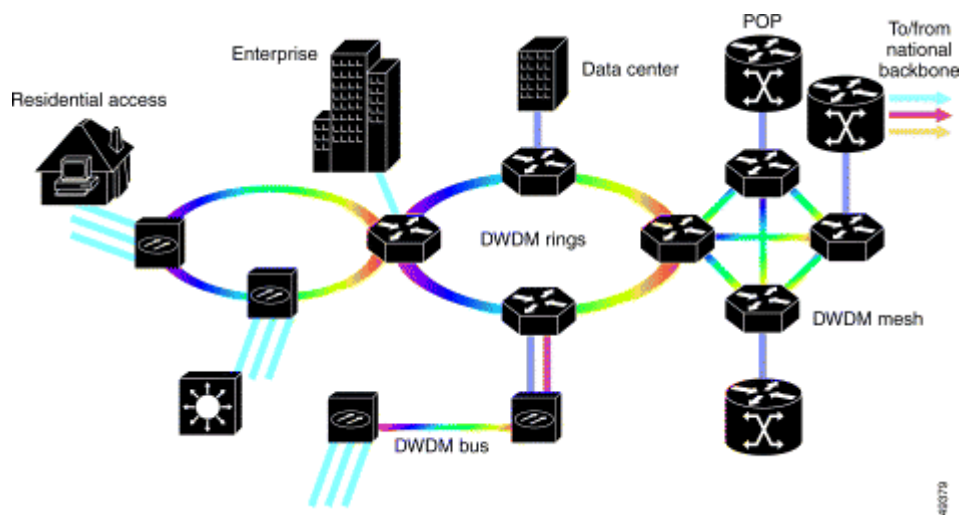


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΑ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ “ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ”, ΜΕ ΤΙΤΛΟ: “IP OVER
SONET/SDH OVER WDM vs. IP OVER WDM”



ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ:
ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ
(Β΄ ΕΞΑΜΗΝΟ ΜΙΣ)

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

UNIVERSITY OF MACEDONIA
MASTER IN INFORMATION SYSTEMS

**STUDY TITLED “COMPARISON OF IP OVER SONET/SDH
OVER WDM vs. IP OVER WDM” FOR THE “ NETWORKING
TECHNOLOGIES” COURSE**

**STUDY OF THE POST-GRADUATE STUDENT:
KARAGIANNAKIS GEORGIOS
(2nd SEMESTER OF MIS)**

PROFESSOR: ANASTASIOS A. ECONOMIDES

THESSALONIKI 2002

ABSTRACT

The Wavelength Division Multiplexing-WDM technology has been recognized as the implementation that will offer a long-term solution to the serious problem of the explosive increase for bandwidth demand. The rapid increase of the IP traffic, along with the emergence of IP as the common foundation for all services has made obvious the fact that the traditional implementation of ‘IP over SONET/SDH’ is insufficient.

There are two ways of implementing the WDM technology, either the installation of the WDM layer in the existing ‘IP over SONET/SDH’ systems, through the ‘IP over SONET/SDH over WDM’ configuration, or the abolishment of the SONET/SDH layer, through the ‘IP over WDM’ configuration. At short notice, especially for the case of the existence of an ‘IP over SONET/SDH’ network, the first implementation seems to be suitable, since it has lower costs and it is less complex for the occasion. Additionally, there is much reluctance in the suppression of the SONET/SDH layer since this is based on a matured and reliable technology, despite the redundancy. In the long run, especially for the cases of no-existence of an ‘IP over SONET/SDH’ system, ‘IP over WDM’ is the less complicated and most flexible solution, as the networks direction is towards all-optical.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνική της πολύπλεξης στο πεδίο του μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM) έχει πλέον αναγνωριστεί ως η υλοποίηση που θα προσφέρει μια μακροπρόθεσμη λύση στο σοβαρό πρόβλημα της ραγδαίας αύξησης των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης. Η εκρηκτική αύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων στο Διαδίκτυο (IP data) και η τάση το IP πρωτόκολλο να αποτελέσει την κοινή βάση για όλες τις προσφερόμενες υπηρεσίες κατέστησε, πλέον, φανερό το γεγονός ότι η παραδοσιακή υλοποίηση της μεταφοράς IP πακέτων μέσω SONET/SDH (‘IP over SONET/SDH’) είναι ανεπαρκής.

Η εφαρμογή της WDM τεχνολογίας είναι δυνατό να γίνει με δύο τρόπους, είτε με την ενσωμάτωση ενός WDM στρώματος στα υπάρχοντα ‘IP over SONET/SDH’ συστήματα –μέσω μιας ‘IP over SONET/SDH over WDM’ υλοποίησης, είτε μέσω της κατάργησης του SONET/SDH επιπέδου με τα IP πακέτα να μεταφέρονται απευθείας μέσω του WDM στρώματος (‘IP over WDM’). Βραχυπρόθεσμα και ιδιαίτερα για την περίπτωση που προϋπάρχει ένα ‘IP over SONET/SDH’ δίκτυο, φαίνεται να ευνοείται η πρώτη υλοποίηση δεδομένου ότι είναι οικονομικότερη η απλή εγκατάσταση ενός επιπλέον στρώματος σε ένα υφιστάμενο σύστημα παρά η ριζική αναθεώρησή του μέσω της ταυτόχρονης κατάργησης ενός στρώματος και της προσθήκης ενός νέου. Επιπλέον, υπάρχει και η απροθυμία της γρήγορης κατάργησης του SONET/SDH επιπέδου, δεδομένου ότι βασίζεται σε μια ώριμη και αξιόπιστη πλέον τεχνολογία παρά τους πλεονασμούς που είναι φανερό ότι εισάγονται. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα και ειδικότερα σε περιπτώσεις που δεν προϋπάρχει κάποιο ‘IP over SONET/SDH’ σύστημα η απλούστερη και πιο ευέλικτη ‘IP over WDM’ υλοποίηση θα αποτελέσει τη βέλτιστη λύση, στα πλαίσια της γενικότερης κατεύθυνσης προς τα εξολοκλήρου οπτικά δίκτυα (All-Optical Networks).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ.....	5
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SONET/SDH	6
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	6
2.2 ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ SONET	7
2.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ SONET/SDH	9
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΗΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING-WDM)	11
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	11
3.2 ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ-ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ WDM.....	12
3.2.1 <i>Οπτικές Ίνες (Optical Fibers)</i>	12
3.2.2 <i>Πηγές φωτός και Ανιχνευτές (Light Sources and Detectors)</i>	13
3.2.3 <i>Οπτικοί Ενισχυτές (Optical Amplifiers)</i>	14
3.2.4 <i>Οπτικοί Πολυπλέκτες/Αποπολυπλέκτες</i>	15
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ‘IP OVER SONET/SDH’ ΚΑΙ ‘IP OVER SONET/SDH OVER WDM’	18
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	18
4.2 ΤΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ‘IP OVER SONET/SDH OVER WDM’ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΓΑΛΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ (WANs)	20
4.3 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (MANs)	20
4.4 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ‘CLIENT OVER SONET OVER WDM’ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	21
4.4.1 <i>Αρχιτεκτονικές Από-Σημείο-Σε-Σημείο (Point-to-Point Architectures)</i>	22
4.4.2 <i>Αρχιτεκτονικές Δακτυλίου (Ring Architectures)</i>	25
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ‘IP OVER WDM’	27
5.1 ΓΕΝΙΚΑ	27
5.2 Η ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΕΝΟΣ ‘IP OVER WDM’ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΕΤΙΚΕΤΩΝ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ (MULTI-PROTOCOL LABEL SWITCHING-MPLS).....	28
5.3 ΤΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΑ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ‘IP OVER WDM’ ΕΝΑΝΤΙ ΤΗΣ ‘IP OVER SONET/SDH OVER WDM’ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	30
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	32
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	33

TABLE OF CONTENTS

1. DESCRIPTION OF THE CURRENT STUDY	5
2. DESCRIPTION OF SONET/SDH TECHNOLOGY	6
1.1 GENERAL PRINCIPLES	6
1.2 MAIN COMPONENTS OF A SONET/SDH NETWORK	7
1.3 ARCHITECTURES OF SONET/SDH NETWORKS	9
2. DESCRIPTION OF WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING-WDM TECHNOLOGY	11
2.1 GENERAL PRINCIPLES	11
2.2 THE EQUIPMENT OF WDM TECHNOLOGY.....	12
2.2.1 <i>Optical Fibers</i>	12
2.2.2 <i>Light Sources and Detectors</i>	13
2.2.3 <i>Optical Amplifiers</i>	14
2.2.4 <i>Optical Multiplexers/Demultiplexers</i>	15
3. DESCRIPTION OF THE ‘IP OVER SONET/SDH’ AND ‘IP OVER SONET/SDH OVER WDM’ NETWORKING TECHNOLOGIES.....	18
3.1 GENERAL PRINCIPLES	18
3.2 THE ADVANTAGES OF ‘IP OVER SONET/SDH OVER WDM’ TECHNOLOGY FOR THE LONG-HAUL NETWORKS (WANS).....	20
3.3 THE CASE OF METROPOLITAN NETWORKS (MANS).....	20
3.4 NETWORKING ARCHITECTURES OF ‘CLIENT OVER SONET OVER WDM’ AND PROTECTION METHODS.....	21
3.4.1 <i>Point-to-Point Architectures</i>	22
3.4.2 <i>Ring Architectures</i>	25
4. DESCRIPTION OF ‘IP OVER WDM’ TECHNOLOGY.....	27
4.1 GENERAL PRINCIPLES	27
4.2 THE INTEGRATION OF IP AND WDM LAYERS OF AN ‘IP OVER WDM’ NETWORK THROUGH MULTI-PROTOCOL LABEL SWITCHING-MPLS	28
4.3 THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF ‘IP OVER WDM’ VS. ‘IP OVER SONET/SDH OVER WDM’	30
5.CONCLUSIONS	32
6. REFERENCES.....	33

1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ

Η παρούσα μελέτη αφορά στη σύγκριση δύο τεχνολογιών υλοποίησης οπτικών δικτύων (των ‘IP over SONET/SDH over WDM’ και ‘IP over WDM’) που υπόσχονται, μέσα στα επόμενα χρόνια, να προσφέρουν πρακτικά απεριόριστο εύρος ζώνης, συμβάλλοντας παράλληλα στην πραγματοποίηση πληθώρας διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω του IP πρωτοκόλλου.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες βάσης αυτών των υλοποιήσεων. Έτσι, γίνεται αναφορά στην τεχνολογία SONET/SDH, τα βασικά στοιχεία της και τα πλεονεκτήματά της. Στη συνέχεια περιγράφεται η τεχνική της πολύπλεξης στο πεδίο του μήκους κύματος (WDM) και τονίζονται οι επαναστατικές αλλαγές που αυτή επέφερε. Αναλύεται ο εξοπλισμός που απαιτείται για την υλοποίησή της καθώς και τα πλεονεκτήματά της σε σχέση με την παραδοσιακή τεχνολογία SONET/SDH. Κατόπιν, περιγράφεται αναλυτικά η ‘IP over SONET/SDH over WDM’ υλοποίηση και αντιδιαστέλλεται με την παλαιότερη ‘IP over SONET’ λύση με σκοπό την πληρέστερη καταγραφή των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της. Όπως είναι φυσικό, ακολουθεί η ανάλυση της ριζοσπαστικότερη και πολλά υποσχόμενης μελλοντικά ‘IP over WDM’ υλοποίησης. Στην ενότητα αυτή παρατίθενται μεταξύ άλλων και τα δυνατά/αδύνατα σημεία μιας τέτοιας τεχνολογίας, έναντι στη συμβατικότερη ‘IP over SONET/SDH over WDM’ διαμόρφωση. Τέλος, παρατίθενται συνοπτικά τα συμπεράσματα της μελέτης αυτής και εξετάζονται οι μελλοντικές προοπτικές των δύο υλοποιήσεων.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SONET/SDH

2.1 Γενικά

Οι όροι SONET (Synchronous Optical Network) και SDH (Synchronous Digital Hierarchy) αναφέρονται σε ένα σύνολο καθορισμένων προτύπων που περιγράφουν την εκπομπή δεδομένων με τη μέθοδο της πολύπλεξης στο πεδίο του χρόνου (Time-Division Multiplexing-TDM) σε δίκτυα οπτικών ινών (fiber optical networks). Ουσιαστικά, πρόκειται για την αμερικανική και την διεθνή έκδοση της ίδιας σειράς προτύπων. Έτσι, το Αμερικανικό Ινστιτούτο Εθνικών Προτύπων (ANSI) είναι υπεύθυνο για το συντονισμό και την έκδοση των προτύπων SONET, ενώ η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) είναι υπεύθυνη για τη σειρά SDH [1].

Το βασικό πρόβλημα το οποίο επιλύει επιτυχώς η τεχνολογία SONET/SDH είναι οι πολύπλοκες διαδικασίες μετατροπών (πολύπλεξης-αποπολύπλεξης κωδικοποίησης-αποκωδικοποίησης) που θα απαιτούνταν για την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών τύπων δικτύων. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται μέσω της προτυποποίησης κατά SONET/SDH των ρυθμών μεταφοράς και των τρόπων με τον οποίο είναι οργανωμένα τα δεδομένα. Έτσι, είναι δυνατή η μεταφορά πολλών διαφορετικών τύπων δεδομένων μέσω μιας κοινής γραμμής [2]. Ειδικότερα, άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα που εξασφαλίζει η τεχνολογία SONET είναι τα εξής [3]:

- Μείωση των απαιτήσεων σε εξοπλισμό και βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου.
- Πρόβλεψη των ‘overhead και payload bytes’, με τα ‘overhead bytes’ (φορείς των πληροφοριών τρόπου εκπομπής και του πρωτοκόλλου) να επιτρέπουν την ξεχωριστή διαχείριση των ‘payload bytes’ (φορείς των δεδομένων) και τη διευκόλυνση μιας κεντρικής τμηματοποιημένης διαχείρισης σφαλμάτων.
- Ορισμός ενός τύπου σύγχρονης πολύπλεξης (synchronous multiplexing) για τα χαμηλότερου επιπέδου ψηφιακά σήματα, καθώς και μιας σύγχρονης δομής (synchronous structure) που απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό τη διασύνδεση με τον εξοπλισμό.
- Διαθεσιμότητα ενός συνόλου πρότυπων γενικής φύσεως, γεγονός που επιτρέπει τη διασύνδεση προϊόντων διαφορετικών κατασκευαστών.
- Ορισμός μιας ευέλικτης αρχιτεκτονικής, ικανής να ενσωματώσει πιθανές μελλοντικές εφαρμογές μέσω μιας ποικιλίας ρυθμών εκπομπής.

Το βασικό δομικό στοιχείο των οπτικών διασυνδέσεων (optical interfaces) της τεχνολογίας SONET είναι το Σήμα Σύγχρονης Μεταφοράς (Synchronous Transport Signal-STS), με ρυθμό μεταφοράς 51,84 Mbps. Το αντίστοιχο για το πρότυπο SDH είναι η Μονάδα Σύγχρονης Μεταφοράς (Synchronous Transfer Module-STM). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι προτυποποιημένοι ρυθμοί για τις SONET/SDH πλατφόρμες, με τους αντίστοιχους συμβολισμούς για το οπτικό και το ηλεκτρικό επίπεδο.

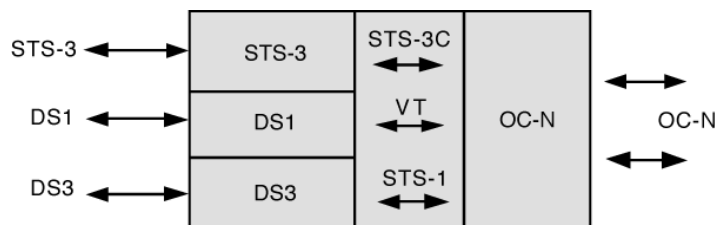
Πίνακας 2.1: Η ψηφιακή ιεραρχία SONET/SDH [1]

Οπτικό Επίπεδο	Ηλεκτρικό Επίπεδο	Ρυθμός (Mbps)	Payload Rate (Mbps)	Overhead Rate (Mbps)	Ισοδύναμο SDH block
OC-1	STS-1	51,840	50,112	1,728	-
OC-3	STS-3	155,520	150,336	5,184	STM-1
OC-9	STS-9	466,560	451,008	15,552	STM-3
OC-12	STS-12	622,080	601,344	20,736	STM-4
OC-18	STS-18	933,120	902,016	31,104	STM-6
OC-24	STS-24	1244,160	1202,688	41,472	STM-8
OC-36	STS-36	1866,240	1804,032	62,208	STM-12
OC-48	STS-48	2488,320	2405,376	82,944	STM-16
OC-96	STS-96	4976,640	4810,752	165,888	STM-32
OC-192	STS-192	9953,280	9621,504	331,776	STM-64

2.2 Τα κύρια συστατικά ενός δικτύου SONET [3]

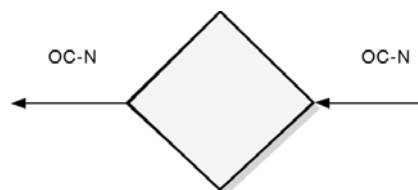
Τα βασικά συστατικά ενός δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία SONET/SDH περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Τερματικοί Πολυπλέκτες (Terminal Multiplexers-PTEs):** Επιτελούν το σημαντικότερο έργο της συγκέντρωσης όλων των ψηφιακών (ηλεκτρικών ή οπτικών) σημάτων ή/και οποιονδήποτε άλλων συμβαλλόμενων σημάτων. Τα σήματα πολυπλέκονται και μεταδίδονται σε οπτικό επίπεδο, μέσω μιας κοινής OC-N γραμμής.



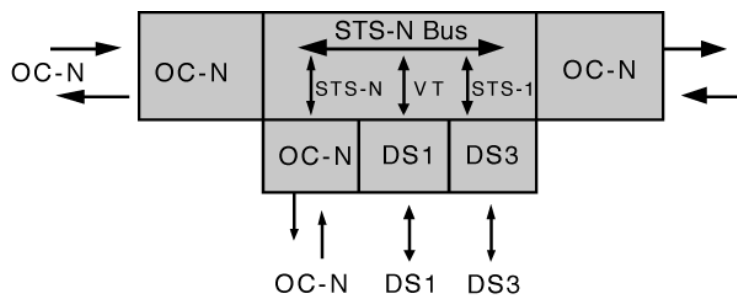
Σχήμα 2.1: Παράδειγμα λειτουργίας του τερματικού πολυπλέκτη [3]

- **Συσκευές Αναγέννησης Σήματος (Regenerators):** Αυτές οι συσκευές είναι απαραίτητες στις περιπτώσεις κατά τις οποίες, λόγω μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των πολυπλεκτών, το σήμα εξασθενίζει σημαντικά. Η ενίσχυση του σήματος αντικαθιστά το ‘overhead’ τμήμα αυτού και το επαναμεταδίδει.



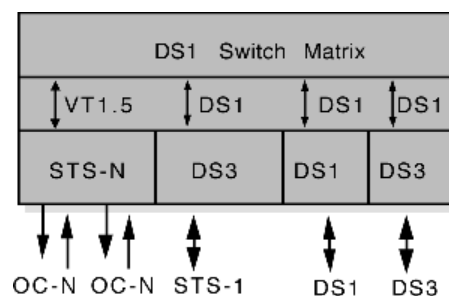
Σχήμα 2.2: Αναγεννητής Σήματος [3]

- **Πολυπλέκτες Ελεγχόμενης Πολύπλεξης (Add/Drop Multiplexers-ADMs):** Οι συγκεκριμένες συσκευές αναλαμβάνουν να πολυπλέξουν μόνο τα σήματα που είναι απαραίτητο να προσπελαστούν στο δεδομένο σημείο του δικτύου, ενώ τα υπόλοιπα περνούν δίχως να υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία. Οι πολυπλέκτες αυτοί επιτρέπουν τη διασύνδεση μεταξύ των σημάτων SONET και των διαφορετικού τύπου σημάτων στο δίκτυο.



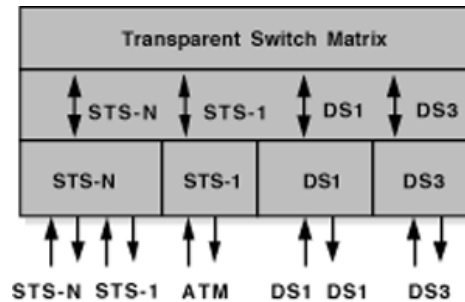
Σχήμα 2.3: Πολυπλέκτης Ελεγχόμενης Πολύπλεξης [3]

- **Wideband Digital Cross-Connects:** Η αποστολή τους έγκειται στο να δέχονται πολλαπλά οπτικά σήματα, προσπελάζοντας τα στοιχειώδη σήματα STS-1 και επιτρέποντας τη μεταγωγή στο επίπεδο αυτό. Τα στοιχεία αυτά καθιστούν δυνατή τη διασύνδεση πολύ μεγαλύτερου αριθμού STS-1 σημάτων, σε σχέση με τους πολυπλέκτες ελεγχόμενης πολύπλεξης. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι οι μειωμένες διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης, λόγω του ότι μόνον τα απαιτούμενα σήματα προσπελάσσονται και μετάγονται. Τα χαρακτηριστικά αυτών των συσκευών, τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές διαχείρισης δικτύων.



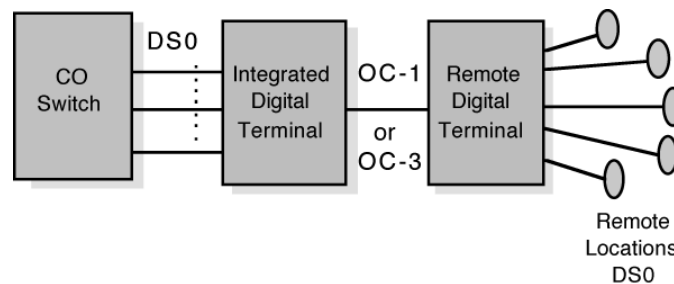
Σχήμα 2.4: Wideband Digital Cross-Connect [3]

- **Broadband Digital Cross-Connects:** Επιτελεί τη διασύνδεση των διαφόρων σημάτων SONET με τα ψηφιακά σήματα DS-3. Ομοίως με το προηγούμενο στοιχείο, προσπελάζει τα STS-1 σήματα, εκτελώντας τη μεταγωγή στο επίπεδο αυτό. Η χρήση των στοιχείων αυτών είναι ως ‘SONET hubs’.



Σχήμα 2.5: Broadband Digital Cross-Connect [3]

- **Μεταφορείς Ψηφιακού Βρόχου (Digital Loop Carriers-DLCs):** Η συσκευή αυτή αποτελείται από ένα σύνολο πολυπλεκτών και διακοπτών και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος συλλέκτη των υπηρεσιών χαμηλών ταχυτήτων, προτού αυτές εισέλθουν στο κεντρικό τοπικό γραφείο (CO) και τεθούν προς διανομή. Με αυτόν τον τρόπο, ο αριθμός των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετηθούν δεν περιορίζεται από τον αριθμό των γραμμών που εξυπηρετούνται από το CO.

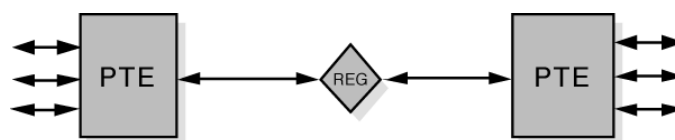


Σχήμα 2.6: Μεταφορέας Ψηφιακού Βρόχου [3]

2.3 Αρχιτεκτονικές Δικτύων SONET/SDH [3]

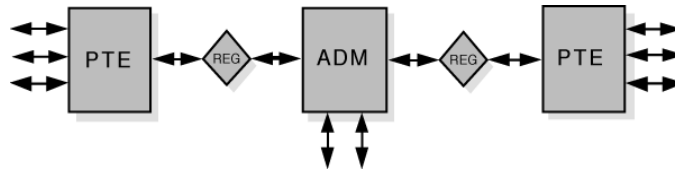
Μετά την εξέταση των συστατικών στοιχείων ενός SONET/SDH δικτύου, κρίνεται σκόπιμη η παράθεση των δυνατών αρχιτεκτονικών ενός τέτοιου δικτύου:

- **Σημείο-σε-σημείο (point-to-point) Αρχιτεκτονική:** Στην απλούστερη έκδοσή του περιλαμβάνει δύο τερματικούς πολυπλέκτες (PTE), οι οποίοι συνδέονται μέσω οπτικής ίνας, παρουσία ή απουσία συσκευής αναγέννησης σήματος (regenerator). Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελεί ταυτόχρονα και την απλούστερη υλοποίηση SONET δικτύων.



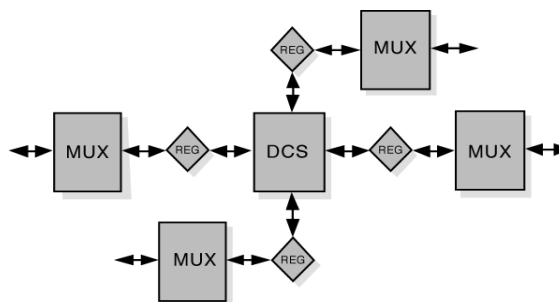
Σχήμα 2.7: Αρχιτεκτονική ‘point-to-point’ [3]

- **Σημείο-σε πολλαπλά σημεία (point-to multipoint) Αρχιτεκτονική:** Η διαμόρφωση αυτή περιλαμβάνει και την προσθήκη/παράλειψη κυκλωμάτων (adding/dropping circuits) κατά μήκος της διαδρομής. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η ύπαρξη των πολυπλεκτών ελεγχόμενης πολύπλεξης (ADMs) για την επιτέλεση της συγκεκριμένης λειτουργίας.



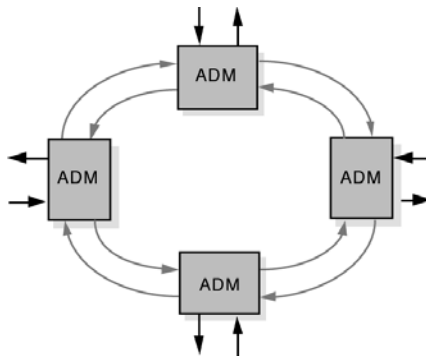
Σχήμα 2.8: Αρχιτεκτονική ‘point-to-multipoint’[3]

- **Δίκτυο κομβικού σημείου (Hub Network):** Ένα ‘hub’ αποτελεί το κομβικό σημείο της κυκλοφορίας στο δίκτυο, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την επανατροφοδότηση (regprovisioning) των κυκλωμάτων. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει ευελιξία, συγκριτικά με τις ‘point-to-point’ αρχιτεκτονικές, κατά τις περιπτώσεις επέκτασης ή μεταβολής του δικτύου.



Σχήμα 2.9: Αρχιτεκτονική Κομβικού Σημείου (Hub) [3]

- **Αρχιτεκτονική Δακτυλίου (Ring Architecture):** Τα βασικά δομικά στοιχεία αυτής της διαμόρφωσης είναι τα ADMs, τα οποία και τοποθετούνται σε τοπολογία δακτυλίου επιτρέποντας την κατεύθυνση της πληροφορίας προς μία ή και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το κύριο πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής δακτυλίου είναι η επιβιωσιμότητά της.

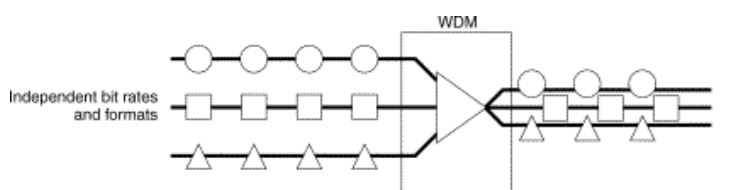


Σχήμα 2.10: Αρχιτεκτονική Κομβικού Σημείου (Hub) [3]

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΛΥΠΛΕΞΗΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING-WDM)

3.1 Γενικά [4,5]

Η τεχνολογία πολύπλεξης στο πεδίο του μήκους κύματος (WDM) αποτελεί μια μέθοδο σημαντικής αύξησης της χωρητικότητας του φυσικού μέσου (οπτική ίνα), μέσω της εκχώρησης σε καθένα από τα εισερχόμενα οπτικά σήματα ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος (λ) ή συχνότητας, από ένα καθορισμένο εύρος συχνοτήτων.



Σχήμα 3.1: Αυξάνοντας τη χωρητικότητα του μέσου μετάδοσης με την τεχνολογία WDM [5]

Έτσι, σε ένα σύστημα WDM, ένα πλήθος διαφορετικών σημάτων μεταφέρονται υπό τη μορφή διακριτών μηκών κύματος ή καναλιών μέσω της οπτικής ίνας και αποπολυπλέκονται στο σημείο λήψης. Όπως και με τη μέθοδο TDM, που χρησιμοποιείται από την τεχνολογία SONET/SDH, η ολική χωρητικότητα του μέσου είναι το άθροισμα των εισερχόμενων σημάτων, με τη διαφορά ότι καθένα από τα σήματα αυτά μεταφέρεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι κάθε κανάλι έχει το δικό του, αποκλειστικό, εύρος ζώνης. Επιπλέον, μια άλλη σημαντική διαφορά σε σχέση με την τεχνολογία SONET/SDH έγκειται στο γεγονός ότι μέσω της WDM είναι δυνατή η μεταφορά πολλαπλών πρωτοκόλλων, δίχως να απαιτείται η χρήση μιας κοινής τυποποίησης των σημάτων.

Συχνά, η τεχνολογία WDM αναφέρεται και ως DWDM (Dense-WDM) και προφανώς η μόνη διαφορά της DWDM έγκειται στο μεγαλύτερο αριθμό των μεταφερόμενων καναλιών, μέσω της διαίρεσης του καθορισμένου εύρους συχνοτήτων σε περισσότερα μήκη κύματος (πρακτικά περισσότερα από 8). Στη συνέχεια, ο όρος WDM θα εννοείται ότι περιλαμβάνει και την DWDM μορφή για λόγους απλοποίησης.

Το προφανέστερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας WDM εντοπίζεται στη δυνατότητά της να παρέχει τεράστια αύξηση (πρακτικά απεριόριστη) της χωρητικότητας μετάδοσης. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα της WDM συνοψίζονται στα παρακάτω:

- *Διαφάνεια (Transparency):* Δεδομένου ότι η WDM αποτελεί μια αρχιτεκτονική στο φυσικό επίπεδο, είναι δυνατή η διαφανής υποστήριξη τόσο της TDM τεχνολογίας όσο και δεδομένων προτυποποιημένων κατά ATM, Gigabit Ethernet, ESCON και Fibre Channel, επιτυγχάνοντας τη διασύνδεση μέσω αυτού ακριβώς του κοινού φυσικού επιπέδου.

- *Κλιμάκωση Μεγέθους (Scalability)*: Επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της οπτικής ίνας, ειδικότερα σε επίπεδο, μητροπολιτικών και επιχειρησιακών δικτύων.
- *Δυναμική Τροφοδότηση (Dynamic Provisioning)*: Η ταχύτατη, απλή και με δυναμικό τρόπο παροχή των δικτυακών συνδέσεων, δίνουν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών υψηλού εύρους ζώνης μέσα σε διάστημα της τάξεως των ημερών παρά μηνών.

3.2 Τα κύρια συστατικά-εξοπλισμός της τεχνολογίας WDM [4]

Τα βασικά συστατικά-εξοπλισμός της WDM τεχνολογίας, με βάση και τη θέση τους στο δίκτυο, είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

- *Συσκευές ακτίνων laser*, στην πλευρά της μετάδοσης, με ικανότητα παραγωγής μηκών κύματος εξαιρετικής ακρίβειας και σταθερότητας.
- *Οπτική ίνα*, στην πλευρά της σύνδεσης, που εμφανίζει χαμηλές απώλειες και υψηλή απόδοση στο αντίστοιχο φάσμα μηκών κύματος. Επιπλέον, απαραίτητη είναι και η παρουσία *οπτικών ενισχυτών* (optical amplifiers) για την ενίσχυση του σήματος και τη μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις.
- *Συσκευές φωτοανίχνευσης* (photodetectors), στην πλευρά του δέκτη, και *οπτικούς αποπολυπλέκτες* (optical demultiplexers).
- *Οπτικούς πολυπλέκτες ελεγχόμενης πολύπλεξης* (add/drop optical multiplexers) και *οπτικά στοιχεία διασύνδεσης* (optical cross-connect components).

Στη συνέχεια, οι προαναφερθείσες διατάξεις-συσκευές αναλύονται περαιτέρω με στόχο την καλύτερη κατανόηση της τεχνολογίας WDM.

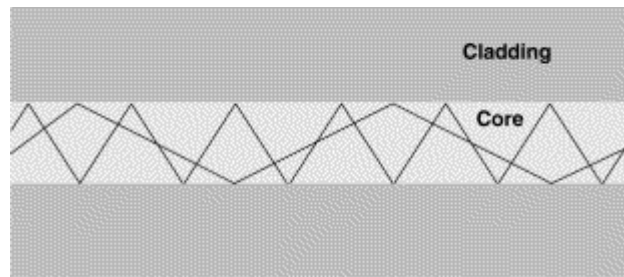
3.2.1 Οπτικές Ίνες (Optical Fibers) [4]

Η κύρια αποστολή των οπτικών ινών έγκειται στην αγωγή των επιθυμητών μηκών κύματος, με την ελάχιστη απώλεια σήματος.

Οι οπτικές ίνες αποτελούνται από πολύ λεπτές υαλώδεις ίνες, σε στρώματα, και διαθέτουν ικανότητα εκπομπής ίση με τα 2/3 της ταχύτητας του φωτός στο κενό. Το σήμα μεταφέρεται μέσα από τον πυρήνα (core), υπό τη μορφή παλμών φωτός. Ο πυρήνας περιβάλλεται από την επικάλυψη (cladding). Οι βασικές κατηγορίες οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σήμερα είναι οι ακόλουθες:

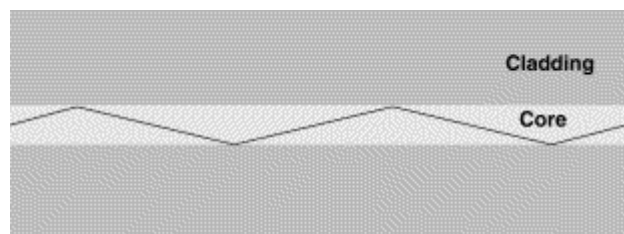
- *Οι πολύτροπες (multimode) οπτικές ίνες* επιτρέπουν την ταυτόχρονη μεταφορά πολλών ακτίνων φωτός μέσα από τον κυματοδηγό (waveguide). Στο Σχήμα 2.2 παρατίθεται ένα παράδειγμα αυτής της κατηγορίας οπτικών ινών. Είναι εμφανές ότι οι δύο αγόμενες ακτίνες φωτός (modes) θα πρέπει να διανύσουν διαφορετική απόσταση, ώστε να φθάσουν στον προορισμό τους. Αυτή η διαφορά στους χρόνους άφιξης των σημάτων ονομάζεται *τροπική διασπορά (modal dispersion)* και έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση του σήματος στο σημείο λήψης, με συνέπεια

τον τελικό περιορισμό της απόστασης που αυτό μπορεί να διανύσει. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι πολύτροπες ίνες δε χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων (wide-area applications).



Σχήμα 3.2: Τρόπος μετάδοσης στην πολύτροπη οπτική ίνα [4]

- Οι μονότροπες (*single-mode*) οπτικές ίνες διαθέτουν πολύ μικρότερο πυρήνα και επιτρέπουν τη διέδο ενός μόνο μήκους κύματος φωτός κάθε φορά. Ως αποτέλεσμα, η πιστότητα του σήματος διατηρείται για πολύ μεγαλύτερη απόσταση και το φαινόμενο της τροπικής διασποράς περιορίζεται σημαντικά. Οι προαναφερθέντες παράγοντες συντελούν αφενός στην υψηλότερη χωρητικότητα αυτής της κατηγορίας ινών και αφετέρου στη χαμηλότερη εγγενή απώλεια σήματος. Έτσι, οι μονότροπες ίνες προτιμώνται τόσο για εφαρμογές υψηλών αποστάσεων όσο και για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης (όπως η τεχνολογία WDM).



Σχήμα 3.3: Τρόπος μετάδοσης στην μονότροπη οπτική ίνα [4]

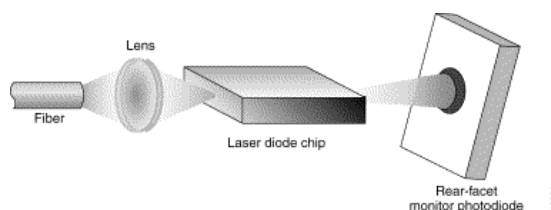
Από την άλλη, οι βασικές δυσκολίες-προκλήσεις κατά τη μετάδοση παλμών φωτός μέσα από την οπτική ίνα περιλαμβάνουν φαινόμενα όπως η *εξασθένιση του σήματος* (attenuation) καθώς αυτό μεταφέρεται, η *χρωματική διασπορά* (chromatic dispersion) και η *μη-γραμμικότητα* (nonlinearity) λόγω της αλληλεπίδρασης του φωτός με το υλικό της ίνας.

3.2.2 Πηγές φωτός και Ανιχνευτές (Light Sources and Detectors) [4]

Οι πηγές φωτός και οι συσκευές φωτοανίχνευσης βρίσκονται στα αντίθετα άκρα ενός συστήματος οπτικής εκπομπής.

Οι πηγές/εκπομπείς φωτός αναλαμβάνουν τη μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε παλμούς φωτός. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται είτε μέσω της εξωτερικής διαμόρφωσης ενός συνεχούς κύματος φωτός, είτε με τη χρήση κατάλληλης συσκευής που παράγει άμεσα διαμορφωμένους παλμούς φωτός. Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι συσκευών εκπομπής φωτός, οι *δίοδοι φωτοεκπομπής (LEDs)* και οι *δίοδοι ακτινών laser ή ημιαγωγοί laser (laser diodes/semiconductor lasers)*.

Οι δίοδοι φωτοεκπομπής (LEDs) αποτελούν σχετικά αργές συσκευές, κατάλληλες για εφαρμογές με ταχύτητες χαμηλότερες από 1Gbps, ενώ εμφανίζουν ένα σχετικά ευρύ πλάτος φάσματος. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως σε επικοινωνιακές εφαρμογές πολύτροπων οπτικών ινών. Από την άλλη, οι ημιαγωγοί laser (semiconductor lasers) διαθέτουν χαρακτηριστικά και απόδοση που τους καθιστά καταλληλότερους για εφαρμογές μονότροπης οπτικής ίνας. Στο ακόλουθο σχήμα, περιγράφονται οι γενικές αρχές τροφοδοσίας παλμών φωτός στην οπτική ίνα.



Σχήμα 3.4: Τυπικός σχεδιασμός για την τροφοδοσία παλμών φωτός σε οπτική ίνα [4]

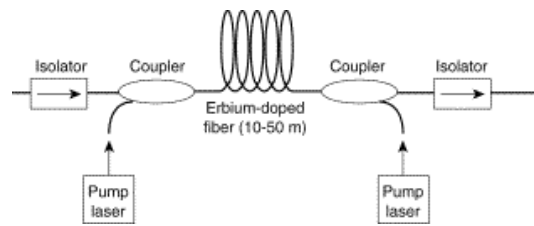
Οι συσκευές φωτοανίχνευσης είναι διαθέσιμες σε δύο γενικούς τύπους, τις θετικές-εσωτερικές-αρνητικές φωτοδιόδους (PIN photodiodes) και τις φωτοδιόδους χιονοστιβάδας (APD photodiodes). Ο πρώτος τύπος, βασίζεται στην αντίστροφη αρχή λειτουργίας των LEDs, μετατρέποντας τα φωτεινά σήματα σε ηλεκτρόνια μέσω μιας σχέσης 1:1. Ο δεύτερος τύπος διαφέρει από τον προηγούμενο στο γεγονός ότι παρέχει επιπλέον και τη διεργασία της ενίσχυσης, μέσω της μετατροπής ενός φωτονίου σε πολλά ηλεκτρόνια. Τα κύρια πλεονεκτήματα των PIN φωτοδίοδων περιλαμβάνουν το χαμηλό κόστος και την αξιοπιστία, ενώ οι APD φωτοδιόδοι έχουν υψηλότερη ακρίβεια και ευαισθησία.

3.2.3 Οπτικοί Ενισχυτές (Optical Amplifiers) [4]

Η παρουσία συσκευών οπτικής ενίσχυσης καθίσταται απαραίτητη λόγω της εξασθένισης του οπτικού σήματος κατά τη μεταφορά του μέσα από την ίνα.

Το σημαντικό όφελος που προκύπτει από τη χρήση αυτών των συσκευών είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης ενίσχυσης όλων των μηκών κύματος, δίχως να είναι απαραίτητη η πρότερη μετατροπή των οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά (OEO conversion). Επιπρόσθετα της χρήσης των συσκευών αυτών στις οπτικές συνδέσεις, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και για την ενίσχυση της ισχύος του σήματος μετά από διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης, οι οποίες προκαλούν απώλειες στο σύστημα. Ειδικά για την περίπτωση της τεχνολογίας WDM, η οποία επιβάλλει την εκπομπή υψηλών φορτίων και σε υψηλές αποστάσεις, ο ιδανικός τύπος οπτικού

ενισχυτή είναι ο Οπτικός Ενισχυτής Σταθεροποιημένου Ερβίου (Erbium-Doped Fiber Amplifier-EDFA). Η βασική αρχή σχεδίασης ενός EDFA ενισχυτή παρατίθεται στο ακόλουθο σχήμα:

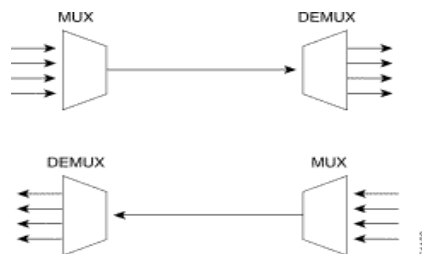


Σχήμα 3.5: Η αρχή σχεδίασης του Οπτικού Ενισχυτή Σταθεροποιημένου Ερβίου (EDFA) [4]

3.2.4 Οπτικοί Πολυπλέκτες/Αποπολύπλέκτες [4]

Οι συσκευές πολύπλεξης και αποπολύπλεξης επιτρέπουν το συνδυασμό των εισερχόμενων προς μετάδοση σημάτων (σημείο εκπομπής) ή το διαχωρισμό του οπτικού σήματος στα στοιχειώδη σήματα που το απαρτίζουν (σημείο λήψης) αντίστοιχα.

Οι διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης διαφοροποιούνται ελαφρώσανάλογα με το αν τα συστήματα κατεύθυνσης του σήματος είναι μονόδρομης ή αμφίδρομης κατεύθυνσης (Unidirectional/Bidirectional Systems). Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στα ακόλουθα σχήματα:



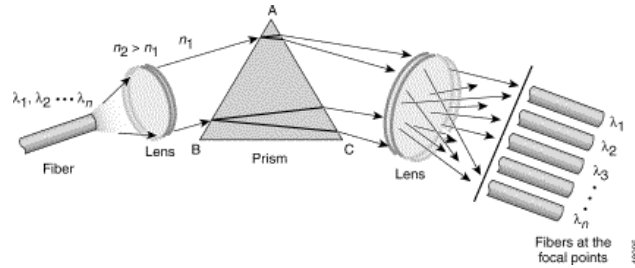
Σχήμα 3.5: Πολύπλεξη/Αποπολύπλεξη σε μονόδρομο σύστημα [4]



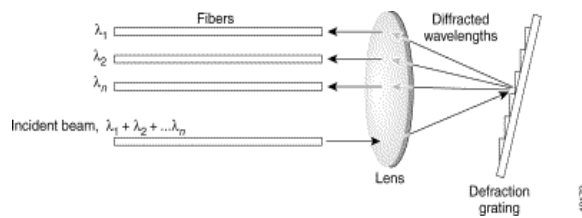
Σχήμα 3.6: Πολύπλεξη/Αποπολύπλεξη σε αμφίδρομο σύστημα [4]

Όσον αφορά στις υπάρχουσες τεχνικές αποπολύπλεξης, αυτές απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα. Είναι προφανές ότι οι ίδιες διατάξεις μπορούν να

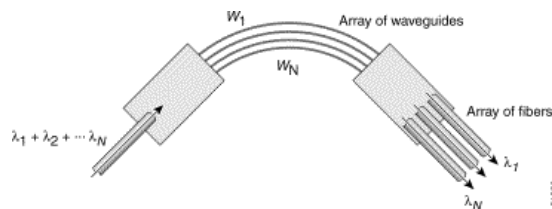
χρησιμοποιηθούν αντίστροφα για την πολύπλεξη πολλών μηκών κύματος σε μια οπτική ίνα.



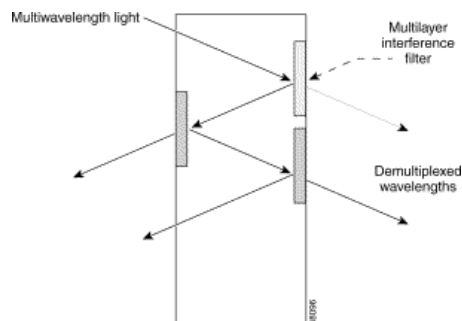
Σχήμα 3.7: Αποπολύπλεξη διάθλασης πρίσματος (Prism Refraction Demultiplexing) [4]



Σχήμα 3.8: Κυματοδηγός πλέγματος περίθλασης (Waveguide Grating Diffraction) [4]



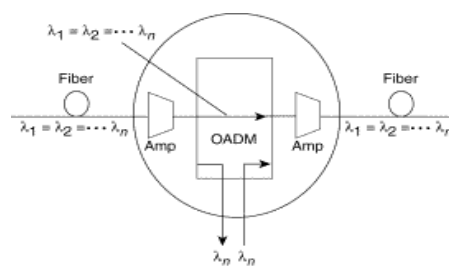
Σχήμα 3.9: Κυματοδηγός πλέγματος μήτρας (Arrayed Waveguide Grating-AWG) [4]



Σχήμα 3.10: Φίλτρα παρεμβολής πολλαπλών στρωμάτων (Multilayer Interference Filters) [4]

Οι τεχνικές AWG και των φίλτρων παρεμβολής πολλαπλών στρωμάτων φαίνεται να υπερτερούν. Η τεχνική των φίλτρων παρεμβολής προσφέρει υψηλή σταθερότητα και απομόνωση μεταξύ των καναλιών με ικανοποιητικό κόστος, έχοντας ωστόσο υψηλές απώλειες κατά την είσοδο του συστήματος (insertion losses). Η τεχνική AWG έχει ως βασικότερο πλεονέκτημα τη δυνατότητα σχεδιασμού ώστε οι διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Επιπλέον, είναι κατάλληλη όταν απαιτείται μεγάλος αριθμός καναλιών, ενώ εμφανίζει χαμηλές απώλειες κατά την είσοδο του σήματος (insertion losses). Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η θερμοκρασιακή ευαισθησία των διατάξεών της, καθιστώντας την έτσι ακατάλληλη για ορισμένα περιβάλλοντα.

Επιπρόσθετα, μια ειδική κατηγορία οπτικών πολυπλεκτών, αυτή των οπτικών πολυπλεκτών ελεγχόμενης πολύπλεξης (Optical Add/Drop Multiplexers-OADMs) κατέχει σημαντικότατο ρόλο στην προσπάθεια δημιουργίας εξολοκλήρου οπτικών δικτύων. Η αποστολή τους έγκειται στο στην εισαγωγή/αφαίρεση ορισμένων μηκών κύματος σε ένα σημείο του δικτύου. Η λειτουργία τους έχει πολλά κοινά σημεία με τις αντίστοιχες ADM/SONET διατάξεις, με τη βασική διαφορά-πλεονέκτημα της μη μετατροπής του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό πριν το διαχωρισμό.



Σχήμα 3.11: Η αρχή της επιλεκτικής απομάκρυνσης ή προσθήκης μηκών κύματος [4]

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ‘IP over SONET/SDH’ ΚΑΙ ‘IP over SONET/SDH over WDM’

4.1 Γενικά

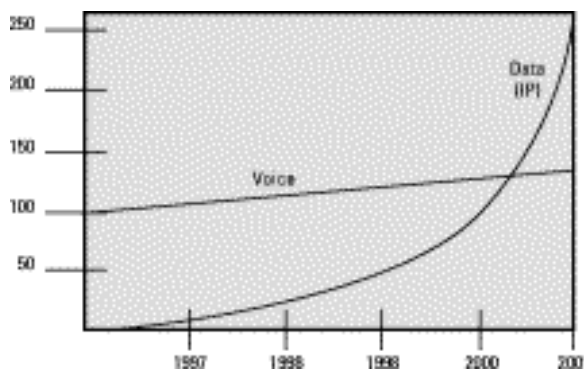
Ο όρος ‘*IP over SONET/SDH*’, ή αλλιώς ‘*Packet over SONET/SDH*’, αναφέρεται ουσιαστικά στην προσθήκη SONET/SDH διασυνδέσεων με κάποιον δρομολογητή που αποτελεί τερματικό στοιχείο για τη διακίνηση δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου από-σημείο-σε-σημείο (*Point-to-Point Protocol-PPP*) [8,9]. Το πρωτόκολλο PPP αποτελεί το ευρύτερα αποδεκτό πρωτόκολλο μορφοποίησης για την κυκλοφορία δεδομένων στο Διαδίκτυο (*Internet Protocol-IP traffic*).

Στην πραγματικότητα, η IP κυκλοφορία μέσω ενός SONET/SDH δρομολογητή προσομοιάζεται ως μια σειριακή ροή δεδομένων (*datastream*) που μετακινείται κατά μήκος του δικτύου, χρησιμοποιώντας το PPP πρωτόκολλο για τις λειτουργίες μορφοποίησης και συμπύκνωσής της. Αυτές οι ροές δεδομένων χαρτογραφούνται σε καθορισμένα STS πλαίσια, όπως προβλέπεται από το θεσπισμένο πρότυπο RFC 1619. Τα πλαίσια μπορούν να έχουν τυπικό ρυθμό μετάδοσης OC-3/STM-1, OC-12/STM-4 και OC-48/STM-16 [9]. Σε κάθε κόμβο του δικτύου το IP πακέτο δεδομένων απομονώνεται από το PPP πλαίσιο του, εξετάζεται η διεύθυνση προορισμού του και τελικά αυτό εντάσσεται σε ένα νέο PPP πλαίσιο για να συνεχιστεί η μεταφορά του.

Τα βασικά πλεονεκτήματα που προσέφερε η τεχνολογία ‘IP over SONET/SDH’ συνοψίζονται στα εξής :[9]

- Η αποτελεσματική/χαμηλού ‘overhead’ από-σημείο-σε-σημείο μεταφορά της IP κυκλοφορίας.
- Η πρόβλεψη σχετικά υψηλών ευρών ζώνης για την παροχή μη διαφοροποιημένων υπηρεσιών (*nondifferentiated services*).

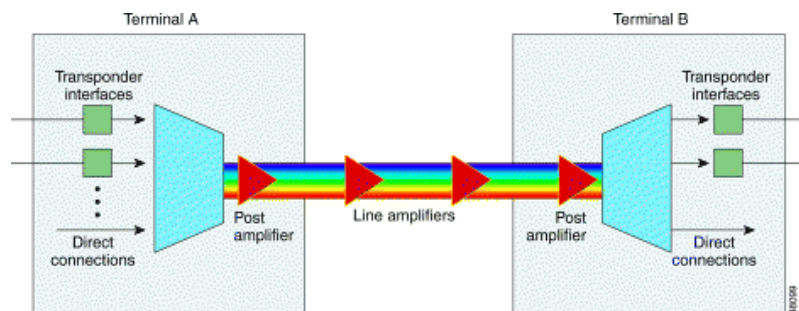
Ωστόσο, κατά τα τελευταία χρόνια, η αύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων στο διαδίκτυο είναι εκρηκτική. Κάθε χρόνο ο όγκος της διακινούμενης πληροφορίας υπερδιπλασιάζεται και αυτό αναμένεται να διατηρηθεί και κατά τα επόμενα έτη [10].



Διάγραμμα 4.1: Η εκρηκτική αύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων στο Διαδίκτυο-σύγκριση με την κυκλοφορία δεδομένων φωνής [10].

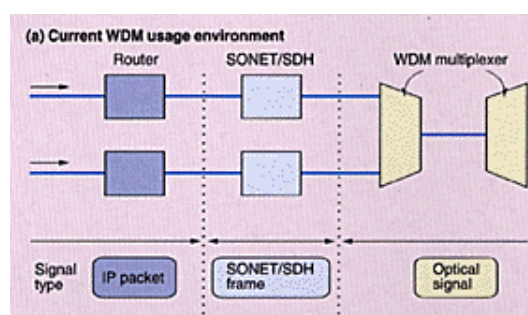
Για την αντιμετώπιση του σοβαρού αυτού προβλήματος, κρίθηκε αναγκαία η ενσωμάτωση της τεχνολογίας πολυπλεξίας στο πεδίο του μήκους κύματος (WDM), στην υπάρχουσα ‘IP over SONET/SDH’ τεχνολογία. Έτσι, προέκυψε μια νέα βελτιωμένη μέθοδος μετάδοσης IP δεδομένων η οποία αναφέρεται ως ‘IP over SONET/SDH over WDM’.

Σε ένα τέτοιο σύστημα, καθοριστικό ρόλο έχει μια εξειδικευμένη διάταξη εκπομπής (*transponder*), η οποία αναλαμβάνει τη μετατροπή του συμβατού με το πρότυπο SONET/SDH οπτικού σήματος, που περιέχει τις πληροφορίες του IP πακέτου, σε ηλεκτρικό σήμα [11]. Η αρχή λειτουργίας του ‘transponder’ απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.2: Η αρχή λειτουργίας του transponder [4]

Αυτό το ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιείται ως οδηγός μιας ‘WDM laser’ διάταξης, η οποία είναι εξαιρετική ακρίβειας και λειτουργεί σε περιοχή μήκους κύματος γύρω από τα 1550nm [11]. Ένα σύστημα ‘IP over SONET/SDH over WDM’ περιλαμβάνει πολλές διατάξεις τύπου ‘transponder’, καθεμιά από τις οποίες μετατρέπει τις πληροφορίες του πακέτου που δέχεται σε ένα ελαφρώς διαφορετικό μήκος κύματος. Στη συνέχεια, τα μήκη κύματος όλων των ‘transponders’ του συστήματος πολυπλέκονται οπτικά και μεταφέρονται διαμέσου της οπτικής ίνας [11]. Στο άκρο λήψης, λαμβάνει χώρα η αντίστροφη διαδικασία. Αναλυτικότερα, τα μήκη κύματος διαχωρίζονται (διαδικασία οπτικής αποπολύπλεξης) και καθένα από αυτά τροφοδοτείται σε έναν ‘transponder’. Έτσι, το σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό και μέσω μιας προτυποποιημένης SONET/SDH διασύνδεσης, τα IP πακέτα αποκαλύπτονται [11]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα τυπικό ‘IP over SONET/SDH over WDM’ περιβάλλον:



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση ενός ‘IP over SONET/SDH over WDM’ περιβάλλοντος [8]

4.2 Τα Πλεονεκτήματα της ‘IP over SONET/SDH over WDM’ Τεχνολογίας για τα Δίκτυα Μεγάλων Αποστάσεων (WANs)

Η προσθήκη της WDM τεχνολογίας στα τυπικά ‘IP over SONET’ συστήματα προσφέρει μια σειρά από *σημαντικότερα πλεονεκτήματα* όπως [11]:

- Η αύξηση της χωρητικότητας της υπάρχουσας οπτικής ίνας, δίχως να απαιτείται η εγκατάσταση επιπλέον οπτικών ινών.
- Η αντικατάσταση των ηλεκτρικών αναγεννητών (electrical regenerators), που αποτελούν διατάξεις υψηλού κόστους και είναι πολύπλοκες, με αυτές των οπτικών ενισχυτών (optical amplifiers). Έτσι, δεν απαιτείται η πρότερη μετατροπή του σήματος σε ηλεκτρικό προκειμένου να ενισχυθεί ενώ όλα τα κανάλια ενισχύονται ταυτόχρονα. Επιπλέον, οι οπτικοί ενισχυτές τοποθετούνται κάθε περίπου 1000 km, σε αντίθεση με τους ηλεκτρικούς αναγεννητές του ‘IP over SONET’ συστήματος που τοποθετούνται κάθε 60-100km.
- Η διαδικασία προσθήκης νέων καναλιών στο δίκτυο απλοποιείται σημαντικά. Η μοναδική απαίτηση είναι η εγκατάσταση του κατάλληλου αριθμού ‘transponders’ στο σύστημα, στα δύο άκρα του WDM υποσυστήματος. Οι οπτικοί ενισχυτές αναλαμβάνουν την ενίσχυση των επιπλέον καναλιών, ταυτόχρονα με τα προϋπάρχοντα, δίχως την απαίτηση επιπλέον αναγεννητών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προαναφερθέντα οφέλη για τα WAN δίκτυα υποσκελίζουν, σχεδόν πάντοτε, σε μεγάλο βαθμό το κόστος εγκατάστασης του WDM υποσυστήματος στο υπάρχον ‘IP over SONET’ σύστημα και για αυτό το λόγο η συντριπτική πλειοψηφία των δικτύων αυτής της κατηγορίας έχει ενσωματώσει την τεχνολογία της πολύπλεξης στο πεδίο του μήκους κύματος [11].

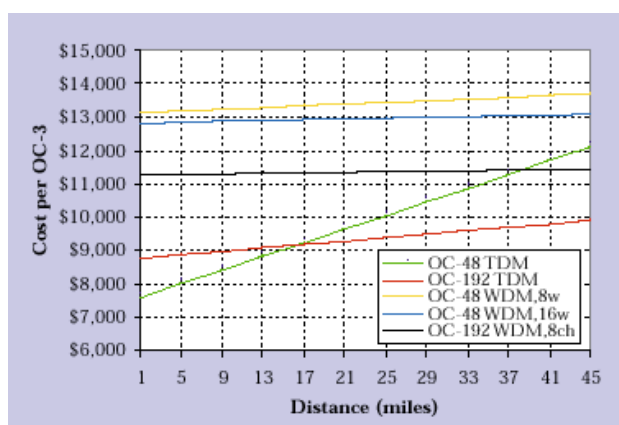
4.3 Η Περίπτωση των Μητροπολιτικών Δικτύων (MANs)

Στη συγκεκριμένη κατηγορία δικτύων, με αποστάσεις μικρότερες των 100km, συνήθως δεν υπάρχει η ανάγκη αναγέννησης ή ενίσχυσης των σημάτων. Επομένως, παύει να έχει νόημα η σημαντικότερη μείωση κόστους λόγω της κατάργησης των συσκευών αναγέννησης όπως συνέβαινε για τα WAN δίκτυα.

Από την άλλη πλευρά, εφόσον υπάρχει ανάγκη αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου και είναι διαθέσιμες οι απαραίτητες οπτικές ίνες, είναι προτιμότερο να δημιουργηθούν οι απαραίτητες διασυνδέσεις είτε με τις κλασσικές ADM (Add/Drop Multiplexers) διατάξεις είτε με τους κατάλληλους διακόπτες ή δρομολογητές [11]. Ωστόσο, στο δίλημμα μεταξύ της εγκατάστασης ενός WDM συστήματος ή της προσθήκης και λειτουργίας νέων οπτικών ινών η απάντηση δεν είναι ξεκάθαρη. Συχνά, δεδομένου ότι υπό τις παρούσες συνθήκες η εγκατάσταση ενός WDM συστήματος είναι αρκετά δαπανηρή, προτιμάται η λύση της χρήσης επιπλέον οπτικών ινών. Επίσης, σημειώνεται ότι η χρήση της WDM τεχνολογίας θα μπορούσε να αποτελέσει πολύτιμη λύση στις περιπτώσεις MAN δικτύων υψηλών απαιτήσεων και γενικότερα σε περιπτώσεις που υπάρχουν περιθώρια μείωσης του κόστους σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό [11]. Επιπρόσθετα, η εγκατάσταση του WDM συστήματος προσφέρει οικονομική εφεδρική χωρητικότητα, υπό τη μορφή αχρησιμοποίητων

μηκών κύματος, η οποία θα είναι διαθέσιμη στην εξαιρετικά πιθανή περίπτωση αύξησης των μελλοντικών απαιτήσεων [13].

Με βάση τα προαναφερθέντα, η διατήρηση της υπάρχουσας ‘IP over SONET’ τεχνολογίας φαίνεται να έχει ένα μικρό προβάδισμα έναντι της ‘IP over SONET over WDM’ λύσης. Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη τα επιμέρους ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε MAN δικτύου και οι απαιτήσεις που θα πρέπει να ικανοποιούνται. Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθεται η σύγκριση κόστους μεταξύ κάποιων συμβατικών ‘IP over SONET’ MANs (χρήση της TDM τεχνικής) και των αντίστοιχων ‘IP over SONET over WDM’ MANs.



Σχήμα 4.3: Κόστος ανά μονάδα εύρους ζώνης OC-3 χωρητικότητας ως συνάρτηση της απόστασης, για πέντε διαφορετικές υλοποιήσεις [13].

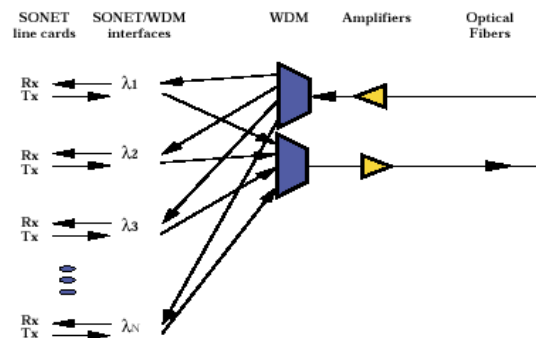
Επιπλέον, η πρόσφατη έλευση των WDM συστημάτων τρίτης γενιάς, με εξειδικευμένο σχεδιασμό για MAN δίκτυα, που συνδυάζουν μειωμένο κόστος και ευέλικτες τοπολογίες δείχνει ικανή να μεταβάλλει σημαντικά την κατάσταση [11].

4.4 Αρχιτεκτονικές Δικτύων ‘Client over SONET over WDM’ και Μέθοδοι Προστασίας

Η ανάλυση που ακολουθεί περιγράφει τις δυνατές αρχιτεκτονικές των δικτύων που βασίζονται στην τεχνολογία ‘Client over SONET over WDM’, με ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους προστασίας. Με τον όρο ‘Client’ εννοούνται σήματα γενικής φύσεως που μπορούν να προέρχονται από IP δρομολογητές, ATM switches κλπ.

4.4.1 Αρχιτεκτονικές Από-Σημείο-Σε-Σημείο (Point-to-Point Architectures) [13]

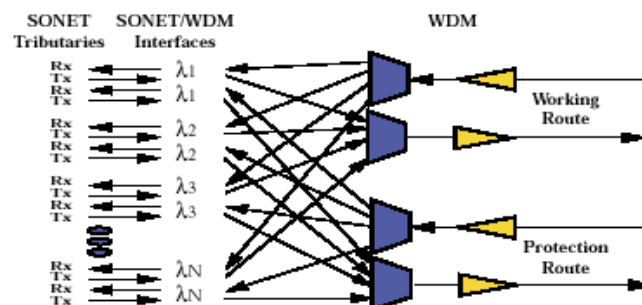
Ένα τυπικό σύστημα με αυτή την αρχιτεκτονική φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Τέτοια συστήματα είναι διαθέσιμα στην αγορά και προσφέρονται με αριθμό 8,16,24,40 ή περισσότερων καναλιών. Σημειώνεται ότι το σύστημα αυτό δεν ενσωματώνει και κάποιο υποσύστημα προστασίας.



Σχήμα 4.4: Το ένα άκρο μιας βασικής point-to-point ‘SONET over WDM’ υλοποίησης [13].

Ανάλογα με το είδος της υλοποίησης της προστασίας του δικτύου ‘point-to-point’ αρχιτεκτονικής, διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες:

- **Συστήματα με προστασία στο ‘client’ στρώμα:** Αποτελεί το συνηθέστερο είδος υλοποίησης για τέτοιου είδους δίκτυα, χρησιμοποιώντας 100% πλεονασμό στο οπτικό επίπεδο (1:1). Στην πραγματικότητα, η προστασία υλοποιείται μέσω ανεξάρτητων ‘tributary’ SONET διασυνδέσεων, μέσα στο ίδιο το στρώμα του ‘SONET client’ (π.χ IP). Το ακόλουθο σχήμα δίνει την εικόνα μιας τέτοιας υλοποίησης:

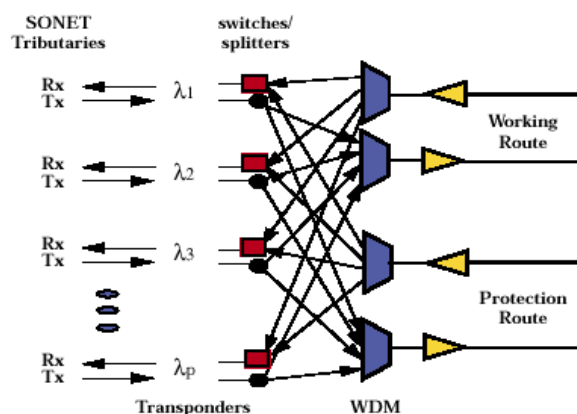


Σχήμα 4.5: Point-to-point ‘SONET over WDM’ υλοποίηση με προστασία στο ‘client’ στρώμα [13]

Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος συνοψίζονται στην υψηλή διαθεσιμότητά του, στη χρήση καθιερωμένων-ώριμων SONET μεθόδων προστασίας καθώς και στην απλότητα των λειτουργιών. Επιπλέον, δεν απαιτείται

η παρακολούθηση του σήματος στο οπτικό επίπεδο. Το τελευταίο, βέβαια, αποτελεί και το μεονέκτημα αυτής της υλοποίησης, δεδομένου ότι το πάγιο και το λειτουργικό κόστος του συστήματος θα μπορούσαν να μειωθούν σημαντικά, εφόσον ορισμένα τμήματα του συστήματος προστασίας μεταφέρονταν στο WDM επίπεδο.

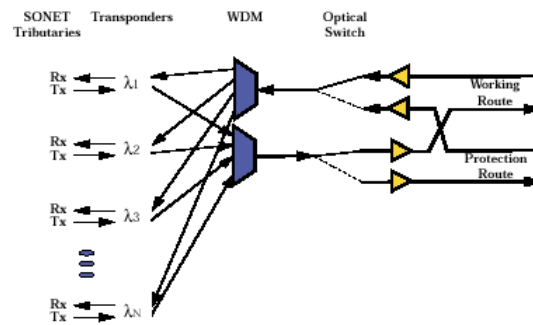
- **Συστήματα με προστασία στο οπτικό κανάλι (OCHP):** Η συγκεκριμένη υλοποίηση βασίζεται στην 1+1 προστασία οπτικού καναλιού. Καθένα από τα ‘tributary’ οπτικά σήματα συνδέεται, μέσω παθητικού οπτικού διαιρέτη, τόσο με την οπτική ίνα εργασίας όσο και με την ίνα προστασίας στο άκρο μετάδοσης. Στο άκρο λήψης, η ίδια η ροή δεδομένων καταφθάνει και από τις δύο ίνες, ενώ τα συστήματα παρακολουθούνται συνεχώς με τον ίδιο τρόπο και ανεξάρτητα μεταξύ τους για τον εντοπισμό πιθανών σφαλμάτων. Ένας οπτικός διακόπτης στο άκρο λήψης επιλέγει ένα από τα δύο πανομοιότυπα σήματα, το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί από το ‘client’ στρώμα. Κατά την περίπτωση σφαλμάτων ή διακοπής του ενός σήματος, ο διακόπτης επιλέγει αυτόματα το δευτερεύον πανομοιότυπο. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται σχηματικά η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος:



Σχήμα 4.6: Point-to-point ‘SONET over WDM’ υλοποίηση με προστασία στο οπτικό κανάλι (OCHP) [13]

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης έγκειται στην ταχύτητα αποκατάστασης πιθανών σφαλμάτων. Επιπλέον, το σύστημα δεν είναι εξαρτώμενο από SONET προστασία, παρέχοντας τη δυνατότητα χρήσης του στο οπτικό επίπεδο για σήματα που δεν είναι προτυποποιημένα κατά SONET (π.χ. Gigabit Ethernet). Το μειονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι η απουσία προστασίας για κυκλοφορία χαμηλής προτεραιότητας.

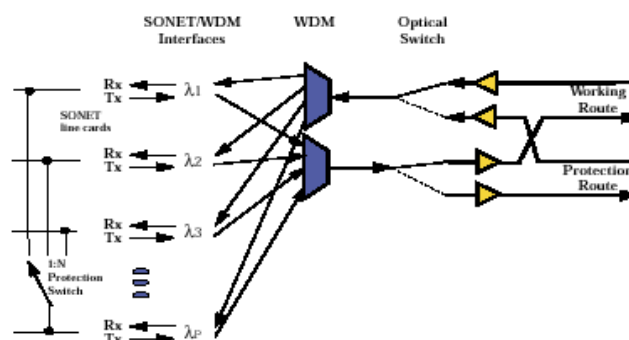
- **Συστήματα με προστασία στο τμήμα οπτικής πολύπλεξης (OMSP):** Στην περίπτωση αυτή, για μια αστοχία της ίνας, το WDM σύστημα μεταπίπτει από την ίνα προστασίας μέσω 1:2 οπτικών διακοπών. Η αστοχία ενός ενισχυτή αντιμετωπίζεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Επιπλέον, μια 1+1 υλοποίηση της OMSP αρχιτεκτονικής είναι πιθανή εφόσον αντικατασταθεί ο οπτικός διακόπτης, στο άκρο μετάδοσης, με έναν παθητικό οπτικό διαιρέτη που αποστέλλει δύο μορφές των ομαδοποιημένων WDM σημάτων προς το άκρο λήψης. Μια τυπική OMSP διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.7: Point-to-point ‘SONET over WDM’ υλοποίηση με προστασία στο τμήμα οπτικής πολύπλεξης (OMSP) [13]

Η επιλογή μιας OMSP υλοποίησης έχει σαφώς μικρότερο κόστος σε σχέση με τις δύο προαναφερθείσες, εξαιτίας των μικρότερων απαιτήσεων σε υλικό διακοπών (switching hardware) και της αποδοτικότερης εκμετάλλευσης των λειτουργιών προστασίας. Ωστόσο, η υλοποίηση αυτή είναι σαφώς πιο ευάλωτη σε αστοχίες απλού σημείου (single point failures) που σχετίζονται με τους WDM και οπτικούς διακόπτες. Επιπρόσθετα, ο συντονισμός που απαιτείται μεταξύ του οπτικού στρώματος και του ανώτερου στρώματος (client layers) είναι πολύπλοκότερος, δεδομένου ότι δεν παρέχεται προστασία έναντι στρωμάτων που επηρεάζουν τα σήματα προτού αυτά πολυπλεχθούν στο πεδίο μήκους κύματος.

- **Συστήματα με συνδυασμένη SONET/WDM προστασία:** Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση συνδυάζεται ο εξοπλισμός I:N SONET αυτόματων συστημάτων προστασίας (I:N SONET APS) του client layer (IP) με την I:I προστασία στο οπτικό στρώμα. Σημειώνεται ότι τα I:N SONET APS αποτελούν καθιερωμένες και δοκιμασμένες διατάξεις προστασίας. Η απεικόνιση της συνδυασμένης αυτής διάταξης δίδεται στο ακόλουθο σχήμα:

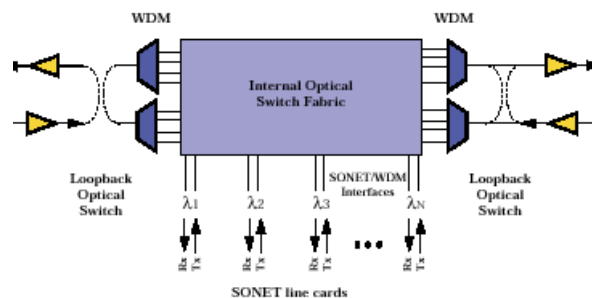


Σχήμα 4.8: Point-to-point ‘SONET over WDM’ υλοποίηση με συνδυασμένη SONET/WDM προστασία [13]

Το βασικό πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι η σημαντική μείωση του κόστους εξοπλισμού σε συνδυασμό με τη διατήρηση επαρκούς διαθεσιμότητας υπηρεσιών.

4.4.2 Αρχιτεκτονικές Δακτυλίου (Ring Architectures) [9]

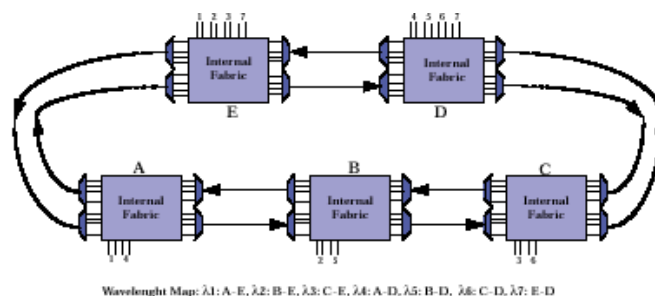
Στις αρχιτεκτονικές δακτυλίου χρησιμοποιούνται ευρύτατα οι συσκευές ελεγχόμενης πολύπλεξης στο πεδίο του μήκους κύματος (WADMs), με αποτέλεσμα την εξάλειψη των τερματικών από - σημείο - σε - σημείο WDM διατάξεων και τη δυνατότητα για επιλεγμένα κανάλια που περνούν δίχως οπτικό - ηλεκτρονικό τερματισμό. Οι WADM συσκευές, επιπλέον, επιτρέπουν την ταχύτερη αναδιάταξη της συνδεσιμότητας των μηκών κύματος στο δακτύλιο, παρέχοντας υψηλή επιβιωσιμότητα κατά τη μεταφορά. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται μια γενική WADM αρχιτεκτονική:



Σχήμα 4.9: Μια γενική, διπλής ίνας, WADM διάταξη [13]

Είναι δυνατό να υπάρξουν αρκετές παραλλαγές της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής. Οι σημαντικότερες είναι οι εξής:

- **Δακτύλιος WDM απλής κατεύθυνσης με προστασία στο οπτικό κανάλι (OCHP)**: Στην περίπτωση αυτή, σε κάθε οπτικό μονοπάτι που ικανοποιεί την απαίτηση μεταξύ δύο κόμβων ανατίθεται ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος και στις δύο ίνες του δακτυλίου. Αυτό το μήκος κύματος δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί από άλλο μονοπάτι. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα διπλής ίνας και 5 κόμβων (A-E), το οποίο διαθέτει οπτικό κανάλι ή μονοπάτι μεταγωγής μήκους κύματος για την προστασία στο οπτικό επίπεδο:

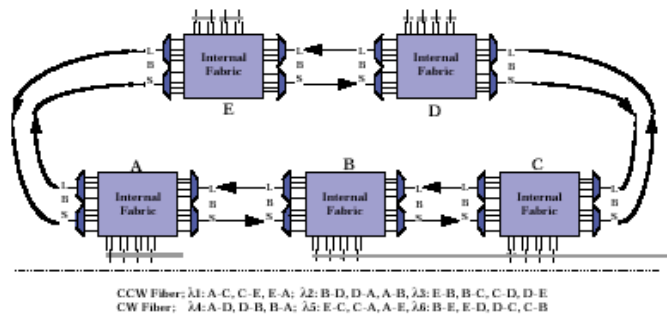


Σχήμα 4.10: Ένας τυπικός WDM δακτύλιος, διπλής κατεύθυνσης, με OCHP [13]

Η υλοποίηση αυτή είναι απλή στο σχεδιασμό και στην πρόβλεψη, ωστόσο η ομαδοποίηση των μηκών κύματος που προσφέρει δεν είναι πάντοτε τόσο αποτελεσματική. Παρόλα αυτά, η αποτελεσματικότητά του είναι ικανοποιητική για σχεδιασμούς κυκλοφορίας κομβικού σημείου (hubbed traffic patterns).

- **Δακτύλιος WDM διπλής κατεύθυνσης με συστήματα προστασίας OMSP:**

Η υλοποίηση αυτή υποστηρίζει 2 ή 4 ίνες που διασυνδέουν γειτονικούς κόμβους του δικτύου μεταξύ τους. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιείται γραμμική μεταγωγή (line switching) για τη βρόχωση με την κυκλοφορία εργασίας, γύρω από το δακτύλιο ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση του δικτύου. Σε περίπτωση αστοχίας της ίνας, η γραμμική μεταγωγή διεξάγεται και στις δύο πλευρές ώστε η κυκλοφορία να ανακατευθύνεται. Μια τυπική διάταξη αυτής της μορφής παρατίθεται στο σχήμα:



Σχήμα 4.11: Ένας τυπικός WDM δακτύλιος, διπλής κατεύθυνσης, με προστασίας OMSP [13]

Η δυνατότητα διπλής κατεύθυνσης επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των μηκών κύματος για διαφορετικές συνδέσεις στο δακτύλιο. Επιπλέον, είναι δυνατός ο διαμοιρασμός της χωρητικότητας της λειτουργίας προστασίας για πολλές διαφορετικές περιπτώσεις αστοχίας. Ο συνδυασμός των δύο αυτών δυνατοτήτων επιτρέπει τον αποτελεσματικό επιμερισμό των μηκών κύματος μεταξύ των μονοπατιών στο δακτύλιο. Από την άλλη, απαιτείται ένας πιο ενδεδειγμένος σχεδιασμός των μηκών κύματος και των διαδικασιών πρόβλεψης.

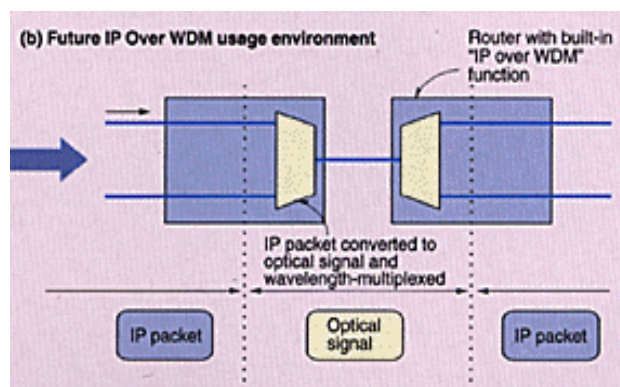
- **Δακτύλιος διπλής κατεύθυνσης με σύστημα προστασίας OCHP:** Η υλοποίηση αυτή συνδυάζει τους δύο προηγούμενους σχεδιασμούς. Έτσι, επιτυγχάνεται τόσο η αποτελεσματική κατανομή των μηκών κύματος, όσο και η προστασία στο οπτικό κανάλι για την αποφυγή πολυπλοκότητας και ενδεχόμενων προβλημάτων αξιοπιστίας. Επιπλέον, είναι δυνατή η επιλεκτική προστασία των ανεξάρτητων καναλιών. Η περιοχή πολύπλεξης προστατεύεται συνολικά.

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ‘IP over WDM’

5.1 Γενικά

Η τεχνολογία μεταφοράς *IP* πακέτων απευθείας μέσω του *WDM* οπτικού επιπέδου (*‘IP over WDM’*), δίχως τη μεσολάβηση κάποιου ενδιάμεσου επιπέδου, αποτελεί τη μελλοντική δικτυακή υλοποίηση που θα εξασφαλίσει την ύπαρξη ενός ουσιαστικά απεριόριστου εύρους ζώνης [18].

Η τεχνολογία αυτή, προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα σε σχέση με την *‘IP over SONET/SDH over WDM’* υλοποίηση, προβλέπει την *εξολοκλήρου απαλοιφή του παραδοσιακού SONET/SDH στρώματος*. Έτσι, τα *IP* πακέτα δεδομένων μετατρέπονται απευθείας σε οπτικό σήμα και ακολουθεί η διαδικασία της πολύπλεξης στο πεδίο του μήκους κύματος [12]. Όπως γίνεται αντιληπτό, η απουσία της ενδιάμεσης μετατροπής των πακέτων σε προτυποποιημένα *SONET/SDH* πλαίσια απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία. Σημαντικό ρόλο για την επίτευξη μιας τέτοιας υλοποίησης, με τον απλούστερο δυνατό τρόπο, αποτελεί η ύπαρξη ενός *καινοτόμου δρομολογητή που θα ενσωματώνει ορισμένες βασικές WDM λειτουργίες* [12]. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου:



Σχήμα 5.1: Απεικόνιση ενός ‘IP over WDM’ περιβάλλοντος [12]

Το σημείο-κλειδί που θα επιτρέψει την αποτελεσματική λειτουργία και την πλήρη εκμετάλλευση των σημαντικών δυνατοτήτων ενός ‘IP over WDM’ δικτύου, δεδομένου ότι για πρώτη φορά αμφισβητείται σοβαρά η αναγκαιότητα ύπαρξης της παραδοσιακής και καθιερωμένης τεχνολογίας *SONET/SDH*, είναι ο ξεκάθαρος ορισμός των υπηρεσιών και της λειτουργικότητας που καθένα από τα *IP* και *WDM* στρώματα θα προσφέρουν [18]. Είναι σημαντικό να μην υπάρχει σύγκρουση αλλά συμπληρωματικότητα μεταξύ των δύο αυτών στρωμάτων. Ως παράδειγμα αναφέρονται τα θέματα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της αναδιαμόρφωσης των οπτικών μονοπατιών και της *IP* δρομολόγησης ή της αλληλεπίδρασης μεταξύ της *IP* αποκατάστασης (*IP restoration*) και της προστασίας στο οπτικό επίπεδο. Επιπλέον, θα ήταν ωφέλιμο να εξεταστεί η πιθανότητα της διαμόρφωσης του *IP* στρώματος με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η μέγιστη εκμετάλλευση των προσφερόμενων από το *WDM* στρώμα υπηρεσιών. Για παράδειγμα, εφόσον το *IP* στρώμα θα μπορούσε να παρέχει υπηρεσίες σε ότι αφορά στον τύπο της κυκλοφορίας και τις

απαιτήσεις των πακέτων σε ποιότητα υπηρεσιών (QoS), τότε και το WDM στρώμα θα μπορούσε να δίνει τη δυνατότητα για κατά-απαίτηση οπτικά μονοπάτια (on-demand lightpaths) συγκεκριμένης υψηλού όγκου IP κυκλοφορίας [18]. Με άλλα λόγια, δίνεται η δυνατότητα παροχής διαφοροποιημένων υπηρεσιών για τις διαφορετικές τάξεις κυκλοφορίας.

Το όραμα ενός εξολοκλήρου οπτικού (all-optical) και από-άκρο-σε-άκρο WDM δικτύου έχει προσελκύσει σημαντικότερες ερευνητικές προσπάθειες από τις μεγάλες εταιρίες σχεδιασμού οπτικών δικτύων, που πλέον έχουν αντιληφθεί τα σημαντικά πλεονεκτήματα της ολοκλήρωσης μιας τέτοιας υλοποίησης. Η ανάπτυξη του Διαδικτύου και των δεδομένων (IP Data) που διακινούνται μέσα από αυτό (βλ. Διάγραμμα 3.1), καθιστά αναγκαιότητα τόσο το οπτικό επίπεδο να είναι ικανό να προσφέρει απευθείας υπηρεσίες υποστήριξης στο IP στρώμα, όσο και το στρώμα αυτό να μπορεί να εκμεταλλευθεί πλήρως αυτές τις υπηρεσίες. Επιπλέον, η υλοποίηση μιας σειράς απαιτητικών εφαρμογών μέσω του Διαδικτύου, όπως η διαδικτυακή τηλεφωνία και η τηλεδιάσκεψη, πέρα από το αναγκαίο εύρος ζώνης απαιτούν και μια σειρά εγγυήσεων σε ότι αφορά στην ποιότητα των υπηρεσιών (QoS), στην ασφάλεια και στη μέγιστη ανοχή σφαλμάτων (fault tolerance) [14].

5.2 Η ολοκλήρωση των δύο στρωμάτων ενός ‘IP over WDM’ δικτύου μέσω του Πολλαπλού Πρωτοκόλλου Ετικετών Μεταγωγής (Multi-Protocol Label Switching-MPLS)

Όπως είναι φυσικό, η αποδοτική λειτουργία μιας καινοτόμου υλοποίησης όπως η συγκεκριμένη εξαρτάται άμεσα από την ύπαρξη ενός ισχυρού και πλήρους πρωτοκόλλου που θα εξασφαλίζει την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών διευθυνσιοδότησης (addressing), σηματοδότησης (signaling), δρομολόγησης (routing) και επιβιωσιμότητας του δικτύου.

Το βέλτιστο πρωτόκολλο για την επιτέλεση των διαδικασιών αυτών και την ολοκλήρωση των IP και WDM στρωμάτων θεωρείται το ‘MPLS’ και ειδικότερα η επέκταση αυτού στο οπτικό πεδίο που αναφέρεται ως ‘Πολλαπλό Πρωτόκολλο Μεταγωγής στο Πεδίο του Μήκους Κύματος’ (*Multi-Protocol Lambda Switching-MPLS*) [19]. Τα δύο βασικά πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου αυτού έγκεινται αφενός στην αποτελεσματική διαχείριση της IP κυκλοφορίας όπως αυτή χρειάζεται στα δίκτυα πολλαπλών υπηρεσιών και αφετέρου αποτελεί το ειδικά σχεδιασμένο εργαλείο για τα WDM οπτικά δίκτυα [20,21].

Αρχικά, όσον αφορά στη διαδικασία της διευθυνσιοδότησης, αυτή θα πρέπει να εγκαθιστά WDM οπτικά μονοπάτια μεταξύ των οπτικών στοιχείων διασύνδεσης (optical crossconnects-OXCs) στα άκρα του δικτύου. Για την επικοινωνία μεταξύ του IP στρώματος με το WDM επίπεδο, είναι απαραίτητη η γνώση των διευθύνσεων εισόδου και εξόδου των οπτικών στοιχείων διασύνδεσης-OXCs. Ένας προφανής και σίγουρος τρόπος να γίνει αυτό, είναι η λειτουργία των ‘OXCs’ ως συσκευών που μπορούν να δεχθούν κάποια IP διεύθυνση ενώ παράλληλα θα ενσωματώνουν μεγάλο αριθμό θυρών. Έτσι, ανατίθεται μια IP διεύθυνση σε κάθε ‘OXC’ στοιχείο, ενώ η ταυτοποίηση των θυρών του καθενός επιτυγχάνεται με ιεραρχικό τρόπο –πρώτα μέσω της IP διεύθυνσης και στη συνέχεια μέσω του αύξοντα αριθμού της θύρας [20].

Το δεύτερο πολύ σημαντικό ζήτημα στο επίπεδο ελέγχου, αυτό της σηματοδοσίας (*signaling*), αναφέρεται στην εξεύρεση των πόρων του δικτύου που θα χρησιμοποιηθούν κάθε φορά. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των IP και WDM συσκευών του δικτύου καθώς και τη δημιουργία, απαλοιφή και τροποποίηση των μονοπατιών δρομολόγησης [20]. Εξαιτίας των σημαντικών διαφοροποιήσεων μεταξύ των λειτουργιών σηματοδοσίας στα δύο στρώματα, η ροή ελέγχου θα πρέπει να τερματίζεται σε κάθε OXC στοιχείο ώστε να προστίθεται ή εξάγεται η απαραίτητη πληροφορία ελέγχου. Ανάλογα με το μηχανισμό σηματοδοσίας υπάρχουν τρία βασικά μοντέλα για την ‘IP over WDM’ υλοποίηση τα οποία και περιγράφονται στη συνέχεια [20,21,22]:

- **Το μοντέλο Πελάτη-Διακομιστή (Client-Server model):** Στην περίπτωση αυτή, το WDM στρώμα αντιμετωπίζεται ως ένα ξεχωριστό-ευφρές δικτυακό στρώμα. Τα επίπεδα ελέγχου στο οπτικό επίπεδο (διακομιστής) και στο επίπεδο του πελάτη λειτουργούν ανεξάρτητα, δίχως την ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης. Για τις υπηρεσίες του ανώτερου στρώματος (πελάτης), το οπτικό δίκτυο αποτελεί ‘μαύρο κουτί’ με κάποιες διασυνδέσεις, μέσω των οποίων τα πρωτόκολλα του πελάτη απαιτούν κανάλια οπτικών μονοπατιών κυκλώματος μεταγωγής (*circuit-switched lightpath channels*). Σημειώνεται ότι το μοντέλο αυτό προϋποθέτει ότι οι διεπιφάνειες χρήστη-δικτύου (*User-to-Network Interface-UNI*) και δικτύου-δικτύου (*Network-to-Network Interface-NNI*) είναι ξεχωριστές. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι η ευκολία της εμπορικής εφαρμογής του. Ωστόσο, ο σχεδιασμός αυτός εισάγει μια σχετική πολυπλοκότητα στην προσπάθεια ολοκλήρωσης των δύο στρωμάτων, ενώ δεν είναι βελτιστοποιημένη ως προς τα λειτουργικά κόστη του δικτύου.
- **Το Ομότιμο μοντέλο (Peer-to-Peer model):** Το μοντέλο αυτό αποτελεί μια IP-κεντρική WDM υλοποίηση, στην οποία τα OXC στοιχεία και οι δρομολογητές ετικετών μεταγωγής (*label-switching routers*) ανταλλάσσουν ελεύθερα πληροφορίες, εκτελώντας κοινά πρωτόκολλα δρομολόγησης και σηματοδοσίας. Η αρχιτεκτονική αυτή διαιρείται σε δύο επίπεδα, το επίπεδο δεδομένων (*data plane*) και το επίπεδο απλού ενοποιημένου ελέγχου (*single unified control plane*). Επιπλέον, οι διεπιφάνειες χρήστη-δικτύου (*UNI*) και δικτύου-δικτύου δεν διαχωρίζονται. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης έγκειται στην εξάλειψη της πολύπλοκης διαχείρισης υβριδικών διαδικτυακών συστημάτων. Επιπρόσθετα, παρέχεται η δυνατότητα ενός προσανατολισμένου στις υπηρεσίες δικτυακού μοντέλου παράλληλα με την προσφορά μιας κλιμακούμενης και επιβιώσιμης αρχιτεκτονικής. Το μειονέκτημα εντοπίζεται στις δυσκολίες προτυποποίησης του συγκεκριμένου μοντέλου.
- **Το επαυξημένο μοντέλο (Augmented model):** Η υλοποίηση αυτή αποτελεί το ενδιάμεσο των δύο προηγούμενων. Έτσι, διατηρείται η ύπαρξη ξεχωριστών επιπέδων ελέγχου για τα στρώματα διακομιστή (WDM) και πελάτη (IP). Ωστόσο, επιτρέπεται η ελεγχόμενη ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης μεταξύ των δύο αυτών επιπέδων.

Γενικά, επικρατεί η άποψη ότι το πρώτο βήμα προς την ολοκλήρωση της αμιγούς ‘IP over WDM’ υλοποίησης θα είναι μέσω του μοντέλου Διακομιστή-Πελάτη. Το

επόμενο στάδιο θα περιλαμβάνει το Επαυξημένο Μοντέλο και τελικά τα δίκτυα αυτής της τεχνολογίας θα καταλήξουν σε μια Ομότιμη Υλοποίηση.

Συνεχίζοντας, όσον αφορά στις *εργασίες της δρομολόγησης*, το MPLS πρωτόκολλο αρχικά υπολογίζει τα μονοπάτια εκείνα που ικανοποιούν καθορισμένες προδιαγραφές ικανοποιώντας ταυτόχρονα συγκεκριμένους περιορισμούς. Ειδικότερα, η υλοποίηση γίνεται μέσω της εκτέλεσης ενός αλγορίθμου επιλογής μονοπατιού (path-selection algorithm) από μια βάση δεδομένων κυκλοφορίας που περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τη διαθεσιμότητα των πόρων του δικτύου, την τοπολογία των πόρων αυτών και τους περιορισμούς της απόδοσης κάθε μονοπατιού [20]. *Η δρομολόγηση μπορεί να είναι συγκεντρωμένη (centralized) ή κατακεμημένη (distributed).*

Πιο συγκεκριμένα, η συγκεντρωμένη μέθοδος απαιτεί τον υπολογισμό και την υλοποίηση των μονοπατιών στην ίδια περιοχή. Έτσι, απλοποιείται ο έλεγχος και γίνεται βέλτιστη χρήση των πόρων του δικτύου, δίχως ωστόσο να δίνεται η δυνατότητα καλής κλιμάκωσης μεγέθους [20]. Από την άλλη, στην κατακεμημένη υλοποίηση η δρομολόγηση και ο έλεγχος πραγματοποιούνται σε κάθε διακόπτη ή δρομολογητή, εξασφαλίζοντας μεν καλή κλιμάκωση μεγέθους αλλά υπάρχει και το κόστος της ανταλλαγής μεγάλου όγκου πληροφορίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου [20].

Τέλος, το *ζήτημα της επιβιωσιμότητας* διαθέτει δύο σκέλη: το σκέλος της προστασίας (protection) και αυτό της αποκατάστασης (restoration). Ο πρώτος σχεδιασμός προστασίας περιλαμβάνει την ταυτόχρονη μετάδοση της κυκλοφορίας μέσω του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος μονοπατιού, με το σημείο λήψης να επιλέγει το σήμα με την υψηλότερη ποιότητα [20]. Ένας δεύτερος σχεδιασμός χρησιμοποιεί το προκαθορισμένο δευτερεύον μονοπάτι για την κυκλοφορία χαμηλής προτεραιότητας έως ώτου αυτό χρειαστεί για την προστασία του πρωτεύοντος [20]. Στη διαδικασία της αποκατάστασης γίνεται αναδρομολόγηση (rerouting). Έτσι, υπολογίζεται μεν κάποιο δευτερεύον μονοπάτι, αλλά η εγκατάστασή του γίνεται μόνον αφότου το πρωτεύον μονοπάτι καταρρεύσει. Η διαδικασία της αποκατάστασης είναι γενικά πιο αργή.

5.3 Τα Πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ‘IP over WDM’ έναντι της ‘IP over SONET/SDH over WDM’ Τεχνολογίας

Η ενδεχόμενη απαλοιφή του SONET/SDH στρώματος από την όλη διαμόρφωση ενός οπτικού δικτύου θα μπορούσε να προσφέρει μια σειρά από σημαντικότερα πλεονεκτήματα όπως:

- Ευνοείται η ταχύτερη κλιμάκωση μεγέθους και ταυτόχρονα υπάρχει μεγάλη μείωση του κόστους υλοποίησης και λειτουργίας [23]
- Ο μετριασμός, σε υψηλό βαθμό, του πλεονασμού που εισάγει η ύπαρξη του επιπλέον, SONET/SDH, στρώματος [23]. Έτσι, παύει πλέον η αναγκαιότητα χρήσης ενός σοβαρού ποσοστού των πόρων του δικτύου που απορρέουν από τις μη βελτιστοποιημένες λειτουργίες διαχείρισης που διεξάγονται από το SONET/SDH στρώμα.

- Ο χαμηλός βαθμός πολυπλοκότητας της ‘IP over WDM’ υλοποίησης [24]. Μετά πλέον και τις τελευταίες εξελίξεις, πολλοί θεωρούν ότι το SONET/SDH επίπεδο παύει να προσφέρει λειτουργικότητα στο δίκτυο, γεγονός που έως τώρα αποτελούσε το βασικό πλεονέκτημά του [25].
- Ο υψηλός βαθμός ευελιξίας που προσφέρει η απλή υλοποίηση δύο στρωμάτων, για την υλοποίηση και διαχείριση δικτύων υψηλής χωρητικότητας [22].
- Παρέχεται η δυνατότητα προσφοράς νέων υπηρεσιών προς τους χρήστες-πελάτες του δικτύου, μέσα σε ένα περιβάλλον αυξανόμενης κυκλοφορίας IP δεδομένων [33].

Ωστόσο, στα παραπάνω θα πρέπει να συνυπολογιστούν και ορισμένοι σημαντικοί παράγοντες που, προς το παρόν, μετριάζουν τον ενθουσιασμό για την ‘IP over WDM’ τεχνολογία. Έτσι, δεν υφίστανται ακόμη εκείνα τα πρότυπα που θα μπορούσαν να καταστήσουν ώριμη και καλά θεμελιωμένη την υλοποίηση αυτή [20]. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι ακόμη η λύση αυτή δεν έχει κατορθώσει να γίνει ‘vendor independent’. Από την άλλη, η SONET/SDH τεχνολογία διαθέτει υψηλό επίπεδο ωριμότητας και όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την WDM λύση στο χαμηλότερο στρώμα, μέσω μιας ‘IP over SONET/SDH over WDM’ υλοποίησης, μπορεί να προσφέρει επιπλέον αξιοπιστία στο δίκτυο.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνική της πολύπλεξης στο πεδίο του μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM) έχει πλέον αναγνωριστεί ως η υλοποίηση που θα προσφέρει μια μακροπρόθεσμη λύση στο σοβαρό πρόβλημα της ραγδαίας αύξησης των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης. Η εκρηκτική αύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων στο Διαδίκτυο (IP data) και η τάση το IP πρωτόκολλο να αποτελέσει την κοινή βάση για όλες τις προσφερόμενες υπηρεσίες κατέστησε, πλέον, φανερό το γεγονός ότι η παραδοσιακή υλοποίηση της μεταφοράς IP πακέτων μέσω SONET/SDH (‘IP over SONET/SDH’) είναι ανεπαρκής. Άλλωστε, η SONET/SDH τεχνολογία έχει και το μειονέκτημα ότι είναι βελτιστοποιημένη για τη μεταφορά φωνητικών δεδομένων. Ιδιαίτερα μετά την υλοποίηση διατάξεων όπως οι οπτικοί ενισχυτές, οι οπτικοί πολυπλέκτες ελεγχόμενης πολύπλεξης (add/drop optical multiplexers) και τα οπτικά στοιχεία διασύνδεσης (optical cross-connect components), οι υψηλές προοπτικές για την ευρεία χρήση της WDM τεχνολογίας στα δίκτυα μεγάλων αποστάσεων (WANs) αλλά και στα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs) είναι ξεκάθαρες.

Η εφαρμογή της WDM τεχνολογίας είναι δυνατό να γίνει με δύο τρόπους, είτε μέσω της ενσωμάτωσης ενός WDM στρώματος στα υπάρχοντα ‘IP over SONET/SDH’ συστήματα –μέσω μιας ‘IP over SONET/SDH over WDM’ υλοποίησης, είτε μέσω της κατάργησης του SONET/SDH επιπέδου με τα IP πακέτα να μεταφέρονται απευθείας μέσω του WDM στρώματος (‘IP over WDM’). Βραχυπρόθεσμα και ιδιαίτερα για την περίπτωση που προϋπάρχει ένα ‘IP over SONET/SDH’ δίκτυο, φαίνεται να ευνοείται η πρώτη υλοποίηση δεδομένου ότι είναι οικονομικότερη η απλή εγκατάσταση ενός επιπλέον στρώματος σε ένα υφιστάμενο σύστημα παρά η ριζική αναθεώρησή του μέσω της ταυτόχρονης κατάργησης ενός στρώματος και της προσθήκης ενός νέου. Επιπλέον, υπάρχει και η απροθυμία της γρήγορης κατάργησης του SONET/SDH επιπέδου, δεδομένου ότι βασίζεται σε μια ώριμη και αξιόπιστη πλέον τεχνολογία παρά τους πλεονασμούς που είναι φανερό ότι εισάγονται. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα και ειδικότερα σε περιπτώσεις που δεν προϋπάρχει κάποιο ‘IP over SONET/SDH’ σύστημα η απλούστερη και πιο ευέλικτη ‘IP over WDM’ υλοποίηση θα αποτελέσει τη βέλτιστη λύση, στα πλαίσια της γενικότερης κατεύθυνσης προς τα εξολοκλήρου οπτικά δίκτυα (All-Optical Networks).

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Techfest – SONET/SDH Technical Summary (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.techfest.com/networking/wan/sonet.htm>)
2. JungleMux SONET/Fiber Optic System – What is SONET? (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/6800/P97_JDSR.HTM)
3. International Engineering Consortium (IEC): On-Line Education – Synchronous Optical Network (SONET) (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.iec.org/online/tutorials/sonet/index.html>)
4. Cisco Systems Inc. - Introduction to DWDM for Metropolitan Networks (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/dwdm/index.htm>)
5. Web ProForum Tutorials – Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.iec.org/>)
6. OE Reports – What is WDM Technology? (by Stamatios V. Kartalopoulos) (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.spie.org/web/oer/november/nov00/wdm.html>)
7. Web ProForum Tutorials – Raman Amplification Design in Wavelength Division Multiplexing (WDM) Systems (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.iec.org/online/tutorials/raman/>)
8. Green P., ‘Progress in Optical Networking’, IEEE Communications Magazine, pp. 54-61, January 2001
9. Web ProForum Tutorials – Internet Protocol (IP) Internetworking Transport (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: http://www.iec.org/online/tutorials/ip_int/)
10. Cisco – Cisco’s Packet over SONET/SDH (POS) Technology Support (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/rt/12000/tech/posdh_wp.htm)
11. Cisco: Service Provider: Optical Internetworking – What is Wave Division Multiplexing (WDM)? (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.cisco.com/warp/public/779/servpro/solutions/optical/docs/whatisw dm.html>)
12. Nikkei Electronics Asia: September 1998, Special Report – Optical Multiplex, Tbps Switch Support 2001 Internet (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: <http://www.nikkeibp.com/nea/sep98/specrep/index.html>)

13. Cardwell R.H., Wasem O.J., Kobrinski H., ‘WDM Architectures and Economics in Metropolitan Areas’, Optical Networks Magazine, pp. 41-50, July 2000
14. David Su, ‘IP over WDM’, Pre-competency Proposal
(*Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:*
<http://w3.antd.nist.gov/Overview/ipoverwdm.pdf>)
15. Chatterjee S., Pawlowski S., ‘Enlightening the effects and implications of nearly infinite bandwidth’, Communications of the ACM, pp 75-83, June 1999/Vol 42.No. 6
16. Weinstein S., ‘Realizing the Optical Internet’, IEEE Communications Magazine, pp.10, July 2001
17. Riezenman M. J., ‘ Optical Nets Brace for Even Heavier Traffic’ IEEE Spectrum, pp.44-46, January 2001
18. Sivalingam K. M., Subramaniam S. ‘Optical WDM Networks: Principles and Practice’, 2001, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts 02061 USA
19. Awduche D., Rekhter Y., Drake J., Coltun, ‘Multi-Protocol Lambda Switching: Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Crossconnects’, Internet Draft draft-awduche-mpls-te-optical-02.txt, July 2000
20. Dixit S., Yinghua Y., ‘Streamlining the Internet-Fiber Connection’, IEEE Spectrum, pp. 52-57, April 2001
21. Moral A. R., Bonenfant P., Krishnashwamy M., ‘The Optical Internet: Architectures and Protocols for the Global Infrastructure of Tomorrow’, IEEE Communications Magazine, pp. 152-159, July 2001
22. ‘WDM and IP Network Management (WINMAN) Project’ (*Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:* <http://www.telecom.ece.ntua.gr/winman/>)
23. Chandhok N., Durresi A., Jagannathan R., Seetharaman S., Vinodkrishnan K., Jain R., ‘IP over WDM Networks’, Internet Draft
24. Muralikrishna G., ‘Optical Networking and Dense Wavelength Division Multiplexing’, (*Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:*
<http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/cis788-99/dwdm/index.html>)
25. Shivkumar K., ‘IP over SONET and Optical Networks’, (*Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:* <http://www.ecse.rpi.edu/homepages/shivkuma>)
26. Jajszczuk A., ‘What is the Future of Telecommunications Networking?’, IEEE Communications Magazine, pp.12-20, June 1999

27. Business Communications Review – Fire Sale in the Fibersphere? (by Sandra L. Borthick), *(Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:*
<http://www.bcr.com/bcrlmag/1997/10/p30.asp>)
28. Business Communications Review – WDM, TDM, SONET and ATM-Oh My! (by Sandra L. Borthick), *(Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:*
<http://www.bcr.com/bcrlmag/1997/10/p31.asp>)
29. Business Communications Review – Riding the Wave to an Optical Infrastructure (by Bob Bellman), *(Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:*
<http://www.bcr.com/bcrlmag/1999/04/p36.asp>)
30. Yates J., Hjalmtysson G., Greenberg A., ‘Reconfiguration of IP over WDM access networks’, Internet Draft
31. Dr Zhang L., ‘IP Traffic in WDM-Based Networks’, *(Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:*
http://www.key3media.com/interop/lasvegas2000/presentations/pdf/ec/E5C_L_Zhang_Presentation.pdf)
32. Schein, Modiano, ‘Increasing Traffic Capacity in WDM ring Networks via Topology Reconfiguration’ OFC ‘99
33. Telecommunications Online – Is IP over DWDM the winning hand? (by Wynne Davis), *(Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:*
<http://www.telecoms-mag.com/>)