



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**  
**ΤΙΤΛΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών**  
**Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών και Κατανεμημένων Συστημάτων**

**Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**

**Τίτλος εργασίας**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΠΤΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ**

**Συγγραφέας**

**AHMED ABDELSAYED**

**ΑΜ: 19030**

**Επιβλέπων**

**Καθηγητής Αντώνης Μπόγρης**

**Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**SCHOOL OF ENGINEERS**  
**DEPARTMENT INFORMATION AND COMPUTER ENGINEERS**  
**TITLE OF POSTGRADUATE PROGRAM (MSc/MBA)**  
**Information and Computer Science and Technology**  
**Communication Networks and Distributed Systems specialization**

**Diploma Thesis**

**Title**

**TRANSPORT TECHNOLOGIES IN OPTICAL NETWORKS**

**Student name and surname:**

**AHMED ABDELSAYED**

**Registration Number:**

**19030**

**Supervisor name and surname:**

**Professor Adonis Bogris**

**Athens, September 2023**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών**

**Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών και Κατανεμημένων Συστημάτων**

**Τίτλος εργασίας**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/a</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	Αντώνης Μπόγρης	Καθηγητής	
2	Νίκος Μυριδάκης	Επ. Καθηγητής	
3	Νίκος Ψαρρας	Λέκτορας Εφαρμογών	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος AHMED ABDELSAYED του MAREI, με αριθμό μητρώου 19030 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών και Κατανεμημένων Συστημάτων του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

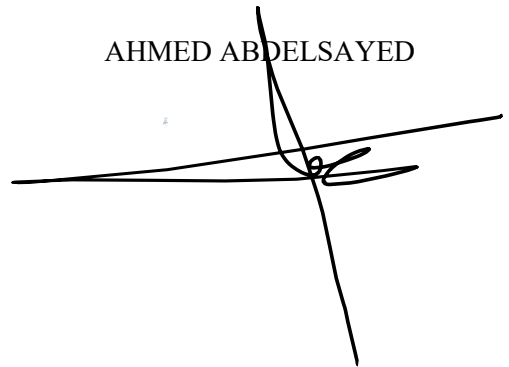
\* Ονοματεπώνυμο /Ιδιότητα

Καθηγητής Αντώνης Μπόγρης

**Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα  
(Υπογραφή)**

Ο/Η Δηλών

AHMED ABDELSAYED

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'AHMED ABDELSAYED', written over the printed name. The signature is stylized and somewhat messy, with several loops and a long horizontal stroke.



### **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και να εκφράσω την εκτίμησή μου στον επιβλέποντα Καθηγητή Αντώνη Μπόγρη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ και να μελετήσω αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα καθώς και για τη βοήθεια και τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε. Για τον χρόνο που αφιέρωσε και την πολύτιμη βοήθειά καθ' όλη τη διάρκεια περάτωσης της διπλωματικής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη συνεχή στήριξη και συμπαράσταση που μου προσφέρουν σε κάθε προσπάθειά μου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διπλωματική αυτή θα πραγματοποιηθεί βιβλιογραφική έρευνα για Τεχνολογίες μεταφοράς σε οπτικά δίκτυα σε μεγάλες αποστάσεις , Κύρια πρωτόκολλα και τεχνολογίες που θα μελετηθούν είναι το OTN, SDH και MPLS. Η διπλωματική θα αναδείξει και τις τάσεις για διασυνδέσεις 800 G, 1.6 Tb/s και πως αυτές θα εξυπηρετηθούν από νέες τεχνολογίες πομποδεκτών μέσα στα έξης κεφάλια

### Πρώτο κεφάλαιο : Οπτικές επικοινωνίες και δίκτυα

Αυτό το κεφάλαιο ασχολείται με το φυσικό επίπεδο της Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM) οπτικά δίκτυα. Αρχικά δίνουμε μια γενική επισκόπηση των οπτικών δικτύων WDM. Μετά προχωράμε στην περιγραφή του τρόπου με τον οποίο το φως μεταδίδεται μέσω μιας οπτικής ίνας. Συγκεκριμένα, θα μελετήσουμε τον Δείκτη Διάθλασης (Refractive Index) και τις οπτικές ίνας Βαθμιαίου Δείκτη (Step-Index) και Διαβαθμισμένου Δείκτη (Graded-Index), πολλαπλών λειτουργιών και ενιαία λειτουργία οπτικές ίνας και διάφορα οπτικά εφέ που συμβαίνουν όταν μεταδίδεται φως μέσω μιας οπτικής ίνας γνωστής ως βλάβες. Τέλος, ολοκληρώνουμε αυτό το κεφάλαιο περιγράφοντας ορισμένα από τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε οπτικά δίκτυα WDM, όπως λείζερ, οπτικούς ενισχυτές, Συζεύκτης Couplers 2 x 2, Couplers αστεριών και Οπτικές Διασταυρούμενες Συνδέσεις (OXC).

### Δεύτερο κεφάλαιο: SONET/SDH

Μέχρι στιγμής, έχουμε γίνει μάρτυρες της ανάπτυξης τρεις γενιές μεταφοράς ψηφιακής τεχνολογίας για την τηλεφωνία PDH, SONET/SDH και G.709. Η πρώτη γενιά μεταφοράς ψηφιακής τεχνολογίας ήταν η Πλησιόχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (PDH), της οποίας ο Βορράς Το αμερικανικό πρότυπο T1 και το ισοδύναμο πρότυπο ITU-T E1 είναι ίσως τα περισσότερα γνωστά συστήματα μεταφοράς. Το T1/E1 αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1960 για τη μεταφορά φωνητική κίνηση.

Το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (SONET) προτάθηκε από την Bellcore (τώρα Telecordia) το 1985, και μπορεί να θεωρηθεί ως η δεύτερη γενιά μεταφορών ψηφιακών δικτύων. Το SONET σχεδιάστηκε για να πολυπλέκει (multiplex) σήματα PDH και να τα μεταδίδει οπτικά σήματα μεταξύ του εξοπλισμού που κατασκευάστηκε από διαφορετικούς κατασκευαστές. Ωστόσο, το SONET δεν σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίσει τις ανάγκες της ευρωπαϊκής κοινότητας, η οποία χρησιμοποίησε την Πλησιόχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (PDH) ITU-T.

Η ITU-T υιοθέτησε τη Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (SDH) ως διεθνή πρότυπο. Το SONET συμμορφώνεται με το SDH. Το SONET και το SDH ορίστηκαν επίσης να φέρουν Κυψέλες ATM και πλαίσια Πρωτόκολλο Σημείου-προς-σημείο (PPP) και HDLC. Το ψηφιακό δίκτυο μεταφορών τρίτης γενιάς είναι το πρότυπο ITU-T G.709, διαφορετικά γνωστό ως ψηφιακό περιτύλιγμα. Αυτό είναι ένα νέο πρότυπο που εκμεταλλεύεται την τεχνολογία Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM). Μπορεί να μεταφέρει πακέτα IP, κελιά ATM, Πλαίσια Ethernet και σύγχρονη κυκλοφορία SONET/SDH.

Σε αυτό το κεφάλαιο, εστιάζουμε στην τεχνολογία μεταφορών SONET/SDH. Ξεκινάμε πρώτα με μια περιγραφή των T1 και E1 και στη συνέχεια παρουσιάζουμε και περιγράφουμε λεπτομερώς την ιεραρχία SONET/SDH, τη δομή πλαισίου SONET STS-1, τα γενικά έξοδα, το ωφέλιμο φορτίο, και τη δομή πλαισίου SONET STS-3. Και στη συνέχεια, περιγράφουμε το SONET / SDH συσκευές και δακτυλίους SONET/SDH.



Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των δακτυλίων SONET/SDH είναι ότι αυτοθεραπεύονται (self-healing). Αυτό είναι Ένας δακτύλιος SONET/SDH μπορεί να ανακάμψει αυτόματα όταν αποτύχει ένα σύνδεσμο οπτικών ινών. Αυτή η αποτυχία μπορεί να εμφανίζεται όταν κόβεται κατά λάθος μια ίνα, όταν τα οπτικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση μια ίνα αποτυγχάνει (fiber fail) ή ο SONET/SDH διακόπτης αποτυγχάνει (switch fails). Θα περιγράψουμε διάφορες αρχιτεκτονικές αυτοθεραπεία (self-healing), όπως συστήματα προστασίας δύο ινών και τεσσάρων ινών. Ολοκληρώνουμε αυτό το κεφάλαιο με μια περιγραφή της Γενικής Διαδικασία Πλαισίωσης (GFP) και δεδομένα μέσω SONET/SDH (DoS). Η Generic Framing Procedure (GFP) είναι ένα ελαφρύ σύστημα προσαρμογής που επιτρέπει τη μετάδοση διαφόρων τύπων κυκλοφορίας μέσω SONET/SDH και, στο μέλλον, μέσω G.709. Το DoS είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που χρησιμοποιεί GFP (μαζί με δύο άλλους μηχανισμούς) για την παροχή αποτελεσματικής μεταφοράς ολοκληρωμένων υπηρεσιών δεδομένων μέσω SONET/SDH.

### **Τρίτο κεφάλαιο: Optical Transport Network (OTN)**

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μάθουμε για τα Οπτικό Δίκτυο Μεταφοράς (OTN). Είναι η τεχνολογία της επόμενης γενιάς και είναι το προηγμένο στοιχείο Ψηφιακή Γραμμή Συνδρομητή (DSL) που χρησιμοποιείται σήμερα. Η οπτική ίνα έχει την ικανότητα να παρέχει σημαντικές ποσότητες δεδομένων μαζί με άλλες υπηρεσίες όπως βίντεο, τηλέφωνο και πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Το OTN έχει σχεδιαστεί ειδικά για να εκμεταλλεύεται αυτή τη χωρητικότητα, επιτρέποντας στους φορείς εκμετάλλευσης να προσφέρουν νέες υπηρεσίες και να αυξάνουν σημαντικά τα έσοδά τους, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνουν σημαντικά τη λειτουργική απόδοση. Η τεχνολογία Optical Transport Network (OTN) παρέχει μια εξαιρετικά επεκτάσιμη, οικονομικά αποδοτική υποδομή μεταφορών τόσο απαραίτητη για την ανάπτυξη των ευρυζωνικών δικτύων. Αυτό το κεφάλαιο εισάγει τις εξελίξεις στην τεχνολογία και τα πρότυπα OTN που παρέχουν καλύτερη απόδοση, μεγαλύτερη απόδοση και υψηλότερη ταχύτητα. Οι μηχανικοί συστημάτων Headend και οι χειριστές δικτύων θα επωφεληθούν από την κατανόηση των βελτιωμένων υπηρεσιών που μπορούν να προσφερθούν χρησιμοποιώντας αυτές τις νέες τεχνολογίες. Το Optical Transport Network (OTN) είναι ένα τυποποιημένο επίπεδο στο μοντέλο αναφοράς Open System Interconnection (OSI) που παρέχει διαφανή μετάδοση της κίνησης δεδομένων χρήστη (π.χ. υπηρεσίες φωνής και πολυμέσων) μέσω σύγχρονων και ασύγχρονων μπλοκ μεταφοράς σε μια σύνδεση σημείου προς σημείο σε έναν οπτικό τομέα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε επίσης τα παρακάτω:

- Πρόσθια Διόρθωση Σφαλμάτων (FEC)
- Ιεραρχία
- Δομή Πλαισίου
- Γενικά Έξοδα Ευθυγράμμισης Πλαισίου
- Μονάδα Οπτικών Δεδομένων (ODU) Παρακολούθηση
- Μονάδα Οπτικού Μονοπατιού (OPU)
- Πολυπλεξία
- Γενική Διαδικασία Πλαισίωσης (GFP)
- Πλαίσιο GFP
- Κοινές πτυχές της GFP
- Πτυχές που αφορούν ειδικά τον πελάτη GFP

### Τέταρτο Κεφάλαιο: MPLS, Generalized MPLS

Καθώς το Διαδίκτυο αυξανόταν σε δημοτικότητα, οι οργανισμοί αναζήτησαν έναν αποτελεσματικό τρόπο για την προώθηση πακέτων. Οι απαιτήσεις εύρους ζώνης αυξήθηκαν, αλλά οι μηχανισμοί εναλλαγής ετικετών δυσκολεύτηκαν να χειριστούν το φορτίο. Οι παραδοσιακές μέθοδοι, όπως η εναλλαγή IP και η εναλλαγή ετικετών, απαιτούν από κάθε δρομολογητή να προσδιορίζει ανεξάρτητα την επόμενη μετάβαση ενός πακέτου επιθερώντας τη διεύθυνση IP προορισμού του πριν συμβουλευτεί τον πίνακα δρομολόγησης του. Αυτή η αργή διαδικασία περιλαμβάνει πόρους υλικού και εισάγει τη δυνατότητα υποβαθμισμένης απόδοσης για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως η φωνή και το βίντεο. Οι παραδοσιακοί δρομολογητές έπρεπε να κλιμακωθούν πιο αποτελεσματικά για να καλύψουν τις ανάγκες εύρους ζώνης του σύγχρονου Διαδικτύου και να αποφύγουν τις χαμηλές ταχύτητες, το jitter και την απώλεια πακέτων.

Το 1997, η ομάδα εργασίας για την εναλλαγή ετικετών πολλαπλών πρωτοκόλλων στο Internet Engineering Task Force (IETF) δημιουργήθηκε για να δημιουργήσει πρότυπα που θα βοηθήσουν στην επίλυση των προβλημάτων σχετικά με τη δρομολόγηση της κυκλοφορίας στο Διαδίκτυο. Το MPLS αναπτύχθηκε ως εναλλακτική λύση για τη μεταγωγή πολλαπλών επιπέδων και τη λειτουργία IP μέσω Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης (ATM). Οι δρομολογητές MPLS δεν αναζητούν διαδρομές σε πίνακες δρομολόγησης, κάτι που συμβάλλει στην αύξηση της ταχύτητας της κυκλοφορίας του δικτύου. Καθώς οι τεχνικές MPLS αναπτύχθηκαν και υιοθετήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 2000, το πρωτόκολλο υιοθετήθηκε ευρέως.

Το MPLS μπορεί να λειτουργήσει σε περιβάλλον πολλαπλών πρωτοκόλλων, όπως ATM, frame relay, Synchronous Optical Network και Ethernet. Το MPLS συνεχίζει να εξελίσσεται καθώς εξελίσσονται οι τεχνολογίες δικτύου κορμού και η ομάδα εργασίας του IETF εξακολουθεί να εργάζεται σε πρωτόκολλα και μηχανισμούς MPLS. Το MPLS έπαιξε επίσης σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη τεχνολογιών παλαιού τύπου δικτύων, καθώς και νεότερων τεχνολογιών που βασίζονται σε δίκτυα IP. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε επίσης τα παρακάτω:

Το Πρωτόκολλο Διαδικτύου (IP)

Η κεφαλίδα IP (IP Header)

Διευθύνσεις IP

Υποδικτύου (Subnetting)

Δρομολόγηση Μεταξύ Τομέων Χωρίς Κατηγορία (CIDR)

ARP, RARP και ICMP

IP Έκδοση 6 (IPv6)

Αρχιτεκτονική Εναλλαγή Ετικετών Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (MPLS)

Label Allocation Schemes

Next Hop Label Forwarding Entry (NHLE)

Παράδειγμα Χρήσης Της Στοιβάς Ετικετών

MPLS OVER ATM

Generalized MPLS (GMPLS)

Basic Features of GMPLS

CR-LDP Extensions for GMPLS

RSVP-TE Extensions For GMPLS

### **Πέμπτο κεφάλαιο: 800 G και 1.6 Tb/s τεχνολογίες – τάσεις**

Πριν από την έναρξη της πανδημίας, η συνεκτική οπτική πέμπτης γενιάς υψηλής χωρητικότητας αναγνωρίστηκε όλο και περισσότερο ως μία από τις μεγαλύτερες τάσεις για τη διαμόρφωση του κλάδου, με αναμενόμενες επιδείξεις σε όλα τα βασικά γεγονότα του κλάδου. Η συνεκτική οπτική μετάδοση χρησιμοποιεί διαμόρφωση του πλάτους, της φάσης του φωτός και της μετάδοσης σε δύο πολώσεις, προκειμένου να αυξηθεί η ποσότητα των πληροφοριών που μεταφέρονται κατά μήκος του καλωδίου οπτικών ινών. Χρησιμοποιεί ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP) σε επίπεδο πομπού και δέκτη και μπορεί να προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς bit, καθώς και καλύτερη ευελιξία. Η δημοτικότητα των συνεκτικών οπτικών έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια χάρη στην ικανότητά τους να αντιμετωπίζουν προβλήματα χωρητικότητας. Ενώ η παγκόσμια κατάσταση εμπόδισε μεγάλο μέρος της αλληλεπίδρασης και των προσωπικών απόψεων αυτής της τεχνολογίας, και αυτό έχει επιταχυνθεί τους τελευταίους 12 μήνες, παράλληλα με μια σειρά δοκιμών και επιδείξεων από προμηθευτές και φορείς εκμετάλλευσης, επισημαίνοντας τα επιτεύγματα υψηλότερων μηκών κύματος, όπως 600G, 800G και πιο πρόσφατα, στο μήκος κύματος Terabits.

Αναφέραμε τις προκλήσεις και την υλοποίηση ενός αναμεταδότη 2x800G για οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς. Παρακινήσαμε και συζητήσαμε τα κύρια χαρακτηριστικά της πολυπλεξίας ψηφιακών sub-carrier, την πιθανολογική διαμόρφωση και την ανάγκη εφαρμογής τους σε έναν αναμεταδότη πραγματικού χρόνου. Περιγράψουμε επίσης τους κύριους απαιτούμενους αλγόριθμους και τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση αυτών των μεθόδων. Η τελευταία ενότητα αναφέρεται στο πρώτο, εξ όσων γνωρίζουμε, πείραμα σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας το πιο πρόσφατο ASIC 7 nm. Κάθε ASIC και PIC έχουν σχεδιαστεί ικανά για δύο κύματα 800G το καθένα.

### **Έκτο κεφάλαιο – Συμπεράσματα**

Η πρόκληση που αντιμετωπίζει τώρα η βιομηχανία είναι να υιοθετήσει το ETC 800 GbE PCS/FEC, το οποίο έχει 32 VL, ή να ορίσει ένα πιο αποτελεσματικό PCS/FEC στο IEEE 802.3df με βάση 8 VL για 800 GbE και 16 VL για 1,6 TbE.

Η εργασία IEEE 802.3df είναι ένα σημαντικό εγχείρημα με τον καθορισμό τόσο των 800 GbE όσο και των 1,6 TbE, που περιλαμβάνει τον καθορισμό 13 οπτικών PMD, 6 χάλκινων (Cu) PMD και 6 AUIs. Όλα τα PMD που βασίζονται σε 100G ανά λωρίδα θα είναι στο έργο fast Trace (~2023), τα 200G ανά λωρίδα οπτικών στο επόμενο έργο (~2024) και τα 200G ανά λωρίδα Cu/CR θα είναι σε μεταγενέστερο έργο (~2026)

Με τα κέντρα δεδομένων hyperscale να αγωνίζονται συνεχώς να κρατήσουν μπροστά τους αυξανόμενους όγκους κίνησης δεδομένων, οι διακόπτες Ethernet 800G και οι συνδεδεμένες οπτικές μονάδες θα προσφέρουν κάποια ανακούφιση. Το πρότυπο 800G της κοινοπραξίας τεχνολογίας Ethernet θα βοηθήσει στην παροχή λύσεων Ethernet 800G έως να ολοκληρωθούν τα πρότυπα IEEE μερικά χρόνια αργότερα. Καθώς οι διακόπτες Ethernet 800G αρχίζουν να βγαίνουν στην αγορά, τα συνδεδεμένα οπτικά 8x100G θα πρέπει επίσης να είναι διαθέσιμα σε συντελεστές μορφής QSFP-DD800 και OSFP. Κοιτάζοντας πιο μπροστά, η σηματοδότηση 200 G ανά λωρίδα θα προσφέρει μια πρόσθετη ώθηση στα 800 G και θα θέσει τις βάσεις για το Ethernet 1,6 Tb

## ABSTRACT

This diploma will carry out bibliographic research on Transport Technologies in optical networks over long distances. The main protocols and technologies to be studied are OTN, SDH, and MPLS. The diplomacy will also highlight the trends for 800 G, 1.6 Tb/s connections and how new transceiver technologies inside six chapters will serve these.

### Chapter One: Optical Communications and Networks

This chapter deals with the physical layer of wavelength-division multiplexing (WDM) optical networks. We first give a general overview of WDM optical networks. We then proceed to describe how light is transmitted through an optical fiber. Specifically, we will study refractive index and step-index, graded-index optical fibers, multi-mode and single-mode optical fibers, and various optical effects that occur when light is transmitted through an optical fiber known as lesions. Finally, we conclude this chapter by describing some of the components used in WDM optical networks, such as lasers, and optics.

amplifiers, 2 × 2 couplers, star couplers, and Optical Cross-Connects (OXC).

### Chapter Two: SONET/SDH

So far, we have witnessed the development of three generations of digital transport technologies for telephony: PDH, SONET/SDH, and G.709. The first generation of digital transport technology was the Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH), of which the North American standard T1 and the ITU-T equivalent standard E1 are probably the most well-known transport schemes. T1/E1 was first deployed in the early 1960s to transport voice traffic.

The Synchronous Optical Network (SONET) was proposed by Bellcore (now Telecordia) in 1985, and it can be seen as the second generation of digital transport networks. SONET was designed to multiplex PDH signals and transmit them optically between equipment made by different manufacturers. SONET was not designed, however, to address the needs of the European community, which used the ITU-T plesiochronous digital hierarchy. In view of this, ITU-T adopted the Synchronous Digital Hierarchy (SDH) as the international standard. SONET is compliant with SDH. SONET and SDH were also defined to carry ATM cells and PPP and HDLC frames.

The third-generation digital transport network is the ITU-T standard G.709, otherwise known as the digital wrapper. This new standard takes advantage of Wavelength Division Multiplexing (WDM) technology. It can carry IP packets, ATM cells, Ethernet frames, and SONET/SDH synchronous traffic.

In this chapter, we focus on the SONET/SDH transport technology. The G.709 standard is described since the reader is required to have knowledge of the WDM optical technology. We first start with a description of T1 and E1, and then we present in detail the SONET/SDH hierarchy, the SONET STS-1 frame structure, overheads, payload, and the SONET STS-3 frame structure. Subsequently, we describe the SONET/SDH devices and SONET/SDH rings.

One of the main features of SONET/SDH rings is that they are self-healing. That is, a SONET/SDH ring can recover automatically when a fiber link fails. This failure can

occur when a fiber is accidentally cut, when the optical components used to transmit on a fiber fail, or the SONET/SDH switch fails. We will describe various architectures for self-healing rings, such as two-fiber and four-fiber protection schemes.

We conclude this chapter with a description of the Generic Framing Procedure (GFP) and data over SONET/SDH (DoS). GFP is a lightweight adaptation scheme that permits the transmission of different types of traffic over SONET/SDH and, in the future, over G.709. DoS is a network architecture that uses GFP (together with two other mechanisms) to efficiently transport integrated data services over SONET/SDH.

### **Chapter Three: Optical Transport Network (OTN)**

In this chapter, we will learn about Optical Transport Networks (OTN). It is the next-generation technology and is the advanced Digital Subscriber Line (DSL) component in use today. Optical fiber can provide significant amounts of data along with other services such as video, telephone, and Internet access. OTN is specifically designed to take advantage of this capacity, allowing operators to offer new services and significantly increase their revenues while significantly improving operational efficiency. Optical Transport Network (OTN) technology provides a highly scalable, cost-effective transport infrastructure essential to developing broadband networks. This chapter introduces the advances in OTN technology and standards that provide better performance, greater throughput, and higher speed. Headend system engineers and network operators will benefit from understanding the improved services that can be offered using these new technologies. An Optical Transport Network (OTN) is a standardized layer in the Open System Interconnection (OSI) reference model that provides transparent transmission of user data traffic (e.g. voice and multimedia services) over synchronous and asynchronous transport blocks over a point-to-point connection in an optical domain. In this chapter, we will also study the following:

- Forward Error Correction (FEC)
- Hierarchy
- Frame structure
- Frame alignment overhead
- Optical Data Unit (ODU) Monitor
- Optical Channel Payload Unit (OPU)
- Multiplexing
- General Framing Process (GFP)
- GFP frame
- Common aspects of GFP
- Aspects specific to the GFP client

## Chapter Four: MPLS, Generalized MPLS

As the Internet grew in popularity, organizations sought an efficient way to forward packages. Bandwidth requirements increased, but tag-switching mechanisms struggled to handle the load. Traditional methods, such as IP switching and label switching, require each router to independently determine a packet's next hop by inspecting its destination IP address before consulting its routing table. This slow process involves hardware resources and introduces the possibility of degraded performance for real-time applications such as voice and video. Traditional routers had to scale more efficiently to meet the bandwidth needs of the modern Internet and avoid slow speeds, jitter, and packet loss.

In 1997, the Multiprotocol Label Switching Working Group of the Internet Engineering Task Force (IETF) was created to create standards to help solve problems related to routing Internet traffic. MPLS was developed as an alternative to multi-layer switching and IP operation over asynchronous transport (ATM). MPLS routers do not look up routes in routing tables, which helps increase network traffic speed. The protocol became widely adopted as MPLS techniques were developed and adopted in the early 2000s to operate in a multi-protocol environment like ATM, frame relay, Synchronous Optical Network, and Ethernet. MPLS continues to evolve as backbone technologies evolve, and the IETF working group is still working on MPLS protocols and mechanisms. MPLS has also played an important role in supporting legacy network technologies as well as newer technologies based on IP networks, in this chapter we will also study the following:

- Internet Protocol (IP)
- IP Header
- IP addresses
- Subnetting
- Classless inter-domain routing (CIDR)
- ARP, RARP, and ICMP
- IP Version 6 (IPv6)
- Multi-protocol Label Switching (MPLS) Architecture
- Label Allocation Schemes
- Next Hop Label Forwarding Entry (NHLFE)
- Example Of Using The Tag Stack
- MPLS OVER ATM
- Generalized Multi-protocol Label Switching (GMPLS)
- Basic Features of GMPLS
- CR-LDP Extensions for GMPLS
- RSVP-TE Extensions For GMPLS

## **Chapter Five: 800 G and 1.6 Tb/s Technologies – trends**

Before the start of the pandemic, fifth-generation high-capacity coherent optics was increasingly recognized as one of the biggest trends shaping the industry, with demonstrations expected at all key industry events. The coherent optical transmission uses modulation of amplitude, phase of light, and transmission in two polarizations to increase the amount of information carried along the fiber optic cable. It uses Digital Signal Processing (DSP) at the transmitter and receiver level and can offer higher bit rates as well as better flexibility. Coherent optics have grown in popularity in recent years thanks to their ability to address capacitance issues. While the global situation has prevented much of the interaction and personal views of this technology, and this has accelerated in the last 12 months, alongside a series of tests and demonstrations by suppliers and operators, highlighting the achievements of higher wavelengths such as 600G, 800G and more recently, at the Terabits wavelength.

We reported the challenges and implementation of a 2x800G transponder for next-generation optical networks. We motivated and discussed the main features of digital sub-carrier multiplexing, probabilistic configuration, and the need to implement them in a real-time transponder. We also describe the main algorithms required and the benefits derived from using these methods. The last section reports the first real-time experiment using the latest 7 nm ASIC. Each ASIC and PIC is designed capable of two 800G waves each.

## **Chapter Six: Conclusions**

The challenge facing the industry now is to adopt the ETC 800 GbE PCS/FEC, which has 32 VLs, or to define a more efficient PCS/FEC in IEEE 802.3df based on 8 VLs for 800 GbE and 16 VLs for 1, 6 TbE.

The IEEE 802.3df work is a major undertaking with the specification of both 800 GbE and 1.6 TbE, which includes the specification of 13 optical PMDs, 6 copper (Cu) PMDs, and 6 AUIs. All PMDs based on 100G per lane will be in the fast trace project (~2023), 200G per optical lane in the next project (~2024) and 200G per lane Cu/CR will be in a later project (~2026).

With hyper-scale data centers constantly struggling to keep up with increasing volumes of data traffic, 800G Ethernet switches and connected optical modules will provide some relief. The Ethernet Technology Consortium's 800G standard will help provide 800G Ethernet solutions until the IEEE standards are finalized a few years later. As 800G Ethernet switches begin to hit the market, 8x100G optical interconnects should also be available in QSFP-DD800 and OSFP form factors. Looking further ahead, 200G per lane signaling will provide an additional boost to 800G and lay the groundwork for 1.6Tb Ethernet.

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

Πρώτο Κεφάλαιο : Οπτικές επικοινωνίες και δίκτυα .....	24
1.1 ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ WDM .....	24
1.2 ΠΩΣ ΜΕΤΑΔΙΔΕΤΑΙ ΤΟ ΦΩΣ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ .....	25
1.3 Οπτικές ίνες πολλαπλών και μονής λειτουργίας .....	28
1.4 Απώλειές (Impairments) .....	31
1.5 Εξασθένηση & Διασπορά .....	31
1.6 Τύποι ινών (Types of Fibers) .....	34
1.7 Λέιζερ (Lasers).....	35
1.8 Photodetectors and Optical Receivers.....	36
1.9 Οπτικοί ενισχυτές (Optical Amplifiers) .....	37
1.9.1 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA).....	37
1.9.2 Συζεύκτης (Coupler) 2 × 2 .....	38
1.9.3 Οπτικές διασταυρούμενες συνδέσεις (OXC).....	39
1.9.4 Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα MEMS .....	41
1.10 Οπτικά Δίκτυα.....	45
Δεύτερο κεφάλαιο: SONET/SDH.....	46
2.1 SONET /SDH .....	46
2.2 Η ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ SONET STS-1 .....	47
2.3 The Section, Line, and Path Overheads.....	49
2.3.2 Το τμήμα STS-1, η γραμμή και τα γενικά έξοδα διαδρομής.....	50
2.3.3 Το Ωφέλιμο Φορτίο (Payload) STS-1.....	52
2.4 Η ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ SONET STS-3 .....	55
.....	55
2.5 ΣΥΣΚΕΥΕΣ SONET/SDH .....	56
2.6.1 Two-fiber Unidirectional Path Switched Ring (2F-UPSR) .....	60
2.6.2 Two-fiber Bidirectional Line Switched Ring (2F-BLSR) .....	61
2.6.3 Four-fiber Bidirectional Line Switched Ring (4F -BLSR).....	62
2.7 THE GENERIC FRAMING PROCEDURE (GFP).....	64
Τρίτο κεφάλαιο: Optical Transport Network (OTN).....	64
3.1 Forward Error Correction (FEC):.....	65
3.2 Ιεραρχία (Hierarchy) .....	66
3.3 Δομή Πλαισίου (Frame Structure) .....	67
3.4 Πολυπλεξία (Multiplexing).....	70



3.5 Generic Framing Procedure (GFP) .....	70
3.7 GFP Common Aspects .....	72
3.8 Πτυχές που αφορούν ειδικά τον πελάτη GFP .....	73
Τέταρτο Κεφάλαιο: MPLS, Generalized MPLS .....	73
4.1 ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ (IP): ΕΝΑ PRIMER .....	73
4.2 Η κεφαλίδα IP (IP Header) .....	74
.....	74
4.3 Διευθύνσεις IP .....	75
4.3.1 Υποδικτύου (Subnetting) .....	76
4.3.2 Classless Inter-Domain Routing (CIDR) .....	76
4.4 ARP, RARP και ICMP .....	78
4.5 IP Έκδοση 6 (IPv6) .....	78
4.6 Αρχιτεκτονική Εναλλαγή Ετικετών Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (MPLS) .....	79
4.7 Label Allocation Schemes .....	84
4.8 The Next Hop Label Forwarding Entry (NHLFE) .....	84
4.9 Ένα παράδειγμα χρήσης της στοίβας ετικετών .....	85
4.10 MPLS OVER ATM .....	86
4.11 GENERALIZED MPLS (GMPLS) .....	87
4.12 Βασικά χαρακτηριστικά του GMPLS .....	88
4.12.1 The Generalized Label Request .....	90
4.12.2 The Generalized Label .....	91
4.12.3 The Label Set .....	91
4.12.5 Πληροφορίες προστασίας .....	93
4.13 CR-LDP Extensions for GMPLS .....	93
4.14 RSVP-TE Extensions For GMPLS .....	94
Πέμπτο κεφάλαιο: 800 G και 1.6 Tb/s τεχνολογίες .....	95
5.1 New Standards for 800G Ethernet .....	95
5.2 Architectural Overview .....	96
5.3 Τα πρότυπα ETC 800 GbE και τα νέα πρότυπα IEEE 802.3 800/1600 GbE .....	96
5.4 Επιλογές για 800G Pluggable Modules .....	97
5.5 Coherent Optics at 800G .....	98
5.6 Σχεδιασμός 800G DSP ASIC με χρήση πιθανοτήτων Shaping και Digital Sub-Carrier Multiplexing .....	99
5.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	99
5.6.2 ΟΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	101
5.6.3 DIGITAL ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ .....	103

5.6.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ALGORITHM .....	108
5.6.5 BENEFIT OF PS AND DSCM .....	113
5.6.6 EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF A 2×800G REAL-TIME TRANSPONDER.....	115
A. Πειραματικά αποτελέσματα.....	116
Έκτο κεφάλαιο – Συμπεράσματα.....	119
6.1 Looking Beyond 800G .....	119
6.1.1 Η Broadcom .....	119
6.1.2 Η Cisco.....	120
6.1.3 Η FS.COM .....	120
6.1.4 Η τεχνολογία Hengtong Rockley .....	120
6.1.5 Η μονάδα 800G της Huawei.....	120
6.1.6 Infinera .....	120
6.1.7 InnoLight .....	120
6.2.8 Η Lumentum .....	121
6.2.9 Photonics .....	121
6.2.10 Η Viavi .....	121
6.3 Ροή 800G PCS TX.....	122
6.4 Forword – Excerpt IEEE 802.3 Ethernet BWA .....	122
6.5 Περίληψη των Τάσεων .....	124
6.6 Νέο παράδειγμα .....	125
6.7 IEEE P802.3 df Objectives.....	126
6.7.2 (200 Gb/s) Related. ....	126
6.7.3 (400 Gb/s) Related. ....	126
6.7.4 (1.6 Tb/s) Related.....	127

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

ΕΙΚΟΝΑ 1:ΈΝΑΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΠΡΟΣ ΣΗΜΕΙΟ WDM.....	24
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΟΠΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	25
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΕΔΙΑ.....	26
ΕΙΚΟΝΑ 4: OPTICAL FIBER.....	26
ΕΙΚΟΝΑ 5: STEP-INDEX AND GRADED-INDEX FIBERS.....	26
ΕΙΚΟΝΑ 6: REFRACTION AND REFLECTION OF A LIGHT RAY.....	27
ΕΙΚΟΝΑ 7: ANGLE OF LAUNCHING A RAY INTO THE FIBER.....	28
ΕΙΚΟΝΑ 8: A LENS IS USED TO FOCUS THE LAUNCHED LIGHT.....	28
ΕΙΚΟΝΑ 9: PATH OF A LIGHT RAY IN A GRADED-INDEX FIBER.....	28
ΕΙΚΟΝΑ 10: ELECTRIC FIELDS.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 11: ELECTRIC FIELD AMPLITUDES FOR VARIOUS FIBER MODES.....	30
ΕΙΚΟΝΑ 12: PROPAGATION OF MODES.....	31
ΕΙΚΟΝΑ 13: SINGLE-MODE FIBER.....	31
ΕΙΚΟΝΑ 14 : ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	32
ΕΙΚΟΝΑ 15 : PULSE SPREADING.....	33
ΕΙΚΟΝΑ 16: PULSE SPREAD.....	34
ΕΙΚΟΝΑ 17: TYPES OF FIBERS.....	35
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΈΝΑΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ WDM ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΟ ΣΕ ΣΗΜΕΙΟ.....	36
ΕΙΚΟΝΑ 19: THE FABRY-PEROT RESONATOR CAVITY.....	36
ΕΙΚΟΝΑ 20:THE ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIER.....	37
ΕΙΚΟΝΑ 21: A TWO-STAGE EDFA.....	38
ΕΙΚΟΝΑ 22: A FUSED FIBER 2 × 2 COUPLERS.....	38
ΕΙΚΟΝΑ 23: 2 × 2 WAVEGUIDE COUPLER.....	39
ΕΙΚΟΝΑ 24:ΈΝΑ ΔΙΚΤΥΟ BANYAN ΣΥΖΕΥΚΤΩΝ 3-DB.....	39
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΈΝΑ ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΟΣ ΟΧC.....	40
ΕΙΚΟΝΑ 26: MICRO-MIRRORS 2D MEMS.....	41
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΈΝΑΣ ΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΟΣ OADM.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 28: A 2D MEMS OADM.....	43
ΕΙΚΟΝΑ 29: THE GIMBALED MIRROR.....	43
ΕΙΚΟΝΑ 30: THE 3D MEMS ARCHITECTURE.....	43
ΕΙΚΟΝΑ 31: PN-JUNCTION.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 32: 2× 2 SOA SWITCH.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 33:ΤΥΠΟ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	45
ΕΙΚΟΝΑ 34:Η ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ SONET STS-1.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 35:ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΗΣ SPE.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 36: ΈΝΑ ΑΠΛΟ ΔΙΚΤΥΟ SONET.....	49
ΕΙΚΟΝΑ 37: THE SONET STACKS.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 38: ΤΟ ΤΜΗΜΑ ΚΑΙ Η ΓΡΑΜΜΗ ΕΝΑΕΡΙΩΝ BYTE.....	51
ΕΙΚΟΝΑ 39: THE PATH OVERHEAD (POH) BYTES.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 40: MAPPING ATM CELLS IN THE STS-1 SPE.....	54
ΕΙΚΟΝΑ 41: PACKET OVER SONET (POS).....	55
ΕΙΚΟΝΑ 42: THE CHANNELIZED STS-3 FRAME.....	55
ΕΙΚΟΝΑ 43:Η SONET TM ΚΑΙ Η ADM.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 44: A SONET RING.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 45:ΈΝΑΣ ΚΟΜΒΟΣ ΨΗΦΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ (DCS).....	58
ΕΙΚΟΝΑ 46: SONET/SDH RINGS.....	59
ΕΙΚΟΝΑ 47: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ UPSR 2F.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 48: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2F-BLSR.....	62
ΕΙΚΟΝΑ 49: AN EXAMPLE OF A 4F-BLSR.....	63
ΕΙΚΟΝΑ 50: SPAN SWITCHING BETWEEN ADM DEVICES 2 AND 3.....	63
ΕΙΚΟΝΑ 51: AN EXAMPLE OF RING SWITCHING.....	63

ΕΙΚΟΝΑ 52: REROUTING OF A CONNECTION.....	63
ΕΙΚΟΝΑ 53: THE GFP STACK.....	64
ΕΙΚΟΝΑ 54: OTN HIERARCHY.....	66
ΕΙΚΟΝΑ 55: OTN HIERARCHY.....	67
ΕΙΚΟΝΑ 56: OTN (G.709) FRAME (A) STRUCTURE SHOWING THE LOCATION OF THE OVERHEAD BYTES, AND.....	68
ΕΙΚΟΝΑ 57: GFP RELATIONSHIP WITH CLIENTS AND OPTICAL TRANSPORT PATHS.....	71
ΕΙΚΟΝΑ 58: GFP FRAME STRUCTURE.....	71
ΕΙΚΟΝΑ 59: ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ETHERNET.....	73
ΕΙΚΟΝΑ 60: THE IPV4 HEADER.....	74
ΕΙΚΟΝΑ 61: THE IP ADDRESS CLASSES.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 62: LABEL ENCAPSULATION.....	80
ΕΙΚΟΝΑ 63: ΤΟΜΕΙΣ MPLS, LSR ΚΑΙ ΚΟΜΒΟΙ MPLS.....	80
ΕΙΚΟΝΑ 64: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΝΑΛΛΑΓΗΣ ΕΤΙΚΕΤΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ.....	80
ΕΙΚΟΝΑ 65: LABEL SWITCHED PATHS.....	83
ΕΙΚΟΝΑ 66: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΟΙΒΑΣ ΕΤΙΚΕΤΩΝ.....	86
ΕΙΚΟΝΑ 67: THE HIERARCHY OF THE FOUR TYPES OF INTERFACES.....	89
ΕΙΚΟΝΑ 68: AN EXAMPLE OF HIERARCHICAL LSPS.....	89
ΕΙΚΟΝΑ 69: THE INFORMATION CARRIED IN A GENERALIZED LABEL REQUEST.....	90
ΕΙΚΟΝΑ 70: ΟΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΣΤΗ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΕΤΙΚΕΤΑ.....	92
ΕΙΚΟΝΑ 71: ΟΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΣΕΤ ΕΤΙΚΕΤΩΝ.....	92
ΕΙΚΟΝΑ 72: ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΣΤΙΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	93
ΕΙΚΟΝΑ 73: THE CR-LDP GENERALIZED LABEL REQUEST TLV.....	94
ΕΙΚΟΝΑ 74: THE CR-LDP GENERALIZED LABEL TLV.....	94
ΕΙΚΟΝΑ 75: THE CR-LDP LABEL SET TLV.....	94
ΕΙΚΟΝΑ 76: THE ESTABLISHMENT OF A CR-LDP.....	94
ΕΙΚΟΝΑ 77: THE RSVP-TE GENERALIZED LABEL REQUEST OBJECT.....	95
ΕΙΚΟΝΑ 78: THE RSVP-TE GENERALIZED LABEL OBJECT.....	95
ΕΙΚΟΝΑ 79: THE RSVP-TE LABEL SET OBJECT.....	95
ΕΙΚΟΝΑ 80: 800G MAC HIGH-LEVEL BLOCK DIAGRAM.....	96
ΕΙΚΟΝΑ 81: ΟΚΤΩ ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΙΝΕΣ ΑΠΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (PSM).....	98
ΕΙΚΟΝΑ 82: HIGHT-ORDER MODULATION-CONSTELLATION DIAGRAMS.....	99
ΕΙΚΟΝΑ 83: Α) ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΑΛΜΟΥ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΣΤΑ 1000 PS/NM ΚΑΙ 350.000 PS/NM, ΜΟΝΟΥ ΦΟΡΕΑ 95,6 GBAUD Β) ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ ΦΑΣΗΣ 0,1 ΜΗΖ.....	102
ΕΙΚΟΝΑ 84: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΠΟΙΝΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΦΑΣΗΣ ΓΙΑ (Α) 8QAM (Β) 16QAM ΜΕ ΠΛΑΤΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΛΕΙΖΕΡ 100 ΚΗΖ.....	103
ΕΙΚΟΝΑ 85: ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΜΟΝΟ ΦΟΡΕΑ (Α) ΚΑΙ ΕΝΟΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΥΠΟΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ 8×11.95 GBAUD (Β).....	105
ΕΙΚΟΝΑ 86: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ PS ENC/DEC SNR ΕΝΑΝΤΙ ΜΗΚΟΥΣ ΚΩΔΙΚΟΣ ΛΕΞΗΣ.....	106
ΕΙΚΟΝΑ 87: 6 BIT/(2 ΠΟΛ- ΣΥΜΒΙΩΣΗ) 8BIT/(2 ΠΟΛ-ΣΥΜΒΙΩΣΗ).....	107
ΕΙΚΟΝΑ 88: 10ΜΠΙΤΣ / (2 ΠΟΛ- ΣΥΜΒΙΩΣΗ) 11. 25ΜΥΤΕΣ / (2 ΠΟΛ- ΣΥΜΒΙΩΣΗ).....	107
ΕΙΚΟΝΑ 89: ΚΕΡΔΟΣ SNR ΤΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ PS ΕΝΑΝΤΙ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ QAM.....	108
ΕΙΚΟΝΑ 90: ΠΑΛΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΓΙΑ ΕΝΑΝ ΜΟΝΟ ΦΟΡΕΑ ΕΝΑΝΤΙ 8 SUB-CARRIER.....	109
ΕΙΚΟΝΑ 91: FDE BLOCK DIAGRAM: (A) FOR THE SINGLE CARRIER; (B) FOR DIGITAL SUB-CARRIER MULTIPLEXING.....	110
ΕΙΚΟΝΑ 92: LDPC SD-FEC EXPERIMENT USING 28 NM ASIC.....	112
ΕΙΚΟΝΑ 93: LDPC SD-FEC EXPERIMENT USING 7 NM 800G ASIC.....	113
ΕΙΚΟΝΑ 94: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ASIC 2×800 GB/S 7 NM.....	113
ΕΙΚΟΝΑ 95: 4: SYSTEM Q BENEFIT OF SUPER-GAUSSIAN PS SIGNALS.....	114
ΕΙΚΟΝΑ 96: SUB-CARRIER WATER-FILLING USING PS MODULATION.....	115

EIKONA 97: 1.6 TB/S DCO. BOUNDING BOX 1 HIGHLIGHTS THE HYBRID INTEGRATED 2-WAVELENGTH ELECTRO-OPTICAL MODULE, WHILE. BOUNDING BOX 2 HIGHLIGHTS THE 2x800G DSP ASIC. ..	115
EIKONA 98:A) EXPERIMENTALLY MEASURED OPTICAL SPECTRUM AT THE OUTPUT OF THE DCO B) EXPERIMENTALLY MEASURED PSD OF THE RECEIVED SIGNAL AS REPORTED BY THE DSP ASIC. C) EXPERIMENTALLY MEASURED B2B Q-FACTOR FOR A SINGLE OPTICAL CHANNEL OPERATING AT 800 GB/S 95.6 GBAUD PS-64QAM. ....	116
EIKONA 99: EXPERIMENTALLY MEASURED 800 GB/S 95.6 GBAUD PS-64QAM CONSTELLATIONS FOR 8 SUB-CARRIERS PER POLARIZATION WHEN THE DCO IS OPERATED IN FULL OPTICAL LOOP-BACK. THE TOP ROW IS THE XPOL, WHILE THE BOTTOM ROW IS THE YPOL. THE CONSTELLATIONS ARE ORDERED AS SHOWN IN EIKONA 108 (B). ....	117
EIKONA 100: A) FULL C-BAND TRANSMISSION TEST BED. (B) WDM OPTICAL SPECTRUM WITH A SINGLE REAL-TIME 95.6 GBAUD PS-64QAM CHANNEL LOCATED AT THE CENTER OF THE C-BAND, WITH ASE AGGRESSORS. (C) CORRESPONDING X- AND Y-POL CONSTELLATIONS AFTER TRANSMISSION OVER 1000 KM OF CORNING® TXF® FIBER.....	118
EIKONA 101:POH 800G PCS TX .....	122
EIKONA 102:FOREWORD – EXCERPT IEEE 802.3 ETHERNET BWA .....	122
EIKONA 103: BANDWIDTH CURVES (2017-2025) .....	123
EIKONA 104:COMPARISON OF FORM FACTOR ADOPTION (200GBE / 400GBE / 800GBE).....	123
EIKONA 105:THE RELATIONSHIP BETWEEN ETHERNET & SIGNALING RATES.....	124
EIKONA 106:GROWING ACCEPTANCE OF X8 SOLUTION. ....	125
EIKONA 107:ΑΝΑΠΤΥΞΗ 800 GBE / 1,6 TB ΣΕ ΞΕΧΩΡΙΣΤΑ ΕΡΓΑ "NEXT SPEED". ....	125
EIKONA 108:WHERE WOULD 1.6 TB MAKE SENSE IN HYPER-SCALE DATA CENTERS .....	125

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 1:</b> ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΠΥΡΗΝΑ(CORE) /ΕΠΈΝΔΥΣΗ(CLADDING).....	29
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 2:</b> SONET/SDH HIERARCHY.....	46
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 3:</b> ΤΙΜΕΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΟΤΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΓΡΑΜΜΗΣ SONET/SDH .....	64
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 1:</b> ALLOCATION OF ADDRESSES PER REGION.....	77
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 2:</b> ΕΓΓΡΑΦΗ FEC ΣΕ ΚΑΘΕ LFIB. ....	82
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 3:</b> ΚΑΤΑΧΩΡΙΣΗ FEC ΣΕ ΚΑΘΕ LFIB ΜΕ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΕΤΙΚΕΤΑΣ .....	82
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 5 1:</b> IEEE 802.3 ETHERNET OPTICAL LANDSCAPE (BASED ON >=50 GB/S SIGNALING PER LANE, EXCLUDING ZR) .....	124
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 5 2:</b> IEEE 802.3 ETHERNET OPTICAL LANDSCAPE (BASED ON >=50 GB/S SIGNALING PER LANE, EXCLUDING ZR) .....	124

**ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ**

ADM	Add-drop multiplexers	=	πολυπλέκτης προσθήκης/απόθεσης
ANSI	American National Standards Institute	=	Αμερικανικό Εθνικό Ίδρυμα Προτυποποίησης
ASE	Amplified Spontaneous Emission	=	Ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή
ATM	Asynchronous Transfer Mode	=	Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης
AUI	Attachment Unit Interface	=	Διεπαφή μονάδας προσάρτησης
AWGN	Additive white Gaussian noise	=	Πρόσθετος λευκός Gaussian θόρυβος
ADC	Analog-to-digital converter	=	Μετατροπέας Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό
ATM	Asynchronous Transfer Mode	=	Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης
ARP	Address Resolution Protocol	=	Πρωτόκολλο Ανάλυσης Διεύθυνσης
APS	Automatic protection switching	=	Αυτόματη μεταγωγή προστασίας Ethernet
BER	Bit Error Rate		Ποσοστό Σφάλματος bit
BDI	Backward Defect Indication	=	Ένδειξη οπισθοδρομικού ελαττώματος
BLSR	Bidirectional Line-Switched Ring	=	Αμφίδρομος Δακτύλιος Μεταγωγής Γραμμής
BPSR	Bidirectional Path-Switched Ring	=	Αμφίδρομος Δακτύλιος Μεταγωγής Διαδρομής
BICM	Bit-Interleaved Coded Modulation	=	Κωδικοποιημένη διαμόρφωση με παρεμβολή bit
BER	Bit Error Rate	=	Ρυθμός Σφαλμάτων
BGP	Border Gateway Protocol	=	Πρωτόκολλο Εξωτερικής Πύλης
Byte	unit of digital information	=	Μονάδα Ψηφιακών Πληροφοριών
CPU	Central Processing Unit	=	Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας
CIDR	Classless Inter-domain Routing	=	Δρομολόγηση μεταξύ τομέων χωρίς κατηγορία
CR-LDP	Constraint-based Routed Label Distribution Protocol	=	Πρωτόκολλο διανομής ετικετών δρομολόγησης βάσει περιορισμών
CRC	Cyclic Redundancy Check	=	Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού
CAGR	The compound annual growth rate	=	Σύνθετος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης
CATV	Cable TV	=	Καλωδιακή Τηλεόραση
CCDM	Constant Composition Distribution Matcher	=	Σταθερή Αντιστοίχιση Κατανομής Σύνθεσης
CDF	Client-Computer Data Framework	=	Πλαίσιο Δεδομένων Υπολογιστή-Πελάτη
CMF	Customer Management Framework	=	Πλαίσιο Διαχείρισης Πελατών
CoS	Class-Of-Service	=	Κατηγορία Υπηρεσίας
DAC	Digital To-Analog Converter	=	Μετατροπέας Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό
DCI	Data Center Interconnect	=	Διασύνδεση Κέντρου Δεδομένων
DCS	Digital Cross-Connect System	=	Ψηφιακό Σύστημα Διασύνδεσης
DCO	Digital Coherent Optics	=	Ψηφιακή Συνεκτική Οπτική
DLCI	Data Link Connection Identifier	=	Αναγνωριστικό Σύνδεσης Συνδέσμου Δεδομένων
DSP	Digital Signal Processing	=	Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος
DSL	Digital Subscriber Line		Ψηφιακή Γραμμή Συνδρομητή
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	=	Πολυπλεξία Πυκνής WDM
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	=	Ενισχυτής σε Οπτική Ίνα με Προσμίξεις Ερβίου
EEPN	Equalization Enhanced Phase Noise	=	Θόρυβος φάσης ενισχυμένος με εξισορρόπηση
ETC	Ethernet Technology Consortium		Κοινοπραξία Τεχνολογίας Ethernet
2F-UPSR	2 Fibre Unidirectional Path-Switched Ring	=	Μονοκατευθυντικός Δακτύλιος Μεταγωγής Μονοπατιού 2 Ινών
2F-BLSR	2 Fibre Bidirectional Line-Switched Ring	=	Αμφίδρομος Δακτύλιος Μεταγωγής Γραμμής Δύο Ινών
4F-BLSR	4 Fibre Bidirectional Line-Switched Ring	=	Αμφίδρομος Δακτύλιος Μεταγωγής Γραμμής Τεσσάρων Ινών
FAS	Frame Alignment Signal	=	Σήμα Ευθυγράμμισης Πλαισίου
FCS	Frame Check Sequence		Πλαισίου Ελέγχου Ακολουθίας

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

FDDI	Fiber Distributed Data Interface	=	Διεπαφή Διανομής Δεδομένων μέσω Οπτικής Ύλας
FDM	Frequency Division Multiplexing	=	Πολυπλεξία Διάρθρωσης Συχνότητας
FEC	Forward Error Correction	=	Πρόσθια Διόρθωση Σφαλμάτων
FIB	Forwarding Information Base		Βάση Πληροφοριών Προώθησης
FSC	Fiber Switch Capable		Δυνατότητα Διακόπτη Ινών
FICON	Fiber Optic Connection	=	Σύνδεση Οπτικών Ινών
FFT	Fast Fourier Transform	=	Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier
FTFL	Fault Type and Fault Location	=	Τύπος Βλάβης και Θέση Σφάλματος
GCC	General Communications Channel	=	Γενικό Κανάλι Επικοινωνίας
GFP-T	Transparent-Mapped GFP	=	GFP με Διαφανή Χαρτογράφηση
GFP-F	Frame-Mapped GFP	=	Πλαίσιο Χαρτογράφησης GFP
GFP	Generic Framing Procedure	=	Διαδικασία Πλαισίωσης
G-PID	Generalized Payload Identifier		Γενικευμένο Αναγνωριστικό Ωφέλιμου Φορτίου
GS	General Schedule	=	Γεωμετρική Διαμόρφωση
HDLC	High-Level Data Link Control	=	Έλεγχος Διασύνδεσης Δεδομένων Υψηλού-Επιπέδου
HEC	Head Error Check	=	Κεφαλίδα Έλεγχου Σφαλμάτων
IAE	Incoming Alignment Error	=	Εισερχόμενο Σφάλμα Ευθυγράμμισης
IETF	Internet Engineering Task Force	=	Ομάδα Εργασίας Μηχανικών Διαδικτύου
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering	=	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
ICMP	Internet Control Message Protocol	=	Πρωτόκολλο μηνυμάτων ελέγχου Διαδικτύου
IHL	Internet Header Length	=	Μήκος κεφαλίδας Διαδικτύου
IP	Internet Protocol	=	Πρωτόκολλο Διαδικτύου
IPv6	composed of 128-bit address length and is the latest updated version of the Internet Protocol (IP)	=	Αποτελείται από μήκος διεύθυνσης 128 bit και είναι η πιο πρόσφατη ενημερωμένη έκδοση του Πρωτοκόλλου Διαδικτύου (IP)
IPv4	composed of 32-bit address length and is the fourth version of the Internet Protocol (IP)	=	Αποτελείται από μήκος διεύθυνσης 32 bit και είναι η τέταρτη έκδοση του Πρωτοκόλλου Διαδικτύου (IP)
LCAS	Link Capacity Adjustment Scheme	=	Σχέδιο Προσαρμογής Χωρητικότητας Συνδέσμων
LED	Light Emitting Diode	=	Δίοδος Εκπομπής Φωτός
LFIB	Label Forwarding Information Base	=	Βάση Πληροφοριών Προώθησης Ετικετών
LWPF	Low Water Peak Fibers	=	Ίνες Αιχμής Χαμηλού Νερού
LTE	Line Termination Equipment		Εξοπλισμός Τερματισμού Γραμμής
LOH	Line Overhead	=	Επικεφαλής Γραμμής
LSC	Lambda Switch Capable	=	Δυνατότητα Διακόπτη Λάμδα
LSR	Label Switching Routers	=	Δρομολογητές Μεταγωγής Ετικετών
MAC	Medium Access Control	=	Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου
MDC	Major Diagnostic Category	=	Μείζονες Διαγνωστικές Κατηγορίες
MEMS	Microelectromechanical Systems	=	Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα
MFAS	Multi-Frame Alignment Signal	=	Σήμα Ευθυγράμμισης Πολλαπλών Πλαισίων
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output	=	Πολλαπλή Είσοδος και Πολλαπλή Έξοδος
MMF	Multi-Mode Fiber	=	Πολύτροπη Οπτική Ύλα
MPLS	Multiprotocol Label Switching	=	Εναλλαγή Ετικετών Πολλαπλών Πρωτοκόλλων
MPO	Metropolitan Planning Organization	=	Μητροπολιτικός Οργανισμός Σχεδιασμού
MTU	Maximum Transport Unit	=	Μέγιστη Μονάδα Μετάδοσης
MSA	Multiple System Atrophy	=	Ατροφία Πολλαπλών Συστημάτων
NDF	Negative Scattering Fiber	=	Αρνητική Διασπορά Ύλα
NHLFE	Next Hop Tag Forwarding Entry	=	Μια Επόμενη Καταχώρηση Προώθησης Ετικετών hop



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

NZDF	NON ZERO DISPERSION FIBER	=	Ίνα Μη Μηδενικής Μετατόπισης Διασποράς
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer	=	Πολυπλέκτης και Φίλτρο Πρόσθεσης/Εξαγωγής
OBS	Optical Burst Switched	=	Οπτική Μεταγωγή Ριπής
OC	Optical Carrier	=	Οπτικός Φορέας
OCh	Optical Channel	=	Οπτικό Κανάλι
ODU	Optical Data Unit	=	Μονάδα Οπτικών Δεδομένων
OMS	Optical Multiplex Section	=	Τμήμα Οπτικής Πολυπλεξίας
OPU	Optical Channel Payload Unit	=	Μονάδα Οπτικού Μονοπατιού
OSFP	Octal Small Form Factor Pluggable	=	Octal Small Form Factor Pluggable
OIF	Optical Internetworking Forum	=	Φόρουμ Οπτικής Εργασίας στο Διαδίκτυο
OXC	Optical Cross-Connects	=	Οπτικές Διασταυρούμενες Συνδέσεις
PCM	Pulse-Code Modulation	=	Διαμόρφωση Με Βάση Κωδικούς Παλμών
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy	=	Πλησιόχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία
PDU	Power Distribution Unit	=	Μονάδα Διανομής Ρεύματος
PHY	Physical layer	=	Φυσικό Επίπεδο
PIM	Protocol Independent Multicast	=	Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης Πολλαπλής Διανομής
PMA	Physical Medium Attachment	=	Αρχιτεκτονική Φυσικού Μέσου Προσκόλλησης
PMD	Physical Medium Dependent	=	Εξαρτάται Από Φυσικό Μέσο
PNNI	Private Network-to-Network Interface	=	Ιδιωτική Διεπαφή Δικτύου Σε Δίκτυο
POF	Plastic Optical Fibers	=	Πλαστική Οπτική Ίνα
PDU	Power Distribution Unit	=	Μονάδα Διανομής Ρεύματος
PHY	Physical layer	=	Φυσικό Επίπεδο
PIM	Protocol Independent Multicast	=	Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης Πολλαπλής Διανομής
PMA	Physical Medium Attachment	=	Αρχιτεκτονική Φυσικού Μέσου Προσκόλλησης
PMD	Physical Medium Dependent	=	Εξαρτάται Από Φυσικό Μέσο
PNNI	Private Network-to-Network Interface	=	Ιδιωτική Διεπαφή Δικτύου Σε Δίκτυο
PoS	Packet Over SONET	=	Πακέτο Μέσω SONET
PLI	Field Length Identifier	=	Αναγνωριστικό Μήκους Πεδίου
PSC	Packet Switching Capability	=	Δυνατότητα Μεταγωγής Πακέτων
PPP	Point-to-Point Protocol	=	Πρωτόκολλο Σημείου-προς-Σημείο
PSM	Process Safety Management	=	Διαχείριση Ασφάλειας Διεργασιών
PTE	Path Terminating Equipment	=	Εξοπλισμός Τερματισμού Διαδρομής
PMMA	Polymethyl Methacrylate	=	Μεθακρυλικός Πολυμεθυλεστέρας
PNNI	Private Network-to-Network Interface	=	Ιδιωτική Διεπαφή Δικτύου Σε Δίκτυο
POF	Plastic Optical Fibers	=	Πλαστική Οπτική Ίνα
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	=	Ορθογώνια Διαμόρφωση Πλάτους
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	=	Ορθογώνια (Διαμόρφωση) Φάσης
RARP	Reverse Address Resolution Protocol	=	Πρωτόκολλο Επίλυσης Αντίστροφης Διεύθυνσης
RSVP-TE	Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering	=	Πρωτόκολλο Κράτησης Πόρων-Τεχνική Κυκλοφορίας
SAN	Storage Area Networks	=	Δίκτυα Περιοχών Αποθήκευσης
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	=	Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία
SMF	Single Mode Fiber	=	Μονότροπη Οπτική Ίνα
SNR	Signal-to-Noise Ratio	=	Λόγος Σήματος προς Θόρυβο
SOH	Section Overhead	=	Εναέριας Κυκλοφορίας
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	=	Ημιαγωγικός Οπτικός Ενισχυτής
SONET	Synchronous Optical Network	=	Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο
SiO2	Silicon dioxide	=	Διοξείδιο Του Πυριτίου
SPE	Synchronous Payload Envelope	=	Σύγχρονος Φάκελος Ωφέλιμου Φορτίου
STM	Synchronous Transport Module	=	Μονάδα Σύγχρονης Μεταφοράς

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

SSMF	Standard Single-Mode Fiber	=	Μονότροπη οπτική ίνα
STS	Synchronous Transport Signal	=	Σήμα Σύγχρονης Μεταφοράς
TCP	Transmission Control Protocol	=	Πρωτόκολλο Ελέγχου Μεταφοράς
TDM	Time Division Multiplexing	=	Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου
TSI	Time Slot Interchanger		Εναλλάκτης Χρονοθυρίδων
TLV	Type-Length-Value	=	Τύπος-μήκος-τιμή
TTI	Trail Trace Identifier	=	Αναγνωριστικού Μήνυμα
TOH	Transport Overhead		Γενικά Έξοδα Μεταφοράς
UDP	User Datagram Protocol	=	Πρωτόκολλο Δεδομένων Χρήστη
ULSR	Unidirectional Line-Switched Ring	=	Μονοκατευθυντικός Δακτύλιος Μεταγωγής Γραμμής
UPSR	Unidirectional Path-Switched Ring	=	Μονοκατευθυντικός Δακτύλιος Μεταγωγής Μονοπατιού
VT	Virtual tributary	=	Εικονικοί Παραπόταμοι
VCAT	Virtual Concatenation	=	Εικονική Συνένωση
VC	Venture Capital	=	Επιχειρηματικών Κεφαλαίων
VPN	Virtual private networks	=	Εικονικό Ιδιωτικό Δίκτυο
VCEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser	=	Laser Εκπομπής Κάθετης Κοιλότητας
WDM	Wavelength-Division Multiplexing	=	Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος
	Actuator	=	Ενεργοποιητή
	Attenuation	=	Εξασθένηση
	Amplifiers	=	Ενισχυτές
	Angle Of Incidence	=	Γωνίας Πρόσπτωσης
	Broadcast	=	Αναμετάδοση
	Concatenated Channel	=	Συνενωμένο Κανάλι
	Combiner	=	Συνδυαστής
	Coupler	=	Συζεύκτη
	Chromatic Dispersion	=	Χρωματική Διασπορά
	Cladding	=	Επένδυση
	Critical Angle	=	Κρίσιμη Γωνία
	Demultiplexer	=	Αποπολυπλέκτης
	Dspersion Compensating	=	Αντισταθμιστικής Ίνας Διασποράς
	Directional Coupler	=	Κατευθυντικός Συζεύκτης
	Dispersion	=	Διασπορά
	Dispersion Compensating	=	Αντισταθμισσης Διασποράς
	External Conflict	=	Εξωτερική Σύγκρουση
	Graded-Index Multi-Mode	=	Πολλαπλό Τρόπο λειτουργίας Διαβαθμισμένου Δείκτη ίνας
	Graded-Index	=	Διαβαθμισμένου Δείκτη
	Hierarchy	=	Ιεραρχία
	Impairments	=	Απώλειές
	Incident Ray	=	Προσπίπτουσα Ακτίνα
	Incidence Angle	=	Γωνία Πρόσπτωσης
	Interface	=	Διεπαφή
	Line Overhead	=	Εναέρια Διαδρομή
	Launch Angle	=	Γωνία Εκτόξευσης
	Modal Dispersion	=	Τροπική Διασπορά
	Multi-Mode	=	Πολλαπλών Λειτουργιών
	Multiplexed	=	Πολυπλέκτης
	Regenerators	=	Αναγεννητών
	Reflected Ray	=	Ανακλώμενης Ακτίνας

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Re-Shaping	=	Αναδιαμόρφωση
Resonator Cavity	=	Κοιλότητα Αντηχείου
Refracted Angle	=	Διαθλασμένη Γωνία
Photonic Layer	=	Φωτονικό Στρώμα
Pre-Amplified	=	Προ-Ενισχύεται
Parabolic Refractive Index	=	Δείκτη Παραβολικής Διάθλασης
Photodetector	=	Φωτοανιχνευτής
Packet-Switching Networks	=	Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων
Polarization Mode Dispersion	=	Τρόπου Πόλωσης Διασπορά
Silicon Wafer	=	Γκοφρέτα Πυριτίου
Semiconductor	=	Ημιαγωγών
Self-Phase Modulation	=	Αυτό-Φασική Διαμόρφωση
Semiconductor lasers	=	Λείζερ Ημιαγωγών
Single-Mode	=	Μονής Λειτουργίας
Star Coupler	=	Συζεύκτης Αστεριών
Self-Healing	=	Αυτοθεραπευόμενοι
Step-Index	=	Δείκτης Βαθμίδας
Switch Fabric	=	Οπτικού Διακόπτη
Subfield	=	Υποπεδίο
Optical Amplifiers	=	Οπτικοί ενισχυτές
Traveling Upwards	=	Ταξιδεύει Προς τα Πάνω
Traveling Downwards	=	Ταξιδεύει Προς τα Κάτω
Transmit Uncompressed	=	Ασυμπιεστη Φωνή
Tandem Monitoring	=	Παράλληλη Παρακολούθηση
Time Slots	=	Χρονοθυρίδες
Virtual Tributaries	=	Εικονικοί Παραπόταμοι
Waveguide Coupler	=	Συζεύκτης Κυματοδηγού
Waveguide Dispersion	=	Κυματοδηγός Διασπορά

## Πρώτο Κεφάλαιο : Οπτικές επικοινωνίες και δίκτυα

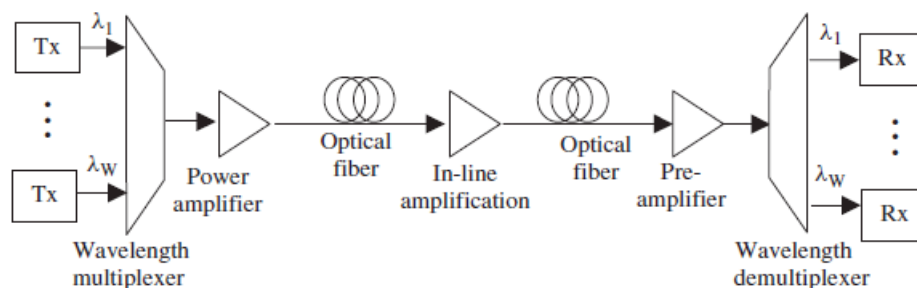
### 1.1 ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ WDM

Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM) αναφέρεται στην τεχνολογία συνδυασμού πολλαπλών μηκών κύματος στην ίδια οπτική ίνα. Κάθε μήκος κύματος είναι διαφορετικό κανάλι. Το WDM είναι το ίδιο με την Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM), η οποία χρησιμοποιείται σε ραδιοκύματα και δορυφορικά συστήματα.

Μια τυπική σύνδεση από σημείο σε σημείο φαίνεται στην Εικόνα 1. Στο τέλος της μετάδοσης, υπάρχουν ανεξάρτητοι πομποί  $W$ . Κάθε πομπός Tx είναι μια πηγή φωτός, όπως ένα λέιζερ και διαμορφώνεται ανεξάρτητα με ροή δεδομένων. Η έξοδος κάθε πομπού είναι ένα οπτικό σήμα σε ένα μοναδικό μήκος κύματος  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, W$ . Τα οπτικά σήματα από τους πομπούς  $W$  συνδυάζονται σε ένα μόνο οπτικό σήμα στο μήκος κύματος (multiplexer) και μεταδίδεται σε μία μόνο οπτική ίνα. Στο άλλο άκρο, το οπτικό σήμα (Demultiplexed) στα μεμονωμένα σήματα  $W$  και το καθένα κατευθύνεται στον κατάλληλο δέκτη (Rx), όπου τερματίζεται και μετατρέπεται στον ηλεκτρικό τομέας. Η ενίσχυση χρησιμοποιείται αμέσως με τον (multiplexer) μήκους κύματος και πριν το (Demultiplexed) μήκους κύματος. Επίσης, εάν η ίνα είναι πολύ μεγάλη, το σήμα ενισχύεται περαιτέρω χρησιμοποιώντας ενισχυτές σε σειρά.

Αυτό το σύστημα από σημείο σε σημείο παρέχει ανεξάρτητα κανάλια  $W$ , όλα ενεργοποιημένα στην ίδια ίνα. Καθώς η τεχνολογία WDM βελτιώνεται, ο αριθμός των μηκών κύματος μπορεί να μεταδοθεί και στην ίδια ίνα. Έτσι, η χωρητικότητα ενός συνδέσμου μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση της τεχνολογίας WDM αντί της προσθήκης νέων ινών. Το τελευταίο είναι σημαντικά πιο δαπανηρή από την αναβάθμιση των στοιχείων που είναι απαραίτητα για την εισαγωγή του WDM.

Πιο σύνθετα οπτικά δίκτυα WDM μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας Οπτικές Διασταυρούμενες Συνδέσεις (OXC).

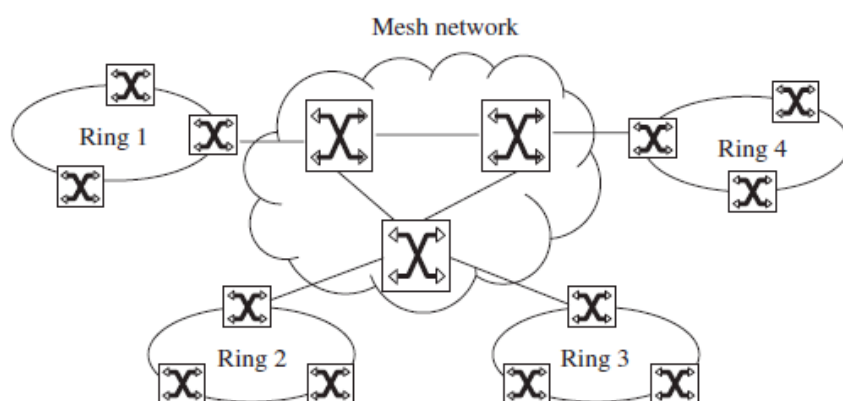


Εικόνα 1: Ένας σύνδεσμος σημείου προς σημείο WDM

Ο OXC είναι ένας οπτικός διακόπτης  $N \times N$ , με  $N$  ίνες εισόδου και  $N$  ίνες εξόδου. Το OXC μπορεί να αλλάξει οπτικά όλα τα εισερχόμενα μήκη κύματος της ίνας εισόδου στα εξερχόμενα μήκη κύματος της ίνας εξόδου, υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν εξωτερικές συγκρούσεις στις ίνες εξόδου. Για παράδειγμα, μπορεί να αλλάξει το οπτικό σήμα στο εισερχόμενο μήκος κύματος  $\lambda_i$  της θύρας εισόδου  $k$  στο εξερχόμενο μήκος κύματος  $\lambda_j$  της θύρας εξόδου  $m$ . Εάν είναι εξοπλισμένο με μετατροπείς, αυτό μπορεί επίσης να αλλάξει το οπτικό σήμα του εισερχόμενου μήκους κύματος  $\lambda_i$  σε άλλο εξερχόμενο μήκος κύματος  $\lambda_j$ .

Ένα OXC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως Optical Add/Drop Multiplexer (OADM). Δηλαδή, Μπορεί να τερματίσει το οπτικό σήμα ενός αριθμού εισερχόμενων μηκών κύματος και να εισάγει νέο οπτικά σήματα στα ίδια μήκη κύματος σε μια θύρα εξόδου. Τα υπόλοιπα μήκη κύματος αλλάζουν όπως περιγράφεται παραπάνω.

Ένα OXC μπορεί να αλλάξει μήκη κύματος με στατικό ή δυναμικό τρόπο. Στη στατική περίπτωση, το OXC έχει ρυθμιστεί ώστε να αλλάζει μόνιμα τα εισερχόμενα μήκη κύματος στο εξερχόμενο μήκος κύματος. Στη δυναμική περίπτωση, το OXC θα αλλάξει ένα συγκεκριμένο εισερχόμενο μήκος κύματος σε εξερχόμενο μήκος κύματος κατ' απαίτηση. Ένα Optical Add/Drop Multiplexer (OADM) μπορεί επίσης να κάνει add/drop στο μήκος κύματος είτε με στατικό τρόπο ή δυναμικά (δηλ. κατ' απαίτηση).



Εικόνα 2: Παράδειγμα Οπτικό Δίκτυο

Ένα τυπικό οπτικό δίκτυο WDM, όπως το διαχειρίζεται μια εταιρεία τηλεπικοινωνιών, αποτελείται από μετρό των δακτυλίων WDM, διασυνδεδεμένο με πλέγμα οπτικό δίκτυο WDM, δηλαδή ένα δίκτυο OXCs αυθαίρετα διασυνδεδεμένο. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου δικτύου απεικονίζεται στο (Εικόνα 2).

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι οπτικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται σε ένα οπτικό δίκτυο WDM, Προχωρούμε τώρα στην εξέταση μερικές από τις βασικές αρχές μετάδοσης φωτός μέσω οπτικής ίνας.

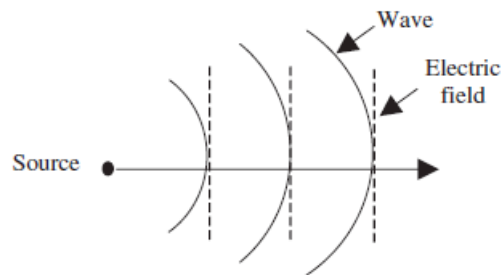
## 1.2 ΠΩΣ ΜΕΤΑΔΙΔΕΤΑΙ ΤΟ ΦΩΣ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

Το φως που ακτινοβολείται από μια πηγή μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από μια σειρά διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών σφαιρικά κύματα. Κατά μήκος κάθε κύματος, μπορεί να μετρηθεί το ηλεκτρικό πεδίο, που υποδεικνύεται στην (Εικόνα 3) από μια διακεκομμένη γραμμή, η οποία είναι κατακόρυφη προς την κατεύθυνση του φως. Το μαγνητικό πεδίο (που δεν φαίνεται στην Εικόνα 3) είναι κάθετο προς το ηλεκτρικό πεδίο.

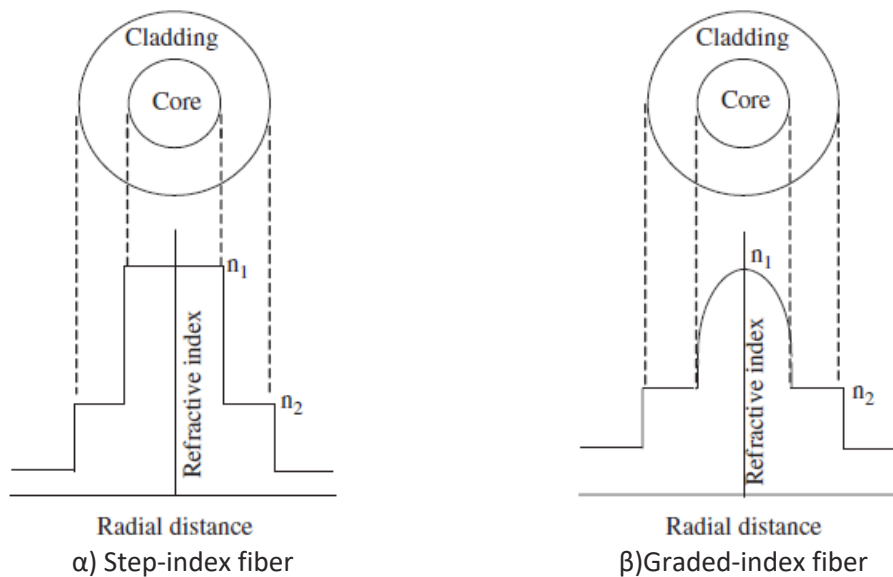
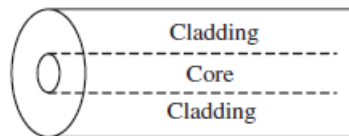
Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται ακολουθώντας μια ημιτονοειδή λειτουργία. Ας σημειώνουμε ένα συγκεκριμένο σημείο, ας πούμε την κορυφή, σε αυτή την ημιτονοειδή λειτουργία. Ο αριθμός πόσες φορές αυτό το συγκεκριμένο σημείο που συμβαίνει ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται συχνότητα. Η συχνότητα μετριέται σε Hertz.. Για παράδειγμα, εάν αυτό το σημείο συμβεί 100 φορές, τότε η συχνότητα είναι 100 Hertz.

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει συχνότητα  $f$ , ταχύτητα  $v$  και μήκος κύματος  $\lambda$ . Στο κενό ή στον αέρα, η ταχύτητα  $v$  είναι περίπου η ταχύτητα του φωτός που είναι  $3 \times 10^8$  meters/sec. Η συχνότητα σχετίζεται με το μήκος κύματος μέσω της έκφρασης:  $v = f \lambda$ . Μια οπτική ίνα αποτελείται από έναν διαφανή κυλινδρικό εσωτερικό πυρήνα που περιβάλλεται με διαφανή επένδυση (Εικόνα 4).

Η ίνα καλύπτεται με πλαστικό προστατευτικό κάλυμμα. Τόσο ο πυρήνας όσο και η επένδυση είναι συνήθως κατασκευασμένα από Διοξείδιο Του Πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), αλλά είναι φτιαγμένο έτσι ώστε να έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Το Διοξείδιο του Πυριτίου εμφανίζεται φυσικά σε ακάθαρτες μορφές, όπως χαλάζι και άμμο. Ο δείκτης διάθλασης ενός διαφανούς μέσου είναι ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό  $c$  προς την ταχύτητα του φωτός σε αυτό το μέσο  $v$ , ότι είναι  $n = c/v$ . Η τιμή του Δείκτη Διάθλασης (Refractive Index) της επένδυσης είναι πάντα μικρότερη από αυτή του τον πυρήνα.



Εικόνα 3: Κύματα και ηλεκτρικά πεδία.

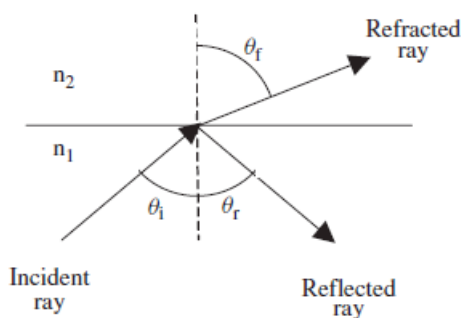


Εικόνα 5: Step-index and graded-index fibers.

Υπάρχουν δύο βασικά προφίλ Δείκτη Διάθλασης (Refractive Index) για οπτικές ίνες : Ο Δείκτης Βαθμίδας (Step-Index) και Ο Διαβαθμισμένου Δείκτη (Graded-Index). Στην ίνα step-index, ο Δείκτης Διάθλασης (Refractive Index), του πυρήνα είναι σταθερός σε όλη τη διάμετρο του πυρήνα. Στην (Εικόνα 5 α), δείχνουμε τη διατομή ενός οπτικού ίνας και κάτω από τον Δείκτη Διάθλασης (Refractive Index) του πυρήνα και της επένδυσης έχει σχεδιαστεί Για λόγους παρουσίασης, η διάμετρος του πυρήνα στην Εικόνα 4 και 5 εμφανίζεται ως πολύ μεγαλύτερο από αυτό της επένδυσης Στην ίνα step-index, ο Δείκτης Διάθλασης (Refractive Index) για τον πυρήνα ( $n_1$ ) παραμένει σταθερός από το κέντρο του πυρήνα στη Διεπαφή (Interface) μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης. Στη συνέχεια πέφτει στο  $n_2$ , μέσα στην επένδυση. Ενόψει αυτής της σταδιακής αλλαγής του Δείκτη Διάθλασης (Refractive Index), αυτό το προφίλ αναφέρεται ως Δείκτης Βαθμίδας (Step-Index). Στην ίνα Διαβαθμισμένου Δείκτη (Graded-Index) , Ο Δείκτης Διάθλασης (Refractive Index) ποικίλλει με την ακτίνα του πυρήνα (Εικόνα 5 b). Στο κέντρο του πυρήνα είναι  $n_1$ , αλλά Στη συνέχεια, πέφτει στο  $n_2$  μετά από μια παραβολική συνάρτηση καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς τη Διεπαφή (Interface) μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης. Ο δείκτης διάθλασης είναι  $n_2$  στο εσωτερικό την επένδυση.

Ας διερευνήσουμε πώς διαδίδεται το φως μέσω μιας οπτικής ίνας. Στην Εικόνα 6, βλέπουμε Μια φωτεινή ακτίνα προσπίπτει υπό γωνία  $\theta_i$  στη διεπαφή μεταξύ δύο μέσων με διάθλαση δείκτες  $n_1$  και  $n_2$ , όπου  $n_1 > n_2$ . Μέρος της ακτίνας διαθλάται – δηλαδή μεταδίδεται μέσω το δεύτερο μέσο – και μέρος του αντανακλάται πίσω στο πρώτο μέσο. Έστω  $\theta_i$  είναι η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας ακτίνας και της διακεκομμένης γραμμής, μια φωτεινή ακτίνα κατακόρυφη γραμμή προς τη Διεπαφή (Interface) μεταξύ των δύο μέσων. Αυτή η γωνία είναι γνωστή ως Γωνία Πρόσπτωσης (Incidence Angle). η Διαθλασμένη Γωνία (Refracted Angle)  $\theta_f$  είναι η γωνία μεταξύ της διαθλασμένης ακτίνας και της κατακόρυφης διακεκομμένης γραμμής. Εμείς έχουμε ότι  $\theta_i < \theta_f$ . Τέλος, η Ανακλώσα Γωνία (Reflected Angle)  $\theta_r$  είναι η γωνία μεταξύ της ανακλώσας ακτίνας και την κάθετη διακεκομμένη γραμμή. Έχουμε ότι  $\theta_r = \theta_i$ .

Είναι ενδιαφέρον ότι υπάρχει μια γωνία  $\theta_c$ , γνωστή ως Κρίσιμη Γωνία (Critical Angle), πέρα από την οποία το περιστατικό το φως θα αντανακλάται εξ ολοκλήρου. Δηλαδή, αν  $\theta_i > \theta_c$ , τότε ολόκληρη η ακτίνα συμβάντος θα Αντανακλάται. Για να μεταδοθεί μια φωτεινή ακτίνα μέσω μιας οπτικής ίνας, πρέπει να χτυπήσει το Διεπαφή (Interface) μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης υπό γωνία  $\theta_i$  η οποία είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία  $\theta_c$ . Για να συμβεί αυτό, η φωτεινή ακτίνα πρέπει να εκτοξευθεί στο τέλος της ίνας υπό γωνία  $\theta_i$ , η οποία είναι μικρότερη από κρίσιμη γωνία  $\theta_c$  (Εικόνα 7(α)). Η γωνία  $\theta_i$  αναφέρεται ως Γωνία Εκτόξευσης (Launch Angle). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν κώνο αποδοχής εντός το οποίο πρέπει να εκτοξευθεί φωτεινή ακτίνα (Εικόνα 7 (β)). Συνήθως, ένας φακός χρησιμοποιείται για εστίαση το εκτοξευόμενο φως σε μια μικρή περιοχή του πυρήνα (Εικόνα 8).



Εικόνα 6: Refraction and reflection of a light ray.





λειτουργίας οπτικών ινών. Ας εξετάσουμε δύο ακτίνες συμβάντος, ακτίνες 1 και 2, τα οποία εκτοξεύονται στην ίνα στην ίδια γωνία εκτόξευσης  $\theta_i$  (Εικόνα 10).

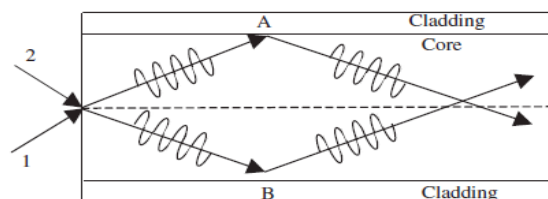
Η Ακτίνα 1 αντανακλάται για πρώτη φορά στο Σημείο Α και η Ακτίνα 2 αντανακλάται στο Σημείο Β. Και γίνεται Ανάκληση της ακτίνας, είτε με μια προσπίπτουσα ακτίνα (incident ray) που εκτοξεύεται στην ίνα είτε μια Ανακλώμενη Ακτίνα (Reflected Ray) έχει μια ηλεκτρικό πεδίο το οποίο είναι κατακόρυφο προς την κατεύθυνση της διαδρομής του. Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο απεικονίζεται στην Εικόνα 10 από την ημιτονοειδή καμπύλη κατά μήκος της διαδρομής της ακτίνας. Για σκοπούς παρουσίασης, υποθέστε μια οπτική ίνα Step-Index. Το ηλεκτρικό πεδίο της Ανακλώμενης Ακτίνας (Reflected Ray) 1 υφίσταται μετατόπιση φάσης στη Διεπαφή (Interface) μεταξύ των πυρήνα και την επένδυση. Αυτή η μετατόπιση φάσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως του Δείκτη Διάθλασης (Refractive Index) του πυρήνα και της Επένδυση (Cladding) και της Γωνία Πρόσπτωσης (Incidence Angle)  $\theta_i$ . Μια παρόμοια μετατόπιση φάσης ισχύει για το ηλεκτρικό πεδίο της ανακλώμενης Ακτίνας 2. Ωστόσο, το ηλεκτρικό πεδίο του συμβάντος Η Ακτίνα 1 που Ταξιδεύει Προς τα Πάνω (Traveling Upwards) βρίσκεται σε φάση με το ηλεκτρικό πεδίο της ανακλώμενης Ακτίνας 2 η οποία επίσης Ταξιδεύει Προς Τα Πάνω (Traveling Upwards). Ομοίως, το ηλεκτρικό πεδίο του Η Προσπίπτουσα Ακτίνα (Incident Ray) 2 που Ταξιδεύει Προς τα Κάτω (Traveling Downwards) βρίσκεται σε φάση με το ηλεκτρικό πεδίο της ανακλώσας Ακτίνας 1 που επίσης Ταξιδεύει Προς τα Κάτω (Traveling Downwards).

Τα ηλεκτρικά πεδία Της Προσπίπτουσα Ακτίνα (Incident Ray) και οι Ανακλώμενης Ακτίνας (Reflected Ray) αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, και ανάλογα με την περίπτωση, είτε ενισχύουν το ένα το άλλο είτε σβήνουν το ένα τον άλλο. Τα ηλεκτρικά πεδία τα δύο προς τα πάνω (Upwards) ή τα δύο Προς τα Κάτω (Downwards) ακτινών που ταξιδεύουν και είναι σε φάση (Εικόνα 10). Ως αποτέλεσμα, ενισχύουν ο ένας τον άλλον. Με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται μια δέσμη φωτός, η οποία καθοδηγείται μέσω του πυρήνα της ίνας. Από την άλλη τα ηλεκτρικά πεδία μιας καθοδικής και μιας ανοδικής κινούμενης ακτίνας βρίσκονται σε φάση, και έτσι παρεμβαίνουν μεταξύ τους και δεν σχηματίζεται δέσμη φωτός. Λόγω αυτών των αλληλεπιδράσεων, τα ηλεκτρικά πεδία ακυρώνουν το ένα το άλλο στη διεπαφή του ο πυρήνα και η επένδυση, αλλά ενισχύουν ο ένας τον άλλον στο κέντρο του πυρήνα.

*Πίνακας 1: Διάμετροι πυρήνα(core) /επένδυση(cladding).*

Fiber type	Core/cladding diameters
Multi-mode fiber	50/125 $\mu\text{m}$ , 62.5/125 $\mu\text{m}$ , 100/140 $\mu\text{m}$
Single-mode fiber	9 or 10/125 $\mu\text{m}$

Η δέσμη φωτός που προκύπτει έχει ένα ηλεκτρικό πεδίο του οποίου το πλάτος ποικίλλει όπως φαίνεται στο (Εικόνα 11),  $m = 0$ . Το σχέδιο του ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται λειτουργία ίνας.

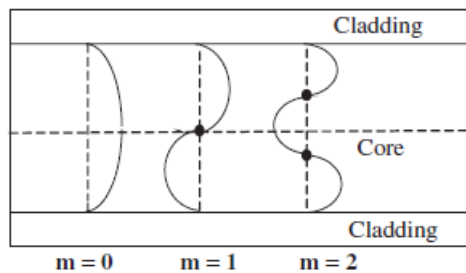


Εικόνα 10: Electric fields.

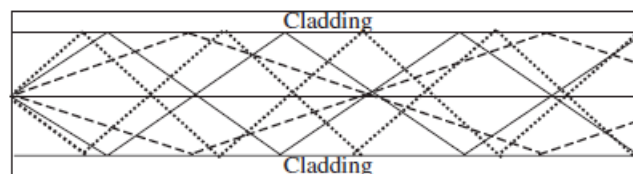
Διαφορετικές λειτουργίες οπτικών ινών μπορούν να δημιουργηθούν εκτοξεύοντας τις δύο ακτίνες σε διαφορετική εκτόξευση γωνία  $\theta_i$  (Εικόνα 10). Το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου για κάθε λειτουργία είναι 0 στο διεπαφή μεταξύ του πυρήνα και της επένδυσης, όπως στην περίπτωση του  $m = 0$ , που συζητήθηκε παραπάνω.

Ωστόσο, μπορούν επίσης να δημιουργηθούν μηδενικά σημεία πλάτους (γνωστά ως μηδενικά σημεία) μέσα στο πυρήνα. Για παράδειγμα, στην (Εικόνα 11), παρουσιάζουμε παραδείγματα του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου σχηματισμένης δέσμης (beam) όπου έχει μηδενικό σημείο στο κέντρο του πυρήνα ( $m = 1$ ) και όπου έχει δύο μηδενικά σημεία μέσα στον πυρήνα ( $m = 2$ ). Σε γενικές γραμμές, οι διαφορετικοί τρόποι σε ένα ηλεκτρικού πεδίου οι ίνες αριθμούνται 0, 1, 2 και ούτω καθεξής. Επίσης, ο αριθμός μιας λειτουργίας είναι ίσος με τον αριθμό μηδενικών σημείων μέσα στον πυρήνα της ίνας που σχετίζεται με τη λειτουργία.

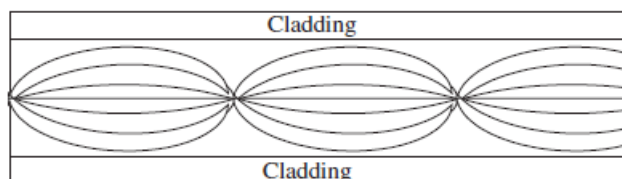
Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 8), ένας φακός χρησιμοποιείται για την εστίαση του εκτοξευόμενου φωτός σε μια μικρή περιοχή του πυρήνα. Ως αποτέλεσμα, να υπάρχουν πολλές διαφορετικές ακτίνες που εισέρχονται στην ίνα σε διαφορετικές γωνίες εκτόξευσης, και έτσι δημιουργούνται και διαδίδονται πολλές διαφορετικές λειτουργίες ινών κάτω από το πυρήνα της ίνας. Με άλλα λόγια, η διάδοση του φωτός μέσω του πυρήνα, γίνεται από την άποψη των διαφορετικών τρόπων διάδοσης όλων των ινών κάτω από τον πυρήνα των ινών. Στην (Εικόνα 12), εμφανίζονται διάφορες λειτουργίες για έναν δείκτη βημάτων (step-index) και μια ίνα Διαβαθμισμένου Δείκτη (Graded-Index).. Η διαδρομή μιας ακτίνας μέσω μιας ίνας δείκτη βημάτων (step-index) είναι μια ευθεία γραμμή μέχρι να αντανακλάται σε μια άλλη ευθεία γραμμή. Από την άλλη, η διαδρομή μιας ακτίνας μέσω μιας ίνας Διαβαθμισμένου Δείκτη (Graded-Index), είναι μια καμπύλη.



Εικόνα 11: Electric field amplitudes for various fiber modes.

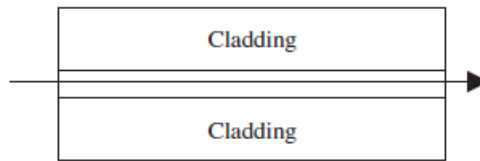


(a) Step-index fiber



(b) Graded-index fiber

Εικόνα 12: Propagation of modes.



Εικόνα 13: Single-mode fiber.

Ο αριθμός των τρόπων λειτουργίας σε μια ίνα σχετίζεται με τη διάμετρο του πυρήνα. Όπως φαίνεται στο (Πίνακας 1), οι ίνες πολλαπλών λειτουργιών έχουν μεγάλη διάμετρο πυρήνα και το φως διαδίδεται μέσω τον πυρήνα σε διαφορετικούς τρόπους, όπως εξηγείται παραπάνω. Ίνες μονής (Single-mode) λειτουργίας (Εικόνα 13) έχουν έναν πυρήνα με πολύ στενή διάμετρο που επιτρέπει μόνο τη διάδοση του μονή ακτίνα με λειτουργία 0 (δηλαδή,  $m = 0$ ).

#### 1.4 Απώλειες (Impairments)

Η μετάδοση του φωτός μέσω μιας οπτικής ίνας υπόκειται σε οπτικά εφέ, γνωστά ως Απώλειες (Impairments). Υπάρχουν γραμμικές και μη γραμμικές Απώλειες. Οι γραμμικές Απώλειες οφείλονται σε εξασθένηση και διασπορά. Εξασθένηση είναι η μείωση της οπτικής ισχύος κατά μήκος της ίνας. Διασπορά είναι η παραμόρφωση την Εικόνα ενός παλμού. Αυτές οι Απώλειες (Impairments) ονομάζονται γραμμικές επειδή η επίδρασή τους είναι ανάλογη με την μήκος της ίνας.

Οι μη γραμμικές Απώλειες μπορεί να οφείλονται στην εξάρτηση του Δείκτη Διάθλασης (Refractive Index) από την ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Τα πιο σημαντικά μη γραμμικά αποτελέσματα σε αυτήν την κατηγορία είναι: αυτό-φασική διαμόρφωση (self-phase modulation) και ανάμειξη τεσσάρων κυμάτων (four-wave mixing). Και μια άλλη κατηγορία μη γραμμικές Απώλειες (Impairments) περιλαμβάνουν τη διεγερμένη σκέδαση Raman και η διεγερμένη σκέδαση Brillouin.

Αυτές οι δύο Απώλειες (Impairments) οφείλονται στις επιδράσεις σκέδασης στο μέσο ιών λόγω της αλληλεπίδραση των φωτεινών κυμάτων (μοριακές δονήσεις) στο πυριτικό μέσο όλες αυτές οι Απώλειες (Impairments) ονομάζονται μη γραμμικές επειδή όταν εμφανίζονται η απόκριση του ένα μέσο όπως το διοξείδιο του πυριτίου, είναι μια μη γραμμική συνάρτηση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού και μαγνητικού πλάτος πεδίου.

#### 1.5 Εξασθένηση & Διασπορά.

##### 1.5.1 Εξασθένηση (Attenuation)

Η εξασθένηση αλλάζει ανάλογα με το μήκος κύματος και ορίζεται σε ντεσιμπέλ ανά χιλιόμετρο. Ένα ντεσιμπέλ (dB) είναι μια μονάδα που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη σχετική διαφορά στην ισχύ του σήματος.

$$\text{Αριθμός ντεσιμπέλ} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_i}{P_0} \right)$$

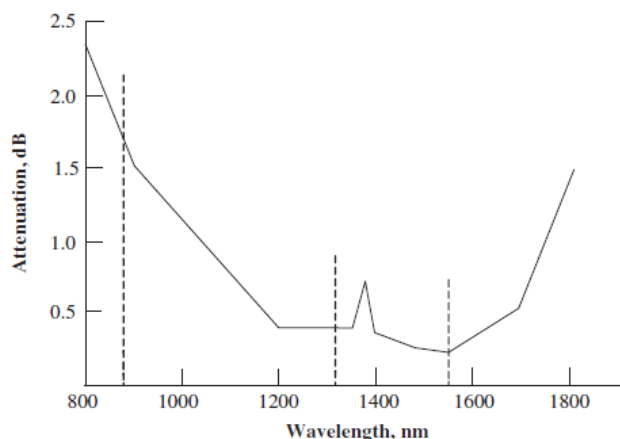
όπου  $P_i$  είναι η είσοδος οπτικής ισχύος στην ίνα και  $P_0$  είναι η έξοδος οπτικής ισχύος από την ίνα. Η εξασθένηση για οποιοδήποτε μήκος ιών είναι  $\alpha_{dB}L$ , όπου  $\alpha_{dB}$  είναι η εξασθένηση

εκφράζεται σε ντεσιμπέλ ανά χιλιόμετρο και  $L$  είναι το μήκος της ίνας. Η εξασθένηση οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως: απορρόφηση, σκέδαση Rayleigh, και αντανάκλασεις λόγω συνδέσεων και συνδέσμων

- Απορρόφηση (Absorption): Το φως απορροφάται καθώς περνά μέσα από την οπτική ίνα.
- Σκέδαση Rayleigh (Rayleigh scattering): Η πυκνότητα των σωματιδίων του πυρήνα δεν είναι πάντα η ίδια λόγω σε ατέλειες της ίνας. Αυτό προκαλεί τη διασπορά του φωτός. Μεγάλα μήκη κύματος έχουν λιγότερη διασπορά.
- Αντανάκλαση από ενώσεις και συνδέσεις: Ένας μακρύς σύνδεσμος ιών αποτελείται συνήθως από πολλά τμήματα που συνδέονται μέσω συνδέσεων. Ενδέχεται επίσης να υπάρχουν συνδέσεις για σύνδεση Χρήστες. Τόσο οι συνδέσεις όσο και οι σύνδεσμοι αντανακλούν πίσω προς την αντίθετη κατεύθυνση της ίνας μέρος του φωτός, μειώνοντας έτσι τη δύναμη του φωτός που κινείται προς τα εμπρός.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η εξασθένηση ποικίλλει ανάλογα με το μήκος κύματος. Το (Εικόνα 14) δίνει την εξασθένηση για μια ίνα ενός τρόπου ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Η εξασθένηση για τα μικρά μήκη κύματος (στρογγυλά 850 nm) είναι περισσότερο από τρεις φορές η εξασθένηση για το μακρύ μήκη κύματος (1300 nm και 1550 nm). Συνήθως, τα παράθυρα Μήκη για οπτικές επικοινωνίες πλησιάζουν τα 850 nm, 1300 nm και Χρησιμοποιούνται 1550 nm.

Η χαμένη ισχύς ενός οπτικού σήματος μπορεί να αποκατασταθεί χρησιμοποιώντας έναν οπτικό ενισχυτή.



Εικόνα 14 : Εξασθένηση ως συνάρτηση του μήκους κύματος.

### 1.5.2 Διασπορά (Dispersion)

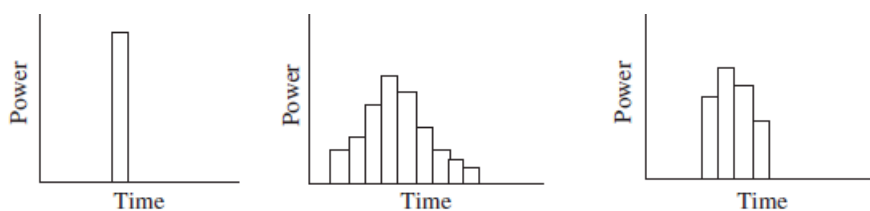
Η διασπορά οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως η Τροπική Διασπορά (Modal Dispersion), η Χρωματική Διασπορά (Chromatic Dispersion), και Τρόπου Πόλωσης Διασπορά (Polarization Mode Dispersion). Η Τροπική Διασπορά (Modal Dispersion) συνδέεται με ίνες πολλαπλών λειτουργιών, όταν το φως εκτοξεύεται στο τέλος της ίνας δημιουργούνται πολλές λειτουργίες ιών και διαδίδονται στον πυρήνα της ίνας.

Τώρα, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 15 (a)), λόγω της διαφορετικές γωνίες στις οποίες οι ακτίνες εισέρχονται στον πυρήνα μιας ίνας Πολλαπλών Λειτουργιών (Multi-Mode), ορισμένες λειτουργίες ταξιδεύουν με μεγαλύτερη απόσταση για να φτάσουν στο τέλος της ίνας από την άλλη από το πρίσμα αυτό, οι τρόποι λειτουργίας έχουν διαφορετικές καθυστερήσεις, γεγονός που προκαλεί διασπορά του παλμού εξόδου (Εικόνα 15 (b)). Η εξάπλωση παλμών αυξάνεται με το μήκος της ίνας. Στην περίπτωση Πολλαπλό Τρόπο λειτουργίας Διαβαθμισμένου Δείκτη ίνας (Graded-Index Multi-Mode) (Εικόνα 15 (c)), η εξάπλωση παλμών είναι ελάχιστη. Αυτό συμβαίνει επειδή στο βαθμολογημένο ευρετήριο

ίνας, οι ακτίνες ταξιδεύουν πιο κοντά στο κέντρο του πυρήνα λόγω του Δείκτη Παραβολικής Διάθλασης (Parabolic Refractive Index). Κατά συνέπεια, οι τρόποι λειτουργίας δεν έχουν σημαντική διαφορά καθυστέρησης. Σε υψηλές ταχύτητες, η εξάπλωση των παλμών μπορεί να προκαλέσει τους παλμούς να έρθουν ο ένας πάνω στον άλλο, μέχρι το σημείο όπου δεν είναι δυνατή η ανάκτηση της ροής δεδομένων. Στην περίπτωση μιας ίνας μονής λειτουργίας, Η παλμική εξάπλωση είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Αυτό συμβαίνει επειδή ο πυρήνας είναι μικρός και μόνο μία ακτίνα μεταδίδεται. Η χρωματική διασπορά οφείλεται στο γεγονός ότι ο Δείκτης Διάθλασης (Refractive Index) του πυριτίου, Αυτό το υλικό χρησιμοποιείται για να φτιάχεται το πυρήνα της ίνας, εξαρτάται από τη συχνότητα. Υπό το πρίσμα αυτό, διαφορετικές οι συχνότητες ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες, με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζουν διαφορετικές καθυστερήσεις, όπως στο την περίπτωση των τρόπων λειτουργίας σε μια ίνα πολλαπλών λειτουργιών. Αυτές οι καθυστερήσεις προκαλούν εξάπλωση στη διάρκεια του παλμού εξόδου.

Η Χρωματική Διασπορά (Chromatic Dispersion) οφείλεται στο γεγονός ότι ο Δείκτης Διάθλασης (Refractive Index) του πυριτίου, είναι το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα της ίνας, εξαρτάται από τη συχνότητα. Ενόψει αυτού, οι συχνότητες ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες και ως αποτέλεσμα να παρουσιάζουν διαφορετικές καθυστερήσεις, όπως στην περίπτωση των τρόπων λειτουργίας σε μια ίνα Πολλαπλών Λειτουργιών (Multi-Mode). Αυτές οι καθυστερήσεις προκαλούν εξάπλωση στη διάρκεια του παλμού εξόδου. Η Χρωματική Διασπορά (Chromatic Dispersion) μετριέται σε  $ps/nm - km$ , όπου  $ps$  αναφέρεται σε χρονική εξάπλωση του παλμού,  $nm$  είναι το φασματικό πλάτος του παλμού και  $km$  αντιστοιχεί σε το μήκος της ίνας. Η Χρωματική Διασπορά (Chromatic Dispersion) συνήθως επισκιάζεται από τη διασπορά του μοντέλου σε ίνες Πολλαπλών Λειτουργιών (Multi-Mode). Αυτός ο τύπος διασποράς ονομάζεται διασπορά υλικού. Η Χρωματική Διασπορά (Chromatic Dispersion) μπορεί να διορθωθεί χρησιμοποιώντας μια ίνα Αντισταθμιστικής Διασποράς (Dispersion Compensating). Το μήκος αυτής της ίνας είναι ανάλογη με τη διασπορά της ίνας μετάδοσης. Περίπου, τοποθετείται ένα πηνίο κάθε 15 km Αντισταθμιστικής Διασποράς (Dispersion Compensating) ίνας για κάθε 80 km μετάδοσης ίνας. Οι Αντισταθμιστικές Διασποράς ίνες εισάγουν εξασθένηση περίπου 0,5 dB/km. Ένας άλλος τύπος διασποράς είναι η διασπορά του κυματοδηγού, η οποία είναι σημαντική μόνο σε ίνες μονής λειτουργίας. Οι ίνες μονής λειτουργίας έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε η διασπορά υλικού και ο Κυματοδηγός Διασπορά (Waveguide Dispersion) ακυρώνουν ο ένας τον άλλον.

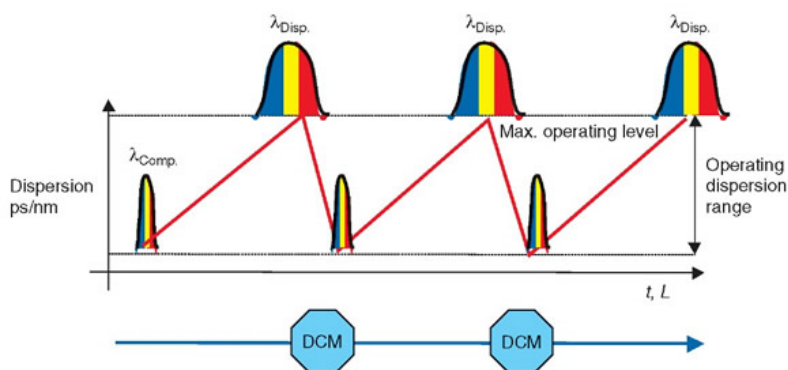
Διασπορά Τρόπων Πόλωσης (Polarization Mode Dispersion) (PMD) οφείλεται στο γεγονός ότι ο πυρήνας της ίνας δεν είναι απόλυτα στρογγυλό. Όταν το φως ταξιδεύει κάτω από μια ίνα μονής λειτουργίας, πολώνεται και ταξιδεύει κατά μήκος δύο επιπέδων πόλωσης που είναι κάθετα μεταξύ τους. Σε μια ιδανική κυκλική συμμετρική ίνα το φως που ταξιδεύει σε κάθε πολωμένο επίπεδο έχει την ίδια ταχύτητα με το φως που ταξιδεύει στο άλλο επίπεδο. Ωστόσο, όταν ο πυρήνας της ίνας δεν είναι στρογγυλός, το φως που ταξιδεύει κατά μήκος ενός επιπέδου μπορεί να ταξιδεύει είτε πιο αργά είτε πιο γρήγορα από το πολωμένο φως κατά μήκος του άλλου επιπέδου. Αυτή η διαφορά στην ταχύτητα θα προκαλέσει το σπάσιμο του παλμού.



Εικόνα 15 : Pulse spreading.

### 1.5.3 Αντιμετώπιση των απωλειών

- Εξασθενεί το σήμα που φτάνει στο δέκτη προκαλώντας υποβάθμιση του λόγου Οπτικός Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (OSNR) – μείωση της εμβέλειας και του ρυθμού μετάδοσης.
- Πως αντιμετωπίζεται; Με τη χρήση αναγεννητών (O/E/O, 3R regenerator) ή οπτικών ενισχυτών (1R regenerator). Η δεύτερη λύση είναι η πιο δημοφιλή διότι επιτυγχάνει την ενίσχυση πολλών μηκών κύματος με μία διάταξη
- Διασπορά Τρόπων Διάδοσης: Με τη χρήση έξυπνου DSP στο δέκτη για αποστάσεις μεγαλύτερες των 1 km και ρυθμούς 1 Gb/s.
- Χρωματική Διασπορά: Με τη χρήση ειδικών ινών αντιστάθμισης διασποράς (επιβάλλουν την αύξηση της ταχύτητας των «αργών» συχνοτήτων και αντίστροφα). Η χρήση DSP
- Διασπορά τρόπων πόλωσης: Με τη χρήση οπτικών ινών χαμηλού συντελεστή διασποράς όπου είναι δυνατό ή τη χρήση έξυπνου DSP στο δέκτη (η τρέχουσα επιλογή στις μέρες μας).



Εικόνα 16: Pulse Spread.

### 1.6 Τύποι ινών (Types of Fibers)

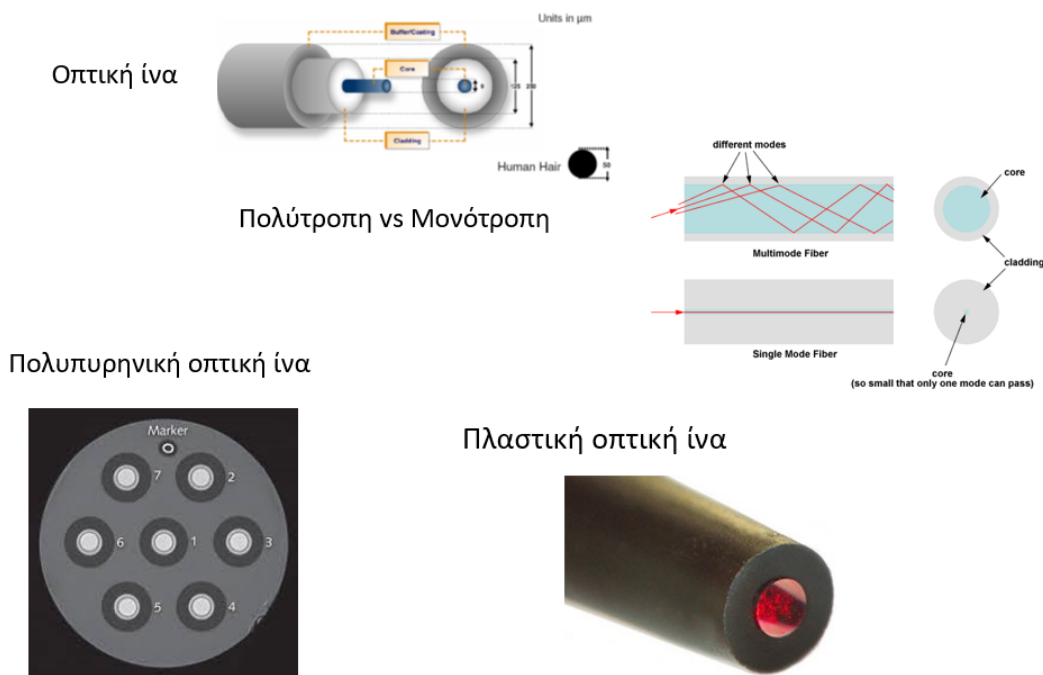
Η ίνα Πολλαπλών Λειτουργιών (Multi-Mode) έχει χρησιμοποιηθεί σε LAN και πιο πρόσφατα σε 1-Gigabit και 10 Gigabit Ethernet. Η συντριπτική πλειοψηφία των εγκατεστημένων ινών πολλαπλών λειτουργιών έχει πυρήνα διάμετρος 62.5μm και λειτουργεί στην περιοχή των 850 nm και 1300 nm. Παρέχει ταχύτητες έως 100 M=mpbs. Ένα μικρό ποσοστό ίνες Πολλαπλών Λειτουργιών (Multi-Mode) τηρεί ένα προηγούμενο πρότυπο το οποίο έχει διάμετρο πυρήνα 50μm και λειτουργεί και στις δύο περιοχές των 850 nm και 1300 nm.

Οι οπτικές ίνες Μονής Λειτουργίας (Single-Mode) χρησιμοποιούνται για υπεραστικές τηλεφωνικές κλήσεις, CATV (Cable television) και δίκτυα μεταγωγής πακέτων.

Τα παρακάτω είναι διαφορετικοί τύποι ινών μονής λειτουργίας (Single-mode), ταξινομημένοι σύμφωνα με την απώλεια και διασποράς τους.

1. Standard Single-Mode Fiber (SSMF): Το μεγαλύτερο μέρος των εγκατεστημένων ινών ανήκει σε αυτήν την κατηγορία. σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει συστήματα μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων και έχει μηδενική διασπορά στα 1310 nm.
2. Non-Zero Dispersion Fiber (NZDF): Αυτή η ίνα έχει μηδενική διασπορά κοντά στα 1450 nm.
3. Negative Scattering Fiber (NDF): Αυτός ο τύπος ινών έχει αρνητική διασπορά στο περιοχή 1300 έως 1600 nm.
4. Low Water Peak Fiber (LWPF): Όπως φαίνεται στην Εικόνα 14, υπάρχει μια κορυφή στην εξασθένιση καμπύλη στα 1385 nm, γνωστή ως κορυφή νερού. Με αυτόν τον νέο τύπο ινών αυτή η κορυφή εξαλείφεται, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση αυτής της περιοχής.

Οι ίνες Μονής Λειτουργίας (Single-Mode) και Πολλαπλών Λειτουργιών (Multi-Mode) είναι δαπανηρές και απαιτούν εξειδικευμένο τεχνικό για εγκατάσταση αυτούς. Η Πλαστική Οπτική Ιαν (Plastic Optical Fibers) (POF) είναι φθηνές και μπορούν να εγκατασταθούν εύκολα από ανεκπαίδευτο άτομο. Τα Plastic Optical Fibers (POF) Εισήχθησαν για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1960, τα POFs έχουν καλή απόδοση αποστάσεις μικρότερες των 30 μέτρων. Ο πυρήνας μιας πλαστικής οπτικής ίνας είναι κατασκευασμένος για γενική χρήση ρητίνη που ονομάζεται Polymethyl Methacrylate (PMMA) είναι γνωστό ως ακρυλικό γυαλί. Ο πυρήνας έχει πολύ μεγάλη διάμετρος – περίπου το 96% της διαμέτρου της επένδυσης. Χρησιμοποιούνται πλαστικές οπτικές ίνες σε διεπαφές ψηφιακών οικιακών συσκευών. οικιακά δίκτυα. και κινητά περιβάλλοντα, όπως Αυτοκίνητο.



Εικόνα 17: Types of Fibers

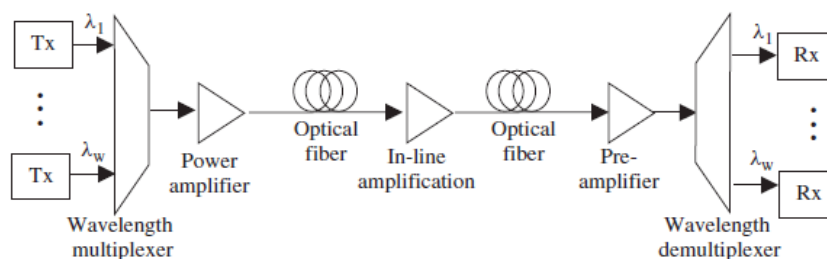
### 1.7 Λέιζερ (Lasers)

Ας εξετάσουμε την πλευρά μετάδοσης της σύνδεσης WDM με τα μήκη κύματος  $\lambda$  που εμφανίζονται στην (Εικόνα 1), και αναπαράγεται ξανά εδώ στην (Εικόνα 18). Υπάρχουν  $W$  διαφορετικοί πομποί, το καθένα εκπέμπει σε διαφορετικό μήκος κύματος  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$  Ένας πομπός είναι συνήθως ένα λέιζερ, αν και μια Δίοδος Εκπομπής Φωτός (LED) μπορεί επίσης να είναι μεταχειρισμένος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι λέιζερ, εκ των οποίων το Λέιζερ Ημιαγωγών (Semiconductor Lasers) χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα οπτικής

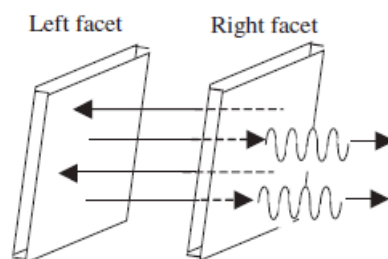
επικοινωνίας. Τα λέιζερ ημιαγωγών είναι πολύ συμπαγές και μπορεί να κατασκευαστούν σε μεγάλες ποσότητες.

Ένα λέιζερ είναι μια συσκευή που παράγει μια πολύ ισχυρή και συμπακνωμένη δέσμη. Αποτελείται από μια πηγή ενέργειας που εφαρμόζεται σε ένα υλικό lasing, μια ουσία που εκπέμπει φως σε όλες τις κατευθύνσεις και μπορεί να είναι από αέριο, στερεό ή ημιαγωγός υλικό. Το φως που παράγεται από το υλικό lasing ενισχύεται χρησιμοποιώντας μια συσκευή όπως η Κοιλότητα Αντηχείου (Resonator Cavity) Fabry-Perot.

Αυτή η κοιλότητα αποτελείται από δύο μερικώς ανακλαστικά παράλληλα επίπεδα καθρέφτες, Αυτοί οι καθρέφτες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μιας οπτικής ανάδρασης, η οποία προκαλεί την ταλάντωση της κοιλότητας με ένα θετικό κέρδος που αντισταθμίζει τυχόν οπτικές απώλειες. Το φως χτυπά τη δεξιά όψη και ένα μέρος του φεύγει από την κοιλότητα μέσω της δεξιάς όψης και ένα μέρος της ανακλάται (Εικόνα 19). Μέρος του ανακλώμενου φωτός αντανάκλαται πίσω από την αριστερή όψη προς τη δεξιά όψη, και πάλι μέρος του εξέρχεται από τη δεξιά όψη και ούτω καθεξής.



Εικόνα 18: Ένας σύνδεσμος WDM από σημείο σε σημείο.



Εικόνα 19: The Fabry-Perot resonator cavity.

## 1.8 Photodetectors and Optical Receivers

Ας εξετάσουμε την πλευρά λήψης του συνδέσμου WDM (Εικόνα 18). Το οπτικό WDM σήμα Αποπολυπλέκεται (Demultiplexed) σε διαφορετικά μήκη κύματος  $\lambda$  και κάθε μήκος κύματος κατευθύνεται σε δέκτη Rx. Ο Αποπολυπλέκτης (Demultiplexer) είναι διαχωριστής 1 προς N. Κάθε δέκτης αποτελείται από έναν Φωτοανιχνευτή (Photodetector), έναν ενισχυτή και ένα κύκλωμα επεξεργασίας σήματος. Ο Φωτοανιχνευτής (Photodetector) Ανιχνεύει ένα οπτικό σήμα και παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα που περιέχει τις ίδιες πληροφορίες όπως στο οπτικό σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα στη συνέχεια ενισχύεται έτσι ώστε μπορεί να υποβληθεί σε ηλεκτρονική επεξεργασία από το κύκλωμα επεξεργασίας σήματος.



## 1.9 Οπτικοί ενισχυτές (Optical Amplifiers)

Το οπτικό σήμα χάνει την ισχύ του καθώς διαδίδεται μέσω μιας οπτικής ίνας και μετά σε κάποια απόσταση γίνεται πολύ αδύναμο για να ανιχνευθεί. Η οπτική ενίσχυση χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση της ισχύος του σήματος. Η οπτική ενίσχυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ισχύς ενισχυτές, σε Ενισχυτές (Amplifiers) και Προενισχυτές (preamplifiers), σε μια σύνδεση WDM. Το οπτικό σήμα μπορεί να ενισχυθεί αφού φύγει από τον πολυπλέκτη (multiplexer) και πριν εισέλθει στον δέκτη. Σε σύνδεση οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται για ζεύξεις WDM πολύ μεγάλης διάρκειας και συνήθως ενισχύουν ισχύ του σήματος για να αντισταθμίσει αυτό που χάθηκε πριν από την είσοδο στον οπτικό ενισχυτή.

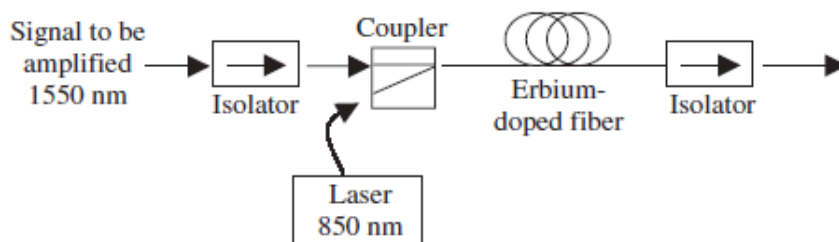
Η οπτική ενίσχυση μπορεί να γίνει χωρίς γνώση του bit ρυθμό και τη μορφή πλαίσιο και μπορεί να εφαρμοστεί ταυτόχρονα στο συνδυασμένο σήμα όλων των μηκών κύματος σε μια σύνδεση WDM. η Αναδιαμόρφωση (Re-Shaping) και ο επαναχρονισμός (re-timing) δεν μπορούν να γίνουν στον οπτικό τομέα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι οπτικών ενισχυτών, όπως ο ενισχυτής ινών Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA), semiconductor optical amplifier (SOA) και τον ενισχυτή Raman . Παρακάτω, περιγράφουμε τον ενισχυτή ινών Erbium-doped, ένα κλειδί της τεχνολογίας που επέτρεψε την ανάπτυξη συστημάτων WDM. Το SOA χρησιμοποιείται κυρίως σε Οπτικές Διασταυρούμενες Συνδέσεις (OXC) .

### 1.9.1 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

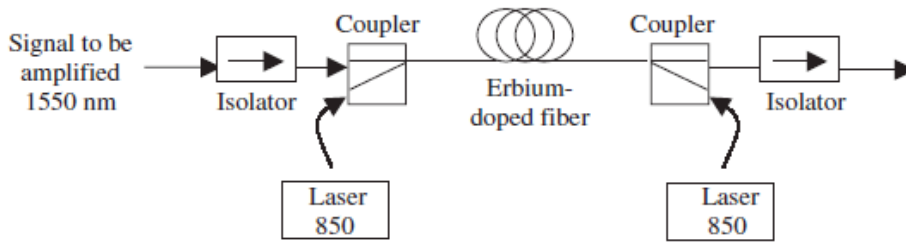
Το EDFA αποτελείται από ένα μήκος ινών πυριτίου το οποίο ο πυρήνας είναι ενισχυμένος με Erbium, ένα σπάνιο γήινο στοιχείο. ένα λέιζερ εκπέμπεται στην ίνα και συνδυάζεται μέσω ενός Συζεύκτης (Coupler) με το σήμα που πρέπει να ενισχυθεί. Αυτό το λέιζερ λειτουργεί στα 980 nm ή στα 1480 nm και το σήμα που πρόκειται να ενισχυθεί βρίσκεται στα 1550 nm.

Το σήμα από το λέιζερ με την ενισχυμένη ίνα προκαλεί διεγερμένη εκπομπή στα ηλεκτρόνια της ίνας. Δηλαδή, τα ηλεκτρόνια ωθούνται να μεταδίδουν από μια υψηλότερη επίπεδο ενέργεια σε χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας, το οποίο προκαλεί την εκπομπή φωτονίων και το οποίο με τη σειρά του ενισχύει το εισερχόμενο σήμα. Ένας Απομονωτής (Isolator) χρησιμοποιείται στην είσοδο ή και στην έξοδο για την αποτροπή αντανάκλασεις στον ενισχυτή.

Στην πράξη, τα EDFA είναι πιο περίπλοκα από αυτά που παρουσιάζονται στην (Εικόνα 20) και τα δύο στάδια EDFA που παρουσιάζεται στην (Εικόνα 21) .Στο πρώτο στάδιο, μια αντλία λέιζερ στο Συζεύκτης (Coupler) προς την ίδια κατεύθυνση με το σήμα που πρόκειται να ενισχυθεί, και στο δεύτερο στάδιο, ένα Counter-Directional αντλία λέιζερ στο Συζεύκτης (Coupler) στην αντίθετη κατεύθυνση του σήματος που πρόκειται να ενισχυθεί. Η Counter-directional άντληση δίνει υψηλότερο κέρδος, αλλά η Counter-Directional άντληση δίνει καλύτερη απόδοση θορύβου.



Εικόνα 20: The Erbium-doped fiber amplifier.



Εικόνα 21: A two-stage EDFA.

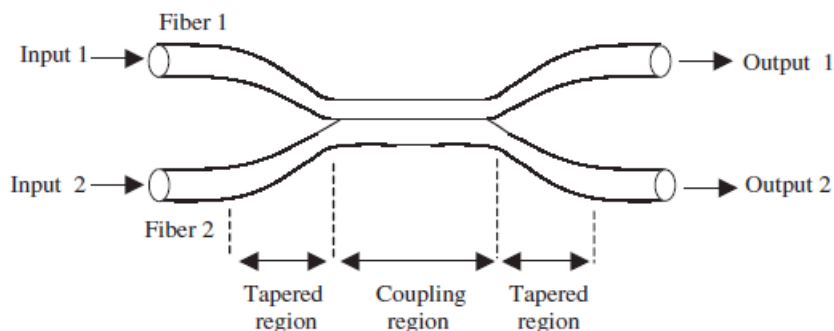
### 1.9.2 Συζεύκτης (Coupler) $2 \times 2$

Ο Συζεύκτης (Coupler)  $2 \times 2$  είναι μια βασική συσκευή στα οπτικά δίκτυα και μπορεί να κατασκευαστεί σε ποικιλία διαφορετικών τρόπων. Μια κοινή κατασκευή είναι ο fused-fiber coupler. Αυτό είναι κατασκευασμένο στρίβοντας, λιώνοντας και τραβώντας μαζί δύο ίνες μονής λειτουργίας έτσι ώστε να λιώσουν μαζί σε ένα ομοιόμορφο τμήμα μήκους. Κάθε ίνα εισόδου και εξόδου έχει μια κωνική άκρη (Εικόνα 22).

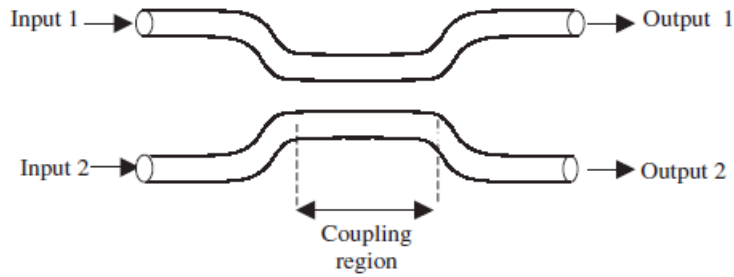
Ας υποθέσουμε ότι ένα φως εισόδου εφαρμόζεται στην είσοδο 1 της ίνας 1. Ως φως εισόδου διαδίδεται μέσω της κωνικής περιοχής ινών 1 στην περιοχή σύζευξης, μια αυξανόμενη τμήμα του ηλεκτρικού πεδίου εισόδου διαδίδεται εκτός του πυρήνα της ίνας 1 και συνδέεται σε συζευγμένη ίνα 2. Μια αμελητέα ποσότητα της εισερχόμενης οπτικής ισχύος αντανακλάται πίσω στην ίνα. Αυτός ο τύπος συζεύκτης είναι γνωστός ως Κατευθυντικός Συζεύκτης (Directional Coupler).

Η οπτική ισχύς που συνδέεται από τη μια ίνα στην άλλη μπορεί να ποικίλλει μεταβάλλοντας το μήκος του στην περιοχή σύζευξης, το μέγεθος της μειωμένης ακτίνας του πυρήνα στην περιοχή σύζευξης και η διαφορά στις ακτίνες των δύο ινών στην περιοχή σύζευξης. Πάντα υπάρχουν μερικές απώλειες ισχύος όταν το φως περνάει από τον Συζεύκτης (Coupler).

Το πιο ευέλικτος Συζεύκτης  $2 \times 2$  είναι ο Συζεύκτης Κυματοδηγού (Waveguide Coupler) (Εικόνα 23). Ένας ο κυματοδηγός είναι ένα μέσο που περιορίζει και καθοδηγεί ένα πολλαπλασιαστικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Οι ζεύκτες είναι αμοιβαίες συσκευές. Δηλαδή, λειτουργούν ακριβώς με τον ίδιο τρόπο εάν οι εισοδοί τους και οι έξοδοι αντιστρέφονται. Ο Συζεύκτης Κυματοδηγού (Waveguide Coupler) έχει δύο πανομοιότυπους παράλληλους οδηγούς στην περιοχή σύζευξης. (Εναλλακτικά, Ο ένας οδηγός μπορεί να είναι φαρδύτερος από τον άλλο.) Όπως και στον Fused-Fiber Coupler, μέρος του φωτός κατεβαίνοντας συνδέεται με τον άλλο οδηγό. Ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο οδηγών μπορούν να μεταβάλλονται κατά το πλάτος του οδηγού.



Εικόνα 22: A fused fiber  $2 \times 2$  couplers.



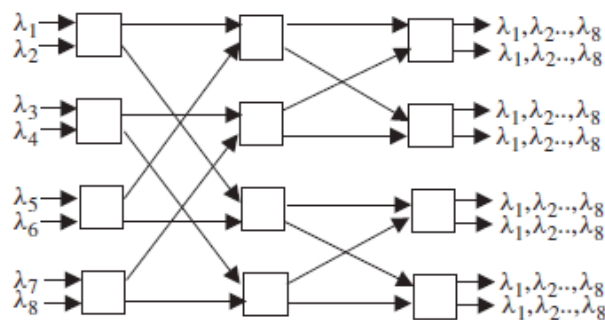
Εικόνα 23: 2 × 2 waveguide coupler.

Ένας συζεύκτης 2 × 2 (coupler) ονομάζεται συζεύκτης 3-dB όταν η οπτική ισχύς ενός φωτός εισόδου εφαρμόζεται. Ας πούμε ότι η είσοδος 1 της ίνας 1 διαιρείται ομοιόμορφα μεταξύ της εξόδου 1 και της εξόδου 2. Αν εμείς εκτοξεύσουμε μόνο ένα φως στη μία από τις δύο εισόδους ενός ζεύκτη 3-dB ας πούμε την είσοδο 1. Και στη συνέχεια ο ζεύκτης λειτουργεί ως διαχωριστής. Εάν εκτοξεύσουμε ένα φως στην είσοδο 1 και ένα φως στην είσοδο 2 ενός 3-dB ζεύκτη, τότε τα δύο φώτα θα συνδεθούν μεταξύ τους και το φως που θα προκύψει θα είναι ομοιόμορφο διαιρούμενο μεταξύ των εξόδων 1 και 2. Σε αυτήν την περίπτωση, αν αγνοήσουμε την έξοδο 2, ο ζεύκτης 3-dB λειτουργεί ως Συνδυαστής (Combiner).

Μια γενίκευση του συζεύκτης 2 × 2 είναι ο Συζεύκτης Αστεριών (Star Coupler). Αυτή η συσκευή συνδυάζει το ισχύς από εισόδους N και στη συνέχεια τη διαιρεί εξίσου σε όλες τις εξόδους. Μια δημοφιλής μέθοδος της κατασκευής ενός Συζεύκτης Αστεριών (Star Coupler) είναι η χρήση της τεχνολογίας σύντηξης ινών. Αυτό περιλαμβάνει συστροφή, θέρμανση και τέντωμα N ινών μαζί. Η συσκευή που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ομοιόμορφη διαίρεση ένα εισερχόμενο φως στις εξόδους N ή μπορεί να συνδυάσει τα εισερχόμενα φώτα N σε μία μόνο έξοδο, ή μπορεί να συνδυάσει N εισερχόμενα φώτα και να κατανειμίει ομοιόμορφα στην εξόδους N. Ωστόσο, λόγω της δυσκολίας στον έλεγχο της διαδικασίας θέρμανσης και έλξης, η τεχνολογία fiber-fused είναι περιορισμένη σε μικρό αριθμό ινών.

### 1.9.3 Οπτικές διασταυρούμενες συνδέσεις (OXC)

Μια οπτική διασύνδεση (OXC) είναι ένας οπτικός διακόπτης N × N, με ίνες εισόδου N και N ίνες εξόδου. Το OXC μπορεί να αλλάξει οπτικά όλα τα εισερχόμενα μήκη κύματος της εισόδου ίνες στα εξερχόμενα μήκη κύματος των ινών εξόδου. Για παράδειγμα, μπορεί να αλλάξει το



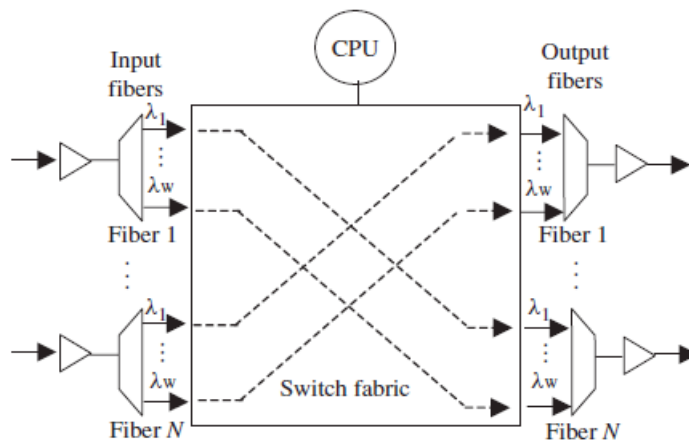
Εικόνα 24: Ένα δίκτυο banyan συζευκτών 3-dB.

οπτικό σήμα στο εισερχόμενο μήκος κύματος  $\lambda_i$  της ίνας εισόδου k στο εξερχόμενο μήκος κύματος  $\lambda_j$  των ινών εξόδου m. Εάν είναι εξοπλισμένο με μετατροπείς, μπορεί επίσης να αλλάξει το οπτικό σήμα του εισερχόμενου μήκους κύματος  $\lambda_i$  της ίνας εισόδου k σε άλλο εξερχόμενο μήκος κύματος  $\lambda_j$  του η ίνα εξόδου m. Αυτό συμβαίνει όταν το μήκος κύματος  $\lambda_i$

της ίνας εξόδου  $m$  είναι σε χρήση. Τέλος, ένα OXC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως Optical Add/Drop Multiplexer (OADM). Εκείνος μπορεί να τερματίσει το οπτικό σήμα ενός αριθμού εισερχόμενων μηκών κυμάτων και να εισαγάγει νέα οπτικά σήματα στα ίδια μήκη κύματος σε μια θύρα εξόδου. Οι υπόλοιποι εισερχόμενοι μήκη κυμάτων εναλλάσσονται όπως περιγράφεται παραπάνω.

Ένα OXC αποτελείται από ενισχυτές, multiplexers/demultiplexers, Ύφασμα Μεταγωγής (Switch Fabric) και μια CPU (Εικόνα 25). Η CPU χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του υφάσματος του διακόπτη και για την εκτέλεση επικοινωνιών που σχετίζονται με λογισμικό, όπως δρομολόγηση, σηματοδότηση και διαχείριση δικτύου. Υπάρχουν εισοδοί  $N$  και οπτικές ίνες εξόδου  $N$ . Κάθε ίνα φέρει μήκη κύματος  $W$   $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w$ . Το οπτικό το σήμα από κάθε ίνα εισόδου Προ-Ενισχύεται (Pre-Amplified) και στη συνέχεια Αποπολυπλεκτική (Demultiplexed) στο  $W$  Μήκη κύματος. Κάθε μήκος κύματος εισέρχεται στο switch fabric μέσω μιας θύρας εισόδου. Ο switch fabric στη συνέχεια κατευθύνει κάθε μήκος κύματος σε μια ίνα εξόδου.

Στο παράδειγμα που δίνεται στην (Εικόνα 25), βλέπουμε ότι τα μήκη κύματος  $\lambda_1$  και  $\lambda_w$  των ινών εισόδου 1 κατευθύνονται στην έξοδο ινών  $N$ . Ομοίως, τα μήκη κύματος  $\lambda_1$  και  $\lambda_w$  της ίνας εισόδου  $N$  κατευθύνεται στην έξοδο ινών 1. Ας υποθέσουμε ότι το εισερχόμενο μήκος κύματος  $\lambda_w$  της ίνας εισόδου  $k$  έχει να κατευθυνθεί στην παραγωγή ινών  $N$ . Όπως φαίνεται, αυτό δεν μπορεί να συμβεί αφού  $\lambda_w$  εξόδου της ίνα  $N$  χρησιμοποιείται. (Αυτό είναι γνωστό ως Εξωτερική Σύγκρουση (External Conflict) Ωστόσο, εάν το OXC είναι εξοπλισμένο με μετατροπέα μήκους κύματος, τότε το εισερχόμενο μήκος κύματος  $\lambda_w$  μπορεί να μετατραπεί σε οποιοδήποτε άλλο μήκος κύματος που τυχαίνει να είναι ελεύθερο στην ίνα εξόδου  $N$ , έτσι ώστε το οπτικό σήμα του  $\lambda_w$  μπορεί να κατευθυνθεί μέσω της ίνας εξόδου  $N$ . Wavelength converters οι οποίοι κατασκευάζονται μπορεί να χρησιμοποιούνται με διαφορετικούς τρόπους τεχνολογίας και είναι πολύ σημαντικά στα οπτικά δίκτυα.



Εικόνα 25: Ένα λογικό διάγραμμα ενός OXC.

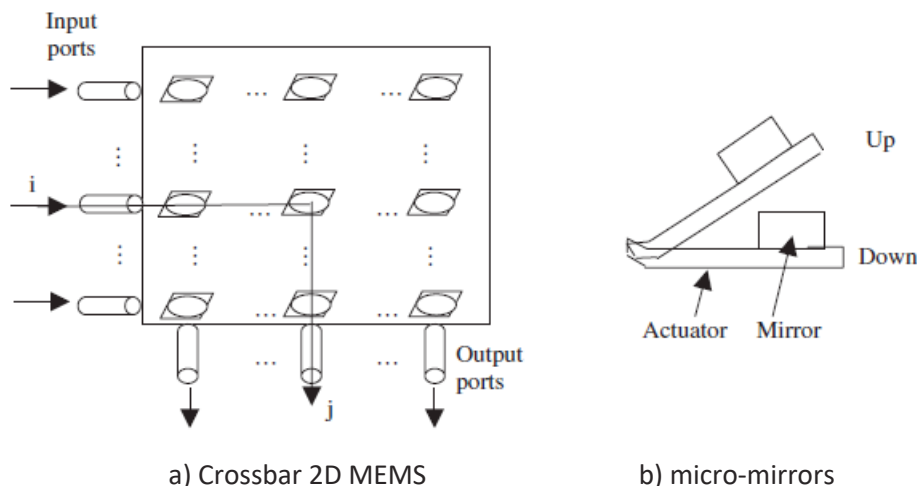
Τα OXCs αναμένεται να χειριστούν μεγάλο αριθμό θυρών, με μεγάλο αριθμό μηκών κύματος ανά ίνα. Αναμένεται επίσης να έχουν πολύ χαμηλό χρόνο μεταγωγής. Αυτό είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη ρύθμιση του switch fabric έτσι ώστε να μπορεί να κατευθυνθεί ένα εισερχόμενο μήκος κύματος σε μια ίνα εξόδου. Ο χρόνος μεταγωγής δεν είναι κρίσιμος για μόνιμες συνδέσεις, αλλά είναι κρίσιμη για δυναμικά καθιερωμένες συνδέσεις. Είναι επίσης κρίσιμη στο Optical Burst Switched Networks (OBS).

### 1.9.4 Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα MEMS

Τα Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα (MEMS) είναι μικροσκοπικές ηλεκτρομηχανικές συσκευές που κυμαίνονται σε διαστάσεις από μερικές εκατοντάδες μικρά έως χιλιοστά. Είναι κατασκευασμένα σε υποστρώματα πυριτίου χρησιμοποιώντας τυποποιημένες τεχνικές επεξεργασίας Ημιαγωγών (Semiconductor). Ξεκινώντας με μια Γκοφρέτα Πυριτίου (Silicon Wafer) που εναποθέτει και διαμορφώνει τα υλικά σε μια σειρά βημάτων προκειμένου να παράγουν μια τρισδιάστατη ηλεκτρομηχανική δομή. Τα MEMS είναι πολύπλοκες συσκευές, αλλά είναι εύρωστα, μακρόβια και φθηνά για παραγωγή. Το οπτικό MEMS είναι ένα πολλά υποσχόμενο τεχνολογία για την κατασκευή όλων των οπτικών διακοπών. Παρακάτω, περιγράφουμε ένα 2D MEMS, 3D MEMS, και 1D.

Το ύφασμα Οπτικού Διακόπτη (Switch Fabric) 2D MEMS αποτελείται από μια τετράγωνη συστοιχία micro-mirrors  $N \times N$  διατεταγμένη σε crossbar (Εικόνα 26 (α)). Κάθε σειρά micro-mirrors αντιστοιχεί σε μια θύρα εισόδου και κάθε στήλη micro-mirrors αντιστοιχεί σε μια θύρα εξόδου. Επίσης Κάθε θύρα εισόδου και εξόδου της crossbar συνδέεται με ένα μόνο μήκος κύματος. Ένας το micro-mirrors υποδεικνύεται από τον αριθμό σειράς και τον αριθμό στήλης.

Ένα micro-mirrors (Εικόνα 26 (β)) αποτελείται από έναν Ενεργοποιητή (Actuator) και ένα καθρέφτη (mirror), και μπορεί να είναι είτε στην κάτω είτε στην επάνω θέση. Για ένα εισερχόμενο μήκος κύματος στη θύρα εισόδου  $i$  να μεταφερθεί στη θύρα εξόδου  $j$ , όλα τα micro-mirrors κατά μήκος της σειράς  $i$ , από τη στήλη 1 έως Θύρα  $j-1$  πρέπει να είναι στην κάτω θέση, το micro-mirrors στη θέση  $(i, j)$  πρέπει να είναι επάνω και οι micro-mirrors στη στήλη  $j$  από τις σειρές  $i+1$  έως  $N$  πρέπει να βρίσκονται στο κάτω θέση. Με αυτόν τον τρόπο, το εισερχόμενο φως θα αντανακλάται στο  $(i, j)$ th micro-mirrors και ανακατευθύνεται στη θύρα εξόδου  $j$ . Τα micro-mirrors είναι τοποθετημένα έτσι ώστε να είναι στο  $45^\circ$  γωνία προς τη διαδρομή των εισερχόμενων μηκών κύματος. Τα εισερχόμενα μήκη κύματος πρέπει να συγκρούονται (δηλαδή, ταξιδεύουν ακριβώς προς την ίδια κατεύθυνση). Ο έλεγχος micro-mirrors είναι απλός, καθώς είναι είτε πάνω είτε κάτω. Ο αριθμός των micro-mirrors αυξάνεται με το τετράγωνο του αριθμού των θυρών εισόδου και εξόδου.

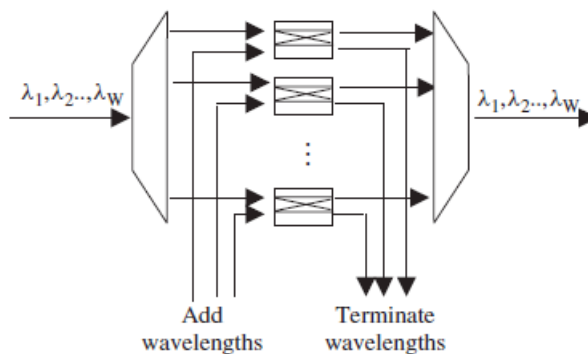


Εικόνα 26: micro-mirrors 2D MEMS.

Επομένως, οι αρχιτεκτονικές 2D περιορίζονται σε  $32 \times 32$  θύρες ή 1024 micro-mirrors. Το κύριο περιοριστικοί παράγοντες είναι το μέγεθος του τσιπ και η απώλεια ισχύος λόγω της

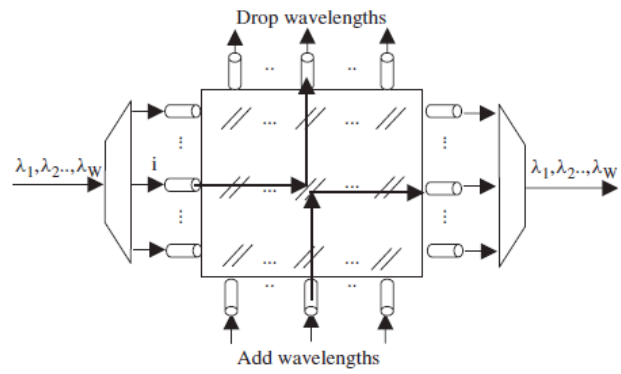
απόστασης το φως που πρέπει να ταξιδέψει μέσω του διακόπτη. Η αρχιτεκτονική 2D MEMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός Optical Add/Drop Multiplexer (OADM) . Αυτή η συσκευή είναι συνδεδεμένη σε οπτικό σύνδεσμο WDM και μπορεί να πέσει (δηλαδή, να τερματιστεί) έναν αριθμό εισερχόμενων μηκών κύματος και την εισαγωγή νέων οπτικών σημάτων σε αυτά τα μήκη κύματος. Τα υπόλοιπα μήκη κύματος του συνδέσμου WDM επιτρέπεται να περάσουν. Το συγκεκριμένο τα μήκη κύματος adds/drops μπορούν να διαμορφωθούν είτε στατικά είτε δυναμικά. Ένας Optical Add/Drop Multiplexer (OADM) μπορεί επίσης να adds/drops μήκη κύματος από έναν αριθμό συνδέσμων WDM. Ένα λογικό διάγραμμα ενός OADM φαίνεται στην (Εικόνα 27). Το οπτικό σήμα στο WDM είναι Αποπολυπλέκτης (Demultiplexed) και κάθε μήκος κύματος κατευθύνεται στην ανώτερη θύρα εισόδου του οπτικό διακόπτη  $2 \times 2$ . Το μήκος κύματος αλλάζει στην κάτω θύρα εξόδου του  $2 \times 2$  εάν πρόκειται να πέσει, ή στην επάνω θύρα εξόδου, εάν επιτρέπεται η διέλευσή του .Η χαμηλότερη θύρα εισόδου του οπτικού διακόπτη  $2 \times 2$  χρησιμοποιείται για το μήκος κύματος που πρόκειται να προστεθεί μέσα Μεταβαίνει πάντα στην επάνω θύρα εξόδου του διακόπτη. Υπάρχει ένα οπτικό  $2 \times 2$  διακόπτη για κάθε μήκος κύματος. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι το μήκος κύματος  $\lambda_i$  πρέπει να πέσει.

Στη συνέχεια, ο οπτικός διακόπτης  $2 \times 2$  δίνεται εντολή να κατευθύνει το μήκος κύματος που εισέρχεται στο πάνω μέρος στην θύρα εισόδου του κάτω θύρα εξόδου. Ταυτόχρονα, διαμορφώνεται μια νέα ροή δεδομένων στο ίδιο μήκος κύματος  $\lambda_i$  , το οποίο κατευθύνεται στην κάτω θύρα εισόδου του ίδιου  $2 \times 2$  οπτικό διακόπτη. Αυτό το νέο πρόσθετο μήκος κύματος μεταβαίνει στην επάνω θύρα εξόδου. Όλα Τα μήκη κύματος που εξέρχονται από τις ανώτερες θύρες εξόδου των οπτικών διακοπών  $2 \times 2$  είναι Πολυπλέκτης (Multiplexed) και διαδίδεται στον σύνδεσμο. Αυτό το OADM μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική 2D MEMS. Όπως φαίνεται Στην (Εικόνα 28), κάθε micro-mirrors είναι ένα ζεύγος micro-mirrors, τα οποία λειτουργούν ταυτόχρονα.

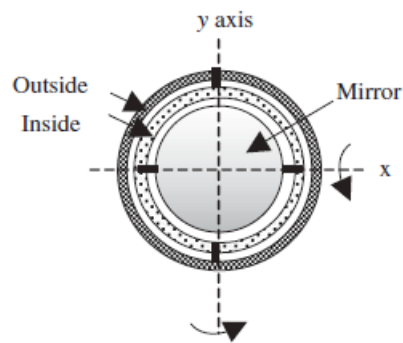


Εικόνα 27: Ένας λογικός σχεδιασμός ενός OADM.

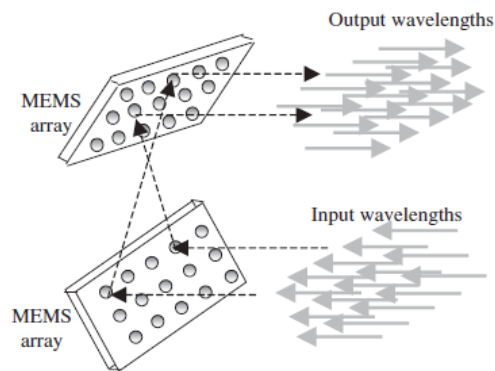
Δηλαδή, και οι δύο ανεβαίνουν ή κατεβαίνουν ταυτόχρονα. Ας υποθέσουμε ότι το  $i$ th εισερχόμενο το μήκος κύματος πρέπει να μειωθεί. Στη συνέχεια ενεργοποιείται το ζεύγος micro-mirrors  $(i, i)$ th , δηλαδή ανεβαίνει. Όλοι οι άλλοι micro-mirrors στη σειρά  $i$ th και στη στήλη  $i$ th είναι κάτω. Το εισερχόμενο φως από το Αποπολυπλέκτης (Demultiplexer) αντανακλάται σε ένα από τα δύο micro-mirrors και κατευθύνεται στη θύρα πτώσης  $i$ th. Ταυτόχρονα, το νέο μήκος κύματος από το  $i$ th προσθέτει Η θύρα ανακλάται από τον άλλο micro-mirrors και κατευθύνεται στη θύρα εξόδου. Αν το  $i$ th το μήκος κύματος δεν πρέπει να πέσει, τότε όλα τα ζεύγη micro-mirrors στη σειρά  $i$ th δεν έχει ενεργοποιηθεί. Δηλαδή, είναι όλα κάτω, και το μήκος κύματος  $i$ th απλά περνά μέσα από το OADM χωρίς διακοπή.



Εικόνα 28: A 2D MEMS OADM..



Εικόνα 29: The gimbaled mirror..



Εικόνα 30: The 3D MEMS architecture.

### 1.9.5 Ημιαγωγικός Οπτικός Ενισχυτής (SOA)

Ένας Semiconductor Optical Amplifier (SOA) είναι μια σύνδεση pn που λειτουργεί. Οι επαφές pn σχηματίζονται από συνένωση (ημιαγωγικών) υλικών με διαφορετικών ειδών προσμίξεις – τύπου-p: οι προσμίξεις δημιουργούν πολλές οπές στην ζώνη σθένους

– τύπου-n: πολλά ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας.

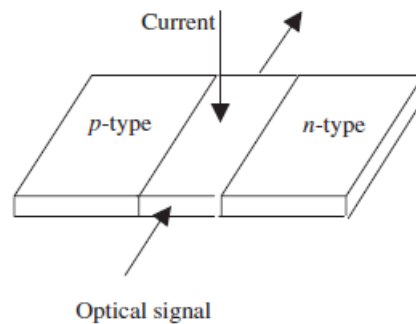
• Χωρίς εξωτερική διέγερση η στάθμη Fermi πρέπει να είναι κοινή κατά μήκος του υλικού.

• Όταν έρχονται σε επαφή τα δύο υλικά, οπές από το p κινούνται προς το n και ηλεκτρόνια από το n κινούνται προς το p.

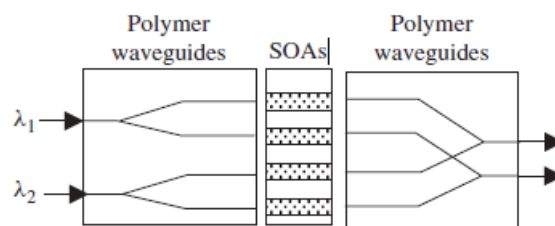
• Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα έλλειμμα θετικού φορτίου (αρνητικό φορτίο) στην περιοχή p και θετικό φορτίο στην περιοχή n που απαγορεύει την περαιτέρω κίνηση φορέων εξαιτίας της ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού.

• Όταν όμως εφαρμόζουμε τάση θετική (ορθή) τάση, τότε το δυναμικό μειώνεται.

• Επίσης οι στάθμες Fermi απομακρύνονται και υπάρχει μία περιοχή κοντά στην επαφή όπου υπάρχουν και οπές και ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να συνδυαστούν και μέσω αυθόρμητης ή εξαναγκασμένης εκπομπής να παράγουν φωτόνια.



Εικόνα 31: pn-junction.



Εικόνα 32: 2 × 2 SOA switch.

- Βρίσκουν εφαρμογές ως Μεταγωγείς (Switches) ή μετατροπείς μήκος κύματος.
- Στην ουσία πρόκειται για μία επαφή pn όπου όμως έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στο να μην λαμβάνουν χώρα ανακλάσεις στα άκρα της διάταξης.
- Στην πράξη δεν χρησιμοποιείται μία απλή επαφή αλλά μία ετεροδομή (heterostructure).
- Οι SOAs έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης (100nm) από τους EDFA αλλά:
  - εισάγουν διαφωνία μεταξύ των καναλιών.
  - Η σύζευξη με την ίνα θέλει προσοχή.
  - Το κέρδος και η ισχύς εξόδου είναι μικρότερες των EDFA.
  - υπάρχει υψηλότερη απώλεια λόγω πόλωσης.
  - εισάγουν περισσότερο θόρυβο



### 1.10 Οπτικά Δίκτυα

#### (a) Σημείο προς σημείο

Αρχικά, η οπτική ίνα χρησιμοποιήθηκε για τη μετάδοση μεταξύ δύο σταθερών σημείων. Ο κόμβος που εκπέμπει: Μετατρέπει τα ηλεκτρικά δεδομένα σε φως (EO conversion) & και τα στέλνει στην οπτική ίνα. Ο κόμβος που λαμβάνει: μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό (OE conversion) για την ηλεκτρονική επεξεργασία και αποθήκευση

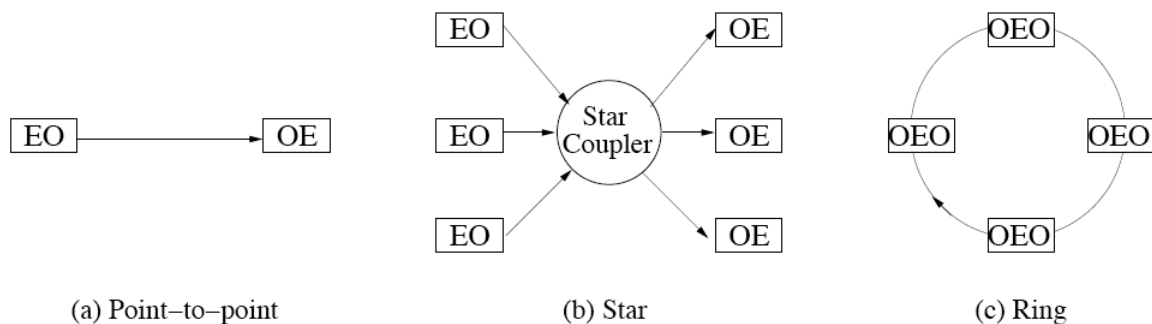
#### (b) Δίκτυο αστέρα

Πολλαπλές ζεύξεις σημείο προς σημείο συνδυάζονται από ένα Συζεύκτη Αστέρα (Star Coupler) για να υλοποιηθούν οπτικά δίκτυα απλού βήματος. Ο Star Coupler είναι μία συσκευή Οπτικής Ευρυεκπομπής (Broadcast) που προωθεί ένα οπτικό σήμα που φτάνει σε μία πόρτα σε όλες τις πόρτες.

#### (c) Δίκτυο Δακτύλιος

Η διασύνδεση ζευγαριών γειτονικών κόμβων με τη χρήση point-to-point οπτικών ζεύξεων οδηγεί σε δίκτυα δακτυλίου. Κάθε κόμβος του δακτυλίου πραγματοποιεί OE και EO μετατροπή για εισερχόμενα και εξερχόμενα σήματα αντίστοιχα.

Ο συνδυασμός OE & EO conversion ονομάζεται OEO conversion. Παράδειγμα πραγματικού κόσμου : Fiber Distributed Data Interface (FDDI)



Εικόνα 33: Τύπο Συνδέσεις Οπτικά Δίκτυα .

## Δεύτερο κεφάλαιο: SONET/SDH

### 2.1 SONET /SDH

Το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (SONET) προτάθηκε για πρώτη φορά από την Bellcore (τώρα Telecordia) το 1985, και αναπτύχθηκε περαιτέρω και τυποποιήθηκε από την επιτροπή T1X1 της American National Standards Institute (ANSI). Το SONET σχεδιάστηκε για να πολυπλέκει (multiplex) σήματα DSN και να τα μεταδίδει οπτικά μεταξύ εξοπλισμό που κατασκευάζεται από διαφορετικούς κατασκευαστές. Ωστόσο, το SONET δεν σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίσει τις ανάγκες της ευρωπαϊκής κοινότητας, η οποία χρησιμοποίησε τα σήματα ITU-T PDH. Η ITU-T υιοθέτησε τη Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (SDH) ως διεθνή πρότυπο, το οποίο επιτρέπει την αποτελεσματική πολυπλεξία σημάτων Πλησιόχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (PDH) 34,368 Mbps (ITU-T's Επίπεδο 3). Το SONET συμμορφώνεται με το SDH. Το SONET και το SDH ορίστηκαν επίσης να φέρουν Κυψέλες ATM και πλαίσια PPP και HDLC.

Οι πληροφορίες που μεταδίδονται από το SONET/SDH είναι οργανωμένες σε πλαίσια. Αυτά τα πλαίσια μεταδίδονται συνεχώς το ένα μετά το άλλο. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από μια συλλογή εναέριων πεδίων και ωφέλιμου φορτίου. Ο εξοπλισμός SONET/SDH κατασκευάζει αυτά τα κουφώματα στον ηλεκτρικό τομέα και στη συνέχεια τα μεταδίδει οπτικά. Στο τέλος, Ο εξοπλισμός SONET/SDH λαμβάνει το οπτικό σήμα και το μετατρέπει στον ηλεκτρικό τομέα για την επεξεργασία των πλαισίων. Η ηλεκτρική πλευρά του σήματος SONET είναι γνωστή ως Σήμα Σύγχρονης Μεταφοράς (Synchronous Transport Signal)(STS) και η ηλεκτρική πλευρά του SDH είναι γνωστή ως Μονάδα Σύγχρονης Μεταφοράς (Synchronous Transport Signal)(STM). Η οπτική πλευρά ενός σήματος SONET/SDH είναι γνωστή ως Οπτικός Φορέας (Optical Carrier) (OC).

Ο βασικός ρυθμός της SONET είναι 51,84 Mbps, ενώ ο βασικός ρυθμός SDH είναι 155,52 Mbps. Ο βασικός ρυθμός του SONET επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά ενός σήματος DS3. Βασικός συντελεστής SDH επιτρέπει την αποτελεσματική πολυπλεξία των σημάτων επιπέδου 3 του ITU-T. Μια ιεραρχία διαφορετικών επιπέδων (πίνακας 2). Η πρώτη στήλη δίνει το επίπεδο οπτικού φορέα (OE-N); Οι επόμενες δύο στήλες δίνουν τα ισοδύναμα επίπεδα STS και STM, αντίστοιχα.

Πίνακας 2: SONET/SDH hierarchy.

Optical level	SONET level (electrical)	SDH level (electrical)	Data rate (Mbps)	Overhead rate (Mbps)	Payload rate (Mbps)
OC-1	STS-1	-	51.840	1.728	50.112
<b>OC-3</b>	<b>STS-3</b>	<b>STM-1</b>	<b>155.520</b>	<b>5.184</b>	<b>150.336</b>
OC-9	STS-9	STM-3	466.560	15.552	451.008
<b>OC-12</b>	<b>STS-12</b>	<b>STM-4</b>	<b>622.080</b>	<b>20.736</b>	<b>601.344</b>
OC-18	STS-18	STM-6	933.120	31.104	902.016
OC-24	STS-24	STM-8	1244.160	41.472	1202.688
OC-36	STS-36	STM-12	1866.240	62.208	1804.932
<b>OC-48</b>	<b>STS-48</b>	<b>STM-16</b>	<b>2488.320</b>	<b>82.944</b>	<b>2405.376</b>
OC-96	STS-96	STM-32	4976.640	165.888	4810.752
<b>OC-192</b>	<b>STS-192</b>	<b>STM-64</b>	<b>9953.280</b>	<b>331.776</b>	<b>9621.504</b>
<b>OC-768</b>	<b>STS-768</b>	<b>STM-256</b>	<b>39813.120</b>	<b>1327.104</b>	<b>38486.016</b>
OC-N	STS-N	STM-N/3	N*51.840	N*1.728	N*50.112

Το N μπορεί να πάρει μια τιμή μεταξύ 1 και 255. Ο ρυθμός δεδομένων, ο ρυθμός γενικών εξόδων και ο ρυθμός ωφέλιμου φορτίου που σχετίζονται με κάθε επίπεδο εμφανίζεται στις στήλες 4, 5 και 6, αντίστοιχα. Στη SONET ο ρυθμός δεδομένων αναφέρεται συνήθως από το οπτικό του επίπεδο. Στο SDH αναφέρεται συνήθως από το ηλεκτρικό του επίπεδο. Για παράδειγμα, ο ρυθμός δεδομένων 155,520 Mbps αναφέρεται στο SONET ως OC-3, ενώ

αναφέρεται στην SDH ως STM-1. Δεν είναι όλα τα επίπεδα οικονομικά βιώσιμα. Υπάρχουν προϊόντα (όπως OC-3/STM-1, OC-12/STM-4 και OC-48/STM-16) υποδεικνύονται με έντονη γραφή. Όπως φαίνεται το κάθε επίπεδο μπορεί να ληφθεί από το προηγούμενο πολλαπλασιάζοντάς το επί τέσσερα. Το SONET/SDH διοχετεύεται. Για παράδειγμα, στο SONET, το STS-3 κατασκευάζεται με πολυπλεξία τρεις ροές βασικού ρυθμού STS-1.

Το STS-12 κατασκευάζεται με πολυπλεξία δώδεκα Ροές STS-1. και ούτω καθεξής. Ομοίως, στο SDH, το STM-4 κατασκευάζεται με πολυπλεξία τεσσάρων Ροές βασικού ρυθμού STM-1.

Το STM-16 κατασκευάζεται με πολυπλεξία 16 ρευμάτων STM-1. και ούτω καθεξής. Όπως αναφέρεται στην τελευταία σειρά του πίνακα 2, λαμβάνεται το επίπεδο EEM για το OC-N διαιρώντας το N με το τρία.

Ο ρυθμός δεδομένων του STS-1 είναι 51,840 Mbps, εκ των οποίων τα 1,728 Mbps χρησιμοποιούνται για γενικά έξοδα και τα υπόλοιπα 50,112 Mbps για πληροφορίες ωφέλιμου φορτίου. Λαμβάνεται ο ρυθμός δεδομένων για το STS-3 πολλαπλασιάζοντας τον αντίστοιχο ρυθμό δεδομένων του STS-1 επί τρία. Ομοίως, τα γενικά έξοδα του STS-3 και οι ρυθμοί δεδομένων ωφέλιμου φορτίου μπορούν να ληφθούν πολλαπλασιάζοντας εκείνους από το STS-1 επί τρία. Όπως ανεβαίνουμε στην ιεραρχία, το ποσοστό των γενικών εξόδων παραμένει σταθερό: αντιστοιχεί σε 3.33% του ρυθμού δεδομένων ή στο 3.45% του ρυθμού ωφέλιμου φορτίου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα διοχετευόμενο STS-N αποτελείται από N STS-1. Κάθε STS-1, ως που παρουσιάζεται παρακάτω, κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας έναν συγκεκριμένο συνδυασμό σημάτων DS<sub>n</sub> και E1.

Εκτός από αυτή τη διοχετευμένη δομή, είναι δυνατή η απλή πλήρωση του ωφέλιμου φορτίου STS-3 με κυψέλες ATM ή πακέτα IP συσκευασμένα σε πλαίσια PPP ή HDLC. Η δομή ονομάζεται συνενωμένο και υποδεικνύεται προσθέτοντας ένα c μετά το όνομα οπτικής στάθμης (π.χ. OC-3c και OC-12c) και μετά το όνομα της ηλεκτρικής στάθμης (STS-3c και STS-12c). Όμοιος η συνένωση λαμβάνει χώρα σε SDH.

Οι συνενωμένοι σύνδεσμοι SONET/SDH χρησιμοποιούνται συνήθως για τη διασύνδεση των διακοπών ATM. Στην πραγματικότητα, η αρχιτεκτονική ATM ορίστηκε αρχικά να τρέξει στο OC-3c. Χρησιμοποιούνται επίσης σε πακέτο μέσω SONET (PoS). Στο PoS, οι δρομολογητές IP είναι διασυνδεδεμένα με συνδέσεις SONET/SDH και τα πακέτα IP μεταφέρονται απευθείας μέσω SONET/SDH αφού ενθυλακώνουν σε πλαίσια PPP ή HDLC.

## 2.2 Η ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ SONET STS-1

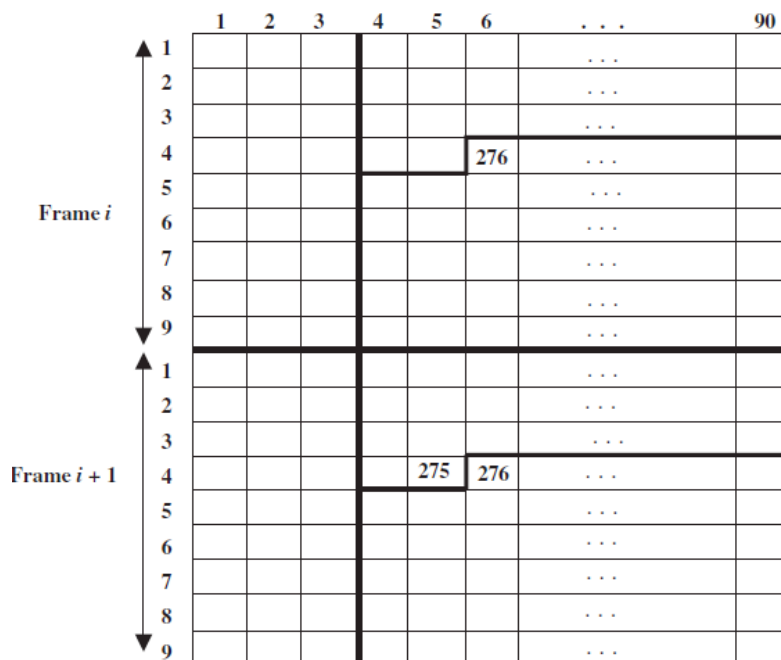
Το πλαίσιο SONET STS-1 αποτελείται από 810 byte και μεταδίδεται 8000 φορές ανά δευτερόλεπτο (δηλαδή, κάθε 125 msec). Αυτό δίνει συνολικό ρυθμό δεδομένων 8000 × 810 × 8 bits / sec (δηλ. 51,84 Mbps). Ένα μόνο byte (συνήθως αναφέρεται ως time slot) στο πλαίσιο μεταδίδεται 8000 φορές ανά δευτερόλεπτο, δίνοντας έτσι ρυθμό δεδομένων 64 Kbps, όπως στην περίπτωση ενός χρόνου στο σήμα DS1. Αυτό επιτρέπει στο SONET να μεταδίδει Ασυμπιεστη Φωνή (Transmit Uncompressed) Στο PCM.

Το πλαίσιο SONET STS-1 εμφανίζεται γραφικά σε μορφή matrix, που αποτελείται από εννέα σειρές και 90 στήλες (Εικόνα 34). Κάθε κελί στο matrix αντιστοιχεί σε ένα byte. Ξεκινώντας από το byte 1, το πλαίσιο μεταδίδεται από σειρά σε σειρά. Το πλαίσιο αποτελείται από το εναέριο τμήμα και το τμήμα ωφέλιμου φορτίου. Το εναέριο τμήμα, που ονομάζεται Γενικά Έξοδα Μεταφοράς (TOH), καταλαμβάνει τις τρεις πρώτες στήλες. Το τμήμα ωφέλιμου φορτίου καταλαμβάνει το υπόλοιπο 87 στήλες (δηλαδή στήλες 4 έως 90) και φέρει τον Σύγχρονος Φάκελος Ωφέλιμου Φορτίου (SPE).

	1	2	3	4	5	6	...	90
1	1	2	3	4	5	6	...	90
2	91	92	93	94	95	96	...	180
3	181	182	183	184	185	186	...	270
4	271	272	273	274	275	276	...	360
5	361	362	363	364	365	366	...	450
6	451	452	453	454	455	456	...	540
7	541	542	543	544	545	546	...	630
8	631	632	633	634	635	636	...	720
9	721	722	723	724	725	726	...	810

Εικόνα 34: Η δομή πλαισίου SONET STS-1.

Η SPE φέρει ωφέλιμο φορτίο δεδομένων χρήστη και ορισμένα πρόσθετα γενικά έξοδα, που αναφέρονται ως γενικά έξοδα Ωφέλιμου Φορτίου (Payload Overhead)(POH). Ο χρήστης συνήθως δεν ευθυγραμμίζεται με τα μεταδιδόμενα πλαίσια SONET. Συνεπώς Η SPE ενδέχεται να καταστεί διαθέσιμη για μετάδοση κατά τη διάρκεια της περιόδου κατά την οποία ένα πλαίσιο SONET μεταδίδεται. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με την προσωρινή αποθήκευση του SPE μέχρι το αρχή του επόμενου πλαισίου SONET και, στη συνέχεια, ευθυγράμμισή του με το πρώτο byte (σειρά 1, στήλη 4) του ωφέλιμου φορτίου SONET. Ως αποτέλεσμα, η SPE θα καταλάβει και τις 87 στήλες του τμήμα ωφέλιμου φορτίου. Αυτή η λύση απαιτεί buffer για να συγκρατούν το SPE μέχρι την αρχή του επόμενου πλαισίου. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα SONET, αυξάνονται επίσης οι απαιτήσεις αποθήκευσης. Μια εναλλακτική λύση για την προσωρινή αποθήκευση της SPE είναι η μετάδοσή της τη στιγμή που γίνεται διαθέσιμο. Αυτό σημαίνει ότι το SPE μπορεί να ξεκινήσει οπουδήποτε εντός του ωφέλιμου φορτίου SONET, γεγονός που απαιτεί την ανάγκη ενός δείκτη που να δείχνει την αρχή της SPE.



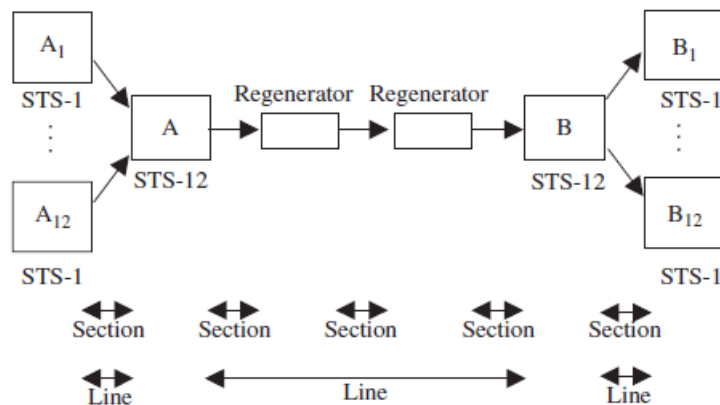
Εικόνα 35: Παράδειγμα της έναρξης της SPE.

Ένα παράδειγμα της έναρξης της SPE παρουσιάζεται στην (Εικόνα 35). Η SPE ξεκινά στα byte 276 (τέταρτη γραμμή, έκτη στήλη) του πλαισίου  $i$  και τελειώνει σε byte 275 (τέταρτη γραμμή, Πέμπτη στήλη) του επόμενου πλαισίου  $i + 1$ . Το επόμενο SPE ξεκινά αμέσως, στο byte 276 του πλαισίου  $i + 1$ , και ούτω καθεξής. Γενικά, η SONET υποθέτει ότι η SPE μπορεί να επιπλέει εντός του ωφέλιμο φορτίο του πλαισίου και παρέχει ένα δείκτη στο εναέριο τμήμα για τον εντοπισμό του αρχή. Η Εναέρια Μεταφορά (Transport Overhead)(TOH) αποτελείται από το τμήμα Εναέριας Κυκλοφορίας (Section Overhead)(SOH) και τη Επικεφαλής Γραμμής (Line Overhead)(LOH). Επίσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχει μια εναέρια διαδρομή ενσωματωμένη στο SPE. Αυτά τα γενικά έξοδα περιγράφονται παρακάτω.

### 2.3 The Section, Line, and Path Overheads

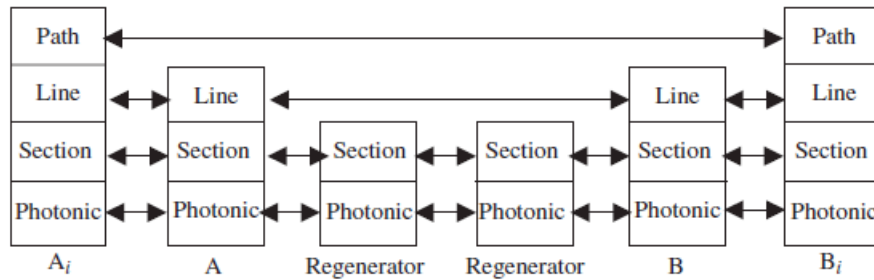
Ας εξετάσουμε ένα απλό δίκτυο SONET που αποτελείται από συσκευές SONET A1 έως A12, A, B και B1 έως B12 (Εικόνα 36).  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 12$  συλλέγει πληροφορίες χρήστη και το μεταδίδει στο A σε πλαίσια STS-1. Το A Πολυπλέκει (Multiplexes) τα δώδεκα εισερχόμενα STS-1 ρέει σε ένα ρεύμα STS-12, το οποίο στη συνέχεια μεταδίδεται στο B μέσω δύο Αναγεννητών (Regenerator). Η B Αποπολυπλέκει (Demultiplexes) τη ροή STS-12 σε 12 μεμονωμένες ροές STS-1 και τις παραδίδει στο  $B_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 12$  συσκευές έτσι ώστε το ρεύμα STS-1 από το  $A_i$  να παραδοθεί στο  $B_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 12$ . Το ίδιο συμβαίνει και προς την αντίθετη κατεύθυνση, αλλά για λόγους απλότητας εξετάζουμε μόνο τη μετάδοση από αριστερά προς τα δεξιά.

Η ποιότητα του οπτικού σήματος επιδεινώνεται καθώς ταξιδεύει μέσω της οπτικής ίνας, και έτσι πρέπει να ανανεώνεται περιοδικά. Η απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα οπτικό σήμα χωρίς να απαιτείται αναγέννηση αυξάνεται συνεχώς καθώς η τεχνολογία οπτικής μετάδοσης εξελίσσεται. Η αναγέννηση γίνεται στον ηλεκτρικό τομέα. Δηλαδή το οπτικό σήμα σε έναν αναγεννητή ρεύματος υφίσταται μετατροπή από τον οπτικό στον ηλεκτρικό τομέα. τότε αυτό υποβάλλεται σε επεξεργασία. και στη συνέχεια μετατρέπεται ξανά στον οπτικό τομέα και μεταδίδεται έξω. Η ηλεκτρική αναγέννηση θα αντικατασταθεί τελικά από την οπτική αναγέννηση. Στη SONET, αυτό θεωρείται ότι η Αναγέννηση (Regenerator) του οπτικού σήματος γίνεται στον ηλεκτρικό τομέα. Στο SONET, ένας μεμονωμένος σύνδεσμος με μια συσκευή SONET ή έναν αναγεννητή και στις δύο πλευρές είναι γνωστό ως τμήμα. Μια σύνδεση μεταξύ δύο συσκευών SONET (η οποία μπορεί να περιλαμβάνει Ηλεκτρική Αναγέννηση (Regenerator)) είναι γνωστή ως γραμμή. Οι ενότητες και οι γραμμές υποδεικνύονται στο παράδειγμά μας (Εικόνα 36). Η επιβάρυνση του τμήματος στο πλαίσιο SONET σχετίζεται με τη μεταφορά των πλαισίων STS-1 σε ένα τμήμα, και η εναέρια γραμμή συνδέεται με τη μεταφορά του SPE πάνω από μια γραμμή. Το SONET οργανώνεται σε μια στοιβα τεσσάρων στρωμάτων, όλα ενσωματωμένα μέσα στο φυσικό στρώμα.



Εικόνα 36: Ένα απλό δίκτυο SONET.

Οι στοίβες SONET για το δίκτυο SONET που δίνονται στην (Εικόνα 36) παρουσιάζονται στην (Εικόνα 37). Το χαμηλότερο στρώμα είναι το Φωτονικό Στρώμα (Photonic Layer) το οποίο ασχολείται με την οπτική μετάδοση του Πλαισίου Σήμα Σύγχρονης Μεταφοράς (STS). Το επόμενο επίπεδο προς τα πάνω είναι το επίπεδο διατομής, το οποίο διαχειρίζεται τη μεταφορά του STS πλαίσια πάνω από το φωτονικό στρώμα χρησιμοποιεί επίσης τα γενικά έξοδα του τμήματος. Το επίπεδο γραμμής χειρίζεται τη μεταφορά των τη μετάδοση από Σύγχρονος Φάκελος Ωφέλιμου Φορτίου (SPE) πάνω από μια γραμμή. Οι λειτουργίες του περιλαμβάνουν πολυπλεξία και συγχρονισμό. Επίσης χρησιμοποιεί τη γραμμή πάνω από τα κεφάλια. Τέλος, το επίπεδο διαδρομής επεξεργάζεται άκρο σε άκρο μεταξύ των σημείων από τα οποία προέρχεται και τερματίζεται η SPE. Θυμηθείτε από το παράδειγμα στην



Εικόνα 37: The SONET stacks.

(Εικόνα 37) ότι κάθε  $A_i$  δημιουργεί SPE που παραδίδονται στον προορισμό του  $B_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 12$ . Εντός κάθε SPE παρέχεται Εναέρια Διαδρομή (Line Overhead) που επιτρέπει την εξαγωγή του προορισμού  $B_i$  τις πληροφορίες χρήστη. Ενόψει αυτού, υπάρχει συσχέτιση μεταξύ αυτών των δύο συσκευών στο επίπεδο διαδρομής. Στο SONET, η συσκευή που μπορεί να επεξεργαστεί τα γενικά έξοδα του τμήματος, γνωστή ως ενότητα εξοπλισμού τερματισμού (STE). Η συσκευή που μπορεί να επεξεργαστεί την εναέρια γραμμή είναι γνωστή ως Εξοπλισμός Τερματισμού Γραμμής (LTE) και τη συσκευή που μπορεί να επεξεργαστεί την εναέρια διαδρομή είναι γνωστός ως Εξοπλισμός Τερματισμού Διαδρομής (PTE). Δείτε από τα παραδείγματα στην (Εικόνα 36) και (Εικόνα 37) ότι η συσκευή  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 12$ , είναι ένα STE, ένα LTE και ένα PTE. Συσκευή Το A, εν τω μεταξύ, είναι ένα STE και ένα LTE, ενώ ένας αναγεννητής είναι ένα STE.

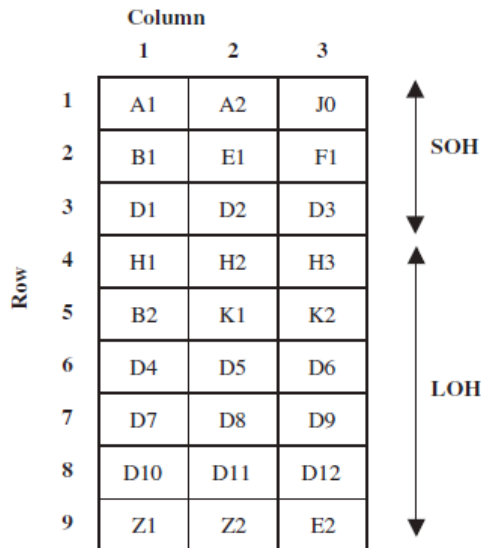
### 2.3.2 Το τμήμα STS-1, η γραμμή και τα γενικά έξοδα διαδρομής

Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 38) τα byte του τμήματος (section overhead) (SOH) καταλαμβάνουν τις τρεις πρώτες σειρές Οι τρεις πρώτες στήλες και τα byte εναέριας γραμμής (line overhead) (LOH) καταλαμβάνουν τις έξι τελευταίες σειρές από τις τρεις πρώτες στήλες.

Έχουν οριστεί τα ακόλουθα byte στην ενότητα:

- A1 και A2: Αυτά τα δύο byte ονομάζονται byte πλαισίωσης (framing) και χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση του πλαισίου. Συμπληρώνονται με την τιμή 1111 0110 0010 1000 (δηλ. 0xF628), η οποία προσδιορίζει μοναδικά την αρχή ενός πλαισίου STS.
- J0: Αυτό ονομάζεται byte ανίχνευσης ενότητας και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του πλαισίου STS-1 πίσω στο τον αρχικό εξοπλισμό του.
- B1: Αυτό το byte είναι το byte ισοτιμίας με παρεμβολή bit, που συνήθως αναφέρεται ως BIP-8. χρησιμοποιείται για την εκτέλεση ενός ελέγχου ομοιόμορφης ισοτιμίας στο προηγούμενο πλαίσιο STS-1 μετά το πλαίσιο έχει ανακατευτεί. Η ισοτιμία εισάγεται στο πεδίο BIP-8 του τρέχοντος πλαισίου πριν είναι ανακατεμένο και υπολογίζεται ως εξής.

Εκτελεί το πρώτο bit του πεδίου BIP-8 Έλεγχος ομοιόμορφης ισοτιμίας σε όλα τα bit πρώτης θέσης όλων των byte του προηγούμενου πλαίσιο αφού έχει ανακατευτεί. Δηλαδή, το άθροισμα των bit της πρώτης θέσης σε όλα τα bytes του προηγούμενου καρέ, αφού έχει κωδικοποιηθεί, συν το πρώτο bit στο BIP-8 πεδίο, πρέπει να είναι ζυγός αριθμός. Το δεύτερο bit εκτελεί έναν έλεγχο ισοτιμίας σε όλα από τα bit της δεύτερης θέσης όλων των byte στο προηγούμενο πλαίσιο μετά από αυτό ανακατεμένα, και ούτω καθεξής.



Εικόνα 38: Το τμήμα και η γραμμή εναέριων byte

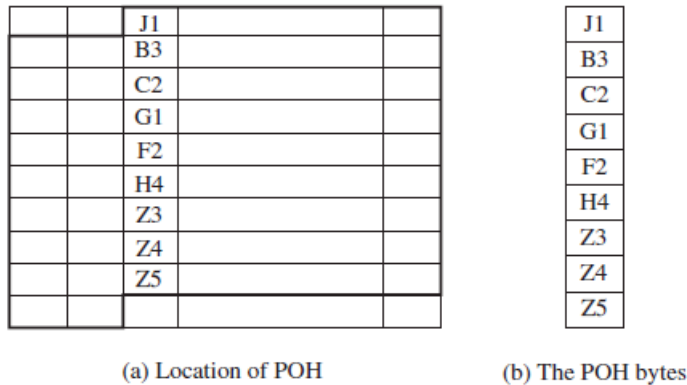
- E1: Αυτό το byte παρέχει ένα κανάλι 64 Kbps που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φωνητικές επικοινωνίες από μηχανικούς.
- F1: Αυτό το byte προορίζεται για χρήση από τον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου.
- D1, D2 και D3: Αυτά τα byte σχηματίζουν ένα κανάλι επικοινωνίας δεδομένων 192 Kbps, το οποίο χρησιμοποιείται για λειτουργίες διαχείρισης δικτύου. Έχουν οριστεί τα ακόλουθα byte στην εναέρια γραμμή (line overhead) (LOH ):
- H1 και H2: Αυτά τα δύο byte είναι γνωστά ως byte δείκτη. Περιέχουν ένα δείκτη που δείχνει την αρχή της SPE εντός του πλαισίου STS-1. Ο δείκτης δίνει το μετατόπιση σε byte μεταξύ των byte H1 και H2 και της αρχής του SPE.
- H3: Αυτό το byte είναι γνωστό ως byte δράσης δείκτη . χρονικές διαφορές που ενδέχεται να υπάρχουν μεταξύ των συσκευών SONET.
- B2: Αυτό είναι παρόμοιο με το byte B1 στην εναέρια ενότητα (section overhead) και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του BIP-8 έλεγχος ισοτιμίας που πραγματοποιείται στο τμήμα γενικών εξόδων γραμμής και στο τμήμα ωφέλιμου φορτίου. Αυτό είναι Εκτελείται σε ολόκληρο το πλαίσιο STS-1, εκτός από τα byte εναέριας ενότητας (section overhead).
- K1 και K2: Αυτά τα δύο byte χρησιμοποιούνται στην αυτόματη εναλλαγή προστασίας.
- D4 έως D12: Αυτά τα byte σχηματίζουν ένα κανάλι επικοινωνίας δεδομένων 576 Kbps, το οποίο χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του δικτύου.
- Z1 και Z2: Αυτά τα δύο byte έχουν οριστεί εν μέρει.
- E2: Αυτό το byte είναι παρόμοιο με το byte E1 στα γενικά έξοδα ενότητας.

Η εναέρια διαδρομή (POH), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι ενσωματωμένη στο SPE και καταλαμβάνει την πρώτη στήλη (Εικόνα 39) Έχουν οριστεί τα ακόλουθα byte:

- J1: Αυτό το byte είναι παρόμοιο με το J0 στην εναέρια ενότητα (section overhead).
- B3: Αυτό το byte είναι παρόμοιο με το B1 που χρησιμοποιείται στην επιβάρυνση του τμήματος και με το B2 που χρησιμοποιείται στο εναέρια γραμμή. Χρησιμοποιείται για τη

μεταφορά του ελέγχου ισοτιμίας BIP-8 που πραγματοποιείται στο ωφέλιμο φορτίο Ενότητα. Δηλαδή, εκτελείται σε ολόκληρο το πλαίσιο STS-1, εκτός από το τμήμα και byte γενικής γραμμής.

- C2: Αυτό το byte είναι γνωστό ως ετικέτα σήματος διαδρομής (path signal label). Υποδεικνύει τον τύπο των πληροφοριών χρήστη μεταφέρονται στην SPE, όπως εικονικοί παραπόταμοι (virtual tributaries)(VT), ασύγχρονοι DS3, κυψέλες ATM, HDLC-πάνω από-SONET, και PPP over SONET.
- G1: Αυτό είναι γνωστό ως byte κατάστασης διαδρομής. Μεταφέρει κατάσταση και διαγνωστικά σήματα.
- F2: Αυτό το byte προορίζεται για χρήση από τον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου.



Εικόνα 39: The path overhead (POH) bytes.

- H4: Αυτό το byte είναι γνωστό ως δείκτης πολλαπλών καρέ (multi-frame indicator) και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ωφέλιμων φορτίων μεταφέρονται εντός του ίδιου πλαισίου.
- Z3 και Z4: Αυτά προορίζονται για μελλοντική χρήση.
- Z5: Αυτό το byte χρησιμοποιείται για Παράλληλη Παρακολούθηση (Tandem Monitoring). Ένα δίδυμο είναι ένας τηλεφωνικός διακόπτης που είναι που χρησιμοποιείται στο τηλεφωνικό δίκτυο κορμού. Εναλλάσσει την κυκλοφορία μεταξύ άλλων τηλεφώνων διακόπτει και δεν εξυπηρετεί απευθείας τους συνδρομητές.

### 2.3.3 Το Ωφέλιμο Φορτίο (Payload) STS-1

Όπως είδαμε παραπάνω, το STS-1 SPE φέρει Ωφέλιμο Φορτίο (Payload) δεδομένων χρήστη και τη διαδρομή overhead. Το ωφέλιμο φορτίο έχει οριστεί να μεταφέρει πολλαπλές ροές δεδομένων δευτερεύοντος ρυθμού, ροές που μεταδίδονται με ρυθμούς χαμηλότερους από εκείνους του STS-1 (όπως DS1, DS2 και E1 σήματα). Ένα τέτοιο δευτερεύον ρεύμα είναι γνωστό ως Εικονικοί Παραπόταμοι (Virtual Tributaries). Το ωφέλιμο φορτίο μπορεί επίσης να μεταφέρει ένα ολόκληρο σήμα DS3. Εκτός από τα σήματα τύπου PDH, τα οφειλόμενα φορτία STS-1 που έχουν οριστεί να μεταφέρουν κυψέλες ATM και πακέτα IP encapsulated σε πλαίσια PPP. Σε αυτό το κεφάλι εξετάζουμε τα διαφορετικά ωφέλιμα φορτία STS-1 που μπορούν να κατασκευαστούν.

#### A) Εικονικοί Παραπόταμοι (Virtual Tributaries)

Το ωφέλιμο φορτίο STS-1 χωρίζεται σε επτά ομάδες, γνωστές ως virtual tributary groups (VTG).

Κάθε VTG αποτελείται από 108 byte, τα οποία περιέχονται σε 12 στήλες. (Υποθέστε ότι κάθε H στήλη έχει πάντα εννέα γραμμές) Τα επτά VTG καταλαμβάνουν συνολικά  $12 \times 7 = 84$  στήλες



της SPE. Μία από τις υπόλοιπες τρεις στήλες χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του POH και η άλλη δύο προορίζονται για μελλοντική χρήση (δηλαδή, παραμένουν αχρησιμοποίητα). Κάθε VTG μπορεί να φέρει έναν αριθμό Virtual tributaries . Έχουν οριστεί οι ακόλουθοι Εικονικοί Παραπόταμοι (Virtual Tributaries):

- VT1.5: Αυτός ο Εικονικός Παραπόταμος (Virtual Tributaries) φέρει ένα σήμα DS1, το οποίο από μόνο του φέρει 24 DS0 σήματα, στα 64 Kbps το καθένα. Το VT1.5 περιέχεται σε τρεις στήλες, δηλαδή, παίρνει 27 byte. Τέσσερα VT1.5 μπορούν να μεταφερθούν σε ένα μόνο VTG.
- VT2: Αυτός ο Εικονικός Παραπόταμος (Virtual Tributaries) φέρει σήμα E1 2,048 Mbps, το οποίο αποτελείται από τριάντα δύο Χρονοθυρίδες (Time Slots) 8 bit , εκ των οποίων οι τριάντα χρησιμοποιούνται για φωνή και οι υπόλοιπες δύο για συγχρονισμό και έλεγχο. Το VT2 περιέχεται σε τέσσερις στήλες, δηλαδή, παίρνει 36 byte. Τρία VT2 μπορούν να μεταφερθούν σε ένα μόνο VTG.
- VT3: Αυτός ο Εικονικός Παραπόταμος (Virtual Tributaries) μεταφέρει την μη καναλιωμένη έκδοση (unchannelized version) του σήματος DS1, όπου τα όρια των Χρονοθυρίδες (Time Slots), αγνοούνται από τον εξοπλισμό αποστολής και παραλαβής. Όλα τα 192 Τα bit χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων, ακολουθούμενα το bit 193 είναι επίσης δυνατό για να χρησιμοποιεί ολόκληρο το πλαίσιο (συμπεριλαμβανομένου του bit πλαισίωσης) με μη καναλιωμένο τρόπο. Η μη καναλιωμένη έκδοση είναι γνωστή ως Συνενωμένο Κανάλι (Concatenated Channel). κεφαλαίο C (σε αντίθεση με το πεζό c που χρησιμοποιείται στο SONET). Το VT3 περιέχεται σε έξι Στήλες, δηλαδή, καταλαμβάνει 54 byte. Αυτό σημαίνει ότι ένα VTG μπορεί να μεταφέρει δύο VT3.
- VT6: Αυτός ο εικονικός παραπόταμος μεταφέρει ένα σήμα DS2, το οποίο μεταφέρει 96 κανάλια φωνής. Το VT6 περιέχεται σε δώδεκα στήλες, δηλαδή, καταλαμβάνει 108 byte. Ένα VTG μπορεί να μεταφέρει ακριβώς ένα VT6. Το ωφέλιμο φορτίο STS-1 μπορεί να μεταφέρει μόνο έναν τύπο εικονικού παραπόταμου. Δηλαδή, τα επτά VTG μπορεί να μεταφέρει μόνο VT1.5s, VT2, VT3 ή VT6. Αυτό σημαίνει ότι το ωφέλιμο φορτίο STS-1 μπορεί φέρουν συνολικά είκοσι οκτώ DS1, είκοσι ένα E1, δεκατέσσερα DS1Cs ή επτά DS2. Περισσότερο η εξελιγμένη κατασκευή ωφέλιμου φορτίου επιτρέπει την ανάμιξη διαφορετικών τύπων εικονικών παραποτάμων. Για Παράδειγμα, το ωφέλιμο φορτίο μπορεί να μεταφέρει δύο VTG (το καθένα με έναν παραπόταμο VT6) και πέντε VTGs (το καθένα με τέσσερα VT1.5s).

## B) Ασύγχρονο DS3

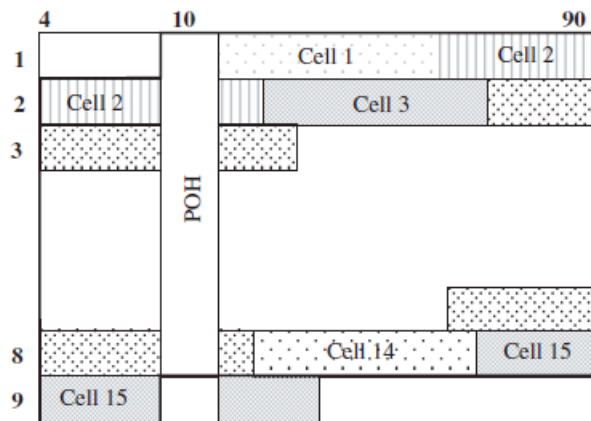
Το σήμα DS3 Πολυπλέκτες (Multiplexes) 672 κανάλια φωνής και έχει ρυθμό μετάδοσης 44,736 Mbps. Στη μη καναλιωμένη μορφή, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά συνεχούς ροής bit. Τόσο το καναλιωμένο όσο και το μη κανάλι DS3 μεταφέρονται στο STS-1 και το σήμα DS3 καταλαμβάνει ολόκληρο το ωφέλιμο φορτίο της SPE..

## C) Κυψέλες ATM

Τα κελιά ATM αντιστοιχίζονται απευθείας στο STS-1 SPE έτσι ώστε τα byte ATM να συμπίπτουν με τα byte του SONET. Ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων byte για δεδομένα χρήστη στο πλαίσιο STS-1 είναι:  $87 \times 9 = 783$ . Από αυτά τα 783 byte, 9 byte χρησιμοποιούνται για την εναέρια διαδρομή, αφήνοντας 774 byte για δεδομένα χρήστη. Ένα κελί ATM αποτελείται από 53 byte. έτσι,  $774/53 = 14$ . 6 ATM τα κύτταρα μπορούν να αποθηκευτούν σε SPE. Με άλλα λόγια, η SPE δεν μπορεί να περιέχει ακέραιο αριθμό των κυττάρων ATM. Ως αποτέλεσμα, μια κυψέλη ATM μπορεί να διασχίζεται από δύο διαδοχικές SPE, με μέρος από

αυτό σε μία SPE και το υπόλοιπο στην επόμενη SPE. Η κυψέλη ATM μπορεί να αποκοπεί σε οποιαδήποτε byte, είτε βρίσκεται στην κεφαλίδα είτε στο ωφέλιμο φορτίο. Τα κελιά ATM μπορούν επίσης να περάσουν από τη διαδρομή εναέρια byte. Ένα παράδειγμα του τρόπου αντιστοιχίσις των κυττάρων ATM στην SPE STS-1 παρουσιάζεται στην Εικόνα 40.

Για λόγους παρουσίασης, δείχνουμε μόνο ένα SPE που εκτείνεται σε δύο καρέ STS-1. Το SPE ξεκινά από τη στήλη 10, πράγμα που σημαίνει ότι τα εναέρια byte διαδρομής καταλαμβάνουν τη στήλη 10. Ας υποθέσουμε ότι το πρώτο κελί ξεκινά αμέσως μετά την πρώτη διαδρομή πάνω από το byte στήλη 11. (Τα κελιά είναι σκιασμένα και δεν σχεδιάζονται αναλογικά.) κελί ATM 1 καταλαμβάνει σειρά 1, στήλες 11 έως 63. Το κελί ATM 2 καταλαμβάνει τα υπόλοιπα byte (από τη γραμμή 1, στήλη 64 έως τη σειρά 2, στήλη 27). Η διαδρομή πάνω από το byte στη δεύτερη γραμμή παραλείπεται όταν το κελί αντιστοιχίζεται στο SPE. Το κελί ATM 3 αντιστοιχίζεται στη σειρά 2, στήλες 28 έως 80.



Εικόνα 40: Mapping ATM cells in the STS-1 SPE.

Το κελί ATM 14 αντιστοιχίζεται στη σειρά 8, στήλες 15 έως 67. Το κελί ATM 15 αντιστοιχίζεται από τη σειρά 8, στήλη 67 έως τη σειρά 9, στήλη 31. Όπως μπορούμε να δούμε, παραλείπει το ένατο μονοπάτι πάνω από το byte, και τρέχει στην επόμενη SPE.

Οι χρήστες ATM δεν μεταδίδουν πάντα συνεχώς. Κατά τη διάρκεια του χρόνου που τα κελιά ATM είναι δεν δημιουργούνται, εισάγονται αδρανή κελιά έτσι ώστε να διατηρείται η αναμενόμενη συνεχής ροή bit από τη SONET. Αυτό γίνεται στο Transmission Convergence (TC) του ATM φυσικό στρώμα. Αυτά τα αδρανή κελιά μπορούν να αναγνωριστούν μοναδικά, καθώς η κεφαλίδα τους επισημαίνεται ως:

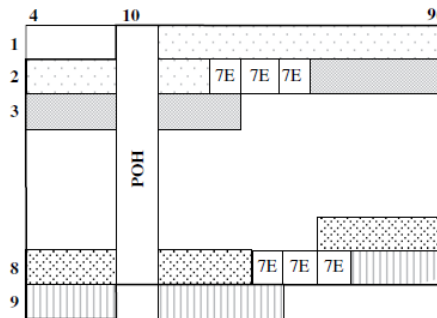
$$VPI = 0, VCI = 0, PTI = 0 \text{ και } CLP = 0.$$

Τα κύτταρα ATM χαρτογραφούνται ομοίως εντός του SPE ενός STS-3c, STS-12c κ.λπ. Ο βασικός ρυθμός που έχει οριστεί για τη μεταφορά κυττάρων ATM είναι ο STS-3c.

#### D) Πακέτο Μέσω SONET (Packet Over SONET) (PoS)

Τα πακέτα IP μπορούν να μεταφερθούν απευθείας μέσω συνδέσμων SONET. Αυτό το Εικόνα είναι γνωστό ως Πακέτο Μέσω SONET (Packet Over SONET)(PoS) και χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση δρομολογητών IP. Τα πακέτα IP ενθυλακώνονται πρώτα σε HDLC. Τα πλαίσια που προκύπτουν αντιστοιχίζονται, σειρά προς σειρά, στο ωφέλιμο φορτίο SPE, όπως στο παραπάνω περίπτωση για κυψέλες ATM. Τα πακέτα IP μπορούν επίσης να ενθυλακωθούν σε πλαίσια PPP της HDLC. Τα πλαίσια PPP τα πλαίσια καθορίζονται με το HDLC 01111110.

Όπως συμβαίνει Με το ATM, ένα πλαίσιο μπορεί να εκτείνεται πάνω από δύο παρακείμενα SPEs. Χρησιμοποιείται το γέμισμα πλαισίου 7E για να διατηρησει μια συνεχή ροή bit όταν δεν υπάρχουν πακέτα IP για μετάδοση. Ένα παράδειγμα Η αντιστοίχιση καρέ HDLC ή PPP στο ωφέλιμο φορτίο SPE παρουσιάζεται στην Εικόνα 41

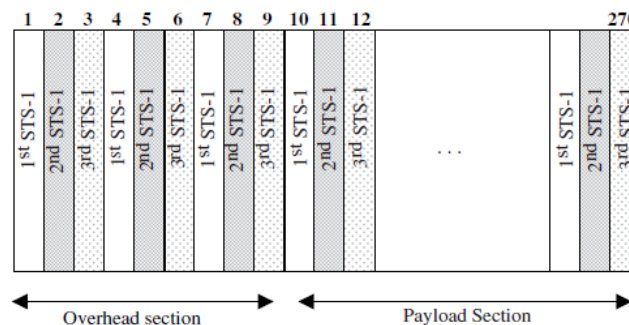


Εικόνα 41: Packet over SONET (PoS).

### 2.4 Η ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ SONET STS-3

Το πλαίσιο SONET STS-3 αποτελείται από 2430 byte και μεταδίδεται 8000 φορές ανά δευτερόλεπτο (δηλαδή μία φορά κάθε 125 msec). Αυτό δίνει συνολικό ρυθμό δεδομένων  $8000 \times 2430 \times 8 \text{ bits} / \text{sec}$  (155,520 Mbps). Το πλαίσιο εμφανίζεται σε μορφή μήτρας που αποτελείται από εννέα σειρές και 270 στήλες, όπου κάθε κελί μήτρας αντιστοιχεί σε ένα byte. Το καναλιποιημένο πλαίσιο STS-3 κατασκευάζεται με πολυπλεξία byte-wise τριών καναλιών Πλαίσια STS-1. bytes 1, 4, 7, . . . 268 του πλαισίου STS-3 περιέχει byte 1, 2, 3, . . . 90 από το πρώτο πλαίσιο STS-1. Ομοίως, τα byte 2, 5, 8, . . . 269 του πλαισίου STS-3 περιέχει byte 1, 2, 3, . . . 90 του δεύτερου πλαισίου STS-1 και byte 3, 6, 9, . . . 270 της Συνθήκης Το πλαίσιο STS-3 περιέχει byte 1, 2, 3, . . . 90 του τρίτου πλαισίου STS-1. Αυτή η byte-σοφή πολυπλεξία Προκαλεί την παρεμβολή των στηλών των τριών πλαισίων STS-1 στο πλαίσιο STS-3 (Εικόνα 42). Δηλαδή, στήλες 1, 4, 7, . . . 268 περιέχουν το πρώτο πλαίσιο STS-1. Στήλες 2, 5, 8, . . . 269 περιέχουν το δεύτερο πλαίσιο STS-1 και οι στήλες 3, 6, 9, . . . 270 περιέχουν το τρίτο πλαίσιο STS-1. Ως αποτέλεσμα αυτής της πολυπλεξίας, οι πρώτες εννέα στήλες του STS-3 το πλαίσιο περιέχει το εναέριο τμήμα και οι υπόλοιπες στήλες περιέχουν το τμήμα ωφέλιμου φορτίου. Ο έλεγχος σφαλμάτων και ορισμένα γενικά byte προορίζονται για ολόκληρο το πλαίσιο STS-3 και είναι μόνο νόημα στα γενικά byte του πρώτου πλαισίου STS-1 (τα αντίστοιχα γενικά έξοδα τα byte στα άλλα καρέ STS-1 δεν υπολογίζονται).

Το STS-3c (OC-3c) σχεδιάστηκε αρχικά για τη μεταφορά κυψελών ATM. Το STS-3c Το πλαίσιο αποτελείται από εννέα στήλες εναέριου φορτίου και 261 στήλες ωφέλιμου φορτίου. Κυψέλες ATM ή τα πακέτα IP συσκευάζονται σε μία SPE με τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφεται παραπάνω Τα υψηλότερα επίπεδα διοχετευμένου STS-N κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο όπως το STS-3 από πολυπλεξία N STS-1s.



Εικόνα 42: The channelized STS-3 frame.

## 2.5 ΣΥΣΚΕΥΕΣ SONET/SDH

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι συσκευών SONET/SDH. Ο Πολυπλέκτης Τερματικών (Terminal Multiplexer) SONET/SDH(TM) η συσκευή, πολυπλέκει έναν αριθμό σημάτων χαμηλής ταχύτητας σε σήμα υψηλότερης ταχύτητας.

Λειτουργεί επίσης προς την αντίθετη κατεύθυνση ως Αποπολυπλέκτης (Demultiplexer). Δηλαδή αποπολυπλέκει μια υψηλή ταχύτητα. Για παράδειγμα, μια συσκευή SONET TM πολυπλέκει έναν αριθμό σημάτων DS<sub>n</sub> σε ένα μόνο σήμα OC-N (Εικόνα 43(α)). Μπορεί Επίσης αποπολυπλέξει ένα σήμα OC-N σε έναν αριθμό σημάτων DS<sub>n</sub> που Αποτελείται από έναν ελεγκτή χαμηλής ταχύτητας Διεπαφές (Interfaces) για DS<sub>n</sub>, OC-N Διεπαφές (Interfaces) και (Time Slot Interchanger)(TSI), που χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση των εισερχόμενων time slot των σημάτων DS<sub>n</sub> στο STS-N SPE. Ο πολυπλέκτης προσθήκης/απόθεσης SONET/SDH (add/drop multiplexer) (ADM) είναι μια πιο σύνθετη έκδοση του TM συσκευή Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 43(b)), ένα SONET ADM λαμβάνει ένα σήμα OC-N από το οποίο μπορεί να αποπολυπλέκει και να τερματίσει οποιονδήποτε αριθμό σημάτων DS<sub>n</sub> και OC-M, όπου  $M < N$ . Ταυτόχρονα, μπορεί να προσθέσει νέα σήματα DS<sub>n</sub> και OC-M στο σήμα OC-N.

Συγκεκριμένα, το εισερχόμενο σήμα OC-N μετατρέπεται πρώτα στον ηλεκτρικό τομέα και τότε το ωφέλιμο φορτίο εξάγεται από κάθε εισερχόμενο πλαίσιο. Θυμηθείτε ότι το ωφέλιμο φορτίο αποτελείται από ένα σταθερό αριθμού byte ή time slot. Αυτές οι time slot φέρουν διαφορετικούς εικονικούς παραποτάμους, όπως τα σήματα DS<sub>n</sub> και OC-M, μερικά από τα οποία απορρίπτονται (δηλαδή τερματίζονται).

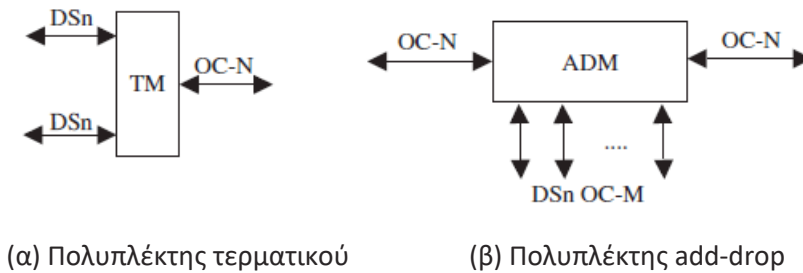
Αυτές οι πληροφορίες εξάγονται πρώτα από τις κατάλληλες χρονικές υποδοχές που φέρουν αυτές τις εικονικές παραποτάμους (virtual tributaries) και στη συνέχεια μεταδίδεται στους τοπικούς χρήστες μέσω του DS<sub>n</sub> χαμηλής ταχύτητας του ADM και OC-M διεπαφές. (Μια διασύνδεση OC-M συνήθως συνδέεται με μια συσκευή TM).Αυτή η διαδικασία τερματισμού απελευθερώνει μια σειρά από χρονικά διαστήματα στο πλαίσιο, τα οποία, μαζί με άλλα αχρησιμοποίητες χρονοθυρίδες (time slots), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά της κυκλοφορίας που δημιουργείται τοπικά. Δηλαδή, DS<sub>n</sub> και Τα σήματα OC-M που λαμβάνονται από τις διεπαφές DS<sub>n</sub> και OC-M χαμηλής ταχύτητας μπορούν να προστεθούν στο το ωφέλιμο φορτίο του πλαισίου χρησιμοποιώντας αυτές τις αχρησιμοποίητες Χρονοθυρίδες (Time Slots). Το τελικό ωφέλιμο φορτίο μεταδίδεται στο ίδιο επίπεδο SONET με το εισερχόμενο σήμα OC-N.

Οι συσκευές SONET ή SDH ADM είναι συνήθως διασυνδεδεμένες για να σχηματίσουν ένα SONET ή ένα Δακτυλίδι SDH. Οι δακτύλιοι SONET/SDH είναι Αυτοθεραπευόμενοι (Self-Healing). μπορούν να ανακτήσουν αυτόματα αστοχίες από συνδέσμων. Οι Αυτοθεραπευόμενοι (Self-Healing) δακτύλιοι αποτελούνται από δύο ή τέσσερις ίνες .

Στην (εικόνα 44), δείχνουμε έναν δακτύλιο SONET που διασυνδέει τέσσερις συσκευές ADM, υποθέτουμε ότι αυτές οι τέσσερις συσκευές ADM συνδέονται με μία μόνο ίνα και ότι η κατεύθυνση της μετάδοσης είναι δεξιόστροφη.

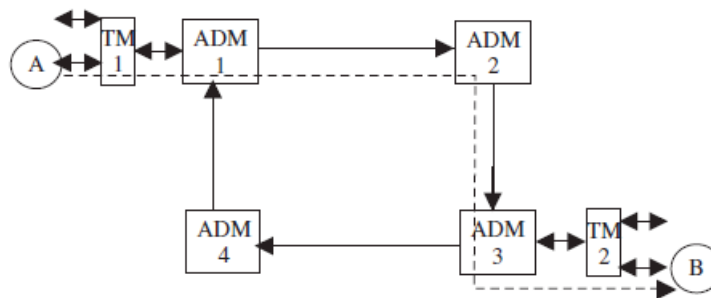
Κάθε συσκευή ADM εξυπηρετεί έναν αριθμό των τοπικών συσκευών TM και άλλων χρηστών. Ο χρήστης Α συνδέεται στο TM 1, το οποίο με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος στο ADM 1. Ο χρήστης Α έχει δημιουργήσει μια σύνδεση με τον χρήστη Β, ο οποίος είναι συνδεδεμένος ADM 3 μέσω TM 2. Στην (εικόνα 44), αυτή η σύνδεση δηλώνεται με τη διακεκομμένη γραμμή. Αφήστε μας Ας υποθέσουμε ότι ο χρήστης Α μεταδίδει ένα σήμα DS1. Αυτό πολυπλέκεται με άλλα σήματα DS1 μέσα στο TM 1 και η έξοδος μεταδίδεται στο ADM 1. Ας υποθέσουμε ότι το σήμα εξόδου του Το TM 1 είναι ένα σήμα OC-3 και ότι η ταχύτητα του δακτυλίου είναι OC-12. Το ADM 1 προσθέτει το OC-3 σήμα που λαμβάνει από το TM 1 στο ωφέλιμο φορτίο STS-

12 και το μεταδίδει στο επόμενο ADM. Το σήμα OC-12 μεταδίδεται στο ADM 2, όπου τερματίζεται και μετατρέπεται στον ηλεκτρικό τομέα. Το ADM 2 προσθέτει και απορρίπτει διάφορα σήματα και στη συνέχεια μεταδίδει το προκύπτουν πλαίσια STS-12 στο ADM 3. Στο ADM 3, το σήμα DS1 που ανήκει στο A απορρίπτεται από το ωφέλιμο φορτίο και μεταδίδεται με άλλα σήματα στο TM 2. Το TM 2 στη συνέχεια αποπολυπλέκει το σήμα και μεταδίδει το του A σήμα DS1 στο B.



Εικόνα 43: Η SONET TM και η ADM.

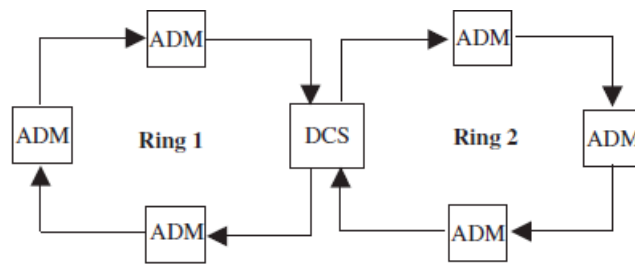
Η σύνδεση από το A στο B είναι ένα καλό παράδειγμα σύνδεσης μεταγωγής κυκλώματος. Το ρυθμίζεται χειροκίνητα χρησιμοποιώντας λογισμικό διαχείρισης δικτύου και με την κατάλληλη ρύθμιση παραμέτρων κάθε συσκευής SONET κατά μήκος της διαδρομής. Η σύνδεση είναι μόνιμη, με την έννοια ότι είναι διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η σύνδεση είναι συνεχώς ενεργοποιημένη, ανεξάρτητα από το A αν είναι μεταδίδεται συνεχώς στο B. Μια παρόμοια σύνδεση μπορεί επίσης να υπάρξει από το B στο A.



Εικόνα 44: A SONET ring.

Οι δακτύλιοι SONET/SDH διασυνδέονται για να καλύψουν μια ευρεία γεωγραφική περιοχή μέσω Ψηφιακό Σύστημα Διασύνδεσης (DCS). Ένα DCS είναι μια πιο σύνθετη έκδοση μιας συσκευής ADM. Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 45) μια συσκευή ADM λαμβάνει σήμα OC-N από την εισερχόμενη ίνα του δακτυλίου εργασίας. Στη συνέχεια μεταδίδει ένα νέο σήμα OC-N στην εξερχόμενη ίνα του δακτυλίου. Ένας κόμβος DCS έχει παρόμοια λειτουργικότητα, αλλά είναι συνδεδεμένος σε πολλούς εισερχόμενους και εξερχόμενες διεπαφές OC-N. Για κάθε εισερχόμενο σήμα OC-N, μπορεί να πέσει και να προσθέσει οποιοδήποτε αριθμός σημάτων DSn ή OC-M,  $M < N$ , όπως στην περίπτωση συσκευής ADM. Επιπλέον, μπορεί να αλλάξει σήματα DSn ή OC-M από μια εισερχόμενη διεπαφή (Interface) σε οποιαδήποτε εξερχόμενη διεπαφή.

Στην (Εικόνα 45) δείχνει έναν κόμβο DCS που διασυνδέει δύο δακτυλίους (Ring 1 και Ring 2). Ο κόμβος DCS λαμβάνει πλαίσια STS-N από το Ring 1. Για κάθε πλαίσιο, ο κόμβος DCS στη συνέχεια πέφτει προκαθορισμένους Εικονικούς Παραπόταμους (Virtual Tributaries). Στη συνέχεια προσθέτει νέους Εικονικούς Παραπόταμους (Virtual Tributaries) αυτούς που προέρχονται από το τοπικές συσκευές SONET (δηλαδή, που είναι απευθείας συνδεδεμένες στο DCS) και εκείνες που προέρχονται από Δακτυλίδι 2.



Εικόνα 45:Ένας κόμβος Ψηφιακό Σύστημα Διασύνδεσης (DCS).

Το αποτέλεσμα STS-N πλαίσια μεταδίδονται στη γειτονική συσκευή ADM Ring 1. Οι εικονικοί παραπόταμοι που απορρίφθηκαν είτε παραδίδονται στις τοπικές συσκευές SONET είτε αλλάζουν στο Ring 2. Ομοίως, το DCS λαμβάνει καρέ STS-N από το Ring 2 – από το οποίο ρίχνει μερικούς Εικονικούς Παραπόταμους (Virtual Tributaries) και προσθέτει νέους που δημιουργούνται από την τοπική SONET συσκευές που είναι προσαρτημένες στο DCS – και από το Ring 1. Τα STS-N πλαίσια που προκύπτουν μεταδίδονται στη γειτονική συσκευή ADM στο Ring 2. Οι Εικονικούς Παραπόταμους (Virtual Tributaries) που έπεσαν είτε παραδίδονται στις τοπικές συσκευές SONET είτε αλλάζουν στο Ring 1.

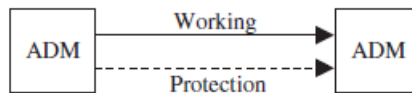
Ένας κόμβος DCS είναι εξοπλισμένος με Ύφασμα Διακόπτη (Switch Fabric) έτσι ώστε να μπορεί να αλλάζει Εικονικούς Παραπόταμους (Virtual Tributaries) από μία διεπαφή εισόδου σε μια διεπαφή εξόδου. Συγκεκριμένα, το ύφασμα διακόπτη μπορεί να αλλάξει Τα δεδομένα που μεταφέρονται σε μία ή περισσότερες χρονικές χρονοθυρίδες κάθε εισερχόμενου πλαισίου από οποιαδήποτε διασύνδεση εισόδου στον ίδιο αριθμό time slots, αλλά όχι απαραίτητα στην ίδια θέση, του εξερχόμενου πλαισίου οποιασδήποτε Διεπαφής (Interface) εξόδου. Εξυπηρετεί όλες τις διεπαφές εισόδου ταυτόχρονα Οι τυπικοί πελάτες περιλαμβάνουν: δίκτυα πρόσβασης που βασίζονται σε ADSL, καλωδιακά δίκτυα πρόσβασης, μικροί τηλεφωνικοί διακόπτες (ιδιωτικό κέντρο υποκαταστημάτων ή τηλεφωνικό κέντρο), δίκτυα πρόσβασης αποθήκευσης (Storage Access Networks)(SAN) και εταιρικά δίκτυα. Ένας κεντρικός δακτύλιος μετρό διασυνδέει τους δακτυλίους των άκρων του μετρό, μεγάλους τηλεφωνικούς διακόπτες και σημεία παρουσίας ISP (Points Of Presence)(POP). Επίσης στέλνει και λαμβάνει κίνηση προς και από μεγαλύτερα περιφερειακά και δίκτυα μεγάλων αποστάσεων. Απαιτήσεις κυκλοφορίας σε δακτύλιο πυρήνα του μετρό είναι δυναμικά, σε αντίθεση με έναν δακτύλιο άκρων του μετρό με αρκετά στατικά μοτίβα κυκλοφορίας. Πυρήνας του μετρό Οι δακτύλιοι διασυνδέονται χρησιμοποιώντας κόμβους DCS για να σχηματίσουν ένα δίκτυο πλέγματος

## 2.6 ΔΑΚΤΥΛΙΟΙ SONET/SDH ΑΥΤΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ

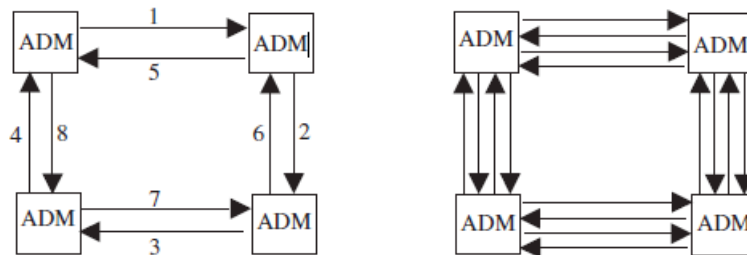
Οι δακτύλιοι SONET/SDH έχουν σχεδιαστεί ειδικά ώστε να είναι εξαιρετικά αξιόπιστοι. Ειδικά είναι διαθέσιμα 99.999% του χρόνου, το οποίο μεταφράζεται σε μέσο χρόνο διακοπής λειτουργίας για το δίκτυο των μόλις έξι λεπτών το χρόνο! Μία από τις κύριες αιτίες για να πάει ένα δακτύλιο κάτω είναι η αποτυχία ενός συνδέσμου ινών. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η ίνα διακοπεί κατά λάθος ξεθωριάζει ή όταν ο εξοπλισμός μετάδοσης αποτύχει ή δέκτη στη σύνδεση οπτικών ινών αποτύχει. Επίσης, μπορεί να προκύψει αποτυχία σύνδεσης όταν αποτύχει μια συσκευή SONET/SDH, αν και αυτό συμβαίνει πολύ σπάνια, καθώς αυτές οι συσκευές έχουν υψηλό βαθμό πλεονασμού. Περικοπές ινών λόγω εκσκαφής μια περιοχή όπου περνούν καλώδια οπτικών ινών, ωστόσο, είναι αρκετά συνηθισμένα. Δακτύλιοι SONET/SDH Αυτοθεραπεία (Self-Healing), έτσι ώστε οι υπηρεσίες του δακτυλίου να μπορούν να αποκατασταθούν αυτόματα ακολουθώντας έναν σύνδεσμο αποτυχία ή υποβάθμιση του

σήματος δικτύου. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας την Αυτόματη Μεταγωγή Προστασίας Ethernet (Automatic Protection Switching)(APS).Ο χρόνος αποκατάστασης των υπηρεσιών πρέπει να είναι μικρότερος από 50 msec.

Ο χρόνος επαναφοράς των υπηρεσιών πρέπει να είναι μικρότερος από 50 msec. Σε αυτό το κεφάλαιο , περιγράφουμε αρχικά συστήματα προστασίας για SONET/SDH από σημείο σε σημείο και στην συνέχεια, περιγράφουμε αρκετές αρχιτεκτονικές δακτυλίου SONET/SDH που αυτοθεραπεύονται. Το απλούστερο δίκτυο SONET/SDH είναι ένας σύνδεσμος οπτικών ινών από σημείο σε σημείο που συνδέει δύο Συσκευές SONET/SDH. Η προστασία συνδέσμων μπορεί να γίνει με ειδικό τρόπο 1+1 ή με κοινόχρηστο 1: 1 ή 1 : N τρόπος. Στην (Εικόνα 46) 1+1 οι δύο συσκευές συνδέονται με δύο διαφορετικές ίνες .Το ένα χαρακτηρίζεται ως ίνα εργασίας και το άλλο ως ίνα προστασίας. Το σήμα SONET/SDH διαιρείται και στη συνέχεια μεταδίδεται ταυτόχρονα και στις δύο ίνες. Ο προορισμός επιλέγει το καλύτερο από τα δύο σήματα με βάση την ποιότητά τους. Εάν μια ίνα αποτύχει, ο προορισμός συνεχίζει να λαμβάνει το σήμα από την άλλη ίνα. Οι ίνες εργασίας και προστασίας πρέπει να δρομολογούνται διαφορετικά. Δηλαδή, οι δύο ίνες χρησιμοποιούν χωριστούς αγωγούς και διαφορετικές φυσικές διαδρομές. Συχνά, για οικονομικούς λόγους, οι δύο ίνες χρησιμοποιούν διαφορετικούς αγωγούς, αλλά χρησιμοποιούν την ίδια φυσική διαδρομή. Σε αυτή την περίπτωση, λέμε ότι είναι δομικά διαφορετικές.



Εικόνα 46: The 1 + 1 protection scheme.



α) Δακτύλιος δύο ινών

β) Δακτύλιος τεσσάρων ινών

Εικόνα 46: SONET/SDH rings.

Στην Εικόνα 46 , εξακολουθούν να υπάρχουν δύο διαφορετικά δρομολογημένες ίνες: μια ίνα εργασίας και μια ίνα προστασίας. Το σήμα μεταδίδεται μέσω της ίνας εργασίας. Εάν αυτή η ίνα αποτύχει, τότε η πηγή και ο προορισμός μεταβαίνουν και οι δύο στην ίνα προστασίας, σύμφωνα με 1:N το οποίο οι ίνες εργασίας N προστατεύονται από ένα μόνο ίνας προστασίας. Δεδομένου ότι υπάρχει μία ίνα προστασίας και μόνο μία ίνα εργασίας μπορεί να προστατευθεί ανά πάσα στιγμή. Μόλις επισκευαστεί μια λειτουργική ίνα, το σήμα αλλάζει ξανά, είτε αυτόματα ή χειροκίνητα, από την ίνα προστασίας έως την ίνα εργασίας. Οι αυτοθεραπευόμενες αρχιτεκτονικές δακτυλίου SONET/SDH διακρίνονται από τις ακόλουθες τρεις χαρακτηριστικά:

- Αριθμός ινών: Ένας δακτύλιος SONET / SDH μπορεί να αποτελείται είτε από δύο είτε από τέσσερις ίνες (Εικόνα 47). Στο δακτύλιο δύο ινών, οι ίνες 1, 2, 3 και 4 χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν την εργασία δακτύλιο και οι ίνες 5, 6, 7 και 8 χρησιμοποιούνται για να

σχηματίζουν το δακτύλιο προστασίας. Διαβίβαση στο ο δακτύλιος εργασίας είναι δεξιόστροφος, στο δακτύλιο προστασίας, είναι αριστερόστροφα (όπως υποδεικνύεται από τα βέλη στην Εικόνα 47). Σε μια άλλη παραλλαγή του δακτυλίου δύο ινών, κάθε σετ οι ίνες (δηλαδή οι ίνες 1, 2, 3, 4 και οι ίνες 5, 6, 7, 8) σχηματίζουν ένα δακτύλιο που μπορεί να λειτουργήσει και ως δύο ένα δακτύλιο εργασίας και ένα δακτύλιο προστασίας. Σε αυτή την περίπτωση, η χωρητικότητα κάθε ίνας διαιρείται σε δύο ίσα μέρη το ένα για την κυκλοφορία εργασίας και το άλλο για την κυκλοφορία προστασίας. Σε μια δακτύλιος SONET / SDH τεσσάρων ινών, υπάρχουν δύο δακτύλιοι εργασίας και δύο δακτύλιοι προστασίας (ένας ανά δακτύλιο εργασίας).

Όπως και στην περίπτωση σύνδεσης οπτικών ινών SONET/SDH από σημείο σε σημείο, η λειτουργία και η προστασία οι δακτύλιοι είναι διαφορετικοί. Δηλαδή, οι ίνες μεταξύ δύο παρακείμενων συσκευών SONET / SDH χρησιμοποιούν διαφορετικούς αγωγούς και διαφορετικές φυσικές διαδρομές. Οι δακτύλιοι εργασίας και προστασίας μπορεί επίσης να είναι δομικά ποικίλη, η οποία είναι συνήθως πιο οικονομική. Στην περίπτωση αυτή, οι ίνες μεταξύ δύο παρακείμενων συσκευών SONET/SDH χρησιμοποιούν διαφορετικούς αγωγούς, αλλά ακολουθούν την ίδια φυσική διαδρομή.

- Κατεύθυνση μετάδοσης: Ένας δακτύλιος SONET/SDH μπορεί να είναι μονής κατεύθυνσης ή αμφίδρομος. Σε μονής κατεύθυνσης δακτύλιο, τα σήματα μεταδίδονται μόνο προς μία κατεύθυνση του δακτυλίου σε ένα αμφίδρομος δακτύλιος, τα σήματα μεταδίδονται και προς τις δύο κατευθύνσεις.

- Εναλλαγή γραμμής ή διαδρομής: Η προστασία σε δακτύλιο SONET/SDH μπορεί να βρίσκεται στο επίπεδο μιας γραμμής ή ένα μονοπάτι. Υπενθυμίζουμε ότι μια γραμμή είναι ένας σύνδεσμος μεταξύ δύο SONET/SDH συσκευές και μπορεί να περιλαμβάνουν αναγεννητές. Μια διαδρομή είναι μια σύνδεση από άκρο σε άκρο μεταξύ του το σημείο από το οποίο προέρχεται η SPE και το σημείο στο οποίο τερματίζεται. Η μεταγωγή γραμμής αποκαθιστά όλη την κυκλοφορία που Πέραστε μέσα από μια αποτυχημένη σύνδεση και η εναλλαγή διαδρομών επαναφέρει ορισμένες από τις συνδέσεις που επηρεάστηκαν από αποτυχία σύνδεσης. Με βάση αυτά τα τρία χαρακτηριστικά, έχουμε τις ακόλουθες αρχιτεκτονικές δακτυλίων δύο ή τεσσάρων ινών:

Μονής Κατεύθυνσης Δακτύλιο Μεταγωγής Γραμμής (Unidirectional Line-Switched Ring)(ULSR), Αμφίδρομος Δακτύλιος Μεταγωγής Γραμμής (Bidirectional Line-Switched Ring)(BLSR), Μονής Κατεύθυνσης Δακτύλιο Μεταγωγής Διαδρομής (Unidirectional Path-Switched Ring)(UPSR) και αμφίδρομος δακτύλιος μεταγωγής διαδρομής (BPSR). Από αυτοί οι δακτύλιοι, οι ακόλουθοι τρεις χρησιμοποιούνται αυτήν τη στιγμή: εναλλαγή διαδρομής Μονής Κατεύθυνσης Δακτύλιο Μεταγωγής Διαδρομής 2 Ινών (2 Fibre Unidirectional Path-Switched Ring)(2F-UPSR), Αμφίδρομος Δακτύλιος Μεταγωγής Γραμμής 2 Ινών (2 Fibre Bidirectional Line-Switched Ring)(2F-BLSR) και Αμφίδρομος Δακτύλιος Μεταγωγής Γραμμής 4 Ινών (4 Fibre Bidirectional Line-Switched Ring)(4F-BLSR) Αυτές οι τρεις αρχιτεκτονικές δακτυλίων συζητούνται παρακάτω αναλυτικά.

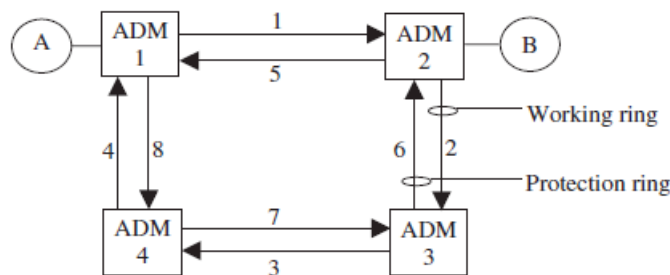
### 2.6.1 Two-fiber Unidirectional Path Switched Ring (2F-UPSR)

Αυτή η αρχιτεκτονική δακτυλίου, όπως υποδηλώνει το όνομά της, αποτελείται από δύο ίνες με μονής κατεύθυνσης μετάδοση και εναλλαγή διαδρομής. στην (Εικόνα 48) δείχνει ένα παράδειγμα αυτής της αρχιτεκτονικής δακτυλίου δακτυλογραφώ. Ο δακτύλιος εργασίας αποτελείται από ίνες 1, 2, 3 και 4. ο δακτύλιος προστασίας αποτελείται από ίνες 5, 6, 7 και 8. Ο δακτύλιος είναι μονής κατεύθυνσης, πράγμα που σημαίνει ότι η κυκλοφορία μεταδίδεται στο ίδια κατεύθυνση. Δηλαδή, το A μεταδίδει στο B πάνω από την ίνα 1 του δακτυλίου



εργασίας και το B μεταδίδει πάνω από τις ίνες 2, 3 και 4 του δακτυλίου εργασίας. Παρέχεται προστασία στο επίπεδο της διαδρομής χρησιμοποιώντας ένα παρόμοιο με το 1+1 που περιγράφεται παραπάνω. Δηλαδή, το σήμα που μεταδίδεται από το A χωρίζεται δύο αντίγραφα. ένα αντίγραφο μεταδίδεται πάνω από την ίνα εργασίας (ίνα 1) και το άλλο αντίγραφο μεταδίδεται μέσω των ινών προστασίας (ίνες 8, 7 και 6). Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, το B λαμβάνει δύο πανομοιότυπα σήματα από το A και επιλέγει αυτό με την καλύτερη ποιότητα. Εάν οι ίνες Το 1 αποτυγχάνει και, στη συνέχεια, το B θα συνεχίσει να λαμβάνει το σήμα του A μέσω της διαδρομής προστασίας. Το ίδιο ισχύει εάν υπάρχει αποτυχία κόμβου.

Αυτή είναι μια απλή αρχιτεκτονική δακτυλίου. χρησιμοποιείται ως δακτύλιος μετρό για τη διασύνδεση των PBX και πρόσβαση σε δίκτυα σε δακτύλιο πυρήνα του μετρό. Οι τυπικές ταχύτητες μετάδοσης είναι OC-3/STM-1 και OC-12/STM-4. Το μειονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής δακτυλίου είναι ότι η μέγιστη κίνηση που μπορεί να μεταφέρει είναι ίση με την κίνηση που μπορεί να μεταφέρει σε μία μόνο ίνα.



Εικόνα 47: παράδειγμα UPSR 2F.

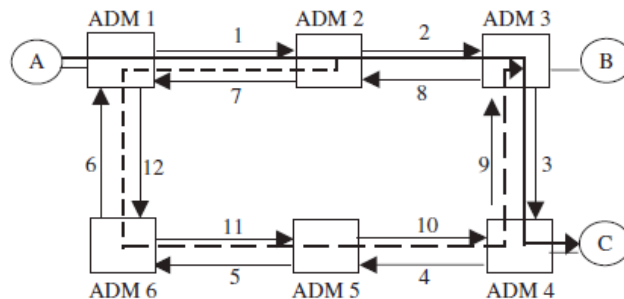
### 2.6.2 Two-fiber Bidirectional Line Switched Ring (2F-BLSR)

Πρόκειται για δακτύλιο δύο ινών με αμφίδρομη μετάδοση και εναλλαγή γραμμής. Χρησιμοποιείται δακτύλιο πυρήνα του μετρό. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 49, οι ίνες 1, 2, 3, 4, 5 και 6 σχηματίζουν ένα δακτύλιο (Δακτύλιος 1), στην οποία η μετάδοση είναι δεξιόστροφη. Οι ίνες 7, 8, 9, 10, 11 και 12 εν τω μεταξύ σχηματίζουν έναν άλλος δακτύλιο (Ring 2), στον οποίο η μετάδοση είναι αριστερόστροφη. Σε αντίθεση με το 2F-UPSR, και οι δύο δακτύλιοι 1 και 2 φέρουν κυκλοφορία εργασίας και προστασίας. Αυτό γίνεται διαιρώντας το χωρητικότητα κάθε ίνας στους δακτυλίους 1 και 2 σε δύο μέρη. Ένα μέρος χρησιμοποιείται για τη μεταφορά εργασίας κυκλοφορία, και το άλλο μέρος για τη μεταφορά της κυκλοφορίας προστασίας. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι η ταχύτητα μετάδοσης κάθε ίνας είναι OC-12 / STM-4. Στη συνέχεια, κατανέμονται δύο OC-3/STM-1 στην κυκλοφορία εργασίας και τα άλλα δύο για την προστασία της κυκλοφορίας. Δεδομένου ότι μόνο δύο OC-3 / STM-1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κυκλοφορία εργασίας, τη μέγιστη χωρητικότητα που μπορεί να μεταφέρει το 2F-BLSR και οι δύο δακτύλιοι 1 και 2 είναι OC-12 / STM-4. Η χωρητικότητα που διατίθεται για την προστασία της κυκλοφορίας σε οποιοδήποτε από τα δύο Οι δακτύλιοι 1 και 2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά κίνησης χαμηλής προτεραιότητας. Αυτή η κίνηση μπορεί να προεγγραφεί περίπτωση αστοχίας μιας ίνας. Ο δακτύλιος είναι αμφίδρομος, πράγμα που σημαίνει ότι ένας χρήστης μπορεί να μεταδώσει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Εκείνος είναι, μπορεί να μεταδώσει είτε στο Ring 1 είτε στο Ring 2, ανάλογα με τη διαδρομή της συντομότερης διαδρομής στον προορισμό. Ενόψει αυτού, υπό κανονική λειτουργία, ο A μεταδίδει στον B μέσω του το τμήμα εργασίας των ινών 1 και 2 του δακτυλίου 1 και το B μεταδίδει στο A πάνω από το τμήμα εργασίας του ίνες 8 και 7 του δακτυλίου 2.

Ας υποθέσουμε ότι η ίνα 2 αποτυγχάνει. Δεδομένου ότι ο δακτύλιος παρέχει εναλλαγή γραμμής, όλη η κίνηση που πηγαίνει πάνω από την ίνα 2 θα αλλάξει αυτόματα στο τμήμα προστασίας του Ring 2. Αυτό δηλαδή, όλη η κίνηση θα αναδρομολογηθεί στο ADM 3 πάνω από το τμήμα προστασίας του Ring 2 χρησιμοποιώντας fibers 7, 12, 11, 10, and 9. Από εκεί, η κίνηση για κάθε σύνδεση θα συνεχιστεί ακολουθώντας την αρχική διαδρομή της σύνδεσης.

### 2.6.3 Four-fiber Bidirectional Line Switched Ring (4F -BLSR)

Είναι ένας δακτύλιος τεσσάρων ιών με αμφίδρομη μετάδοση και εναλλαγή γραμμής. Υπάρχουν τέσσερις ίνες μεταξύ δύο γειτονικών συσκευών SONET/SDH. Σχηματίζουν δύο δακτυλίους εργασίας και δύο δακτυλίους προστασίας (Εικόνα 49). Οι δύο δακτύλιοι εργασίας μεταδίδουν αντίθετα κατευθύνσεις, η μία δεξιόστροφα και η άλλη αριστερόστροφα. Κάθε δακτύλιος εργασίας προστατεύεται από ένα δακτύλιο προστασίας που μεταδίδει προς την ίδια κατεύθυνση. Οι δακτύλιοι προστασίας μπορούν είτε να είναι αδρανής ή να φέρει κυκλοφορία χαμηλής προτεραιότητας, η οποία μπορεί να προκαταληφθεί σε περίπτωση βλάβης των οπτικών ιών.

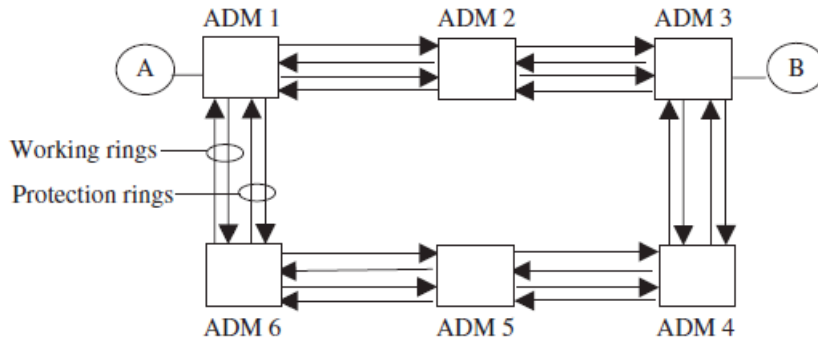


Εικόνα 48: παράδειγμα 2F-BLSR.

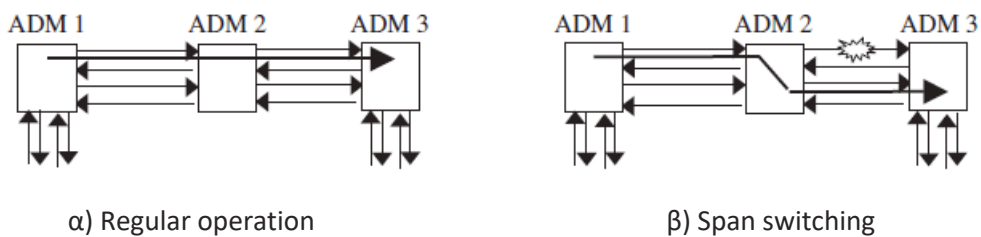
και δύο δακτυλίους προστασίας (Εικόνα 50). Οι δύο δακτύλιοι εργασίας εκπέμπουν σε αντίθετες κατευθύνσεις, ο ένας δεξιόστροφα και ο άλλος αριστερόστροφα. Κάθε δακτύλιος εργασίας προστατεύεται από έναν δακτύλιο προστασίας που εκπέμπει προς την ίδια κατεύθυνση. Οι δακτύλιοι προστασίας μπορούν είτε να είναι αδρανείς είτε να μεταφέρουν κίνηση χαμηλής προτεραιότητας, η οποία μπορεί να προληφθεί σε περίπτωση βλάβης της ίνας. Το πλεονέκτημα αυτού του δακτυλίου τεσσάρων ιών έναντι του δακτυλίου δύο ιών που αναφέρθηκε παραπάνω ότι μπορεί να υποστεί πολλαπλές αστοχίες και να συνεχίσει να λειτουργεί. Ενόψει αυτού, αναπτύσσεται από εταιρείες τηλεφωνίας μεγάλων αποστάσεων περιφερειακούς και εθνικούς δακτυλίους.

Ο δακτύλιος είναι αμφίδρομος, πράγμα που σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να εκπέμψει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Δηλαδή, μπορεί να εκπέμψει σε οποιονδήποτε από τους δακτυλίους εργασίας, ανάλογα με τη συντομότερη διαδρομή προς τον προορισμό. Για παράδειγμα, ο χρήστης A εκπέμπει στο B μέσω του ADM 2 μέσω του δεξιόστροφου δακτυλίου εργασίας και ο B μεταδίδει στο A μέσω του ADM 2 μέσω του αριστερόστροφου δακτυλίου εργασίας. Εάν μια ίνα εργασίας αποτύχει, τότε η κίνηση εργασίας θα μεταφερθεί πάνω από τον δακτύλιο προστασίας της. Αυτό είναι γνωστό ως μεταγωγή εύρους. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι η ίνα εργασίας μεταξύ των συσκευών ADM 2 και 3 στον δεξιόστροφο δακτύλιο προστασίας αποτυγχάνει. Στη συνέχεια, όλη η λειτουργική κίνηση θα εκτραπεί στην προστατευτική ίνα μεταξύ των συσκευών ADM 2 και 3 του δεξιόστροφου δακτυλίου προστασίας (όπως φαίνεται από τη συμπαγή γραμμή στο Εικόνα 51). Συχνά, οι δύο ίνες εργασίας αποτελούν μέρος της ίδιας δέσμης ιών. Επομένως, μπορεί να κοπούν και τα δύο ταυτόχρονα. Το ίδιο ισχύει και για τις ίνες προστασίας. Όταν οι δύο ίνες εργασίας

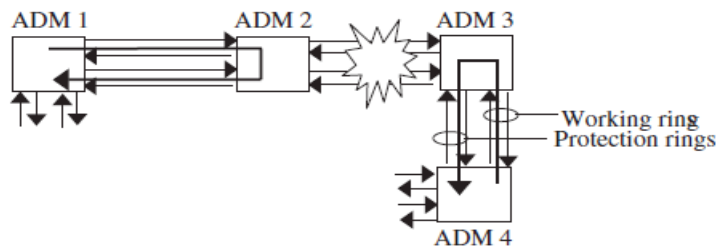
μεταξύ δύο συσκευών SONET/SDH κοπούν και οι δύο, τότε η κίνηση εργασίας θα μεταβεί αυτόματα στις ίνες προστασίας. Είναι επίσης πιθανό οι ίνες εργασίας και οι ίνες προστασίας να μην απέχουν πολύ μεταξύ τους και να κοπούν όλες ταυτόχρονα. Σε αυτή την περίπτωση, η κίνηση θα μεταφερθεί στις ίνες προστασίας, γνωστές ως εναλλαγή δακτυλίου (Εικόνα 52). Ας υποθέσουμε ότι οι χρήστες A και B έχουν δημιουργήσει μια αμφίδρομη σύνδεση (δείτε τη συνεχή γραμμή στην Εικόνα 52(α)). Το ζεύγος ινών εργασίας και το ζεύγος ινών προστασίας το καθένα εμφανίζεται ως ενιαία δέσμη. Όταν κοπούν και οι τέσσερις ίνες μεταξύ ADM 2 και 3, ο δακτύλιος θα ξανά δρομολογήσει αυτόματα την κίνηση (Εικόνα 52(β)).



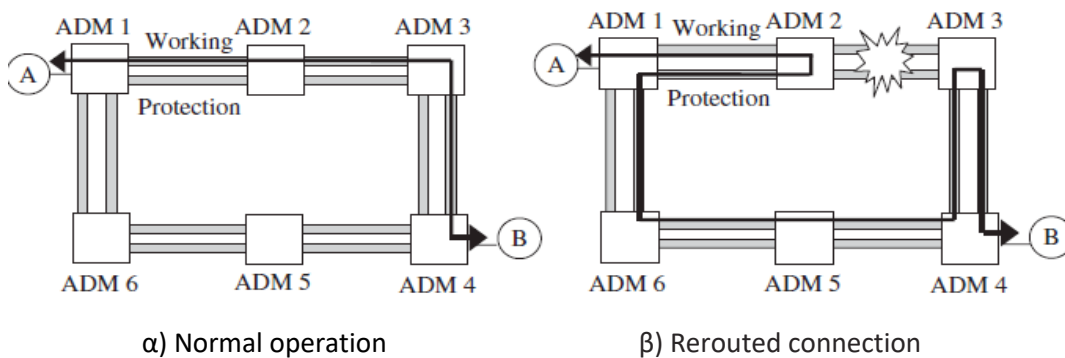
Εικόνα 49: An example of a 4F-BLSR.



Εικόνα 50: Span switching between ADM devices 2 and 3.



Εικόνα 51: An example of ring switching.

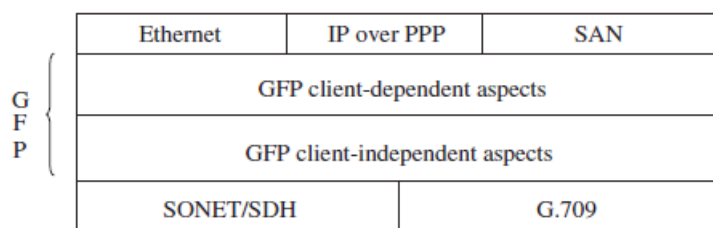


Εικόνα 52: Rerouting of a connection.

## 2.7 THE GENERIC FRAMING PROCEDURE (GFP)

Όπως είδαμε, το SONET/SDH έχει βελτιστοποιηθεί για να μεταφέρει φωνητική κίνηση. Έχει επίσης οριστεί να μεταφέρει κίνηση ATM και πακέτα IP (PoS). Το GFP είναι ένα απλό σχήμα προσαρμογής που επεκτείνει την ικανότητα του SONET/SDH να μεταφέρει διαφορετικούς τύπους κίνησης. Συγκεκριμένα, επιτρέπει τη μεταφορά κίνησης προσανατολισμένης στο πλαίσιο, όπως Ethernet και IP μέσω PPP. Επιτρέπει επίσης κωδικοποιημένα δεδομένα μπλοκ συνεχούς ρυθμού bit από Storage Area Networks (SAN) που μεταφέρονται από δίκτυα, όπως κανάλια οπτικών ινών, fiber channel, Fiber Optic Connection (FICON) και Enterprise System Connect (ECON). Το GFP προκύπτει από μια κοινή προσπάθεια τυποποίησης των ANSI, επιτροπής T1X1.5 και ITU-T

Το GFP αποτελείται από πτυχές που είναι ανεξάρτητες από τον πελάτη και εξαρτώμενες από τον πελάτη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 54. Οι πτυχές που είναι ανεξάρτητες από τον πελάτη ισχύουν για όλη την κίνηση που είναι προσαρμοσμένη στο GFP. Οι πτυχές ανεξάρτητες από τον πελάτη καλύπτουν επίσης λειτουργίες όπως οριοθέτηση πλαισίου GFP, συγχρονισμός ζεύξης δεδομένων και κρυπτογράφηση πολυπλεξίας PDU πελάτη και παρακολούθηση απόδοσης ανεξάρτητη από τον πελάτη. Οι εξαρτώμενες από τον πελάτη πτυχές του GFP καλύπτουν τη λειτουργία, όπως η αντιστοίχιση των PDU του πελάτη στο ωφέλιμο φορτίο GFP. παρακολούθηση απόδοσης για συγκεκριμένο πελάτη. και λειτουργίες.



Εικόνα 53: The GFP stack.

### Τρίτο κεφάλαιο: Optical Transport Network (OTN)

Σχεδιάστηκε το Οπτικό Δίκτυο Μεταφοράς (OTN), που μερικές φορές αναφέρεται ως G.709 για τη μεταφορά κίνησης πακέτων δεδομένων όπως IP και Ethernet μέσω οπτικών ινών, όπως και η κυκλοφορία παλαιού τύπου και ιδίως η SONET/SDH. Ονομάζεται ψηφιακό περιτύλιγμα τεχνολογία επειδή τυλίγει οποιοδήποτε σήμα πελάτη σε γενικές πληροφορίες για λειτουργίες, διοίκηση και διαχείριση. Οι τιμές γραμμής του OTU1, OTU2 και OTU3, είναι όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 3. Βασίζεται σε έννοιες SONET/SDH και διαθέτει τα ακόλουθα Δυνατότητες.

**Πίνακας 3:** Τιμές γραμμής OTN σε σύγκριση με τις τιμές γραμμής SONET/SDH

OTN (G.709)	Line Rates	SONET/SDH	Line Rates
OTU1:	2.666 Gb/s	STS-48/ STM-16:	2.488 Gb/s
OTU2:	10.709 Gb/s	STS-192/ STM-64:	9.953 Gb/s
OTU3:	43.018 Gb/s	STS-786/STM-128:	39.813 Gb/s

Το Optical Transport Network (OTN) είναι ένα πρότυπο για τη διάδοση ψηφιακών δεδομένων μέσω οπτικών ινών. Το OTN αποσυνδέει το φυσικό επίπεδο μεταξύ του Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου (MAC) και του επιπέδου μεταφοράς σε ένα δίκτυο IP, επιτρέποντας σε αυτά τα

επίπεδα να εκτελούνται σε ξεχωριστές συσκευές. Αυτό επιτρέπει ευέλικτες λειτουργίες δικτύου και αποτελεσματική διαχείριση δικτύου. Το OTN είναι ένα πρότυπο που αναπτύχθηκε από τον Τομέα Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών της ITU και βασίζεται στην έννοια της Μονάδα Σύγχρονης Μεταφοράς (STM). Το OTN χρησιμοποιεί τεχνολογία οπτικών ινών για μετάδοση δεδομένων πολυπλεξίας, αντί για χαλκό ή άλλα μέσα μετάδοσης. Μπορεί να χειριστεί κίνηση έως και 8.192 Terabits ανά δευτερόλεπτο (Tbit/s). Τα Οπτικό Δίκτυο Μεταφοράς (OTN) είναι ένας συγκεκριμένος τύπος τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Το OTN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση ενός οπτικού φορέα επιπέδου 3 (OC-3) (Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU-T) G. 957) γραμμή σε ένα δίκτυο πρόσβασης ή για την παροχή των υπηρεσιών μέσω ενός κορμού interface. Το Optical Transport Network είναι η συλλογή διασυνδεδεμένων καλωδίων οπτικών ινών που μεταφέρουν σήματα από τη μια θέση στην άλλη. Το OTN έχει σχεδιαστεί για να είναι επεκτάσιμο, πράγμα που σημαίνει ότι εάν θέλετε περισσότερο εύρος ζώνης ή χωρητικότητα στο δίκτυό σας, μπορείτε απλώς να προσθέσετε περισσότερη ίνα ή να αποθέσετε περισσότερους κόμβους. Για εξοικονόμηση κόστους και χώρου, το OTN αναπτύσσεται συχνά ως υπηρεσία που βασίζεται σε σύννεφο που περιλαμβάνει πολλές τοποθεσίες καθώς και διαφορετικούς παρόχους.

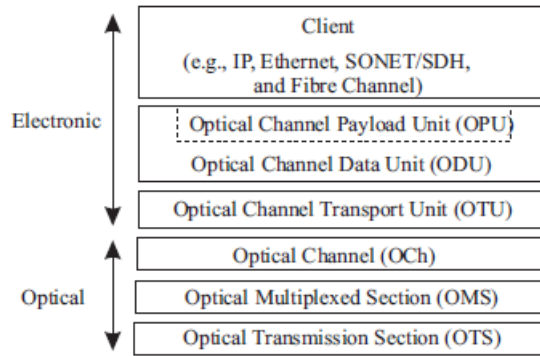
### 3.1 Forward Error Correction (FEC):

Πρόσθια Διόρθωση Σφαλμάτων (FEC) Το OTN έχει σχεδιαστεί για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, όπως φαίνεται στον (Πίνακα 3) Σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων ή σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, ο θόρυβος είναι σημαντικός και γίνεται πρόβλημα όταν διασφαλίζονται χαμηλά ποσοστά σφάλματος bit. Η διόρθωση σφαλμάτων προς τα εμπρός (FEC) είναι κρίσιμη για να πετύχει αυτών των χαμηλών ρυθμών σφάλματος bit. Το FEC είχε ήδη χρησιμοποιείται στις υλοποιήσεις του SDH. Αυτά είναι ιδιόκτητα σχήματα κωδικοποίησης που βασίζονται στη χρήση αχρησιμοποίητα byte γενικής χρήσης τμημάτων για τη μεταφορά των περιττών byte FEC.

Ωστόσο, η απόδοση είναι περιορισμένη καθώς ο αριθμός των byte είναι περιορισμένος και η Διαλειτουργικότητα (Interoperability) με άλλο εξοπλισμό προμηθευτή δεν μπορεί να εξασφαλιστεί. Το OTN έχει σχεδιαστεί για να μεταφέρει γενικά FEC και χρησιμοποιεί ισχυρότερο FEC χρησιμοποιώντας το (255.239) Κώδικας Reed-Solomon. Έτσι, για κάθε μπλοκ 255 byte, υπάρχουν 16 πλεονάζοντα byte. Το FEC μπορεί να διορθώσει σφάλματα σε ένα μπλοκ έως και 8 byte σφάλματος και να εντοπίσει ένα σφάλμα σε ένα μπλοκ με το πολύ 16 byte σφάλματος. Τα μπλοκ παρεμβάλλονται για να αυξηθεί το μήκος των ριπών σφαλμάτων που μπορούν να διορθωθούν.

2. Διαχείριση: Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, το SONET/SDH υποστηρίζει την παρακολούθηση και τη διαχείριση του σήματος στα επίπεδα του τμήματος, της γραμμής και της διαδρομής. Αυτή η γενική επιβάρυνση περιλαμβάνει αναγνώριση σήματος, μέτρηση BER και επικοινωνία πληροφοριών συναγερωμένων. Το OTN παρέχει μια δομή για την παρακολούθηση μιας σύνδεσης από άκρη σε άκρη και πάνω από διάφορα τμήματα. Αυτά τα τμήματα ενδέχεται να επικαλύπτονται με έως και έξι τέτοια τμήματα παρακολούθησης σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής θα ήταν μια σύνδεση του δικτύου A που διέρχεται από ένα άλλο δίκτυο B. Δηλαδή, το B χρησιμεύει ως φορέας για το δίκτυο A. Στη συνέχεια, οι φορείς εκμετάλλευσης και των δύο δικτύων πρέπει να παρακολουθούν τη σύνδεση καθώς διέρχεται από το B, χρησιμοποιώντας το δικό τους σύνολο σημάτων παρακολούθησης και διαχείρισης. Αυτά τα σήματα πρέπει να λειτουργούν παράλληλα.



Εικόνα 54: OTN hierarchy.

3. Διαφάνεια πρωτοκόλλου: Το OTN παρέχει υπηρεσία σταθερού ρυθμού bit. Διαθέτει λειτουργίες, διαχείριση και διαχείριση των συνδέσεων της που είναι διαφανείς στους πελάτες της. Μπορεί να μεταφέρει όλους τους τύπους κίνησης πακέτων δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων IP και Ethernet 10 Gigabit, καθώς και πλαίσια SONET/SDH. Τα πλαίσια OTN μπορούν να μεταφέρουν ολόκληρα πλαίσια SONET/SDH, συμπεριλαμβανομένης της επιβάρυνσης χωρίς τροποποίηση. Ο (πίνακας 3) δείχνει ότι οι χρεώσεις γραμμών OTN είναι 7% υψηλότερες από τις τιμές γραμμής SONET/SDH και αυτό οφείλεται στις πρόσθετες γενικές δαπάνες και στις πληροφορίες FEC.

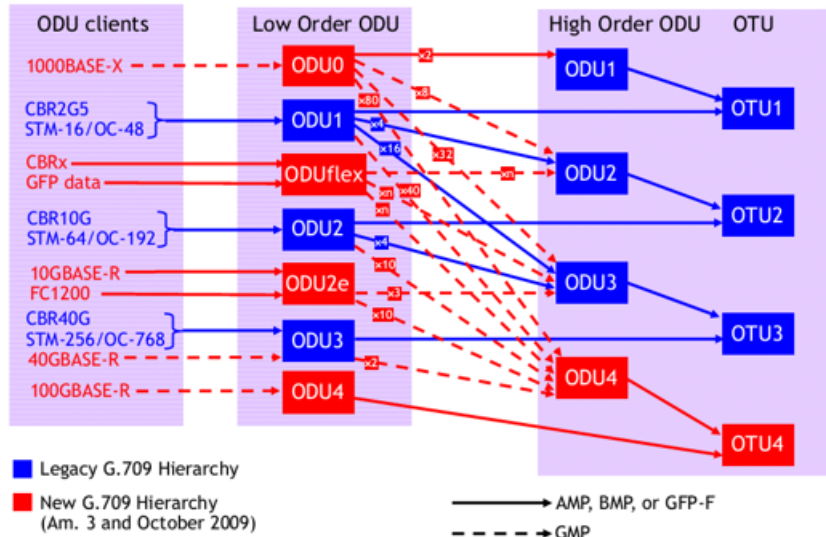
4. Ασύγχρονος χρονισμός: Το OTN έχει μια ασύγχρονη αντιστοίχιση των σημάτων πελάτη σε πλαίσια OTN όπου το ρολόι που δημιουργεί τα πλαίσια μπορεί να είναι ένας απλός ταλαντωτής ελεύθερης λειτουργίας. Για να ληφθεί υπόψη τυχόν αναντιστοιχία μεταξύ των ρολογιών των πλαισίων OTN και του σήματος πελάτη, το ωφέλιμο φορτίο OTN επιπλέει εντός του πλαισίου. Η χρήση απλών ταλαντωτών ελεύθερης λειτουργίας μπορεί να απλοποιήσει την υλοποίηση και να μειώσει το κόστος. Το OTN έχει επίσης μια σύγχρονη αντιστοίχιση όπου το ρολόι για τη δημιουργία των πλαισίων OTN προέρχεται από το σήμα πελάτη.

### 3.2 Ιεραρχία (Hierarchy)

Τα επίπεδα της ιεραρχίας OTN φαίνονται στην Εικόνα 58. Τα στρώματα οπτικής μετάδοσης (OTS), Μονάδα Οπτικών Δεδομένων (Optical Multiplex Section)(OMS) και Οπτικό Κανάλι (Optical Channel)(OCh) βρίσκονται στον οπτικό τομέα. Το επίπεδο OTS διαχειρίζεται τμήματα ζεύξης ινών μεταξύ οπτικών στοιχείων, όπως μεταξύ οπτικών ενισχυτών, οπτικών ενισχυτών και πολυπλέκτης WDM. Το επίπεδο OMS διαχειρίζεται συνδέσμους ινών μεταξύ οπτικών πολυπλέκτης και διακόπτες και το στρώμα OCH διαχειρίζεται τις οπτικές συνδέσεις μεταξύ αναγεννητών 3R (π.χ. μονοπάτια φωτός).

Η Μονάδα Μεταφοράς Οπτικού Καναλιού (OTU) και η Μονάδα Οπτικών Δεδομένων (ODU) έχουν παρόμοιες λειτουργίες με τα επίπεδα τομής, γραμμής, διαδρομής του SONET/SDH. Το OTU είναι παρόμοιο με το στρώμα τομής του SONET/SDH, όπου τώρα το στρώμα OTN OCh παρέχει οπτικές συνδέσεις μεταξύ Αναγεννητών (Regenerators) 3R. Έχει γενικά έξοδα για οριοθέτηση Τα πλαίσια OTN, παρέχουν αναγνώριση της οπτικής σύνδεσης, Ποσοστό Σφάλματος bit (BER), μεταφορά ενδείξεων συναγερμού σε αστοχίες σήματος και παροχή α κανάλι επικοινωνίας μεταξύ των τελικών σημείων της οπτικής σύνδεσης.

Το στρώμα προσθέτει το FEC στα πλαίσια OTN και ανακατεύει τα πλαίσια πριν από τη μετάδοση. Σε Επιπλέον, παρέχει πληροφορίες συγχρονισμού για πολλαπλά καρέ. Τα πολλαπλά πλαίσια είναι μια μέθοδος αποστολής μηνυμάτων σε πολλαπλά πλαίσια OTN. Για παράδειγμα, ένα 256 byte Το μήνυμα μπορεί να σταλεί μέσω ενός μόνο overhead byte πάνω από 256 καρέ. Ένα πολλαπλό πλαίσιο έχει μια σταθερή περίοδο που πρέπει να είναι δύναμη δύο.



Εικόνα 55: OTN hierarchy.

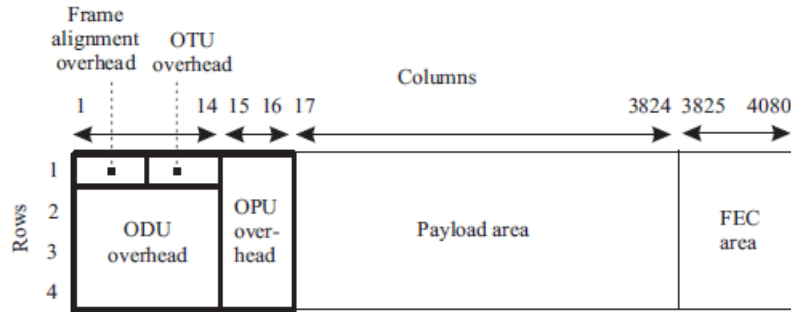
Η Μονάδα Οπτικών Δεδομένων (ODU) έχει παρόμοιες λειτουργίες με τη γραμμή και τη διαδρομή στρώματα SONET/SDH. Υποστηρίζει παρακολούθηση έως και 6 διαδοχικών συνδέσεων. Κάθε η παρακολούθηση παρέχει αναγνώριση, παρακολουθεί την απόδοση του BER, φέρει δείκτες συναγερμού, και παρέχει κανάλια επικοινωνίας στα τελικά σημεία. Το στρώμα ODU έχει το Optical Channel Payload Unit (OPU) που προσαρμόζει τα σήματα πελάτη στα OTN πλαίσια.

### 3.3 Δομή Πλαισίου (Frame Structure)

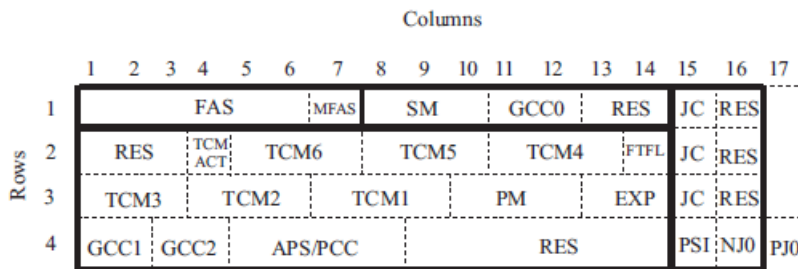
Στην Εικόνα 60 (a) δείχνει τη δομή ενός πλαισίου OTN. Είναι οργανωμένο σε 4 σειρές και 4080 στήλες byte. Ένα πλαίσιο μεταδίδεται σειριακά ξεκινώντας από τη γραμμή 1 και ανά σειρά από αριστερά προς τα δεξιά. Κάθε σειρά αποτελείται από 16 παρεμβαλλόμενα μπλοκ FEC των 255 byte που είναι συνολικά  $16 \times 255 = 4080$  byte. Κάθε μπλοκ έχει 1 byte επιβάρυνσης (overhead), 238 byte Ωφέλιμου (Payload) φορτίου και 16 byte Περιττών (Redundant) byte FEC. Δεδομένου ότι 16 μπλοκ είναι Παρεμβάλλονται (Interleaved) και κάθε μπλοκ μπορεί να διορθώσει έως και 8 byte σφαλμάτων, οι ριπές σφαλμάτων μπορεί να είναι διορθωμένο έως  $16 \times 8 = 128$  byte. Τα γενικά έξοδα OTU και ODU βρίσκονται σε στήλες 1 έως 14 του πλαισίου OTN, όπου η επιβάρυνση OTU βρίσκεται στη σειρά 1 και το ODU τα εναέρια είναι στις σειρές 2 έως 4. Τα γενικά έξοδα της OPU βρίσκονται στις στήλες 15 και 16 του πλαισίου. Την Εικόνα 60 (b) παρουσιάζει τα γενικά byte του πλαισίου OTN. Το πλαίσιο είναι ανακατεύτηκε πριν μεταδοθεί. Στη συνέχεια περιγράφουμε τα υπόλοιπα γενικά έξοδα που φαίνονται στην (Εικόνα 60(a,b)).

**Frame Alignment Overhead (FAS).**

Σήμα Ευθυγράμμισης Πλαισίου (FAS). Αυτά τα 6 byte χρησιμοποιούνται για την οριοθέτηση του πλαισίου παρόμοια στα byte A1 και A2 στην επιβάρυνση της ενότητας SONET. Όταν το πλαίσιο είναι κρυπτογραφημένο, αυτό το πεδίο εξαιρείται.



(a)



Εικόνα 56: OTN (G.709) frame (a) structure showing the location of the overhead bytes, and (b) a larger view of the overhead bytes.

Multi-Frame Alignment Signal (MFAS). Μερικά από τα γενικά πεδία φέρουν πληροφορίες που είναι διασκορπισμένες σε πολλαπλά πλαίσια, που αναφέρονται ως πολλαπλά πλαίσια. Το byte MFAS αυξάνεται κάθε καρέ παρέχοντας 256 τιμές που υποδεικνύουν τον αριθμό των πλαισίων σε ένα πολλαπλό πλαίσιο. Το byte MFAS χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό των byte πολλαπλών πλαισίων.

Optical Channel Transport Unit (OTU) Overhead Τμήμα Παρακολούθησης (Section Monitoring) (SM). Το πεδίο SM είναι 3 byte και έχει το αναγνωριστικό ανίχνευσης ίχνους, BIP-8 byte και σήματα συναγερμού, τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

**Αναγνωριστικού Μήνυμα Trail Trace Identifier (TTI).** Το byte TTI φέρει τον προσδιορισμό των δύο άκρων σημεία της οπτικής σύνδεσης. Το TTI έχει παρόμοια λειτουργία με το SONET/SDH ίχνος ενότητας (J0) byte. Κάθε τελικό σημείο έχει 16 byte πληροφοριών αναγνώρισης. Αυτές οι πληροφορίες μεταφέρεται μέσω του byte Αναγνωριστικού Μήνυμα (TTI) σε πολλαπλά πλαίσια με περίοδο 64 πλαίσια.

Τα πρώτα 32 byte φέρουν τα αναγνωριστικά των δύο τελικών σημείων και τα υπόλοιπα 32 byte αφορούν συγκεκριμένους τελεστές.

**BIP-8.** Αυτό είναι παρόμοιο με το SONET/SDH BIP-8 και χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση του σφάλματος bit ρυθμός.



**Σήματα συναγερμού.** Αυτές είναι οι ενδείξεις σφάλματος προς τα πίσω και οι εισερχόμενες προς τα πίσω σφάλμα ευθυγράμμισης (BEI/BIAE). ένδειξη backward defect indication (BDI) και το Εισερχόμενο Σφάλμα Ευθυγράμμισης (Incoming Alignment Error)(IAE). Παράδειγμα εμφάνισης σφαλμάτων εισερχόμενης στοίχισης είναι όταν χαθεί το σήμα του ρολογιού. Τα πεδία BEI/BIAE και BDI παρέχουν πληροφορίες upstream σχετικά με τις επιδόσεις από τους παραλήπτες στους αποστολείς. Τα 4 bits του BEI/BIAE υποδεικνύουν τον αριθμό των σφάλματα που μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας το byte BIP-8 ή μπορεί να υποδεικνύει ότι υπάρχει εισερχόμενο σφάλμα ευθυγράμμισης. Το bit BDI υποδεικνύει εάν υπάρχει ελάττωμα σήματος. Η IAE Το bit παρέχει πληροφορίες downstream απόδοσης από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Αυτό υποδεικνύει στο παραλήπτη ότι ο αποστολέας εντόπισε σφάλμα στοίχισης. Ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτά τα σήματα συναγερμού.

**Γενικό Κανάλι Επικοινωνίας (General Communications Channel)(GCC).** Αυτό το πεδίο 2 byte παρέχει ένα σαφές κανάλι σύνδεση μεταξύ τερματικών σημείων OTU. Μοιάζει με την Δεδομένα Κανάλι Επικοινωνία (Data Communication Channel)(DCC) του SONET/SDH.

#### **Optical Channel Data Unit (ODU) Overhead Διαδρομής (PM)**

Αυτά είναι 3 byte που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της διαδρομής από άκρο σε άκρο. Έχει δομή παρόμοια με το πεδίο παρακολούθησης ενότητας 3 byte (SM) που περιγράφεται παραπάνω για τα γενικά έξοδα της OTU. Αυτό περιλαμβάνει byte για ένα Αναγνωριστικού Μήνυμα (Trail Trace Identifier)(TTI), BIP-8 και σήματα συναγερμού. Τα σήματα συναγερμού περιλαμβάνουν ένα πεδίο παρακολούθησης διαδρομής (STAT), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά σήματος ένδειξης συναγερμού (AIS). Το πεδίο STAT μπορεί να μεταφέρει άλλα σήματα, όπως υποδεικνύοντας ότι το οπτικό κανάλι είναι ανοιχτό.

#### **Παρακολούθηση παράλληλης σύνδεσης**

(TCM,  $k = 1, 2, \dots, 6$ ). Υπάρχουν έξι πεδία TCM, καθένα από τα 3 byte και έχει την ίδια δομή με το πεδίο παρακολούθησης διαδρομής (PM) που περιγράφεται παραπάνω. Ένα πεδίο TCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί από φορέα εκμετάλλευσης δικτύου για την παρακολούθηση της απόδοση σφάλματος ενός σήματος για διαφορετικές εφαρμογές, για παράδειγμα, παρακολούθηση τη σύνδεση μέσω του δημόσιου δικτύου. Επειδή τα πρότυπα δεν καθορίζουν ποιος πρέπει να χρησιμοποιεί τα πεδία TCM, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων πρέπει να διαπραγματεύονται συμφωνία.

- Tandem Connection Monitoring Activation (TCM ACT). Αυτό το byte είναι αχρησιμοποίητο. Τύπος βλάβης και θέση σφάλματος (Fault Type and Fault Location)(FTFL). Αυτό το byte είναι μέρος του πολλαπλού καρέ 256 byte μήνυμα που υποδεικνύει σφάλματα στην κατεύθυνση προς τα εμπρός και προς τα πίσω.
- Γενικός Δίαυλος Επικοινωνίας (General Communication Channel (GCC1 and GCC2). Αυτή είναι μια επικοινωνία 2 byte κανάλι παρόμοιο με το πεδίο GCC στην επιβάρυνση (overhead) OTU.
- Automatic Protection Switching/Protection Communication Channel (APS/PCC). Αυτά τα 4 byte παρέχουν ένα κανάλι για τη μεταφορά πληροφοριών σηματοδότησης για automatic protection switching (APS). Το APS υποστηρίζεται σε διαφορετικά επίπεδα παρακολούθησης.
- Experimental (EXP).Αυτά τα 2 byte προορίζονται για πειραματικούς σκοπούς και μπορεί να χρησιμοποιούνται από φορείς εκμετάλλευσης και πωλητές.
- Δεσμευμένο (Reserved)(RES).Αυτά τα byte προορίζονται για μελλοντική τυποποίηση

**Optical Channel Payload Unit (OPU) Overhead** OPU overhead χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των σημάτων πελατών στο πλαίσιο OTN. Στο OTN ασύγχρονη λειτουργία, το ρολόι για το πλαίσιο OTN μπορεί να έχει ελαφρώς διαφορετικό ρυθμό από το ρολόι για το σήμα του πελάτη. Για την αντιμετώπιση αυτής της αναντιστοιχίας, τα γενικά έξοδα της OPU μπορεί να προσθέσει ή να αφαιρέσει byte δεδομένων από το ωφέλιμο φορτίο OTN.

**Payload Structure Identifier (PSI).** Αυτό το byte αποτελεί μέρος ενός μηνύματος πολλαπλών πλησίον 256 byte που περιγράφει το ωφέλιμο φορτίο. Το πρώτο byte του μηνύματος είναι ο τύπος ωφέλιμου φορτίου (payload type)(PT). Προσδιορίζει τον τύπο ωφέλιμου φορτίου που μεταφέρεται στο πλαίσιο, για παράδειγμα, σταθερός ρυθμός μετάδοσης bit (CBR), όπως SONET/SDH, Γενική διαδικασία πλαισίωσης, πολυπλεξία σήματα ODU και σήματα δοκιμής. Τα άλλα 255 byte εξαρτώνται από τη χαρτογράφηση και τη συνένωση.

**Αιτιολόγηση (Justification)(JC, NJO, PJO).** Για την αντιμετώπιση των διαφορών στους ρυθμούς ρολογιού, το ODU Το επίπεδο θα προσθέσει ή θα αφαιρέσει ένα byte δεδομένων από ένα ωφέλιμο φορτίο πλαισίου OTN για προσαρμογή σε αυτές τις διαφορές. Το byte ελέγχου αιτιολόγησης (justification control)(JC) υποδεικνύει εάν τα δεδομένα θα μεταφέρονται από δύο byte: την ευκαιρία αρνητικής αιτιολόγησης (negative justification opportunity)(NJO) και την θετική ευκαιρία αιτιολόγησης (positive justification opportunity)(PJO) byte. Κανονικά, μόνο το PJO μεταφέρει δεδομένα ωφέλιμου φορτίου. Για να προσθέσετε ένα byte στο ωφέλιμο φορτίο, τόσο το PJO όσο και το NJO μεταφέρουν δεδομένα και για να διαγράψετε ένα byte από το ωφέλιμο φορτίο, ούτε το PJO ούτε το NJO μεταφέρουν δεδομένα. Για προστασία από σφάλματα, η τιμή JC αντιγράφεται σε 3 byte. Πλειοψηφική ψηφοφορία (δηλαδή, δύο στα τρία) λαμβάνεται υπόψη για τον προσδιορισμό της πραγματικής τιμής JC.

### 3.4 Πολυπλεξία (Multiplexing)

Ο συνδυασμός ODU1 και ODU2 μπορεί να πολυπλέκει σε ένα ODU3. Το OTN υποστηρίζει επίσης εικονική συνένωση. Εδώ, θα περιορίσουμε τη συζήτηση στο πλαίσιο OTN ενός ODU2 που φέρει τέσσερα ODU1. Τα πλαίσιο OTU2 είναι οργανωμένα σε πολλαπλά πλαίσια μεγέθους τέσσερα, όπου κάθε πολλαπλά πλαίσια φέρει τα πλαίσια τεσσάρων ODU1: ODU1[1], ODU1[2], ODU1[3] και ODU1[4]. Τα ωφέλιμα φορτία των ODU1 παρεμβάλλονται byte στο ωφέλιμο φορτίο ενός πλαισίου ODU2. Η επιβάρυνση (overhead) της OPU ενός πλαισίου OTU2 θα μεταφέρει πληροφορίες στο byte PSI του σχετικά με την πολυπλεξία σημάτων. Ο τύπος ωφέλιμου φορτίου υποδεικνύει πολυπλεξία σημάτων ODU. Τα byte 2 έως 17 του PSI υποδεικνύουν τον τύπο με την πολυπλεξία σημάτων, για παράδειγμα, εάν τα σήματα είναι ODU1, ODU2 ή ODU3, και τη θέση τους στο ωφέλιμο φορτίο.

### 3.5 Generic Framing Procedure (GFP)

Η Γενική Διαδικασία Πλαισίωσης (GFP) είναι μια κοινή μέθοδος για την προσαρμογή διαφορετικών πρωτοκόλλων πακέτων στο επίπεδο σύνδεσης που πρόκειται να μεταφερθεί μέσω SONET/SDH ή οπτικής μεταφοράς Δίκτυο (OTN) όπως φαίνεται στη (εικόνα 61). Διευκολύνει τη διαλειτουργικότητα του εξοπλισμού διαφορετικών προμηθευτών.

Τα πρωτόκολλα πακέτων μπορούν να έχουν πακέτα μεταβλητού μήκους, όπως Ethernet, IP over PPP, Gigabit Ethernet και Resilient Packet Ring (RPR). είτε έχουν πακέτα σταθερού μήκους, όπως το κανάλι οπτικών ινών. Για υπολογιστές-πελάτες με πακέτα μεταβλητού μήκους, η GFP μπορεί να συνδυαστεί με εικονική συνένωση SONET/SDH (Virtual Concatenation)(VCAT) και Σχέδιο Προσαρμογής Χωρητικότητας Συνδέσμων (LCAS) για την παροχή συνδέσεων πακέτων. με τη VCAT, μια σύνδεση πακέτου μπορεί να ρυθμιστεί ώστε

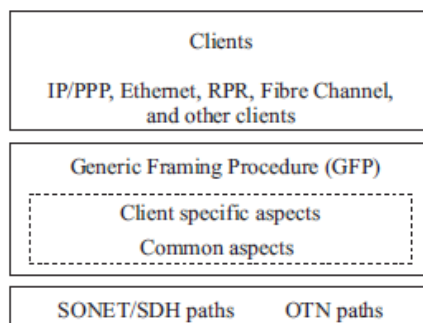
να έχει το σωστό εύρος ζώνης για τον υπολογιστή-πελάτη κυκλοφορία, και με το LCAS, το εύρος ζώνης σύνδεσης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις του φορτίο κυκλοφορίας πακέτων. Για υπολογιστές-πελάτες με πακέτα σταθερού μήκους, μια σύνδεση GFP μπορεί να μοιάζει με σταθερή σύνδεση ρυθμού μετάδοσης bit, που οδηγεί σε χαμηλές καθυστερήσεις. Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 61), η GFP έχει πτυχές (aspects) και πτυχές που αφορούν ειδικά τον πελάτη.

Οι κοινές Πτυχές (Aspects) της GFP είναι βασικές λειτουργίες κοινές για όλους τους πελάτες, ενώ η GFP Οι συγκεκριμένες πλευρές (aspects) του υπολογιστή πελάτη έχουν δυνατότητες προσαρμογής που εξαρτώνται από το πρωτόκολλο του υπολογιστή πελάτη. Οι κοινές πτυχές (aspects) της GFP περιλαμβάνουν τις λειτουργίες της οριοθέτησης πλαισίου, της πολυπλεξίας, κωδικοποίηση πλαισίου και διαχείριση πελατών. Οι Πτυχές (Aspects) που αφορούν ειδικά τον πελάτη GFP είναι οι χαρτογραφήσεις του σήματος πελάτη σε πλαίσια GFP. Υπάρχουν δύο αντιστοιχίσεις: το πλαίσιο αντιστοιχίζεται GFP (GFP-F) ή διαφανής αντιστοιχισμένη GFP (GFP-T). Η GFP που έχει αντιστοιχιστεί με πλαίσιο θα είναι απλά Ενθυλάκωση κάθε πακέτο υπολογιστή πελάτη σε ένα πλαίσιο GFP και εφαρμόζεται σε μεταβλητό μήκος Πακέτα. Η διαφανής αντιστοιχισμένη GFP εφαρμόζεται σε πακέτα σταθερού μήκους που είναι κωδικοποιούνται από (8,10) κωδικούς γραμμής που απαιτούν πολύ χαμηλό λανθάνοντα χρόνο μετάδοσης, κυρίως Κανάλι οπτικών ινών.

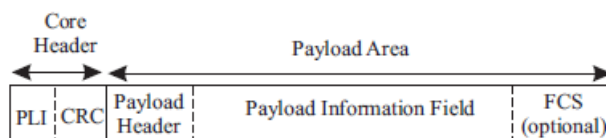
### 3.6 Πλαίσιο GFP

Η GFP διαθέτει πλαίσια πελάτη και ελέγχου. Ένα πλαίσιο υπολογιστή-πελάτη μπορεί είτε να είναι Πλαίσιο Δεδομένων Υπολογιστή-Πελάτη (CDF), το οποίο μεταφέρει δεδομένα πελατών. ή ένα Πλαίσιο Διαχείρισης Πελατών (CMF), το οποίο φέρει πληροφορίες διαχείρισης του σήματος πελάτη ή της σύνδεσης GFP. Ένας σημαντικός έλεγχος το πλαίσιο είναι το αδρανές πλαίσιο, το οποίο αποστέλλεται κάθε φορά που η σύνδεση GFP δεν έχει τίποτα να μεταφέρει. Επομένως, μια σύνδεση GFP φέρει πάντα ένα πλαίσιο.

Η δομή του πλαισίου GFP φαίνεται στην Εικόνα 62. Η βασική κεφαλίδα είναι 4 byte μακρύτερη και αποτελείται από ένα αναγνωριστικό δύο byte Μήκους Ωφέλιμου Φορτίου (Payload Length Identifier) (PLI). Έχει επίσης ένα 2-byte Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check)(CRC) για την προστασία του. Το PLI μπορεί είτε να έχει το μήκος του πλαισίου GFP σε byte ή υποδεικνύουν ότι το πλαίσιο είναι πλαίσιο ελέγχου.



Εικόνα 57: GFP relationship with clients and optical transport paths.



Εικόνα 58: GFP frame structure.

Η περιοχή ωφέλιμου φορτίου μεταφέρει πληροφορίες σχετικά με το ωφέλιμο φορτίο του πελάτη και μπορεί να διαφέρει σε μέγιστο μήκος 65.535 byte. Αποτελείται από ένα PayloadHeader, Payload Πεδίο πληροφοριών και μια προαιρετική Πλαισίου Ελέγχου Ακολουθίας (Frame Check Sequence)(FCS) Το PayloadHeader υποδεικνύει τη δομή του ωφέλιμου φορτίου και το πεδίο Πληροφορίες ωφέλιμου φορτίου φέρει το σήμα του πελάτη. Το FCS είναι ένας κυκλικός έλεγχος πλεονασμού 4 byte για την προστασία του ωφέλιμου φορτίου Πεδίο πληροφοριών. Η κεφαλίδα ωφέλιμου φορτίου έχει ένα πεδίο τύπου 2 byte, έναν κυκλικό έλεγχο πλεονασμού 2 byte για να προστατεύστε μόνο το πεδίο τύπου και ένα προαιρετικό πεδίο επέκτασης. Το πεδίο επέκτασης μπορεί να είναι έως 60 byte, επομένως η κεφαλίδα ωφέλιμου φορτίου μπορεί να έχει μήκος μεταξύ 4 και 64 byte. Εάν η ένδειξη το πλαίσιο είναι ένα πλαίσιο υπολογιστή-πελάτη, το πεδίο τύπου ωφέλιμου φορτίου έχει ένα δευτερεύον πεδίο που υποδεικνύει εάν Το πλαίσιο GFP είναι ένα πλαίσιο δεδομένων υπολογιστή-πελάτη ή ένα πλαίσιο διαχείρισης υπολογιστή-πελάτη και ένα Υποπεδίο (Subfield) αυτό δείχνει εάν υπάρχει FCS. Έχει επίσης Υποπεδίο (Subfield) για να υποδείξει τον πελάτη πρωτόκολλο, εάν το πλαίσιο είναι αντιστοιχισμένο πλαίσιο ή διαφανές αντιστοιχισμένο και ο τύπος της επέκτασης, εάν υπάρχει, στην κεφαλίδα ωφέλιμου φορτίου.

Υπάρχουν πεδία επέκτασης για γραμμικά και παραλλαγές δακτυλίων. Η γραμμική επέκταση υποστηρίζει πολλαπλούς πελάτες που μοιράζονται ένα GFP σημείο προς σημείο σύνδεσης, ενώ η επέκταση δακτυλίου υποστηρίζει πολλούς υπολογιστές-πελάτες σε ένα δακτύλιο διαμόρφωση. Για παράδειγμα, η γραμμική επέκταση έχει 8 bit Αναγνώριση Καναλιού (Channel Identification)(CID) για να υποδείξει έναν από τους 256 διαύλους επικοινωνίας. Οι επεκτάσεις έχουν επίσης κυκλικό έλεγχο πλεονασμού 2 byte.

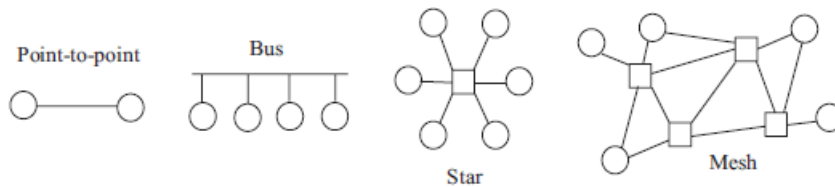
### 3.7 GFP Common Aspects

Μια κοινή συνάρτηση GFP είναι η οριοθέτηση πλαισίου, η οποία γίνεται κυρίως με το Κεφαλίδα πυρήνα του πλαισίου. Θυμηθείτε ότι η κεφαλίδα πυρήνα αποτελείται από ένα πακέτο Μήκους Αναγνωριστικό Μήκους Πεδίου (PLI) και κυκλικός έλεγχος επανάληψης για το πεδίο. Δεδομένου ότι μια GFP η σύνδεση έχει πάντα ένα πλαίσιο GFP, το τέλος ενός πλαισίου είναι η αρχή του επόμενου. Ωστόσο, εάν υπάρχει σφάλμα όπως στο PLI, ο δέκτης μπορεί να χάσει την παρακολούθηση του μήκους του τρέχοντος πλαισίου και την αρχή του επόμενου.

Έτσι, χάνει το πλαίσιο περιγραφή. Στη συνέχεια, ο δέκτης θα αναζητήσει την έναρξη ενός επόμενου πλαισίου GFP χρησιμοποιώντας τον κυκλικό έλεγχο πλεονασμού της βασικής κεφαλίδας του πλαισίου. Ειδικότερα, ένας παραλήπτης θα υποθέσει ότι τα τελευταία 4 byte που έχει λάβει είναι μια κεφαλίδα πυρήνα πλαισίου GFP. Εάν η ένδειξη Ο κυκλικός έλεγχος πλεονασμού της κεφαλίδας λειτουργεί, τότε ο παραλήπτης μαντεύει ότι αυτό είναι την αρχή ενός πλαισίου. Αυτό είναι γνωστό ως πλαίσιο που βασίζεται στην περιγραφή Κεφαλίδα Έλεγχο Σφαλμάτων (Header Error Check)(HEC). Πρόσθετοι έλεγχοι στα επόμενα διαδοχικά πλαίσια πραγματοποιούνται και ο δέκτης καθορίζει ότι συγχρονίζεται ξανά. Αυτή η τεχνική έχει το πλεονέκτημα της δεν απαιτούν πρόσθετα bit για συγχρονισμό.

Άλλες κοινές λειτουργίες GFP είναι η κρυπτογράφηση, η πολυπλεξία και η αποστολή προγράμματος πελάτη σήματα διαχείρισης. Η GFP ανακατεύει την κεφαλίδα πυρήνα για να εξασφαλίσει υψηλό ρυθμό bit Μεταβαίνει και ανακατεύει την περιοχή ωφέλιμου φορτίου για να διασφαλίσει ότι δεν θα επαναλάβει το ανακατεμένη κεφαλίδα πυρήνα. Υπάρχουν δύο τύποι πολυπλεξίας: πολυπλεξία πλαισίου και πολυπλεξία υπολογιστή-πελάτη.

Η πολυπλεξία πλαισίου περιλαμβάνει πλαίσια από πολλαπλές διεργασίες GFP. δηλαδή, πελάτης τα πλαίσια και τα πλαίσια ελέγχου πολυπλέκονται μεταξύ τους. Υποστηρίζεται πολυπλεξία υπολογιστή-πελάτη με τις γραμμικές και δακτυλιοειδείς επεκτάσεις. Τα σήματα διαχείρισης πελατών μπορούν να μεταφερθούν χρησιμοποιώντας πλαίσια διαχείρισης πελατών. Για παράδειγμα, μπορούν να σταλούν μηνύματα αποτυχίας σήματος υπολογιστή-πελάτη.



Εικόνα 59: τοπολογίες Ethernet.

### 3.8 Πτυχές που αφορούν ειδικά τον πελάτη GFP

Μια λειτουργία ειδικά για τον πελάτη είναι η αντιστοίχιση των σημάτων του πελάτη σε ένα πλαίσιο GFP χρησιμοποιώντας ένα πλαίσιο αντιστοιχισμένο GFP (GFP-F) ή ένα διαφανές χαρτογραφημένο GFP (GFP-T). Όπως αναφέραμε Νωρίτερα, ένα πλαίσιο GFP-F είναι μια ενθυλάκωση ενός πακέτου πελάτη. Η διαφανής χαρτογραφημένη GFP είναι λίγο πιο περίπλοκη. Πρώτον, σημειώστε ότι εφαρμόζεται σε σταθερό μήκος πακέτα που κωδικοποιούνται από (8,10) κωδικούς γραμμής. Σημειώστε ότι ο κωδικός γραμμής του υπολογιστή-πελάτη Το σήμα δεν είναι απαραίτητο για τη μεταφορά GFP, επειδή τα πλαίσια GFP έχουν το δικό τους πλαίσιο Συγχρονισμού. Έτσι, η αντιστοίχιση GFP-T θα εξαγάγει πρώτα τα bytes δεδομένων και χαρακτήρες ελέγχου στα σήματα πελάτη. Στη συνέχεια, σχηματίζονται μπλοκ από 8 bytes δεδομένων ή χαρακτήρες ελέγχου και στη συνέχεια σχηματίζονται superblock από 8 μπλοκ. Το superblock μεταφέρεται σε πλαίσιο GFP-F. Η αφάνεια είναι χαμηλή επειδή ένα superblock δεν έχει να περιμένει ολόκληρο το πλαίσιο του προγράμματος-πελάτη πριν προωθηθεί.

## Τέταρτο Κεφάλαιο: MPLS, Generalized MPLS

### 4.1 ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ (IP): ΕΝΑ PRIMER

Το IP είναι μέρος πρωτοκόλλων TCP/IP suite που χρησιμοποιούνται στο Διαδίκτυο. Το TCP αντιστοιχεί στο επίπεδο μεταφοράς του μοντέλου OSI και το IP αντιστοιχεί στο επίπεδο δικτύου του μοντέλου OSI. Σε αυτήν την ενότητα, περιγράφουμε την τρέχουσα έκδοση της IP, γνωστή ως έκδοση IP 4 (IPv4).

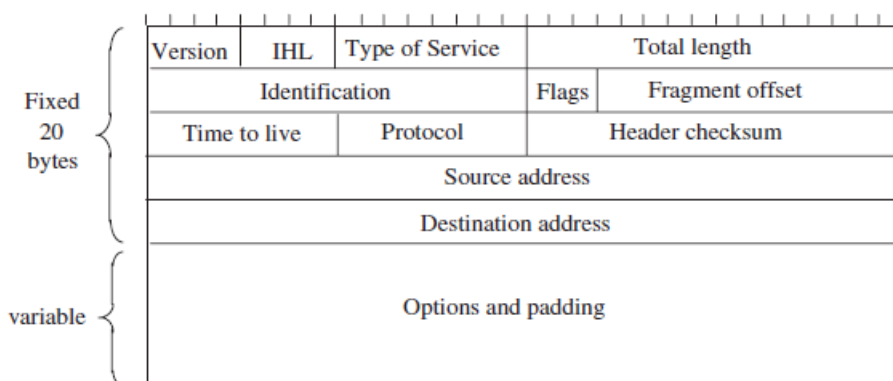
Το IP παρέχει μια υπηρεσία χωρίς σύνδεση χρησιμοποιώντας μεταγωγή πακέτων με datagrams. Τα πακέτα σε ένα δίκτυο χωρίς σύνδεση, όπως το δίκτυο IP, αναφέρονται ως datagrams. Ένας κεντρικός υπολογιστής IP μπορεί να μεταδίδει datagrams σε έναν κεντρικό υπολογιστή προορισμού IP χωρίς να χρειάζεται να ρυθμίσει μια σύνδεση με τον προορισμό, όπως στην περίπτωση του X.25, frame relay και ATM. IP datagrams δρομολογούνται μέσω του δικτύου IP ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, και θεωρητικά, μπορούν να ακολουθήσουν διαφορετικές διαδρομές μέσω του δικτύου IP. Στην πράξη το δίκτυο IP χρησιμοποιεί πίνακες δρομολόγησης που παραμένουν σταθεροί για κάποιο χρονικό διάστημα. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, όλα τα πακέτα IP από τον αποστολέα στον παραλήπτη ακολουθούν συνήθως την ίδια διαδρομή. Αυτοί οι πίνακες δρομολόγησης ανανεώνονται περιοδικά, λαμβάνοντας υπόψη τις συνδέσεις και τις αστοχίες υλικού των δρομολογητών και των συνδέσμων. Η IP δεν

εγγυάται την παράδοση των δεδομένων IP. Ενόψει αυτού, εάν το υποκείμενο δίκτυο ρίξει ένα datagram IP, η IP δεν θα το γνωρίζει. Επίσης, όπως και στα δίκτυα ATM, το IP δεν ελέγχει το ωφέλιμο φορτίο ενός datagram IP για σφάλματα, αλλά ελέγχει μόνο την κεφαλίδα IP του. Το IP θα ρίξει ένα datagram IP εάν διαπιστώσει ότι η κεφαλίδα του είναι λάθος. Τα χαμένα ή λανθασμένα δεδομένα ανακτώνται από το TCP του προορισμού.

#### 4.2 Η κεφαλίδα IP (IP Header)

Ένα datagram IP αποτελείται από μια κεφαλίδα και ένα ωφέλιμο φορτίο. Η κεφαλίδα IP φαίνεται στο (Εικόνα 64) και αποτελείται από ένα σταθερό τμήμα 20 byte και ένα προαιρετικό τμήμα που έχει μεταβλητό μήκος. Τα ακόλουθα πεδία ορίζονται στην κεφαλίδα IP:

- Version: Ένα πεδίο 4 bit χρησιμοποιείται για να υποδείξει ποια έκδοση του πρωτοκόλλου χρησιμοποιείται.
- Μήκος Κεφαλίδας Διαδικτύου (Internet Header Length) (IHL): Αυτό είναι ένα πεδίο 4 bit που δίνει το μήκος της κεφαλίδας σε λέξεις 32 bit. Το ελάχιστο μήκος κεφαλίδας είναι πέντε λέξεις 32-bit (ή 20 byte).
- Τύπος υπηρεσίας (Type of service): Αυτό είναι ένα πεδίο 8-bit που υποδεικνύει εάν ο αποστολέας προτιμά το datagram να ταξιδεύει σε μια διαδρομή με ελάχιστη καθυστέρηση ή σε μια διαδρομή με μέγιστη απόδοση.
- Συνολικό μήκος (Total length): Ένα πεδίο 16 bit που χρησιμοποιείται για να υποδείξει το μήκος ολόκληρου του datagram (δηλαδή, κεφαλίδα και ωφέλιμο φορτίο). Η προεπιλεγμένη τιμή για το μέγιστο μήκος είναι 65.535 byte.
- Αναγνώριση (Identification): Πεδίο 16 bit που χρησιμοποιείται από τον δέκτη για να προσδιορίσει το datagram στο οποίο ανήκει το τμήμα. Όλα τα τμήματα ενός datagram έχουν την ίδια τιμή στο πεδίο αναγνώρισης.
- Flags: Πεδίο 3 bit, αλλά χρησιμοποιούνται μόνο δύο bit. Όλα τα fragments, εκτός από το τελευταίο, έχουν το σύνολο των bit των περισσότερων Fragments. Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν στον παραλήπτη να γνωρίζει πότε έχουν φτάσει όλα τα Fragments. Το bit Don't Fragment χρησιμοποιείται για την απαγόρευση του κατακερματισμού (disallow fragmentation).



Εικόνα 60: The IPv4 header.

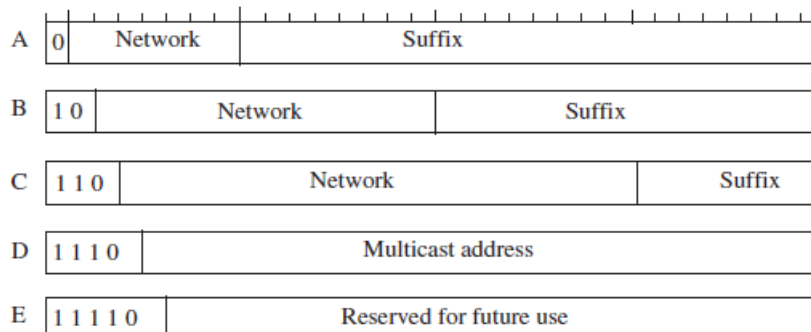
- Μετατόπιση τμήματος (Fragment offset): Πεδίο 13 bit περιέχει μια μετατόπιση που δείχνει πού βρίσκεται αυτό το τμήμα ανήκει στο αρχικό datagram.
- Χρόνος ζωής (Time to live): Πεδίο 8-bit που καθορίζει σε δευτερόλεπτα πόσο χρόνο επιτρέπεται σε ένα datagram να ζει στο δίκτυο. Η μέγιστη διάρκεια ζωής είναι 255

δευτερόλεπτα. Κάθε δρομολογητής που επεξεργάζεται το datagram πρέπει να μειώσει αυτό το πεδίο κατά ένα δευτερόλεπτο και κατά αρκετά δευτερόλεπτα εάν το datagram βρίσκεται σε ουρά στον δρομολογητή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό το πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι παρόμοιο με ένα hop count. Όταν ο χρόνος για ζωντανό πεδίο γίνει ίσος με 0, το datagram απορρίπτεται. Αυτό εμποδίζει ένα datagram να κινείται για πάντα στο δίκτυο.

- Πρωτόκολλο (Protocol): Πεδίο μήκος 8 bit. Καθορίζει το επόμενο πρωτόκολλο υψηλότερου επιπέδου (π.χ. TCP και UDP) στην οποία θα πρέπει να παραδοθεί το datagram.
- Header checksum: Πεδίο 16-bit που χρησιμοποιείται για την επαλήθευση εάν η κεφαλίδα IP έχει ληφθεί σωστά. Ο κεντρικός υπολογιστής εκπομπής αθροίζει όλες τις μισές λέξεις 16-bit της κεφαλίδας χρησιμοποιώντας την αριθμητική του συμπληρώματος 1, υποθέτοντας ότι το πεδίο αθροίσματος ελέγχου είναι 0. Το συμπλήρωμα 1 του τελικού αποτελέσματος στη συνέχεια υπολογίζεται και τοποθετείται στο πεδίο αθροίσματος ελέγχου. Ο κεντρικός υπολογιστής λήψης υπολογίζει το άθροισμα ελέγχου και εάν το τελικό αποτέλεσμα είναι 0, τότε η κεφαλίδα έχει ληφθεί σωστά. Διαφορετικά, η κεφαλίδα είναι λανθασμένη και το datagram απορρίπτεται. Το άθροισμα ελέγχου υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε δρομολογητή κατά μήκος της διαδρομής του datagram, αφού έχει αλλάξει τουλάχιστον ένα πεδίο της κεφαλίδας (το χρονικό διάστημα για το ζωντανό πεδίο).
- Διεύθυνση προέλευσης (Source address): Πεδίο 32 bit που συμπληρώνεται με το δίκτυο και τον αριθμό κεντρικού υπολογιστή του κεντρικού υπολογιστή αποστολής.
- Διεύθυνση προορισμού (Destination address): Πεδίο 32-bit που συμπληρώνεται με το δίκτυο και τον αριθμό κεντρικού υπολογιστή του κεντρικού υπολογιστή προορισμού.
- Επιλογές (Options): Πεδίο μεταβλητού μήκους χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση των επιλογών που ζητά ο χρήστης (π.χ. ασφάλεια, δρομολόγηση πηγής, καταγραφή διαδρομής και χρονική σήμανση).
- Αναπλήρωση (Padding): Πεδίο μεταβλητού μήκους χρησιμοποιείται για να κάνει την κεφαλίδα του datagram ένα αναπόσπαστο πολλαπλάσιο (integral multiple) λέξεων 32 bit.

### 4.3 Διευθύνσεις IP

Όπως είδαμε παραπάνω, οι διευθύνσεις IP έχουν μήκος 32 bit. Μια διεύθυνση IP χωρίζεται σε δύο μέρη: ένα δίκτυο και μια κατάληξη. Το δίκτυο προσδιορίζει το φυσικό δίκτυο που φιλοξενεί το κεντρικό υπολογιστή. Εάν ο υπολογιστής είναι συνδεδεμένος. Η κατάληξη προσδιορίζει τον ίδιο τον κεντρικό υπολογιστή. Το μέγεθος αυτών δύο πεδίων διαφέρουν ανάλογα με την κλάση της διεύθυνσης IP. Συγκεκριμένα, πέντε διαφορετικές τάξεις των διευθύνσεων – A, B, C, D και E – έχουν οριστεί (Εικόνα 65).



Εικόνα 61: The IP address classes.

Οι κλάσεις A, B και C ονομάζονται κύριες κλάσεις επειδή χρησιμοποιούνται για διευθύνσεις κεντρικού υπολογιστή. Η κλάση D χρησιμοποιείται για multicasting. Η κλάση E προορίζεται

για μελλοντική χρήση. Το πρώτο πεδίο καθορίζει την κλάση της διεύθυνσης IP και κυμαίνεται από 1 bit για μια διεύθυνση κατηγορίας A έως 5 bit για μια διεύθυνση κλάσης E. Το δεύτερο πεδίο δίνει τη διεύθυνση δικτύου και το τρίτο πεδίο είναι το επίθημα που δίνει τη διεύθυνση κεντρικού υπολογιστή. Στην κατηγορία A, υπάρχει μια διεύθυνση δικτύου 7-bit και μια διεύθυνση κεντρικού υπολογιστή 24-bit, με αποτέλεσμα 128 διευθύνσεις δικτύου και 16.777.216 διευθύνσεις κεντρικού υπολογιστή. Στην κατηγορία B, υπάρχει μια διεύθυνση δικτύου 14-bit και μια διεύθυνση κεντρικού υπολογιστή 16-bit, με αποτέλεσμα 16.384 διευθύνσεις δικτύου και 65.536 διευθύνσεις κεντρικού υπολογιστή. Στην κατηγορία C, υπάρχει μια διεύθυνση δικτύου 21-bit και μια διεύθυνση κεντρικού υπολογιστή 8-bit, με αποτέλεσμα 2.097.152 διευθύνσεις δικτύου και 256 διευθύνσεις κεντρικού υπολογιστή. Οι διευθύνσεις δικτύου συνήθως γράφονται με διακεκομμένο δεκαδικό που κυμαίνεται από 0 έως 255. Για παράδειγμα, η διεύθυνση IP 00000111 00000010 00000000 00000010 θα γραφτεί ως 7.2.0.2. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον συμβολισμό, έχουμε ότι το εύρος των διευθύνσεων κλάσης A είναι από 1.0.0.0 έως 127.255.255.255, για την κλάση B έχουμε ένα εύρος τιμών από 128.0.0.0 έως 191.255.255.255 και για την κλάση C έχουμε ένα εύρος τιμών 192.0.0.0 έως 233.255.255.255. Η κλάση C είναι πολύ κοινή, ενώ η κλάση A χρησιμοποιείται σπάνια, καθώς υπάρχουν μόνο λίγα δίκτυα με αυτόν τον μεγάλο αριθμό κεντρικών υπολογιστών. Η IP διατηρεί τη διεύθυνση κεντρικού υπολογιστή 0 για να δηλώσει τη διεύθυνση ενός δικτύου. Για παράδειγμα, στη διεύθυνση κατηγορίας B 128.32.0.0 το πεδίο δικτύου είναι 128.32 και το επίθημα είναι 0.0. Αυτό υποδεικνύει τη διεύθυνση του δικτύου 128.32. Για μετάδοση εντός του δικτύου, η IP χρησιμοποιεί τη διεύθυνση 128.32.255.255. Η IP εκχωρεί πολλαπλές διευθύνσεις IP σε δρομολογητές, καθώς ένας δρομολογητής είναι συνδεδεμένος σε πολλά δίκτυα. Συγκεκριμένα, ένας δρομολογητής έχει μία διεύθυνση IP για κάθε δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένος. Ένας μεμονωμένος κεντρικός υπολογιστής που είναι συνδεδεμένος σε πολλά δίκτυα έχει επίσης πολλές διευθύνσεις IP, μία για κάθε σύνδεση δικτύου. Ένας τέτοιος οικοδεσπότης αναφέρεται ως multihomed.

#### 4.3.1 Υποδικτύου (Subnetting)

Η δομή διεύθυνσης IP που περιγράφεται παραπάνω εισάγει μια ιεραρχία δύο επιπέδων. Το πρώτο επίπεδο είναι η διεύθυνση δικτύου και το δεύτερο επίπεδο είναι η διεύθυνση κεντρικού υπολογιστή. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτά τα δύο επίπεδα διευθύνσεων δεν αρκούν. Για παράδειγμα, εάν λάβουμε υπόψη έναν οργανισμό με διεύθυνση B-class, τότε όλοι οι κεντρικοί υπολογιστές φαίνεται να είναι οργανωμένοι σε μια ενιαία ομάδα, που περιγράφεται από τη διεύθυνση δικτύου. Ωστόσο, οι κεντρικοί υπολογιστές μέσα σε έναν οργανισμό συνήθως ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν έναν αριθμό διαφορετικών LAN. Για να διακρίνουμε τα LAN, το suffix της διεύθυνσης IP υποδιαιρείται σε τμήμα υποδικτύου και τμήμα υποδοχής.

Σε κάθε LAN εκχωρείται μια διεύθυνση υποδικτύου που μεταφέρεται στο τμήμα υποδικτύου και σε έναν κεντρικό υπολογιστή στο LAN εκχωρείται μια διεύθυνση που μεταφέρεται στο τμήμα κεντρικού υπολογιστή. Η πραγματική ανάλυση του επιθέματος σε αυτά τα δύο υποπεδία υπαγορεύεται από μια μάσκα υποδικτύου. Η μάσκα υποδικτύου είναι γνωστή μόνο στους δρομολογητές εντός του δικτύου, καθώς τα υποδίκτυα δεν είναι ορατά εκτός δικτύου. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως Υποδικτύωση (Subnetting).

#### 4.3.2 Classless Inter-Domain Routing (CIDR)

Στις αρχές της δεκαετίας του '90, έγινε φανερό ότι η ταχεία επέκταση του Διαδικτύου θα προκαλούσε εξάντληση των διευθύνσεων IP και έκρηξη των πινάκων δρομολόγησης. Η κύρια αιτία για την εξάντληση των διευθύνσεων ήταν η άσκοπη χρήση διευθύνσεων κατηγορίας B. Πολλοί οργανισμοί χρησιμοποιούσαν μια διεύθυνση κατηγορίας B, αλλά είχαν μόνο μικρό



αριθμό κεντρικών υπολογιστών, αφήνοντας έτσι τον χώρο διευθύνσεων κεντρικού υπολογιστή σε μεγάλο βαθμό αχρησιμοποίητο. Η έκρηξη του πίνακα δρομολόγησης οφειλόταν στο γεγονός ότι ένας δρομολογητής διατηρεί όλες τις διευθύνσεις όλων των καταχωρημένων δικτύων. Προκειμένου να λυθούν αυτά τα δύο προβλήματα, προτάθηκε το Δρομολόγηση μεταξύ τομέων χωρίς κατηγορία Classless Inter-domain Routing (CIDR). Αυτό το σχήμα επιτρέπει την εκχώρηση συνεχόμενων διευθύνσεων κατηγορίας C και ταυτόχρονα μειώνει τον αριθμό των εγγραφών που απαιτούνται σε έναν πίνακα δρομολόγησης. Η βασική ιδέα στο CIDR είναι να εκχωρηθούν μπλοκ διευθύνσεων δικτύου κατηγορίας C σε κάθε ISP. Οι οργανισμοί που χρησιμοποιούν τον ISP λαμβάνουν υπό-εκχωρημένο μπλοκ 2n συνεχόμενων διευθύνσεων. Για παράδειγμα, εάν ένας οργανισμός απαιτεί 2000 διευθύνσεις, τότε θα του εκχωρηθεί ένα μπλοκ 2048 (δηλαδή 28) συνεχόμενων διευθύνσεων κατηγορίας C.

Η ιεραρχική υπό-εκχώρηση διευθύνσεων με αυτόν τον τρόπο υποδηλώνει ότι οι πελάτες με διευθύνσεις που έχουν εκχωρηθεί από έναν δεδομένο ISP θα δρομολογούνται μέσω του δικτύου του ISP. Αυτό επιτρέπει σε όλες αυτές τις διευθύνσεις να διαφημίζονται με συγκεντρωτικό τρόπο εκτός του δικτύου του ISP. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι σε έναν ISP έχουν εκχωρηθεί 131.072 διευθύνσεις δικτύου κατηγορίας C ξεκινώντας από το 194.0.0.0. Αυτό σημαίνει ότι η χαμηλότερη διεύθυνση δικτύου είναι 194.0.0.0 ή 11000010 00000000 00000000 00000000 και η υψηλότερη διεύθυνση δικτύου είναι 195.255.255.255 ή 11000011 11111111 πρώτη διεύθυνση. τα bit είναι 1100001 ανήκει στην ομάδα διευθύνσεων που έχουν εκχωρηθεί στον ISP. Αυτό το τίτλος του ονόματος μπορεί να υπολογιστεί εκτελώντας μια λειτουργία bit-wise και μεταξύ της χαμηλότερης διεύθυνσης και της μάσκας 254.0.0.0 ή 11111110 00000000 00000000 00000000. Ως εκ τούτου, οι δρομολογητές εκτός του δικτύου του ISP παρέχονται μόνο με τη διεύθυνση βάσης .190.0 και τη βασική μάσκα .0. 254.0.0.0. Αυτές οι πληροφορίες αρκούν για να προσδιοριστεί εάν μια διεύθυνση ενός πακέτου IP έχει το ίδιο prefix με τον ISP.

Ο υπολογισμός ενός προθέματος χρησιμοποιώντας μια διεύθυνση δικτύου βάσης και μια μάσκα είναι γνωστός ως Supernetting. Το Supernetting είναι το αντίστροφο του υποδικτύου. Η παραπάνω χρήση συνεχόμενων διευθύνσεων οδηγεί σε καλύτερη χρήση του χώρου διευθύνσεων. Επίσης, διαφημίζοντας μόνο μια διεύθυνση βάσης και μια μάσκα, ελαχιστοποιείται ο όγκος των πληροφοριών που πρέπει να διατηρεί ένας δρομολογητής στον πίνακα δρομολόγησης του. Λάβετε υπόψη ότι ορισμένες διευθύνσεις δικτύου είχαν εκχωρηθεί πριν από το CIDR και ένας δρομολογητής πρέπει επίσης να διατηρεί αυτές τις διευθύνσεις στον πίνακά του. Για περαιτέρω απλοποίηση της δρομολόγησης, κατανεμήθηκαν επίσης μπλοκ διευθύνσεων ανάλογα με τις γεωγραφικές περιοχές ( Πίνακα 4.1). Τέλος, σημειώστε ότι οι διευθύνσεις κλάσης A, B και C δεν χρησιμοποιούνται πλέον για δρομολόγηση. Το CIDR εφαρμόζεται σε όλες τις διευθύνσεις, γεγονός που εξηγεί γιατί αυτό το σχήμα ονομάζεται Classless.

**Πίνακας 4. 1:** Allocation of addresses per region.

Region	Lower address	Higher address
Europe	194.0.0.0	195.255.255.255
North America	198.0.0.0	199.255.255.255
Central/South America	200.0.0.0	201.255.255.255
Pacific Rim	202.0.0.0	203.255.255.255

#### 4.4 ARP, RARP και ICMP

Η οικογένεια πρωτοκόλλων TCP/IP περιλαμβάνει άλλα πρωτόκολλα, όπως το Πρωτόκολλο Ανάλυσης Διεύθυνσης (Address Resolution Protocol) (ARP) , το Πρωτόκολλο Επίλυσης Αντίστροφης Διεύθυνσης (Reverse Address Resolution Protocol)(RARP) και το Internet Control Message (ICMP). Το ARP χρησιμοποιείται για τη μετάφραση της διεύθυνσης IP ενός κεντρικού υπολογιστή στην αντίστοιχη διεύθυνση υλικού του. Αυτή η μετάφραση διεύθυνσης είναι γνωστή ως ανάλυση διεύθυνσης. Το πρότυπο ARP ορίζει δύο βασικά μηνύματα: ένα αίτημα και μια απάντηση. Ένα μήνυμα αιτήματος περιέχει μια διεύθυνση IP και ζητά την αντίστοιχη διεύθυνση υλικού. Ένα μήνυμα απάντησης περιέχει τη διεύθυνση IP που στάλθηκε στο αίτημα και τη διεύθυνση υλικού. Το RARP κάνει το αντίθετο από το ARP. Προσδιορίζει τη διεύθυνση IP ενός κεντρικού υπολογιστή που αντιστοιχεί σε μια γνωστή διεύθυνση υλικού.

Το Πρωτόκολλο μηνυμάτων ελέγχου Διαδικτύου (Internet Control Message Protocol)(ICMP) ορίζει πολλά μηνύματα σφαλμάτων και πληροφοριών που χρησιμοποιούνται στο Διαδίκτυο για την αναφορά διαφόρων τύπων σφαλμάτων ή την αποστολή διαφόρων τύπων πληροφοριών. Μερικά από τα κύρια μηνύματα είναι σβήσιμο πηγής, υπέρβαση χρόνου destination unreachable, redirect, fragmentation required, parameter problem, echo request/reply και timestamp request/reply. Ένα μήνυμα απόσβεσης πηγής αποστέλλεται από έναν δρομολογητή όταν έχει εξαντληθεί ο χώρος αποθήκευσης και δεν μπορεί να δεχτεί περισσότερα datagrams.

Ένα μήνυμα υπέρβασης χρόνου (Source Quench) αποστέλλεται από έναν δρομολογητή όταν το πεδίο χρόνου ενεργοποίησης σε ένα datagram είναι 0. Το datagram απορρίπτεται από τον δρομολογητή. Το ίδιο μήνυμα χρησιμοποιείται επίσης από έναν κεντρικό υπολογιστή εάν το χρονόμετρο επανασυναρμολόγηση (Reassembly) λήξει πριν φτάσουν όλα τα τμήματα από ένα δεδομένο datagram. Ένα μήνυμα Destination Unreachable αποστέλλεται από έναν δρομολογητή σε έναν κεντρικό υπολογιστή που δημιούργησε ένα datagram όταν αποφασίσει ότι το datagram δεν μπορεί να παραδοθεί στον τελικό προορισμό του. Ένα μήνυμα ανακατεύθυνσης αποστέλλεται από έναν δρομολογητή στον κεντρικό υπολογιστή που δημιούργησε ένα datagram, εάν ο δρομολογητής πιστεύει ότι το datagram έπρεπε να είχε σταλεί σε άλλο δρομολογητή. Ένα μήνυμα fragmentation required αποστέλλεται από έναν δρομολογητή στον κεντρικό υπολογιστή ενός datagram, εάν είναι ότι το datagram είναι μεγαλύτερο από τη Μέγιστη Μονάδα Μετάδοσης (Maximum Transfer Unit)(MTU) του δικτύου μέσω του οποίου πρέπει να σταλεί. Το datagram απορρίπτεται από τον δρομολογητή. Ένα μήνυμα Παραμέτρων Προβλήματος (Parameter Problem) χρησιμοποιείται για να υποδείξει ότι έχει ανακαλυφθεί μια παράνομη τιμή στην κεφαλίδα IP ενός datagram. Η απάντηση Echo Reply και το Echo Request χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί εάν ένας προορισμός χρήστη είναι προσβάσιμο και ζωντανό. Το αίτημα Timestamp Request και η Timestamp Reply είναι παρόμοια με τα echo Request/Reply, εκτός από το ότι καταγράφονται επίσης η ώρα άφιξης του μηνύματος αιτήματος και η ώρα αναχώρησης του μηνύματος απάντησης.

#### 4.5 IP Έκδοση 6 (IPv6)

Λόγω της ταχείας ανάπτυξης του Διαδικτύου, θεωρήθηκε ότι ο χώρος διευθύνσεων της τρέχουσας IP σύντομα θα είναι ανεπαρκής για να αντιμετωπίσει τη ζήτηση για νέες διευθύνσεις IP. Αυτή η εκτίμηση σε συνδυασμό με την ανάγκη παροχής νέων μηχανισμών για την παροχή κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, όπως ως ήχος και βίντεο, οδήγησε στην ανάπτυξη μιας νέας IP, γνωστής ως IPv6.

Το IPv6 διατηρεί πολλές από τις βασικές έννοιες από το IPv4. Τα νέα χαρακτηριστικά είναι 128-bit διευθύνσεις, νέα μορφή κεφαλίδας, κεφαλίδες επέκτασης, υποστήριξη για ήχο και βίντεο και επεκτάσιμο πρωτόκολλο.

#### 4.6 Αρχιτεκτονική Εναλλαγή Ετικετών Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (MPLS)

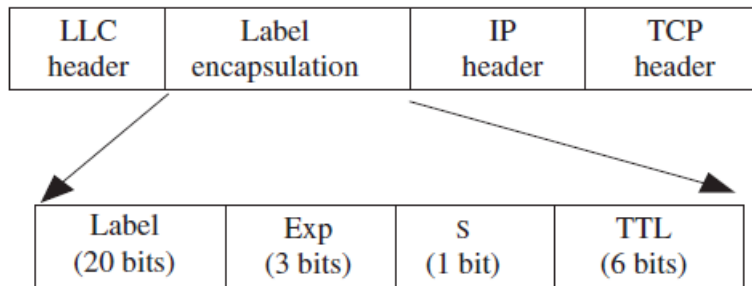
Το MPLS είναι ένα πρότυπο IETF που βασίζεται στην εναλλαγή ετικετών της Cisco. Η αρχική πρόθεση ήταν να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με διαφορετικά πρωτόκολλα δικτύωσης, όπως IPv4, IPv6, IPX και AppleTalk. Ωστόσο, το MPLS έχει αναπτυχθεί αποκλειστικά για δίκτυα IP, γεγονός που καθιστά το όνομα του πρωτοκόλλου πιο γενικό από ό,τι είναι στην πραγματικότητα. Για να κατανοήσουμε τη βασική ιδέα πίσω από το MPLS, πρέπει να ριζώσουμε μια ματιά στον τρόπο λειτουργίας ενός δρομολογητή IP. Ένας δρομολογητής IP υλοποιεί στοιχεία ελέγχου και προώθησης. Το στοιχείο ελέγχου αποτελείται από πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως η Ανοίξτε πρώτα τη συντομότερη διαδρομή (Open Shortest Path First) (OSPF), το Πρωτόκολλο Εξωτερικής Πύλης (BGP), και το Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης Πολλαπλής Διανομής (Protocol Independent Multicast) (PIM) που χρησιμοποιείται για την κατασκευή διαδρομών και την ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης μεταξύ δρομολογητών IP.

Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται από τους δρομολογητές IP για την κατασκευή του πίνακα δρομολόγησης προώθησης, που αναφέρεται ως Βάση Πληροφοριών Προώθησης (Forwarding Information Base) (FIB). Το στοιχείο προώθησης αποτελείται από διαδικασίες που χρησιμοποιεί ένας δρομολογητής για να λάβει μια απόφαση προώθησης σε ένα πακέτο IP. Για παράδειγμα, στην forwarding decision, ο δρομολογητής χρησιμοποιεί τη διεύθυνση IP προορισμού για να βρει μια καταχώρηση στο FIB, χρησιμοποιώντας τον μακρύτερο αλγόριθμο αντιστοιχίσης. Το αποτέλεσμα αυτής της αναζήτησης στο πίνακα είναι ένας αριθμός διεπαφής, ο οποίος είναι η θύρα εξόδου που συνδέει το δρομολογητή με τον επόμενο δρομολογητή hop, στον οποίο θα πρέπει να σταλεί το πακέτο IP.

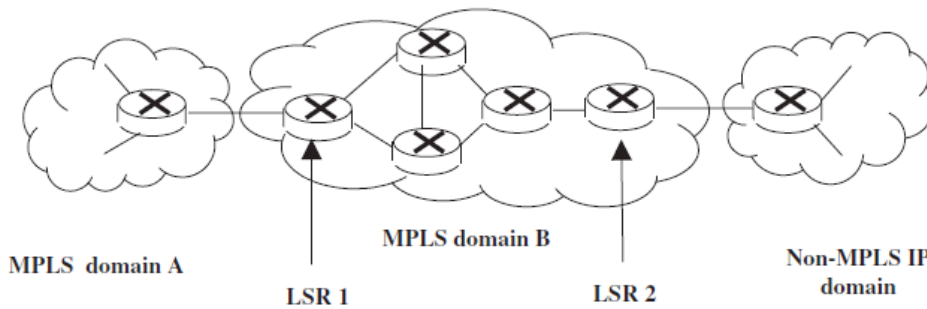
Ένας δρομολογητής προωθεί ένα πακέτο IP σύμφωνα με το πρόθεμά (prefix) του. Σε έναν δεδομένο δρομολογητή, το σύνολο όλων των διευθύνσεων που έχουν το ίδιο πρόθεμα (prefix) αναφέρεται ως Πρόσθια Διόρθωση Σφαλμάτων (FEC). Τα πακέτα IP που ανήκουν στο ίδιο FEC έχουν την ίδια διεπαφή εξόδου. Στο MPLS, κάθε FEC σχετίζεται με διαφορετική ετικέτα. Αυτή η ετικέτα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της διεπαφής εξόδου ενός πακέτου IP χωρίς να χρειάζεται να αναζητήσετε τη διεύθυνσή του στο FIB. Μια ετικέτα είναι ένα σύντομο αναγνωριστικό σταθερού μήκους που έχει τοπική σημασία. Δηλαδή, ισχύει σε ένα μόνο hop που διασυνδέει δύο δρομολογητές. Μια ετικέτα είναι παρόμοια σε λειτουργικότητα με την τιμή VPI/VCI που σχετίζεται με μια κυψέλη ATM.

Στο IPv6, η ετικέτα μπορεί να μεταφερθεί στο πεδίο ετικέτας ροής. Στο IPv4, ωστόσο, δεν υπάρχει χώρος για μια τέτοια ετικέτα στην κεφαλίδα IP. Εάν το δίκτυο IP λειτουργεί πάνω από ένα ATM δίκτυο, τότε η ετικέτα μεταφέρεται στο πεδίο VPI/VCI μιας κυψέλης ATM. Εάν εκτελείται μέσω Ρελέ Πλαισίου (Frame Relay), η ετικέτα μεταφέρεται στο πεδίο DLCI. Για συνδέσεις Ethernet, token ring και point-to-point που εκτελούν πρωτόκολλο επιπέδου σύνδεσης (π.χ. PPP), η ετικέτα ενθυλακώνεται και εισάγεται μεταξύ της κεφαλίδας LLC και της κεφαλίδας IP (Εικόνα 66). Το πρώτο πεδίο της ενθυλάκωσης (encapsulation) ετικέτας είναι ένα πεδίο 20 bit που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της ετικέτας. Το δεύτερο πεδίο είναι ένα πεδίο 3 bit που χρησιμοποιείται για πειραματικούς σκοπούς. Μπορεί για παράδειγμα να φέρει μια ένδειξη Κατηγορία Υπηρεσίας (Class-Of-Service)(CoS), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της σειράς με την οποία τα πακέτα IP θα μεταδοθούν εκτός μιας διεπαφής. Το πεδίο S χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη στοιβία

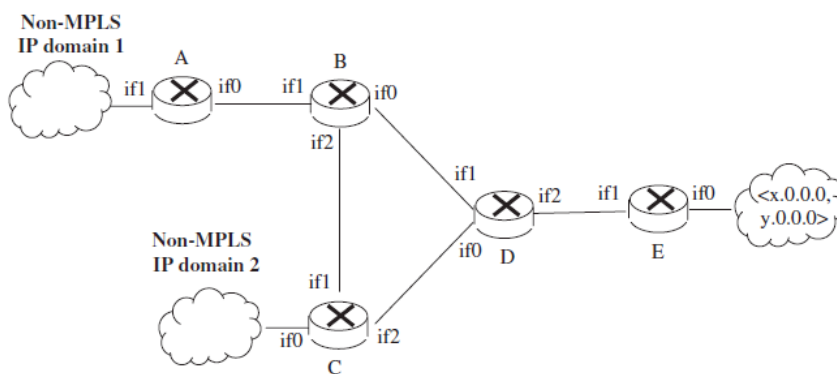
ετικετών. Τέλος, το πεδίο Περίοδος Ζωής (Time-To-Live )(TTL) είναι παρόμοιο με το πεδίο TTL στην κεφαλίδα IP. Ένα δίκτυο MPLS αποτελείται από Δρομολογητές Μεταγωγής Ετικετών (Label Switching Routers)(LSR) και κόμβους MPLS. Ένα LSR είναι ένας δρομολογητής IP που εκτελεί το πρωτόκολλο MPLS. Μπορεί να συνδέσει ετικέτες σε FEC, να προωθήσει πακέτα IP με βάση τις ετικέτες τους και να μεταφέρει τη συνηθισμένη απόφαση προώθησης IP πραγματοποιώντας μια αναζήτηση πίνακα στο FIB χρησιμοποιώντας ένα πρόθεμα (prefix). Ένας κόμβος MPLS είναι ένας LSR, εκτός από το ότι δεν έχει απαραίτητα τη δυνατότητα να προωθήσει πακέτα IP με βάση Προθέματα (Prefixes).



Εικόνα 62: Label encapsulation.



Εικόνα 63: Τομείς MPLS, LSR και κόμβοι MPLS.



Εικόνα 64: Παράδειγμα εναλλαγής ετικετών πολλαπλών πρωτοκόλλων.

Ένα συνεχόμενο σύνολο κόμβων MPLS που βρίσκονται στον ίδιο τομέα δρομολόγησης ή διαχείρισης σχηματίζει έναν τομέα MPLS. Μέσα σε έναν τομέα MPLS, τα πακέτα IP αλλάζουν χρησιμοποιώντας την ετικέτα MPLS τους. Ένας τομέας MPLS μπορεί να συνδεθεί σε έναν κόμβο έξω από τον τομέα, ο οποίος μπορεί να ανήκει σε έναν τομέα IP MPLS ή non-MPLS (δηλαδή, έναν τομέα IP όπου οι δρομολογητές χρησιμοποιούν τη συνηθισμένη απόφαση

προώθησης βάσει Προθεμάτων (Prefixes)). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 67, ο τομέας MPLS B αποτελείται από πέντε δρομολογητές, δύο εκ των οποίων είναι LSR (LSR 1 και LSR 2). οι υπόλοιποι τρεις μπορεί να είναι κόμβοι LSR ή MPLS. Ο τομέας MPLS B συνδέεται με τον τομέα MPLS A μέσω LSR 1 και συνδέεται με τον τομέα C IP που δεν είναι MPLS μέσω LSR 2. Οι LSR 1 και 2 αναφέρονται ως κόμβοι ακμής MPLS. Για απλότητα, θα υποθέσουμε ότι όλοι οι κόμβοι σε έναν τομέα MPLS είναι LSR. Για να δούμε πώς λειτουργεί το MPLS, ας εξετάσουμε έναν τομέα MPLS που αποτελείται από πέντε LSR (LSRs A, B, C, D και E), όλα συνδεδεμένα με συνδέσεις από σημείο σε σημείο όπως φαίνεται στην Εικόνα 68. Τα LSR A και C συνδέονται σε τομείς IP που δεν είναι MPLS 1 και 2, αντίστοιχα. Ας υποθέσουμε ότι ένα νέο σύνολο κεντρικών υπολογιστών με το πρόθεμα (prefix) x.0.0.0, y.0.0.0, όπου x.0.0.0 είναι η βασική διεύθυνση δικτύου και y.0.0.0 είναι η μάσκα, είναι απευθείας συνδεδεμένο στο E.

Η ροή των πακέτων IP με αυτό το Πρόθεμα (Prefix) από το A στο E γίνεται μέσω του B και του D. Δηλαδή, ο επόμενος δρομολογητής του A για αυτό το πρόθεμα είναι ο B, ο επόμενος δρομολογητής του B είναι ο D και ο επόμενος δρομολογητής του D είναι ο E. Ομοίως, η ροή των πακέτων IP με το ίδιο πρόθεμα από το C στο E είναι μέσω D. Δηλαδή, ο επόμενος δρομολογητής του C για αυτό το πρόθεμα είναι D και ο επόμενος δρομολογητής του D είναι ο E. Οι διεπαφές στο Εικόνα 6.5 δείχνουν πώς αυτοί οι δρομολογητές συνδέονται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, το A συνδέεται με το B μέσω if0 και το B συνδέεται με τα A, C και D μέσω if1, if2 και if0, αντίστοιχα. Όταν ένα LSR προσδιορίζει το FEC που σχετίζεται με αυτό το νέο πρόθεμα (prefix) x.0.0.0, y.0.0.0, επιλέγει μια ετικέτα από μια ομάδα ελεύθερων ετικετών και κάνει μια καταχώρηση σε έναν πίνακα που αναφέρεται ως label forward information base (LFIB). Αυτός ο πίνακας περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις εισερχόμενες και εξερχόμενες ετικέτες που σχετίζονται με ένα FEC και τη διεπαφή εξόδου, δηλαδή τον επόμενο δρομολογητή hop της FEC. Το LSR αποθηκεύει επίσης την ετικέτα στο FIB του στην καταχώρηση που σχετίζεται με το FEC.

Η καταχώρηση στο LFIB που σχετίζεται με τη συγκεκριμένη FEC για κάθε LSR φαίνεται στον Πίνακα 4.2. Σημειώστε ότι ο B έχει επιλέξει μια εισερχόμενη ετικέτα ίση με 62. Ο D έχει επιλέξει 15. και ο E έχει επιλέξει 60. Εφόσον οι A και C είναι δρομολογητές άκρων MPLS και δεν αναμένουν να λαμβάνουν πακέτα IP με ετικέτα, δεν έχουν επιλέξει εισερχόμενη ετικέτα για αυτό το FEC. Οι υπόλοιπες πληροφορίες σε κάθε καταχώρηση δίνουν το επόμενο hop LSR και τη διεπαφή εξόδου για το FEC.

Έτσι για αυτό το FEC, ο επόμενος δρομολογητής hop για το A είναι ο B και περνάει από το if0. Μια εισερχόμενη ετικέτα είναι μια ετικέτα που μια LSR αναμένει να βρει σε όλες τις incoming πακέτα IP που ανήκουν σε ένα FEC. στο παραπάνω παράδειγμα, το LSR B αναμένει ότι όλα τα εισερχόμενα πακέτα IP που ανήκουν στο FEC που σχετίζονται με το πρόθεμα (prefix) (x.0.0.0, y.0.0.0) θα φέρουν την τιμή 62. Η επισήμανση αυτών Τα πακέτα πρέπει να γίνονται από τους LSR που είναι upstream του B. Δηλαδή, είναι upstream σε σχέση με τη ροή των πακέτων IP που σχετίζονται με αυτό το FEC. Σε αυτό το παράδειγμα, το μόνο LSP που βρίσκεται upstream του B είναι το A. Στην περίπτωση του D, τόσο το B όσο και το C είναι LSR προς τα πάνω. Προκειμένου ένα LSR να λάβει εισερχόμενα πακέτα IP με ετικέτα με την τιμή που έχει επιλέξει, το LSR πρέπει να ειδοποιήσει τους γείτονές του σχετικά με την επιλογή της ετικέτας για ένα συγκεκριμένο FEC.

Στο παραπάνω παράδειγμα, το LSR B στέλνει τις πληροφορίες του στους A, D και C. Ο A αναγνωρίζει ότι είναι upstream από το B και χρησιμοποιεί τις πληροφορίες για να ενημερώσει την καταχώρηση για αυτό το FEC στο LFIB του. Όσον αφορά αυτό το FEC, το D και το C δεν είναι upstream από το B και δεν χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες στα LFIB τους. Ωστόσο, μπορούν να επιλέξουν να το αποθηκεύσουν για μελλοντική χρήση. Για

παράδειγμα, μια αποτυχία σύνδεσης C-to-D θα μπορούσε να κάνει το B το επόμενο LSR hop για αυτό το FEC. Σε αυτήν την περίπτωση, ο C θα χρησιμοποιήσει την ετικέτα που διαφημίζεται από τον B για να ενημερώσει την καταχώριση LFIB του. Το D στέλνει τις πληροφορίες του στους B, C και E. Επειδή οι B και C είναι και οι δύο upstream του D, χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για να ενημερώσουν τις εγγραφές στο LFIB τους. Τέλος, το E στέλνει τις πληροφορίες του

*Πίνακας 4. 2: Εγγραφή FEC σε κάθε LFIB.*

LSR	Incoming label	Outgoing label	Next hop	Outgoing interface
A	–	–	LSR B	if0
B	62	–	LSR D	if0
C	–	–	LSR D	if2
D	15	–	LSR E	if2
E	60	–	LSR E	if0

*Πίνακας 4. 3: Καταχώριση FEC σε κάθε LFIB με πληροφορίες δέσμωσης ετικέτας*

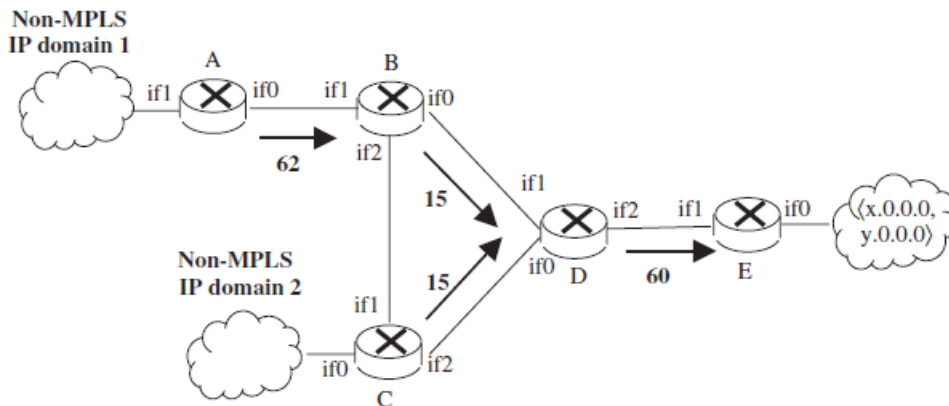
LFIB	Incoming label	Outgoing label	Next hop	Outgoing interface
A	–	62	LSR B	if0
B	62	15	LSR D	if0
C	–	15	LSR D	if2
D	15	60	LSR E	if2
E	60	–	LSR E	if0

Μόλις διανεμηθούν οι ετικέτες και ενημερωθούν οι καταχωρίσεις στα LFIB, την προώθηση ενός πακέτου IP που ανήκει στο FEC και συνδέεται με το πρόθεμα `_x.0.0.0, y.0.0.0_` γίνεται χρησιμοποιώντας μόνο τις ετικέτες. Ας υποθέσουμε ότι ο A λαμβάνει ένα πακέτο IP από ο τομέας IP 1 εκτός MPLS με πρόθεμα `_x.0.0.0, y.0.0.0_`.

Το A προσδιορίζει ότι το πακέτο διεύθυνση IP ανήκει στο FEC και αναζητά το LFIB του για να λάβει την τιμή ετικέτας και το εξερχόμενη διεπαφή. Ορίζει την τιμή της ετικέτας σε 62, την ενσωματώνει χρησιμοποιώντας τη μορφή που εμφανίζεται στην Εικόνα 66, και το προωθεί στην εξερχόμενη διεπαφή if0. Όταν το πακέτο IP φτάσει στο LSR B, η ετικέτα του εξάγεται και αναζητείται στο LFIB του B. Η παλιά ετικέτα αντικαθίσταται από τη νέα ένα, το οποίο είναι 15, και το πακέτο IP προωθείται στη διεπαφή if0. Το LSR D ακολουθεί ακριβώς με την ίδια διαδικασία. Όταν λαμβάνει το πακέτο IP από το B, αντικαθιστά την εισερχόμενη ετικέτα του με την εξερχόμενη ετικέτα, η οποία είναι 60, και την προωθεί στη διεπαφή if2. Τέλος, η E προωθεί το πακέτο IP στον τοπικό προορισμό του. Η ίδια διαδικασία ισχύει και για ένα πακέτο IP με ένα πρόθεμα `_x.0.0.0, y.0.0.0_` που φτάνει στο C από τον τομέα 2 που δεν είναι MPLS.

Στην Εικόνα 69, παρουσιάζουμε τις ετικέτες που κατανέμονται από τα LSR. Αυτές οι ετικέτες είναι παρόμοιες με τις Τιμές VPI/VCI σε ATM. Έχουν τοπική σημασία, δηλαδή, κάθε ετικέτα

ισχύει μόνο για ένας σύνδεσμος. Η ακολουθία των ετικετών 62, 15, 60 σχηματίζει μια διαδρομή γνωστή ως Δρομολογητές Μεταγωγής Ετικετών (Label Switching Routers)(LSR) .



Εικόνα 65: Label switched paths.

Αυτή η διαδρομή είναι ανάλογη με μια σύνδεση ATM από σημείο σε σημείο, η οποία ορίζεται από μια ακολουθία τιμών VPI/VCI. Μια σύνδεση ATM συνδέεται με δύο τελικές συσκευές, ενώ μια διαδρομή εναλλαγής ετικέτας σχετίζεται με ένα FEC. Αρκετές διαδρομές εναλλαγής ετικετών είναι συνήθως συνδέεται με το ίδιο FEC, σχηματίζοντας ένα διάγραμμα δέντρου (Εικόνα 69). Κάθε LSP έχει ένα LSR εισόδου και ένα LSR εξόδου. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 69, τα LSR A και E είναι τα LSR εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα, για το LSP από το LSR A στο LSR E. Ομοίως, τα LSR C και E είναι LSR εισόδου και εξόδου για το LSP από LSR C σε LSR E. Η Εναλλαγή Ετικετών Εξαλείφει (Label Switching Eliminates) την αναζήτηση πίνακα CPU-intensive στο FIB, απαραίτητο για τον προσδιορισμό του επόμενου δρομολογητή hop ενός πακέτου IP. Η αναζήτηση table look-up στο LFIB δεν είναι τόσο χρονοβόρα, καθώς ένα LFIB είναι σημαντικά μικρότερο από ένα FIB. Από την εισαγωγή της εναλλαγής ετικετών, ωστόσο, αναπτύχθηκαν αρκετοί αλγόριθμοι αποδοτικοί ως προς την CPU για την πραγματοποίηση αναζητήσεων πινάκων στο FIB. Αυτό δεν μείωσε τη σημασία της εναλλαγής ετικετών, καθώς θεωρήθηκε ως μέσο εισαγωγής QoS στο δίκτυο IP.

Ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να εισαχθεί το QoS στο δίκτυο είναι να συσχετιστεί κάθε πακέτο IP με μια προτεραιότητα. Αυτή η προτεραιότητα μπορεί να μεταφερθεί στο πειραματικό πεδίο 3 bit της Ετικέτας Ενθυλάκωση (Label Encapsulation)( Εικόνα 70). Οι προτεραιότητες μπορούν να εκχωρηθούν από έναν κόμβο άκρης MPLS. Τα πακέτα IP με ετικέτα εντός ενός LSR εξυπηρετούνται σύμφωνα με την προτεραιότητά τους όπως στην περίπτωση ενός ATM διακόπτη. Θυμηθείτε ότι, στα δίκτυα ATM, κάθε σύνδεση VC σχετίζεται με μια κατηγορία QoS. Ένας διακόπτης ATM μπορεί να καθορίσει το QoS ενός εισερχόμενου κελιού από την τιμή VPI/VCI του και, κατά συνέπεια, μπορεί να βάλει το κελί στην ουρά στην κατάλληλη ουρά QoS.

Ένας διακόπτης ATM διατηρεί διαφορετικές ουρές QoS για κάθε διεπαφή εξόδου. Αυτές οι ουρές εξυπηρετούνται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο προγραμματισμού, έτσι ώστε οι συνδέσεις VC να μπορούν να εξυπηρετούνται σύμφωνα με το ζητούμενο QoS. Μια παρόμοια δομή ουράς μπορεί τώρα να εισαχθεί σε έναν δρομολογητή IP. Τα πακέτα IP μπορούν τώρα να τεθούν σε ουρά σε μια διεπαφή εξόδου σύμφωνα με την προτεραιότητά τους και μπορούν να μεταδοθούν με μια σειρά που καθορίζεται από έναν προγραμματιστή.

Label (20 bits)	Exp (3 bits)	S = 0	TTL (8 bits)
Label (20 bits)	Exp (3 bits)	S = 0	TTL (8 bits)
• • •			
Label (20 bits)	Exp (3 bits)	S = 1	TTL (8 bits)

Εικόνα 70: The label stack

#### 4.7 Label Allocation Schemes

Στο παράδειγμα εναλλαγής ετικετών που περιγράφεται παραπάνω, ένα LSR δεσμεύει (δηλαδή, εκχωρεί) μια ετικέτα σε ένα FEC και αποθηκεύει αυτές τις πληροφορίες στο LFIB του ως εισερχόμενη ετικέτα. Στη συνέχεια, διαφημίζει τη σύνδεση μεταξύ της εισερχόμενης ετικέτας και του FEC με τα γειτονικά LSR. Ένα upstream LSR (δηλαδή, ένα LSR που βρίσκεται upstream του συνδέσμου καθώς ρέει η κυκλοφορία) τοποθετεί την ετικέτα στο πεδίο εξερχόμενης ετικέτας της καταχώρισης στο LFIB του που σχετίζεται με αυτό το FEC. Ένα μη upstream LSR μπορεί είτε να αγνοήσει τη διαφήμιση της ετικέτας είτε να την αποθηκεύσει για μελλοντική χρήση. Επειδή το LSR, το οποίο βρίσκεται upstream του συνδέσμου σε σχέση με τη ροή κυκλοφορίας, δημιουργεί την ετικέτα και επειδή η ετικέτα διαφημίζεται στους γείτονές της με αυτόκλητο τρόπο, το σχήμα κατανομής ετικετών είναι γνωστό ως *unsolicited downstream scheme*.

Για παράδειγμα, ας εξετάσουμε το LSR B στο Σχήμα 6.6. Το LSR B διαφημίζει την εισερχόμενη ετικέτα του 65 για το FEC (x.0.0.0, y.0.0.0) στα γειτονικά LSRs A, C και D. Από αυτά, μόνο το LSR A είναι upstream του LSR B όσον αφορά τη ροή των πακέτων IP προς τον προορισμό (x.0.0.0,y.0.0.0). Ενόψει αυτού, το LSR A θα χρησιμοποιήσει αυτήν την ετικέτα για να ενημερώσει το LFIB του.

Τα LSR C και D μπορούν να επιλέξουν να αποθηκεύσουν αυτή τη δέσμευση ετικέτας, σε περίπτωση που γίνουν upstream του LSR B όσον αφορά τη ροή αυτών των πακέτων IP. Αυτό μπορεί να συμβεί εάν ένας σύνδεσμος ή ένα LSR διακοπεί. Για παράδειγμα, εάν η σύνδεση μεταξύ των LSR C και D είναι σπασμένη, το LSR C μπορεί να χρειαστεί να επαναδρομολογήσει (reroute) την κυκλοφορία του μέσω του LSR B. Στην περίπτωση αυτή, θα γίνει upstream προς το B. Τα LSR C και D μπορούν επίσης να επιλέξουν να αγνοήσουν τη διαφημιζόμενη δέσμευση ετικετών του LSR B.

#### 4.8 The Next Hop Label Forwarding Entry (NHLFE)

Μέχρι στιγμής, για λόγους παρουσίασης έχουμε υποθέσει ότι ένα LSR διατηρεί μία μόνο καταχώρηση για κάθε εισερχόμενη ετικέτα. Σε αυτήν την καταχώρηση, δεσμεύει την εισερχόμενη ετικέτα με μια εξερχόμενη ετικέτα και παρέχει πληροφορίες σχετικά με το επόμενο βήμα, όπως το επόμενο LSR και τη διεπαφή (interface) εξόδου.

Η αρχιτεκτονική MPLS επιτρέπει σε ένα LSR να διατηρεί πολλαπλές καταχωρήσεις για κάθε εισερχόμενη ετικέτα. Κάθε καταχώρηση είναι γνωστή ως η επόμενη Καταχώρηση Προώθησης Ετικετών hop (next hop label forwarding entry)(NHLFE) και παρέχει τις ακόλουθες πληροφορίες: το επόμενο βήμα του πακέτου και τη λειτουργία που πρέπει να



εκτελεστεί στην ετικέτα του πακέτου. Κάθε καταχώρηση NHLFE μπορεί επίσης να περιέχει πρόσθετες πληροφορίες που είναι απαραίτητες για τη σωστή απόρριψη του πακέτου.

Το MPLS επιτρέπει σε ένα πακέτο να φέρει πολλαπλές ετικέτες που είναι οργανωμένες ως στοίβα. Ένα παράδειγμα της στοίβας ετικετών δίνεται στην Εικόνα 70. Κάθε σειρά περιέχει μια διαφορετική ενθυλάκωση ετικέτας. Το bit S υποδεικνύει εάν η τρέχουσα ενθυλάκωση ετικέτας είναι η τελευταία

( $S = 1$ ) ή not ( $S = 0$ ).

Οι ακόλουθες τρεις λειτουργίες μπορούν να εκτελεστούν στην ετικέτα του πακέτου:

- Αντικαταστήστε την ετικέτα στο επάνω μέρος της στοίβας ετικετών του πακέτου με μια νέα ετικέτα.
- Τοποθετήστε τη στοίβα ετικετών.
- Αντικαταστήστε την ετικέτα στο επάνω μέρος της στοίβας ετικετών του πακέτου με μια νέα ετικέτα και, στη συνέχεια, πιέστε μία ή περισσότερες νέες ετικέτες στη στοίβα.

Την Εικόνα 70 απεικονίζει μόνο την πρώτη πράξη. Όταν το LSR B λαμβάνει ένα πακέτο από LSR A, θα αντικαταστήσει την εισερχόμενη ετικέτα 62 με μια νέα εξερχόμενη ετικέτα 15, χρησιμοποιώντας την πρώτη λειτουργία. Το ίδιο συμβαίνει και στο LSR D. Θα το περιγράψουν οι άλλες δύο πράξεις παρακάτω, όπου συζητάμε τη χρήση της στοίβας ετικετών. Στην περίπτωση που το επόμενο βήμα ενός LSR είναι το ίδιο το LSR, το LSR ανοίγει την ετικέτα ανώτατου επιπέδου και το πακέτο που προκύπτει προωθείται με βάση ό,τι απομένει μετά το άνοιγμα της στοίβας ετικετών. Αυτό μπορεί να εξακολουθεί να είναι ένα πακέτο με ετικέτα ή μπορεί να είναι ένα εγγενές πακέτο IP (native IP) που πρέπει να προωθηθεί με βάση το πρόθεμά (prefix) του. Στο παράδειγμα στην Εικόνα 69, το LSR E θα εμφανίσει τη στοίβα και στη συνέχεια θα προωθήσει το εγγενές πακέτο IP (native IP) χρησιμοποιώντας το πρόθεμά του. Ο χάρτης incoming label map (ILM) αντιστοιχίζει μια εισερχόμενη ετικέτα σε ένα σύνολο NHLFE που σχετίζονται με την εισερχόμενη ετικέτα. Η ύπαρξη πολλαπλών καταχωρήσεων για κάθε εισερχόμενη ετικέτα μπορεί να είναι χρήσιμη, επειδή επιτρέπει την υλοποίηση πολλαπλών διαδρομών για ισορροπία φορτίου και προστασία. Η διαδικασία επιλογής μιας από τις εγγραφές NHLFE ξεφεύγει από το πεδίο εφαρμογής της αρχιτεκτονικής MPLS.

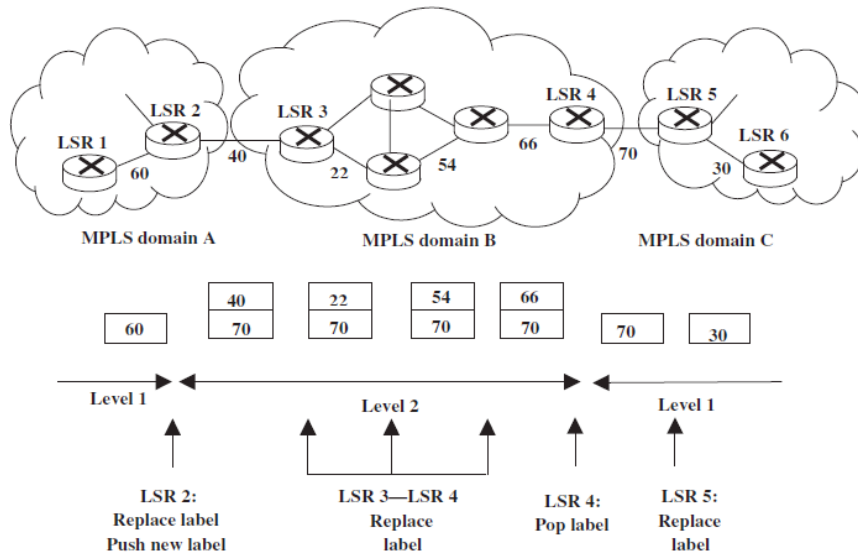
Τέλος, υπάρχει ο χάρτης FEC-to-NHLFE (FTN), ο οποίος χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση ενός FEC σε ένα σύνολο NHLFE. Αυτό χρησιμοποιείται όταν ένα πακέτο φθάνει χωρίς ετικέτα και πρέπει να επισημανθεί πριν προωθηθεί. Όπως και στην περίπτωση του ILM, εάν το FTN αντιστοιχίσει ένα FEC σε πολλαπλά NHLFE, απαιτείται διαδικασία για την επιλογή ενός από αυτά. Μια τέτοια διαδικασία δεν ορίζεται στην αρχιτεκτονική MPLS. Στο παράδειγμα στην Εικόνα 69, οι LSR A και C χρησιμοποιούν το FTN για να καθορίσουν την κατάλληλη καταχώρηση από όπου μπορούν να ληφθούν η εξερχόμενη ετικέτα και η εξερχόμενη διεπαφή.

#### 4.9 Ένα παράδειγμα χρήσης της στοίβας ετικετών

Ένα παράδειγμα χρήσης της στοίβας ετικετών φαίνεται στην Εικόνα 71. Υπάρχουν τρεις τομείς MPLS (A, B και C) και έχει καθιερωθεί μια ρητή διαδρομή μεταξύ LSR 1 στον τομέα MPLS A και LSR 6 στον τομέα MPLS C. Η στοίβα ετικετών σε κάθε αναπήδηση και η λειτουργία ετικέτας που πραγματοποιήθηκε σε κάθε LSR κατά μήκος της διαδρομής φαίνονται επίσης στο Εικόνα 71. Η εξερχόμενη ετικέτα από το LSR 1 στο LSR 2 είναι 60.

(Για λόγους απλότητας, δεν μας απασχολεί το πώς το LSR 1 εκχωρεί αυτήν την ετικέτα και από πού προέρχονται τα πακέτα IP). Η λειτουργία ετικέτας στο LSR 2 είναι: να αντικαταστήσετε την ετικέτα στην κορυφή της στοίβας ετικετών του πακέτου με μια νέα ετικέτα και, στη συνέχεια, να σπρώξετε μια νέα ετικέτα στη στοίβα. Ως αποτέλεσμα αυτής

της λειτουργίας, η ετικέτα 60 αντικαθίσταται από 70 και μια νέα ετικέτα με την τιμή 40 πιέζεται από πάνω. Από το LSR 3 στο LSR 4, το πακέτο προωθείται χρησιμοποιώντας τη λειτουργία:



Εικόνα 66: Παράδειγμα χρήσης της στοίβας ετικετών.

αντικαταστήστε την ετικέτα στην κορυφή της στοίβας ετικετών του πακέτου με μια νέα ετικέτα. Ως αποτέλεσμα, η επάνω ετικέτα της στοίβας ετικετών αντικαθίσταται πρώτα με την τιμή 22, μετά 54 και στη συνέχεια 66. Στο LSR 4, η λειτουργία ετικετών είναι: αναδιπλώστε τη στοίβα ετικετών. Ως αποτέλεσμα, η επάνω ετικέτα 66 αφαιρείται από τη στοίβα ετικετών και τώρα το πακέτο προωθείται στο LSR 5 χρησιμοποιώντας την ετικέτα 70. Τέλος, το LSR 5 προωθεί το πακέτο στο LSR 6 χρησιμοποιώντας τη λειτουργία ετικέτας: αντικαταστήστε την ετικέτα στο επάνω μέρος του τη στοίβα ετικετών του πακέτου με μια νέα ετικέτα. Ως αποτέλεσμα, το πακέτο φτάνει στο LSR 6 με μια ετικέτα 30. Όπως μπορούμε να δούμε, όταν ένα πακέτο προωθείται εντός του τομέα B MPLS, περιέχει δύο ετικέτες. Η επάνω ετικέτα χρησιμοποιείται για την εναλλαγή ετικετών εντός του τομέα MPLS B και η κάτω ετικέτα χρησιμοποιείται μεταξύ των δύο ακραίων κόμβων που συνδέουν τους τομείς MPLS B και C. Αυτή η χρήση της στοίβας ετικετών επιτρέπει τη δημιουργία σήραγγων LSP. Για παράδειγμα, μπορούμε να σκεφτούμε ότι η διαδρομή μεταξύ των LSR 3 και 4 μέσω του τομέα MPLS B, που ορίζεται από τις ετικέτες 22, 54 και 66, είναι μια σήραγγα που διασυνδέει τα LSR 2 και 5. Για το LSR 2 να προωθήσει πακέτα σε αυτό σήραγγα, πρέπει να χρησιμοποιήσει την ετικέτα 40. Στην άλλη πλευρά της σήραγγας, για να προωθηθούν τα πακέτα στο LSR 6, η εισερχόμενη ετικέτα στο LSR 5 πρέπει να έχει την τιμή 70, έτσι ώστε το LSR 5 να μπορεί να το αλλάξει στο LSR 6. Αυτή η ετικέτα φέρεται στην κάτω ετικέτα της στοίβας ετικετών.

#### 4.10 MPLS OVER ATM

Το MPLS ορίστηκε να τρέχει σε διαφορετικά σχήματα δικτύωσης, συμπεριλαμβανομένων των ATM και αναμετάδοσης πλαισίου. Στην περίπτωση του MPLS μέσω ATM, τα πρωτόκολλα σηματοδότησης που εκτελούνται συνήθως σε έναν διακόπτη ATM, όπως το Q.2931 και το PNNI, αντικαθίστανται από πρωτόκολλα IP όπως OSPF, BGP, PIM και RSVP. Ο διακόπτης ATM χρησιμοποιείται απλώς ως συσκευή μεταγωγής κυψέλης. Σε ένα δίκτυο ATM, μια σύνδεση ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας Q.2931 και PNNI. Χρησιμοποιώντας το PNNI, ένας διακόπτης ATM αποκτά επίγνωση της τοπολογίας της ίδια ομάδας του (peer group) και των λογικών

κόμβων σε τις ομάδες συνομηλικών ανώτερου επιπέδου. Όταν ένας καλών χρήστης επιθυμεί να δημιουργήσει μια σύνδεση με έναν χρήστη προορισμού, στέλνει ένα μήνυμα SETUP στον διακόπτη ATM εισόδου του χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο σηματοδότησης Q.2931.

Ο διακόπτης ATM εισόδου υπολογίζει μια διαδρομή μέσω του δικτύου ATM και, στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο PNNI, προωθεί το μήνυμα SETUP στον επόμενο διακόπτη κατά μήκος της διαδρομής, ο οποίος το προωθεί στον επόμενο διακόπτη ATM στη διαδρομή και ούτω καθεξής μέχρι το μήνυμα SETUP φτάνει στο διακόπτη ATM εξόδου που εξυπηρετεί τον καλούμενο χρήστη. Ο διακόπτης εξόδου προωθεί το μήνυμα SETUP στον καλούμενο χρήστη χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο σηματοδότησης Q.2931 και εάν ο καλούμενος χρήστης το αποδεχτεί, επιστρέφεται μια επιβεβαίωση στον καλούντα χρήστη. Εκείνη τη στιγμή, ο χρήστης που καλεί μπορεί να ξεκινήσει τη μετάδοση δεδομένων στον καλούμενο χρήστη.

Στο MPLS μέσω ATM, όλη αυτή η λειτουργία σηματοδότησης αφαιρείται από τους διακόπτες ATM. Αντίθετα, κάθε διακόπτη ATM αναγνωρίζεται από μια διεύθυνση IP και εκτελεί πρωτόκολλα δρομολόγησης IP. Ένας τέτοιος διακόπτης ATM αναφέρεται ως ATM-LSR. Όπως σε έναν δρομολογητή IP, χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα δρομολόγησης IP, ένα ATM-LSR μπορεί να μάθει για τους γείτονές του και την τοπολογία του τομέα IP του και μπορεί να υπολογίσει το επόμενο ATM-LSR μετάβασης για κάθε προορισμό IP. Στο MPLS μέσω ATM, ένα LSP δεν είναι τίποτα άλλο παρά μια σύνδεση ATM που ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας MPLS. Η ετικέτα MPLS μεταφέρεται στο πεδίο VPI/VCI του κελιού. Εάν χρησιμοποιείται μια στοιβία ετικετών, τότε μπορούν να μεταφερθούν μόνο δύο ετικέτες.

Η επάνω ετικέτα βρίσκεται στο πεδίο VPI και η κάτω στο πεδίο VCI. Η διαφήμιση των δεμάτων ετικετών γίνεται με τη χρήση downstream κατανομής κατά παραγγελία. Δηλαδή, όταν ένα ATM LSR προσδιορίζει ένα νέο FEC, εκχωρεί μια ετικέτα, αλλά δεν το διαφημίζει στους γείτονές του. Ένα upstream ATM-LSR αποκτά τη δέσμευση της ετικέτας στέλνοντας ένα αίτημα. Μια προκαθορισμένη σύνδεση VC ATM χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή πληροφοριών δέσμευσης ετικετών.

Ας εξετάσουμε τώρα ένα δίκτυο ATM-LSR. Ένα πακέτο IP στην είσοδο ATM-LSR Ενθυλακώνεται (Encapsulated) πρώτα σε ένα CPS-PDU χρησιμοποιώντας AAL 5. Στη συνέχεια, τμηματικά σε έναν ακέραιο αριθμό μπλοκ 48 byte και κάθε μπλοκ μεταφέρεται σε διαφορετικό κελί ATM. Η ετικέτα που σχετίζεται με το συγκεκριμένο LSP μεταφέρεται στο πεδίο VPI/VCI του κελιού. Όταν ένα κελί ATM φτάσει στο επόμενο hop ATM-LSR, η ετικέτα του αντικαθίσταται από την εξερχόμενη ετικέτα και η κυψέλη μεταβαίνει στην κατάλληλη έξοδο από όπου μεταδίδεται στο επόμενο ATM-LSR. Αυτό συνεχίζεται μέχρι το κελί να φτάσει στην έξοδο ATM-LSR. Εκεί, το κελί συγκεντρώνεται (assembled) με άλλα κύτταρα στο πρωτότυπο AAL 5 CSC-PDU και το πακέτο IP ανακτάται από το ωφέλιμο φορτίο του και παραδίδεται στο πρωτόκολλο IP. Επομένως, ένα πακέτο IP διασχίζει το δίκτυο των ATM-LSR σε μια ακολουθία κυψελών ATM που εναλλάσσονται μέσω κάθε ATM-LSR χωρίς να χρειάζεται ποτέ να ανακατασκευαστεί το αρχικό πακέτο IP σε κάθε ενδιάμεσο ATM-LSR, εκτός από την έξοδο ATM-LSR. Αυτό είναι πολύ παρόμοιο με το σχήμα εναλλαγής IP.

#### 4.11 GENERALIZED MPLS (GMPLS)

Η Generalized MPLS (GMPLS) αρχιτεκτονική είναι μια επέκταση του MPLS, Το MPLS σχεδιάστηκε αρχικά για να εισαγάγει διαδρομές εναλλαγής ετικετών στο Δίκτυο IP, ισχύει επίσης και για ATM, Ρελέ Πλαισίου (Frame Relay) και Δίκτυα που βασίζονται σε Ethernet. Η αρχιτεκτονική GMPLS σχεδιάστηκε με σκοπό την εφαρμογή τεχνικές μεταγωγής ετικετών σε

δίκτυα Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (Time-Division Multiplexing) (TDM) και μήκους κύματος δίκτυα δρομολόγησης επιπλέον των Δίκτυο Μεταγωγής Πακέτων (Packet-Switching Networks).

Ένα δίκτυο TDM είναι ένα δίκτυο ζεύξεων SONET / SDH διασυνδεδεμένο με Ψηφιακό Σύστημα Διασύνδεσης (Digital Cross-Connect System)(DCS). Ένα DCS τερματίζει το σήμα SONET/SDH στο Κάθε εισερχόμενη σύνδεση, τη μετατρέπει στον ηλεκτρικό τομέα και, στη συνέχεια, αλλάζει τα περιεχόμενα ορισμένων από τους εικονικούς παραποτάμους σε διαφορετικά εξερχόμενα πλαίσια SONET/SDH. Πέφτει επίσης μερικούς Εικονικούς Παραποτάμους (Virtual Tributaries) και προσθέτει νέους στα εξερχόμενα πλαίσια. Τα εξερχόμενα πλαίσια στη συνέχεια μεταδίδονται μέσω των συνδέσεων εξόδου SONET/SDH του διακόπτη. Η συγκέντρωση των ωφέλιμων φορτίων SONET/SDH σε υψηλότερο επίπεδο SONET/SDH μπορεί επίσης να γίνει στους συνδέσμους εξόδου. Μια σύνδεση μεταγωγής κυκλώματος μέσω ενός τέτοιου δικτύου SONET/SDH μπορεί να δημιουργηθεί εκχωρώντας μία ή περισσότερες υποδοχές ενός πλαισίου SONET/SDH κατά μήκος των συνδέσμων που αποτελούν την διαδρομή . Το GMPLS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση των SONET/SDH DCSs, έτσι ώστε για να ρυθμίσετε μια σύνδεση μεταγωγής κυκλώματος.

Το GMPLS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία μιας διαδρομής φωτός σε ένα οπτικό δίκτυο δρομολόγησης μήκους κύματος. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση ενός OXC έτσι ώστε να αλλάζει ολόκληρο το οπτικό σήμα μιας ίνας εισόδου σε μια ίνα εξόδου.

Σε GMPLS, δρομολογητές IP, διακόπτες ATM, Διακόπτες Ρελέ Πλαισίου (Frame Relay Switches), Ethernet switches, DCS και τα OXCs αντιμετωπίζονται ως ένα ενιαίο δίκτυο IP από την άποψη του ελέγχου. Εκεί δεν είναι UNIs και NNIs, δεδομένου ότι το GMPLS είναι ένα πρωτόκολλο peer-to-peer. Το GMPLS είναι μια αρχιτεκτονική και η εφαρμογή του απαιτεί ένα πρωτόκολλο σηματοδότησης. Το RSVP-TE και το CR-LDP έχουν επεκταθεί για να υποστηρίξουν το GMPLS.

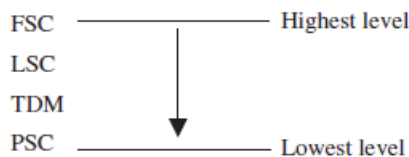
#### 4.12 Βασικά χαρακτηριστικά του GMPLS

Ένα LSR με δυνατότητα GMPLS μπορεί να υποστηρίξει μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες διεπαφές:

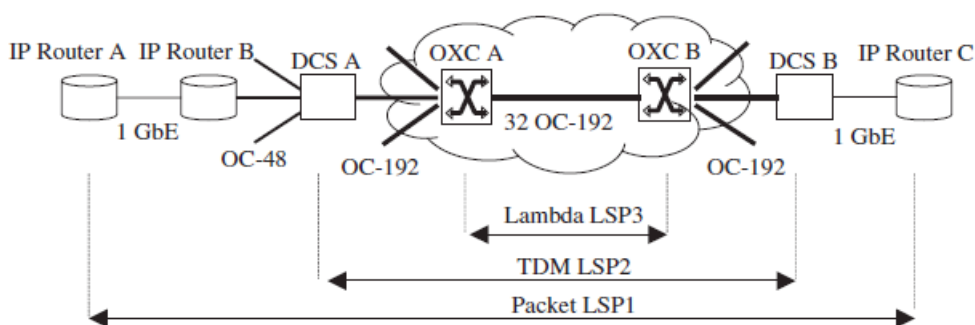
1. Διεπαφές με Δυνατότητα Μεταγωγής Πακέτων (Packet Switching Capability)(PSC): Αυτές είναι οι διαφορετικές διεπαφές που χρησιμοποιούνται για λήψη και μετάδοση πακέτων, όπως πακέτα IP, κελιά ATM, πλαίσια αναμετάδοσης πλαισίων, και πλαίσια Ethernet. Η προώθηση αυτών των πακέτων βασίζεται σε: μια ενθυλακωμένη ετικέτα (Encapsulated label), το πεδίο VPI/VCI της κεφαλίδας κελιού ATM ή το πεδίο DLCI του πλαισίου ρελέ πλαισίου.
2. Time-Division Multiplex (TDM) capable interfaces: Προωθούν δεδομένα με βάση τις υποδοχές δεδομένων εντός ενός πλαισίου. Αυτή η διεπαφή χρησιμοποιείται σε ένα SONET/SDH DCS.
3. Lambda Switch Capable (LSC) interfaces: Προωθούν δεδομένα από ένα εισερχόμενο μήκος κύματος σε εξερχόμενο μήκος κύματος. Αυτή η διεπαφή χρησιμοποιείται σε OXCs.
4. Fiber Switch Capable (FSC) interfaces: Προωθούν δεδομένα από μία (ή περισσότερες) εισερχόμενες ίνες σε μία (ή περισσότερες) εξερχόμενες ίνες. Χρησιμοποιούνται σε ένα OXC που μπορεί να λειτουργήσει σε το επίπεδο μιας (ή περισσότερων) ινών.

Αυτές οι τέσσερις διεπαφές (interfaces) είναι ιεραρχικά διατεταγμένες (Εικόνα 73). Στην κορυφή του ιεραρχία είναι η FSC, ακολουθούμενη από την LSC, στη συνέχεια την TDM και τέλος την PSC, το MPLS υποστηρίζει επίσης ιεραρχικά LSP. Εξετάστε ένα LSP που ξεκινά και τελειώνει σε ένα Διεπαφή (Interface) Μεταγωγής Πακέτων (Packet-Switching). Αυτό το LSP μπορεί να περάσει από διάφορους τύπους δικτύων, όπου μπορεί να ενσωματωθεί μαζί με άλλα LSPs σε LSP υψηλότερης τάξης.

Το LSP υψηλής τάξης μπορεί να ξεκινά και να τελειώνει σε μια διεπαφή μεταγωγής πακέτων (packet-switching interface), μια Διεπαφή Διαίρεσης Χρόνου (Time-Division Interface), μια Lambda switch interface μια Διεπαφή Μεταγωγής Ινών (Fiber-Switch Interface). Γενικά, η ένθεση των LSPs σε ένα LSP υψηλής τάξης γίνεται ακολουθώντας την ιεραρχία των παραπάνω τεσσάρων Διεπαφών (Interfaces) (Εικόνα 73). Ένα παράδειγμα ιεραρχικού LSP φαίνεται στο Εικόνα 74. Ας υποθέσουμε ότι ένας αριθμός δρομολογητών IP είναι συνδεδεμένος σε ένα δίκτυο SONET/SDH, το οποίο με τη σειρά του είναι συνδεδεμένο σε ένα δίκτυο δρομολόγησης μήκους κύματος κορμού. Το LSP ξεκινά από τον δρομολογητή IP A και τελειώνει στον δρομολογητή IP C. Όπως φαίνεται, ο δρομολογητής IP A συνδέεται στον δρομολογητή IP B μέσω μιας σύνδεσης 1-GbE και ο δρομολογητής IP B συνδέεται στο DCS A μέσω ενός OC-48/ Σύνδεσμος STM-16 SONET/SDH. Το DCS A συνδέεται στο OXC A μέσω μιας σύνδεσης OC-192/STM-64 SONET/SDH. Τα OXC A και B αποτελούν μέρος ενός δικτύου δρομολόγησης μήκους κύματος και συνδέονται με μία μόνο ίνα που έχει 32 μήκη κύματος – με κάθε μήκος κύματος να φέρει μια ροή OC-192/STM 64 SONET/SDH. Στην άλλη πλευρά του οπτικού δικτύου δρομολόγησης μήκους κύματος, το OXC B συνδέεται στο DCS B μέσω μιας σύνδεσης OC-192/STM-64 SONET/SDH και το DCS B συνδέεται στον δρομολογητή IP C μέσω μιας σύνδεσης 1-GbE.



Εικόνα 67: The hierarchy of the four types of interfaces.



Εικόνα 68: An example of hierarchical LSPs.

Οι Διεπαφών (Interfaces) κατά μήκος της διαδρομής του LSP από τον δρομολογητή IP A στον δρομολογητή IP C μπορούν εύκολα να συναντηθούν. Οι συνδέσεις 1-GbE μεταξύ των δρομολογητών IP A και B, και του DCS B και του δρομολογητή IP C έχουν διασυνδέσεις PSC. Οι συνδέσεις SONET/SDH μεταξύ του δρομολογητή IP B και του DCS A, DCS A και OXC A και OXC B και DCS B διαθέτουν διασυνδέσεις TDM. Τέλος, η σύνδεση μεταξύ των OXC A και B έχει μια Διεπαφή (Interface) LSC. Καθώς προχωράμε προς το οπτικό δίκτυο δρομολόγησης

μήκους κύματος, η χωρητικότητα των ζεύξεων αυξάνεται. (Αυτό υποδεικνύεται στην Εικόνα 74 χρησιμοποιώντας παχύτερες γραμμές). Στην άλλη πλευρά του οπτικού δικτύου δρομολόγησης μήκους κύματος, οι χωρητικότητες ζεύξης μειώνονται καθώς κινούμαστε προς την άκρη, και αυτό υποδεικνύεται με τη μείωση του πάχους των γραμμών. Η αύξηση της χωρητικότητας της ζεύξης καθώς πλησιάζουμε στο βασικό δίκτυο είναι φυσιολογική, καθώς οι σύνδεσμοι μεταφέρουν περισσότερη κίνηση από αυτές που βρίσκονται στην άκρη του δικτύου.

Στην Εικόνα 74, το LSP μεταξύ των δρομολογητών IP A και C επισημαίνεται ως πακέτο LSP1. Όπως φαίνεται το LSP είναι σε σειρά μαζί με άλλα LSP στο TDM LSP2 και Lambda LSP3. Όταν δημιουργηθεί το LSP1, το DCS A θα προσπαθήσει να εκχωρήσει εύρος ζώνης εντός του TDM LSP2 του. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό, το DCS A θα δημιουργήσει ένα νέο TDM LSP2 στο DCS B. Το νέο TDM LSP2 θα είναι σειρά εντός της φωτεινής διαδρομής Lambda LSP3, εάν το εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο. Διαφορετικά, το OXC A θα δημιουργήσει μια νέα φωτεινή διαδρομή προς το OXC B. Εάν τα LSP 2 και 3 δεν υπάρχουν τη στιγμή που ο δρομολογητής IP A επιχειρεί να δημιουργήσει LSP1, τότε η εγκατάσταση του LSP1 θα ενεργοποιήσει το DCS A για να δημιουργήσει το TDM LSP2 και το OXC A για τη δημιουργία λάμδα LSP3.

#### 4.12.1 The Generalized Label Request

Το αίτημα Γενικευμένης Ετικέτας (Generalized Label) χρησιμοποιείται για την επικοινωνία των χαρακτηριστικών που απαιτούνται για την υποστήριξη της δημιουργίας ενός LSP. Οι πληροφορίες που απαιτούνται σε μια γενικευμένη αίτηση ετικέτας φαίνονται στην Εικόνα 75. Έχουν οριστεί τα ακόλουθα πεδία:

0	1	2	3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	0 1
LSP enc. type	Switching type	G-PID	

Εικόνα 69: The information carried in a generalized label request.

- Τύπος κωδικοποίησης LSP: Αυτό το πεδίο 8-bit υποδεικνύει τον τρόπο μετάδοσης των δεδομένων μέσω του LSP θα κωδικοποιηθεί. Έχουν οριστεί οι ακόλουθες τιμές:

**Πίνακας 4.4** Τύπος κωδικοποίησης LSP

Value	Type
1	Packet
2	Ethernet V2/DIX
3	ANSI PDH
4	ETSI PDH
5	SDH ITU-T G.707
6	SONET ANSI T1.105
7	Digital wrapper
8	Lambda (photonic)
9	Fiber
10	Ethernet 802.3
11	Fiber Channel

- Τύπος Μεταγωγής (Switching Type): Ένα πεδίο 8 bit χρησιμοποιείται για να υποδείξει τον τύπο μεταγωγής που πρέπει να εκτελεστεί σε μια συγκεκριμένη σύνδεση. Αυτό το πεδίο χρησιμοποιείται σε συνδέσμους που διαφημίζουν περισσότερους από έναν τύπους δυνατοτήτων μεταγωγής.
- Generalized Payload Identifier (G-PID): Ένα αρχείο 16-bit χρησιμοποιείται για την αναγνώριση του ωφέλιμου φορτίου που μεταφέρεται από ένα LSP. Χρησιμοποιείται από τα τελικά σημεία του LSP. Οι ακόλουθες είναι μερικές από τις τιμές που καθορίζονται:

**Πίνακας 4.5** Η γενικευμένη ετικέτα

Value	Type	Technology
0	Unknown	All
14	Byte synchronous mapping of E1	SONET/SDH
17	Bit synchronous mapping of DS1/T1	SONET/SDH
28	PoS- No scrambling, 16 bit CRC	SONET/SDH
32	ATM mapping	SONET, SDH
33	Ethernet	Lambda, Fiber
34	SDH	Lambda, Fiber
35	SONET	Lambda, Fiber
36	Digital wrapper	Lambda, Fiber
37	Lambda	Fiber

#### 4.12.2 The Generalized Label

Δεδομένου ότι το πεδίο εφαρμογής του MPLS διευρύνθηκε στους οπτικούς τομείς και τους τομείς TDM, αρκετές νέες απαιτούνται μορφές ετικετών. Η γενικευμένη ετικέτα δεν επιτρέπει μόνο την ετικέτα τύπου MPLS που ταξιδεύει εντός ζώνης με το συσχετισμένο πακέτο, αλλά επιτρέπει επίσης ετικέτες που προσδιορίζουν το χρόνο σχισμές, μήκη κύματος ή μια ίνα. Αυτές οι νέες μορφές ετικετών, οι οποίες αναφέρονται συλλογικά ως γενικευμένη ετικέτα, μπορεί να φέρει μια ετικέτα που αντιπροσωπεύει:

- Γενική ετικέτα MPLS, ετικέτα ρελέ πλαισίου, ετικέτα ATM
- Ένα σύνολο time slots εντός ενός πλαισίου SONET / SDH
- Ένα μόνο μήκος κύματος μέσα σε μια ζώνη κύματος ή ίνα
- Μία μόνο ζώνη κύματος μέσα σε μια ίνα
- Μία μόνο ίνα σε μια δέσμη

Δεδομένου ότι ο κόμβος που χρησιμοποιεί GMPLS γνωρίζει τον τύπο του συνδέσμου που χρησιμοποιείται, η γενικευμένη ετικέτα δεν περιέχουν πεδίο τύπου. Η γενικευμένη ετικέτα δεν είναι ιεραρχική. Όταν πολλαπλά επίπεδα απαιτούνται ετικέτες, κάθε LSP πρέπει να καθορίζεται ξεχωριστά. Οι πληροφορίες που μεταφέρονται η γενικευμένη ετικέτα παρουσιάζεται στην Εικόνα 76. Εξαρτάται η ερμηνεία του πεδίου ετικέτας σχετικά με τον τύπο του συνδέσμου πάνω στον οποίο χρησιμοποιείται η ετικέτα.

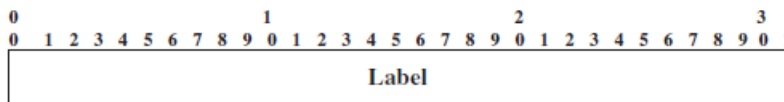
#### 4.12.3 The Label Set

Το σύνολο ετικετών χρησιμοποιείται για τον περιορισμό της επιλογής ετικετών ενός Downstream κόμβου σε ένα σύνολο αποδεκτών ετικετών. Αυτός ο περιορισμός ισχύει σε βάση ανά άλμα. Ο δέκτης του συνόλου ετικετών πρέπει να περιορίσει την επιλογή ετικετών

σύμφωνα με το σετ ετικετών. Ένα σύνολο ετικετών μπορεί να υπάρχει σε πολλά άλματα, οπότε κάθε κόμβος δημιουργεί το δικό του σύνολο ετικετών, πιθανώς με βάση το εισερχόμενο σύνολο ετικετών και τις δυνατότητες υλικού του κόμβου. Ένα σύνολο ετικετών είναι χρήσιμο στον οπτικό τομέα στις ακόλουθες τέσσερις περιπτώσεις:

- Περίπτωση 1: Ο τελικός εξοπλισμός είναι ικανός να μεταδίδει ή να λαμβάνει μόνο σε ένα μικρό συγκεκριμένο σύνολο μηκών κύματος.
- Περίπτωση 2: Υπάρχει μια ακολουθία Διεπαφών (Interfaces) που δεν μπορούν να υποστηρίξουν τη μετατροπή μήκους κύματος και απαιτούν τη χρήση του ίδιου μήκους κύματος σε μια ακολουθία άλματος ή ακόμη και σε ολόκληρη τη διαδρομή
- Περίπτωση 3: Περιορίστε τον αριθμό των μετατροπών μήκους κύματος κατά μήκος της διαδρομής.
- Περίπτωση 4: Τα δύο άκρα ενός συνδέσμου υποστηρίζουν διαφορετικά σύνολα μηκών κύματος.

Οι πληροφορίες που μεταφέρονται σε ένα σετ ετικετών παρουσιάζονται στην Εικόνα 77. Αποτελείται ένα σύνολο ετικετών ενός ή περισσότερων στοιχείων του συνόλου ετικετών. Κάθε στοιχείο αναφέρεται ως subchannel, και έχει την ίδια μορφή με τη γενικευμένη ετικέτα.



Εικόνα 70: Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται στη γενικευμένη ετικέτα.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
<b>Action</b>																															
<b>Reserved</b>																<b>Label type</b>															
<b>Sub-channel 1</b>																															
⋮																															
<b>Sub-channel N</b>																															

Εικόνα 71: Οι πληροφορίες που μεταφέρονται στο σετ ετικετών.

Τα ακόλουθα πεδία έχουν οριστεί στο προσθήκη στο subchannel:

- Ενέργεια (Action): Αυτό το πεδίο 8 bit υποδεικνύει τον τρόπο ερμηνείας του συνόλου ετικετών. Τα ακόλουθα έχουν οριστεί τιμές:
  - Inclusive list (value set to 0): Υποδεικνύει ότι το σύνολο ετικετών περιέχει ένα ή περισσότερα subchannel στοιχεία που πρέπει να περιλαμβάνονται στο σύνολο ετικετών.
  - Exclusive list (value set to 1): Υποδεικνύει ότι το σύνολο ετικετών περιέχει ένα ή περισσότερα subchannel στοιχεία που θα πρέπει να εξαιρεθούν από το σύνολο ετικετών.
  - Inclusive range (value set to 2): Υποδεικνύει ότι το σύνολο ετικετών περιέχει μια περιοχή ετικετών.

The object/TLV contains two subchannel elements: το πρώτο δείχνει την αρχή του το εύρος και το δεύτερο δείχνει το τέλος του εύρους. Η τιμή 0 υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει δέσμευση στο αντίστοιχο τμήμα του εύρους.

- Exclusive range (value set to 3): Υποδεικνύει ότι το σύνολο ετικετών περιέχει μια σειρά ετικετών που θα πρέπει να εξαιρεθούν από το σύνολο ετικετών. Όπως παραπάνω, το αντικείμενο/TLV περιέχει δύο subchannel στοιχεία: το πρώτο δείχνει την αρχή του εύρους

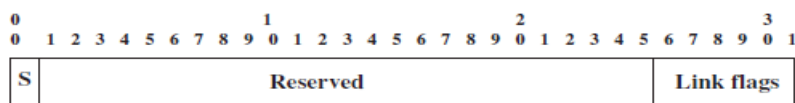


και το δεύτερο υποδεικνύει το τέλος του εύρους. Η τιμή 0 υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει δέσμευση στο αντίστοιχο τμήμα της περιοχής.

- Τύπος ετικέτας (Label type): Ένα πεδίο 14 bit που χρησιμοποιείται για να υποδείξει τον τύπο και τη μορφή των ετικετών που μεταφέρονται στο αντικείμενο/TLV.

#### 4.12.5 Πληροφορίες προστασίας

Οι πληροφορίες προστασίας χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν τον τύπο προστασίας - αφιερωμένο 1 + 1, αφιερωμένο 1: 1, κοινόχρηστο 1: N ή απροστάτευτο - επιθυμητό από το ζητούμενο LSP σε έναν σύνδεσμο. Προστασία πληροφορίες υποδεικνύουν επίσης εάν το LSP είναι πρωτεύον ή δευτερεύον LSP. Υποτίθεται ότι οι δυνατότητες προστασίας κάθε συνδέσμου είναι γνωστές μέσω των διαφημίσεων δρομολόγησης. Οι απαιτούμενες πληροφορίες στις πληροφορίες προστασίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 78. έχουν οριστεί τα ακόλουθα πεδία:



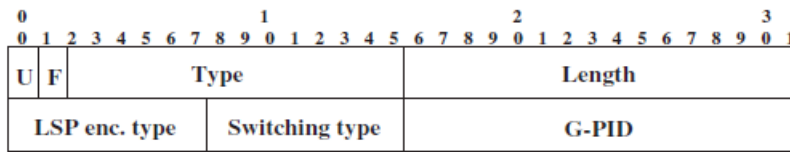
Εικόνα 72: Απαιτούμενες πληροφορίες στις πληροφορίες προστασίας.

- Secondary (S): Ένα πεδίο 1 bit που χρησιμοποιείται για να υποδείξει ότι το ζητούμενο LSP είναι δευτερεύον LSP.
- Δεσμευμένο (Reserved): Ένα δεσμευμένο πεδίο 25 bit, ρυθμισμένο σε 0.
- Σημαίες σύνδεσης (Link flags): Αυτό το πεδίο υποδεικνύει τον επιθυμητό τύπο προστασίας σε έναν σύνδεσμο. Έχουν οριστεί οι ακόλουθες σημαίες:
  - Ενισχυμένο (Enhanced): Υποδεικνύει ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πιο αξιόπιστο σύστημα προστασίας από το αποκλειστικό 1 + 1 (δηλαδή, BLSR 4 ινών).
  - Dedicated 1 + 1 : Υποδεικνύει ότι πρέπει να χρησιμοποιείται σύστημα προστασίας 1 + 1.
  - Dedicated 1:1: Υποδεικνύει ότι πρέπει να χρησιμοποιείται σύστημα προστασίας 1:1.
  - Κοινόχρηστο (Shared): Υποδεικνύει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα κοινό σύστημα προστασίας 1:N.
  - Χωρίς προστασία (Unprotected): Δεν απαιτείται προστασία.
  - Extra traffic: Υποδεικνύει ότι το ζητούμενο LSP θα πρέπει να χρησιμοποιεί συνδέσμους που προστατεύουν άλλα κύρια LSP. Το ζητούμενο LSP μπορεί να προεπιλεγεί εάν αποτύχουν οι σύνδεσμοι που φέρουν τα κύρια LSPs.

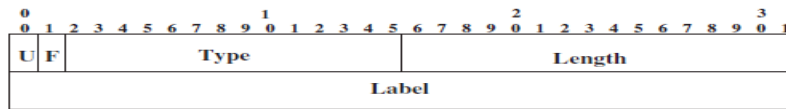
#### 4.13 CR-LDP Extensions for GMPLS

Νέα TTV έχουν εισαχθεί στο CR-LDP για να υποστηρίξουν τη λειτουργία γενικευμένης ετικέτας. Συγκεκριμένα, το αίτημα γενικευμένης ετικέτας TLV φαίνεται στην (Εικόνα 79), Η ετικέτα TLV φαίνεται στην (Εικόνα 80), η προτεινόμενη ετικέτα TLV είναι η ίδια με τη γενικευμένη ετικέτα TLV και το σύνολο ετικετών TLV φαίνεται στην Εικόνα 81. Η διαδικασία δημιουργίας ενός LSP αμφίδρομης κατεύθυνσης είναι η ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός μονοκατευθυντικού (unidirectional) LSP με ορισμένες προσθήκες. Δημιουργείται ένα μονοκατευθυντικό (unidirectional) LSP, από το LSR A έως το LSR E. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας ένα μήνυμα αίτησης ετικέτας στην downstream κατεύθυνση από το LSR A στο LSR E και ένα μήνυμα αντιστοίχισης ετικέτας στην upstream κατεύθυνση (από το LSR E στο LSR A). ( Εικόνα 82) Οι ετικέτες για το LSP μονής κατεύθυνσης από το LSR A έως το LSR E ρυθμίζονται καθώς το μήνυμα αντιστοίχισης ετικετών ταξιδεύει upstream. Αυτό συμβαίνει επειδή ένα CR-LSP έχει ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας downstream κατ' απαίτηση με

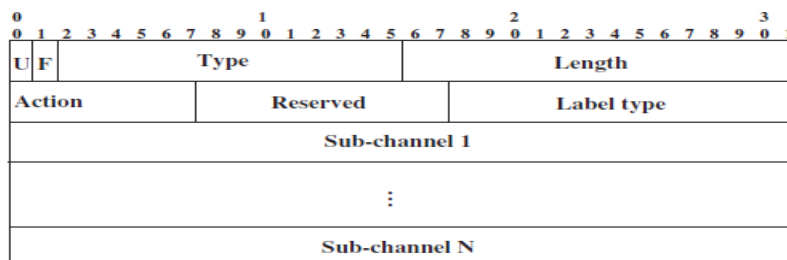
διατεταγμένο έλεγχο. Για να υποστηρίξει ένα αμφίδρομο LSP, προστίθεται μια ανοδική ετικέτα στο μήνυμα αιτήματος ετικέτας.



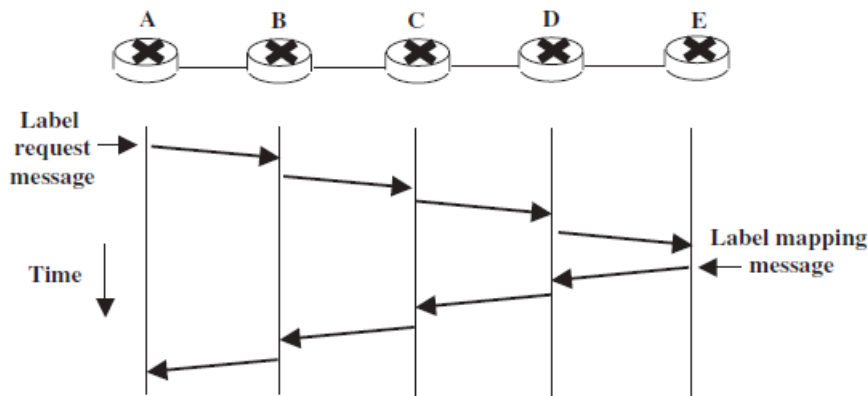
Εικόνα 73: The CR-LDP generalized label request TLV.



Εικόνα 74: The CR-LDP generalized label TLV.



Εικόνα 75: The CR-LDP label set TLV.

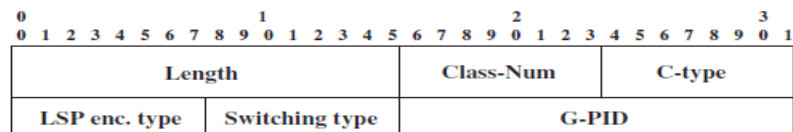


Εικόνα 76: The establishment of a CR-LDP.

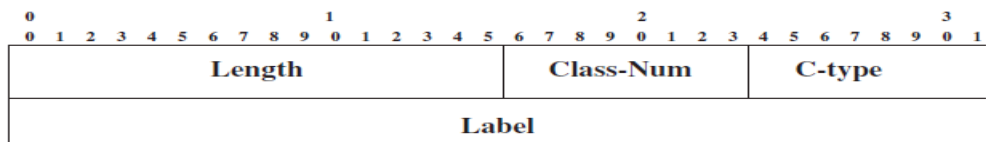
#### 4.14 RSVP-TE Extensions For GMPLS

Όπως και στην περίπτωση του CR-LDP, νέα αντικείμενα έχουν εισαχθεί στο RSVP-TE για την υποστήριξη της γενικευμένης λειτουργίας ετικέτας. Το γενικευμένο αντικείμενο αιτήματος ετικέτας και το προτεινόμενο αντικείμενο ετικέτας (που είναι το ίδιο) φαίνονται στην (Εικόνα 83). το αντικείμενο γενικευμένης ετικέτας φαίνεται στην (Εικόνα 84), και το αντικείμενο συνόλου ετικετών φαίνεται στην (Εικόνα 85). Τα αμφίδρομα LSP δημιουργούνται χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία δημιουργίας ενός μονοκατευθυντικού (unidirectional) LSP με ορισμένες προσθήκες. Μια ανοδική ετικέτα προστίθεται στο μήνυμα διαδρομής, η οποία επιτρέπει την κατανομή ετικετών κατά μήκος της διαδρομής από το LSR προορισμού στο LSR προέλευσης. Οι ετικέτες κατά μήκος της διαδρομής από το LSR προορισμού προς το

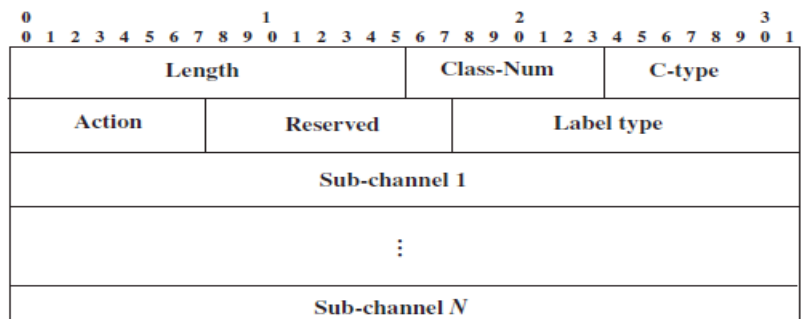
LSR προέλευσης κατανέμονται όπως στο μονής κατεύθυνσης LSP χρησιμοποιώντας το μήνυμα Resv.



Εικόνα 77: The RSVP-TE generalized label request object.



Εικόνα 78: The RSVP-TE generalized label object.



Εικόνα 79: The RSVP-TE label set object.

## Πέμπτο κεφάλαιο: 800 G και 1.6 Tb/s τεχνολογίες

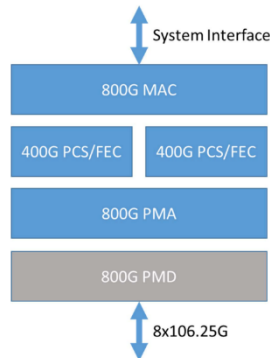
### 5.1 New Standards for 800G Ethernet

Το πρότυπο 25G & 50G Ethernet Consortium παρέχει προδιαγραφές για μια υλοποίηση 800G που βασίζεται στην τεχνολογία 8 lane 100 Gb/s, επιτρέποντας στους χρήστες να αναπτύξουν προηγμένες διαλειτουργικές τεχνολογίες Ethernet υψηλού εύρους ζώνης. Καθώς τα κέντρα δεδομένων hyper-scale αναζητούν περισσότερο εύρος ζώνης και αρχίζουν να αναπτύσσουν συνδέσεις 400 Gigabit Ethernet (GbE) στα δίκτυα υπάρχουν ήδη κινήσεις προς ένα νέο πρότυπο 800 GbE. Η βιομηχανία αναπτύσσει ήδη 2x400 GbE (σύνολο 800 G) σε συντελεστές μορφής QSFP-DD800 και OSFP για την υποστήριξη διακοπών 25,6 Tb και καρτών γραμμής. Η Ethernet Technology Consortium (ETC) έχει ορίσει ένα πρότυπο 800 GbE που βασίζεται σε μια διπλή παρουσία 400 GbE PCS/FEC. Επιπλέον, οι συνδεόμενες μονάδες πομποδέκτη 800G έχουν καθοριστεί από το 800G Pluggable MSA, το QSFP-DD MSA και το OSFP MSA.

Το Coherent 400ZR Optics 400 GbE στα κέντρα δεδομένων είναι βασικός μοχλός χρησιμοποιώντας Data Center Interconnect (DCI) μεταφέροντας το Ethernet απευθείας σε συνεκτικές ζεύξεις. Επί του παρόντος, υπάρχουν ήδη διαθέσιμοι ιδιόκτητοι συνεκτικοί οπτικοί πομποδέκτες 800G ανά μήκος κύματος. Ωστόσο, για τη διαλειτουργικότητα, το Optical Networking Forum (OIF) εργάζεται τώρα για να ορίσει το 800ZR για την αντιμετώπιση εφαρμογών DCI και το 800G-LR για την αντιμετώπιση ενός μήκους κύματος συνεκτικού έως 10 km για εφαρμογές πανεπιστημίουπολης

## 5.2 Architectural Overview

Η τεχνολογία Ethernet 800Gb/s έχει σχεδιαστεί ως μια διεπαφή (interface) που χρησιμοποιεί οκτώ λωρίδες 106 Gb/s χρησιμοποιώντας ένα 2xClause 119 PCS (400G) για τη σύνδεση ενός μόνο MAC που λειτουργεί στα 800 Gb/s (αν και τα PCS 400G έχουν τροποποιηθεί, αυτό είναι πολύ εννοιολογική άποψη υψηλού επιπέδου). Το παρακάτω σχήμα δείχνει την αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου. Τα PMD 2x400G θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν μια διεπαφή 800G, για παράδειγμα, μονάδες 2x400GBASE-DR4, αν και το λογό πρέπει να διαχειρίζεται ώστε να είναι εντός των προδιαγραφών. Αυτή η αρχιτεκτονική θα μπορούσε να υποστηρίξει 8x106.25G, 16x53.125G ή ακόμα πιο αργές διεπαφές, αλλά το 8x106.25G είναι η κύρια εστίαση.



Εικόνα 80: 800G MAC High-Level Block Diagram

## 5.3 Τα πρότυπα ETC 800 GbE και τα νέα πρότυπα IEEE 802.3 800/1600 GbE

Λοιπόν, ποια είναι η κατάσταση της ανάπτυξης προτύπων 800G; Επί του παρόντος, το IEEE 802.3 έχει σχηματίσει την ομάδα εργασίας 802.3df για να καθορίσει 800 GbE και 1600 GbE. Η ανάπτυξη της ομάδας εργασίας IEEE 802.3df μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρία κύρια έργα:

Ορίστε 800/1600 GbE MAC, PCS και FEC. Ορίστε PMD που υποστηρίζουν 800 GbE, όπως 800-KR/CR, 800G-SR8 (100 m), 800G-DR8 (500 m), 800G-FR8 (2 km), 800G-LR/LR8 (10 km), και 800G-ER/ER8 (40 χλμ.).

Μια σημαντική προσπάθεια θα είναι ο καθορισμός νέων οπτικών PMD 200G ανά λωρίδα. Ορίστε τα PMD όπως 800G-DR4 (500 m), 800G-FR4 (2 km) και 800G-LR4 (10 km).

Μια σημαντική προσπάθεια θα είναι ο καθορισμός ηλεκτρικών IO 200 G ανά λωρίδα. Ορίστε τα PMD όπως 200G-KR/CR, 1600G-DR8 (500 m), 1600G-FR8 (2 km), 800G-LR (10 km) και 800G-ZR (80 km).

Τα πρότυπα IEEE 800G καλύπτουν 8x100G χρησιμοποιώντας ένα πολλαπλών λειτουργιών για έως και 100 m, 8x100G παράλληλες ίνες μονής λειτουργίας έως και 500 μέτρα και πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος 8x100G (WDM) σε ένα μονής λειτουργίας για έως 2 km και 10 km. Ακολουθούν πιο αποτελεσματικά PMD με βάση τα 200G ανά λωρίδα.

Το IEEE 802.3df χρειάζεται αρκετά χρόνια για να αναπτύξει νέα πρότυπα Ethernet πέραν των 400G, επομένως η κοινοπραξία τεχνολογίας Ethernet μεσολαβή για να καθορίσει ένα πρότυπο 800 GbE MAC/PCS βασισμένο στενά στο υπάρχον 400G Ethernet. Διπλασιάζοντας απλώς τον αριθμό των FEC/PCS VL (virtual) λωρίδων (από 16 σε 32), έχει καθοριστεί ένας νέος έλεγχος πρόσβασης μέσω (MAC) που είναι οκτώ επί 106,25 Gbps και λειτουργεί στα

800 GbE. Αξιοποιώντας κυρίως το πρότυπο 400G IEEE 802.3bs, Στην Εικόνα 90 δείχνει την υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική μιας Ethernet Technology Consortium 800G διεπαφής (interface). Το MAC έχει κλιμακωθεί στα 800 G, αλλά υπάρχουν δύο υποστρώματα (sublayers) φυσικής κωδικοποίησης με forward error correction (FEC) από το πρότυπο Ethernet 400G που έχουν τροποποιηθεί ελαφρώς. Το MAC διανέμει δεδομένα σε 32 λωρίδες στα δύο PCS, 16 λωρίδες δεδομένων 25 Gbps σε κάθε PCS.

Τροποποιημένοι δείκτες ευθυγράμμισης εισάγονται σε κάθε λωρίδα δεδομένων PCS για να διασφαλιστεί ότι μια ροή δεδομένων 800G μπορεί να ληφθεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία. Στη συνέχεια, οι λωρίδες 32 PCS πολυπλέκονται (multiplexed) στο επίπεδο Physical Medium Attachment (PMA) για να τροφοδοτήσουν οκτώ λωρίδες 106,25 Gbps στο επίπεδο Physical Medium Dependent (PMD).

Η πρόκληση που αντιμετωπίζει τώρα η βιομηχανία είναι να υιοθετήσει το ETC 800 GbE PCS/FEC, το οποίο έχει 32 VL, ή να ορίσει ένα πιο αποτελεσματικό PCS/FEC στο IEEE 802.3df με βάση 8 VL για 800 GbE και 16 VL για 1,6 TbE.

Η εργασία IEEE 802.3df είναι ένα σημαντικό εγχείρημα με τον καθορισμό τόσο των 800 GbE όσο και των 1,6 TbE, που περιλαμβάνει τον καθορισμό 13 οπτικών PMD, 6 χάλκινων (Cu) PMD και 6 AUIs. Όλα τα PMD που βασίζονται σε 100G ανά λωρίδα θα είναι στο έργο fast Trace (~2023), τα 200G ανά λωρίδα οπτικών στο επόμενο έργο (~2024) και τα 200G ανά λωρίδα Cu/CR θα είναι σε μεταγενέστερο έργο (~2026)

#### 5.4 Επιλογές για 800G Pluggable Modules

Ένα βασικό μέρος της υιοθέτησης 800G στα κέντρα δεδομένων εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα συνδεδεμένων μονάδων οπτικού πομποδέκτη 800G. Η ομάδα 800G Pluggable MSA έχει καθορίσει μια μονάδα χαμηλού κόστους 8x100G και μια μονάδα 4x200G. Η μονάδα χαμηλού κόστους 8x100G καθορίζει μια οπτική διεπαφή που αποτελείται από οκτώ παράλληλες ίνες απλής λειτουργίας (PSM) για μήκη από 2 μέτρα έως 100 μέτρα, αλλά το IEEE 802.3df αναμένει να ορίσει ένα παρόμοιο PMD με εμβέλεια 500 μέτρων.

Η μονάδα 4x200G καθορίζει μια οπτική διεπαφή (interface) που χρησιμοποιεί wavelength division multiplexing (WDM) για τη μετάδοση σημάτων 200 Gbps σε τέσσερα διαφορετικά μήκη κύματος σε μία ίνα μονής λειτουργίας μήκους 2 μέτρων έως 2 km. Οι παράγοντες μορφής πομποδέκτη και οι ηλεκτρικές διεπαφές (interface) δεν καθορίζονται από το 800G Pluggable MSA, αν και τόσο το QSFP-DD800 όσο και το OSFP έχουν ορίσει διεπαφές (interface) 800G.

Επιπλέον, το QSFP-DD MSA έχει ορίσει ένα πρότυπο μονάδας 800G που ονομάζεται QSFP-DD800 που υποστηρίζει μια Διεπαφή (Interface) 8x100G. Αυτή η προδιαγραφή μονάδας περιλαμβάνει οκτώ ηλεκτρικές λωρίδες καθώς και το connector system και cage. Οι μονάδες QSFP-DD800 είναι επίσης συμβατές προς τα πίσω με QSFP-DD 8 λωρίδων και QSFP28 4 λωρίδων.

Η προδιαγραφή 800G Pluggable MSA για τη μονάδα 4x200G WDM προσδοκά τα 200G ανά λωρίδα να γίνει η μελλοντική προτιμώμενη επιλογή για ταχύτητες Ethernet 800G και άνω. Αυτό το πρότυπο προτείνει επίσης τη συμπερίληψη ενός πρόσθετου FEC που εφαρμόζεται στη μονάδα για να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία. Ως εκ τούτου, η

τρέχουσα εστίαση για το 800G είναι μια λύση 8x100G με τη λύση 4 λωρίδων να είναι κάτι που θα είναι πιο οικονομικό στο μέλλον.

Οπτικά Πρότυπα	Εκτέλεση	Ίνες Tx/Rx	Φθάνω	Παράγοντες Μορφής
800G Pluggable MSA	8x100G PSM	8	100 μ	QSFP-DD800, OSFP, άλλα
	4x200G WDM	1	2 χλμ	QSFP-DD800, OSFP, άλλα
IEEE 802.3df	8x100G PMM	8	100 μ	QSFP-DD800, OSFP, άλλα
IEEE 802.3df	8x100G PSM	8	500 μ	QSFP-DD800, OSFP, άλλα
IEEE 802.3df	8x100G WDM	1	2 km/10 km	QSFP-DD800, OSFP, άλλα
IEEE 802.3df	4x200G PSM	4	500 μ	QSFP-DD800, OSFP, άλλα
IEEE 802.3df	4x200G WDM	1	2 km/10 km	QSFP-DD800, OSFP, άλλα
IEEE 802.3df	1x800G Συνεκτική	1	10 χλμ	QSFP-DD800, OSFP, άλλα

Εικόνα 81:Οκτώ παράλληλες ίνες απλής λειτουργίας (PSM)

Με το πρότυπο 800G-ETC-R και τις λύσεις μονάδας με δυνατότητα σύνδεσης 8x100G να είναι το επίκεντρο για το 800G Ethernet, παραμένει το ζήτημα της καλωδίωσης και των υποδοχών στο κέντρο δεδομένων. Η λύση 8x100G απαιτεί 16 ίνες για κάθε σύνδεσμο. Οι υποδοχές και τα καλώδια Multi-fiber Push On (MPO) πολλαπλών ινών περιλαμβάνουν έναν αριθμό επιλογών που χωρούν 16 ίνες. Το MPO-16 και το MPO-12 Two Row (ονομάζεται επίσης MPO-24) είναι προφανείς επιλογές. Μια διπλή υποδοχή MPO-12 είναι μια νέα προσθήκη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για 800G.

Εκτός από αυτές τις υποδοχές MPO, υπάρχουν νέοι σύνδεσμοι πολύ μικρού μεγέθους, όπως SN και MDC που υποστηρίζουν flexible port breakout options. Καθώς οι διακόπτες των 25,6 Tbps αρχίζουν να αναπτύσσονται σε κέντρα δεδομένων, η θύρα 800G επιτρέπει έως και 256 θύρες συνδέσεων 100G από έναν διακόπτη. Αυτοί οι διακόπτες υψηλής ακτίνας προσφέρουν μεγαλύτερη πυκνότητα και καλύτερη απόδοση στα κέντρα δεδομένων. Αυτή η τάση θα συνεχιστεί μόνο όταν γίνει διαθέσιμο πυρίτιο μεταγωγής 51,2 Tbps και αρχίσουν να εμφανίζονται θύρες που υποστηρίζουν 800G και πιθανώς 1,6T

## 5.5 Coherent Optics at 800G

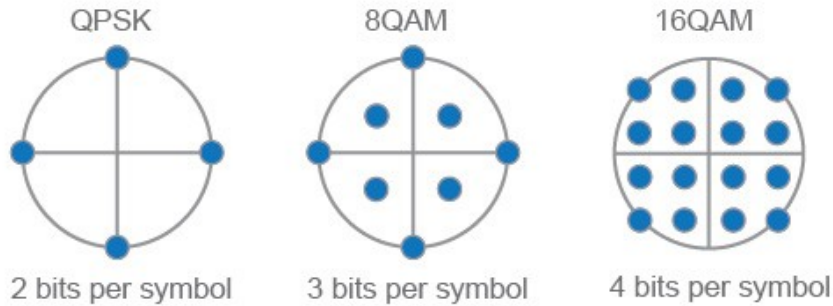
Ένα άλλο βήμα προς το 800G Ethernet γίνεται με τη χρήση coherent optics. Τα coherent optics χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές διασύνδεσης κέντρων δεδομένων όπου μπορούν να μεταφέρουν περισσότερα δεδομένα σε μία μόνο ίνα για μεγαλύτερες αποστάσεις χρησιμοποιώντας τεχνικές διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης, με αποτέλεσμα καλύτερη φασματική απόδοση με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Το Optical Networking Forum (ONF) ανέπτυξε με επιτυχία το 400ZR, 400G coherent optics μια συμφωνία υλοποίησης που υποστηρίζει συνδέσεις από 80 km έως 120 km. Το πρότυπο χρησιμοποιεί διαμόρφωση DP-16QAM διπλής πόλωσης με ρυθμό συμβόλων 59,84 Gbaud με ρυθμιζόμενο λέιζερ για dense wavelength division multiplexing (DWDM). Τα interoperable συνδεδεμένα οπτικά 400ZR χρησιμοποιούν Domain-Specific Part (DSP) χαμηλής κατανάλωσης που είναι ενσωματωμένοι στη μονάδα και αντισταθμίζουν τη διασπορά του σήματος στην ίνα.

Τώρα ο ONF βρίσκεται στη διαδικασία αξιοποίησης του προτύπου 400ZR για τον καθορισμό συνεκτικών οπτικών προτύπων 800G για 2-10 km (800LR) και 80-120 km (800ZR). Το πρότυπο

800ZR στοχεύει σε εφαρμογές διασύνδεσης κέντρων δεδομένων και περιλαμβάνει ένα ρυθμιζόμενο λέιζερ για ενισχυμένες συνδέσεις DWDM, ενώ το χαμηλότερο κόστος 800LR είναι ένα πρότυπο σταθερού μήκους κύματος πιο κατάλληλο για περιπτώσεις χρήσης πανεπιστημιούπολης. Η ανάπτυξη αυτών των προτύπων θα συνεπάγεται σημαντικές τεχνικές προκλήσεις. Για να επιτευχθεί μετάδοση 800G σε ένα μόνο μήκος κύματος, πρέπει να ληφθούν υπόψη διαμορφώσεις υψηλότερης τάξης (32QAM και 64QAM) και υψηλότεροι ρυθμοί συμβόλων 90 Gbaud ή περισσότερο.

### High-Order Modulation - Constellation Diagrams



$$\text{Transmit bit rate} = [\text{symbol rate}] \times [\text{bits per symbol}] \times [\text{polarization} (x2)]$$

Εικόνα 82: High-order Modulation-Constellation Diagrams.

#### 5.6 Σχεδιασμός 800G DSP ASIC με χρήση πιθανοτήτων Shaping και Digital Sub-Carrier Multiplexing

Περίληψη—Ο σχεδιασμός των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για συγκεκριμένες εφαρμογές (ASIC) βρίσκεται στον πυρήνα των σύγχρονων αναμεταδοτών εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιούν προηγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (DSP). Αυτό το χειρόγραφο συζητά τα κίνητρα για την από κοινού χρήση τεχνικών μετάδοσης όπως η πιθανολογική διαμόρφωση και η ψηφιακή πολυπλεξία υποφερόντων σε ψηφιακά συνεκτικά συστήματα οπτικής μετάδοσης.

Αρχικά αναφέρουμε τα βασικά δομικά στοιχεία των σύγχρονων αναμεταδοτών υψηλής ταχύτητας που βασίζονται σε DSP που λειτουργούν έως και 800 G ανά κύμα. Δεύτερον, δείχνουμε τα οφέλη αυτών των μεθόδων μετάδοσης όσον αφορά την απόδοση σε επίπεδο συστήματος. Τέλος, αναφέρουμε, εξ όσων γνωρίζουμε, την πρώτη πειραματική μετάδοση μεγάλων αποστάσεων – π.χ. πάνω από 1000 km – με DSP ASIC 7 nm σε πραγματικό χρόνο και Ψηφιακή Συνεκτική Οπτική (Digital Coherent Optics) (DCO) ικανή για ταχύτητες δεδομένων έως και 1,6 Tb /s χρησιμοποιώντας δύο κύματα (2×800G).

Όροι ευρητηρίου—Σχεδίαση ASIC, DSP, μορφές διαμόρφωσης υψηλής τάξης, πολυπλεξία ψηφιακών υποφερόντων, πιθανολογική διαμόρφωση, συστήματα υψηλής χωρητικότητας

##### 5.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η οπτικές επικοινωνίες έχουν σημειώσει τεράστια πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες. Μόλις πριν από μια δεκαετία, το 10G ήταν η κορυφαία κάρτα αναμεταδότη με συστήματα άμεσης ανίχνευσης ικανά να μεταδίδουν έως και ~ 1Tb / s. Η έκρηξη του Διαδικτύου ώθησε για ταχεία ανάπτυξη του 100G. Αυτό κατέστη δυνατό χρησιμοποιώντας από κοινού τεχνολογία

συνεκτικής ανίχνευσης (coherent detection technology), αλγόριθμους επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (DSP) και μετατροπείς υψηλής ταχύτητας ψηφιακού σε αναλογικό και αναλογικό σε ψηφιακό (DAC / ADC) [1]–[4]. Χάρη στη συνεκτική ανίχνευση, οι πληροφορίες φάσης και πλάτους διατηρούνται. Αυτό επιτρέπει στους αλγόριθμους DSP να αντισταθμίζουν τους περιορισμούς των εξαρτημάτων και τις βλάβες γραμμικής διάδοσης ινών, π.χ. συσσωρευμένη διασπορά ( $D_{acc}$ ) και διασπορά λειτουργίας πόλωσης (polarization mode dispersion)(PMD). Η χωρητικότητα τελικά διπλασιάστηκε με την εισαγωγή της πόλωσης-πολυπλεξίας .

Η χωρητικότητα τελικά διπλασιάστηκε με την εισαγωγή πόλωσης-πολυπλεξίας (polarization-multiplexing) [3], [5]. Η επερχόμενη καινοτομία (π.χ. 5G, δίκτυα οπτικής πρόσβασης υψηλής ταχύτητας, κ.λπ.) θα αυξήσει περαιτέρω τον σύνθετο ετήσιο ρυθμό αύξησης (compound annual growth rate)(CAGR) της κίνησης στο Διαδίκτυο, ο οποίος είναι τώρα ~26%, με κορυφές ~46% στο μετρό [6]. Για να αντιμετωπίσετε την τρέχουσα ταχεία εξέλιξη της κυκλοφορίας, είναι διαθέσιμες διάφορες επιλογές, μεταξύ των οποίων:

(I) αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων που βασίζεται σε ελαστικά και γνωστικά οπτικά δίκτυα [7].

(II) χρήση μορφών διαμόρφωσης υψηλής τάξης και υψηλό ποσοστό συμβόλων [8], [9].

(III) εφαρμογή προηγμένων αλγορίθμων DSP και διόρθωσης σφαλμάτων προώθησης forward error correction)(FEC) [10].

(IV) μετάδοση με προηγμένες τεχνικές ψηφιακής επικοινωνίας όπως η πιθανολογική διαμόρφωση (probabilistic shaping)(PS) και η ψηφιακή πολυπλεξία υποφερόντων (digital sub-carrier multiplexing)(DSCM) [11], [12].

(V) δυνατότητα μετάδοσης πέραν της ζώνης C [13]. και τέλος

(VI) ανάπτυξη νέων τύπων ινών όπως multi-mode και core [14], [15].

Οι επιλογές (I) – (V) αξιοποιούνται επί του παρόντος και τα κριτήρια επιλογής εξαρτώνται κυρίως από τις απαιτήσεις του συστήματος όπως η εμβέλεια, το κόστος, το αποτύπωμα, η απόδοση και η κατανάλωση ενέργειας. Η αποτελεσματική διαχείριση των πόρων είναι θεμελιώδης (I), επειδή μπορεί να αναβάλει την δαπανηρή ανάπτυξη νέων ινών αξιοποιώντας αποτελεσματικά τις υπάρχουσες υποδομές οπτικών ινών [7], [16]. Με το (II), η αρχιτεκτονική του δικτύου μπορεί να απλοποιηθεί με τη χρήση μορφών διαμόρφωσης υψηλής τάξης - πέρα από τη διαμόρφωση πλάτους τετραγώνου τετραγώνου (quadrature amplitude modulation)(QAM) - με ρυθμό συμβόλων  $\geq 90$  GBaud, επιτρέποντας έτσι τη μετάδοση ενός μήκους κύματος έως 800G. Κατά συνέπεια, πιο περίπλοκοι αλγόριθμοι DSP, για να αντισταθμίσουν τις πολυάριθμες βλάβες που επηρεάζουν το σήμα εντός του πομποδέκτη και του καναλιού – όπως η αντιστάθμιση του στενού εύρους ζώνης [17], [18], οι μη γραμμικότητες της συσκευής [19], [20] και τα εφέ όπως το IQ skew [21], [22] – θα απαιτηθεί με την κοινή χρήση προηγμένων κωδικών/σημάτων FEC (III). Προς το παρόν, είναι διαθέσιμοι οι πρώτοι εμπορικοί αναμεταδότες μονού μήκους κύματος 600 G [23], οι οποίοι παρέχουν συνολική χωρητικότητα – σε ζώνη C – έως 38,4 Tb/s/fiber σε παλιές μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις όταν χρησιμοποιείται 400G 64QAM σε πλέγμα 50 GHz [23]. Επιπλέον, η εισαγωγή προηγμένων τεχνικών ψηφιακής επικοινωνίας όπως το PS και το DSCM θα επέτρεπε την προσαρμοστικότητα του ρυθμού λεπτών δεδομένων και θα παρείχε ανθεκτικότητα έναντι των επιδράσεων διασποράς των ινών, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, η απλοποίηση και η ευελιξία του επιπέδου διαχείρισης δικτύου επιτυγχάνονται επίσης χάρη στις τεχνικές water-filling (δηλαδή, διαθεσιμότητα πολλών τρόπων λειτουργίας), που επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου με βάση την στιγμιαία κατάστασή τους. Στους σύγχρονους αναμεταδότες [9], [23], ο αριθμός των λειτουργικών τρόπων αυξάνεται πάρα πολύ, και στις κάρτες γραμμής 800G που ανακοινώθηκαν πρόσφατα [8], [9] – με χρήση PS και DSCM [8] – ο αριθμός των τρόπων λειτουργίας γίνεται ακόμη



μεγαλύτερος. Αυτό ανοίγει το δρόμο για την υλοποίηση αληθινών ελαστικών οπτικών δικτύων, έτσι ώστε η δυναμική κίνηση και τα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά χρόνου-συχνότητας του καναλιού να μπορούν να αντιμετωπιστούν στιγμιαία [7]. Τέλος, μπορούμε να ενισχύσουμε περαιτέρω τη χωρητικότητα των ινών, (V), μεταδίδοντας πέρα από τη ζώνη C με τη ζώνη C+L.

Σε αυτή την ενότητα εστιάζουμε στον σχεδιασμό ολοκληρωμένου κυκλώματος (ASIC) για συγκεκριμένη εφαρμογή για DSP για αναμεταδότες υψηλής τεχνολογίας που χρησιμοποιούν DSCM και PS. Sec.

Το II παρέχει τα κίνητρα για την υλοποίησή τους, ενώ το Sec.

Το III παρουσιάζει το θεωρητικό τους υπόβαθρο. Sec.

Το IV περιγράφει βασικές ενότητες εντός του ASIC συζητώντας την πολυπλοκότητα της υλοποίησής τους, και για το FEC, το όφελος από την κατανομή κερδών. Sec.

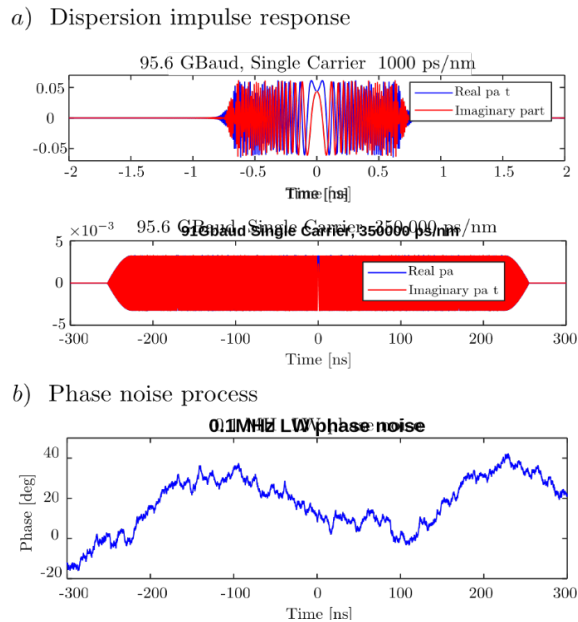
Το V δείχνει τις δυνατότητες της κοινής χρήσης PS και DSCM για τη βελτίωση της απόδοσης μετάδοσης και της ευελιξίας του συστήματος μέσω πλήρωσης νερού. Sec. Το

Το VI αναφέρει, εξ όσων γνωρίζουμε, την πρώτη μετάδοση σε πραγματικό χρόνο πάνω από 1000 km οπτικών ινών με τον αναμεταδότη 2×800G DSP ASIC που λειτουργεί σε ένα κύμα 95,6 GBaud 800 Gb/s. Sec. VII συζητά τα συμπεράσματα.

### 5.6.2 ΟΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Για σχεδόν δέκα χρόνια, η αρχιτεκτονική για την εξίσωση των Dacc και PMD παρέμεινε σε μεγάλο βαθμό αμετάβλητη [1]–[4], [24], [25]. Η ηλεκτρονική αντιστάθμιση διασποράς 2 έχει πραγματοποιηθεί στον τομέα της συχνότητας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT), αντίστροφου FFT (I-FFT) και μεθόδου επικάλυψης και αποθήκευσης ως πρωτεύουσες μονάδες. ενώ η υπολειπόμενη αντιστάθμιση Dacc και PMD έχει πραγματοποιηθεί στον τομέα του χρόνου χρησιμοποιώντας ένα σετ φίλτρων γραμμής καθυστέρησης 2×2 tap οργανωμένα σε δομές Πολλαπλή Είσοδος και Πολλαπλή Έξοδος (multiple-input multiple-output)(MIMO). Αυτή η αρχιτεκτονική ήταν επιτυχημένη ως DSP πρώτης γενιάς, ωστόσο κάτω από την επιφάνεια κρύβεται το ζήτημα του βελτιωμένου θορύβου φάσης εξισορρόπησης (equalization enhanced phase noise)(EEPN) [26] που προέρχεται από το μη μηδενικό εύρος γραμμής λέιζερ (LW) και την ψηφιακή αντιστάθμιση διασποράς. Το EEPN επιδεινώνεται εάν ο ρυθμός συμβόλων του συστήματος αυξηθεί για παράδειγμα στον τρέχοντα αναμεταδότη [8], [9] και πέραν αυτού. Πρόσφατα πειράματα ηρώων πέτυχαν ρυθμούς συμβόλων έως και 190 GBaud [27] ως μια προσπάθεια περαιτέρω αύξησης της χωρητικότητας και μείωσης του κόστους μετάδοσης.

Οι δυνατότητες αντιστάθμισης του ψηφιακού Dacc έχουν επίσης αυξηθεί λόγω των αποστάσεων που προσφέρει η τελευταία, χαμηλής απώλειας, μεγάλης αποτελεσματικής επιφάνειας ίνα και η εισαγωγή συστημάτων L-band. Για τα σύγχρονα υποβρύχια οπτικά συστήματα, το εύρος αντιστάθμισης διασποράς πρέπει τώρα να είναι τόσο υψηλό όσο 350.000 ps/nm. Το εμπορικό λέιζερ εξωτερικής κοιλότητας LW, από την άλλη πλευρά, δεν μπόρεσε να μειώσει σημαντικά τα ~100 kHz. Τα λέιζερ εξαιρετικά χαμηλού LW είναι δυνατά, αλλά δεν είναι πρακτικά για εμπορική χρήση σε πολλές πτυχές, συμπεριλαμβανομένου του κόστους και της γεωμετρίας. Το EEPN αγνοήθηκε στην πρώιμη γενιά συνεκτικών συστημάτων και τώρα καθίσταται ένα από τα κυρίαρχα αποτελέσματα και, ως εκ τούτου, πρέπει να αντιμετωπιστεί κατάλληλα, είτε με τον μετριασμό του είτε με τον κατάλληλο σχεδιασμό του αναμεταδότη. στην Εικόνα 93: (a) Απόκριση παλμού διασποράς στα 1000 ps/nm και 350.000 ps/nm, μονού φορέα 95,6 GBaud και (b) Διεργασία θορύβου φάσης 0,1 MHz.

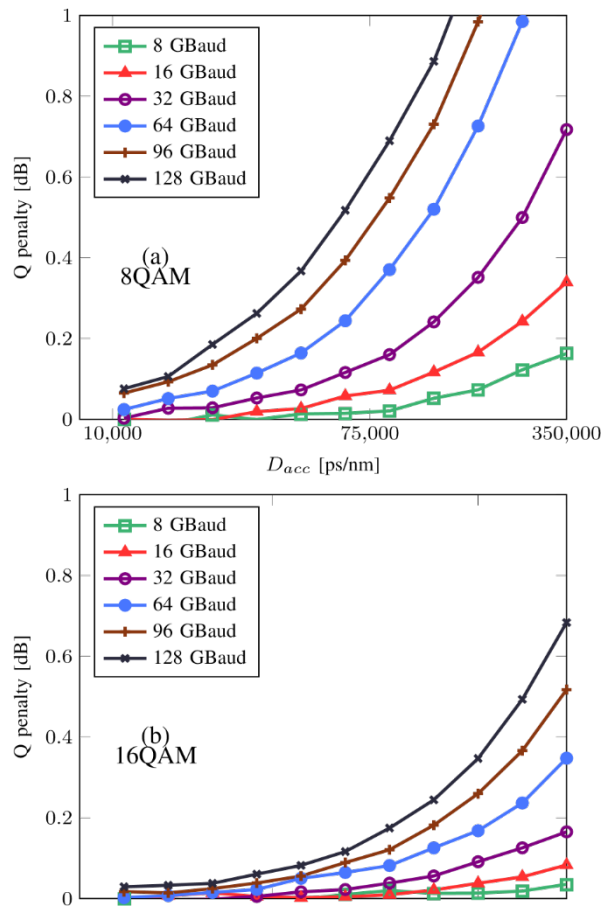


Εικόνα 83: a) Απόκριση παλμού διασποράς στα 1000 ps/nm και 350.000 ps/nm, μονού φορέα 95,6 Gbaud  
b) Διεργασία θορύβου φάσης 0,1 MHz.

απόκριση ενός ψηφιακού φίλτρου αντιστάθμισης διασποράς υποθέτοντας ένα σήμα μονού φορέα 95,6 GBaud με 1000 ps/nm και 350.000 ps/nm διασποράς. Το χρονικό διάστημα του φίλτρου αντιστάθμισης διασποράς καταλαμβάνει  $\pm 0,7$  ns στα 1000 ps/nm, αλλά εκτείνεται στα  $\pm 250$  ns στα 350.000 ps/nm. Το άνοιγμα του φίλτρου κλιμακώνεται γραμμικά με τη διασπορά. Η υπόθεση στην ψηφιακή αντιστάθμιση διασποράς είναι ότι η φάση λέιζερ (ιδίως το λέιζερ δέκτη) πρέπει να είναι στατική εντός του χρονικού διαστήματος του φίλτρου αντιστάθμισης διασποράς στον δέκτη. Ωστόσο, ο θόρυβος φάσης λέιζερ παραβιάζει αυτή την υπόθεση. Στην εικόνα 94(b) απεικονίζει μια χρονική σύλληψη ενός θορύβου φάσης λέιζερ, η οποία είναι μια διαδικασία τυχαίας βάρδισης που μπορεί να ποικίλλει σημαντικά μέσα στο χρονικό διάστημα του φίλτρου, ειδικά όταν η διασπορά είναι μεγάλη. Στην εικόνα, η φάση λέιζερ κινείται μεταξύ  $-20$  μοιρών έως  $+40$  μοιρών σε 200 ns, αρκετά εντός του χρονικού διαστήματος του φίλτρου αντιστάθμισης διασποράς στα 350.000 ps/nm.

Έτσι, όταν το διεσπαρμένο οπτικό σήμα εισόδου διαμορφώνεται από τον θόρυβο φάσης λέιζερ και στη συνέχεια περιελίσσεται μέσω του φίλτρου αντιστάθμισης διασποράς, μπορεί να δημιουργηθεί θόρυβος στη διαδικασία [28]. Ο θόρυβος φάσης λέιζερ Tx και Rx μπορεί να συμβάλει στη διαδικασία θορύβου EEPN με βάση την ποσότητα διασποράς που αντισταθμίζεται στις αντίστοιχες πλευρές τους. Η επίδραση του θορύβου EEPN αυξάνεται γραμμικά ως συνάρτηση του Dacc, του λέιζερ LW και του ρυθμού συμβόλων. Μια πιο λεπτομερής αναλυτική και πειραματική επαλήθευση της διαδικασίας EEPN μπορεί να βρεθεί στο [29].

Στην Εικόνα 94 (a) αναφέρουμε την ποιότητα Q του συστήματος σε [dB] normalized σε σχέση με 7 dB έναντι Dacc – σε λογαριθμική κλίμακα – σε διαφορετικούς ρυθμούς συμβόλων χρησιμοποιώντας λέιζερ με 100 kHz LW και αντιστάθμιση ψηφιακής διασποράς στην πλευρά του δέκτη. Αυτή η αριθμητική ανάλυση προϋποθέτει έναν κινητήρα DSP που μπορεί να αντισταθμίσει πολύ περισσότερο από 350.000 ps/nm συσσωρευμένης διασποράς. Η ποιότητα που εμφανίζεται προκαλείται εξ ολοκλήρου από την EEPN. Αναφέρουμε τα αποτελέσματα για δύο διαφορετικές μορφές διαμόρφωσης: 8QAM στην Εικόνα 94(a) και 16QAM στην Εικόνα 94(b). Σε σχέση με την Εικόνα 94(a), σε ποιότητα 0,2 dB, ένα σήμα 8 GBaud μπορεί να ανεχθεί  $16\times$  περισσότερο Dacc από ένα σήμα 128 GBaud, σύμφωνα με την αναλογία ρυθμού συμβόλων.



Εικόνα 84: Αριθμητικά αξιολογημένη ποινή συστήματος από την εξισορρόπηση ενισχυμένου θορύβου φάσης για (a) 8QAM (b) 16QAM με πλάτος γραμμής λέιζερ 100 KHz..

Στα 350.000 ps/nm, οι ρυθμοί συμβόλων 32 GBaud ή υψηλότεροι, θα υποστούν σημαντικά μεγάλες ποινές Q και δεν θα είναι κατάλληλοι για πρακτική χρήση. Για επίγεια μετάδοση μεγάλων αποστάσεων, η συσσωρευμένη διασπορά ινών είναι μικρότερη –σε σχέση με το προηγούμενο παράδειγμα– και μπορεί, για παράδειγμα, να φτάσει τα 50.000 ps/nm. Σε αυτό το σενάριο – αν και μπορεί να εξαρτάται από άλλους παράγοντες – η κυρίαρχη μορφή διαμόρφωσης θα μπορούσε να είναι 16QAM. Κάτω από αυτές τις συνθήκες μετάδοσης, στην Εικόνα 94(β) υπογραμμίζει ότι εξακολουθεί να υπάρχει σημαντικό όφελος όσον αφορά τη μειωμένη ποινή Q κατά τη μετάδοση με χαμηλότερο ρυθμό συμβόλων και το EEPN εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό πρόβλημα στα 64 GBaud και άνω. Υπάρχουν τεχνικές στη βιβλιογραφία που προσπαθούν να μετριάσουν το EEPN, μεταξύ των οποίων θα θέλαμε να αναφέρουμε τον πολύ γρήγορο equalizer [30], και μια προσέγγιση που περιλαμβάνει πρόσθετο φωτονικό κύκλωμα που ανιχνεύει τη συχνότητα λέιζερ χρησιμοποιώντας επιπλέον σετ μετατροπών A/D [31]. [32]. Και οι δύο προσεγγίσεις απαιτούν πρόσθετο κύκλωμα είτε σε ψηφιακό είτε/και αναλογικό τομέα. Αυτό αναπόφευκτα περιπλέκει τον συνολικό σχεδιασμό του συστήματος.

### 5.6.3 DIGITAL ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ

Οι βασικές πτυχές που σχετίζονται με το DSCM και το PS συζητούνται τώρα στις επόμενες ενότητες. Και τα δύο μέρη χρησιμεύουν ως κίνητρο για την ανάπτυξη των DSCM και PS.

#### A. Digital Sub-Carrier Multiplexing

Το κύριο συμπέρασμα από τον Εικόνα. Το 2 (a-b) είναι ότι όταν λειτουργούμε με χαμηλό ποσοστό συμβόλων, αυτό μειώνει σημαντικά τον αντίκτυπο του EEPN. Ωστόσο, εάν ο ρυθμός συμβόλων μειωθεί κατά έναν παράγοντα  $N$ , τότε ο αριθμός των λέιζερ και των παράλληλων διαμορφωτών θα αυξηθεί επίσης κατά  $N$  και αυτό είναι ανεπιθύμητο από την άποψη της πολυπλοκότητας της συσκευής. Αν και η πυκνή φωτονική (photonic) ολοκλήρωση έχει από καιρό εμπορική επιτυχία, η δυνατότητα πλήρους αξιοποίησης του εύρους ζώνης (BW) του ηλεκτρικού καναλιού είναι επίσης σημαντική για τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του συστήματος. Υπό το πρίσμα αυτών των εκτιμήσεων αξιολογούμε τις δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ψηφιακή πολυπλεξία sub-carriers χαμηλότερου ρυθμού συμβόλων για να σχηματίσουν ένα υψηλό σήμα BW. Για παράδειγμα, θεωρούμε την εφαρμογή ενός συστήματος ρυθμού συμβόλων 95.6 GBaud χρησιμοποιώντας απόσταση 8at κοντά στο Nyquist sub-carrier όπως απεικονίζεται στο Εικόνα. 3,×11.95 GBaud, πολυπλεξία που δείχνει το φάσμα ενός μόνο φορέα σήματος 95.6 GBaud (Εικόνα 95(a)) και 8 sub-carriers (Εικόνα 95(b)) – ο καθένας στα 11,95 GBaud. Και στις δύο περιπτώσεις, το φάσμα διαμορφώνεται κοντά στο Nyquist με συντελεστή κύλισης ίσο με 0,0625. Η απόσταση συχνοτήτων επιλέγεται για να συσκευάσει τους 8 sub-carriers μαζί χωρίς καμία επικάλυψη συχνοτήτων, καθιστώντας τους έτσι αμοιβαία ανεξάρτητους μέσω διαχωρισμού συχνοτήτων. Η συνολική φασματική πληρότητα είναι η ίδια με εκείνη ενός σήματος ενός φορέα με τον ίδιο συντελεστή κύλισης. Άλλες διαμορφώσεις είναι δυνατές, ωστόσο για ευκολία υλοποίησης, ο αριθμός των sub-carriers είναι ιδανικά δυνάμεις 2. Για παράδειγμα, 4 sub-carriers και 16 sub-carriers είναι όλοι πιθανοί συνδυασμοί που μπορούν να ληφθούν υπόψη. Ο πολύ μικρός ρυθμός συμβόλων sub-carriers θεωρείται δύσκολο να εφαρμοστεί από την άποψη της παρακολούθησης φάσης φορέα και ο πολύ μεγάλος ρυθμός συμβόλων sub-carriers ενδέχεται να μην επωφεληθεί πλήρως από τη μείωση θορύβου EEPN. Επιλέχθηκε η διαμόρφωση 8 sub-carriers για το σύστημα 800G.

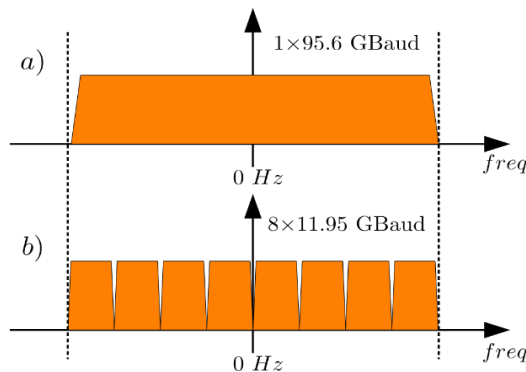
## B. Probabilistic Shaped Modulations for Maximizing Capacity

Η καθολική μέτρηση για τη μέτρηση της βέλτιστης τεχνικής διαμόρφωσης σε ένα κανάλι επικοινωνίας είναι η απόσταση σε dB από τη χωρητικότητα του καναλιού. Για τα additive white Gaussian noise (AWGN), είναι αποδεδειγμένο ότι η κατανομή επίτευξης χωρητικότητας των μεταδιδόμενων συμβόλων είναι, στην πραγματικότητα, μια κατανομή Gaussian. Η απόσταση από τη χωρητικότητα για αυτό το κανάλι υπολογίζεται με βάση τον τύπο χωρητικότητας Shannon για τα κανάλια Gauss [35].

Πρέπει να σημειωθεί ότι η οπτική ίνα το κανάλι δεν είναι εντελώς AWGN. Για τη μετάδοση ενισχυμένης ίνας πολλαπλών αποστάσεων, ο θόρυβος του ενισχυτή είναι κυρίαρχος παράγοντας, αλλά υπάρχει ένα μη αμελητέο τμήμα παραμόρφωσης σήματος που προκαλείται από τη μη γραμμικότητα της ίνας. Αυτή η πτυχή της μη γραμμικότητας των ινών αντιμετωπίζεται μόνο εν μέρει με το σχήμα διανομής Super Gaussian που θα περιγράφεται σε μεταγενέστερη ενότητα αυτού του κεφαλαίου. Αυτό αφήνει περιθώρια για βελτιώσεις στα μελλοντικά συστήματα. Οι πρόσφατες εξελίξεις στον σχεδιασμό DSP και FEC για συνεκτικά οπτικά μόντεμ έχουν δώσει τη δυνατότητα στη χρήση μορφών διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης για την αύξηση της φασματικής απόδοσης (SE) και, κατά συνέπεια, για τη μείωση της απόστασης από τη χωρητικότητα. Ωστόσο, υπάρχει ένα κενό στη χωρητικότητα για ένα ευρύ φάσμα SE. Ένα κλάσμα του κενού προκαλείται από τη συνολική επιβάρυνση που χρησιμοποιείται για διαφορετικούς σκοπούς, όπως πιλότους, ακολουθίες εκπαίδευσης και σήματα ελέγχου.

Ένα άλλο χάσμα (gap) του κενού οφείλεται στη χρήση πρακτικών σχημάτων FEC με codewords πεπερασμένου μήκους. Ωστόσο, ένα σημαντικό μέρος του κενού είναι ακόμα ανακτήσιμο με έναν πιο εξελιγμένο σχεδιασμό και βελτιστοποίηση των μορφών FEC και

διαμόρφωσης. Για παράδειγμα, οι παραδοσιακές μορφές διαμόρφωσης – όπως το ευρέως χρησιμοποιούμενο MQAM – υπόκεινται σε εγγενή απώλεια απόδοσης. Για αυτές τις μορφές, με ομοιόμορφη διακριτή κατανομή σήματος, η απαιτούμενη αναλογία ισχύος σήματος προς θόρυβο (SNR) για επικοινωνία χωρίς σφάλματα απέχει από το όριο Shannon, ανεξάρτητα από το πόσο ισχυρή είναι η τεχνική FEC εδώ. Αυτό το χάσμα απόδοσης (γνωστό και ως κέρδος διαμόρφωσης), αυξάνεται σε υψηλότερες τιμές SE και φτάνει έως και τα 1,53 dB για έναν αστερισμό hyper-cube με large square constellations και μεγάλους τετράγωνους αστερισμούς που εκτείνονται σε  $n$  complex dimensions [36]. Έτσι, ένα μεγάλο βήμα για τη μείωση της απόστασης από τη χωρητικότητα είναι η τροφοδοσία του καναλιού με μια κατανομή επίτευξης χωρητικότητας η οποία είναι Gaussian για τα κανάλια AWGN, υποθέτοντας ότι το κανάλι οπτικών ινών κυριαρχείται από τον θόρυβο του ενισχυτή. Η διαμόρφωση αστερισμού είναι μια τεχνική για την προσαρμογή της στατιστικής κατανομής των συμβόλων εισόδου σύμφωνα με την κατανομή επίτευξης χωρητικότητας του καναλιού.



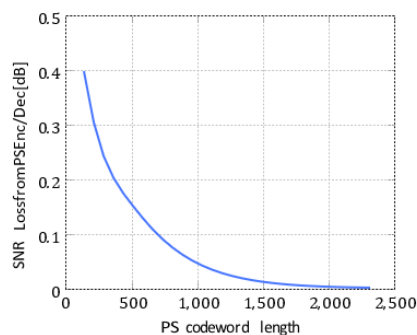
Εικόνα 85: Οπτικοποίηση ενός μόνο φορέα (α) και ενός ψηφιακού καναλιού υποδιαίρεσης που χρησιμοποιεί  $8 \times 11.95$  GBaud (b).

Probabilistic shaping (PS) [37] και η γεωμετρική διαμόρφωση (GS) [38] είναι πιθανές προσεγγίσεις για τη διαμόρφωση αστερισμών. Στο GS, η φυσική θέση των σημείων αστερισμού σε ένα μιγαδικό επίπεδο προσαρμόζεται για να προσεγγίσει την επιθυμητή κατανομή. Για έναν αστερισμό με σταθερό καρδινάλιο, περισσότερα σημεία βρίσκονται κοντά στην αρχή και λιγότερα σημεία εντοπίζονται καθώς αυξάνεται η απόσταση από την αρχή. Καθώς αυτό υλοποιεί μια quantized version της επιθυμητής κατανομής, είναι πιο αποτελεσματικό σε υψηλές τιμές SE όπου υπάρχουν επαρκή σημεία αστερισμού για να κβαντιστεί με ακρίβεια η επιθυμητή κατανομή. Η κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση του GS είναι σχετικά απλή καθώς δεν εμπλέκεται επέκταση διάστασης και αρκεί μια επεξεργασία σύμβολο προς σύμβολο για να επιτευχθεί το κέρδος διαμόρφωσης. Ωστόσο, άλλες πτυχές όπως η δυαδική επισήμανση, η ακριβής εφαρμογή bit και η αποτελεσματική εξίσωση είναι επίσης προκλητικές. Για παράδειγμα, μέρος του κέρδους διαμόρφωσης που επιτυγχάνεται από το GS συνήθως βελτιστοποιείται σχετικά με συστήματα κωδικοποιημένης διαμόρφωσης με παρεμβολή bit (bit-interleaving coded modulation)(BICM) λόγω έλλειψης ιδανικής binary gray επισήμανσης.

Στο PS, τα δυαδικά ψηφία δεδομένων κωδικοποιούνται έτσι ώστε όταν αντιστοιχίζονται σε έναν συγκεκριμένο αστερισμό 2-D όπως το 64QAM, η πιθανότητα εμφάνισης καθενός από τα σημεία αστερισμού ακολουθεί μια επιθυμητή διακριτή συνάρτηση μάζας πιθανότητας, η οποία είναι σχεδιασμένη να προσεγγίζει την Gaussian κατανομή. Καθώς ο στόχος είναι συνήθως να διαμορφωθεί η κατανομή του πλάτους του αστερισμού, τα σύμβολα με τα ίδια επίπεδα πλάτους είναι equiprobable. Αυτό απλοποιεί το πρόβλημα εφαρμόζοντας μόνο την κατανομή στα επίπεδα πλάτους του αστερισμού. Για αστερισμούς τετράγωνου σχήματος με σημεία που βρίσκονται σε ένα καρτεσιανό πλέγμα (Cartesian grid) όπως το 64QAM, αυτό γίνεται ακόμα πιο εύκολο με την εφαρμογή της

αντίστοιχης κατανομής 1-D στις διαστάσεις I και Q ξεχωριστά [37]. Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιώντας το σύνολο αστερισμών βάσης 64QAM, ένα σχήμα PS μπορεί να μεταφέρει όλες τις τιμές SE μεταξύ 2 και 6 bit ανά σύμβολο ανά πόλωση, έχοντας διαφορετικές κατανομές στα σημεία αστερισμού. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι του GS στον οποίο κάθε σχεδιασμένος αστερισμός αντιστοιχεί μόνο σε μία μόνο τιμή SE σε ένα σταθερό SNR. Η δυαδική γκρι σήμανση εξακολουθεί να ισχύει για τετράγωνους αστερισμούς QAM χωρίς να προκαλείται απώλεια. Η επιθυμητή κατανομή στο PS κατασκευάζεται με επέκταση διαστάσεων σε πολλαπλά σύμβολα του αστερισμού βάσης. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται μια συγκεκριμένη μονάδα κωδικοποιητή για τη δημιουργία της επιθυμητής κατανομής από ομοιόμορφα bits πληροφοριών εισόδου. Κατά συνέπεια, απαιτείται μια μονάδα αποκωδικοποιητή PS στην πλευρά του δέκτη για την ανάκτηση bits πληροφοριών από δεδομένα κωδικοποιημένα με PS. Η κύρια πολυπλοκότητα του PS είναι η υλοποίηση των μονάδων κωδικοποιητή και αποκωδικοποιητή. Εκτός από αυτό, η σημαντική ευελιξία που παρέχει για τον ακριβή συντονισμό του SE για κάθε συγκεκριμένο σύνδεσμο, συν το πλεονέκτημα SNR σε σύγκριση με τα σχήματα GS και ομοιόμορφης διαμόρφωσης, καθιστά το PS ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για συνεκτικά οπτικά μόντεμ.

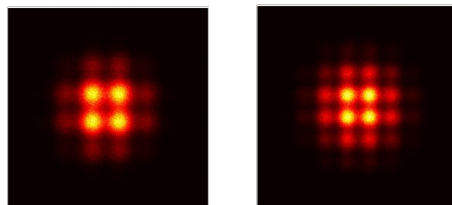
Στη συνέχεια παρουσιάζεται για ένα συγκεκριμένο σενάριο ότι ο κωδικοποιητής και οι μονάδες αποκωδικοποιητή μπορούν να κατασκευαστούν με λογική πολυπλοκότητα υλοποίησης και περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι για την υλοποίηση των μονάδων κωδικοποιητή και αποκωδικοποιητή PS [39]–[41]. Οι κύριες προσεγγίσεις ακολουθούν τις αρχές της κωδικοποίησης εντροπίας πηγής χωρίς απώλειες, όπως η αριθμητική κωδικοποίηση και η αριθμητική κωδικοποίηση [41]. Ενώ αυτές οι προσεγγίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για σκοπούς αντιστοίχισης διανομής, η κύρια πρόκληση είναι να διασφαλιστεί μια αντιστοίχιση σταθερού-προς-σταθερού στην οποία ένα διάνυσμα σταθερού μήκους bits μήκους k αντιστοιχίζεται πάντα σε ένα διάνυσμα σταθερού μήκους συμβόλων μήκους n. Ο Constant composition distribution matcher (CCDM) είναι μια παραλλαγή της προσέγγισης αριθμητικής κωδικοποίησης που έχει σχεδιαστεί ειδικά για σκοπούς διαμόρφωσης αστερισμών [39]. Αυτός ο αλγόριθμος εγγυάται μια σταθερή σε σταθερή αντιστοίχιση μεταξύ των ακολουθιών input bit και output codewords. Για ένα γενικός σχεδιασμός κωδικοποιητή/αποκωδικοποιητή PS, το μέγεθος του αστερισμού βάσης, π.χ. 16/32/64/128, και το μήκος codeword PS n πρέπει να επιλεγεί. Ο αστερισμός βάσης καθορίζει το εύρος των τιμών SE που μπορούν να καλυφθούν. Το μήκος codeword καθορίζει την ακρίβεια με την οποία μπορεί να υλοποιηθεί μια επιθυμητή κατανομή. Μια κβαντισμένη εκδοχή της επιθυμητής κατανομής πιθανοτήτων υλοποιείται εντός μήκους n συμβόλων από τον αστερισμό βάσης. Έτσι, μεγαλύτερο μήκος κωδικών λέξεων n έχει ως αποτέλεσμα μια πιο ακριβή υλοποίηση της επιθυμητής κατανομής. Ταυτόχρονα, η πολυπλοκότητα υλοποίησης αυξάνεται με την αύξηση του n.



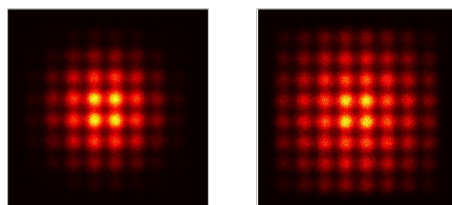
Εικόνα 86: Παράδειγμα απώλειας απόδοσης PS Enc/Dec SNR έναντι μήκους κωδικός λέξης

Για έναν συγκεκριμένο αστερισμό βάσης, μπορεί να αποδειχθεί ότι σχεδόν όλο το κέρδος διαμόρφωσης μπορεί να ληφθεί με codeword PS με μήκος  $\sim 1000$  συμβόλων. Για αυτό το εύρος  $n$ , η εφαρμογή ASIC των μονάδων κωδικοποιητή και αποκωδικοποιητή PS είναι αρκετά εφικτή με λογική πολυπλοκότητα υλοποίησης και κατανάλωση ενέργειας. Στην Εικόνα 96 δείχνει την απώλεια στην ανοχή θορύβου (απώλεια SNR) σε σχέση με το μήκος της codeword PS για την καθαρή φασματική απόδοση που αντιστοιχεί στη μορφή διαμόρφωσης 16QAM. Η απώλεια SNR είναι σχετική με την ιδανική υλοποίηση. Το μικρότερο μήκος κωδικών λέξεων έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη απώλεια ρυθμού μέσω της μηχανής κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης PS, η οποία στη συνέχεια μεταφράζεται σε μεγαλύτερη απώλεια στην ανοχή θορύβου του συστήματος. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται εδώ είναι συγκεκριμένα για τον συγκεκριμένο αλγόριθμο κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης που χρησιμοποιείται. στην Εικόνα 96 δείχνει μερικά παραδείγματα διαγραμμάτων αστερισμών για διαφορετικές φασματικές αποδόσεις.

Επειδή ο κινητήρας κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης PS έχει σχεδιαστεί σε ASIC με αρκετά μεγάλο μήκος codeword, είναι επίσης εύκολο να παρέχεται πολύ λεπτός συντονισμός του SE. Ο ίδιος ο εφαρμοσμένος κινητήρας PS μπορεί να επιτύχει ένα λεπτό μέγεθος βήματος SE της τάξης του ποσοστού ενός bit ανά σύμβολο ανά πόλωση. Αυτή η λεπτή κοκκοποίηση (fine granularity) μας επιτρέπει να μεγιστοποιήσουμε τη χωρητικότητα του καναλιού προσαρμόζοντας την κατανομή συμβόλων που διαμορφώνεται σε κάθε εγκατάσταση ιών και κάθε ζεύγος μόντεμ. Αυτή η σημαντική πτυχή είναι η πρωτογενής απόδοση του σχήματος PS, και αυτή υπολογίζεται θεωρητικά από την ανοχή SNR της διαμόρφωσης. Η επιτευχθείσα απαιτούμενη SNR (υπολογισμένη) έναντι της φασματικής απόδοσης για PS (μπλε) και υβριδικές (πράσινες) διαμορφώσεις φαίνονται στην Εικόνα 99. Η χωρητικότητα Shannon χωρίς περιορισμούς (μαύρη γραμμή) απεικονίζεται επίσης στην κορυφή για σύγκριση. Ο x-axis είναι κανονικοποιημένος (normalized) έτσι ώστε το QPSK να είναι στα 4 bit/(2Pol-Symbol) και το ομοιόμορφο 64QAM να είναι στα 12 bit/(2Pol-Symbol). Τα γενικά έξοδα FEC θεωρούνται ότι είναι 20%. Η καθαρή φασματική απόδοση ολόκληρου



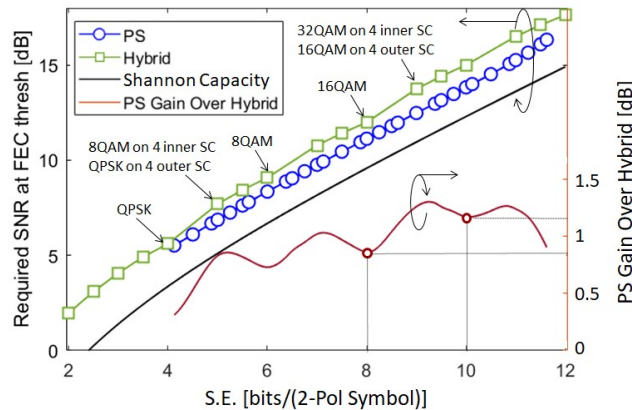
Εικόνα 87: 6 bit/(2 Πολ- Συμβίωση) 8bit/(2 Πολ-Συμβίωση)



Εικόνα 88: 10μπιτς / (2 Πολ- Συμβίωση) 11. 25μύτεις / (2 Πολ- Συμβίωση).

του συστήματος συμπεριλαμβανομένου του FEC και της διαμόρφωσης είναι η τιμή στον άξονα x διαιρούμενη με 1,2 για να ληφθεί υπόψη η γενική επιβάρυνση FEC. Για παράδειγμα, μια συμβατική μορφή QPSK έχει φασματική απόδοση 4 bit ανά σύμβολο για 2 πολώσεις, αλλά η καθαρή φασματική απόδοση συμπεριλαμβανομένου του FEC είναι  $4 \text{ bit}/(2\text{Pol-Symbol})/1,2 = 3,33 \text{ bits}/(2\text{Pol-Symbol})$ . Οι συμβατικές μορφές όπως οι QPSK, 8QAM και 16QAM επισημαίνονται με ένα βέλος στο σχήμα για την πράσινη καμπύλη. Ο αριστερός άξονας  $\gamma$  απεικονίζει το απαιτούμενο SNR για να φτάσει το όριο FEC. Η FEC είναι μια καμπύλη υψηλής απόδοσης LDPC 20% όπως μετριέται (measured) στην Εικόνα 99. Μια ανώτερη

διαμόρφωση θα δημιουργήσει χαμηλότερο απαιτούμενο SNR και ως εκ τούτου υψηλότερη ανοχή θορύβου και μεγαλύτερη εμβέλεια συστήματος.



Εικόνα 89: Κέρδος SNR της διαμόρφωσης PS έναντι υβριδικού QAM.

Οι διαμορφώσεις PS και οι υβριδικές διαμορφώσεις συγκρίνονται μεταξύ τους και οι διαφορές τους στην ανοχή SNR απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα με έναν δεύτερο άξονα γ στη δεξιά πλευρά. Οι υβριδικές διαμορφώσεις κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τυπικό ομοιόμορφο QAM όπως το QPSK και το 8/16/32/64QAM. Για παράδειγμα, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει διαφορετικές διαμορφώσεις σε κάθε sub-carrier και έτσι να επιτύχει SE στα μισά του δρόμου μεταξύ QPSK και 8QAM, ή στα μισά του δρόμου μεταξύ 16QAM και 32QAM, και ούτω καθεξής. Η σχετική ισχύς των συμβόλων QPSK και 8QAM είναι βελτιστοποιημένη για μεγιστοποίηση της απόδοσης των υβριδικών διαμορφώσεων. Όπως επισημαίνεται στην κόκκινη καμπύλη, ένα κέρδος SNR 1,17 dB και 0,87 dB – δεξιός άξονας γ στο κόκκινο – επιτυγχάνεται υπέρ της διαμόρφωσης PS σε σύγκριση με το τυπικό 32QAM και 16QAM αντίστοιχα. Όπως δείχνει η καμπύλη, το κέρδος διαμόρφωσης είναι μικρότερο σε φασματικές αποδόσεις 6bit/8bit/10bit και υψηλότερο μεταξύ τους. Αυτό δημιουργεί ένα κυματιστό χαρακτηριστικό για την κόκκινη καμπύλη. Αυτό συμβαίνει επειδή οι υβριδικές διαμορφώσεις που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας ένα μείγμα συμβόλων 8QAM και 16QAM δεν θα είναι τόσο βέλτιστες όσο η ίδια η τυπική διαμόρφωση και ως εκ τούτου το PS θα έχει ελαφρώς υψηλότερο κέρδος σε σχέση με τα υβριδικά σχήματα.

#### 5.6.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ALGORITHM

##### A.Μηχανή περιοχής συχνότητας για DSCM και οφέλη για την πολυπλοκότητα αντιστάθμισης διασποράς

Στην πλευρά του δέκτη ενός συνεκτικού αναμεταδότη, ένας frequency domain equalizer (FDE) αντισταθμίζει τη μαζική συσσωρευμένη διασπορά (ένας δεύτερος equalizer MIMO αντισταθμίζει την υπολειπόμενη διασπορά και άλλα γραμμικά φαινόμενα όπως το PMD). Η δομή FDE μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για sub-carrier demultiplexing όσο και για αντιστάθμιση διασποράς. Έτσι, εντός της πλευράς του δέκτη, η πολυπλοκότητα (complexity) δεν αυξάνεται, και στην πραγματικότητα, η πολυπλοκότητα της αντιστάθμισης διασποράς μειώνεται κάπως λόγω της χρήσης σημάτων υποφερόντων χαμηλότερου ρυθμού συμβόλων.

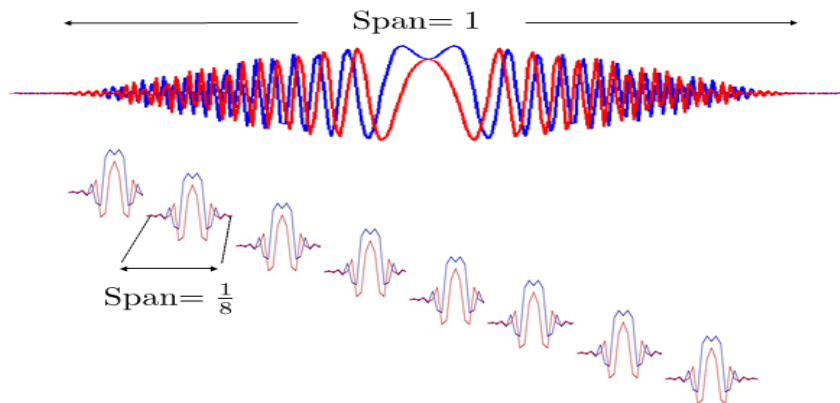
Η ακόλουθη ενότητα συγκρίνει την πολυπλοκότητα ενός FDE που έχει σχεδιαστεί για την αντιστάθμιση ενός σήματος 95,6 GBaud μεμονωμένου φορέα με εκείνο που χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της ίδιας ποσότητας διασποράς για έναν κινητήρα DSP 8 ψηφιακών sub-carrier. Είναι γνωστό ότι ο αριθμός των κρουστών του φίλτρου, που απαιτείται για την



αντιστάθμιση διασποράς, αυξάνεται (ή μειώνεται) αναλογικά με το τετράγωνο του ρυθμού συμβόλων [42]. Επομένως, εάν ο ρυθμός συμβόλων μειωθεί, για παράδειγμα, κατά  $\times 8$ , το μήκος της απόκρισης παλμού μειώνεται κατά  $\times 64$ . Αυτό μπορεί να μεταφραστεί σε κάποια άμεση εξοικονόμηση στην πολυπλοκότητα της αντιστάθμισης διασποράς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πολυπλοκότητα δεν έχει κλίμακα  $\times 64$ . Η αντιστάθμιση διασποράς ενός συστήματος DSCM απαιτεί την αντιστάθμιση της παραμόρφωσης καθυστέρησης ομάδας σε κάθε sub-carrier ξεχωριστά συν ένα στοιχείο καθυστέρησης σε κάθε sub-carrier. Η παρακάτω εξίσωση δείχνει ότι κατά την αντιστάθμιση της διασποράς ( $\beta_2$ ) σε ένα σήμα 11,95 GBaud σε μετατόπιση συχνότητας  $\omega_0$ , πρέπει επίσης να συμπεριληφθεί ένα στοιχείο καθυστέρησης (2ος όρος:  $2 \cdot \beta_2 \cdot \omega_0$ ). Η σταθερή φάση στον 3ο όρο θα αντισταθμιστεί με ανάκτηση φορέα, που τοποθετείται μετά το MIMO.

$$e^{j\beta_2 \cdot (\omega + \omega_0)^2} = e^{j\beta_2 \cdot \omega^2} \cdot e^{j2\beta_2 \cdot \omega \cdot \omega_0} \cdot e^{j\beta_2 \cdot \omega_0^2}$$

Στον τομέα του χρόνου, μπορεί κανείς να δείξει στην Εικόνα 99 ότι η πραγματική καμπύλη (μπλε) και η φανταστική (κόκκινη) της παλμικής απόκρισης για ένα μόνο σήμα φορέα 95.6 GBaud μπορούν να αναλυθούν σε 8 μικρότερες παλμικές αποκρίσεις (κάθε  $1/8$  του διαστήματος), αλλά με καθυστέρηση μεταξύ τους. Η μαζική καθυστέρηση μεταξύ των sub-carrier αντισταθμίζεται από έναν μόνο barrel shifter σε κάθε sub-carrier ανεξάρτητα, η οποία είναι μια πιο αποδοτική υπολογιστικά λύση σε σύγκριση με τη χρήση πολλαπλασιασμών για την εφαρμογή ενός μακρού φίλτρου. Το μπλοκ διάγραμμα υψηλού επιπέδου για την πλευρά του δέκτη DSP για σήματα μονής φέρουσας και 8 δευτερευουσών σημάτων απεικονίζεται στην Εικόνα 101. Τα σήματα δειγματοληψίας μετά τα ADC χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά για να αντισταθμίσουν τη μαζική συσσωρευμένη διασπορά.



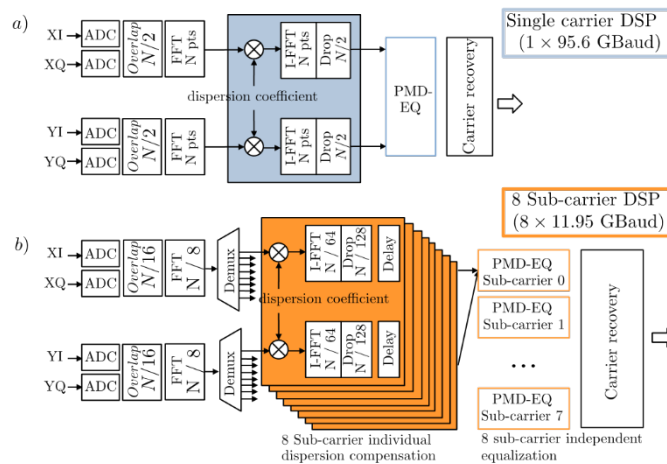
Εικόνα 90: Παλμική απόκριση διασποράς για έναν μόνο φορέα έναντι 8 sub-carrier.

Για το DSP sub-carrier, η αντιστάθμιση διασποράς και η πολυπλεξία δευτερεύοντος φορέα εκτελούνται όλα σε ένα βήμα στον τομέα συχνότητας, χρησιμοποιώντας διαφορετικού μεγέθους FFT και IFFT και τη μέθοδο επικάλυψης και αποθήκευσης. Εκτελείται μια συνάρτηση καθυστέρησης σε κάθε δευτερεύοντα φορέα για να αποκλίνει τα δεδομένα λόγω της διασποράς στην ίνα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένας συμβατικός προσαρμοστικός equalizer 2x2 MIMO για την εκτέλεση de-multiplexing πόλωσης και την αντιστάθμιση της υπολειπόμενης διασποράς και του PMD (εφαρμόζεται σε κάθε sub-carrier). Δεδομένου ότι οι sub-carrier διαχωρίζονται μεταξύ τους ως προς τη συχνότητα, δεν υπάρχει παρεμβολή μεταξύ τους και ως εκ τούτου δεν απαιτείται εξίσωση που εκτείνεται σε γειτονικούς sub-carrier. Τέλος, η ανάκτηση φορέα και η διόρθωση ολίσθησης κύκλου εκτελούνται στις εξόδους MIMO, δηλαδή στα ισοσταθμισμένα σύμβολα. Το υπόλοιπο DSP θα περιλαμβάνει στη συνέχεια πλαισίωση, de-mapper και αποκωδικοποίηση FEC, τα οποία μπλοκ δεν εμφανίζονται στο διάγραμμα. Παράδειγμα υλοποίησης: Υποθέτοντας ότι το μέγεθος FFT που

απαιτείται για την αντιστάθμιση της μεγάλης διασποράς για ένα DSP 95,6 GBaud είναι  $N$ . Στο ίδιο ποσό Dacc, ένα  $8 \times 11,95$  GBaud DSP χρησιμοποιεί μέγεθος FFT  $N/8$ , το οποίο είναι  $\times 8$  μικρότερο. Το μέγεθος IFFT για 95,6 GBaud DSP είναι επίσης  $N$ , αλλά για  $8 \times 11,95$  GBaud DSP, θα ήταν μόνο  $N/64$  ( $64 \times$  μικρότερο).

Η πολυπλοκότητα μιας κλίμακας FFT σύμφωνα με το  $\log_2(\cdot)$  (μέγεθος FFT) και επομένως ο συνδυασμός FFT και IFFT θα αποφέρει εξοικονόμηση πολυπλοκότητας  $0,68 \times$  για 8 sub-carrier έναντι ενός μόνο φορέα, γεγονός που οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας. Βρήκαμε ότι οι πολλαπλασιαστές συντελεστών διασποράς τομέα συχνότητας για τις δύο αρχιτεκτονικές DSP έχουν την ίδια πολυπλοκότητα. Ο equalizer PMD MIMO και οι λειτουργίες ανάκτησης φορέα θα είναι επίσης σχεδόν ίδιες και για τις δύο αρχιτεκτονικές DSP. Άλλες λειτουργίες DSP μετά την ανάκτηση φορέα, όπως το σύμβολο de-mapper και το FEC είναι επίσης πανομοιότυπες. Για την πλευρά του δέκτη, συνδυάζοντας την de-multiplexing sub-carrier μαζί με την αντιστάθμιση διασποράς, η πολυπλοκότητα DSP στην πραγματικότητα μειώνεται και δεν αυξάνεται.

Από την πλευρά του πομπού, η πολυπλεξία sub-carrier είναι μια απαραίτητη πρόσθετη λειτουργία. Όπως και στον δέκτη, μπορεί να συνδυαστεί με αντιστάθμιση διασποράς στον πομπό για πρόσθετο μη γραμμικό όφελος όταν διαδίδεται σε ίνα [12]. Τέλος, διαπιστώσαμε ότι δεν υπάρχει πρόβλημα πολυπλοκότητας κατά την πολυπλεξία ή την de-multiplexing sub-carrier.



Εικόνα 91: FDE block diagram: (a) for the single carrier; (b) for digital sub-carrier multiplexing

## B- SD-FEC Performance and FEC Gain Sharing

Η Soft decision FEC (SD-FEC) είναι αναπόσπαστο μέρος του συνολικού συστήματος DSP. Το SD-FEC που βασίζεται σε low density parity check code (LDPC) είναι γνωστό ότι είναι κωδικό προσέγγισης χωρητικότητας [43]. Επιτρέποντας στις εξισώσεις ελέγχου ισοτιμίας να εκτείνονται σε πολλαπλά πλαίσια μέσω της χωρικής σύζευξης πλαισίων [44] ή convolutional type [45], ο πίνακας ελέγχου ισοτιμίας μπορεί να γίνει sparse και ο αλγόριθμος διέλευσης μηνύματος μπορεί πραγματικά να προσεγγίσει την μέγιστη πιθανότητα αποκωδικοποίηση. Οι αλγόριθμοι μετάδοσης μηνυμάτων μπορούν να τροποποιηθούν και να απλοποιηθούν για να μειωθεί η πολυπλοκότητα, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο αποκωδικοποίησης σε επίπεδα [46] και έναν αλγόριθμο ελαχίστου αθροίσματος [47]. Οι κώδικες LDPC έχουν πίνακες ελέγχου ισοτιμίας που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τυχαίες επιλογές ακμών μεταξύ bit πληροφοριών και bit ελέγχου ισοτιμίας [48].

Αυτή η τυχαία συνδεσιμότητα ορίζει τις άκρες του υποκείμενου γραφήματος Tanner και πρέπει να ακολουθεί μια συγκεκριμένη προκαθορισμένη κατανομή βαθμών. Στη θεωρία LDPC, δεδομένης μιας κατάλληλα επιλεγμένης κατανομής βαθμών μεταβλητού κόμβου ή κόμβου ελέγχου, έχει αποδειχθεί ότι αυτό από μόνο του είναι αρκετό για να εγγυηθεί απόδοση κοντά στη χωρητικότητα Shannon. Ωστόσο, υπάρχει σχεδόν άπειρος αριθμός τρόπων για τη δημιουργία του πίνακα ελέγχου ισοτιμίας για την ίδια κατανομή βαθμών. Το σύνολο όλων αυτών των πιθανών πινάκων θα έχει μέση απόδοση κοντά στο Shannon. Ωστόσο, το κατώτατο όριο σφάλματος ενός γραφήματος που δημιουργείται τυχαία είναι δύσκολο να αναλυθεί και η απόδοση του τελικού κατώτατου σφάλματος πρέπει να επικυρωθεί μέσω μέτρησης σε πραγματικό χρόνο ή field programmable gate array (FPGA). Σημειώστε ότι το όριο εισαγωγής πριν από το FEC BER από μόνο του δεν είναι σωστός τρόπος αξιολόγησης Απόδοση FEC. Για παράδειγμα, εξετάστε ένα σχέδιο FEC που ανέχεται BER εισόδου  $2 \times 10^{-2}$ , αλλά χρησιμοποιεί 20% OH, έναντι ενός άλλου σχεδιασμού FEC που ανέχεται το ίδιο BER  $2 \times 10^{-2}$ , αλλά αντίθετα χρησιμοποιεί 30% OH. Σε αυτή την περίπτωση, το 20% OH FEC είναι πολύ καλύτερος σχεδιασμός γιατί θα απαιτούσε λιγότερο σήμα BW και θα επιτυγχάνει υψηλότερη SE. Η κατάλληλη μέτρηση για την αξιολόγηση της απόδοσης FEC είναι το net coding gain (NCG), του οποίου ο ορισμός normalizes τις απαραίτητες διαφορές BW σήματος λόγω διαφορών στο FEC OH ή τον πλεονασμό. Ένας υψηλότερος κωδικός OH θα πρέπει να εξακολουθεί να έχει υψηλότερο NCG από έναν χαμηλότερο κωδικό OH ακόμη και μετά την normalizes BW. Ένα μη κωδικοποιημένο σύστημα 16QAM μπορεί να επιτύχει έξοδο BER =  $10^{-15}$  σε κανάλι SNR 24,95 dB. Με ένα σύστημα κωδικοποίησης FEC 20% OH, τα σύμβολα 16QAM μπορούν να φορτωθούν με ένα κανάλι SNR 12,04 dB για να φτάσουν στην έξοδο BER =  $10^{-15}$ . Το NCG μπορεί να υπολογιστεί ως  $24.95 - 12.04 - 10 \times \log_{10}(1.2) = 12.12$  dB.

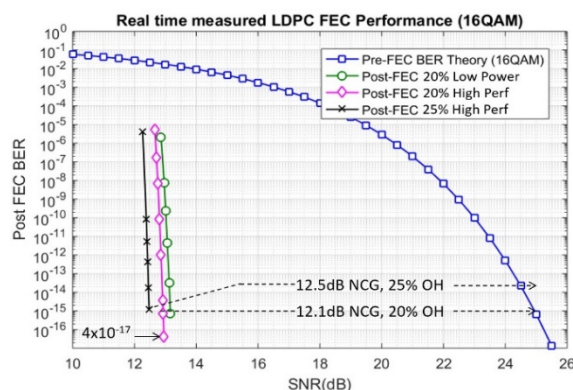
Το NCG πρέπει να συνυπολογίσει τον επιπλέον θόρυβο που μπορεί να αντιμετωπίσει το σύστημα όταν το BW του συστήματος αυξάνεται κατά 20%. στην Εικόνα 102 δείχνει μια απόδοση LDPC FEC που μετρήθηκε σε πραγματικό χρόνο, εσωτερική σε ένα CMOS ASIC 28 nm που κατασκευάστηκε και ενσωματώθηκε στο σύστημα ICE4 της Infinaera. Τα δυαδικά bit είναι τα πρώτα κωδικοποιημένα LDPC και στη συνέχεια τα γκρι αντιστοιχισμένα σε σύμβολα 16QAM. Τα σύμβολα είναι θόρυβος που φορτώνεται από ένα εσωτερικό κύκλωμα γεννήτριας θορύβου. Το Demapper χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των τιμών log-Likelihood Ratio (LLR) για τη δυαδική αποκωδικοποίηση LDPC σε ένα σχήμα BICM. Το μη κωδικοποιημένο σύστημα 16QAM εμφανίζεται ως η μπλε καμπύλη και η μέτρηση εμφανίζεται για τους γενικούς κωδικούς 20% και 25%. Το κατώτατο όριο σφάλματος του κώδικα επαληθεύεται μετά από  $4 \times 10^{-17}$ .

Η υποθετική διαμόρφωση είναι 16QAM και 12,1 dB NCG επιτυγχάνονται σε 20% OH και 12,5 dB NCG σε 25% OH. Η τρίτη καμπύλη είναι ένα αποτέλεσμα μέτρησης που χρησιμοποιεί το μισό αριθμό επαναλήψεων με αποτέλεσμα 0,2 dB λιγότερο NCG. στην Εικόνα 103. δείχνει μια μέτρηση σε πραγματικό χρόνο του LDPC FEC που χρησιμοποιείται στο 7nm 2x800G ASIC. Μετρημένο με χρήση μορφής διαμόρφωσης QPSK (επομένως ένα δυαδικό NCG), είναι ικανό να αποδίδει 11,6 dB NCG σε 20% OH και 12,25 dB NCG σε 33% OH. Η καμπύλη 33% OH μετρήθηκε σε  $10^{-14}$  BER και από  $10^{-14}$  σε  $10^{-15}$  προέκταση. Η κωδικοποίηση για τον κωδικό OH 20% είναι η ίδια με τον κωδικό στην Εικόνα 102. Όταν χρησιμοποιείται με μορφή 16QAM, αυτός ο κωδικός 20% αναμένεται να φτάσει τα 12,2 dB NCG, μια ελαφρά αύξηση 0,1 dB NCG σε σχέση με το σχέδιο προηγούμενης γενιάς που φαίνεται στην Εικόνα 102. Αυτό είναι αποτέλεσμα μιας ελαφράς αύξησης στην πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης.

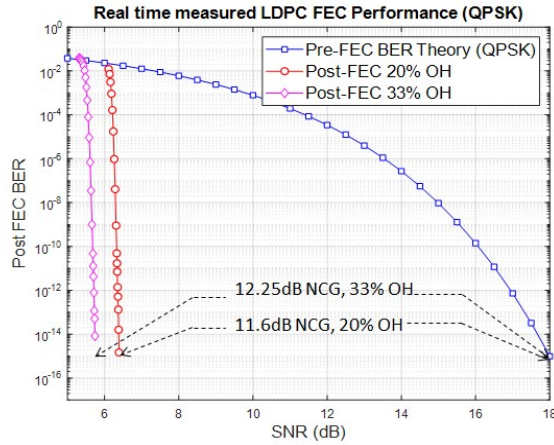
Το ASIC 7 nm έχει σχεδιαστεί για να δέχεται DSP αξίας δύο κυμάτων, το καθένα στα 800 Gb/s και για ένα σύνολο 1,6 Tb/s. Αυτή η πυκνή ολοκλήρωση επιτρέπει τη χρήση της κατανομής κέρδους SD-FEC ως μια μορφή μη γραμμικής ή εξαρτώμενης από την polarization dependent loss (PDL) [49], [50]. Στον πομπό, οι δύο μηχανές κωδικοποίησης FEC παράγουν δύο codewords που παρεμβάλλονται ή αναμειγνύονται και αποστέλλονται σε κινητήρες 2×DSP, οι οποίοι στη συνέχεια διαμορφώνονται σε δύο κύματα των 8 sub-carriers το καθένα. Στην πλευρά του δέκτη, τα δεδομένα και τα σύμβολα από 16 sub-carriers αποσυμπλέκονται αντιστρέφοντας το μοτίβο παρεμβολής στον πομπό και στη συνέχεια αποστέλλονται σε δύο ξεχωριστές μηχανές αποκωδικοποίησης FEC. Σε αυτή τη διάταξη, και οι δύο αποκωδικοποιητές FEC έχουν τον ίδιο μέσο όρο BER, παρόλο που τα δύο φυσικά κανάλια μπορεί να είναι καλά διαχωρισμένες σε συχνότητα και να παρουσιάζουν διαφορετικό BER λόγω κλίσης του erbium doped fiber amplifier (EDFA) ή μη γραμμικών βλαβών. Δεδομένου ότι κάθε κύμα μπορεί να συντονιστεί ευρέως σε ολόκληρη τη ζώνη C, τότε η κατανομή κέρδους FEC μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε δύο ζεύγη κυμάτων ευρέως διαχωρισμένα σε συχνότητα. Για παράδειγμα, σε συστήματα υποβρυχίων ινών με διαχείριση διασποράς όπου το BER στο ένα άκρο του φάσματος μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικό από ένα άλλο μέρος. Το χειρότερο κανάλι σε ένα σύστημα WDM μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε η codeword FEC του να μοιράζεται με το καλύτερο κανάλι, και ως εκ τούτου, και τα δύο κανάλια έχουν τον ίδιο μέσο όρο BER και αποκτάται περισσότερο περιθώριο Q για το κανάλι στη χειρότερη περίπτωση.

Σε μια ακραία περίπτωση, το χειρότερο κανάλι μπορεί να έχει ποσοστό σφάλματος υψηλότερο από το όριο FEC, αλλά μετά την κοινή χρήση κέρδους FEC, το ποσοστό σφάλματος μπορεί να μειωθεί κάτω από το όριο FEC. Οι βελτιώσεις ικανότητας και τα οφέλη αυτού του καθεστώτος έχουν αποδειχθεί σε εμπορικά συστήματα σε πραγματικό χρόνο [49]. Η άλλη εφαρμογή είναι ο μετριασμός PDL. Η ποιινή PDL στο coherent system εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την προσπίπτουσα γωνία πόλωσης στον κύριο άξονα PDL στην ίνα, η οποία ποικίλλει σημαντικά στη συχνότητα λόγω της διπλής διάθλαση της ίνας. Επομένως, το BER ποικίλλει σημαντικά για Wavelength division multiplexing (WDM) καναλιών ακόμη και απουσία μη γραμμικών εφέ ή κλίση απολαβής EDFA. Σε ένα άλλο εμπορικό σύστημα σε πραγματικό χρόνο, το Q .

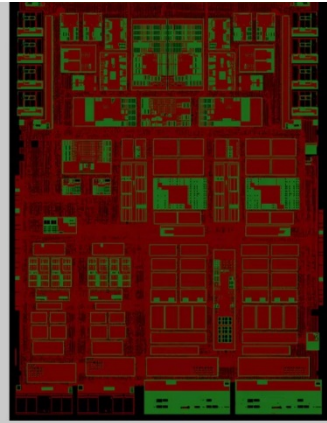
Οι κυρώσεις από τις επιδράσεις PDL του καναλιού μπορούν να μετριαστούν κατά 40 – 50% χρησιμοποιώντας την τεχνική κατανομής απολαβής FEC, με αποτέλεσμα κέρδος 0,5 dB στο περιθώριο Q έως το όριο FEC για ένα σύστημα ινών με μέση τιμή PDL 3 dB [50]. Στην Εικόνα 103 απεικονίζει ένα διάγραμμα διάταξης ενός DSP ASIC 7 nm ικανού για δύο κύματα TX και RX DSP, με κάθε κύμα να λειτουργεί με μέγιστη χωρητικότητα 800 Gb/s. Η μορφή διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται σε καθέναν από τους 8 sub-carriers είναι μια πιθανολογικά σχήματος διαμόρφωση που χρησιμοποιεί το 64QAM ως βασικό αστερισμό. Το συνολικό ποσοστό συμβόλων των 8 sub-carriers υπερβαίνει τα 90 GBaud για να επιτύχει 800 Gb/s ανά κύμα.



Εικόνα 92: LDPC SD-FEC experiment using 28 nm ASIC.



Εικόνα 93: LDPC SD-FEC experiment using 7 nm 800G ASIC.



Εικόνα 94: Διάγραμμα διάταξης ASIC 2x800 Gb/s 7 nm.

## 5.6.5 BENEFIT OF PS AND DSCM

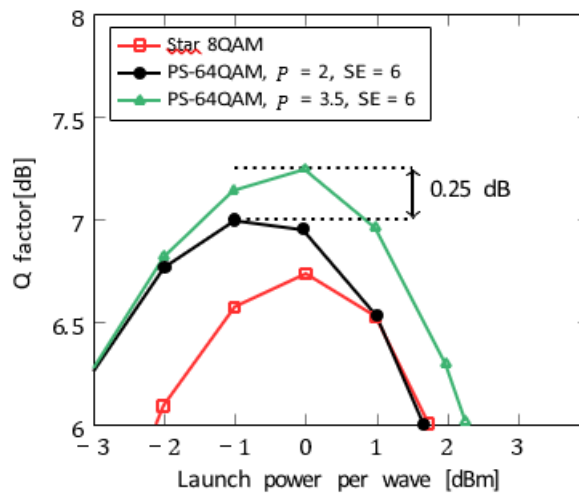
### A. Fiber Kerr Nonlinearity Tolerant Modulations

Αν και η διαμόρφωση PS ξεπερνά το κανονικό QAM με δυνατότητα κλοπής εξοπλισμού στο γραμμικό καθεστώς, όταν τα σήματα διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις ίνας, υπάρχει μια ευκαιρία για περαιτέρω βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Ο κύριος λόγος είναι ότι η κατανομή Maxwell-Boltzmann για τα σημεία αστερισμού έχει βελτιστοποιηθεί για το κανάλι AWGN. Για τη μετάδοση ιών μεγάλων αποστάσεων, αυτή η υπόθεση δεν είναι απολύτως έγκυρη και το σύστημα με την optimum launch power μπορεί να έχει ένα σημαντικό μη γραμμικό στοιχείο. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες εκτιμήσεις, όπως οι μη γραμμικές παράμετροι της ίνας για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των σημείων. Μια γενικευμένη μορφή κατανομής Maxwell-Boltzmann έχει προταθεί στο [51] και εφαρμόστηκε στο ASIC σε πραγματικό χρόνο 7 nm. Αυτή η Super-Gaussian κατανομή μειώνει σημαντικά τη διακύμανση της μη γραμμικής παρεμβολής (nonlinear interference)(NLI) του λαμβανόμενου σήματος μειώνοντας τις τυποποιημένες ροπές του σήματος. Έτσι, το συνολικό λαμβανόμενο SNR σήματος θα βελτιωνόταν σε σύγκριση με την κατανομή Maxwell-Boltzmann. Η παρακάτω εξίσωση απεικονίζει τη συνάρτηση μάζας πιθανότητας των μεταδιδόμενων συμβόλων για μια Super-Gaussian

$$p(x_i) = e^{-\lambda x_i^p} / I, i = 0, 1, \dots, m - 1,$$

κατανομή όπου  $m$  είναι η πληθώρα των επιπέδων πλάτους 1-D του αστερισμού (π.χ.  $m = 4$  για το 64QAM) και  $1/I$  είναι ο συντελεστής κλιμάκωσης για την ομαλοποίηση του

αθροίσματος των πιθανοτήτων σε ένα. Η παράμετρος "P" στην εξίσωση είναι ίση με 2 στην κατανομή Maxwell-Boltzmann αλλά ίση με μια τιμή μεγαλύτερη από 2 για το S την κατανομή Super-Gaussian. Φαίνεται στην Εικόνα 105 ότι η Super-Gaussian κατανομή (με  $P = 3,5$ ) παρέχει 0,25 dB υψηλότερο Q στη βέλτιστη ισχύ εκτόξευσης σε σύγκριση με την κατανομή Maxwell-Boltzmann (με  $P = 2$ ). Το περιβάλλον προσομοίωσης είναι 9360 χιλιόμετρα (151 ανοίγματα) ινών TeraWave. Υπάρχουν κανάλια 16×WDM, το καθένα αποτελείται από 8 sub-carrier στις 8.25 GBaud. Κάθε sub-carrier διαμορφώνεται είτε με Star 8QAM στα 6 bits ανά σύμβολο dual-pol, είτε με διαμορφωμένη διαμόρφωση με βάση το σύνολο συμβόλων 64QAM επιτυγχάνοντας το ίδιο SE. Η βέλτιστη ισχύς εκτόξευσης βελτιώνεται επίσης κατά λίγο λιγότερο από 1 dB. Όλα αυτά μεταφράζονται σε μεγαλύτερη εμβέλεια συστήματος για το σήμα Super-Gaussian.

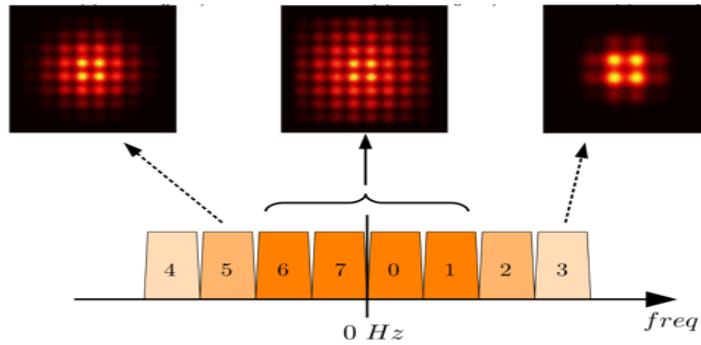


Εικόνα 95: 4: System Q benefit of Super-Gaussian PS signals.

**B. Capacity optimization of digital sub-carrier multiplexed transmission by means of the water-filling approach.**

Σε πρακτικά συστήματα υψηλού ρυθμού συμβόλων στα 90 GBaud και άνω, η ποιότητα του σήματος στις υψηλές συχνότητες παρουσιάζει ένα κρίσιμο ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί για να μειωθεί η ποινή υλοποίησης για διαμόρφωση υψηλής τάξης όπως 64QAM τα σήματα σε σχήμα υψηλού SE. Η ποιότητα του σήματος υψηλής συχνότητας υποβαθμίζεται λόγω διαφόρων παραγόντων όπως:

- (α) απώλεια σήματος σε υψηλές συχνότητες, γνωστός και ως περιορισμός BW.
- (β) ανεξέλεγκτες ανακλάσεις στην αλυσίδα ραδιοσυχνοτήτων σε υψηλές συχνότητες.
- (γ) υψηλότερες μη γραμμικότητες που δημιουργούνται από περιεχόμενα υψηλής συχνότητας του σήματος μέσω μη γραμμικών συσκευών όπως ηλεκτρονικά μηχανήματα οδήγησης Mach-Zehnder (MZ).
- (δ) Αναντιστοιχία της λειτουργίας μεταφοράς καναλιού I και Q σε υψηλές συχνότητες που μπορεί να εξαρτώνται από τη συσκευή και να ποικίλλουν χρονικά από τα θερμικά φαινόμενα και τη γήρανση. Αρκετές επιδράσεις σε πραγματικά, πρακτικά συστήματα δεν μπορούν να αντισταθμιστούν αποτελεσματικά με μέσα DSP, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται το εφικτό SNR. Είναι ευρέως γνωστό ότι εάν το κανάλι SNR είναι συνάρτηση της συχνότητας, τότε είναι πλεονεκτικό να διαμορφώνονται διαφορετικοί ρυθμοί δεδομένων σε διαφορετικά μέρη του φάσματος για να μεγιστοποιηθεί η καθαρή απόδοση. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως water-filling και είναι μια κλασική τεχνική που χρησιμοποιείται σε συστήματα OFDM [52].

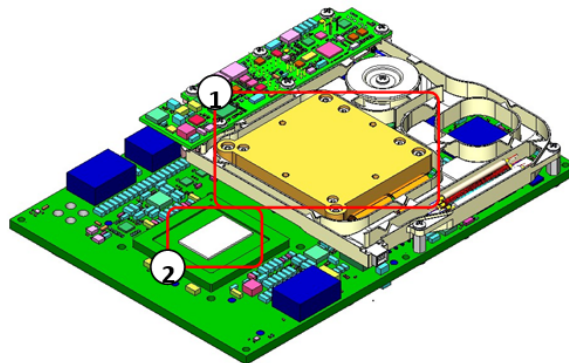


Εικόνα 96: Sub-Carrier water-filling using PS modulation.

το PS είναι ένας φυσικός και οικονομικά αποδοτικός τρόπος για την εφαρμογή πλήρωσης νερού για το ASIC σε πραγματικό χρόνο. Στην Εικόνα 106, οι πιο εσωτερικοί sub-carriers μπορούν να διαμορφωθούν με σήμα σχήματος υψηλής φασματικής απόδοσης {6, 7, 0, 1}, ενώ ο sub-carriers {2, 5} μπορεί να διαμορφωθεί σε ελαφρώς χαμηλότερη φασματική απόδοση και επομένως ικανοί να ανέχονται υψηλότερη ποσότητα θορύβου και παραμορφώσεων, και οι δύο πιο εξωτερικοί sub-carriers {4, 3} διαμορφώνονται με τη χαμηλότερη φασματική απόδοση σύμφωνα με το μειωμένο SNR καναλιού στους πιο εξωτερικούς sub-carriers. Με τη συνάρτηση συχνότητας SNR καναλιού, η διαμόρφωση θα πρέπει επίσης να επιλεγεί κατάλληλα για το επιτεύξιμο SNR σε αυτήν τη ζώνη συχνοτήτων. Αυτή η τεχνική πλήρωσης νερού είναι δυνατή μόνο και αντιπροσωπεύει μια μοναδική ικανότητα, με ψηφιακή διαμόρφωση sub-carriers

### 5.6.6 EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF A 2×800G REAL-TIME TRANSPONDER

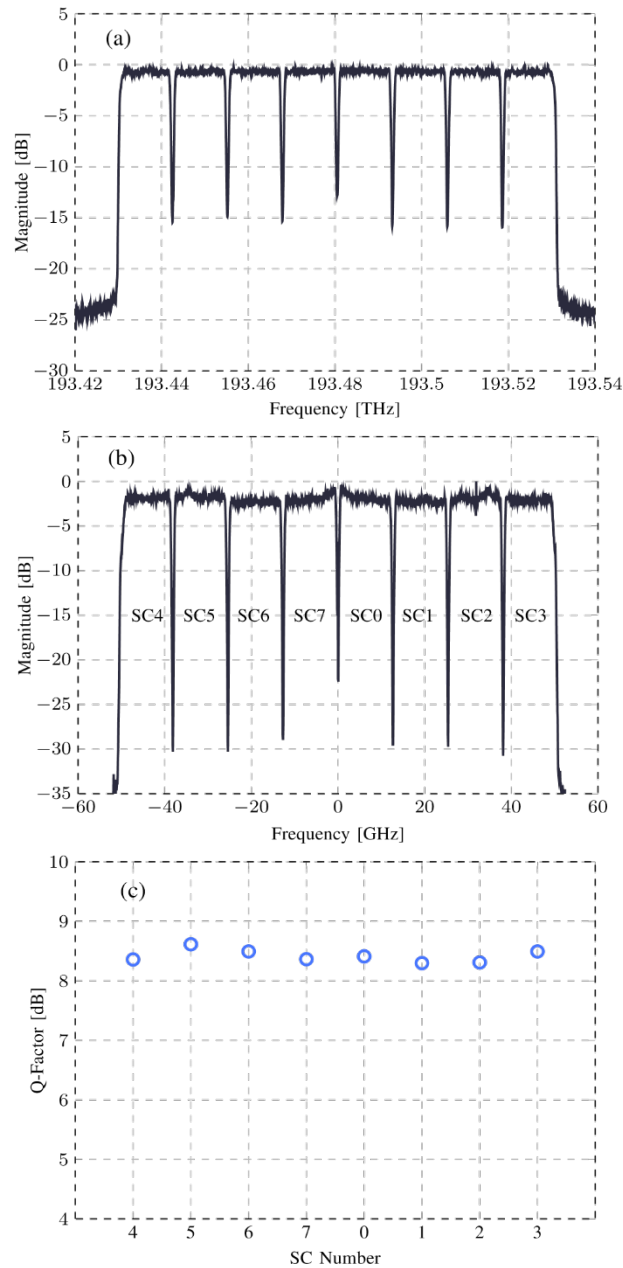
Σε αυτή την ενότητα, αναφέρουμε την πρώτη, εξ όσων γνωρίζουμε, πειραματική επίδειξη μιας μονάδας ψηφιακή συνεκτική οπτική (DCO) 2 κυμάτων σε πραγματικό χρόνο, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 107. Το DCO αποτελείται ενός 2×800G DSP ASIC και μιας υβριδικής ολοκληρωμένης electro-optical μονάδας, η οποία αποτελείται από ένα φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα 2 κυμάτων (PIC), flip-chip συνδεδεμένο με ένα αντίστοιχο αναλογικό πρόγραμμα οδήγησης 2 κυμάτων ASIC [53]. Το ενσωματωμένο DCO είναι ικανό να δημιουργήσει και να λάβει δύο οπτικά μήκη κύματος με ρυθμούς δεδομένων που κυμαίνονται από 100 Gb/s έως 800 Gb/s ανά μήκος κύματος, χρησιμοποιώντας ρυθμούς συμβόλων που μπορούν να ρυθμιστούν από 32 GBaud έως 100 GBaud.



Εικόνα 97: 1.6 Tb/s DCO. Bounding box 1 highlights the hybrid integrated 2-wavelength electro-optical module, while. bounding box 2 highlights the 2×800G DSP ASIC.

### A. Πειραματικά αποτελέσματα

Οπτικό back-to-back: Το DCO λειτουργούσε αρχικά σε οπτικό loop-back και η διαμόρφωση ορίστηκε στα 95,6 GBaud PS-64QAM, τα οποία παρείχαν καθαρό ρυθμό δεδομένων 800 Gb/s με ρυθμό πληροφοριών 10,5 bt/sym. Ο συντελεστής roll-off του ψηφιακού φίλτρου διαμόρφωσης παλμών στο TX DSP ορίστηκε στο 6,25%, επομένως το οπτικό BW ενός καναλιού μήκους κύματος ήταν 101,62 GHz. Εικόνα 108



Εικόνα 98: a) Experimentally measured optical spectrum at the output of the DCO b) Experimentally measured PSD of the received signal as reported by the DSP ASIC. c) Experimentally measured B2B Q-factor for a single optical channel operating at 800 Gb/s 95.6 GBaud PS-64QAM.

(a) δείχνει το μεταδιδόμενο οπτικό φάσμα στην έξοδο του DCO, όπου στην συχνότητα λέιζερ TX ρυθμίστηκε στα 193.48125 THz. Η οπτική έξοδος του DCO μετρήθηκε πριν περάσει απευθείας στη θύρα λήψης του DCO. Εικόνα 108

(b) δείχνει το αντίστοιχο λαμβανόμενο φάσμα, το οποίο διαβάστηκε απευθείας από το DSP ASIC. Η ομοιομορφία ισχύος των sub-carriers δείχνει την πολύ υψηλή electro-optical με



απόκριση BW του DCO. Οι sub-carriers αριθμούνται από 0 έως 3 για την άνω πλευρική ζώνη SCs και 4 έως 7 για την κάτω πλευρική ζώνη SCs Εικόνα 108

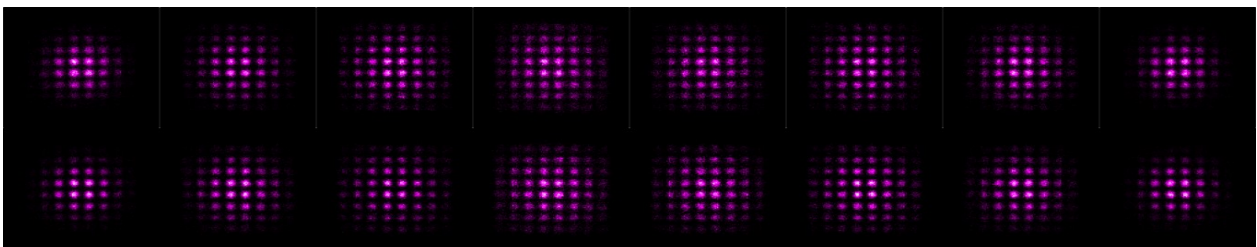
(c) δείχνει τον πειραματικά καταγεγραμμένο παράγοντα Q (μέσος όρος και στις δύο πολώσεις) για καθέναν από τους 8 ψηφιακούς sub-carriers που αποτελούν το κανάλι 800 Gb/s 95.6 GBaud PS64QAM. Η Water-filling όπως περιγράφεται στο τμήμα V-B, χρησιμοποιήθηκε για να εξασφαλιστεί συνεπής απόδοση σε όλους τους sub-carriers. Ενώ ο λαμβανόμενος συντελεστής Q κυμαινόταν από 8,3 dB έως 8,6 dB και στους 8 sub-carriers, είναι ο μέσος συντελεστής Q (8,45 dB) ολόκληρου του σήματος 800 Gb / s που είναι σημαντικός για την απόδοση του κινητήρα FEC. Στην εικόνα 109 δείχνει τους experimentally captured probabilistically διαμορφωμένους αστερισμούς και των 8 sub-carriers και των δύο πόλωσης. Η πλήρωση με νερό μπορεί να παρατηρηθεί σαφώς από τα δεδομένα του αστερισμού. Οι εσωτερικοί sub-carriers ορίστηκαν στον υψηλότερο ρυθμό πληροφοριών και επομένως στην πυκνότερη μορφή διαμόρφωσης. Καθώς η συχνότητα του SC αυξάνεται, ο ρυθμός πληροφοριών μειώνεται, διατηρώντας παράλληλα καθαρό ρυθμό μετάδοσης bit 800 Gb/s.

## B.Μετάδοση

Η ρύθμιση για το πείραμα μετάδοσης πλήρους ζώνης C απεικονίζεται στην εικόνα 109 (α). Ένα μόνο κανάλι 800 Gb/s 95,6 GBaud PS-64QAM, σε πραγματικό χρόνο Το ICE6 DCO3 2 μήκους κύματος μεταδόθηκε στο κέντρο της ζώνης C (193,48125 THz). Το υπόλοιπο της ζώνης C φορτώθηκε με χρήση spectrally shaped amplified spontaneous emission (SS-ASE) [54].

Ο επιδρομέας (aggressor) ASE πολυπλέχθηκε (multiplexed) στο σύστημα γραμμής χρησιμοποιώντας έναν εμπορικά διαθέσιμο reconfigurable optical add-drop multiplexer (ROADM), ο οποίος αποτελούνταν από έναν wavelength selective switch (WSS), EDFA και ένα οπτικό κανάλι ελέγχου. Το 800 Gb/s 95,6 GBaud PS 64QAM channel under test (CUT) επίσης πολυπλέχθηκε (multiplexed) χρησιμοποιώντας την ίδια ROADM, η οποία ενίσχυσε ολόκληρο το σήμα WDM για να παρέχει συνολική launch power 19 dBm. Η launch power του CUT ορίστηκε στα 4 dBm.

Η ζεύξη μετάδοσης αποτελούνταν από δέκα ανοίγματα ινών 100 km, καθεμία ακολουθούμενη από έναν εμπορικά διαθέσιμο υβριδικό ενισχυτή Raman EDFA. Η ίνα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το πείραμα ήταν η ίνα Corning® TXF®, η οποία έχει έναν συνδυασμό εξαιρετικά χαμηλής εξασθένησης (0,168 dB/km τυπικά στα 1550 nm), μεγάλης αποτελεσματικής περιοχής (125  $\mu\text{m}^2$  τυπικά στα 1550 nm) και υψηλής διασποράς (  $\sim 21$  ps/nm.km στα 1550 nm). Η ίνα TXF βασίζεται σε σχεδίαση πυρήνα πυριτίου, η οποία επιτρέπει χαμηλότερο μη γραμμικό Δείκτη Διάθλασης (Refractive Index) ( $\sim 2,2 \times 10^{-20}$  m<sup>2</sup> /W) σε σύγκριση με τις ίνες με πρόσμιξη Germania-doped. Ο συνδυασμός εξαιρετικά χαμηλών απωλειών και βελτιωμένης ανοχής σε μη γραμμικά φαινόμενα επιτρέπει μεγαλύτερη εμβέλεια.

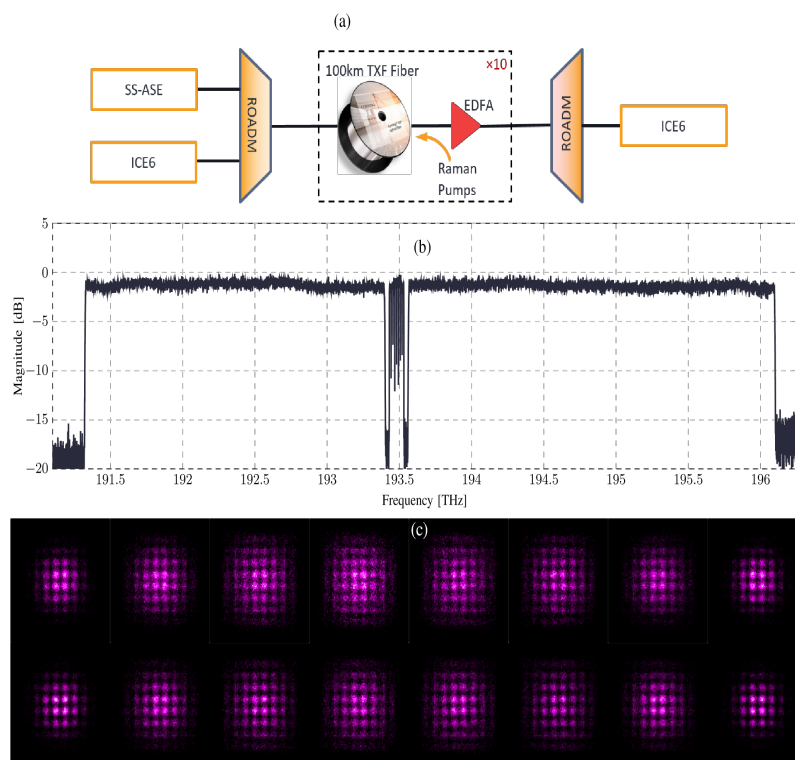


Εικόνα 99: Experimentally measured 800 Gb/s 95.6 GBaud PS-64QAM constellations for 8 sub-carriers per polarization when the DCO is operated in full optical loop-back. The top row is the XPOL, while the bottom row is the YPOL. The constellations are ordered as shown in Εικόνα 108 (b).

Οι αστερισμοί έχουν μεγαλύτερη ικανότητα μετάδοσης και βελτιωμένο περιθώριο συστήματος. Ως ένα συμβατή με τη σύσταση ITU-T G.654.E με μέγιστο μήκος κύματος

διακοπής καλωδίου 1520 nm, η ίνα TXF έχει σχεδιαστεί ειδικά για να λειτουργεί για επίγεια δίκτυα μεγάλων αποστάσεων και περιφερειακά δίκτυα που χρησιμοποιούν τις ζώνες μετάδοσης C ή C + L. Στην εικόνα. 110 (b) απεικονίζει το μεταδιδόμενο φάσμα στην έξοδο του ROADM, με το σήμα PS-64QAM σε πραγματικό χρόνο 800 Gb/s τοποθετημένο στο κέντρο της ζώνης C. Μετά τη μετάδοση μέσω του συστήματος γραμμής 1000 χιλιομέτρων, το ROADM στη θύρα λήψης, το οποίο είχε ρυθμιστεί σε pass-band BW 150 GHz, έριξε το CUT και το τροφοδότησε απευθείας στη θύρα λήψης ενός δεύτερου DCO ICE6. Στη συνέχεια, το DCO λήψης μείωσε το οπτικό σήμα στα -6 dBm προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση.

Ο μέσος συντελεστής Q (πάνω από 2 polarizations και 8 sub-carrier) για τα 800 Gb/s 95,6 GBaud PS-64QAM, ο οποίος μετρήθηκε πειραματικά σε περίπου 10 ώρες, φαίνεται στην εικόνα 110. Ο μέσος συντελεστής Q που επιτεύχθηκε κατά τη διάρκεια του παραθύρου μέτρησης των 10 ωρών ήταν 6,1 dB, με το 3σ Qfactor να οριοθετείτε (bounded) μεταξύ 6 dB και 6,2 dB. Αυτό παρείχε ένα περιθώριο παράγοντα Q από 0,4 έως 0,6 dB στο όριο FEC, παρέχοντας έτσι μηδενικά σφάλματα μετά το FEC. Οι αντίστοιχοι λαμβανόμενοι αστερισμοί για όλους τους sub-carrier εμφανίζονται στο Εικόνα. 110(c).



Εικόνα 100: a) Full C-band transmission test bed. (b) WDM optical spectrum with a single real-time 95.6 GBaud PS-64QAM channel located at the center of the C-band, with ASE aggressors. (c) Corresponding X- and Y-POL constellations after transmission over 1000 km of Corning® TXF® fiber

## Έκτο κεφάλαιο – Συμπεράσματα

### 6.1 Looking Beyond 800G

Με τα κέντρα δεδομένων hyperscale να αγωνίζονται συνεχώς να κρατήσουν μπροστά τους αυξανόμενους όγκους κίνησης δεδομένων, οι διακόπτες Ethernet 800G και οι συνδεδεμένες οπτικές μονάδες θα προσφέρουν κάποια ανακούφιση. Το πρότυπο 800G της κοινοπραξίας τεχνολογίας Ethernet θα βοηθήσει στην παροχή λύσεων Ethernet 800G έως να ολοκληρωθούν τα πρότυπα IEEE μερικά χρόνια αργότερα. Καθώς οι διακόπτες Ethernet 800G αρχίζουν να βγαίνουν στην αγορά, τα συνδεδεμένα οπτικά 8x100G θα πρέπει επίσης να είναι διαθέσιμα σε συντελεστές μορφής QSFP-DD800 και OSFP. Κοιτάζοντας πιο μπροστά, η σηματοδότηση 200 G ανά λωρίδα θα προσφέρει μια πρόσθετη ώθηση στα 800 G και θα θέσει τις βάσεις για το Ethernet 1,6 Tb.

### 6.2 Οπτικά προϊόντα υψηλής χωρητικότητας στην αγορά τώρα

Οι προμηθευτές οπτικών κινητήρων, μονάδων και υποστηρικτικών προϊόντων υψηλής χωρητικότητας περιλαμβάνουν την **Adva**, τώρα μέρος της **Adtran**. Το TeraFlex Core Channel εξασφαλίζει μεταφορά 800Gb/s με υψηλή απόδοση, υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος, επιτυγχάνοντας αποστάσεις άνω του 50% μεγαλύτερες από τις λύσεις που βασίζονται σε 95Gb/s. Ο προσαρμοστικός ρυθμός baud εξασφαλίζει ότι χρησιμοποιείται η ελάχιστη ποσότητα φάσματος. Αυτό είναι χαμηλό όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες. Ωστόσο, η τεχνολογία sub-carriers 140Gb/s του έλκθρου Core Channel του δίνει τη δυνατότητα να αξιοποιήσει εξαιρετικά υψηλά ποσοστά baud και να μεταφέρει έως και 800Gb / s περαιτέρω.

#### 6.1.1 Η Broadcom

Προσφέρει τη σειρά Switch StrataXGS Tomahawk 5, Η οικογένεια BCM78900 της Broadcom® είναι μια κατηγορία συσκευών μεταγωγής δικτύου υψηλής ακτίνας και υψηλού εύρους ζώνης που υποστηρίζουν έως 64 θύρες x 800GbE, 128 x 400GbE ή 256 x 200GbE. Η οικογένεια συσκευών διαθέτει έως 64 ενσωματωμένους πυρήνες Peregrine SerDes, ο καθένας με οκτώ ενσωματωμένους πομποδέκτες PAM106 SerDes 4 Gb/s και σχετικούς υπολογιστές για εγγενή υποστήριξη πολλών επιλογών φυσικής συνδεσιμότητας, επιτρέποντας ένα ευρύ φάσμα μέσων, ταχύτητας και εμβέλειας. Το BCM78900 παρέχει συνδεσιμότητα δικτύου υψηλού εύρους ζώνης, χωρίς κόλλα έως 51,2 Tb/s σε ένα μόνο τσιπ.

Το BCM78900 είναι μια συσκευή υψηλής απόδοσης και υψηλής χωρητικότητας που έχει σχεδιαστεί για να πληροί τις απαιτήσεις για περιβάλλοντα κέντρων δεδομένων επόμενης γενιάς και cloud computing. Η αρχιτεκτονική BCM78900 παρέχει πλήρεις δυνατότητες μεταγωγής, δρομολόγησης και σήραγγας L2 και L3 με ρυθμό γραμμής και μέγιστη πυκνότητα θύρας, με χαμηλή ισχύ και καθυστέρηση. Η συμβατότητα λογισμικού διατηρείται σε όλο το χαρτοφυλάκιο προϊόντων της StrataXGS® για την απλοποίηση του σχεδιασμού των πελατών και τη μείωση του χρόνου διάθεσης των πελατών στην αγορά.

Καθώς οι διεπαφές διακομιστών μεταβαίνουν σε υψηλότερες ταχύτητες Ethernet και η εικονική διαμόρφωση συνεχίζει να αυξάνει τη χρήση των συνδέσεων, τα δίκτυα κέντρων δεδομένων απαιτούν μεταγωγείς με πυκνή συνδεσιμότητα 50GbE έως 800GbE στα άκρα και επίπεδα συνάθροισης. Με έως 64 x [PM8x100] SerDes και ευελιξία στη διαμόρφωση θυρών 50GbE, 100GbE, 200GbE, 400GbE και 800GbE, ένα μόνο τσιπ μεταγωγής BCM78900 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία κλιμακούμενων, οικονομικά αποδοτικών μεταγωγών φύλλων, σπονδυλικής στήλης, λεπίδων και συνάθροισης σε ολόκληρο το κέντρο δεδομένων.

### 6.1.2 Η Cisco

Ανακοίνωσε πρόσφατα επιλογές 400 και 800GbE στη σειρά Nexus. Αυτοί περιλαμβάνουν τους διακόπτες πλαισίου Nexus 9800 και Nexus 9400, καθώς και δύο νέους σταθερούς μεταγωγείς Nexus 9300, όλοι με υποστήριξη για 100GbE και 400GbE για δίκτυα επόμενης γενιάς. Διατίθεται επίσης ένας νέος διακόπτης πλαισίου σχεδιασμένος για 100GbE / 400GbE σήμερα και 800GbE στο μέλλον. Με χωρητικότητα από 57Tb/s έως 115Tb/s, η σειρά Nexus 9800 μπορεί να χωρέσει τέσσερις ή οκτώ κάρτες γραμμής, δύο μονάδες εποπτείας και δύο ή τρεις δίσκους τροφοδοτικών ανά chassis.

### 6.1.3 Η FS.COM

Πρόσφατα επέκτεινε το χαρτοφυλάκιο οπτικών λύσεων νέας γενιάς 400G/800G με ένα νέο χαρτοφυλάκιο, το αποκορύφωμα του οποίου είναι ένα σύνολο μονάδων πομποδέκτη 800G, που λανσαρίστηκαν σε συνεργασία με την Source Photonics. Οι μονάδες FS 400G / 800G OSFP / QSFP-DD διαθέτουν υψηλή ταχύτητα, υψηλή πυκνότητα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Είναι ιδανικά για έξυπνα, ενεργειακά αποδοτικά και υψηλής απόδοσης δίκτυα κέντρων δεδομένων.

### 6.1.4 Η τεχνολογία Hengtong Rockley

Προσφέρει οπτικές μονάδες 800G QSFP-DD800 DR8, βασισμένες στην τεχνολογία EML. Η εταιρεία προσαρμοσε DSP 7nm με ενσωματωμένα προγράμματα οδήγησης και δομή COB για να επιτύχει αυτόν τον σχεδιασμό 800G QSFP-DD800 DR8. Η συνολική κατανάλωση ισχύος της μονάδας είναι περίπου 16W.

### 6.1.5 Η μονάδα 800G της Huawei

Έχει σχεδιαστεί για να βοηθά τους χειριστές να αντιμετωπίζουν τις προκλήσεις εύρους ζώνης των δικτύων 5G. Μεταξύ των χαρακτηριστικών του, οι ρυθμοί γραμμής μπορούν να ρυθμιστούν από 200 έως 800Gb /s, καθιστώντας το προσαρμόσιμο σε διάφορες εφαρμογές και επιτρέποντας την ομαλή εξέλιξη τα επόμενα 10 χρόνια. Τα πολλαπλά σενάρια εφαρμογών περιλαμβάνουν μετάδοση κορμού και μετρό, καθώς και διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων.

### 6.1.6 Infinera

Ο κινητήρας άπειρης χωρητικότητας έκτης γενιάς (ICE6), από τις προηγμένες συνεκτικές οπτικές μηχανές και υποσυστήματα της Infinera, είναι ένας οπτικός κινητήρας 1,6 Tb / s που παρέχει δύο ανεξάρτητα προγραμματιζόμενα μήκη κύματος έως και 800 Gb / s το καθένα. Χρησιμοποιώντας έναν κόμβο διεργασίας CMOS 7 nm DSP και προηγμένη τεχνολογία PIC, το ICE6 αξιοποιεί εξαιρετικά υψηλά ποσοστά baud, υψηλό μόντεμ SNR και καινοτόμα χαρακτηριστικά για να σπάσει τα εμπόδια απόδοσης και φασματικής απόδοσης, συμπεριλαμβανομένης της απόδοσης ενός μήκους κύματος 800G πάνω από 1000+ km σε ένα εμπορικό δίκτυο.

### 6.1.7 InnoLight

Η οπτική μονάδα 800G OSFP της InnoLight περιλαμβάνει δύο αρχιτεκτονικές λύσεις, 4x100Gx2 και 8X100G. Εκτός από τον παραδοσιακό σχεδιασμό EML, υιοθετεί επίσης μια λύση

με βάση το πυρίτιο για την κάλυψη αναγκών μετάδοσης μικρών αποστάσεων. Τα προϊόντα αυτής της σειράς συμμορφώνονται με τα πρότυπα IEEE802.3ck και OSFP MSA και υποστηρίζουν CMIS4.0. Τα προϊόντα χρησιμοποιούνται κυρίως σε 800G Ethernet, κέντρα δεδομένων και δίκτυα cloud.

### 6.2.8 Η Lumentum

Προσφέρει μια σουίτα οπτικών εξαρτημάτων 100 έως 800 Gb/s σε πελάτες που αναζητούν συνεκτικά προϊόντα. Το χαρτοφυλάκιο της εταιρείας παρέχει διακριτά εξαρτήματα βελτιστοποιημένης απόδοσης, λέιζερ στενής γραμμής, συνεκτικούς διαμορφωτές και δέκτες υψηλού ρυθμού baud, καθώς και ενσωματωμένα εξαρτήματα για QSFP-DD, OSFP, CFP2 και άλλους συμβατούς πομποδέκτες με δυνατότητα σύνδεσης μικρού μεγέθους.

### 6.2.9 Photonics

Οι οπτικοί πομποδέκτες 800G PAM4 OSFP/ QSFP-DD800 της Source Photonics ενσωματώνουν τα εσωτερικά καθετοποιημένα τσιπ λέιζερ 53G EML και το υπερσύγχρονο τσιπ 7nm 800G DSP για χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Παρέχει διάφορες επιλογές σύνδεσης οπτικών ινών, μια ομαλή μετάβαση από οπτικά συστήματα 400G μονής σε διπλή θύρα στον συντελεστή μορφής 800G που απαιτεί συμβατότητα προς τα πίσω με τη μεγάλη βάση σωμάτων των μονάδων οπτικών ινών.

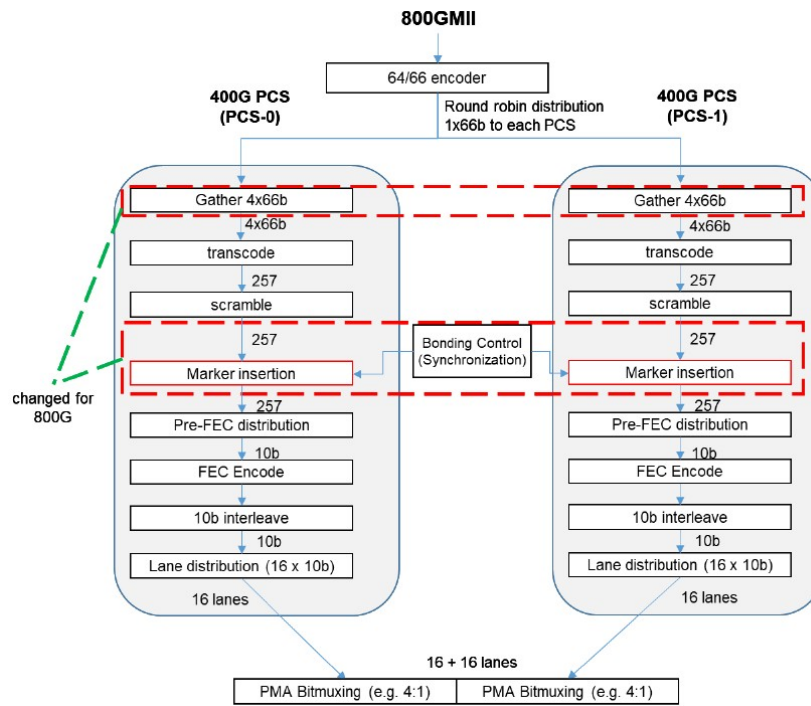
### 6.2.10 Η Viavi

προσφέρει λύσεις δοκιμών και μετρήσεων για 800G. Η μονάδα ONT 800G FLEX XPM είναι μια ολοκληρωμένη λύση δοκιμής με εγγενή διεπαφή 800G που βασίζεται στην ταχύτητα ηλεκτρικής λωρίδας 100G. Υποστηρίζει πολλαπλούς παράγοντες μορφής με δυνατότητα σύνδεσης, συμπεριλαμβανομένων των OSFP 800G και 800G QSFP DD. Η μονάδα ONT 800G FLEX V2, μαζί με τις μονάδες ONT DCO και Ethernet, παρέχει αυτοματοποιημένες δυνατότητες δοκιμής οπτικής μεταφοράς μέσω διεπαφής 2 x 400G. Ο ελεγκτής οπτικού δικτύου ONT-800 της εταιρείας είναι ένα κεντρικό πλαίσιο υψηλής απόδοσης με δυνατότητα τοποθέτησης σε rack, το οποίο δημιουργεί μια ανθεκτική βάση για την οικογένεια μονάδων δοκιμής ONT με δυνατότητα εναλλαγής.

Βασικά χαρακτηριστικά :

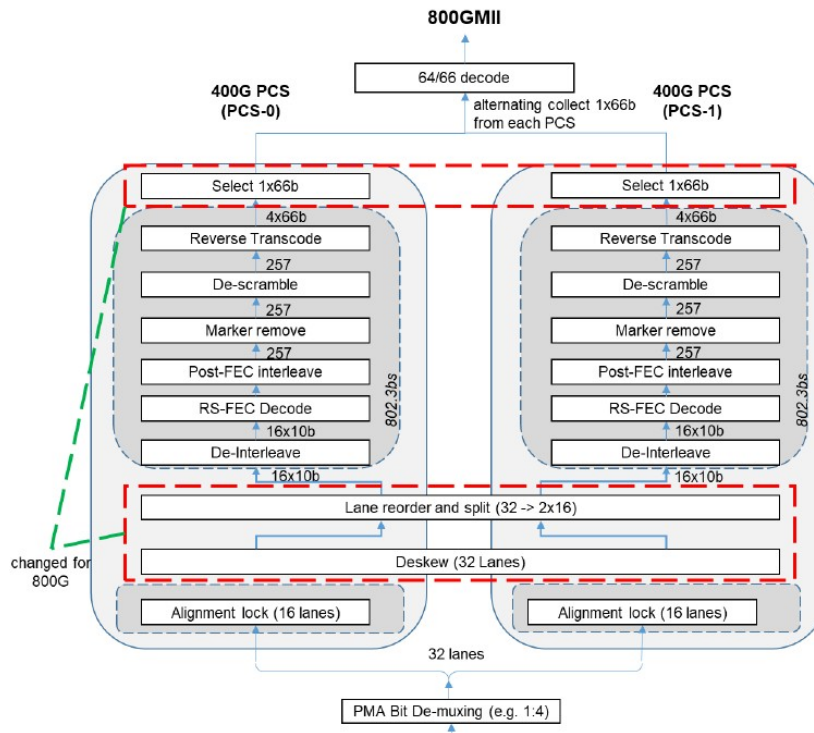
- Designed for multi form factor 800G transponder test and validation including OSFP 800G and QSFP-DD800
- 800G Unframed BERT
- 800G Ethernet as 800G ETC, 2 x 400GE, 8 x 100GE, and 4 x 200GE
- Native QSFP-DD and SFP-DD
- Hardware validation
- Transponder Control Environment
- Dynamic Skew
- FEC Stress Testing
- Test Automation

### 6.3 Ποή 800G PCS TX



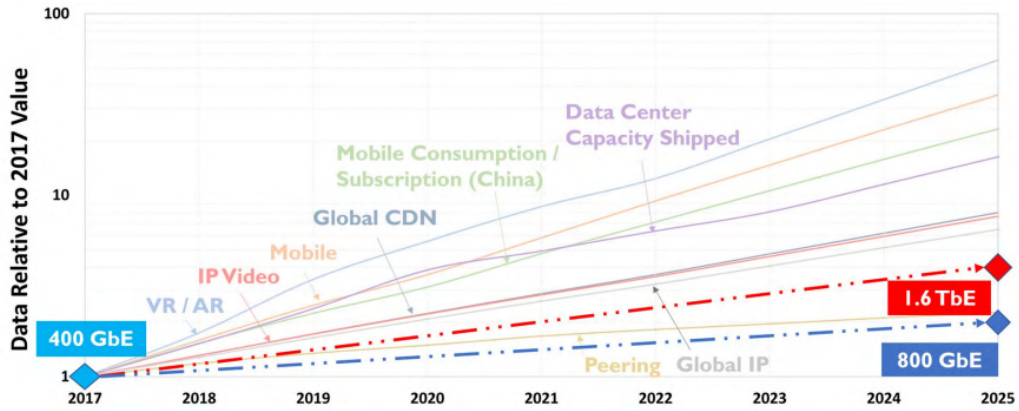
Εικόνα 101: Ποή 800G PCS TX

### 6.4 Forward – Excerpt IEEE 802.3 Ethernet BWA



Εικόνα 102: Foreword – Excerpt IEEE 802.3 Ethernet BWA

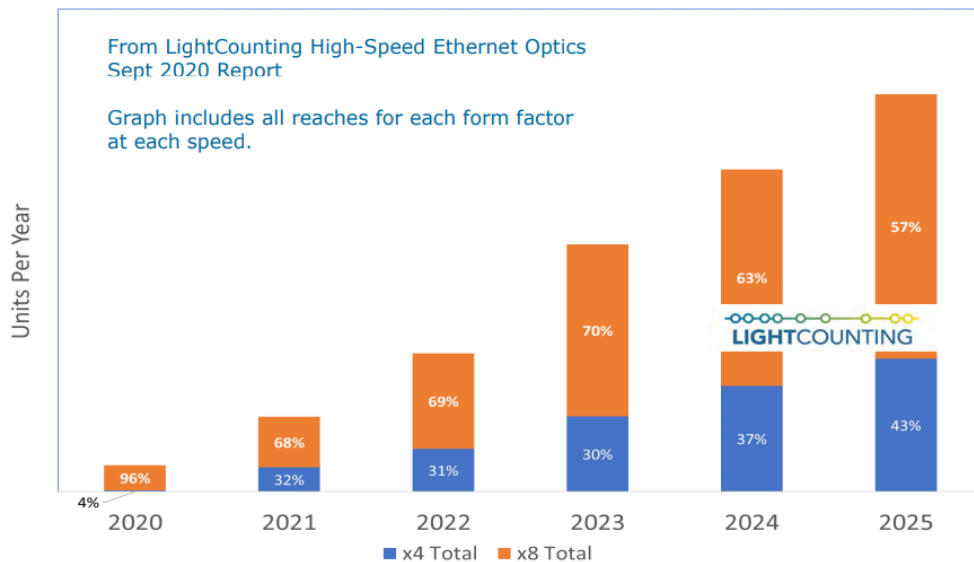
Υποθέτοντας ότι ένα νέο έργο για τον καθορισμό του επόμενου ρυθμού Ethernet ξεκίνησε το 2020 και χρειάζεται 5 χρόνια για να ολοκληρωθεί (2025), βασίζονται σε καμπύλες ρυθμών ανάπτυξης, δημιουργήθηκαν επίσης 800 GbE και 1,6 TbE και συγκρίθηκαν με τα υποβληθέντα δεδομένα. Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν άλλες αρχιτεκτονικές αλλαγές στην



Εικόνα 103: Bandwidth Curves (2017-2025)

ανάπτυξη, αυτή η επικάλυψη έδειξε σημαντική υστέρηση ανάπτυξης μεταξύ 800 GbE και των παρατηρούμενων καμπυλών ανάπτυξης. Ωστόσο, δημιουργήθηκε η 4x καμπύλη ανάπτυξης κατά μια κλίση 1,6 TbE θα υστερούσε επίσης σε όλες τις καμπύλες ανάπτυξης που παρατηρήθηκαν, εκτός από την "Κίνηση ομότιμης κίνησης".

Επιπλέον, όλοι οι υποκείμενοι παράγοντες που οδηγούν μια έκρηξη εύρους ζώνης, συμπεριλαμβανομένου (1) του αριθμού των χρηστών, (2) αυξημένων ρυθμών και μεθόδων πρόσβασης και (3) αυξημένων υπηρεσιών όλα δείχνουν συνεχιζόμενη αύξηση του εύρους ζώνης.



Εικόνα 104: Comparison of Form Factor Adoption (200GbE / 400GbE / 800GbE).

Πίνακας 5 1: IEEE 802.3 Ethernet Optical Landscape (based on >=50 Gb/s signaling per lane, excluding ZR)

Ethernet Rate	Signaling Rate	MMF 50m	MMF 100m	SMF 500m	SMF 2km	SMF 10km	SMF 40km
100 Gb/s	50 Gb/s		Over 2 pair				
	100 Gb/s	Over 1 pair**	Over 1 pair**	Over 1 λ (pair)	Over 1 λ (pair)	Over 1 λ (pair)	
200 Gb/s	50 Gb/s		Over 4 pair	Over 4 pair			
	50 Gb/s				Over 4 λ's	Over 4 λ's	Over 4 λ's
	100 Gb/s	Over 2 pair*	Over 2 pair*				
400 Gb/s	50 Gb/s		Over 8 pairs Over 4 pairs (4.2)				
	50 Gb/s				Over 8 λ's	Over 8 λ's	Over 8 λ's
	100 Gb/s	Over 4 pair**	Over 4 pair**	Over 4 pairs			
	100 Gb/s				Over 4 λ's	Over 4 λ's (6km)	
800 Gb/s*	100 Gb/s	Over 8 pairs	Over 8 pairs	Over 8 pairs			
	200 Gb/s			Over 4 pairs	Over 4 pairs		
	200 Gb/s				Over 4 λ's		
	TBD					Over single SMF in each direction	Over single SMF in each direction

### 6.5 Περίληψη των Τάσεων

1-Οι βιομηχανικές προσπάθειες για την ανάπτυξη λύσεων χωρητικότητας 800 GbE και 800 Gb/s έχουν ξεκινήσει πριν από τον Μάρτιο του 2020.

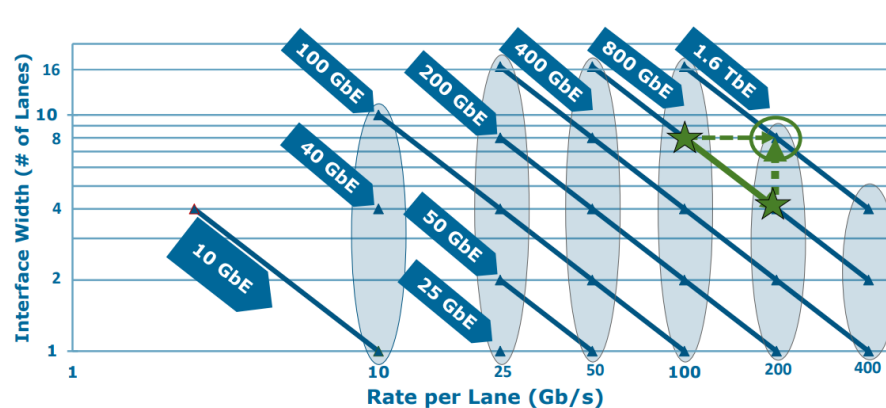
2-Οι συντελεστές οπτικής μορφής με βάση το x8 θα είναι >50% για 200/400/800

3- IEEE 802.3 υπάρχοντα PHY

- Οι τεχνολογίες σηματοδότησης αξιοποιούνται σε πολλαπλούς ρυθμούς Ethernet
- MMF: χρήση 1 / 2 / 4 / 8 ζευγών
- PSM: χρήση 1 / 4 / 8 ζευγών
- SMF: χρήση 1 / 4 / 8 λ'

4- IEEE 802.3 Beyond 400 Gb/s Ethernet

- Προαιρετικές διεπαφές μονάδων προσάρτησης 800 Gb/s (AUI) για εφαρμογές chip-to-module και chip-to-chip
- 8 λωρίδες (υποτίθεται 8 x 100 Gb/s)
- 4 λωρίδες (υποτίθεται ότι 4 x 200 Gb/s)
- Στόχοι φυσικής στρώσης που στοχεύουν 800 Gb/s, <= 2km
- 8 λωρίδες (υποτίθεται 8 x 100 Gb/s)
- 4 λωρίδες (υποτίθεται ότι 4 x 200 Gb/s)

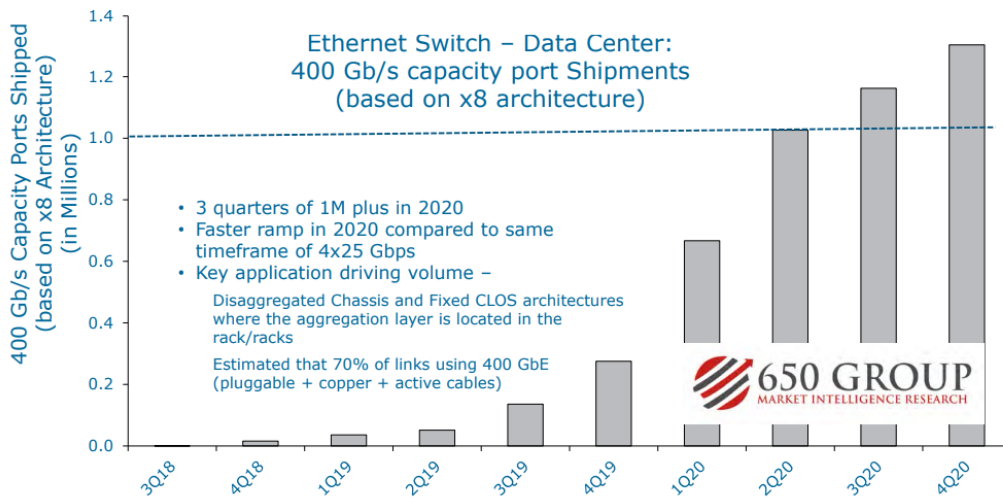


Εικόνα 105: The Relationship Between Ethernet & Signaling Rates.

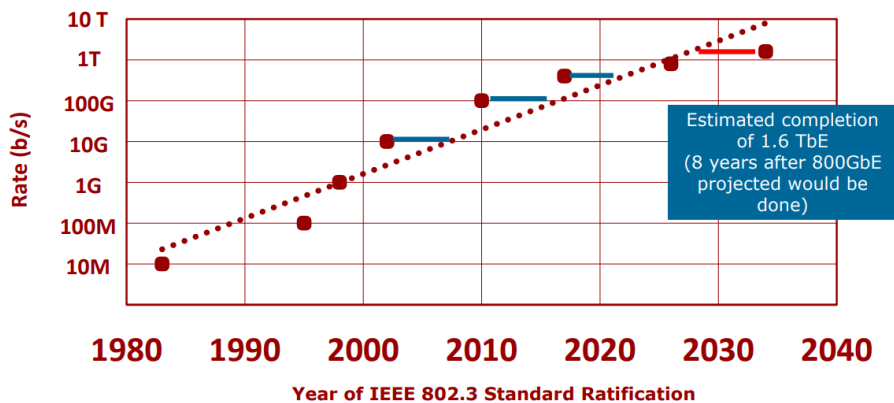


### 6.6 Νέο παράδειγμα

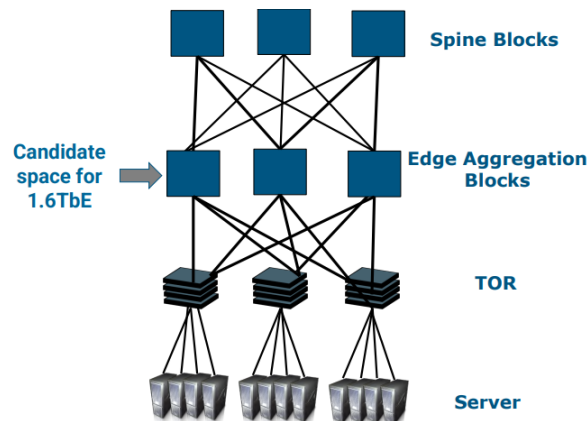
- Έχει γίνει στροφή σε θύρες πολλαπλών ρυθμών: x1, x2, x4, x8
  - Έχουν γίνει Ethernet PHY αναπτύχθηκε με βάση τα x1, x2, x4, και τιμές λωρίδων x8
  - αποδοχή της αγοράς
- συνεχίζει αυτή την τάση με 8 x Φυσικό επίπεδο 100 Gb/s Προδιαγραφές  
 – πρέπει να συνεχιστεί αυτή η τάση βασίζεται σε σηματοδότηση 200 Gb/s



Εικόνα 106: Growing Acceptance of x8 Solution.



Εικόνα 107: Ανάπτυξη 800 GbE / 1,6 Tb σε ξεχωριστά έργα "Next Speed".



Εικόνα 108: Where would 1.6 Tb make sense in hyper-scale data centers

## 6.7 IEEE P802.3 df Objectives

### 6.7.1 Non-Rate Specific

- Support full-duplex operation only
- Preserve the Ethernet frame format utilizing the Ethernet MAC
- Preserve minimum and maximum Frame Size of current IEEE 802.3 standard
- Support a BER of better than or equal to  $10^{-13}$  at the MAC/PLS service interface (or the frame loss ratio equivalent)
- Provide support to enable mapping over OTN

### 6.7.2 (200 Gb/s) Related.

- Support a MAC data rate of 200 Gb/s
- Support optional single-lane 200 Gb/s attachment unit interfaces for chip-to-module and chip-to-chip applications
- Define a physical layer specification that supports 200 Gb/s operation:
  - over 1 pair of copper twin-axial cables in each direction with a reach of up to at least 1.0 meter
  - over 1 pair of SMF with lengths up to at least 500 m
  - over 1 pair of SMF with lengths up to at least 2 km

### 6.7.3 (400 Gb/s) Related.

- Support a MAC data rate of 400 Gb/s
- Support optional two-lane 400 Gb/s attachment unit interfaces for chip-to-module and chip-to-chip applications
- Define a physical layer specification that supports 400 Gb/s operation:
  - over 2 pairs of copper twin-axial cables in each direction with a reach of up to at least 1.0 meter
  - over 2 pairs of SMF with lengths up to at least 500 m
  - over 4 pairs of SMF with lengths up to at least 2 km \*

### 6.7.4 (800 Gb/s) Related.

- Support a MAC data rate of 800 Gb/s
- Support optional eight-lane 800 Gb/s attachment unit interfaces for chip-to-module and chip-to-chip applications
- Support optional four-lane 800 Gb/s attachment unit interfaces for chip-to-module and chip-to-chip applications
- Define a physical layer specification that supports 800 Gb/s operation:
  - over 4 pairs of copper twin-axial cables in each direction with a reach of up to at least 1.0 meter
  - over eight lanes of twin axial copper cables with a reach up to at least 2 meters
  - over eight lanes over electrical backplanes supporting an insertion loss  $\leq 28$ dB at 26.56GHz
  - over 8 pairs of MMF with lengths up to at least 50 m
  - over 8 pairs of MMF with lengths up to at least 100 m
  - over 8 pairs of SMF with lengths up to at least 500 m

- over 8 pairs of SMF with lengths up to at least 2 km
- over 4 pairs of SMF with lengths up to at least 500 m
- over 4 pairs of SMF with lengths up to at least 2 km
- over 4 wavelengths over a single SMF in each direction with lengths up to at least 2 km
- over a single SMF in each direction with lengths up to at least 10 km
- over a single SMF in each direction with lengths up to at least 40 km

#### **6.7.4 (1.6 Tb/s) Related.**

- Support a MAC data rate of 1.6 Tb/s
- Support optional sixteen-lane 1.6 Tb/s attachment unit interfaces for chip-to-module and chip-to-chip applications
- Support optional eight-lane 1.6 Tb/s attachment unit interfaces for chip-to-module and chip-to-chip applications
- Define a physical layer specification that supports 1.6 Tb/s operation:
  - over 8 pairs of copper twin-axial cables in each direction with a reach of up to at least 1.0 meter
  - over 8 pairs of SMF with lengths up to at least 500 m
  - over 8 pairs of SMF with lengths up to at least 2 km

### Κατάλογος διαγραμμάτων

- [1] H. Sun, K.-T. Wu, and K. Roberts, “Real-time measurements of a 40 Gb/s coherent system,” *Optics Express*, vol. 16, no. 2, pp. 873–879, 2008.
- [2] M. Kuschnerov, F. N. Hauske, K. Piyawanno, B. Spinnler, M. S. Alfiad, A. Napoli, and B. Lankl, “DSP for coherent single-carrier receivers,” *Journal of light wave technology*, vol. 27, no. 16, pp. 3614–3622, 2009.
- [3] K. Roberts, M. O’Sullivan, K.-T. Wu, H. Sun, A. Awadalla, D. J. Krause, and C. Laperle, “Performance of dual-polarization QPSK for optical transport systems,” *Journal of light wave technology*, vol. 27, no. 16, pp. 3546–3559, 2009.
- [4] Y. Han and G. Li, “Coherent optical communication using polarization multiple-input-multiple-output,” *Optics Express*, vol. 13, no. 19, pp. 7527–7534, 2005.
- [5] M. S. Alfiad, M. Kuschnerov, T. Wuth, T. Xia, G. Wellbrock, E.-D. Schmidt, D. van den Borne, B. Spinnler, C. J. Weiske, E. de Man et al., “111-Gb/s transmission over 1040-km field-deployed fiber with 10G/40G neighbors,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 10, pp. 615–617, 2009.
- [6] “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, June 2017,” <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visualnetworking-indexvni/index.html>.
- [7] J. Slovak, M. Herrmann, W. Schairer, E. Torren go, K. Pulverer, A. Napoli, and U. Habel, “Aware optical networks: Leaving the lab,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 2, pp. A134–A143, 2019.
- [8] “Infinera 800G,” <https://www.infinera.com/infinera-announces-ice6-the-next-generation-infinite-capacity-engine-featuring-800g-waves/>.
- [9] “Ciena 800G,” <https://www.ciena.com/insights/articles/Ciena-unveilsWaveLogic-5-800G-and-so-much-more.html>
- [10] K. Sugihara, K. Ishii, K. Dohi, K. Kubo, T. Sugihara, and W. Matsumoto, “Scalable SD-FEC for efficient next-generation optical networks,” in *ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication*. VDE, 2016, pp. 1–3.
- [11] M. Torbatian, D. Chan, H. H. Sun, S. Thomson, and K.-T. Wu, “Distribution matching for probabilistic constellation shaping with an arbitrary input/output alphabet,” May 16, 2019, uS Patent App. 16/152,353.
- [12] D. Piloni, L. Bertignono, A. Nespola, F. Forghieri, and G. Bosco, “Comparison of probabilistically shaped 64QAM with lower cardinality uniform constellations in long-haul optical systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 2, pp. 501–509, 2017.
- [13] A. Ferrari, A. Napoli, J. K. Fischer, N. M. S. d. Costa, A. D’Amico, J. Pedro, W. Forsysiak, E. Pincemin, A. Lord, A. Stavdas, J. P. Fernandez-Palacios Gimnez, G. Roelkens, N. Calabretta, S. Abrate, B. Sommerkorn-Krombholz, and V. Curri, “Assessment on the achievable throughput of multi-band itu-t g.652.d fiber transmission systems,” *Journal of Lightwave Technology*, pp. 1–1, 2020.
- [14] R. Van Uden, R. A. Correa, E. A. Lopez, F. Huijskens, C. Xia, G. Li, A. Schulzgen, H. De Waardt, A. Koonen, and C. Okonkwo, “Ultra-high- density spatial division multiplexing with a few-mode multicore fibre,” *Nature Photonics*, vol. 8, no. 11, p. 865, 2014.
- [15] T. Kobayashi, M. Nakamura, F. Hamaoka, K. Shibahara, T. Mizuno, A. Sano, H. Kawakami, A. Isoda, M. Nagatani, H. Yamazaki et al., “1- Pb/s (32 SDM/46 WDM/768 Gb/s) C-band dense SDM transmission over 205.6-km of single-mode heterogeneous multi-core fiber using. 6-Gbaud PDM-16QAM channels,” in *Optical Fiber Communication Conference*. OSA, 2017, pp. Th5B–1.
- [16] Y. Pointurier, “Design of low-margin optical networks,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 1, pp. A9–A17, 2017.
- [17] A. Napoli, M. M. Mezghanni, D. Rafique, V. A. Sleiffer, T. Rahman, B. Spinnler, S. Calabro, and M. Bohn, “Novel DAC digital pre-emphasis` algorithm for next-generation flexible optical

transponders,” in Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2015, pp. Th3G–6.

[18] Y. Yoffe, G. Khanna, E. Wohlgenuth, E. de Man, B. Spinnler, N. Hanik, A. Napoli, and D. Sadot, “Low-resolution digital pre-compensation enabled by digital resolution enhancer,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 1543–1551, 2019.

[19] P. W. Berenguer, M. Nolle, L. Molle, T. Raman, A. Napoli, C. Schubert, and J. K. Fischer, “Nonlinear digital pre-distortion of transmitter components,” *Journal of light wave technology*, vol. 34, no. 8, pp. 1739–1745, 2015.

[20] A. Napoli, M. M. Mezghanni, S. Calabro, R. Palmer, G. Saathoff, and B. Spinnler, “Digital predistortion techniques for finite extinction ratio IQ Mach–Zehnder modulators,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 19, pp. 4289–4296, 2017.

[21] J. C. M. Diniz, F. Da Ros, E. P. da Silva, R. T. Jones, and D. Zibar, “Optimization of DP-M-QAM transmitter using cooperative coevolutionary genetic algorithm,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 12, pp. 2450–2462, 2018.

[22] G. Khanna, S. Calabro, B. Spinnler, E. De Man, and N. Hanik, “Joint adaptive pre compensation of transmitter I/Q skew and frequency response for high order modulation formats and high baud rates,” in Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2015, pp. M2G–4.

[23] “Infinera 600G,” <https://www.infinera.com/infinera-sets-highest-performance-600g-transmission-record/>

[24] S. Savory, A. Stewart, S. Wood, G. Gavioli, M. Taylor, R. Killey, and P. Bayvel, “Digital equalisation of 40Gbit/s per wavelength transmission over 2480km of standard fibre without optical dispersion compensation,” in 2006 European Conference on Optical Communications. IEEE, 2006, pp. 1–2.

[25] J. C. Geyer, C. R. Fludger, T. Duthel, C. Schulien, and B. Schmauss, “Efficient frequency domain chromatic dispersion compensation in a coherent polmux QPSK-receiver,” in Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2010, p. OWV5.

[26] W. Shieh and K.-P. Ho, “Equalization-enhanced phase noise for coherent-detection systems using electronic digital signal processing,” *Optics Express*, vol. 16, no. 20, pp. 15 718–15 727, 2008.

[27] X. Chen, S. Chandrasekhar, S. Randel, G. Raybon, A. Adamiecki, P. Pupalakakis, and P. J. Winzer, “All-electronic 100-GHz bandwidth digital-to-analog converter generating PAM signals up to 190 gbaud,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 411–417, 2017.

[28] S. Yamamoto, N. Edagawa, H. Taga, Y. Yoshida, and H. Wakabayashi, “Analysis of laser phase noise to intensity noise conversion by chromatic dispersion in intensity modulation and direct detection optical fiber. transmission,” *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, no. 11, pp. 1716–1722, 1990.

[29] A. Kakkar, J. R. Navarro, R. Schatz, H. Louchet, X. Pang, O. Ozolins, G. Jacobsen, and S. Popov, “Comprehensive study of equalizationenhanced phase noise in coherent optical systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 23, pp. 4834–4841, 2015.

[30] X. Zhou and L. Nelson, “Advanced DSP for 400 gb/s and beyond optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 16, pp. 2716– 2725, 2014.

[31] A. Kakkar, M. I. Olmedo, O. Ozolins, J. R. Navarro, X. Pang, R. Schatz, H. Louchet, G. Jacobsen, and S. Popov, “Overcoming EEPN in coherent transmission systems,” in 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). IEEE, 2016, pp. 1–2.

[32] G. Goldfarb, “Apparatus for compensating optical signal impairments,” Dec. 30, 2014, uS Patent 8,923,707.

[33] R. Going, M. Lauermann, R. Maher, H. Tsai, M. Lu, N. Kim, S. Corzine, P. Studenkov, J. Summers, A. Hosseini et al., “Multi-channel InP based coherent PICs with hybrid integrated SiGe electronics operating up to 100 GBd, 32QAM,” in 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2017, pp. 1–3.

- [34] D. Krause, A. Awadalla, A. S. Karar, H. Sun, and K.-T. Wu, "Design considerations for a digital subcarrier coherent optical modem," in Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2017, pp. Th1D–1.
- [35] T. M. Cover and J. A. Thomas, Elements of information theory. John Wiley & Sons, 2012.
- [36] F. R. Kschischang and S. Pasupathy, "Optimal nonuniform signaling for Gaussian channels," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 39, no. 3, pp. 913–929, 1993.
- [37] F. Buchali, F. Steiner, G. Bocherer, L. Schmalen, P. Schulte, and W. Idler, "Rate adaptation and reach increase by probabilistically shaped 64-QAM: An experimental demonstration," Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 7, pp. 1599–1609, 2016.
- [38] N. S. Loghin, J. Zollner, B. Mouhouche, D. Anzorregui, J. Kim, and S.-I. Park, "Non-uniform constellations for ATSC 3.0," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 62, no. 1, pp. 197–203, 2016.
- [39] P. Schulte and G. Bocherer, "Constant composition distribution matching," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 62, no. 1, pp. 430–434, 2015.
- [40] C. Pan and F. R. Kschischang, "Probabilistic 16-QAM shaping in WDM systems," Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 18, pp. 4285–4292, 2016.
- [41] T. Cover, "Enumerative source encoding," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 19, no. 1, pp. 73–77, 1973.
- [42] B. Spinnler, "Equalizer design and complexity for digital coherent receivers," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 16, no. 5, pp. 1180–1192, 2010.
- [43] A. Alvarado, E. Agrell, D. Lavery, and P. Bayvel, "LDPC codes for optical channels: Is the "FEC limit" a good predictor of post-FEC BER?" in Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2015, pp. Th3E–5.
- [44] L. Schmalen, V. Aref, J. Cho, D. Suikat, D. Rosener, and A. Leven, "Spatially coupled soft-decision error correction for future light wave systems," Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 5, pp. 1109–1116, 2014.
- [45] L. Schmalen, D. Suikat, D. Rosener, and A. Leven, "Evaluation of left-terminated spatially coupled LDPC codes for optical communications," in 2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2014, pp. 1–3.
- [46] D. Chang, F. Yu, Z. Xiao, N. Stojanovic, F. N. Hauske, Y. Cai, C. Xie, L. Li, X. Xu, and Q. Xiong, "LDPC convolutional codes using layered decoding algorithm for high-speed coherent optical transmission," in OFC/NFOEC. IEEE, 2012, pp. 1–3.
- [47] I. B. Djordjevic, M. Arabaci, and L. L. Minkov, "Next generation FEC for high-capacity communication in optical transport networks," Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 16, pp. 3518–3530, 2009.
- [48] T. Richardson and R. Urbanke, "The capacity of low-density parity check codes under message-passing decoding," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 47, no. 2, pp. 599–618, 2001.
- [49] E. Abbess, A. Karar, H. Sun, A. Awadalla, P. Mertz, X. Yang, L. Zong, J. Rahn, and K. Wu, "Capacity improvement using dual carrier FEC gain sharing in submarine optical communications," in Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2016, pp. Th2A–51.
- [50] J. Rahn, K. Croussore, G. Goldfarb, S. Kumar, M. Mitchell, V. Dominic, B. Taylor, Y. Park, V. Adavani, V. Shyamsundar et al., "Transmission improvement through dual-carrier FEC gain sharing," in 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC). IEEE, 2013, pp. 1–3.
- [51] M. N. Tehrani, M. Torbatian, H. Sun, P. Mertz, and K.-T. Wu, "A novel nonlinearity tolerant super-gaussian distribution for probabilistically shaped modulation," in 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2018, pp. 1–3.
- [52] J. Jang and K. B. Lee, "Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems," IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 21, no. 2, pp. 171–178, 2003.

- [53] V. Lal et al., “1.6 Tbps coherent 2-channel transceiver using a monolithic Tx/Rx InP PIC and single SiGe ASIC,” in 2020 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC). IEEE, 2020, pp. 1–3.
- [54] D. J. Elson, G. Saavedra, K. Shi, D. Semrau, L. Galdino, R. Killey, B. C. Thomsen, and P. Bayvel, “Investigation of bandwidth loading in optical fibre transmission using amplified spontaneous emission noise,” *Optics express*, vol. 25, no. 16, pp. 19 529–19 537, 2017.
- [55]. MPLS\_VPN .PPT, SONET OTN GMPLS PPT. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών Δρ. Αντώνης Μπόγρης
- [56].[Ethernet-Technology-Consortium 800G-Specification r1.1.pdf](#)  
([ethernettechnologyconsortium.org](#))
- [57].[https://www.ciena.com/about/newsroom/press-releases/ciena-unveils-wavelogic-6?utm\\_source=Blog&utm\\_medium=Social&utm\\_term=MetaQuote](https://www.ciena.com/about/newsroom/press-releases/ciena-unveils-wavelogic-6?utm_source=Blog&utm_medium=Social&utm_term=MetaQuote)
- [58]. Optical Networks A Practical Perspective Third Edition (Rajiv Ramaswami -Kumar N. Sivarajan - Galen H. Sasaki)
- [59].[https://www.ieee802.org/3/B400G/public/21\\_05/dambrosia\\_b400g\\_01b\\_210524.pdf](https://www.ieee802.org/3/B400G/public/21_05/dambrosia_b400g_01b_210524.pdf)
- [60]. <https://www.accton.com/Technology-Brief/towards-800g-and-1600g-ethernet/>
- [61]. <https://www.nextplatform.com/2020/04/09/hyperscalers-set-the-pace-for-800g-ethernet/>
- [62]. [SN Series » SENKO Advanced Components, Inc.](#)
- [63]. Connection-oriented Networks SONET/SDH, ATM, MPLS and OPTICAL NETWORKS Harry G. Perros 2.800G DSP ASIC Design Using Probabilistic Shaping and Digital Sub-Carrier Multiplexing May 2020 *Journal of Lightwave Technology* PP (99):1-1 DOI:10.1109/JLT.2020.2996188 LicenseCC BY 4.0
- [64].[https://www.researchgate.net/publication/341558660\\_800G\\_DSP\\_ASIC\\_Design\\_Using\\_Probabilistic\\_Shaping\\_and\\_Digital\\_Sub-Carrier\\_Multiplexing](https://www.researchgate.net/publication/341558660_800G_DSP_ASIC_Design_Using_Probabilistic_Shaping_and_Digital_Sub-Carrier_Multiplexing)
- [65].[https://eclass.hua.gr/modules/document/file.php/DIT126/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A6%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%99%CE%95%CE%A3\\_2017-2018.pdf](https://eclass.hua.gr/modules/document/file.php/DIT126/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A6%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%99%CE%95%CE%A3_2017-2018.pdf)
- [66] [https://www.ieee802.org/3/df/proj\\_doc/objectives\\_P802d3df\\_220317.pdf](https://www.ieee802.org/3/df/proj_doc/objectives_P802d3df_220317.pdf)