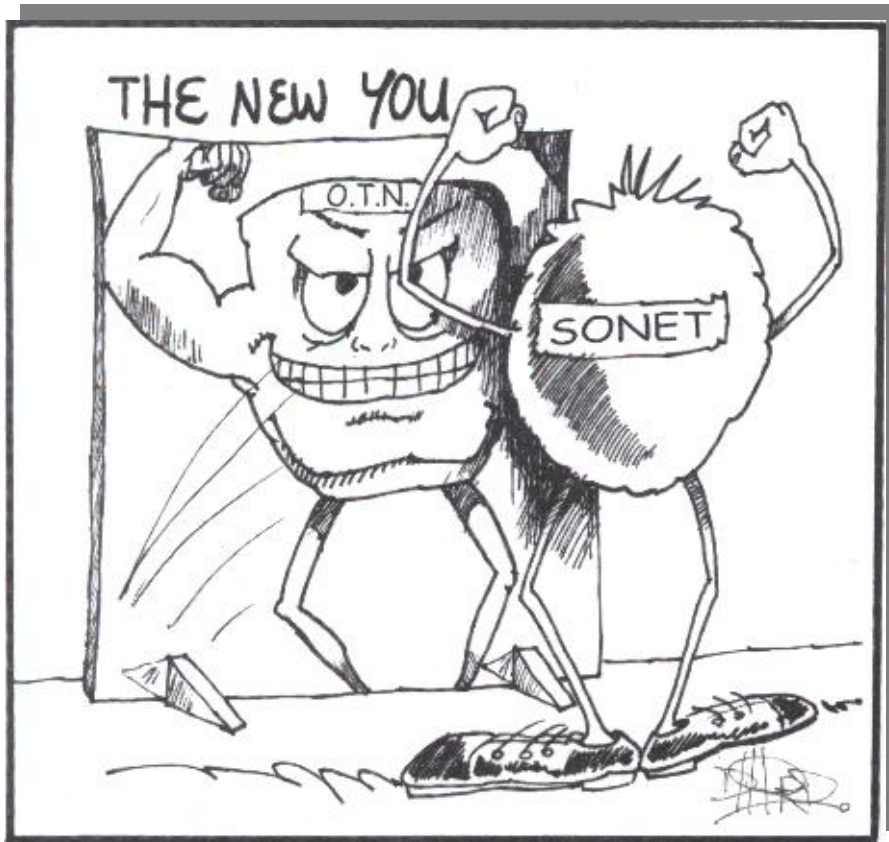


Tsompanoudi Despina MIS 31/04
Christou Ioannis MIS 29/04

University of Macedonia
Master Information Systems
Networking Technologies
Professors: A.A. Economides & A. Pomportsis

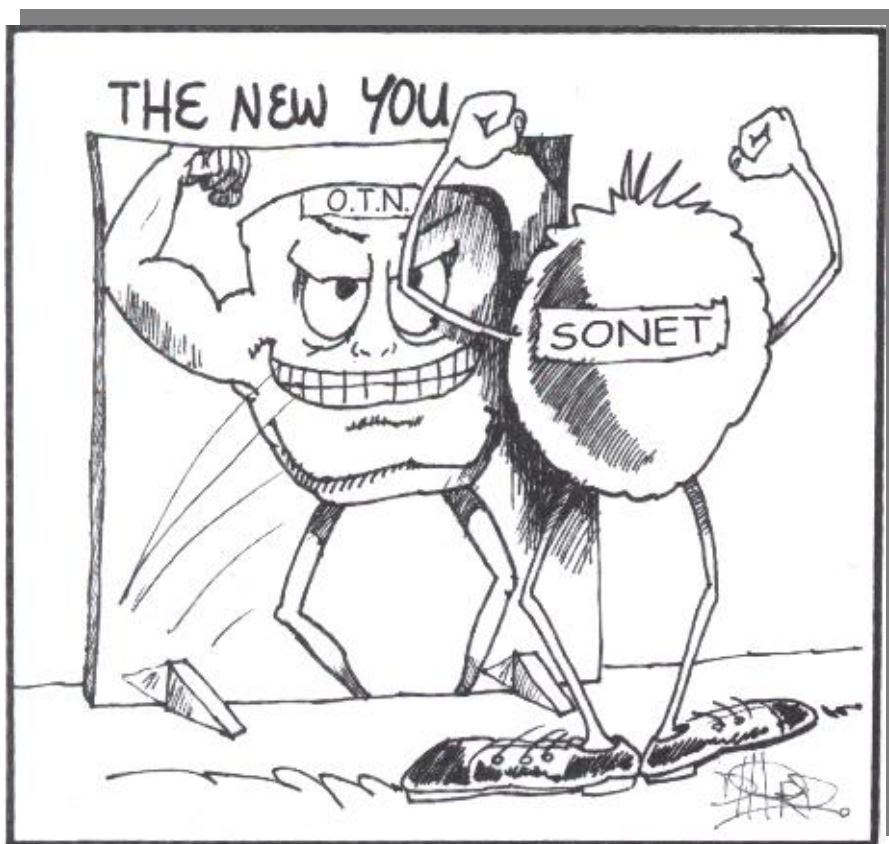


Optical Network Protocols

THESSALONIKI, FEBRUARY 2005

Εθνοπανούδη Δέσποινα ΜΙΣ 31/04
Χρήστου Ιωάννης ΜΙΣ 29/04

Πανεπιστήμιο Μακεδονίας
ΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα
Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων
Καθηγητές: Α.Α. Οικονομίδης & Α. Πομπόρτσης



Πρωτόκολλα Οπτικών Δικτύων

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2005

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ - TABLE OF CONTENTS

Παρουσίαση θέματος	Subject Presentation	4
Περίληψη	Summary	5-6
1. Ιστορική αναδρομή	1. Historical Review	7
2. Οπτικές ίνες	2. Fiber Optics	11
α. Εισαγωγή	a. Introduction	11
β. Δομή οπτικής ίνας	b. Fiber Optics Structure	11
γ. Είδη οπτικών ινών	c. Fiber Optics Types	12
3. SONET	3. SONET	15
α. Γιατί είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός;	a. Why is the synchronization important?	17
β. Συγχρονισμένο SONET	b. Synchronized SONET	18
γ. Ιεραρχία Σήματος	c. Signal Hierarchy	18
δ. Βασικά Αρχιτεκτονικής	d. Architecture Basics	19
ε. Υπηρεσίες που παρέχονται από κάθε επίπεδο	e. Services provided in every layer	20
στ. Το πλαίσιο SONET	f. The SONET frame	21
ζ. Overheads	g. Overheads	22
η. SONET Alarm Structure	h. SONET Alarm Structure	23
θ. Πλεονεκτήματα SONET	i. SONET Advantages	23
ι. Ενισχυμένη OAM&P	j. Improved OAM&P	25
ια. Βελτιωμένη εκτέλεση ελέγχου	k. Improved Control Execution	25
ιβ. Τεστ γνώσεων	l. Test	26
4. Automatic Protection Switching	4. Automatic Protection Switching	28
α. Αρχιτεκτονική προστασίας	a. Protection Architecture	29
β. Protection Switching Schemes	b. Protection Switching Schemes	31
5. Τεχνολογίες Μεταφοράς Δεδομένων	5. Data Transport Technologies	37
α. Packet over SONET/SDH (POS)	a. Packet over SONET/SDH (POS)	37
β. Dynamic Packet Transport (DPT)	b. Dynamic Packet Transport (DPT)	38
6. WDM / DWDM	6. WDM / DWDM	40
α. WDM	a. WDM	40
β. DWDM	b. DWDM	41
γ. Εφαρμογές του DWDM σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα	c. DWDM applications in telecommunications networks	43
δ. Τα σημερινά δίκτυα DWDM	d. Today's DWDM networks	44
ε. Υποδομή ενός DWDM δικτύου	e. DWDM network infrastructure	47
7. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	7. Conclusions – Proposals for future research	48
8. Βιβλιογραφία - Παραπομπές	8. Bibliography - References	49

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΘΕΜΑΤΟΣ

Στην παρακάτω εργασία θα γίνει ανάλυση των πρωτοκόλλων οπτικών δικτύων. Επίσης ο χρήστης έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει και να εξασκηθεί σε ένα αλληλεπιδραστικό εκπαιδευτικό περιβάλλον, το οποίο θα αναλύει όλα τα περιεχόμενα της εργασίας και θα τον βοηθά στην καλύτερη κατανόηση των εννοιών που αναφέρονται στα οπτικά δίκτυα και φυσικά στα πρωτόκολλά τους.

SUBJECT PRESENTATION

The following essay analyzes the Optical Network Protocols. Further more the user has the ability to use and practice in an interactive educational environment, which will analyze all the essay's contents and will assist him in a better understanding of the terms referred in the optical networks and with no doubt to their protocols.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρακάτω εργασία παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των οπτικών δικτύων και πιο συγκεκριμένα τα πρωτόκολλα τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτά. Αρχικά, γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή στην χρησιμότητα των δικτύων και την ανάγκη της ολοένα και αυξανόμενης επέκτασής τους και πως αυτό έχει επηρεάσει τις τεχνολογίες δικτύων.

Στη συνέχεια δίνονται κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά για το φυσικό μέσο μετάδοσης που χρησιμοποιείται στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα, το οποίο είναι η οπτική ίνα, καθώς και τα πλεονεκτήματά της σε σχέση με τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς δεδομένων.

Στην επόμενη ενότητα γίνεται αναφορά στο SONET/SDH, το οποίο αποτελεί ένα πρότυπο οπτικών δικτύων με το οποίο επιλύονται σημαντικά προβλήματα επικοινωνίας, σφαλμάτων και ταχύτητας. Στη συνέχεια επεξηγείται ο λόγος ύπαρξής του, τα πλεονεκτήματά του και στο τέλος παρέχεται στον αναγνώστη η δυνατότητα να αξιολογήσει τις γνώσεις του με την επίλυση ενός τεστ.

Ακολουθεί η ενότητα που παρουσιάζεται το λεγόμενο APS (Automatic Protection Switching), που είναι το βασικό σύστημα προστασίας που χρησιμοποιείται στα οπτικά δίκτυα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο από τις τεχνολογίες μεταφοράς δεδομένων, η Packet over SONET/SDH (POS) και η Dynamic Packet Transport (DTP) και τα πρωτόκολλά τους.

Τέλος, στην τελευταία ενότητα αναπτύσσονται οι τεχνολογίες αύξησης εύρους ζώνης στα οπτικά δίκτυα WDM (Wavelength Division Multiplexing) και DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

SUMMARY

In the following essay the basic principles of optical networks are presented and more specific, the protocols that are been used. Firstly, there is a historical review of the networks use and the evermore increasing need for expansion that has affected the network technologies.

Thereafter, we provide some technical data for the physical transportation mean that is been used in contemporary optical networks which is the fiber optic and its advantages as well in comparison with other transportation means.

SONET/SDH is referenced in the next section which is an optical networks prototype that solves significant communication failure and speed problems. After that we explain the reason of its existence, its advantages and finally we give a chance to the reader to evaluate his knowledge by solving a test.

Then follows the APS (Automatic Protection Switching) section which is the basic protection system been used in optical networks.

Thereafter Packet over SONET/SDH (POS), Dynamic Packet Transport (DTP) and their protocols are presented.

Finally in the last section WDM (Wavelength Division Multiplexing) and DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) are described, which are the basic technologies for bandwidth expansion in optical networks.

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Για να κατανοήσουμε τις επιπτώσεις των οπτικών δικτύων θα πρέπει να γνωρίζουμε κάποια θέματα σχετικά με τα υπάρχοντα ‘δημόσια δίκτυα’ (public networks). Σήμερα σε όλο τον κόσμο εκατοντάδες και ίσως χιλιάδες εταιρείες χρησιμοποιούν αυτό που γενικά αναφέρεται σαν ‘δημόσιο δίκτυο’, ένα τεράστιο άμορφο σύμπλεγμα από καλώδια, διακόπτες που συνδέουν σπίτια και εταιρείες σε όλο τον κόσμο. Το τηλεφωνικό δίκτυο για παράδειγμα, είναι τόσο τεράστιο που για να το χειριστούμε είναι αρκετά δύσκολο.

Ο καλύτερος τρόπος προσέγγισής του είναι να το παρομοιάσουμε με ένα οδικό δίκτυο. Αυτό το δίκτυο περιλαμβάνει αυτοκινητοδρόμους που συνδέουν τις πόλεις μεταξύ τους, μεγάλες λεωφόρους μέσα σε αυτές και μικρότερες οδούς και εμπορικούς δρόμους. Το ίδιο ισχύει και στα ‘δημόσια δίκτυα’ υπολογιστών. Μεταξύ των πόλεων διαχειριστές μεγάλων αποστάσεων “long distance operators” τρέχουν “run” δίκτυα μεγάλων αποστάσεων “long-haul networks” που έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Μέσα σε αυτά τα δίκτυα υπάρχουν διακόπτες υψηλής ταχύτητας για την μεταβίβαση των δεδομένων σε διαφορετικές πόλεις.

Στο άκρο αυτών των μεγάλων δικτύων τοπικοί διανομείς διαχειρίζονται μητροπολιτικά δίκτυα (MANs – Metropolitan Area Networks). Τα μητροπολιτικά δίκτυα περιλαμβάνουν δίκτυα πόλεων τα οποία ονομάζονται ο “πυρήνας του μητροπολιτικού δικτύου” (metro core networks) και “γειτονικά δίκτυα” (neighborhood networks) τα οποία ονομάζονται “μητροπολιτικά δίκτυα πρόσβασης” (metro access networks).

Οι πυρήνες μητροπολιτικών δικτύων είναι οι μεγαλύτεροι λεωφόροι δεδομένων σε μία πόλη συνδέοντας τα γειτονικά δίκτυα μεταξύ τους. Τα μητροπολιτικά δίκτυα πρόσβασης διασυνδέουν οικήματα και εταιρείες με το μητροπολιτικό πυρήνα.¹

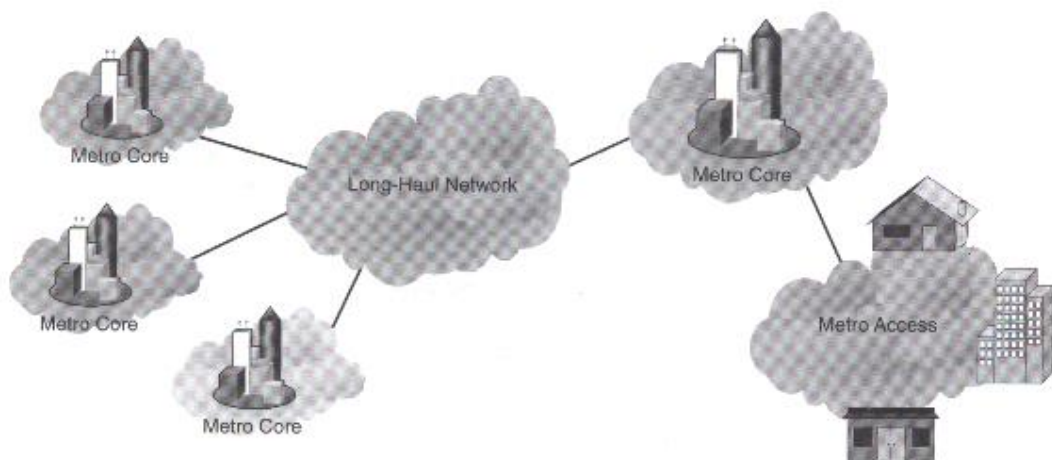
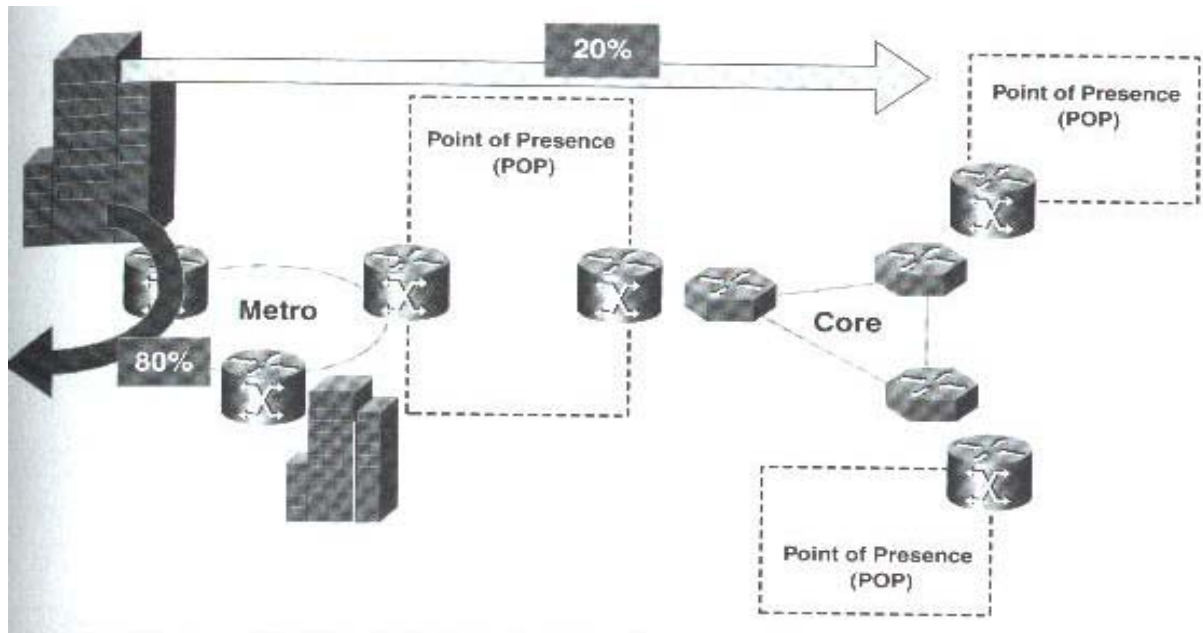


Figure 1.1

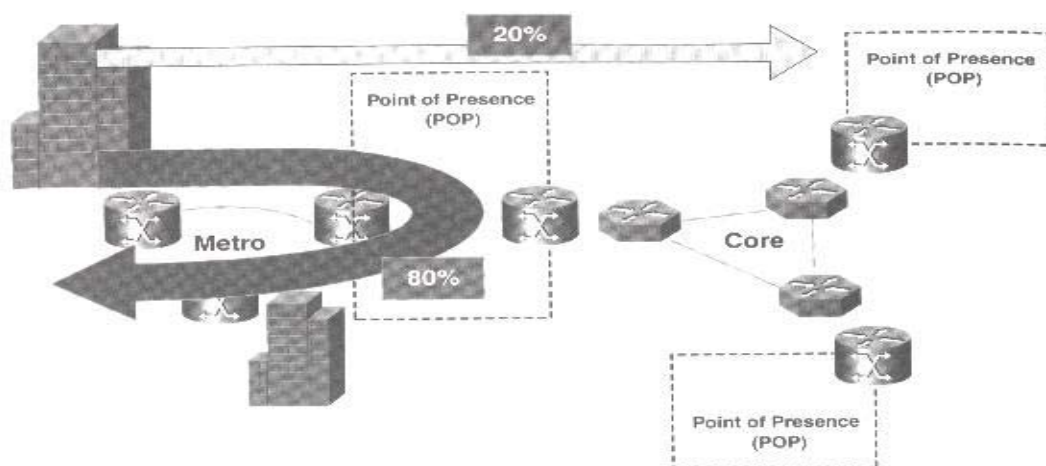
The public network consists of long-haul, metro-core, and metro-access networks.

Η διαφοροποίηση της αγοράς των τηλεπικοινωνιών δημιούργησε μια νέα δυναμική σχετικά με το κόστος του εύρους ζώνης των δικτύων και στη ποσότητα των δεδομένων που μεταφέρονται σε αυτά. Οι τιμές έπεσαν δραματικά ενώ οι απαιτήσεις για μεγαλύτερη χωρητικότητα αυξήθηκε κυρίως λόγω της ανάπτυξης του Internet. Πριν το internet η “κυκλοφορία δεδομένων” (traffic) ακολουθούσε τον κανόνα 80-20 (Σχήμα 1): 80% της κυκλοφορίας των δεδομένων παρέμενε στο τοπικό δίκτυο ενώ 20% στο δίκτυο μεγάλων αποστάσεων.



Σχήμα 1

Σήμερα αυτές οι αναλογίες έχουν αλλάξει με το 80% της κυκλοφορίας δεδομένων να διεκπεραιώνεται μεταξύ μεγάλων πόλεων (Σχήμα 2).



Σχήμα 2

Οι απαιτήσεις αυτές οδήγησαν στη δημιουργία νέων δυναμικών δικτύων που μπορούν να διαμορφώνουν, διαχειρίζονται και να φιλοξενούν οποιοδήποτε τύπο κυκλοφορίας. Τέτοια δίκτυα είναι και τα οπτικά².

Η αρχή της κλασικής πολυπλεξίας με επιμερισμό χρόνου (TDM) είναι ευρέως γνωστή. Από μια ομάδα αναλογικών σημάτων, λαμβάνονται δείγματα σε χρονική διαδοχή και με κοινό ρυθμό δειγματοληψίας. Τα δείγματα αυτά στη συνέχεια πολυπλέκονται για μετάδοση πάνω από κοινό κανάλι. Στις αρχές του 1960 όλα τα συστήματα μετάδοσης και μεταγωγής ήταν αναλογικά. Την περίοδο αυτή άρχισε να αναπτύσσεται η τεχνολογία της «παλμοκωδικής διαμόρφωσης» (PCM Pulse Code Modulation), όπου το αναλογικό σήμα φωνής μετατρέπεται σε ρεύμα δυαδικών ψηφίων μέσα από διαδικασίες δειγματοληψίας, κβάντισης, ψηφιοποίησης και τελικά κωδικοποίησης.

Στη συνέχεια, πολλά τέτοια δυαδικά σήματα (κανάλια) πολυπλέκονται σχηματίζοντας ένα σήμα με υψηλότερο ρυθμό. Αρχικά δημιουργήθηκε το λεγόμενο «ψηφιακό ρεύμα 1^{ου} επιπέδου» (DS1- Digital Stream 1) το οποίο μετέφερε 24 (PCM 24) ψηφιακά κανάλια φωνής των 64 Kbps συν 8 Kbps σηματοδοσίας, με συνολικό ρυθμό 1,544 Mbps. Το πρώτο επίπεδο πολυπλεξίας είναι πρακτικά γνωστό ως T1. Λίγο αργότερα (1968) αναπτύχθηκε η διαδικασία μετάδοσης (PCM 30) δημιουργώντας το λεγόμενο E1 σήμα, το οποίο αποτελείται από ένα ρεύμα δυαδικών ψηφίων με ρυθμό 2,048 Mbps.

Έχοντας ως βάση τα σήματα T1 και E1 και χρησιμοποιώντας κατάλληλη πολυπλεξία, δημιουργούνται ρεύματα υψηλότερης ταχύτητας τα οποία επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών καναλιών. Παρενθετικά υπενθυμίζεται ότι ένας τύπος πολυπλεξίας χαρακτηρίζεται ως σύγχρονος ή ασύγχρονος ανάλογα με την ύπαρξη ή μη ενός κεντρικού ρολογιού, που ελέγχει και συντονίζει όλες τις πηγές των προς πολυπλεξία σημάτων. Σε αυτό το δεδομένο βασίζεται και η λεγόμενη «πλεισιόχρονη πολυπλεξία» (Pleisiochronous Multiplexing), συστήματα ψηφιακής μετάδοσης που εφαρμόστηκαν στα «δημόσια δίκτυα» για την οικονομική μεταφορά αρχικά φωνής και στη συνέχεια δεδομένων.

Η «πλεισιόχρονη ψηφιακή ιεραρχία (PDH Pleisiochronous Digital Hierarchy) αναπτύχθηκε πριν από 40 περίπου χρόνια στα εργαστήρια της BELL και χρησιμοποιήθηκε για την επιτυχή μεταφορά ψηφιοποιημένης φωνής. Όμως παρουσιάζει τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- α. Μειωμένη απόδοση σε διαβίβαση ωφέλιμης πληροφορίας, λόγω ανάγκης για εισαγωγή δυαδικών ψηφίων συμπλήρωσης στις ανώτερες τάξεις πολυπλεξίας.
- β. Δεν υπάρχει δυνατότητα πρόσβασης σε ένα σήμα χαμηλής τάξης, όταν αυτό έχει πολυπλεχθεί με ένα σήμα υψηλότερης τάξης.

Έχοντας αυτά υπ' όψη, βλέπουμε μία λογική εξέλιξη του χώρου λειτουργίας των δικτύων. έχουμε κυριολεκτικά σήμερα μεταπηδήσει σε μία time division multiplexing

(TDM)-βασισζόμενη στο SONET/SDH εποχή. Με την εισαγωγή των λύσεων της επόμενης γενιάς **SONET/SDH**, οδηγούμαστε κατευθείαν στη καρδιά της επανάστασης της επόμενης γενιάς των μητροπολιτικών δικτύων ,στην οποία οι εταιρίες μπορούν να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη των επενδύσεών τους πάνω στις υπάρχουσες υποδομές, μειώνοντας το κόστος της ανάπτυξης νέων δικτύων και με δραματική αύξηση της παραγωγικότητας.

Το τί σημαίνει η επόμενη γενιά του SONET/SDH, είναι για παράδειγμα, ότι το κόστος μπορεί να μειωθεί σημαντικά, διότι έχει απομείνει μόνο ένα σύστημα μετάδοσης, αντί για διαφορετικούς τύπους πολυπλεξίας. Οι παροχές υπηρεσιών ικανοποιούνται με αυτό το τρόπο λειτουργίας, διότι τους επιτρέπει να συνδέουν πελάτες για λιγότερα, ενώ τους παρέχουν υπηρεσίες που διαφέρουν. Φυσικά όλα αυτά γίνονται σε ένα φυσιολογικό μοντέλο κέρδους που ουσιαστικά εγγυάται την επιτυχία.

2. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ³

α. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται μία επανάσταση στο χώρο των ψηφιακών επικοινωνιών και των δικτύων με την εισαγωγή της οπτικής ίνας ως μέσου μετάδοσης. Η οπτική ίνα έχει γίνει το επιλεγμένο μέσο μεταφοράς για μετάδοση φωνής, δεδομένων και βίντεο ιδιαίτερα για επικοινωνίες υψηλών ταχυτήτων. Η οπτική ίνα είναι συμπαγής συγκρινόμενη με τα καλώδια χαλκού (συνεστραμμένα ζεύγη και ομοαξονικό καλώδιο) και έχει πολλές ιδιότητες που ο χαλκός δεν προσφέρει.

Η οπτική ίνα έχει μεγάλη αντοχή στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, έχει εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης, μικρή εξασθένιση σήματος και μικρές διαστάσεις. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των ιδιοτήτων της είναι ότι το χρήσιμο εύρος ζώνης για ένα οπτικό κλώνο είναι χίλιες φορές μεγαλύτερο του ολικού ραδιοφωνικού εύρους ζώνης σε όλο τον κόσμο. Εντούτοις, οι οπτικές ίνες απαιτούν συνδέσμους και εξειδικευμένο προσωπικό για την εγκατάστασή και τη σύνδεσή τους.

Επιπλέον, η εγκατάσταση της οπτικής ίνας απαιτεί μεγάλο κόστος όχι εξαιτίας του κόστους της αλλά λόγω του κόστους που απαιτείται για τις άδειες εγκατάστασης και δημιουργία υπογείων δικτύων, την εγκατάσταση και χρήση εξειδικευμένου υλικού και προσωπικού αντίστοιχα. Στο άμεσο μέλλον όταν η παραγωγή οπτικών ινών καταστεί πιο μαζική, στα παραπάνω πλεονεκτήματα θα προστεθεί και το χαμηλό κόστος κατασκευής διότι το πυρίτιο που είναι η πρώτη ύλη για την κατασκευή οπτικών ινών είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα στοιχεία στη φύση.

β. Δομή οπτικής ίνας

(1) Ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης έχει τρία στοιχεία: την πηγή φωτός, το μέσο μετάδοσης και τον ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής δημιουργεί έναν ηλεκτρικό παλμό όταν πέφτει πάνω του φως. Συνδέοντας μία πηγή φωτός στο ένα άκρο οπτικής ίνας και έναν ανιχνευτή στο άλλο, έχουμε ένα μονοκατευθυντικό σύστημα μετάδοσης, που δέχεται ένα ηλεκτρικό σήμα, το μετατρέπει σε παλμούς φωτός και το μεταδίδει και τέλος το ξαναμετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα στη λήψη.

Αυτό το σύστημα μετάδοσης θα παρουσίαζε διαρροές φωτός και θα ήταν πρακτικά άχρηστο εάν δεν υπήρχε μία ενδιαφέρουσα αρχή της φυσικής. Όταν μία ακτίνα φωτός περνά από ένα μέσο σε άλλο, για παράδειγμα από γυαλί σε αέρα, η ακτίνα διαθλάται (στρίβει) στη διαχωριστική επιφάνεια γυαλιού/αέρος. Η ποιότητα της διάθλασης εξαρτάται από τις ιδιότητες των δύο μέσων και συγκεκριμένα από τους δείκτες διάθλασής τους. Για γωνίες

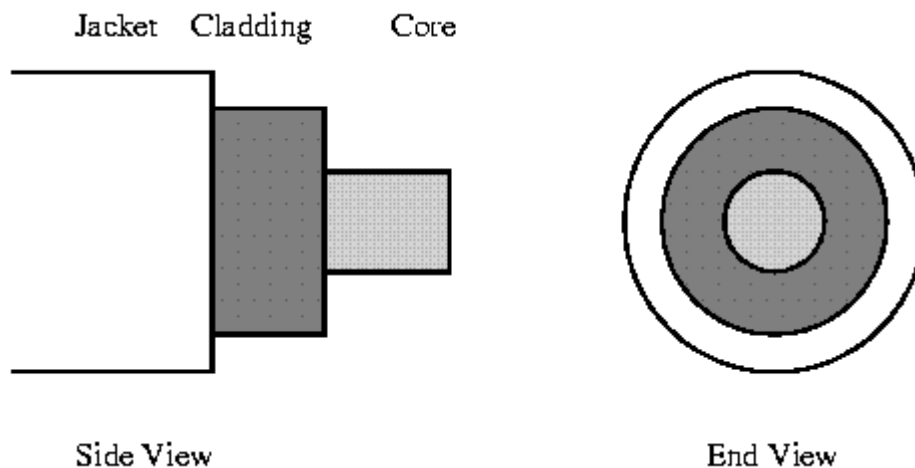
πρόσπτωσης μεγαλύτερες από μία συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή, το φως διαθλάται πίσω στο γυαλί και δεν διαφεύγει στο αέρα. Κατά συνέπεια μία ακτίνα φωτός προσπίπτουσα με γωνία ίση ή μεγαλύτερη της κρίσιμης τιμής παγιδεύεται εντός της ίνας και μπορεί να διαδοθεί για πολλά χιλιόμετρα, σχεδόν χωρίς καμία απώλεια.

(2) Η οπτική ίνα (optic fiber) αποτελείται από τρία ομοαξονικά στρώματα υλικού (Σχήμα 3):

(α) τον πυρήνα (core) αποτελούμενο από γυαλί, μέσα στον οποίο διαδίδεται το οπτικό σήμα

(β) την επίστρωση (cladding) αποτελούμενη από γυαλί με δείκτη διάθλασης μικρότερο από αυτόν του πυρήνα και

(γ) το λεπτό πλαστικό προστατευτικό κάλυμμα (jacket) της οπτικής ίνας.



Σχήμα 3

Η ίνα περιβάλλεται από ένα παχύ εξωτερικό κάλυμμα (buffer) που είναι κατασκευασμένο από πλαστικό και χρησιμοποιείται για την πρόσθετη προστασία της.

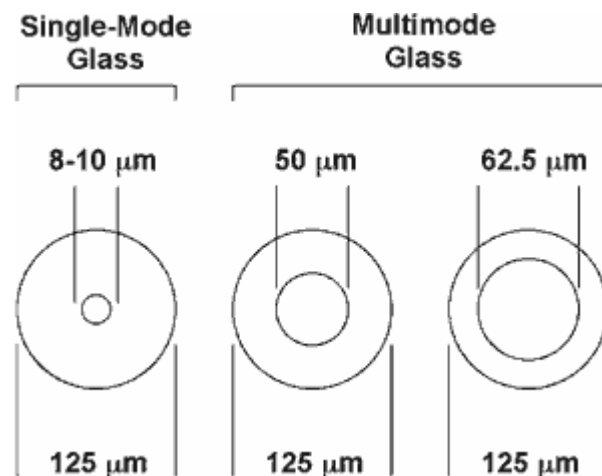
Λόγω του ότι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι μεγαλύτερος από αυτόν της επίστρωσης οι ακτίνες που προσπίπτουν στην επίστρωση με γωνία μεγαλύτερη της οριακής ανακλώνται με γωνία ίση με τη γωνία πρόσπτωσης. Έτσι το οπτικό σήμα 'παγιδεύεται' μέσα στον πυρήνα και οδεύει με διαδοχικές αντανάκλασεις προς το άλλο άκρο της οπτικής ίνας.

γ. Είδη οπτικών ινών

Διακρίνουμε δύο είδη οπτικών ινών: τις **single-mode** (μονότροπη ίνα) και τις **multimode** (πολύτροπη ίνα) (Σχήμα 4). Οι single-mode οπτικές ίνες χαρακτηρίζονται, σε ότι αφορά τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά, από διάμετρο του πυρήνα 8 έως 10μm και

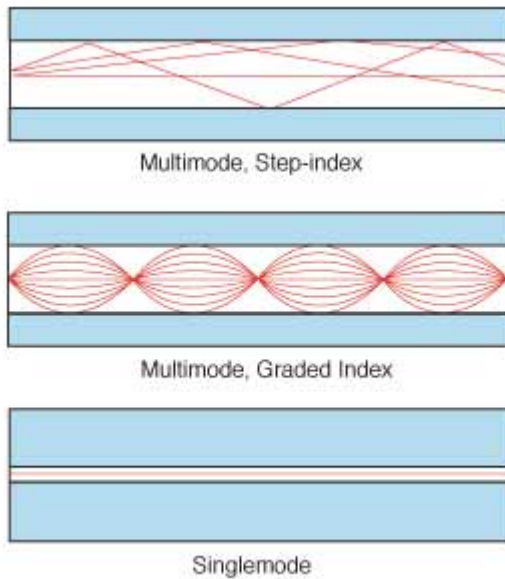
διάμετρο της επίστρωσης 125 μm . Οι multimode οπτικές ίνες χαρακτηρίζονται από διάμετρο του πυρήνα 50 μm , ενώ η διάμετρος της επίστρωσης είναι όπως και στις single-mode ίση με 125 μm . Είναι εύκολο να ξεχωρίσουμε τα δύο είδη οπτικών ινών διότι το εξωτερικό κάλυμμα των single-mode οπτικών ινών κίτρινο ενώ αυτό των multimode είναι πορτοκαλί.

Οι single-mode είναι ακριβότερες αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγαλύτερες αποστάσεις. Οι σημερινές single-mode οπτικές ίνες μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα με ταχύτητα αρκετών Gbps για 30km. Ακόμα μεγαλύτεροι ρυθμοί δεδομένων έχουν επιτευχθεί στο εργαστήριο για μικρότερες αποστάσεις. Πειράματα έχουν δείξει ότι ισχυρά laser μπορούν να τροφοδοτήσουν μία ίνα μήκους 100km χωρίς επαναλήπτες, αν και σε χαμηλότερες ταχύτητες. Η έρευνα σε ίνες με προσμίξεις Ερβίου υπόσχεται ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς επαναλήπτες.



Σχήμα 4

Πέρα από τις κατασκευαστικές τους διαφορές, οι single-mode και οι multimode οπτικές ίνες διαφέρουν και σε ότι αφορά τον τρόπο διάδοσης του οπτικού σήματος. Στις multimode οπτικές ίνες, το οπτικό σήμα ακολουθεί πολλούς διαφορετικούς δρόμους (Σχήμα 5) κατά τη διέλευσή του μέσα από την οπτική ίνα που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης του οπτικού σήματος στην επίστρωση. Αντίθετα στις single-mode οπτικές ίνες, όπου η διάμετρος του πυρήνα έχει μειωθεί στο επίπεδο του μήκους κύματος, το οπτικό σήμα ακολουθεί έναν και μοναδικό δρόμο.



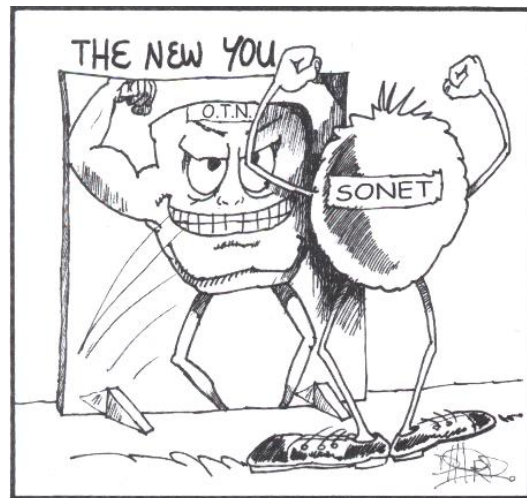
Σχήμα 5

Βασικά πλεονεκτήματα των multimode οπτικών ινών είναι η ευκολότερη και άρα φθηνότερη κατασκευή τους και η ευκολότερη πραγματοποίηση συνδέσεων μεταξύ οπτικών ινών αυτού του είδους. Από την άλλη πλευρά, το γεγονός ότι το οπτικό σήμα ακολουθεί περισσότερους του ενός δρόμους κατά τη διέλευσή του από μία multimode οπτική ίνα προκαλεί την παραμόρφωσή του. Η παραμόρφωση αυτή είναι ανάλογη με το μήκος της ίνας, γεγονός που καθιστά αναποτελεσματική τη χρήση multimode ινών σε μεγάλες αποστάσεις.

Μια ιδιαίτερη υποκατηγορία των multimode είναι οι graded index fibers. Αυτή η κατηγορία χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα δεν είναι σταθερός, αλλά μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από τον κεντρικό άξονα της ίνας. Οι ακτίνες φωτός που ταξιδεύουν κοντά στον άξονα της ίνας διανύουν μεν μικρότερη απόσταση σε σχέση με αυτές που ακολουθούν εξωτερική διαδρομή, αλλά λόγω του ότι ο δείκτης διάθλασης των graded index fibers είναι μεγαλύτερος κοντά στον άξονα της ίνας ταξιδεύουν με μικρότερη ταχύτητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δραστική μείωση της διασποράς του οπτικού σήματος.

3. THE SYNCHRONOUS OPTICAL NETWORK (SONET)⁴

Κατασκευασμένο για να προσφέρει «κοινή πλατφόρμα» για τις οπτικές τηλεπικοινωνίες το «Synchronous Optical Network (SONET)» έχει σε μεγάλο βαθμό αντικαταστήσει τη τυποποίηση μεταφοράς δεδομένων τύπου T που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα. Όπως σε πάμπολλες περιπτώσεις των τεχνολογιών επικοινωνίας, που ο λόγος της τυποποίησης των τεχνολογιών που ακολουθούνται είναι «εκ των ων ουκ άνευ» για τον ίδιο λόγο και το πρότυπο SONET/SDH έχει ακολουθήσει την ίδια πορεία.



SONET ASPIRES FOR GREATNESS.

Πριν την ανάπτυξη και παρουσίαση του SONET, τα ψηφιακά δίκτυα αντικατέστησαν τα αναλογικά συστήματα μεταφοράς με τη χρήση του Pleisiochronous Digital Hierarchy (PDH), μία συλλογή από υπηρεσίες, που διευθυνσιοδοτούσαν ηλεκτρικούς διασυνδετές για δίκτυα χαμηλών ταχυτήτων, που βασίζονταν στην τυποποίηση «Μεταφορά T» (T1, T3 κλπ). Ο όρος «plesiochronous» χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τεχνολογίες δικτύων, που είναι σχεδόν (αλλά όχι πλήρως), σύγχρονες. Αυτά τα δίκτυα βασίστηκαν σε υλικά που λειτουργούσαν χωρίς ρολόγια και με «σφιχτή» ωρολογιακή ανοχή, αλλά δεν απαιτούσαν κοινό παλμό. Η χρήση της λέξεως «σύγχρονο» στο SONET δηλώνει ότι όλες οι μεταδώσεις εκτελούνται με ακριβώς τον ίδιο κοινό παλμό. Όλα τα ρολόγια στα δίκτυα SONET βασίζονται σε ένα μοναδικό ρολόι αναφοράς με μία ακρίβεια τουλάχιστον ± 1 in 10^{11} .

Αν και τα δίκτυα PDH παρείχαν σημαντικά πλεονεκτήματα στα αναλογικά συστήματα, η αυξανόμενη ζήτηση για μεγάλο εύρος χρήσης, οδήγησε στην εισαγωγή των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας, για τα οποία δεν υπήρχε τυποποίηση. Τα υλικά τους προσαρμόζονταν με δυσκολία στα κοινά δίκτυα τα συστήματα διαχείρισης αποτελούνταν από ευπαθείς ιδιότυπες λύσεις. Αναγνωρίζοντας ότι τα δίκτυα επικοινωνιών μπορούσαν να επωφεληθούν από μία καθορισμένη τυποποίηση, η Bellcore, με το ρόλο του ερευνητή που προέρχεται από την Bell Operating Companies, πρότεινε το SONET σαν μία ιεραρχία μετάδοσης το 1985. Το CCITT τώρα The International Telecommunications Union, (ITU), κατανοώντας τα πλεονεκτήματα της τυποποίησης για τις οπτικές επικοινωνίες, υιοθέτησε την τυποποίηση, συντονίζοντας την με ένα τρόπο ώστε να είναι αποδεκτή από ένα διεθνές κοινό. Αποτέλεσμα αυτής της τυποποίησης, ήταν να μπορούν οι εταιρίες τηλεπικοινωνιών να αναπτύξουν δίκτυα που βασίζονταν στην προσφορά πωλητών, υλικών, σε μεγάλη ποσότητα, χωρίς να απαιτείται επιπλέον υλικό.

4. Synchronous Optical Network (SONET) Tektronix

Το SONET σχεδιάστηκε αρχικά για να υποστηρίζει ιεραρχική παράδοση σύγχρονων επικοινωνιακών κυκλωμάτων. Ποιο μετά αποδείχθηκε ότι είναι μία χρήσιμη τεχνολογία για την δόμηση και μεταφορά άλλων δικτύων πρωτοκόλλων, συμπεριλαμβανομένων του «Asynchronous Transfer Mode» (ATM) και «Internet protocol» (IP). Οι διακόπτες «switches» και δρομολογητές «routers» ATM και IP κατασκευάζονται με διεπαφές (interfaces) υψηλών ταχυτήτων SONET, επιτρέποντας τα να λειτουργούν απευθείας σε οπτικές συνδέσεις μεγάλων ταχυτήτων (Σχήμα 6).

SONET (ANSI)	Οπτικός Φορέας (OC)	Ρυθμός (Mbps)
STS-1	OC-1	51,840
STS-3	OC-3	155,520
STS-9	OC-9	466,560
STS-12	OC-12	622,080
STS-18	OC-18	933,120
STS-24	OC-24	1244,160
STS-36	OC-36	1866,240
STS-48	OC-48	2488,320
STS-96	OC-96	4976,640
STS-192	OC-192	9953,280

Σχήμα 6

Η τυποποίηση SONET απευθύνεται σε πολλά θέματα που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών. Προσφέροντας ένα εύρος τυποποιημένων οπτικών δικτύων, που χαρακτηρίζει τεχνολογίες multiplexing, κατανομής T-μεταφορέων και πολλαπλών ρυθμών οπτικών σημάτων multiple-rate optical signals. Το SONET έχει επικρατήσει μεταξύ των επικοινωνιακών δικτύων. Θέματα για την ολοκλήρωση των δικτύων περιλαμβάνουν:

- *Σήματα Φυσικού Επιπέδου.* Αυτά τα σήματα καθορίζουν πώς θα μεταφέρεται η ψηφιακή πληροφορία μέσω διαφόρων οπτικών μέσων.
- *Clock synchronization.* Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του SONET είναι η ικανότητά του να συγχρονίζει το ρεύμα της ψηφιακής πληροφορίας μέσα στο δίκτυο. Αυτό βοηθά στον περιορισμό της διαφυγής των δεδομένων, που δημιουργεί επιπτώσεις στην «ποιότητα των υπηρεσιών» που προσφέρει το δίκτυο. (Quality of the Services).
- *Information formats.* Αυτά καθορίζουν πώς παρουσιάζεται η κυκλοφορία, με υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται από τις συσκευές εκπομπής, προσφέροντας

επομένως ένα μεγάλο εύρος από εργασίες, διαχείριση, συντήρηση και πρόβλεψη για εργασίες που είναι αναγκαίες για την αποτελεσματική λειτουργία μεγάλων δικτύων.

- *Network architectures.* Με ένα εύρος εφαρμογών, πολλοί τύποι υλικών μπορούν να ενσωματωθούν μέσα στο δίκτυο. Πολλά βασικά τμήματα και ο ρόλος τους μπορεί να αναγνωρισθεί. Κάθε τύπος υλικού έχει έναν ξεκάθαρο ρόλο στην διαχείριση του κυκλώματος. Μία ποικιλία από συστήματα προστασίας έχουν αναπτυχθεί για να βοηθήσουν στη διάθεση υψηλών υπηρεσιών δικτύου, ακόμη και σε πραγματικές καταστάσεις όπου παρουσιάζονται προβλήματα υλικών και συνδέσεων.
- *Network management.* Αρκετές τυποποιήσεις συνοδεύουν τις υπηρεσίες μεταφοράς του SONET/SDH, συμπεριλαμβανομένου και του «Transaction Language 1» (TL1) και του Δικτύου Διαχείρισης Τηλεπικοινωνιών, «Telecommunications Management Network (TMN)» τυποποίηση εφαρμογών, καθώς και την υποδομή δικτύου δεδομένων για την υποστήριξη της κυκλοφορίας του δικτύου.

α. Γιατί είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός;⁵

Παραδοσιακά, τα συστήματα μεταφοράς ήταν ασύγχρονα με κάθε τερματικό στο δίκτυο να «τρέχει» με το δικό του ρολόι. Στις ψηφιακές μεταδόσεις ο χρονισμός είναι ένα από τα πιο σημαντικά θέματα. Χρονισμός σημαίνει, να χρησιμοποιείς μία σειρά από επαναλαμβανόμενους παλμούς για να διατηρείς τον ρυθμό των δεδομένων σταθερό, και να καταδεικνύεις που βρίσκονται τα 0 και 1 στην ροή των δεδομένων.

Επειδή αυτά τα ρολόγια είναι ανεξάρτητα και όχι συγχρονισμένα, παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις στους ρυθμούς των ρολογιών και κατά συνέπεια και στον ρυθμό των σημάτων δεδομένων. Για παράδειγμα, ένα σήμα DS-3 που καθορίζεται στα 44.736 Mps + 20 parts per million (ppm) μπορεί να παράγει μία μεταβλητή μέχρι 1.789 bps μεταξύ ενός εισερχόμενου DS-3 και ενός άλλου. Η ασύγχρονη πολυπλεξία χρησιμοποιεί διάφορα στάδια. Σήματα όπως τα ασύγχρονα DS-1s είναι πολυπλέξημα επιπλέον bits προσθέτονται (bit-stuffing) για να συνεργαστούν με τις εναλλαγές του κάθε ανεξάρτητου ρεύματος και συνδυάζονται με άλλα bits (framing bits) για να δημιουργήσουν ένα κανάλι DS-2. Το bit-stuffing χρησιμοποιείται επίσης για να πολυπλέξει μέχρι τα DS-3. Τα DS-3 πολυπλέκονται με υψηλότερους ρυθμούς με τον ίδιο τρόπο. Σε υψηλότερους ασύγχρονους ρυθμούς, δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση χωρίς την απόπλεξή τους.

Σε ένα συγχρονισμένο σύστημα όπως το SONET, ο μέσος όρος των συχνοτήτων των ρολογιών στο σύστημα θα είναι ο ίδιος (συγχρονισμένος) ή σχεδόν ο ίδιος. (plesiochronous).

5. <http://www.iec.org/online/tutorials/>

Κάθε ρολόι μπορεί να εντοπιστεί σε ένα υψηλά σταθερό σημείο αναφοράς. Γι αυτόν τον λόγο οι ρυθμοί των STS-1 παραμένουν στο ελάχιστο 51.84 Mbps, επιτρέποντας πολλά συγχρονισμένα σήματα STS-1 να συσσωρεύονται μαζί όταν πολυπλέκονται χωρίς να υπάρχει bit-stuffing. Έτσι το STS-1 έχει εύκολη πρόσβαση σε υψηλότερους ρυθμούς STS-N.

Συγχρονισμένα σήματα χαμηλών συχνοτήτων (Virtual Tributary, VT), έχουν και αυτά μεγάλη ευκολία να μεταβούν σε υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς. Σε χαμηλές ταχύτητες, τα DS-1 μεταφέρονται από συγχρονισμένα σήματα VT-1.5 σε έναν σταθερό ρυθμό των 1.728 Mbps. Πολυπλεξία «απλού βήματος» μέχρι STS-1 δεν απαιτεί bit-stuffing και επομένως είναι εύκολα προσβάσιμη. Οι δείκτες “pointers” προσαρμόζουν διαφορές στις συχνότητες πηγών αναφοράς και “phase wander” και προλαμβάνουν διαφορές συχνοτήτων κατά την διάρκεια των λαθών συγχρονισμού.

β. Συγχρονισμένο SONET

Τα εσωτερικά ρολόγια ενός τερματικού SONET μπορούν να αντλούν το «χρονικό σήμα» από το λεγόμενο “building integrated timing supply” (BITS), το οποίο χρησιμοποιείται από συστήματα διακοπών και άλλες συσκευές. Έτσι αυτό θα λειτουργήσει σαν “master” για τους υπόλοιπους κόμβους SONET, προσφέροντας χρονισμό στα εξερχόμενα OC-N σήματα. Οι υπόλοιποι κόμβοι SONET θα λειτουργήσουν σαν “slaves” με τα εσωτερικά τους ρολόγια να συγχρονίζονται από τα εισερχόμενα OC-N σήματα. Τα υπάρχοντα δεδομένα καθορίζουν ότι το δίκτυο SONET είναι ικανό να αντλεί τον χρονισμό του από Stratum 3 ή υψηλότερα ρολόγια.

γ. Ιεραρχία Σήματος

Στην πιο βασική μορφή το σύστημα SONET/ SDH παρέχει έναν μηχανισμό για να «αποπλέξει / πολυπλέξει» (multiplex/demultiplex) και να διανείμει ένα εύρος δεδομένων μέσα στο δίκτυο. Ένα εύρος από δεδομένα μεταφέρονται στο δίκτυο. Τρεις βασικές νόρμες χαρακτηρίζουν τα περιφερειακά. Το επίπεδο «σύγχρονου σήματος μεταφοράς» «synchronous transport signal (STS)» αναφέρεται στην βασική μονάδα του σήματος που μεταφέρεται διαμέσου του δικτύου. Τα επίπεδα οπτικών μεταφορέων, «Optical carrier, (OC)» αναφέρονται ακριβώς στο ρυθμό της οπτικής σήμανσης. Όταν προσθέτεις την ονομαστική συνθήκη SDH, ένα δόγμα πλαισίωσης δεδομένων γνωστό ως «synchronous transport module (STM)» τίθεται σε ενέργεια.

δ. Βασικά Αρχιτεκτονικής

Υπάρχει ένας αριθμός από θεμελιώδη τμήματα που παίζουν σημαντικό ρόλο στην αρχιτεκτονική του συστήματος SONET. Σαν απόδειξη στον πίνακα ,η αρχιτεκτονική SONET έχει πολλούς τύπους υλικών που μεταφέρουν την πληροφορία μέσω του δικτύου (Σχήμα 7).

Table 1. SONET Hierarchy

Signal	Bit Rate (Mbps)	Capacity
STS-1, OC-1	51.840	28 DS-1s or 1 DS-3
STS-3, OC-3	155.520	84 DS-1s or 3 DS-3s
STS-12, OC-12	622.080	336 DS-1s or 12 DS-3s
STS-48, OC-48	2,488.320	1,344 DS-1s or 48 DS-3s
STS-192, OC-192	9,953.280	5,376 DS-1s or 192 DS-3s
Note: STS = synchronous transport signal OC = optical carrier		

Σχήμα 7

Με αρκετές από τις αρχιτεκτονικές της ψηφιακής μεταφοράς δεδομένων τα SONET interfaces ουσιαστικά αποτελούνται από ένα σετ επιπέδων. Στο βασικό επίπεδο, το φυσικό, προσφέρει τον μηχανισμό για την διαβίβαση της πληροφορίας μέσω του οπτικού καναλιού. Ο πίνακας αναπαριστά αυτό μέσω των συνδέσεων OC-x connections μεταξύ των τμημάτων του SONET. Κινούμενοι προς τα πάνω, το επίπεδο τομέα the section layer προσφέρει την πλαισίωση και την μεταφορά των στοιχειωδών πληροφοριών ανάμεσα στα ανεξάρτητα στοιχεία. Οι υπηρεσίες στο επίπεδο είναι ανάλογες με το επίπεδο διασύνδεσης στη δικτύωση δεδομένων. Αρκετή από την ονοματολογία που χρησιμοποιείται στη μεταφορά δεδομένων SONET συνδέεται με την βασική αρχιτεκτονική που βλέπουμε στην εικόνα [Figure 1](#). Σαν αποτέλεσμα, είναι ευκολότερο να ακολουθήσουμε την συζήτηση για τους μηχανισμούς πλαισίωσης με κάποια κατανόηση για τον ρόλο κάθε συσκευής. Τα στοιχεία είναι τα παρακάτω:

- *Path terminating equipment (PTE)*. PTE γενικά αναφέρεται σαν ο πολυπλέκτης του τερματικού. Λειτουργεί τυπικά σαν πολυπλεκτικό σημείο για τη διασύνδεση του Μεταφορέα T «T-carrier» με το σύστημα SONET. Αυτές οι συσκευές είναι τα εξωτερικά σημεία πρόσβασης για

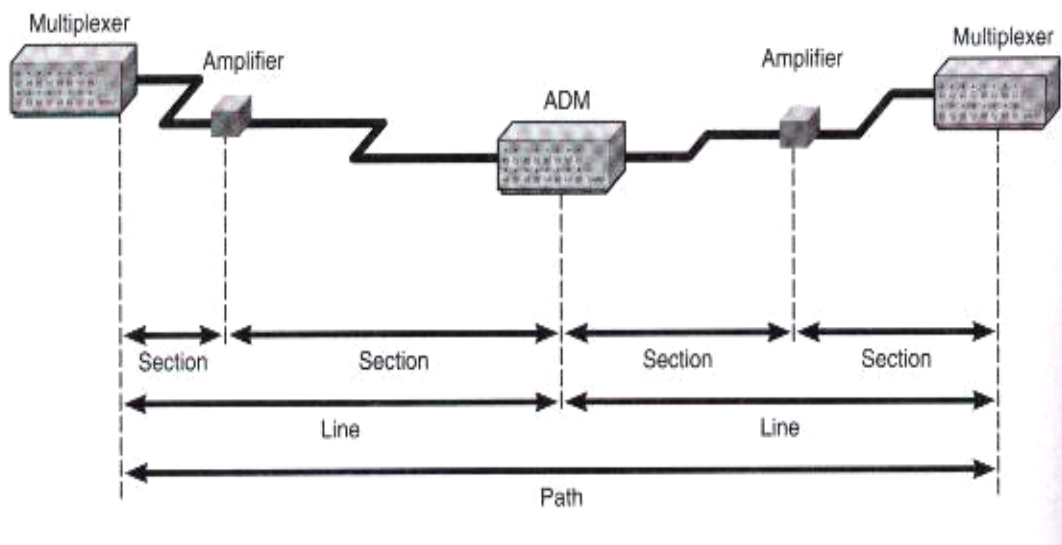
συστήματα χαμηλών ταχυτήτων και επικοινωνιακών συστημάτων. Τα τερματικά θα πρέπει να επικοινωνούν με ένα αριθμό επιπέδων του πρωτοκόλλου SONET με δρομολογήσεις σε απομακρυσμένα τερματικά, line interactions with add drop multiplexers, and section level interfaces with regenerators.

- *Regenerators.* Αυτές οι συσκευές ολοκληρώνουν το οπτικό τμήμα (τα σήματα μεταδίδονται απευθείας μέσω της ίνας) και παρέχουν διατήρηση του σήματος, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα του.
- *Add/drop multiplexers.* Αυτοί οι πολυπλέκτες ολοκληρώνουν την γραμμή και το επίπεδο section layers, και πολυπλέκουν/αποπλέκουν σήματα από την ιεραρχία SONET/SDH για μετάδοση προς και από την τερματική συσκευή.

Τα τελευταία χρόνια αρκετές παραλλαγές έχουν προστεθεί στο θέμα μεταφοράς δεδομένων μέσω SONET. Σχήματα προστασίας και ένα νέο φωτονικό επίπεδο βασισμένο στο «dense wavelength division multiplexing (DWDM)», έχουν παρουσιαστεί και έχουν αρχίσει να επηρεάζουν τους τύπους συνδέσεων και τις υπηρεσίες που παρέχονται στο δίκτυο.

ε. Υπηρεσίες που παρέχονται από κάθε επίπεδο

Κάθε επίπεδο στο πρότυπο SONET παρέχει το δικό του σετ από υπηρεσίες. Από την πλευρά του επιπέδου υπηρεσιών του SONET/SDH επίπεδα παρέχουν τα παρακάτω:



- *Path.* Το path χαρτογραφεί τα κανάλια προσφερόμενου φορτίου «payload channels» για παράδειγμα (DS1s and DS3s) μέσα στη φόρμα μεταφοράς του SONET. Παρέχει την διαβίβαση από τερματικό σε τερματικό για τη διαχείριση της πληροφορίας σε απομακρυσμένες συσκευές. Στην

ονοματολογία SONET η πληροφορία για τον φόρτο καταχωρείται στον Φάκελο Σύγχρονου Φορτίου «synchronous payload envelope» (SPE).

- *Line.* Αυτό το επίπεδο καταχωρεί την γραμμή line overhead πάνω στο Φάκελο Σύγχρονου Φορτίου «SPE» για την προώθησή του διαμέσου του δικτύου. Η γραμμή διαχειρίζεται αυτή την σχέση με μεμακρυσμένες γραμμικές τερματικές συσκευές. Επιπλέον υπηρεσίες στο γραμμικό επίπεδο συχνά συμπεριλαμβάνουν υπηρεσίες συντήρησης και προστασίας. Ένα επιπρόσθετο κανάλι επικοινωνιών δεδομένων «data communications channel (DCC)» παρέχεται για να υποστηρίξει τη διαχείριση του δικτύου.
- *Section.* Το επίπεδο τμήματος εκπέμπει το SPE σε συσκευές, που είναι σχεδόν αντίστοιχες με τις υπηρεσίες του επιπέδου διασυνδέσεως των δεδομένων. Κάποιες επιπλέον υπηρεσίες διαχείρισης, όπως η voice orderwire, παρέχονται για να βοηθούν στη συντήρηση και την διατήρηση των συσκευών και των υπηρεσιών του επιπέδου τμήματος. Στην περίπτωση του γραμμικού επιπέδου, το επίπεδο τμήματος παρέχει ένθετο κανάλι λειτουργιών DCC για απομακρυσμένη διαχείριση των συσκευών του τερματικού τμήματος.
- *Physical.* Αυτό το επίπεδο καταχωρεί το λογική ψηφιακή πληροφορία πάνω στο φυσικό μέσο για τη μετάδοσή του στην αντίστοιχη συσκευή. Πρόσφατα με την εισαγωγή του DWDM έχει επεκτείνει την χρήση του σε ένα φωτονικό επίπεδο που παρέχει την ικανότητα να πολυπλέκει αρκετά κανάλια SONET μέσα σε μόνο μία οπτική ίνα.

Με αυτά τα βασικά θέματα υπ' όψη ας ρίξουμε μία ματιά στις υπηρεσίες πλαισίωσης και πολυπλεκτικότητας «framing and multiplexing» που παρέχονται από το SONET.

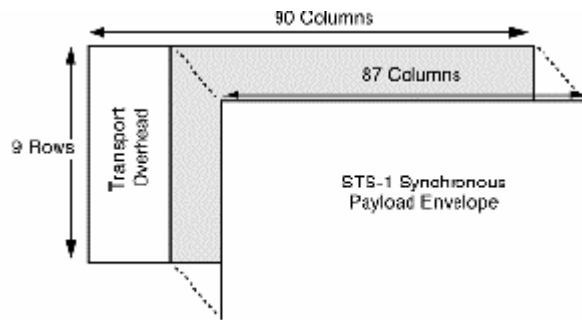
στ. Το πλαίσιο SONET

Όλες οι ψηφιακές επικοινωνίες του δικτύου SONET βασίζονται σε μια κοινή φόρμα «πλαισίωσης» (frame format), γνωστή ως Πλαίσιο Σήματος Σύγχρονης Μεταφοράς-1 (STS-1). Το πλαίσιο του SONET μεταδίδεται σχηματίζοντας ένα σήμα 51,840 Mbps. Μια και τα δεδομένα αυξάνονται (OC-192), κάθε κύκλος 8-kHz framing cycle περιέχει περισσότερα αντίγραφα από το πλαίσιο STS-1. Η λειτουργικότητα του SONET επιτυγχάνεται:

ορίζεται το βασικό STS-1 σήμα

Δημιουργείται μια πολλαπλάσια δομή η οποία προκύπτει από την πολυπλεξία σημάτων STS-1 με τη μέθοδο της παρεμβολής οκτάδων.

Το βασικό πλαίσιο περιγράφεται σαν ένας πίνακας με 9 γραμμές και 90 στήλες από byte με τα δεδομένα να μεταδίδονται γραμμή γραμμή. Από αυτά τα 810 bytes, οι πρώτες 4 στήλες χρησιμοποιούνται για να μεταδώσουν την «επικεφαλής πληροφορία» Αυτά τα δεδομένα παρέχουν την πληροφορία ελέγχου για όλες τις σχέσεις μεταξύ των στοιχείων που λειτουργούν στα διάφορα επίπεδα του δικτύου (Σχήμα 8).

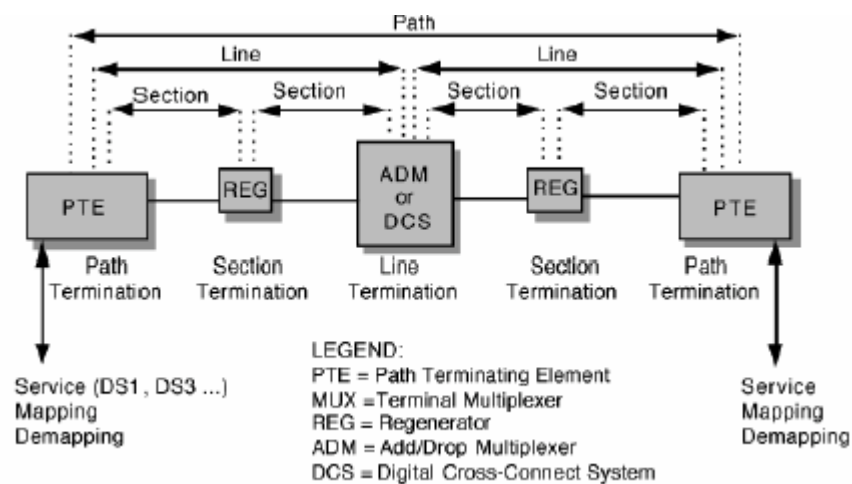


Σχήμα 8

Σχετικά με τα παραπάνω υπάρχει γνωστικό αντικείμενο το οποίο όμως δεν είναι του παρόντος.

ζ. Overheads

Το SONET παρέχει σημαντικές πληροφορίες overhead επιτρέποντας ευκολότερη πολυπλεξία και επέκταση των λειτουργιών διαχείρισης, συντήρησης κλπ. Υπάρχουν πολλά επίπεδα τα οποία φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 9).



Σχήμα 9

Επιπλέον υπάρχουν και συστήματα που βοηθούν στην ορθή λειτουργία του SONET αυτά είναι τα παρακάτω:

- (1) Section Overhead
- (2) Line Overhead
- (3) STS POH
- (4) VT POH

η. SONET Alarm Structure

Η δομή των συναγεργμών λόγω λάθους, που μπορούμε να συναντήσουμε στο SONET είναι οι παρακάτω:

- (1) Ανωμαλία
- (2) Αυτομόληση
- (3) Σφάλμα

θ. Πλεονεκτήματα SONET

Το δίκτυο SONET παρέχει πιο ισχυρές δυνατότητες δικτύωσης εν σχέση με τα υπάρχοντα «ασύγχρονα» συστήματα.

Σαν αποτέλεσμα της εκπομπής του SONET τα ρολόγια του δικτύου χρησιμοποιούν ένα αρκετά υψηλό σημείο αναφοράς. Επομένως η ανάγκη ευθυγράμμισης των καναλιών των δεδομένων και του συγχρονισμού των ρολογιών δεν είναι απαραίτητη. Σαν συνέπεια ένα σήμα χαμηλού ρυθμού όπως είναι το DS-1 είναι προσβάσιμο και η απόπλεξή του δεν απαιτεί να έχει πρόσβαση στο bit stream. Επιπλέον τα σήματα μπορούν να συλλεχθούν όλα μαζί χωρίς να υπάρχει συνωστισμός.

Για αυτές τις περιπτώσεις στις οποίες οι συχνότητες αναφοράς μπορεί να διαφέρουν, SONET χρησιμοποιεί «δείκτες» “pointers” για να επιτρέπει στα κανάλια να κινούνται μέσα στο λεγόμενο «φάκελο φόρτου» “payload envelope”. Τα συγχρονισμένα ρολόγια είναι το βασικό στοιχείο για την λειτουργία των «δεικτών». Επιτρέπουν μία πολύ ευέλικτη κατανομή και ευθυγράμμιση των φόρτων μέσα στον «φάκελο μετάδοσης».

- (1) Μειωμένη Back to Back Multiplexing

Ανεξάρτητοι «πολυπλέκτες» (DS-1 έως DS-3) και τερματικά συστήματα μετάδοσης με οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για την «πολυπλεξία» ενός σήματος DS-1 σε DS-2 και

DS-2 σε DS-3, και μετά σε ρυθμό οπτικής γραμμής. Το επόμενο επίπεδο θα είναι ένα ολοκληρωμένο μηχανικό «οπτικο/πολυπλεξικό» τερματικό. Στα υπάρχοντα «ασύγχρονα» συστήματα, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα έτσι ώστε να αποφευχθεί η «πολυπλεξία και η αποπολυπλεξία» αρκετές φορές μια και τα ηλεκτρονικά είναι αναγκαία κάθε φορά που ένα σήμα DS-1 επεξεργάζεται. Με το SONET όμως και λόγω του «συγχρονισμού» δεν χρειάζεται να αποπλεχθεί ολόκληρο το σήμα αλλά μόνο τα VT ή STS.

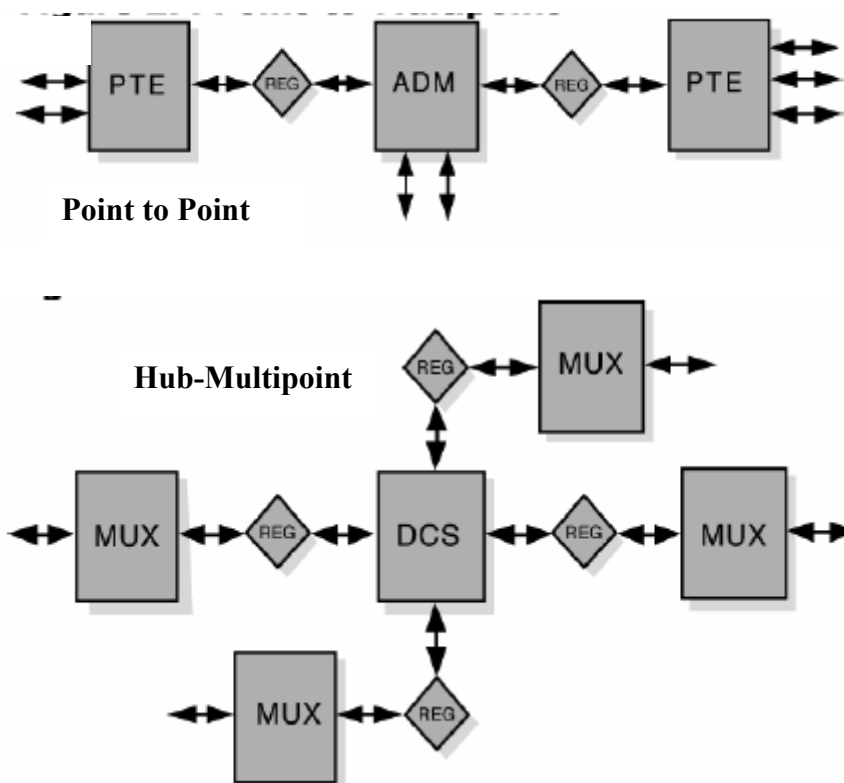
(2) Οπτική Διασύνδεση

Εξαιτίας των διαφορετικών «φορμών» ανάμεσα στους πωλητές «ασύγχρονων» προϊόντων δεν είναι δυνατή η σύνδεση ενός «οπτικού τερματικού» με ένα άλλο.

Η μεγάλη αξία του SONET είναι ότι επιτρέπει συμβατότητα ανεξάρτητα του πωλητή. Επομένως το SONET επιτρέπει τη διασύνδεση μεταξύ των παροχών δικτύων ανεξάρτητα με το ποιος κατασκευάζει το υλικό. Έτσι οι χρήστες μπορούν να κατέχουν OC-N υλικό της επιλογής τους και να συνδέονται με έναν άλλο παροχέα δικτύου στο ίδιο επίπεδο.

(3) Multipoints Configuration

Η διαφορά μεταξύ των συστημάτων “point to point” και “multipoints”, φαίνεται στα παρακάτω σχεδιαγράμματα:



Τα περισσότερα «ασύγχρονα» συστήματα είναι ικανά να λειτουργήσουν μόνο σε “point to point” καταστάσεις, ενώ το SONET υποστηρίζει διατάξεις “multipoint” ή “hub”.

Οι παροχείς δικτύων δεν έχουν πλέον ανάγκη να διατηρούν υλικά που βρίσκονται στον πελάτη. Μία ανάπτυξη δικτύου «πολλών σημείων» επιτρέπει διασυνδέσεις OC-N, επιτρέποντας τους παροχείς δικτύων και τους πελάτες να βελτιστοποιούν την κοινή χρήση της υποδομής του SONET.

(4) Σύγκλιση μεταξύ ATM, VIDEO και SONET

Είναι μία τάση που υπάρχει στην «σύγκλιση» των παραπάνω και το SONET με την ανεξάρτητη αρχιτεκτονική του παρέχει τεράστιες ικανότητες στο θέμα της ευελιξίας.

(5) Grooming

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στην δυνατότητα του SONET να συγχωνεύει ή να χωρίζει σε τμήματα την κυκλοφορία, για να κάνει ποιο καλή χρήση των ευκολιών του συστήματος.

(6) Μείωση των καλωδίων και εξαφάνιση των DSX Panels

Τα «ασύγχρονα» συστήματα είναι κατακλισμένα απο τερματικά “back to back” και αυτο συνεπάγεται πολλά καλώδια και “racks” στα οποία είναι συνωστισμένα πάρα πολλά καλώδια. Το SONET από την πλευρά του επιτρέπει την διάταξη των “Hub” και έτσι μειώνεται στο ελάχιστο η χρήση τερματικών “back to back”.

ι. Ενισχυμένη OAM&P

Η αρχιτεκτονική SONET επιτρέπει σε μία σύνδεση να έρθει σε επαφή με όλα τα στοιχεία-τμήματα που βρίσκονται στην αρχιτεκτονική του δικτύου. Επιπλέον η «απομακρυσμένη τροφοδότηση» επιτρέπει κεντρική συντήρηση του δικτύου και έτσι μειώνεται η άσκοπη μετακίνηση προσωπικού για την συντήρηση και φυσικά το κόστος.

ια. Βελτιωμένη Εκτέλεση Ελέγχου

Η «πληροφορία επιτήρησης» που παρέχει το SONET επιτρέπει την γρηγορότερη ανίχνευση και αντιμετώπιση των προβλημάτων, πριν αυτά προκαλέσουν προβλήματα σε υψηλότερα επίπεδα.

ιβ. Τεστ γνώσεων

Στη συνέχεια για την κατανόηση των προαναφερομένων, υποβάλλεται ένα μικρό τεστ γνώσεων με το οποίο μπορεί κάποιος να αξιολογήσει τις γνώσεις του.

1. Δύο ψηφιακά σήματα στα οποία η μεταβολή τους πραγματοποιείται με σχεδόν τον ίδιο ρυθμό χαρακτηρίζονται ως:
 - α. Ασύγχρονα
 - β. Σύγχρονα
 - γ. «Πλεισιόχρονα»
2. Τα συστήματα SONET είναι τεχνολογίες που βασίζονται σε
 - α. Twisted-pair, copper-based
 - β. Οπτικές ίνες
 - γ. Ασύρματες
3. Το βασικό σήμα (STS-1) λειτουργεί με ρυθμό bit των
 - α. 64 kbps
 - β. 1.544 Mbps
 - γ. 51840 Mbps
 - δ. 155.520 Mbps
4. Το N στην έκφραση STS-N δείχνει
 - α. Την «γενιά» της αρχιτεκτονικής STS
 - β. Τον ακέραιο «πολλαπλασιαστή» του βασικού ρυθμού εκπομπής
5. Το λεγόμενο “Line Overhead” περιλαμβάνει _____ bytes πληροφορίας.
 - α. 18

β. 9

γ. 4

6. Το λεγόμενο “Jitter” _____ μία εναλλαγή μίας «κυματομορφής»

α. Είναι

β. Δεν είναι

7. Χαμηλής ταχύτητας «υποκάναλα» τα οποία δημιουργούν ένα πολυπλεγμένο σήμα SONET _____ ανεξάρτητα προσβάσιμα

α. Είναι

β. Δεν είναι

8. Το SONET _____ συμβατότητα διαφόρων προϊόντων.

α. Πετυχαίνει

β. Δεν πετυχαίνει

9. Ποία από τα παρακάτω δεν είναι βασικά στοιχεία ενός δικτύου SONET

α. Switch interface

β. Digital loop carrier

γ. Service control point

δ. add/drop multiplexer

10. _____ “stuffing” χρησιμοποιείται όταν ο ρυθμός των «πακέτων» του SPE είναι πολύ χαμηλός σε σχέση με τον ρυθμό του STS-1.

α. Θετικό

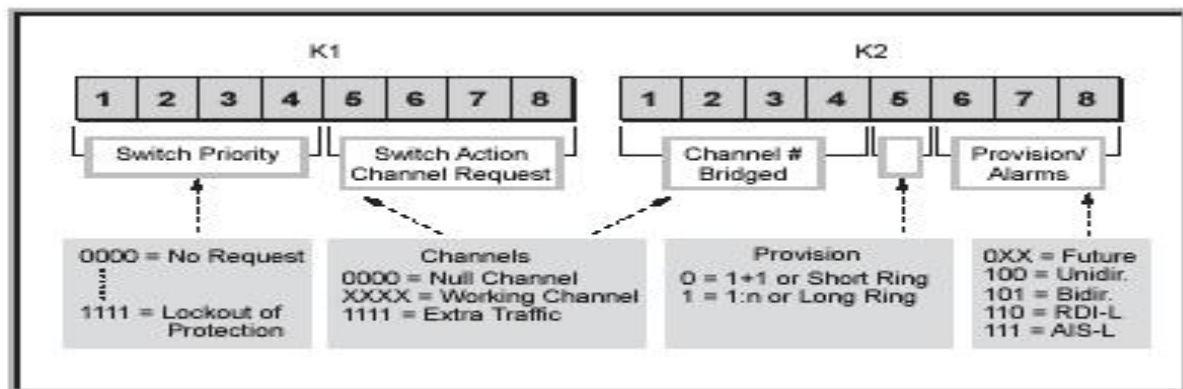
β. Αρνητικό.

4. AUTOMATIC PROTECTION SWITCHING⁶

Η αυτόματη εναλλαγή προστασίας είναι μια από τις πιο σημαντικές λειτουργίες στα δίκτυα SONET/SDH. Η ικανότητα του συστήματος μετάδοσης να εντοπίζει ένα σφάλμα σε μία εργασία και να την μετατρέπει σε εργασία αναμονής για να αποκαταστήσει την κυκλοφορία. Αυτή η ικανότητα έχει ένα θετικό αποτέλεσμα στην ολική διαθεσιμότητα του δικτύου, μια και επιτρέπει στο δίκτυο να λειτουργεί ακόμη και αν ένα στοιχείο ή σύνδεση έχει πρόβλημα..

Μόνο το τμήμα πολύπλεξης στο SDH είναι προστατευμένο με αυτό τον αυτόματο τρόπο. Ο μηχανισμός προστασίας του τμήματος πολύπλεξης συντονίζεται από τα K1 και K2 bytes στο επικεφαλής τμήμα πολυπλεξης. Αυτά τα bytes μεταφέρουν ένα πρωτόκολλο APS το οποίο χρησιμοποιείται για τον συντονισμό της προστασίας της κεφαλής και του τέλους. Η προστασία της διαδρομής διευθύνεται σε υψηλότερο επίπεδο με λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου.

MULTIPLEX SECTION PROTECTION, K1/K2 BYTES



Στο SDH, η εκπομπή στα οπτικά τμήματα προστατεύεται από τα near end (το σημείο στο οποίο το MS Overhead τερματίζει). Τα Bytes K1 και K2 στην κεφαλή ΜΣ του σήματος STM-1 μεταφέρουν ένα πρωτόκολλο προστασίας του τμήματος πολύπλεξης “Multiplex Section Protection (MPS) protocol” που χρησιμοποιείται για αν συντονίζει τους την εναλλαγή προστασίας μεταξύ του near end και του far end. Η εναλλαγή προστασίας τίθεται σε λειτουργία σαν αποτέλεσμα των παρακάτω περιπτώσεων:

- α. Αστοχία σήματος
- β. Μείωση σήματος
- γ. Σε απάντηση σε διαταγή από το τοπικό τερματικό ή τον μεμακρυσμένο διαχειριστή του δικτύου.

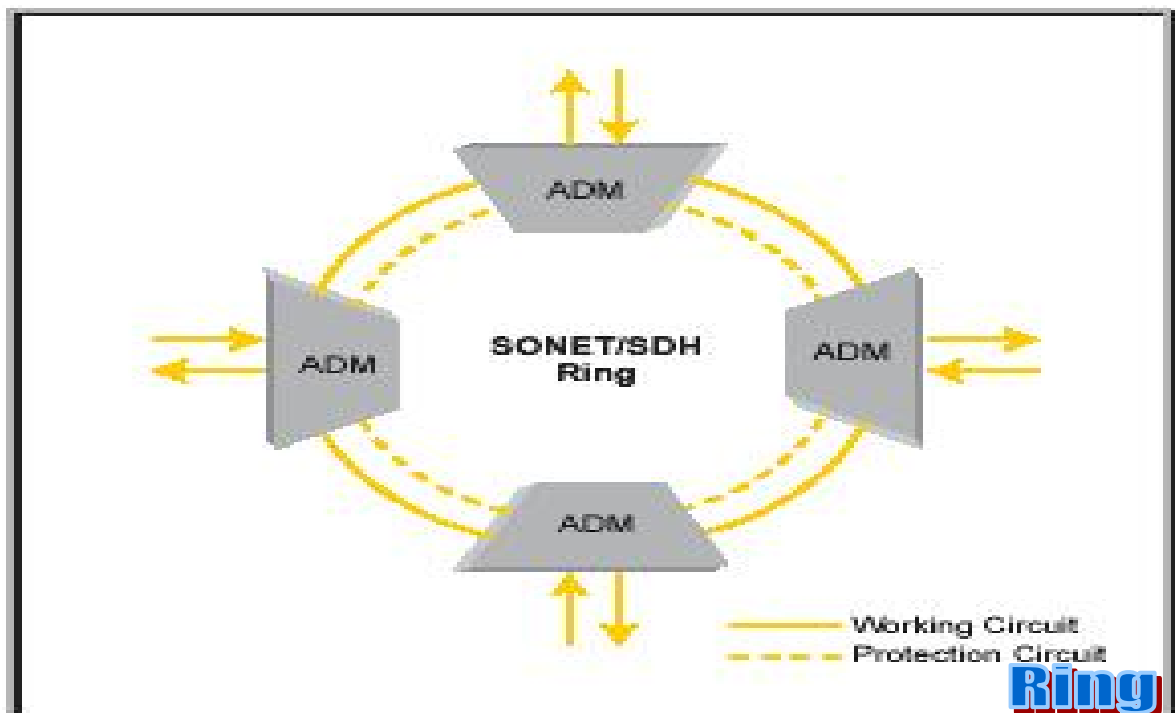
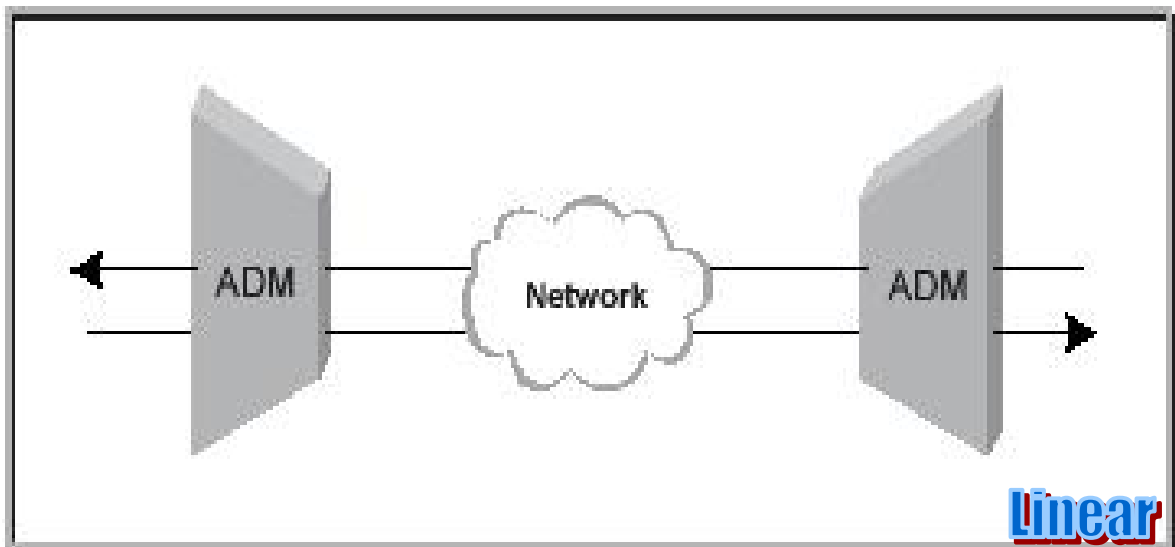
α. Αρχιτεκτονική προστασίας

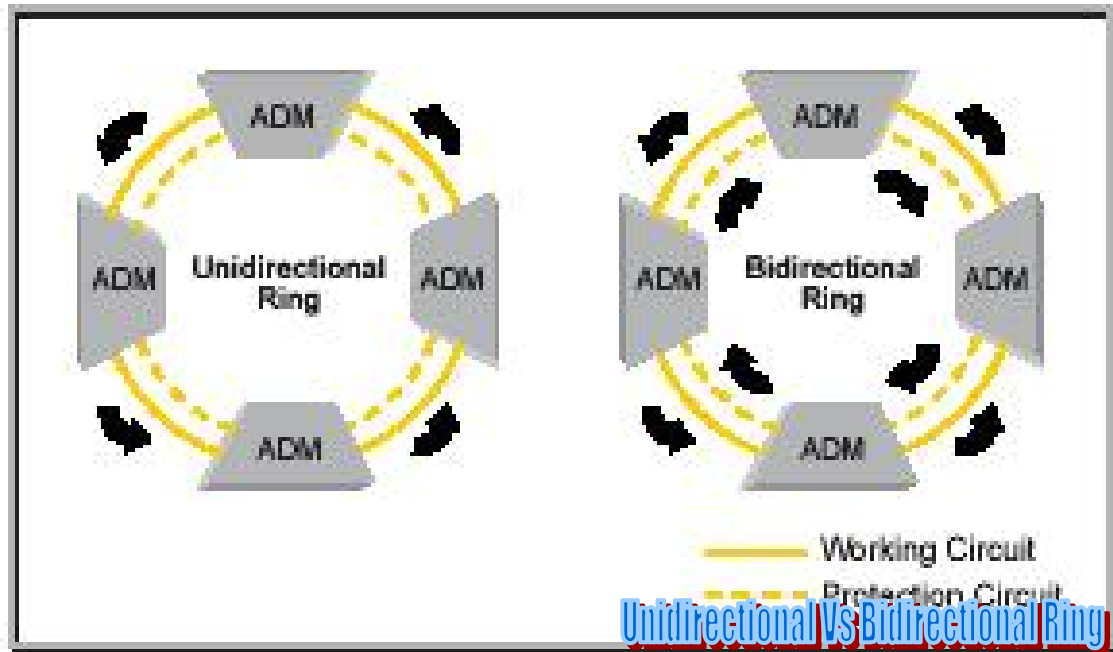
Υπάρχουν 2 τύποι προστασίας για τα δίκτυα με APS:

Η ευθύγραμμη (Linear) προστασία, που βασίζεται στο ANSI T1.105.1 και ITU-TG.783 για “point to point” συνδέσεις και η

Κυκλική (Ring) προστασία βασισμένη στο ANSI T1.105.1 και ITU-TG.841 για κυκλικές κατασκευές, (τέτοιες κυκλικές κατασκευές μπορούν να βρεθούν επίσης σε δύο τύπους, δακτυλίους μονής κατεύθυνσης και αμφίδρομης κατεύθυνσης).

Σχηματική διάταξη των δύο τύπων στα παρακάτω σχήματα:





β. Protection Switching Schemes

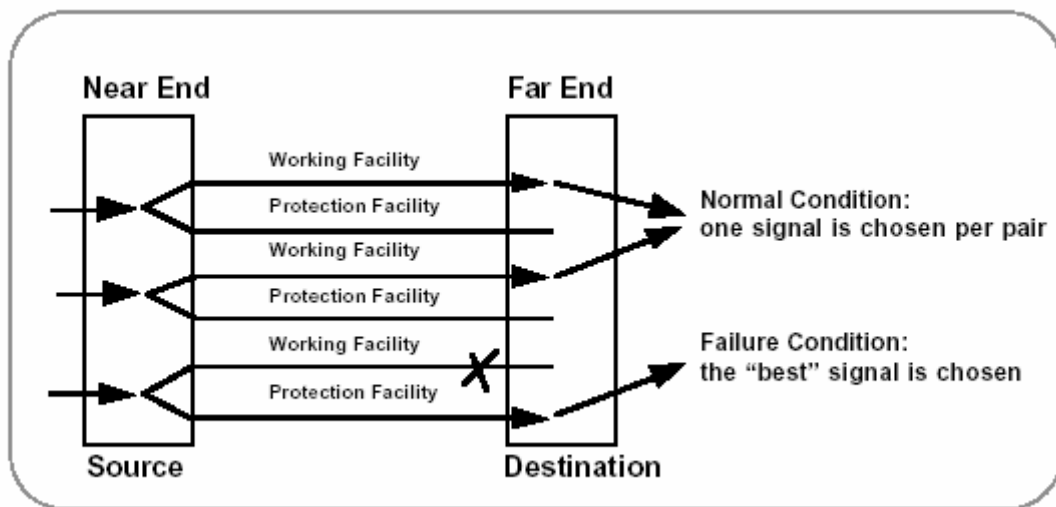
Δύο καταστάσεις του APS είναι διαθέσιμες: 1+1 εναλλαγή προστασίας και 1:N εναλλαγή προστασίας.

Το Byte K1 περιέχει ταυτόχρονα τον διακόπτη προ ενέργεια pre-emption priorities (σε 1 έως 4 bits) και το νούμερο του καναλιού από το κανάλι αίτησης ενεργείας (σε bit 5 έως 8).

Το Byte K2 περιλαμβάνει το νούμερο του καναλιού που γεφυρώνεται στα bits προστασίας (1-4) και το type mode (bit 5), επιπλέον τα bit 6 έως 8 περιέχουν διάφορες συνθήκες όπως η MS-AIS, MS-RDI, ενδείκτες της μονοδιεύθυνης και της πολυδιεύθυνης εναλλαγής.

(1) ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ 1+1

Στην εναλλαγή προστασίας 1+1, υπάρχει μία λειτουργία προστασίας (backup line) για κάθε εργασία. Στο near end του τμήματος, το οπτικό σήμα γεφυρώνεται μόνιμα (διαχωρίζεται σε 2 σήματα), και στέλνεται και στις λειτουργίες εργασίας και μέσα



προστασίας ταυτόχρονα, παράγοντας ένα σήμα εργασίας και ένα σήμα προστασίας που είναι ακριβώς τα ίδια.

Στο far end και τα δύο σήματα, επιτηρούνται ανεξάρτητα για δυσλειτουργίες. Η συσκευή λήψης επιλέγει είτε το σήμα προστασίας ή το σήμα εργασίας. Αυτή η επιλογή βασίζεται στα κριτήρια της έναυσης της εναλλαγής, που μπορεί να είναι μία αστοχία σήματος (Αστοχία μεγάλου βαθμού όπως η απώλεια του πλαισίου (LOF) μέσα στο οπτικό σήμα, ή η «πτώση» ενός σήματος, (αστοχία μικρότερου μεγέθους που προκλήθηκε από ένα λάθος ρυθμού (error rate) υπερβαίνοντας μία προκαθορισμένη αξία τιμής.

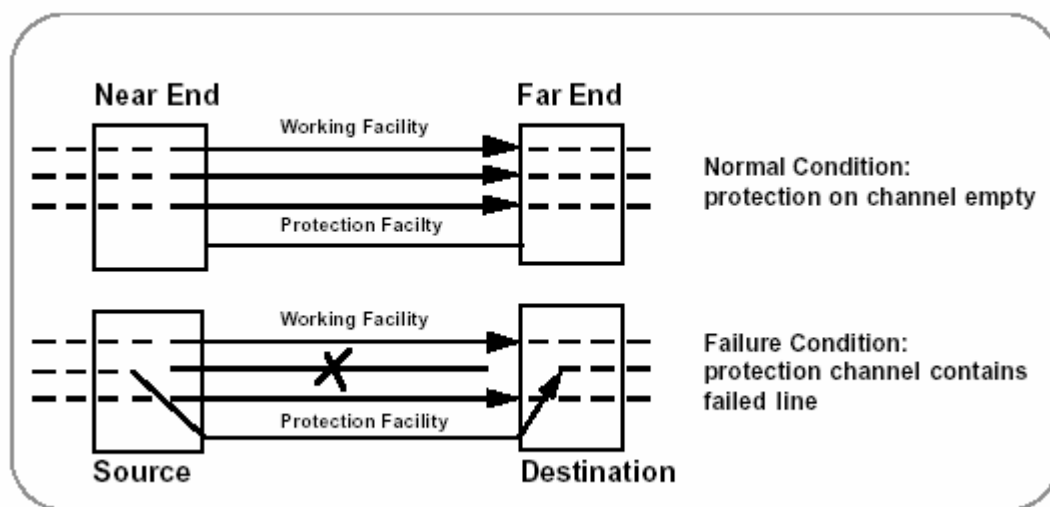
Φυσιολογικά η προστασία εναλλαγής 1+1 είναι μόνο διευθυντική, αν και αν η συσκευή που τερματίζει η γραμμή υποστηρίζει και δυο διευθυντική εναλλαγή, τότε η μόνο-διευθυντική αξία μπορεί να παραγραφεί.

Η εναλλαγή μπορεί να είναι είτε επαναστρέψιμη (η ροή επανέρχεται στα εργασιακά μέσα μόλις το σφάλμα έχει διορθωθεί) ή μη (τα μέσα προστασίας χειρίζονται σαν εργασιακά)

Στην αρχιτεκτονική προστασίας 1+1, όλες οι επικοινωνίες από το near end στο far end εκτελούνται μέσω του καναλιού APS, χρησιμοποιώντας τα K1 και K2 bytes. Στο 1+1 η δυο-διευθυντική εναλλαγή, η εκπομπή του K-byte καταδεικνύει στο near end ότι το μέσο έχει εναλλαχθεί έτσι ώστε να μπορεί να αρχίσει να λαμβάνει στα νέα ενεργά μέσα.

(2) ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ 1:N

Στην εναλλαγή προστασίας 1:N, υπάρχει μέσο προστασίας για αρκετά εργασιακά μέσα (το εύρος είναι από 1 μέχρι 14). Στην αρχιτεκτονική προστασίας 1:N, όλες οι επικοινωνίες εκτελούνται μέσω του καναλιού APS με τη χρησιμοποίηση των K1 και K2



bytes. Όλες οι εναλλαγές είναι αναστρέψιμες, αυτό σημαίνει ότι η κυκλοφορία αναστρέφεται στα εργασιακά μέσα μόλις το σφάλμα έχει διορθωθεί.

Επιπλέον σε αυτήν την περίπτωση, τα οπτικά σήματα συνήθως στέλνονται μόνο στα εργασιακά μέσα, με το μέσο προστασίας να αφήνεται ελεύθερο μέχρι να αποτύχει το εργασιακό μέσο. Ας δούμε ένα τέτοιο παράδειγμα στην εικόνα 18. Ας υποθέσουμε ότι το far end εντοπίζει ένα σφάλμα στο εργασιακό μέσο. Το far end στέλνει ένα μήνυμα στα bits 5 έως 8 του K1 byte που ανήκουν στο near end μέσω του μέσου προστασίας αιτούμενο ενέργεια εναλλαγής. Το near end μπορεί να ενεργήσει άμεσα, ή αν υπάρχει παραπάνω από ένα

προβλήματα, αποφασίζει ποιο έχει την μέγιστη προτεραιότητα. Μετά την απόφαση να ενεργήσει για ένα σφάλμα στο εργασιακό μέσο 2 το near end εκτελεί τα ακόλουθα βήματα:

1. Γεφυρώνει το εργασιακό μέσο στο Near end με το προστασίας
2. Επιστρέφει ένα μήνυμα στο byte K2 καταδεικνύοντας το νούμερο του καναλιού κυκλοφορίας, στο κανάλι προστασίας στο far end.
3. Στέλνει μία αντίστροφη αίτηση στο far end μέσω του K1 byte για να ενεργοποιήσει τη δυο-διευθυντική εναλλαγή.

Με την λήψη αυτού του μηνύματος το far end εκτελεί τα παρακάτω βήματα:

1. Αλλάζει σε μέσο προστασίας για να λάβει
2. Γεφυρώνει τα εργασιακά μέσα 2 με τα μέσα προστασίας για να ξανάεκπέμψει

Τώρα η μετάδοση πραγματοποιείται δια μέσου ενός νέου εργασιακού μέσου.

(3) SWITCH ACTION COMMENTS

Στις μονής κατεύθυνσης αρχιτεκτονικές, το far end αποφασίζει για τις προτεραιότητες. Αντιθέτως στις αρχιτεκτονικές διπλής κατεύθυνσης το head end είναι αυτό που αποφασίζει. Σε περίπτωση που υπάρχει παραπάνω από ένα λάθη την ίδια χρονική στιγμή, μία ιεραρχική προτεραιότητα καθορίζει ποιο εργασιακό μέσο θα τεθεί σε λειτουργία από το εργασιακό μέσο. Οι προτεραιότητες που δεικνύονται στα bit 1-4 του K1 είναι όπως παρακάτω:

1. Lockout
2. Forced switch (στο κανάλι προστασίας ανεξάρτητα του σταδίου που βρίσκεται), αναφέρεται μόνο σε 1:n switching
3. Signal Fails (υψηλή και μετά χαμηλή προτεραιότητα για span ή ring)
4. Signal degrades (υψηλή και μετά χαμηλή προτεραιότητα για span ή ring), αναφέρεται μόνο σε 1:n switching.
5. Manual Switch(σε ένα μή κατειλημμένο και χωρίς λάθη κανάλι προστασίας για span ή ring), αναφέρεται μόνο σε 1+1 LTE .
6. Wait-to-store
7. Exerciser for span or ring (Ίσως να μην λειτουργήσει σε κάποια linear APS systems)
8. Reverse Request (μόνο για διπλής κατεύθυνσης “bidirectional”)
9. Do not revert
10. No request

Ανάλογα με την αρχιτεκτονική προστασία K1 και K2 bytes μπορεί να κωδικοποιηθεί όπως παρακάτω.

Linear Protection (ITU-T G.783)

Bits 1234	Condition (state or external request)	Order
1111	Lockout of protection	Highest Lowest
1110	Forced switch	
1101	Signal fail high priority	
1100	Signal fail low priority	
1011	Signal degrade high priority	
1010	Signal degrade low priority	
1001	Unused	
1000	Manual switch	
0111	Unused	
0110	Wait to restore	
0101	Unused	
0100	Exercise	
0011	Unused	
0010	Reverse request	
0001	Do not revert	
0000	No request	

Table 1 K1 Byte, Bits 1-4 Types of Request

Bits 5678	Channel number	Requesting switch action
0000	0	<i>Null channel</i> (no working channel or extra traffic channel). Conditions and associated priority (fixed high) apply to the protection section.
0001 1110	1-14	<i>Working channel</i> Conditions and associated high priority (high or low) apply to the corresponding working sections. For 1+1, only working channel 1 is applicable, with fixed high priority.
1111	15	<i>Extra traffic channel</i> Conditions are not applicable. Exists only when provisioned in a 1:n architecture.

Table 2 K1 Byte, Bits 5-8, Channel No. for Action Switch Req.

Bits 1234	Channel number	Indication
0000	0	<i>Null channel</i>
0001 1110	1-14	<i>Working channel</i> For 1+1, only working channel 1 is applicable.
1111	15	<i>Extra traffic channel</i> Exists only when provisioned in a 1:n architecture.

Table 3 K2 Byte, Bits 1-4 Bridged Channel

Bit (5)	Architecture	Bits (678)	
0	1+1	111	MS-AIS
1	1:n	110	MS-RDI
		101	Reserved for future use
		 000	

Table 4 K2 Byte, Bits 5-8

Bits 1234	Bridge Request code (1-4)	Destination Node Identification (5-8)
1111	Lockout of Protection (Span) or Signal Fail (Protection) LP-S	<i>The destination node ID is set to the value of the ID of the node for which that K1 byte is destined. The destination node ID is always that of an adjacent node (except for default APS bytes).</i>
1110	Forced Switch (Span) FS-S	
1101	Forced Switch (Ring) FS-R	
1100	Signal Fail (Span) SF-S	
1011	Signal Fail (Ring) SF-R	
1010	Signal Degrade (Protection) SD-P	
1001	Signal Degrade (Span) SD-S	
1000	Signal Degrade (Ring) SD-R	
0111	Manual Switch (Span) MS-S	
0110	Manual Switch (Ring) MS-R	
0101	Wait-To-Restore WTR	
0100	Exerciser (Span) EXER-S	
0011	Exerciser (Ring) EXER-R	
0010	*Reverse Request (Span) RR-S	
0001	*Reverse Request (Ring) RR-R	
0000	No Request NR	

*Note: Reverse Request assumes the priority of the bridge request to which it is responding.

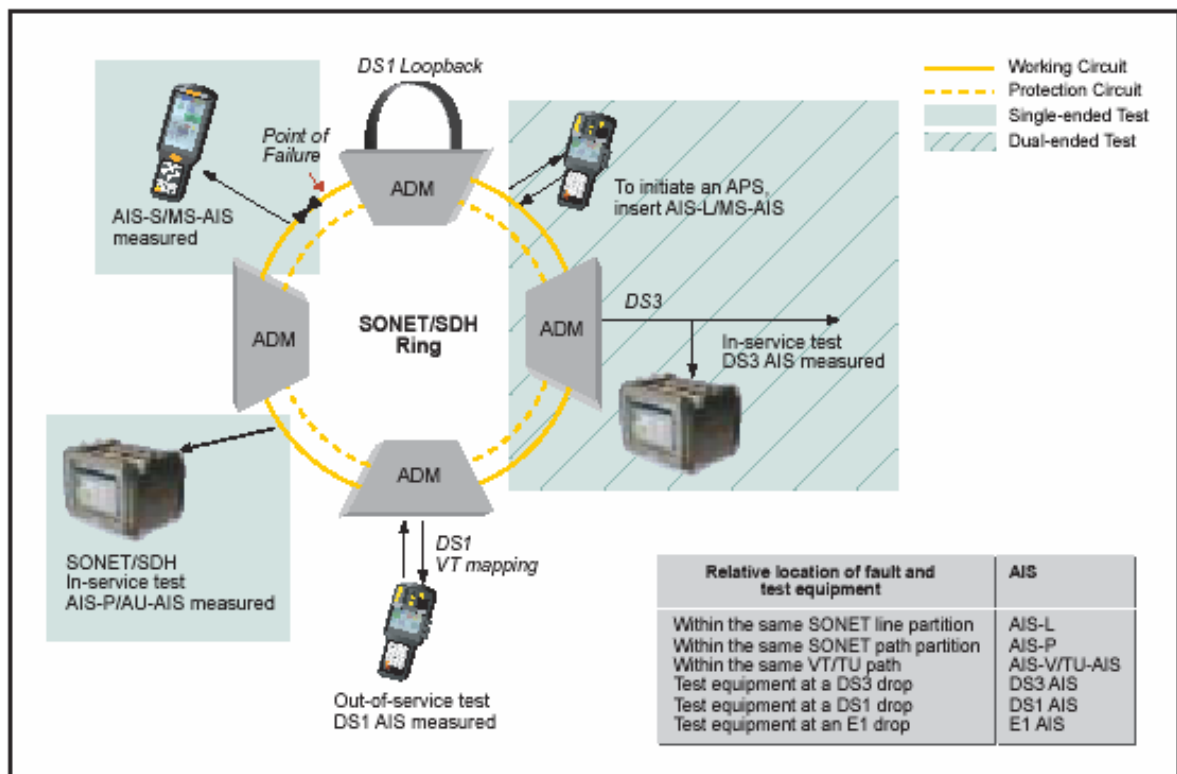
Table 5 K1 Byte, Bits 1-4 Types of Req.; Bits 5-8 Destination Node

Source Node ID (Bits 1-4)	Bit (5)	Long/Short	Bits (678)	Long/Short
Source node ID is set to the node's own ID.	0	Short path code (S)	111	MS-AIS
	1	Long path code (L)	110	MS-RDI
			101	Reserved for future use
			100	Reserved for future use
			011	Extra traffic on protect. channels
			010	Bridged and Switched
			001	Bridged
			000	Idle

Table 6 K2 Byte, Bits 5-8 Destination Node

(4) ΜΕΤΡΩΝΤΑΣ ΤΟ APS

Ο έλεγχος του APS μπορεί να είναι ‘single ended’ ή ‘dual ended’



Τα single ended τεστ είναι καλύτερα για επίβλεψη “in service” ή για γεγονότα τα οποία ενεργοποιούνται από στοιχεία του δικτύου.

Σε αντίθεση τα “dual ended” τεστ ένα σετ από τεστ εκκινεί τον συναγερμό ή τα λάθη ισότητας ενώ ένα άλλο σετ μετράει τον απαιτούμενο χρόνο για τη διόρθωση των λαθών.

Όλη αυτή η διαδικασία είναι σημαντική για να διασφαλίσει ότι οι μηχανισμοί ασφαλείας του SONET/SDH που είναι εγκατεστημένοι στο δίκτυο λειτουργούν ομαλά. Όταν εμφανίζεται

ένα λάθος, το γεγονός ότι ελαχιστοποιείται η απώλεια κυκλοφορίας στο δίκτυο, συνεπάγεται ικανοποιημένους χρήστες.

5. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ⁷

Ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρονται τα δεδομένα έχει αλλάξει ριζικά στα οπτικά δίκτυα. Με την απαλοιφή του ενδιάμεσου επιπέδου του ATM και SONET/SDH εξασφαλίζεται μεγαλύτερη απόδοση κατά την μεταφορά και μπορούν να δημιουργηθούν πιο απλές και πιο οργανωμένες αρχιτεκτονικές.

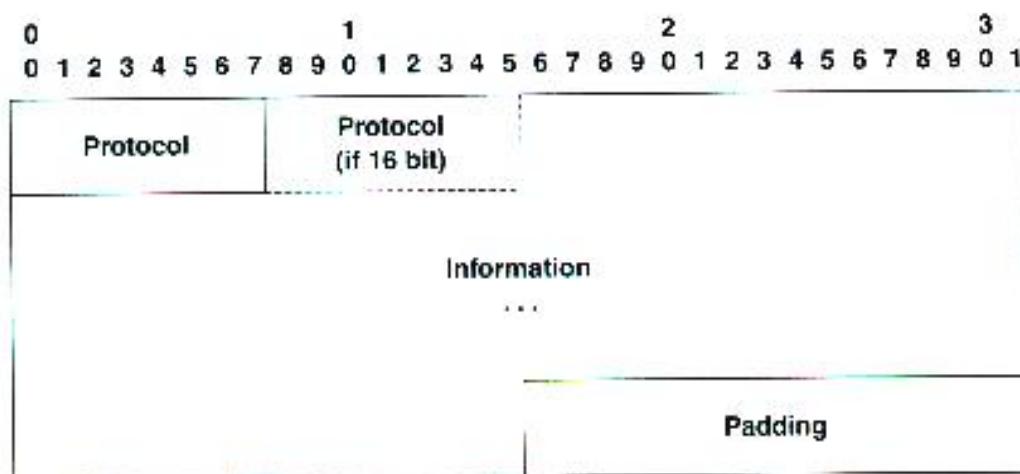
Μερικές από τις τεχνολογίες που υπάρχουν για τη μεταφορά δεδομένων IP σε ένα οπτικό δίκτυο είναι η Packet over SONET/SDH (POS), η Dynamic Packet Transport (DTP) και το Ethernet.

Η πρώτη απαιτεί τον εξοπλισμό ενός SONET/SDH δικτύου και χρησιμοποιεί τεχνικές για συνδέσμους τύπου p-t-p. Αντίθετα η DTP ορίζει μεθόδους για τοπολογίες τύπου ring με επιπρόσθετους μηχανισμούς ασφάλειας.

α. Packet over SONET/SDH (POS)

Η τεχνολογία POS επιτρέπει το επίπεδο IP να τοποθετηθεί ακριβώς πάνω από το επίπεδο SONET/SDH, και όσο προσφέρει εγγύηση της ποιότητας υπηρεσίας μειώνει το overhead που χρειάζεται για να τρέξει το IP πάνω από το ATM πάνω από το SONET/SDH.

Επειδή το IP είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου χωρίς σύνδεση (ενώ το SONET/SDH είναι πρωτόκολλο φυσικού επιπέδου) το κενό μεταξύ των επιπέδων 1 και 3 πρέπει να γεμίσει. Αυτό επιτυγχάνεται με το Point-to-Point Protocol (PPP), το οποίο χρησιμοποιείται για την συμπύκνωση IP πακέτων σε μια ροή δεδομένων η οποία μπαίνει στα πλαίσια του SONET ή του SDH (ακόλουθο Σχήμα).



Maximum Transmission Unit (MTU) = Information + Padding = 1500 bytes

Το PPP αποτελείται από δύο μέρη: Το Link Control Protocol (LCP) το οποίο εγκαθιστά και ελέγχει τη σύνδεση των δεδομένων και το Network Control Protocol (NCP), το οποίο αποτελεί τη διεπαφή για την αλληλεπίδραση με το πρωτόκολλο του τρίτου επιπέδου.

Υλοποιήσεις του Packet over SONET/SDH βασίζονται στα ακόλουθα έγγραφα:

- ▶ RFC 2615, “PPP over SONET/SDH”
- ▶ RFC 1661, “The Point-to-Point Protocol (PPP)”
- ▶ RFC 1662, “PPP in HDLC-like framing”

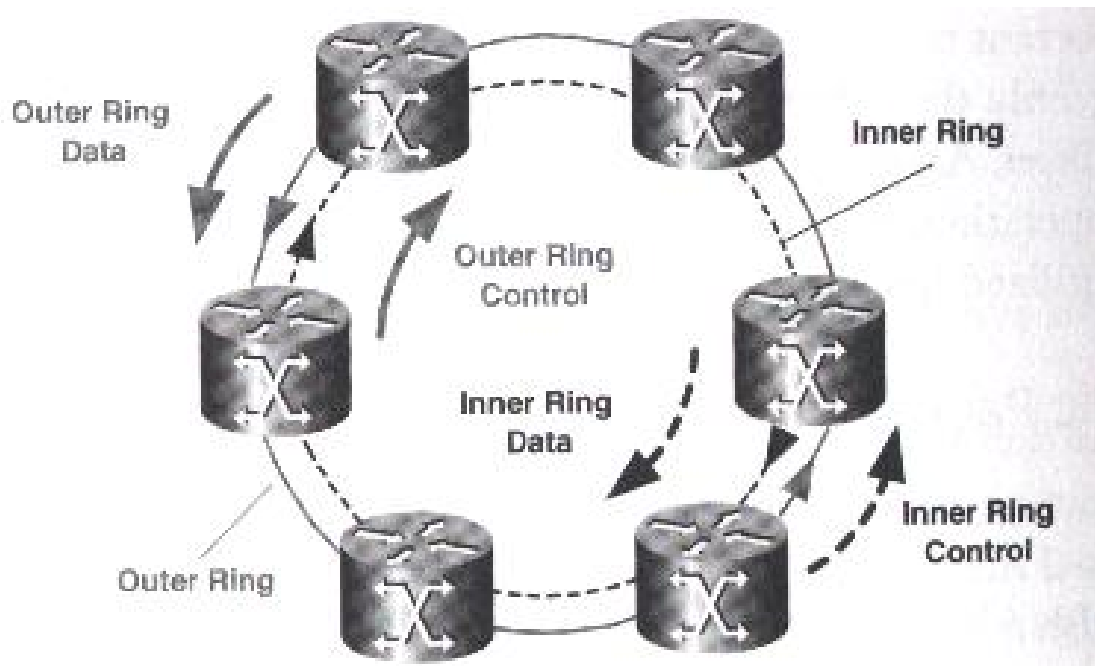
β. Dynamic Packet Transport (DPT)

Το DPT είναι μία τεχνολογία που αναπτύχθηκε από τη Cisco Systems η οποία εισάγει ένα νέο πρωτόκολλο δευτέρου επιπέδου που ονομάζεται Spatial Reuse Protocol (SRP). Το SRP επιτρέπει την ανάπτυξη οπτικών IP δικτύων δακτυλίου με δυνατότητα κλιμάκωσης και αναβάθμισης στο χρόνο.

Σε αντίθεση με το POS, που είναι τεχνολογία p-t-p, το DPT καθιστά εφικτή τη δημιουργία δικτύων τύπου δακτυλίου, μέσα στα οποία η μεταφορά δεδομένων δεν επηρεάζει και δεν επιβαρύνει ενδιάμεσους κόμβους. Το SRP είναι ένα δευτέρου επιπέδου MAC (Media Access Control)-πρωτόκολλο για τοπικά (LANs), μητροπολιτικά (MANs) και ευρείας περιοχής (WANs) δίκτυα.

Οι διεπαφές του DPT μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για να συνδέσουν έναν δρομολογητή απευθείας με τον εξοπλισμό των SONET/SDH, με συστήματα DWDM, ή με οπτική ίνα επειδή το SRP παρέχει μία στάνταρ διεπαφή για SONET/SDH στην πρώτη του υλοποίηση. Έτσι, αυτή η πρώτη υλοποίηση δίνει τη δυνατότητα για μεγάλη ελαστικότητα και προσαρμοστικότητα γιατί τα δίκτυα DPT μπορούν να αναπτυχθούν πάνω σε μία από τις τρεις παραπάνω επιλογές φυσικού επιπέδου. Επιπλέον, είναι δυνατή η ανάμειξη των τριών αυτών „υβριδικών δακτυλίων DPT“. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι το SRP είναι τελείως ανεξάρτητο από το προηγούμενο φυσικό επίπεδο που βρίσκεται από κάτω του και μπορεί να εφαρμοστεί πάνω σε κάθε διαφορετική τεχνολογία του πρώτου επιπέδου.

Όπως διακρίνεται και στο ακόλουθο σχήμα οι δακτύλιοι DPT είναι dual, counter-rotating fiber rings. Και οι δύο οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και τον έλεγχο των πακέτων.

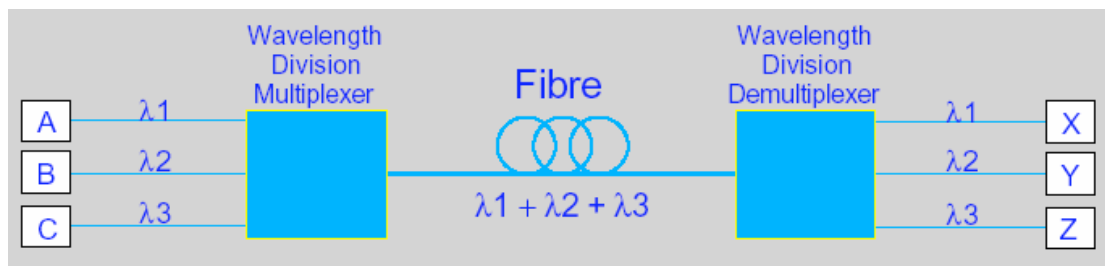


6. WDM / DWDM⁸

Όσο αυξάνεται η ανάγκη για μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, απαιτείται και μεγαλύτερο εύρος ζώνης στα υπάρχοντα συστήματα επικοινωνιών έτσι ώστε ένα δίκτυο και τα μέσα μετάδοσης να είναι σε θέση να διαχειρίζονται την αυξανόμενη κίνηση. Ωστόσο, όταν αυξάνεται το εύρος ζώνης πρέπει να εξασφαλιστεί ότι και το μέσο μετάδοσης μπορεί να αντεπεξέλθει σε αυτή την αλλαγή, δηλαδή ότι έχει τη δυνατότητα να αυξήσει το δικό του εύρος ζώνης. Για να γίνει αυτό, και συγκεκριμένα στα οπτικά δίκτυα, θα πρέπει είτε να εγκατασταθούν περισσότερες οπτικές ίνες, είτε να αυξηθεί το εύρος ζώνης των υπαρχόντων ινών.

α. WDM

Στον δεύτερο τρόπο από αυτούς που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή σχετικά με την αύξηση του εύρους ζώνης ανήκει η τεχνολογία Wavelength Division Multiplexing – WDM (Πολυπλεξία με Διάρθρωση Μήκους Κύματος) στην οποία γίνεται πολυπλεξία φωτεινών ακτινών με διαφορετικά μήκη κύματος μέσα από μία οπτική ίνα με αποτέλεσμα πολλαπλάσιο εύρος ζώνης και πολλαπλές ιδεατές οπτικές ίνες.



Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα πολλαπλά κανάλια επικοινωνίας μεταφέρονται μέσω της ίδιας ίνας το καθένα με διαφορετικό μήκος κύματος.

Στις πρώτες WDM εφαρμογές που εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '80 χρησιμοποιήθηκαν multimode οπτικές ίνες και συχνά δύο μήκη κύματος με εύρος 1,310nm και 1,550nm εξασφαλίζοντας έτσι 5Gbps ανά ίνα. Τα σημερινά WDM συστήματα χρησιμοποιούν 16, 32, 128 ή και περισσότερα μήκη κύματος, τα οποία ονομάζονται δίκτυα DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) επειδή γίνεται πιο πυκνή πολυπλεξία στο πεδίο του μήκους κύματος. Τα συστήματα αυτά μπορούν να μεταδώσουν κάθε είδους σήμα όπως SDH (Synchronous Digital Hierarchy), ATM (Asynchronous Transfer Mode) ή IP κυκλοφορία.

8. DWDM Fundamentals, Components, and Applications, Jean-Pierre Laude

Introduction to DWDM Technology / Data in a Rainbow, Stamatios V. Kartalopoulos

β. DWDM

Όπως προαναφέρθηκε τα DWDM αποτελούν μία επέκταση της WDM τεχνολογίας με περισσότερα κανάλια και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε εύρος ζώνης. Τα μήκη κύματος φωτός βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται ταχύτητες από 2,5 έως 10Gbps ανά σήμα.

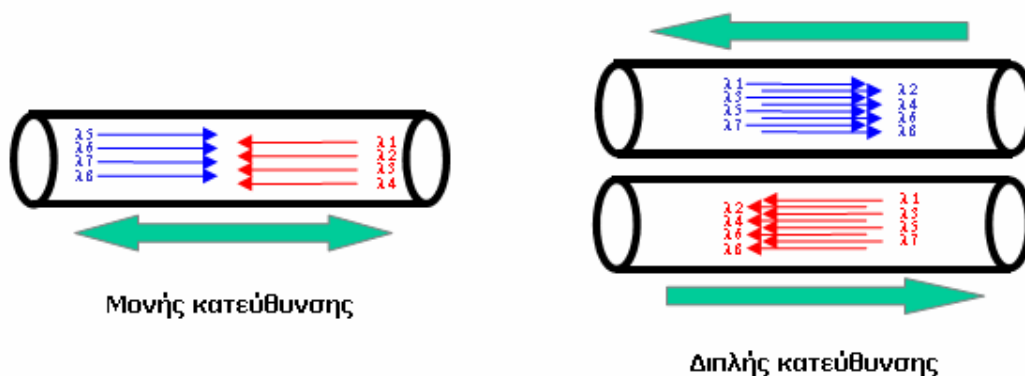
Τα DWDM συστήματα έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- ▶ Παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα της ίνας
- ▶ Είναι ευκολότερη η επέκταση ενός δικτύου
- ▶ Δεν απαιτείται η εγκατάσταση νέων οπτικών ινών
- ▶ Είναι απλή η διαδικασία πρόσθεσης ενός νέου μήκους κύματος
- ▶ Μικρό κόστος για τη δημιουργία νέων καναλιών

καθώς και μερικά μειονεκτήματα:

- ▶ Τα δίκτυα SONET/SDH δεν είναι κατάλληλα εξοπλισμένα για τις τοπολογίες του DWDM
- ▶ Οι μηχανισμοί προστασίας και ο έλεγχος και η παρακολούθηση της απόδοσής τους είναι ακόμη σε αρχικό στάδιο
- ▶ Δεν συμφέρει το κόστος για μικρό αριθμό καναλιών

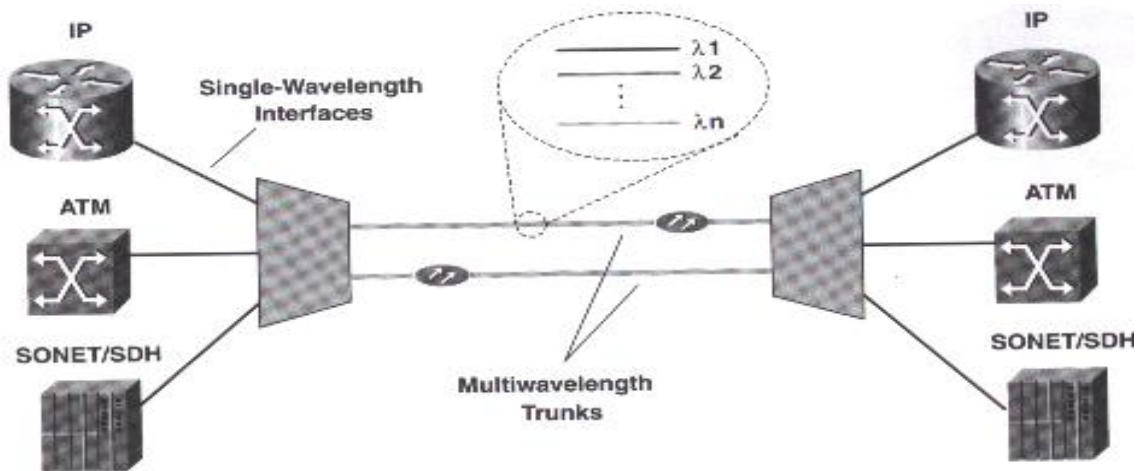
Τα DWDM συστήματα διακρίνονται σε p-t-p (point to point) και ring. Και τα δύο μπορούν να είναι μονής και διπλής κατεύθυνσης. Τα συστήματα μονής κατεύθυνσης χρησιμοποιούν όλα τα διαθέσιμα κανάλια κυμάτων της ίνας για να στείλουν ή να λάβουν δεδομένα. Αντιθέτως, τα διπλής κατεύθυνσης έχουν μερικά μήκη κύματος από τα διαθέσιμα για αποστολή και μερικά για λήψη ταυτοχρόνως όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



P-t-p systems

Τα συστήματα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται κυρίως για την αύξηση της χωρητικότητας της ίνας σε διασυνδέσεις μεγάλων αποστάσεων. Όπως φαίνεται και στο σχήμα (Σχήμα 9) αποτελούνται από δύο γραμμές με ίνες πολλαπλών μηκών κύματος (Multiwavelength Trunks) με στόχο να επιτευχθεί και η κίνηση μεγάλου όγκου δεδομένων και επιπλέον να ενσωματωθούν δυνατότητες μηχανισμών ασφάλειας. Για τη σύνδεση των IP δρομολογητών, ATM διακοπών ή σύγχρονων οπτικών δικτύων (SONET)/SDH χρησιμοποιούνται διεπαφές με ένα μήκος κύματος (Single-Wavelength Interfaces). Το σύνολο αυτών κατά τη μετάδοση περνά αρχικά από έναν διαμορφωτή για να μετασχηματιστεί κατάλληλα και έπειτα πολυπλέκονται τα διαφορετικά μήκη κύματος για να σταλθούν στη γραμμή. Μόλις φτάσουν στον παραλήπτη γίνεται ανάλογα η αντίστροφη διαδικασία.

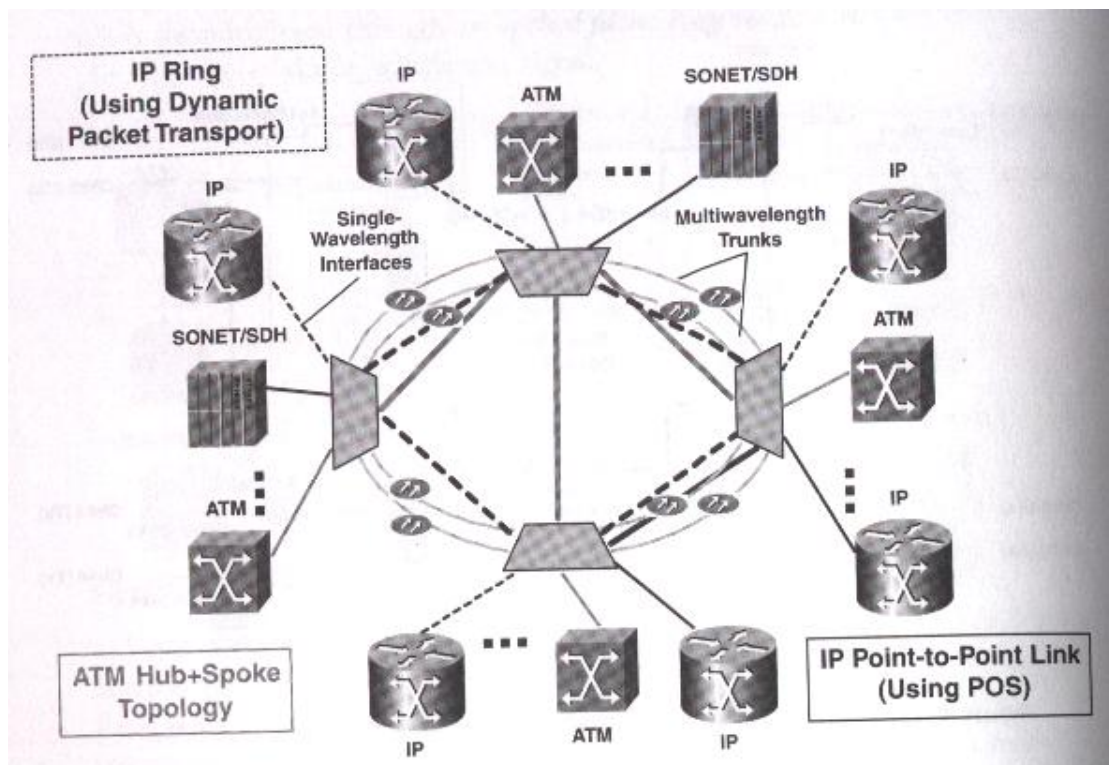
Τα p-t-p συστήματα, συνήθως χρησιμοποιούν 1+1 προστασία (1+1 protection) για να χειρίζονται βλάβες στο κανάλι μεταφοράς ή στις ίνες. Δύο DWDM-τερματικά συνδέονται μέσω δύο ινών. Κάθε μήκος κύματος στέλνεται και με τις δύο ίνες, έτσι που το τερματικό-παραλήπτης συγκρίνει τα δύο οπτικά σήματα και χρησιμοποιεί το καλύτερο.



Σχήμα 9

Ring Systems

Τα ring συστήματα χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές Μητροπολιτικών Δικτύων (Metropolitan Area Network - MAN). Έχουν τέσσερις γραμμές με ίνες πολλαπλών μηκών κύματος (Multiwavelength Trunks) με επιπρόσθετες και πιο ισχυρές δυνατότητες προστασίας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα (Σχήμα 10), τα DWDM rings μπορούν να παρέχουν στην πραγματικότητα κάθε τοπολογία. Δίκτυα όπως p-t-p, ring, hub-and-spoke ή mesh μπορούν να υλοποιηθούν αν καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο τερματίζονται τα μήκη κύματος. Και εδώ χρησιμοποιείται η 1+1 προστασία με τη σύγκριση των οπτικών σημάτων στον παραλήπτη.



Σχήμα 10

γ. Εφαρμογές του DWDM σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα

- Το 1985 η Bell Communication Research εισήγαγε το δίκτυο Lambdanet συνδέοντας 16 τερματικούς σταθμούς μέσω ενός „διαφανούς“, single-mode οπτικής ίνας δικτύου τύπου αστέρα. Χρησιμοποιήθηκε ένας σύνδεσμος αστέρα 16x16, έτσι που κάθε τερματικό έστελνε το δικό του μήκος κύματος και λάμβανε όλα τα άλλα μήκη κύματος από ένα WDM 16 καναλιών.

- Λίγα χρόνια αργότερα στο BBC (Μεγάλη Βρετανία), δημοσιεύτηκε μία παρόμοια εφαρμογή τύπου αστέρα, για το εσωτερικό δίκτυο ενός στούντιο τηλεόρασης.
- Το 1988 παρουσιάστηκε και το δίκτυο Bell Communication Research' s Passive Photonic Loop (PPL) που είναι άλλο ένα παράδειγμα μιας δομής αστέρα. Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιούσε ένα διπλό αστέρα από single-mode οπτικές ίνες μεταξύ του κεντρικού σταθμού και ενδιάμεσων τερματικών σταθμών. Σε ένα τέτοιο δίκτυο η αποστολή των διάφορων υπηρεσιών γινόταν αφού πολυπλεχθούν αυτές σε μία ίνα που ήταν εγκατεστημένη ανάμεσα στον κεντρικό και τους ενδιάμεσους τερματικούς σταθμούς. Έπειτα, τα σήματα στέλνονταν από εκεί στον προορισμό τους.
- Το DWDM είναι επίσης αποδοτικό στα δίκτυα μεταφοράς αναλογικού βίντεο και άλλα διάφορα ειδικά δίκτυα όπως δίκτυα αισθητήρων, δίκτυα ραντάρ και δίκτυα ελέγχου φασματοσκοπικών διαδικασιών

δ. Τα σημερινά δίκτυα DWDM

Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που υπάρχουν τώρα είναι σχετικά ετερογενής. Αυτό είναι η συνέπεια μιας εξέλιξης, στη διάρκεια της οποίας το υλικό των μεταφορών καθώς και διαδικαστικές μέθοδοι έχουν τροποποιηθεί με μεγάλη πρόοδο για να αντεπεξέλθουν στις συνεχώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις.

Καινούργιες υπηρεσίες πρέπει συνέχεια να εισάγονται σε παλιά και νέα συστήματα. Έτσι, βλέπουμε μία τεράστια ανάπτυξη του διαδικτύου. Νέες υπηρεσίες, όπως τηλε-διάσκεψη, ψυχαγωγία, αλληλεπιδραστικές εφαρμογές εκπαίδευσης, ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ υπολογιστών και γενικά όλα τα δίκτυα ISDN χρειάζονται ή θα χρειασθούν στο μέλλον ρυθμούς μετάδοσης από 1 μέχρι 100Mbps και παραπάνω. Συνεπώς, τα νέα δίκτυα απαιτείται να χαρακτηρίζονται από προσαρμοστικότητα και κατά κάποιο τρόπο θα πρέπει να έχουν μία κατανομημένη νοημοσύνη.

Οι διαφορετικοί τύποι δικτύων μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το μέγεθος, την τοπολογία και τον τρόπο μεταφοράς. Βέβαια, τα όρια των διάφορων κατηγοριών δεν είναι πάντα πολύ καλά καθορισμένα με αποτέλεσμα ένα δίκτυο να βρίσκεται ανάμεσα σε διαφορετικές τοπολογίες και σχήματα.

Ανάλογα με το μέγεθος του δικτύου, χρησιμοποιούνται συχνά οι ακόλουθοι όροι:

- Τοπικό δίκτυο (Local Area Network - LAN)
- Μητροπολιτικό δίκτυο (Metropolitan Area Network – MAN)
- Δίκτυο προσπέλασης (Access Network)
- Δίκτυο ευρείας περιοχής (Wide Area Network - WAN)
- Δίκτυο μεταφοράς (Transport Network)

Ανάλογα με τις τοπολογίες, τα δίκτυα ονομάζονται:

- Static broadcast and select networks
- Wavelength routed networks
- Linear lightwave networks
- Logically routed networks

Οι κύριοι τρόποι μεταφοράς είναι:

- IP: Οι IP κάρτες ελέγχου διαβάζουν τον προορισμό στον header του πακέτου και στέλνουν το πακέτο δεδομένων στη σωστή κατεύθυνση. Τα πακέτα μπορούν να έχουν μεταβλητό μήκος.
- Σύγχρονη ψηφιακή ιεραρχία (Synchronous Digital Hierarchy – SDH): Τα σήματα διευθετούνται μαζί με τα δεδομένα σε πλαίσια 810-byte με header 18 bytes πληροφορίας δικτύου σε δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος. Ο ρυθμός γραμμής είναι στις ιεραρχίες: STM-1 (155.84 Mbps), STM-2 (622.08 Mbps), STM-16 (2488.32 Mbps), STM-64 (9953.28 Mbps).
- Σύγχρονο οπτικό δίκτυο (Synchronous Optical Network – SONET): Όπως και το SDH έτσι και το SONET σχεδιάστηκε αρχικά για τη μεταφορά σε ψηφιακά τηλεφωνικά οπτικά δίκτυα με ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης. Εδώ χρησιμοποιούνται τα OC-1 (51.48 Mbps), OC-2 (155.52 Mbps) και OC-192 (9953.84 Mbps). Περιλαμβάνονται και δυνατότητες συντήρησης και προστασίας. Η ποιότητα υπηρεσίας είναι καλύτερη από αυτή του IP αλλά η χρησιμοποίηση πόρων είναι λιγότερο αποδοτική.

- Ασύγχρονος τρόπος μεταφοράς (Asynchronous transfer mode – ATM): Το ATM αναπτύχθηκε για τα ISDN ευρείας ζώνης (B-ISDN). Χρησιμοποιεί πακέτα σταθερού μήκους των 53 bytes.
- Ethernet: Αναπτύχθηκε για τοπικά δίκτυα. Περιλαμβάνει το “βασικό“, το “γρήγορο“ και το “Gigabit“ Ethernet στα 10 Mbps, 100 Mbps και 1 Gbps αντίστοιχα.
- Simple data link(SDL)
- Multiprotocol label switching (MPLS): Το MPLS μπορεί να πάρει δεδομένα κάθε τύπου σε ένα πακέτο. Δεν απαιτεί κεντρική διαχείριση και έχει πρωτόκολλα πιο απλά από το ATM. Στην πραγματικότητα το MPLS σχεδιάστηκε αρχικά για δίκτυα IP.
- Αναμετάδοση πακέτου (Frame relay): Πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στη διασύνδεση τοπικών δικτύων βασισμένο σε πακέτα.

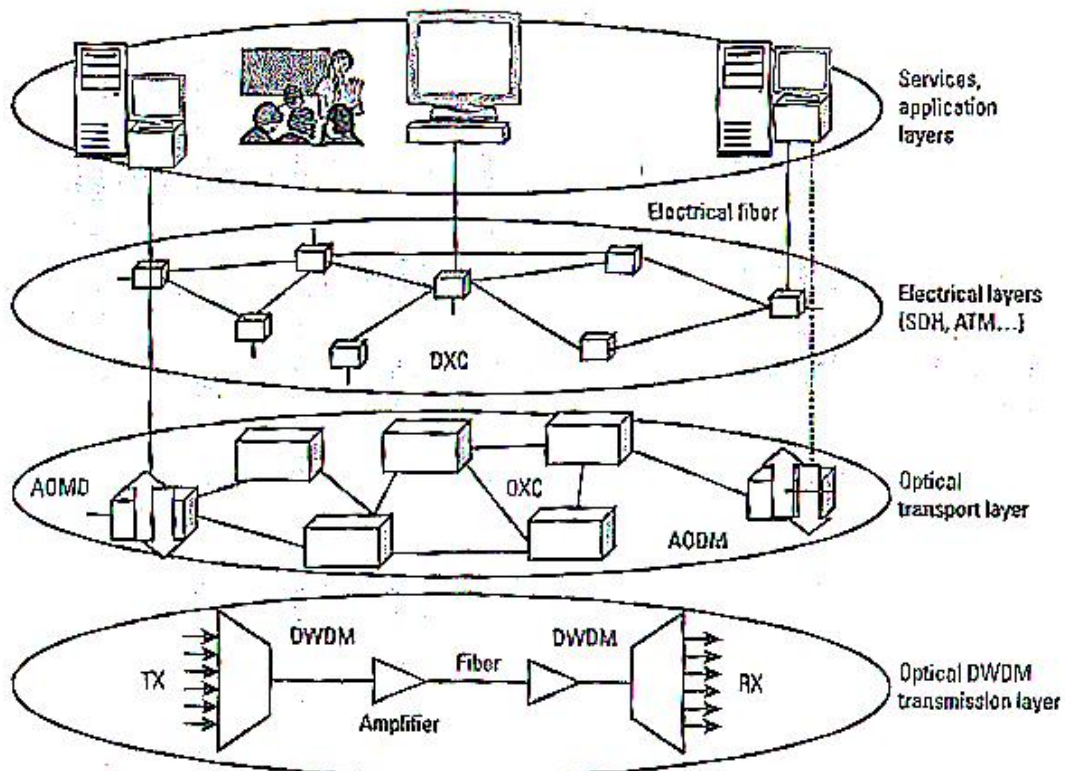
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται ο αριθμός καναλιών και η συνολική χωρητικότητα σε μερικές εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκε το DWDM τα τελευταία χρόνια⁹.

Ημερομηνία	Κατασκευαστής	Αριθμός καναλιών	Συνολική Χωρητικότητα
Απρίλιος 2000	Lucent	82	3.28 Terabits/sec
Σεπτέμβριος 2000	Alcatel	128	5.12 Terabits/sec
Οκτώβριος 2000	Nec	160	6.4 Terabits/sec
Οκτώβριος 2000	Siemens	176	7.04 Terabits/sec
Μάρτιος 2001	Alcatel	256	10.2 Terabits/sec
Μάρτιος 2001	Nec	273	10.9 Terabits/sec

9. <http://www.electronics.dit.ie/staff/gfarrell/OpticalMultiplex/1DWDMOpticalAmp.pdf>

ε. Υποδομή ενός DWDM δικτύου

Οι αρχιτεκτονικές δικτύων στοιβάζονται σχηματικά σε διαφορετικά επίπεδα. Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 11) στα επάνω επίπεδα βρίσκονται οι υπηρεσίες και οι εφαρμογές, στα μεσαία επίπεδα έχουμε ηλεκτρική μεταγωγή και πολυπλεξία όπως συμβαίνει σε ένα επίπεδο ATM πάνω σε ένα SDH/SONET και τέλος στο πρώτο επίπεδο βρίσκεται το δίκτυο μεταφοράς με το επίπεδο του DWDM και της οπτικής μετάδοσης.



Σχήμα 11

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Συμπεράσματα από την μελέτη

Τα οπτικά δίκτυα αποτελούν μία από τις τεχνολογίες που θα απασχολήσει τους εμπλεκόμενους στις τεχνολογίες δικτύων τα επόμενα χρόνια, μια και τα πλεονεκτήματα τα οποία παρέχουν βοηθούν στη δημιουργία γρήγορων και αξιόπιστων δικτύων. Απόδειξη των παραπάνω είναι το γεγονός ότι η τεχνολογία SONET/SDH είναι καλά εδραιωμένη στο παγκόσμιο γίγνεσθαι, ενώ χαρακτηριστικό παράδειγμα των δυνατοτήτων των οπτικών δικτύων είναι η τεχνολογία DWDM, η οποία επιτρέπει έως 128 ανά ίνα με δυνατότητα χρήσης πολλών ειδών ινών ταυτόχρονα.

Επιπλέον, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες που έχουν να κάνουν με τη χρήση σολιτονίων για τη μεταφορά δεδομένων με μεγάλες ταχύτητες σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ πολύ σύντομα θα είναι εφικτή η μεταγωγή οπτικών πακέτων.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- **Soliton:** Σωματίδια σε μη γραμμικά μέσα. Δεν παρουσιάζουν παραμόρφωση. Παλμοί 10ps. Μεγάλες ταχύτητες, πολύ μεγάλες αποστάσεις.
- **Optical Packet Switching:** Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα KEOPS (Keys to Optical Packet Switching).
- **Optic Wireless:** Χρησιμοποιεί WDM στον αέρα, με δέσμη LASER.
- **Dark Solitons:** Κενά σε δέσμη υψηλής ισχύος.
- **Light Guiding Light:** Μια δέσμη υψηλής ενέργειας σε ειδικό (dispersive) υλικό αλλάζει τον δείκτη διάθλασης και το μετατρέπει σε κυματοδηγό. Άλλα μήκη κύματος ακολουθούν αυτόν τον κυματοδηγό.
- **ZBLAN Fiber:** Zirconium, barium, lanthanum, aluminium, and sodium (Na) fiber. Απόσβεση 10-2 or 10-3 dB/km. Διασχίζει ωκεανούς χωρίς ενίσχυση. Λειτουργεί στα 2.55 μικρά. Μεγαλύτερος πυρήνας.
- **Optical Time Domain Multiplexing (OTDM):** Χωρίζει και ανασυνθέτει στενούς παλμούς.
- **MONET (Multiwavelength Optical Networking):** Πρόγραμμα των ΗΠΑ δημιουργίας οπτικού δικτύου πολλαπλού μήκους κύματος το οποίο θα λειτουργεί για εμπορικές και κυβερνητικές εφαρμογές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ**Βιβλία / Περιοδικά / Εγχειρίδια**

Εισαγωγή στις νέες τεχνολογίες επικοινωνιών
Πομπόρτσης Ανδρέας

Δίκτυα Υπολογιστών, Τρίτη Έκδοση
Andrew S. Tannenbaum

DWDM Fundamentals, Components, and Applications
Jean-Pierre Laude

Introduction to DWDM Technology / Data in a Rainbow
Stamatios V. Kartalopoulos

Next Generation Optical Networks
Peter Tomsu, Christian Schmutzer

Optical Networking & WDM
Walter J. Goralski

Optical Networks: A Practical Perspective
Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan

Understanding SONET/SDH and ATM: Communications Networks for the Next Millennium
Stamatios V. Kartalopoulos, IEEE, Inc. Staff

Optical WDM Networks: Concepts and Design Principles
Jun Zheng, Hussein T. Mouftah

"Modeling and analysis of ultra high capacity optical networks," Proceedings of the SMS
Advanced Simulation Technologies Conference, Washington D.C., April 2004.
A. Bragg and H. Perros,

"On the Design of Dynamic Reconfiguration Policies for Broadcast WDM Networks,"

Proceedings of SPIE Technical Conference: All-Optical Networking: Architecture, Control, and Management Issues, volume 3531, November, 1998.

I. Baldine and G. Rouskas,

Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) Performance and Conformance Testing

Tektronix

Driving Optical Network Evolution

Cisco Systems

Optical Networks

Alcatel

Synchronous Optical Network (SONET)

Tektronix

High-Speed Synchronization for Optical Packet Networks, Proc. London Communications Symposium (LCS 2000)

G. Gavioli and P. Bayvel

Δικτυακοί τόποι

<http://www.optical-networks.com/>

Σελίδα του περιοδικού των οπτικών δικτύων

http://www.iec.org/online/tutorials/hfc_dwdm/topic09.html

Εκπαιδευτικό εγχειρίδιο σχετικά με το DWDM

http://www.cisco.com/en/US/tech/tk482/tech_topology_and_network_serv_and_protocol_suite_home.html

Σύντομη αναφορά και περιγραφή όλων των πρωτοκόλλων των οπτικών δικτύων

http://ru6.cti.gr/bouras/dialekseis/3/DYT_dwdm_v2.ppt

Διάλεξη του τμήματος Μηχανικών Η/Υ Πάτρας σχετικά με τη τεχνολογία DWDM

<http://www.electronics.dit.ie/staff/gfarrell/OpticalMultiplex/1DWDMOpticalAmp.pdf>

Διαφάνειες με στατιστικά στοιχεία σχετικά με τις σημερινές εφαρμογές του DWDM

<http://www.iec.org/online/tutorials/>

Ιστοσελίδα του IEC σχετικά με τις τεχνολογίες πρωτοκόλλων οπτικών δικτύων

<http://www.opticalnetworks.com/>

Σελίδα που περιλαμβάνει πηγές στο διαδίκτυο σχετικά με τα οπτικά δίκτυα

<http://www.optastic.com/>

Εκπαιδευτικά εγχειρίδια (Tutorials) σχετικά με θέματα οπτικών δικτύων

<http://www.cyberstream.gr/>

Εφαρμογές οπτικών δικτύων στην Ελλάδα

http://www.cisco.com/global/GR/solutions/sp/techsols/ip_optical/ipoptical_home.shtml

Στοιχεία για τις παρεχόμενες υπηρεσίες της CISCO στην Ελλάδα

<http://ru6.cti.gr/broadband/el/readnews.php?id=34>

Ενημερωτική σελίδα σχετικά με τις εξελίξεις στη δημιουργία μητροπολιτικών δικτύων οπτικών ινών στον Ελλαδικό χώρο

http://www.conta.uom.gr/conta/ekpaideysh/seminaria/M_NetworkTech/cd5.swf

Εφαρμογή του τμήματος MIS με θέματα που αφορούν τις σύγχρονες τεχνολογίες δικτύων