγωγής και πολιτικές ενταμίευσης .....</i>	<i>70</i>
3.2	Αντιμεταθέτης χρονοσχισμών (Time Slot Interchanger).....	74
3.2.1	<i>Προτεινόμενες υλοποιήσεις TSI.....</i>	<i>75</i>
3.2.2	<i>Υλοποίηση TSI στο παρόν πείραμα .....</i>	<i>84</i>
3.3	Βιβλιογραφία .....	95

### **4 ..... 96**

## **Περιγραφή του πειράματος – Πειραματική διάταξη..... 96**

4.1	Εισαγωγή .....	96
4.2	Περιγραφή του πειράματος .....	97
4.3	Σημείωση.....	120
4.4	Βιβλιογραφία.....	121

### **5 ..... 122**

## **Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων ..... 122**

5.1	Εισαγωγή .....	122
5.2	Ανάλυση σημάτων με διαγράμματα ματιού .....	122

5.3 Υλοποίηση του TSI με τρία στάδια .....	126
5.4 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα .....	130
5.5 Βιβλιογραφία .....	139
<b>6 .....</b>	<b>140</b>
<b>Εφαρμογές του TSI στα οπτικά δίκτυα .....</b>	<b>140</b>
6.1 Εισαγωγή .....	140
6.2 Εφαρμογές του TSI στα οπτικά δίκτυα.....	141
6.3 Επίλογος.....	149
6.4 Βιβλιογραφία .....	150





# 1

## Εισαγωγικά στοιχεία

### 1.1 Εισαγωγή

Η κλιμακούμενη και κατανεμημένη φύση του διαδικτύου συνεισφέρει στην αλματώδη αύξηση των συνδεδεμένων υπολογιστών, των χρηστών και των παρεχόμενων υπηρεσιών, οδηγώντας, έτσι στην ολοένα και αυξανόμενη απαίτηση για εύρος ζώνης. Είναι επομένως επιτακτική η ανάγκη για την ύπαρξη μιας νέας υποδομής στα δίκτυα κορμού, ικανής να παρέχει την απαιτούμενη χωρητικότητα. Τα οπτικά δίκτυα είναι η απάντηση σε αυτή τη πρόκληση. Βασικό τους όπλο είναι το μέσο μετάδοσης τους, η οπτική ίνα η οποία παρέχει τη δυνατότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου πληροφορίας με χαμηλές απώλειες σε ένα τεράστιο εύρος συχνοτήτων. Το φασματικό αυτό εύρος μετάδοσης είναι της τάξης των 25THz και είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης οποιουδήποτε άλλου μέσου μετάδοσης. Η οπτική ίνα δίνει τη δυνατότητα μετάδοσης ενός οπτικού σήματος σε πολύ μεγάλους ρυθμούς και σε μεγάλες αποστάσεις πριν να υπάρξει η ανάγκη οπτικής ενίσχυσής του ή αναγέννησής του. Για να φτάσει όμως ένα πακέτο πληροφορίας από τον αρχικό κόμβο στον τελικό περνάει διαμέσου άλλων κόμβων στους οποίους υφίσταται μεταγωγή και δρομολόγηση. Καθότι όμως οι διεργασίες αυτές γίνονται ακόμα σε ηλεκτρονικό επίπεδο, αναγκαστικά εισάγεται μια καθυστέρηση από την οπτικο-ηλεκτρο-οπτικομετατροπή του σήματος με συνέπεια τη μη βέλτιστη αξιοποίηση της τεχνολογίας της οπτικής μετάδοσης και των υψηλών ταχυτήτων που προσφέρει.

Για την καλύτερη αξιοποίηση και εκμετάλλευση της τεράστιας χωρητικότητας που παρέχουν οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται τεχνικές οπτικής πολυπλεξίας ανάλογα με τις τεχνικές ηλεκτρονικής πολυπλεξίας. Μια από αυτές είναι η πολυπλεξία μήκους κύματος

(WDM, Wavelength Division Multiplexing) η οποία βασίζεται στη διαίρεση του οπτικού φάσματος σε πολλά διαφορετικά κανάλια, το καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος (ή συχνότητα).[1.15] Για παράδειγμα, ένα σύστημα πολυπλεξίας μήκους κύματος 128 καναλιών OC-192, μπορεί να επιτύχει συνολική χωρητικότητα 1,2Tbps. Θα αναφερθούμε εκτενέστερα στις τεχνικές της οπτικής πολυπλεξίας παρακάτω.

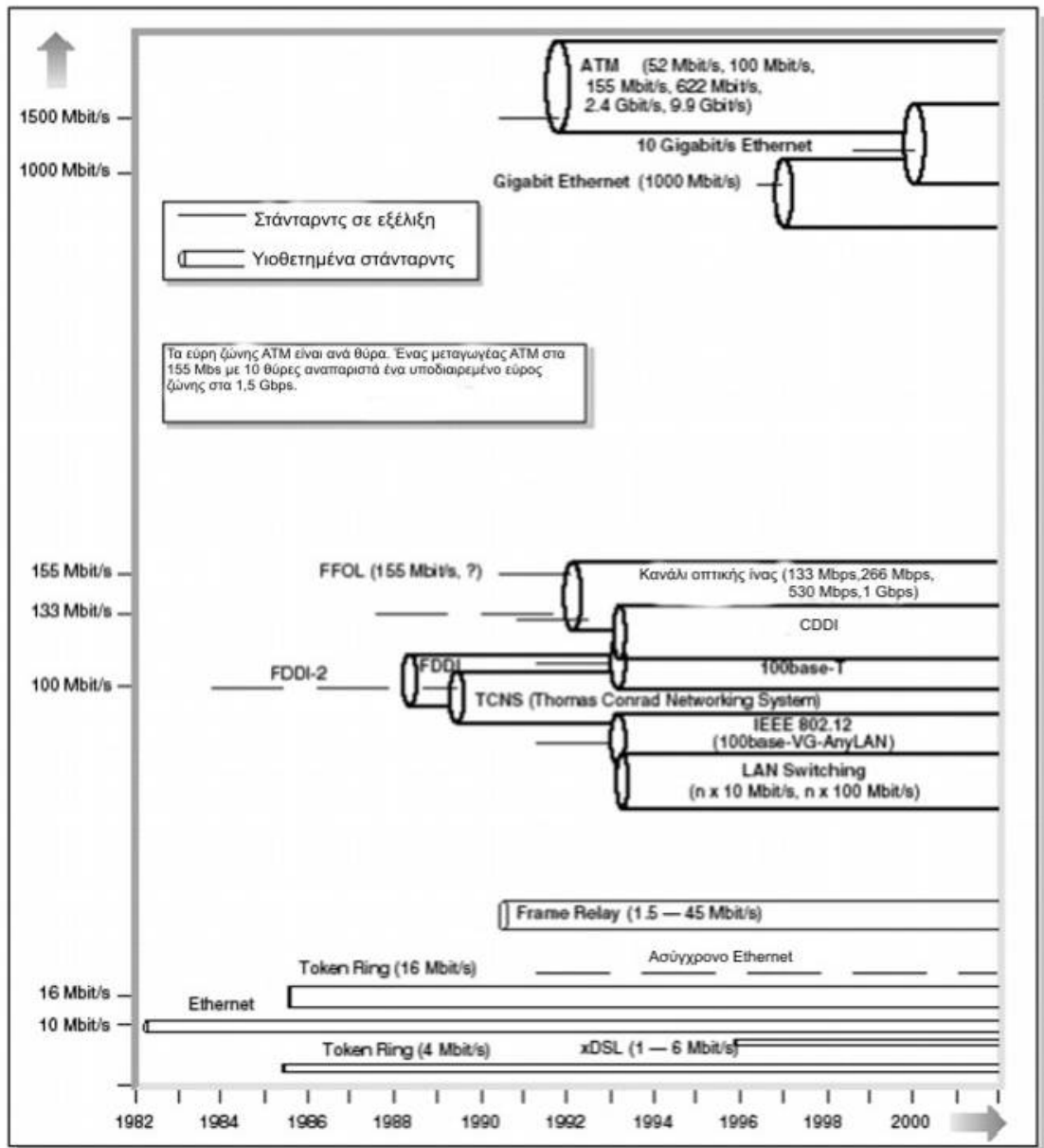
Μια άλλη προηγμένη τεχνολογία που εφαρμόζεται στα οπτικά δίκτυα είναι το σύστημα διασταυρωμένου οπτικού συνδέσμου (OXC, Optical Cross Connect), με σκοπό την εξάλειψη της μετατροπής του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρονικό και συνεπώς την εντυπωσιακή αύξηση της ταχύτητας. Αυτό ίσως αποτελεί και τη μεγαλύτερη πρόκληση στο μέλλον των οπτικών δικτύων καθώς η χειραφέτησή τους από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ο βασικός στόχος των μελλοντικών γενεών οπτικών δικτύων.

Με την υιοθέτηση των παραπάνω τεχνολογιών από τους λειτουργούς των δικτύων και την αυξημένη χωρητικότητα που επιτυγχάνεται, γεννάται και η απαίτηση για τεχνολογίες μεταγωγής πακέτου της τάξης των Terabit για τη βέλτιστη χρήση των υψηλών ταχυτήτων των μέσων. Οι μεταγωγείς αυτού του τύπου αναμένεται να είναι από τα κρίσιμα στοιχεία της νέας υποδομής, μιας και θα αναβαθμίσουν τους τωρινούς μεταγωγείς και δρομολογητές και θα συνεισφέρουν με αυτόν τον τρόπο στην γρηγορότερη και πιο αξιόπιστη μετάδοση των σημάτων πληροφορίας.

Η τεχνολογία Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς (ATM, Asynchronous Transfer Mode) αναμένεται να έχει κυρίαρχη θέση στη νέα αυτή υποδομή, μεταδίδοντας με ολοκληρωμένο τρόπο φωνή, δεδομένα και κινούμενη εικόνα σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Το σημερινό δίκτυο κορμού αποτελείται από μεταγωγείς ATM και δρομολογητές IP, όπου τα πακέτα ATM και IP μεταφέρονται πάνω από οπτικό φυσικό στρώμα, όπως το SONET (Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο, Synchronous Optical Network). Το ATM παρέχει επίσης τη δυνατότητα διαφορετικών παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας για διάφορες υπηρεσίες πολυμέσων.

Τέλος πρέπει να τονίσουμε την κυρίαρχη θέση του πρωτοκόλλου IP στα σημερινά δίκτυα. Με την αλματώδη ανάπτυξη του διαδικτύου και την ευρεία χρήση του IP, οι λειτουργοί αναγνωρίζουν την ανάγκη μετάδοσης δεδομένων, φωνής και κινούμενης εικόνας πάνω από μια κοινή υποδομή με χρήση ενός κοινού πρωτοκόλλου, αντί μιας διαστρωματωμένης αρχιτεκτονικής. [1.1]

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε την ανάπτυξη των σύγχρονων τεχνολογιών στη μετάδοση δεδομένων.



Εικόνα 1.1: Η πρόοδος των σύγχρονων τεχνολογιών στη μετάδοση δεδομένων

## 1.2 Μοντέλο αναφοράς OSI

Στις αρχές της δεκαετίας του '70 ο ISO (International Standardization Organization) διαβλέποντας την ανάγκη ενός πρότυπου μοντέλου στη σύνδεση μεταξύ υπολογιστών, δημιούργησε το μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection). Στο μοντέλο OSI ορίζονται ο

έλεγχος ροής των δεδομένων, ο έλεγχος των λαθών, το user-interface, καθώς και κάποιες προδιαγραφές software και hardware που ρυθμίζουν την ανταλλαγή δεδομένων στο δίκτυο. Παρόλο που έχουν περάσει πολλά χρόνια από την πρώτη πρόταση, το OSI δεν έχει καταφέρει ακόμη να επικρατήσει εμπορικά σαν πρότυπο. Παρόλο που όλα τα πρωτόκολλα αναφέρονται σ' αυτό, κανένα δεν είναι απόλυτα συμβατό. Αυτό οφείλεται στο ότι η τυποποίηση του OSI ήταν μια διαδικασία χρονοβόρα, ενώ η ανάγκη που υπήρχε για την διασύνδεση των πρωτοκόλλων ήταν άμεση. Το μοντέλο OSI αποτελείται από 7 επίπεδα, και περιγράφει όλη την επικοινωνία μέσα σε ένα δίκτυο, αλλά και μεταξύ περισσότερων δικτύων.

Στο πρώτο, το *φυσικό επίπεδο* (physical layer), ορίζονται οι ηλεκτρικές και οι μηχανικές παράμετροι, δηλαδή η bit προς bit μεταφορά των δεδομένων μέσα από το καλώδιο του δικτύου. Αυτό είναι και το επίπεδο στο οποίο εκτελείται το πείραμά μας.

Το δεύτερο επίπεδο, το *επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων* (data link layer), αποτελεί ένα ορισμένο πλαίσιο για την μεταφορά των δεδομένων. Το επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων εξασφαλίζει την αλάνθαστη μεταφορά των δεδομένων μέσα στο δίκτυο.

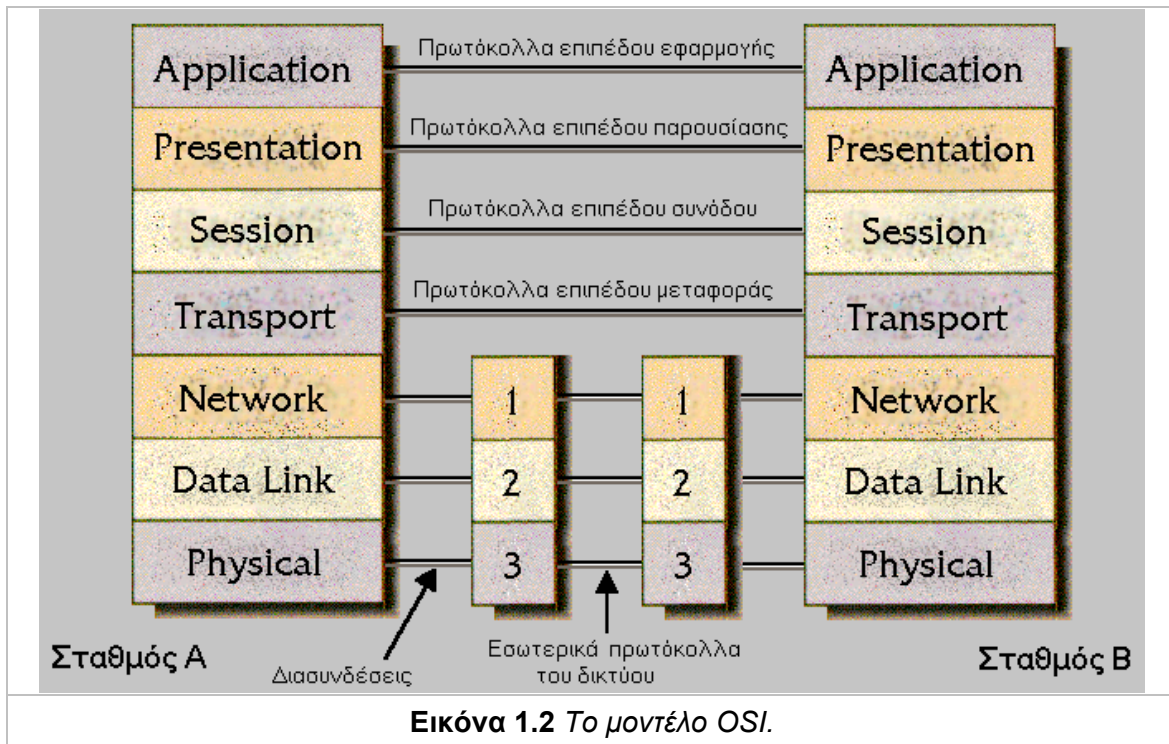
Το τρίτο επίπεδο, το *επίπεδο δικτύου* (network layer), αποτελεί τον σύνδεσμο μεταξύ του hardware και του software και ρυθμίζει την παραλαβή και παράδοση των δεδομένων από το hardware. Πιο αναλυτικά, οι λειτουργίες που υποστηρίζει είναι η δημιουργία και διακοπή σύνδεσης, έναρξη και διακοπή μετάδοσης, αναγνώριση λαθών και διαφανής μεταφορά δεδομένων μεταξύ των σταθμών του δικτύου. Σ' αυτό το επίπεδο λαμβάνεται η απόφαση για τον πιο φυσικό δρόμο θα ακολουθήσει κάποιο πακέτο δεδομένων στο δίκτυο.

Στο τέταρτο επίπεδο, το *επίπεδο μεταφοράς* (transport layer), γίνεται ο συντονισμός της μεταφοράς των δεδομένων σε ολόκληρο το δίκτυο. Αν για παράδειγμα παρουσιαστεί βλάβη σε κάποια γραμμή του δικτύου, τότε θα αναζητηθεί εναλλακτικός δρόμος, ή στην ανάγκη θα αποθηκευτούν τα δεδομένα μέχρι να αποκατασταθεί αυτή.

Το πέμπτο επίπεδο, το *επίπεδο συνόδου* (session layer), προσφέρει τα μέσα επικοινωνίας για ολόκληρο το δίκτυο. Στα καθήκοντα αυτού του επιπέδου περιλαμβάνεται ο έλεγχος του password, η επικοινωνία με τον χρήστη, καθώς και ο συγχρονισμός και η αποκατάσταση κάποιων sessions μετά από κάποιο λάθος στα χαμηλότερα επίπεδα.

Στο έκτο επίπεδο, το *επίπεδο παρουσίασης* (presentation layer), γίνεται η "μετάφραση" των δεδομένων για το ακόλουθο έβδομο επίπεδο, το επίπεδο εφαρμογής. Εδώ γίνεται επίσης ο έλεγχος των εισερχόμενων και εξερχόμενων δεδομένων, μεταφράζονται οι κωδικοί μετάδοσης και προσαρμόζονται τα formats της οθόνης και του εκτυπωτή.

Τέλος στην πιο υψηλή θέση του μοντέλου του OSI βρίσκεται το *επίπεδο εφαρμογής* (application layer). Αυτό αποτελεί το πραγματικό interface του δικτύου με τον χρήστη. Ασχολείται επίσης με την διαχείριση του συστήματος και των εφαρμογών στο δίκτυο. Για αυτό το λόγο τα περισσότερα προγράμματα βασίζονται στο επίπεδο εφαρμογής και δεν ασχολούνται με τα χαμηλότερα επίπεδα. [1.2] Στην Εικόνα 1.2 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση του OSI.



### 1.3 Ενσύρματα μέσα μετάδοσης

Ο στόχος του φυσικού επιπέδου είναι να μεταδίδει μια ανεπεξέργαστη ροή bit από μια μηχανή σε μια άλλη. Για την ίδια τη μετάδοση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα φυσικά μέσα. Καθένα από αυτά έχει τα δικά του χαρακτηριστικά από πλευράς εύρους ζώνης, καθυστέρησης, κόστους και ευκολίας εγκατάστασης και συντήρησης. Σε γενικές γραμμές τα μέσα ομαδοποιούνται σε κατευθυνόμενα μέσα όπως τα χάλκινα σύρματα και οι οπτικές ίνες και μη κατευθυνόμενα μέσα όπως τα ραδιοκύματα και οι ακτίνες laser στον αέρα. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των κατευθυνόμενων μέσων μετάδοσης.

a) Μαγνητικά μέσα: περιλαμβάνουν την εγγραφή των δεδομένων σε μαγνητική ταινία ή άλλα μεταφερόμενα μέσα (πχ εγγράφιμα DVDs) και την φυσική μεταφορά τους

στον προορισμό για αναπαραγωγή. Αν και άριστα όσον αφορά το εύρος ζώνης μειονεκτούν στην παρεμβαλλόμενη καθυστέρηση!

b) Σύστροφο ζεύγος: αποτελείται από 2 μεμονωμένα χάλκινα σύρματα, περίπου 1 mm σε πάχος, συνεστραμμένα ελικοειδώς μεταξύ τους, ώστε να μειώνεται η ακτινοβολία. Είναι πολύ συνηθισμένο μέσο μετάδοσης, ιδίως στην τηλεφωνία .

c) Ομοαξονικό καλώδιο: αποτελείται από ένα πυρήνα άκαμπτου χάλκινου καλωδίου, που περιβάλλεται από ένα μονωτικό υλικό. Ο μονωτής καλύπτεται από έναν κυλινδρικό αγωγό (σε μορφή πυκνού πλέγματος), ο οποίος με τη σειρά του καλύπτεται από ένα πλαστικό προστατευτικό περίβλημα. Λόγω της κατασκευής του αυτής, έχει καλύτερη θωράκιση από το σύστροφο ζεύγος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερες ταχύτητες.

d) Οπτικές ίνες: είναι παρόμοιες με τα ομοαξονικά καλώδια, με εξαίρεση το πλέγμα. Αποτελούνται από γυάλινο πυρήνα, ο οποίος είναι περικυκλωμένος με γυάλινη επικάλυψη, χαμηλότερου δείκτη διάθλασης ώστε, όπως θα δούμε παρακάτω, όλο το φως να μένει στον πυρήνα. Τέλος, υπάρχει για προστασία ένα λεπτό πλαστικό κάλυμμα. Πολλές οπτικές ίνες ομαδοποιημένες σε δέσμες προστατεύονται από εξωτερικό περίβλημα (μανδύα).[1.2]

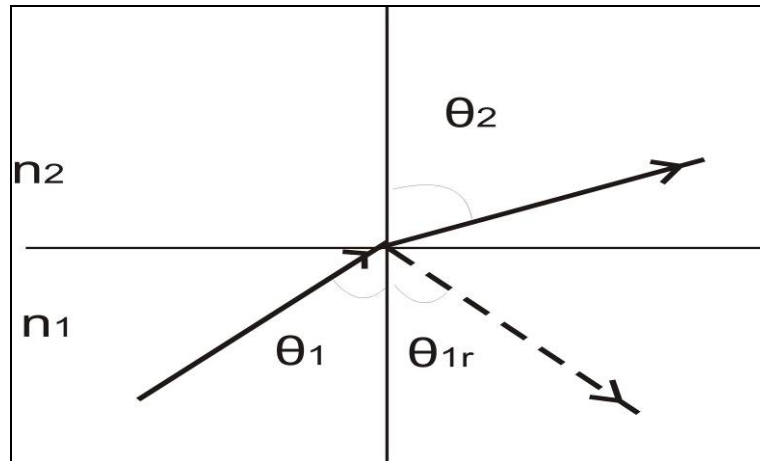
Το οπτικό σύστημα μετάδοσης έχει τρία βασικά συστατικά: τον πομπό, που αποτελείται από την πηγή φωτός και οπτοηλεκτρονικό διαμορφωτή, το μέσο μετάδοσης και τον δέκτη (που αποτελείται από φωτοανιχνευτή (PD ή φωτοδίοδο)). Το ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε φως (πομπός) και μεταφέρεται μέσω οπτικής ίνας (μέσο μετάδοσης) από την πηγή του στο άλλο άκρο, όπου βρίσκεται ο φωτοανιχνευτής (δέκτης), που μετατρέπει το φως ξανά σε ηλεκτρικό σήμα. Η ύπαρξη σήματος, δηλαδή ένας παλμός φωτός, σηματοδοτείται με το bit 1 ενώ η απουσία φωτός με το bit 0.

Η μεταφορά του φωτός μέσα στην οπτική ίνα βασίζεται στα φαινόμενα της διάθλασης και της ανάκλασης. Το φως μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από έναν αριθμό από ακτίνες που διαδίδονται σε ευθείες γραμμές μέσα σε ένα υλικό και που ανακλώνται ή/και διαθλώνται στην διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα σε δύο υλικά. Η Εικόνα 1.3 δείχνει την διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μέσων με συντελεστές διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$ . Μια ακτίνα φωτός από το μέσο 1 προσπίπτει στη διαχωριστική αυτή επιφάνεια. Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία που σχηματίζουν η προσπίπτουσα ακτίνα και η κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων και συμβολίζεται με  $\theta_1$ . Μέρος της ενέργειας ανακλάται πίσω στο μέσο 1 ως ανακλώμενη ακτίνα και η υπόλοιπη περνά στο μέσο 2 ως διαθλώμενη ακτίνα. Η γωνία διάθλασης  $\theta_{1r}$  είναι η γωνία μεταξύ της διαθλώμενης ακτίνας και της κάθετης στη διαχωριστική επιφάνεια, ενώ η γωνία ανάκλασης  $\theta_2$  είναι η γωνία

μεταξύ της ανακλώμενης ακτίνας και της κάθετης στη διαχωριστική επιφάνεια. Οι νόμοι της γεωμετρικής οπτικής ορίζουν ότι

$$\theta_{1r} = \theta_1$$

και  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  (νόμος Snell).



Εικόνα 1.3 Ακτίνα προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ μέσων με συντελεστές  $n_1$  και  $n_2$ .

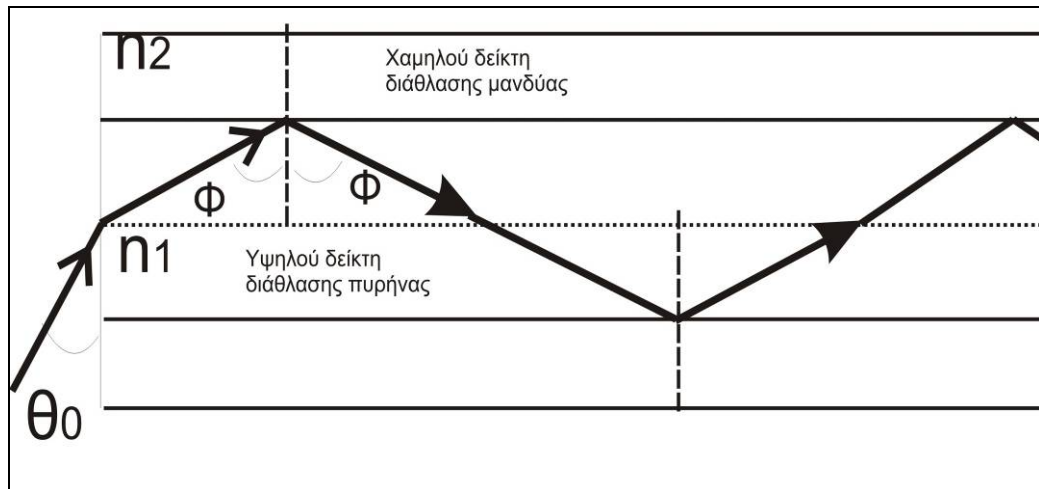
Όσο η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  αυξάνεται, αυξάνεται επίσης και η γωνία διάθλασης  $\theta_2$ . Με δεδομένο ότι  $n_1 > n_2$  και  $\theta_1 = \sin^{-1}(n_2/n_1)$  τότε  $\theta_2 = \pi/2$  ακτίνια. Για μεγαλύτερες τιμές τις  $\theta_1$ , δεν υπάρχει πλέον διαθλώμενη ακτίνα και όλη η ενέργεια της προσπίπτουσας ακτίνας ανακλάται. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ολική εσωτερική ανάκλαση. Η μικρότερη γωνία πρόσπτωσης για την οποία έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση ονομάζεται κρίσιμη γωνία και ισούται με  $\sin^{-1}(n_2/n_1)$ .

Στις οπτικές ίνες το φως διαδίδεται εξαιτίας μιας σειράς από ολικές εσωτερικές ανακλάσεις που συμβαίνουν στην διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στον πυρήνα και τον μανδύα. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 1.4. Σε αυτήν την εικόνα, φαίνεται επίσης η είσοδος του φωτός από το εξωτερικό μέσο που λαμβάνεται να είναι ο αέρας με συντελεστή διάθλασης  $n_0$ . Μπορεί να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας τον νόμο του Snell ότι μόνο οι ακτίνες φωτός που προσπίπτουν στην διαχωριστική επιφάνεια αέρα-πυρήνα με μια γωνία

$$\theta_0 < \theta_0^{\max} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}$$

θα υποστούν ολική εσωτερική διάθλαση στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-μανδύα και ως εκ τούτου θα διαδοθούν στην οπτική ίνα. Τέτοιες ακτίνες ονομάζονται οδηγούμενες ακτίνες, και η  $\theta_0^{\max}$  ονομάζεται γωνία αποδοχής (acceptance).

[1.3]



Εικόνα 1.4 Ολική ανάκλαση σε οπτική ίνα

## 1.4 Ανασκόπηση τεχνολογιών δικτύου

Γενικά τα δίκτυα μπορούν να ταξινομηθούν α) με βάση τον τρόπο μετάδοσης που χρησιμοποιούν και β) με βάση την εμβέλεια τους.

α) Βάσει του τρόπου μετάδοσης που χρησιμοποιούν τα δίκτυα διακρίνονται στα δίκτυα που χρησιμοποιούν συνδέσεις εκπομπής και στα δίκτυα που χρησιμοποιούν συνδέσεις από σημείο σε σημείο.

- *Συνδέσεις εκπομπής (broadcast connections):*

Στην πρώτη κατηγορία υπάρχει μόνο ένα κοινόχρηστο κανάλι επικοινωνίας. Μέσω αυτού, όταν στέλνεται ένα πακέτο από έναν πομπό, αυτό λαμβάνεται από όλες τις συνδεδεμένες μηχανές. Ελέγχοντας το πεδίο διεύθυνσης στην επικεφαλίδα του πακέτου θα καταλάβει αν προορίζεται για αυτό το μηχάνημα, οπότε και θα προχωρήσει στην επεξεργασία του ή για κάποιο άλλο, οπότε και θα το παραβλέψει.

- *Συνδέσεις από σημείο σε σημείο (point to point connections):*

Στην δεύτερη κατηγορία τα δίκτυα αποτελούνται από πολλές συνδέσεις ανάμεσα σε ζεύγη μηχανών. Για να φτάσει ένα πακέτο από την πηγή στον προορισμό περνάει από



διάφορους ενδιάμεσους κόμβους, οπότε ένα σημαντικό ζήτημα εδώ είναι η εύρεση του αποδοτικότερου μονοπατιού.

Συνήθως τα μικρά δίκτυα χρησιμοποιούν εκπομπή ενώ τα μεγαλύτερα μετάδοση από σημείο σε σημείο.

β) Ανάλογα με την εμβέλειά τους τα δίκτυα διακρίνονται σε:

■ *Τοπικά δίκτυα (LANS):*

Είναι ιδιωτικά δίκτυα συνήθως στεγασμένα σε ένα κτίριο ή σε μια έκταση ακτίνας μερικών χιλιομέτρων. Χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση προσωπικών υπολογιστών και σταθμών εργασίας σε γραφεία και εργοστάσια εταιρειών με στόχο την χρησιμοποίηση κοινών πόρων και την ανταλλαγή πληροφοριών.

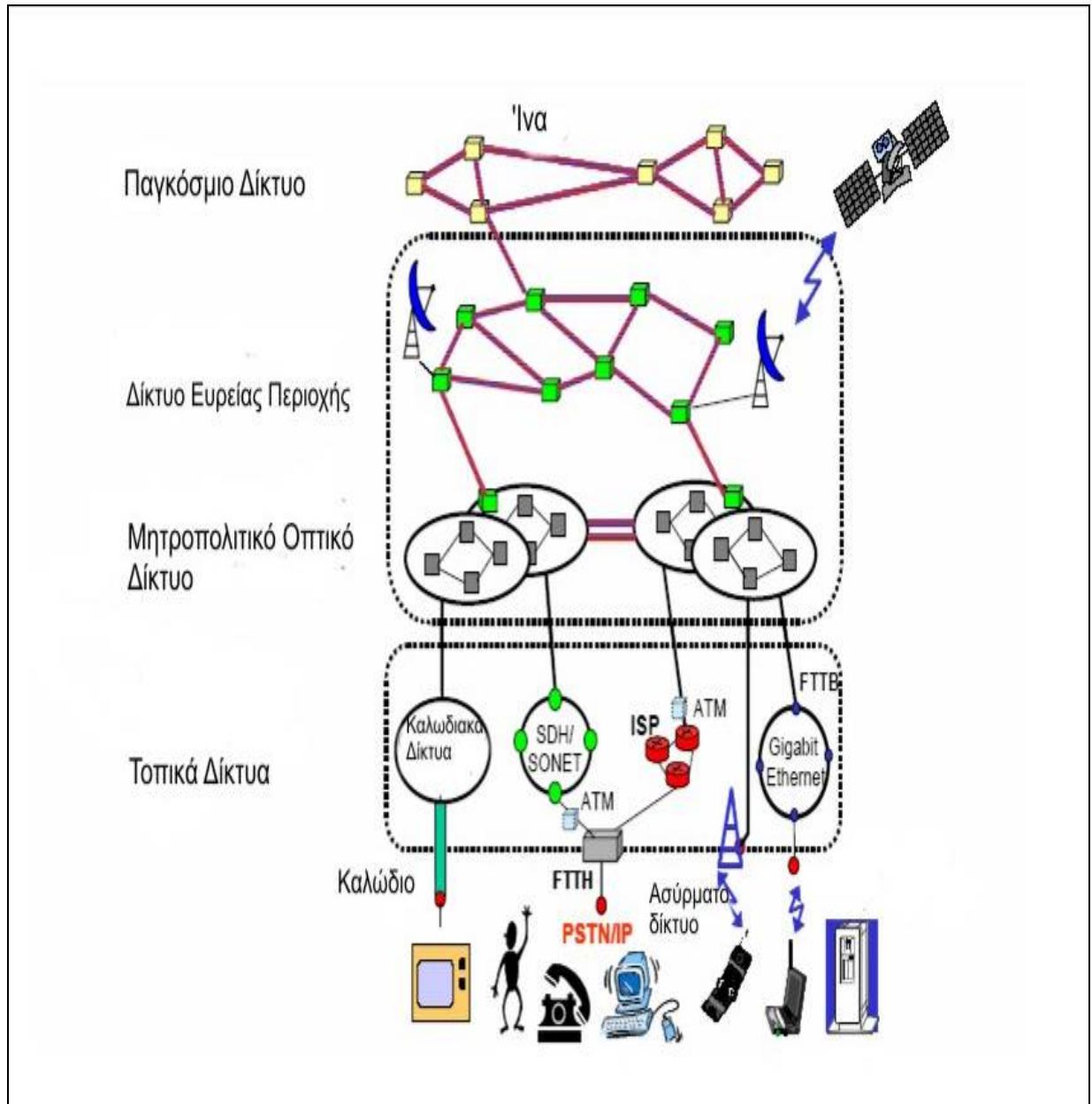
■ *Μητροπολιτικά δίκτυα (MANS):*

Τα δίκτυα αυτά αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση πολλαπλών δικτύων πρόσβασης και στην εξυπηρέτηση χρηστών με υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, όπως είναι, για παράδειγμα, οι οργανισμοί παροχής υπηρεσιών Internet. Η συνολική τους έκταση καλύπτει μερικές δεκάδες χιλιόμετρα και χρησιμοποιούνται, κυρίως, για την εσωτερική δικτύωση των πόλεων, στο οποίο οφείλουν, άλλωστε, και την ονομασία τους ως μητροπολιτικά. Τα δίκτυα αυτά είναι απαραίτητο να παρέχουν ποικιλία υπηρεσιών, όπως, για παράδειγμα, ασύνδετες υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας (best-effort connectionless services) ή/και προσανατολισμένης σύνδεσης (connection-oriented) υψηλής ποιότητας υπηρεσίες, δεδομένου ότι καλούνται να εξυπηρετήσουν το ευρύ και πολυμορφικό κοινό μιας πόλης. Επίσης, είναι σημαντικό για τα μητροπολιτικά δίκτυα να είναι εύκολα επεκτάσιμα, καθώς το μέγεθός τους αυξάνει πολύ γρήγορα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα MAN είναι το δίκτυο καλωδιακής τηλεόρασης που υπάρχει σε πολλές πόλεις.

■ *Δίκτυα ευρείας περιοχής (WANS) :*

Τα δίκτυα αυτά εκτείνονται σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Αποτελούνται από υπολογιστές υπηρεσίας, συνδεδεμένους σε ένα υποδίκτυο επικοινωνίας. Η δουλειά του υποδικτύου είναι να μεταφέρει μηνύματα ανάμεσα στους υπολογιστές υπηρεσίας. Ο

διαχωρισμός των καθαρά επικοινωνιακών θεμάτων του δικτύου από τα θέματα των εφαρμογών απλοποιεί σημαντικά τη σχεδίαση του δικτύου. [1.4]



Εικόνα 1.5 Δίκτυα τηλεπικοινωνιών

## 1.5 Ασυνδεδεσιστρεφής (connectionless) και συνδεδεσιστρεφής (connection-oriented) υπηρεσία και προδιαγραφές ενός ιδανικού δικτύου

Τα παραπάνω δίκτυα παρέχουν δυο τύπους υπηρεσιών για τις εφαρμογές: ασυνδεδεσιστρεφή υπηρεσία (connectionless service) και συνδεδεσιστρεφή υπηρεσία (connection-oriented service). Όταν μια εφαρμογή χρησιμοποιεί τη συνδεδεσιστρεφή υπηρεσία, το πρόγραμμα πελάτης (client) και το πρόγραμμα εξυπηρετητή (server) αποκαθιστούν μια σύνδεση μεταξύ τους και απαιτούν την εδραίωση ενός εικονικού κυκλώματος (Virtual Circuit) για τη μετάδοση της πληροφορίας. Η συνδεδεσιστρεφής υπηρεσία του Διαδικτύου (TCP – Transmission Control Protocol) παρέχεται μαζί με αρκετές άλλες υπηρεσίες, που περιλαμβάνουν την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων, τον έλεγχο ροής και τον έλεγχο συμφόρησης. Αντίθετα, η ασυνδεδεσιστρεφής υπηρεσία δεν παρέχει τίποτα από τα παραπάνω με αποτέλεσμα όμως τα δεδομένα να μεταδίδονται ταχύτερα. Όλες οι παραπάνω προδιαγραφές έχουν άμεσο αντίκτυπο στη λεγόμενη Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS - Quality Of Service). Πιο συγκεκριμένα ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής σε αξιοπιστία, καθυστέρηση, παραμόρφωση χρονισμού και εύρος ζώνης λαμβάνεται η απόφαση σχετικά με το είδος των υπηρεσιών που θα χρησιμοποιηθούν. Η Εικόνα 1.6 παραθέτει διάφορες συνηθισμένες εφαρμογές μαζί με την αυστηρότητα των απαιτήσεων τους. [1.5]-[1.6]

Εφαρμογή	Αξιοπιστία	Καθυστέρηση	Παραμόρφωση χρονισμού	Εύρος ζώνης
Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Μεταφορά αρχείων	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
Πρόσβαση στον Ιστό	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια
Τηλεσύνδεση	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή
Ήχος κατόπιν αιτήσεως	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια
Βίντεο κατόπιν αιτήσεως	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή
Τηλεφωνία	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Βιντεοδιάσκεψη	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή

Εικόνα 1.6 Αυστηρότητα των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσιών

Ο τρόπος μεταφοράς της πληροφορίας που σχετίζεται με τη μετάδοση, πολυπλεξία και μεταγωγή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης χωρίζεται σε δυο κατηγορίες: τη μεταγωγή κυκλώματος και τη μεταγωγή πακέτου οι οποίες θα εξετασθούν παρακάτω.

Τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών που θα παρέχονται στον τελικό χρήστη θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα ελκυστικά καθώς ο ανταγωνισμός ολοένα και αυξάνεται, σαν άμεση συνέπεια της εξέλιξης των τεχνολογιών και των δικτύων. Έτσι απαιτείται μεγαλύτερο εύρος ζώνης κατά απαίτηση και υψηλότερη ταχύτητα, όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαθεσιμότητα δικτύου και άμεση αποκατάσταση οποιασδήποτε βλάβης στο δίκτυο. Η μεγαλύτερη όμως απαίτηση από τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς είναι η κατασκευή δικτύων τα οποία θα παρέχουν **εύρος ζώνης όποτε και όπου** χρειάζεται, καθώς δεν μπορούν να προβλέψουν τη ενδεχόμενη ζήτηση που θα υπάρξει στο μέλλον.

Επομένως οι προδιαγραφές των σύγχρονων ανταγωνιστικών δικτύων συνοψίζονται στα παρακάτω [1.7]:

- Όσο το δυνατόν υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης και παροχή χωρητικότητας στο μικρότερο δυνατό κόστος.
- Εκτενής παροχή υπηρεσιών.
- Ευελιξία και ευκολία στην αναβάθμιση.
- Ταχύτατη ανταπόκριση στις απαιτήσεις της αγοράς.

## **1.6 Είδη μεταγωγής**

### **1.6.1 Μεταγωγή κυκλώματος**

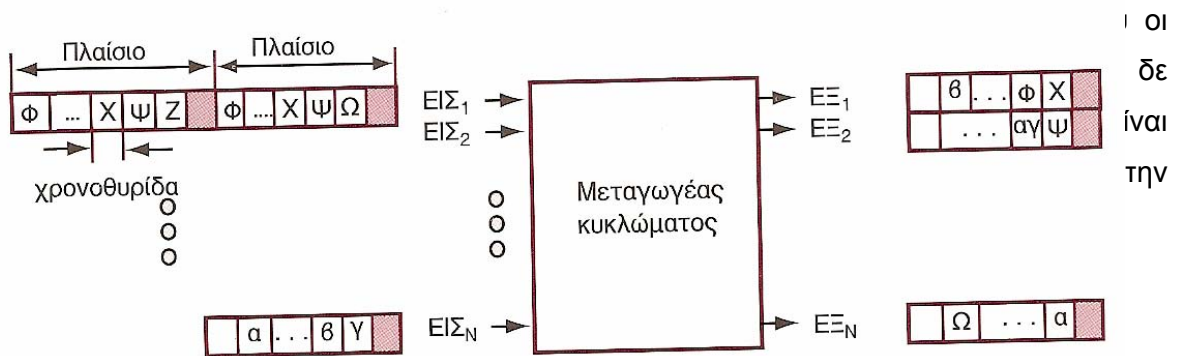
Η μεταγωγή κυκλώματος χρησιμοποιείται στα κλασικά τηλεφωνικά συστήματα και βασίζεται στην εγκατάσταση ενός κυκλώματος καθ' όλη τη διάρκεια χρήσης μιας αντίστοιχης υπηρεσίας. Αποτελεί μέθοδο προσανατολισμένη σε σύνδεση. Για να χρησιμοποιήσει, δηλαδή, μια υπηρεσία δικτύου βασισμένη σε μεταγωγή κυκλώματος, ο χρήστης της υπηρεσίας πρέπει να εγκαταστήσει πρώτα μια σύνδεση την οποία και απολύει όταν δεν επιθυμεί πλέον πρόσβαση στην υπηρεσία. Από το παραπάνω γίνεται σαφές, ότι η σηματοδότηση στις υπηρεσίες αυτού του τύπου είναι απαραίτητη, για την εγκατάσταση, τον έλεγχο και την κατάργηση των συνδέσεων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της μεταγωγής κυκλώματος, που απορρέει από το γεγονός της ύπαρξης σύνδεσης μεταξύ των οντοτήτων που επικοινωνούν, είναι ότι τα δεδομένα καταφθάνουν πάντα στον παραλήπτη με τη σειρά που τα μετέδωσε ο αποστολέας, αφού μεταφέρονται στο εκ των προτέρων εγκατεστημένο μονοπάτι μετάδοσης. Είναι ευνόητο από τα παραπάνω, ότι η έννοια της μεταγωγής κυκλώματος είναι άρρηκτα συνυφασμένη με την ύπαρξη μιας σύνδεσης. Αυτό φαίνεται και

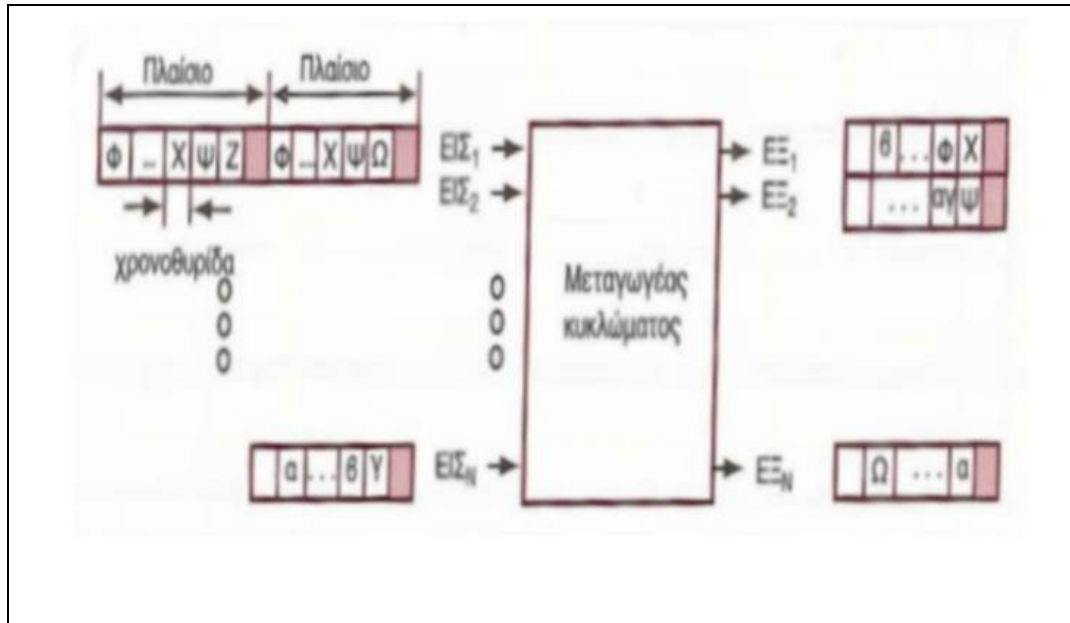
σχηματικά στην Εικόνα 1.8 όπου οι πόροι για την επίτευξη της επικοινωνίας μεταξύ πηγής και προορισμού είναι δεσμευμένοι από πριν.

Στη μεταγωγή κυκλώματος η πληροφορία μεταφέρεται με μια συγκεκριμένη συχνότητα επανάληψης (π.χ. 8bits/125μsec για 64Kbps). Η βασική μονάδα για αυτή τη συχνότητα επανάληψης ονομάζεται χρονική θυρίδα (timeslot) ή κανάλι. Η μεταφορά πληροφορίας μεταξύ δύο «γειτονικών» κόμβων βασίζεται στην αρχή της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM). Οι συνδέσεις, δηλαδή πολυπλέκονται χρονικά σε μία ζεύξη με συνένωση των αντίστοιχων χρονικών θυρίδων σε ένα πλαίσιο, το οποίο μεταφέρεται επίσης με συγκεκριμένη συχνότητα. Κάθε επιμέρους κύκλωμα (σύνδεση) χρησιμοποιεί πάντα την ίδια χρονική θυρίδα στο πλαίσιο για όλη τη διάρκεια της κλήσης.

Για τη μεταγωγή ενός κυκλώματος από μία εισερχόμενη προς μία εξερχόμενη ζεύξη, γίνεται έλεγχος με τη βοήθεια ενός πίνακα αντιστοίχισης, στον οποίο περιγράφεται η σχέση της εισερχόμενης ζεύξης και της χρονικής θυρίδας με την αντίστοιχη εξερχόμενη ζεύξη και την ανάλογη χρονική θυρίδα. Στην Εικόνα 1.7 φαίνεται ότι, η 1η χρονοθυρίδα κατέχεται από τη σύνδεση Ω της ζεύξης εισόδου ΕΙΣ1 και μεταφέρεται στη ζεύξη εξόδου ΕΞΝ στην Μ-ιοστή χρονοθυρίδα και μόνο σε αυτήν καθ' όλη τη διάρκεια της σύνδεσης.

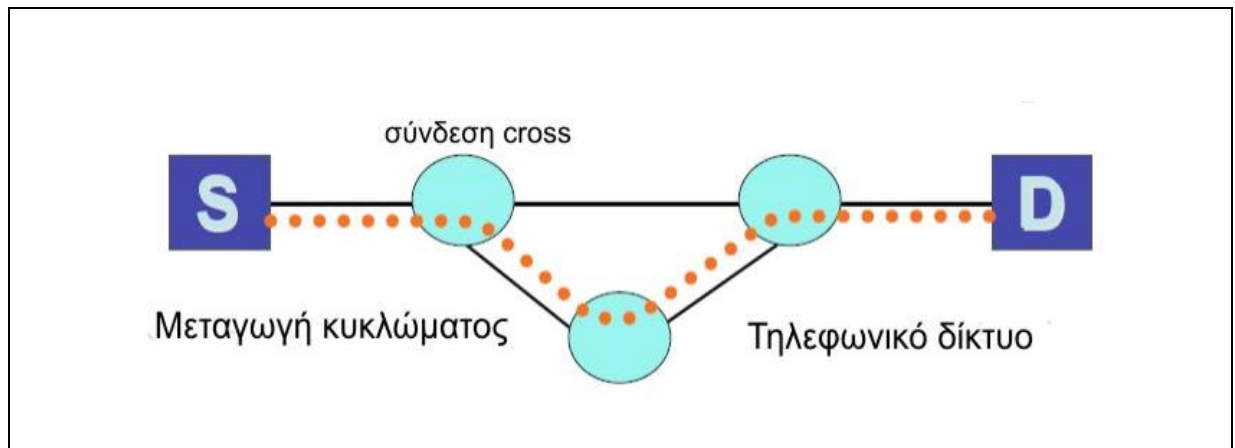
Το αδιαμφισβήτητο στοιχείο που συνηγορεί υπέρ της μεταγωγής κυκλώματος είναι η εγγύηση της ποιότητας υπηρεσίας, αφού οι πόροι δεσμεύονται εκ των προτέρων. Η διατήρηση, επίσης της ορθής σειράς παράδοσης, είναι ένα γεγονός που πιστώνεται στα θετικά. Παρόλα αυτά, υπάρχουν σοβαρά μειονεκτήματα, τα οποία δεν μπορούν να αγνοηθούν. Καταρχήν, οδηγεί σε κατασπατάληση πόρων του δικτύου, αφού αυτοί εκχωρούνται αρχικά για μια σύνδεση, κατά τη διάρκεια εγκατάστασης της. Επομένως, δεν





Εισερχόμενη ζεύξη	Χρονοθυρίδα	Εξερχόμενη ζεύξη	Χρονοθυρίδα	Σύνδεση
IN <sub>1</sub>	1	OUT <sub>N</sub>	M	Ω
	2	OUT <sub>2</sub>	1	Ψ
	3	OUT <sub>1</sub>	1	Χ
	...	...	...	...
	M	OUT <sub>1</sub>	2	Φ
IN <sub>2</sub>	1			
	2			
	...			
	M			
IN <sub>N</sub>	1	OUT <sub>2</sub>	2	γ
	2	OUT <sub>1</sub>	M	β
	...	...	...	...
	M	OUT <sub>N</sub>	1	α

Εικόνα 1.7 Μεταγωγή κυκλώματος



Εικόνα 1.8 Μεταγωγή κυκλώματος: Παρατηρείται η εκ των προτέρων δέσμευση πόρων από την πηγή στον προορισμό.

### 1.6.2 Μεταγωγή πακέτου

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στη μεταγωγή κυκλώματος προτάθηκε η μεταγωγή πακέτου η οποία προσφέρει καλύτερο μοίρασμα του εύρους ζώνης και είναι απλούστερη, πιο αποδοτική και λιγότερο ακριβή στην υλοποίηση. Στα συστήματα μεταγωγής πακέτου η πληροφορία του χρήστη οργανώνεται σε πακέτα. Εκτός όμως από την πληροφορία χρήστη, τα πακέτα περιέχουν και επιπλέον πληροφορία, γνωστή και ως επικεφαλίδα, η οποία χρησιμοποιείται εσωτερικά στο δίκτυο για δρομολόγηση, διόρθωση λαθών, έλεγχο ροής κ.α. Η επανασύνδεση των πακέτων στην αρχική μορφή της ροής δεδομένων γίνεται μόλις αυτά φτάσουν στον τελικό προορισμό.

Οι εφαρμογές διαδικτύου είναι οι κυριότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούν Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων. Το διαδίκτυο αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος υποδικτύων, τα οποία συνδέονται μέσω δρομολογητών με βάση ένα κοινό πρωτόκολλο επικοινωνίας, το πρωτόκολλο διαδικτύου (IP – Internet Protocol). Σε κάθε δρομολογητή είναι συνδεδεμένες πολλαπλές ζεύξεις. Για κάθε συνδεδεμένη ζεύξη, ο δρομολογητής έχει ένα **ενταμιευτή (buffer) εξόδου**, ο οποίος αποθηκεύει πακέτα, τα οποία ο δρομολογητής πρόκειται να - στείλει σε αυτή τη ζεύξη. Οι ενταμιευτές εξόδου παίζουν ένα βασικό ρόλο στη μεταγωγή πακέτου. Αν ένα πακέτο που φθάνει, πρέπει να μεταδοθεί επάνω σε μια ζεύξη αλλά βρει τη ζεύξη απασχολημένη με τη μετάδοση ενός άλλου πακέτου, το πακέτο πρέπει να περιμένει στην ουρά αναμονής του ενταμιευτή εξόδου. Εφόσον η ποσότητα χώρου στον ενταμιευτή είναι πεπερασμένη, ένα πακέτο που φθάνει μπορεί να βρει τον ενταμιευτή γεμάτο με άλλα

πακέτα που περιμένουν να μεταδοθούν. Σε αυτή την περίπτωση συμβαίνει **απώλεια πακέτου** - θα απορριφθεί είτε το πακέτο που μόλις έφθασε είτε ένα από τα πακέτα που είναι ήδη στην ουρά. Στην περίπτωση του διαδικτύου η λειτουργία αυτή επιτελείται από το υψηλού στρώματος πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης (TCP), του οποίου βασικό λειτουργικό χαρακτηριστικό είναι η εξασφάλιση ότι τα απορριπτόμενα πακέτα θα αναμεταδοθούν. Ουσιαστικά εδώ, τα πακέτα κατευθύνονται προς την έξοδο της ζεύξης χωρίς να ακολουθούν κάποιο σταθερό μοτίβο αλλά με τυχαία σειρά.

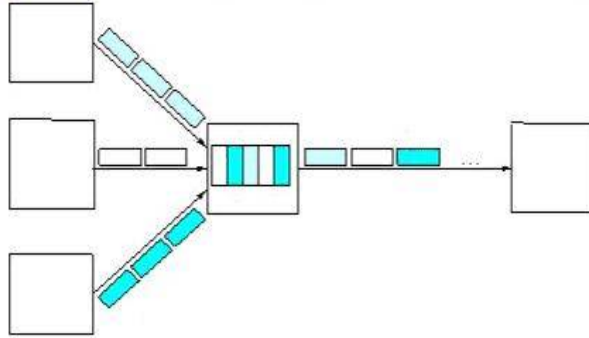
Τα παραπάνω περιγράφουν τη στατιστική πολυπλεξία που χρησιμοποιείται στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων και η οποία έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) στη μεταγωγή κυκλώματος, στην οποία κάθε υπολογιστής υπηρεσίας παίρνει την ίδια θυρίδα μέσα στα περιοδικά πλαίσια TDM. Η τεχνική στατιστικής πολυπλεξίας είναι κατάλληλη για την αντιμετώπιση πολλών “εκρηκτικών” ροών δεδομένων μιας ζεύξης σε μια ροή δεδομένων. Επομένως συνολικά, έχουμε αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης της ζεύξης. Προσοχή πρέπει να δοθεί στα προβλήματα που απορρέουν από αυτή την τεχνική όπως η απώλεια πακέτων που τονίσαμε και παραπάνω καθώς το άθροισμα των μέγιστων ρυθμών των ενεργών ροών δεδομένων υπερβαίνει τη χωρητικότητα της ζεύξης.

Έχουν βρεθεί διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν από την στατιστική πολυπλεξία όπως η χρήση μεταγωγέων με ενταμιευτές στις μονάδες εισόδου και η χρήση δικαιοσύνης στην προώθηση των πακέτων σε σχέση με το QoS της εκάστοτε εφαρμογής.

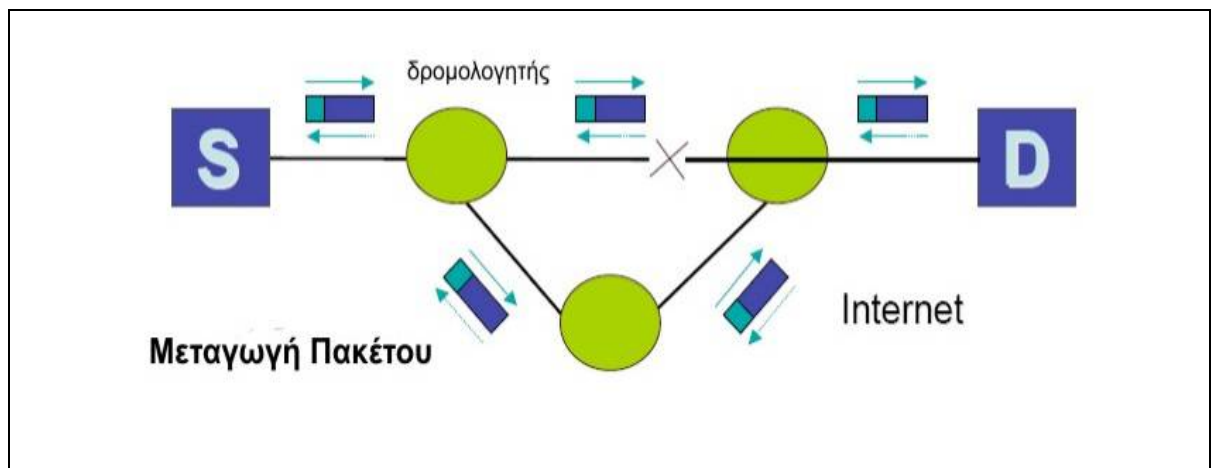
Η ITU-T (International Telecommunications Union – Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών) έχοντας σαν στόχο την αντιμετώπιση των προβλημάτων, που υπαγορεύονται από τη χρήση της μεταγωγής κυκλώματος και πακέτου, υιοθέτησε σαν τελική λύση τον Ασύγχρονο Τρόπο Μεταφοράς (Asynchronous Transfer Mode, ATM). Το ATM συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματα και των δυο τρόπων μεταφοράς και χαρακτηρίζεται από ευελιξία και ανθεκτικότητα στο χρόνο, αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων και ύπαρξη ενός παγκόσμιου δικτύου. [1.9]-[1.11]



- Κατ'απαίτηση διαίρεση χρόνου
- Προγραμματισμός ζεύξης ανα πακέτο
- Πακέτα από διαφορετικές πηγές οργανώνονται πάνω στη ζεύξη
- Ενταμειούνται τα πακέτα που ανταγωνίζονται για την ζεύξη
- Η υπερχειλίση του ενταμειυτή καλείται συνωστισμός



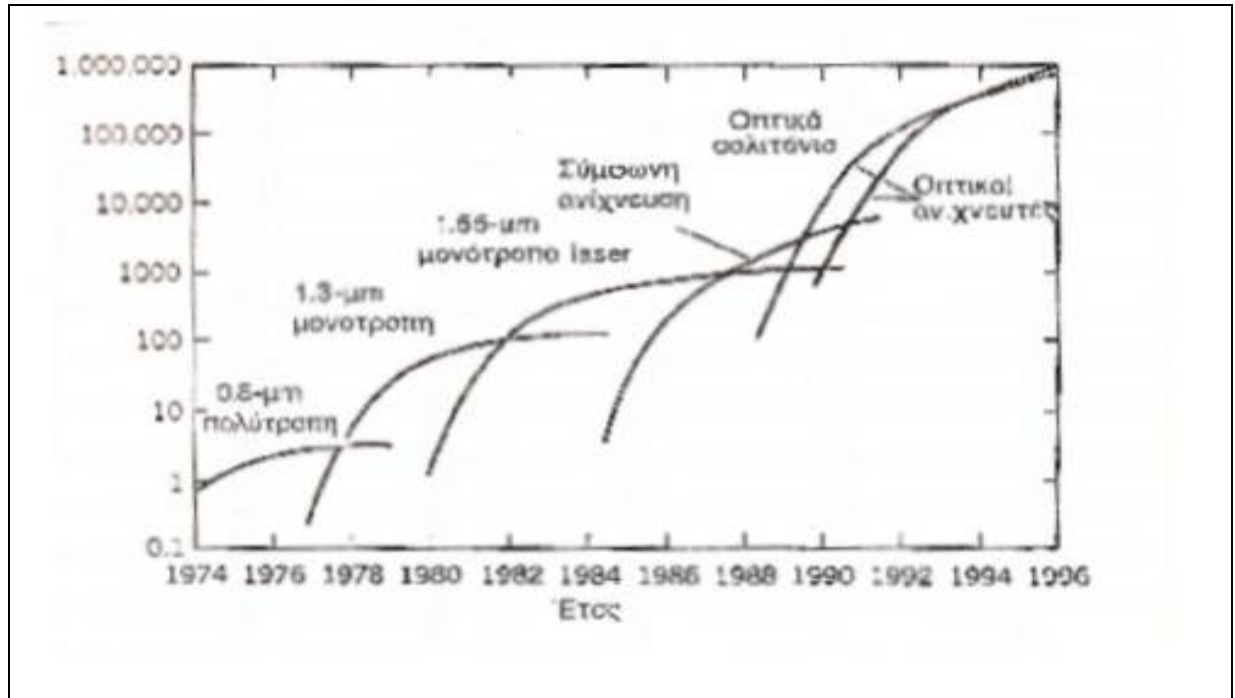
Εικόνα 1.9 Στατιστική πολυπλεξία



Εικόνα 1.10 Μεταγωγή Πακέτου: παρατηρείται η αποδοτικότερη και ευέλικτη παράδοση των πακέτων στον προορισμό

## 1.7 Δίκτυα ευρείας ζώνης οπτικών ινών

### 1.7.1 Γενικά – Ιστορική αναδρομή



Εικόνα 1.9: Εξέλιξη στην τεχνολογία των επικοινωνιών με φως την περίοδο 1974-1996. Οι διάφορες καμπύλες δείχνουν αύξηση στο γινόμενο ρυθμού των bits επί απόσταση, BL, για πέντε γενιές συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες.

Τα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών είναι συστήματα οπτικών κυμάτων που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες για μετάδοση της πληροφορίας. Τέτοια συστήματα έχουν αναπτυχθεί ευρύτατα από το 1980 και έχουν φέρει επανάσταση στην τεχνολογία των επικοινωνιών. Αρχικά το κύριο πρόβλημα ήταν οι μεγάλες απώλειες των οπτικών ινών. Ίνες που χρησιμοποιούνταν κατά τη δεκαετία του 1960 είχαν απώλειες πάνω από 1000 db/Km. Μία ξαφνική ανακάλυψη έγινε το 1970, όταν οι απώλειες οπτικής ίνας μπορούσαν να μειωθούν περίπου σε 20 db/Km σε μήκη κύματος κοντά στην περιοχή του 1  $\mu\text{m}$ . Τον ίδιο χρόνο περίπου, επιδείχτηκαν lasers ημιαγωγού GaAs, που λειτουργούσαν συνέχεια σε θερμοκρασία δωματίου. Η ταυτόχρονη ύπαρξη μιας συμπαγούς οπτικής πηγής και μιας οπτικής ίνας χαμηλών απωλειών οδήγησαν σε παγκόσμια προσπάθεια για την ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες.

Η Εικόνα 1.9 δείχνει την πρόοδο στη λειτουργικότητα των οπτικών συστημάτων

επικοινωνίας που πραγματοποιήθηκε μετά το 1974 μέσω αρκετών γενεών ανάπτυξης. Η πρόοδος είναι πράγματι ραγδαία, όπως είναι προφανές από την αύξηση πολλών τάξεων μεγέθους στο γινόμενο ρυθμού bit-απόστασης σε μία περίοδο μικρότερη από 25 χρόνια.

Λόγω της εμπορικής ανάπτυξης των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας ανάλογη ανάπτυξη ακολούθησε και η έρευνα . Μετά από πολλές δοκιμές, τα πρώτα οπτικά συστήματα που λειτουργούσαν κοντά στα 0.8  $\mu\text{m}$  έγιναν εμπορικά διαθέσιμα το 1980. Τα συστήματα αυτά λειτούργησαν σε ρυθμό bit 45 Mb/s και επέτρεψαν απόσταση μεταξύ επαναληπτών γύρω στα 10 Km.

Η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ επαναληπτών συγκρινόμενη με εκείνη ενός ομοαξονικού συστήματος ήταν ένα σπουδαίο κίνητρο για τους σχεδιαστές συστημάτων. Έτσι μειώθηκε το κόστος εγκατάστασης που σχετίζεται με κάθε επαναλήπτη. Έγινε ξεκάθαρο κατά τη διάρκεια του 1970, ότι η απόσταση μεταξύ επαναληπτών μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά για λειτουργία των οπτικών συστημάτων σε μήκη κύματος στην περιοχή του 1.3  $\mu\text{m}$ , όπου οι απώλειες των οπτικών ινών ήταν κάτω από 1 db/Km. Επιπλέον, οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν ελάχιστη διασπορά σε αυτήν την περιοχή μηκών κύματος. Αυτό το γεγονός οδήγησε σε μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη laser και ανιχνευτών από ημιαγωγούς InGaAsP, που λειτουργούν κοντά στα 1.3  $\mu\text{m}$ . Ο ρυθμός μετάδοσης των συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες που εμφανίσθηκαν πριν το 1980 περιορίσθηκε κάτω από 100 Mb/s λόγω διασποράς σε πολύτροπες οπτικές ίνες. Αυτός ο περιορισμός ξεπεράσθηκε με τη χρήση μονότροπων οπτικών ινών. Ένα εργαστηριακό πείραμα το 1981 απέδειξε μετάδοση με ρυθμό 2 Gb/s σε μονότροπη οπτική ίνα. Από το 1987 έγινε εμπορικά διαθέσιμη η παραγωγή αυτών των οπτικών συστημάτων στα 1.3  $\mu\text{m}$ , που λειτουργούσε με ρυθμούς μετάδοσης 1.7 Gb/s με απόσταση μεταξύ επαναληπτών περίπου 50 Km.

Η απόσταση μεταξύ επαναληπτών αυτών των οπτικών συστημάτων περιορίσθηκε από τις απώλειες της οπτικής ίνας σε λειτουργία στα 1.3  $\mu\text{m}$  (τυπικά 0.5 db/Km). Οι απώλειες στις γυάλινες οπτικές ίνες είναι ελάχιστες κοντά στα 1.55  $\mu\text{m}$ .

Πράγματι, απώλειες των 0.2 db/Km διαπιστώθηκαν σ' αυτήν την περιοχή του φάσματος, το 1979. Όμως, η εισαγωγή της επόμενης κατηγορίας οπτικών συστημάτων, που λειτουργούσαν στα 1.55  $\mu\text{m}$  καθυστέρησε σημαντικά, από μεγάλες διασπορές της ίνας κοντά στα 1.55  $\mu\text{m}$ . Συμβατικά lasers ημιαγωγού InGaAsP δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εξαιτίας του απλώματος του παλμού που συνέβαινε, σαν αποτέλεσμα ταυτόχρονης ταλάντωσης πολλών διαμηκών τρόπων μετάδοσης. Το πρόβλημα της διασποράς μπορούσε να ξεπερασθεί είτε χρησιμοποιώντας ίνες με ολίσθηση στη διασπορά, σχεδιασμένες να έχουν ελάχιστη διασπορά κοντά στα 1.55  $\mu\text{m}$  ή περιορίζοντας το φάσμα του laser σε ένα απλό διαμήκη τρόπο ταλάντωσης. Και οι δύο προσεγγίσεις

πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1980. Από το 1985, εργαστηριακά πειράματα έδειξαν τη δυνατότητα μετάδοσης της πληροφορίας σε ρυθμούς μετάδοσης bit μέχρι 4Gb/s σε αποστάσεις που υπερβαίνουν τα 100 Km. Η κατηγορία συστημάτων στα 1.55 μm, που λειτουργούσε στα 2.5 Gb/s, εμφανίσθηκε στο εμπόριο το 1990. Τέτοια συστήματα είναι ικανά να λειτουργούν σε ρυθμούς bit μέχρι 10 Gb/s. Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες με ολίσθηση στη διασπορά μαζί με laser διαμήκους τρόπου μετάδοσης.

Ένα μειονέκτημα των οπτικών συστημάτων που λειτουργούσαν στα 1.55 μm είναι ότι το σήμα αναγεννάται περιοδικά με τη χρήση ηλεκτρονικών επαναληπτών που απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις τυπικά περίπου 60 έως 80 Km. Η απόσταση μεταξύ επαναληπτών μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας ομόδυνα ή ετερόδυνα τεχνική φώρασης, αφού η χρήση της βελτιώνει την ευαισθησία του δέκτη. Τέτοια συστήματα αναφέρονται σαν *σύμφωνα συστήματα* οπτικών επικοινωνιών. Τα σύμφωνα συστήματα ήταν υπό ανάπτυξη παγκοσμίως κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 και τα δυναμικά τους πλεονεκτήματα αποδείχτηκαν σε πολλά πειράματα συστημάτων. Όμως, η εμπορική εισαγωγή αυτών των συστημάτων είχε καθυστερήσει λόγω της εμφάνισης των ενισχυτών οπτικών ινών το 1989.

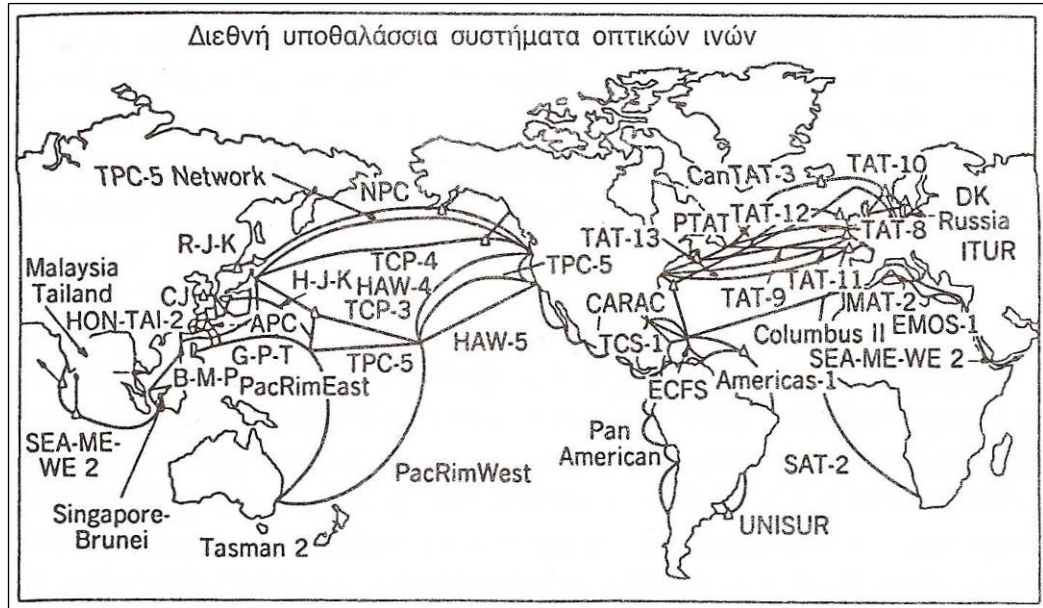
Η επόμενη κατηγορία οπτικών συστημάτων χρησιμοποιεί την οπτική ενίσχυση για αύξηση της απόστασης μεταξύ επαναληπτών και πολυπλεξία με διαίρεση του μήκους κύματος (WDM) για αύξηση του ρυθμού μετάδοσης bit. Σε τέτοια συστήματα, οι απώλειες οπτικών ινών αντισταθμίζονται περιοδικά με τη χρήση ενισχυτών οπτικών ινών με εμπλουτισμό με έρβιο, οι οποίοι τοποθετούνται σε αποστάσεις 60-100 Km. Τέτοιοι ενισχυτές αναπτύχθηκαν κατά τη δεκαετία του 1980 και διατέθηκαν στο εμπόριο το 1990. Το 1991, ένα πείραμα έδειξε τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων (data) σε αποστάσεις πάνω από 21.000 Km με ρυθμούς 2.5 Gb/s και σε αποστάσεις πάνω από 14.300 Km με ρυθμούς 5 Gb/s χρησιμοποιώντας μία διάταξη ανακυκλωμένου βρόχου. Αυτή η απόδοση έδειξε ότι ένα υποθαλάσσιο σύστημα μετάδοσης, εξ' ολοκλήρου οπτικό και με ενισχυτές πάνω σε ένα οπτικό υποθαλάσσιο σύστημα μετάδοσης μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για διηπειρωτικές επικοινωνίες. Το 1996, όχι μόνο μετάδοση πάνω από 11.300 Km με ρυθμό 5Gb/s είχε γίνει με τη χρήση υποθαλάσσιων καλωδίων, αλλά λειτούργησε και ένα εμπορικό υπερωκεάνιο καλώδιο (TPC-5).

Η Εικόνα 1.10 δείχνει ένα διεθνές δίκτυο υποθαλάσσιων οπτικών συστημάτων που λειτούργησε το 1996. Έχουν σχεδιασθεί πολλά άλλα υπερωκεάνια οπτικά συστήματα. Η ζεύξη των 27.300 Km οπτικών ινών ανά τον κόσμο (γνωστή σαν FLAG) άρχισε να λειτουργεί το 1997, συνδέοντας χώρες της Ασίας και της Ευρώπης σε 5Gb/s, με αρκετά τμήματα να λειτουργούν στα 10 Gb/s. . Όμως, ίσως το πιο πολυσυζητημένο σχήμα καλωδίωσης με οπτική ίνα είναι το Africa One. Το συγκεκριμένο project, που αρχικά ήταν

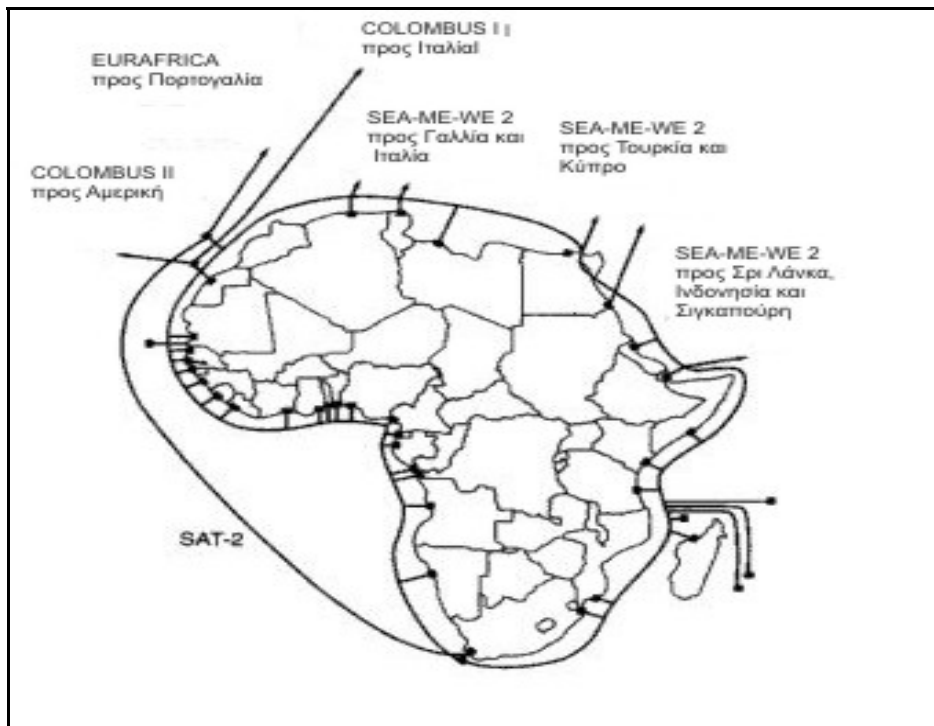
υπό την αιγίδα των ITU και AT&T Υποθαλάσσια Συστήματα, περιλαμβάνει ένα υποθαλάσσιο δακτύλιο οπτικής ίνας μήκους 32.000 χιλιομέτρων που κυκλώνει την αφρικανική ήπειρο και τέθηκε σε λειτουργία το 2000. Κεντρική ιδέα του Africa One είναι ο ευρύς σχεδιασμός του σε «δακτύλιο-διακλάδωση» (ring and branch). Αποτελείται από διακλαδώσεις που ενώνουν τα παράκτια σημεία με τον κύριο δακτύλιο οπτικής ίνας επιτρέποντας έτσι την σύνδεση μεταξύ των παραθαλάσσιων και των ηπειρωτικών χωρών καθώς και των νησιών της Αφρικής. Το σχήμα εκμεταλλεύεται τις τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία των οπτικών ινών χρησιμοποιώντας την πολυπλεξία μήκους κύματος WDM, η οποία αυξάνει την χωρητικότητα των οπτικών ινών μεταδίδοντας ταυτόχρονα σήματα σε διαφορετικά μήκη κύματος σε μια μόνο οπτική ίνα. Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο του συστήματος είναι η ανεξαρτησία των συνδεδόμενων κόμβων. Το Africa ONE παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.11. [1.17]

Ξεκάθαρα πλέον, η συγκεκριμένη κατηγορία έχει προκαλέσει επανάσταση στην τεχνική των οπτικών συστημάτων με χαρακτηριστικό γνώρισμα την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος με τη μετάδοση πολλών καναλιών μέσω της τεχνικής WDM. Οι οπτικοί ενισχυτές είναι ιδανικοί για πολυκαναλικά συστήματα οπτικών επικοινωνιών αφού όλα τα κανάλια μπορούν να ενισχυθούν ταυτόχρονα χωρίς να απαιτείται αποπολυπλεξία ξεχωριστών καναλιών. Σε μία επίδειξη το 1996, είκοσι κανάλια 5 Gb/s μεταδόθηκαν σε απόσταση πάνω από 9100 Km σε μια διάταξη ανακυκλωμένου βρόχου, με αποτέλεσμα ένα ολικό ρυθμό μετάδοσης 100 Gb/s, ενώ το γινόμενο BL (γινόμενο του ρυθμού των bits επί απόσταση) ήταν 910 (Tb/s)-Km. Σε μία άλλη πειραματική καταχώρηση, επιτεύχθηκε συνολικός ρυθμός bit 1.1 Tb/s με πολυπλεξία 55 καναλιών που το καθένα λειτουργούσε με 20 Gb/s. Παρά τη χρήση τεχνικών αποφυγής της διασποράς, τα φαινόμενα διασποράς περιόρισαν την ολική απόσταση μετάδοσης σε 150 Km. Εμπορικά συστήματα WDM που λειτουργούσαν με ρυθμό μετάδοσης μέχρι 40 Gb/s διατέθηκαν στο τέλος του 1996. Ένα μεγάλο σύστημα που διέσχισε τον Ειρηνικό (TPC-6) και λειτουργούσε στα 100 Gb/s σχεδιάστηκε για να αρχίσει να λειτουργεί το έτος 2000. Το γινόμενο ρυθμού μετάδοσης bit-απόσταση για ένα τέτοιο σύστημα υπερβαίνει τα 900 (Tb/s)-Km, δείχνοντας την πρόοδο που πραγματοποιήθηκε μέσα σε μία περίοδο 20 ετών.

Η επόμενη κατηγορία συστημάτων επικοινωνίας με οπτικές ίνες ασχολείται με την εύρεση μιας λύσης στο πρόβλημα της διασποράς των οπτικών ινών. Οι οπτικοί ενισχυτές λύνουν το πρόβλημα των απωλειών, αλλά ταυτόχρονα κάνουν το πρόβλημα της διασποράς χειρότερο, αφού τα φαινόμενα διασποράς συσσωρεύονται λόγω πολλαπλών σταδίων ενίσχυσης. Κατά τη δεκαετία του 1990 αναπτύχθηκαν αρκετές τεχνικές αντιστάθμισης της διασποράς για να διορθώσουν το συγκεκριμένο πρόβλημα.



Εικόνα 1.10: Διεθνές υποθαλάσσιο δίκτυο συστημάτων επικοινωνιών με οπτικές ίνες όπως διαμορφώνεται κατά το τέλος του 1996.



Εικόνα 1.11 Το δίκτυο Africa One

Μία τελική λύση βασίζεται στην πρωτότυπη ιδέα των οπτικών σολιτονίων, οπτικών παλμών που συντηρούν το σχήμα τους κατά τη διάρκεια της μετάδοσης σε μία οπτική ίνα με απώλειες αντισταθμίζοντας την επίδραση της διασποράς μέσω της μη γραμμικότητας της οπτικής ίνας. Παρόλο που η βασική ιδέα προτάθηκε αρκετά νωρίς, το 1973, μόνο το

1988 ένα εργαστηριακό πείραμα απέδειξε τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων (data) σε απόσταση πάνω από 4.000 Km αντισταθμίζοντας τις απώλειες της οπτικής ίνας λόγω εξαναγκασμένης σκέδασης Raman. Για την ενίσχυση των σολιτονίων, χρησιμοποιήθηκαν ενισχυτές οπτικών ινών εμπλουτισμένοι με έρβιο μετά το 1989. Από τότε, πολλά πειράματα συστημάτων έχουν αποδείξει την προφανή δυναμική των συστημάτων επικοινωνίας με σολιτόνια. Από το 1994, σολιτόνια μεταδόθηκαν σε αποστάσεις πάνω από 35.000 Km με ρυθμό 10 Gb/s και πάνω από 24.000 Km με ρυθμό 15 Gb/s. Το 1996, σε ένα πείραμα ανακυκλωμένου βρόχου, η μετάδοση σολιτονίου έγινε σε απόσταση 9.400 Km με ρυθμό 70Gb/s πολυπλέκοντας επτά κανάλια των 10 Gb/s το καθένα.

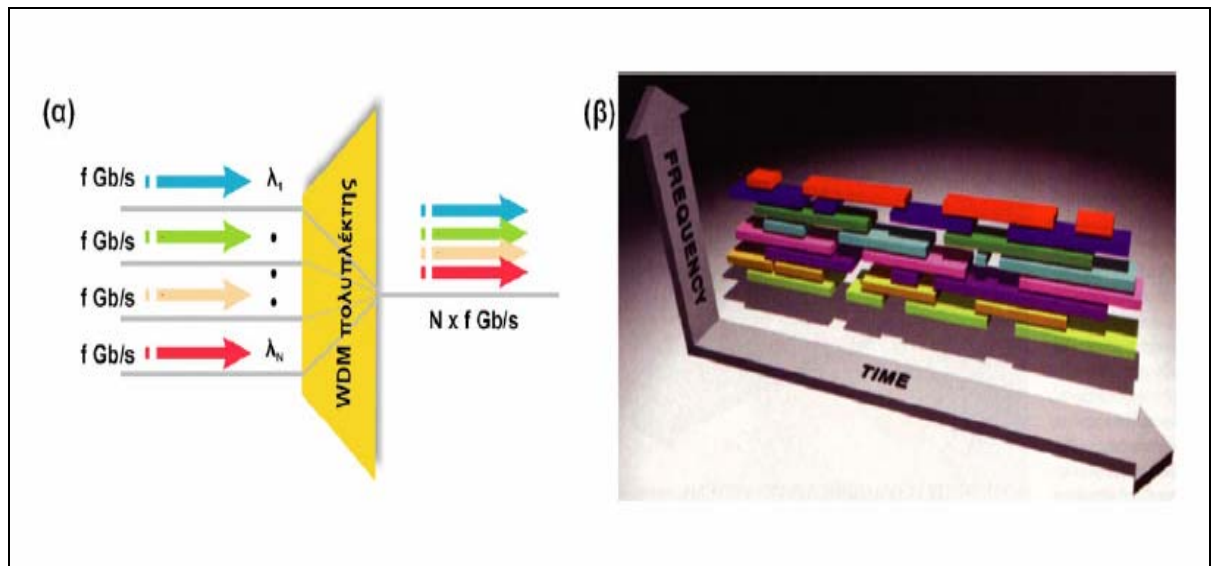
Παρόλο που η τεχνολογία της επικοινωνίας με οπτικές ίνες καλύπτει μόνο δύο δεκαετίες, έχει εξελιχθεί ραγδαία και έχει φθάσει σε ένα συγκεκριμένο στάδιο ωρίμανσης.[1.12]

### **1.7.2 Μέθοδοι πολύπλεξης**

Όπως τονίσαμε και παραπάνω, το εύρος ζώνης του σήματος στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας μπορεί να υπερβεί το 1 THZ. Ωστόσο, στην πράξη ο ρυθμός μετάδοσης bit συχνά περιορίζεται λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από τη διασπορά και τη μη-γραμμικότητα στις οπτικές ίνες καθώς και την ταχύτητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Η μετάδοση των πολλαπλών οπτικών καναλιών μέσω της ίδιας οπτικής ίνας δίνει έναν πολύ απλό τρόπο χρήσης των ανεπανάληπτων ικανοτήτων που προσφέρει η οπτική σαν επιστήμη. Η πολυπλεξία των καναλιών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε στην περιοχή χρόνου, είτε στην περιοχή συχνότητας, οδηγώντας σε *πολυπλεξία με διαίρεση-χρόνου* (TDM) στην πρώτη περίπτωση και σε *πολυπλεξία με διαίρεση-συχνότητας* (FDM) στην δεύτερη. Η TDM στην ηλεκτρική περιοχή χρησιμοποιείται αδιαλείπτως ακόμη και στα μονοκαναλικά οπτικά συστήματα. Παρακάτω θα επικεντρωθούμε στις τεχνικές TDM και FDM που χρησιμοποιούνται στην οπτική περιοχή. Για να εξηγήσουμε τον διαχωρισμό, συνήθως ονομάζουμε τις δύο τεχνικές οπτικής περιοχής *οπτικό TDM* (OTDM) και *πολυπλεξία με διαίρεση του μήκους κύματος* (WDM), αντίστοιχα. Τα οπτικά συστήματα, που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους τεχνικές, ονομάζονται πολυκαναλικά συστήματα επικοινωνίας. Τέλος θα σχολιάσουμε ένα νέο είδος τεχνικής πολυπλεξίας γνωστό σαν πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα.

### 1.7.2.1 Πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (Wavelength Division Multiplexing -WDM)

Το WDM αντιστοιχεί στην τεχνική εκείνη όπου πολλά οπτικά φέροντα σε διαφορετικά μήκη κύματος διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας ανεξάρτητα ηλεκτρικά ρεύματα bit (τα οποία μπορούν από μόνα τους να χρησιμοποιούν τεχνικές TDM και FDM στην ηλεκτρική περιοχή) και κατόπιν μεταδίδονται μέσω της ίδιας οπτικής ίνας, όπως παρατηρούμε και στην Εικόνα 1.12 . [1.13]

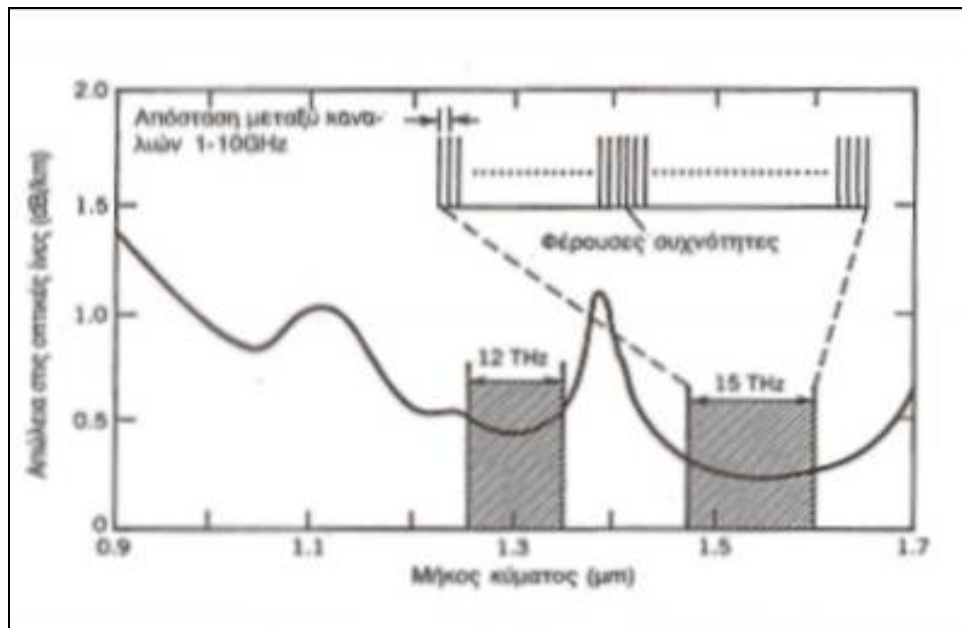


Εικόνα 1.12: (α) Η τεχνική της πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος (WDM). Τα  $N$  μήκη κύματος με ρυθμό πληροφορίας  $f$  Gb/s το καθένα πολυπλέκονται στον WDM πολυπλέκτη, και στην έξοδο προκύπτει ένα πολυχρωματικό (πολυκυματικό) σήμα δεδομένων με συνολικό ρυθμό  $N \times f$  Gb/s μέσα στην ίδια οπτική ίνα. (β) Η τεχνική WDM μέσα από ένα γράφημα της συχνότητας συναρτήσει του χρόνου.

Το οπτικό σήμα στον δέκτη υφίσταται αποπολυπλεξία σε ξεχωριστά κανάλια χρησιμοποιώντας μια οπτική τεχνική. Το WDM έχει τη δυνατότητα να εκμεταλλεύεται το μεγάλο εύρος ζώνης που προσφέρει η οπτική ίνα. Για παράδειγμα, εκατοντάδες κανάλια των 10Gb/s μπορούν να μεταδοθούν από την ίδια ίνα, αν η μεταξύ τους απόσταση μειωθεί στα 1-10GHz. Η Εικόνα 1.13 παρουσιάζει τα παράθυρα μετάδοσης χαμηλής-απώλειας στις οπτικές ίνες στις περιοχές μήκους κύματος γύρω στα 1.3 και 1.55  $\mu\text{m}$ . Κάθε παράθυρο



καλύπτει ένα εύρος ζώνης μεγαλύτερο των 10THZ, δηλώνοντας ότι η ολική χωρητικότητα των συστημάτων WDM υπερβαίνει τα 10Tb/s.



Εικόνα 1.13 Παράθυρα μετάδοσης χαμηλής απώλειας στις οπτικές ίνες πυριτίου στις περιοχές μήκους κύματος γύρω στα 1.3 και 1.55μm. Το ένθετο παράθυρο παρουσιάζει σχηματικά την πολυκαναλική λειτουργία σε παράθυρο μετάδοσης 1.55μm.

Στην πιο απλή μορφή του, το WDM χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δύο καναλιών σε διαφορετικά παράθυρα μετάδοσης της οπτικής ίνας. Για παράδειγμα, ένα πραγματικό οπτικό σύστημα 1.3μm μπορεί να αναβαθμίσει τη χωρητικότητά του αν προσθέσουμε άλλο ένα κανάλι γύρω στα 1.55μm, με αποτέλεσμα απόσταση μεταξύ καναλιών της τάξης των 250nm.

Η τελική χωρητικότητα των ζεύξεων οπτικών ινών WDM εξαρτάται από το πόσο μπορούν τα κανάλια να συσκευάζονται μεταξύ τους κοντά στην περιοχή του μήκους κύματος. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ καναλιών περιορίζεται από τις μεταξύ τους παρεμβολές. Τυπικά, η απόσταση μεταξύ των καναλιών θα πρέπει να υπερβαίνει το τετραπλάσιο του ρυθμού μετάδοσης bit. Η περιοχή χαμηλής απώλειας των εξελιγμένων τεχνικά οπτικών ινών εκτείνεται σε πάνω από 120nm στην περιοχή του μήκους κύματος

γύρω στα  $1.55\mu\text{m}$  (βλέπε Εικόνα 1.13). Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ καναλιών μπορεί να είναι μόλις 80GHz ή 0.6nm για κανάλια των 20Gb/s. Αφού μπορούν να χωρέσουν 200 κανάλια σε εύρος ζώνης 120nm, ο ενεργός ρυθμός μετάδοσης bit θα είναι μέχρι και 4Tb/s. Αν υποθέσουμε ότι το σήμα WDM μπορεί να μεταδοθεί σε απόσταση 150km χωρίς την ανάγκη ηλεκτρονικής αναμετάδοσης ή οπτικής ενίσχυσης, το ενεργό γινόμενο BL υπερβαίνει τα 600 (Tb/s)-km, χρησιμοποιώντας τεχνολογία WDM.

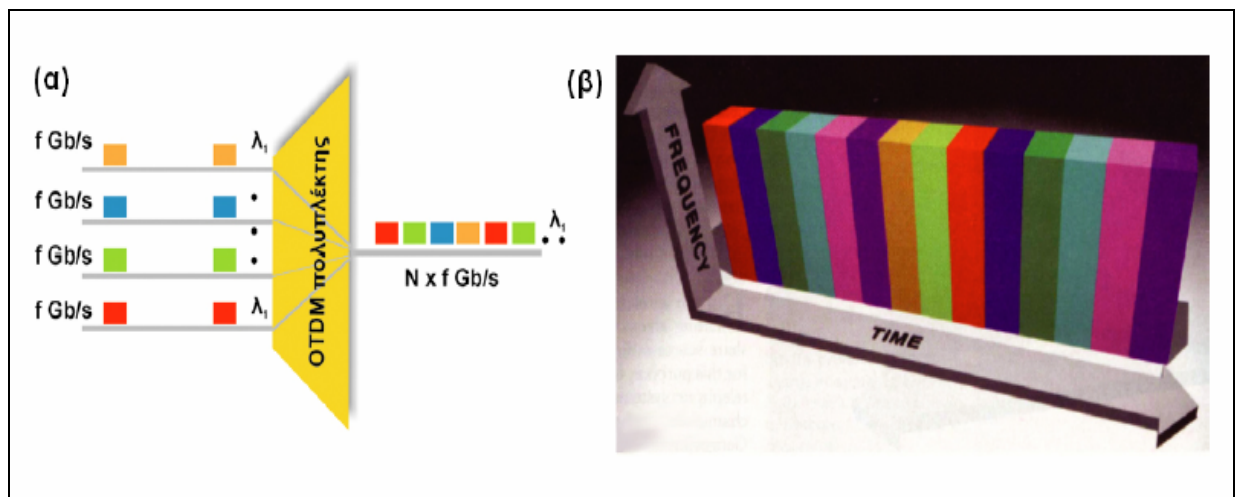
Το σημαντικότερο θέμα της σχεδίασης των οπτικών συστημάτων WDM είναι η διαφωνία (crosstalk). Η απόδοση του συστήματος υποβαθμίζεται όποτε έχουμε διαφωνία κι οδηγεί σε μεταφορά της ισχύος από το ένα κανάλι στο άλλο. Μία τέτοια μεταφορά μπορεί να εμφανιστεί λόγω των μη-γραμμικών επιδράσεων στις οπτικές ίνες, φαινόμενο που ονομάζεται μη-γραμμική διαφωνία, αφού εξαρτάται από τη μη-γραμμική φύση του καναλιού επικοινωνίας. Τα κυριότερα από τα μη γραμμικά φαινόμενα με καθοριστική επίδραση στην συνολική επίδοση μίας WDM ζεύξης είναι η μίξη τεσσάρων φωτονίων (Four Wave Mixing - FWM), η ετεροδιαμόρφωση φάσης (Cross Phase Modulation - XPM) και η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman (Stimulated Raman Scattering - SRS). Η απόδοση των WDM συστημάτων όμως επηρεάζεται και από γραμμικά φαινόμενα όπως η χρωματική διασπορά (chromatic dispersion) της ίνας και η διασπορά τρόπων πόλωσης (Polarization Mode Dispersion - PMD).

Τα εμπορικά διαθέσιμα WDM δίκτυα, που έχουν ανακοινωθεί από μεγάλες τηλεπικοινωνιακές εταιρίες, περιλαμβάνουν ως και 160 κανάλια σε ρυθμό μετάδοσης 2.5–10Gb/s το καθένα ή 80 κανάλια με ρυθμό μετάδοσης 40Gb/s ανά κανάλι. Σε εργαστηριακό/ερευνητικό επίπεδο οι επιδόσεις των WDM συστημάτων μετάδοσης είναι πολύ πιο εντυπωσιακές, υποδεικνύοντας τις τεράστιες δυνατότητες και τη δυναμική αυτών. Έτσι, πειράματα έχουν επιδείξει επιτυχή μετάδοση συνολικής διέλευσης 10.92Tb/s ( $273 \times 40\text{Gb/s}$ ) σε απόσταση 117Km, 6.4 Tb/s ( $159 \times 42.7\text{Gb/s}$ ) σε απόσταση 2.100Km, 3.65 Tb/s ( $365 \times 11.6\text{Gb/s}$ ) σε απόσταση 6.850Km, 3.2Tb/s ( $80 \times 42.7\text{Gb/s}$ ) σε απόσταση 5.200Km. Για τη μετάβαση της τεχνολογίας από το εργαστήριο στην αγορά έχει δειχθεί από θεωρητικές και στατιστικές μελέτες ότι απαιτούνται περίπου 2-3 χρόνια. Λόγω της ταχύτατης αύξησης του αριθμού των χρησιμοποιούμενων καναλιών η τεχνική WDM πολύ συχνά αναφέρεται, πλέον, και ως πυκνή πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing-DWDM). [1.12]-[1.14]

### 1.7.2.2 Οπτική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Optical Time Division Multiplexing – OTDM)

Η TDM συνήθως εκτελείται στην ηλεκτρική περιοχή για να πάρουμε τις ψηφιακές ιεραρχίες των συστημάτων τηλεπικοινωνίας. Από αυτή την άποψη, ακόμη και τα μονοκαναλικά οπτικά συστήματα μεταφέρουν πολλά κανάλια TDM. Αυτή η τεχνική γίνεται δύσκολη στην υλοποίηση της για ρυθμούς μετάδοσης bit πάνω από 10Gb/s λόγω των περιορισμών που επιβάλλουν τα ηλεκτρονικά υψηλής ταχύτητας και η απόδοση άμεσης διαμόρφωσης των laser ημιαγωγών. Μία λύση προσφέρει η οπτική TDM (OTDM), τεχνική που έχει τη δυνατότητα να αυξάνει τον ρυθμό των bit για ένα μονοκαναλικό οπτικό φέρον σε τιμή μέχρι και 1 Tb/s. Παρόλο που δεν έχουν διατεθεί ακόμη στο εμπόριο, τα συστήματα OTDM μελετηθήκαν εκτεταμένα κατά τη δεκαετία του 1990. Η ανάπτυξη τους απαιτεί νέους τύπους οπτικών πομπών και δεκτών, που χρησιμοποιούν τεχνικές πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας καθαρά-οπτικές.

Στα οπτικά συστήματα OTDM, διάφορα οπτικά σήματα που διαμορφώνονται σε ρυθμό μετάδοσης  $f$  Gb/s και χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα συχνότητα πολυπλέκονται οπτικά για να σχηματίσουν ένα οπτικό σήμα με ρυθμό μετάδοσης  $N \times f$  Gb/s, όπου  $N$  είναι ο αριθμός των πολυπλεγμένων οπτικών καναλιών, όπως παρατηρούμε και από την Εικόνα 1.14.



Εικόνα 1.14: (α) Η τεχνική της οπτικής πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου (OTDM). Οι  $N$  ροές δεδομένων με ρυθμό  $f$  Gb/s η καθεμία στο ίδιο μήκος κύματος ( $\lambda_1$ ) πολυπλέκονται στον TDM πολυπλέκτη, και στην έξοδο προκύπτει σήμα δεδομένων με ρυθμό  $N \times f$  Gb/s μέσα στην ίδια οπτική ίνα. (β) Η τεχνική OTDM μέσα από ένα γράφημα της συχνότητας συναρτήσει του χρόνου.

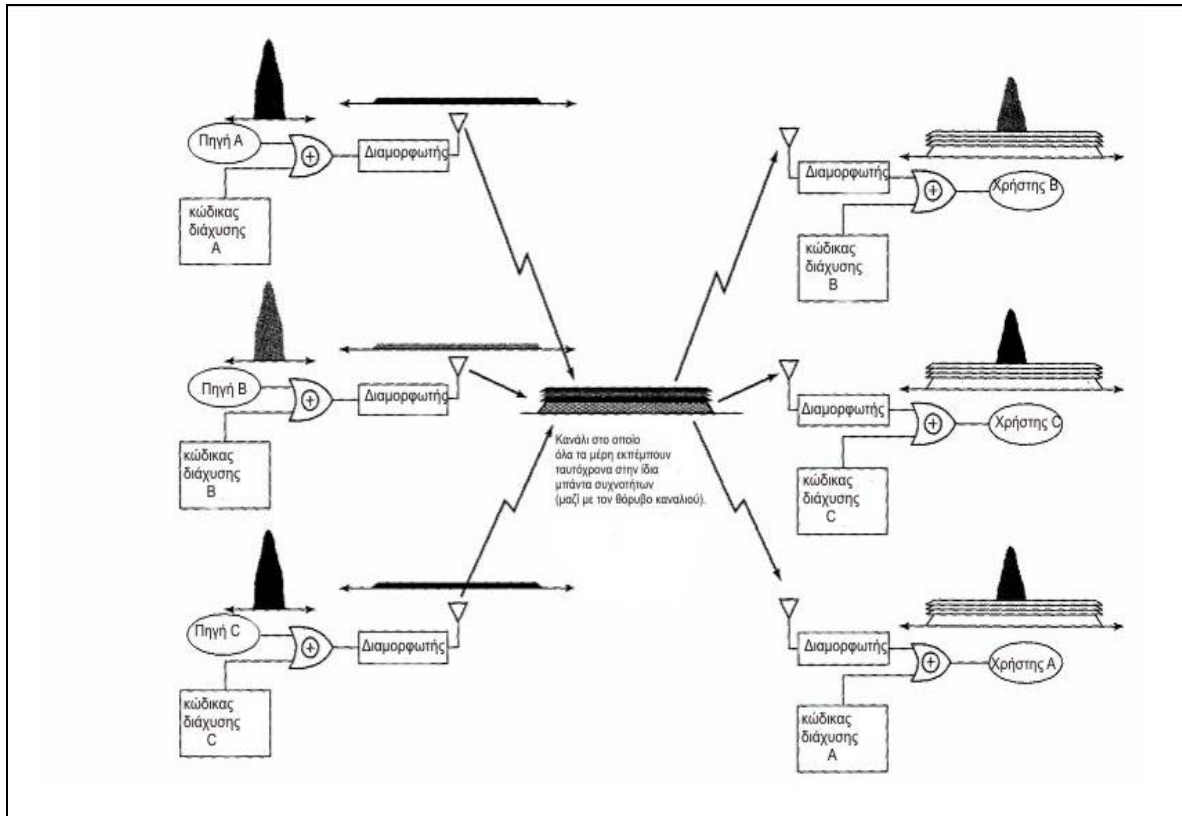
Οι βασικότεροι παράγοντες για την επίδοση των OTDM συστημάτων είναι ο ακριβής χρονισμός των οπτικών σημάτων και το χρονικό εύρος των οπτικών παλμών για την αποφυγή φαινομένων διασυμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference) στο πολυπλεγμένο κανάλι. Για το χρονικό εύρος των παλμών έχει υπολογιστεί ότι θα πρέπει να είναι τυπικά μικρότερο ή ίσο με το ένα τρίτο του ρυθμού επανάληψης της πολυπλεγμένης ροής δεδομένων. Τα σημαντικότερα φαινόμενα, που επηρεάζουν τη μετάδοση στα OTDM συστήματα, είναι κυρίως η χρωματική διασπορά και η διασπορά τρόπων πόλωσης της ίνας, καθώς ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων αυξάνει σε σημαντικό βαθμό. Πρέπει να σημειωθεί, όπως, ότι με τη χρήση ενός και μόνο καναλιού αποφεύγεται η διέγερση των μη γραμμικών φαινομένων της ίνας και η επίδραση αυτών στη ζεύξη, όπως επίσης καθίσταται περισσότερο πρακτική και αποδοτική η χρήση των EDFAs. [1.13]

Μία σημαντική διαφορά μεταξύ των τεχνικών OTDM και WDM αποτελεί το γεγονός ότι η OTDM απαιτεί τη χρήση διαμόρφωσης RZ ενώ η NRZ είναι η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται συνήθως για τα WDM οπτικά συστήματα. Στην πραγματικότητα, και στις δύο περιπτώσεις χρειαζόμαστε laser ημιαγωγού ή laser με κλείδωμα του τρόπου διάδοσης.

### **1.7.2.3 Πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiplexing - CDM)**

Η μέθοδος CDM χρησιμοποιεί τεχνικές διάχυσης φάσματος. Ονομάζεται πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα (CDM), αφού κάθε κανάλι κωδικοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε το φάσμα του να διευρύνεται σε μία ακόμη μεγαλύτερη περιοχή από εκείνη που καταλάμβανε το αρχικό σήμα. Η CDM έχει μελετηθεί εκτεταμένα αναφορικά με τις μικροκυματικές επικοινωνίες και είναι γνωστό ότι παρέχει τη μεγαλύτερη δυνατή ευελιξία σε πολυχρηστικό περιβάλλον. Η χρήση της στις επικοινωνίες οπτικών ινών προσέλυσε αρκετά την προσοχή κατά τη δεκαετία του 1990.

Στη μέθοδο διάχυσης φάσματος, το φάσμα του σήματος εκτείνεται σε μία σχετικά μεγάλη περιοχή απ' ότι το ελάχιστο εύρος ζώνης που απαιτείται για την μετάδοση. Η επέκταση του φάσματος ολοκληρώνεται μέσω ενός κώδικα, που είναι ανεξάρτητος από το ίδιο το σήμα. Ο δέκτης χρησιμοποιεί τον ίδιο κώδικα για την συμπίεση του φάσματος του σήματος και την ανάκτηση των δεδομένων. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι είναι δύσκολο να αναμείξουμε ή να παρεμποδίσουμε το σήμα λόγω της κωδικοποίησής του. Η τεχνική CDM, επομένως, είναι χρήσιμη όταν μας ενδιαφέρει η ασφάλεια των δεδομένων. [1.15]



Εικόνα 1.15 Τηλεπικοινωνιακό σύστημα που χρησιμοποιεί CDM

### 1.7.3 Η δεύτερη γενιά οπτικών δικτύων

Τα οπτικά δίκτυα διαχωρίζονται σε δύο γενιές: στα δίκτυα πρώτης και στα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς η οπτική ίνα χρησιμοποιούταν μόνο ως φυσικό μέσο μετάδοσης και παροχής χωρητικότητας, ενώ η μεταγωγή, η δρομολόγηση, καθώς και όλες οι άλλες ευφυείς δικτυακές διεργασίες επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς είναι το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (Synchronous Optical Network - SONET) και το SDH [1.1], τα οποία σχηματίζουν τον κορμό της τηλεπικοινωνιακής υποδομής στη Βόρεια Αμερική, την Ασία και την Ευρώπη.

Στις μέρες μας σχηματίζονται σταδιακά τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς, στα οποία μέρος της δρομολόγησης, της μεταγωγής καθώς και των άλλων ευφυών διαδικασιών έχει μετακινηθεί στο οπτικό επίπεδο (optical layer). Συστήματα που υποστηρίζουν τέτοιες τεχνικές είναι τα συστήματα κοινοποίησης και επιλογής, τα συστήματα χωρικής μεταγωγής, τα δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος και τα συστήματα μεταγωγής με διαίρεση κώδικα

ή χρόνου. Από αυτά, τα δύο τελευταία έχουν αναλυθεί παραπάνω. Για τα υπόλοιπα ακολουθούν ενδεικτικά χαρακτηριστικά:

- *Συστήματα κοινοποίησης και επιλογής:*

Σε αυτές τις αρχιτεκτονικές, οι εκπομπές κάθε σταθμού κοινοποιούνται σε όλους τους υπόλοιπους σταθμούς του δικτύου. Στο δέκτη όλα τα επιθυμητά σήματα επιλέγονται και εξάγονται. Η διάρθρωση του δικτύου είναι καθαρά παθητική (εκτός ίσως από πιθανούς οπτικούς ενισχυτές) και αποτελείται από οπτικούς συζεύκτες, διακλαδωτές και συνδυαστές.

- *Δίκτυα δρομολόγησης μήκους κύματος:*

Η κεντρική ιδέα στα δίκτυα αυτά είναι η χρήση της δρομολόγησης μήκους κύματος, η οποία σε συνδιασμό με οπτική μεταγωγή, οδηγεί στην ικανότητα επαναχρησιμοποίησης των μηκών κύματος στο δίκτυο.

- *Συστήματα χωρικής μεταγωγής:*

Σε αυτά τα συστήματα οι είσοδοι και οι έξοδοι διασυνδέονται με φυσικές διαδρομές. Διαφορετικές συνδέσεις χρησιμοποιούν διαφορετικές διαδρομές και κάθε σύνδεση απαιτεί επιπρόσθετο φυσικό χώρο στο μεταγωγέα. [1.13]

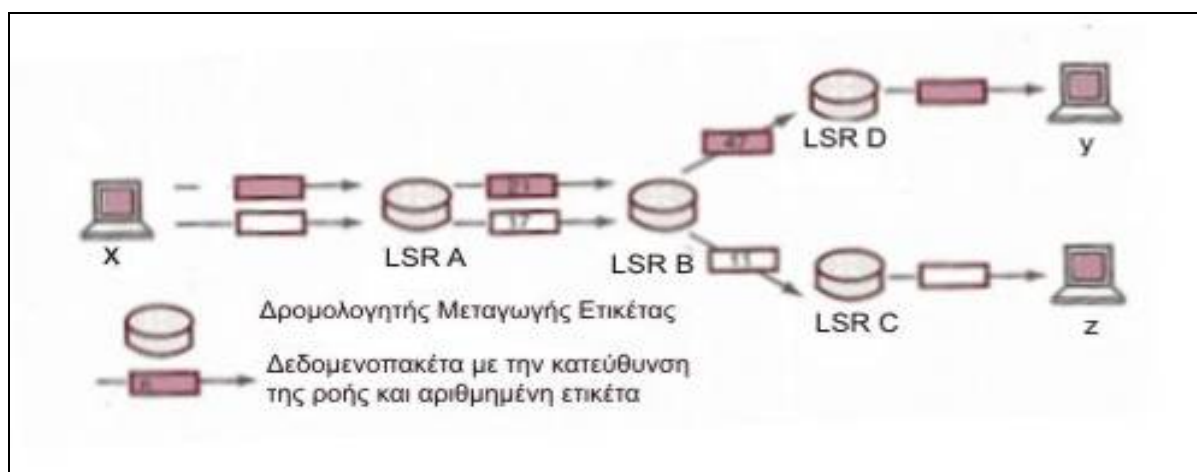
#### **1.7.4 Οι μελλοντικές γενιές οπτικών δικτύων**

Κύρια τεχνολογία των μελλοντικών γενιών οπτικών δικτύων αποτελεί η Μεταγωγή Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (MultiProtocol Label Switching - MPLS). Ο ρόλος της MPLS στη σημερινή αρχιτεκτονική του διαδικτύου στηρίζεται στο γεγονός της χρήσης δικτύων προσανατολισμένων σε σύνδεση (connection-oriented) ως υποδομή για δίκτυα που μεταφέρουν πακέτα (datagrams). Ο διαχωρισμός των στρωμάτων των δικτύων πακέτου και των δικτύων προσανατολισμένων σε σύνδεση δεν επιτρέπει την πλήρη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των δεύτερων. Με τη χρήση του MPLS δημιουργείται μια εικονική σύνδεση μεταξύ δυο σημείων ενός δικτύου πακέτου και μέσω αυτής μεταφέρεται κίνηση πακέτων. Επομένως το MPLS παρέχει τη λειτουργικότητα της μεταγωγής ετικέτας σε ένα δίκτυο προσανατολισμένο σε σύνδεση.

Σε ένα συμβατικό δρομολογητή, η λειτουργία προώθησης πακέτων είναι αρκετά απαιτητική ως προς την υπολογιστική ισχύ και φυσικά πρέπει να γίνεται ανά πακέτο. Καθώς οι ταχύτητες των φυσικών συνδέσεων αυξάνουν, οι δρομολογητές αρχίζουν να φαίνονται ολοένα και πιο αργοί συνιστώντας τη στενωπό του συστήματος. Η MPLS προσπαθεί να

απλουστεύσει τη λειτουργία της δρομολόγησης. Η βασική λειτουργία της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι να προωθεί τα πακέτα χρησιμοποιώντας ετικέτες που έχουν προσαρτηθεί σε κάθε πακέτο, οι οποίες διανέμονται μεταξύ των κόμβων που αποτελούν το δίκτυο.

Η MPLS δεν αντικαθιστά τη δρομολόγηση IP αλλά θα συνυπάρξει μαζί με υπάρχουσες και μελλοντικές τεχνολογίες δρομολόγησης, ώστε να παρέχει υψηλές ταχύτητες προώθησης δεδομένων μεταξύ των Δρομολογητών-Μεταγωγέων ετικέτας (LSRs). Επιπλέον θα εξασφαλίσει εύρος ζώνης για ροές κίνησης με διαφορετικές απαιτήσεις σε Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS). Η βασική λειτουργία ενός δικτύου MPLS φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 1.16. [1.16]



Εικόνα 1.16 Δυο διαδρομές Μεταγωγής Ετικέτας σε ένα δίκτυο MPLS

## 1.8 Δομή Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική οργανώνεται σε 6 κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο παραθέσαμε μια γενική εισαγωγή όσον αφορά τα είδη δικτύων, τις οπτικές ίνες, τις μεθόδους πολύπλεξης καθώς και μια ιστορική αναδρομή για τα δίκτυα οπτικών ινών από την γέννησή τους έως και σήμερα ενώ καταλήξαμε στις μελλοντικές τεχνολογίες οπτικών δικτύων. Στο Κεφάλαιο 2 θα ασχοληθούμε με την ανάλυση και διεξοδική παρουσίαση του οπτικού συμβολόμετρου Mach Zehnder (MZI) το οποίο στοιχείο είναι κύριας σημασίας για το πείραμά μας. Στο Κεφάλαιο 3 ασχολούμαστε με την αρχιτεκτονική αντιμετάθεσης χρονοσχισμών TSI (Time Slot Interchange), μια υλοποίηση της οποίας αποτελεί το παρόν πείραμα. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση της πειραματικής διάταξης και η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα αποτελέσματα του

πειράματος και πραγματοποιείται η εξαγωγή των συμπερασμάτων και ο σχολιασμός αυτών. Τελικά στο Κεφάλαιο 6 αναλύουμε τις εφαρμογές της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής και παρουσιάζουμε τα δίκτυα και τα τμήματα αυτών, στα οποία χρησιμοποιείται ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο TSI καθώς και τα προβλήματα στον οποίων την λύση συμβάλει η χρήση του.



## 1.9 Βιβλιογραφία

- [1.1] Συστήματα μεταγωγής πληροφορίας, Ιάκωβος Στ.Βενιέρης, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2004 σελ 5
- [1.2] Computer Networks, 4th Edition, Andrew S. Tanenbaum, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005, Μετάφραση Γ.Ξυλωμένος, Κεφ 1.4.1
- [1.3] Optical communications: Network Perspective, Ramaswami
- [1.4] Computer Networks, 4th Edition, Andrew S. Tanenbaum, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005, Μετάφραση Γ.Ξυλωμένος, Κεφ 1.2
- [1.5] Computer Networks, 4th Edition, Andrew S. Tanenbaum, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005, Μετάφραση Γ.Ξυλωμένος, Κεφ 5.4.1
- [1.6] Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring The Internet, James F.Kurose, Keith W.Ross, Εκδόσεις Μ.Γκιούρδας 2004, Μετάφραση Γ.Σ.Σαμαράς, Κεφ 1.2.2
- [1.7] <http://www1.alcatel-lucent.com/submarine/how/>
- [1.8] Συστήματα μεταγωγής πληροφορίας, Ιάκωβος Στ.Βενιέρης, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2004 σελ 6-7
- [1.9] Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring The Internet, James F.Kurose, Keith W.Ross, Εκδόσεις Μ.Γκιούρδας 2004, Μετάφραση Γ.Σ.Σαμαράς, Κεφ 1.3.1
- [1.10] Δίκτυα Ευρείας Ζώνης, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Ιάκωβος Στ.Βενιέρης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2007, Κεφ 2.2
- [1.11] Συστήματα μεταγωγής πληροφορίας, Ιάκωβος Στ.Βενιέρης, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2004 Κεφ 1.2
- [1.12] P. E. Green, Jr., "Fiber optic networks", Prentice-Hall Inc., NJ, Μετάφραση Κ.Καρούμπαλος, Ed. Α. Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο. Ε., 1993.
- [1.13] Ψηφιακά Συστήματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων, Διδακτορική Διατριβή, Νικόλαος Α. Πλέρος, Αθήνα, Απρίλιος 2004, Κεφ1
- [1.14] Δίκτυα Ευρείας Ζώνης, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Ιάκωβος Στ.Βενιέρης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2007, Κεφ 8.5
- [1.15] Δίκτυα Ευρείας Ζώνης, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Ιάκωβος Στ.Βενιέρης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2007, Κεφ 2.3
- [1.16] Τεχνολογίες Διαδικτύου, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Ιάκωβος Στ.Βενιέρης, Ευγενία Νικολούζου, Εκδόσεις Τζιόλα, 2006, Κεφ 6

# 2

## **Οπτικό συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI - Mach-Zehnder Interferometer) με ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή-SOA**

### **2.1 Εισαγωγή**

Το μελλοντικό internet απαιτεί την αύξηση του εύρους ζώνης, τόσο στα δίκτυα πρόσβασης (access networks) όσο και για τα δίκτυα κορμού. Οι σύγχρονοι κατασκευαστές δικτύων εγκαθιστούν μαζικώς WDM (Wavelength Division Multiplexing) συνδέσεις για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες για αυξημένη χωρητικότητα κυρίως στις συνδέσεις από σημείο σε σημείο. Η χωρητικότητα μιας ζεύξης πρόκειται να αυξηθεί σε μερικά Tbps/ίνα. Αναμένεται ότι οι τεχνικές πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (Optical Time Division Multiplexing – OTDM ) θα χρησιμοποιηθούν για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης ανά WDM κανάλι πέρα από την υψηλότερη διαθέσιμη ταχύτητα επεξεργασίας στα ηλεκτρονικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, στα οπτικά συστήματα μετάδοσης με πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος WDM η ταχύτητα λειτουργίας ξεκίνησε από 10 Gbps ανά κανάλι και έχει αγγίξει τα 40Gbps στα πιο πρόσφατα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα.

Σε εργαστηριακό επίπεδο τα WDM οπτικά δίκτυα έχουν υπερβεί τα τελευταία χρόνια τα 10Tbps συνολικό ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας το οποίο είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των δυνατοτήτων τους. Ο ρυθμός μετάδοσης σε ένα μονοχρωματικό κανάλι με OTDM τεχνικές, από τα 40Gbps στα αρχικά αποτελέσματα έχει φτάσει στα 1,28 Tbps στις πιο πρόσφατες πειραματικές έρευνες [2.3]. Ωστόσο, τα OTDM δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή ως εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα καθώς η OTDM πολυπλεξία δεν θεωρείται ακόμα αρκετά πρακτική μέθοδος μετάδοσης.

Παρόλα τα επιτεύγματα στον τομέα της ταχύτητας μετάδοσης, δεν έχουν παρατηρηθεί τα ίδια αποτελέσματα και στον τομέα της επεξεργασίας του οπτικού σήματος. Αυτό αποτελεί επιτακτική ανάγκη για την πλήρη εκμετάλλευση του παρεχόμενου εύρους ζώνης και την μη καθυστέρηση του σήματος στους κόμβους του δικτύου. Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε ότι το ηλεκτρονικό μέρος του μεταγωγέα μπορεί να επεξεργαστεί πληροφορία, η οποία μεταδίδεται σε πακέτα των 53 οκτάδων. Επομένως για  $53 \times 8 = 424$  bits πληροφορίας αν η ζεύξη παρέχει ρυθμό 100Mbps, απαιτείται χρόνος 4,24 μsec για την επεξεργασία της πληροφορίας, ενώ για ρυθμό 10Gbps ο χρόνος περιορίζεται στα 42,4 nsec.

Σήμερα τα οπτικά δίκτυα απαρτίζονται από συνδέσεις από σημείο σε σημείο με ηλεκτρονικά συστήματα μεταγωγής και δρομολόγησης στους κόμβους του δικτύου (SDH-ATM-hierarchy). Τα ηλεκτρονικά συστήματα όμως δεν συνιστούν την λύση του προβλήματος για το μέλλον, αφενός γιατί έχουν προσεγγίσει τα πρακτικά όρια λειτουργίας τους και αφετέρου γιατί η οπτο-ηλεκτρο-οπτική μετατροπή (O/E/O conversion ) οδηγεί στη μείωση των επιδόσεων του δικτύου και στη συμφόρηση των κόμβων. Η εξέλιξη του δικτύου θα προχωρήσει σε πιο αναβαθμισμένους κόμβους, όπου το σήμα θα παραμένει στο οπτικό επίπεδο και θα υφίσταται μεταγωγή, δρομολόγηση και επεξεργασία με οπτικές μεθόδους. Για πολύπλοκες λειτουργίες επεξεργασίας μια υβριδική λύση μπορεί να υπερτερεί, αφού οι εκτενείς υπολογισμοί θα γίνονται σε ηλεκτρονικό επίπεδο χρησιμοποιώντας τις ανώτερες επιδόσεις των εξελιγμένων κεντρικών μονάδων επεξεργασίας (CPUs). Ωστόσο, για κάποιες συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως η γρήγορη μεταγωγή σε οπτικό επίπεδο (all-optical high-speed switching ) (ως και 100Gbps σήμερα), η μετατροπή μήκους κύματος (wavelength conversion) (μέχρι και τα 3,8 THz), η οπτική 3R αναγέννηση (3R- regeneration) (ως και τα 40Gbps) καθώς και η δειγματοληψία (sampling) οπτικού σήματος σε ταχύτητες (ως και 320Gbps), ενδείκνυται η χρήση οπτικών πυλών. Αυτά τα στοιχεία θεωρούνται κατάλληλα για μέτριους ρυθμούς της τάξεως των 10 Gbps έως και 40Gbps λόγω των επιδόσεων τους σε απλότητα, υψηλή λειτουργικότητα, κόστος, αξιοπιστία και ολοκληρωσιμότητα των πυλών σε ένα πλινθίο. Όμως, η δυσκολία στην πυκνότητα ολοκλήρωσης των οπτικών πυλών συμπεριλαμβανομένων και άλλων τεχνικών και οικονομικών μειονεκτημάτων συγκριτικά με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην εξέλιξη της αμιγώς οπτικής επεξεργασίας. [2.1]

Έχοντας ως στόχο να ελαττώσουμε την ηλεκτρονική επεξεργασία του σήματος στο επίπεδο δικτύου, όλα τα οπτικά στοιχεία πρέπει να επεξεργάζονται τα δεδομένα (μεταφορά, αποθήκευση και μεταγωγή) με την ταχύτητα μεταφοράς του δικτύου. Ένα απαιτούμενο στοιχείο για αυτό το σκοπό είναι ο ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής (SOA - Semiconductor Optical Amplifier) ο οποίος έχει υιοθετηθεί ως η κύρια διάταξη οπτικών διακοπών και ως βασικό δομικό στοιχείο μεταγωγής της φωτονικής τεχνολογίας. Τα οπτικά συμβολόμετρα

MZI (Mach-Zehnder Interferometer) και UNI (Ultrafast Nonlinear Interferometer) είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα διακοπών που χρησιμοποιούν το SOA. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήσαμε τον MZI στον οποίο ο SOA επιτελεί λειτουργίες ενίσχυσης και στροφής φάσης. Παρακάτω ακολουθεί εκτεταμένη ανάλυση για το SOA, τους οπτικούς διακόπτες και τον MZI.

## 2.2 Ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής - SOA

Η ιστορία των SOAs (Semiconductor Optical Amplifier) αρχίζει στη δεκαετία του 1980 όταν οι έρευνες υποκινούνταν από την ανάγκη για γραμμική ενίσχυση σε συστήματα από σημείο σε σημείο. Οι προκλήσεις περιλάμβαναν την πραγματοποίηση χαμηλού επιπέδου ανακλάσεων και υψηλού κέρδους από ίνα σε ίνα με την ταυτόχρονη μείωση απωλειών διαχωρισμού (coupling losses). Με την άφιξη του EDFA (erbium doped fiber amplifier) γύρω στα 1990, οι SOAs είχαν βγει εκτός ανταγωνισμού ως γραμμικοί ενισχυτές. Οι EDFAs παρουσίαζαν χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και καλύτερη αντιμετώπιση στο πρόβλημα της παρεμβολής γειτονικού διαύλου (crosstalk) για πολυκαναλική ενίσχυση. Ωστόσο, οι SOAs ακόμα έχουν πλεονέκτημα στην τιμή έναντι των EDFAs μιας και τροφοδοτούνται άμεσα, οπότε μπορούν να χρησιμεύσουν ως ενισχυτές σε δίκτυα πρόσβασης. Επιπλέον, προσφέρουν λύσεις πέρα από την ζώνη των 1500nm όπου οι ενισχυτές που βασίζονται σε οπτικές ίνες είναι πιο δύσκολο να υλοποιηθούν.

Κύριο χαρακτηριστικό που εμφανίζει ο ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής (SOA) είναι η ευαισθησία στη πόλωση που μπορεί να εκτιμηθεί αναφορικά με το κέρδος ή με την εξαναγκασμένη μετατόπιση φάσης (στροφή φάσης). Το κέρδος του SOA έχει τύχει μεγάλης προσοχής ενώ σπάνια αναφέρεται στη βιβλιογραφία η στροφή φάσης που οδηγεί στην περιστροφή της πόλωσης του φωτός στην έξοδο του οπτικού ενισχυτή η οποία προκαλεί κάποια ενδιαφέροντα ή ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Ένας οπτικός έλεγχος της διαθλαστικότητας μπορεί να εφαρμοστεί στην μετατροπή μήκους κύματος, στην αναγέννηση σήματος και στην οπτική μεταγωγή σήματος. [2.2]

Επιπλέον στα θετικά των SOAs συγκαταλέγονται το μικρό μέγεθος, το μεγάλο εύρος ζώνης και η ευκολία με την οποία οι SOAs ενσωματώνονται σε οπτο-ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα σε συμπαγείς διατάξεις. Το τελευταίο χαρακτηριστικό, παρέχει τη δυνατότητα για διαδοχική σύνδεση πολλαπλών διακοπών και για την υλοποίηση σύνθετων οπτικών κυκλωμάτων επεξεργασίας, τα οποία προσαρμόζονται εύκολα σε μια πληθώρα δικτυακών εφαρμογών. Ενδεικτικά αναφέρονται η οπτική ενίσχυση, η μεταγωγή μόνο σε οπτικό επίπεδο (all-optical switching), η οπτική αποπολυπλεξία, η μετατροπή μήκους

κύματος, η οπτική αναγέννηση, ο συγχρονισμός ρολογιού (clock recovery) και η αντιστάθμιση της διασποράς.

## 2.3 Οπτικοί διακόπτες και SOA

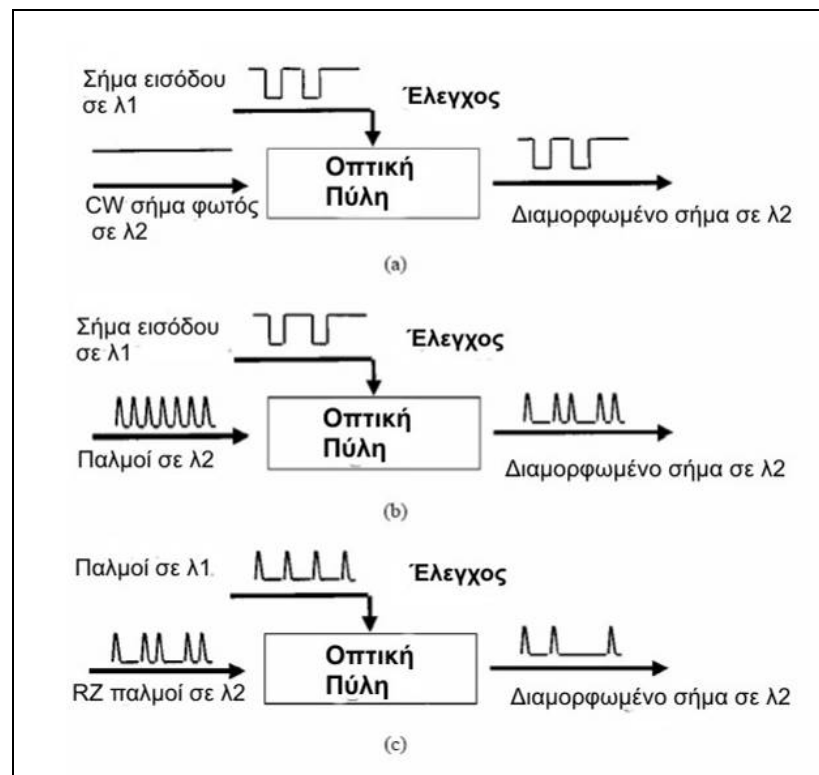
Η πρόοδος στον τομέα της οπτικής επεξεργασίας σήματος είναι αξιοσημείωτη ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία. Αυτή η πρόοδος είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αξιοποίηση των οπτικών συμβολομετρικών διατάξεων (Optical Interferometers) με SOAs οι οποίες υιοθετήθηκαν ως οι κύριες διατάξεις οπτικών διακοπών και ως τα βασικά δομικά στοιχεία μεταγωγής της φωτονικής τεχνολογίας.[2.3]

Αρχικά αυτές οι οπτικές πύλες (συμπαγείς διατάξεις με SOAs) στηρίζονταν στο φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης κέρδους (cross-gain modulation -XGM). Σ' αυτές, το σήμα εισόδου χρησιμοποιείται για να κορέσει το κέρδος και ως εκ τούτου να διαμορφώσει ένα CW σήμα στο επιθυμητό μήκος κύματος εξόδου.[2.4]

Στις νέες τεχνολογίες, η λειτουργία αυτών των οπτικών πυλών βασίζεται στο φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross-Phase Modulation - XPM) μέσα στους ημιαγωγίμους οπτικούς ενισχυτές, το οποίο εκμεταλλεύεται την ισχυρή μη γραμμικότητα των ημιαγωγών και την ταχύτατη χρονική απόκριση αυτής. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά προσδίδουν στις οπτικές συμβολομετρικές διατάξεις τη δυνατότητα για λειτουργία με χαμηλές ενέργειες μεταγωγής (της τάξης μερικών fJ), και σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, παρέχοντας σαφές πλεονέκτημα έναντι των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.[2.3] Αυτές οι πύλες είναι πολύ αποτελεσματικές για υψηλής ταχύτητας επεξεργασία σήματος και έχουν ανοίξει νέους ορίζοντες στην οπτική αναγέννηση σήματος (all-optical regeneration), στις υψηλής ταχύτητας οπτικές λογικές πύλες (high-speed all-optical logic functions) και σε άλλες εφαρμογές όπως OTDM αποπολυπλέκτες και μετατροπή μήκους κύματος.

Για τις περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές χρειαζόμαστε απλές πύλες οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν οπτικά, όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.1. Μια πύλη που χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει ένα CW σήμα ή ένα παλμό μπορεί να λειτουργήσει ως μετατροπέας μήκους κύματος ή ως μέρος ενός οπτικού αναγεννητή ενώ δειγματοληψία ενός οπτικού σήματος εισόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποπολύπλεξη χρόνου. Επιπλέον οπτικά στοιχεία που εκτελούν απλές λογικές πράξεις όπως οι πύλες AND και XOR θα βοηθήσουν στις λειτουργίες δρομολόγησης.

Όλες οι οπτικές πύλες υλοποιούνται τόσο στο γυαλί όσο και στα ημιαγωγίμα υλικά και στηρίζονται σε μηχανισμούς, όπως four wave mixing, κέρδος διασταύρωσης, διαμόρφωση διασταυρούμενης φάσης ή και σε συνδυασμούς αυτών των μηχανισμών. [2.4]



Εικόνα 2.1 Σχηματική απεικόνιση οπτικής πύλης για: (α) Μετατροπή μήκους κύματος με CW σήμα εισόδου, (b) Αναγέννηση και μετατροπή μήκους κύματος με σήματα εισόδου παλμούς ρολογιού, (c) Αποπολύπλεξη-δειγματοληψία με RZ σήματα.

Σαν σήματα εισόδου χρησιμοποιούνται:

- *CW (continuous wave) σήματα:*

Είναι ηλεκτρομαγνητικά οπτικά κύματα συνεχούς πλάτους και συχνότητας. Σε μαθηματική ανάλυση τους αποδίδεται και η ιδιότητα της συνεχούς διάρκειας. (Εικόνα 2.2)

- *Παλμοί ρολογιού :*

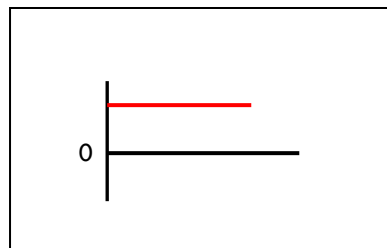
Είναι συνεχόμενοι RZ παλμοί στο ρυθμό μετάδοσης του σήματος του πομπού οι οποίοι χρειάζονται για να συγχρονιστεί ο δέκτης στο ρυθμό μετάδοσης του εισερχόμενου σήματος. Μία από τις λειτουργίες του δέκτη είναι συνήθως η ανάκτηση του σήματος ρολογιού η οποία με αμιγώς οπτικό τρόπο μπορεί να γίνει με ένα φίλτρο Fabry-Perot και ένα οπτικό συμβολόμετρο με SOAs.

- *NRZ σήματα:*

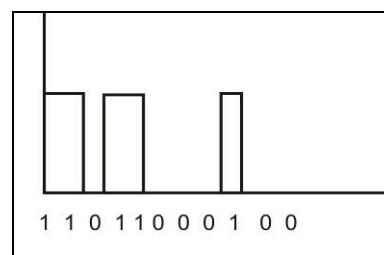
Ένα NRZ (non-return-to-zero) σήμα είναι ένας γραμμικός κώδικας στον οποίο το '1' αντιπροσωπεύει μια καθορισμένη κατάσταση και το 0 την άλλη, χωρίς άλλες ουδέτερες καταστάσεις. Οι παλμοί έχουν περισσότερη ενέργεια από ότι οι RZ παλμοί, αλλά δεν έχουν κατάσταση αναμονής, που σημαίνει ότι ένα σήμα ρολογιού θα πρέπει να στέλνεται παράλληλα με τους παλμούς. (Εικόνα 2.3)

- *RZ σήματα:*

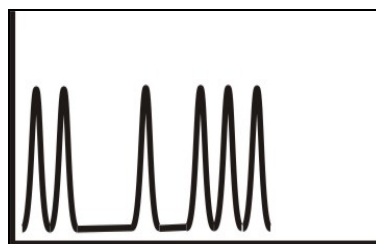
Ένα RZ (return-to-zero) σήμα περιγράφει ένα γραμμικό κώδικα στον οποίο το σήμα πέφτει στο 0 ανάμεσα σε 2 παλμούς. Αυτό συμβαίνει ακόμα και όταν έχουμε διαδοχικούς άσσους ή μηδενικά. Το σήμα είναι αυτοσυγχρονιζόμενο (self-clocking). Αυτό σημαίνει ότι δεν χρειάζεται ένας ξεχωριστός παλμός ρολογιού να σταλεί παράλληλα με το σήμα, αλλά μειονεκτεί στο ότι χρησιμοποιεί διπλάσιο εύρος ζώνης για να φτάσει τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης όπως στους παλμούς NRZ. (Εικόνα 2.4)



Εικόνα 2.2: CW σήμα



Εικόνα 2.3: NRZ σήματα

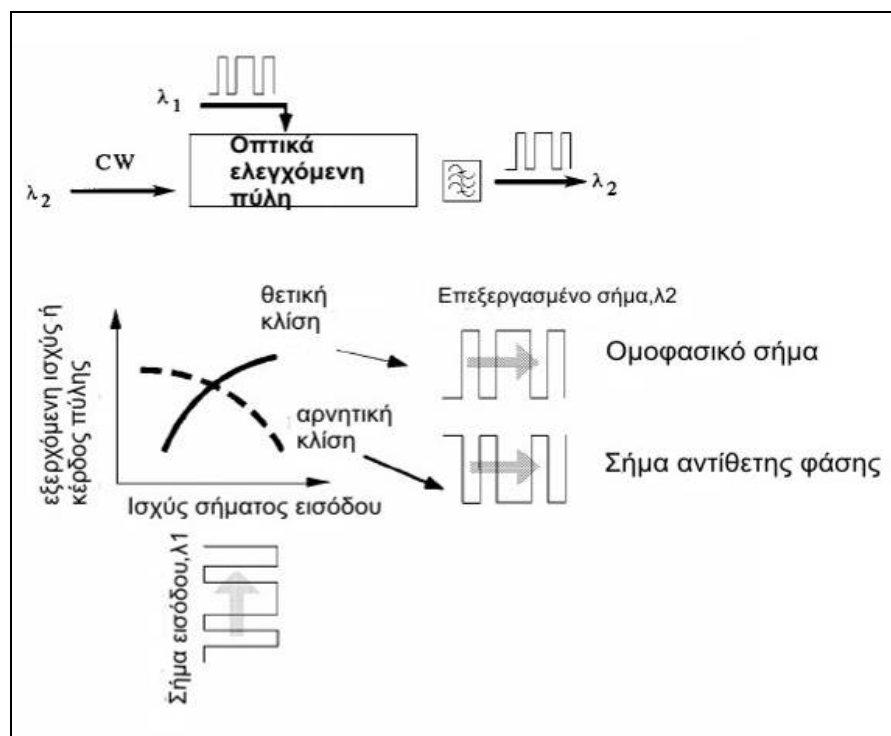


Εικόνα 2.4: RZ οπτικά σήματα

Ανάλογα με τη συνάρτηση μεταφοράς των πυλών προκύπτουν αναστραμμένα ή σε φάση σήματα εξόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5.

Είναι φανερό λοιπόν από όσα προειπώθηκαν ότι χρειαζόμαστε μοντέλα που :

- 1) λειτουργούν σε χαμηλά ενεργειακά επίπεδα
- 2) εύκολα προσαρμόζονται στον ρυθμό μετάδοσης (bit rate) του συστήματος και στο πρωτόκολλο μεταφοράς
- 3) είναι ανεξάρτητα της πόλωσης και
- 4) μπορούν να διαιρεθούν σε αρκετά στάδια. [2.4]



Εικόνα 2.5 Σχηματική απεικόνιση οπτικής πύλης και η εξάρτηση του σήματος εξόδου από τη συνάρτηση μεταφοράς της πύλης.

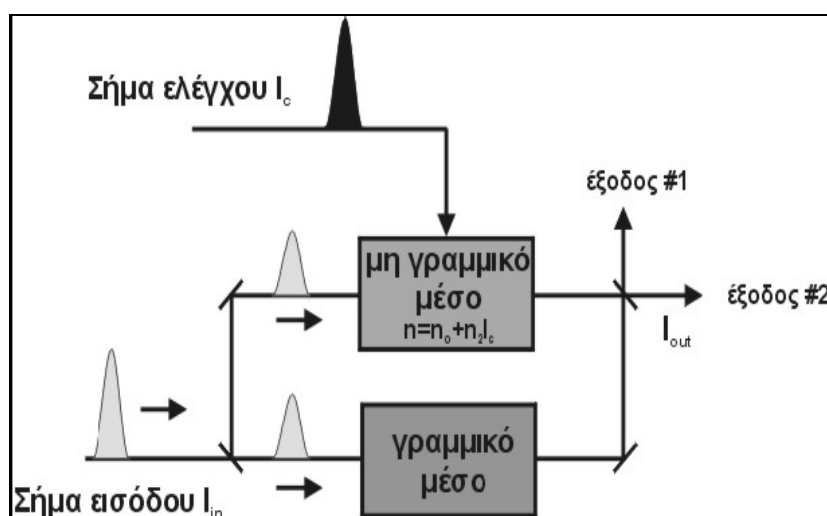
## 2.4 Οπτικός συμβολομετρικός διακόπτης

Για πρώτη φορά η χρήση συμβολόμετρων για την υλοποίηση αμιγώς οπτικών διακοπών ή, αλλιώς, πυλών προτάθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980, για να φτάσει σήμερα να είναι, πλέον, αποδεδειγμένα ευρέως αποδεκτό, ότι οι οπτικές συμβολομετρικές



διατάξεις (interferometric arrangements) μπορούν να προσφέρουν πλεονεκτήματα στην ταχύτητα λειτουργίας, στη δυνατότητα υλοποίησης Boolean λογικής, καθώς και σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών. [2.5]

Η διάταξη ενός οπτικού συμβολομέτρου στη γενική του μορφή είναι γνωστή με την ονομασία Mach-Zehnder. Το οπτικό συμβολόμετρο MZI, που εφευρέθηκε περισσότερο από 100 χρόνια πριν χρησιμοποιείται σε πολλές οπτικές μετρήσεις. Το όνομα Mach αντιστοιχεί στον ίδιο άνθρωπο που πρότεινε την “Αρχή του Mach” και για τον οποίο έχει ονομαστεί μια μέτρηση της ταχύτητας του ήχου.[2.6] Μια σχηματική αναπαράσταση φαίνεται στην εικόνα 2.6

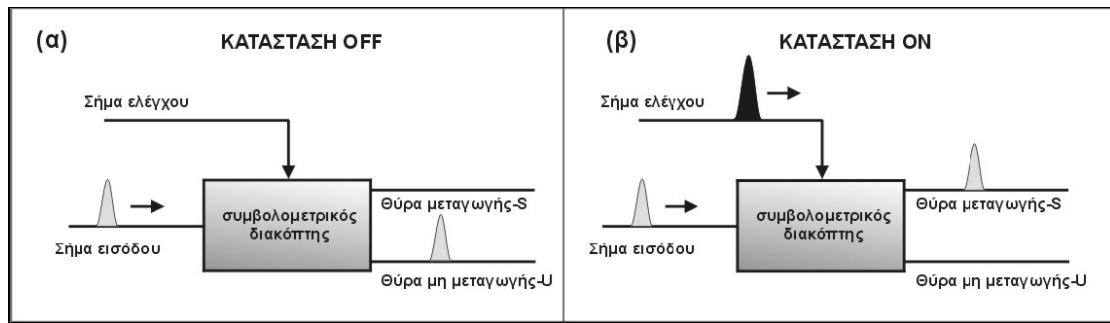


Εικόνα 2.6 Σχηματική αναπαράσταση ενός απλοποιημένου συμβολομετρικού διακόπτη

Για την επιτυχή λειτουργία του συμβολομέτρου απαιτείται η ύπαρξη δύο τουλάχιστον οπτικών σημάτων. Το ένα από τα δύο σήματα είναι, συνήθως, ένα οπτικό σήμα ρολογιού χαμηλής οπτικής ισχύος, το οποίο εισέρχεται στο διακόπτη σαν σήμα εισόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6, και το οποίο αναφέρεται ως σήμα ρολογιού (clock signal) της οπτικής πύλης. Το δεύτερο οπτικό σήμα, που απαιτείται, είναι το σήμα ελέγχου (control signal), το οποίο μπορεί να είναι μια τυχαία παλμική ακολουθία, και του οποίου ο ρόλος είναι να καθορίζει (ελέγχει) την κατάσταση μεταγωγής του διακόπτη. Το συμβολόμετρο της εικόνας 2.6 αποτελείται από δύο βραχίονες ίδιου μήκους. Το σήμα εισόδου διαχωρίζεται, καθώς εισέρχεται στη διάταξη, σε δύο συνιστώσες με τη βοήθεια ενός οπτικού συζεύκτη ισχύος (optical coupler). Στη συνέχεια, η κάθε μια συνιστώσα διαδίδεται στον ένα από τους δύο βραχίονες του συμβολομέτρου, και τελικά οι δύο συνιστώσες επανενώνονται στην έξοδο του συμβολομέτρου μέσω ενός δεύτερου οπτικού συζεύκτη ισχύος, όπου αναγκαστικά συμβάλλουν και εξέρχονται του διακόπτη μέσω των δύο εξόδων του. Το

μέγεθος της οπτικής ισχύος σε κάθε έξοδο της πύλης είναι αποκλειστικό αποτέλεσμα της συμβολής των δύο συνιστωσών. Αν τα υλικά, που αποτελούν τους δύο βραχίονες ιδίου μήκους έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, τότε οι αντίστοιχοι οπτικοί δρόμοι είναι ίδιοι και οι δύο συνιστώσες του σήματος ρολογιού έχουν την ίδια φάση (phase), όταν συμβάλλουν στο δεύτερο συζεύκτη. Αποτέλεσμα αυτού είναι στη μια έξοδο του διακόπτη να υπάρχει πλήρως προσθετική συμβολή, ενώ στην άλλη έξοδο του διακόπτη η συμβολή είναι πλήρως αναιρετική. Κατά συνέπεια, το σύνολο της οπτικής ισχύος εξέρχεται, σ' αυτήν την περίπτωση, από την πρώτη θύρα εξόδου, και ο διακόπτης βρίσκεται στην κατάσταση OFF.

Για την επίτευξη μεταγωγής πρέπει τουλάχιστον στον ένα από τους δύο βραχίονες του συμβολομέτρου να υπάρχει ένα μη γραμμικό μέσο, του οποίου ο δείκτης διάθλασης να μεταβάλλεται μη γραμμικά με την προσπίπτουσα οπτική ισχύ μέσω του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (Cross-Phase Modulation - XPM), ενώ ο δεύτερος βραχίονας στην απλουστευμένη αυτή θεώρηση της Εικόνας 2.6 αρκεί να έχει τέλεια γραμμική συμπεριφορά. Οι περισσότερες παρουσιάσεις διακοπών, μέχρι σήμερα, βασίζονται σε μη γραμμικότητες, που οφείλονται στους συντελεστές επιδεκτικότητας δεύτερης και τρίτης τάξης, αντίστοιχα, των υλικών που χρησιμοποιούνται. Το μη γραμμικό υλικό, που χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για την υλοποίηση των οπτικών διακοπών, είναι η τυπική οπτική ίνα με προσμίξεις πυριτίου (Si), για να μελετηθούν, στη συνέχεια, διάφορες εναλλακτικές λύσεις, αποσκοπώντας κυρίως στην αύξηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς και στη μείωση του απαιτούμενου μήκους αλληλεπίδρασης μεταξύ υλικού και εισερχόμενου οπτικού σήματος. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα στον τομέα της οπτικής μεταγωγής έχει εστιαστεί στην χρήση οπτικών ενισχυτών ημιαγωγού (SOA) λόγω, κυρίως, της ισχυρής μη γραμμικότητάς τους και του μικρού και συμπαγούς μεγέθους. Η διέγερση της μη γραμμικότητας του μέσου επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενός ισχυρού οπτικού σήματος ελέγχου, και η προκαλούμενη μεταβολή του δείκτη διάθλασης του μη γραμμικού μέσου γίνεται αντιληπτή από το ασθενές ισχύος σήμα ρολογιού ως μια αλλαγή στη φάση του. Αποτέλεσμα αυτού είναι να φτάνουν οι δύο συνιστώσες του σήματος ρολογιού στην έξοδο με διαφορετική μεταξύ τους φάση, οπότε η συμβολή τους μετατρέπει τη διαφορά φάσης σε μεταβολή πλάτους, αλλάζοντας το συσχετισμό οπτικής ισχύος στις δύο θύρες εξόδου του διακόπτη. Στην περίπτωση, που η μεταβολή στη φάση είναι ίση με  $\pi$ , το σύνολο της οπτικής ισχύος εξέρχεται από τη δεύτερη θύρα του διακόπτη, πλέον, και όχι από την πρώτη, και η πύλη είναι σε κατάσταση μεταγωγής ή ON. Σχηματικά, οι δύο καταστάσεις μεταγωγής OFF και ON ενός συμβολομετρικού διακόπτη φαίνονται στην Εικόνα 2.7 [2.6]



Εικόνα 2.7: κατάσταση μεταγωγής (α) OFF και (β) ON ενός συμβολομετρικού διακόπτη.

## 2.5 Είδη, εφαρμογές και γενικά χαρακτηριστικά των οπτικών συμβολομετρικών διακοπών

Η γενική αρχή λειτουργίας όλων των αμιγώς οπτικών διακοπών, που χρησιμοποιούν τη διάταξη συμβολομέτρου, είναι ίδια με αυτή του απλουστευμένου Mach-Zehnder, που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 2.6. Κατά καιρούς προτάθηκαν διάφορες συνδεσμολογίες από αρκετές ερευνητικές ομάδες, εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι οι εξής:

- **Μη γραμμικός καθρέφτης βρόχου ίνας (Nonlinear Optical Loop Mirror-NOLM)**, ο οποίος χρησιμοποιεί οπτική ίνα ως το μη γραμμικό μέσο και η συνδεσμολογία του είναι τύπου κλειστού βρόχου.
- **Καθρέφτης βρόχου με ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή (Semiconductor Laser Amplifier Loop Mirror-SLALOM ή Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer-TOAD)**, ο οποίος έχει, επίσης, συνδεσμολογία κλειστού βρόχου, όπως το NOLM, αλλά χρησιμοποιεί ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή ως μη γραμμικό μέσο.
- **Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer) με ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή-SOA**, ο οποίος βασίζεται στο χωρικό διαχωρισμό των δύο συνιστωσών του σήματος εισόδου, χρησιμοποιεί ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή ως μη γραμμικό μέσο, και η συνδεσμολογία του είναι όμοια με αυτή, που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.6.
- **Συμβολομετρικός διακόπτης Michelson με ημιαγωγίμους οπτικούς ενισχυτές**, ο οποίος, επίσης, χωρίζει το σήμα εισόδου σε δύο χωρικές συνιστώσες, όπου η κάθε συνιστώσα διαδίδεται σε έναν οπτικό βραχίονα με ανακλαστική επιφάνεια στο ένα άκρο του. Το μη γραμμικό μέσο, που χρησιμοποιείται σε κάθε βραχίονα, είναι, επίσης, ένας ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής.

- **Συμβολόμετρο μονού βραχίονα – Το μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερυψηλών ταχυτήτων UNI (Ultra-fast Non-linear Interferometer)**, το οποίο αποτελείται από ένα, μόνο, βραχίονα και βασίζει τη λειτουργία του στο χρονικό διαχωρισμό των δύο κάθετων πολωτικών συνιστωσών του σήματος εισόδου.
- **Καθυστερημένο συμβολόμετρο (Delayed Interferometer)**, στο οποίο η συμβολομετρική συνδεσμολογία, η οποία είναι, συνήθως, της μορφής Mach-Zehnder, τοποθετείται μετά το μη γραμμικό μέσο, το οποίο συνήθως είναι ένας ημιαγωγίμος οπτικός ενισχυτής .

Κάθε μία από τις παραπάνω συνδεσμολογίες φέρει ορισμένα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, συγκριτικά με τις άλλες. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής χρησιμοποιήθηκε για τη θεωρητική ανάλυση και την πειραματική επίδειξη των κυκλωμάτων το συμβολόμετρο τύπου Mach-Zehnder. Λεπτομερής περιγραφή της συνδεσμολογίας και του τρόπου λειτουργίας του συμβολομετρικού αυτού διακόπτη ακολουθεί επόμενες ενότητες.

Όλες, όμως, οι προαναφερθείσες συνδεσμολογίες έχουν να επιδείξουν έναν σημαντικό αριθμό εφαρμογών και, αναμφίβολα, διαδραμάτισαν ηγετικό ρόλο στην πρόοδο του τομέα της οπτικής επεξεργασίας σήματος κατά την τελευταία δεκαετία. Οι εφαρμογές τους καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο δικτυακών λειτουργιών, όπως είναι η οπτική αναγέννηση, η οπτική αποπολυπλεξία, η οπτική αποθήκευση δεδομένων, η ανάκτηση ρολογιού και ο συγχρονισμός δεδομένων, η μετατροπή μήκους κύματος, η μετατροπή ρυθμού μετάδοσης, η εξαγωγή και αναγνώριση της επικεφαλίδας, η κωδικοποίηση/ αποκωδικοποίηση του οπτικού σήματος (Encryption/Decryption), η μεταγωγή/διέλευση δεδομένων (Exchange/Bypass switches) και η οπτική δρομολόγηση σήματος, η οπτική δειγματοληψία για την απεικόνιση δεδομένων υπερυψηλής ταχύτητας στα διαθέσιμα ηλεκτρονικά διαγνωστικά όργανα, και, τέλος, η οπτική λογική, με την επίδειξη απλών οπτικών πυλών AND, NOT, XOR και OR, και πιο σύνθετων κυκλωμάτων, όπως μετρητών δυφίων, οπτικών κυκλωμάτων δυαδικής πρόσθεσης και παραγωγής ψευδοτυχαίων ακολουθιών.

Η λειτουργία κάθε συμβολομετρικής διάταξης κρίνεται με βάση τις επιδόσεις της σε μια σειρά από χαρακτηριστικά μεγέθη, τα οποία αποτελούν τα κριτήρια αξιολόγησης ενός οπτικού διακόπτη. Τα σημαντικότερα από αυτά τα μεγέθη είναι το παράθυρο μεταγωγής, που σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα λειτουργίας, η ενέργεια μεταγωγής, η εισαγόμενη χρονική καθυστέρηση, ο λόγος αντίθεσης ή ON-OFF του διακόπτη, ο θόρυβος στην έξοδο, η σταθερότητα λειτουργίας, η δυνατότητα πολλαπλών συνδέσεων σε σειρά (cascadability) και η δυνατότητα ολοκλήρωσης του διακόπτη σε συμπαγή συσκευασία. Ακολουθεί μια συνοπτική ανάλυση της καθενός από αυτά τα χαρακτηριστικά.

- **Παράθυρο μεταγωγής (switching window)**, το οποίο ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η κατάσταση του διακόπτη παραμένει ON, μέχρι ο διακόπτης να επανέλθει σε κατάσταση OFF μετά το πέρας της αλληλεπίδρασης της δέσμης ελέγχου με το μη γραμμικό μέσο. Όσο μικρότερο είναι το παράθυρο μεταγωγής, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα λειτουργίας του διακόπτη, με αποτέλεσμα το χρονικό εύρος του παραθύρου μεταγωγής να καθορίζει και **τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του διακόπτη**. Το χρονικό εύρος του παραθύρου μεταγωγής καθορίζει, επίσης, την ανεκτικότητα, που επιδεικνύει ο διακόπτης στη χρονική ολίσθηση (timing jitter) των παλμών του σήματος ελέγχου. Το εύρος του παραθύρου μεταγωγής εξαρτάται, γενικά, από την ταχύτητα διέγερσης και επαναφοράς της μη γραμμικότητας, από τα χαρακτηριστικά των παλμών ελέγχου και από τη συνδεσμολογία του διακόπτη. Ο κλασικός τρόπος μέτρησής του γίνεται με εφαρμογή ενός σήματος συνεχούς κύματος (CW - continuous wave signal) ως σήμα ρολογιού στο διακόπτη, και παλμικού ως σήμα ελέγχου (τυπική διάταξη μετατροπής μήκους κύματος). Η μορφή του μεταγόμενου (switched) οπτικού σήματος στο μήκος κύματος του σήματος ρολογιού αποτελεί το παράθυρο μεταγωγής.
- **Ενέργεια μεταγωγής (switching energy) ή κατανάλωση ισχύος (power consumption)**, η οποία είναι η ενέργεια των παλμών ελέγχου, που απαιτείται για την διέγερση της μη γραμμικότητας και την αλλαγή της κατάστασης μεταγωγής του διακόπτη. Η ενέργεια αυτή είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μεταγωγή σε υπερυψηλές ταχύτητες μετάδοσης με χαμηλή παρεχόμενη μέση ισχύ από τους διαθέσιμους οπτικούς ενισχυτές EDFA, και να διατηρείται η κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος χαμηλή, για να μπορεί το κύκλωμα να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές εφαρμογές. Η ενέργεια μεταγωγής εξαρτάται κυρίως από το πόσο ισχυρή είναι η μη γραμμικότητα του υλικού.
- **Χρονική καθυστέρηση (delay)**, η οποία είναι το χρονικό διάστημα, που απαιτείται, για να διαδοθεί το εισερχόμενο σήμα από την είσοδο ως την έξοδο του διακόπτη. Ιδανικά, κάθε διακόπτης οφείλει να εισάγει όσο γίνεται μικρότερη καθυστέρηση, ούτως ώστε να αποφεύγεται η συμφόρηση στη ροή δεδομένων του δικτύου και η εισαγωγή επιπλέον χρονικών καθυστερήσεων στη μετάδοση του σήματος. Προφανώς, η κατασκευή του διακόπτη από διακριτά στοιχεία με προσαρτήσεις οπτικής ίνας επιβαρύνει τον χρόνο διάδοσης του οπτικού σήματος μέσα από αυτόν, λόγω του μεγάλου μήκους των διακριτών στοιχείων και της ίνας, και σίγουρα η λύση ενός ολοκληρωμένου οπτικού διακόπτη είναι προτιμητέα.
- **Λόγος αντίθεσης ή ON-OFF (contrast ή extinction ratio)**, ο οποίος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κριτήριο για την ποιότητα του οπτικού σήματος στην έξοδο του διακόπτη. Ο

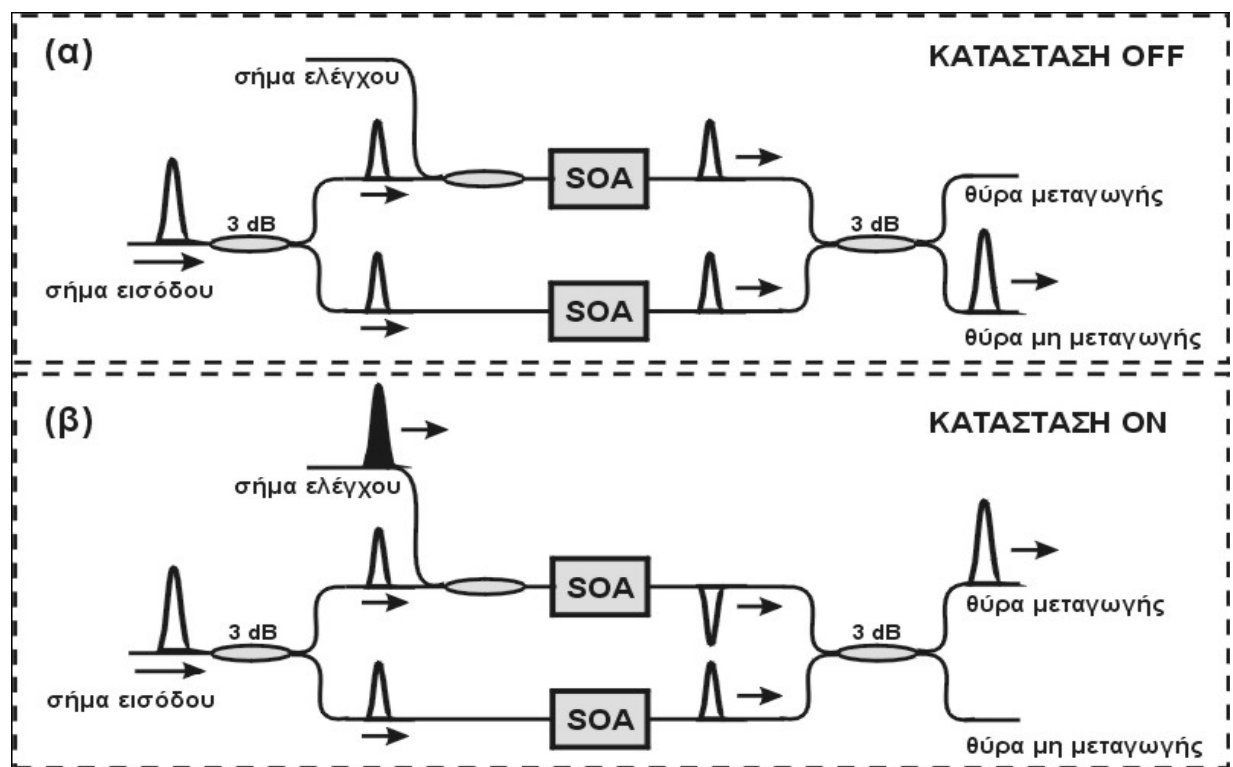
λόγος αυτός ισούται με το πηλίκο της ισχύος του σήματος, που έχει μεταχθεί στην θύρα μετάδοσης παρουσία σήματος ελέγχου, προς την ισχύ του ανεπιθύμητου σήματος, που μετάγεται στη θύρα μετάδοσης ακόμα και όταν δεν υπάρχει σήμα ελέγχου. Στην ουσία εκφράζει τον λόγο αντίθεσης του σήματος εξόδου. Για ελαχιστοποίηση του ρυθμού σφαλμάτων ο λόγος αυτός πρέπει να έχει όσο γίνεται μεγαλύτερη τιμή.

- **Θόρυβος (noise)**, η παρουσία του οποίου εξαρτάται από το αν η εκάστοτε συνδεσμολογία οπτικού διακόπτη χρησιμοποιεί κάποια πηγή θορύβου ή όχι. Οι οπτικοί διακόπτες, που χρησιμοποιούν οπτική ίνα σαν μη γραμμικό μέσο, προφανώς δεν προσθέτουν θόρυβο στο σήμα εξόδου, ενώ, αντίθετα, οι διακόπτες με ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή αλλοιώνουν την εικόνα θορύβου του σήματος λόγω της αυθόρμητης εκπομπής φωτονίων. Η επίδραση του θορύβου ενός οπτικού σήματος είναι πολύ σημαντική σε ένα δίκτυο, αφού υποβιβάζει την απόδοση αυτού καθώς και την ποιότητα των υπηρεσιών που προσφέρει. Ο θόρυβος καθορίζεται από δύο δείκτες. Ο πρώτος είναι ο σηματοθορυβικός λόγος (Signal to Noise Ratio - SNR) και ο δεύτερος είναι ο δείκτης θορύβου (Noise Figure - NF).
- **Σταθερότητα λειτουργίας (stability)**, η οποία είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό για την αξιολόγηση των οπτικών διακοπών και την ενδεχόμενη εφαρμογή τους σε δικτυακό περιβάλλον. Η λειτουργία του διακόπτη προφανώς επηρεάζεται από περιβαλλοντικές διακυμάνσεις (π.χ. θερμοκρασιακές μεταβολές) λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της οπτικής ίνας. Η ελαχιστοποίηση της αστάθειας λειτουργίας, είτε λόγω μεταβολών των οπτικών σημάτων, που εισέρχονται στο διακόπτη, είτε λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών του διακόπτη, κρίνεται απολύτως απαραίτητη, τουλάχιστον όσον αφορά την εφαρμογή τους σε εμπορικά διαθέσιμα οπτικά συστήματα. Οι δύο σημαντικότεροι παράγοντες βελτίωσης της σταθερότητας λειτουργίας ενός διακόπτη είναι η χαμηλή πολωτική ευαισθησία των δομικών του στοιχείων, καθώς και οι μικρές φυσικές του διαστάσεις. Αναφορικά με το δεύτερο παράγοντα, σαφές πλεονέκτημα παρέχουν οι οπτικοί διακόπτες, που είναι ολοκληρωμένοι σε συμπαγείς συσκευασίες.
- **Διαδοχική σύνδεση πολλαπλών διακοπών (cascadability)**, η οποία αφορά στην ικανότητα ενός διακόπτη να οδηγεί απευθείας, από την έξοδό του, στη θύρα εισόδου ενός άλλου. Η ικανότητα αυτή αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια για την αξιολόγηση της απόδοσης των οπτικών πυλών, δεδομένου ότι καθορίζεται από όλα τα προαναφερθέντα κριτήρια. Η ανάγκη για διαδοχική σύνδεση πολλαπλών διακοπών είναι μεγάλη, αφού αν μια πύλη δεν μπορεί να οδηγήσει μία άλλη καθίσταται ανέφικτη η σχεδίαση σύνθετων αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων, τα οποία απαιτούν τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού πυλών.

Περισσότερο λεπτομερής περιγραφή των διαφόρων τύπων των συμβολομετρικών διακοπών και εκτενέστερη ανάλυση των εφαρμογών τους και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους δεν εμπίπτει στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής, και μπορεί να βρεθεί στην πλούσια διεθνή, αλλά και ελληνική βιβλιογραφία, του τομέα της αμιγώς οπτικής επεξεργασίας σήματος. [2.5]

## 2.6 Οπτικό συμβολόμετρο MZI (Mach Zehnder Interferometer) με ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή SOA

Η δομή ενός διακόπτη τύπου Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer - MZI) με ημιαγωγίμο οπτικό ενισχυτή (SOA) φαίνεται στην Εικόνα 2.8, όπου εύκολα διαπιστώνεται ότι έχει πολλές ομοιότητες με τη γενική μορφή ενός συμβολομετρικού διακόπτη, όπως αυτός παρουσιάστηκε στην Εικόνα 2.6, αφού χρησιμοποιεί δύο βραχίονες – οπτικούς δρόμους.



Εικόνα 2.8: ο διακόπτης Mach-Zehnder σε κατάσταση (α) μη μεταγωγής-OFF και (β) μεταγωγής-ON

Η βασική διαφορά σε σχέση με το διακόπτη της Εικόνας 2.6 είναι ότι το MZI έχει έναν SOA τοποθετημένο σε κάθε βραχίονα. Το σήμα εισόδου εισέρχεται στο διακόπτη και διαχωρίζεται σε δύο ίσες συνιστώσες με τη βοήθεια ενός 3 dB οπτικού συζεύκτη. Κάθε συνιστώσα διαδίδεται μέσα από τον αντίστοιχο βραχίονα με τον ενισχυτή, και στην έξοδο του διακόπτη οι δύο συνιστώσες επανενώνονται και συμβάλλουν με τη βοήθεια ενός

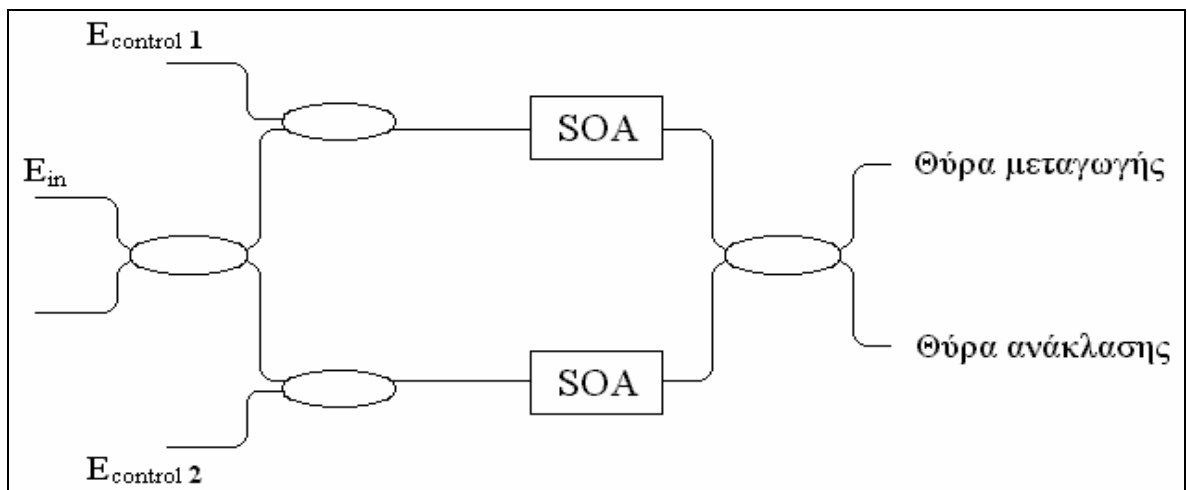
δεύτερου 3 dB οπτικού συζεύκτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δύο οπτικοί 3 dB συζεύκτες, εκτός του διαχωρισμού της οπτικής δέσμης σε δύο συνιστώσες ίδιας ισχύος, εισάγουν και μια διαφορά φάσης ίση με  $\pi/2$  μεταξύ των δύο συνιστωσών, που εμφανίζονται στην έξοδο του. Το σήμα ελέγχου εισάγεται στο διακόπτη και, συγκεκριμένα, στο SOA του πάνω βραχίονα, μέσω ενός επιπλέον οπτικού συζεύκτη, ο οποίος είναι τοποθετημένος στον πάνω βραχίονα, ακριβώς πριν τον ημιαγωγό. Αποτέλεσμα αυτού είναι το σήμα ελέγχου να επιδρά μόνο στη μία από τις δύο χωρικές συνιστώσες του σήματος εισόδου. Η λειτουργία αυτού του διακόπτη βασίζεται στον πρώτο συμβολομετρικό διακόπτη τύπου Mach-Zehnder, που προτάθηκε για αμιγώς οπτική μεταγωγή. Στην εικόνα 2.8(α) περιγράφεται η λειτουργία του σε κατάσταση μη μεταγωγής ή αλλιώς στην κατάσταση OFF, απουσία, δηλαδή, σήματος ελέγχου. Το σήμα ρολογιού διασπάται στο συζεύκτη εισόδου σε δύο πεδία, τα οποία αποκτούν διαφορά φάσης  $\pi/2$  μεταξύ τους, διαδίδονται μέσα από τους δυο βραχίονες με τους αντίστοιχους SOAs, και φτάνουν στις εισόδους του συζεύκτη εξόδου έχοντας την ίδια ακριβώς σχέση φάσης,  $\pi/2$ . Στο συζεύκτη εξόδου επανεισάγεται ολίσθηση φάσης κατά  $\pi/2$  μεταξύ των οπτικών δεσμών, αλλά κατά αντίθετο τρόπο από ότι στο συζεύκτη εισόδου, με αποτέλεσμα στη μια θύρα εξόδου του διακόπτη να υπάρχει διαφορά φάσης  $\pi$  μεταξύ των δύο συνιστωσών, και επομένως πλήρως αναιρετική συμβολή, ενώ στην άλλη θύρα εξόδου η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο συνιστωσών είναι 0, οπότε η συμβολή είναι πλήρως προσθετική. Το σύνολο, λοιπόν, του σήματος εισόδου εξέρχεται από τη θύρα, στην οποία γίνεται πλήρως προσθετική συμβολή και η οποία ονομάζεται θύρα μη μεταγωγής (Unswitched-port), ενώ η άλλη θύρα, στην οποία γίνεται πλήρως αναιρετική συμβολή, αποδίδει μηδενική οπτική ισχύ. Ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση μεταγωγής, όταν εισέρχεται οπτικός παλμός σήματος ελέγχου στον ένα από τους δύο βραχίονες, και η κατάσταση αυτή περιγράφεται στην Εικόνα 2.8(β). Οι δύο συνιστώσες του σήματος εισόδου φτάνουν στους αντίστοιχους SOAs με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως περιγράφηκε στην κατάσταση μη μεταγωγής του συμβολομέτρου.

Εκεί, η μιν μία, που διαδίδεται μέσα από τον ημιαγωγό που δεν δέχεται σήμα ελέγχου, θεωρητικά διατηρεί την αρχική της φάση, η δεύτερη συνιστώσα όμως «συνταξιδεύει» μες στο SOA με τον ισχυρό παλμό ελέγχου, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης του ενισχυτή. Αποτέλεσμα της μεταβολής του δείκτη διάθλασης του ενισχυτή είναι η ολίσθηση τη φάσης της συνιστώσας του σήματος ρολογιού στην έξοδο του SOA κατά  $\pi$ , σε σχέση με τη φάση της ίδιας συνιστώσας στην είσοδο, λόγω του φαινομένου της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM). Έτσι, στο συζεύκτη εξόδου οι δύο οπτικές δέσμες του σήματος ρολογιού συμβάλλουν με μια σχετική διαφορά φάσης  $\pi$ , συγκριτικά με την κατάσταση μη μεταγωγής, οπότε στη θύρα μη μεταγωγής η συμβολή είναι τώρα πλήρως αναιρετική, ενώ στην άλλη θύρα είναι πλήρως προσθετική. Κατά συνέπεια, όλο το σήμα



ρολογιού εξέρχεται τώρα από τη δεύτερη θύρα εξόδου, η οποία και ονομάζεται θύρα μεταγωγής (Switch-port), και ο διακόπτης άλλαξε κατάσταση και βρίσκεται, πλέον, σε κατάσταση μεταγωγής, ή αλλιώς στην κατάσταση ON. [2.7]

Από μια πιο αναλυτική σκοπιά όσων προαναφέρθηκαν παρουσιάζεται παρακάτω μια μαθηματική προσέγγιση με βάση την εικόνα 2.9. Θεωρούμε βραχίονες ίσου μήκους και αγνοούμε τις απώλειες στις ίνες και τους συζεύκτες.



Εικόνα 2.9 Βοηθητικό σχήμα για την μαθηματική ανάλυση της λειτουργίας του MZI

Έστω σήμα εισόδου:

$$E_{in}(t) = E_{in} e^{-j\omega t}$$

Ακριβώς μετά το συζεύκτη εισόδου, το σήμα διαιρείται σε δύο ίσους ισχύος σήματα. Στον

επάνω βραχίονα διαδίδεται το σήμα  $E_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in} e^{-j\omega t}$  και στον κάτω βραχίονα το σήμα

$$E_2(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in} e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}$$

. Αφού τα σήματα αυτά περάσουν από τους ενισχυτές γίνονται

$$E_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{G_1} E_{in} e^{-j(\omega t + \varphi_1)} \quad \text{και} \quad E_2(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{G_2} E_{in} e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_2\right)}$$

αντιστοίχως, όπου  $G_1 =$

$G_1(t)$ ,  $G_2 = G_2(t)$  τα αντίστοιχα κέρδη ισχύος και  $\varphi_1 = \varphi_1(t)$ ,  $\varphi_2 = \varphi_2(t)$  οι αντίστοιχες στροφές φάσης είναι συναρτήσεις του χρόνου. Μετά το συζεύκτη εξόδου, τα δύο σήματα στις θύρες εξόδου του συμβολόμετρου Mach-Zehnder είναι τα

$$E_{tran}(t) = \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{in}e^{-j(\omega t + \varphi_1)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{in}e^{-j(\omega t + \pi + \varphi_2)}$$

$$E_{refl}(t) = \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{in}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_1\right)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{in}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_2\right)}$$

Η ισχύς στην θύρα μεταγωγής είναι :

$$P_{tran}(t) = E_{tran}(t)E_{tran}^*(t) =$$

$$= \left( \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{in}e^{-j(\omega t + \varphi_1)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{in}e^{-j(\omega t + \pi + \varphi_2)} \right) \left( \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{in}e^{j(\omega t + \varphi_1)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{in}e^{j(\omega t + \pi + \varphi_2)} \right) =$$

$$= \frac{1}{4}E_{in}^2 \left( \sqrt{G_1}e^{-j\varphi_1} + \sqrt{G_2}e^{-j(\pi + \varphi_2)} \right) \left( \sqrt{G_1}e^{j\varphi_1} + \sqrt{G_2}e^{j(\pi + \varphi_2)} \right) =$$

$$= \frac{1}{2}P_{in} \left( G_1 + \sqrt{G_1}\sqrt{G_2}e^{-j\varphi_1}e^{j\varphi_2}e^{j\pi} + \sqrt{G_1}\sqrt{G_2}e^{j\varphi_1}e^{-j\varphi_2}e^{-j\pi} + G_2 \right) =$$

$$= \frac{1}{4}P_{in} \left( G_1 + G_2 - \sqrt{G_1}\sqrt{G_2}e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} - \sqrt{G_1}\sqrt{G_2}e^{-j(\varphi_2 - \varphi_1)} \right) =$$

$$= \frac{1}{4}P_{in} \left( G_1 + G_2 - 2\sqrt{G_1}\sqrt{G_2}\cos(\Delta\varphi) \right)$$

Η ισχύς στην θύρα ανάκλασης είναι :

$$P_{refl}(t) = E_{refl}(t)E_{refl}^*(t) =$$

$$= \left( \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{in}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_1\right)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{in}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_2\right)} \right) \left( \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{in}e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_1\right)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{in}e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_2\right)} \right) =$$

$$= \frac{1}{4}E_{in}^2 \left( \sqrt{G_1}e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_1\right)} + \sqrt{G_2}e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_2\right)} \right) \left( \sqrt{G_1}e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_1\right)} + \sqrt{G_2}e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_2\right)} \right) =$$

$$= \frac{1}{2}P_{in} \left( G_1 + \sqrt{G_1}\sqrt{G_2}e^{-j\varphi_1}e^{j\varphi_2} + \sqrt{G_1}\sqrt{G_2}e^{j\varphi_1}e^{-j\varphi_2} + G_2 \right) =$$

$$= \frac{1}{4}P_{in} \left( G_1 + G_2 + \sqrt{G_1}\sqrt{G_2}e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} + \sqrt{G_1}\sqrt{G_2}e^{-j(\varphi_2 - \varphi_1)} \right) =$$

$$= \frac{1}{4}P_{in} \left( G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1}\sqrt{G_2}\cos(\Delta\varphi) \right)$$

Όπου  $P_{in} = E_{in}^2$ ,  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  και όπως έχει ήδη αναφερθεί  $G_1 = G_1(t)$ ,  $G_2 = G_2(t)$ ,  $\varphi_1 = \varphi_1(t)$  και  $\varphi_2 = \varphi_2(t)$  είναι συναρτήσεις του χρόνου.

Συνεπώς, η ισχύς στις θύρες εξόδου του Mach-Zehnder είναι

$$P_{tran}(t) = \frac{1}{4} E_{in}^2 (G_1 + G_2 - 2\sqrt{G_1} \sqrt{G_2} \cos(\Delta\phi)) \quad (2.1)$$

και

$$P_{refl}(t) = \frac{1}{4} E_{in}^2 (G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1} \sqrt{G_2} \cos(\Delta\phi)) \quad (2.2)$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις φαίνεται ότι η ισχύς στις εξόδους εξαρτάται από τη διαφορά φάσης των δύο συμβαλλόμενων σημάτων, καθώς κι από τα κέρδη ισχύος. Αν τα δύο σήματα ελέγχου είναι ίδια, τότε το σήμα εισόδου μεταγεται στη θύρα ανάκλασης. Πράγματι από τις σχέσεις (2.1) και (2.2), για :

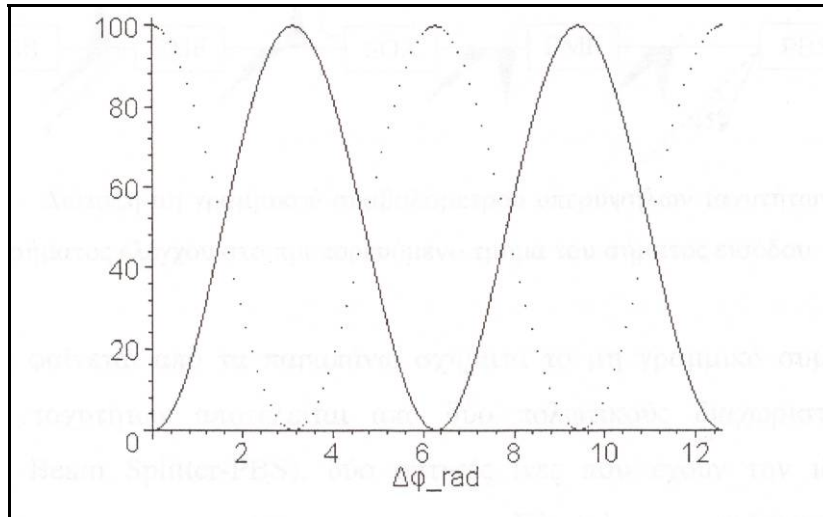
$$\Delta\phi = 0 \text{ έπεται ότι } P_{tran}(t) = \frac{1}{4} E_{in}^2 (G_1 + G_2 - 2\sqrt{G_1} \sqrt{G_2})$$

$$\text{και } P_{refl}(t) = \frac{1}{4} E_{in}^2 (G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1} \sqrt{G_2})$$

Στην περίπτωση που τα κέρδη ισχύος είναι ίσα, δηλαδή  $G_1 = G_2 = G$  συνεπάγεται ότι  $P_{tran}(t) = 0$  και  $P_{refl}(t) = E_{in}^2 G$ . Επομένως τη χρονική στιγμή που  $\Delta\phi = 0$ , το σήμα εξέρχεται αποκλειστικά από τη θύρα ανάκλασης, ενισχυμένο κατά το κοινό κέρδος ισχύος  $G$ . Στην περίπτωση, όμως, που  $G_1 \neq G_2$ , τότε η εξερχόμενη ισχύς μοιράζεται και στις δύο θύρες εξόδου. Το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος εξέρχεται από τη θύρα ανάκλασης και το μικρότερο από τη θύρα μεταγωγής. Αντίστοιχα και για την περίπτωση που  $\Delta\phi = \pi$ .

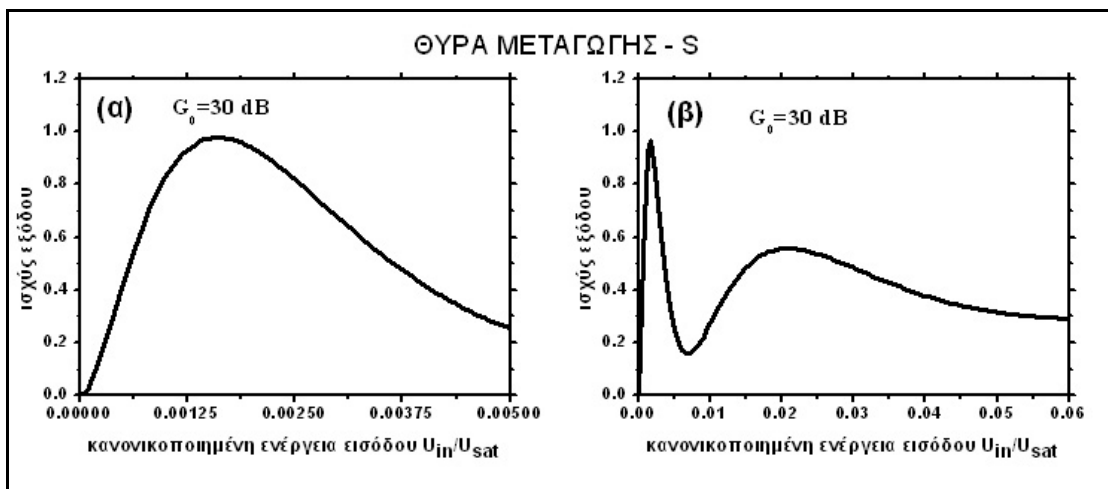
Η καλή λειτουργία ενός συμβολόμετρου, ως οπτικού διακόπτη, εστιάζεται κυρίως στην επίτευξη διαφοράς φάσης ίσης με  $\pi$  ακτίνια. Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζονται τα συνολικά κέρδη για τις δύο θύρες του συμβολόμετρου Mach-Zehnder, όπως προκύπτουν

από τις σχέσεις (2.1) και (2.2). Στην ουσία αναπαρίστανται οι λόγοι  $\frac{P_{refl}}{P_{in}}$  και  $\frac{P_{tran}}{P_{in}}$  συναρτήσεως της διαφοράς φάσης  $\Delta\phi$ . Η συνεχής καμπύλη αφορά τη θύρα μεταγωγής (S) κι η καμπύλη με τις κουκίδες αναφέρεται στην θύρα ανάκλασης (U). Όσον αφορά τα κέρδη ισχύος, έχουμε υποθέσει ότι  $G_1 = G_2 = G = 100$ , κάτι που εν γένει δεν ισχύει (όχι αναφορικά με την τιμή 100), αφού τα κέρδη είναι συναρτήσεις του χρόνου και η μεταβολή τους εξαρτάται από τη συνολική ισχύ, που διέρχεται από τον ενισχυτή. [2.8]

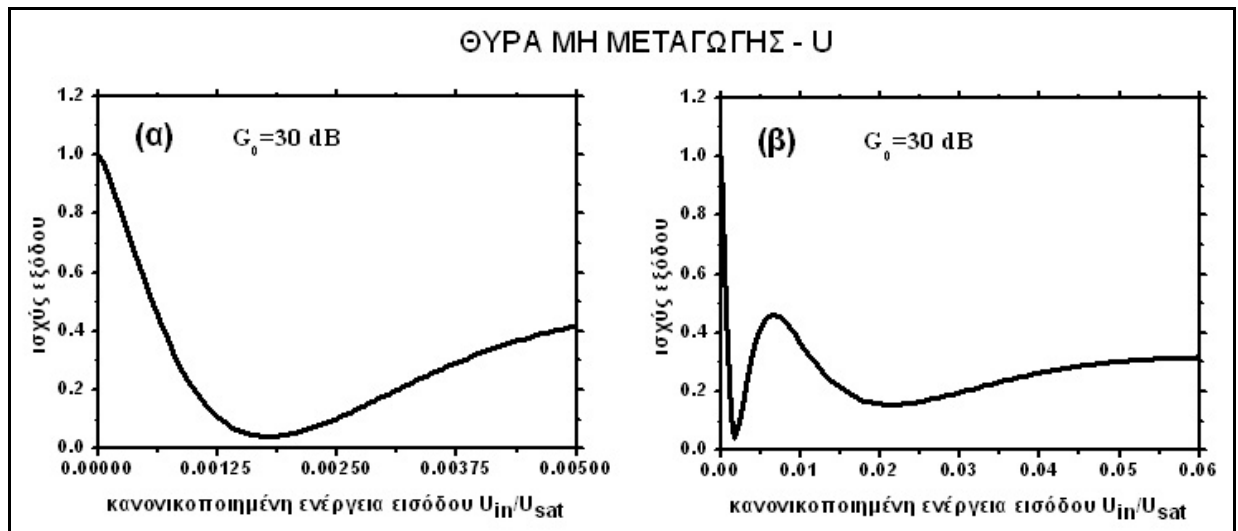


Εικόνα 2.10 Κέρδη για τις θύρες μεταγωγής (συνεχής καμπύλη) και τη θύρα ανάκλασης (διακεκομμένη γραμμή) σε συνάρτηση με τη διαφορά φάσης των σημάτων στις δύο θύρες.

Γενικότερα, από τη γραφική αναπαράσταση των συναρτήσεων μεταφοράς ισχύος των δύο θυρών προκύπτουν κάποιες πολύ χρήσιμες παρατηρήσεις:



Εικόνα 2.11: Συνάρτηση μεταφοράς ισχύος (κανονικοποιημένης ως προς τη μονάδα) της θύρας μεταγωγής S για κέρδος ασθενούς σήματος  $G_0=30$  dB (α) πρώτη κορυφή μετάδοσης (β) δύο πρώτες κορυφές μετάδοσης.



Εικόνα 2.12: Συνάρτηση μεταφοράς ισχύος (κανονικοποιημένης ως προς τη μονάδα) της θύρας μη μεταγωγής U για κέρδος ασθενούς σήματος  $G_0=30 \text{ dB}$  (α) πρώτη κορυφή μετάδοσης (β) δύο πρώτες κορυφές μετάδοσης.

- Η θύρα S εμφανίζει μέγιστα για ενέργειες παλμού ελέγχου, οι οποίες προκαλούν στροφή φάσης μέσα στον ενισχυτή ίση με ακέραιο περιττό πολλαπλάσιο του  $\pi$ , δηλ.  $\pi, 3\pi$  κ.ο.κ., ενώ εμφανίζει ελάχιστα σε ενέργειες παλμού ελέγχου που προκαλούν στροφή φάσης ίση με άρτιο πολλαπλάσιο του  $\pi$ , δηλ.  $0, 2\pi, 4\pi$  κ.ο.κ. Το αντίθετο, για τις ίδιες ακριβώς τιμές, συμβαίνει για τη θύρα U.
- Η μορφή των κορυφών μετάδοσης (transmission peaks) και για τις δύο θύρες μεταβάλλεται, καθώς αυξάνει η εισερχόμενη ενέργεια παλμού και, κατά συνέπεια, η ολίσθηση φάσης μέσα στον ενισχυτή. Η μεταβολή αυτή συνίσταται στη μείωση του πλάτους της κορυφής μετάδοσης και στη διεύρυνση της καμπύλης της. Η πτώση πλάτους οφείλεται στο γεγονός, ότι ο ενισχυτής κοραίνεται περισσότερο, καθώς αυξάνει η εισερχόμενη ενέργεια του σήματος ελέγχου, οπότε μειώνεται το κέρδος του και, κατά συνέπεια, αποδίδει λιγότερη οπτική ισχύ στην έξοδο. Μαθηματικά η μείωση του πλάτους της κορυφής μετάδοσης δίνεται από την αντίστοιχη μείωση του αθροιστικού όρου  $G_1+G_2$  στις σχέσεις που αφορούν τα  $P_{tran}$  και  $P_{refl}$ . Η διεύρυνση οφείλεται στο γεγονός ότι καθίσταται δυσκολότερος ο επιπρόσθετος κορεσμός του SOA, καθώς ο ενισχυτής εισέρχεται όλο και περισσότερο στην περιοχή έντονου κορεσμού λόγω του εισερχόμενου παλμού ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι ίδιες μεταβολές στην ενέργεια του παλμού ελέγχου προκαλούν μικρότερη μεταβολή στη μορφή της δεύτερης κορυφής μετάδοσης της συνάρτησης μεταφοράς συγκριτικά με

τη μεταβολή, που προκαλείται στη μορφή της πρώτης κορυφής μετάδοσης, αφού για τη δεύτερη κορυφή μετάδοσης ο ενισχυτής είναι εντονότερα κορεσμένος.

- Η βέλτιστη περιοχή λειτουργίας του οπτικού διακόπτη βρίσκεται στην πρώτη κορυφή μετάδοσης και για ενέργειες παλμού ελέγχου, οι οποίες αντιστοιχούν σε μεταβολές φάσης γύρω από την τιμή  $\Delta\phi=\pi$ . Στην περιοχή εκείνη μεγιστοποιείται η μετάδοση από τη θύρα S και ελαχιστοποιείται η μετάδοση στη θύρα U, με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται ο λόγος αντίθεσης ON-OFF του διακόπτη.
- Η έξοδος της θύρας μη μεταγωγής U δεν μηδενίζεται ποτέ, το οποίο φαίνεται να διαφωνεί με την ανάλυση της γενικής αρχής λειτουργίας του συμβολομετρικού διακόπτη, η οποία έγινε παραπάνω. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι η ανάλυση που προηγήθηκε αφορούσε σε λειτουργία του διακόπτη σε ιδανικές συνθήκες, όπου οι παράγοντες κέρδους ή απωλειών για τους δύο βραχίονες του συμβολομέτρου είχαν θεωρηθεί ίδιοι ακόμα κι όταν μεταβάλλονταν η φάση μέσα στο μη γραμμικό μέσο. Στις πραγματικές συνθήκες, όμως, τα κέρδη των δύο SOAs απαιτείται να είναι διαφορετικά για να υπάρξει ολίσθηση στη φάση λόγω εξωτερικού παλμού ελέγχου και για να επιτευχθεί μεταγωγή. Αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς είναι ότι ποτέ ο όρος  $(\sqrt{G_1(t)} - \sqrt{G_2(t)})^2$ , που περιέχεται στις σχέσεις 3.24 και 3.25, δε μπορεί να είναι μηδενικός, όταν υπάρχει μεταγωγή. Κατά συνέπεια, ένα ποσοστό ισχύος του σήματος εξέρχεται από τη θύρα U ακόμα και στην κατάσταση πλήρους μεταγωγής του διακόπτη, αναγκάζοντας το λόγο αντίθεσης ON-OFF για τη θύρα U να μην απειρίζεται ποτέ. Αντίθετα, τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο, ο λόγος αντίθεσης ON-OFF της θύρας μεταγωγής S μπορεί να τείνει στο άπειρο, καθώς σε κατάσταση μη μεταγωγής η ισχύς εξόδου της θύρα S είναι, θεωρητικά, μηδενική. Στην πραγματικότητα, βέβαια, ο λόγος ON-OFF της θύρα S δεν είναι ποτέ άπειρος, καθώς η ισχύς εξόδου της θύρας μεταγωγής δεν είναι ποτέ μηδενική λόγω του θορύβου, που εκπέμπει ο οπτικός ενισχυτής.

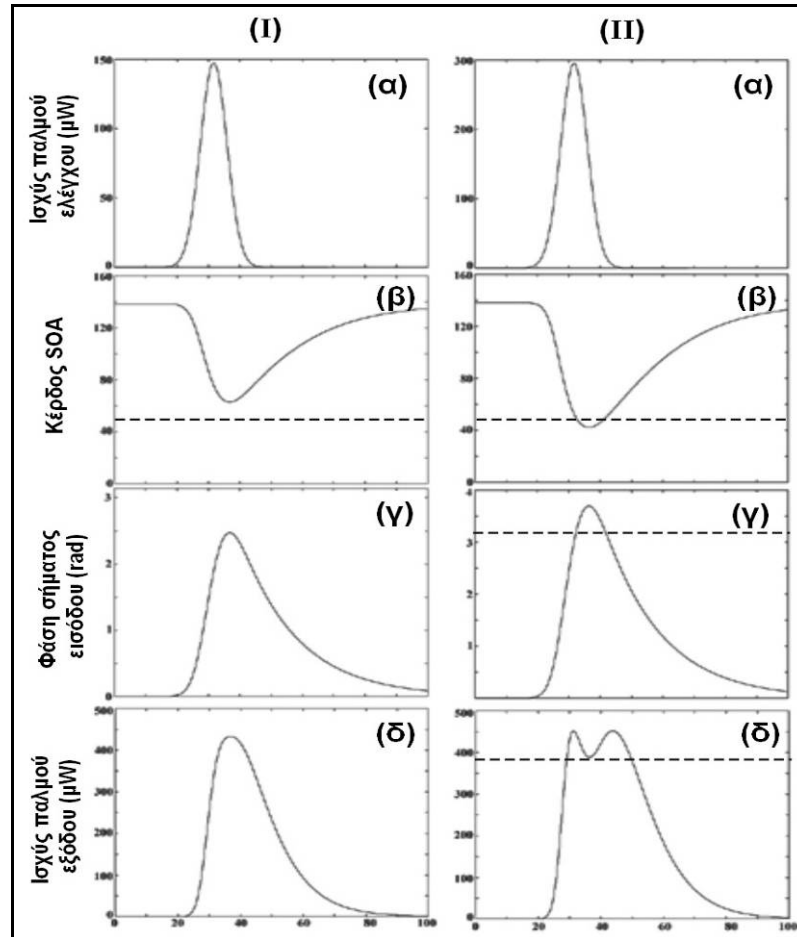
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει, επίσης, η μορφή του μεταγόμενου παλμού, ο οποίος εξέρχεται από τη θύρα S και είναι, στην ουσία, ο παλμός που καταγράφεται πάνω στο CW σήμα του οπτικού διακόπτη. Η μορφή αυτού του παλμού αποτελεί, ουσιαστικά, το παράθυρο μεταγωγής του συμβολομέτρου, για το οποίο έγινε λόγος στην υποπαράγραφο 2.5. Για τη μελέτη της μορφής του μεταγόμενου παλμού απαιτείται ο υπολογισμός της ισχύος εξόδου της θύρας S του διακόπτη για κάθε χρονική στιγμή μεταξύ της χρονικής στιγμής εισόδου του παλμού ελέγχου στον ενισχυτή και της χρονικής στιγμής, κατά την οποία ο ενισχυτής του διακόπτη έχει ανακάμψει πλήρως και έχει επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Κατά συνέπεια, χρειάζεται να λάβουμε υπόψη τη χρονική εξάρτηση της

συνάρτησης μεταφοράς ισχύος του συμβολομέτρου, την οποία αμελήσαμε κατά την προηγούμενη ανάλυση.

Καθώς ο παλμός ελέγχου εισέρχεται στον ενισχυτή του διακόπτη, το κέρδος του ενισχυτή κοραίνεται μέχρι μια ελάχιστη τιμή, η οποία αντιστοιχεί στο χρονικό σημείο, που το σύνολο της ενέργειας του παλμού ελέγχου βρίσκεται μέσα στον SOA. Για όλο αυτό το χρονικό διάστημα κορεσμού του ενισχυτή η έξοδος του διακόπτη αποδίδεται πλήρως από τις σχέσεις για τις  $P_{tran}$  και  $P_{ref}$ . Μετά την έξοδο του παλμού ελέγχου από τον ενισχυτή, το κέρδος του ενισχυτή αρχίζει να ανακάμπτει με εκθετική μορφή από την ελάχιστη τιμή του προς την αρχική τιμή κέρδους στη μόνιμη κατάσταση. Αν η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης τιμής του κέρδους και του αρχικού κέρδους του ενισχυτή αντιστοιχεί σε ολίσθηση φάσης ίση ή μικρότερη από  $\pi$ , τότε από τη σχέση για το  $P_{tran}$  προκύπτει ότι η κυματομορφή του μεταγόμενου παλμού έχει ένα μοναδικό μέγιστο. Αντίθετα, στην περίπτωση που η διαφορά μεταξύ ελάχιστης και αρχικής τιμής του κέρδους του ενισχυτή μεταφράζεται σε ολίσθηση φάσης μεγαλύτερης του  $\pi$ , τότε η κυματομορφή του μεταγόμενου παλμού έχει δύο μέγιστα, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται το σχήμα του παλμού στην έξοδο του διακόπτη. Το πρώτο μέγιστο της μορφής του παλμού εξόδου αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης  $\pi$ , που επιτυγχάνεται κατά τον κορεσμό του ενισχυτή, ενώ το δεύτερο μέγιστο της μορφής του μεταγόμενου παλμού αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης  $2\pi$ , η οποία επιτυγχάνεται κατά το χρονικό διάστημα ανάκαμψης του κέρδους του ενισχυτή.

Η προηγούμενη περιγραφή της χρονικής απόκρισης του ενισχυτή και της δημιουργούμενης κυματομορφής εξόδου γίνεται καλύτερα κατανοητή με τη βοήθεια της Εικόνας 2.13. Η στήλη (I) της Εικόνας 2.13 περιγράφει την περίπτωση, όπου η προκαλούμενη ολίσθηση φάσης είναι μικρότερη ή ίση με  $\pi$ , ενώ στη στήλη (II) περιγράφεται η περίπτωση, που η ολίσθηση φάσης είναι μεγαλύτερη από  $\pi$ . Στις εικόνες 2.13(I)(α) και 2.13(II)(α) απεικονίζεται ο αρχικός παλμός ελέγχου. Η μεταβολή του κέρδους του ενισχυτή για τις αντίστοιχες περιπτώσεις αποδίδεται στις Εικόνες 2.13(I)(β) και 2.13(II)(β), θεωρώντας αρχικό κέρδος ασθενούς σήματος του SOA ίσο με 140 (γραμμική κλίμακα). Με τη διακεκομμένη γραμμή στα δύο αυτά σχήματα δείχνεται η τιμή του κέρδους του ενισχυτή, η οποία αντιστοιχεί σε ολίσθηση φάσης ίση με  $\pi$  και είναι ίση με  $\sim 49$  (γραμμική κλίμακα). Το κέρδος του ενισχυτή στη στήλη (I) του σχήματος είναι πάντα μεγαλύτερο αυτής της τιμής, ενώ το κέρδος του ενισχυτή στη στήλη (II) λαμβάνει τιμές μικρότερες από αυτήν την τιμή για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα. Η αντίστοιχη μεταβολή στη φάση του CW σήματος εισόδου, που συνδιαδίδεται μέσα στον ενισχυτή με τον παλμό ελέγχου, απεικονίζεται στις Εικόνες 2.13(I)(γ) και 2.13(II)(γ), αντίστοιχα, όπου η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην τιμή φάσης, η οποία είναι μικρότερη κατά  $\pi$  από την αρχική φάση  $\phi_0$  (θεωρώντας  $\phi_0=0$ ). Τέλος, με χρήση της σχέσης για το  $P_{tran}$ , απεικονίζεται στις Εικόνες 2.13(I)(δ) και 2.13(II)(δ)

η αντίστοιχη έξοδος της θύρας S του διακόπτη για τις δύο περιπτώσεις, αντίστοιχα. Η μορφή του παλμού στο σχήμα 2.13(I)(δ) εμφανίζει μία μοναδική κορυφή, ενώ η μορφή του παλμού στην Εικόνα 2.13(II)(δ) έχει δύο κορυφές. Για όλες τις περιπτώσεις ο παράγοντας διεύρυνσης φασματικής γραμμής  $\alpha$  του ενισχυτή θεωρείται ίσος με 6. [2.5]



Εικόνα 2.13: στροφή φάσης μέσα στο SOA (I) μικρότερη από  $\pi$  (II) μεγαλύτερη από  $\pi$ . Σε κάθε στήλη δείχνονται (α) αρχικός παλμός ελέγχου (β) κέρδος του SOA (γραμμική κλίμακα) (γ) μεταβολή της φάσης του CW σήματος εισόδου (rad) (δ) παλμός εξόδου. Χρονικό παράθυρο 0-100 psec.

Στην περίπτωση της ομόρροπης διάδοσης των σημάτων ελέγχου και εισόδου θα εμφανίζεται, προφανώς, στην έξοδο του διακόπτη και ένα ανεπιθύμητο ποσοστό του σήματος ελέγχου. Για το διαχωρισμό των δύο σημάτων και την απομόνωση του σήματος ρολογιού έχουν προταθεί διάφορες λύσεις. Η μία αφορά στη χρήση διαφορετικών μηκών κύματος για τα δύο σήματα σε συνδυασμό με τη χρήση οπτικού φίλτρου, επιλεκτικού ως προς το μήκος κύματος, στην έξοδο της διάταξης. Μια δεύτερη, εναλλακτική αντιμετώπιση είναι η χρησιμοποίηση κυματοδηγών SOA πολλαπλών τρόπων διάδοσης, όπου το σήμα εισόδου και ελέγχου είναι στον πρώτης τάξης και τον βασικό τρόπο, αντίστοιχα, και ο



διαχωρισμός των τρόπων αυτών γίνεται με χρήση MMI συζευκτών (Multi-Mode Interference couplers). Τέλος, μια ευρέως διαδεδομένη λύση είναι η αλλαγή της γεωμετρίας του διακόπτη σε αντίρροπη συνδεσμολογία, όπου το σήμα ελέγχου διαδίδεται μες στο SOA σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του σήματος εισόδου. Αναφορικά με την εικόνα 2.8 η αντίρροπη συνδεσμολογία θα μπορούσε να υλοποιηθεί τοποθετώντας τον 3 dB συζεύκτη εισαγωγής του σήματος ελέγχου από τη μεριά της εξόδου του ημιαγωγού, οπότε το σήμα ελέγχου θα είχε κατεύθυνση από την έξοδο προς την είσοδο του διακόπτη. Κατά αυτόν τον τρόπο δεν απαιτείται διαχωρισμός των δύο σημάτων στην έξοδο του διακόπτη, και αποφεύγεται η χρήση επιπρόσθετου οπτικού στοιχείου. Ο διακόπτης Mach-Zehnder είναι ο πρώτος, και μέχρι πριν λίγο καιρό ήταν και ο μοναδικός μεταξύ άλλων οπτικών διακοπών, ο οποίος έχει ολοκληρωθεί σε ένα και μόνο πλινθίο. Πλέον, μάλιστα, είναι και εμπορικά διαθέσιμος, κυρίως για εφαρμογές μετατροπής μήκους κύματος. [2.7] Αυτό είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα της διάταξης του MZI, καθώς βελτιώνει τη σταθερότητα, διευκολύνει τη χρήση του, και επιτρέπει, θεωρητικά, την κατασκευή πιο πολύπλοκων διατάξεων με χρήση πολλαπλών πυλών. Επίσης, πιο πρόσφατα, ο διακόπτης MZI χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή και πειραματική επίδειξη ενός πλήρως ολοκληρωμένου μετατροπέα μήκους κύματος για την οποία λειτουργία τον χρησιμοποιούμε και εμείς στο παρόν πείραμα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται φωτογραφία ενός ολοκληρωμένου διακόπτη Mach-Zehnder.



Εικόνα 2.14 Ολοκληρωμένος τετραπλός διακόπτης MZI

Το γεγονός, ότι η λειτουργία του διακόπτη Mach-Zehnder βασίζεται στο χωρικό διαχωρισμό του σήματος εισόδου και, επομένως, απαιτεί τη χρήση δύο ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών, αποτελεί ταυτόχρονα μειονέκτημα και πλεονέκτημα της διάταξης. Μειονέκτημα, γιατί οι δύο ενισχυτές σημαίνουν αύξηση του κόστους της διάταξης, συγκριτικά τουλάχιστον με τα συμβολόμετρα μονού βραχίονα και τα συμβολόμετρα κλειστού βρόχου. Επίσης, η διάταξη απαιτεί ακριβή ρύθμιση σε μια σειρά σημαντικών παραμέτρων, όπως μήκη των δύο βραχιόνων, κέρδη των δύο ενισχυτών και πολωτικές καταστάσεις των χωρικά διαχωρισμένων συνιστωσών εισόδου, για να είναι εφικτή η βέλτιστη απόδοσή της και η μεγιστοποίηση του λόγου αντίθεσης στην έξοδο. Εύλογα, επομένως, συγκριτικά πάλι με τα

συμβολόμετρα μονού βραχίονα ή, ακόμα, και τα συμβολόμετρα κλειστού βρόχου ο διακόπτης Mach-Zehnder έχει μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας στη ρύθμισή του και στην αρχικοποίησή του κατά την πειραματική διαδικασία. Ταυτόχρονα, όμως, η συνδεσμολογία του προσφέρει και σημαντικά πλεονεκτήματα, το κυριότερο από τα οποία είναι η δυνατότητα ολοκλήρωσής του. Επίσης, η χρήση δύο ενισχυτών επιτρέπει την ανεξάρτητη επέμβαση σε κάθε συνιστώσα του σήματος εισόδου, προσφέροντας ευκολία στη δυνατότητα εναλλακτικών συνδεσμολογιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η συνδεσμολογία ασύμμετρου διακόπτη Mach-Zehnder (asymmetric MZI), η οποία βασίζεται στην τοποθέτηση των δύο ημιαγωγών σε μη συμμετρικές θέσεις πάνω στους αντίστοιχους βραχίονες και επιτρέπει τον κατά βούληση καθορισμό του παραθύρου μεταγωγής και, επομένως, τη λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης.

Ο διακόπτης Mach-Zehnder έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα δικτυακών εφαρμογών, με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Πολύ συνοπτικά, οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν την αποπολυπλεξία οπτικού καναλιού σε OTDM οπτικούς κόμβους, την αναγέννηση οπτικού σήματος, τη μετατροπή μήκους, καθώς και την υλοποίηση αμιγώς οπτικών πυλών, που επιτελούν λογικές Boolean συναρτήσεις σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, στον τομέα αυτό, είναι το γεγονός ότι, με χρήση ολοκληρωμένου διακόπτη MZI, παρουσιάστηκε πρόσφατα η οπτική πύλη XOR στα 40 Gb/s, η οποία είναι και η υψηλότερη ταχύτητα λειτουργίας μεταξύ των οπτικών πυλών XOR με SOA, που έχει αναφερθεί μέχρι στιγμής.

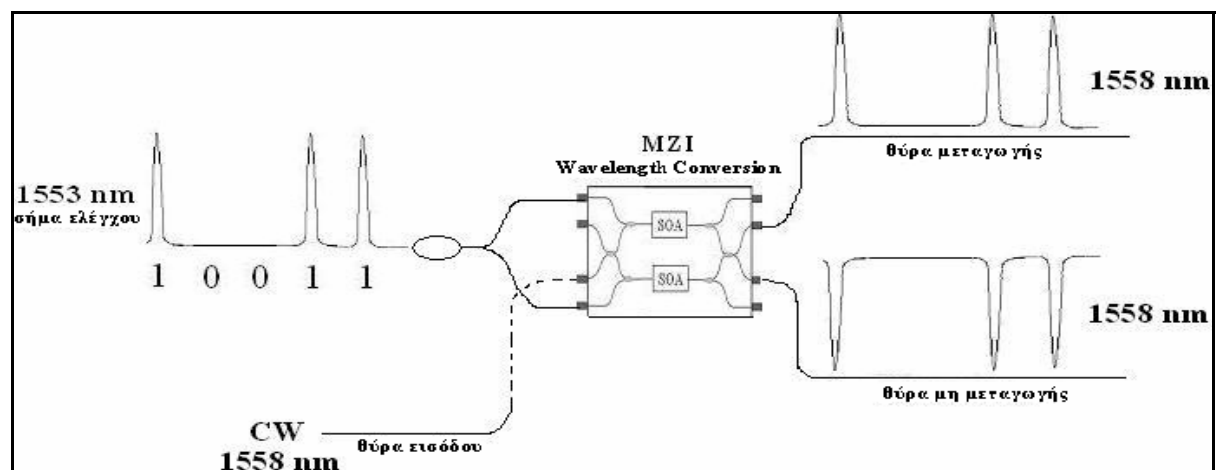
## 2.7 Μετατροπή μήκους κύματος με συμβολόμετρο MZI

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η λειτουργία του συμβολομέτρου MZI για την μετατροπή μήκους κύματος που είναι κύριας σημασίας για το πείραμά μας. Για την περαιτέρω ανάλυσή μας, θα βασιστούμε στην Εικόνα 3.16 όπου το συμβολόμετρο MZI χρησιμοποιείται για να πραγματοποιήσει μετατροπή μήκους κύματος (Wavelength Conversion) μιας ακολουθίας RZ από τα 1553 nm στα 1558 nm. Όταν ένα MZI χρησιμοποιείται για μετατροπή μήκους κύματος, το σήμα εισόδου του δεν είναι παλμικό αλλά συνεχές (Continuous Wave – CW), ενώ η παλμική ακολουθία της οποίας επιθυμούμε να αλλάξουμε το μήκος κύματος εισέρχεται στο MZI ως σήμα ελέγχου. Μάλιστα, η νέα παλμική ακολουθία θα εμφανίζεται στην θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI και θα βρίσκεται στο μήκος κύματος του συνεχούς σήματος εισόδου (CW). Το CW σήμα μήκους κύματος 1558 nm παράγεται από μία δίοδο laser, στη συνέχεια ενισχύεται, περνά από ένα βραχίονα

ελέγχου πόλωσης και ισχύος, διαδικασία απαραίτητη για την ορθή λειτουργία του MZI που είναι ευαίσθητος στην πόλωση, και εισάγεται στη μία εκ των δύο θυρών εισόδου του MZI .

Ως σήμα ελέγχου στο MZI θα θεωρήσουμε τμήμα μιας ακολουθίας RZ έστω 1 0 0 1 1 με μήκος κύματος  $\lambda_1=1553\text{nm}$ . Το σήμα εισόδου θα είναι ένα CW σήμα με μήκος κύματος  $\lambda_2=1558\text{nm}$ .

Η μορφή των σημάτων στις δύο θύρες εξόδου του MZI φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.16: Μετατροπή μήκους κύματος ενός τυχαίου τμήματος μιας ακολουθίας, με συμβολόμετρο MZI.

Έτσι λοιπόν, η νέα παλμική ακολουθία που θα εμφανίζεται στη θύρα εξόδου μεταγωγής του MZI, θα βρίσκεται στο μήκος κύματος του CW δηλαδή στα 1558 nm ενώ δε θα συμβεί καμία αλλαγή από άσσο σε μηδενικό ή αντιστρόφως. Εντούτοις, η διαδικασία μετατροπής μήκους κύματος επηρεάζει το χρονικό εύρος των παλμών εξόδου, το οποίο προκύπτει αυξημένο με το ρυθμό μετάδοσης όμως να παραμένει σταθερός. Όσον αφορά το σήμα στη θύρα εξόδου μη μεταγωγής, παρατηρούμε ότι οι παλμοί βρίσκονται σε μήκος κύματος 1558 nm αλλά εμφανίζονται ανεστραμμένοι. Προφανώς λοιπόν, μας ενδιαφέρει το σήμα της θύρας εξόδου μεταγωγής. [2.9]

Αυτή η διαδικασία είναι καθοριστικής σημασίας στο πείραμά μας όπως θα φανεί και στα επόμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα μετατροπή μήκος κύματος μέσω MZI πραγματοποιείται στα τρία στάδια του TSI, από τα μήκη κύματος 1556nm, 1558nm, 1559nm στο μήκος κύματος 1553nm κάθε φορά σε κάθε στάδιο για την περαιτέρω επίτευξη της διαδικασίας της χρονικής καθυστέρησης που υφίστανται τα πακέτα στα delay lines. Επίσης στο τελικό στάδιο πραγματοποιείται μετατροπή κύματος από τα 1553nm στα 1562nm ώστε

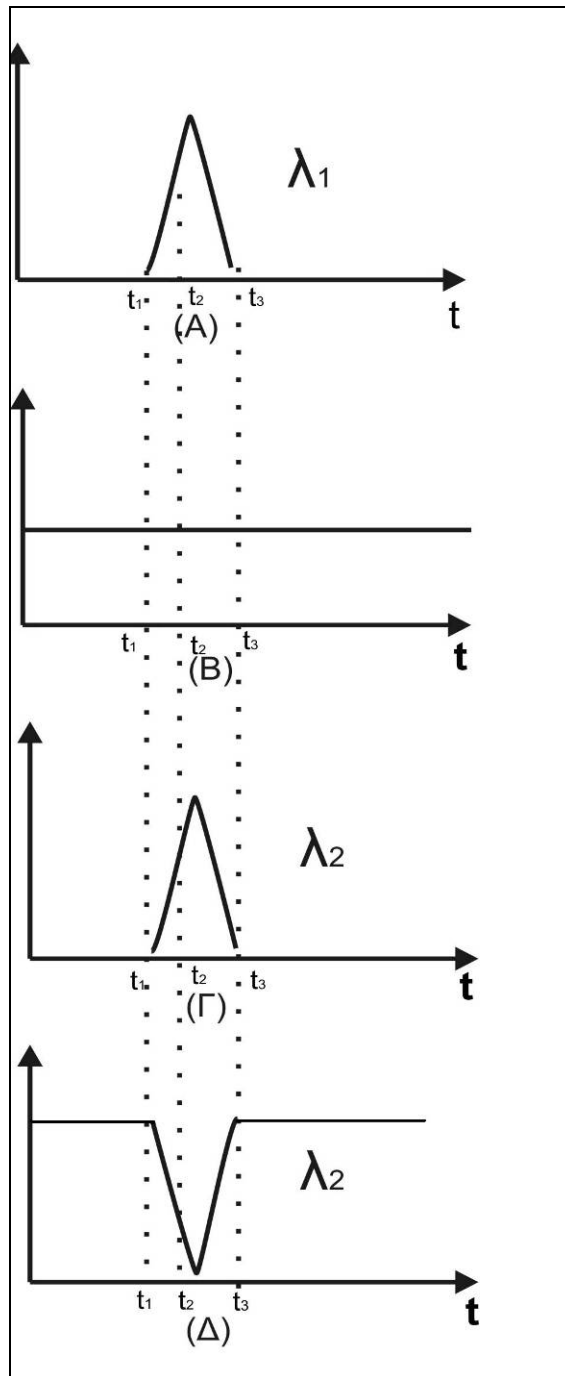
το τελικό σήμα εξόδου του κυκλώματος να είναι στην αρχική του μορφή (δηλ. όλα τα πακέτα σε ένα κοινό μήκος κύματος ) και έτσι να μπορεί να δρομολογηθεί από τον κόμβο δρομολόγησης ενός μήκους κύματος.

Ακολουθεί στα επόμενα σχήματα διαγραμματική επεξήγηση της μετατροπής μήκους κύματος. Στην Εικόνα 3.17 παρουσιάζεται η διαδικασία για ένα μόνο παλμό RZ ενώ στην Εικόνα 3.18 για τη παλμοσειρά RZ 10011.

Όσον αφορά την Εικόνα 3.17 ο παλμός σε μήκος κύματος  $\lambda_1$  του διαγράμματος (A) αποτελεί το σήμα ελέγχου ενώ το CW σήμα σε μήκος κύματος  $\lambda_2$  (B) αποτελεί το σήμα εισόδου στο MZI. Το σήμα εξόδου στη θύρα μεταγωγής προκύπτει βάσει της παρακάτω διαδικασίας: Κάθε σημείο του σήματος εισόδου CW αποκτά την ισχύ του αντίστοιχου σημείου στον άξονα του χρόνου του σήματος ελέγχου. Έτσι, το σημείο του CW σήματος που βρίσκεται στο χρονικό σημείο  $t_1$  αποκτά στην έξοδο μεταγωγής μηδενική ισχύ, αφού ο παλμός του σήματος εισόδου ξεκινάει στην στιγμή  $t_1$ , άρα έχει μηδενική ισχύ. Σε μια επόμενη στιγμή, π.χ. στην  $t_2$  το αντίστοιχο σημείο του CW σήματος θα αποκτήσει την ισχύ του αντίστοιχου σημείου του παλμού και θα αντιστοιχιστεί στο σημείο που φαίνεται στο διάγραμμα Γ ακολουθώντας την διακεκομμένη γραμμή. Ομοίως θα συμβεί και για όλα τα υπόλοιπα σημεία και ως αποτέλεσμα θα προκύψει στην θύρα εξόδου μεταγωγής ο παλμός του διαγράμματος Γ που είναι ουσιαστικά ο παλμός του A αλλά στο μήκος κύματος  $\lambda_2$ .

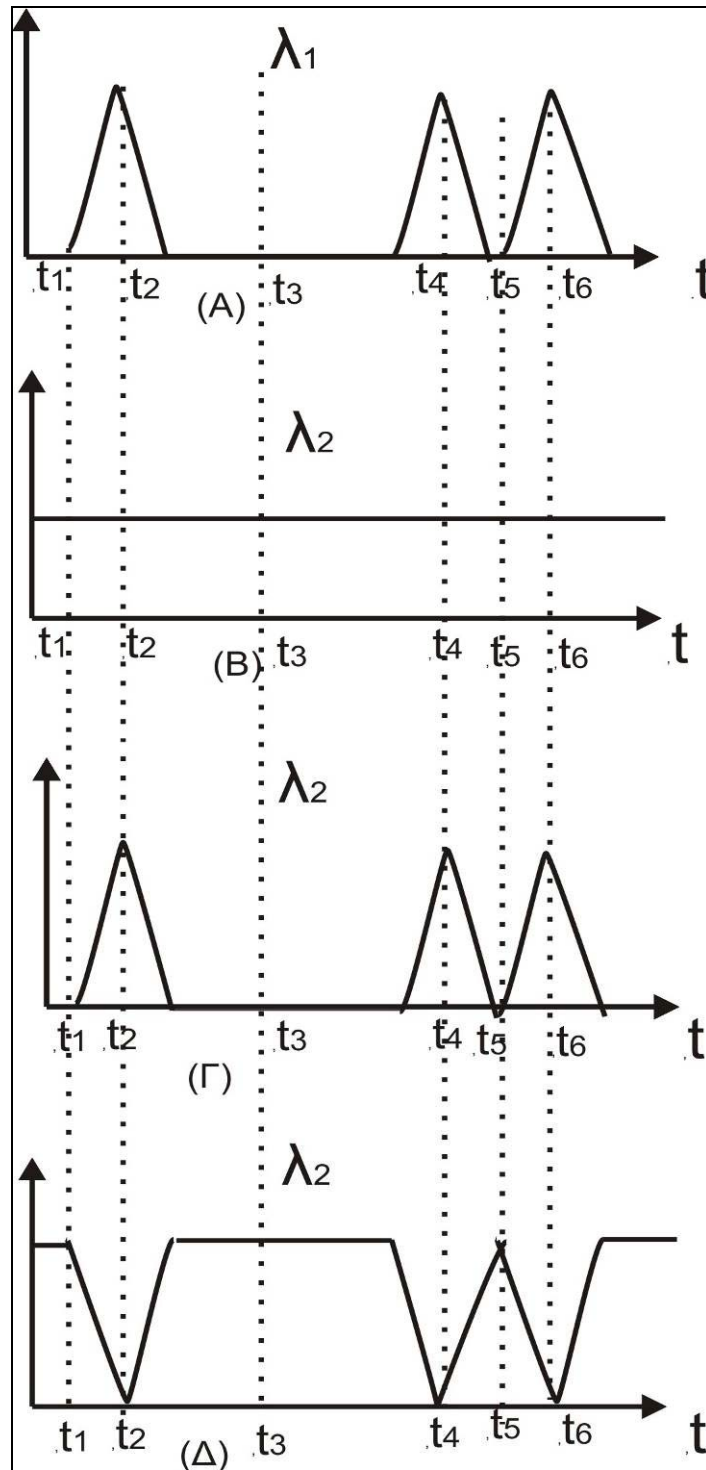
Για το σήμα εξόδου της θύρας μη μεταγωγής η διαδικασία που ακολουθείται είναι παρόμοια. Η διαφορά είναι ότι εδώ τα σημεία του CW σήματος αποκτούν ισχύ αντίθετη από αυτή των αντίστοιχων σημείων του παλμού του σήματος ελέγχου. Έτσι, το σημείο με την μέγιστη ισχύ του σήματος ελέγχου αντιστοιχίζεται σε σημείο με μηδενική ισχύ στην έξοδο μη μεταγωγής και ανάποδα τα σημεία με μηδενική ισχύ σε σημεία της μέγιστης ισχύς του παλμού. Τελικά προκύπτει στην έξοδο μη μεταγωγής ο παλμός ελέγχου ανεστραμμένος και σε μήκος κύματος  $\lambda_2$ .

Η Εικόνα 3.18 περιγράφει διαγραμματικά την αντίστοιχη διαδικασία για σήμα ελέγχου την παλμοσειρά 10011 μήκους κύματος  $\lambda_1$  και σήμα εισόδου CW μήκους κύματος  $\lambda_2$ . Όμοια όπως και στη περίπτωση του ενός παλμού στην έξοδο μεταγωγής προκύπτει η παλμοσειρά σε μήκος κύματος  $\lambda_2$  και στην έξοδο μη μεταγωγής προκύπτει η παλμοσειρά ανεστραμμένη σε μήκος κύματος  $\lambda_2$ . Στο πείραμά μας έχουμε την περίπτωση της Εικόνας 3.18 και το αποτέλεσμα που μας ενδιαφέρει η έξοδος της θύρας μεταγωγής.



Σχήμα 3.17: Μετατροπή μήκους κύματος ενός παλμού μέσω MZI:

- (A) παλμός σε μήκος κύματος  $\lambda_1$  (σήμα ελέγχου)
- (B) CW σήμα σε μήκος κύματος  $\lambda_2$  (σήμα εισόδου)
- (Γ) παλμός σε μήκος κύματος  $\lambda_2$  στη θύρα μεταγωγής
- (Δ) παλμός σε μήκος κύματος  $\lambda_2$  στη θύρα μη μεταγωγής



Σχήμα 3.18: Μετατροπή μήκους κύματος της παλμοσειράς RZ 10011 μέσω MZI:

(A) παλμοσειρά σε μήκος κύματος  $\lambda_1$  (σήμα ελέγχου)

(B) CW σήμα σε μήκος κύματος  $\lambda_2$  (σήμα εισόδου)

(Γ) παλμοσειρά σε μήκος κύματος  $\lambda_2$  στη θύρα μεταγωγής

(Δ) παλμοσειρά σε μήκος κύματος  $\lambda_2$  στη θύρα μη μεταγωγής

## 2.8 Βιβλιογραφία

- [2.1] New trends in optical network design and modeling. Edited by A.A. Stardas, 2001, Athens, Greece
- [2.2] Cross-Polarization Modulation in Semiconductor Optical Amplifiers H. Soto, D. Erasme, and G. Guekos, *Member, IEEE* IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 11, NO. 8, AUGUST 1999
- [2.3] Ψηφιακά Συστήματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων. Διδακτορική διατριβή. Νικόλαος Α. Πλέρος. Αθήνα, Απρίλιος 2004
- [2.4] Semiconductor Optical Amplifier-Based All-Optical Gates for High-Speed Optical Processing, Kristian E. Stubkjaer, IEEE JOURNAL ON SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 6, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2000
- [2.5] Ψηφιακά Συστήματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων. Διδακτορική διατριβή. Νικόλαος Α. Πλέρος. Αθήνα, Απρίλιος 2004
- [2.6]  
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/MachZehnder/MachZehnder.html>
- [2.7] Ψηφιακά Συστήματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων. Διδακτορική διατριβή. Νικόλαος Α. Πλέρος. Αθήνα, Απρίλιος 2004
- [2.8] Αμιγώς οπτικός αναγεννητής 3R. Διπλωματική εργασία. Δημήτριος Β. Αποστολόπουλος. Αθήνα, Ιούλιος 2004
- [2.9] Αμιγώς Οπτικός 2×2 Διακόπτης Μεταγωγής με Χρήση Ισχυρά μη Γραμμικής Ίνας Οξειδίου του Βισμούθιου. Διπλωματική εργασία. Νικόλαος Ε. Μαρινάκης. Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006

# 3

## Αντιμεταθέτης Χρονοσχισμών TSI

### 3.1 Εισαγωγικά στοιχεία για τη μεταγωγή πακέτου

Στα σύγχρονα συστήματα που γίνονται πλέον διαθέσιμα, με εκατοντάδες μηκών κύματος ανά οπτική ίνα και ρυθμούς μετάδοσης 10-40 Gbps ανά μήκος κύματος οδηγούμαστε σε ένα μεγάλο χάσμα μεταξύ της ταχύτητας της ηλεκτρονικής μεταγωγής που χρησιμοποιείται κατά κόρον και της χωρητικότητας των οπτικών ινών που έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλό ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού η μεταγωγή σε καθαρά οπτικό επίπεδο έρχεται να αντικαταστήσει την ηλεκτρονική μεταγωγή και να μετάγει τα δεδομένα στην οπτική τους μορφή, ενώ η ταυτόχρονη ελάττωση της χρήσης οπτικο-ηλεκτρονικών στοιχείων θέτει ένα όριο στο κόστος των ηλεκτρονικών δρομολογητών. Η οπτική μεταγωγή έχει και άλλα εν δυνάμει προτερήματα, συμπεριλαμβανομένης της ανεξαρτησίας ρυθμού bit (bit-rate independence), διαφάνεια πρωτοκόλλων (protocol transparency) και κατανάλωση χαμηλής ενέργειας. Έτσι για τα μελλοντικά δίκτυα αναμένεται να είναι κρίσιμο να παρέχουν επιπρόσθετη λειτουργικότητα στον τομέα της μεταγωγής στο οπτικό φυσικό επίπεδο έτσι ώστε να εξασφαλιστούν οι υψηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με την γρήγορη προσπελασιμότητα.

Οι τυπικές τεχνικές μεταγωγής περιλαμβάνουν έναν από τους ακόλουθους τομείς: χρόνο, μήκος κύματος, και χώρο, ενώ οι αντίστοιχες τεχνικές πολυπλεξίας είναι η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiplexing-TDM), η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM) και η πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (Space Division Multiplexing-SDM. [3.1]

Επιπρόσθετα στα σύγχρονα δίκτυα χρησιμοποιούνται και υβριδικές αρχιτεκτονικές μεταγωγών που συνδυάζουν τις παραπάνω τεχνικές. Γενικά οι συμβατικές μέθοδοι



μεταγωγής πακέτου βασίζονται στη χρήση ενός μεταγωγέα διαίρεσης χώρου. Καθώς η ικανότητα μεταγωγής αυξάνεται συνεχώς οι αρχιτεκτονικές μεταγωγής γίνονται ογκώδεις και πολύπλοκες. Ένας μεταγωγέας διαίρεσης χρόνου θα έδινε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά η μεγάλη καθυστέρηση που εισάγει αποτελεί πρόβλημα. Ο συνδυασμός των μεταγωγέων διαίρεσης χώρου και χρόνου έχει ως αποτέλεσμα η τελική αρχιτεκτονική να είναι συμπαγής και χαμηλής καθυστέρησης. Η επιπλέον προσθήκη ενός μεταγωγέα διαίρεσης μήκους κύματος επιτρέπει την ανάπτυξη ενός φωτονικού συστήματος μεταγωγής που συναντάται σε πολλές εφαρμογές και πιο συγκεκριμένα στη χρήση IP (Internet Protocol) πρωτοκόλλου πάνω από δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος (WDM Networks). Γενικά τα τελευταία χρόνια η χρήση υβριδικών αρχιτεκτονικών δίνει πολλές φορές λύσεις σε προβλήματα που ανέκυπταν παλιότερα.

Βασισμένοι στις τρεις βασικές τεχνικές πολυπλεξίας κατηγοριοποιούμε τους μεταγωγείς σε τρεις βασικές ομάδες:

- Μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου
- Μεταγωγείς διαίρεσης χώρου
- Μεταγωγείς διαίρεσης μήκους κύματος

Οι μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου που μας απασχολούν περισσότερο στην διπλωματική αυτή χωρίζονται σε δυο περαιτέρω κατηγορίες:

- Μεταγωγείς διαμοιραζόμενης μνήμης
- Μεταγωγείς διαμοιραζόμενου μέσου

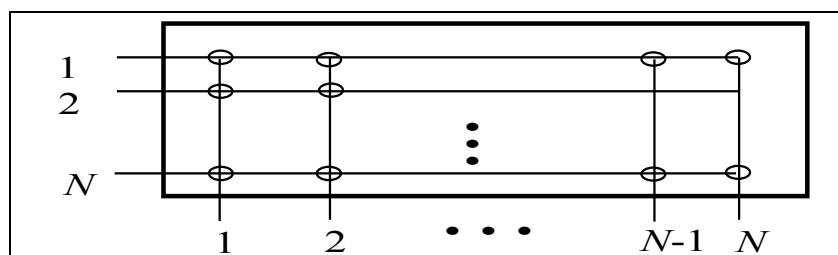
Στις υποπαραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται μια περιληπτική ανάλυση των παραπάνω τύπων μεταγωγέων, των συχνότερα εμφανιζόμενων προβλημάτων κατά τη μεταγωγή πακέτων καθώς και τις πολιτικές ενταμίευσης που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση αυτών .

### **3.1.1 Μεταγωγείς διαίρεσης χώρου**

Στους μεταγωγείς διαίρεσης χώρου παρέχονται πολλαπλά φυσικά κανάλια μεταξύ των θυρών εισόδου και εξόδου. Τα κανάλια αυτά λειτουργούν παράλληλα, επιτρέποντας έτσι την ταυτόχρονη μετάδοση πακέτων κατά μήκος του μεταγωγέα. Επομένως η συνολική χωρητικότητα του μεταγωγέα προκύπτει από το άθροισμα του εύρους ζώνης των επιμέρους φυσικών καναλιών και είναι θεωρητικά απεριόριστο. Πρακτικά όμως περιορίζεται από ζητήματα φυσικής υλοποίησης και συγχρονισμού.

Οι μεταγωγείς διαίρεσης χώρου κατηγοριοποιούνται περαιτέρω βάσει τον αριθμό των διαθέσιμων διαδρομών μεταξύ των θυρών εισόδου και εξόδου σε μεταγωγείς μοναδικής και πολλαπλών διαδρομών. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει μια μόνο διαδρομή μεταξύ οποιουδήποτε ζευγαριού θυρών εισόδου/εξόδου με αποτέλεσμα την απλούστερη δρομολόγηση, ενώ στη δεύτερη περίπτωση υπάρχουν περισσότερες της μίας και συνεπώς παρέχεται μεγαλύτερη ευελιξία. [3.3]

Στην Εικόνα 3.1 απεικονίζεται ένας μεταγωγέας διαίρεσης χώρου με  $N$  εισόδους και  $N$  εξόδους και ένα σύνολο από  $N \times N$  σημεία διασταύρωσης.



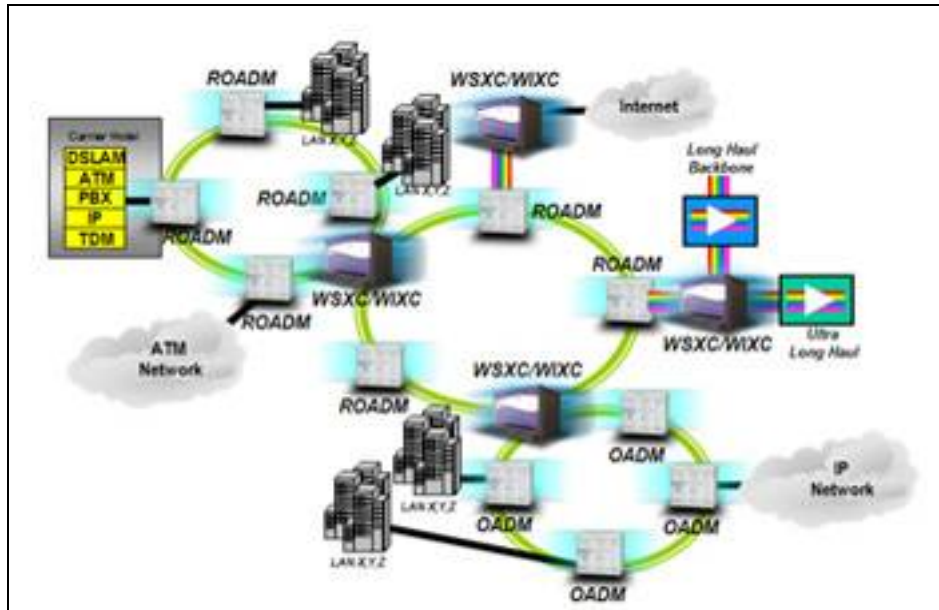
Εικόνα 3.1 Μεταγωγέας διαίρεσης χώρου

### 3.1.2 Μεταγωγείς διαίρεσης μήκους κύματος

Η μεταγωγή διαίρεσης μήκους κύματος (ή αλλιώς φωτονική μεταγωγή ή μεταγωγή  $\lambda$ ) είναι η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα οπτικά δίκτυα για να μετάγει μεμονωμένα μήκη κύματος φωτός σε ξεχωριστά μονοπάτια για συγκεκριμένη δρομολόγηση πληροφορίας. Σε συνεργία με τεχνολογίες όπως η πυκνή (dense) πολυπλεξία μήκους κύματος (DWDM), που επιτρέπει να μεταφερθούν 80 ή και παραπάνω διαφορετικά μήκη κύματος σε μια μόνο οπτική ίνα, η μεταγωγή διαίρεσης μήκους κύματος δίνει τη δυνατότητα σε ένα μονοπάτι να συμπεριφέρεται σαν ένα εικονικό κύκλωμα (virtual circuit).

Όσο όμως και αν η ικανότητα ευφυούς επαναδιευθέτησης (redirecting) συγκεκριμένων μήκων κύματος είναι μια σημαντική τεχνολογική εξέλιξη, οι μεταγωγείς διαίρεσης μήκους κύματος λειτουργούν περίπου με τον ίδιο τρόπο όπως οι κλασικοί δρομολογητές και μεταγωγείς. Ο δρομολογητής διαίρεσης μήκους κύματος δέχεται ως είσοδο ένα μόνο μήκος κύματος από μια συγκεκριμένη 'πλέξη' οπτικών ινών και το συγχωνεύει ξανά σε μια άλλη 'πλέξη' που βρίσκεται σε ένα διαφορετικό μονοπάτι. [3.4]

Η Εικόνα 3.2 δείχνει ένα δίκτυο βασισμένο στη τεχνολογία της μεταγωγής διαίρεσης μήκους κύματος.



Εικόνα 3.2 Δίκτυο μεταγωγής μήκους κύματος

### 3.1.3 Μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου

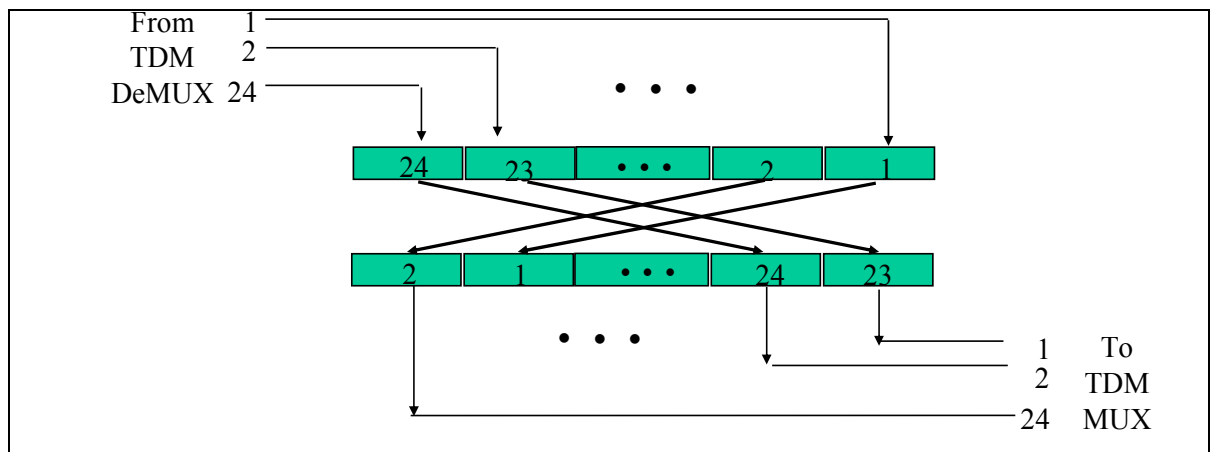
Στην υποπαράγραφο αυτή θα αναλύσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια απ' ό τι για τους άλλους μεταγωγείς, τους μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου, μέρος των οποίων αποτελεί και ο TSI που υλοποιήσαμε στο πειραματικό μέρος της εργασίας.

Στους μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου υπάρχει μια μοναδική εσωτερική δομή επικοινωνίας, η οποία διαμοιράζεται από όλα τα πακέτα που κατευθύνονται από τις θύρες εισόδου στις θύρες εξόδου του μεταγωγέα. Αυτή η εσωτερική δομή μπορεί να είναι διάυλος, βρόχος ή μνήμη. Το κύριο μειονέκτημα αυτή της μεθόδου είναι οι περιορισμοί εξαιτίας της χωρητικότητας της εσωτερικής δομής. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι αφού κάθε πακέτο διέρχεται από την εσωτερική δομή, οι μεταγωγείς αυτού του τύπου μπορούν εύκολα να υποστηρίξουν λειτουργίες καθολικής και πολλαπλής εκπομπής (multicast/broadcast).

Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται διαγραμματικά η διαδικασία μεταγωγής με χρονοσχισμές στον χρονικό τομέα. Θεωρούμε ένα χρονικής διαίρεσης πολυπλεγμένο σήμα που μεταφέρει 24 φωνητικά κανάλια, με ρυθμό μετάδοσης 8000 bytes/sec ανά κανάλι μεταφερόμενα byte ανά byte. Υποθέτουμε ότι η φωνή που ανατίθεται στη χρονοσχισμή 1 μιλάει στην φωνή που ανατίθεται στη χρονοσχισμή 23. Άρα υπάρχει η ανάγκη δρομολόγησης της χρονοσχισμής εισόδου 1 στη χρονοσχισμή εξόδου 23 και τούμπλαβιν, σε κάθε ένα frame από τις 24 χρονοσχισμές. Ομοίως θα συμβεί αν ένα άλλο ζεύγος ομιλητών ανατεθούν στις χρονοσχισμές 2 και 24.

Κάθε byte εισόδου γράφεται σε ένα πίνακα στη μνήμη κατά τη στιγμή της άφιξής του, ενώ η κλήση μια διαδικασίας εγκατάστασης εγκαθιστά ένα πίνακα αντιμετάθεσης (permutation table) που ελέγχει την σειρά με την οποία τα bytes διαβάζονται από τον πίνακα. Το εξερχόμενο frame αρχίζει με την ανάγνωση των περιεχομένων της χρονοσχισμής 23, έπειτα της χρονοσχισμής 24 και ούτω καθεξής μέχρι να διαβαστούν οι χρονοσχισμές 1 και 2. Αυτή η διαδικασία

Με αυτή τη διαδικασία λοιπόν κατορθώνεται η αντιμετάθεση των χρονοσχισμών και των περιεχομένων αυτών με όποια σειρά θέλουμε. Έτσι, η χρονοσχισμή 2 μετατέθηκε στην χρονοσχισμή 24 και η χρονοσχισμή 1 στην 23. Έτσι, μπορεί να συνδεθεί κάθε είσοδος σε κάθε διαθέσιμη έξοδο ενώ η αντιμετάθεση χρονοσχισμών για όλο το frame απαιτεί μια εγγραφή και μια ανάγνωση ανά χρονοσχισμή. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να εκτελεστεί παρομοίως, αν σε κάθε χρονοσχισμή αντιστοιχίζαμε πακέτα δεδομένων ή μεμονωμένα bit ή ακόμα και αν αντιμετωπίζαμε το πρόβλημα με δεδομένο στοιχείο που αντιμεταθέτουμε τις χρονοσχισμές αυτές, όπως συμβαίνει και στο πείραμά μας.



Εικόνα 3.3 Μεταγωγή διαίρεσης χρόνου

### 3.1.4 Μεταγωγείς διαμοιραζόμενου μέσου

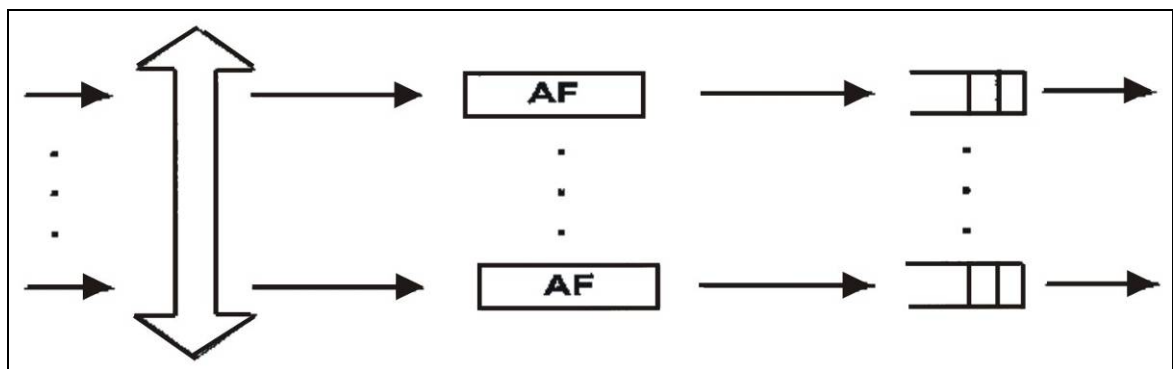
Στους μεταγωγείς διαμοιραζόμενου μέσου, τα εισερχόμενα πακέτα πολυπλέκονται χρονικά σε ένα κοινό μέσο υψηλής ταχύτητας, το οποίο είναι συνήθως ένας δίαυλος ή ένας δακτύλιος. Το εύρος ζώνης του κοινού μέσου είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το άθροισμα των ευρών ζώνης των εισερχόμενων ζεύξεων, ενώ ο ρυθμός διέλευσης πακέτου του μέσου καθορίζει και τη συνολική χωρητικότητα του μεταγωγέα. Κάθε γραμμή εξόδου συνδέεται στο

κοινό μέσο με τη βοήθεια μιας διεπαφής που περιέχει ένα φίλτρο διεύθυνσης και έναν ενταμιευτή FIFO (Εικόνα 3.4). Το φίλτρο διεύθυνσης εξετάζει την επικεφαλίδα των εισερχόμενων πακέτων και αποδέχεται μόνο αυτά που κατευθύνονται προς την αντίστοιχη θύρα εξόδου.

Από τη μεριά του τομέα του χρόνου, κάθε frame διαιρείται σε  $N$  χρονοσχισμές, όπου  $N$  είναι ο αριθμός των εισερχόμενων ζεύξεων. Στη διάρκεια μιας χρονοσχισμής ένα πακέτο εκπέμπεται προς όλες τις θύρες εξόδου και τελικά καταλήγει στον ενταμιευτή μιας εξ αυτών, αφού έχει απορροφηθεί από τα φίλτρα διεύθυνσης στις υπόλοιπες  $N-1$  εξόδους. Αυτή η λογική για την περίπτωση της μοναδικής εκπομπής μπορεί εύκολα να επεκταθεί, ώστε ο μεταγωγέας να υποστηρίζει πολλαπλή μεταγωγή.

Αυτή η αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική παρέχει το πλεονέκτημα της αυτόνομης λειτουργίας και σχεδιασμού για κάθε μια από τις θύρες εξόδου. Παρόλα αυτά απαιτείται μεγάλος αριθμός ενταμιευτών και αξιοσημείωτη πολυπλοκότητα του υλικού για την κατασκευή της διεπαφής για κάθε θύρα εξόδου. Επιπλέον δεν γίνεται σωστή εκμετάλλευση του υλικού, αφού ενώ σε μια έξοδο μπορεί να υπάρχει συμφόρηση και να απορρίπτονται επερχόμενα πακέτα, σε μια άλλη μπορεί ο ενταμιευτής να παραμένει άδειος σε κάποιες χρονοσχισμές.

Αυτή η αρχιτεκτονική αν και λειτουργεί στον τομέα του χρόνου, δεν χρησιμοποιεί αντιμετάθεση χρονοσχισμών, αλλά απλή μεταγωγή αυτών προς όλες τις εξόδους και τελική εγκατάλειψη του μεταγωγέα από την κάθε έξοδο μόνο των πακέτων που φέρουν την αντίστοιχη επικεφαλίδα.

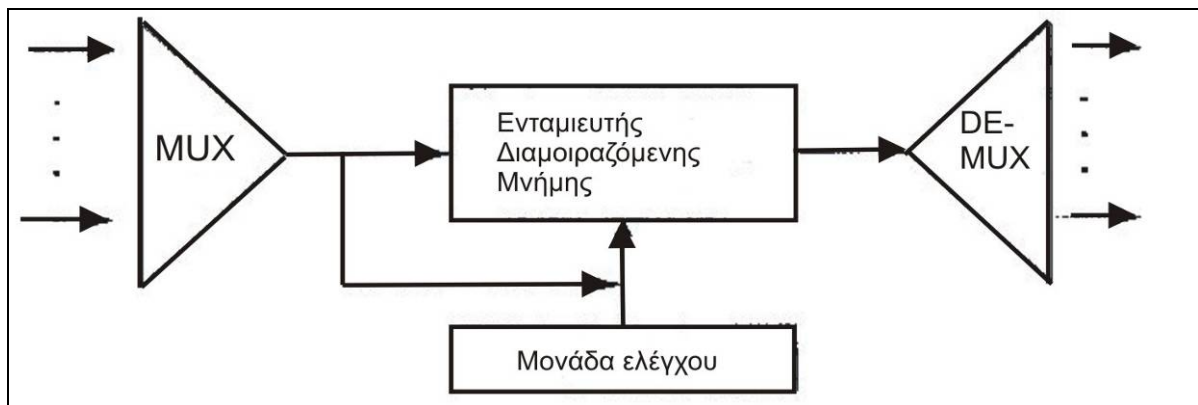


Εικόνα 3.4 Μεταγωγέας διαμοιραζόμενου μέσου

### 3.1.3.1 Μεταγωγείς διαμοιραζόμενου μνήμης

Σε ένα μεταγωγέα διαμοιραζόμενης μνήμης τα εισερχόμενα πακέτα πολυπλέκονται χρονικά σε ένα ρεύμα δεδομένων εισόδου και γράφονται σειριακά στην κοινή μνήμη (Εικόνα 3.5). Η δρομολόγηση επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας ένα ρεύμα δεδομένων εξόδου, το οποίο αποπολυπλέκεται στις ζεύξεις εξόδου. Η μονάδα ελέγχου παρέχει τις διευθύνσεις μνήμης για την εγγραφή/ανάγνωση των πακέτων με βάση τις πληροφορίες δρομολόγησης στις επικεφαλίδες τους.

Το κύριο πλεονέκτημα των μεταγωγών διαμοιραζόμενης μνήμης έναντι των μεταγωγών διαμοιραζόμενου μέσου είναι η βέλτιστη χρησιμοποίηση της μνήμης, αφού όλες οι θύρες εισόδου/εξόδου μοιράζονται την ίδια μνήμη. Στενωπός της επίδοσης αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η ταχύτητα με την οποία προσπελαίνουν την μνήμη τα εισερχόμενα και τα εξερχόμενα πακέτα. [3.3]



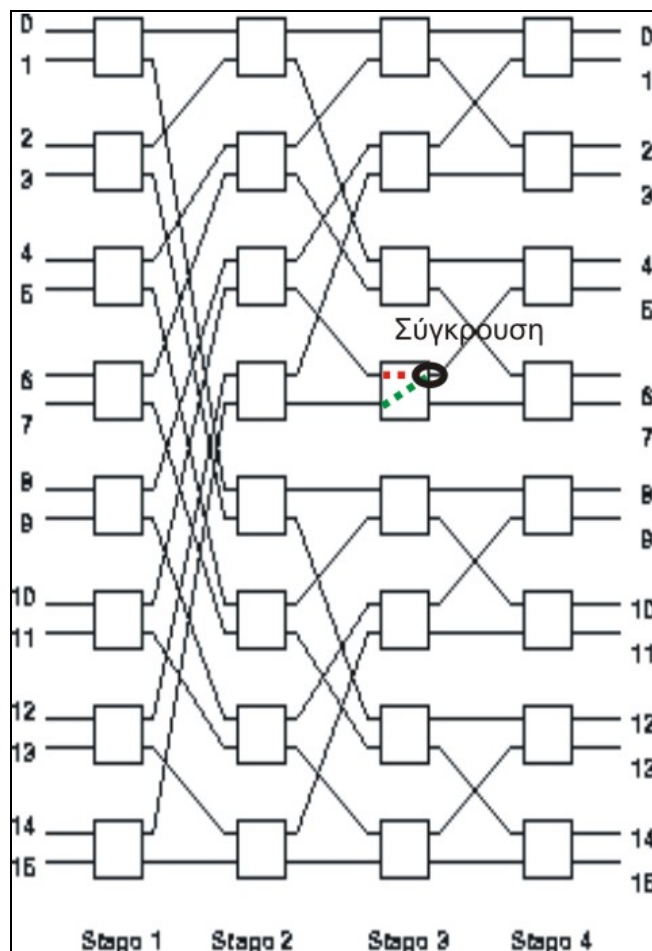
Εικόνα 3.5 Μεταγωγέας διαμοιραζόμενης μνήμης

### 3.1.4 Βασικότερα προβλήματα μεταγωγής και πολιτικές ενταμίευσης

Τα πιο συχνά προβλήματα που εμφανίζονται κατά τη δρομολόγηση πακέτων στη μονάδα μεταγωγής αναλύονται στις παρακάτω παραγράφους .

### 3.1.4.1 Φραγή εσωτερικού διαύλου (Internal link blocking)

Είναι πιθανό κατά τη δρομολόγηση πακέτων στη μονάδα μεταγωγής δυο ή περισσότερα πακέτα να απαιτήσουν πρόσβαση στον ίδιο πόρο. Αυτό ακριβώς συμβαίνει και στη φραγή εσωτερικού διαύλου, όπου πολλαπλά πακέτα ανταγωνίζονται ταυτόχρονα για τον ίδιο εσωτερικό δίαυλο μεταγωγέα όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 3.6 πρόβλημα συνήθως παρουσιάζεται συνήθως στις μονάδες βασισμένες σε μεταγωγή διαίρεσης χώρου, όπου ένας δίαυλος διαμοιράζεται σε πολλαπλές συνδέσεις μεταξύ των θυρών εισόδου και εξόδου. Ένας μεταγωγέας που πάσχει από φραγή εσωτερικού διαύλου καλείται μεταγωγέας φραγής (blocking switch). Σε αντίθετη περίπτωση, ο μεταγωγέας καλείται μεταγωγέας μη-φραγής (non-blocking switch). Η φραγή εσωτερικού διαύλου σε αυτού του τύπου μεταγωγείς αποφεύγεται με την τοποθέτηση ενταμιευτών στα πιθανά σημεία σύγκρουσης. Με αυτό τον τρόπο όμως αυξάνεται η καθυστέρηση μετάδοσης του πακέτου εσωτερικά της μονάδας μεταγωγής και ελαττώνεται ο ρυθμός διέλευσης πακέτου (throughput) του μεταγωγέα.

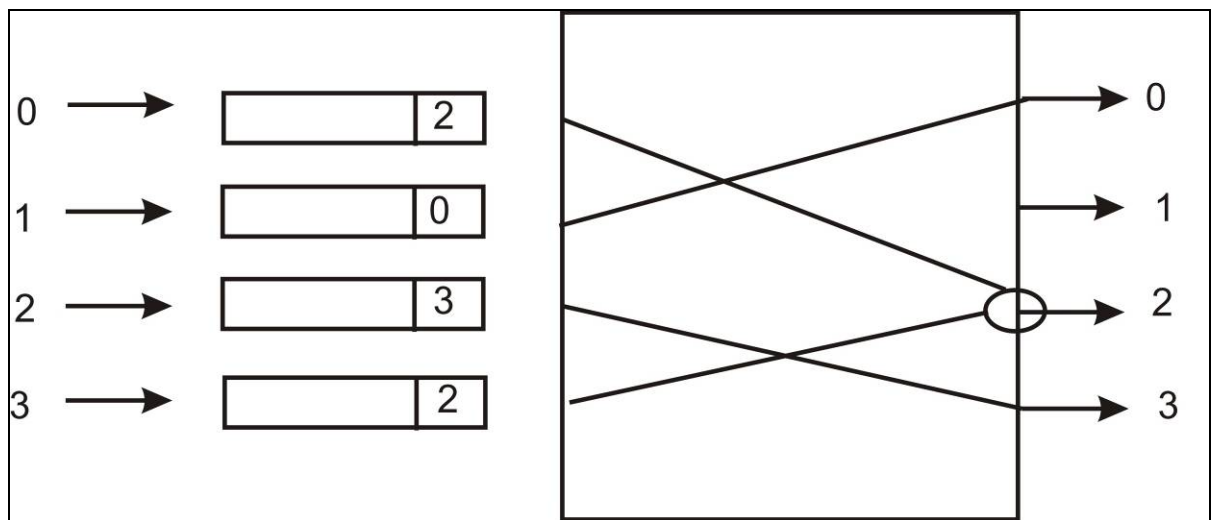


Εικόνα 3.6 Φραγή εσωτερικού διαύλου (Internal link blocking)

### 3.1.4.2 Ανταγωνισμός θύρας εξόδου (Output port contention)

Ο ανταγωνισμός θύρας εξόδου παρουσιάζεται όταν δυο ή περισσότερα πακέτα προερχόμενα από διαφορετικές θύρες εισόδου, κατευθύνονται στη θύρα εξόδου την ίδια χρονική θυρίδα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7. Η θύρα εξόδου μπορεί να μεταδώσει το πολύ ένα πακέτο ανά χρονική θυρίδα, και ως εκ τούτου τα υπόλοιπα πακέτα απορρίπτονται ή αποθηκεύονται σε ενταμιευτές.

Η δεύτερη περίπτωση λαμβάνει χώρα στους μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εξόδου με την τοποθέτηση ενταμιευτών στις θύρες εξόδου.



Εικόνα 3.7 Ανταγωνισμός θύρας εξόδου

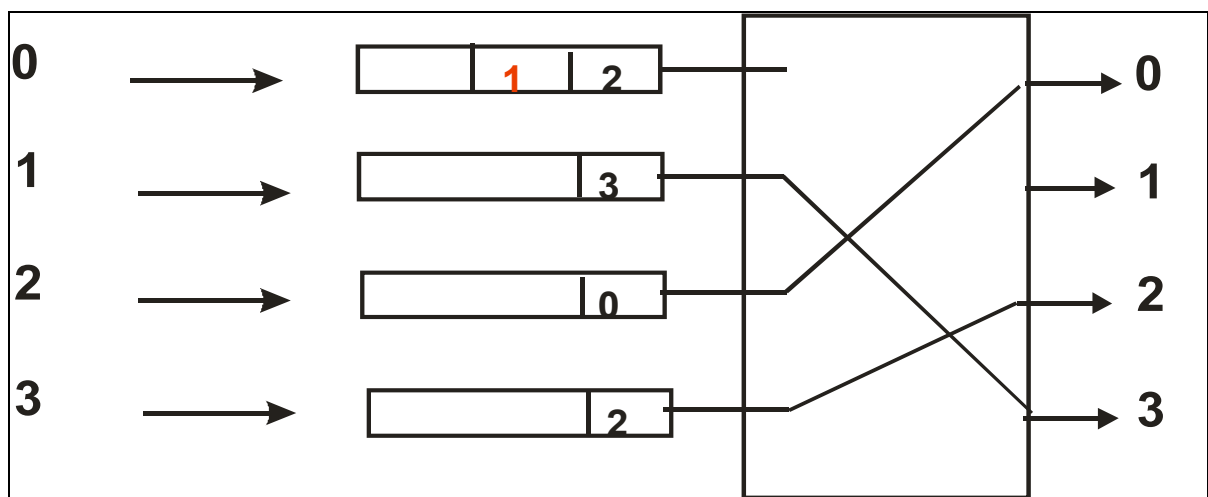
### 3.1.4.3 Φραγή στη θύρα εισόδου (Head-of Line blocking)

Ένας άλλος τρόπος επίλυσης του ανταγωνισμού θύρας εξόδου είναι η τοποθέτηση ενταμιευτών στις μονάδες εισόδου και η μετάδοση ενός μόνο πακέτου κάθε φορά. Οι μεταγωγείς αυτού του τύπου καλούνται μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου. Ένας μηχανισμός δεικτησίας καθορίζει τα πακέτα που επιλέγονται να μεταδοθούν προς στις θύρες εξόδου. Η απόφαση λαμβάνεται βάσει ενός πεδίου προτεραιότητας στην επικεφαλίδα του πακέτου ή μπορεί να είναι τυχαία. Πολλοί μηχανισμοί δεικτησίας έχουν προταθεί μέχρι στιγμής, οι σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι η κράτηση δακτυλίου (ring reservation), η



διατησία ταξινόμησης (sort-and-arbitrate) και η διατησία δρομολόγησης (route-and-arbitrate).

Ένα τυπικό πρόβλημα στους μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου με ενταμιευτές FIFO (First In / First Out), είναι η φραγή στη θύρα εισόδου εξαιτίας του πακέτου επικεφαλής της ουράς (Head-of-Line, HOL Blocking). Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν εμποδίζεται η μετάδοση κάποιου πακέτου προς μια ελεύθερη θύρα εξόδου εξαιτίας του πακέτου που βρίσκεται μπροστά από αυτό στην ουρά και το οποίο δεν μπορεί να μεταδοθεί λόγω ανταγωνισμού θύρας εξόδου. Στην Εικόνα 3.8 απεικονίζεται μια τέτοια περίπτωση: Συγκεκριμένα το δεύτερο πακέτο στην ουρά της θύρας εισόδου 0 (που σημειώνεται με κόκκινο χρώμα) δεν μπορεί να μεταδοθεί στην ελεύθερη θύρα εξόδου 1, επειδή πρέπει να μεταδοθεί πρώτα το πακέτο μπροστά από αυτό στη θύρα εξόδου 2. Έτσι, ο ανταγωνισμός στη θύρα εξόδου 2, προκαλεί και τη φραγή του πακέτου προς την ελεύθερη θύρα εξόδου 1.



Εικόνα 3.8 Φραγή στη θύρα εισόδου

Η φραγή στη θύρα εισόδου εξαιτίας του πακέτου επικεφαλής αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες περιορισμού του ρυθμού διέλευσης πακέτου στους μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου. Έχει αποδειχθεί μάλιστα ότι εξαιτίας αυτού του φαινομένου ένας τυπικός μεταγωγέας ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου μπορεί να έχει μέγιστο ρυθμό διέλευσης πακέτου μόλις 58.6%. [3.3]

#### **3.1.4.4 Πολιτικές ενταμίευσης**

Με σκοπό να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα που εμφανίζονται στους μεταγωγείς και αποτελούν τροχοπέδη στη δρομολόγηση των πακέτων και στην επίτευξη του μέγιστου δυνατού ρυθμού διέλευσης παρουσιάζονται ονομαστικά κάποιες πολιτικές ενταμίευσης μερικές από τις οποίες αναφέρθηκαν και πιο πάνω:

- Μεταγωγείς εσωτερικής ενταμίευσης
- Μεταγωγείς ενταμίευσης επανακυκλοφορίας
- Μεταγωγείς ενταμίευσης διασταυρωμένου σημείου
- Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου
- Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εξόδου
- Μεταγωγείς διαμοιραζόμενου ενταμιευτή
- Μεταγωγείς διαμοιραζόμενου ενταμιευτή πολλαπλών επιπέδων
- Μεταγωγείς ενταμίευσης στις μονάδες εισόδου και εξόδου
- Μεταγωγείς εικονικής ουράς αναμονής εξόδου [3.3]

### **3.2 Αντιμεταθέτης χρονοσχισμών (Time Slot Interchanger)**

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέραμε τους διάφορους τύπους μεταγωγέων και τονίσαμε την κατηγορία των μεταγωγέων διαίρεσης χρόνου. Η σημασία αυτών είναι εμφανής σε δίκτυα που περιέχουν στοιχεία πολύπλεξης χρονικής διαίρεσης (TDM), όπου η χρονοσχισμή καθενός bit καθορίζει την θύρα εξόδου του σε κάθε κόμβο μεταγωγής. Κύριοι τύποι μεταγωγέων που χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε τέτοια δίκτυα ( και που αφορούν και την εργασία μας) είναι οι Οπτικοί Αντιμεταθέτες Χρονοσχισμών (Optical Time Slot Interchangers OTSI). Η αντιμετάθεση χρονοσχισμών επιτυγχάνεται μετακινώντας ένα bit ( ή μια σειρά από bits) από μια χρονοσχισμή σε μια άλλη, οπότε αλλάζοντας τον προορισμό του. Αυτό μπορεί εύκολα να επιτευχθεί στον ηλεκτρονικό τομέα με καταχωρητές μετακίνησης (shift registers). Όμως η υλοποίηση του TSI στο οπτικό τομέα είναι πολύ επιθυμητή για την αποφυγή των οπτικοηλεκτρονικών μετατροπών, όπως επίσης την δυναμικά περιορισμένη ταχύτητα μεταγωγής των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. [3.5]

Τρεις παράγοντες κλειδιά που επηρεάζουν το κόστος και την επίδοση ενός OTSI είναι:

- το πλήθος των χρονοσχισμών που μπορεί να αντιμετωπίσει
- η ποσότητα οπτικής ίνας που χρειάζεται για τις γραμμές καθυστέρησης που χρησιμοποιούνται για την αναδιάταξη των χρονοσχισμών
- το πλήθος των σταδίων μεταγωγής που οι ροές δεδομένων μπορεί να υποστούν καθώς διέρχονται από το OTSI [3.2]

### **3.2.1 Προτεινόμενες υλοποιήσεις TSI**

Για την υλοποίηση των TSI έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές οι οποίες περιγράφονται παρακάτω:

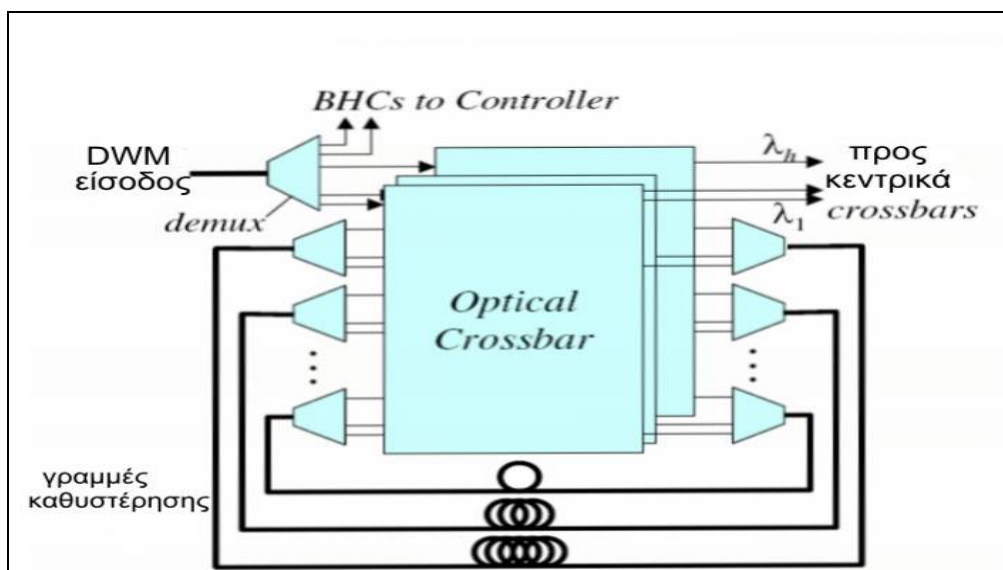
- ***Υλοποίηση OTSI με βρόχο ανατροφοδότησης και σε συνδιασμό με μεταγωγή στο πεδίο του χώρου.***

Η μεταγωγή των δεδομένων διαμέσου ενός δικτύου TSOBS (Time Sliced Optical Burst Switching)[3.2] πραγματοποιείται εξολοκλήρου στον οπτικό τομέα. Οπτικοί μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου διαμορφώνονται δυναμικά για να μετάγουν τα δεδομένα από τις εισερχόμενες χρονοσχισμές σε χρονοσχισμές στις κατάλληλες ζεύξεις εξόδου. Αυτό συμβαίνει χρησιμοποιώντας προσεκτικά συγχρονισμένες διαδικασίες μεταγωγής για να μεταφέρουμε τα bits των δεδομένων του χρήστη από τις εισερχόμενες ζεύξεις προς τις εξερχόμενες ζεύξεις. Η μεταγωγή μιας χρονοσχισμής μπορεί να συμπεριλαμβάνει καθυστέρηση των δεδομένων, για να μεταφερθεί από μια θέση χρονοσχισμής στην άλλη. Τα σήματα εισόδου που οργανώνονται σε frames που μεταφέρονται σε διαφορετικά μήκη κύματος συγχρονίζονται το ένα με το άλλο, επιτρέποντας ο συγχρονισμός των διαδικασιών μεταγωγής στα μήκη κύματος των δεδομένων να καθορίζεται από τον συγχρονισμό των frame στα μήκη κύματος ελέγχου. Τα Κανάλια Επικεφαλίδων εκρηκτικής ροής (Burst Header Cells –BHC), τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικά μήκη κύματος, «ανακοινώνουν» την επικείμενη άφιξη μιας ροής δεδομένων και μεταφέρουν όλη την απαραίτητη πληροφορία για τη διεύθυνση, το μήκος κύματος και το κανάλι στο οποίο φτάνει η ροή.

Οπτικοί μεταγωγείς σε συμπαγή μορφή μπορούν να εκτελέσουν διαδικασίες μεταγωγής με μια ακρίβεια των 10 ns ή λιγότερο. Για να επιτρέπονται οι αβεβαιότητες συγχρονισμού οι χρονοσχισμές πρέπει να διαχωρίζονται από ένα χρονικό διάστημα (guard time) τουλάχιστον 10 ns και πιθανόν μέχρι 100 ns. Για να επιτύχουμε ικανοποιητική ικανότητα μετάδοσης δεδομένων, η διάρκεια των χρονοσχισμών πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές ίση με το διαχωριστικό χρονικό διάστημα, ή 100ns μέχρι 1μs.

Η Εικόνα 3.9 δείχνει μια σχεδίαση για έναν τέτοιο οπτικό TSI. Όπως φαίνεται και από την εικόνα ο OTSI περιλαμβάνει ένα σύνολο από μήτρες διασταυρώσεων (crossbar matrix) για την μεταγωγή των χρονοσχισμών μεταξύ των εισόδων και των εξόδων και ένα σύνολο γραμμών καθυστέρησης που ανατροφοδοτούν τη μήτρα των crossbars με τα σήματα στα διάφορα μήκη κύματος αφού τους προσδώσουν την ανάλογη καθυστέρηση. Τα σήματα αποπολυπλέκονται για την διαδικασία της μεταγωγής διαίρεση χώρου και επαναπολυπλέκονται πριν από την είσοδο στις γραμμές καθυστέρησης, επιτρέποντας έτσι την επιβολή χρονικής καθυστέρησης στα πακέτα. Ο αριθμός των γραμμών καθυστέρησης και οι τιμές των καθυστερήσεών τους είναι σχεδιαστικοί παράμετροι-κλειδιά, που επηρεάζουν σημαντικά και στο κόστος και στην απόδοση του OTSI.

Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τους TSI σε non-blocking και σε blocking. Ενώ η non-blocking σχεδίαση παρέχει την βέλτιστη απόδοση, είναι σημαντικά πιο ακριβή από την αντίστοιχη blocking. Παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο αυτές αρχιτεκτονικές του OTSI.



Εικόνα 3.9 Οπτικός Αντιμεταθέτης Χρονοσχισμών (TSI)

ο Non-blocking TSI

Η απλούστερη στη σύλληψη non-blocking σχεδίαση είναι αυτή που έχει N γραμμές καθυστέρησης, όπου κάθε μια από αυτές έχει τιμή καθυστέρησης ίση με τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής. Σε αυτή τη σχεδίαση, κάθε εισερχόμενη χρονοσχισμή  $i$  μπορεί να καθυστερηθεί κατά  $d$  μεσολαβούσες χρονοσχισμές με το να ανακυκλωθεί  $d$  φορές στην  $i$  γραμμή καθυστέρησης. Από τη στιγμή που μια χρονοσχισμή ανατίθεται σε μια ξεχωριστή

γραμμή καθυστέρησης, δεν υπάρχουν συγκρούσεις, αφού η σχεδίαση είναι non-blocking. Επίσης χρησιμοποιεί το μικρότερο δυνατό συνολικό μήκος γραμμών καθυστέρησης ( $N$ ). Δυστυχώς χρειάζεται ένα μεγάλο πλήθος από ξεχωριστές γραμμές καθυστέρησης ( $N$ ) και ογκώδης μεταγωγείς διασταυρώσεων (crossbars switches)  $((N + 1) \times (N + 1))$ . Τα οπτικά crossbars αποτελούν ένα σχεδιαστικό πρόβλημα, αφού το κόστος τους μεγαλώνει ανάλογα με τον αριθμό των εισόδων και των εξόδων. Τελικά, η σχεδίαση αυτή μπορεί να υποβάλλει ένα σήμα σε μέχρι  $N$  διαδικασίες οπτικής μεταγωγής, προκαλώντας υπερβολική υποβάθμιση στην ποιότητα του οπτικού σήματος, όταν το  $N$  είναι μεγάλο. Αυτό το ελάττωμα μπορεί να διορθωθεί αντικαθιστώντας τις γραμμές καθυστέρησης μήκους 1, με γραμμές καθυστέρησης μήκους  $1, 2, \dots, N$ . Αυτό επιτρέπει σε κάθε χρονοσχισμή να μετάγεται διαμέσου μιας μόνο γραμμής καθυστέρησης, μειώνοντας τον αριθμό των διαδικασιών μεταγωγής σε 2. Φυσικά, αυτό συνοδεύεται με αύξηση του συνολικού μήκους γραμμών καθυστέρησης από  $N$  σε  $N^2/2$ .

Ένας πιο πρακτικός non-blocking μεταγωγέας χρησιμοποιεί γραμμές καθυστέρησης μήκους  $1, 2, 3, \dots, (A-1)$ , όπου το  $A$  είναι ακέραιος, καθώς επίσης και επιπρόσθετες γραμμές καθυστέρησης μήκους  $A, 2A, 3A, \dots, (B-1)A$  χρονοσχισμών, όπου το  $B$  είναι ένας δεύτερος ακέραιος. Ονομάζουμε τις δύο αυτές ομάδες γραμμών καθυστέρησης κοντές γραμμές καθυστέρησης και μακριές γραμμές καθυστέρησης αντίστοιχα. Ας υποθέσουμε ότι μια χρονοσχισμή πρέπει να υποστεί μια καθυστέρηση  $T$  χρονοσχισμών. Το  $T$  μπορεί να εκφραστεί ως ένα άθροισμα,  $k_2 A + k_1$ , όπου  $k_1 \in [0, A)$  και  $k_2 \in [0, B)$ . Για να καθυστερήσουμε την χρονοσχισμή κατά  $T$ , περνάμε τα δεδομένα από την μακριά γραμμή καθυστέρησης μήκους  $k_2 A$  και έπειτα την περνάμε από την κοντή γραμμή καθυστέρησης μήκους  $k_1$ . Με αυτή τη διάταξη το μέγιστο που μπορούμε να καθυστερήσουμε ένα σήμα είναι  $(B-1)A + (A-1)$  και αφού η μέγιστη χρειαζόμενη καθυστέρηση είναι  $N-1$ , εξάγουμε τη σχέση  $AB \geq N$ . Ο αριθμός των γραμμών καθυστέρησης σε αυτή τη σχεδίαση είναι  $A+B-2$ , και αν επιλέξουμε  $A = B = \lceil \sqrt{N} \rceil$  παίρνουμε τον ελάχιστο αριθμό γραμμών καθυστέρησης.

Έπειτα αποδεικνύουμε ότι αυτή η σχεδίαση είναι non-blocking. Θεωρούμε οποιεσδήποτε 2 εισερχόμενες χρονοσχισμές  $i$  και  $j$  που πρόκειται να καθυστερηθούν κατά  $d_i$  και  $d_j$ , όπου  $i + d_i = j + d_j$ . Υποθέτουμε ότι  $\lfloor d_i / A \rfloor = \lfloor d_j / A \rfloor$ . Έπειτα και οι δυο χρονοσχισμές θα διέλθουν από τη μακριά γραμμή καθυστέρησης αλλά από αφού εισέρχονται σε διαφορετικές στιγμές θα εξέλθουν από την γραμμή καθυστέρησης σε διαφορετικές στιγμές. Ως εκ τούτου δεν μπορούν να συγκρουστούν μεταξύ τους όταν εισέρχονται στην βραχεία γραμμή καθυστέρησης. Αφού  $i + d_i = j + d_j$ , πρέπει να βγουν από την βραχεία γραμμή καθυστέρησης σε διαφορετικές στιγμές, εξασφαλίζοντας μη σύγκρουση στην έξοδο. Τώρα

θα υποθέσουμε ότι  $[d_i / A] \neq [d_j / A]$ . Σε αυτή την περίπτωση οι χρονοσχισμές μπορεί να εξέλθουν από την αντίστοιχη μακριά γραμμή καθυστέρησης την ίδια στιγμή, δημιουργώντας μια δυναμική σύγκρουση αν πρέπει να μεταχθούν στην ίδια βραχεία γραμμή καθυστέρησης. Παρόλα αυτά μια τέτοια σύγκρουση μπορεί να συμβεί μόνο αν  $i + d_i = j + d_j$ , αντικρούοντας την κατάσταση στις γενικές καθυστερήσεις. Έτσι, η σχεδίαση είναι non-blocking αν υποθέσουμε ότι οι χρονοσχισμές μεταγονται πάντα πρώτα από μια μακριά γραμμή καθυστέρησης, και έπειτα από μια κοντή γραμμή καθυστέρησης.

Το μέγεθος του απαιτούμενου μεταγωγέα crossbar για αυτή τη σχεδίαση είναι  $(2\lceil\sqrt{N}\rceil - 1) \times (2\lceil\sqrt{N}\rceil - 1)$ , (31x31 για N=256) και το μήκος της οπτικής ίνας που απαιτείται είναι  $N\lceil\sqrt{N}\rceil/2$ , (2,048 όταν N=256). Παρατηρούμε ότι μειώθηκε το μέγεθος του crossbar εις βάρος του αυξημένου μήκους οπτικής ίνας, σχετικά με την πρώτη σχεδίαση. Αυτή η σχεδίαση επίσης περιορίζει τον αριθμό των σταδίων μεταγωγής που υπόκειται μια χρονοσχισμή, σε τρία. Αυτό σημαίνει ότι η μεταγωγή του σήματος το πολύ τρεις φορές γίνεται πλέον εφικτή χωρίς το σήμα να υποστεί σημαντική υποβάθμιση

- Blocking TSI

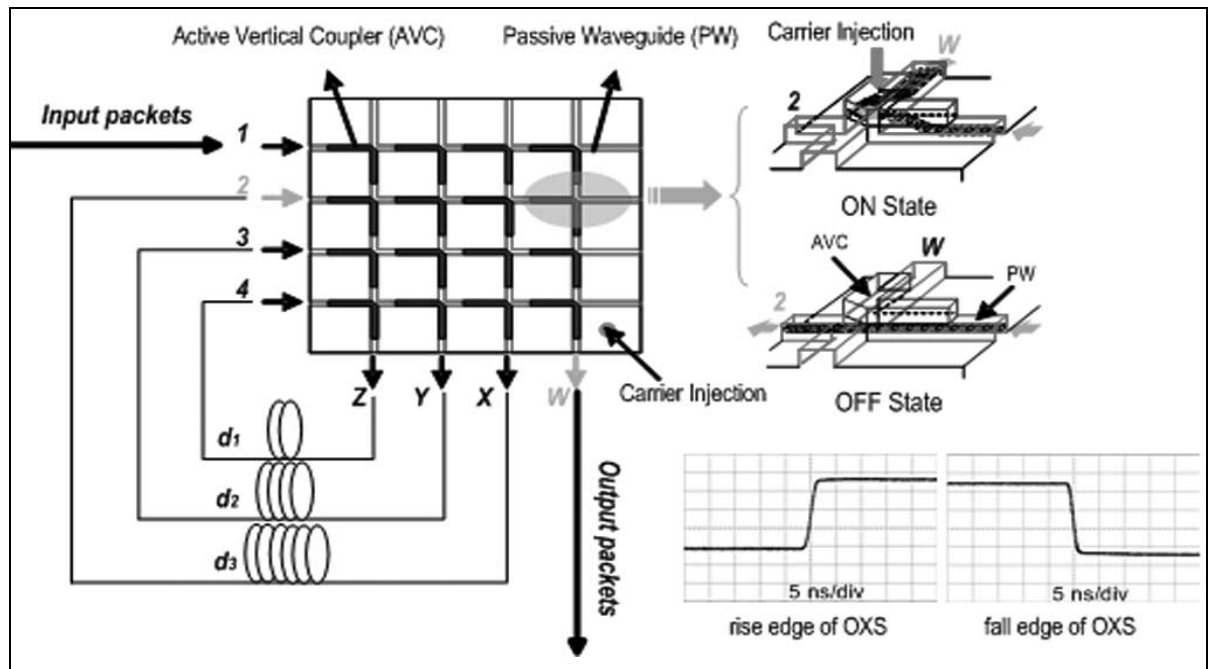
Τα Blocking OTSIs είναι εναλλακτικές των non-blocking OTSIs, που προσφέρουν μικρότερη πολυπλοκότητα, με κόστος την ύπαρξη πιθανότητας φραγής (blocking). Ίσως η πιο φυσική επιλογή των καθυστερήσεων για ένα blocking TSI είναι το σύνολο  $\{1, 2, 4, \dots, N/2\}$ . Αυτό επιτρέπει σε κάθε χρονοσχισμή να μεταβεί σε κάθε χρονοσχισμή εξόδου και παρέχει μικρή συνολική καθυστέρηση (255 για N=256) και μικρό μέγεθος crossbar (8x8 για N=256). Μπορεί να αποδειχθεί ότι ένα TSI με αυτές τις καθυστερήσεις μπορεί να λειτουργήσει έτσι ώστε να πετύχει ένα κατά μέσο όρο μικρό αριθμό από διαδικασίες αντιμετάθεσης (3 στις περισσότερες περιπτώσεις) και ότι το αντίκτυπο του blocking στην απόδοση της στατιστικής πολυπλεξίας είναι πολύ μικρό. [3.2]

Μια εναλλακτική αρχιτεκτονική TSI με βρόχο ανατροφοδότησης σε συνδιασμό με μεταγωγή στο πεδίο του χώρου, που προσφέρει μεγάλο φάσμα μεταβλητών καθυστερήσεων είναι η ακόλουθη.

Η λειτουργία μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής TSI είναι ίδια με αυτή ενός καταχωρητή μετακίνησης (shift register) που θα μπορούσε να εκτελεστεί στον ηλεκτρονικό τομέα. Όμως εξαιτίας των μειονεκτημάτων των ηλεκτρο-οπτικών (E/O) και οπτικο-ηλεκτρικών (O/E)

μετατροπών, όπως η περιορισμένη ταχύτητα μεταγωγής και το μεγάλο κόστος του εξοπλισμού επεξεργασίας, η υλοποίηση του TSI στον οπτικό τομέα μπορεί να είναι περισσότερο επιθυμητή. Παρόλο που ένας καθολικά οπτικός TSI θα μπορούσε να υλοποιηθεί με γραμμές καθυστέρησης σταθερού μήκους και με ημιαγωγίμους οπτικούς ενισχυτές (SOAs) ή κατευθυντικούς συζεύκτες λιθίου-νιόβατε, εξακολουθούν να υπάρχουν εγγενή προβλήματα σε αυτά τα σχέδια, όπως ενισχυμένος θόρυβος αυτογενών εκλύσεων (ASE noise), συνεκτική παρεμβολή διασταυρώσεων, ικανότητα κλιμάκωσης και περιορισμένη ικανότητα διαμόρφωσης του δικτύου.

Για την δημιουργία ενταμιευτή με μεγάλο φάσμα μεταβλητών καθυστερήσεων και με μεγάλο εύρος ζώνης και μικρό μέγεθος συσκευής χρησιμοποιείται ο OXS (optical crosspoint switch), με την χρήση του οποίου ελαχιστοποιείται το πλήθος των πηγών του δικτύου που απασχολούνται (σε σύγκριση με άλλα σχήματα). Ο OXS όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10 αποτελείται από δύο στρώματα οδηγητών μήκους κύματος (waveguide layers) σχηματισμένα σε ένα υποστρώμα InP. Δύο ενεργοί κάθετοι συζεύκτες (active vertical coupler - AVC) σχηματίζονται σε κάθε σημείο διασταύρωσης του μεταγωγέα έχοντας ένα ενεργό οδηγητή μήκους κύματος τοποθετημένο πάνω στους παθητικούς οδηγούς κύματος εισόδου και εξόδου. Ο μηχανισμός μεταγωγής του OXS βασίζεται σε ένα διαθλαστικό δείκτη που προκαλείται από ένα φέρον σήμα και σε αλλαγές του κέρδους στο ενεργό στρώμα του AVC. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, στο στάδιο ON ο ισχύον διαθλαστικός δείκτης του πάνω ενεργού στρώματος μειώνεται από την παρουσία εισαγόμενων φερόντων σημάτων ισότιμα με αυτόν του κάτω οδηγητή, και έτσι επιτρέποντας την σύζευξη. Όταν μια κατάσταση σύζευξης επιτυγχάνεται σε αυτή τη συσκευή, η οπτική ισχύς συσχετίζεται πλήρως μέσω των AVCs και μετάγεται στην μια έξοδο. Εξαιτίας της δομής του ενεργού στρώματος AVC που μοιάζει με αυτή του SOA, το σήμα ενισχύεται σε αυτή τη διαδικασία, εμφανίζοντας κάποιο οπτικό κέρδος στο chip. Η έλλειψη εισαγόμενων φερόντων θα αφήσει τον μεταγωγέα σε κατάσταση OFF με το σήμα να κατευθύνεται από τον παθητικό οδηγητή στον επόμενο μεταγωγέα. Αυτή η εικόνα επίσης δείχνει τον σχεδιασμό του συστήματος αντιμεταθέτη χρονοσχισμών που χρησιμοποιεί τον προτεινόμενο οπτικό ενταμιευτή που βασίζεται σε ανακυκλούμενη (multiloop) διάταξη και στον πίνακα OXC. Οι θύρες εισόδου του OXC δείχνονται με τους αριθμούς 1-4 και οι θύρες εξόδου με τα γράμματα W-Z. Τρεις γραμμές καθυστέρησης, των οποίων οι καθυστερήσεις είναι  $d_1, d_2$  και  $d_3$ , αντίστοιχα, συνδέονται μεταξύ των θυρών εισόδου και εξόδου του OXS ως οπτικά loops. Στις εφαρμογές η ελάχιστη τιμή του  $d_1$  πρέπει να είναι ίση ή ελάχιστα μεγαλύτερη από το μήκος του πακέτου ή της χρονοσχιμής. [3.8]



Εικόνα 3.10 Σχήμα του προτεινόμενου συστήματος

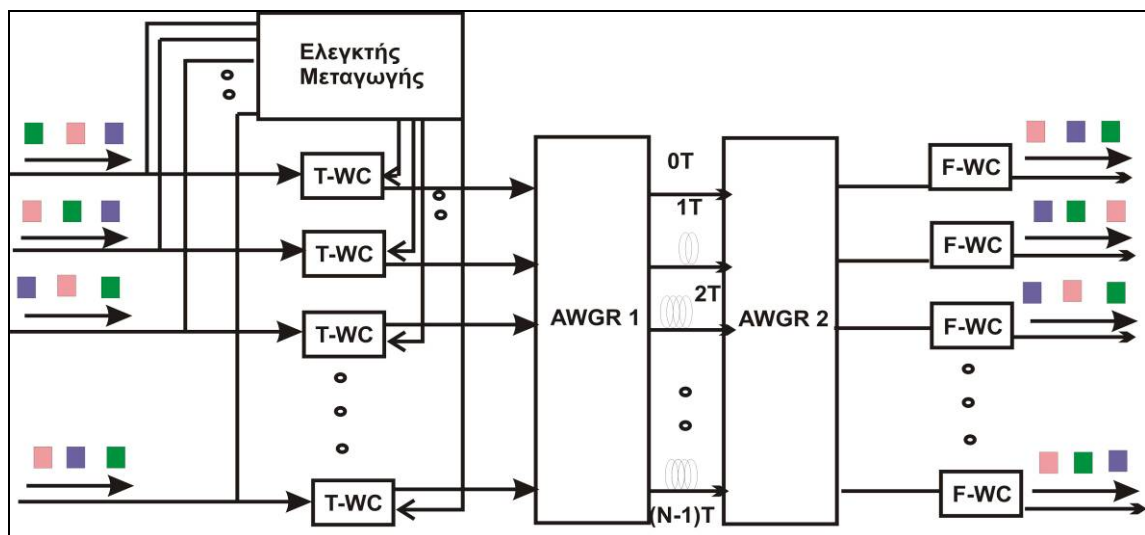
- **Υλοποίηση OTSI με γραμμές καθυστέρησης σε σχηματισμό πρόδρασης σε συνδιασμό με μεταγωγή στο πεδίο του μήκους κύματος.**

Αυτό το προτεινόμενο σύστημα TSI, η αρχιτεκτονική του οποίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.11, χρησιμοποιεί οπτική μεταγωγή ετικέτας με ρυθμιζόμενη μετατροπή μήκους κύματος (που επιτυγχάνεται με τη χρήση ρυθμιζόμενου laser και διαμόρφωση κέρδους διασταύρωσης με SOA),  $N \times N$  συνολικά AWGRs (Arrayed Wavelength Grating Routers) και ένα σύνολο γραμμών καθυστέρησης από οπτική ίνα. Στην εικόνα φαίνεται μια σειρά πακέτων να εισέρχεται στο σύστημα από καθεμία από τις  $N$  θύρες εισόδου. Το αποσπώμενο περιεχόμενο της επικεφαλίδας (ή οπτική ετικέτα) προκαλεί τον ελεγκτή μεταγωγής να μετατρέψει το φορτίο δεδομένων σε διαφορετικό μήκος κύματος διαμέσου των ρυθμιζόμενων μετατροπέων μήκους κύματος (Tunable Wavelength Converter T-WC). Έπειτα οι AWGRs θα οδηγήσουν τα φορτία που βρίσκονται σε διαφορετικά μήκη κύματος μέσα από γραμμές με διαφορετικές καθυστερήσεις, ανάλογα με το μήκος κύματος. Συγκρινόμενη με άλλες αρχιτεκτονικές TSI, αυτή η αρχιτεκτονική παρέχει ικανοποιητική κλιμάκωση (το  $N$  μπορεί να είναι μεγάλο), μεγάλη απόδοση ενέργειας (η είσοδος δεν διασπάται) και προγραμματιστικότητα (ο ελεγκτής μεταγωγής είναι επαναπρογραμματίσιμος).

Πιο αναλυτικά, κάθε πακέτο περιέχει τα δεδομένα και μια ετικέτα βάσει της οποίας παράγεται το αντίστοιχο μήκος κύματος πάνω στο οποίο θα γραφτεί το πακέτο με τη



βοήθεια ενός SOA. Έτσι φορτία με διαφορετικές επικεφαλίδες θα μετατραπούν σε διαφορετικά μήκη κύματος και θα κατευθυνθούν προς διαφορετικές θύρες εξόδου του AWGR1 ταξιδεύοντας διαμέσου γραμμών με διαφορετικές τιμές καθυστερήσεων ( $0T, 1T$  ή  $2T$  όπου το  $T$  αντιπροσωπεύει το άθροισμα του μήκους του πακέτου σε χρόνο και του διαχωριστικού χρονικού διαστήματος (guard time)) ανάλογα με το νέο τους μήκος κύματος. Ο AWGR2 καθοδηγεί τα πακέτα στη θύρα εξόδου που είναι δυαδική στη θύρα εισόδου, ανεξάρτητα από τα αλλαγμένα μήκη κύματος. Έτσι τελικά τα πακέτα που έχουν μπει από τη θύρα εισόδου 1 θα βγουν από τη θύρα εξόδου 1, αλλά με σειρά ίσως διαφορετική από αυτήν κατά την είσοδο, αφού έχουν υποστεί αντιμετάθεση μέσω της διέλευσης τους από τον TSI, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. [3.7]



Εικόνα 3.11 Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική TSI. Παρατηρούμε ότι τα πακέτα που μπαίνουν από την είσοδο  $i$  βγαίνουν από την είσοδο  $i$  αλλά ίσως με διαφορετική σειρά.

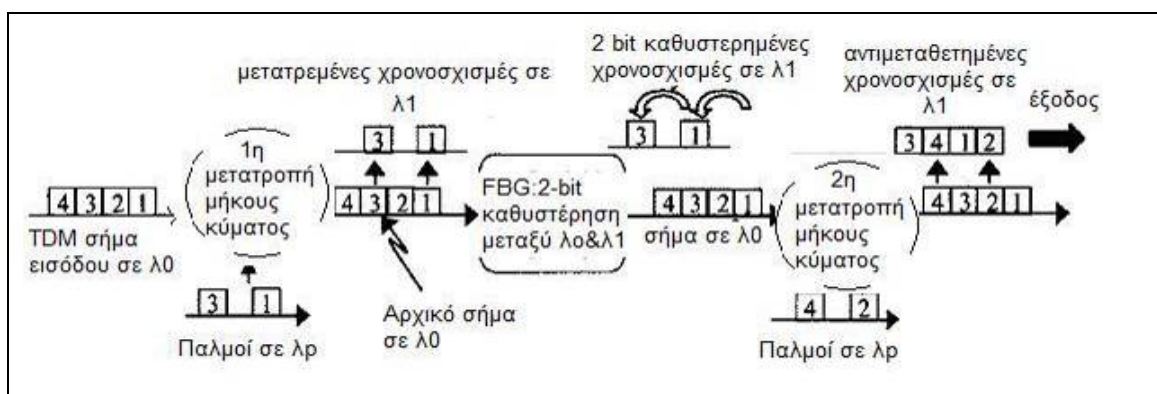
- **Υλοποίηση ρυθμιζόμενου αντιμεταθέτη χρονοσχισμών σε συνδυασμό με μετατροπή μήκους κύματος με χρήση γεννήτριας διαφορετικής συχνότητας και οπτικών ενταμιευτών.**

Η συγκεκριμένη υλοποίηση αφορά στον συνδυασμό ενός TSI με μετατροπέα μήκους κύματος, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό της γέννησης διαφορεικής συχνότητας (DFG) ως μετατροπέα μήκους κύματος και του πλέγματος ρυθμιζόμενης οπτικής ίνας Bragg (FBG) ως ενταμιευτές οπτικής ίνας για την παραγωγή των στοιχείων μεταγωγής. Η ανταλλαγή γειτονικών χρονοσχισμών επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τρία τέτοια στοιχεία στα οποία 1) ο πρώτος μετατροπέας μήκους κύματος τοποθετεί τα bits που είναι αριθμημένα με περιττό

αριθμό σε νέο μήκος κύματος 2) οι FBGs εισάγουν μια καθυστέρηση 2 bit ανάμεσα στα μήκη κύματος και 3) ο δεύτερος μετατροπέας μήκους κύματος τοποθετεί τα μη-καθυστερημένα, άρτια αριθμημένα bits στο νέο μήκος κύματος. Οι ρυθμιζόμενοι οπτικοί ενταμιευτές FBGs παρέχουν καλύτερη ικανότητα κλιμάκωσης και διαμορφώνονται πιο εύκολα από τους συμβατικούς ενταμιευτές που είναι βασισμένοι σε γραμμές καθυστέρησης οπτικών ινών.

Η Εικόνα 3.12 δείχνει διαγραμματικά την ανταλλαγή γειτονικών χρονοσχισμών. Στον πρώτο μεταγωγέα μήκους κύματος/χρόνου, τα περιττά αριθμημένα bits επιλέγονται και αντιγράφονται από το  $\lambda_0$  στο  $\lambda_1$  μέσω του DFG. Ένας πίνακας εξαρτώμενος από το μήκος κύματος, ξεχωριστά ρυθμιζόμενων καθυστερήσεων χρονοσχισμών, όπως καθορίζονται από το ρυθμιζόμενο σύνολο των FBGs, εισάγει μια καθυστέρηση 2 bit ανάμεσα στα  $\lambda_0$  και  $\lambda_1$ . Εφαρμόζοντας κατάλληλη τάση στους FBGs, είναι πιθανό να ρυθμίσεις τα ανακλώμενα μήκη κύματος των. Χρησιμοποιώντας την τεχνική αυτή, ο σχετικός συγχρονισμός των συρμών bits μπορεί να αλλάξει, δημιουργώντας ένα ρυθμιζόμενο οπτικό χρονικό ενταμιευτή. Στην συνέχεια ο δεύτερος μεταγωγέας μήκους κύματος/χρόνου διαλέγει και αντιγράφει τις άρτια αριθμημένες χρονοσχισμές στον ήδη καθυστερημένο συρμό bits, καταλήγοντας έτσι να είναι το αποτέλεσμα του καθόλα οπτικού TSI και της μετατροπής μήκους κύματος. [3.9]

Με άλλα λόγια, η σειρά χρονοσχισμών 4,3,2,1 εισάγεται στο κύκλωμα και διέρχεται ως έχειν από όλα τα στοιχεία. Στον πρώτο μετατροπέα μήκους κύματος, επιλέγονται οι περιττές χρονοσχισμές, των οποίων και αλλάζεται το μήκος κύματος. Στον FBG που ακολουθεί εισάγεται καθυστέρηση 2 bit ανάμεσα στα μήκη κύματος  $\lambda_0$  και  $\lambda_1$  (στην ουσία καθυστερούνται οι χρονοσχισμές στο μήκος κύματος  $\lambda_1$ ). Στην συνέχεια ακολουθεί ο δεύτερος μετατροπέας μήκους κύματος που μετατρέπει τις άρτιες χρονοσχισμές του αρχικού σήματος σε  $\lambda_1$  και τις αντιγράφει στο καθυστερημένο σήμα των περιπτώων χρονοσχισμών. Τελικά έχουμε το αρχικό σήμα γραμμένο σε  $\lambda_1$  με διαφορετική σειρά των χρονοσχισμών στην έξοδο (3,4,1,2).



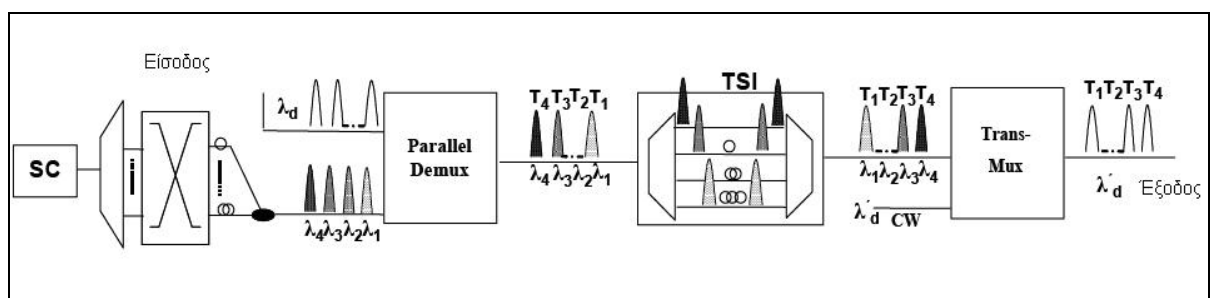
Εικόνα 3.12 TSI σε συνδιασμό με μετατροπέας μήκους κύματος

- **Υλοποίηση TSI σε οπτικό επίπεδο**

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.13 βασίζεται σε μια προγραμματισμένη πολλών μηκών κύματος ακολουθία bits η οποία αποφασίζει για τη λειτουργία του TSI. Μια πηγή laser SC (Super-Continuum) παράγει ένα συρμό από bits παλμών που είναι ισοδύναμα με τον συμβάλλον OTDM ρυθμό και χωρίζεται φασματικά με τη χρήση ενός αποπολυπλέκτη μήκους κύματος με αποτέλεσμα να παράγει έναν αριθμό συγχρονισμένων συρμών bits σε διαφορετικά μήκη κύματος. Ένας μεταγωγέας διαίρεσης χώρου σε συνδυασμό με γραμμές καθυστέρησης επιλέγει το κατάλληλο μήκος κύματος και ο συρμός των bits εναλλάσσεται ώστε να δημιουργήσουν ένα συρμό bits πολλαπλών μηκών κύματος της απαιτούμενης ακολουθίας μηκών κύματος και στον κατάλληλο OTDM ρυθμό. Με τη χρήση ενός καταλλήλου μετατροπέα μήκους κύματος τα εισερχόμενα OTDM δεδομένα μετατρέπονται σε ένα αναγεννημένο σήμα πολλαπλών μηκών κύματος (παράλληλη ή ταυτόχρονη αποπολυπλέξη), σε συμφωνία με την προγραμματισμένη ακολουθία bits πολλαπλών μηκών κύματος. Αυτό το σήμα στη συνέχεια εισέρχεται σε ένα αποπολυπλέκτη μήκους κύματος και έπειτα κατευθύνεται σε μια στατική δομή από γραμμές καθυστέρησης οι οποίες διαφέρουν κατά ένα bit περίοδο. Επομένως επιλέγοντας τη σωστή ακολουθία μηκών κύματος οποιαδήποτε αντιμετάθεση χρονοσχησμών μπορεί να διεξαχθεί. Το τελικό κομμάτι της αρχιτεκτονικής περιλαμβάνει ένα δεύτερο μετατροπέα μήκους κύματος που διεξάγει τη μετάφραση της εξόδου του TSI στο απαιτούμενο μήκος κύματος εξόδου.

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική είναι δελεαστική για ένα αριθμό λόγων :

- Ο ρυθμός παλμών του laser ισούται με το χαμηλότερο συμβάλλον OTDM ρυθμό
- Το TSI είναι στατικό και προτείνει μια εύρωστη λειτουργία
- Ο παράλληλος αποπολυπλέκτης και πολυπλέκτης παρέχουν αναγέννηση, μετατροπή μήκους κύματος και επιπρόσθετα διευκολύνουν την λειτουργία του TSI
- Απαιτούνται μόνο χαμηλής ταχύτητας ηλεκτρονικά ελέγχου [3.10]



Εικόνα 3.13 Σύστημα αρχιτεκτονικής που περιλαμβάνει : 1) Πηγή laser SC, 2) Φασματικό διαχωρισμό, 3) Μεταγωγή διαίρεσης χώρου, 4) Παράλληλο αποπολυπλέκτη, 5) Μονάδα TSI, 6) Αποπολυπλέκτη μετάδοσης

### 3.2.2 Υλοποίηση TSI στο παρόν πείραμα

Στην παράγραφο αυτή αρχικά θα παρουσιάσουμε μια γενική επισκόπηση της λειτουργίας του TSI που χρησιμοποιήσαμε, ως ενταμιευτή πακέτων (ή ταυτόσημα χρονοσχισμών), καθώς και μια περιγραφή του γενικότερου αλγόριθμου στον οποίο στηρίζεται η σχεδίασή του. Κατόπιν θα επικεντρωθούμε στα χαρακτηριστικά και στον τρόπο λειτουργίας του TSI όπως αυτός χρησιμοποιήθηκε στο πείραμά μας.

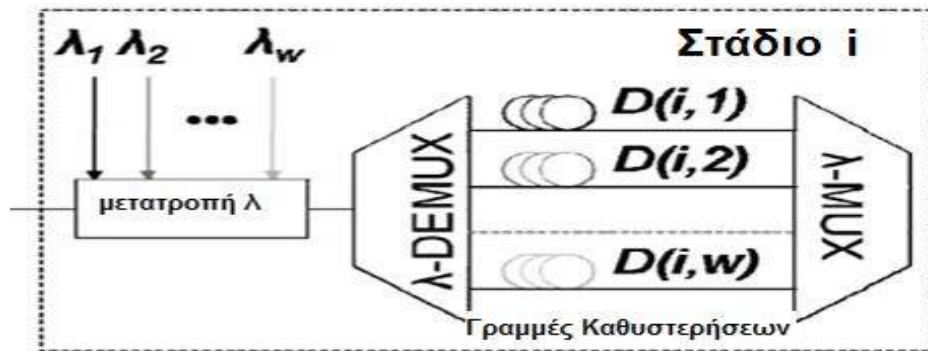
#### ο **Γενική αναφορά στην σχεδίαση του TSI ως ενταμιευτή χρονοσχισμών**

Για να διευκολύνουμε την ανάλυσή μας, θεωρούμε ότι ο χρόνος διαιρείται σε χρονοπερίόδους (χρονικά πλαίσια ή time frames) και ότι τα πακέτα περιορίζονται στα όρια των περιόδων αυτών. Περαιτέρω, θεωρούμε ότι η περίοδος περιέχει  $Y$  χρονοσχισμές και ότι κάθε πακέτο απασχολεί ασύγχρονα μια σειρά από γειτονικές χρονοσχισμές. Υπό αυτές τις υποθέσεις, η παροχή ποικίλων χρόνων αποθήκευσης για τα πακέτα μεταφράζεται στην αντιμετάθεση χρονοσχισμών. [3.11]

Ο TSI αποτελεί ένα ενταμιευτή εισόδου μεγέθους  $T$  και αποτελείται από  $s$  σειριακά συνδεδεμένα στάδια καθυστέρησης (Εικόνα 3.14), που έχουν τη διάταξη που φαίνεται στην Εικόνα 3.15. Η αρχιτεκτονική εκμεταλλεύεται τον παραλληλισμό των μηκών κύματος για να μειώσει τον αριθμό των σταδίων και συνεπώς το κόστος του υλικού αλλά και την εξασθένιση του σήματος που εισάγουν τα επιπλέον στάδια. Ένας ρυθμιζόμενος μετατροπέας μήκους κύματος (TWC), με  $w$  μήκη κύματος τοποθετείται μπροστά στην είσοδο κάθε σταδίου καθυστέρησης. Ο TWC αναθέτει στα πακέτα τα μήκη κύματος ανάλογα με την γραμμή καθυστέρησης που πρέπει να διασχίσουν τα πακέτα. Η αντιστοίχιση μεταξύ μηκών κύματος και γραμμών καθυστέρησης επιτυγχάνεται μέσω ενός παθητικού αποπολυπλέκτη μήκους κύματος, ενώ ένας πολυπλέκτης μηκών κύματος τροφοδοτεί τα καθυστερημένα πακέτα στο επόμενο στάδιο. Οι καθυστερήσεις  $D(i,j)$  που εισάγονται στο στάδιο  $i$  είναι μια σχεδιαστική παράμετρος της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής και θα υπολογιστούν σε επόμενη υποπαράγραφο. Ακολουθεί ο γράφος χώρου-χρόνου της αρχιτεκτονικής του ενταμιευτή εισόδου.



Εικόνα 3.14 Τα σειριακά συνδεδεμένα στάδια του TSI



Εικόνα 3.15 Ένα στάδιο καθυστέρησης του TSI

- **Σχηματισμός του γράφου χώρου-χρόνου**

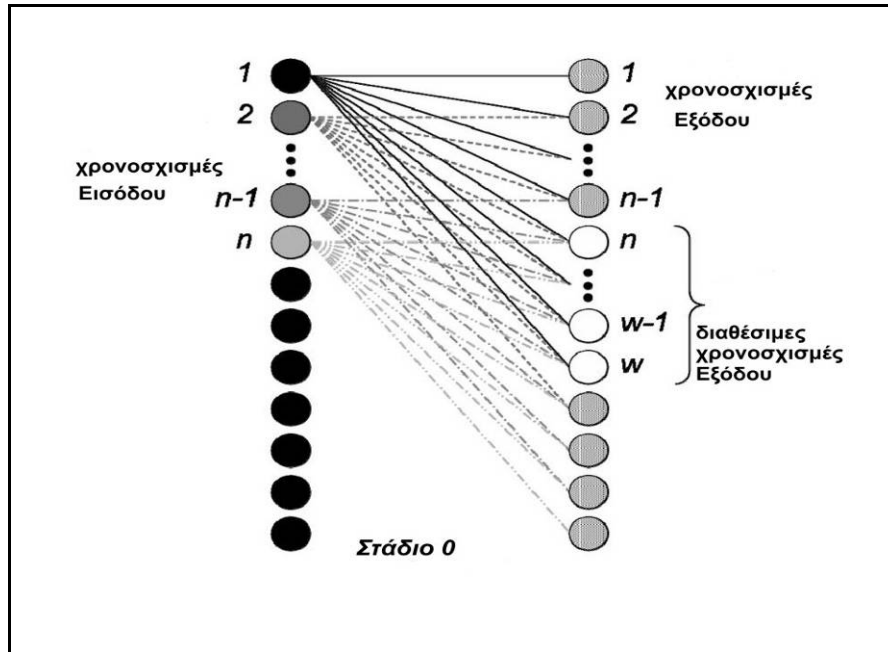
Ο γράφος χώρου-χρόνου της προτεινόμενης σχεδίασης αποτελείται από κόμβους που βρίσκονται σε στήλες και γραμμές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.16. Οι στήλες  $i$  και  $i + 1$  αντιπροσωπεύουν τις εισόδους και εξόδους αντίστοιχα, του ενταμιευτή εισόδου του σταδίου  $i$ , ενώ οι γραμμές αντιπροσωπεύουν τις χρονοσχιστές των περιόδων. Για παράδειγμα, ο κόμβος που βρίσκεται στη γραμμή  $j$  και στη στήλη  $i$  στον γράφο χώρου-χρόνου αναπαριστά την  $j$ οστή χρονοσχιστή της εισόδου του σταδίου  $i$ . Από τη σκοπιά του γράφου χώρου-χρόνου, τα εισερχόμενα πακέτα αντιμετωπίζονται σαν να απασχολούν έναν αριθμό από διαδοχικές χρονοσχιστές στην είσοδο του γράφου. Η ενταμίευση των πακέτων σε κάθε στάδιο ουσιαστικά αντιστοιχεί στην διάσχιση της γραμμής καθυστέρησης ενώ ο χρόνος διάσχισης ισούται με το χρόνο αποθήκευσής τους. Αυτό παρουσιάζεται στον γράφο με συνεχείς γραμμές (χρονικές μεταβάσεις) που ενώνουν τους κόμβους των χρονοσχιστών στις εισόδους και τις εξόδους του κάθε σταδίου. Οι χρονικές μεταβάσεις ενώνουν τους κόμβους εισόδου με τους κόμβους εξόδου σε μετέπειτα γραμμές, αφού τα πακέτα μπορούν μόνο να καθυστερηθούν σε κάθε στάδιο, δηλαδή να μετατεθούν σε επόμενες χρονοσχιστές.

Η ενταμίευση ενός πακέτου στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική για μια συγκεκριμένη διάρκεια αντιστοιχεί σε ένα μονοπάτι πάνω στον γράφο, με προέλευση το ζεύγος εισερχόμενου κόμβου-χρονοσχιστής στο οποίο έφτασε το πακέτο και προορισμό το ζεύγος εξερχόμενου κόμβου-χρονοσχιστής από το οποίο το πακέτο φεύγει. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι πολλαπλά πακέτα φτάνουν στις εισόδους του ενταμιευτή σε μια περίοδο, πρέπει να σχηματίζεται σε κάθε χρονοσχιστή, πάνω στο γράφο ένα πρότυπο εσωτερικής διασύνδεσης το οποίο θα αντιστοιχίζει τις χρονοσχιστές εισόδου σε χρονοσχιστές εξόδου. Για αυτό το

σκοπό υπολογίζονται οι χρονικές μεταβάσεις ή ισοδύναμα οι χρόνοι καθυστέρησης  $D(i,j)$  σε κάθε στάδιο, έτσι ώστε το εν λόγω πρότυπο να περιέχει ένα  $\log_n$ -Benes γράφο. Ο γράφος  $\log_n$ -Benes απορρέει από τον  $\log_2$ -Benes γράφο μετά από τη αντικατάσταση των μεταγωγών  $2 \times 2$  με  $n \times n$  crossbars και είναι μια γνωστή τοπολογία ενδοδιασύνδεσης αναδιατασσόμενη με τρόπο ώστε να μην προκαλούνται φραγές (non-blocking).

Ο σκοπός κατασκευής του γράφου  $\log_n$ -Benes είναι πολύπλευρος: η υλοποίηση απαιτεί έναν ελάχιστο αριθμό από σειριακά συνδεδεμένα στάδια που είναι ίσος με  $s = 2 \cdot m - 1 = 2 \cdot \lceil \log_n T \rceil - 1$  (1), για ένα δεδομένο αριθμό  $T$  χρονοσχισμών ανά χρονική περίοδο. Η εξίσωση (1) δείχνει ότι υλοποιώντας τον γράφο  $\log_n$ -Benes, μπορεί να επιτευχθεί δραστική μείωση των αριθμών των σταδίων. Αυτό είναι εξαιρετικής σημασίας αν αναλογιστούμε το κόστος του υλικού αυτής της υλοποίησης. Επιπλέον, οι εξασθενίσεις στο φυσικό επίπεδο, όπως το χρονικό jitter και το φαινόμενο μορφοτύπου (patterning effect), επιδεινώνουν την ποιότητα του οπτικού σήματος καθώς αυξάνεται ο αριθμός των αλληπαλλήλων σταδίων. Επίσης, ο γράφος Benes παρέχει ικανότητα κλιμάκωσης (λογαριθμική) ανάλογα με το μέγεθος  $T$  της χρονικής περιόδου και είναι non-blocking, ενώ η προτεινόμενη σχεδίαση είναι ικανή να αποθηκεύσει πακέτα χωρίς να υφίσταται εσωτερικές συγκρούσεις.

Τα συστατικά μέρη του γράφου  $\log_n$ -Benes είναι μεταγωγείς crossbars  $n \times n$  και ως εκ τούτου το πρώτο βήμα στην κατασκευή του είναι να καθορίσουμε το μέγεθος των crossbars, δηλαδή τα πόσα πακέτα μπορούν να υποστούν αντιμετάθεση. Τα crossbars σχηματίζονται από χρονικές μεταθέσεις στον γράφο χώρου-χρόνου όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.16, που αντιστοιχεί στο πρώτο στάδιο (stage 0) του TSI (Εικόνα 3.14). Εισερχόμενα πακέτα που φτάνουν στις χρονοσχισμές  $\{1, \dots, n\}$  μπορούν να καταλήξουν στις χρονοσχισμές εξόδου  $\{n, \dots, w\}$ , αφού δεν είναι δυνατές οι χρονικές μετατοπίσεις σε προηγούμενες χρονοσχισμές. Έτσι, ο συνολικός αριθμός των χρονοσχισμών στην έξοδο που είναι διαθέσιμες σε όλες τις  $n$  χρονοσχισμές εισόδου περιορίζεται σε  $w - n + 1$ .



Εικόνα 3.16 Ο γράφος χώρου-χρόνου.

Ο αριθμός των χρονοσχισμών που βρίσκονται στο επόμενο στάδιο και μπορούν να προσπελαστούν από μια χρονοσχισμή που βρίσκεται στο τρέχον στάδιο ισούται με τον αριθμό των διαθέσιμων μηκών κύματος  $w$ . Το crossbar που ενώνει χρονοσχισμές μεταξύ διαδοχικών σταδίων σχηματίζεται έτσι ώστε όλες οι χρονοσχισμές εισόδου να μπορούν να προσπελάσουν όλες τις χρονοσχισμές εξόδου.

Οι εισοδοί των crossbars είναι ισάριθμοι με τις εξόδους τους, και από αυτό βρίσκουμε το μέγεθος του crossbar να είναι ίσο με

$n = w - n + 1 \Leftrightarrow n = \lfloor (w + 1) / 2 \rfloor$  (2), όπου  $\lfloor x \rfloor$  δηλώνει το ακέραιο μέρος του  $x$ . Η εξίσωση (2) δείχνει ότι περίπου το 50% των διατιθέμενων μηκών κύματος συμβάλλει στον σχηματισμό των crossbars που αποτελούν τον γράφο  $\log_n$ -Benes.

Το δεύτερο βήμα για τη δημιουργία του γράφου  $\log_n$ -Benes είναι ο καθορισμός των χρονικών μετατοπίσεων που σχηματίζουν τους crossbars του γράφου στα αντίστοιχα στάδια. Η διαδικασία φαίνεται στην Εικόνα 3.17 (α) για το πρώτο και δεύτερο στάδιο του ενταμιευτή, όπως και στη Εικόνα 3.17 (β) και (γ), όπου το δίκτυο της Εικόνας 3.17 (α) μετατρέπεται σε μια συγκεκριμένη παρουσίαση. Ο σχηματισμός των crossbars του γράφου  $\log_n$ -Benes απαιτεί σε κάθε στάδιο  $i$  οι χρονικές μετατοπίσεις να ενώνουν χρονοσχισμές που βρίσκονται  $n^i$  θέσεις μακριά. Αυτό αντιστοιχεί στο να θέσουμε τις χρονικές καθυστερήσεις του μεταγωγέα, σε χρονοσχισμές, η θέση των οποίων ισούται με  $D(i, j) = j \cdot n^i$ ,  $i = 0, \dots, m - 1$ ,  $j = 0, \dots, w - 1$  (3). Οι καθυστερήσεις ισχύουν για όλες τις

χρονικές μετατοπίσεις στον γράφο, ακόμα και αν μόνο  $n$  μετατοπίσεις ανά χρονοσχισμή συνεισφέρουν στον σχηματισμό των εικονικών crossbars. Οι υπόλοιπες  $w - n$  ανενεργές μετατοπίσεις παράγουν μια σταθερή καθυστέρηση, μετά την οποία αρχίζει η χρονική περίοδος στην έξοδο (άσπρα τετράγωνα στην Εικόνα 3.17 (α)). Στην έξοδο κάθε σταδίου, η καθυστέρηση ισούται με

$$\Delta_i = n^i \cdot (n - 1), i = 0, \dots, m - 1 \quad (4)$$

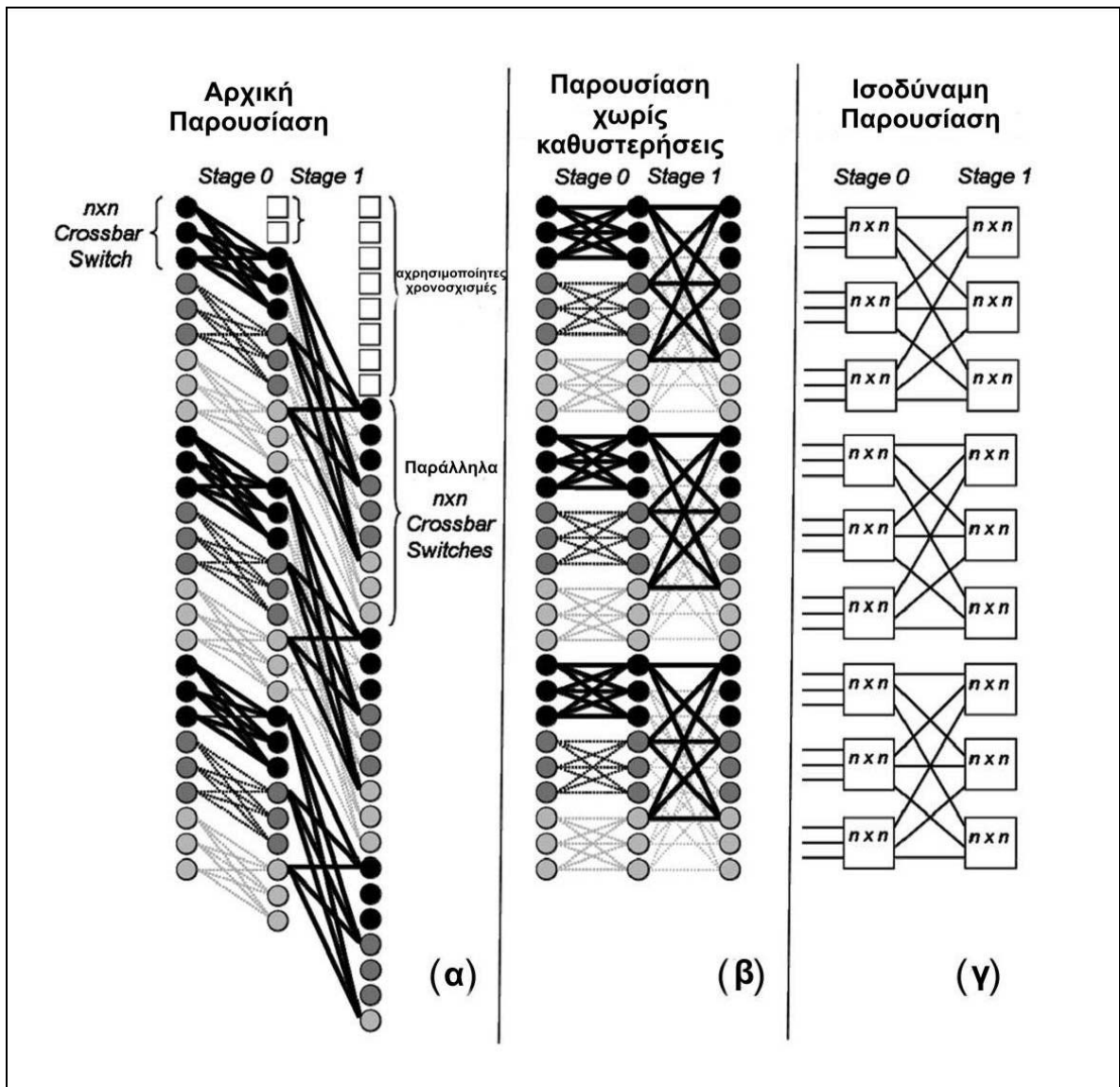
χρονοσχισμές και σαν αποτέλεσμα η συνολική καθυστέρηση που υφίστανται τα πακέτα όταν διασχίζουν τον

ενταμιευτή είναι

$$\Delta = \sum_{i=0}^{m-1} n^i \cdot (n - 1) + \sum_{i=0}^{m-2} n^i \cdot (n - 1) = n^m + n^{m-1} - 2 = T + \frac{T}{n} - 2 \quad (5)$$

χρονοσχισμές. Η εξίσωση (5) μπορεί να θεωρηθεί ως μια σταθερή καθυστέρηση αποθήκευσης που δημιουργείται από τον ενταμιευτή. [3.11]





Εικόνα 3.17 Σχηματισμός του  $\log_n$ -Benes υπογράφου στον γράφο χώρου-χρόνου. Οι  $nxn$  εικονικοί μεταγωγείς στο στάδιο  $i$  σχηματίζονται από κόμβους που απέχουν μεταξύ τους  $n^i$  χρονοσχισμές.

- **Χρήση του MZI βασισμένου σε SOA για την υλοποίηση του TSI και υπολογισμός του μέγιστου επιτρεπτού αριθμού σταδίων.**

Για την υλοποίηση του TSI χρησιμοποιήθηκε σε κάθε στάδιο ένα συμβολόμετρο SOA-MZI για την υλοποίηση του ρυθμιζόμενου μετατροπέα μήκους κύματος TWC. Παρόλο που οι SOA-MZI TWCs δεν έχουν διαφάνεια στη μορφοποίηση των πακέτων (format transparency), όπως η εναλλακτική πρόταση των TWCs που βασίζονται σε μίξη τεσσάρων φωτονίων (four-wave mixing), είναι κατάλληλοι για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική που

περιλαμβάνει πολλά στάδια, αφού απαιτούν χαμηλές ενέργειες για την μεταγωγή και παρέχουν υψηλές ενέργειες στην έξοδο. Έτσι, είναι πιθανό να κλιμακωθούν άμεσα τα στάδια καθυστέρησης χωρίς να συμπεριλαμβάνονται ενισχυτές που επιδεινώνουν τον SNR και περιορίζουν την κλιμάκωση των TWCs. Βέβαια στην πράξη χρησιμοποιούνται ενισχυτές, όταν οι απώλειες από τους πολυπλέκτες, αποπολυπλέκτες και γραμμές καθυστέρησης που εμπλέκονται σε κάθε στάδιο είναι πολύ υψηλές.

Η συγκεκριμένη υλοποίηση του TSI που προτείνεται (reference), αποδεικνύεται με μεθόδους προσομοίωσης ότι είναι δυνατόν να κλιμακωθεί μέχρι ένα μέγιστο αριθμό 7 σταδίων, λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο ρυθμός μετάδοσης είναι στα 10Gbps. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει ελέγχοντας τους BER σε συνδιασμό με την λαμβανόμενη ισχύ στην έξοδο κάθε σταδίου, για κάθε στάδιο. Αποδεκτές τιμές BER θεωρούνται εκείνες που είναι μικρότερες από  $10^{-9}$ , ενώ για μεγαλύτερο αριθμό σταδίων από 7, ο λαμβανόμενος BER ήταν μικρότερος από  $10^{-7}$ . Για να επιτευχθούν καλύτερα BERs είναι απαραίτητο να λάβουμε μεγαλύτερη ενέργεια σήματος στην έξοδο κάθε σταδίου, εξαιτίας της αυξανόμενης πυκνότητας του φάσματος του θορύβου στην είσοδο κάθε επόμενου σταδίου. Επίσης η ποιότητα του σήματος χειροτερεύει με τον αριθμό των σταδίων, αφού αποκλίσεις στο πλάτος των παλμών στο σήμα εισόδου καταλήγουν σε χρονικές αποκλίσεις στην έξοδο του TWC προκαλώντας έτσι συσσώρευση χρονικού jitter στο σήμα.

Παρότι όμως υπάρχει ένας μέγιστος αριθμός στα επιτρεπόμενα στάδια ίσως με 7, ο αριθμός αυτός είναι ικανός να παρέχει χρόνους ενταμίευσης κατάλληλους για πρακτική χρήση όταν συνοδεύεται από ένα ευρύ πλήθος από μήκη κύματος, σύμφωνα με την εξίσωση (1). Για παράδειγμα, για 5 διατιθέμενα μήκη κύματος, η σχεδίαση του ενταμιευτή με 7 επίπεδα είναι ικανή να αποθηκεύσει 81 πακέτα. Η εικόνα 3.18 παρουσιάζει τον αριθμό των απαιτούμενων μηκών κύματος σε σχέση με τον αριθμό των αντιμετατιθέμενων χρονοσχισμών ανά χρονική περίοδο (time frame) δηλαδή τον αριθμό των πακέτων που μπορούμε να αντιμεταθέσουμε. Η αντιστοιχία γίνεται για 1,3 και 5 στάδια. [3.12]

Αντιμετατιθέμενες χρονοσχισμές	Απαιτούμενα μήκη κύματος		
	s=1	s=3	s=5
4	7	3	3
9	17	5	5
16	31	7	5
25	49	9	5
36	71	11	7
49	97	13	7

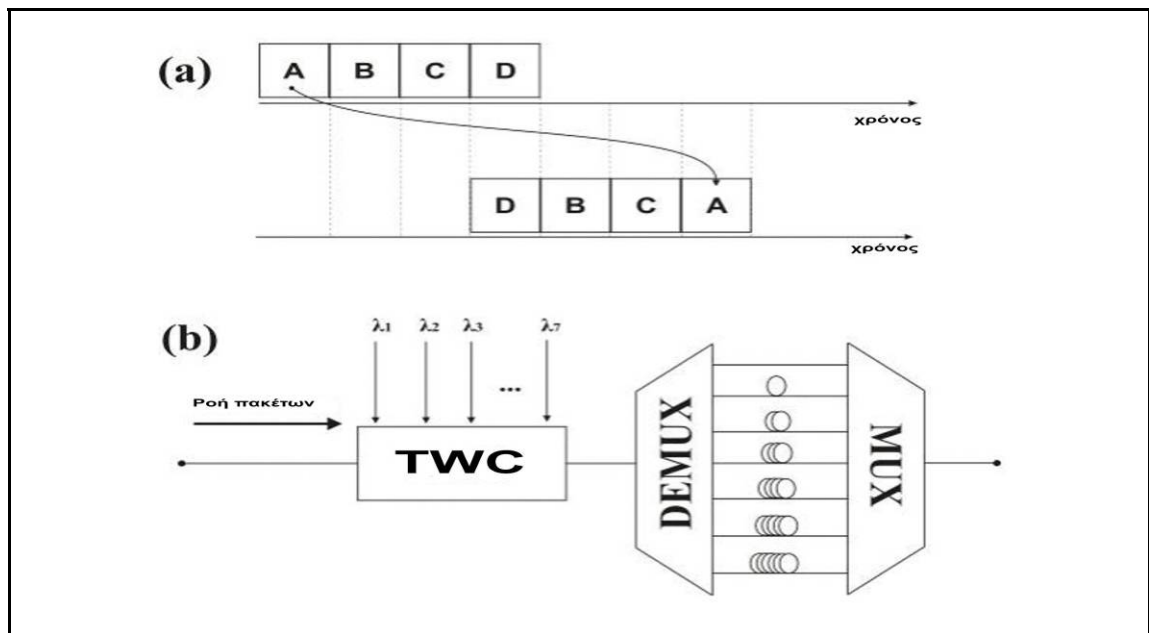
Εικόνα 3.18 Πίνακας αντιστοιχίας αντιμετατιθέμενων χρονοσχισμών-μηκών κύματος για 1,3,5 στάδια.

ο **Συγκεκριμενοποίηση της αρχιτεκτονικής TSI στο παρόν πείραμα**

Μετά την αναφορά στην γενική λειτουργία του TSI ως ενταμιευτή που προηγήθηκε είμαστε σε θέση να προχωρήσουμε στην περιγραφή της υλοποίησης του TSI στο πείραμα που εκτελέσαμε. Βασικά είναι η πειραματική υλοποίηση της παραπάνω αρχιτεκτονικής για 3 μήκη κύματος και 3 στάδια στα 10 Gbps που αντιστοιχεί στην αντιμετάθεση 4 πακέτων. Αρχίζουμε με μια εξήγηση της επιλογής της υλοποίησης τριών σταδίων.

Σε αυτήν υλοποίηση κάθε χρονική περίοδος (time frame) περιέχει 4 χρονοσχισμές, έτσι ώστε η TSI δομή να μπορεί να αναδιοργανώσει το πολύ 4 πακέτα που έχουν φτάσει κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής. Στην έξοδο του TSI, κάθε εισερχόμενο πακέτο μπορεί να τοποθετηθεί σε κάθε μια από τις 4 διατιθέμενες χρονοσχισμές. Η χειρότερη περίπτωση είναι το πρώτο και το τελευταίο πακέτο να πρέπει να ανταλλάξουν θέση μέσα στο frame. Σε αυτήν τη περίπτωση, στο τελευταίο πακέτο θα πρέπει να προστεθεί μηδενική καθυστέρηση ενώ στο πρώτο θα πρέπει να προστεθεί καθυστέρηση 6 χρονοσχισμών. Σε περιπτώσεις διαφορετικών αναδιοργανώσεων πακέτων απαιτούνται ενδιάμεσες τιμές καθυστερήσεων. Αυτό σημαίνει ότι το TSI θα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει όλες τις πιθανές καθυστερήσεις μεταξύ 0 και 6 χρονοσχισμών, ένα σύνολο 7 διαφορετικών καθυστερήσεων. Υποθέτοντας ότι ο TSI είναι υλοποιημένος σε μια διάταξη ενός σταδίου θα χρειαζόνταν 7 μήκη κύματος, όπως φαίνεται και στον πίνακα της Εικόνας 3.18. Αυτό είναι συνέπεια της ανάθεσης μιας συγκεκριμένης καθυστέρησης σε μια συγκεκριμένη θύρα του αποπολυπλέκτη μήκους κύματος, ο οποίος στην περίπτωση αυτή θα ήταν 1x7 (Εικόνα 3.19). Έτσι σε κάθε πακέτο θα δινόταν το κατάλληλο μήκος κύματος από την διαδικασία αλλαγής μήκους κύματος στον MZI έτσι ώστε ο αποπολυπλέκτης να επιτρέψει την διέλευση

από κάθε γραμμή καθυστέρησης μόνο των προβλεπόμενων πακέτων. Δυστυχώς η προσέγγιση της υλοποίησης του TSI σε ένα στάδιο δεν κλιμακώνεται καλά σε όρους απαιτούμενων μηκών κύματος. Για παράδειγμα η αναδιάταξη πακέτων σε μια περίοδο δέκα πακέτων απαιτεί 19 μήκη κύματος, ενώ για την γενική περίπτωση περιόδων  $N$  πακέτων, πρέπει να χρησιμοποιηθούν  $2N-1$  μήκη κύματος.



Εικόνα 3.19 Η χειρότερη περίπτωση ανταλλαγής πακέτων:

- (a) το πακέτο A στην πρώτη χρονοσχισμή πρέπει να αλλάξει θέση με το πακέτο D στην τελευταία χρονοσχισμή.
- (b) υλοποίηση TSI σε ένα στάδιο

Για να ανταπεξέλθουμε αυτή την αρνητική ιδιότητα που αφορά τα απαιτούμενα μήκη κύματος στον TSI ενός σταδίου, μπορεί να υιοθετηθεί μια υλοποίηση πολλών σταδίων. Με μια τέτοια υλοποίηση κάθε στάδιο θα χρησιμοποιήσει λιγότερα από 7 μήκη κύματος και τα διαδοχικά στάδια θα έχουν ένα διαφορετικό σύνολο καθυστερήσεων. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε στάδιο θα είναι ικανό να αναδιατάξει λιγότερα από 4 πακέτα της περιόδου σε μια φορά. Παρόλα αυτά τα διαδοχικά στάδια αναδιάταξης μπορούν να εκτελέσουν πλήρη αναδιοργάνωση πακέτων. Ο αριθμός των απαιτούμενων σταδίων TSI και μηκών κύματος ανά στάδιο, όπως και οι καθυστερήσεις που εισάγουν είναι συσχετιστικές σχεδιαστικές παράμετροι που αντλούνται από τον αλγόριθμο που εξετάσαμε παραπάνω, ως συνάρτηση των χρονοσχισμών που ανατίθενται σε κάθε περίοδο. Έτσι καταλήγουμε στον αριθμό 3 για τα στάδια ως βέλτιστη επιλογή, καθότι με 1 στάδιο χρειαζόμαστε πολλά μήκη κύματος. Από

την άλλη με 5 στάδια χρειαζόμαστε τον ίδιο αριθμό μηκών κύματος, ενώ αυτά προκαλούν περαιτέρω υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος εξαιτίας των αλληπάλληλων αλλαγών μήκους κύματος στα TWCs και συγκεκριμένα κατά τη διέλευση από τα MZI λόγω των SOAs και κατά τη διέλευση από τους πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες.

Επιπλέον από τον πίνακα της Εικόνας 3.18 είναι φανερό ότι το μοτίβο των τριών σταδίων που παρουσιάζουμε κλιμακώνεται καλά με τον αριθμό των διαθέσιμων μηκών κύματος, για παράδειγμα, μόνο 13 μήκη κύματος χρειάζονται για περίπου 49 πακέτα, σε αντίθεση με αυτό του ενός σταδίου που θα απαιτούσε σχεδόν 100. Παρόλα αυτά επιπρόσθετα στάδια απαιτούνται για να επεκτείνουμε περαιτέρω τις αντιμεταθετικές δυνατότητες της αρχιτεκτονικής TSI, με μια πιθανή μείωση των μηκών κύματος. Για παράδειγμα, μια σχεδίαση 5 σταδίων χρειάζεται το πολύ 7 μήκη κύματος για ανταλλαγή 49 πακέτων.

Η διάταξη του TSI τριών σταδίων που υλοποιήσαμε περιλαμβάνει ένα MZI-SOA που ακολουθείται από 1 αποπολυπλέκτη DEMUX 1x3, 3 γραμμές καθυστέρησης με διαφορετικές καθυστερήσεις η καθεμία και 1 πολυπλέκτη MUX 3x1, ανά στάδιο (Εικόνα 3.20). Ο MZI-SOA πραγματοποιεί την μετατροπή του μήκους κύματος στα τρία πακέτα, έτσι ώστε αυτά να αποκτήσουν διαφορετικό μήκος κύματος ανάλογο της καθυστέρησης που θέλουμε να τους δώσουμε (το τέταρτο πακέτο έχει επιλεγθεί να είναι κενό). Στη συνέχεια ο αποπολυπλέκτης DEMUX έχει στην κάθε έξοδο του ένα φίλτρο σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, έτσι ώστε κατά τη διέλευση των πακέτων διαμέσου του να επιτυγχάνεται η είσοδος σε κάθε γραμμή καθυστέρησης μόνο του πακέτου που θέλουμε ανάλογα με την επιθυμητή καθυστέρηση. Με αυτή τη διαδικασία τα πακέτα υφίστανται καθυστερήσεις σε τρία αλληπάλληλα στάδια για να αποκτήσουμε στην έξοδο του τρίτου σταδίου την επιθυμητή αλληλουχία πακέτων. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται και περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και ως μέρος αυτής και η υλοποιημένη αρχιτεκτονική TSI.

Τέλος μπορούμε να αναφέρουμε τις καθυστερήσεις σε αριθμό χρονοσχισμών που εισάγονται σε κάθε πακέτο ανάλογα με το μήκος κύματος στο οποίο αυτό έχει γραφτεί και που προκύπτουν από την εξίσωση (3) δηλ. την  $D(i, j) = j \cdot n^i$ ,  $i = 0, \dots, m - 1$ ,  $j = 0, \dots, w - 1$ . Στην παρούσα υλοποίηση των τριών σταδίων έχουμε  $s=3$  και άρα από την εξίσωση (1) δηλ. την  $s = 2m - 1$  προκύπτει ότι  $m=2$ . Από την εξίσωση (3) δηλ. την  $n = \lfloor (w + 1) / 2 \rfloor$  αφού  $w=3$  μήκη κύματος,  $n= 2$ . Έτσι με αυτά τα στοιχεία έχουμε

Για  $i=0$  (πρώτο στάδιο):

Για  $j=0$  (πρώτο μήκος κύματος) :  $D(0,0) = 0T$

Για  $j=1$  (δεύτερο μήκος κύματος) :  $D(0,1) = 1T$

Για  $j=2$  (τρίτο μήκος κύματος) :  $D(0,2) = 2T$

Για  $i=1$  (δεύτερο στάδιο):

Για  $j=0$  (πρώτο μήκος κύματος) :  $D(1,0) = 0T$

Για  $j=1$  (δεύτερο μήκος κύματος) :  $D(1,1) = 2T$

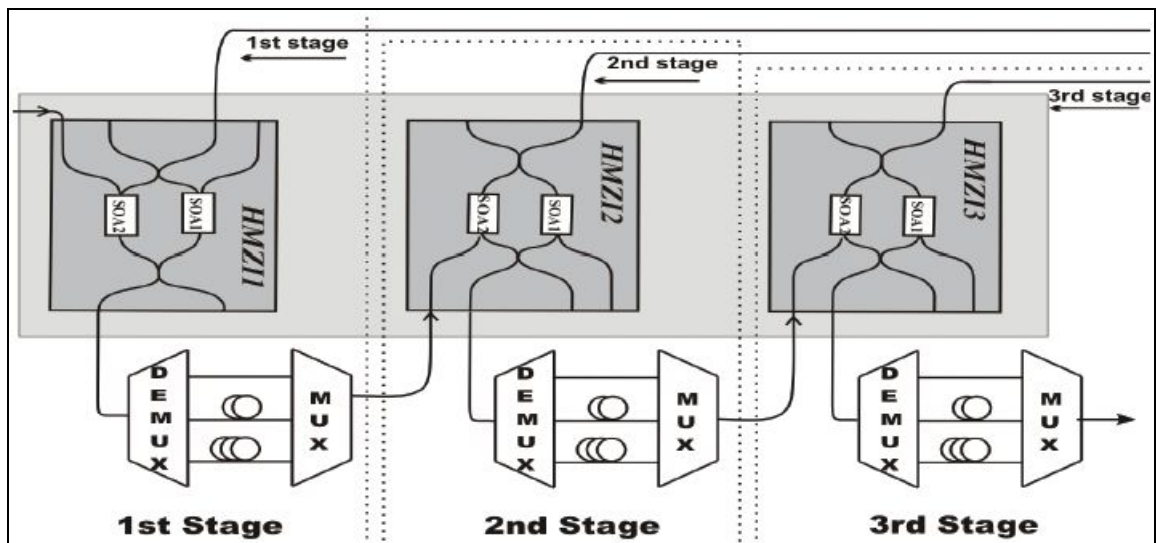
Για  $j=2$  (τρίτο μήκος κύματος) :  $D(1,2) = 4T$

Οι καθυστερήσεις του τρίτου σταδίου λόγω της συμμετρίας της διάταξης θα είναι ίδιες με αυτές του πρώτου σταδίου δηλ.

τρίτο μήκος κύματος :  $D(3,0) = 0T$

δεύτερο μήκος κύματος :  $D(3,1) = 1T$

πρώτο μήκος κύματος :  $D(3,2) = 2T$ .



Εικόνα 3.20 Υλοποίηση TSI τριών σταδίων

### 3.3 Βιβλιογραφία

- [3.1] All-optic time-slot-interchange and wavelength conversion using difference-frequency-generation and FBGs, M.C. Cardakli, D. Gurkan, S.A. Havstad, and A. E. Willner, K.R. Parameswaran and M.M. Fejer, I. Brenner
- [3.2] Time Sliced Optical Burst Switching, Jeyashankher Ramamirtham, Jonathan Turner
- [3.3] Συστήματα μεταγωγής πληροφορίας, Ιάκωβος Στ. Βενιέρης, Αθήνα 2004
- [3.4] [http://searchnetworking.techtarget.com/sDefinition/0,,sid7\\_gci525909,00.html](http://searchnetworking.techtarget.com/sDefinition/0,,sid7_gci525909,00.html)
- [3.5] Tunable All-Optical Time-Slot-Interchange and Wavelength Conversion Using Difference-Frequency-Generation and Optical Buffers, M. C. Cardakli, D. Gurkan, S. A. Havstad, *Member, IEEE*, A. E. Willner, *Senior Member, IEEE*, K. R. Parameswaran, M. M. Fejer, *Member, IEEE*, and I. Brenner
- [3.6] Photonic Time-Slot and Wavelength-Grid Interchange for 10-Gb/s Packet Switching Kiyoshi Onohara, *Student Member, IEEE*, Hideyuki Sotobayashi, *Member, IEEE*, Ken-ichi Kitayama, *Senior Member, IEEE*, and Wataru Chujo, *Member, IEEE*
- [3.7] [ieeexplore.ieee.org/iel5/8042/22213/01036352.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8042/22213/01036352.pdf)
- [3.8] *Time-Slot Assignment Using Optical Buffer With a Large Variable Delay Range Based on AVC Crosspoint Switch* Zhuoran Wang, Nan Chi, *Member, IEEE*, and Siyuan Yu, *Member, IEEE*
- [3.9] *Tunable All-Optical Time-Slot-Interchange and Wavelength Conversion Using Difference-Frequency-Generation and Optical Buffers* M. C. Cardakli, D. Gurkan, S. A. Havstad, *Member, IEEE*, A. E. Willner, *Senior Member, IEEE*, K. R. Parameswaran, M. M. Fejer, *Member, IEEE*, and I. Brenner
- [3.10] An All-Optical Time-Slot Interchange Architecture. G. Zarris, L. M. Sadeghioon, K. M. Guild, D. Simeonidou, M. O'Mahony (1), C. G. Leburn, C. T. A. Brown, W. Sibbett (2), Hyun-Do Jung, A. M. J. Koonen, I. T. Monroy (3) 1: Photonic Networks Research Laboratory, Electronic Systems Engineering Dept., University of Essex, Colchester CO4 3SQ, UK, [gzarris@essex.ac.uk](mailto:gzarris@essex.ac.uk) 2: J. F. Allen Physics Research Laboratories, School of Physics and Astronomy, University of St Andrews 3: The COBRA Research Institute, Eindhoven University of Technology
- [3.11] Multiple-Input-Buffer and Shared-Buffer Architectures for Optical Packet- and Burst-Switching Networks. Konstantinos Yiannopoulos, Kyriakos G. Vlachos, *Member, IEEE*, and Emmanouel Varvarigos *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, VOL. 25, NO. 6, JUNE 2007
- [3.12] Implementation of an All-Optical Time-Slot-Interchanger Architecture O. Zouraraki, K. Yiannopoulos, P. Zakynthinos, D. Petrantonakis, E. Varvarigos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos

# 4

## Περιγραφή του πειράματος – Πειραματική διάταξη

### 4.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε η θεωρητική παρουσίαση του οπτικού συμβολόμετρου MZI και του αντιμεταθέτη χρονοσχισμών TSI, στοιχεία που αφορούν άμεσα το πείραμά μας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε την πειραματική διάταξη, η οποία αποτελείται από τέσσερα στάδια και θα παρουσιάσουμε το πείραμα αναλυτικά ανά στάδιο, ενώ θα εξηγήσουμε επίσης τη λειτουργία κάθε δομικού τμήματος.

Σκοπός του πειράματος είναι η υλοποίηση κυκλώματος για την αντιμετάθεση οπτικών δεδομενοπακέτων σε καθαρά οπτικό επίπεδο. Αυτό πρακτικά επιτεύχθηκε με τη μη εμπλοκή ηλεκτρονικού κυκλώματος κατά τη φάση αντιμετάθεσης των χρονοσχισμών. Εντούτοις η υπόλοιπη πειραματική διάταξη περιλαμβάνει ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως είναι τα κυκλώματα ελέγχου και το κύκλωμα υλοποίησης του αλγορίθμου στον οποίο στηρίζεται η λειτουργία του TSI.

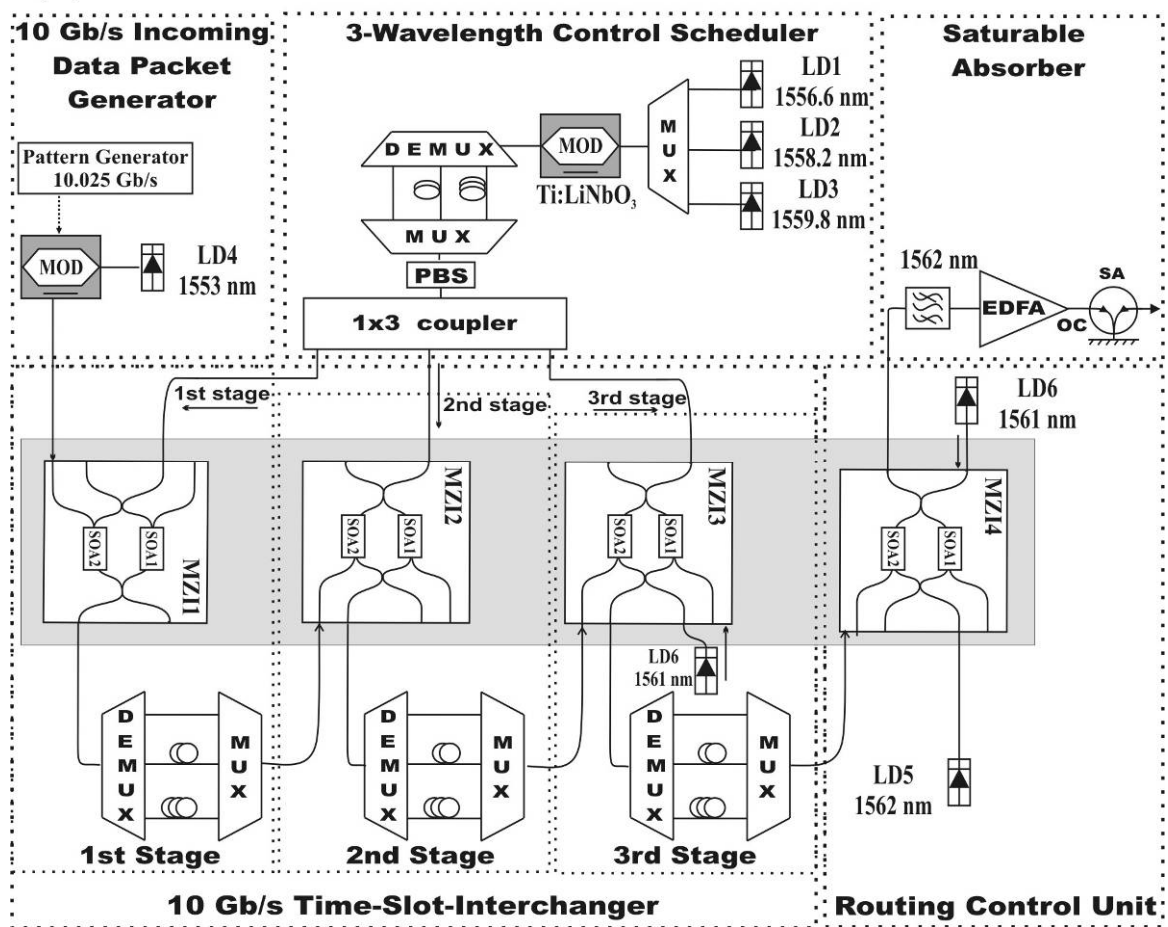
Το κύκλωμα αντιμετάθεσης χρονοσχισμών που υλοποιήθηκε αποτελείται από 3 αλληπάλληλα στάδια. Κάθε στάδιο έχει ως κύριο στοιχείο ένα οπτικό συμβολόμετρο MZI για τη μετατροπή του μήκους κύματος των δεδομενοπακέτων που εισέρχονται σε αυτόν από τη θύρα ελέγχου καθώς και μια πλειάδα οπτικών γραμμών καθυστέρησης, που προσδίδουν χρονική καθυστέρηση στα πακέτα ανάλογα με το μήκος κύματός τους. Επομένως ο MZI αλλάζει το μήκος κύματος των πακέτων με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί στην έξοδο του εκάστοτε σταδίου η επιθυμητή αντιμετάθεση των πακέτων, αφού κάθε μήκος κύματος



αντιστοιχεί σε ορισμένη καθυστέρηση του αντίστοιχου πακέτου. Η διάταξη παρουσιάζει λειτουργία χωρίς σφάλματα σε πακέτα NRZ με ρυθμό 10Gb/s και ποιινή ενέργειας 1,8 dB. Ακολουθεί η περιγραφή του πειράματος

## 4.2 Περιγραφή του πειράματος

Η συνολική πειραματική διάταξη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



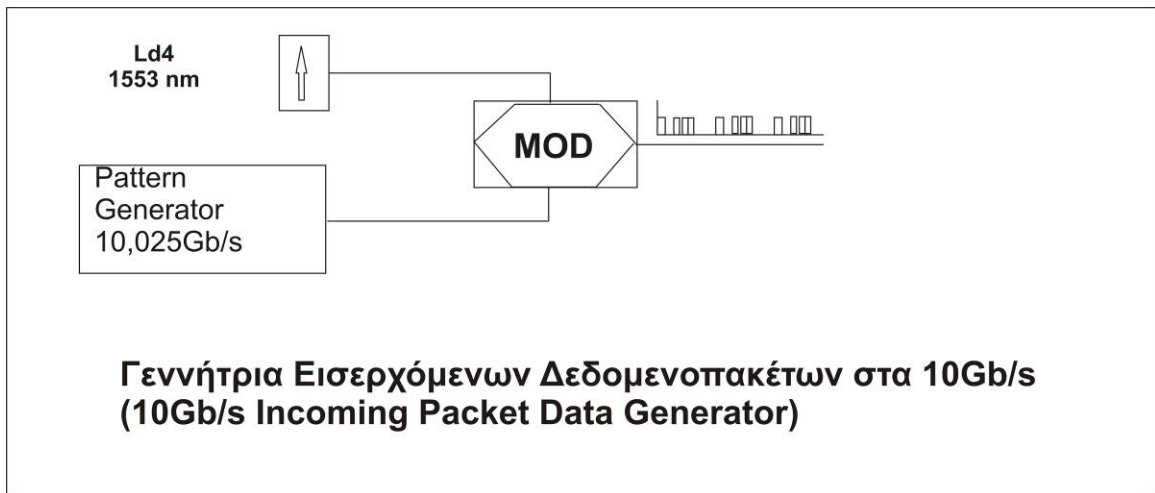
Εικόνα 4.1 Παρουσίαση του διαγράμματος της πειραματικής διάταξης.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του κυκλώματος και την περαιτέρω διεξαγωγή του πειράματος είναι :

- ένας Pattern Generator στα 10.025Gb/s
- 6 δίοδοι laser στα 1556,6nm, 1558,2nm, 1559,8nm, 1553 nm, 1561 nm, και 1562 nm.
- δύο Modulator Ti:LiNbO<sub>3</sub>
- πολυπλέκτες-αποπολυπλέκτες
- ένας διαχωριστής πόλωσης (PBS)
- ένας διαχωριστής σήματος 1x3 (coupler)
- ένας Απορροφητής Κορεσμού (Saturable Absorber)
- ενισχυτές οπτικής ίνας EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier )
- 1 ολοκληρωμένο κύκλωμα αποτελούμενο από 4 ανεξάρτητα μεταξύ τους οπτικά συμβολόμετρα SOA-MZI

➤ *Δημιουργία ακολουθίας δεδομενοπακέτων και σημάτων εισόδου στα οπτικά συμβολόμετρα.*

Αρχικά, και πριν το πρώτο στάδιο δημιουργούμε τα δεδομενοπακέτα και τις 3 περιβάλλουσες πακέτων που αποτελούν τα σήματα εισόδου και ελέγχου για τα MZI αντίστοιχα.



Εικόνα 4.2 Δημιουργία των δεδομενοπακέτων

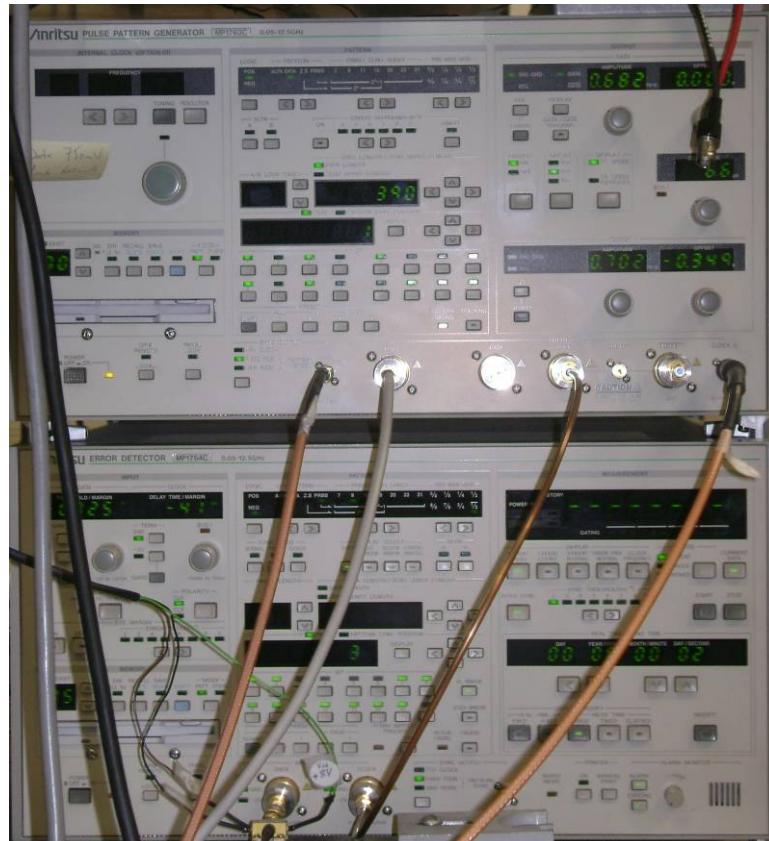
Αρχικά υποθέτουμε ότι η ροή δεδομένων χωρίζεται και οργανώνεται σε χρονικές περιόδους, που περιέχουν ένα αριθμό από χρονοσχισμές και ότι κάθε πακέτο απασχολεί μια χρονοσχισμή [4.1]. Το κύκλωμα παραγωγής των δεδομενοπακέτων φαίνεται στην εικόνα 4.2 και αποτελείται από μια δίοδο laser στα 1553 nm (Ld4), έναν Pattern Generator στα 10 Gbps και έναν διαμορφωτή σήματος (MOD). Το οπτικό σήμα που παράγεται στην έξοδο του κυκλώματος αυτού είναι ένα περιοδικό σήμα 4 χρονοσχισμών, που περιλαμβάνει τρία πακέτα δεδομένων στις τρεις πρώτες χρονοσχισμές ενώ η τελευταία επιλέγεται να είναι άδεια (θα μπορούσε και η τελευταία να περιέχει δεδομενοπακέτο). Σε αυτό το σημείο πρέπει να παρατηρήσουμε ότι το κάθε πακέτο δεδομένων χωρίζεται από το επόμενο με ένα ίσης διάρκειας χρονικό διάκενο (time interval), ώστε να είναι εφικτός ο διαχωρισμός τους.

Πιο συγκεκριμένα ο Pattern Generator δημιουργεί τρεις αλληλουχίες από bits (μήκους 25 bits η καθεμία), ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα χρονικό διάστημα σταθερού μήκους 15 μηδενικών bits και στο τέλος ακολουθεί η κενή χρονοσχισμή. Το σήμα αυτό με τη βοήθεια του MOD διαμορφώνει το οπτικό ημίτονο που παράγεται από τη δίοδο laser (LD4) με αποτέλεσμα η ακολουθία αυτή από bits να μετατρέπεται σε μήκος κύματος 1553nm. Συνολικά το περιοδικό σήμα αποτελείται από 4 χρονοσχισμές μήκους 40 bits η καθεμία, οπότε η περίοδος του σήματος έχει συνολικό μέγεθος 160 bits. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο ρυθμός μετάδοσης είναι 10 Gbps, προκύπτει ότι η διάρκεια μετάδοσης ενός δεδομενοπακέτου είναι  $\frac{25bits}{10Gbps} = 2,5nsec$ , μια χρονοσχισμή διαρκεί  $\frac{40bits}{10Gbps} = 4nsec$  ενώ

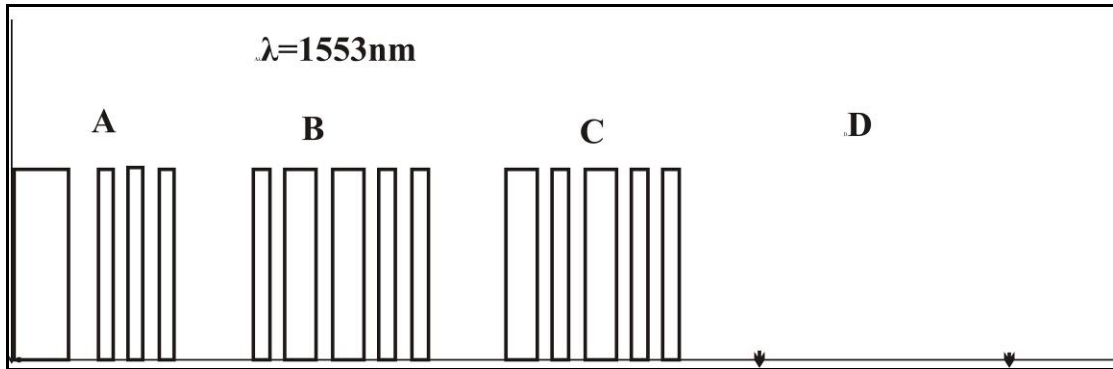
η διάρκεια μιας περιόδου του σήματος είναι  $\frac{160bits}{10Gbps} = 16nsec$ . Αυτό το σήμα, που φαίνεται

στη εικόνα 4.4, εισέρχεται ως σήμα ελέγχου στο πρώτο MZI. Όπως φαίνεται στην εικόνα

αυτή έχουμε αντιστοιχίσει τις χρονοσχισμές στα γράμματα Α,Β,С ακολουθώντας τη σειρά εμφάνισης, ενώ στην κενή χρονοσχισμή αντιστοιχίζεται το γράμμα D.

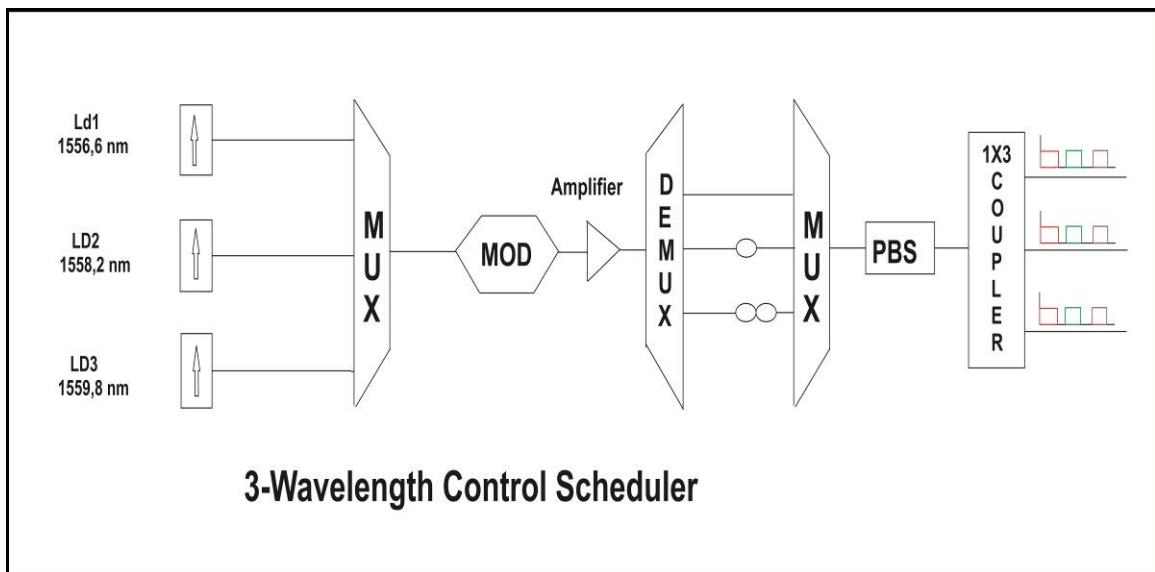


Εικόνα 4.3 Γεννήτρια δεδονοπακέτων και tester BER



Εικόνα 4.4 Τρία διαδοχικά δεδομένοπακέτα χωριζόμενα με time interval και ακολουθούμενα από μια κενή χρονοσχισμή.

➤ Δημιουργία περιβαλλουσών πακέτων



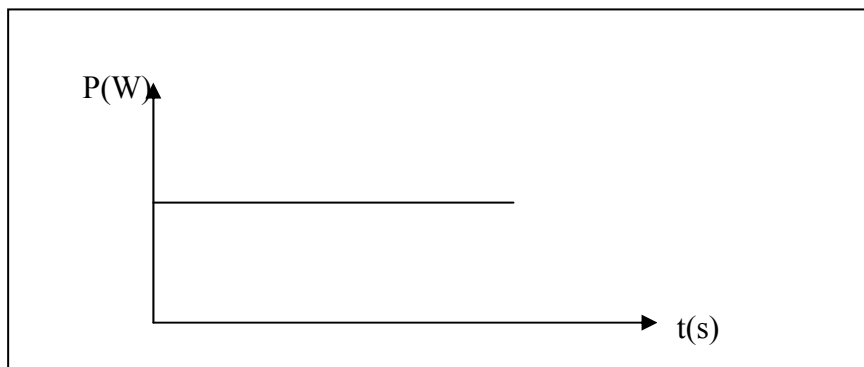
Εικόνα 4.5 Δημιουργία των περιβαλλουσών πακέτων

Σε αυτό το επίπεδο, έχουμε τη δημιουργία του CW σήματος που θα χρησιμοποιηθεί σαν είσοδος των MZI των τριών σταδίων που αποτελούν το κύκλωμα του αντιμεταθέτη χρονοσχησμών.

Στην αρχή του επιπέδου βρίσκονται τρεις διόδοι laser, οι οποίες επιφορτίζονται με την δημιουργία CW σημάτων σε τρία διαφορετικά μήκη κύματος (Εικόνα 4.5) :η πρώτη (LD1) παράγει CW σήμα στα 1556,6nm, η δεύτερη (LD2) στα 1558,2nm ενώ η τρίτη (LD3) στα 1559,8nm. Η Εικόνα 4.6 παρουσιάζει τη μορφή των CW σημάτων που παράγονται από τα laser.



Εικόνα 4.5 Γεννήτρια των CW σημάτων στα 3 μήκη κύματος.



Εικόνα 4.6 Μορφή του ενός CW σήματος

Τα 3 αυτά CW σήματα εισάγονται σε πολυπλέκτη 3x1 (MUX-AWG) (Εικόνα 4.7), στην έξοδο του οποίου λαμβάνουμε ένα πολυπλεγμένο κατά μήκος κύματος WDM σήμα. Στη συνέχεια το πολυπλεγμένο αυτό σήμα εισάγεται στον διαμορφωτή (Mod Ti:LiNbO<sub>3</sub>) (Εικόνα 4.8), ο οποίος διαμορφώνει το καθένα από τα τρία σήματα σε περιβάλλουσες πακέτων (τρεις συνολικά) (Εικόνα 4.9) οι οποίες είναι συγχρονισμένες, δηλαδή η μια

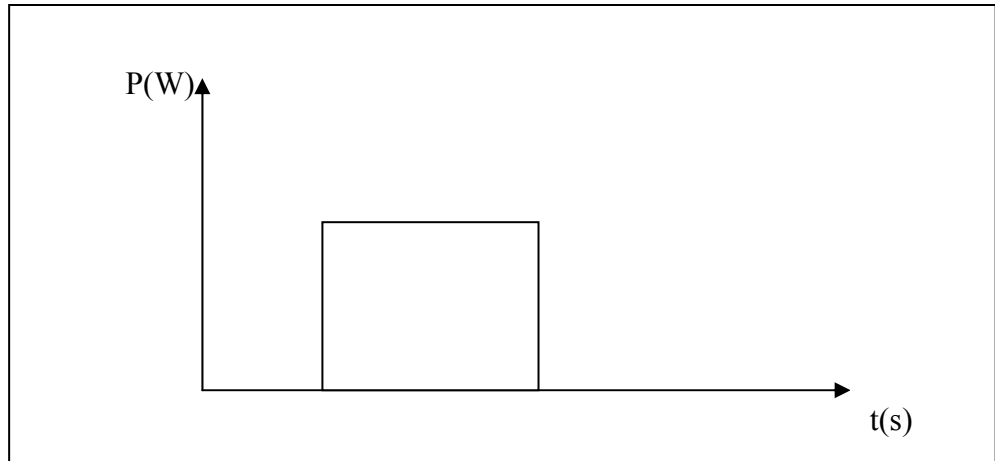
«πέφτει» πάνω στην άλλη. Η διάρκεια των περιβαλλουσών αυτών είναι ίση με τη διάρκεια των δεδομενοπακέτων που δημιούργησε ο 10Gb/s Incoming Data Packet Generator και που μελετήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Η διαδικασία αυτή δημιουργίας των περιβαλλουσών συνίσταται στον περιορισμό της ενέργειας κάθε CW σήματος σε ένα συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο σε αντίθεση με το CW σήμα που αντιστοιχεί σε μια σταθερή στάθμη ενέργειας που διαρκεί επ'άοριστον. Το χρονικό αυτό παράθυρο είναι ίσο με τη διάρκεια ενός δεδομενοπακέτου που όπως υπολογίσθηκε πριν είναι 2,5 nsec.



Εικόνα 4.7 Πολυπλέκτης AWG



Εικόνα 4.8 Διαμορφωτής (Mod Ti:LiNbO<sub>3</sub>)



Εικόνα 4.9 Περιβάλλουσα πακέτου όπως προκύπτει από την έξοδο του Modulator Ti:LiNbO<sub>3</sub>

Στη συνέχεια το σήμα εισάγεται στον αποπολυπλέκτη 1x3 (DEMUX) και από την έξοδό του προκύπτουν τρία σήματα τα οποία ουσιαστικά είναι τρεις περιβάλλουσες πακέτων σε μήκη κύματος 1556,6nm, 1558,2nm και 1559,8nm αντίστοιχα, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 4.10.



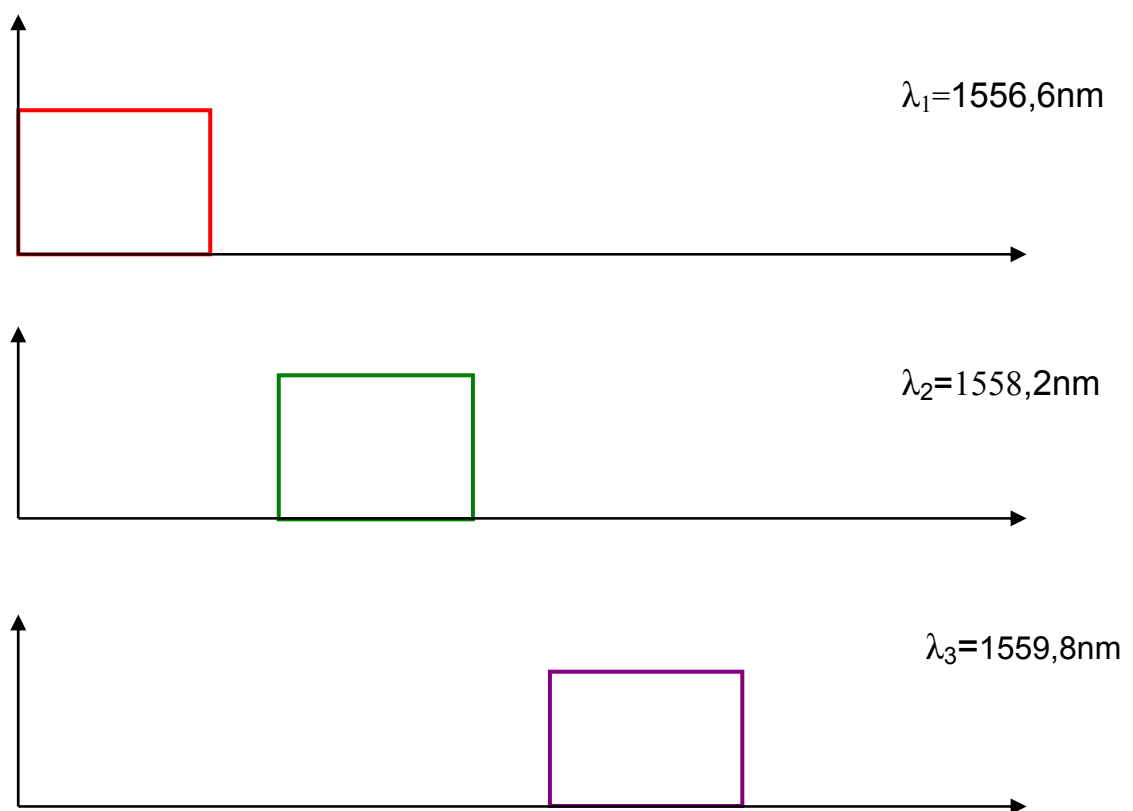


Εικόνα 4.10 Οι τρεις περιβάλλουσες πακέτων όπως προκύπτουν από την έξοδο του αποπολυπλέκτη.

Ακολουθούν τρία optical delay lines τα οποία είναι τμήματα οπτικής ίνας διαφορετικού μήκους το καθένα και χρησιμοποιούνται για να προσδώσουν συγκεκριμένη καθυστέρηση (ανάλογα με το μήκος τους) στα σήματα. Κάθε αποπλεγμένη περιβάλλουσα διέρχεται από ένα delay line ανάλογα με το μήκος κύματός της και οδεύει προς το επόμενο στοιχείο που είναι ένας πολυπλέκτης (MUX). Έτσι, η πρώτη περιβάλλουσα εισέρχεται κατευθείαν στον πολυπλέκτη, αφού δεν θέλουμε να υπάρχει καμία καθυστέρηση στο σήμα αυτό. Στη δεύτερη περιβάλλουσα εισάγεται μέσω σταθερού τμήματος οπτικής ίνας (0,8m) μια καθυστέρηση μιας χρονοσχισμής, ώστε το σήμα αυτό να αφιχθεί στην δεύτερη χρονοσχισμή, ενώ στην τρίτη παρεμβάλλεται καθυστέρηση δυο χρονοσχισμών (1,6m μήκος παρεμβαλλόμενης οπτικής ίνας), ώστε το σήμα αυτό να αφιχθεί στην τρίτη χρονοσχισμή και τα σήματα να μη συμπέσουν χρονικά. Οι αντιστοιχίες των μηκών οπτικής ίνας που παρεμβάλλεται με τις επιθυμητές χρονοκαθυστερήσεις προκύπτουν από τη σχέση  $s = \frac{T}{5}$

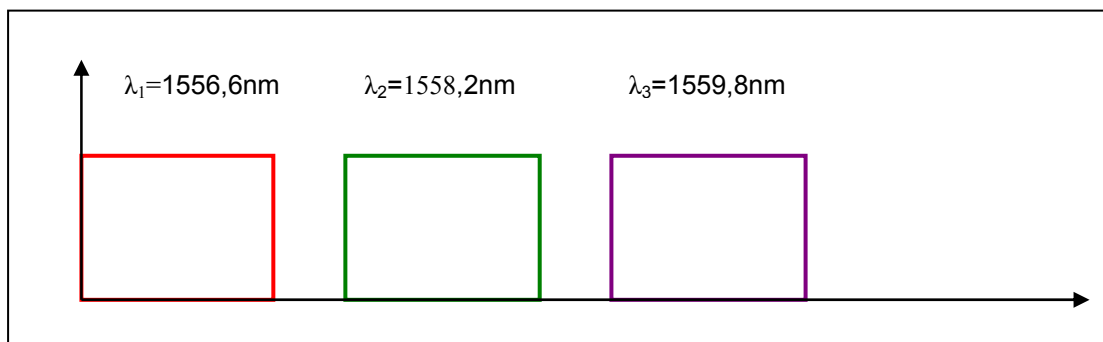
(m), (βλέπε παράγραφο 4.3), όπου  $s$  είναι το μήκος της οπτικής ίνας σε μέτρα που αντιστοιχεί σε χρονική καθυστέρηση  $T$  σε nsec. Έτσι, για χρονική καθυστέρηση μιας χρονοσχισμής δηλαδή  $T=4\text{nsec}$  (όπως αποδείχθηκε παραπάνω) είναι  $s=0,8\text{m}$ , ενώ για καθυστέρηση δύο χρονοσχισμών δηλαδή  $T=8\text{nsec}$ , είναι  $s=1,6\text{m}$ .

Με βάση την παραπάνω ανάλυση πριν την είσοδο στον πολυπλέκτη τα σήματα ακολουθούν τις γραφικές παραστάσεις που απεικονίζονται στην εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.11 Οι τρεις περιβάλλουσες πακέτων πριν την είσοδο του δεύτερου πολυπλέκτη.

Μετά την είσοδο των τριών σημάτων στον πολυπλέκτη και την πολύπλεξή τους με τη μέθοδο WDM, προκύπτει ένα σήμα που έχει τη μορφή της εικόνας 4.12, όπου ορίζουμε το κόκκινο χρώμα να αντιστοιχεί στο μήκος κύματος  $\lambda_1=1556,6\text{nm}$ , το πράσινο χρώμα στο  $\lambda_2=1558,2\text{nm}$  και το μωβ στο  $\lambda_3=1559,8\text{nm}$  στο παρόν αλλά και στα επόμενα γραφήματα.



Εικόνα 4.12 Οι τρεις περιβάλλουσες πακέτων πολυπλεγμένες σε ένα ενιαίο σήμα. Παρατηρούμε την ύπαρξη του σταθερού χρονικού διαστήματος ανάμεσα στα τρία σήματα το οποίο χρησιμεύει για τον διαχωρισμό αυτών.

Το πολυπλεγμένο σήμα εισέρχεται έπειτα σε ένα διαχωριστή πόλωσης (PBS-Polarization Beam Splitter), ώστε τα τρία διαφορετικού μήκους κύματος σήματα που θα προκύψουν μετά τον διαχωριστή και θα αποτελέσουν την είσοδο για τα MZI, να έχουν την ίδια πόλωση. Η λειτουργία του PBS συνίσταται στον διαχωρισμό της πόλωσης του σήματος στους δυο άξονες x και y και στην επιλογή της μιας εξ αυτών για το σήμα. Αυτή η διαδικασία είναι αναγκαία για να μπορούμε να ελέγχουμε την πόλωση και των τριών μηκών κύματος στην είσοδο του κάθε MZI χρησιμοποιώντας έναν κοινό ελεγκτή πόλωσης καθώς ως γνωστόν, το MZI είναι ένα πολωτικά ευαίσθητο στοιχείο .

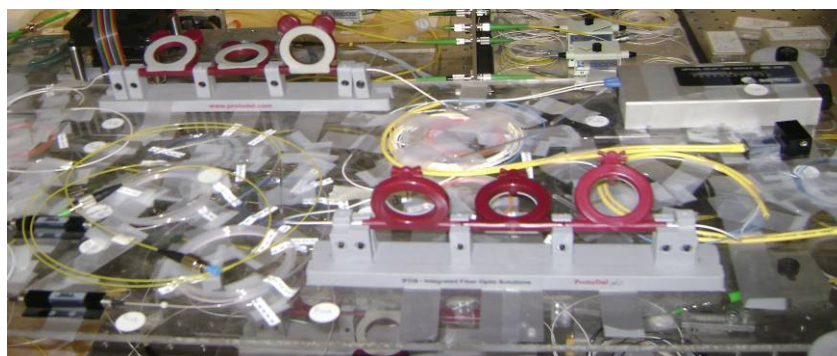
Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας πριν το πολυπλεγμένο σήμα φτάσει στους MZI αποτελεί ο διαχωριστής (1x3 coupler) ο οποίος δημιουργεί τρία αντίγραφα του αρχικού σήματος ίσης ισχύος η οποία ισούται με το 1/3 της ισχύος εισόδου στο διαχωριστή. Καθένα από τα τρία αυτά σήματα θα αποτελέσει την είσοδο του MZI για τα τρία απόμεινα στάδια, που αποτελούν και τα κύρια στάδια του TSI.

Ακολουθεί η περιγραφή των τριών σταδίων του TSI. Κάθε στάδιο TSI απασχολεί ένα συμβολόμετρο SOA-MZI και ένα κλάδο που περιλαμβάνει έναν πολυπλέκτη και έναν αποπολυπλέκτη ανάμεσα στους οποίους υπάρχει μια συστοιχία τριών γραμμών οπτικής

καθυστέρησης με διαφορετική χρονική καθυστέρηση η κάθε μία (bank delay). Πριν από κάθε θύρα εισόδου ή ελέγχου του MZI, υπάρχει ένας βραχίονας (branch) για τον έλεγχο της πόλωσης και της ισχύος των σημάτων, για την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας του MZI(Εικόνα 4.13).

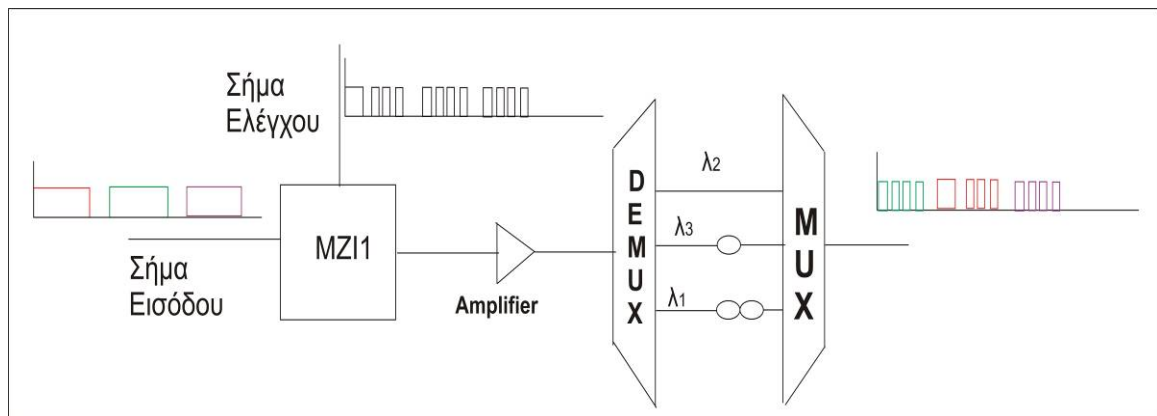
Στη συγκεκριμένη πειραματική υλοποίηση το κάθε MZI λειτουργεί ως μετατροπέας μήκους κύματος, βασισμένο στο φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης (XPM) που προκαλείται από το σήμα ελέγχου, παραχωρώντας σε κάθε πακέτο που εμφανίζεται στη θύρα ελέγχου του ένα από τα τρία μήκη κύματος όπως αυτά εισέρχονται από τη θύρα εισόδου.

Στο τελευταίο στάδιο (το οποίο ονομάζουμε εκ παραδρομής 4<sup>ο</sup> στάδιο) εκτελείται μετατροπή μήκους κύματος στο τελικό σήμα. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει το τέταρτο MZI από την ολοκληρωμένη συστοιχία των τεσσάρων MZI που χρησιμοποιούμε στο σύστημά μας.



Εικόνα 4.13 Δύο βραχίονες ελέγχου ισχύος και πόλωσης των σημάτων.

➤ 1ο Στάδιο



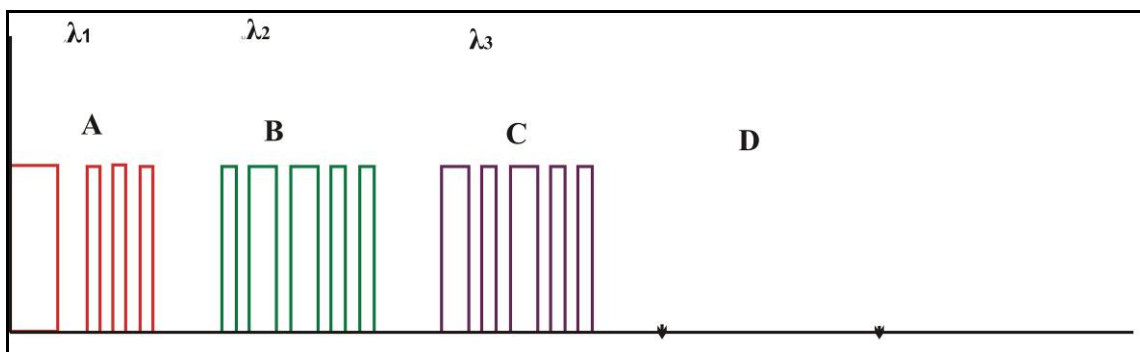
Εικόνα 4.14 Το πρώτο στάδιο

Η εικόνα 4.14 δείχνει το πρώτο στάδιο όπου πραγματοποιείται η πρώτη αντιμετάθεση των πακέτων που εμφανίζονται στην θύρα ελέγχου του MZI1.

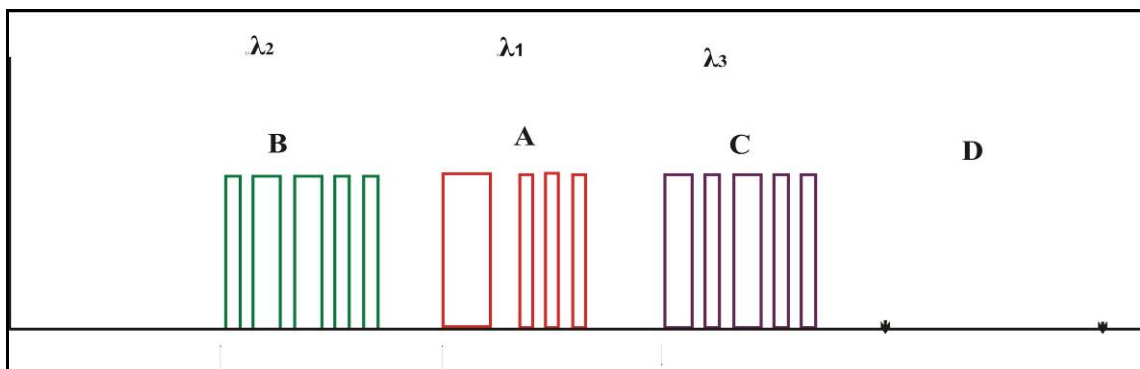
Συγκεκριμένα στη θύρα ελέγχου του HMZI1 εισάγεται το σήμα που περιλαμβάνει τα δεδομένοπακέτα της Εικόνα 4.4 ενώ στη θύρα εισόδου του εισάγεται το ένα από τα τρία τμήματα του πολυπλεγμένου σήματος των περιβαλλουσών στα τρία μήκη κύματος που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.12. Βέβαια, όπως έχουμε επαναλάβει παραπάνω, τα σήματα περνούν πρώτα από τον βραχίονα ελέγχου πόλωσης και ισχύος πριν εισέλθουν στον MZI (αυτό συμβαίνει και για κάθε MZI επόμενου σταδίου, οπότε θεωρείται δεδομένο παρακάτω). Τα σήματα ελέγχου και εισόδου εισέρχονται στον MZI με ομόροπη διάδοση (co-propagating configuration) καθώς βρίσκονται σε διαφορετικά μήκη κύματος, και έτσι ο κίνδυνος παρεμβολής μεταξύ τους είναι μηδαμινός.

Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράψαμε στην ανωτέρω παράγραφο, η έξοδος του πρώτου MZI θα είναι το σήμα που φαίνεται στην Εικόνα 4.15 και που δείχνει την μετατροπή των χρονοσχισμών που έχουν εισέλθει από την θύρα ελέγχου στα μήκη κύματος που έχουν εισέλθει από την θύρα εισόδου, με τη σειρά που αυτές εισέρχονται (δηλαδή η χρονοσχισμή A θα γραφτεί στο λ1, η B στο λ2 και η C στο λ3). Το σήμα αυτό εισέρχεται έπειτα στον αποπολυπλέκτη (DEMUX) και καθεμία από τις χρονοσχισμές υφίσταται μια προκαθορισμένη χρονική καθυστέρηση ανάλογα με το μήκος κύματος που της έχει ανατεθεί και που έχει προκύψει από τον αλγόριθμο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα εισάγεται μηδενική καθυστέρηση για τη χρονοσχισμή B (1<sup>ος</sup> βραχίονας), καθυστέρηση μιας χρονοσχισμής για τη χρονοσχισμή C (2<sup>ος</sup> βραχίονας) και 2 χρονοσχισμών (3<sup>ος</sup> βραχίονας)

για τη χρονοσχισμή A. Τα τμήματα οπτικών ινών κάθε χρονικής καθυστέρησης αντιστοιχούν σε 0 m για τον πρώτο βραχίονα, 0,8 m για τον δεύτερο βραχίονα και 1,6 m για τον τρίτο βραχίονα. Οι καθυστερημένες χρονοσχισμές εισέρχονται στον πολυπλέκτη (MUX) που ακολουθεί και σαν αποτέλεσμα προκύπτει στην έξοδο του σταδίου ένα ενιαίο σήμα με τις χρονοσχισμές αναδιαταγμένες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.16. Έτσι η ακολουθία (A,B,C,D) μετατρέπεται στη (B,A,C,D) αφού ανταλλάξαμε τα A και B ενώ το σήμα αυτό θα αποτελέσει και σήμα ελέγχου για τον MZI του δεύτερου σταδίου που ακολουθεί. Παρατηρούμε ότι όλες οι χρονοσχισμές έχουν μετατεθεί προς τα δεξιά όπως προκύπτει από τις καθυστερήσεις που τους αναλογούν και φυσικά είναι πιο δεξιά από την χρονοσχισμή B η οποία θέλουμε να είναι πρώτη στη σειρά. Γι' αυτό το λόγο και αφού αυτή καταλάμβανε τη δεύτερη χρονοσχισμή κατά την έξοδό τους από τον MZI, η αρχή της αλληλουχίας των χρονοσχισμών θα ξεκινάει από τη δεύτερη χρονοσχισμή. Ταυτόχρονα μετακινούμε νοητά την αρχή των αξόνων στο σημείο αυτό ώστε στην είσοδο του επόμενου σταδίου η χρονοσχισμή B να είναι τοποθετημένη στην πρώτη χρονοσχισμή, η A στην δεύτερη, κ.ο.κ. Την ίδια νοητή διαδικασία εκτελούμε στην έξοδο κάθε σταδίου.

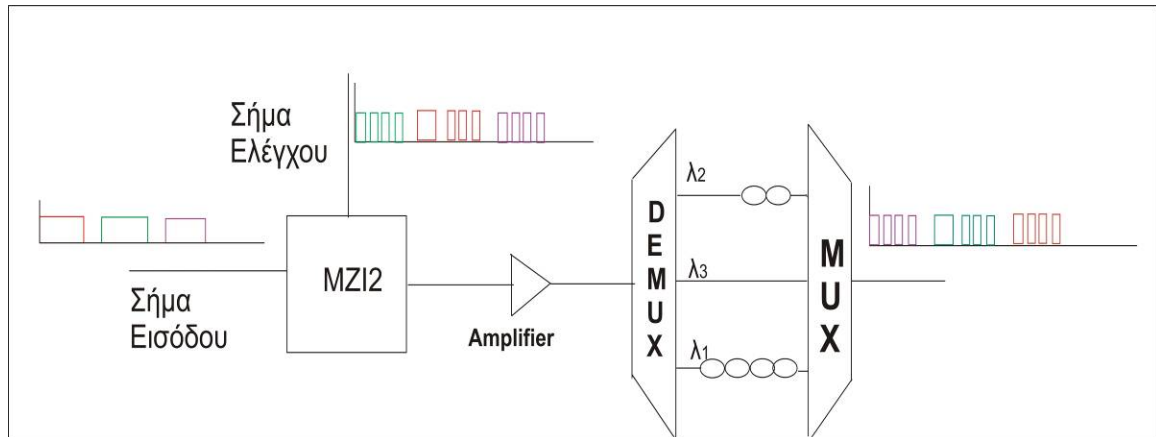


Εικόνα 4.15 Έξοδος του πρώτου MZI



Εικόνα 4.16 Έξοδος του πρώτου σταδίου και σήμα ελέγχου για το δεύτερο στάδιο.

➤ 2ο Στάδιο

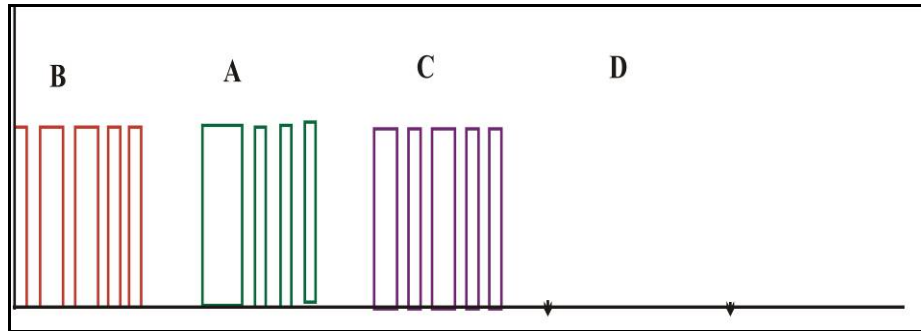


Εικόνα 4.17 Το δεύτερο στάδιο

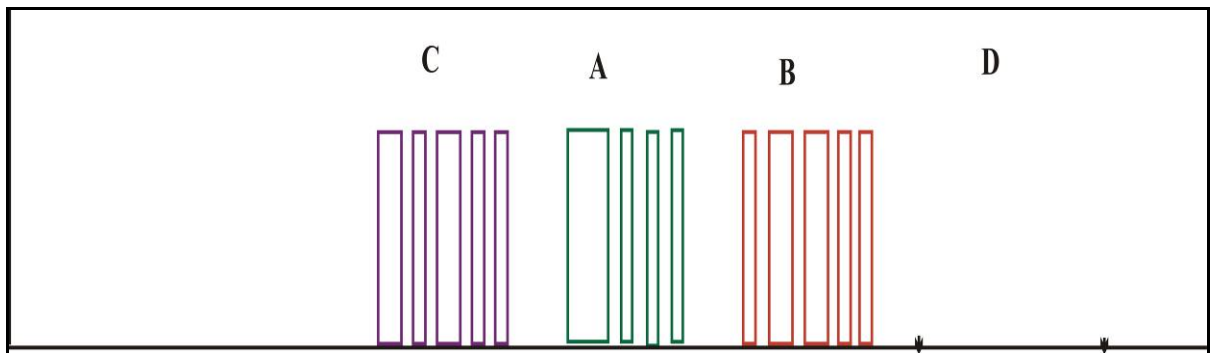
Στο δεύτερο στάδιο, που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.17, πραγματοποιείται η δεύτερη αντιμετάθεση των πακέτων που εμφανίζονται στην θύρα ελέγχου του MZI2.

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω το σήμα της Εικόνας 4.16 αποτελεί το σήμα ελέγχου για τον MZI2 ενώ σήμα εισόδου είναι το ένα τρίτο του σήματος που περνάει από τον διαχωριστή κατά την έξοδο του 3-Wavelength Control Scheduler όπως και στον MZI1 και φαίνεται στην Εικόνα 4.12. Σε αντίθεση με το προηγούμενο στάδιο το σήμα τροφοδοτείται στη θύρα ελέγχου του δεύτερου MZI σε αντίθετη κατεύθυνση διάδοσης με το σήμα εισόδου (counter propagating configuration) επειδή εδώ τα σήματα έχουν τα ίδια μήκη κύματος ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ), οπότε επιβάλλεται η αντίθετη κατεύθυνση διάδοσης ώστε να μην παρεμβάλουν. Η λειτουργία του MZI είναι ίδια όπως και στο προηγούμενο στάδιο και έχει σκοπό την μετατροπή του μήκους κύματος των πακέτων που απασχολούν τις χρονοσχισμές, ανάλογα με τη σειρά που αυτές εισέρχονται στον MZI, δηλαδή η B θα γραφτεί στο  $\lambda_1$ , η A στο  $\lambda_2$  και η C στο  $\lambda_3$  (Εικόνα 4.18). Ακολουθεί μια διαδικασία όμοια με αυτή του προηγούμενου σταδίου: η έξοδος του MZI αποπολυπλέκεται έτσι ώστε κάθε χρονοσχισμή, ανάλογα με το μήκος κύματός που της αντιστοιχεί, να υποστεί μια προκαθορισμένη ( από τον αλγόριθμο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3) καθυστέρηση. Ο πολυπλέκτης που ακολουθεί πολυπλέκει και πάλι τις χρονοσχισμές μεταξύ τους. Η καθυστέρηση αντιστοιχεί σε 0 χρονοσχισμές άρα 0 m μήκος οπτικής ίνας για τη χρονοσχισμή C που περνάει από τον 2<sup>ο</sup> βραχίονα, 2 χρονοσχισμές άρα 1,6 m μήκος οπτικής ίνας για τη χρονοσχισμή A που περνάει από τον 1<sup>ο</sup> βραχίονα και 4 χρονοσχισμές άρα 3,2 m μήκος οπτικής ίνας για τη χρονοσχισμή B που περνάει από 3<sup>ο</sup> βραχίονα. Έτσι τελικά στην έξοδο του δεύτερου σταδίου

η ακολουθία (B,A,C,D) έχει μετατραπεί στην (C,A,B,D) η οποία φαίνεται Εικόνα 4.19 και θα αποτελέσει το σήμα ελέγχου του τρίτου σταδίου. Παρατηρούμε όπως και στην έξοδο του προηγούμενου σταδίου ότι οι χρονοσχισμές έχουν μετατεθεί δεξιά στον άξονα του χρόνου, λόγω της νέας καθυστέρησης που έχουν υποστεί. Σε αυτό το στάδιο όμως θέλουμε να προηγείται το πακέτο C των άλλων πακέτων, γι' αυτό και επειδή η χρονοσχισμή C κατελάμβανε κατά την έξοδό της από τον MZI τη τρίτη χρονοσχισμή η ακολουθία (C,A,B,D) ξεκινάει από τη τρίτη χρονοσχισμή.



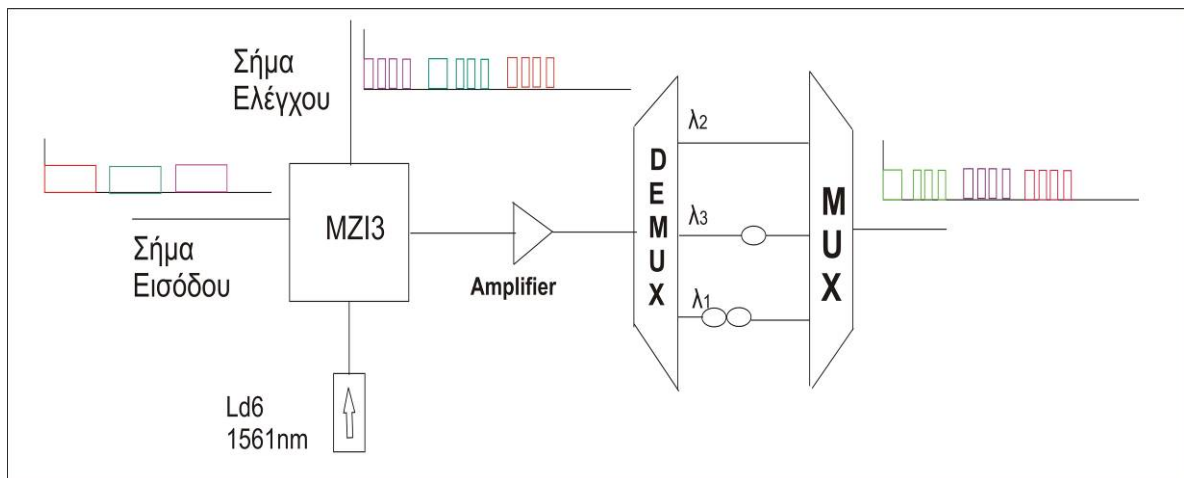
Εικόνα 4.18 Έξοδος δεύτερου MZI



Εικόνα 4.19 Έξοδος δεύτερου σταδίου και σήμα ελέγχου για MZI τρίτου σταδίου.



➤ 3ο Στάδιο



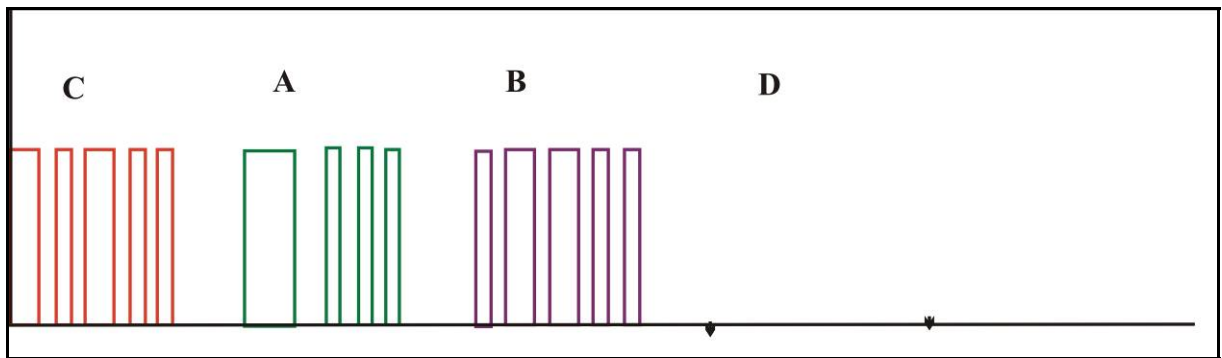
Εικόνα 4.20 Τρίτο στάδιο

Στο τρίτο στάδιο, που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.20, πραγματοποιείται η τρίτη και τελευταία αντιμετάθεση των πακέτων που εμφανίζονται στην θύρα ελέγχου του MZI3.

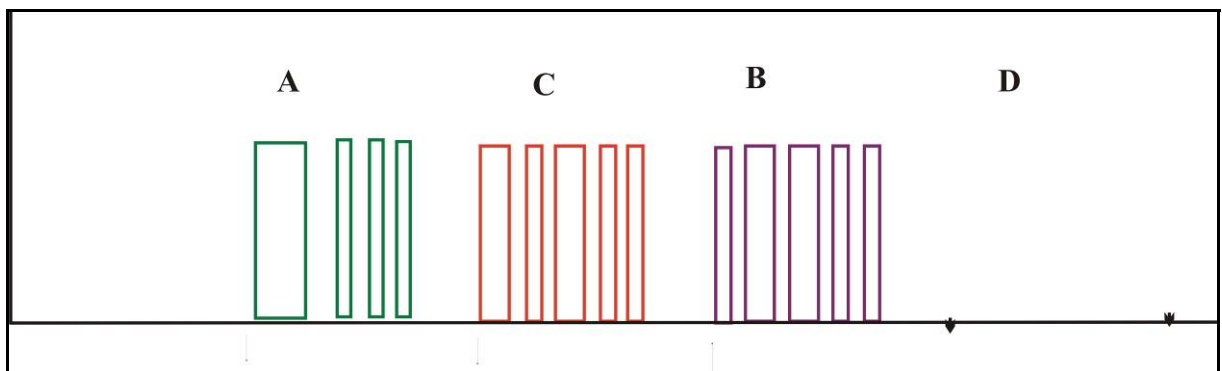
Ειδικότερα, στην θύρα ελέγχου του MZI3 εισάγεται η έξοδος του δεύτερου σταδίου, ενώ σήμα εισόδου είναι το τελευταίο τρίτο από την έξοδο του σταδίου 3-Wavelength Control Scheduler. Τα σήματα εισόδου και ελέγχου εισέρχονται με αντίθετη κατεύθυνση διάδοσης (counter propagating configuration) όπως και στο δεύτερο στάδιο ώστε να μη δημιουργούνται παρεμβολές. Αποτέλεσμα της διέλευσης των πακέτων από τον MZI3 είναι η μετατροπή του μήκους κύματος του πακέτου της χρονοσχισμής C σε  $\lambda_1$ , της A σε  $\lambda_2$  και της B σε  $\lambda_3$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.21. Η έξοδος του MZI3 αποπολυπλέκεται, προσδίδεται μηδενική καθυστέρηση στη χρονοσχισμή A που διέρχεται από τον 1<sup>ο</sup> βραχίονα, καθυστέρηση μιας χρονοσχισμής στη χρονοσχισμή B που διέρχεται από τον 2<sup>ο</sup> βραχίονα και δύο χρονοσχισμών στη χρονοσχισμή C που διέρχεται από τον 3<sup>ο</sup> βραχίονα μέσω της παρεμβολής τμήματος οπτικής ίνας μήκους 0m, 0,8m και 1,6m αντίστοιχα σε κάθε βραχίονα και τελικά οι χρονοσχισμές πολυπλέκονται ξανά. Η έξοδος του τρίτου σταδίου φαίνεται στην Εικόνα 4.22 όπου η ακολουθία (C,A,B,D) έχει μετατραπεί στην (A,C,B,D). Πάλι εδώ φαίνεται η μετατόπιση των χρονοσχισμών προς τα δεξιά στον άξονα του χρόνου λόγω της καθυστέρησης που έχουν υποστεί, ενώ η ακολουθία ξεκινάει από τη δεύτερη χρονοσχισμή, που ήταν η αρχική θέση του A. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τον αλγόριθμο για το TSI οι καθυστερήσεις των χρονοσχισμών στο στάδιο αυτό είναι ίσες με τις αντίστοιχες του σταδίου 1 (αυτό δε σημαίνει ότι προσδίδεται στις χρονοσχισμές η ίδια καθυστέρηση

όπως στο πρώτο στάδιο, αλλά ότι στις χρονοσχισμές που έχουν κοινό μήκος κύματος στα δύο στάδια προσδίδεται ίδια καθυστέρηση).

Στο στάδιο αυτό παρατηρούμε εκτός των άλλων στοιχείων και την ύπαρξη μιας διόδου laser (LD6) στα 1561nm η οποία συνδέεται με τον MZI3. Ο σκοπός που επιτελεί είναι να διατηρεί κορεσμένους τους SOAs του συμβολομέτρου του τρίτου σταδίου έτσι ώστε το MZI να απορροφά τη διαμόρφωση πλάτους που έχει υποστεί το σήμα ελέγχου λόγω της μετάβασής του από τα προηγούμενα δύο στάδια και τελικά το σήμα στην έξοδο να προκύπτει βελτιωμένο, αφού μετά από τρία στάδια επεξεργασίας το σήμα ελέγχου έχει υποστεί διαπλάτυνση και εξασθένηση λόγω θορύβου.

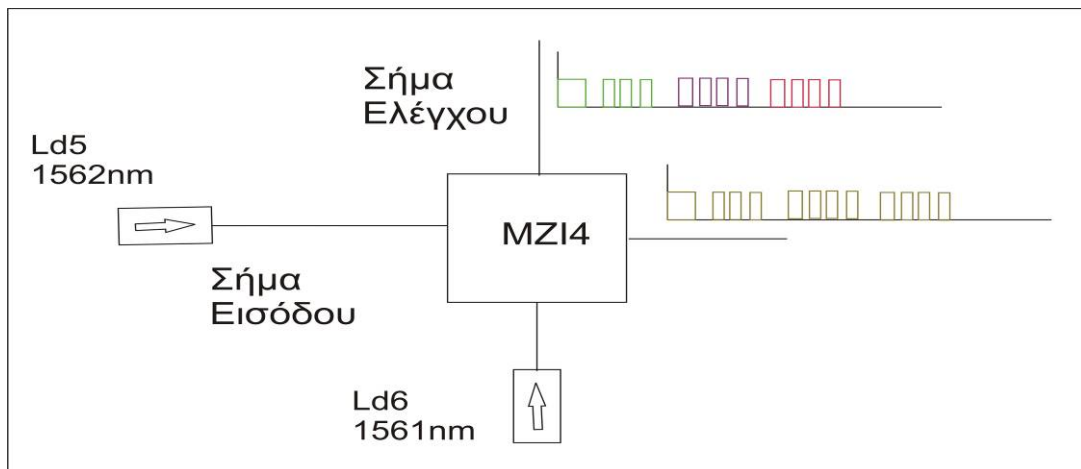


Εικόνα 4.21 Έξοδος τρίτου MZI



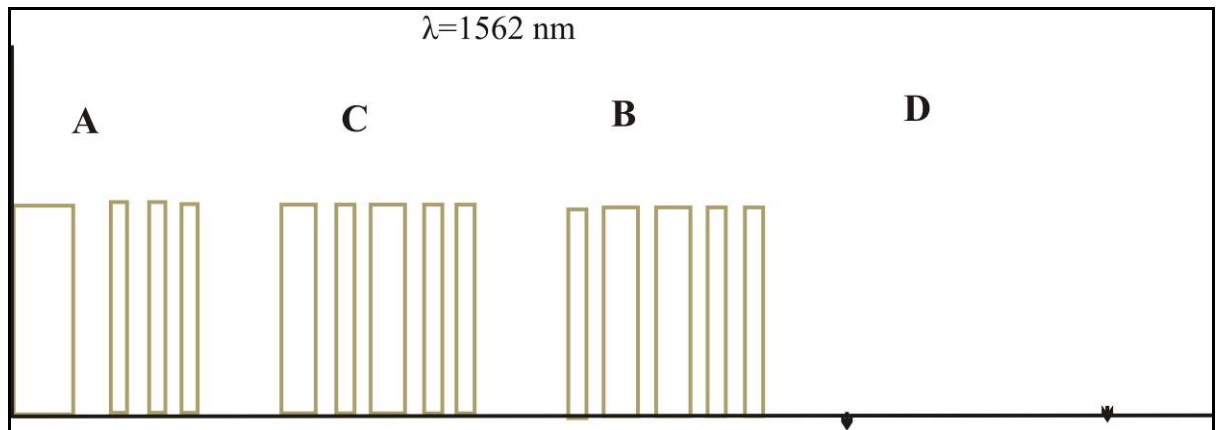
Εικόνα 4.22 Έξοδος τρίτου σταδίου και σήμα ελέγχου 4<sup>ου</sup> σταδίου.

➤ 4ο Στάδιο



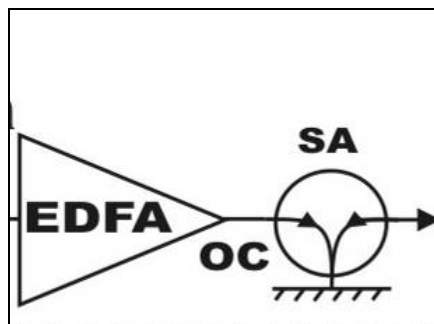
Εικόνα 4.23 Τέταρτο στάδιο

Το τέταρτο στάδιο του κυκλώματος που υλοποιήθηκε πειραματικά (Εικόνα 4.23), λειτουργεί ως Μονάδα Ελέγχου Δρομολόγησης και δεν αποτελεί στάδιο του TSI. Είναι ένα στάδιο στο οποίο χρησιμοποιείται MZI (MZI4) και δύο δίοδοι laser, ο LD5 στα 1562 nm και ο LD6 στα 1561 nm. Σαν σήμα ελέγχου στον MZI4 χρησιμοποιείται το σήμα στην έξοδο του τρίτου σταδίου που περιέχει τα πακέτα και που φαίνεται στην Εικόνα 4.22 ενώ σήμα εισόδου είναι ένα CW σήμα που παράγεται από τη δίοδο LD5. Τα σήματα αυτά τροφοδοτούνται στον MZI4 ομόρροπα (co-propagating configuration) μιας και τα σήματα δεν είναι στο ίδιο μήκος κύματος και έτσι δεν υπάρχει κίνδυνος παρεμβολής. Στόχος είναι η εγγραφή και των τριών πακέτων σε ένα κοινό μήκος κύματος (το 1562 nm), ώστε το τελικό σήμα εξόδου του κυκλώματος να μπορεί να δρομολογηθεί κατάλληλα από ένα κόμβο δρομολόγησης μήκους κύματος. Η δίοδος LD6 χρησιμεύει για τον ίδιο ακριβώς λόγο όπως και στο στάδιο 3, δηλαδή να κρατά κορεσμένους τους SOAs του τέταρτου συμβολομέτρου MZI έτσι ώστε αυτό να απορροφά τη διαμόρφωση πλάτους που έχει το σήμα ελέγχου και τελικά το σήμα στην έξοδο να προκύπτει βελτιωμένο. Στην εικόνα 4.24 παρατηρούμε την έξοδο του τέταρτου σταδίου, όπου οι χρονοσχισμές βρίσκονται στο ίδιο μήκος κύματος  $\lambda=1562$  nm.



Εικόνα 4.24 Έξοδος τέταρτου σταδίου

- *Κύκλωμα συμπίεσης NRZ παλμών - Απορροφητής κορεσμού*



Εικόνα 4.25 Κύκλωμα συμπίεσης NRZ παλμών

Το τελικό στάδιο από το οποίο πρέπει να περάσει το σήμα για να φτάσει στην έξοδο και να δρομολογηθεί (Εικόνα 4.25), είναι το κύκλωμα συμπίεσης NRZ παλμών. Αυτό αποτελείται από έναν ενισχυτή EDFA, που ενισχύει το σήμα ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει σωστά ο SA που χρειάζεται υψηλή κορυφή ισχύος των σημάτων όπως αναφέρεται και παρακάτω, και από τον Απορροφητή Κορεσμού (Saturable Absorber -SA), ο οποίος χρησιμοποιείται για βελτιωτικούς λόγους πάνω στο σήμα. Σε αυτό το σημείο και μετά από τόσα στάδια επεξεργασίας διαμέσου των MZI, το σήμα έχει διευρυνθεί εξαιτίας των SOAs. Για την αντιμετώπιση του δυσμενούς αυτού αποτελέσματος αλλά και για την απαλοιφή του θορύβου και την βελτίωση του SNR κρίνεται απαραίτητη η χρήση του τελικού αυτού σταδίου. Ο απορροφητής κορεσμού παρουσιάζει χαρακτηριστική λειτουργίας που φαίνεται στην Εικόνα 4.26, ανάλογα με το SRAM που χρησιμοποιεί [4.3]. Η καμπύλη αυτή

δείχνει το μήκος κύματος το οποίο απορροφά πλήρως και που αντιστοιχεί στο χαμηλότερο σημείο της καμπύλης. Μέσω ρύθμισης της θερμοκρασίας μπορούμε να μετακινήσουμε την καμπύλη 1560 προς το μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει δηλαδή τα 1562 nm του τελικού σήματος, ώστε να απορροφηθούν προϊόντα εσωτερικού θορύβου (inband noise). Για να είναι όμως αυτό εφικτό, είναι απαραίτητο το σήμα να έχει υψηλή ισχύ και για αυτό το λόγο έχει προστεθεί στο κύκλωμα ένας ενισχυτής οπτικής ίνας (EDFA).

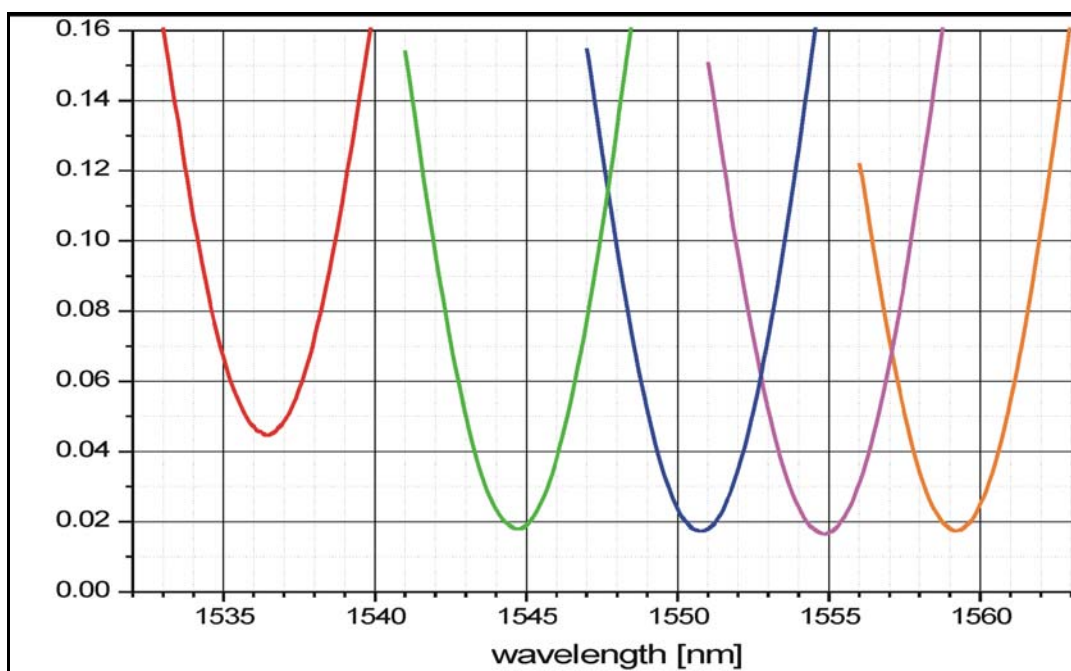
Στις εικόνες 4.27 και 4.28 παρουσιάζεται το κύκλωμα του απορροφητή κορεσμού που αποτελεί έναν οπτικό κυκλοφορητή με τον RSAM (FC-SANOS-15XX-TEC) να συνδέεται στη θύρα 2. Ένας οπτικός κυκλοφορητής είναι ένα ειδικό στοιχείο των οπτικών ινών, που μπορεί να διαχωρίσει οπτικά σήματα που ταξιδεύουν σε αντίθετη κατεύθυνση σε μια οπτική ίνα. Είναι μια τρίθυρη συσκευή που επιτρέπει στο φως να ταξιδεύει σε μια μόνον κατεύθυνση - το σήμα που μπαίνει στη θύρα 1 κατευθύνεται προς τη θύρα 2, το σήμα που μπαίνει στη θύρα 2 στην θύρα 3. Αυτό σημαίνει ότι αν μια ποσότητα φωτός που εκλύεται από την θύρα 2 ανακλαστεί πίσω στον κυκλοφορητή, δεν θα οδηγηθεί πίσω στη θύρα 1, αλλά στη θύρα 3 [4.3]. Έτσι, στην περίπτωση μας το σήμα εξόδου του 4<sup>ου</sup> σταδίου που εισάγεται ως είσοδος στην θύρα 1 του κυκλοφορητή, οδηγείται στην θύρα 2 που βρίσκεται ο RSAM, και έπειτα το επεξεργασμένο σήμα από τον RSAM που μπαίνει στον κυκλοφορητή από τη θύρα 2 οδηγείται στη θύρα 3.

Ο RSAM που είναι συντονισμένος ανακλαστήρας-απορροφητής κορεσμού, έχει ισχυρό μη γραμμικό χαρακτήρα. Για χαμηλό επίπεδο σήματος εισόδου η διαπερατότητα του FC-SANOS είναι μόλις 3% (97% απώλεια), ενώ παλμοί υψηλής έντασης μεταδίδονται με μια μέγιστη απώλεια 50 %. Η απαιτούμενη μέγιστη ισχύς παλμού για τον κορεσμό είναι 50 mW, που σημαίνει ότι το σήμα πρέπει να έχει ισχύ κορυφής τουλάχιστον ίση με 50 mW για να μην απορριφθεί από τον απορροφητή. Επειδή το RSAM είναι μια συσκευή συντονισμού, ο θόρυβος καταστέλεται μόνο στο μήκος κύματος συντονισμού. Η απομόνωση του σήματος εισόδου είναι καλύτερη από 50 dB. Το RSAM ρυθμίζεται μέσω θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας μια θερμοηλεκτρική συσκευή θέρμανσης/ψύξης (TEC), για τον καλύτερο συντονισμό στο επιθυμητό μήκος κύματος συντονισμού, με μια μέγιστη μετατόπιση των 6nm. [4.2]

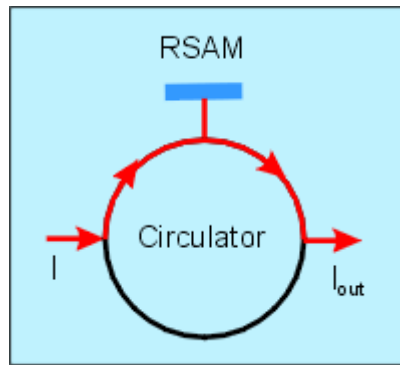
Με το επίπεδο αυτό στη θερμοκρασία του απορροφητή κορεσμού πετύχαμε λοιπόν την αποκοπή των χαμηλού επιπέδου ισχύος σημάτων στα 1562nm. Τα σήματα αυτά αποτελούν τα άκρα των παλμών και η αποκοπή τους συνεπάγεται το «σμίλευμά» τους οπότε και τη συμπίεση τους κρατώντας μόνο το τμήμα τους με την υψηλή ισχύ. Επιπλέον αποκόπτονται και τα προϊόντα εσωτερικού θορύβου με αποτέλεσμα τη βελτίωση του

σηματοθορυβικού λόγου του σήματος στην έξοδο του απορροφητή κορεσμού. Η βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου SNR εξαρτάται από τον SNR του σήματος εισόδου. Αν το επίπεδο θορύβου του σήματος εισόδου είναι χαμηλό, η καταπίεση του θορύβου είναι υψηλή και αντίστροφα. Ο λόγος της εξάρτησης αυτής είναι ο μερικός κορεσμός του RSAM σε περίπτωση υψηλού επιπέδου θορύβου.

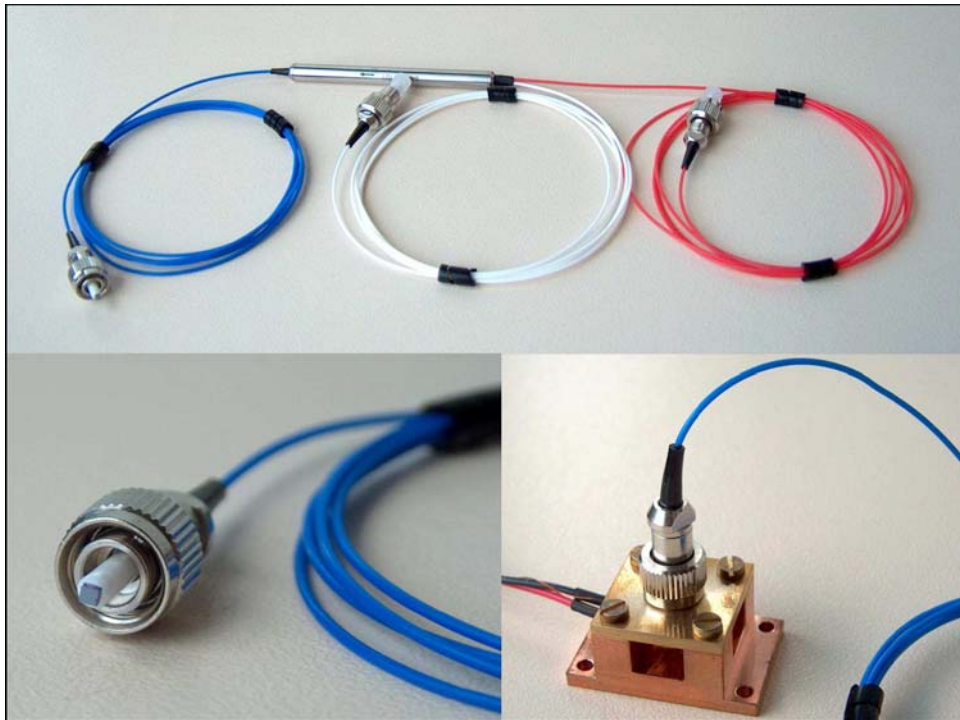
Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι κατορθώσαμε μέσα από 3 στάδια TSI και ένα επιπλέον στάδιο επεξεργασίας (μετατροπή μήκους κύματος) να πετύχουμε αντιμετάθεση οπτικών πακέτων σε καθαρά οπτικό επίπεδο και συγκεκριμένα να μετατρέψουμε την αρχική ακολουθία χρονοσχισμών (A,B,C,D) στην ακολουθία (A,C,B,D). Πιο αναλυτικά πετύχαμε αντιμετάθεση χρονοσχισμών με μετατροπή μήκους κύματος σε οπτικό επίπεδο στα 10Gbps και κατά συνέπεια αποφύγαμε την ανεπιθύμητη οπτικο-ηλεκτρονική μετατροπή δεδομένων και συγχρόνως την πιθανά περιορισμένη ταχύτητα μεταγωγής των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Αποτελείται από



Εικόνα 4.26 Μήκος κύματος συντονισμού ενός FC-SANOS ανάλογα με το RSAM που χρησιμοποιεί. Η κάθε καμπύλη 1560 που μας ενδιαφέρει με κατάλληλη ρύθμιση της θερμοκρασίας δύναται να μετακινηθεί προς το μήκος κύματος 1562nm.



Εικόνα 4.27 Απορροφητής κορεσμού



Εικόνα 4.28 Πάνω: ανακυκλωτής με ενσωματωμένο RSAM

(στο μπλε καλώδιο)

Κάτω αριστερά: RSAM στο ομοαξονικό καλώδιο

Κάτω δεξιά: TEC με RSAM οπτικής ίνας

### 4.3 Σημείωση

Παρατίθεται παρακάτω η απόδειξη της σχέσης  $s = \frac{T}{5}$ .

Το φως στην οπτική ίνα ταξιδεύει με την ταχύτητα ομάδας  $u_g$  που ισούται με

$$u_g = \frac{s}{T} \Rightarrow s = u_g \cdot T \quad . \text{ (A)}$$

Είναι γνωστό ότι  $n_g = \frac{c}{u_g} \Rightarrow u_g = \frac{c}{n_g}$  , (B)

όπου  $n_g$  ο συντελεστής διάθλασης και  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$  η ταχύτητα του φωτός. Όμως από το διάγραμμα του συντελεστή διάθλασης του γυαλιού σε συνάρτηση με το μήκος κύματος προκύπτει ότι ο συντελεστής διάθλασης  $n_g$  για μήκος κύματος  $1,55 \mu\text{m}$  είναι  $n_g = 1,462$ . Από τις σχέσεις (A) και (B) προκύπτει

$$s = \frac{c}{n_g} \cdot T$$

και αντικαθιστώντας τις γνωστές τιμές καταλήγουμε στη σχέση (Γ) που είναι αυτή που θέλουμε να αποδείξουμε:

$$s = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ (m/sec)}}{1,462} \cdot T(\text{sec}) \Rightarrow s = 2,05 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9} \cdot T(\text{nsec}) = 0,2 \cdot T(\text{nsec}) \Rightarrow$$
$$s = \frac{T(\text{nsec})}{5} \text{ (m)} \text{ (}\Gamma\text{)}$$



## **4.4 Βιβλιογραφία**

[4.1] Implementation of an All-Optical Time-Slot-Interchanger Architecture, O. Zouraraki, K. Yiannopoulos, P. Zakynthinos, D. Petrantonakis, E. Varvarigos, A. Poustie, G. Maxwell and H. Avramopoulos

[4.2] FC-SANOS-15XX-TEC Preliminary data sheet of fiber-coupled SANOS @  $\lambda = 1530$  ... 1560 nm with TEC SANOS – Saturable noise suppressor

[http://www.batop.de/informations/SANOS\\_infos.html](http://www.batop.de/informations/SANOS_infos.html)

[4.3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_circulator](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_circulator)

# 5

## Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που προηγήθηκε αναλύθηκε λεπτομερώς η διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος και περιγράφηκε η πειραματική διάταξη. Περιληπτικά, είδαμε ότι η πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο αρχικά στάδια για την παραγωγή των χρονοσχισμών και των σημάτων στα επιθυμητά μήκη κύματος, τρία στάδια που αποτελούν το κύριο μέρος του TSI και ένα τελικό στάδιο για την έξοδο των χρονοσχισμών σε κοινό μήκος κύματος και τη βελτίωση του σήματος εξόδου. Τελικά καταλήξαμε στο αποτέλεσμα που είναι η επίτευξη αντιμετάθεσης 3 οπτικών πακέτων (τεσσάρων χρονοσχισμών) σε καθαρά οπτικό επίπεδο.

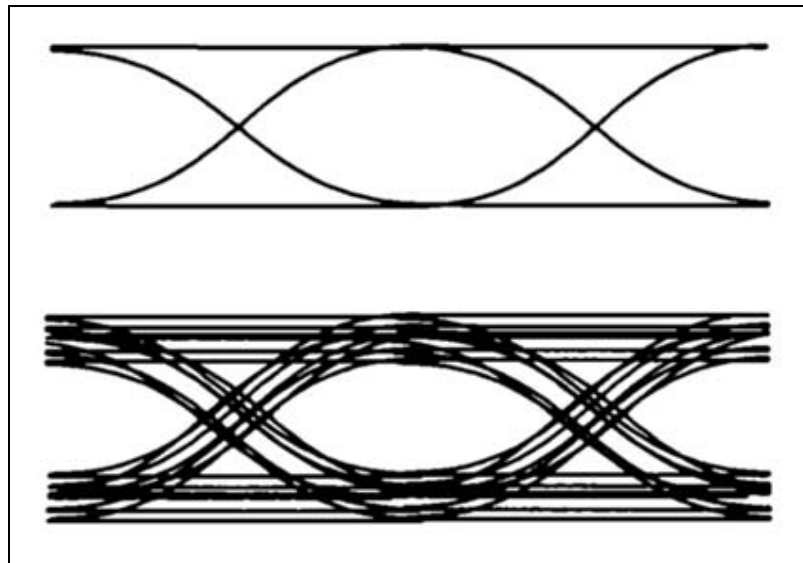
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν τα πειραματικά αποτελέσματα όπως τα είδαμε στον παλμογράφο καθώς και η ανάλυση των αντίστοιχων διαγραμμάτων ματιού (Eye-Diagram), μια διαδικασία που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Επίσης, θα παρατεθεί και το διάγραμμα του ρυθμού σφαλμάτων (BER) ανάλογα με το κάθε επίπεδο του πειράματος και θα καταλήξουμε στα συμπεράσματα πιο διεξοδικά.

### 5.2 Ανάλυση σημάτων με διαγράμματα ματιού

Το διάγραμμα ματιού (eye diagram) αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την ποιοτική ανάλυση των σημάτων στα ψηφιακά συστήματα μετάδοσης. Επιπλέον παρέχει χρήσιμες

οπτικές πληροφορίες για την αξιολόγηση και αποκατάσταση τυχών προβλημάτων. Εκτιμά με «μια ματιά» τη συμπεριφορά του εν λόγω συστήματος και εισχωρεί στις ατέλειες των καναλιών που το αποτελούν. Μια προσεχτική ανάλυση του συγκεκριμένου οπτικού υλικού δίνει στο χρήστη μια πρώτη εκτίμηση του σηματοθορυβικού λόγου (SNR-signal-to-noise), του χρονισμού του ρολογιού (clock timing) και του jitter. Ουσιαστικά το διάγραμμα ματιού είναι ένας παλμογράφος για επίδειξη του ψηφιακού σήματος με συνεχή δειγματοληψία ώστε να επιτευχθεί μια καλή παρουσίαση της συμπεριφοράς του.

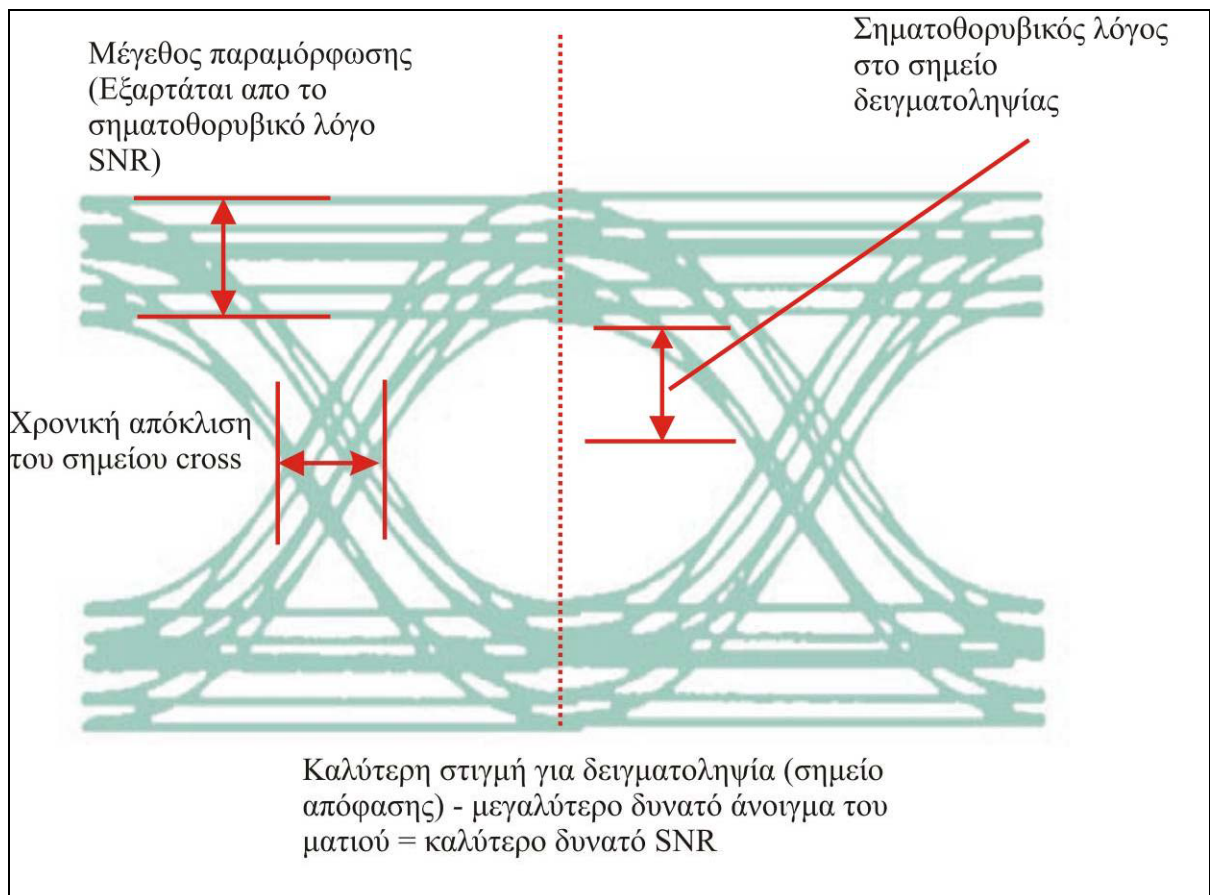
Το eye diagram χρησιμοποιείται επίσης για να εξετάσει την «καθαρότητα» του σήματος σε χαμηλής ποιότητας ψηφιακά συστήματα όπως συστήματα μετάδοσης οπτικών ινών, δίκτυα καλωδιακών τηλεοράσεων (network cables) και κυκλώματα. Η παρακάτω εικόνα δείχνει ένα «καθαρό» διάγραμμα ματιού και ένα άλλο που έχει θόρυβο και λάθη που οφείλονται στην απώλεια συγχρονισμού (timing errors) και στη διαμόρφωση πλάτους που εμφανίζει το σήμα λόγω υποβάθμισης της ποιότητας. Τα ποικίλα σημεία μετάδοσης παρέχουν μια πιο λεπτομερή ματιά στα χαρακτηριστικά της εξασθένησης.



Εικόνα 5.1 Στο πάνω μέρος φαίνεται το μη παραμορφωμένο διάγραμμα ματιού ενός ψηφιακού σήματος περιορισμένου εύρους ζώνης ενώ το κάτω διάγραμμα ματιού περιλαμβάνει θόρυβο πλάτους (amplitude noise) και φάσης (phase errors).

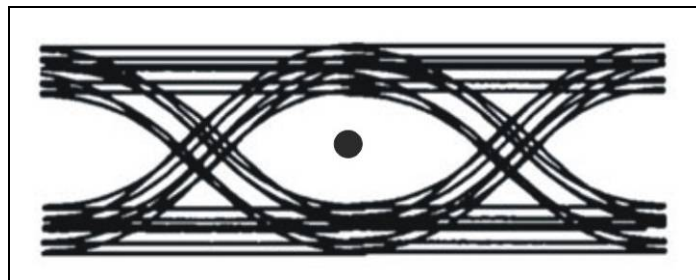
Όπως είπαμε και παραπάνω μια από τις χρήσεις του διάγραμμα ματιού είναι η αξιολόγηση της ποιότητας του σήματος. Η Εικόνα 5.2 απεικονίζει τον τύπο της πληροφορίας που μπορεί να προκύψει από ένα διάγραμμα ματιού.

Ορίζουμε αρχικά ως διασταύρωση (cross) την περιοχή τομής των καμπύλων στο διάγραμμα ματιού. Όταν στα διαδοχικά διαγράμματα ματιού που λαμβάνουμε παρατηρούμε ότι ανεβαίνει το cross, αυτό σημαίνει ότι ο παλμός φαρδαίνει και υπάρχει κίνδυνος παρεμβολής με τους διπλανούς παλμούς. Πέρα από το επίπεδο του cross μας ενδιαφέρει να παρατηρήσουμε το amplitude και το time jitter που ορίσαμε παραπάνω. Το amplitude jitter στο πείραμα μας, οφείλεται στο κορεσμό των ενεργών στοιχείων (MZI-SOA) από τις ακολουθίες διαδοχικών bits. Έτσι, καθώς διαδοχικά bits κορένουν τους Ημιαγωγίμους Οπτικούς Ενισχυτές των συμβολομέτρων MZI, τα MZI δίνουν διαφορετικό κέρδος από bit σε bit και ως εκ τούτου οι άσσοι λαμβάνουν διαφορετικό επίπεδο ισχύος που μάλιστα ελαττώνεται για όσους έπονται στον παλμό. Αποτέλεσμα είναι αυτοί να απεικονίζονται στο eye-diagram σε θέσεις που αποκλίνουν ελαφρώς μεταξύ τους προκαλώντας το amplitude jitter. Το time jitter οφείλεται στην απώλεια συγχρονισμού μεταξύ των διφύων. Επίσης μεγάλης σημασίας είναι το μέγεθος του ματιού, που είναι το άνοιγμα ανάμεσα στις δύο καμπύλες, διότι όσο μεγαλύτερο και καθαρότερο είναι τόσο καλύτερο SNR πετυχαίνουμε και κατά συνέπεια και καλύτερο BER (Bit Error Rate).

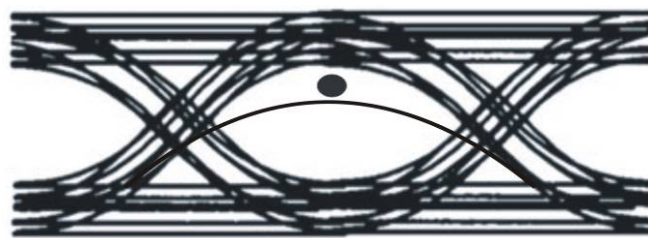


Εικόνα 5.2 Η βασική πληροφορία που εμπεριέχεται σε ένα διάγραμμα ματιού. Οι σημαντικότερες είναι το άνοιγμα του ματιού (καλύτερο δυνατό SNR), το εύρος του πλάτους και τα λάθη συγχρονισμού (timing errors).

Η απόφαση σχετικά με το αν ένα bit θα ληφθεί ως 1 ή 0 εξαρτάται από τη θέση σχετικά με ένα κατώφλι το οποίο ορίζουμε πειραματικά ανάλογα με την περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα ας θεωρήσουμε για διευκόλυνση ότι υπάρχει μια κουκίδα στο διάγραμμα που συμβολίζει το κατώφλι (threshold). Η θέση της κουκίδας ορίζεται από τον άξονα του χρόνου σε συνδυασμό με τον άξονα του πλάτους. Ανάλογα με τη θέση της κουκίδας αυτής στο διάγραμμα ματιού λαμβάνεται η απόφαση για το bit: αν το bit είναι πάνω από την κουκίδα λαμβάνεται ως 1, ενώ αν είναι κάτω από την κουκίδα λαμβάνεται ως 0. Λόγω όμως ύπαρξης σημαντικού θορύβου ή ισχνού σήματος ενδέχεται να καταλήξουμε σε λανθασμένα συμπεράσματα. Για παράδειγμα, αν το bit είναι 0 και υπάρχει σημαντικός θόρυβος στο διάγραμμα μας ώστε να πραγματοποιηθεί διεύρυνση του πλάτους (amplitude jitter) του διαγράμματος ματιού μπορεί να υπάρξει σύγχυση και να θεωρηθεί 1. Αντίστοιχα αν το bit είναι 1 αλλά το διάγραμμα έχει χαμηλότερο πλάτος από το σύνηθες μπορεί το bit να ληφθεί ως 0 (Εικόνα 5.3(β)). Όταν η κουκίδα βρίσκεται στο σημείο cross (Εικόνα 5.3(α)), πράγμα που συνήθως αποφεύγεται, το αποτέλεσμα είναι να μπερδεύονται τα bits και η τελική απόφαση να είναι λανθασμένη.



(α)



(β)

Εικόνα 5.3 Περιπτώσεις τοποθέτησης της κουκίδας. Στο (α) παρατηρούμε την κουκίδα στο μέσο του διαγράμματος ματιού που συνίσταται να αποφεύγεται. Στο (β) λόγω του amplitude jitter, ο άσπος που βρίσκεται κάτω από την κουκίδα θα ληφθεί λανθασμένα ως μηδέν.

Συνοψίζοντας, το διάγραμμα ματιού είναι ένα απλό και εύχρηστο εργαλείο για την αξιολόγηση ψηφιακών συστημάτων μετάδοσης. Παρέχει άμεσα οπτικά δεδομένα για να επιβεβαιώσει την ποιότητα ή για να καταδείξει κάποιο πρόβλημα και η χρήση του σε συνδυασμό με άλλες αξιόπιστες μεθόδους μέτρησης σημάτων μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος και να προσδιορίσει την πηγή της εξασθένησης. Πολλές φορές είναι χρήσιμο να καταχωρούνται τα διαγράμματα ματιού ώστε να είναι διαθέσιμα στο μέλλον για σύγκριση αν προκύψουν νέα προβλήματα. [5.1]

Στο δικό μας πείραμα, στην έξοδο κάθε σταδίου, ελέγχουμε το σήμα εξόδου με διαγράμματα ματιού για να παρατηρήσουμε τυχούσες αλλοιώσεις λόγω θορύβου ή εξασθένησης που θα χαλούσαν τα αποτελέσματα. Με τη χρήση του οργάνου μέτρησης του ρυθμού σφαλμάτων (BERT-Bit Error Rate Tester) εξετάζουμε το ρυθμό λανθασμένων διφυίων (BER) στην έξοδο κάθε σταδίου. Στη μέτρηση αυτή το διάγραμμα ματιού χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά για τον έλεγχο του συγχρονισμού των σημάτων στα 3 στάδια του TSI και συγκεκριμένα κατά το σημείο που προσθέταμε καθυστέρηση στις χρονοσχισμές με την παρεμβολή οπτικών γραμμών καθυστέρησης. Ο συγχρονισμός έγινε ρυθμίζοντας ένα επιπρόσθετο μεταβλητό τμήμα οπτικής ίνας στις σταθερές γραμμές καθυστέρησης, το ODL (Optical Delay Line) και έχοντας ως γνώμονα την καθαρότητα του διαγράμματος ματιού. Όσο πιο καθαρό ήταν το μάτι, τόσο καλύτερος συγχρονισμός υπήρχε ανάμεσα στα καθυστερημένα σήματα.

### **5.3 Υλοποίηση του TSI με τρία στάδια**

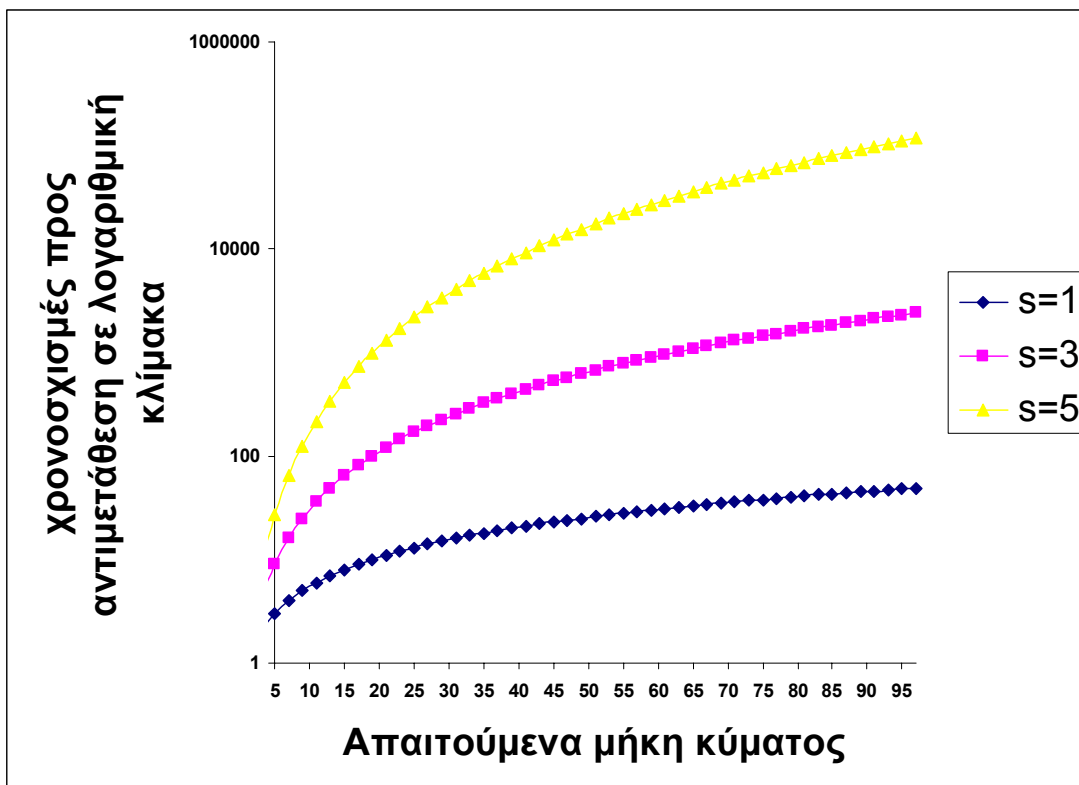
Όπως αναλύσαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο ο TSI στο πείραμα μας υλοποιείται σε τρία στάδια. Η ίδια υλοποίηση θα μπορούσε να επιτευχθεί με ένα στάδιο και 7 μήκη κύματος. Αυτό είναι συνέπεια της ανάθεσης μιας συγκεκριμένης καθυστέρησης σε μια συγκεκριμένη θύρα του αποπολυπλέκτη μήκους κύματος, έτσι ώστε το πακέτο να μπορεί να προσπελάσει αυτή την καθυστέρηση με κατάλληλη αλλαγή μήκους κύματος στον TWC. Δυστυχώς η προσέγγιση της υλοποίησης του TSI σε ένα στάδιο δεν κλιμακώνεται καλά σε όρους απαιτούμενων μηκών κύματος. Για παράδειγμα η αναδιάταξη πακέτων σε μια περίοδο δέκα πακέτων απαιτεί 19 μήκη κύματος, ενώ για την γενική περίπτωση περιόδων  $N$  πακέτων, πρέπει να χρησιμοποιηθούν  $2N-1$  μήκη κύματος. Για να ανταπεξέλθουμε σε αυτή την αρνητική ιδιότητα κλιμάκωσης που αφορά τα μήκη κύματος στον TSI ενός σταδίου, μπορεί να υιοθετηθεί μια υλοποίηση πολλών σταδίων. Με μια τέτοια υλοποίηση κάθε στάδιο θα χρησιμοποιήσει λιγότερα από 7 μήκη κύματος και τα διαδοχικά στάδια θα έχουν ένα διαφορετικό σύνολο καθυστερήσεων. Με αυτόν τον τρόπο,

κάθε στάδιο θα είναι ικανό να αναδιατάξει λιγότερα από 4 πακέτα της περιόδου σε μια φορά. Παρόλα αυτά τα διαδοχικά στάδια αναδιάταξης μπορούν να εκτελέσουν πλήρη αναδιοργάνωση πακέτων όπως αποδεικνύεται στο Κεφάλαιο 3, όπου παρουσιάζεται πλήρης περιγραφή του σχεδιαστικού αλγορίθμου και των προτερημάτων του. Ο αριθμός των απαιτούμενων σταδίων TSI ανάλογα με τα μήκη κύματος ανά στάδιο, όπως και οι καθυστερήσεις που εισάγουν είναι συσχετιστικές σχεδιαστικές παράμετροι που αντλούνται από τον αλγόριθμο ως συνάρτηση των χρονοσχισμών που ανατίθενται σε κάθε περίοδο. Ωστόσο είναι αναγκαίο να τονίσουμε ότι στην ανταλλαγή μηκών κύματος για στάδια πρέπει να γίνεται ένας προσεχτικός υπολογισμός καθώς τα επιπλέον στάδια εισάγουν παραμόρφωση στο κύκλωμα και τα συμβολόμετρα κοστίζουν πολύ περισσότερο σε σχέση με την προσθήκη πηγών laser για τα επιπλέον μήκη κύματος.

Ο Πίνακας 1 συγκεντρώνει τον αριθμό των απαιτούμενων μηκών κύματος έναντι στις χρονοσχισμές ανά περίοδο του TSI που περιλαμβάνει 1, 3 και 5 στάδια. Είναι φανερό ότι το μοτίβο των τριών σταδίων που παρουσιάζουμε κλιμακώνεται καλά με τον αριθμό των διαθέσιμων μηκών κύματος.

Χρονοσχισμές προς αντιμετάθεση	Απαιτούμενος αριθμός μηκών κύματος		
	s=1	s=3	s=5
4	7	3	3
9	17	5	5
16	31	7	5
25	49	9	5
36	71	11	7
49	97	13	7

Πίνακας 1: Ο αριθμός των απαιτούμενων μηκών κύματος ανάλογα με τις χρονοσχισμές ανά στάδιο για TSI αποτελούμενο από 1,3 και 5 στάδια.



Εικόνα 5.4 Γραφική παράσταση των χρονοσχισμών που δύνανται να υποστούν μετάθεση σε συνάρτηση με τον αριθμό των απαιτούμενων μηκών κύματος για  $s=1,3,5$  στάδια.

Η Εικόνα 5.4 απεικονίζει γραφικά το πλήθος των χρονοσχισμών που μπορούν να αντιμετωπιστούν συναρτήσει του πλήθους των μηκών κύματος που απαιτούνται κάθε φορά ανάλογα με τον αριθμό των σταδίων του TSI. Από τις γνωστές εξισώσεις της παραγράφου 3.2.2 προκύπτει ότι για δεδομένο αριθμό μηκών κύματος, το πλήθος των χρονοσχισμών που μπορούν να αντιμετωπιστούν στις υλοποιήσεις ενός, τριών και πέντε σταδίων πολλαπλασιάζεται με γεωμετρική πρόοδο αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι διαθέτουμε 3 μήκη κύματος και έχουμε ένα στάδιο, τότε ο αριθμός των χρονοσχισμών που μπορούμε να αντιμετωπίσουμε είναι 2. Για τον ίδιο αριθμό μηκών κύματος, αν είχαμε τρία στάδια, οι χρονοσχισμές που θα μπορούσαν να μετατεθούν θα ήταν 4 ενώ θα ήταν 8 αν είχαμε 5 κλιμακούμενα στάδια. Η διαφορά μεταξύ του πλήθους των χρονοσχισμών που μπορεί το σύστημα να αντιμετωπίσει γίνεται ακόμα πιο έντονη για περισσότερα μήκη κύματος. Για παράδειγμα, αν έχουμε 97 μήκη κύματος με την υλοποίηση σε ένα στάδιο μπορούμε να αντιμετωπίσουμε 49 χρονοσχισμές, σε τρία στάδια 2401 και σε πέντε στάδια 117649 χρονοσχισμές! Δηλαδή παρατηρούμε ότι με τον ίδιο αριθμό μηκών κύματος, το πλήθος των χρονοσχισμών που μπορούν να αντιμετωπιστούν γίνεται πολλαπλάσιο αν



προσθέσουμε στο σύστημά μας ακόμα δύο στάδια. Μάλιστα, σύμφωνα με τους τύπους που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2.2 ο παράγοντας με τον οποίο πολλαπλασιάζεται το πλήθος των χρονοσχισμών με την πρόσθεση δύο ακόμα σταδίων είναι  $n = \left\lfloor \frac{w+1}{2} \right\rfloor$ , όπου  $w$  είναι το πλήθος των μηκών κύματος.

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η υλοποίηση σε 1 στάδιο δεν είναι συμφέρουσα λόγω του περιορισμένου αριθμού χρονοσχισμών που μπορεί να αντιμετωπίσει. Από την άλλη, αν και η υλοποίηση σε 5 στάδια προσφέρει μεγάλες δυνατότητες αντιμετάθεσης, εντούτοις λόγω της εμπλοκής πολλών MZI εισάγεται παραμόρφωση στο σήμα. Για το λόγο αυτό θα πρέπει κάθε φορά, ανάλογα με το πλήθος των χρονοσχισμών που έχουμε να αντιμετωπίσουμε, να υπάρχει αντιστάθμισμα μεταξύ του αριθμού των μηκών κύματος και των σταδίων που θα χρησιμοποιήσουμε. Στην επιλογή μας αυτή θα παίξουν ρόλο τόσο οι οικονομικοί πόροι που μπορούμε να διαθέσουμε για ένα συγκεκριμένο σύστημα όσο και το περιθώριο όσον αφορά το επίπεδο παραμόρφωσης για το συγκεκριμένο σημείο του δικτύου στο οποίο θέλουμε να τοποθετήσουμε το υποσύστημα αντιμετάθεσης των χρονοσχισμών.

Τέλος στον Πίνακα 2 παρατηρούμε τις απαιτήσεις σε δύναμη και ενέργεια για τα τέσσερα MZI.

MZI	Εισερχόμενη Ισχύς	Ενέργεια Ελέγχου	Ισχύς του βοηθητικού σήματος CW
1ο Στάδιο (MZI1)	2.3 dBm	1.61 pJ	-
2ο Στάδιο (MZI2)	0.5 dBm	1.39 pJ	-
3ο Στάδιο (MZI3)	-0.04 dBm	1.57 pJ	-1.6 dBm
Μονάδα Ελέγχου Δρομολόγησης (MZI4)	8.1 dBm (CW)	1.48 pJ	-1 dBm

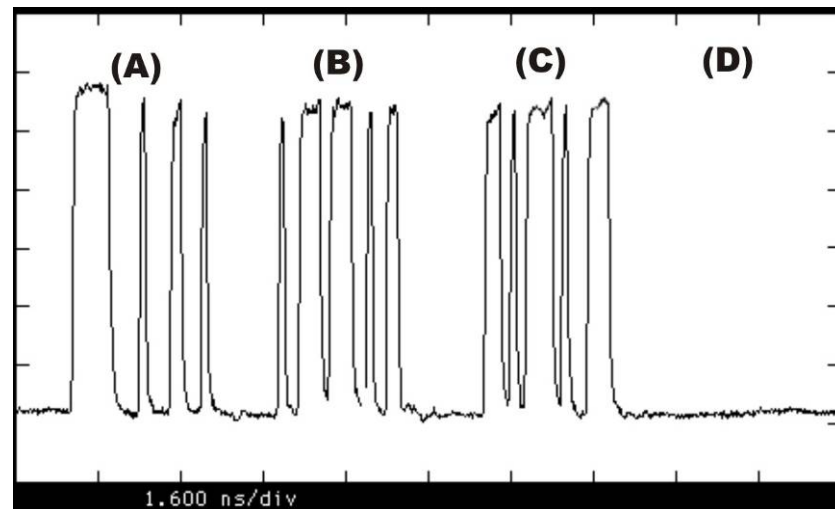
Πίνακας 2: Οι ανάγκες σε δύναμη και ενέργεια για τους μεταγωγείς MZI

Παρατηρούμε ότι στο πρώτο στάδιο η εισερχόμενη ισχύς και η απαιτούμενη ενέργεια είναι οι υψηλότερες σε σύγκριση με τα υπόλοιπα στάδια του TSI. Στα δυο επόμενα στάδια η εισερχόμενη ισχύς είναι ελάχιστη. Ενώ στο τελευταίο MZI η εισερχόμενη ισχύς είναι τετραπλάσια σχεδόν σε σχέση με το πρώτο στάδιο και αυτό εξηγείται γιατί μετά την

υποβάθμιση του σήματος από τα στάδια του TSI το συγκεκριμένο στάδιο αναλαμβάνει να βελτιώσει την ποιότητα του σήματος από τον εισερχόμενο θόρυβο και το στένεμα του παλμού.

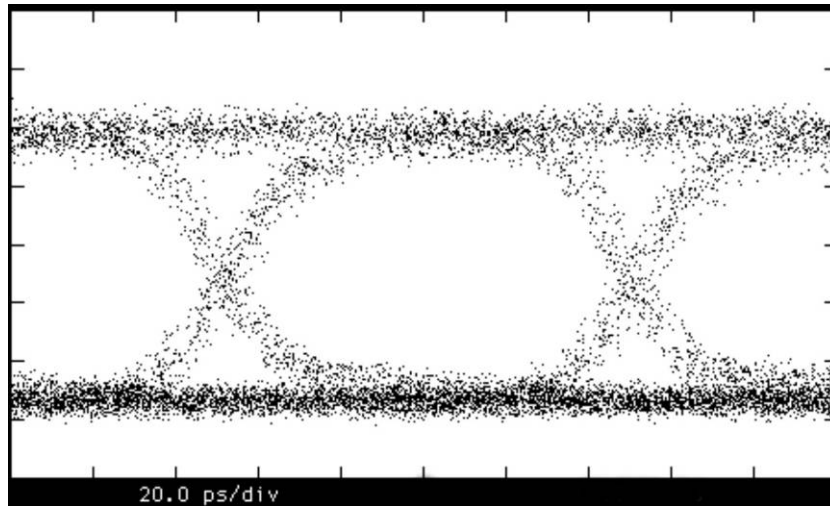
#### 5.4 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Αρχικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.5 η είσοδος του TSI η οποία είναι και η είσοδος του πρώτου MZI όπως φαίνεται στον παλμογράφο.



Εικόνα 5.5 Είσοδος TSI και πρώτου MZI όπως φαίνεται στον παλμογράφο.

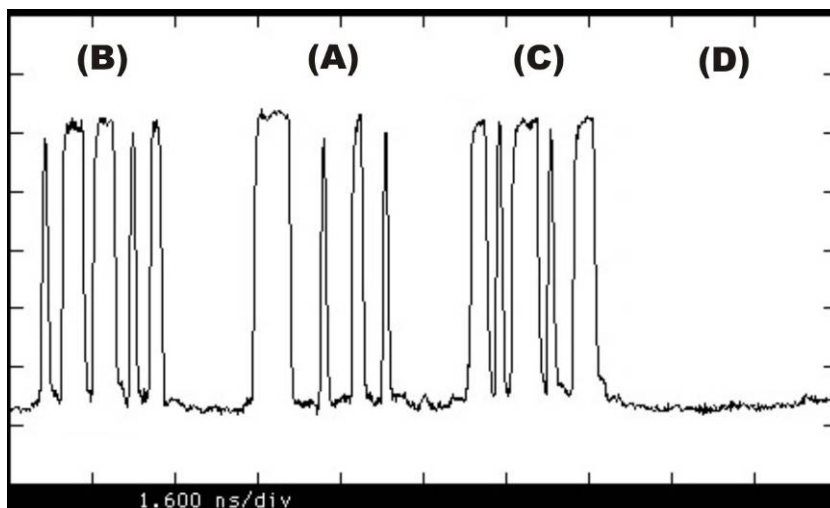
Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι οι παλμοί των χρονοσχισμών είναι NRZ (Non-Return-To-Zero) και η ακολουθία των bits για τις χρονοσχισμές A, B, C είναι αντίστοιχα : {1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 } , {1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 } , {1 1 1 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 } ενώ η χρονοσχισμή D αποτελείται από μηδενικά. Επίσης παρατηρούμε την ύπαρξη των 15 μηδενικών bits που ακολουθούν κάθε πακέτο και που μαζί με τα bits των δεδομένων απασχολούν μια χρονοσχισμή. Όπως έχουμε προαναφέρει, η ύπαρξη αυτών των bits αποσκοπεί στον εύκολο διαχωρισμό των bits δεδομένων των πακέτων μεταξύ τους.



Εικόνα 5.6 Eye-diagram της εισόδου του TSI

Το παραπάνω διάγραμμα είναι το αντίστοιχο διάγραμμα ματιού της εισόδου του TSI. Παρατηρούμε ότι το μάτι είναι καθαρό και το άνοιγμά του αρκετά μεγάλο, που σημαίνει ότι το amplitude jitter δεν αποτελεί πρόβλημα αφού δεν παρατηρείται διεύρυνση του πλάτους του σήματος, ενώ το time jitter είναι μικρό, άρα δεν υπάρχει μεγάλη απώλεια συγχρονισμού μεταξύ των παλμών. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι το σήμα έχει την απαραίτητη ισχύ και ο θόρυβος είναι χαμηλός οπότε και ο BER είναι πολύ ικανοποιητικός.

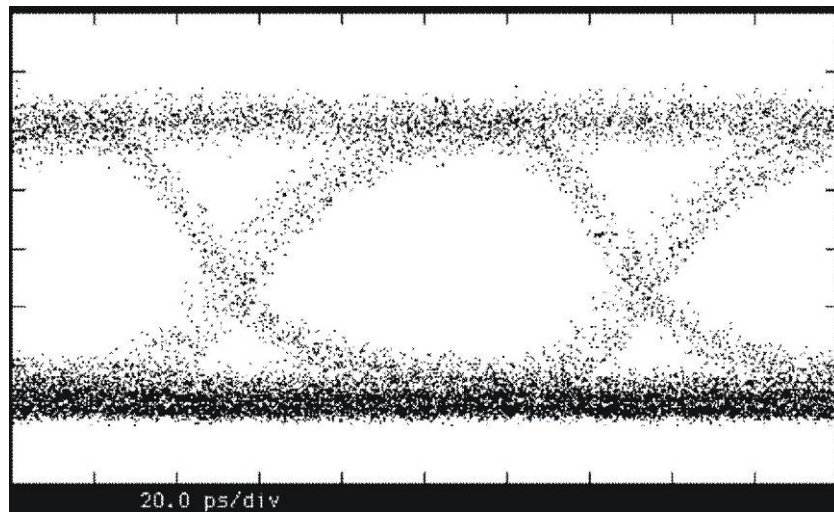
Η διεργασία που επιτελείται στο πρώτο στάδιο έχει ως αποτέλεσμα την πρώτη αντιμετάθεση των χρονοσχισμών. Έτσι, η έξοδος του πρώτου σταδίου είναι οι χρονοσχισμές με την σειρά που φαίνονται στην Εικόνα 5.7, δηλαδή την {B,A,C,D}.



Εικόνα 5.7 Έξοδος πρώτου σταδίου όπως φαίνεται στον παλμογράφο.

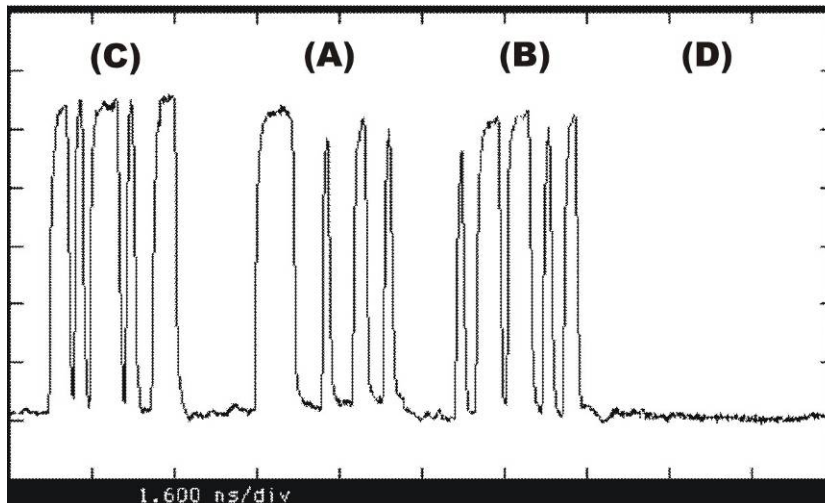
Στην εικόνα 5.8 παρατίθεται το διάγραμμα ματιού του σήματος εξόδου του πρώτου σταδίου. Παρατηρούμε εδώ ότι ο συγχρονισμός έχει χαλάσει ελαφρώς καθώς το time jitter

έχει αυξηθεί. Αντίθετα το amplitude jitter φαίνεται να μην έχει επιδεινωθεί σοβαρά σε σχέση με την αρχική κατάσταση του σήματος. Γενικά το σχήμα έχει αλλοιωθεί σε μικρό βαθμό καθώς ο παλμός αρχίζει να φαρδαίνει. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην επίδραση του SOA του MZI που κορένεται, καθώς όμως βρισκόμαστε ακόμα στο πρώτο στάδιο οι επιδράσεις των στοιχείων στην ποιότητα του σήματος δεν είναι σημαντικές. Παράλληλα οφείλεται και στην επίδραση των AWG φίλτρων που βρίσκονται στην έξοδο του MZI, τα οποία έχουν την τάση να ομαλοποιούν την κλίση του παλμού τόσο στο προπορευόμενο όσο και στο επικείμενο μέρος του παλμού. Ωστόσο το άνοιγμα του ματιού είναι ικανοποιητικό, όπως και το προκύπτων BER.



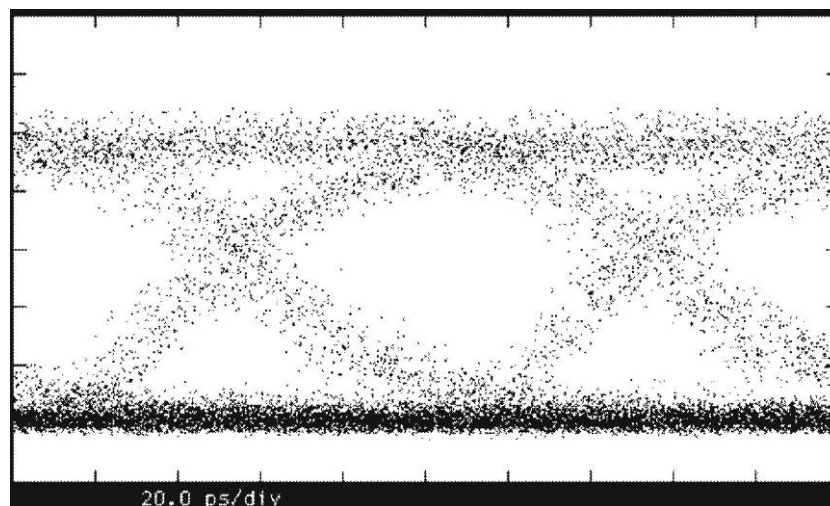
Εικόνα 5.8 Eye-diagram της εξόδου του πρώτου σταδίου.

Το σήμα της Εικόνας 5.7 θα αποτελέσει την είσοδο του δεύτερου σταδίου, ενώ μετά τις αντιμεταθέσεις των χρονοσχισμών και σε αυτό το επίπεδο θα προκύψει το σήμα που φαίνεται στην Εικόνα 5.9. Η σειρά των χρονοσχισμών στην έξοδο του δεύτερου σταδίου είναι η {C,A,B,D} όπως φαίνεται παρακάτω.



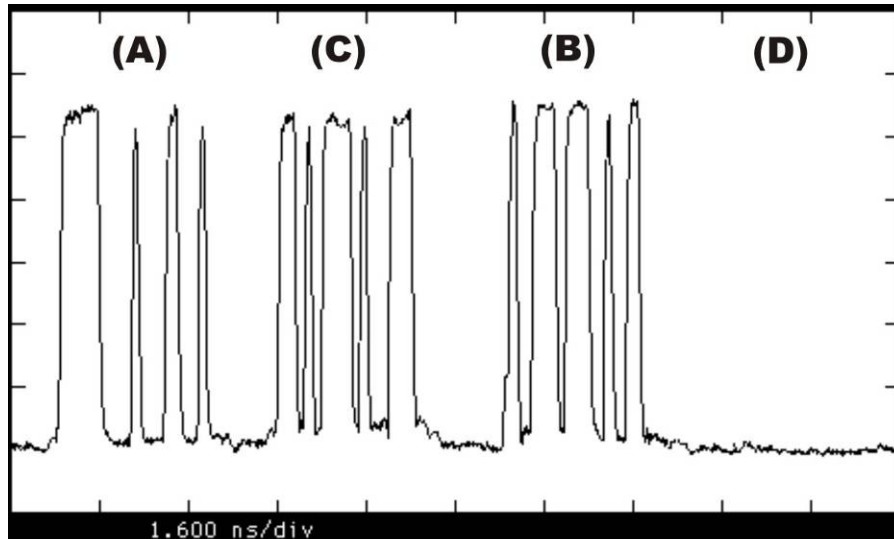
Εικόνα 5.9 Έξοδος δευτέρου σταδίου όπως φαίνεται στον παλμογράφο.

Στην εικόνα 5.10 παρατίθεται το διάγραμμα ματιού του σήματος εξόδου του δεύτερου σταδίου. Το σημείο cross έχει ανέβει, το time και το amplitude jitter έχει αυξηθεί και ο παλμός έχει φαρδύνει περισσότερο από πριν ενώ το άνοιγμα του ματιού έχει μικρύνει. Αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω της επίδρασης του δεύτερου MZI στο σήμα και του AWG φίλτρου που ακολουθεί, καθώς και λόγω της εισαγωγής θορύβου από την διέλευσή του από τα MZI. Ως αποτέλεσμα το αντίστοιχο BER έχει μειωθεί σε σχέση με την προηγούμενη τιμή και είναι φανερό από αυτό ότι η ποιότητα του σήματος χειροτερεύει.



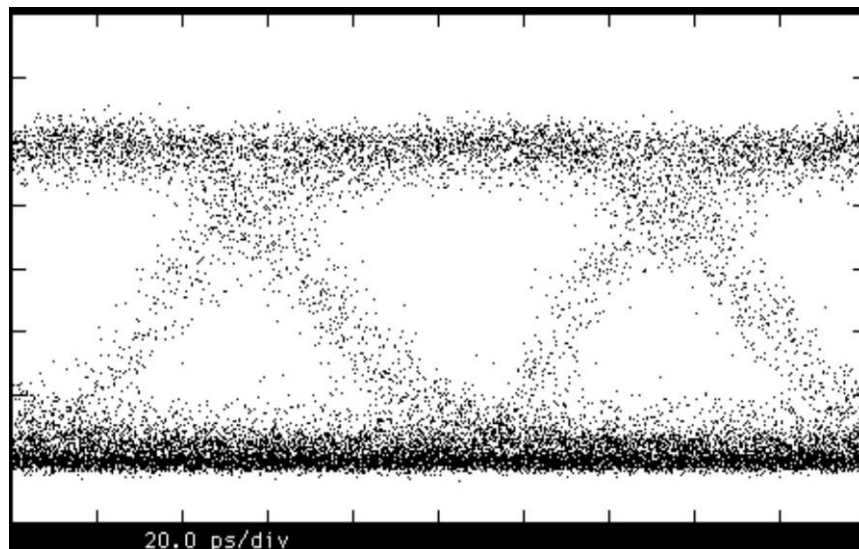
Εικόνα 5.10 Eye-diagram της εξόδου του δεύτερου σταδίου.

Το σήμα αυτό θα εισαχθεί στο τρίτο και τελευταίο στάδιο του TSI και μετά την επεξεργασία που θα υποστεί, θα ληφθεί στην έξοδο του σταδίου το σήμα που φαίνεται στην Εικόνα 5.11. Η αλληλουχία των χρονοσχημάτων είναι η εξής: {A,B,C,D}.



Εικόνα 5.11 Έξοδος τρίτου σταδίου όπως φαίνεται στον παλμογράφο.

Στην εικόνα 5.12 παρατίθεται το διάγραμμα ματιού του σήματος εξόδου του τρίτου σταδίου. Παρατηρούμε ότι το σημείο cross έχει ανέβει αισθητά, το time jitter και το amplitude jitter παραμένει στα ίδια επίπεδα με πριν ενώ το άνοιγμα του ματιού έχει ελαττωθεί, πράγμα που οφείλεται στην αρνητική επίδραση των διαδοχικών ενεργών συμβολόμετρων.. Έτσι παρόλο που το σήμα δε βελτιώνεται σε σχέση με πριν, παρόλα αυτά το CW βοηθά στην βελτίωση του σήματος σε σχέση με την ποιότητα που θα είχε χωρίς αυτό.

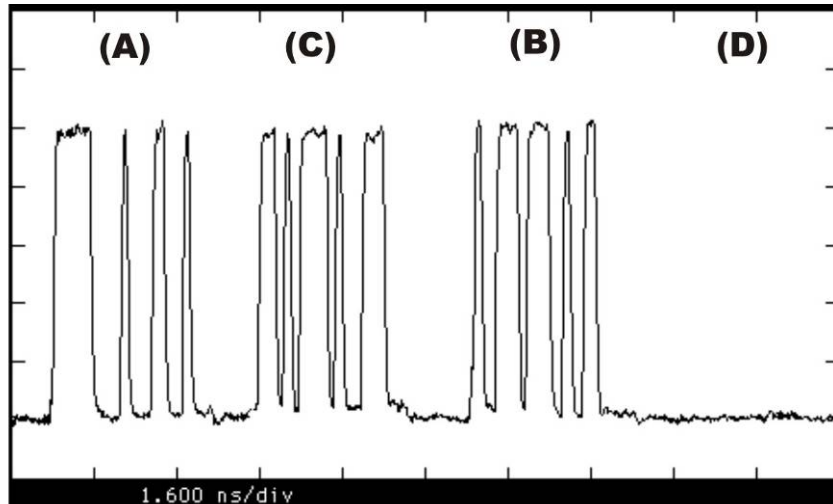


Εικόνα 5.12 Eye-diagram της εξόδου του τρίτου σταδίου.

Το σήμα αυτό εισέρχεται έπειτα στην μονάδα ελέγχου δρομολόγησης, όπου μέσω ενός MZI αλλάζει το μήκος κύματος των χρονοσχισμών σε ένα κοινό και για τις τρεις χρονοσχισμές. Και πάλι χρησιμοποιήσαμε μια βοηθητική δίοδο laser γιατί παρότι έχουμε

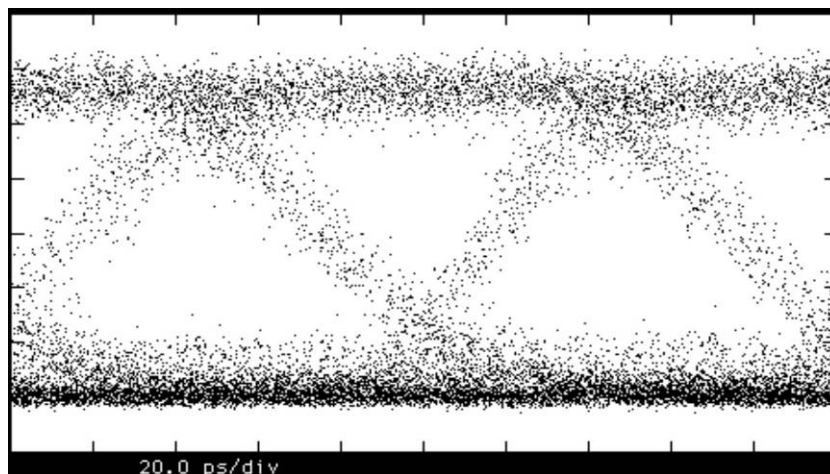


χειροτέρευση του BER σε σχέση με το προηγούμενο επίπεδο, με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουμε ικανοποιητικό ρυθμό σφαλμάτων. Έτσι, η έξοδος του σταδίου αυτού είναι η Εικόνα 5.13 που ουσιαστικά απεικονίζει την ίδια αλληλουχία χρονοσχισμών με την Εικόνα 5.11, δηλαδή την έξοδο του τρίτου σταδίου.



Εικόνα 5.13 Έξοδος μονάδας ελέγχου δρομολόγησης όπως φαίνεται στον παλμογράφο.

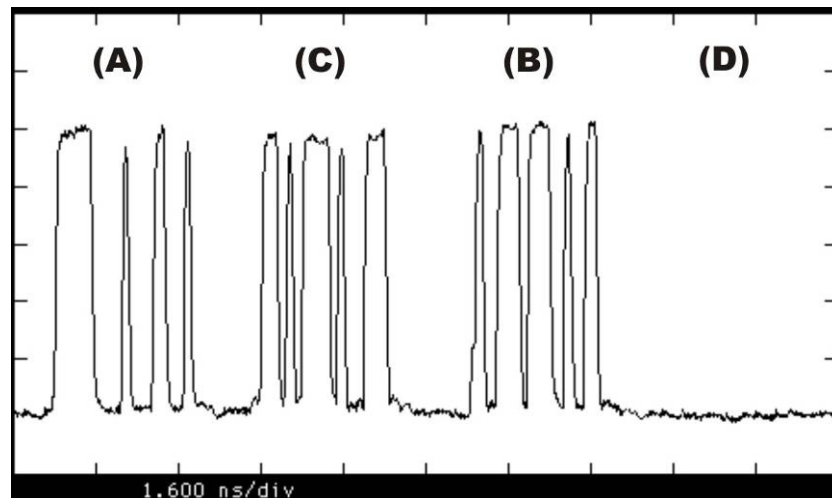
Στην εικόνα 5.14 παρατίθεται το διάγραμμα ματιού του σήματος εξόδου της μονάδας ελέγχου δρομολόγησης. Η μορφή συγκλίνει σε αυτή του προηγούμενου διαγράμματος, όμως έχει χειροτερέψει. Παρατηρούμε ότι το σημείο cross έχει ανέβει πολύ ενώ το άνοιγμα του ματιού έχει μικρύνει. Σε αυτό οφείλεται και η χειροτέρευση του BER που είναι και η χειρότερη κατά τη διάρκεια όλου του πειράματος.



Εικόνα 5.14 Eye-diagram της εξόδου της μονάδας ελέγχου δρομολόγησης.

Η αύξηση του εύρους του παλμού που φαίνεται καθαρά από τα eye-diagram εξόδου στα τέσσερα στάδια της διάταξής μας οφείλεται όπως είπαμε παραπάνω, τόσο στην επίδραση των τεσσάρων ενεργών συμβολομέτρων MZI όσο και στην επίδραση των AWG φίλτρων που τα ακολουθούν. Για να μελετήσουμε την επίδραση συγκεκριμένα των AWG φίλτρων υλοποιήσαμε με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης VPI μια σειρά προσομοιώσεων στις οποίες αγνοήσαμε την ύπαρξη των ενεργών συμβολομέτρων MZI. Στην προσομοίωση αυτή παρατηρήσαμε ότι λόγω της διέλευσης του σήματος από τα φίλτρα AWG ο παλμός διευρύνεται ενώ παράλληλα ομαλοποιούνται οι άκρες του. Επίσης, αν είχαμε την επίδραση μόνο των AWG φίλτρων θα μπορούσαμε να βάλουμε μέχρι 9 φίλτρα και άρα 9 στάδια χωρίς να έχουμε παρεμβολή μεταξύ των παλμών. Επειδή όμως σε ένα κύκλωμα αντιμεταθέτη χρονοσχισμών δεν έχουμε μόνο την επίδραση των AWG φίλτρων αλλά και των MZI συμβολομέτρων αναμένεται ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός σταδίων να είναι μικρότερος από 9.

Τελικά το σήμα εισέρχεται στον απορροφητή κορεσμού, στην έξοδο του οποίου παρατηρούμε το σήμα μας να έχει τη μορφή του σήματος εισόδου στο στάδιο αυτό (Εικόνα 5.15).

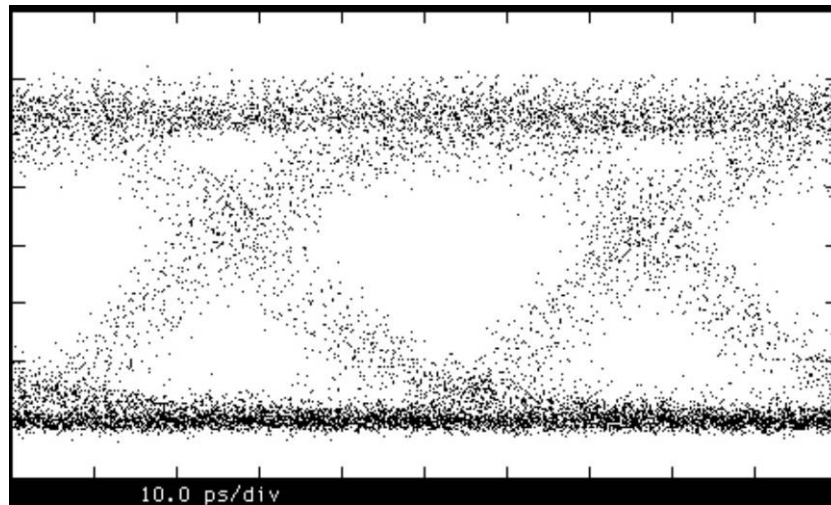


Εικόνα 5.15 Έξοδος απορροφητή κορεσμού όπως φαίνεται στον παλμογράφο.

Η επεξεργασία που έχει υποστεί το σήμα στο στάδιο αυτό φαίνεται στην Εικόνα 5.16, στο διάγραμμα ματιού του σήματος. Παρατηρούμε ότι το σήμα έχει βελτιωθεί σχετικά με το προηγούμενο επίπεδο, καθότι το cross έχει πέσει και το μάτι έχει ανοίξει, αν και το time jitter εμφανίζεται περισσότερο, αφού ο απορροφητής κορεσμού αποτελεί και αυτός ένα ενεργό στοιχείο και ως εκ τούτου έχει αρνητική επίδραση στο time jitter. Συνολικά όμως το BER έχει βελτιωθεί σε σχέση με το προηγούμενο επίπεδο όπως είναι φανερό και από το



eye-diagram και όπως εξάλλου αναμενόταν αφού αυτός είναι ο σκοπός ύπαρξης του τελικού αυτού σταδίου.



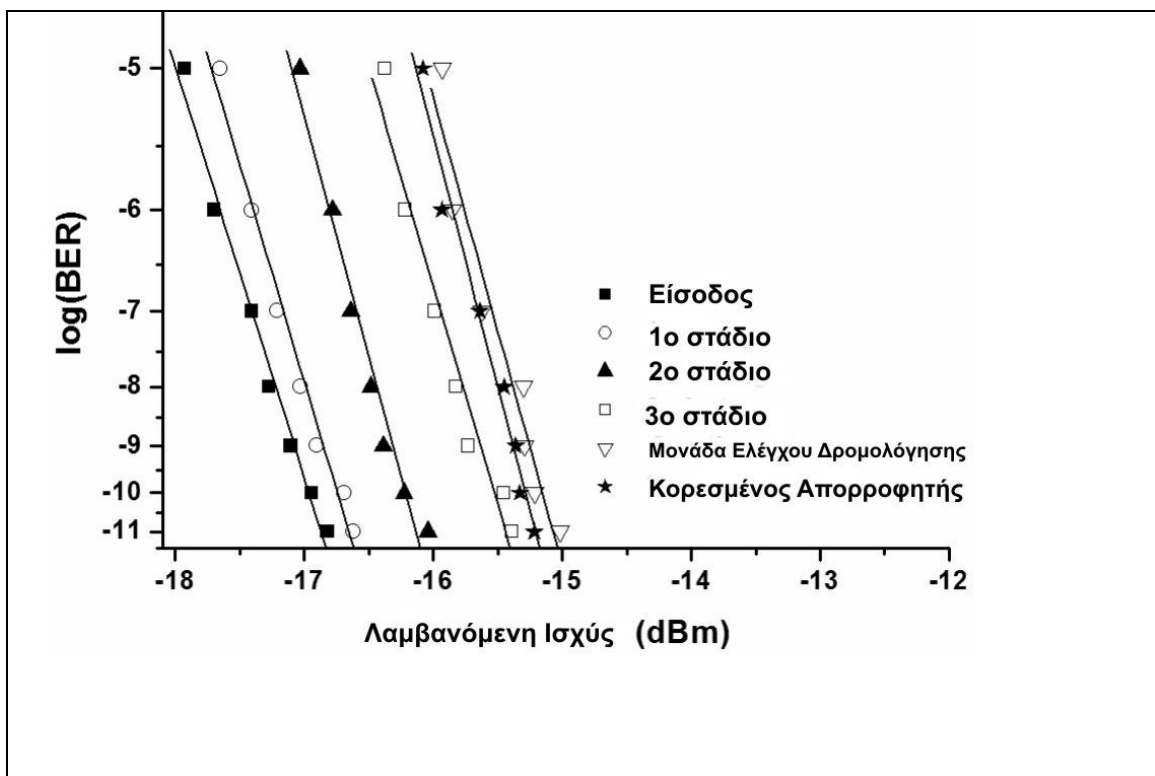
Εικόνα 5.16 Eye-diagram της εξόδου του απορροφητή κορεσμού.

Τέλος, παραθέτουμε την καμπύλη του BER για κάθε στάδιο σε ένα ενιαίο διάγραμμα (Εικόνα 5.17). Ο ρυθμός σφαλμάτων Bit Error Ratio είναι το ποσοστό λανθασμένων διφύιων στα αποτελέσματα και χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της αξιοπιστίας του συστήματος. [5.2] Για να είναι αξιόπιστο το σύστημα το αποδεκτό άνω όριο του BER είναι  $10^{-11}$ , ενώ όσο μικραίνει ο BER τόσο ελαττώνεται ο θόρυβος και βελτιώνεται το σύστημα.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε την σταδιακή αύξηση του BER κατά την πάροδο διαμέσου των σταδίων λόγω της αναπόφευκτης εισαγωγής θορύβου, διαπλάτυνσης των παλμών και εισαγωγής amplitude και time jitter, που προκύπτει από την ολοένα και αυξανόμενη επεξεργασία που υφίσταται το σήμα και μάλιστα από την επεξεργασία που υφίσταται στα SOA των MZIs. Μάλιστα, παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι όσο πιο χαμηλή είναι η ισχύς στο δέκτη, τόσο μεγαλύτερος είναι ο BER σε βαθμό που είναι και μη αποδεκτός. Φανερή είναι και η θετική επίδραση του τελευταίου σταδίου, του Απορροφητή Κορεσμού, ο οποίος εισήχθη στο κύκλωμα με σκοπό την βελτίωση του BER στο τελικό σήμα.

Για να πετύχουμε error free λειτουργία για κάθε ένα στάδιο, δηλαδή Bit Error Rate (BER) ίσο με  $10^{-11}$ , ακολουθούμε την εξής διαδικασία: εισάγουμε το σήμα από την έξοδο κάθε σταδίου στον BER tester και αυξάνοντας την ισχύ στην είσοδο του δέκτη του, επιτυγχάνουμε την αποδεκτή τιμή BER για κάθε στάδιο. Η τιμή της λαμβανόμενης ισχύος για το σήμα του σταδίου της εισόδου θεωρείται ως τιμή αναφοράς για τις υπόλοιπες τιμές ισχύος των επόμενων σταδίων. Η διαφορά των τιμών της ισχύος κάθε σταδίου από την

τιμή αναφοράς ορίζεται ως penalty που αντιπροσωπεύει την επιπλέον ισχύ που απαιτείται για να επιτευχθεί η αποδεκτή τιμή BER. Πιο συγκεκριμένα για BER  $10^{-11}$  χρειαζόμαστε για το στάδιο εισόδου περίπου -16,8 dBm, για το 1<sup>ο</sup> στάδιο του TSI -16,6 dBm, για το 2<sup>ο</sup> στάδιο -16,02 dBm, για το 3<sup>ο</sup> στάδιο -15,37 dBm, για το στάδιο της Μονάδας Ελέγχου Δρομολόγησης -15 dBm και για το τελευταίο στάδιο του κορεσμένου απορροφητή -15,2 dBm. Έτσι, παρατηρούμε ότι όσο το σήμα διανύει την πειραματική διάταξη, τόσο μεγαλύτερη ισχύ πρέπει να έχει για να επιτυγχάνεται αποδεκτός BER στην έξοδο κάθε σταδίου και συγκεκριμένα τα penalty για τα στάδια είναι 0,2 dB, 0,78 dB, 1,43 dB, 1,8 dB και 1,6 Db για τα στάδια 1,2 ,3 του TSI και για τα στάδια Μονάδας Ελέγχου Δρομολόγησης και Κορεσμένου Απορροφητή αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι μεταξύ των δυο τελευταίων σταδίων υπάρχει ένα αρνητικό penalty -0,2 dB που οφείλεται στην ευεργετική επίδραση του Κορεσμένου Απορροφητή στην ποιότητα του σήματος.



Εικόνα 5.17 Διάγραμμα BER σε συνάρτηση με την λαμβανόμενη ισχύ

## **5.5 Βιβλιογραφία**

[5.1] High Frequency Design EYE DIAGRAM TUTORIAL “Analyzing Signals Using the Eye Diagram” By Gary Breed Editorial Director From November 2005 High Frequency Electronics

[5.2] Διαμόρφωση και μετάδοση σημάτων Παναγιώτης Γ.Κωπτής Εκδόσεις Τζιόλα 2005

# 6

## Εφαρμογές του TSI στα οπτικά δίκτυα

### 6.1 Εισαγωγή

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν αναλύσαμε την υλοποίηση ενός αντιμεταθέτη χρονοσχισμών σε οπτικό επίπεδο με τη χρήση οπτικών συμβολόμετρων τύπου MZI. Παράλληλα παραθέσαμε τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι επιτυγχάνεται error free λειτουργία για παλμούς NRZ ρυθμού 10 Gbps και power penalty 1,8 dB. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε τις εφαρμογές της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής και θα παρουσιάσουμε τα δίκτυα και τα τμήματα αυτών, στα οποία χρησιμοποιείται ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο TSI καθώς και τα προβλήματα των οποίων την λύση βοηθάει η χρήση του.

Η ικανότητα επεξεργασίας υψηλών ταχυτήτων του SOA-MZI και η ολοκληρωσιμότητά του σε συμπυκνωμένες διατάξεις καθιστά ικανή τη σχεδίαση οπτικών TSIs που επιτρέπουν την σύνδεση πολλών επιπέδων αντιμεταθετικών στοιχείων. Οι ικανότητες αναδιάταξης των πακέτων στα TSIs που βασίζονται σε SOA-MZI περιορίζονται από τον συνολικό αριθμό πυλών που δύνανται να ολοκληρωθούν σε ένα chip. Όμως οι τελευταίες μελέτες δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν πλήρης χρήση της σύνδεσης σε TCP πάνω σε OPS δίκτυα, αν παρέχεται ικανότητα αναδιάταξης πακέτων σε μια μικρή ποσότητα των μερικών δεκάδων πακέτων. Έτσι, δεν αναμένεται να υπάρξει πραγματική ανάγκη για ικανότητα μεγάλης κλίμακας αναδιάταξης πακέτων στα μελλοντικά OPS δίκτυα και επομένως η αρχιτεκτονική TSI 3 σταδίων που υλοποιήθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή οπτικών δικτύων νέας τεχνολογίας και υψηλών ταχυτήτων.

Τα δίκτυα στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί ο TSI είναι κατά κόρον τα οπτικά δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά έχουν υποστεί γρήγορες και μεγάλες αλλαγές και στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα

αναμένεται να εξελιχθούν ακόμα περισσότερο. Από τη μια υπάρχει η τεχνολογία του κυκλώματος μεταγωγής ASON (Automatically Switched Optical Network) το οποίο επιτρέπει τη αυτόματη δημιουργία οπτικών μονοπατιών και ενός δυναμικού και ευέλικτου οπτικού στρώματος μετάδοσης δικτύου (Optical Transport Network Layer). Από την άλλη σημαντικό θέμα για έρευνα αποτελούν οι τεχνολογίες οπτικών δικτύων μεταγωγής πακέτου όπως τα OPS (Optical Packet Switching) και τα OBS (Optical Burst Switching). [6.1] Αυτές οι τεχνολογίες κάνουν πιο αποτελεσματική την χρήση του εύρους ζώνης με χρήση της στατιστικής πολυπλεξίας και με τη χρήση μεταγωγέων οπτικού επιπέδου, όπως είναι ο TSI που παρουσιάσαμε στην παρούσα διπλωματική.

## **6.2 Εφαρμογές του TSI στα οπτικά δίκτυα**

Ο TSI αποτελεί συστατικό στοιχείο των σύγχρονων δρομολογητών και μεταγωγέων οπτικών πακέτων που βρίσκονται στους κόμβους ενός οπτικού δικτύου. Οι συμβατικές μέθοδοι μεταγωγής πακέτου βασίζονται στη χρήση ενός μεταγωγέα διαίρεσης χώρου. Καθώς όμως η ικανότητα μεταγωγής αυξάνεται συνεχώς οι αρχιτεκτονικές μεταγωγής γίνονται ογκώδεις και πολύπλοκες και έτσι ένας μεταγωγέας διαίρεσης χρόνου θα έδινε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό η προτεινόμενη αρχιτεκτονική TSI που βασίζεται στη μεταγωγή χρόνου θεωρείται ότι έχει να προσφέρει πολλά σε αυτόν τον τομέα.

Η κύρια λειτουργία του TSI είναι ως ενταμιευτής οπτικών πακέτων στα οπτικά δίκτυα. Παρόλα αυτά χρησιμοποιείται και για τη λύση άλλων προβλημάτων που συναντώνται στα OPS δίκτυα όπως είναι η μορφοποίηση της κίνησης, η λύση και η αποφυγή των διενέξεων καθώς και η απόδοση δικαιοσύνης σε περιπτώσεις διαφορετικής προτεραιότητας των πακέτων.

- **Χρήση TSI ως ενταμιευτής οπτικών πακέτων στους μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου.**

Ένας σημαντικός παράγοντας για κάθε αρχιτεκτονική δικτύου είναι ο προσδιορισμός του μεγέθους της χωρητικότητας του δικτύου και η χωρητικότητα μεταγωγής του κάθε κόμβου ξεχωριστά. Όμως η κίνηση στο δίκτυο και στους κόμβους συγκεκριμένα δεν είναι σταθερή από τη φύση της αλλά συνεχώς μεταβάλλεται. Ο υπολογισμός του μεγέθους της κίνησης είναι δύσκολος και συχνά υπέρ- ή υποεκτιμάται. Γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενταμιευτών στους κόμβους μεταγωγής, για την αποφυγή απόρριψης πακέτων αλλά και την αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης. Οι ενταμιευτές αυτοί μάλιστα

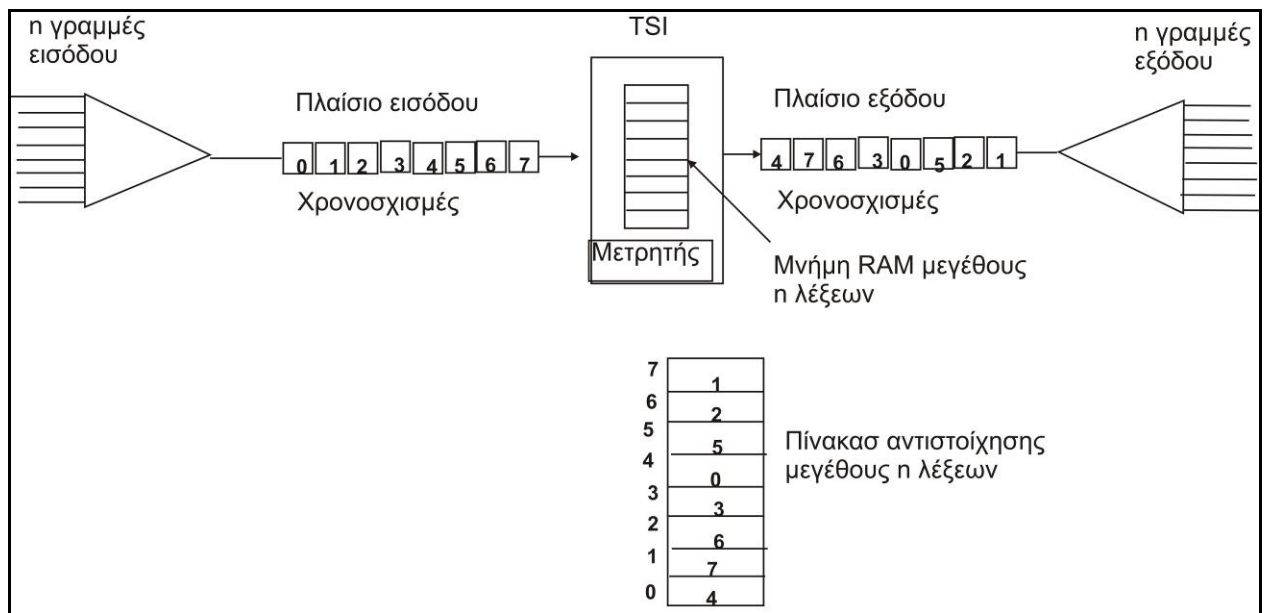
κρίνεται σημαντικό να λειτουργούν σε οπτικό επίπεδο, ώστε να μην υπάρχει καθυστέρηση στην μετατροπή των δεδομένων από οπτικά σε ηλεκτρονικά και πάλι σε οπτικά για την διαδικασία μετάδοσής τους.

Σε αυτό το στόχο μπορεί να συμβάλει ο TSI, ο οποίος αποτελεί μια απλή και πρακτική μέθοδο αποθήκευσης οπτικών πακέτων. Τα οπτικά πακέτα που συγκρούονται στην έξοδο του κόμβου κατευθύνονται στον TSI όπου ανταλλάζονται οι χρονοσχισμές τους με χρονοσχισμές μη συγκρουόμενων πακέτων.

Στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζεται ένας μεταγωγέας διαίρεσης χρόνου, όπου απεικονίζεται η λειτουργία του TSI ως ενταμιευτή. Στη μεταγωγή διαίρεσης χρόνου, οι γραμμές εισόδου σαρώνονται ακολουθιακά, ώστε να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο εισόδου με  $n$  χρονοσχισμές. Ο TSI δέχεται αυτά τα πλαίσια εισόδου και παράγει πλαίσια εξόδου, στα οποία έχουν αναδιαταχθεί οι χρονοσχισμές. Στην Εικόνα 6.1 η εισερχόμενη χρονοσχισμή 4 εξέρχεται πρώτη, μετά η χρονοσχισμή 7 κ.ο.κ. Τελικά, το πλαίσιο εξόδου αποπολυπλέκεται με την εξερχόμενη χρονοσχισμή 0 (εισερχόμενη χρονοσχισμή 4) να κατευθύνεται στη γραμμή 0 κ.ο.κ. Ουσιαστικά, ο μεταγωγέας μετακίνησε ένα byte από τη γραμμή εισόδου 4 στη γραμμή εξόδου 0, ένα άλλο byte από τη γραμμή εισόδου 7 στην γραμμή εξόδου 1 κ.ο.κ. με τη βοήθεια του TSI.

Ο TSI λειτουργεί ως εξής: Όταν ένα πλαίσιο εισόδου είναι έτοιμο προς επεξεργασία, κάθε χρονοσχισμή (δηλ. κάθε byte στο πλαίσιο εισόδου) γράφεται σε χώρο προσωρινής αποθήκευσης (buffer) RAM μέσα στον ανταλλάκτη (TSI). Οι χρονοσχισμές γράφονται με τη σειρά, ώστε η λέξη  $i$  της RAM να περιέχει τη χρονοσχισμή  $i$ .

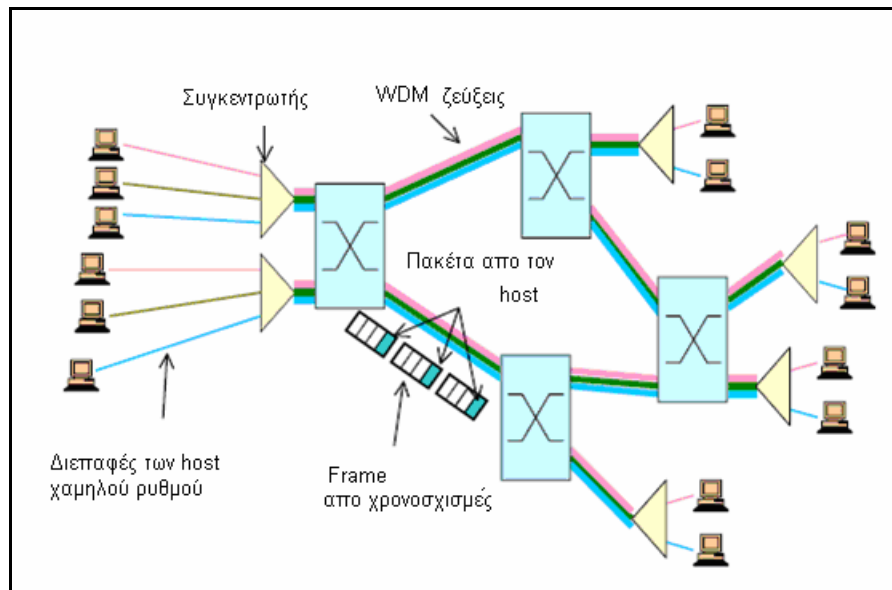
Από τη στιγμή που όλες οι χρονοσχισμές του πλαισίου εισόδου έχουν αποθηκευτεί στη RAM, το πλαίσιο εξόδου δημιουργείται διαβάζοντας τις λέξεις με διαφορετική σειρά. Ένας μετρητής μετρά από το 0 έως το  $n-1$ . Στο βήμα  $j$ , διαβάζονται τα περιεχόμενα της λέξης  $j$  ενός πίνακα αντιστοίχισης και χρησιμοποιούνται ως διεύθυνση της RAM. Αν, συνεπώς, η λέξη 0 του πίνακα αντιστοίχισης περιέχει το 4, η λέξη 4 της RAM θα διαβαστεί πρώτη και η πρώτη χρονοσχισμή του πλαισίου εξόδου θα είναι η χρονοσχισμή 4 του πλαισίου εισόδου. Έτσι, τα περιεχόμενα του πίνακα αντιστοίχισης καθορίζουν ποια αναδιάταξη του πλαισίου εισόδου θα αποτελέσει το πλαίσιο εξόδου και συνεπώς, ποια γραμμή εισόδου συνδέεται με ποια γραμμή εξόδου.



Εικόνα 6.1 Μεταγωγέας διαίρεσης χρόνου

- **Χρήση του TSI στους μεταγωγείς TSOBS (Time Sliced Optical Burst Switching) δικτύων**

Τα OBS δίκτυα είναι μια πειραματική τεχνολογία δικτύων που ενώ προτιμά τη χρήση οπτικών μεταγωγέων για το μονοπάτι των δεδομένων, διατηρεί ακόμα την ελαστικότητα των ηλεκτρονικών στοιχείων για τον έλεγχο. Γενικά για την μεταγωγή χρησιμοποιείται η τεχνολογία της αλλαγής μήκους κύματος η οποία όμως θεωρείται αρκετά ακριβή. Μια παραλλαγή της τεχνολογίας αυτής είναι τα TSOBS δίκτυα τα οποία αντικαθιστούν την μεταγωγή στον τομέα των μηκών κύματος με μεταγωγή στον τομέα του χρόνου. Παρόλο που και εδώ είναι αναγκαία η χρήση οπτικών ενταμιευτών, το μέγεθος της απαιτούμενης αποθήκευσης είναι λιγότερο από 1% αυτής που χρειάζεται για την συμβατική μεταγωγή πακέτων, η οποία μειώνει αισθητά το κόστος. Οι TSIs αποτελούν στοιχεία-κλειδιά για την δημιουργία TSOBS δικτύων. Ένα τέτοιο δίκτυο φαίνεται στην Εικόνα 6.2.

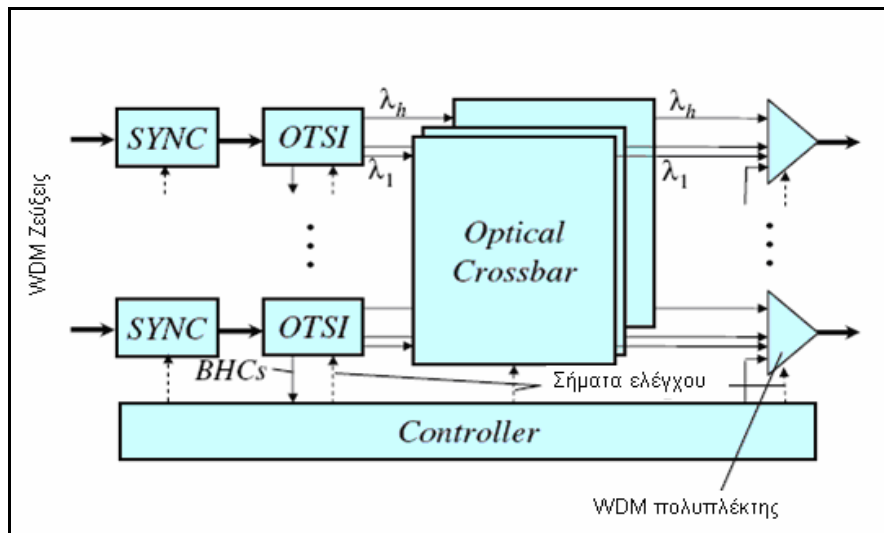


Εικόνα 6.2 Ένα TSOBS δίκτυο

Στην Εικόνα 6.3 παρουσιάζεται η δομή ενός μεταγωγέα TSOB ο οποίος χρησιμοποιεί TSIs, οι οποίοι παρέχουν την απαιτούμενη μεταγωγή στον τομέα του χρόνου για όλα τα μήκη κύματος ενώ επίσης ξεχωρίζουν τα μήκη κύματος που φέρουν τις επικεφαλίδες των πακέτων και τα προωθούν στον Ελεγκτή του συστήματος. Τέλος ξεχωρίζουν τα μήκη κύματος δεδομένων και τα προωθούν σε ξεχωριστές οπτικές ίνες σε μια από τις ομάδες των Οπτικών Crossbars στο κέντρο του σχήματος. [6.2]

Έτσι, τα πακέτα από τους hosts που είναι γραμμένα σε ορισμένα μήκη κύματος χωρίζονται σε χρονοσχισμές, οργανώνονται σε frames και υφίστανται την επιθυμητή αντιμετάθεση αυτών των χρονοσχισμών στους κόμβους μεταγωγείς, ανάλογα με το μήκος κύματος στο οποίο αυτές είναι γραμμένες. Έτσι, δεν υπάρχει ανάγκη για ενταμιευτές αφού ουσιαστικά τα πακέτα που θα ενταμιεύονταν υφίστανται καθυστέρηση για όσες χρονοσχισμές χρειάζεται. Αξίζει δε να αναφερθεί ότι με την χρήση του TSI σε αυτή την αρχιτεκτονική ελαττώνεται το κόστος που αφορούσε την μετατροπή μήκους κύματος, το οποίο είναι και ο πιο περιοριστικός παράγοντας στην εξέλιξη των OBS δικτύων, με αποτέλεσμα να τα καθιστά ανταγωνιστικά με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά.





Εικόνα 6.3 Το σχέδιο ενός μεταγωγέα TSOB

- **Σχέδιο ενός TSI ως διεπαφή**

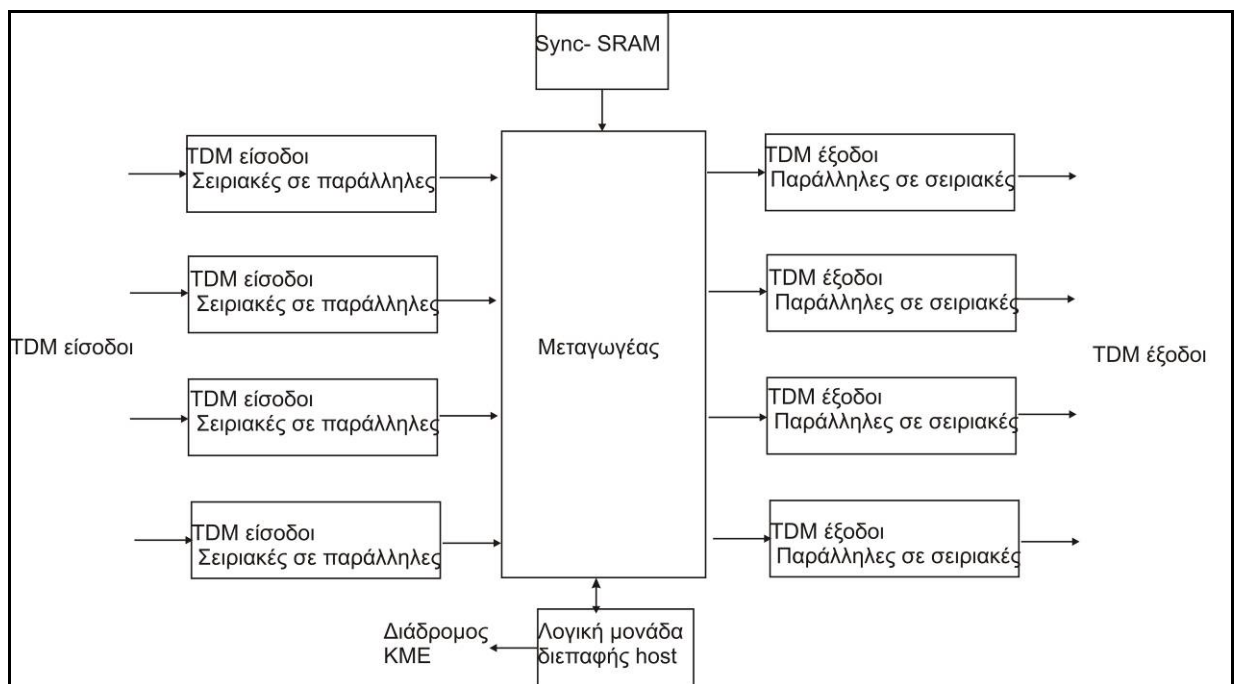
Η συγκεκριμένη εφαρμογή δείχνει το σχέδιο ενός οικονομικού TSI για την αντιμετάθεση χρονοσχισμών δεδομένων μεταξύ διαφόρων TDM διάδρομων (time-division-multiplexed busses). Η δρομολόγηση των χρονοσχισμών δεδομένων πραγματοποιείται μέσα από ένα πίνακα δρομολόγησης αποθηκευμένο στην SRAM. Επιτρέπει στα δεδομένα από και χρονοσχισμή να δρομολογηθούν σε μια άλλη χρονοσχισμή στην ίδια ή σε διαφορετική TDM διαδρομή.

Το TSI παράλληλα έχει χαρακτηριστικά που επιτρέπουν στον έλεγχο εξωτερικών ενταμιευτών ενώ παίζει υποστηρικτικό ρόλο για τη γενιά των βοηθητικών σημάτων συγχρονισμού του σήματος που αντιμετωπίζουν δυσκολία στη διεπαφή με chips. Η TSI λογική μπορεί να εφαρμοστεί στις μικρού μεγέθους, εξωτερικές πύλες Sync-SRAM όπου προσφέρει μια οικονομική λύση.

Επιστρέφοντας στην εφαρμογή που περιγράφουμε, πολλές φορές δεν είναι πρακτικό να συνδέουμε ένα μεγάλο αριθμό από συσκευές στην ίδια TDM διαδρομή. Μερικές φορές οι χρονοσχισμές πρέπει να είναι σε συγκεκριμένη σειρά καθώς τα ICs (integrated circuits- ενσωματωμένα κυκλώματα) δεν μπορούν να υποστηρίξουν πολλές χρονοσχισμές. Η διαχείριση ενός ρολογιού υψηλού ρυθμού μπορεί επίσης να προκαλέσει προβλήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ένα TSI μπορεί να αποτελέσει τη λύση καθώς αναλαμβάνει πολλαπλές TDM διαδρομές, δρομολογεί δεδομένα μεταξύ τους και μεταξύ διαφορετικών χρονοσχισμών. Ξεκινά με ένα πίνακα δρομολόγησης και σύμφωνα με αυτόν δρομολογεί τα δεδομένα.

Η Εικόνα 6.4 δείχνει το διάγραμμα ενός τέτοιου TSI. Τα δεδομένα εισέρχονται παράλληλα οπότε θα πρέπει να υπάρχουν σειριακοί-παράλληλοι και παράλληλοι-σειριακοί μετατροπείς στις εισόδους και στις εξόδους. Η SRAM χρησιμοποιείται για την ενταμίευση των δεδομένων όπως και για την αποθήκευση των πινάκων δρομολόγησης.

Ο σχεδιαστικός στόχος της συγκεκριμένης εφαρμογής TSI είναι να εμφανίζεται μια ίσης διάρκειας καθυστέρηση για όλες τις χρονοσχισμές μεταξύ των εισόδων και των εξόδων και να επιτευχθεί κάτι τέτοιο το εισερχόμενο frame πρέπει να είναι ολόκληρο γραμμένο στον ενταμιευτή προτού οποιοδήποτε μέρος του διαβαστεί για έξοδο. [6.3]



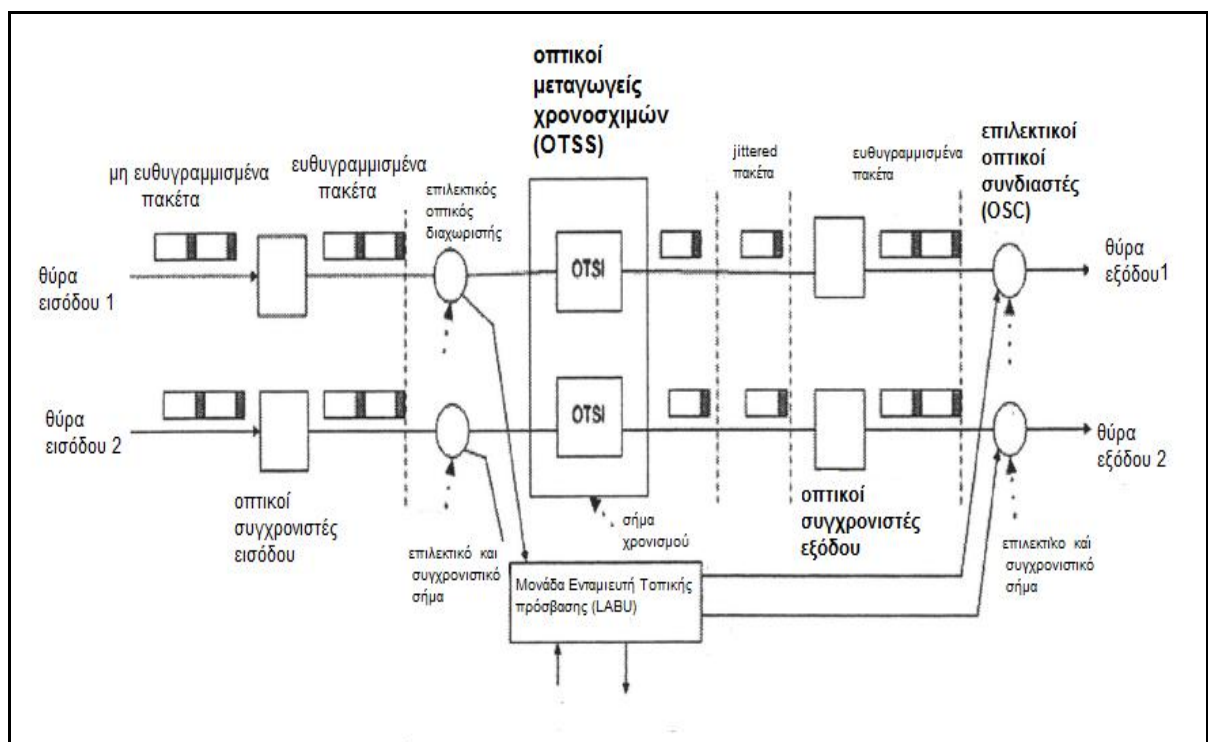
Εικόνα 6.4 Το διάγραμμα του TSI ως διεπαφή.

- **Χρήση του TSI σε διαμοιραζόμενο δρομολογητή χρονοσχισμών για WDM οπτικά δίκτυα TDM μήκους κύματος.**

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική παρουσιάζει ένα STSWR (shared timeslot wavelength router) δρομολογητή που επιτρέπει στο εύρος ζώνης μιας χρονοσχισμής ενός μήκος κύματος να διαμοιράζεται στην κίνηση δεδομένων χαμηλής ταχύτητας Ethernet με μια ενεργή σύνδεση και ταξιδεύει από την ίδια διαδρομή, από την ίδια STSWR πηγή προς τον STSWR προορισμό. Η διαμοιραζόμενη χρονοσχισμή μιας διαδρομής δεν αποδεσμεύεται μέχρι να λήξει η διάρκεια σύνδεσης όλων των συνδέσεων που μοιράζονται τη χρονοσχισμή.

Ο STSWR δρομολογητής πρέπει να αποφασίσει τη διαδρομή, το μήκος κύματος και τη χρονοσχισμή στο TDM frame για κάθε σύνδεση που επιθυμεί να συνδεθεί με ένα νέο STSWR προορισμό που δεν βρίσκεται στην ήδη υπάρχουσα λίστα συνδέσεων ή ένα υπάρχων προορισμό όπου η καθορισμένη χρονοσχισμή δεν έχει ελεύθερο εύρος ζώνης. Ο STSWR δρομολογητής χρησιμοποιεί για τη μεταγωγή κυκλώματα OTSI. Συγκεκριμένα ο TSI βρίσκεται μέσα σε ένα 2x2 OTDS (Optical Time-Division Switch) μεταγωγέα όπου είναι συγκεντρωμένες οι οπτικές γραμμές του ίδιου μήκους κύματος για να δρομολογήσουν τις εισερχόμενες χρονοσχισμές. Η κύρια λειτουργία του OTDS δρομολογητή είναι να διασφαλίσει ότι οι χρονοσχισμές αντιμετωπίζονται καταλλήλως στον OTSI για το κάθε μήκος κύματος κάθε θύρας και η εν λόγω αντιμετάθεση πραγματοποιείται εσωτερικά στον OTSI με γραμμές καθυστέρησης οπτικής ίνας. [6.4]

Η Εικόνα 6.5 παρουσιάζει έναν OTDS δύο εισόδων και δύο εξόδων σε ένα μήκος κύματος ενός δρομολογητή STSWR και τη λειτουργική σημασία των μεταγωγέων OTDSS και ως εκ τούτου των OTSI που είναι συστατικά μέρη του δρομολογητή.

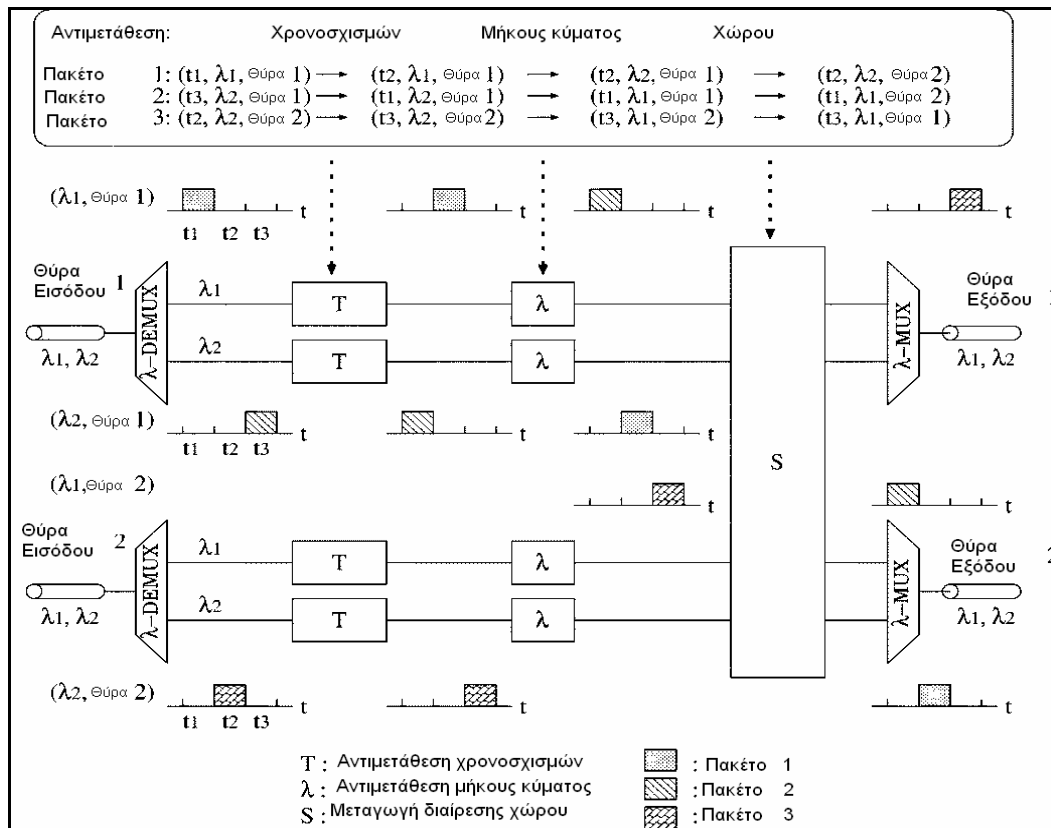


Εικόνα 6.5 Αρχιτεκτονική 2x2 OTDS ενός δρομολογητή STSWR

- **Χρήση του TSI για υβριδική μεταγωγή διαίρεσης χρόνου-χώρου-μήκους κύματος.**

Όπως αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου για να έχουμε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη διαδικασία της μεταγωγής χρησιμοποιούμε μεταγωγείς διαίρεσης χρόνου στη θέση των μεταγωγέων διαίρεσης χώρου. Το πρόβλημα όμως που συναντάμε σε αυτή την περίπτωση είναι η μεγάλη καθυστέρηση που φαίνεται να εισάγουν. Ο συνδυασμός των μεταγωγέων διαίρεσης χώρου και χρόνου έχει ως αποτέλεσμα η τελική αρχιτεκτονική να είναι συμπαγής και χαμηλής καθυστέρησης. Η επιπλέον προσθήκη ενός μεταγωγέα διαίρεσης μήκους κύματος επιτρέπει την ανάπτυξη ενός φωτονικού συστήματος μεταγωγής που συναντάται σε πολλές εφαρμογές και πιο συγκεκριμένα στη χρήση IP (Internet Protocol) πρωτοκόλλου πάνω από δίκτυα πολυπλεξίας μήκους κύματος (WDM Networks). Γενικά τα τελευταία χρόνια η χρήση υβριδικών αρχιτεκτονικών δίνει πολλές φορές λύσεις σε προβλήματα που ανέκυπταν παλιότερα.

Η Εικόνα 6.6 δείχνει ένα μεταγωγέα διαίρεσης χρόνου-χώρου-μήκους κύματος. Ο μεταγωγέας πραγματοποιεί την ταυτόχρονη και ταχύτατη αντιμετάθεση των χρονοσχισμών και μηκών κύματος οπτικών πακέτων. Υποθέτουμε ότι έχει 2x2 θύρες εισόδου και εξόδου στις οποίες συνδέεται μια WDM ζεύξη δυο μηκών κύματος. Τρεις χρονοθυρίδες στο frame προσδιορίζονται ως κανάλια διαίρεσης χρόνου στα καθορισμένου μήκους πακέτα. Ενσωματώνοντας τον αντιμεταθέτη χρονοσχισμών και τον αντιμεταθέτη μήκους κύματος στον 4x4 μεταγωγέα διαίρεσης χώρου εγκαθίσταται η σύνδεση ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο των WDM ζεύξεων. Περνώντας στη διαδικασία, το εισερχόμενο πακέτο αρχικά υφίσταται αντιμετάθεση χρονοσχισμών, έπειτα αντιμετάθεση μήκους κύματος και τέλος κατευθύνεται μέσω του μεταγωγέα διαίρεσης χώρου στην αντίστοιχη Θύρα Εξόδου. [6.5]



Εικόνα 6.6 Μεταγωγείας διαίρεσης χρόνου-χώρου-μήκους κύματος

### 6.3 Επίλογος

Στην διπλωματική αυτή παρουσιάσαμε την υλοποίηση ενός οπτικού αντιμεταθέτη χρονοσχισμών (TSI) κάνοντας χρήση οπτικών συμβολόμετρων MZI για μετατροπή μήκους κύματος. Καταγράφηκε και αναλύθηκε η πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα αυτής καθώς και διάφορες εναλλακτικές υλοποιήσεις του TSI. Τελικά παρουσιάστηκαν διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύων στις οποίες ο TSI μπορεί να αποτελέσει συστατικό μέρος σε χαμηλό επίπεδο (φυσικό και δικτύου) και επισημάνθηκε η χρησιμότητά του. Ως συμπέρασμα θα μπορούσαμε να πούμε ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη λύση διενέξεων που εμφανίζονται στους κόμβους όταν πολλαπλά πακέτα θέλουν να κατευθυνθούν προς την ίδια έξοδο και τη μορφοποίηση της κίνησης σε οπτικά δίκτυα μεταγωγής και να συμβάλει στην περαιτέρω ανάπτυξή τους.

## **6.4 Βιβλιογραφία**

[6.1] Upgrade scenarios for OPS networks Jan Cheyns, Didier Colle, Chris Develder, Erik Van Breusegem, Mario Pickavet, Piet Demeester

[6.2] Time Sliced Optical Burst Switching Jeyashankher Ramamirtham, Jonathan Turner

[6.3] Design of a Time-Slot-Interchanger and Other TDM bus Interfacing Issues. David Kessner Cyclades Corporation

[6.4] A Shared Time-Slot Router Architecture for TDM Wavelength Optical WDM

Networks Yoong Cheah Huei and Pung Hung Keng School of InfoComm Technology, Network Services & Systems Laboratory Ngee Ann Polytechnic, National University of Singapore

[6.5] Photonic Time-Slot and Wavelength-Grid Interchange for 10-Gb/s Packet Switching Kiyoshi Onohara, Student Member, IEEE, Hideyuki Sotobayashi, Member, IEEE, Ken-ichi Kitayama, Senior Member, IEEE, and Wataru Chujo, Member, IEEE