

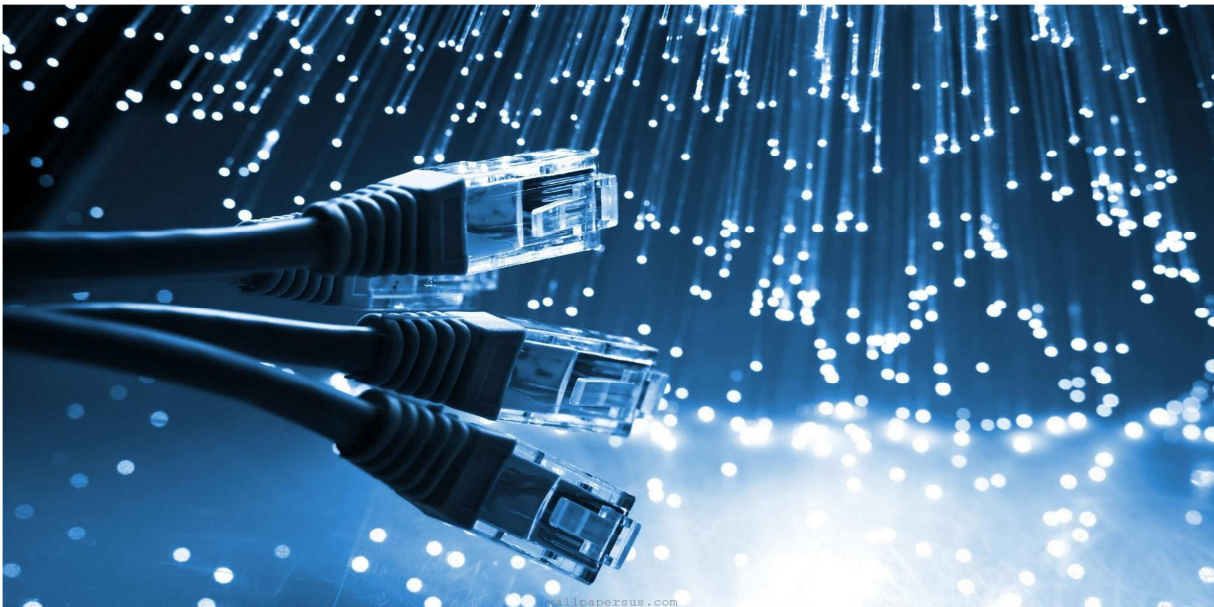


ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



Πτυχιακή εργασία

## «Gigabit Οπτικά Παθητικά Δίκτυα»



Του φοιτητή  
**Βαλιού Κωνσταντίνου – Δημόκριτου**  
Αριθμός Μητρώου: **03/2193**

Επιβλέπων καθηγητής  
**Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης**

Θεσσαλονίκη 2013



ΑΤΕΙΘ  
ΣΤΕΦ - Πληροφορική

## Τίτλος

«Gigabit Οπτικά Παθητικά Δίκτυα»

Βαλιός Κωνσταντίνος – Δημόκριτος

A.M. 03-2193

Επιβλέπων καθηγητής

**Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης**



## Ευχαριστίες

---

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη ηθική και οικονομική συμπαράσταση που μου επέδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και για τη στήριξη και κατανόηση στις δυσκολίες που εμφανίστηκαν

Στον κύριο Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη οφείλω τις θερμότερες ευχαριστίες μου για την καθοδήγηση, υποστήριξη και βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης της παρούσας πτυχιακής

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την Κωνσταντίνα Ξανθίδου για την επιμέλεια, τον φιλολογικό έλεγχο και τη διόρθωση των κειμένων

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα τεχνολογίας GPON. Περιγράφονται η μορφή, η λειτουργία των οπτικών ινών και οι χρήσεις τους. Έπειτα αναφέρονται τα είδη δικτύων που εξυπηρετούν, οι τεχνολογίες πολύπλεξης που εφαρμόζονται και κάποιες προηγούμενες υλοποιήσεις δικτύου οπτικών ινών. Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος επικοινωνίας πηγής και προορισμού, το υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης καθώς και το πλήρες μήνυμα που αποστέλλεται από κάθε πλευρά. Ακολουθεί η ανάλυση του τρόπου δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης στα παθητικά δίκτυα GPON, ώστε να γίνεται καλύτερη αξιοποίηση του καναλιού ανόδου και καθόδου και η επεξήγηση λειτουργίας μερικών αλγορίθμων που το επιτυγχάνουν. Τέλος, παρουσιάζονται η καθυστέρηση, η δικαιοσύνη και η χρησιμοποίηση ως παράμετροι αξιολόγησης των αλγορίθμων, τρόποι για την ενίσχυση της ασφάλειας, τα τελικά συμπεράσματα καθώς και η μετέπειτα εξέλιξη των παθητικών δικτύων.

# Abstract

This present thesis is presenting the modern optical networks of the GPON technology. It is describing the form, the operating function and the use of the optical fibers. After the types of networks they serve are indicating, the multiplexing technologies that applied and some previous implementations of fiber optic network. Then discusses how source and destination are communicating, the transmission convergence sublayer and the whole message sent by each side. Below is an analysis of how dynamic bandwidth assignment on passive GPON networks works to make better use of the upstream and downstream channel and the explanation of a few algorithms who achieve that. Finally we present the delay, fairness and utilization as some of the evaluation parameters of the algorithms, methods to enhance the security and the final conclusions and subsequent evolution of passive networks.





---

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι : Οπτική Ίνα**

<b>1.1</b>	Αρχή λειτουργίας.....	7
1.1.1.	Πολύτροπες οπτικές ίνες (Multimode fiber optics).....	8
1.1.2.	Μονότροπες οπτικές ίνες (single mode fiber optics).....	10
<b>1.2</b>	Χαρακτηριστικά και επιδόσεις.....	11
<b>1.3</b>	Τύποι οπτικών ινών.....	12
<b>1.4</b>	Χρήσεις – Παραδείγματα.....	14
<b>1.5</b>	Κατασκευή Οπτικών Ινών.....	16
<b>1.6</b>	Τύποι Συνδετήρων.....	18
	• Συνδετήρας (Connector) SMA.....	18
	• Συνδετήρας (Connector) ST.....	20
	• Συνδετήρας (Connector) ίνας φυσικής επαφής (FC/PC).....	22
	• Συνδετήρας (Connector) Mini BNC.....	24
	• Δικωνικός συνδετήρας.....	24
	• Συνδετήρας (Connector) SC.....	25

- 
- 
- Συνδετήρας (Connector) FSD ή MIC.....27
- Συνδετήρας (Connector) πλαστικής ίνας.....27

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ II : Οπτικά Δίκτυα**

2.1	Εφαρμογές Οπτικών Δικτύων.....	29
2.2	Τύποι γεωγραφικών δικτύων με οπτικές ίνες.....	30
	• Οπτικά δίκτυα μεγάλης απόστασης (long haul networks).....	30
	• Οπτικά δίκτυα κορμού (back haul networks).....	31
	• Οπτικά δίκτυα πρόσβασης (access networks).....	33
2.2	Πλεονεκτήματα και περιορισμοί δικτύων οπτικών ινών.....	35
2.4	Η εξέλιξη των οπτικών ινών .....	39

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ III : Πολύπλεξη Οπτικής Ίνας**

3.1	Πολύπλεξη μήκους κύματος.....	42
-----	-------------------------------	----

3.2 Πυκνή Πολύπλεξη.....	44
3.3 Παθητικά Οπτικά Δίκτυα Πολύπλεξης με Διαίρεση Μήκους Κύματος.....	45
3.4 Αυτόματο Κλείδωμα Μήκους Κύματος.....	46

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV : Οπτικά Παθητικά Δίκτυα**

4.1 Γενικά.....	50
4.2 Τεχνολογίες Οπτικών Παθητικών Δικτύων.....	53
➤ APON.....	53
➤ EPON.....	58
➤ GPON.....	61
4.3 Σύγκριση τεχνολογιών APON, EPON και GPON.....	63

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ V : Δίκτυα GPON**

<b>5.1</b>	Γενικά.....	66
<b>5.2</b>	Υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης (TC Layer).....	67
<b>5.3</b>	Βασικές αρχές υποστρώματος μετάδοσης GPON.....	68
<b>5.4</b>	Πρωτόκολλο MAC.....	69
<b>5.5</b>	Διαχείριση QoS σε δίκτυα PON.....	72
<b>5.6</b>	Βάση δεδομένων MIB (Management Information Base).....	76
<b>5.7</b>	Κανάλι, μήνυμα και αρχές του πρωτοκόλλου.....	77
<b>5.8</b>	Έλεγχος ροής και διόρθωση λαθών.....	80
<b>5.9</b>	Αναλυτικότερα τα πεδία του TC.....	82
	➤ Προς τα κάτω ζεύξη.....	83
	➤ Προς τα άνω ζεύξη.....	90

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI : Δυναμική Ανάθεση Εύρους Ζώνης**

<b>6.1</b>	Δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης.....	95
<b>6.2</b>	Ανάλυση τύπων TCONT.....	101
<b>6.3</b>	Ανάθεση DBA με την έννοια του κύκλου.....	102
<b>6.4</b>	Αλγόριθμος Flow-Aware MAC Protocol.....	104
<b>6.5</b>	Αλγόριθμος DWFQ-MDBA.....	108
<b>6.6</b>	DBA βασισμένο σε bursty Multi-Service Traffic.....	110
<b>6.7</b>	Ένα νέο πρωτόκολλο MAC για την εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών.....	112
<b>6.8</b>	Αλγόριθμος προγραμματισμού με προσαρμόσιμα ενδιάμεσα χρόνου βασισμένο στο offset (Offset-based scheduling with flexible intervals).....	117
<b>6.9</b>	Εκτίμηση ελάχιστου εγγυημένου περιεχόμενου T-Cont - Minimum Guaranteed T-Cont Content Estimation (MGTC) .....	120
<b>6.10</b>	Fair Resource Distribution Within the Flexible WDMA/TDMA.....	126

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII : Αξιολόγηση Αλγορίθμων DBA**

7.1 Παράμετροι Αξιολόγησης Αλγόριθμου DBA.....	136
7.2 Ασφάλεια .....	142
7.3 Συμπεράσματα – Εξέλιξη.....	144
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>153</b>

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

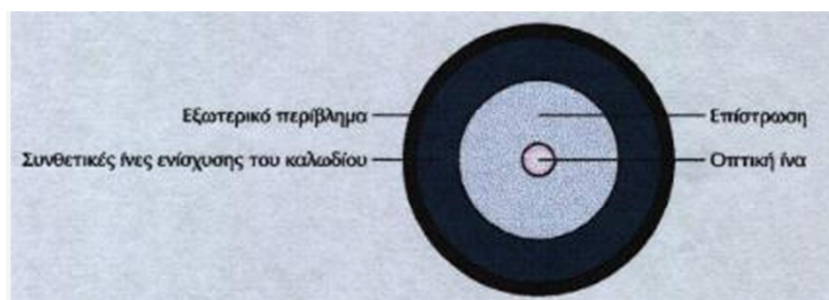
## Οπτική ίνα

---

Οπτική ίνα (ή ίνα) είναι γυαλί ή πλαστική ίνα που φέρει φως κατά μήκος του. Οπτική ινών είναι η σύνθεση εφαρμοσμένης επιστήμης και εφαρμοσμένης μηχανικής με το σχέδιο και την εφαρμογή των οπτικών ινών. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως στη οπτική επικοινωνία, η οποία επιτρέπει τη μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερα ποσοστά στοιχείων από άλλες μορφές επικοινωνιών. Οι ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων επειδή τα σήματα ταξιδεύουν κατά μήκος τους με λιγότερες απώλειες και είναι ανεξάρτητες από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβάσεις. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται επίσης στη διαμόρφωση αισθητήρων και σε ποικίλες άλλες εφαρμογές.<sup>1</sup>

### 1.1 Αρχή Λειτουργίας

Μια οπτική ίνα είναι μια κυλινδρική διηλεκτρικός κυματοδηγός που διαβιβάζει το φως κατά μήκος του άξονά της, με τη διαδικασία της συνολικής εσωτερικής αντανάκλασης. Η ίνα αποτελείται από τον πυρήνα (core) και από το στρώμα επίστρωσης (cladding) όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Για να περιορίσει το οπτικό σήμα στον πυρήνα, ο δείκτης διάθλασης από τον πυρήνα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από αυτόν της επίστρωσης. Το όριο μεταξύ του πυρήνα και της επίστρωσης μπορεί να είναι απότομο στη μονότροπη ίνα ή βαθμιαίο στην πολύτροπη.



Σχήμα 1 - Εγκάρσια τομή οπτικής ίνας

Την επίστρωση περιβάλλει δέσμη συνθετικών ινών, οι οποίες έχουν ως στόχο την προστασία της ίνας από πιθανά τραβήγματα, όπου είναι επικίνδυνο να σπάσει το γυαλί, το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα της ίνας. Όλα τα παραπάνω περικλείονται σε εξωτερικό πλαστικό περίβλημα όμοιο με αυτό των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών.

Η εκπομπή του οπτικού σήματος σε οπτική ίνα γίνεται από πηγή LED (Light Emmiting Diode) ή LASER (Light Amplification by Stimulated Emission off Radiation), και τα μήκη κύματος του φωτός, που η οπτική ίνα είναι σχεδιασμένη να μεταφέρει, ποικίλουν από 800nm μέχρι 1500nm.

Οι οπτικές ίνες διαφοροποιούνται κατ' αρχήν, από τον τρόπο μετάδοσης του σήματος σε αυτές. Η πρώτη βασική διάκριση είναι μεταξύ των πολύτροπων και μονότροπων οπτικών ινών.

### 1.1.1 Πολύτροπες οπτικές ίνες (Multimode fiber optics)

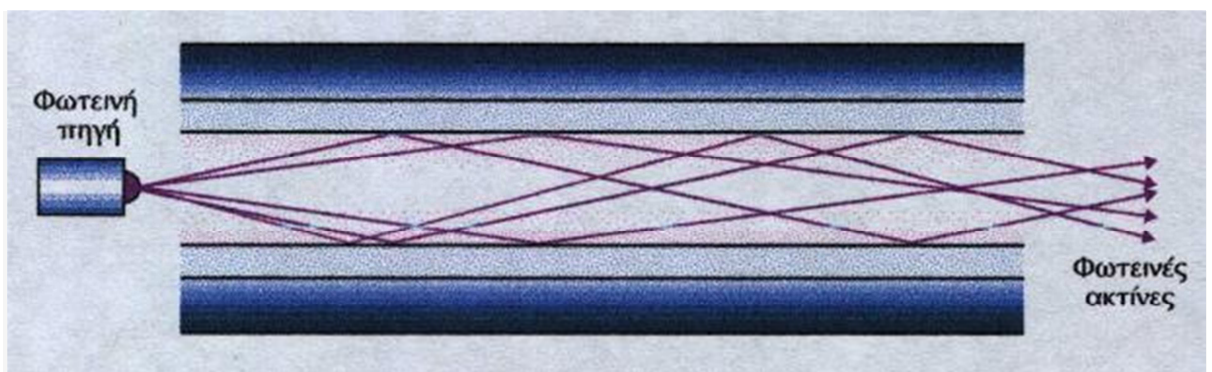
Ο τρόπος αναφοράς των μεγεθών για τις οπτικές ίνες είναι ο εξής: αναφέρουμε πρώτα τη διάμετρο του πυρήνα (γυαλιού) και στη συνέχεια τη



διάμετρο της επίστρωσης (cladding). Οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών γίνονται σε  $10^{-6}$  μέτρα. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν τυπικά μεγέθη 50μm/125μm, 62,5/125, 85/125 ή 100/140. Ο συνηθέστερος τύπος, ο οποίος κυκλοφορεί, είναι ο 62,5/125. Η ολική διάμετρος της οπτικής ίνας συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτικών συνθετικών ινών και του εξωτερικού περιβλήματος φτάνει τα 900μm. Η αρχή μετάδοσης στην πολύτροπη οπτική ίνα είναι ότι οι διάφορες ακτίνες του οπτικού σήματος ανάλογα με την είσοδο τους στην οπτική ίνα ταξιδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες, όπως φαίνεται στα σχήματα. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης ονομάζεται πολύτροπος (multimode), επειδή έχουμε πολλούς δρόμους μετάδοσης, που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: τις διακριτού βήματος (step index) και τις βαθμιαίου βήματος (graded index).

➤ Οπτική ίνα διακριτού δείκτη (step index)

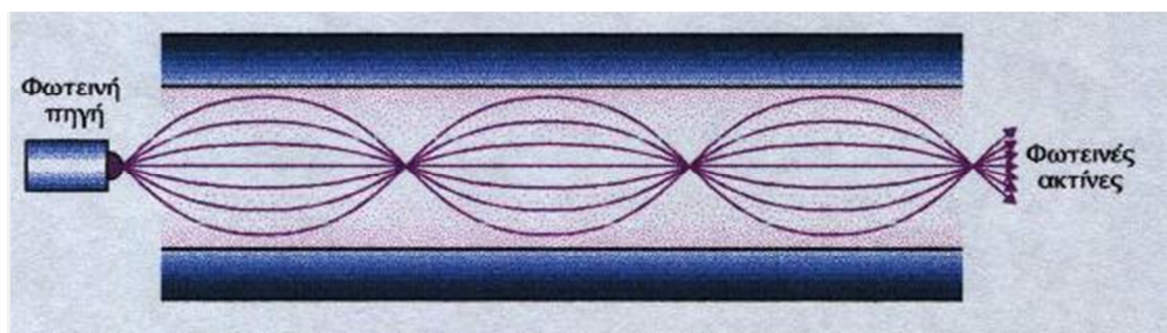
Στις ίνες αυτές συμβαίνει απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης μεταξύ της κεντρικής ίνας και του υλικού επίστρωσης. Στην περίπτωση αυτή, η πορεία των ακτινών εμφανίζεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2 – Ίνα διακριτού δείκτη

➤ Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη (graded index)

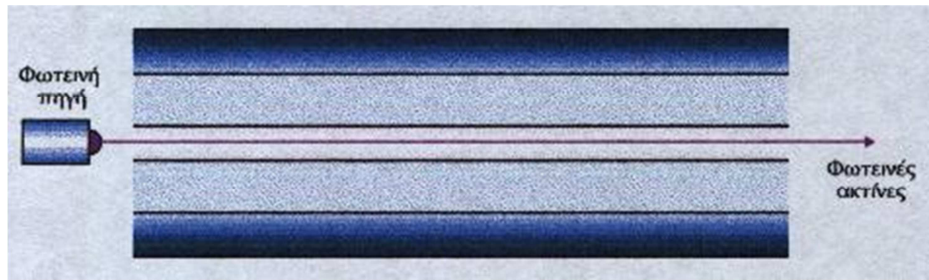
Οι ίνες αυτές χαρακτηρίζονται από βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης του υλικού της κεντρικής ίνας. Συμβαίνει βαθμιαία μείωση όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς την εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια ίνα απεικονίζεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3 – Ίνα βαθμιαίου δείκτη

### 1.1.2 Μονότροπες οπτικές ίνες (single mode fiber optics)

Στις μονότροπες οπτικές ίνες η διάμετρος της κεντρικής ίνας είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου το επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε έναν μόνο δυνατό τρόπο μετάδοσης του οπτικού σήματος, τον αξονικό. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια οπτική ίνα φαίνεται στο σχήμα 4. Η κεντρική ίνα στις μονότροπες οπτικές ίνες έχει διάμετρο από 5μm έως 10μm με συνηθέστερη τιμή τα 8,3 μm.



Σχήμα 4 - Μονότροπη οπτική ίνα

## 1.2 Χαρακτηριστικά και επιδόσεις

Οι επιδόσεις μιας οπτικής ίνας συνδέονται με τον τρόπο μετάδοσης του σήματος στην ίνα, με το αν, δηλαδή, η ίνα είναι πολύτροπη ή μονότροπη και με το μήκος κύματος του φωτός, που εκπέμπεται από την πηγή<sup>8</sup>. Στις μονότροπες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται μήκη κύματος μεταξύ των 1310nm και των 1550nm. Στις πολύτροπες οπτικές ίνες έχουμε μήκη κύματος από 850nm έως 1300nm. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι για δεδομένη εγκατάσταση θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο ένας τρόπος μετάδοσης και μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος από τις πηγές σε όλη την έκταση της εγκατάστασης.

Οι οπτικές ίνες μπορούν να μεταφέρουν σήματα με πολύ μεγάλο εύρος ζώνης σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ μικρή εξασθένιση του σήματος. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αποστάσεις, που υπερβαίνουν τα 3Km, ενώ οι μονότροπες οπτικές ίνες μπορούν να υπερβούν τα 10 Km.

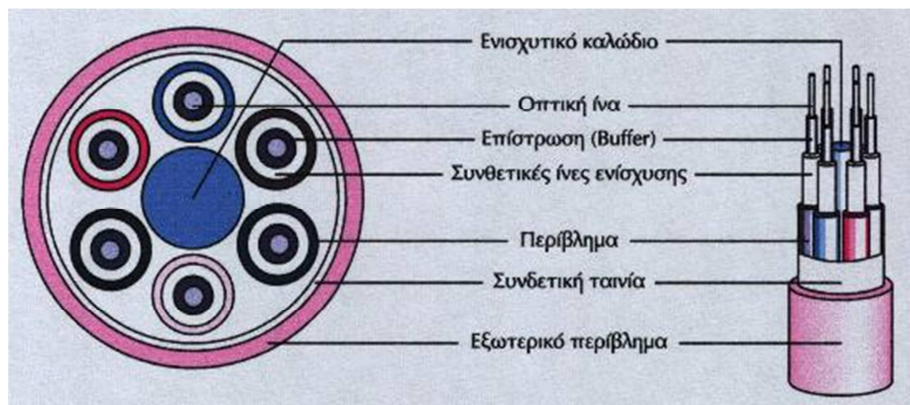
Υπάρχουν όμως, και άλλοι παράγοντες, οι οποίοι περιορίζουν τις παραπάνω αποστάσεις μετάδοσης. Τέτοιοι παράγοντες είναι το εύρος ζώνης της πηγής και του δέκτη των σημάτων σε μια οπτική ίνα και η χρωματική διασπορά του μεταδιδόμενου σήματος μέσα στην οπτική ίνα, η οποία διασπορά αυξάνεται με την απόσταση και εξασθενίζει το σήμα. Επίσης, επιβαρυντικός παράγοντας

είναι η χρήση συνδέσμων και διακλαδωτών στην πορεία των οπτικών ινών. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στις πολύτροπες οπτικές ίνες είναι πιο ανεκτό να χρησιμοποιήσουμε συνδετήρες και διακλαδωτές απ' ό τι στις μονότροπες. Επίσης, στις πολύτροπες οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλού κόστους πηγές LED, ενώ οι μονότροπες οδηγούνται συνήθως από πηγή LASER. Τυπική τιμή εξασθένισης σήματος για μια 62,5/125 πολύτροπη οπτική ίνα είναι 3,5 dB/Km για σήμα με μήκος κύματος 850 nm και 1.0 dB/Km για μήκος κύματος 1300nm. Τυπικό μέγεθος εξασθένισης σήματος για μονότροπη οπτική ίνα είναι 0,5 dB/Km στα 1310 nm και 0,4 dB/Km στα 1550nm.

### 1.3 Τύποι οπτικών ινών

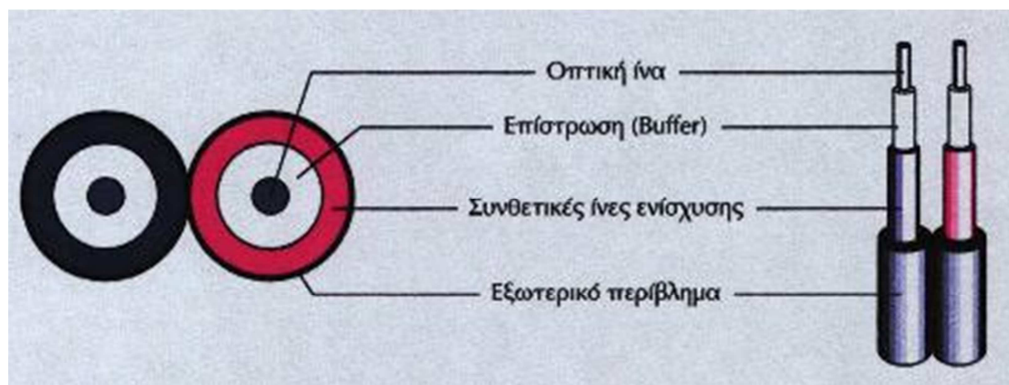
Τα καλώδια οπτικών ινών περιέχουν από 1 έως 36 οπτικές ίνες. Τα πιο συνηθισμένα είναι τα καλώδια με ζυγό αριθμό οπτικών ινών για την επικοινωνία των αμφίδρομων (full-duplex) κυκλωμάτων<sup>9</sup>. Θα ξεχωρίσουμε δυο τύπους οπτικών ινών ως προς την κατασκευή τους.

- Στην πρώτη περίπτωση, έχουμε σε κάθε οπτική ίνα και εξωτερικά από την επίστρωση συνθετικές ίνες και εξωτερικό μονωτικό περίβλημα. Μέσα στο καλώδιο υπάρχουν πολλές τέτοιες ίνες, όπου η κάθε ίνα αποτελεί και ένα ξεχωριστό καλώδιο. Μέσα στο καλώδιο περιέχονται εκτός από καλώδια οπτικών ινών και καλώδια, τα οποία χρησιμεύουν για ενίσχυση και στρογγυλοποίηση του όλου σχήματος. Όλα αυτά τα καλώδια, τέλος, περικλείονται από εξωτερικό περίβλημα. Αυτή η κατασκευή είναι γνωστή ως Tight Buffer. Στο σχήμα 5 εμφανίζεται ανάλογη κατασκευή καλωδίου οπτικών ινών



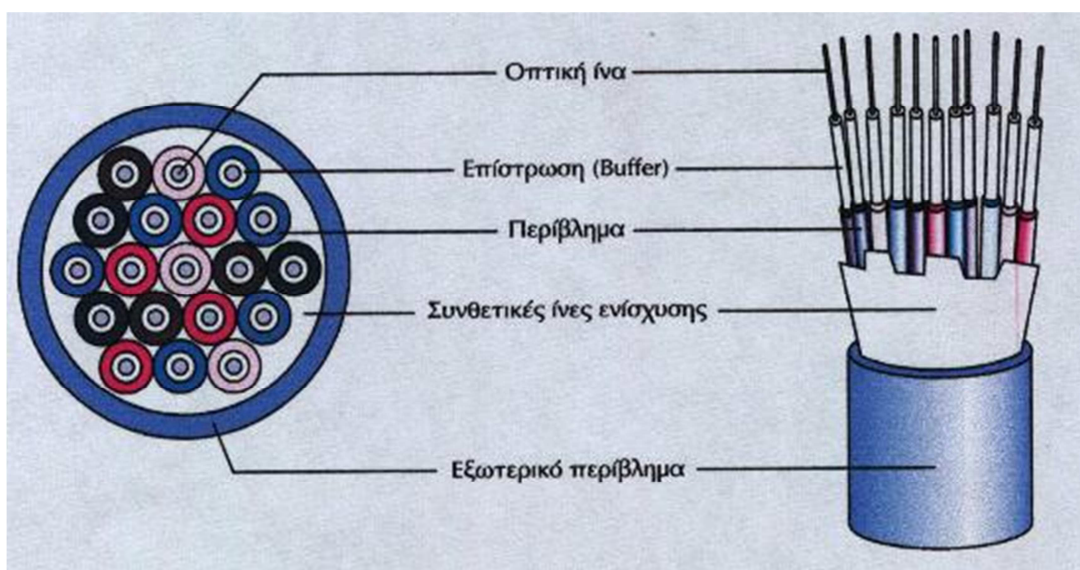
Σχήμα 5 - Καλώδιο οπτικών ινών ( Tight Buffer)

Παρόμοιας κατασκευής είναι τα εύκαμπτα καλώδια, που χρησιμοποιούμε για τη σύνδεση με τον ενεργό εξοπλισμό (optical patch cords). Αυτά αποτελούνται από δυο καλώδια ενωμένα στο εξωτερικό τους, το κάθε ένα από τα οποία περιέχει οπτική ίνα από πλαστικό. Στο σχήμα 6 εμφανίζεται ένα οπτικό καλώδιο σύνδεσης.



Σχήμα 6 - Οπτικό καλώδιο (Patch cord)

- Στη δεύτερη περίπτωση, έχουμε τις οπτικές ίνες με την επίστρωση τους να είναι τοποθετημένες ελεύθερα μέσα στο καλώδιο και να περικλείονται από εξωτερικό περίβλημα, αφού πρώτα τοποθετηθεί μέσα στο καλώδιο επίστρωση από συνθετικές ίνες για την ανθεκτικότητα του καλωδίου. Αυτή η κατασκευή είναι γνωστή ως Loose Buffer. Στο σχήμα 7 εμφανίζεται ανάλογη κατασκευή καλωδίου οπτικών ινών.



Σχήμα 7 - Καλώδιο οπτικών ινών ( Loose Buffer )

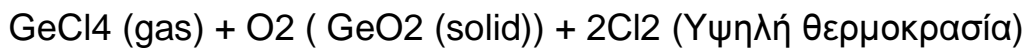
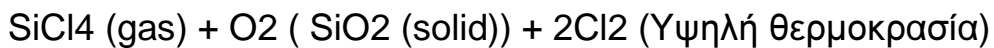
## 1.7 Χρήσεις – Παραδείγματα

Τα καλώδια οπτικών ινών, τα οποία συνήθως περιέχουν δεσμίδες οπτικών ινών, χρησιμοποιούνται κυρίως από τους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς για επίγειες και υποθαλάσσιες συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων, αντικαθιστώντας τόσο τις γραμμές ομοαξονικών καλωδίων όσο και τις επίγειες και δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις<sup>1</sup>. Τα τελευταία χρόνια έχουν ποντισθεί πολλά καλώδια οπτικών ινών, με χωρητικότητα, η οποία ξεπερνά τα 30.000 κυκλώματα φωνής, για τη διασύνδεση ηπείρων. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν το καλώδιο BSFOCS, που εκτείνεται στην περιοχή της Μαύρης θάλασσας και συνδέει τη Βουλγαρία, την Ουκρανία και την Ρωσία με το καλωδιακό σύστημα SEA - ME – WE 3 (South East Asia – Middle East – West Europe), που ξεκινά από τη Δυτική Ευρώπη (Γερμανία, Μεγ. Βρετανία), περνά από τα στενά του Γιβραλτάρ στη Μεσόγειο (Ιταλία, Ελλάδα, Κύπρος) συνεχίζει από τα στενά του Σουέζ προς την Ασία (Ινδία, Σιγκαπούρη) και χωρίζεται σε δύο μέρη, με το ένα άκρο να καταλήγει στην Ιαπωνία και το άλλο στην Αυστραλία και το καλώδιο ADRIA-1, που συνδέει την Ελλάδα (Κέρκυρα), την Αλβανία (Durrës) και την Κροατία (Dubrovnik).

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται, όπως θα δούμε και αναλυτικότερα παρακάτω, από ιδιωτικές εταιρίες σε τοπικά δίκτυα, σε πανεπιστημιακά δίκτυα κορμού, σε δίκτυα ευρείας περιοχής, σε δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης, σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε ασφάλεια μετάδοσης, όπως οι στρατιωτικές και τέλος, σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου υπάρχει υψηλός βιομηχανικός θόρυβος, στον οποίο οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν ανοσία.

## 1.5 Κατασκευή Οπτικών Ινών

Η βασική χημική αντίδραση από την οποία παράγεται το οπτικό γυαλί είναι:



### Υλικά

Οι οπτικές ίνες γυαλιού σχεδόν πάντα γίνονται από πυρίτιο, αλλά μερικά άλλα υλικά, όπως fluorozirconate, fluoroaluminate, και chalcogenide γυαλιά, χρησιμοποιούνται για τις υπέρυθρες εφαρμογές μεγάλου μήκους κύματος. Όπως και άλλα γυαλιά έχουν δείκτη διάθλασης περίπου 1.5. Χαρακτηριστικά η διαφορά μεταξύ του πυρήνα και της επίστρωσης είναι λιγότερο από ένα τοις εκατό.

Μπορεί μεν οι οπτικές ίνες να δημιουργούνται από γυαλί, θα πρέπει να τονιστεί όμως ότι το γυαλί αυτό δεν μπορεί να συγκριθεί, ως προς την καθαρότητά του, με το κοινό γυαλί που συναντάμε σε διάφορα αντικείμενα γύρω μας. Η φύση των δεδομένων που μεταδίδονται, καθώς και οι μεγάλες αποστάσεις που καλύπτουν τα καλώδια αυτά, απαιτούν το υλικό κατασκευής τους να είναι απολύτως διαφανές. Φυσικά αυτό δεν είναι εφικτό σε ποσοστό 100% και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η ισχύς του φωτεινού σήματος μειώνεται σταδιακά. Η δημιουργία μιας οπτικής ίνας πραγματοποιείται σε τρία βήματα, που είναι ο σχηματισμός ενός αρχικού γυάλινου κυλίνδρου, η τομή των ινών από τον κύλινδρο αυτό, καθώς και η δοκιμή για την αντοχή τους, αλλά και για τη σωστή λειτουργία τους.



Στο πρώτο στάδιο, γίνονται όλες οι απαραίτητες χημικές διαδικασίες για τον σχηματισμό του καθαρού γυαλιού, ενώ ειδικός εξοπλισμός αναλαμβάνει να απομακρύνει από τον γυάλινο κύλινδρο όλα τα ξένα σώματα που θα είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της οπτικής ίνας. Όπως αντιλαμβάνεται εύκολα κανείς, πρόκειται για το κυριότερο βήμα για τη δημιουργία των οπτικών ινών. Αφού δημιουργηθεί ο αρχικός κύλινδρος, στη συνέχεια τοποθετείται σε μια συσκευή η οποία έχει το σχήμα πύργου και αναλαμβάνει τη δημιουργία των μικροσκοπικών ινών. Ο πύργος αυτός λιώνει το γυαλί σε θερμοκρασία περίπου 2.300 βαθμών Κελσίου και στη συνέχεια αυτό ρέει κατακόρυφα από μικρές οπές, οπότε και ψύχεται σταδιακά, ώστε να πάρει την τελική μορφή οπτικής ίνας. Ειδικό μηχανισμό ελέγχουν τον σωστό σχηματισμό της, ενώ εξασφαλίζουν ότι η διάμετρος της δεν θα ξεπεράσει το φυσιολογικό όριο. Στο κάτω μέρος του πύργου, συναντάμε μια τροχαλία που αναλαμβάνει την περιέλιξη της οπτικής ίνας σε κυλίνδρους.

Στο τελικό στάδιο, η οπτική ίνα περνά από ένα σύνολο ελέγχων που εξασφαλίζουν ότι είναι σε θέση να διατεθεί προς χρήση, χωρίς να προξενηθούν τυχόν προβλήματα κατά τη χρήση της. Στα τεστ αυτά περιλαμβάνεται ο έλεγχος αντοχής κατά ενδεχόμενης θραύσης, το σωστό της σχήμα αλλά και η μέτρηση της διαφάνειας, καθώς από αυτή εξαρτάται η σωστή μετάδοση του φωτεινού σήματος. Καταγράφεται επίσης η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, η συμπεριφορά της οπτικής ίνας στα διάφορα μήκη κύματος (χρώματα) του φωτός που μεταδίδει, καθώς και οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος στις οποίες δύναται αυτή να λειτουργήσει σωστά. Όταν όλοι αυτοί οι έλεγχοι ολοκληρωθούν επιτυχώς, η οπτική ίνα πλέον διατίθεται στο εμπόριο για χρήση από τις εταιρείες παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.

## 1.6 Τύποι Συνδετήρων

Αρχικά οι συνδετήρες κατασκευάζονταν από συμπαγή ορείχαλκο και προσαρμόζονταν στο εργοστάσιο, οι πρώτοι μοντέρνοι συνδετήρες, προσαρμοζόμενοι στον χώρο εφαρμογής ήταν οι SMA. Υπάρχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ των διάφορων τύπων συνδετήρων. Οι συνδετήρες σχεδόν πάντα συναρμολογούνται χρησιμοποιώντας εποξική κόλλα και δε μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν<sup>11</sup>.

- **Συνδετήρας (Connector) SMA**

Οι συνδετήρες SMA 906 αντιπροσωπεύουν παλιό σχέδιο πρώτης γενιάς που χρησιμοποιείται όλο και λιγότερο. Έχουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι δύσκολοι στη χρήση και έχουν φτωχή επίδοση. Ο συνδετήρας SMA ξεπεράστηκε από πιο μοντέρνα σχέδια, αλλά πολλοί από αυτούς χρησιμοποιούνται ακόμη. Για να συνδέσουμε δύο ίνες, απλά βιδώνουμε έναν συνδετήρα σε κάθε άκρη του προσαρμογέα όπως δείχνει το σχήμα 8. Χρησιμοποιείται μόνο για πολύτροπα συστήματα αφού οι απώλειες είναι πολύ μεγάλες

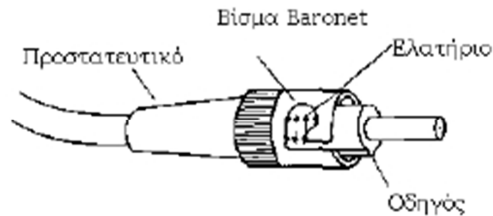


Σχήμα 8 - SMA Connector και Adaptor

Το μήκος του προσαρμογέα εξασφαλίζει ότι οι άκρες των δύο μεταλλικών κρίκων διαχωρίζονται από ένα αρκετά μικρό κενό αέρα για να επιτρέψει στο φως να υπερπηδάει το κενό και να φτάνει στην άλλη ίνα. Αυτό δημιουργεί το πρώτο πρόβλημα. Πόσο σφιχτά πρέπει να το βιδώσουμε; Αν δεν το βιδώσουμε αρκετά σφιχτά, οι απώλειες θα είναι πολύ μεγάλες. Αν το βιδώσουμε πολύ σφιχτά θα δημιουργηθεί τριβή στις όψεις των δύο ινών και θα προκαλέσουμε θραύσματα στο γυαλί ή θα το χαράξουμε. Αν γίνει αυτό, πρέπει να απομακρύνουμε και να πετάξουμε τον συνδετήρα.

Οι μεταλλικοί κρίκοι έχουν μια τρύπα στο κέντρο τους για να περνά η γυμνή ίνα (αφού απομακρύναμε τον αρχικό απομονωτή) και είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο ατσάλι ή κεραμικό. Στην περίπτωση του ανοξείδωτου ατσάλιου, πρέπει να ανοίξουμε μια τρύπα με διάμετρο 127 μm. Αν η τρύπα αυτή δεν είναι ακριβώς στο κέντρο ή είναι λίγο μεγαλύτερη, μπορεί να προκαλέσει απώλεια εκκεντρικότητας. Από τα δύο είδη το κεραμικό είναι ανώτερο. Το κεραμικό "αναπτύσσεται" πάνω σε ένα κομμάτι σύρμα με το κατάλληλο πάχος. Όταν απομακρύνουμε το σύρμα, υπάρχει μια πολύ πιο ακριβής τρύπα. Λόγω της λάθος ευθυγράμμισης και της κάποιας διαφοροποίησης στη συναρμολόγηση του συνδετήρα υπάρχουν απώλειες που διαφέρουν σε μέγεθος αφού ο συνδετήρας περιστρέφεται μαζί με τον προσαρμογέα. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι μας επιτρέπει να βελτιώσουμε τη σύνδεση παρατηρώντας τις απώλειες καθώς ο συνδετήρας περιστρέφεται. Είναι πολύ καλύτερα να γνωρίζουμε την απώλεια κάθε φορά που ενώνουμε τους συνδετήρες εξασφαλίζοντας ότι μπορούν να συνδυαστούν σε μια μόνο θέση. Ο SMA έχει μικρή δυνατότητα επανάληψης, γιατί μπορεί να συναρμολογηθεί σε οποιαδήποτε τυχαία θέση. Είναι συνηθισμένο να εισάγουμε τον συνδετήρα, να υπολογίζουμε την απώλεια και μετά να τον περιστρέφουμε για 90° και να μετράμε και πάλι.

- **Συνδετήρας (Connector) ST**



Σχήμα 9 - Συνδετήρας ST

Οι συνδετήρες (connectors) ST αποτελούνται από ένα στριφογυριστό και κλειδωμένο συζεύκτη που συγκρατεί την ίνα και τον συνδετικό κρίκο. Παρέχουν σταθερότερη απώλεια παρεμβολής, πολύ καλά χαρακτηριστικά, χαμηλό κόστος και καλή επίδοση. Αναπτύχθηκε για να ξεπεράσει πολλά από τα προβλήματα του SMA και τώρα είναι η πιο δημοφιλής επιλογή συνδετήρα για τις πολύτροπες ίνες. Επίσης διατίθεται και για μονότροπα συστήματα. Τώρα υπάρχει μια μόνο θέση μέσα στην οποία μπορεί να ταιριάξει ο συνδετήρας στον προσαρμογέα. Το βύσμα που βιδώνει, στο SMA, αντικαταστάθηκε από μια ειδική προσαρμογή για να μη μπορεί ο συνδετήρας να χαλαρώσει.

Ο μεταλλικός κρίκος έχει ένα ελατήριο, ώστε η πίεση στο άκρο του κρίκου να μην ελέγχεται από αυτόν που προσαρμόζει τον συνδετήρα και τη δύναμη με την οποία θα βιδώσει το παξιμάδι. Ο ST connector χρησιμοποιείται σε πολύτροπες ίνες (50/125μm και 62,5/125μm καθώς και σε καλώδια 900μm). Είναι μεταλλικής κατασκευής με κεραμικό δακτύλιο. Διατίθενται συζεύκτες ST μόνο για πολύτροπες ίνες .



Σχήμα 10 - ST Connector



Σχήμα 11 - ST Connector και Adaptor

Η ίνα περνάει μέσα από το κέντρο του συνδετήρα και λειαίνεται κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης για να βελτιώσει τη μεταφορά φωτός μεταξύ των συνδετήρων.

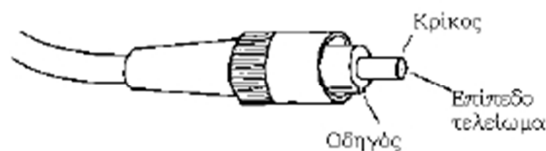
Υπάρχουν τρεις διαφορετικού τύποι:

- Επίπεδου τελειώματος
- Φυσικής επαφής (PC)
- Γωνιακής φυσικής επαφής (APC)

Πολλοί από τους συνδετήρες κυκλοφορούν με διαφορετικούς τύπους τελειώματος και έτσι βλέπουμε στο τέλος του ονόματος του συνδετήρα να προστίθεται και ένα PC ή APC. Αν δεν αναφέρεται τίποτε, υποθέτουμε πως είναι επίπεδου τελειώματος. Στο επίπεδο τελείωμα απλά λειαίνεται για να παράγει μια

ομαλή, επίπεδη άκρη στην ίνα ώστε το φως να βγαίνει κατευθείαν από τον συνδετήρα μέσα στην αποδεκτή γωνία της άλλης ίνας. Στην περίπτωση του τελειώματος PC, η ίνα λειαίνεται για να δημιουργήσει μια ελαφριά καμπύλη. Ο συνδετήρας PC έχει δύο πλεονεκτήματα. Οι δύο ίνες κάνουν τη φυσική επαφή και επομένως περιορίζουν το κενό αέρα που οφείλεται σε μικρές απώλειες εισαγωγής. Η καμπυλωτή άκρη της ίνας επίσης μειώνει την απώλεια επιστροφής ανακλώντας το φως έξω από την ίνα. Το τελείωμα APC έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μικρές απώλειες επιστροφής. Είναι απλά ένα επίπεδο τελείωμα σε γωνία συνήθως 8°. Όταν εμφανίζεται ανάκλαση Fresnel, η περισσότερη από την ισχύ ανάκλασης βρίσκεται σε γωνία μικρότερη από την κρίσιμη γωνία και δε μεταδίδεται και πάλι πίσω κατά μήκος της ίνας.

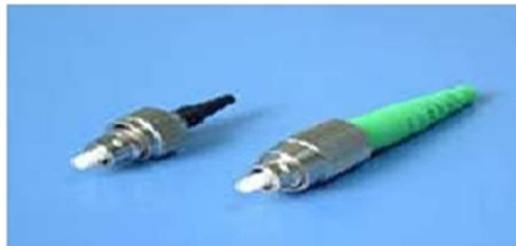
- **Συνδετήρας (Connector) ίνας φυσικής επαφής (FC/PC)**



Σχήμα 12 - Συνδετήρας FC/PC

Διατίθεται σαν FC/PC (επίπεδη άκρη) όπως φαίνεται στο σχήμα 12 και 14 ή FC/APC (γωνιακή φυσική επαφή) όπως στο σχήμα 15. Ο FC/PC είναι συνδετήρας δεύτερης γενιάς με πολύ καλή επίδοση και χαρακτηριστικά, αλλά σχετικά υψηλό κόστος. Περιέχει μια τελειοποιημένη πρόσοψη με καμπύλες που ελαττώνει σε μεγάλο βαθμό την ανάκλαση. Είναι συνδετήρας πολύ καλής ποιότητας που σχεδιάστηκε για μονότροπα συστήματα μεγάλων αποστάσεων και έχει πολύ μικρές απώλειες.

Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για εργασίες πολύ καλής ποιότητας σε πολύτροπα συστήματα αν χρειαστεί, και συχνά βρίσκεται σε εξοπλισμό ελέγχου. Ο FC connector χρησιμοποιείται σε πολύτροπες ίνες (50/125μm 62,5/125μm) σε μονότροπες ίνες (9/125μm), καθώς και σε καλώδια 900μm. Είναι μεταλλικής κατασκευής με κεραμικό δακτύλιο.



*Σχήμα 13 - FC Connector*

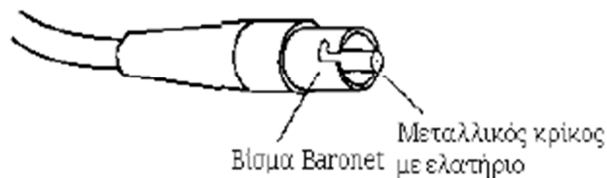


*Σχήμα 14 - FC/PC Single mode*



*Σχήμα 15 - FC/APC Connector & Adaptor Single Mode*

- **Συνδετήρας (Connector) Mini BNC**



Σχήμα 16 - Συνδετήρας mini-BNC

Δεν είναι πολύ διαδεδομένος και επιβιώνει μόνο επειδή έχει προδιαγραφές για το δίκτυο της IBM. Εκτός από το ότι είναι ελαφρώς μικρότερος, δεν προσφέρει τίποτε περισσότερο σε σύγκριση με τον ST/PC. Χρησιμοποιείται μόνο για πολύτροπα συστήματα, δε χρησιμοποιεί βιδωτούς προσαρμογείς και ο μεταλλικός του κρίκος έχει ένα ελατήριο και αποτελεί ένα συνδετήρα PC.



Σχήμα 17 - Connector BNC

- **Δικωνικός συνδετήρας**

Ο δικωνικός συνδετήρας χρησιμοποιείται σε μονότροπες τηλεπικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Ασφαλίζει βιδώνοντας και έχει έναν μεταλλικό κρίκο με



ελατήριο και με τελείωμα PC. Όταν συνδεθεί στον προσαρμογέα, ο κωνικός μεταλλικός κρίκος κεντράρεται και έτσι παρέχει μικρή απώλεια.



Σχήμα 18 - Δικωνικός Συνδετήρας

- **Συνδετήρας (Connector) SC**

Διατίθεται σαν FC/PC (επίπεδη άκρη) ή FC/APC (γωνιακή φυσική επαφή). Είναι κατάλληλος για μονότροπα και πολύτροπα συστήματα και φαίνεται στο σχήμα 19.



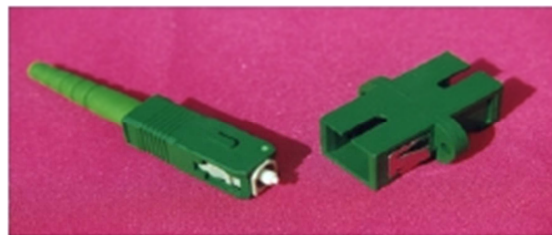
Σχήμα 19 - Συνδετήρας SC

Ο μηχανισμός κλειδώματος του συνδετήρα SC εμποδίζει την περιστροφική κακή ευθυγράμμιση και εμποδίζει τον κρίκο να χάσει την οπτική επαφή κατά τη διάρκεια της ενδοσύνδεσης, ενώ προσφέρει εξαιρετική πυκνότητα δέσμης και μοναδική επίδοση και κόστος. Ο συνδετήρας αυτός έχει σχεδιαστεί για υψηλή απόδοση στις τηλεπικοινωνίες και στα δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης. Υπάρχει διαφορετική αίσθηση για τους συνδετήρες αυτούς, όταν συγκρίνονται με τα προηγούμενα είδη. Το κύριο μέρος του είναι ελαφρύ από πλαστικό. Έχει μικρή

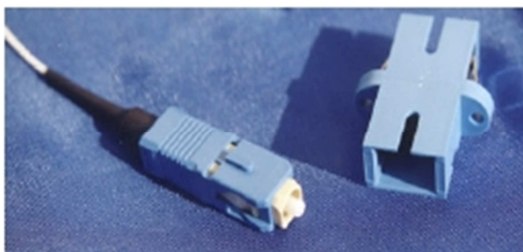
απώλεια και το μικρό του μέγεθος με την τετραγωνισμένη φόρμα πιάνει πολύ λίγο χώρο. Συνδέεται στον προσαρμογέα με ένα κλικ, ειδοποιώντας μας ότι συνδέθηκε. Ο SC connector χρησιμοποιείται σε πολύτροπες ίνες (50/125μm 62,5/125μm) σε μονότροπες ίνες (9/125μm), καθώς και σε καλώδια 900μm. Είναι πλαστικής κατασκευής με κεραμικό δακτύλιο.



Σχήμα 20 - SC Connector

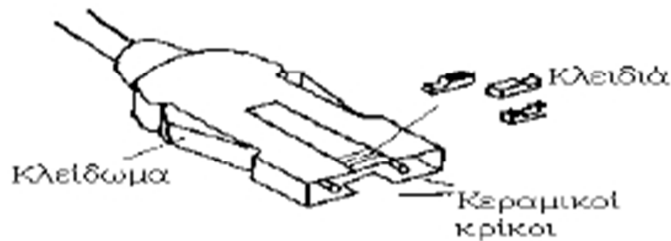


Σχήμα 21 - SC/PC Connector & Adaptor Single Mode



Σχήμα 22 - SC/PC Connector & Adaptor Multi Mode

- **Συνδετήρας (Connector) FSD ή MIC**



Σχήμα 23 - Συνδετήρας FSD

Είναι ένας σταθερός συνδετήρας διπλής προστασίας (FSD) και λέγεται και συνδετήρας προσαρμογής μέσων (MIC) όπως φαίνεται στο σχήμα 23. Σε αντίθεση με τους άλλους συνδετήρες έχει δύο ίνες μέσα στο ίδιο κάλυμμα, έχοντας ως αποτέλεσμα τα σήματα να δρομολογούνται σε δύο κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Αυτό ονομάζεται διπλή λειτουργία. Χρησιμοποιεί κεραμικούς κρίκους STPC, σε αντίθεση με έναν συνδετήρα κατασκευασμένο μόνο από πλαστικό, όπως ο SC. Χρησιμοποιείται σε τοπικά δίκτυα (LAN) και στη σύνδεση υπολογιστών. Σε σύγκριση με τους άλλους συνδετήρες, φαίνεται ογκώδης και έχει σχεδιαστεί για να τον χειριζόμαστε εύκολα. Κλειδώνει για να μη μπει κατά λάθος σε άλλη υποδοχή και έχει κωδικό χρώμα για εύκολη αναγνώριση.

- **Συνδετήρας (Connector) πλαστικής ίνας**



Σχήμα 24 - Συνδετήρας για πλαστικές ίνες

Οι συνδετήρες πλαστικής ίνας προσαρμόζονται γρήγορα και εύκολα, αλλά η απώλεια εισαγωγής είναι πολύ μεγαλύτερη από την κανονική απώλεια των γυάλινων ινών μεταξύ 1 και 2dB. Τα καλώδια συνδέονται με τη συνηθισμένη μέθοδο, όπου δύο συνδετήρες συνδέονται σε έναν προσαρμογέα στη σειρά. Ακόμα υπάρχουν: Ο LC connector χρησιμοποιείται σε πολύτροπες ίνες (62,5/125μm και 50/125μm) και σε μονότροπες ίνες καθώς και σε καλώδια 900μm. Είναι πλαστικής κατασκευής με κεραμικό δακτύλιο.



Σχήμα 25 - LC Connector



Σχήμα 26 - MTRJ Connector

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ

### Οπτικά δίκτυα

---

#### 2.1 Εφαρμογές Οπτικών Δικτύων

Τα συστήματα καλωδιώσεων με οπτικές ίνες συνεχώς αυξάνονται καθώς όλο και νέες εφαρμογές χρησιμοποιούν τα πλεονεκτήματα τους<sup>7</sup>. Ας δούμε λοιπόν πεδία εφαρμογής τους.

- Επίγειες και υποθαλάσσιες συνδέσεις τηλεπικοινωνιακών συστημάτων μακρινών αποστάσεων, υποκαθιστώντας τα ομοαξονικά καλώδια, τις μικροκυματικές ζεύξεις και τους δορυφόρους. Τώρα τελευταία έχουν ποντισθεί πολλά τέτοια καλώδια που συνδέουν ηπείρους μεταξύ τους με χωρητικότητα που ξεπερνά τα 30000 κυκλώματα φωνής. Παραδείγματα τέτοιων συνδέσεων είναι η ζεύξη Μασσαλίας – Σιγκαπούρης, το Υπερσιβηρικό καλώδιο κλπ.
- Συνδέσεις σε βιομηχανικές περιοχές με υψηλό επίπεδο ηλεκτρομαγνητικών θορύβων.
- Τοπικά δίκτυα για επικοινωνίες δεδομένων μεγάλων ταχυτήτων (Local Area Networks – LANs). Τα LANs διασυνδέουν χρήστες σε περιορισμένες περιοχές, όπως δωμάτια, διαμερίσματα, κτίρια, γραφεία, χώρους εργοστασίου και άλλους χώρους με κοντινό εύρος κάλυψης.

- Νέα Αστικά Δίκτυα (Metropolitan Area Networks - MANs) που αναπτύσσονται τελευταία και καλύπτουν μεγαλύτερες περιοχές από ένα τοπικό δίκτυο. Τα MANs μπορούν να καλύπτουν κτίρια που βρίσκονται σε διάφορα οικοδομικά τετράγωνα μιας πόλης ή και της περιοχής που περιβάλλει την πόλη.
- Μεταδόσεις με υψηλές απαιτήσεις ασφάλειας που απαιτούν οι κρατικές υπηρεσίες πληροφοριών, οι στρατιωτικές εφαρμογές κλπ.

## 2.2 Τύποι γεωγραφικών δικτύων με οπτικές ίνες

Τα δίκτυα οπτικών ινών έχουν εφαρμογές σε διάφορους τύπους δικτύων όσον αφορά τη γεωγραφική επικράτειά τους. Οι κατηγορίες των δικτύων είναι οι ακόλουθες:

### ❖ Οπτικά δίκτυα μεγάλης απόστασης (long haul networks)

Ήταν τα πρώτα δίκτυα που οι οπτικές ίνες έγιναν απαραίτητες. Μεταφέρουν δεδομένα μεταξύ ωκεανών, ηπείρων, χωρών. Αποστάσεις πάνω από 10000 km. μπορούν να καλύπτονται. Σε ένα long haul δίκτυο υπάρχει τεράστιο εύρος ζώνης με μεγάλες αποστάσεις που πρέπει να καλυφθούν χωρίς πολλές ενισχύσεις, επομένως η χρήση της οπτικής ίνας είναι επιτακτική. Προς το τέλος της δεκαετίας του '90, η άνθηση των long haul δικτύων έφερε μεγάλες καινοτομίες στις οπτικές υποθαλάσσιες και διηπειρωτικές συνδέσεις. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας της «πυκνής» πολύπλεξης με διαίρεση μήκους κύματος (Dense Wave Division Multiplexing – DWDM), έφερε σημαντική αύξηση στη χωρητικότητα.

Αποτελούνται κυρίως από δακτυλίους (rings) που έχουν συνήθως τριγωνική δομή. Η δικτυακή τεχνολογία σε αυτούς τους δακτυλίους (rings) είναι γνωστή σαν SONET/SDH (Synchronous Optical Networking/ Synchronous Digital Hierarchy). Οι απαιτήσεις των μεγάλης απόστασης δικτύων είναι μεγαλύτερες για τα υποθαλάσσια δίκτυα σε σχέση με τα χερσαία, αφού τα τελευταία είναι πιο εύκολα στη συντήρηση και αναβάθμιση τους. Ένα τυπικό δίκτυο αποτελείται μέχρι και από 8 οπτικές ίνες. Σε ένα υποθαλάσσιο δίκτυο το κόστος είναι 40% για τα καλώδια, 30% για την εργασία τοποθέτησης, 20% για τους επαναλήπτες (repeaters), των οποίων η απόσταση είναι 75 – 100km, ενώ το υπόλοιπο 10% είναι για τη μελέτη του έργου, τον εξοπλισμό στα άκρα του δικτύου, κλπ. Προφανώς σε ένα τέτοιο δίκτυο, υπάρχει σχεδιασμός για την αναμενόμενη χωρητικότητα στο μέλλον κι όχι μόνο για τις τωρινές ανάγκες<sup>9</sup>.

#### ❖ **Οπτικά δίκτυα κορμού (back haul networks):**

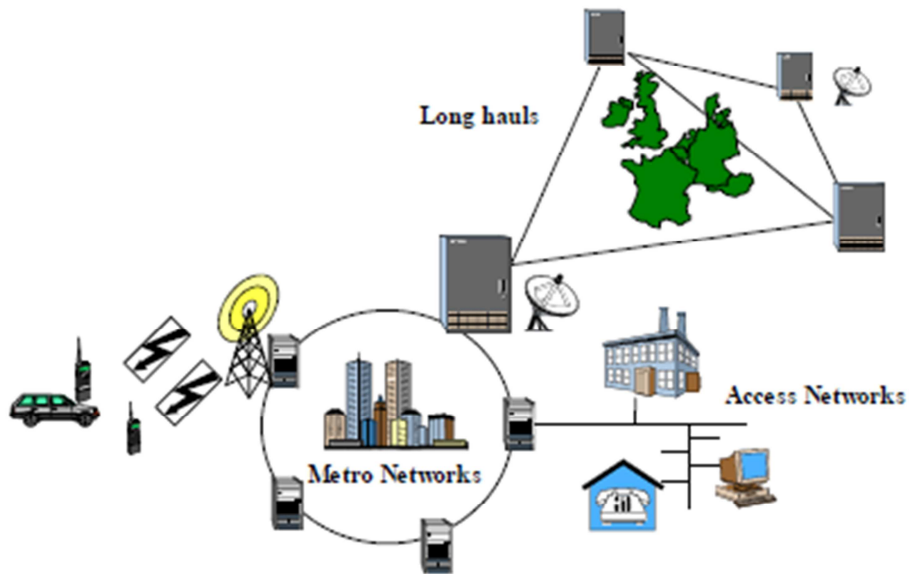
Πρόκειται για δίκτυα που συνδέουν βασικούς κόμβους στα γεωγραφικά όρια της εθνικής επικράτειας, ενώ συγχρόνως παρέχουν και μονοπάτια για την επικοινωνία διαφορετικών υποδικτύων. Στα δίκτυα κορμού μπορούν να συνδέονται ευρεία δίκτυα, όπως μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Area Network – MAN), δίκτυα ευρείας περιοχής (Wide Area Networks – WAN), περιφερειακά δίκτυα (Regional Area Networks – RAN), που μπορούν να συνδέονται και μεταξύ τους. Τα δίκτυα αυτά μεταφέρουν κίνηση από τοπικά και περιφερειακά γραφεία μεταγωγής (switch offices) προς τα δίκτυα μεγάλης απόστασης, διανέμουν την κίνηση σε μητροπολιτικές και περιφερειακές περιοχές μεταξύ σημείων παρουσίας (Points of Presence – POPs), παρόχων διαδικτύου (ISPs), άλλων δικτύων, μεγάλων εταιρικών πελατών και κόμβων ανταλλαγής διαδικτύου (Internet Exchange Points).

Τα δίκτυα αυτά προκύπτουν από συνενώσεις δικτύων αρχιτεκτονικής δακτυλίων (rings). Τα πιο συνηθισμένα πρωτόκολλα επιπέδου συνδέσμου

δεδομένων (data link layer) είναι τα ATM (Asynchronous Transfer Mode), SONET/SDH και το Ethernet. Τα πρωτόκολλα αυτά φέρουν IP πακέτα και δεδομένα από κλασσικά συστήματα τηλεφωνίας και κινητών δικτύων. Από τα 3 παραπάνω πρωτόκολλα το ATM τείνει να διακοπεί και να αντικατασταθεί από τα πρωτόκολλα Gigabit, 10Gigabit Ethernet και Packet over SONET. Αν και παλιά συνηθιζόταν για κάθε δίκτυο πρόσβασης να υπάρχει κι ένα διαφορετικό δίκτυο κορμού, σήμερα τα δίκτυα τείνουν να υπόκεινται σε ένα κοινό δίκτυο κορμού, κάνοντας χρήση του Ethernet και IP.

Στα δίκτυα κορμού η αύξηση της κυκλοφορίας είναι έντονη. Η κίνηση από τους τελικούς χρήστες συναθροίζεται στα άκρα όπως τα DSLAMs και τα POPs κι έπειτα στέλνεται σε κεντρικά σημεία μεταγωγής, από όπου φεύγει για άλλα περιφερειακά, εθνικά και διεθνή δίκτυα. Η ανταλλαγή μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσα μεταξύ των δικτύων, αλλά είναι επίσης κοινό να ανταλλαχθεί η κυκλοφορία πέρα από ένα σημείο ανταλλαγής Διαδικτύου (IXP). Η κίνηση στα δίκτυα αυτά αυξάνεται από 50% έως 100% κάθε χρόνο. Σε πολλές χώρες, τα δίκτυα κορμού έχουν εμφανίσει μια υπέρ του δέοντος αύξηση της χωρητικότητάς τους στα τέλη του 1990 και τις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Όπως στα long haul δίκτυα, έτσι κι εδώ οι σχεδιαστές οφείλουν να φροντίζουν για το μέλλον των δικτύων. Κι εδώ, χρησιμοποιείται τεχνολογία πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) για να εκμεταλλεύεται καλύτερα η χωρητικότητα των γραμμών.





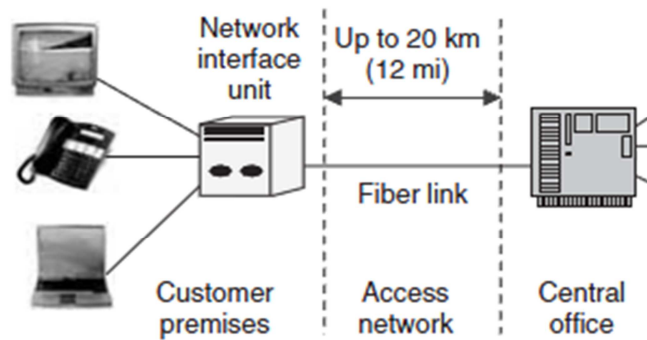
Σχήμα 1 - Ιεραρχική δομή δικτύων

#### ❖ Οπτικά δίκτυα πρόσβασης (access networks):

Τα δίκτυα πρόσβασης, που αλλιώς ονομάζονται δίκτυα τελευταίου χιλιομέτρου (last mile networks) ή δίκτυα πρώτου χιλιομέτρου (first mile networks), είναι εκείνα τα δίκτυα στα οποία συνδέονται οι τελικοί χρήστες ή οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις με τα κεντρικά γραφεία μεταγωγής (αλλιώς αναφέρονται και ως σημεία παρουσίας – points of presence – pop). Τα δίκτυα πρόσβασης έχουν ως όριο τα κεντρικά γραφεία, μετά από τα οποία ξεκινάνε τα δίκτυα κορμού/μητροπολιτικά δίκτυα, κλπ. Αν και οι διάφοροι πάροχοι τηλεπικοινωνιών ρίχνουν το βάρος στο δίκτυο κορμού, τελευταία ακόμα και τα δίκτυα πρόσβασης παρουσιάζουν συμφόρηση (bottleneck).

Το μήκος τους συνήθως εκτείνεται μέχρι τα 20 χιλιόμετρα (για τα παθητικά δίκτυα PONs). Συνήθως χρησιμοποιούν δενδρικές δομές. Τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης που προχωρούν μέχρι την κατοικία ή το κτίριο του χρήστη λέγονται

FTTH (Fiber To The Home) δίκτυα και FTTB (Fiber To The Building) δίκτυα, ενώ γενικότερα όταν το οπτικό δίκτυο πλησιάζει μέχρι ένα σημείο x κοντά στο χρήστη λέγεται FTTx.



Σχήμα 2 - Απλοποιημένο οπτικό δίκτυο πρόσβασης

Τέλος, ένα οπτικό δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει μια πληθώρα υπηρεσιών μερικές από τις οποίες φαίνονται στον πίνακα 1 καθώς και κάποια χαρακτηριστικά τους όπως ο ρυθμός δεδομένων ή το εύρος ζώνης που καταλαμβάνουν.

Υπηρεσία	Τύπος	Εύρος λήψης	Εύρος αποστολής
Τηλεφωνία	Μεταγωγή (switched)	4 kHz	4 kHz
ISDN	Μεταγωγή	144 Kbits	144 Kbits
Μετάδοση βίντεο	Εκπομπή (broadcast)	6 MHz/ 2-6 Mbit/s	0
Διαλογικό βίντεο	Μεταγωγή	6 Mbit/s	Μικρό
Πρόσβαση διαδικτύου	Μεταγωγή	Μερικά Mbit/s	Μικρό (αρχικά)
Βιντεοδιάσκεψη	Μεταγωγή	6 Mbit/s	6 Mbit/s
Επιχειρησιακές Υπηρεσίες	Μεταγωγή	1.5 Mbits ως 10 Gbits	1.5 Mbits ως 10 Gbits

Πίνακας 1 - Υπηρεσίες σε δίκτυα πρόσβασης

## 2.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί δικτύων οπτικών ινών

Το κίνητρο για την ανάπτυξη των οπτικών ινών αλλά και των δικτύων που αποτελούνται από αυτές άρχισε στις αρχές του 1960 με την ανακάλυψη των λέιζερ. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των λέιζερ συσκευών οδήγησαν τους ερευνητές να εξετάσουν τη χρήση οπτικών συστημάτων, ώστε να παρέχονται σύνδεσμοι μετάδοσης με αρκετά υψηλές χωρητικότητες. Επιπλέον, εξαιτίας κάποιων ιδιοτήτων των οπτικών ινών, που δεν είχαν τα προϋπάρχοντα μέσα μετάδοσης, όπως για παράδειγμα τα παραδοσιακά καλώδια χαλκού έφεραν στο προσκήνιο κάποια σημαντικά οφέλη έτσι ώστε να προτιμούνται τα δίκτυα οπτικών ινών έναντι άλλων παραδοσιακών δικτύων<sup>10</sup>. Κάποια από αυτά είναι:

- ✓ **Εύρος ζώνης:** Το εύρος ζώνης (bandwidth) στα οπτικά δίκτυα είναι σχεδόν απεριόριστο. Έχουν αρκετά μεγαλύτερο εύρος από τα δίκτυα χαλκού. Επίσης, συγκριτικά με τα δορυφορικά δίκτυα, έχουν μεγαλύτερο εύρος αλλά και μικρότερη καθυστέρηση ταξιδιού διάδοσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί να μεταδοθεί από ένα απλό καλώδιο περισσότερη πληροφορία, επομένως να χρησιμοποιούνται λιγότερα καλώδια για δεδομένο ποσό πληροφορίας.
  
- ✓ **Μεγάλη απόσταση μετάδοσης:** Τα καλώδια οπτικών ινών έχουν πολύ μικρότερες απώλειες σε σχέση με τα καλώδια χαλκού. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορούν να αποσταλούν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις χωρίς την παρέμβαση άλλων συσκευών.
  
- ✓ **Πλήθος επαναληπτών/απόσταση μεταξύ τους:** Ως συνέπεια της μεγάλης απόστασης μετάδοσης που έχουν τα οπτικά δίκτυα, λίγοι επαναλήπτες (repeaters)

και αναγεννητές σήματος απαιτούνται στα δίκτυα αυτά, αφού υπάρχει μικρή εξασθένιση λόγω απόστασης (attenuation) και διασποράς (dispersion).

✓ Βάρος και μέγεθος: Τα οπτικά καλώδια είναι αρκετά μικρότερα και ελαφρύτερα σε σχέση με τα ηλεκτρικά καλώδια. Ένα σύστημα με οπτικά καλώδια μπορεί να εκτελέσει ακριβώς την ίδια εργασία με ένα πολύ μεγαλύτερο και βαρύτερο σύστημα που αποτελείται από χάλκινα καλώδια. 1000 χάλκινα καλώδια ζυγίζουν περίπου 8000 κιλά/km, ενώ 912 οπτικές ίνες 495 κιλά/km· επιπροσθέτως οι τελευταίες καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο χώρο. Αυτό είναι σημαντικό σε δίκτυα αστικών περιοχών που πρέπει να καλυφθούν πολλοί πελάτες σε σχετικά λίγα τετραγωνικά. Επίσης, έχει ακόμα μεγαλύτερη σημασία σε εφαρμογές με αεροσκάφη, δορυφόρους, πλοία, αλλά και στρατιωτικές εφαρμογές, όπου τα μικρά και ελαφριά καλώδια προτιμούνται για την εξοικονόμηση χώρου και βάρους.

✓ Κόστος υλικών: Για την ίδια χωρητικότητα μεταδόσεων τα οπτικά καλώδια είναι πολύ φθηνότερα από τα αντίστοιχα χάλκινα.

✓ Αυξημένη ασφάλεια: Λόγω κάποιων προβλημάτων που εμφανίζονται στις συνδέσεις με ηλεκτρικά στοιχεία, οι οπτικές συνδέσεις φαίνεται να είναι απόλυτα ασφαλείς σε αυτόν τον τομέα. Τα οπτικά καλώδια δεν εμφανίζουν προβλήματα σπινθηρισμών ή άλλων φαινομένων από υψηλή τάση που μπορούν να εμφανίσουν τα δίκτυα χαλκού. Ωστόσο, πρέπει να παίρνονται μέτρα για την προστασία των ματιών από την ακτίνα λέιζερ.

✓ Καμία ηλεκτρομαγνητική επίδραση: Επειδή οι συνδέσεις δεν είναι ηλεκτρικές, τα συνολικά σφάλματα στα οπτικά δίκτυα είναι λίγα, αφού δεν υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, που προκαλούν σημαντικό θόρυβο σε ένα

σύστημα μετάδοσης. Επίσης δεν υπάρχουν επιδράσεις από καιρικά φαινόμενα, κτίρια, βουνά όπως γίνεται στις ασύρματες επικοινωνίες.

✓ Αυξημένη ασφάλεια του μεταδιδόμενου σήματος: Μια οπτική ίνα προσφέρει υψηλό βαθμό ασφάλειας των δεδομένων, αφού το οπτικό σήμα περιορίζεται μέσα στην ίνα και τυχόν εκπομπές/ διαρροές απορροφώνται από το επίστρωμα γύρω από την ίνα. Σε αντίθεση, στα καλώδια χαλκού μπορούν εύκολα ηλεκτρικά σήματα να υποκλαπούν. Έτσι, τα οπτικά δίκτυα κρίνονται απαραίτητα σε εφαρμογές όπου η ασφάλεια της πληροφορίας θεωρείται σημαντική, όπως οικονομικά, νομικά, κυβερνητικά και στρατιωτικά συστήματα.

✓ Εξελιξιμότητα: Όπως αναφέρθηκε και πριν, λόγω της θεωρητικά απεριόριστης χωρητικότητας των οπτικών ινών, τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα μπορούν εύκολα να αναβαθμιστούν χωρίς να γίνεται αλλαγή των ινών, αλλά μόνο αναβάθμιση των ηλεκτρονικών στοιχείων, λέιζερ, LEDs που βρίσκονται στα άκρα του δικτύου και παράγουν τα οπτικά σήματα.

Ωστόσο, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά τη χρήση των οπτικών ινών σε δίκτυα. Χαρακτηριστικά:

\* Κόστος πομπών και δεκτών: Καθώς η τεχνολογία των οπτικών ινών είναι σχετικά καινούρια, το κόστος κάποιων εξαρτημάτων στα οπτικά δίκτυα είναι αυξημένο, όπως οι πομποί και οι δέκτες.

- \* Μικρή προτυποποίηση: Λόγω της πρόσφατης τεχνολογίας, δεν έχουν τυποποιηθεί ακόμα σε μεγάλο βαθμό. Έτσι, πολλές βιομηχανίες δεν τις χρησιμοποιούν ευρέως σε σχέση με άλλα ηλεκτρικά συστήματα.
  
- \* Δυσκολία συγκόλλησης και συνένωσης καλωδίων: Η διαδικασία συγκόλλησης καλωδίων είτε γίνεται με τήξη (fusion splicing) ή μηχανικά (mechanical splicing), ενώ για τη συνένωση χρησιμοποιούνται συνδετήρες (connectors) και συζευκτήρες (couplers). Όλα αυτά απαιτούν ειδικό εξοπλισμό και απαιτούν υψηλή ακρίβεια για να μην υπάρχει απώλεια σήματος.
  
- \* Κάμψη καλωδίων: Λόγω του φαινομένου της ολικής εσωτερικής ανάκλασης, υπάρχει μια συγκεκριμένη επιτρεπτή γωνία κατά την οποία μπορούμε να κάμψουμε ένα καλώδιο οπτικής ίνας χωρίς απώλειες. Μόλις ξεπεραστεί αυτό το όριο, το φως δε μπορεί να ανακλαστεί ολικά.
  
- \* Οπτικά μέσα μόνο για μετάδοση: Μέχρι πρόσφατα δεν υπήρχαν οπτικοί ενισχυτές. Έτσι, το σήμα έπρεπε να μετατρέπεται συνέχεια από οπτικό σε ηλεκτρικό και αντίστροφα. Πρόσφατοι όμως οπτικοί ενισχυτές και συστήματα οπτικής επεξεργασίας λύνουν αυτό το θέμα, ωστόσο χρήζουν ακόμα βελτίωσης.
  
- \* Ακτινοβολία γάμμα: Σε μικρό βαθμό η ακτινοβολία γάμμα που προέρχεται από το σύμπαν επηρεάζει μερικούς τύπους γυαλίων οπτικής ίνας. Σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, αλλά και σε μεγάλης απόστασης διαστημικού ελέγχου περιοχές, δεν ενδείκνυται η χρήση τους, αφού η ακτινοβολία αποχρωματίζει το γυαλί και ως εκ τούτου εξασθενεί το σήμα.

## 2.4 Η εξέλιξη των οπτικών ινών

Η οπτική ίνα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως γραμμή μεταφοράς στο δίκτυο TAT-8 για τη μετάδοση υπεραστικών και υπερατλαντικών τηλεφωνικών σημάτων με ρυθμό μετάδοσης 560Mb/s<sup>7</sup>. Η διείσδυση των οπτικών ινών στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα κορμού επιταχύνθηκε μετά την υλοποίηση των πρώτων οπτικών ενισχυτών με ίνες προσμίξεων ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifier-EDFA), οι οποίοι επέτρεψαν την ενίσχυση του σήματος απευθείας στο οπτικό επίπεδο χωρίς τη χρήση οπτο-ηλεκτρονικών μετατροπών, παρέχοντας τη δυνατότητα για την κατασκευή μεγαλύτερου μήκους οπτικών δικτύων. Έτσι, στα μέσα της δεκαετίας του 1990 ολοκληρώθηκε το υπερατλαντικό δίκτυο TAT -12/13, το οποίο διαχειρίζεται κίνηση με ρυθμό μετάδοσης 10Gb/s, το υποθαλάσσιο δίκτυο FLAG με παρόμοιες δυνατότητες και βάση τη Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (Synchronous Digital Hierarchy-SDH), και το παναφρικανικό δίκτυο Africa ONE. Με την έναρξη της νέας χιλιετίας ολοκληρώθηκε το παγκόσμιο δίκτυο SEA-MEWE\_3 (Ευρώπη - Ασία - Αυστραλία) με συνολική διέλευση 10Gb/s, ενώ ανακοινώνεται και η έναρξη των δικτύων Flag-Atlantic1 και Flag-Pacific1 με διέλευση 5 και 10Tb/s και βάση το SDH. Παράλληλα, έκαναν την εμφάνισή τους και τα πρώτα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα μετάδοσης με ρυθμό μετάδοσης κάθε καναλιού στα 40Gb/s. Τα οπτικά δίκτυα διαχωρίζονται σε δύο γενιές: στα δίκτυα πρώτης και στα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Στα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς η οπτική ίνα χρησιμοποιούνταν μόνο ως φυσικό μέσο μετάδοσης και παροχής χωρητικότητας, ενώ η μεταγωγή, η δρομολόγηση, καθώς και όλες οι άλλες ευφυείς δικτυακές διεργασίες επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς είναι το Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο (Synchronous Optical Network-SONET) και το SDH, τα οποία σχηματίζουν τον κορμό της τηλεπικοινωνιακής υποδομής στη Βόρεια Αμερική, την Ασία και την Ευρώπη. Στις μέρες μας σχηματίζονται σταδιακά τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς, στα οποία μέρος της δρομολόγησης, της μεταγωγής καθώς και των άλλων ευφυών διαδικασιών έχει

μετακινηθεί στο οπτικό επίπεδο (optical layer). Για την αξιοποίηση της τεράστιας χωρητικότητας των οπτικών ινών και τη βέλτιστη εκμετάλλευση αυτής χρησιμοποιούνται τυπικές τεχνικές οπτικής πολυπλεξίας σε πλήρη αναλογία με τις τεχνικές ηλεκτρονικής πολυπλεξίας. Η ανάγκη για πολυπλεξία γεννήθηκε από το γεγονός, ότι είναι πολύ πιο οικονομική η μετάδοση δεδομένων με υψηλότερο ρυθμό μέσα από μία και μόνο ίνα, από το να χρησιμοποιούνται πολλές ίνες μεταφέροντας δεδομένα σε χαμηλούς ρυθμούς. Οι βασικοί τρόποι πολυπλεξίας μέσα σε μία οπτική ίνα, οι οποίοι έχουν αναφερθεί και στην αρχή στα πλεονεκτήματα των οπτικών δικτύων, είναι η πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM) και η οπτική πολυπλεξία δεδομένων στο πεδίο του χρόνου (Optical Time Division Multiplexing-OTDM). Αν και τα οπτικά δίκτυα υιοθετήθηκαν αρχικά μόνο για τη μετάδοση των δεδομένων, πολύ γρήγορα διαπιστώθηκε ότι έχουν τις δυνατότητες για την υλοποίηση περισσότερων λειτουργικών διεργασιών πέραν της ζεύξης από σημείο σε σημείο. Μεταφέροντας ορισμένες από τις διεργασίες μεταγωγής και δρομολόγησης, που επιτελούνταν από ηλεκτρονικά κυκλώματα, απευθείας στο οπτικό επίπεδο, προκύπτουν ορισμένα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς έτσι ορισμένες λειτουργίες γίνονται σε συντομότερο χρονικό διάστημα και ταυτόχρονα απαλλάσσονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα από την επεξεργασία όλου του όγκου δεδομένων. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς, τα οποία έχουν ήδη αρχίσει να εγκαθίστανται σταδιακά. Αν και οι επιδόσεις των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς είναι αρκετά ικανοποιητικές για τα δίκτυα ευρείας περιοχής, δεν επαρκούν για την αποδοτική διασύνδεση σε δίκτυα μεγαλύτερης εκρηκτικότητας και αμεσότερης πρόσβασης. Για την εξυπηρέτηση αυτών των δικτύων και τη βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης οι ελπίδες έχουν εναποτεθεί στα μελλοντικά οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς, τα οποία έχουν συγκεντρώσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια και για τα οποία γίνεται λόγος στην επόμενη ενότητα. Ο βασικός στόχος των μελλοντικών οπτικών δικτύων τρίτης γενιάς είναι η αποδοτική εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών δικτύων, υπό την έννοια της παροχής συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας μόνο κατά το χρονικό διάστημα, για το οποίο οι συνδέσεις αυτές είναι ενεργές. Για



την επίτευξη της παροχής εύρους ζώνης κατ' απαίτηση τα οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς έχουν υιοθετήσει την τεχνική μεταγωγής πακέτου, η οποία ήδη λειτουργεί με αποδοτικό τρόπο στα ηλεκτρονικά δίκτυα. Ο όρος οπτικά δίκτυα τρίτης γενιάς είναι, επομένως, ταυτόσημος με τον όρο οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων (All-Optical Packet Switched Networks – OPS).

---

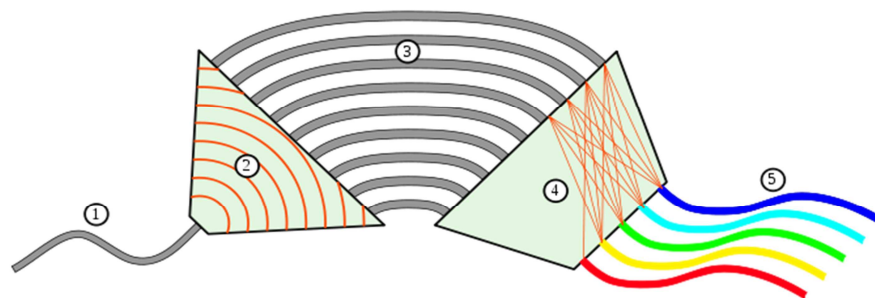
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ III

### Πολύπλεξη Οπτικής Ίνας

---

#### 3.1 Πολύπλεξη μήκους κύματος

Μια στρατηγική για τη δημιουργία δικτύων που μπορούν να υποστηρίξουν τις νέες απαιτητικές για εύρος ζώνης εφαρμογές είναι η τεχνολογία πολύπλεξης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM). Η βασική ιδέα πάνω στην οποία στηρίζεται η τεχνολογία αυτή είναι η εξής: καθώς σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα, είναι δυνατόν από την ίδια ίνα να περάσουν περισσότερα του ενός διαφορετικά σήματα διαφορετικής συχνότητας ( $\lambda$ ) ή αλλιώς διαφορετικού χρώματος μιας και μιλάμε για οπτικά σήματα, από τα οποία το καθένα να αντιπροσωπεύει και μία ροή δεδομένων<sup>37</sup>.

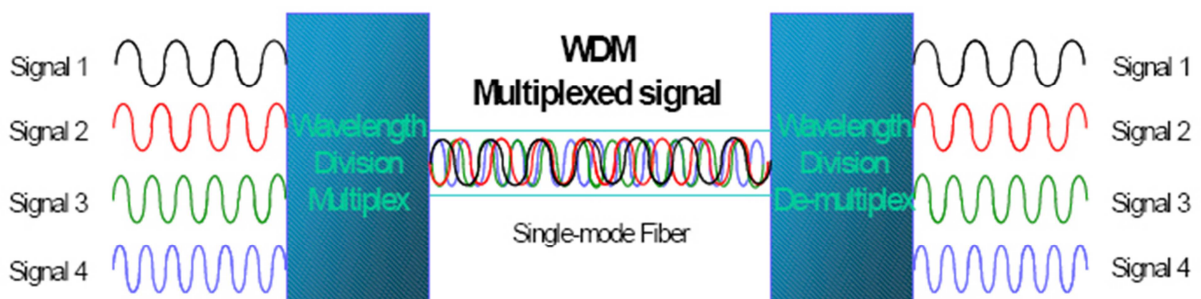


Σχήμα 1 – Πολύπλεξη μήκους κύματος

Αυτή η ιδέα δεν ήταν καινούρια, άλλωστε η πολύπλεξη (multiplexing) στο ίδιο μέσο παραπάνω του ενός σήματος με διαφορετικές συχνότητες, συνεπώς και διαφορετικά μήκη κύματος χρησιμοποιείται από πολύ παλιά στις εκπομπές ραδιοφώνου αλλά και σε πολλές άλλες εφαρμογές, αλλά έγινε τελευταία εφικτή η υλοποίηση της και στα οπτικά δίκτυα. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό έγινε δυνατή η παράλληλη μετάδοση σήματος και στις οπτικές ίνες, με τα πρώτα WDM συστήματα να εμφανίζονται σε εργαστήρια στα τέλη της δεκαετίας του 1970.

Ενώ εκείνα τα πρώτα συστήματα ξεκίνησαν με το να συνδυάζουν 2 σήματα (μήκη κύματος), τα πιο σύγχρονα συστήματα φτάνουν μέχρι και τα 160. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μεταφορά πληροφορίας μέσω οπτικών καναλιών (optical channels), τα οποία έχουν ένα κοινό μέσο μεταφοράς, την οπτική ίνα. Έτσι είναι δυνατή η αύξηση και η καλύτερη διαχείριση της χωρητικότητας των ήδη υπάρχοντων οπτικών ινών, χωρίς να είναι απαραίτητη η εγκατάσταση νέων (που έχει μεγάλο κόστος).

Η τεχνολογία WDM είναι επομένως ένας τύπος πολύπλεξης συχνότητας (FDM – Frequency Division Multiplexing). Παρότι το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας και άρα οι δύο όροι τυπικά σημαίνουν το ίδιο πράγμα, ο όρος πολύπλεξη συχνότητας (FDM) έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται για τις ραδιοφωνικές μεταδόσεις, ενώ ο όρος πολύπλεξη μήκους κύματος (WDM) για τις οπτικές επικοινωνίες.



Σχήμα 2- Πολύπλεξη κυμάτων

### 3.2 Πυκνή Πολύπλεξη

Τα συστήματα WDM μπορούν να μεταδώσουν μέχρι 24 κανάλια, αλλά η τάση της τεχνολογίας είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα στα 128 και παραπάνω μέσα από μια ίνα<sup>44</sup>. Σήμερα η τεχνική DWDM (Dense Wave Division Multiplexing - Πυκνή Πολύπλεξη με διαίρεση του Μήκους Κύματος) έχει ενταχθεί στην τεχνική WDM. Τεχνικά είναι η ίδια μεθοδολογία, αλλά όπως φαίνεται και από το όνομα η DWDM εμπεριέχει περισσότερα κανάλια και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε εύρος ζώνης. Συχνά οι δύο αυτές τεχνικές αναφέρονται ως μια, WDM, χωρίς να διακρίνεται η ειδοποιός διαφορά. Η τεχνολογία DWDM είναι η περισσότερα υποσχόμενη τεχνολογία για μεταφορά δεδομένων μέσα από οπτικές ίνες και συνίσταται στην πολύπλεξη σημάτων διαφορετικού μήκους κύματος (wavelength) και στη μετάδοσή τους μέσω μιας μόνο οπτικής ίνας. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η αύξηση του συνολικού ρυθμού μεταφοράς δεδομένων ανά οπτική ίνα, που προκύπτει από την άθροιση των ρυθμών μεταφοράς κάθε σήματος διαφορετικού μήκους κύματος.

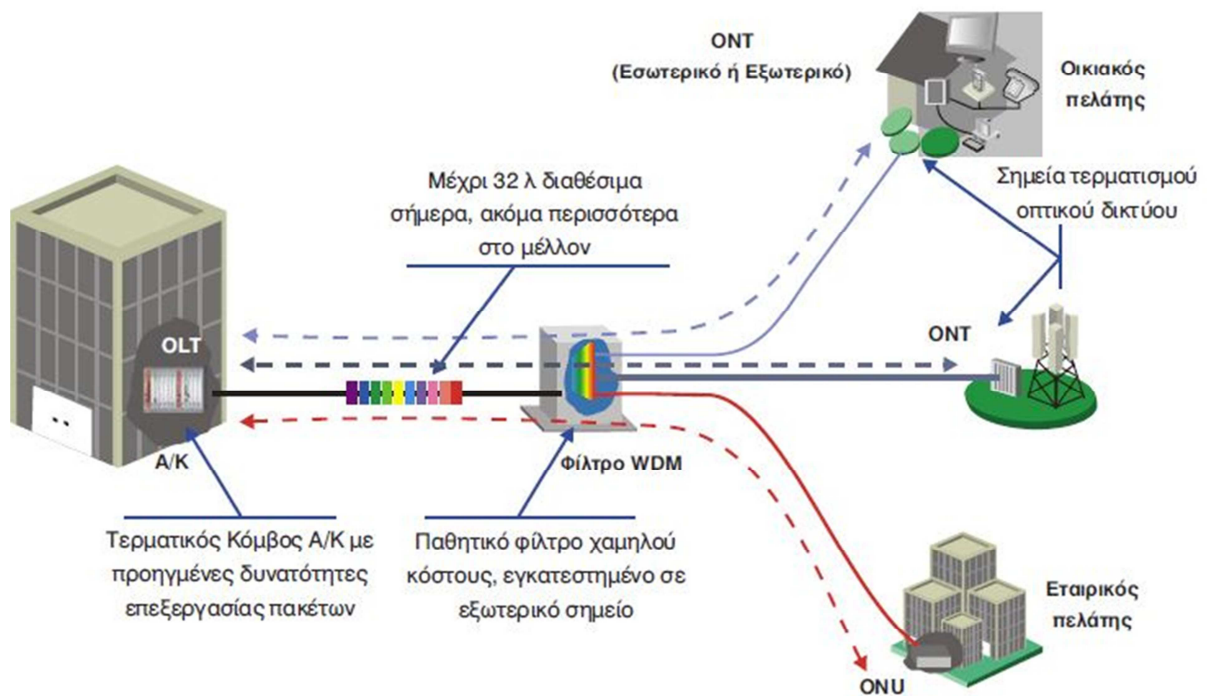
Με τα σημερινά δεδομένα είναι δυνατή η πολύπλεξη σαράντα τέτοιων σημάτων σε μια και μόνο οπτική ίνα, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να μεταφέρει δεδομένα με ρυθμό 10Gb/s, κάτι που οδηγεί σε συνολικό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων ίσο με 400Gb/s. Σε πειραματικό επίπεδο έχουν επιτευχθεί ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων της τάξης των Tb/s. Η δυνατότητα για μεταφορά IP πακέτων πάνω από δίκτυα DWDM δύο τεχνικών, που η κάθε μια στον τομέα της αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη λύση, διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο όσον αφορά σε μεθόδους για γρήγορη μεταφορά δεδομένων με ταυτόχρονη ενοποίηση των υπαρχόντων δικτύων.

### 3.3 Παθητικά Οπτικά Δίκτυα Πολύπλεξης με Διαίρεση Μήκους Κύματος

Η τεχνολογία WDM PON είναι ότι πιο σύγχρονο υπάρχει σήμερα διαθέσιμο στον τομέα της οπτικής δικτύωσης. Με την τεχνολογία WDM PON εξοικονομείται μεγάλος αριθμός οπτικών ινών, ενώ παράλληλα εξαλείφονται οι διάφοροι περιορισμοί που συναντώνται στα αντίστοιχα συστήματα TDM PON. Εξάλλου αυξάνεται σημαντικά η περιοχή κάλυψης του δικτύου, ενώ προσφέρονται αυξημένες δυνατότητες κλιμάκωσης και υψηλού επιπέδου ασφάλεια δεδομένων, από ένα πραγματικά ολοκληρωμένο δίκτυο οικιακών και εταιρικών υπηρεσιών<sup>44</sup>.

Σε ένα σύστημα WDM PON, ένα απλό μήκος κύματος ξεκινά από το Αστικό Κέντρο και ανακατευθύνεται προς τον τελικό χρήστη μέσω ενός παθητικού οπτικού δρομολογητή που βρίσκεται εγκατεστημένος εξωτερικά, κατά μήκος της ενδιάμεσης διαδρομής. Σε αντίθεση με τα συστήματα TDM PON, τα μήκη κύματος είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους καθώς εκχωρούνται κάθε φορά σαν να επρόκειτο για μοναδικές ζεύξεις σημείου προς σημείο. Με τον τρόπο αυτόν, ένα μήκος κύματος μπορεί να χρησιμοποιείται για οικιακές υπηρεσίες και έχει ταχύτητα 100Mbps, ενώ ταυτόχρονα ένα άλλο μπορεί να λειτουργεί στο 1Gbps εξυπηρετώντας εταιρικές ανάγκες. Ο παθητικός οπτικός δρομολογητής μπορεί να χειριστεί σήμερα μέχρι και 32 μήκη κύματος, ενώ στο μέλλον αναμένεται να αυξηθεί στα 128.

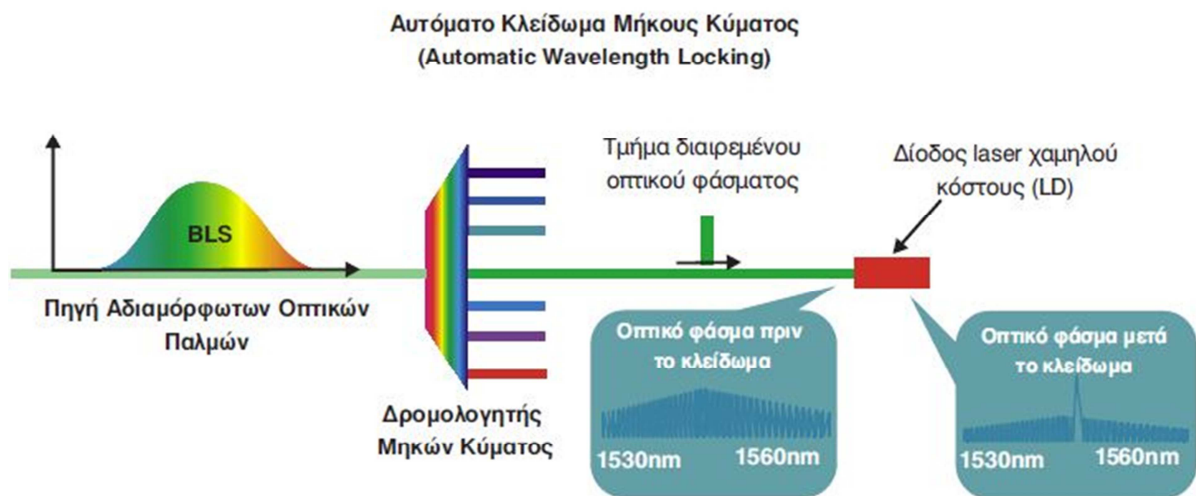
Γενικά η τεχνολογία WDM PON υποστηρίζει συνδέσεις σημείο προς σημείο, διατηρώντας παράλληλα την ανεξαρτησία μεταξύ των μηκών κύματος κατά μήκος ολόκληρης της διαδρομής.



Σχήμα 3 – Δίκτυο Πρόσβασης

### 3.4 Αυτόματο Κλείδωμα Μήκους Κύματος

Στο σχήμα 4 παρακάτω παρουσιάζεται ο μηχανισμός κλειδώματος μήκους κύματος σε ένα σύστημα WDM PON<sup>53</sup>. Στο οπτικό τερματικό (OLT) που βρίσκεται εγκατεστημένο στο αντίστοιχο Αστικό Κέντρο (CO), υπάρχει μια μονάδα παραγωγής αδιαμόρφωτων ευρυζωνικών οπτικών παλμών (Broadband Light Source). Οι παλμοί αυτοί κατευθύνονται στη συνέχεια προς τον απομακρυσμένο εξωτερικό κόμβο στον οποίο βρίσκεται το αντίστοιχο παθητικό φίλτρο και τελικά λειτουργούν ως «πιλότοι» για το κλείδωμα των τερματικών των χρηστών (ONUs) σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος.



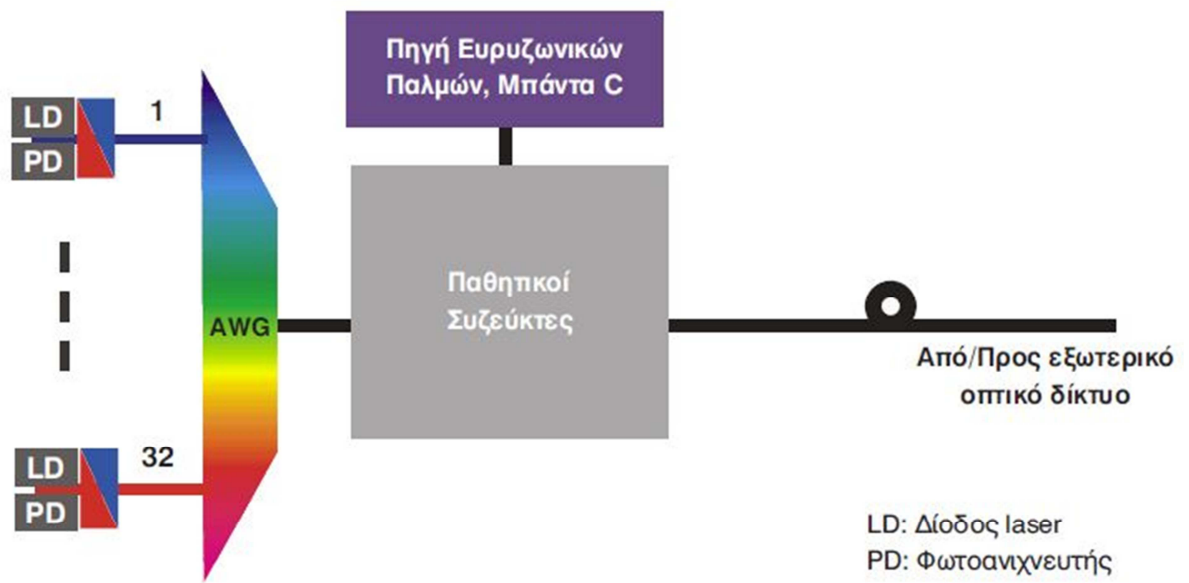
Σχήμα 4 – Αυτόματο κλείδωμα μήκους κύματος

Πιο συγκεκριμένα, το παθητικό φίλτρο διαιρεί το φάσμα του αδιαμόρφωτου ευρυζωνικού παλμού σε  $N$  κανάλια DWDM στενού φασματικού εύρους. Στη συνέχεια κάθε κομμάτι του διαιρεμένου φάσματος μεταδίδεται διαμέσου μιας οπτικής ίνας προς το οπτικό τερματικό του τελικού χρήστη (ONT) το οποίο είναι εξοπλισμένο με κατάλληλες δίοδους λέιζερ (LDs). Όταν η δίοδος λέιζερ οδηγείται από τα προς μετάδοση δεδομένα, τότε το λαμβανόμενο σήμα την εξαναγκάζει σε λειτουργία περιορισμένου φάσματος όπως αυτό προσδιορίζεται από τη ζεύξη DWDM στην οποία ανήκει. Η διαδικασία του αυτόματος κλειδώματος σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος γίνεται εύκολα κατανοητή, αν θυμηθούμε πως μια δίοδος λέιζερ λειτουργεί ουσιαστικά ως οπτικός ενισχυτής ο οποίος διαμορφώνει, ενισχύει και επιστρέφει τον λαμβανόμενο BLS παλμό. Στην εικόνα παρουσιάζεται η μορφή του οπτικού φάσματος στη δίοδο λέιζερ πριν και μετά το κλείδωμα σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Χωρίς την εισαγωγή του σήματος «πιλότου» (locking signal) η δίοδος λέιζερ θα εξέπεμπε σε περισσότερα μήκη κύματος

καθιστώντας το αντίστοιχο φάσμα ακατάλληλο για μετάδοση σε ζεύξεις DWDM λόγω του αυξημένου θορύβου διασποράς στον τρόπο μετάδοσης (mode partition noise) που δημιουργείται από το φιλτράρισμα μέσω του δρομολογητή μηκών κύματος. Με τη βοήθεια του σήματος πιλότου το πολύτροπο φάσμα μετατρέπεται σε σχεδόν μονότροπο, παρόμοιο με εκείνο των διόδων λέιζερ κατανεμημένης ανατροφοδότησης (DFB lasers). Τελικά, το σήμα αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με το κανάλι DWDM που προσδιορίζεται από το επίπεδο μεταφοράς (transportation layer). Η προαναφερθείσα διαδικασία αυτόματου κλειδώματος σε ένα μήκος κύματος μετατρέπει τις οπτικές τερματικές συσκευές (ONUs) σε δικτυακές συσκευές «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας» (plug 'n' play), αφού πλέον όλες είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους λειτουργώντας ωστόσο σε διαφορετικό μήκος κύματος η κάθε μία.

Η πηγή του παλμού (BLS) βρίσκεται στην πλατφόρμα OLT και χρησιμοποιείται ως ένας μηχανισμός συντονισμού όλων των απομακρυσμένων τερματικών συσκευών (ONUs). Συγκεκριμένα, πρόκειται για έναν υψηλής πιστότητας αδιαμόρφωτο Οπτικό Ενισχυτή Προσμίξεων Ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifier EDFA) ο οποίος παράγει αυθόρμητους οπτικούς παλμούς (Amplitude Spontaneous Emissions) χαμηλής ισχύος. Η σύζευξη μεταξύ της πηγής BLS και της οπτικής γραμμής γίνεται με διάφορα παθητικά στοιχεία τα οποία απαλλάσσουν τον διαχειριστή από πολλές δυσκολίες και ιδιαιτερότητες που αφορούν τα οπτικά χαρακτηριστικά της ζεύξης. Το μόνο που απαιτείται είναι η σύνδεση της πλατφόρμας με την εξωτερική οπτική υποδομή. Στη συνέχεια, όλα τα τερματικά που βρίσκονται στα άκρα του δικτύου (ONUs) θα αναγνωρίσουν την πηγή και θα κλειδώσουν στο μήκος κύματος που τους υποδεικνύεται από το ενδιάμεσο φίλτρο AWG.





Σχήμα 5 – Τεχνολογία WDM PON

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙV

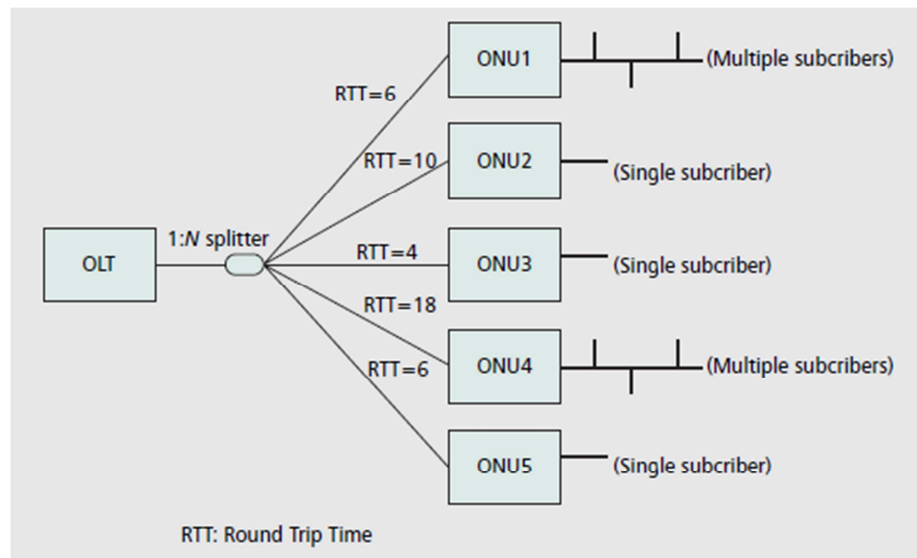
### Οπτικά Παθητικά Δίκτυα

---

#### 4.1 Γενικά

Καθώς η δικτύωση με βάση το χαλκό δείχνει τα όρια της στην επίτευξη υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης πληροφορίας, μια νέα τεχνολογία έρχεται για να την αντικαταστήσει εξ' ολοκλήρου. Οι σημερινές ανάγκες σύνδεσης, τουλάχιστον μεταξύ των κέντρων επικοινωνιών, δεν ικανοποιούνται με τα σημερινά καλώδια. Αν και μπορούν πλέον να επιτευχθούν μεγάλες ταχύτητες, ο περιορισμός της μέγιστης απόστασης κάνει την ανάγκη αντικατάστασής τους εντονότερη. Οι οπτικές ίνες από γυαλί ή πλαστικό προσφέρουν ταχύτητα και προστασία από περιβαλλοντικές συνθήκες σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Το φαινομενικά μεγάλο κόστος αντισταθμίζεται με πολλαπλά οφέλη από τη χρήση τους. Πλέον στα κεντρικά σημεία διανομής η χρήση τους είναι μονόδρομος. Το τελικό στάδιο που φτάνει μέχρι τον χρήστη, αποκαλούμενο και ως Τελικό Μίλι (Last Mile), εξακολουθεί να κάνει χρήση του χαλκού για λόγους ευκολίας και κόστους.

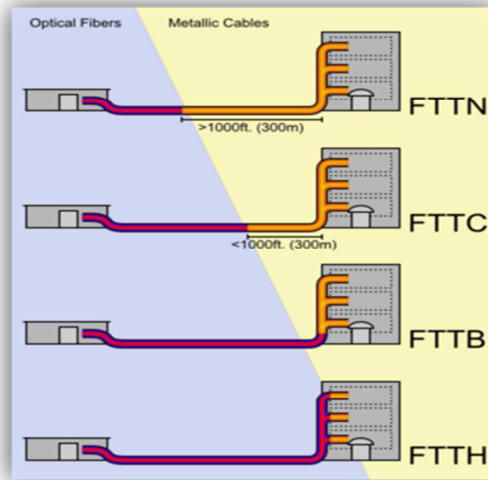
Τα οπτικά παθητικά δίκτυα (PON) χρησιμοποιούν οπτικές ίνες και συνδέουν τους τερματικούς κεντρικούς σταθμούς μέχρι το Τελικό Μίλι. Το όνομά τους περιέχει τον όρο “παθητικά” για να περιγράψει την απουσία ηλεκτρικών συσκευών αναμετάδοσης. Η ανάπτυξή τους άρχισε στην δεκαετία του '80 και καθώς η χρήση τους γινόταν όλο και πιο ευρεία, ξεκίνησε να τυποποιείται από το 2000. Τα εξαρτήματα αναμετάδοσης είναι υπεύθυνα για τη διανομή δεδομένων μεταξύ ενός Οπτικού Τερματικού Γραμμής (Optical Line Terminator [OLT]) και πολλών Οπτικών Μονάδων Δικτύου (Optical Network Unit [ONU]). Σε κάθε ONU μπορεί να είναι συνδεδεμένος ένας ή περισσότεροι συνδρομητές σε τοπολογία αρτηρίας όπως φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1 - OLT – ONU (ONT)

Οι οπτικοί διαχωριστές/μείκτες χρησιμοποιούν Time Division Multiplexing και διαχωρίζουν το σήμα που προέρχεται από τον OLT σε κάθε ONU ενώ συνθέτουν τα αποστελλόμενα σήματα από τα ONUs σε μια ίνα. Στα δίκτυα Wavelength Division Multiplexing την διαδικασία αναλαμβάνουν οι Arrayed Waveguide Gratings που διανέμουν την κίνηση ανάλογα με το μήκος κύματος που έχει το σήμα.

Το οπτικό δίκτυο διανομής έχει στόχο να χωρίσει το δίκτυο ανάλογα με τον τύπο του δέκτη, τις προτεραιότητές του και την υπολειπόμενη απόσταση που καλύπτεται με το συμβατικό δίκτυο χαλκού<sup>39</sup>. Έτσι δημιουργούνται τέσσερις περιπτώσεις, 1να μέχρι τον Κόμβο (Fiber-to-the-Node (FTTN)), 1να μέχρι το Πεζοδρόμιο (Fiber-to-the-Curb (FTTC)), 1να μέχρι την Εργασία (Fiber-to-the-Business (FTTB)) και 1να μέχρι το Σπίτι (Fiber-to-the-Home (FTTH)) όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.



Σχήμα 2 – Διαχωρισμός δικτύου διανομής

Στα δίκτυα PON κατά τη μετάδοση δεδομένων από έναν OLT, το σήμα χωρίζεται μέσω ενός διαχωριστή (splitter) και διανέμεται σε όλα τα ONUs. Υπάρχει περιορισμένος αριθμός ONUs ο οποίος προκύπτει από την απώλεια ισχύος του σήματος. Τον περιορισμό θέτει το μακρινότερο ONU λόγω εξασθένησης. Στην αντίθετη περίπτωση, αυτό που απαιτεί ιδιαίτερο έλεγχο είναι η σύνθεση πολλών σημάτων από διάφορα ONUs σε ένα OLT. Πρέπει να υπάρχει συγχρονισμός για να αποφευχθεί η απώλεια σήματος στον δέκτη. Το πρόβλημα αυτό παρακάμπτεται με τη χρήση ερωταποκρίσεων (polling) (και διαφόρων άλλων σύνθετων τεχνικών που θα αναλυθούν παρακάτω) για αποστολή δεδομένων από τα ONUs. Ένα πρόβλημα που επίσης προκύπτει είναι η ταυτόχρονη αποστολή και λήψη, αν δεν υπάρχει αφιερωμένη οπτική ίνα για τις δύο καταστάσεις. Για την εξάλειψη της παραδιαφωνίας (crosstalk) χρησιμοποιείται διαφορετικό μήκος κύματος στα 1480-1500nm για το ρεύμα καθόδου (downstream) και στα 1260-1360nm για το ρεύμα ανόδου (upstream). Το εύρος κύματος 1550-1560nm μπορεί να χρησιμοποιηθεί για downstream διανομής RF βίντεο. Στην περίπτωση του ρεύματος καθόδου τίθεται θέμα ασφαλείας αφού τα δεδομένα εκπέμπονται από το OLT σε πολλά ONUs.

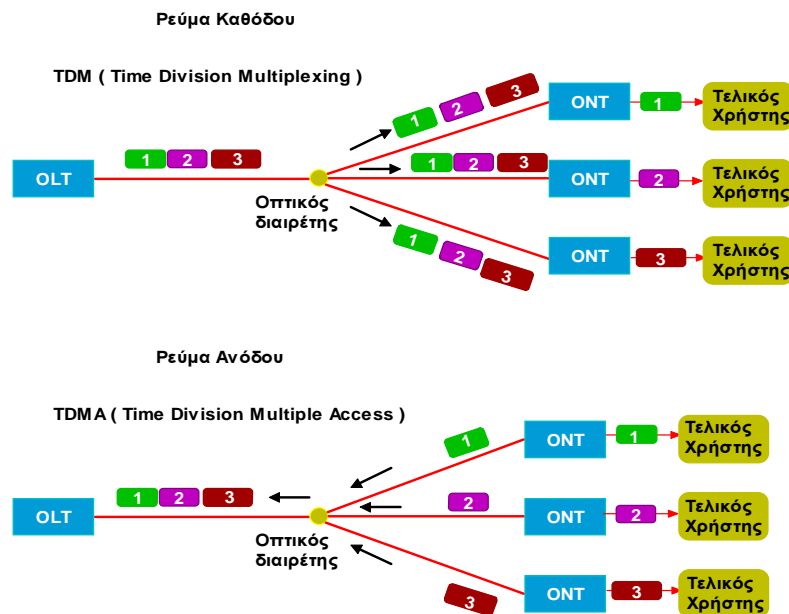
Προστασία από κακοπροαίρετη ενέργεια επαναπρογραμματισμού ενός ONU να δέχεται πακέτα που προορίζονται για κάποιο άλλο, επιτυγχάνεται με χρήση του αλγορίθμου κρυπτογράφησης AES (Advanced Encryption Standard). Δέχεται κλειδιά των 128, 192 και 256 bytes που αλλάζουν περιοδικά χωρίς να επηρεάζουν τα δεδομένα και κάνουν εξαιρετικά δύσκολη την παραβίαση της κρυπτογράφησης. Μια ακόμα λύση θα ήταν να χρησιμοποιηθούν πολλά διαφορετικά μήκη κύματος, αλλά αφού αυτό κρίνεται ως ανέφικτο, το θέμα διευθετείται με τη χρήση έξτρα ινών και προστατευμένων μεταγωγών.

## 4.2 Τεχνολογίες Οπτικών Παθητικών Δικτύων

### ➤ **APON**

#### Χαρακτηριστικά και λειτουργία

Ο συνδυασμός της τεχνολογίας PON με τον ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM) αναπτύχθηκε το 1995 από την FSAN, διότι θεωρήθηκε τότε ως η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε υπηρεσίες των διαφόρων χρηστών, οπότε δημιουργήθηκαν τα APON τα οποία υποστήριζαν διάφορες αρχιτεκτονικές όπως τις FTTH, FTTB/C και FTTH/CAB. Η θεώρηση αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι εκείνη την εποχή οι λογικότερες και πιο συμφέρουσες επιλογές ήταν για τον τρόπο μεταφοράς δεδομένων ο ATM και για την τοπολογία των δικτύων πρόσβασης τα δίκτυα PON<sup>40</sup>. Ο ATM θεωρείτο ο καταλληλότερος για να υποστηρίξει πολλαπλά πρωτόκολλα και τα PON η οικονομικότερη ευρυζωνική οπτική λύση. Η πρόταση της FSAN έγινε αποδεκτή ως πρότυπο από την ITU και περιγράφεται στο ITU-T Rec.G.983, όπου δίνονται οι προδιαγραφές για την αρχιτεκτονική, τον εξοπλισμό και τη διαστρωμάτωση του APON και συγκεκριμένα η περιγραφή του υποστρώματος σύγκλισης μετάδοσης δεδομένων και του φυσικού υποστρώματος.



*Σχλημα 3- Ρεύμα ανόδου – καθόδου δικτύου APON*

Στο APON με κριτήρια την απλότητα και το κόστος επιλέχθηκαν η τεχνική TDM για την προς τα κάτω (downstream) ζεύξη και για την πολλαπλή προσπέλαση στο μέσο για την προς τα άνω (upstream) ζεύξη η TDMA τεχνική. Στο σχήμα 3 φαίνονται τα βασικά στοιχεία του δικτύου: OLT, ONU/ONT και παθητικός οπτικός διαιρέτης. Στο APON μία οπτική ίνα διαιρείται παθητικά μέχρι και 64 φορές με αποτέλεσμα 64 ONU/ONT να μοιράζονται τη χωρητικότητα της. Η παθητική διαίρεση επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται το εύρος ζώνης και κατ' επέκταση το κόστος. Το κόστος μειώνεται ακόμα περισσότερο με την ελάττωση του αριθμού των οπτο-ηλεκτρονικών στοιχείων που απαιτούνται για το OLT δεδομένου ότι μία διεπαφή μοιράζονται περισσότερα του ενός ONU/ONT.

Το APON χρησιμοποιεί τοπολογία διπλού αστέρα. Ο πρώτος αστέρας βρίσκεται στο OLT όπου η διεπαφή του δικτύου ευρείας ζώνης για τις υπηρεσίες διαιρείται λογικά και οδηγείται στη διεπαφή ATM-PON. Ο δεύτερος αστέρας

υλοποιείται στον διαιρέτη όπου η πληροφορία διαιρείται παθητικά και οδηγείται σε κάθε ONU. Το OLT, που τοποθετείται στο κέντρο μεταγωγής, είναι το σημείο διασύνδεσης μεταξύ του Δικτύου Πρόσβασης και των σημείων υπηρεσιών στο δίκτυο κορμού (backbone). Όταν δεδομένα από το δίκτυο φθάνουν στο OLT οδηγούνται στον παθητικό διαιρέτη χρησιμοποιώντας την τεχνική TDM. Το OLT λειτουργεί ως ATM τελικός μεταγωγέας με ATM-σύγχρονη οπτική (SONET) διεπαφή από την πλευρά του δικτύου κορμού και ATM-PON διεπαφή από την πλευρά του συνδρομητή.

Το κάθε ONU φιλτράρει τα κελιά που φθάνουν και ανακτά μόνο αυτά που προορίζονται για αυτό. Κάθε κελί έχει ένα 28-bit πεδίο που καθορίζει τις τιμές που αφορούν στη νοητή διαδρομή και στον νοητό δίαυλο, που αναφέρονται ως VPI/VCI. Κάθε OLT αρχικά στέλνει ένα μήνυμα στο ONU για να το προετοιμάσει να δεχτεί κελιά με συγκεκριμένες τιμές VPI/VCI. Τα πεδία VPI/VCI, της επικεφαλίδας του πακέτου ATM, χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της πολυπλεξίας πακέτων σε μια κοινή ζεύξη.

Δεδομένου ότι στο κανάλι ρεύματος ανόδου χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο TDMA, κάθε ONT πρέπει να είναι συγχρονισμένο χρονικά με κάθε άλλο ONT. Αυτό πραγματοποιείται με μία διαδικασία που ονομάζεται αποστασιομέτρηση (ranging) των ONU και βασίζεται στη λογική ότι το OLT πρέπει να καθορίσει πόσο μακριά του βρίσκεται το κάθε ONT, έτσι ώστε να του παραχωρήσει τη βέλτιστη χρονική σχισμή μέσα στην οποία θα πρέπει να εκπέμψει, για να αποφευχθούν προβλήματα συγκρούσεων μετάδοσης. Στη συνέχεια το OLT στέλνει μήνυμα παραχώρησης μέσω των κελιών διαχείρισης PLOAM του φυσικού επιπέδου για να αναθέσει στο κάθε ONT συγκεκριμένες χρονικές σχισμές. Τέλος το ONT προσαρμόζει τη διεπαφή υπηρεσιών σε ATM και στη συνέχεια για την επικοινωνία με το OLT θα χρησιμοποιήσει την τεχνική TDMA.

Στο APON χρησιμοποιείται μία οπτική ίνα τόσο για το κανάλι ανόδου όσο και για το κανάλι καθόδου, οπότε χρησιμοποιούνται δύο μήκη κύματος 1550 nm

για το downstream κανάλι και 1310nm για το upstream κανάλι. Συμπληρωματικά αναφέρουμε ότι θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα μήκος κύματος η επιλογή όμως για δύο παρέχει καλύτερη οπτική απομόνωση για τους πομπούς και τους δέκτες λέιζερ και εξαλείφει την ανάγκη των ακριβών διαιρετών δέσμης φωτός.

Τα κελιά ATM μετατρέπονται απευθείας σε οπτικό κύμα και στέλνονται στο δίκτυο PON. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο ηλεκτροοπτικό εξοπλισμό, ειδικό για τη μετάδοση κίνησης σε ταχύτητες Mbit/sec. Επιπλέον δεδομένου ότι υπάρχουν καθοδικά κανάλια κοινοποίησης (broadcast channels) στα PON χρησιμοποιούνται τεχνικές κρυπτογράφησης για να επιτευχθεί ασφάλεια.

Το APON δεν εξαρτάται από τις διάφορες υπηρεσίες με αποτέλεσμα να μπορούν να υλοποιηθούν τόσο οι κλασικές όσο και μελλοντικές υπηρεσίες. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι μπορεί να μεταφέρει πακέτα Ethernet και να υποστηρίζει T1.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθούμε στον όρο Broadband PON (BPON) που με την πάροδο του χρόνου εισήχθη και χρησιμοποιείται, είναι ταυτόσημος με τον όρο APON με τη μοναδική διαφοροποίηση ότι περιγράφονται δίκτυα που έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν επιπλέον ευρυζωνικές υπηρεσίες, όπως υπηρεσίες video.

### Οφέλη των APON

Η συντήρηση της οπτικής ίνας είναι οικονομικότερη από αυτήν των συστημάτων που βασίζονται στο χαλκό με αποτέλεσμα οι παροχείς να μειώνουν το κόστος και να αυξάνεται το κέρδος τους ή να έχουν τη δυνατότητα να χαμηλώνουν τις τιμές με αποτέλεσμα να γίνονται πιο ανταγωνιστικοί.

Στα ATM-PON οι οπτικές διεπαφές βρίσκονται στα OLT, οπότε μία μόνο ίνα χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει μέχρι 64 τελικές τοποθεσίες χρηστών.



Συνεπώς έχουμε μείωση των οπτικών διεπαφών από 64 σε 1 σε σχέση με τα σημείο – προς – σημείο (point-to-point) οπτικά συστήματα.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι στα APON πραγματοποιείται συσσώρευση κελιών ATM στα OLT. Η συσσώρευση αυτή επιτρέπει στους παροχείς να εξυπηρετούν πολύ περισσότερους χρήστες από ότι στην περίπτωση που θα χρησιμοποιούνταν μόνο τεχνικές βασισμένες στο TDM. Έχει υπολογιστεί ότι η τεχνολογία APON μπορεί να είναι από 20 έως 40 τα εκατό οικονομικότερη από συστήματα πρόσβασης με κυκλώματα. Η οικονομία οφείλεται στην προαναφερθείσα συγκέντρωση του ATM και τη στατιστική πολυπλεξία σε συνδυασμό με την από κοινού χρήση των ενεργητικών οπτο-ηλεκτρονικών εξαρτημάτων μεταξύ των διαιρετών.

Επιπλέον, επειδή τα ONT μοιράζονται την ίδια ίνα και οπτικό διαιρέτη, μοιράζονται κατ' επέκταση και το εύρος ζώνης, οπότε με κατάλληλα δυναμικής ανάθεσης του εύρους ζώνης πρωτόκολλα είναι δυνατό να εξυπηρετεί ο παροχέας ακόμα περισσότερους χρήστες.

Το APON έχει ως πυρήνα την τεχνολογία ATM συνεπώς ένα απλό σύστημα διαχείρισης μπορεί να προβλέψει το απαιτούμενο εύρος από άκρο σε άκρο. Ακόμα κρίνεται εύκολη η αύξηση του εύρους ζώνης μιας δεδομένης ζεύξης αν αυτό απαιτηθεί μελλοντικά. Επιπλέον μπορεί να εξυπηρετήσει σχεδόν κάθε επιθυμητή υπηρεσία.

Τέλος, τα ενεργητικά εξαρτήματα του APON τοποθετούνται στο κτίριο του πελάτη ή στο κέντρο μεταγωγής και όχι σε εξωτερικά εγκατεστημένα τερματικά. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφονται οι δαπάνες για συστήματα εφεδρικών μπαταριών και τα ενεργητικά στοιχεία που πρέπει να είναι ανθεκτικά στις μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας.

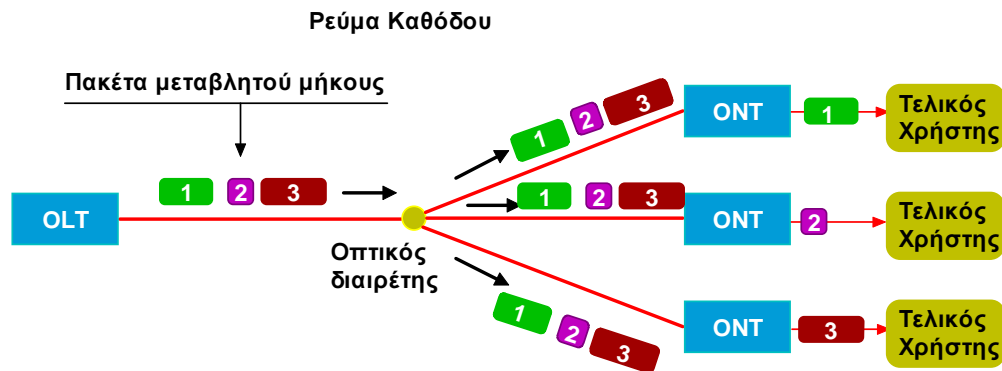
## ➤ EPON

### Χαρακτηριστικά και λειτουργία

Με το πέρασμα του χρόνου το APON θεωρήθηκε ως ακατάλληλη λύση για τον τοπικό βρόχο εξαιτίας της αδυναμίας του να υποστηρίξει υπηρεσίες βίντεο, το ανεπαρκές του εύρος, την πολυπλοκότητά του και το κόστος του. Η ευρεία χρήση του Ethernet έδινε την εντύπωση ότι η χρήση των Ethernet-PON (EPON) θα εξάλειφε την ανάγκη για μετατροπή από ATM σε IP πρωτόκολλο στη σύνδεση WAN/LAN. Οι κατασκευαστές EPON εστίαζαν αρχικά στην ανάπτυξη FTTB και FTTC λύσεων με μακροπρόθεσμο στόχο την ανάπτυξη μίας FTTH λύσης για τη διανομή δεδομένων, video και φωνής πάνω από την ίδια πλατφόρμα. Το EPON παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, ελάττωση κόστους και ευρύτερες υπηρεσίες από το APON ενώ η αρχιτεκτονική του είναι παρόμοια και κληρονομεί πολλά χαρακτηριστικά του G.983 που αφορούν στα APON.

Η κύρια διαφορά μεταξύ APON και EPON είναι ότι τα δεδομένα στο EPON μεταφέρονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους ως και 1518 bytes σύμφωνα με το πρωτόκολλο της IEEE 802.3 για το Ethernet. Ενώ στο APON σε κελιά ATM των 53 bytes όπως επιβάλλεται από το πρωτόκολλο ATM, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι δύσκολη και όχι αποδοτική η μεταφορά σε ένα δίκτυο APON κίνησης που βασίζεται στο IP όπου τα δεδομένα χωρίζονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους ως και 65535 bytes. Για να μεταφερθεί η IP κίνηση στο APON τα πακέτα θα πρέπει να καταμηθούν σε κομμάτια των 48-bytes και στο κάθε ένα από αυτά να προσαρτηθεί επικεφαλίδα ATM των 5-bytes. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, πολύπλοκη και προσθέτει επιπλέον κόστος στα ONT και OLT. Επιπλέον, για κάθε τμήμα δεδομένων των 48-bytes έχουμε σπατάλη εύρους 5-bytes. Αντίθετα το Ethernet είναι φτιαγμένο για να καλύψει κίνηση IP και μειώνει δραστικά τις επικεφαλίδες σε σχέση με το ATM.

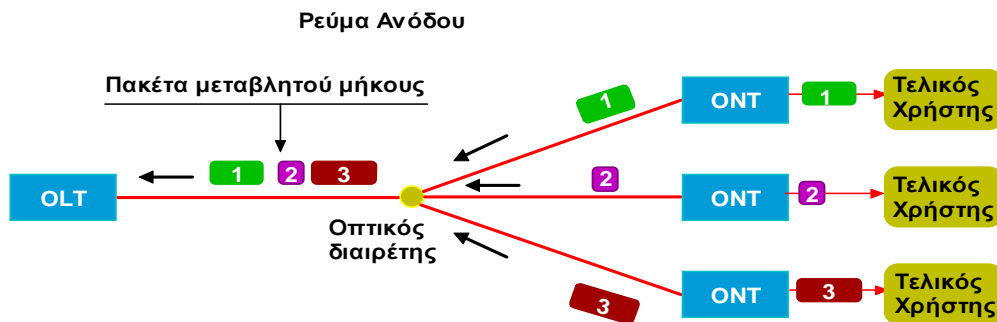
Στο EPON η διαδικασία εκπομπής δεδομένων προς τα κάτω από το OLT στα ONU είναι διαφορετική από την αντίστοιχη προς τα άνω. Οι διαφορετικές αυτές διαδικασίες φαίνονται στα σχήματα.



Σχήμα 4 - Ρεύμα καθόδου δικτύου EPON

Συγκεκριμένα στο σχήμα 4 τα δεδομένα εκπέμπονται από το OLT προς τα ONU σε πακέτα μεταβλητού μήκους με μέγιστο μήκος 1518 bytes, σύμφωνα με το πρωτόκολλο της IEEE 802.3. Κάθε πακέτο φέρει μία επικεφαλίδα που καθορίζει το ONU για το οποίο προορίζεται το πακέτο. Επιπλέον, κάποια πακέτα είναι δυνατό να προορίζονται για όλα τα ONU (broadcast packets), ενώ άλλα για μία δεδομένη ομάδα ONU (multicast packets). Στο δεδομένο σχήμα η κίνηση χωρίζεται στον διαιρέτη σε τρία διαφορετικά σήματα που κάθε ένα φέρει όλα τα πακέτα. Όταν τα πακέτα φτάσουν σε ένα ONU τότε αυτό δέχεται μόνο τα πακέτα που προορίζονται για αυτό, ενώ απορρίπτει όλα τα υπόλοιπα. Συγκεκριμένα στο παράδειγμά μας το ONU-1 δέχεται τα πακέτα 1,2 και 3 αλλά διανέμει στον τελικό χρήστη-1 μόνο το πακέτο 1. Όσον αφορά την προς τα άνω ζεύξη η λειτουργία της οποίας συνοψίζεται στο σχήμα, χρησιμοποιείται η τεχνική TDM, κατά την οποία χρονικές σχισμές εκπομπής ανατίθενται σε κάθε ONU. Οι χρονικές σχισμές είναι συγχρονισμένες, έτσι ώστε να μην υπάρχουν συγκρούσεις, όταν τα πακέτα από διαφορετικά ONU συνδυάζονται στην κοινή ίνα. Στο συγκεκριμένο

παράδειγμα το ONU-1 εκπέμπει το πακέτο 1 στην πρώτη χρονική σχισμή, το ONU-2 εκπέμπει το πακέτο 2 στη δεύτερη μη επικαλυπτόμενη με την πρώτη χρονική σχισμή και το ONU-3 εκπέμπει το πακέτο 3 στην τρίτη μη επικαλυπτόμενη με τη δεύτερη χρονική σχισμή όπως στο σχήμα 5.



Σχήμα 5 - Ρεύμα ανόδου δικτύου EPON

### Οφέλη των EPON

Τα EPON θεωρήθηκαν απλούστερα, πιο αποδοτικά και λιγότερο δαπανηρά από οποιαδήποτε εναλλακτική λύση πολλαπλών υπηρεσιών δικτύου πρόσβασης την εποχή που προτάθηκαν. Τα EPON προσέφεραν το υψηλότερο εύρος ζώνης στους πελάτες συγκριτικά με οποιοδήποτε άλλο δίκτυο PON. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μπορούν να υποστηριχθούν περισσότεροι συνδρομητές από το EPON, να διατίθεται περισσότερο εύρος ανά συνδρομητή, καλύτερο QoS και να υπάρχει η δυνατότητα υποστήριξης υπηρεσιών video.

Επιπλέον, τα EPON οδηγούσαν σε μείωση των δαπανών μέσω της εξάλειψης των πολύπλοκων και ακριβών στοιχείων ATM και SONET και δραματική απλοποίηση της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Ακόμα, η εξάλειψη του κόστους συντήρησης των εξωτερικών εγκαταστάσεων δεδομένου ότι δε χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά στοιχεία σε αυτές λόγω χρήσης των μεγάλης

διάρκειας ζωής παθητικών εξαρτημάτων οδηγούσε σε μείωση της συνολικής δαπάνης. Τέλος, οι Ethernet διεπαφές εξάλειφαν την ανάγκη για επιπλέον DSL ή καλωδιακά μόντεμ γεγονός που οδηγούσε σε περαιτέρω μείωση του κόστους.

Η τεχνολογία EPON δεδομένου ότι μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες, βίντεο και φωνής έδινε τη δυνατότητα στους παροχείς να προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών και κατ' επέκταση να αυξήσουν τα έσοδά τους. Συγκεκριμένα, εκτός από τις υπηρεσίες POTS, T1, 10/100BASE-T και DS3 τα EPON υποστηρίζουν και εξελιγμένες λειτουργίες όπως επιπέδου 2 και 3 μεταγωγή και δρομολόγηση, μετάδοση φωνής (VOIP), IP multicast, VPN 802.1Q και κατανομή και μορφοποίηση του εύρους ζώνης. Συνοψίζοντας τα EPON εξαιτίας της απλότητάς τους, που προέρχεται από τη χρήση των τοπολογιών Ethernet, έδιναν τη δυνατότητα στους παροχείς να μπορούν εύκολα να αναπτύσσουν, να προβλέπουν και να διαχειρίζονται τις υπηρεσίες.

## ➤ GPON

Το 2001 η FSAN ξεκίνησε μία προσπάθεια, έτσι ώστε να αναγνωριστούν ως standard τα δίκτυα PON τα οποία λειτουργούσαν σε ταχύτητες μεγαλύτερες του 1Gbps. Εκτός από την ανάγκη να υποστηριχθούν υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων, το συνολικό πρωτόκολλο θα έπρεπε να είναι ανοιχτό για επανεξέταση, έτσι ώστε η τελική μορφή που αυτό θα λάβει να είναι η βέλτιστη και η πιο αποδοτική όσον αφορά στην υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών και λειτουργιών διαχείρισης, συντήρησης και πρόβλεψης. Το αποτέλεσμα της προσπάθειας της FSAN ήταν μία νέα λύση στην αγορά οπτικών δικτύων πρόσβασης τα GPON που προσφέρουν πολύ υψηλά bit rates, έως και 2,048 Gbps, ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζουν τη μεταφορά πολλαπλών υπηρεσιών, ιδιαίτερα δεδομένων και TDM, σε απλές διατάξεις και με μεγάλη αποδοτικότητα.

Το GPON διατηρεί, όπου αυτό είναι δυνατό, τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που χρονικά προηγήθηκαν αυτού και περιγράφονται στα ITU-T G.982 και στη σειρά G.983.x Recommendations, έτσι ώστε να είναι συμβατά με όλες τις τεχνολογίες PON που προηγήθηκαν. Τα GPON, εξαιτίας του μεγάλου εύρους ζώνης που παρέχουν, υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών συμπεριλαμβανομένων υπηρεσιών φωνής, TDM, video, Ethernet, 10/100BASE-T, μισθωμένες γραμμές και επεκτάσεις χωρίς καλώδιο. Επίσης είναι δυνατό να εξυπηρετήσουν αποστάσεις των 60 km μεταξύ ONT/ONU και OLT, η απόσταση όμως αυτή υπολογίζεται χωρίς να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί του φυσικού μέσου και αποτελεί τη λογική απόσταση. Σε αντίθεση με την τιμή αυτή η μέγιστη φυσική απόσταση που είναι δυνατό να καλυφθεί είναι ίση με 20 km. Τα GPON υποστηρίζουν 7 διαφορετικά bit rates χρησιμοποιώντας για όλα το ίδιο πρωτόκολλο. Οι δυνατοί συνδυασμοί για το upstream και το downstream κανάλι δίνονται στον πίνακα 1.

Upstream	Downstream
155 Mbit/s up	1.2 Gbit/s down
622 Mbit/s up	1.2 Gbit/s down
1.2 Gbit/s up	1.2 Gbit/s down
155 Mbit/s up	2.4 Gbit/s down
622 Mbit/s up	2.4 Gbit/s down
1.2 Gbit/s up	2.4 Gbit/s down
2.4 Gbit/s up	2.4 Gbit/s down

Πίνακας 1 - Συνδυασμοί bit rate για upstream/downstream κανάλι στα GPON

Όσον αφορά τη διαίρεση του σήματος της οπτικής ίνας στον οπτικό διαιρέτη μία ρεαλιστική υλοποίηση με βάση το κόστος είναι η διαίρεση 1:64, ενώ παρά το γεγονός αυτό προβλέποντας τις μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις το TC στρώμα πρέπει να λαμβάνει μέριμνα για διαίρεση 1:128.

Επιπλέον, το GPON έχει μεγάλες δυνατότητες όσον αφορά στις λειτουργίες ανάπτυξης, πρόβλεψης και διαχείρισης του δικτύου, ενώ παρέχει και ασφάλεια σε επίπεδο πρωτοκόλλου για την κίνηση καθόδου. Συγκεκριμένα δεδομένου του multicast χαρακτήρα του μεριμνά, ώστε να μην είναι εύκολη η αποκωδικοποίηση των καθοδικών δεδομένων από όλους τους χρήστες παρά μόνο από αυτόν για τον οποίο προορίζονται τα δεδομένα και επιτρέπει προς την κατεύθυνση αυτή οικονομικά αποδοτικές υλοποιήσεις.

#### **4.3 Σύγκριση τεχνολογιών APON, EPON και GPON**

Στην παράγραφο αυτή θα δοθούν οι συγκρίσεις, με βάση τη σειρά εμφάνισής τους, των τεχνολογιών που αναφέρθηκαν στις παραπάνω ενότητες σε μία προσπάθεια να καταστεί συνολικά κατανοητή η μετάβαση από τη μία τεχνολογία στην άλλη καθώς και οι ανάγκες που οδήγησαν στην εξέλιξη αυτή<sup>33,40</sup>. Σε ένα πρώτο στάδιο θα συγκριθούν οι τεχνολογίες APON και EPON, ενώ σε ένα δεύτερο οι EPON και GPON. Ακόμα στην ενότητα αυτή δίνονται συνοπτικά και τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που αναφέρθηκαν στις παραπάνω ενότητες.

#### **APON vs EPON**

Στον πίνακα 2 δίνεται η σύγκριση των τεχνολογιών APON και EPON.

	EPON	APON
Εισηγητής	EFM (Ethernet in the First Mile)	NTT,BC,etc.
Χρονολογία	-	1995
Πρωτόκολλο Επιπέδου 2	Ethernet	ATM
Μεταφορά	Frame	Fixed Cell
Ταχύτητα	1.25/1.25 Gbps	155/622 Mbps
Κύριοι Παροχείς Υπηρεσιών	CLECs, ELECs, DLECs, MSOs, ILECs	FSAN ILECs
Standard	IEEE 803.2ah	FSAN , ITU G.983
Τεχνική Upstream Ζεύξης	TDMA, κ.α.	TDMA
IP Αποδοτικότητα	Καλή	Μέτρια
Αναβάθμιση	Ναι στα 10Gbps	Δύσκολη
ONU λειτουργίες	Δρομολόγηση , Μεταγωγή κ.α.	-
Κύρια Δαπάνη	Ethernet Switch	ATM Switch
Υπηρεσίες	POTS, Data VOIP, IP Video	POTS, Data

Πίνακας 2 - Σύγκριση APON-EPON

## EPON vs GPON



Στον πίνακα 3 δίνεται η σύγκριση των τεχνολογιών EPON και GPON.

	EPON	GPON
Εισηγητής	EFM (Ethernet in the First Mile)	FSAN
ODN classes  ODN = Optical Distribution Network = Οπτικό δίκτυο διανομής	A,B	A, B, C  Η χρήση της ODN class C οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους για την τοπολογία μέσω διπλασιασμού των end-users σε κάθε δένδρο PON
Ταχύτητα	1.25/1.25 Gbps	1.25,2.5Gbps(d)/155,622 Mbps ή 1.25,2.5Gbps(u)
Αναβάθμιση	Μία επιλογή τα 10Gbps	Πολλές επιλογές
Ταχύτητα Upstream Ζεύξης	1.25Gbps πάντα → περιττό κόστος διότι δεν είναι αναγκαία πάντα τέτοια ταχύτητα για την upstream ζεύξη	Καθορίζεται ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες
Απόδοση	Μικρή → μεγάλες IP επικεφαλίδες φόρτωμα του δικτύου	Μεγάλη
Κόστος	Η TDM τεχνική στα EPON και η μεταφορά φωνής υπαγορεύουν επιπλέον ανάγκες για Hardware/Software για τα VoIP schemes → Επιπλέον κόστος	Τα GPON υποστηρίζουν μεταφορά υπηρεσιών TDM (σε χαμηλούς E1/T1 και υψηλούς ρυθμούς STM1/OC3) στην πρωταρχική τους τυποποίηση και για αυτό τα standard για Jitter και καθυστερήσεις ικανοποιούνται χωρίς αύξηση του κόστους

Πίνακας 3 - Σύγκριση APON – GPON

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

### Δίκτυα GPON

---

#### 5.1 Γενικά

Το GPON είναι ένα παθητικό οπτικό δίκτυο, το οποίο επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων με ρυθμό Gbit/sec. Η τοπολογία που χρησιμοποιεί είναι αυτή του παθητικού δένδρου, αφού κρίθηκε ως η πιο συμφέρουσα οικονομικά. Για να είναι δυνατή η μεταφορά δεδομένων με ρυθμό Gbit/sec σχεδιάστηκε εκ νέου το υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence) και προδιαγράφηκαν οι απαιτήσεις για το υπόστρωμα φυσικού μέσου, ώστε να είναι εφικτή η μετάδοση σε τέτοιους υψηλούς ρυθμούς.

Το δίκτυο GPON βασίζεται στη μεταφορά πακέτων με έναν πιο γενικό τρόπο σε σύγκριση με τους άλλους τύπους δικτύων (EPON, APON). Πιο συγκεκριμένα το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως EPON, αλλά μπορεί να μεταδώσει και γνήσια πακέτα IP, με την προσθήκη μιας επικεφαλίδας MPLS (Multi Protocol Label Switching – Μεταγωγή Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων), ή ακόμα και πακέτων ATM. Αυτό είναι εφικτό επειδή το πλαίσιο (frame) του στρώματος μετάδοσης σχεδιάστηκε εκ νέου, χωρίς να βασιστεί σε κάποια ήδη υπάρχουσα δομή που αφορούσε σε προγενέστερο δίκτυο (EPON, APON), με βασικό κριτήριο την αποδοτική και οικονομική υποστήριξη μεταβλητού μήκους πακέτων κάνοντας χρήση διαδοχικών σχισμών σταθερού μήκους. Η διαχείριση των πακέτων γίνεται από ένα πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC – Medium Access Protocol) που λειτουργεί με γνώμονα την Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS – Quality of Service), έτσι το GPON είναι ένα πλήρες δίκτυο πρόσβασης σε αντίθεση με το EPON που δε λαμβάνει υπόψη του τη QoS. Η καινούρια αυτή σχεδίαση του πλαισίου επιτρέπει την

αποδοτικότερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης για την παροχή υπηρεσιών πακέτου από παθητικά δίκτυα υψηλής ταχύτητας. Κατά τον καινούριο αυτό σχεδιασμό λήφθηκαν υπόψη διάφοροι περιορισμοί όπως το επίπεδο ισχύος, η λήψη δεδομένων σε εκρηκτική/καταιγιστική μετάδοση (burst mode), ο συγχρονισμός των ρολογιών, καθώς επίσης και ζητήματα όπως η μειωμένη πολυπλοκότητα του συστήματος και ο περιορισμός του κόστους. Στο ρεύμα ανόδου (upstream – από ONU προς το OLT) χρησιμοποιείται μη γραμμική κωδικοποίηση σε συνδυασμό με διόρθωση λαθών. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σε δίκτυο PON με λειτουργία καταιγιστικού ρυθμού (burst mode) στο ρεύμα ανόδου. Αυτό γίνεται έτσι, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερο απόθεμα ισχύος που είναι απαραίτητο για να αυξηθεί η μέγιστη απόσταση καθώς και ο λόγος της διαίρεσης του σήματος της οπτικής ίνας στον οπτικό διαιρέτη, με τελικό και σημαντικό αποτέλεσμα να εξυπηρετούνται από το δίκτυο περισσότεροι χρήστες.

## 5.2 Υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης (TC Layer)

### Γενικά

Στρώμα Μετάδοσης TC (Transmission Convergence) – Δημιουργεί και λαμβάνει πλαίσια μετάδοσης και είναι υπεύθυνο για την πληροφορία επικεφαλίδας που συνδέεται με το πλαίσιο μετάδοσης<sup>18</sup>.

Στρώμα Μετάδοσης – Ένα σύνολο διεργασιών που προετοιμάζουν τα κελιά ATM για μετάδοση στο φυσικό στρώμα. Το TC εξαρτάται και από το φυσικό στρώμα που χρησιμοποιείται<sup>15</sup>.

Οι βασικές αρχές του υποστρώματος σύγκλισης είναι :

- Δημιουργία του πλαισίου μετάδοσης και επανάκτησή του

- Προσαρμογή του πλαισίου μετάδοσης
- Αποσυσχέτιση του ρυθμού των πακέτων
- Δημιουργία αλληλουχίας ελέγχου λάθους επικεφαλίδας και επαλήθευση
- Οριοθέτηση των πακέτων

Το υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης (TC) επιτελεί κυρίως δύο λειτουργίες. Πρώτον, καλύπτει την ανάγκη για απόκρυψη της φυσικής δομής του δικτύου από τα ανώτερα στρώματα. Συγκεκριμένα επειδή τα παθητικά οπτικά δίκτυα, και ειδικά το GPON, χρησιμοποιούν τοπολογία δένδρου έχουμε στο ρεύμα ανόδου μια δομή πολλαπλών σημείων προς σημείο, γεγονός που σημαίνει ότι δημιουργούνται πολλά ανεξάρτητα μονοπάτια από τους χρήστες προς το OLT, πράγμα που επιθυμούμε να μην είναι ορατό στα ανώτερα στρώματα. Η δεύτερη λειτουργία είναι ο καθορισμός μιας δομής πλαισίου η οποία να υποστηρίζει μεγάλο πλήθος υπηρεσιών που σε κάθε μια αντιστοιχεί και κάποια συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Ο ρόλος του υποστρώματος μετάδοσης είναι καθοριστικός και για την οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος ενός PON, αφού είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του συστήματος μετάδοσης που θα εξυπηρετεί την απαιτούμενη μεταφορά δεδομένων. Το υπόστρωμα μετάδοσης δεδομένων αντιστοιχεί στο επίπεδο 1 και 2 της διαστρωμάτωσης σύμφωνα με το μοντέλο του OSI. Το TC σχεδόν πάντα συναντάται ως μέρος του στρώματος ATM και γι' αυτό ορίζεται ως υπόστρωμα.

### **5.3 Βασικές αρχές υποστρώματος μετάδοσης GPON**

Οι βασικές αρχές που υλοποιεί το υπόστρωμα μετάδοσης ενός δικτύου GPON είναι οι παρακάτω :

- Αντιστάθμιση της διαφορετικής απόστασης των ONU

Στο ρεύμα ανόδου ενός δικτύου PON, το οποίο χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική πολλαπλών σημείων προς σημείο, στέλνονται τα δεδομένα από τους χρήστες στο OLT κάνοντας χρήση του πρωτοκόλλου TDMA. Τον έλεγχο όλων αυτών των μεταδόσεων τον έχει το OLT. Προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκρούσεις μεταξύ της αποστολής δεδομένων από δύο διαφορετικά ONU και για να έχουμε αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης, το OLT πρέπει να γνωρίζει με ακρίβεια τη θέση κάθε ONU, και συγκεκριμένα την απόσταση ενός ONU από το OLT. Το μέγιστο της απόστασης μεταξύ OLT και ONU μπορεί να είναι 60 km, ενώ η μέγιστη διαφορά μεταξύ δύο ONU μπορεί να είναι 20 km. Για μήκος ίνας 20 km έχουμε μια καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ του πιο κοντινού ONU και του πιο απομακρυσμένου περίπου ίση με  $2 \times 100\mu\text{s}$  (διαδρομή από OLT σε ONU και αντιστρόφως). Με δεδομένο ότι σε ρυθμό  $1.24416 \text{ Gb/s}$  η μετάδοση ενός byte διαρκεί 6.43 ns, υπάρχει μια διαφορά 31100 σχισμών (byte slots) μεταξύ του πιο κοντινού και του πιο απομακρυσμένου ONU. Για το λόγο αυτό το OLT πρέπει να γνωρίζει το χρόνο μετάδοσης με επιστροφή για κάθε ONU. Αυτό γίνεται μέσω της διαδικασίας της αποστασιομέτρησης (ranging). Έτσι εφόσον το OLT γνωρίζει την καθυστέρηση με επιστροφή για κάθε ONU, επιβάλλει σε κάθε ONU να τηρεί μια συγκεκριμένη καθυστέρηση στην αποστολή δεδομένων. Η καθυστέρηση αυτή τηρείται από τη στιγμή που θα λάβει την άδεια (grant) για να στείλει δεδομένα έως ότου ξεκινήσει η αποστολή δεδομένων. Για κάθε ONU η καθυστέρηση είναι διαφορετική αφού εξαρτάται από τη θέση του στο δίκτυο.

- Ευθυγράμμιση bit/byte και συγχρονισμός εκρηκτικής (burst) κίνησης

Στο ρεύμα καθόδου (downstream) η συμβολοσειρά bit, κωδικοποιημένος με NRZ (Non Return to Zero), επιτρέπει τον εύκολο συγχρονισμό για τα ONU. Ο συγχρονισμός byte βασίζεται στην αναγνώριση της διάταξης του πλαισίου καθόδου (downstream frame). Στο ρεύμα ανόδου (upstream) χρησιμοποιείται η επικεφαλίδα (upstream overhead) για το συγχρονισμό, η οποία έχει μήκος 12 bytes στο GPON.

- Χρόνος επιτήρησης

Σκοπός του είναι να παρέχει επαρκή απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων εκρήξεων (μεταφορά δεδομένων από τους χρήστες που υπακούει σε εκρηκτική κίνηση) από δύο διαφορετικές ONU, ώστε να μην υπάρξει σύγκρουση. Επίσης, λαμβάνει υπόψη τον αριθμό που θα αναβοσβήσει το λέιζερ ενός ONU.

- Εισαγωγή

Η εισαγωγή επιτελεί δύο λειτουργίες. Πρώτον εξάγει τη φάση του συρμού bit ανοδικού ρεύματος που φθάνει σε σχέση με την τοπική ώρα στο OLT, επιτρέποντας έτσι το συγχρονισμό των bits και δεύτερον συμβάλλει στην επαναφορά της ισχύος. Η διαφορά θέσης των ONU σε σχέση με το OLT έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορετική εξασθένιση των οπτικών σημάτων όταν φθάνουν στο OLT.

- Αρχή

Υπάρχει ένα μοναδικό χαρακτηριστικό που υποδεικνύει την αρχή του συρμού ανόδου, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον συγχρονισμό των bytes.

- Ευθυγράμμιση πλαισίου
- Δομή του πλαισίου
- Ανάθεση σχισμών
- Ανάθεση εύρους ζώνης – MAC

Το πρωτόκολλο MAC επιτελεί ένα σημαντικό ρόλο στα δίκτυα PON, όπου υπάρχουν πολλές υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα να εξυπηρετηθούν. Ο ελεγκτής MAC, που υλοποιεί το πρωτόκολλο, δέχεται ως είσοδο διάφορες παραμέτρους σχετικές με το QoS για κάθε συνθήκη κίνησης, καθώς και στοιχεία από τα διάφορα ONU και αναλαμβάνει τη σωστή ανάθεση εύρους ζώνης σε κάθε ONU.

- Ακεραιότητα των πληροφοριών

Χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός πρόβλεψης λαθών (FEC – Forward Error Detection), δηλαδή μια τεχνική κωδικοποίησης που επιτρέπει την εξασφάλιση του ίδιου ρυθμού λαθών (Bit Error Rate), αλλά σε μικρότερη ευαισθησία. Όμως έτσι έχουμε μείωση του ωφέλιμου εύρους ζώνης. Το FEC χρησιμοποιείται αντί

ενός πρωτοκόλλου επανάληψης, δηλαδή ενός πρωτοκόλλου που ζητά την επανεκπομπή δεδομένων σε περίπτωση λάθους. Το FEC παρέχει επαρκή bit, ώστε να γίνει διόρθωση λαθών μέχρι ενός αριθμού, όπου αυτό απαιτείται.

- Ασφάλεια

Εξαιτίας της κοινοποίησης της πληροφορίας σε όλα τα ONU στο κανάλι καθόδου, υπάρχει η δυνατότητα κάποιο ONU να διαβάσει την πληροφορία που προορίζεται για άλλα. Για το λόγο αυτό η πληροφορία πρέπει να υφίσταται κρυπτογράφηση, κάνοντας χρήση ενός κλειδιού κωδικοποίησης διαφορετικό για το κάθε ONU.

## 5.4 Πρωτόκολλο MAC

Οι τοπολογίες δέντρου, που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα GPON, προσφέρουν το πλεονέκτημα της οικονομικής πρόσβασης σε δίκτυα πρόσβασης, αφού παρέχουν τη δυνατότητα σε μεγάλο αριθμό χρηστών να μοιράζονται τον εξοπλισμό, και κατ' επέκταση το μεγάλο κόστος του. Σε τέτοια συστήματα η πολλαπλή πρόσβαση στο ρεύμα ανόδου επιτυγχάνεται μέσω πολυπλεξίας TDMA. Για να επιτευχθεί η δίκαιη πρόσβασης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός πρωτοκόλλου ελέγχου της πρόσβασης στο μέσο. Το πρωτόκολλο αυτό θα ρυθμίζει την πρόσβαση αναθέτοντας σχισμές στα τερματικά των χρηστών ανάλογα με τη ζήτηση.

Η τοπολογία δέντρου παρουσιάζει μια διαφορετική συμπεριφορά στη μεταφορά δεδομένων στο ρεύμα ανόδου από το ρεύμα καθόδου. Στο ρεύμα καθόδου η κοινοποίηση δεδομένων σε όλους τους χρήστες επιβάλλει τη δημιουργία πολλών αντιγράφων του εκπεμπόμενου σήματος. Αντίθετα, το ρεύμα ανόδου λειτουργεί ως ένα κατανομημένο σύστημα αναμονής, το οποίο χαρακτηρίζεται από το μεγάλο χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση της

πληροφορίας ελέγχου από τα σημεία συσσώρευσης στον ελεγκτή του δικτύου που βρίσκεται στη «ρίζα» του δικτύου.

Ο ελεγκτής MAC συλλέγει τις αιτήσεις για πρόσβαση στο μέσο από τα διάφορα ONU/ONT και διανέμει τον αριθμό των χρονοθυρίδων του ρεύματος ανόδου ανάλογα με τα δεδομένα που έχει συλλέξει. Κύριος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη για την κατανομή του εύρους ζώνης είναι η διασφάλιση της QoS που έχει συμφωνηθεί ανάμεσα στο OLT και τα ONU/ONT.

## 5.5 Διαχείριση QoS σε δίκτυα PON

Χαμηλό QoS είναι το αποτέλεσμα της ανεπάρκειας πόρων, που οδηγεί στην απώλεια πληροφορίας ή την καθυστέρηση μετάδοσης, και των σφαλμάτων μετάδοσης<sup>13</sup>. Τα σφάλματα μετάδοσης διορθώνονται με χρήση μηχανισμού πρόβλεψης ή διόρθωσης λαθών (forward or backward error correction). Η ανεπάρκεια πόρων γίνεται φανερή στα σημεία συσσώρευσης από την υπερχείλιση των προσωρινών καταχωρητών. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις ελέγχου είτε ανοιχτού (πρόβλεψης) είτε κλειστού (αντίδρασης) βρόγχου. Με τον πρώτο τρόπο γίνεται δέσμευση πόρων πριν αρχίσει η μετάδοση δεδομένων, γι' αυτό απαιτείται η διατήρηση πληροφοριών για την κατάσταση στα σημεία μεταγωγής, σε συνδυασμό με τον έλεγχο συμμόρφωσης της πηγής δεδομένων προς τις παραμέτρους μετάδοσης που έχουν συμφωνηθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί για την κράτηση των πόρων. Με τον δεύτερο τρόπο υλοποιούνται αλγόριθμοι οι οποίοι προσαρμόζουν τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων από τις πηγές ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους στα σημεία συμφόρησης. Η επιλογή της μεθόδου δεν αφήνεται στη διακριτικότητα του σχεδιαστή του συστήματος, αλλά υπαγορεύεται από το είδος των υπηρεσιών που θα εξυπηρετούνται. Η μετάδοση κίνησης πραγματικού χρόνου δε μπορεί να γίνει με χρήση ελέγχου κλειστού



βρόγχου, ενώ η μετάδοση κίνησης καλύτερης προσπάθειας έχει καλά αποτελέσματα με αυτό το είδος ελέγχου. Δεν είναι δυνατή η χρήση και των δύο μεθόδων, αφού με τη μέθοδο του κλειστού βρόγχου καταλαμβάνεται όλο και περισσότερο εύρος ζώνης, έως ότου αρχίσουν οι απώλειες μετάδοσης. Παρόλο που η μέθοδος κλειστού βρόγχου καλύπτει τις απώλειες, η κίνηση πραγματικού χρόνου θα είχε ελλιπή ποιότητα.

Το πρωτόκολλο MAC είναι ένας γενικός ρυθμιστής κίνησης στα δίκτυα PON, ο οποίος δε μπορεί να λειτουργήσει σωστά αν δε γνωρίζει το είδος και τις ιδιότητες της ροής στην οποία ανήκουν τα προς μετάδοση πακέτα. Αν η πληροφορία αυτή δεν είναι διαθέσιμη στον ελεγκτή MAC, είναι δυνατόν να δώσει άδεια για μετάδοση σε ένα πακέτο TCP ενός ONU, ενώ σε κάποιο κοντινό ONU ένα πακέτο που ανήκει σε ροή μετάδοσης δεδομένων πραγματικής κίνησης να ανταγωνίζεται για την ίδια σχισμή (slot). Αφού δεν είναι δυνατό για τον ελεγκτή MAC να ελέγχει και να ταξινομεί το κάθε πακέτο προς μετάδοση σε ποιο είδος κίνησης ανήκει, είναι επιθυμητό η ταξινόμηση των πακέτων να γίνεται από την τερματική συσκευή. Έτσι υπάρχουν μερικές κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται τα πακέτα ανάλογα με την προτεραιότητά τους από το ONU/ONT. Ο ελεγκτής MAC ελέγχει τώρα μόνο το μήκος της κάθε ουράς αναμονής για την κάθε κατηγορία και παραχωρεί προτεραιότητα στις ουρές υψηλής προτεραιότητας κάθε ONU. Η τοπική ταξινόμηση των πακέτων σε κάθε ONU δεν έχει τόση σημασία, όσο η καθολική ταξινόμηση ανάμεσα σε όλα τα ONU, αφού σκοπός είναι να εξυπηρετηθούν τα πακέτα υψηλής προτεραιότητας νωρίτερα από τα υπόλοιπα σε όλες τις ουρές των ONU.

Ο αριθμός των κατηγοριών που μπορεί να ταξινομηθούν τα διάφορα πακέτα είναι πέντε και φαίνονται στον πίνακα. Για κάθε TCONT που υποστηρίζεται θα πρέπει να υπάρχει μια ξεχωριστή ουρά. Οι ροές δεδομένων με απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσιών πρέπει να αναγνωρίζονται και να εξυπηρετούνται διαφορετικά από τα υπόλοιπα δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται στο ONU με την τοποθέτηση των δεδομένων αυτών στη σωστή ουρά του αντίστοιχου TCONT.

TCONT	Υπηρεσίες	Παράμετροι	Εγγυήσεις
1	DS-1, E1 υπηρεσίες	Μέγιστο SDI = Ελάχιστο SDI = προκαθορισμένη και σταθερή τιμή  Μέγιστο TB = Ελάχιστο TB = προκαθορισμένη σταθερή τιμή	καθορισμένο σταθερό εύρος ζώνης  καθορισμένη σταθερή καθυστέρηση
2	μη πραγματικού χρόνου κίνηση	Μέγιστο SDI = Ελάχιστο SDI = προκαθορισμένη σταθερή τιμή  Μέγιστο TB = Ελάχιστο TB = προκαθορισμένη σταθερή τιμή	καθορισμένο εύρος ζώνης  περιορισμένο CTD, CDV
3	μεταβλητού ρυθμού μετάδοση	Μέγιστο SDI = προκαθορισμένη τιμή  Ελάχιστο SDI = προκαθορισμένη τιμή  Μέγιστο TB = προκαθορισμένη τιμή  Ελάχιστο TB = προκαθορισμένη τιμή	προκαθορισμένο, εγγυημένο εύρος ζώνης  μη εγγυημένο δεσμευμένο σε αναλογία με το εγγυημένο
4	καλύτερες δυνατές υπηρεσίες	Μέγιστο SDI = άπειρο  Ελάχιστο SDI = προκαθορισμένη τιμή  Μέγιστο TB = προκαθορισμένη τιμή  Ελάχιστο TB = 0	ίση κατανομή του μη δεσμευμένου εύρους ζώνης
5	όλα τα παραπάνω		

Πίνακας 1 - Κατηγορίες T - CONT

Max SDI : Μέγιστο διάστημα μεταξύ επιτυχούς μετάδοσης δεδομένων

Min SDI : Ελάχιστο διάστημα μεταξύ επιτυχούς μετάδοσης δεδομένων

Max TB : Μέγιστος αριθμός byte που μεταδίδονται

Min TB : Ελάχιστο αριθμός byte που μεταδίδονται

Η ταξινόμηση των προτεραιοτήτων αυτών έχει καθοριστεί από την ITU στο G983.5 και έχουν υιοθετηθεί και από την FSAN.

Ο πίνακας 1 περιέχει τους πέντε τύπους TCONT, τις υπηρεσίες που μπορεί να εξυπηρετήσει ο καθένας, τις παραμέτρους του συστήματος και τις εγγυήσεις που παρέχει ο κάθε τύπος. Παρόλο που το PON είναι ένα σύστημα μεταγωγής πακέτου, από την πλευρά του MAC ελεγκτή εγκαθίστανται συνδέσεις και οι παράμετροι που αναφέρονται χαρακτηρίζουν τις συνδέσεις αυτές.

Κάθε φορά που το OLT ζητάει από το ONU να του μεταδώσει ένα μήνυμα DBA, το ONU έχει την ευκαιρία να γνωστοποιήσει στο OLT τις ανάγκες του σε εύρος ζώνης. Εφόσον το PON υποστηρίζει διαφορετική QoS, το ONU θα πρέπει να διατηρεί ξεχωριστές ουρές κίνησης για κάθε ποιότητα υπηρεσιών και να αναφέρει το μήκος της κάθε μιας ξεχωριστά. Αυτή η απαίτηση είναι απαραίτητη, ώστε ο ελεγκτής MAC να έχει στη διάθεση του επαρκείς πληροφορίες για να κάνει σωστή κατανομή του εύρους ζώνης.

Στα μηνύματα DBA, το ONU αναφέρει το συνολικό μήκος της ουράς και όχι μόνο το μήκος των νέων πακέτων που προστέθηκαν σε αυτήν από την τελευταία αναφορά. Αυτό γίνεται για δύο λόγους :

- για συνέπεια, δηλαδή ακόμα και αν ένα μήνυμα αναφοράς DBA δε ληφθεί σωστά από το OLT, το ONU θα αναφέρει σωστά το μήκος της ουράς στο επόμενο μήνυμα
- Κάθε φορά που ανατίθεται στο ONU να μεταδώσει  $X$  bytes, η ουρά στο ONU μειώνεται για λιγότερα από  $X$  bytes, αφού ένα μέρος από αυτά χρησιμοποιούνται από το πλαίσιο του TC. Έτσι, ενώ ο ελεγκτής MAC υποθέτει ότι η ουρά στο ONU έχει μειωθεί κατά  $X$  bytes, αυτό είναι λανθασμένο. Για το λόγο αυτό, ο MAC χρειάζεται το συνολικό μήκος της ουράς. Για να αποφευχθεί αυτό θα μπορούσε να αναφέρεται στο MAC το μήκος πακέτου που μεταδίδεται όμως αυτό δε γίνεται, αφού θα σπαταλούσαμε επιπλέον πόρους για να το επιτύχουμε.

## 5.6 Βάση δεδομένων MIB (Management Information Base)

Η βάση δεδομένων που διατηρείται σε κάθε ONU αποτελείται από ένα σύνολο διαχειριζόμενων οντοτήτων (managed entities). Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε σε μία σειρά απεικονίσεων των πόρων και των υπηρεσιών ενός ONU. Οι οντότητες αυτές ανάλογα με το ποια λειτουργία ή τμήμα του ONU διαχειρίζονται κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Οντότητες που αφορούν στη διαχείριση του εξοπλισμού του ONU.
- Οντότητες που αφορούν στη διαχείριση της διεπαφής δικτύου πρόσβασης.
- Οντότητες που αφορούν στη διαχείριση της διεπαφής του δικτύου του χρήστη.
- Οντότητες που αφορούν στη διαχείριση του επιπέδου VP/VC (virtual path/virtual channel).
- Οντότητες που αφορούν στη διαχείριση της κίνησης.

Στο OMCI (ONU management and control interface) ορίζεται και μια ακόμα κατηγοριοποίηση των διαχειριζόμενων οντοτήτων και λειτουργιών του ONU ανάλογα με το πόσο απαραίτητη είναι η κάθε οντότητα. Συγκεκριμένα τα τρία διαφορετικά επίπεδα είναι τα εξής:

- Οντότητες που είναι απαραίτητες (Requirement, συμβολισμός R) για συμβατή λειτουργία.
- Οντότητες που είναι κατά συνθήκη απαραίτητες (Conditional Requirements, CR) δηλαδή απαραίτητες μόνον όταν υλοποιείται η συγκεκριμένη προαιρετική λειτουργία με την οποία σχετίζονται.
- Οντότητες που είναι προαιρετικές (Option, O) δηλαδή μπορεί να είναι χρήσιμες ή να απαιτούνται από κάποιο λειτουργό του δικτύου, αλλά δεν είναι απαραίτητες για συμβατή λειτουργία.

Οι οντότητες απαρτίζονται από τα χαρακτηριστικά τους (attributes) κάθε ένα από τα οποία δίνει μια συγκεκριμένη πληροφορία για τη διαχειριζόμενη οντότητα. Τα χαρακτηριστικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν

υποστηρίζουν πράξη δημιουργίας (create action) ή όχι. Αν δεν υποστηρίζεται πράξη δημιουργίας και ανάλογα με το δεδομένο χαρακτηριστικό, μπορούν να επιτρέπονται ενέργειες εγγραφής μόνο (R), ανάγνωσης μόνο (W), ανάγνωσης και εγγραφής (R,W) από το OLT. Στην περίπτωση, όμως, που υποστηρίζεται πράξη δημιουργίας, το σύνολο ενεργειών εμπλουτίζεται με ενέργειες εγγραφής μόνο, ανάγνωσης μόνο, ανάγνωσης και εγγραφής από το OLT, αφού έχει προηγηθεί μία πράξη δημιουργίας. Οι τρεις αυτές επιπλέον λειτουργίες συμβολίζονται ως (R, Set-by-create), (W, Set-by-create) και (R, W, Set-by-create) αντίστοιχα.

Μία τιμή ενός χαρακτηριστικού μιας οντότητας είναι δυνατό να μεταβληθεί, αν αυτό ζητηθεί από το OLT μέσω κατάλληλης εντολής δημιουργίας ή αυτόνομα από το ONU. Στην περίπτωση της αυτόνομης δημιουργίας, στις περιπτώσεις (R), (R,W), (R, Set-by-create) και (R, W, Set-by-create) το ONU ενημερώνει το OLT για την αλλαγή στέλνοντας μία ειδοποίηση αλλαγής τιμής χαρακτηριστικού (attribute value change notification), ενώ αντίθετα κάτι τέτοιο δε λαμβάνει χώρα στις περιπτώσεις (W) και (W, Set-by-create). Συνολικά οι ειδοποιήσεις που παράγονται από τις διαχειριζόμενες οντότητες προκαλούνται από τα ακόλουθα γεγονότα: συναγερμούς (Alarms), αλλαγή τιμής χαρακτηριστικού (Attribute Value Changes, σύντομα AVCs), ειδοποιήσεις υπέρβασης κατωφλίου (Threshold Crossing Alerts, TCAs) και αποτελέσματα δοκιμών (test results). Το κάθε είδος ειδοποίησης μεταφέρεται από τα κατάλληλα μηνύματα. Συγκεκριμένα τα Alarms και τα TCAs από τα μηνύματα συναγερμού (Alarm messages), τα AVCs από τα μηνύματα αλλαγής τιμής χαρακτηριστικού (Attribute Value Change messages) και τα Test results από τα μηνύματα αποτελεσμάτων δοκιμών (Test result messages) αν η δοκιμή έχει ζητηθεί από το OLT ή μηνύματα συναγερμού (Alarm messages) αν η δοκιμή γίνεται με πρωτοβουλία του ONU.

## 5.7 Κανάλι, μήνυμα και αρχές του πρωτοκόλλου

Η ενότητα θα αναφέρεται αρχικά στο κανάλι που χρησιμοποιείται από το δίκτυο για τη διαχείριση και τον έλεγχο του ONU. Στη συνέχεια θα δοθεί η δομή

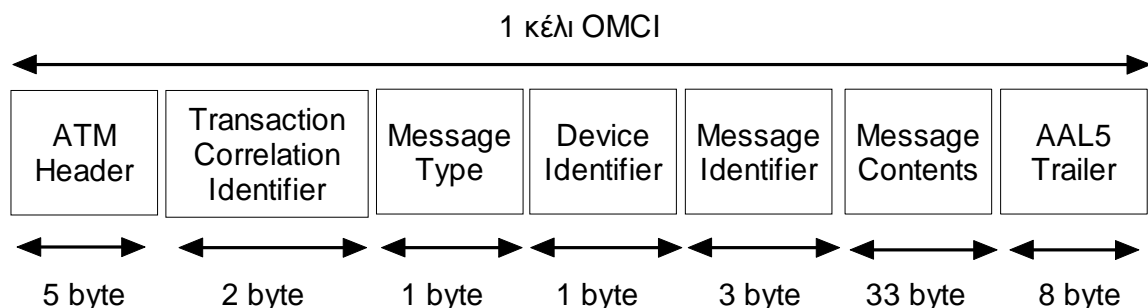
του μηνύματος του πρωτοκόλλου OMCI (OLT Management and Control Interface) που περνά από το κανάλι αυτό και θα εξηγηθεί η λειτουργία και η χρησιμότητα των πεδίων που το αποτελούν<sup>15</sup>. Στην τελευταία ενότητα θα αναφερθούν αρχές του πρωτοκόλλου που αφορούν στον έλεγχο ροής και τη διόρθωση λαθών.

### **Κανάλι**

Το κανάλι διαχείρισης και ο έλεγχος του ONU (ONU Management and Control Channel, σύντομα OMCC) είναι μία σύνδεση ATM μεταξύ του OLT και του ONU. Για την εγκατάσταση της σύνδεσης αυτής στέλνεται κατάλληλο PLOAM μήνυμα από το OLT, ώστε να καθοριστεί ένα ζεύγος τιμών VPI/VCI. Το OLT καθορίζει διαφορετική τιμή VPI για κάθε ONU μέσω του μηνύματος PLOAM. Επιπλέον, το MAC πρωτόκολλο του OLT διασφαλίζει ότι υπάρχει δεσμευμένη ροή στην προς τα άνω ζεύξη για την OMCC κίνηση από τα ONU.

### **Μήνυμα**

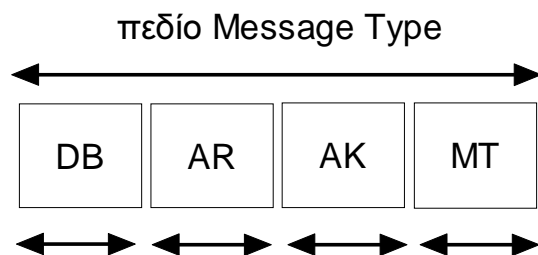
Το πακέτο του πρωτοκόλλου διαχείρισης και ελέγχου του ONU μεταφέρεται σε ένα κελί ATM. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1 - Δομή του κελιού OMCI

Το κελί αποτελείται από τα παρακάτω πεδία

- Την επικεφαλίδα ATM (ATM Header) μήκους 5 bytes που περιέχει το ζεύγος VPI/VCI για το δεδομένο ONT, για το οποίο προορίζεται το κελί.
- Το αναγνωριστικό συσχέτισης συναλλαγής (Transaction Correlation Identifier) μήκους 2 bytes που χρησιμοποιείται για να συσχετιστεί μία αίτηση του OLT προς κάποιο συγκεκριμένο ONU με την απάντηση από το ONU στο OLT. Συγκεκριμένα για μία αίτηση το OLT επιλέγει μία τιμή για το πεδίο αυτό και η απάντηση από το ONU, στη συγκεκριμένη αίτηση, θα πρέπει να χρησιμοποιήσει την τιμή αυτή. Ειδική μέριμνα λαμβάνεται, ώστε να μη στέλνεται μία δεύτερη αίτηση με την ίδια τιμή του πεδίου αυτού σε ένα ONU χωρίς να έχει ληφθεί η απάντηση από την πρώτη αίτηση.
- Το είδος μηνύματος (Message Type) μήκους 1 byte που χωρίζεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2 σε τέσσερα υποπεδία των οποίων η λειτουργία είναι η εξής:
  - Το πιο σημαντικό bit είναι δεσμευμένο για τον προορισμό του μηνύματος (Destination Bit, DB) και για το OMCI έχει πάντα την τιμή μηδέν.
  - Το δεύτερο πιο σημαντικό bit υποδεικνύει αν το αποστελλόμενο μήνυμα απαιτεί να σταλεί επιβεβαίωση (Acknowledge Request, σύντομα AR). Συγκεκριμένα αν έχει την τιμή ένα απαιτείται επιβεβαίωση, ενώ αν έχει την τιμή μηδέν δεν απαιτείται.
  - Το τρίτο πιο σημαντικό bit υποδεικνύει αν το αποστελλόμενο μήνυμα είναι ή όχι επιβεβαίωση (Acknowledgement, AK). Συγκεκριμένα αν έχει την τιμή ένα είναι επιβεβαίωση, ενώ αν έχει την τιμή μηδέν δεν είναι.
  - Τα υπόλοιπα bit δείχνουν τον τύπο του μηνύματος (Message Type, MT). Κάθε τιμή του πεδίου αυτού αντιστοιχεί σε έναν τύπο μηνύματος. Οι τιμές 0-3 είναι δεσμευμένες για μελλοντική χρήση και ορίζονται συνολικά 23 μηνύματα.



Σχήμα 2 - Τα υποπεδία του πεδίου Message Type

- Το αναγνωριστικό συσκευής (Device Identifier) μήκους 1 byte που έχει μία δεδομένη τιμή για την τεχνολογία του ONU που χρησιμοποιείται.
- Το αναγνωριστικό μηνύματος (Message Identifier) μήκους 3 bytes. Το σημαντικότερο byte του πεδίου αυτού καθορίζει την οντότητα για την οποία προορίζεται το μήνυμα που περιγράφεται από το πεδίο Message Type. Επομένως, μπορούν να οριστούν το πολύ μέχρι 256 διαχειριζόμενες οντότητες. Τα άλλα δύο bytes χρησιμοποιούνται για να ορίσουν μία εικόνα (instance) της διαχειριζόμενης οντότητας. Συνεπώς, μπορούν να οριστούν το πολύ μέχρι 65536 instances ανά διαχειριζόμενη οντότητα.
- Το περιεχόμενο μηνύματος (Message Contents) μήκους 33 bytes, που εξαρτάται από το δεδομένο μήνυμα που το OLT θέλει να στείλει ONU.
- Το πεδίο που μεταφέρει πληροφορία για το AAL5 (AAL5-trailer) μήκους 8 bytes

## 5.8 Έλεγχος ροής και διόρθωση λαθών

Οι διαδικασίες ελέγχου ροής και διόρθωσης λαθών για το κανάλι OMCC βασίζονται σε ένα απλό σενάριο με συναλλαγές μεταξύ του OLT και ενός ONU μέσω μηνυμάτων και επιβεβαιώσεων, που χρησιμοποιεί την τεχνική stop-and-go και μπορεί εύκολα να επεκταθεί, ώστε να υποστηρίζει πολλές και ταυτόχρονες συναλλαγές του OLT με περισσότερα του ενός ONU. Στο σενάριο αυτό σημαντικό ρόλο έχει η προτεραιότητα των μηνυμάτων και οι διαδικασίες ελέγχου



ροής οι οποίες εξασφαλίζουν ότι σε μία συναλλαγή μεταξύ του OLT και ενός ONT ένα μήνυμα με δεδομένη προτεραιότητα μπορεί να σταλεί από το OLT μόνο αφού προηγουμένως έχει ληφθεί σωστά και εξυπηρετηθεί από το ONT το αμέσως προηγούμενο μήνυμα με ίδια προτεραιότητα.

Για την υλοποίηση του σεναρίου χρησιμοποιούνται το αναγνωριστικό συσχέτισης συναλλαγής (Transaction Correlation Identifier), έτσι ώστε να συσχετίζονται οι αιτήσεις με τις αντίστοιχες επιβεβαιώσεις, μετρητές που μετρούν τις φορές που ξαναστέλνεται ένα μήνυμα από τον OLT (Retry Counters) και χρονόμετρα που καθορίζουν το μέγιστο χρόνο αναμονής μίας επιβεβαίωσης (Transaction Request Timer). Συγκεκριμένα η λειτουργία έχει ως εξής: Όταν σταλεί μία αίτηση από το OLT με προτεραιότητα  $i$  στο ONU αρχίζει να μετρά ένα χρονόμετρο  $T_i$  το οποίο σταματά να μετρά, όταν σταλεί από το ONU μία επιβεβαίωση χωρίς λάθη και με το σωστό Transaction Correlation Identifier. Αν σε κάποιο προκαθορισμένο χρόνο δε ληφθεί η παραπάνω επιβεβαίωση, το OLT ξαναστέλνει την αίτηση με το ίδιο αναγνωριστικό συσχέτισης συναλλαγής και ταυτόχρονα αυξάνεται η τιμή ενός retry counter, που για αυτήν την περίπτωση συμβολίζουμε  $R_i$ , κατά ένα. Αν ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία επαναληπτικά ο μετρητής αυξηθεί τόσες φορές, ώστε να φτάσει μία προκαθορισμένη ανώτατη τιμή, τότε το μήνυμα δε ξαναστέλνεται και το OLT καταλαβαίνει σφάλμα στη σύνδεση OMCC. Τόσο τα χρονόμετρα όσο και οι μετρητές υλοποιούνται μέσα στο OLT και το ONU δεν έχει γνώση για αυτούς. Επίσης, οι προκαθορισμένες ανώτατες τιμές για τα στοιχεία αυτά δεν καθορίζονται από τα στάνταρ, αλλά από την υλοποίηση που αφορά στο κάθε δίκτυο.

## 5.9 Αναλυτικότερα τα πεδία του TC

Το υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης TC (Transmission Convergence) του δικτύου G-PON ως μέρος ενός τρισδιάστατου μοντέλου διαστρωμάτωσης αποτελείται από το επίπεδο χρήστη (U-Plane) που ασχολείται με τη μεταφορά δεδομένων, τον έλεγχο ροής, τη διόρθωση λαθών και άλλες λειτουργίες χρήστη και το επίπεδο ελέγχου και διαχείρισης (C/M-Plane) που ασχολείται με τον έλεγχο της κίνησης, την ασφάλεια, τη λειτουργία, διαχείρισης και τη συντήρηση του δικτύου (OAM - Operations, Administration and Maintenance) <sup>54</sup>.

Το U-Plane πραγματοποιεί τον έλεγχο ροής χρησιμοποιώντας για την αναγνώριση της κάθε ροής ενός ONU, δηλαδή του κάθε TCONT τη μοναδική τιμή της AllocId, που αποτελεί τη διεύθυνσή της στο δίκτυο. Επιπλέον, η εκχώρηση εύρους ζώνης και ο έλεγχος του QoS ενός TCONT γίνεται μέσω ανάθεσης μεταβλητού αριθμού χρονικών σχισμών στο συγκεκριμένο TCONT.

- Το C/M-Plane αποτελείται από τρία μέρη που ενσωματώνονται στο μεταφερόμενο πλαίσιο και η περιγραφή και λειτουργία τους είναι η εξής: Το μέρος OAM που καθορίζει τη λειτουργία, διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου. Οι πληροφορίες που αφορούν στις λειτουργίες αυτές μεταφέρονται σε πραγματικό χρόνο και ενσωματώνονται σε συγκεκριμένα πεδία στην επικεφαλίδα του GTC πλαισίου και αφορούν στη δέσμευση εύρους, τη γνωστοποίηση του κλειδιού και τη σηματοδότηση που σχετίζεται με τη δυναμική ανάθεση του εύρους ζώνης.

- Το μέρος PLOAM που σχετίζεται με λειτουργίες διαχείρισης των υποστρωμάτων PMD και TC που δε συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία OAM. Οι πληροφορίες που αφορούν στις λειτουργίες αυτές ενσωματώνονται ως μηνύματα στο πεδίο PLOAM στην επικεφαλίδα του GTC πλαισίου.

- Το μέρος OMCI το οποίο αναφέρεται στη διαχείριση υπηρεσιών στρωμάτων υψηλότερων από το GTC. Οι πληροφορίες αυτές μεταφέρονται μέσω

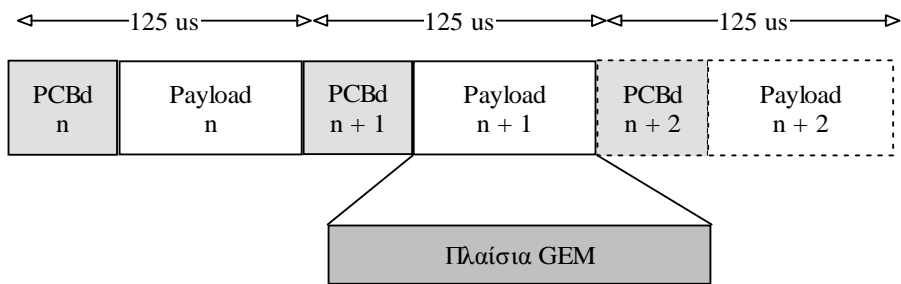
ενός καναλιού GEM (G-PON Encapsulation Method) που υπάρχει για αυτό το σκοπό.

### **GTC πλαίσιο TC**

Στην παράγραφο αυτή αναλύεται η δομή και η λειτουργία κάθε πεδίου του πλαισίου του TC τόσο όσον αφορά στην προς τα άνω όσο και στην προς τα κάτω ζεύξη<sup>18</sup>.

#### **➤ Προς τα κάτω ζεύξη**

Το πλαίσιο στη ζεύξη αυτή είναι σταθερού μήκους 125 us και αποτελείται από το δύο μέρη το PCBd (Physical Control Block D/S) και το GEM (G-PON Encapsulation Method) που αποτελεί τη χρήσιμη πληροφορία (payload) του πλαισίου αυτού. Το μήκος τους δεν είναι σταθερό και εξαρτάται από το είδος και τον αριθμό των πελατών που έχουν ζητήσει εξυπηρέτηση ή αλλιώς από τις δομές ανάθεσης εύρους ζώνης στους διάφορους πελάτες που μεταφέρει το συγκεκριμένο πλαίσιο. Τα μέρη αυτά, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 3, χωρίζονται με τη σειρά τους σε μία σειρά πεδίων των οποίων η περιγραφή και η λειτουργία θα γίνει αμέσως παρακάτω.

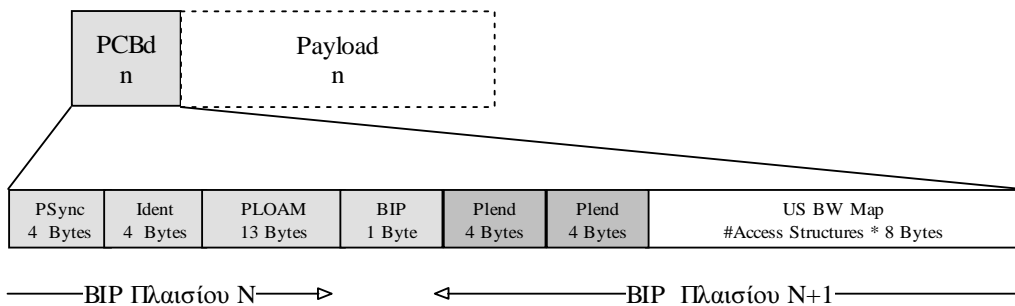


Σχήμα 3 - Το προς τα κάτω πλαίσιο του GPON GIANT

▪ **PCBd**

Το PCBd (Physical Control Block downstream) που εκπέμπεται από το OLT προς όλα τα ONU και στη συνέχεια το κάθε ένα από αυτά αξιοποιεί τις πληροφορίες, που προορίζονται για αυτό, χωρίζεται σε πεδία τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις επιμέρους κατηγορίες.

- Πεδία με πληροφορίες που αφορούν στο ίδιο το πλαίσιο που στέλνεται (PSync, Ident, BIP)
- Πεδία με πληροφορίες που αφορούν στο payload του πλαισίου (PLOAMd, Plend)
- Πεδίο με πληροφορίες που αφορούν στον καθορισμό της πρόσβασης στο μέσο από τα διαφορετικά ONU (US BW Map)



Σχήμα 4 - Δομή PCBd του προς τα κάτω πλαισίου

- **Πεδίο PSync**

Το πεδίο αυτό, που ονομάζεται Physical synchronization field, είναι σταθερού μήκους 32-bit έχει σταθερή τιμή, τοποθετείται στην αρχή του PCBd, ώστε να μπορούν τα ONU να αντιλαμβάνονται την αρχή ενός νέου πλαισίου και να συγχρονίζονται με την εκπομπή. Ο συγχρονισμός γίνεται με την υλοποίηση σε κάθε ONU μηχανής καταστάσεων που προορίζεται για τον σκοπό αυτό.

- **Πεδίο Ident**

Το πεδίο αυτό είναι σταθερού μήκους 32-bit και χρησιμοποιείται ώστε να υποστηριχθούν μεγαλύτερες δομές πλαισίων (super-frames). Για να έχει τη δυνατότητα το κάθε ONU να αναγνωρίζει αν δύο πλαίσια ανήκουν στο ίδιο super-frame τα 30 λιγότερο σημαντικά bit του πεδίου αυτού υλοποιούν έναν αύξοντα μετρητή όπου για κάθε επόμενο πλαίσιο, που ανήκει στο ίδιο super-frame, έχει τιμή κατά ένα μεγαλύτερη. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται και πάλι μηχανή καταστάσεων στο ONU για συγχρονισμό.

Το σημαντικότερο bit του πεδίου αυτού χρησιμοποιείται για να δείξει αν χρησιμοποιείται κωδικοποίηση FEC στην προς τα κάτω ζεύξη.

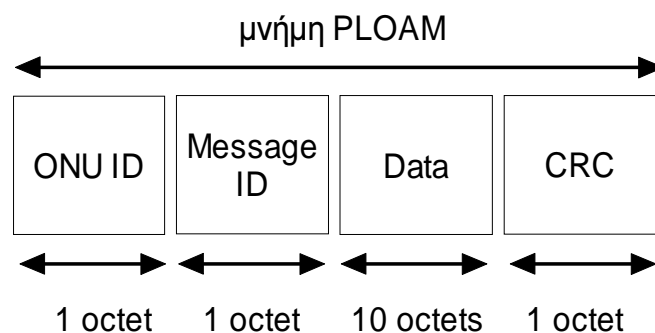
- **Πεδίο BIP**

Το πεδίο αυτό έχει μήκος 8-bit και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισοτιμίας όλων των bytes από το αμέσως προηγούμενο πεδίο BIP (Bit Interleaved Parity) μέχρι το υπό εξέταση, έτσι ώστε να μετρηθεί ο αριθμός των λαθών στη ζεύξη.

▪ **Πεδίο PLOAM**

Το πεδίο αυτό έχει μήκος 13 bytes και μεταφέρει τα μηνύματα λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης του φυσικού επιπέδου (Physical Layer OAM ή PLOAM).

Συγκεκριμένα μεταφέρουν πληροφορίες σχετικές με προειδοποιήσεις κινδύνου (alarms), προειδοποίηση για παραβίαση κατωφλιού και μηνύματα ενεργοποίησης. Η δομή ενός μηνύματος PLOAM φαίνεται στο σχήμα 5



Σχήμα 5 - Δομή μηνύματος PLOAM

Τα πεδία ενός μηνύματος PLOAM είναι:

- Το πεδίο ONU ID έχει τη διεύθυνση ενός συγκεκριμένου ONU. Κατά τη διαδικασία της αποστασιομέτρησης (ranging) κάθε ONU αντιστοιχίζεται σε ένα αριθμό από το μηδέν (0) έως το διακόσια πενήντα τρία (253), τον ONU ID. Για τη λειτουργία της κοινοποίησης (broadcasting) το πεδίο αυτό γίνεται ίσο με 0xFF.
- Το πεδίο Message ID δείχνει τον τύπο του μηνύματος. Το πεδίο αυτό περιέχει ένα αριθμό 8 bit που αντιστοιχεί σε ένα είδος μηνύματος. Τα μηνύματα αυτά μπορεί να είναι: μήνυμα επικεφαλίδας ρεύματος ανόδου (Upstream\_Overhead), μήνυμα μάσκας σειριακού αριθμού (Serial\_Number\_Mask), μήνυμα ανάθεσης ONU ID (Assign\_ONU-ID), μήνυμα χρόνου αποστασιομέτρησης (Ranging\_Time), μήνυμα απενεργοποίησης ONU ID (Deactivate\_ONU-ID), μήνυμα απενεργοποίησης σειριακού αριθμού (Disable\_serial\_number), μήνυμα απόκρυψης ID θύρας (Encrypted Port-ID),

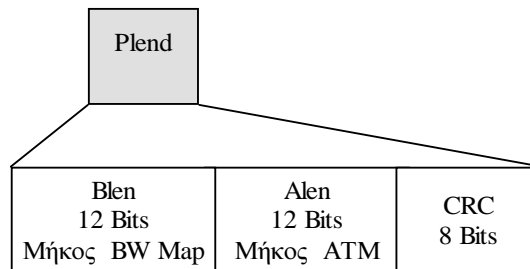
μήνυμα αίτησης κωδικού (Request\_Password), μήνυμα ανάθεσης AllocId (Assign\_AllocId), Κανένα Μήνυμα, Μήνυμα POPUP, μήνυμα Configure-Port-ID, μήνυμα λάθους εξοπλισμού (Physical Equipment Error (PEE)), μήνυμα αλλαγής στάθμης ισχύος (Change Power Level (CPL)), μήνυμα PST, μήνυμα BER Interval, μήνυμα Key\_Switching\_Time

- Το πεδίο Data περιέχει την πληροφορία του μηνύματος
- Το πεδίο CRC περιέχει τα bit του κυκλικού κώδικα πλεονασμού και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο λαθών.

#### ▪ **Πεδίο Plend**

Το πεδίο αυτό που ονομάζεται Payload Length στέλνεται δύο φορές σε κάθε πλαίσιο για την αποφυγή τυχόν λαθών. Καθορίζει το μέγεθος του χάρτη εύρους ζώνης (BW Map) και ATM μέρους που στέλνεται στο πεδίο US BW Map. Συγκεκριμένα το πεδίο αυτό, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6, χωρίζεται στα παρακάτω υποπεδία

- Blen αποτελείται από τα 12 σημαντικότερα bit και δείχνει το μέγεθος του BW Map. Η ύπαρξη των 12-bit έχει ως συνέπεια να μπορούν να εξυπηρετηθούν μέχρι 4095 TCONT το καθένα από τα οποία αναγνωρίζεται από έναν αντίστοιχο αριθμό που ονομάζεται AllocId.
- Alen αποτελείται από τα 12 επόμενα bit και δείχνει το μέγεθος του ATM μέρους.
- CRC αποτελείται από τα 8 τελευταία bit υλοποιούν κυκλικό κώδικα μείωσης λαθών με βάση το πολυώνυμο  $g(x)=x^8+x^2+x+1$ .



Σχήμα 6 - Δομή πεδίου Plend

#### ▪ Πεδίο US BW Map

Το πεδίο αυτό αποτελείται από ομάδες των 8 bytes που αποτελούν τις δομές πρόσβασης (Access Structures), ο αριθμός των ομάδων αυτών είναι μεταβλητός και δίνεται στο πεδίο Plend. Η κάθε δομή πρόσβασης προορίζεται για κάποιο συγκεκριμένο TCONT, που προσδιορίζεται από το AllocId του και αναθέτει εύρος ζώνης στο δεδομένο TCONT. Η ανάθεση του εύρους ζώνης υλοποιείται με τη δυνατότητα που παρέχεται στο TCONT να καταλάβει κάποια bytes στο πλαίσιο της προς τα άνω ζεύξης. Η δομή περιλαμβάνει τα παρακάτω πεδία.

- AllocId αποτελείται από τα 12 σημαντικότερα bit, ορίζει μία διεύθυνση και καθορίζει μονοσήμαντα ένα TCONT. Τα 12 bit συνεπάγονται ότι οι διευθύνσεις αυτές παίρνουν τιμές από 0 έως 4095.
- Flags αποτελείται από τα επόμενα 12 bit και καθορίζει μηνύματα που θα πρέπει με εντολή του OLT να συμπεριληφθούν στο προς τα άνω πλαίσιο και έχουν να κάνουν με μετρήσεις του δικτύου (μηνύματα PLSu, PLOAMu, DBRu) ή ενέργειες στις οποίες θα πρέπει να προβεί το ONU (υπολογισμός και εισαγωγή FEC).
- StartTime αποτελείται από τα επόμενα 16 bit και καθορίζει το byte από το οποίο θα πρέπει να αρχίσει να μεταδίδει το συγκεκριμένο TCONT. Η αρίθμηση των bytes αρχίζει από το μηδέν (αρχή του προς τα άνω πλαισίου) και έχει μέγιστη τιμή 65536 (τιμή που δίνει το μέγιστο του προς τα άνω πλαισίου)

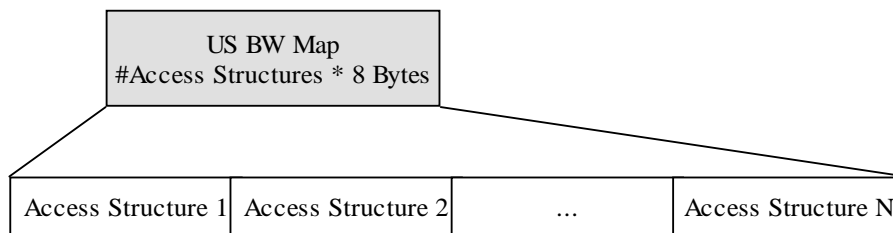


λαμβάνοντας υπόψη ρυθμό μετάδοσης στην προς τα άνω ζεύξη ίσο με 2.488 Gb/s)

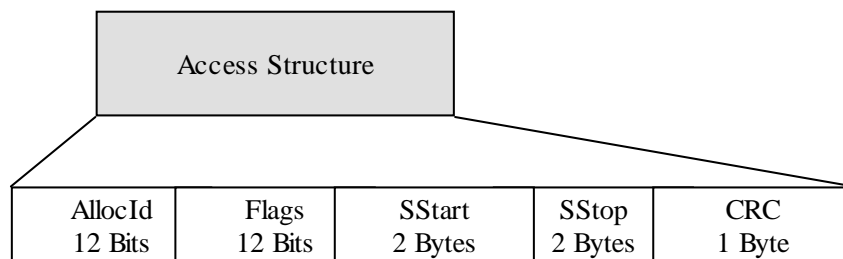
- StopTime αποτελείται από τα επόμενα 16 bit και καθορίζει το byte του προς τα άνω πλαισίου στο οποίο θα πρέπει να σταματήσει να μεταδίδει το συγκεκριμένο TCONT

- CRC αποτελείται από τα τελευταία 8-bit και υλοποιεί κυκλικό κώδικα μείωσης λαθών προστατεύοντας την κάθε δομή πρόσβασης. Χρησιμοποιείται το πολυώνυμο  $g(x)=x^8+x^2+x+1$  και αν εντοπιστεί λάθος το οποίο δεν είναι δυνατό να διορθωθεί, απορρίπτεται η δομή πρόσβασης.

Το πεδίο US BW Map, οι δομές πρόσβασης και τα πεδία της δομής πρόσβασης φαίνονται στα σχήματα 7 και 8.



Σχήμα 7 - Δομή πεδίου US BW Map



Σχήμα 8 - Δομή δομής πρόσβασης

▪ **Payload**

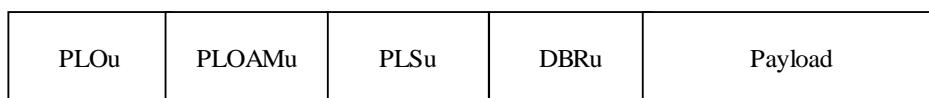
Το πεδίο αυτό του προς τα κάτω πλαισίου ξεκινά αμέσως μετά το τέλος του PCBd και έχει μέγεθος όσα bytes έχουν απομείνει για να συμπληρωθεί το

μήκος του πλαισίου. Το πεδίο αυτό καταλαμβάνεται μόνο από πλαίσια GEM (G-PON Encapsulation Method).

### ➤ **Προς τα άνω ζεύξη**

Το πλαίσιο στη ζεύξη αυτή έχει το ίδιο μήκος με το πλαίσιο στην προς τα κάτω ζεύξη για όλους τους ρυθμούς μεταφοράς. Το πλαίσιο φαίνεται στο σχήμα 9. Αποτελείται από κομμάτια που προέρχονται από διαφορετικά T-CONT και ο τρόπος διάταξης τους στο πλαίσιο υπαγορεύεται από το προς τα κάτω πλαίσιο με βάση όσα εξηγήσαμε στην προηγούμενη ενότητα. Επιπλέον κάθε ONU, με εντολή του OLT, μέσω των αντίστοιχων Flags στο προς τα κάτω πλαίσιο, αποστέλλει κατάλληλες επικεφαλίδες. Οι επικεφαλίδες αυτές παραθέτονται παρακάτω και η χρήση και η λειτουργικότητά τους θα αναλυθούν στη συνέχεια.

- Επικεφαλίδα φυσικού στρώματος PLOu
- Επικεφαλίδα φυσικού στρώματος λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης του φυσικού επιπέδου PLOAMu
- Επικεφαλίδα για μετρήσεις της ενέργειας PLSu
- Επικεφαλίδα αναφοράς δυναμικού εύρους DBRu



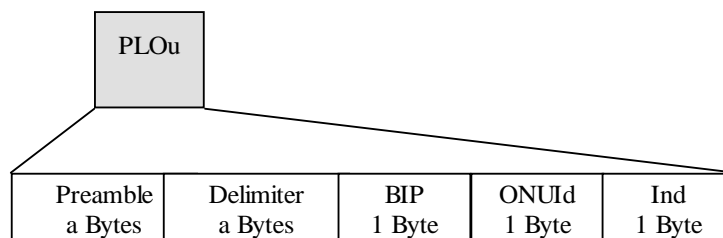
Σχήμα 9 - Δομή προς τα άνω πλαισίου

#### ▪ **PLOu**

Η επικεφαλίδα αυτή στέλνεται από κάθε ONU, όταν αυτό αποκτά πρόσβαση στο μέσο. Ειδική μέριμνα λαμβάνεται στην περίπτωση που ένα ONU έχει περισσότερα του ενός AllocId τα οποία πρέπει να στείλουν δεδομένα στο ίδιο προς τα άνω πλαίσιο. Συγκεκριμένα στην περίπτωση αυτή στέλνεται ένα

μόνο PLOu (Physical Layer Overhead upstream) και οι εκπομπές των διαφορετικών AllocId ακολουθεί η μία την άλλη ή αλλιώς το δίκτυο συμπεριφέρεται σαν να πρόκειται για AllocId διαφορετικών ONU και στέλνει αντίστοιχο αριθμό PLOu. Το PLOu αποτελείται από τα πεδία εισαγωγής (preamble) και χαρακτήρα αρχής/τέλους (delimiter) που απευθύνονται στο φυσικό επίπεδο και χρησιμοποιούνται για το συγχρονισμό καθώς και από τρία πεδία δεδομένων που απευθύνονται στο ONU. Συγκεκριμένα τα πεδία αυτά είναι τα παρακάτω

- Το πεδίο BIP έχει μήκος 8-bit και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισοτιμίας όλων των bytes (εξαιρούνται τα preamble και delimiter) από το αμέσως προηγούμενο πεδίο BIP μέχρι το υπό εξέταση έτσι ώστε να μετρηθεί ο αριθμός των λαθών στη ζεύξη.
- Το πεδίο ONU-ID έχει μήκος 8-bit, αποτελεί τη διεύθυνση του ONU και χρησιμοποιείται για το μονοσήμαντο προσδιορισμό του.
- Το πεδίο Ind παρέχει σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες του ONU στο OLT. Οι πληροφορίες αυτές έχουν να κάνουν με επείγοντα μηνύματα PLOAM, το είδος του TCONT που αναμένει εξυπηρέτηση και πληροφορία σχετική με το FEC.

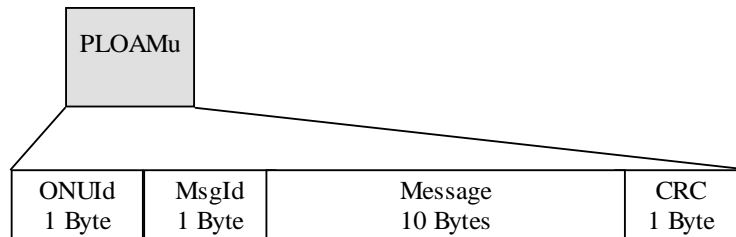


Σχήμα 10 - Δομή επικεφαλίδας PLOu

#### ▪ **PLOAMu**

Physical Layer OAM Operations, Administrations and Maintenance upstream. Έχει μήκος 13 bytes και μεταφέρει τα μηνύματα λειτουργίας,

διαχείρισης και συντήρησης του φυσικού επιπέδου (Physical Layer OAM ή PLOAM). Η δομή του φαίνεται στο σχήμα 11.



Σχήμα 11 - Δομή επικεφαλίδας PLOAMu

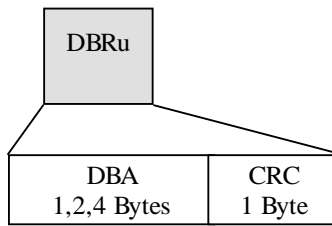
- **PLSu**

Power Levelling Sequence upstream. Έχει μήκος 120 bytes, μεταφέρει μηνύματα σχετικά με την ενέργεια και το περιεχόμενό του καθορίζεται από το ίδιο το ONU ανάλογα με το σχεδιασμό του. Οι έλεγχοι ενέργειας είναι απαραίτητοι τόσο στην περίπτωση που ένα ONU είναι ενεργό όσο και κατά την εγκατάσταση αυτού στο δίκτυο.

- **DBRu**

Dynamic Bandwidth Report upstream. Η επικεφαλίδα αυτή σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του TCONT που εκπέμπει και αποτελείται από δύο επιμέρους υποπεδία, όπως φαίνεται στο σχήμα 12.

- Το πεδίο DBA παρέχει την κατάσταση της κίνησης στο συγκεκριμένο TCONT.
- Το πεδίο CRC προστατεύει με κυκλικό κώδικα μείωσης λαθών που χρησιμοποιεί το πολυώνυμο  $g(x)=x^8+x^2+x+1$  την DBRu. Αν εντοπισθεί σφάλμα το οποίο δεν είναι δυνατό να διορθωθεί, απορρίπτεται η πληροφορία που περιέχεται στην επικεφαλίδα DBRu.



Σχήμα 12 - Δομή επικεφαλίδας DBRu

▪ **Payload**

Το μέγεθος του πεδίου αυτού είναι μεταβλητό και καθορίζεται από τα byte που απομένουν, αν από τα byte που συνολικά αναθέτονται σε ένα TCONT, αφαιρεθούν τα byte που αφορούν στις επικεφαλίδες. Το πεδίο payload μεταφέρει δύο ειδών πληροφορίες και μέσω αυτών χαρακτηρίζεται.

- Payload τύπου GEM περιέχει πακέτα τύπου GEM. Τα πλαίσια που στέλνονται από τα ONU στο OLT υφίστανται κατάτμηση για να διασχίσουν το δίκτυο και στη συνέχεια το OLT ενώνει τα διάφορα τμήματα. Τα διάφορα αυτά τμήματα αποτελούν το payload των GEM πακέτων το οποίο συμπληρώνεται με την προσθήκη της επικεφαλίδας GEM, όπως φαίνεται στο σχήμα 13 και αποτελείται από τα πεδία:

- Το πεδίο Payload length indicator (PLI) μήκους 12-bit που δείχνει σε bytes το μέγεθος του τμήματος
- Το πεδίο Port ID που καθορίζει το TCONT μήκους 12-bit από το οποίο προήλθε το τμήμα αυτό, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πολύπλεξη της κίνησης
- Το πεδίο Payload type indicator (PTI) το είδος του μεταφερόμενου payload
- Το πεδίο Header error control (HEC) μήκους 13-bit που διασφαλίζει την ορθότητα της επικεφαλίδας

PLI 12 Bits	Port Id 12 Bits	PTI 3 Bits	HEC 13 Bits	Τμήμα Payload N Bytes
----------------	--------------------	---------------	----------------	--------------------------

Σχήμα 13 - Δομή πεδίου Payload προς τα άνω πλαισίου

- Payload τύπου DBA περιέχει μια ομάδα από αναφορές δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης που προέρχονται από τα ONU. Οι αναφορές συντάσσονται στη σειρά. Αν το πεδίο ανάθεσης δεν έχει ακριβώς το ίδιο μήκος σε byte με το σύνολο των αναφορών τοποθετημένων η μία μετά την άλλη, τότε το σύνολο αυτό συμπληρώνεται με μηδενικά ή αποκόπτεται.

---

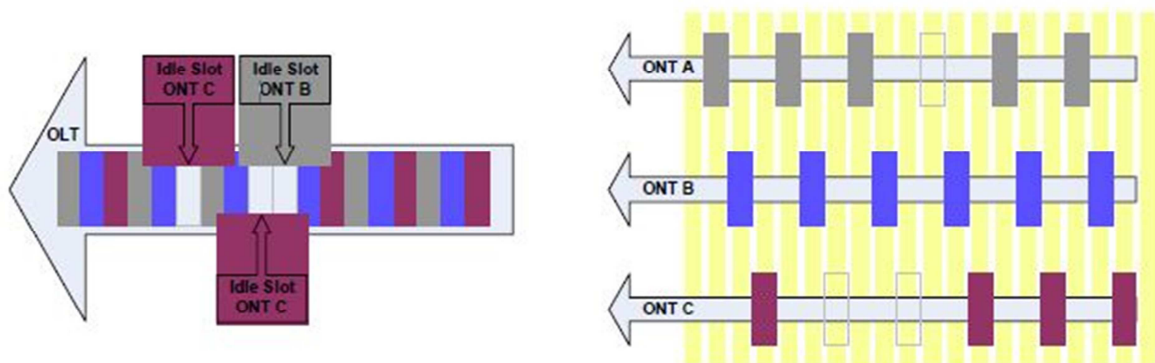
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

### Δυναμική Ανάθεση Εύρους Ζώνης - DBA

---

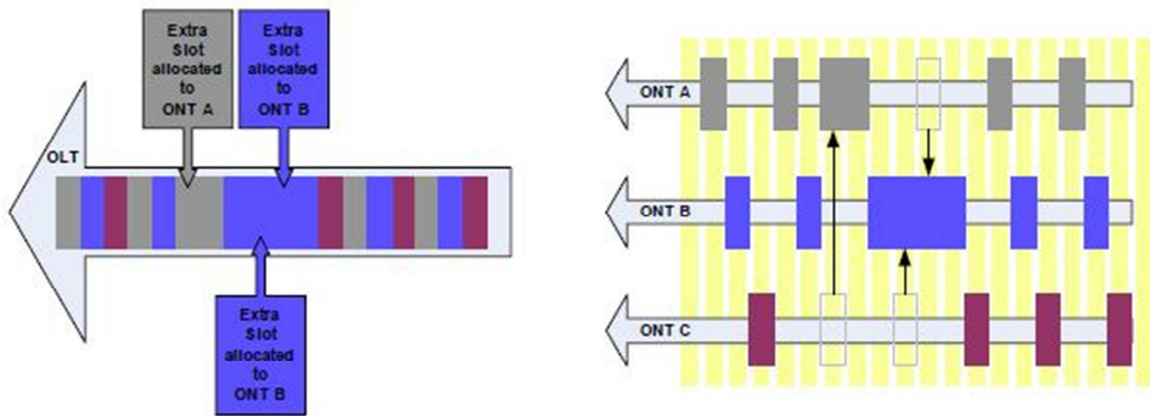
#### 6.1 Δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης

Στα περισσότερα οπτικά δίκτυα είχε χρησιμοποιηθεί ο στατικός τρόπος ανάθεσης εύρους ζώνης (Static Bandwidth Allocation)<sup>37</sup>. Το ρεύμα ανόδου αποτελείται από διαδοχικές χρονοσχισμές (timeslots), όπου στην κάθε μία στέλνονται μερικά bytes επικεφαλίδας και ένα κελί πληροφορίας. Οι χρονοσχισμές αυτές μοιράζονται από το OLT στα διάφορα ONU. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η κατανομή είναι μέσω των κελιών ελέγχου και διαχείρισης του φυσικού μέσου (PLOAM) που στέλνονται στο ρεύμα καθόδου. Μέσα σε ένα κελί PLOAM το OLT στέλνει μια άδεια (grant) σε κάποιο ONU για να μεταδώσει σε κάποια χρονοσχισμή του ρεύματος ανόδου. Αυτό γινόταν με στατικό τρόπο, δηλαδή η διανομή των χρονοσχισμών γινόταν μια φορά και δε μεταβαλλόταν ανάλογα με τις απαιτήσεις των ONU σε εύρος ζώνης. Στο παρακάτω παράδειγμα (σχήμα 1) φαίνεται πως με τον στατικό τρόπο ανάθεσης εύρους ζώνης σε 3 ONUs, μένουν ανεκμετάλλετες κάποιοι σχισμές.

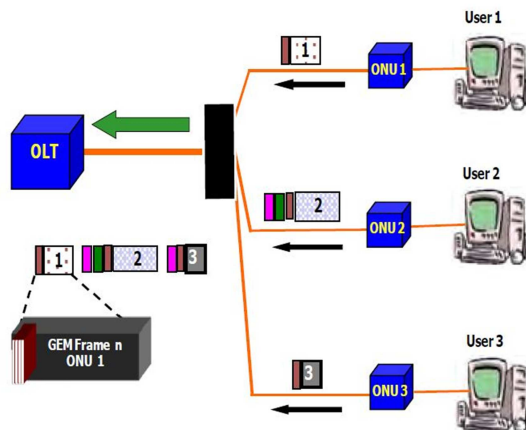


Σχήμα 1 - Παράδειγμα στατικής ανάθεσης εύρους ζώνης

Εξαιτίας των απαιτήσεων για υπηρεσίες αληθινού χρόνου, καθώς και για εκρηκτική κίνηση δεδομένων, όπως το Ίντερνετ, είναι αναγκαία η δυναμική ανάθεση του εύρους ζώνης, ώστε να έχουμε υψηλότερη απόδοση στη χρησιμοποίηση του δικτύου. Ένας μηχανισμός δυναμικής ανάθεσης του εύρους ζώνης (DBA - Dynamic Bandwidth Allocation) βελτιώνει την απόδοση, επειδή μεταβάλλει με δυναμικό τρόπο το εύρος ζώνης που παρέχεται σε κάθε ONU ανάλογα με τις απαιτήσεις του. Τα πλεονεκτήματα του μηχανισμού αυτού είναι δύο. Πρώτον, μπορούν να εξυπηρετηθούν περισσότεροι χρήστες ανά δίκτυο, αφού έχουμε καλύτερη χρησιμοποίησή του. Δεύτερον, οι χρήστες μπορούν να απολαμβάνουν εμπλουτισμένες υπηρεσίες οι οποίες απαιτούν μεταβλητό εύρος ζώνης. Στα παραδείγματα του σχήματος 2 φαίνεται επίσης πως με τη δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης, γίνεται πλήρης αξιοποίηση του μέσου αναθέτοντας στα ONUs A και B το εύρος ζώνης που δε χρησιμοποιείται από τα ONUs C και A.

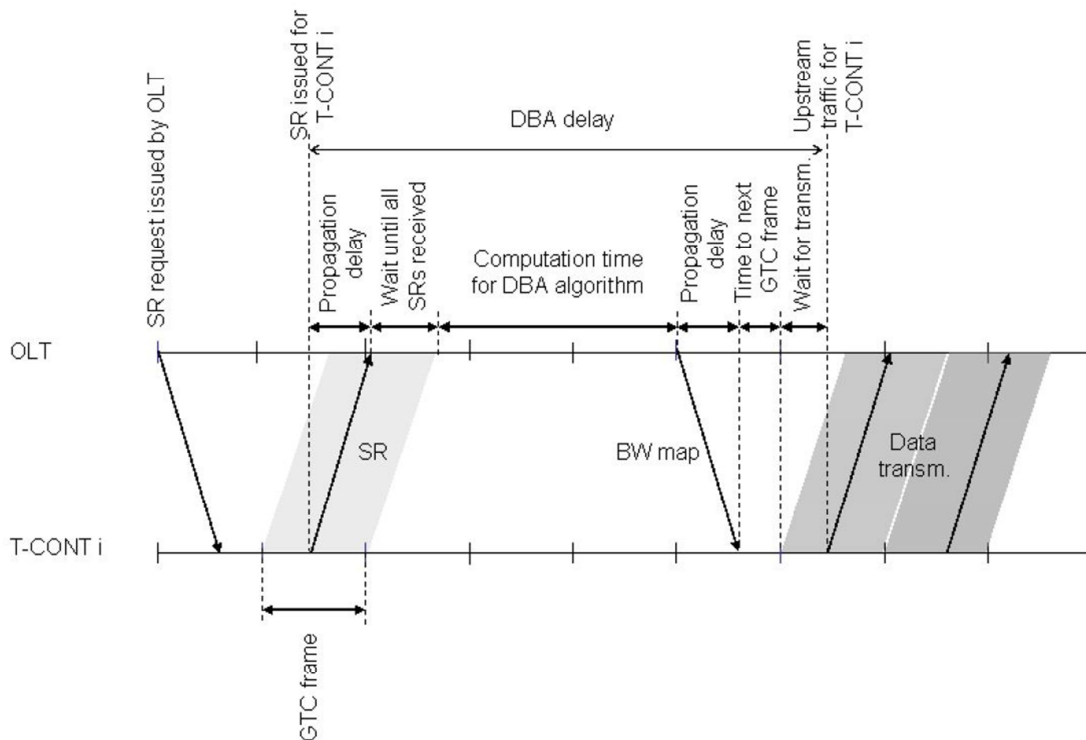






Σχήμα 2 - Παραδείγματα δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι υλοποίησης του μηχανισμού δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης. Η μία μέθοδος ονομάζεται «ρύθμιση αδρανών κελιών» ( idle cell adjustment) ή «μη αναφορά κατάστασης» (Non-Status Reporting). Σε αυτήν τη μέθοδο το OLT παρακολουθεί τη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης που ανατίθεται στα ONU. Αν η χρησιμοποίηση υπερβεί ένα προκαθορισμένο κατώφλι, τότε θα ανατεθεί επιπλέον εύρος ζώνης, εφόσον υπάρχει πλεόνασμα. Σε αυτή την προσέγγιση δεν απαιτούνται πόροι, ώστε να γίνεται αναφορά της κατάστασης από κάθε ONU. Το OLT συμπεραίνει την ανάγκη κάθε ONU για εύρος ζώνης από την εκάστοτε χρησιμοποίηση. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αργή αντίδραση στην απαίτηση ενός ONU για επιπλέον εύρος ζώνης. Η δεύτερη μέθοδος ονομάζεται «με αναφορά κατάστασης» (Status Reporting). Το ONU αναφέρει την κατάσταση της προσωρινής του μνήμης και το OLT χρησιμοποιώντας τις αναφορές αυτές κάνει ανακατανομή του εύρους ζώνης.



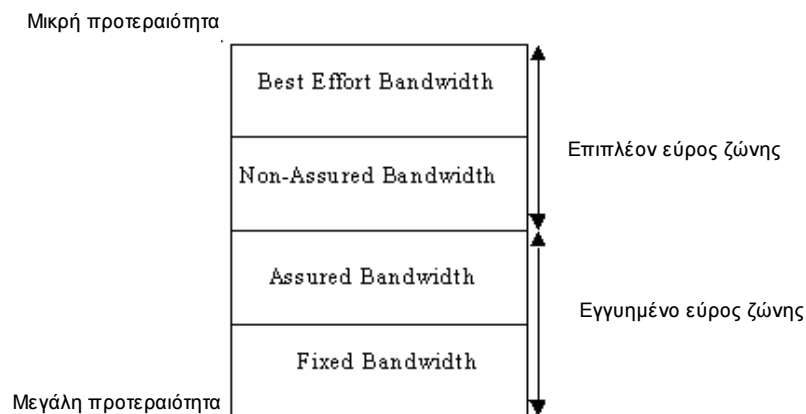
Σχήμα 3 - Σχηματική αναπαράσταση της DBA διαδικασίας στα GPON

Το DBA εξυπηρετεί ορισμένες λειτουργίες. Οι λειτουργίες αυτές μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ανίχνευση κατάστασης συμφόρησης από το OLT ή/και το ONU
- Αναφορά κατάστασης συμφόρησης στο OLT
- Αναθεώρηση του εύρους ζώνης που έχει ανατεθεί σε κάθε ONU σύμφωνα με προκαθορισμένες παραμέτρους
- Θέματα που αφορούν τις άδειες μετάδοσης που δίνει το OLT σύμφωνα με το αναθεωρημένο εύρος ζώνης και τα TCONT
- Θέματα διαχείρισης για λειτουργίες DBA

Άλλο χαρακτηριστικό του DBA είναι η ικανότητα να εξυπηρετεί διάφορα TCONT (Traffic Containers) σε ένα ONU. Τα TCONTs μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα το ένα από τα άλλα σε κάθε ONU. Ο μηχανισμός DBA συνδέει κάθε τύπο TCONT με ένα είδος άδειας μετάδοσης δεδομένων (grant). Η κατηγοριοποίηση αυτή επιτρέπει τον καλύτερο χειρισμό ροών δεδομένων με παρόμοια χαρακτηριστικά.

Λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα υπηρεσιών (QoS) το DBA παρέχει τις ίδιες δυνατότητες εγγύησης της ποιότητας με το G.983.4, το οποίο έχει πέντε τύπους TCONT. Κάθε τύπος TCONT χαρακτηρίζεται από το είδος του ανατιθέμενου εύρους ζώνης που υποστηρίζει. Το εύρος ζώνης, που ανατίθεται σε μια ONU, μπορεί να ανήκει σε μια από τις εξής κατηγορίες: σταθερό, εγγυημένο, μη εγγυημένο, το καλύτερο δυνατό και το μέγιστο. Η ιεραρχία των κατηγοριών αυτών φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.



Πίνακας 1 - Ιεραρχία T-CONT

Στον πίνακα 2 φαίνεται η σχέση μεταξύ της κάθε κατηγορίας εύρους ζώνης και των πέντε τύπων TCONT<sup>23</sup>.

	Ευαισθησία στην καθυστέρηση	Τύπος ανάθεσης	Τύποι TCONT				
			1	2	3	4	5
Σταθερό	Ναι	Προκαθορισμένος	✓				✓
Εγγυημένο	Όχι	Προκαθορισμένος		✓	✓		✓
Μη Εγγυημένο	Όχι	Δυναμικός			✓		✓
Καλύτερο Δυνατό	Όχι	Δυναμικός				✓	✓
Όλοι οι τύποι		Προκαθορισμένο + Δυναμικό	✓	✓	✓	✓	✓

Πίνακας 2 - εύρος ζώνης – TCONT

Για τους τύπους 3, 4 και 5 το άνω όριο του εύρους ζώνης είναι ίσο με το μέγιστο και είναι προκαθορισμένο. Στον πίνακα, ο τύπος ανάθεσης χαρακτηρίζει το επιπρόσθετο εύρος ζώνης που μπορεί να ζητήσει ένα ONU. Στην ανάθεση εύρους ζώνης εξυπηρετούνται πρώτα, όσοι έχουν σταθερό εύρος ζώνης, χρησιμοποιώντας και σχισμές για τη μείωση της καθυστέρησης και της μεταβολής της καθυστέρησης ανά μετάδοση. Κατόπιν εξυπηρετείται το εγγυημένο εύρος ζώνης. Το υπόλοιπο εύρος ζώνης διανέμεται στο μη – εγγυημένο και το καλύτερο δυνατό. Το μη – εγγυημένο έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα εξυπηρέτησης έναντι του καλύτερου δυνατού.

## 6.2 Ανάλυση τύπων TCONT

### TCONT τύπου 1

Το TCONT τύπου 1 χαρακτηρίζεται από σταθερό εύρος ζώνης μόνο. Για αυτό το TCONT το εύρος ζώνης πρέπει να διανέμεται υποχρεωτικά, με σταθερό ρυθμό και ελεγχόμενη καθυστέρηση κελιών. Το TCONT αυτού του τύπου χρησιμοποιείται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ο OLT πάντα αναθέτει το προκαθορισμένο εύρος ζώνης στις συνδέσεις με TCONT 1 ανεξαρτήτως αν υπάρχουν δεδομένα να σταλούν ή όχι. Για το TCONT αυτό δε γίνεται δυναμική ανάθεση του εύρους ζώνης.

### TCONT τύπου 2

Το T -CONT τύπου 2 χαρακτηρίζεται από εγγυημένο εύρος ζώνης μόνο. Το εγγυημένο εύρος ζώνης είναι ίδιο με το σταθερό με τη διαφορά ότι δεν υπάρχει ευαισθησία ως προς το χρόνο. Το TCONT 1 εγγυάται τόσο τον ρυθμό μετάδοσης όσο και την καθυστέρηση ανά κελί και τη μεταβολή της καθυστέρησης αυτής. Ενώ το TCONT 2 εγγυάται μόνο τον ρυθμό μετάδοσης.

### TCONT τύπου 3

Το TCONT τύπου 3 χαρακτηρίζεται τόσο από εγγυημένο όσο και από μη εγγυημένο εύρος ζώνης. Στο TCONT τύπου 3 διανέμεται εύρος ζώνης ίσο με το εγγυημένο μόνο όταν ο ρυθμός είναι ίσος ή μεγαλύτερος από αυτόν του εγγυημένου εύρους ζώνης. Αν υπάρχει απαίτηση για επιπλέον εύρος ζώνης, θα διανεμηθεί ως μη - εγγυημένο. Η κατανομή αυτή θα γίνει από το εύρος ζώνης που αφιερώνεται στο μη - εγγυημένο και στο καλύτερο δυνατό και σε αναλογία με

το εγγυημένο εύρος ζώνης. Το άθροισμα του εγγυημένου και μη - εγγυημένου δε θα πρέπει να ξεπερνάει το μέγιστο εύρος ζώνης το οποίο και είναι προκαθορισμένο. Με το TCONT 3 μπορεί να μεταδοθεί κίνηση μεταβλητού ρυθμού, εκτός από κίνηση πραγματικού χρόνου.

#### **TCONT τύπου 4**

Το TCONT τύπου 4 δεν έχει εγγυημένο εύρος ζώνης και μεταφέρει μόνο το καλύτερο δυνατό. Το TCONT τύπου 4 θα έχει διαθέσιμο εύρος ζώνης μόνο αν εξυπηρετηθούν όλες οι άλλες κατηγορίες (σταθερό, εγγυημένο, μη – εγγυημένο) και υπάρχει πλεόνασμα. Το πλεόνασμα αυτό μοιράζεται εξίσου σε όλα τα TCONT τύπου 4, βασισμένο σε κάποιον αλγόριθμο Round Robin, έως ότου γίνει ίσο με το μέγιστο εύρος ζώνης.

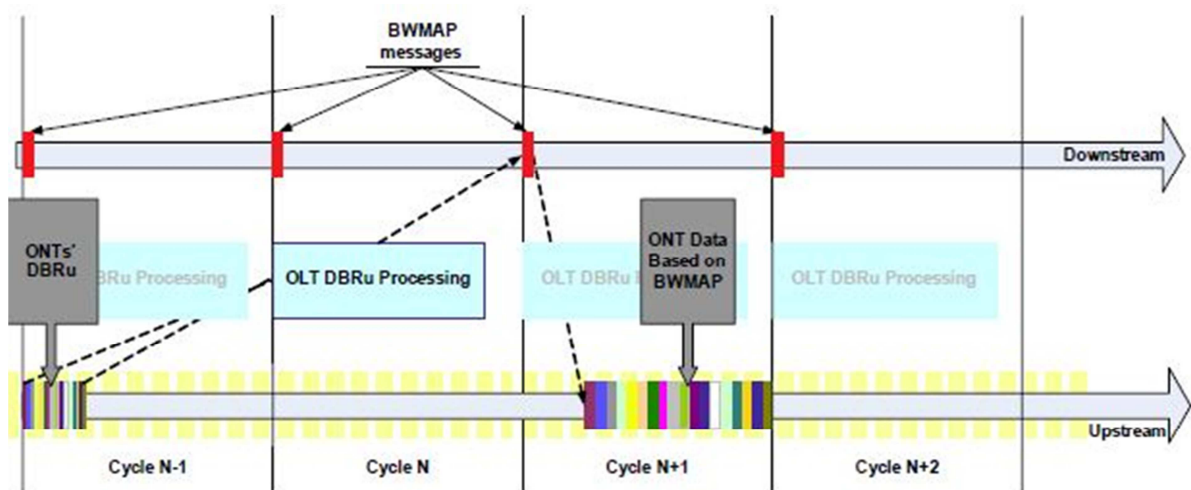
#### **TCONT τύπου 5**

Το TCONT τύπου 5 είναι ένας συνδυασμός όλων των παραπάνω κατηγοριών. Το TCONT τύπου 5 μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε είδος κίνησης συμπεριλαμβανομένης και της μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο.<sup>23</sup>

### **6.3 Ανάθεση DBA με την έννοια του κύκλου**

Οι περισσότεροι DBA αλγόριθμοι χρησιμοποιούν την έννοια του κύκλου. Ένας κύκλος DBA, είναι η διάρκεια που καλύπτει τις μεταδόσεις από όλα τα ONUs. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αρκετά ONUs δε θα μεταδώσουν κατά τη

διάρκεια ορισμένων κύκλων ή η διάρκεια του κύκλου μπορεί να διαφέρει, αλλά η γενική ιδέα ενός «κυκλικού χρόνου» που χρησιμοποιείται για την DBA επεξεργασία, εμφανίζεται σε όλους τους αλγόριθμους<sup>42</sup>. Όπως φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 4, το OLT συλλέγει DBRu μηνύματα από τα ONUs σε κάθε δεδομένο κύκλο, τα επεξεργάζεται στον επόμενο κύκλο, και χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα επεξεργασίας για να χαρτογραφήσει τον επόμενο κύκλο. Το μήκος του κύκλου έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση των IP υπηρεσιών, δεδομένου ότι καθορίζει την ικανότητα να αλλάζει τους χάρτες κατανομής εύρους ζώνης, προσαρμόζοντας την κατανομή όσο μεταβάλλεται κίνηση.



Σχήμα 4 - Σχηματική αναπαράσταση χαρτογράφησης upstream μετάδοσης

## 6.4 Αλγόριθμος Flow-Aware MAC Protocol

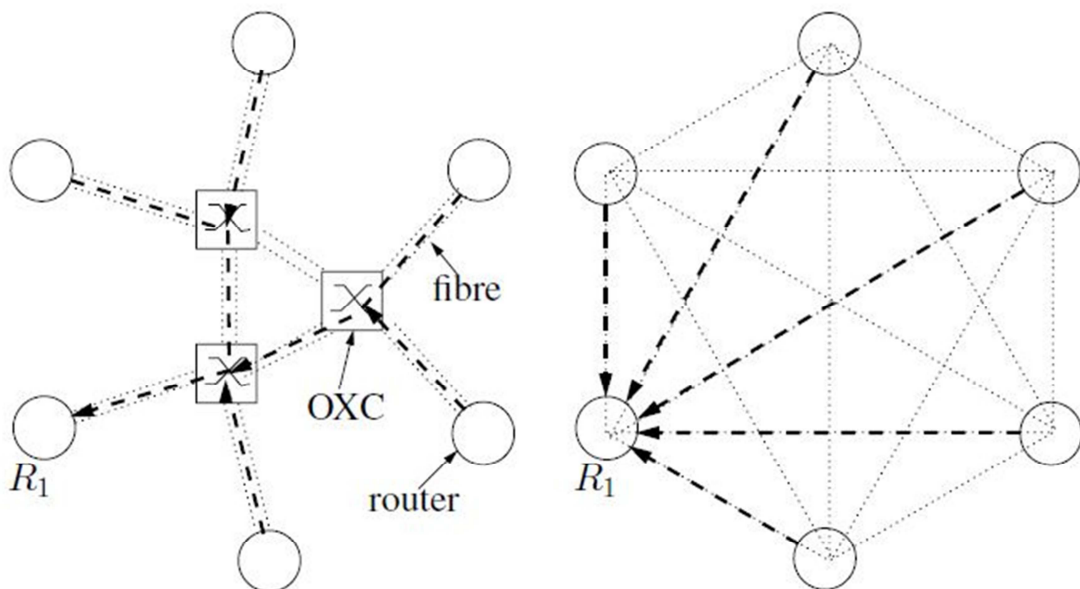
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα γνήσιο πρωτόκολλο MAC για ένα παθητικό οπτικό δίκτυο μητροπολιτικής περιοχής (MAN) με τη χρήση time-domain wavelength interleaved networking (TWIN)<sup>12</sup>. Τα οπτικά κανάλια κατανέμονται στον διανεμημένο έλεγχο των προορισμών χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο δημοσκόπησης με βάση τα πακέτα. Αυτός ο έλεγχος είναι εμπνευσμένος περισσότερο από τους αλγορίθμους δυναμικής διάθεσης εύρους ζώνης των δικτύων EPON παρά από τον έλεγχο πρόσβασης του GPON με βάση τις σχισμές (slots). Η διαχείριση της κίνησης μεταξύ πηγής και προορισμού, που είναι ενήμερη (flow-aware) με το μέγεθος των διατεθειμένων χρονοσχισμών στην ροή, είναι ανάλογη με τον αριθμό των ενεργών ροών. Αυτό μοιάζει με έναν διανεμημένο δίκαιο χρονοπρογραμματιστή ουρών σε κλίμακα ολόκληρου δικτύου, φέρνοντας τα πλεονεκτήματα του μηχανισμού αυτού όσον αφορά στην ευρωστία και στη διαφοροποίηση των υπηρεσιών, σε μικρότερης κλίμακας δίκτυα.

Το TWIN χρησιμοποιεί επιλεκτικούς συνδέτες με βάση το μήκος κύματος του φωτός (OXCs optical cross-connects) για να δημιουργήσει μονοπάτια φωτός από πολλά σημεία προς σημείο σε εικονικό σχηματισμό δέντρων, όπου το καθένα συνδέει τους δρομολογητές πηγής σε έναν συγκεκριμένο δρομολογητή προορισμού. Το μήκος κύματος του μονοπατιού (lightpath) στην πράξη αποτελεί τη διεύθυνση δρομολογητή προορισμού. Οι OXCs έχουν προγραμματιστεί να κατευθύνουν παθητικά όλη την εισερχόμενη πληροφορία σε ένα δεδομένο μήκος κύματος σε μια συγκεκριμένη εξερχόμενη ίνα, φέρνοντας τα σήματα σταδιακά πλησιέστερα προς τον προορισμό.

Το παρακάτω σχήμα 5 απεικονίζει το δέντρο που παρέχει πρόσβαση στον δρομολογητή R1. Κάθε πηγή μπορεί να στέλνει σήματα στο R1 απλά εκπέμποντας τους σε μορφή ριπών φωτός στο αντίστοιχο μήκος κύματος. Οι



πηγές είναι εξοπλισμένες με έναν ή περισσότερους γρήγορα ρυθμιζόμενους πομπούς που είναι σε θέση να στείλουν διαδοχικές ριπές σε όλα τα μήκη κύματος. Τονίζεται ότι οι ριπές που έχουν ρυθμιστεί να μη συγκρούονται στον προορισμό, δε μπορούν να συγκρουστούν πουθενά αλλού στο δίκτυο. Το σχέδιο στα δεξιά του σχήματος είναι το λογικό ισοδύναμο του δίκτυο στα αριστερά. Κάθε ακμή σε αυτό το γράφημα θα φέρει ένα μονοπάτι φωτός (lightpath) σε κάθε κατεύθυνση, αλλά αυτό δεν εμφανίζεται για λόγους σαφήνειας.



Σχήμα 5 - Δίκτυο TWIN 6 κόμβων

Οι πηγές αναφέρουν τα ισχύοντα προσωρινά δεδομένα για αποστολή στους αντίστοιχους προορισμούς χρησιμοποιώντας μηνύματα σταθερού μήκους. Η ώρα που απεστάλησαν αυτές οι αναφορές περιλαμβάνεται στην επιχορήγηση (grant) που δόθηκε από τον προορισμό. Μια αναφορά επισυνάπτεται πάντα στο τέλος κάθε αποστολής δεδομένων ακόμα και αν δεν έχει η πηγή δεδομένα προς αποστολή. Κάθε δρομολογητής προορισμού στέλνει συνεχώς εγκρίσεις για αποστολή στους δρομολογητές υλοποιώντας ένα σύστημα δημοσκοπήσεων

σχεδιασμένο να διασφαλίσει πως νέες αφίξεις στην πηγή θα αναφερθούν το συντομότερο δυνατόν. Αφού οι αναφορές υλοποιούνται σε σήματα εντός μήκος κύματος του μονοπατιού, κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν σήματα εκτός μήκος κύματος από εξωτερικά μέσα για την αποστολή των grants.

Όλοι οι κόμβοι πρέπει να είναι προσεκτικά συγχρονισμένοι σε πραγματικό χρόνο για να εξασφαλιστούν ακριβή χρονοδιαγράμματα μετάδοσης. Αυτό είναι δυνατό με μια τακτική ανταλλαγή χρονικών σφραγίδων.

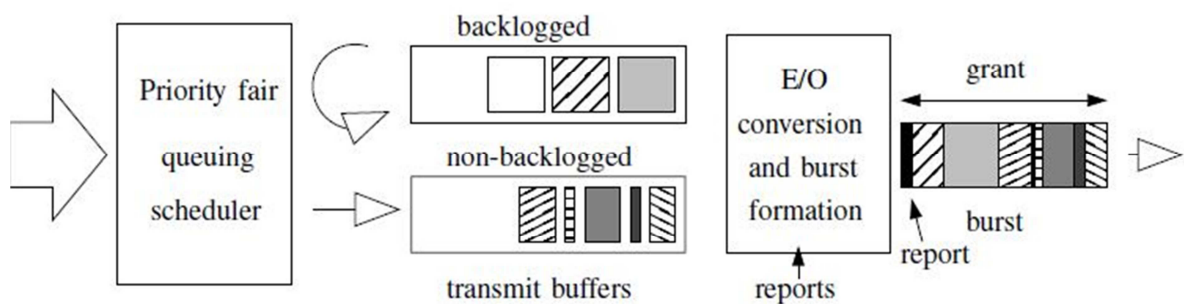
Για τον υπολογισμό χρονικών περιόδων των επιχορηγήσεων, ο κόμβος προορισμού πρέπει να υπολογίσει την καθυστέρηση που πραγματοποιήθηκε πριν φτάσει η ριπή στον προορισμό όπως επίσης και τον χρόνο που απαιτείται για τον αναμεταδότη να ρυθμίσει το μήκος κύματος. Το μέγεθος το grant υπολογίζεται βάσει την αναφοράς για το περιεχόμενο της ουράς εφαρμόζοντας μια συγκεκριμένη πολιτική υπηρεσιών. Επίσης πρέπει να περιλαμβάνεται ο χρόνος για να σταλεί η αναφορά και ο χρόνος που απαιτείται από το κανάλι για να χρησιμοποιηθεί ξανά.

Ένας κόμβος πηγή λαμβάνει grants από διάφορους προορισμούς τα οποία μπορούν να επικαλύπτονται. Εάν ο αριθμός των επικαλύψεων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μεταδοτών, ένα ή περισσότερα grant δεν μπορούν να ικανοποιηθούν πλήρως. Όταν ένας επιτυχημένο grant τελειώνει και μερικά άλλα ανικανοποίητα grants δεν έχουν λήξει εντελώς, ο πομπός επιστρέφει στο αντίστοιχο μήκος κύματος για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα των grants.

Όταν το grant εκπέμπεται από τον προορισμό, αυτός υπολογίζει την κατανομή με βάση όλες τις αναφορές που έλαβε από το τελευταίο grant που εκδόθηκε, δηλαδή, το σύνολο των μη καθυστερούμενων (non-backlogged) αφίξεων και τα ελλείμματα, συν το χρόνο για να σταλεί ένα κβάντο κάθε καθυστερούμενης (backlogged) ροής που αναφέρεται στην τελευταία ληφθείσα αναφορά. Αυτοί οι μηχανισμοί αναφοράς και επιχορηγήσεων διασφαλίζουν ότι η προσωρινή κίνηση θα εξυπηρετηθεί επιτυχώς στο σύνολό της.

Όταν ένα grant συμπληρώνεται από μία πηγή στον καθορισμένο χρόνο εκκίνησης, τα προσωρινά περιεχόμενα τυπικά δε θα είναι τα ίδια με εκείνα που αναφέρθηκαν λόγω της καθυστέρησης προγραμματισμού. Το grant

χρησιμοποιείται πρώτα για την αποστολή πακέτων από μη καθυστερούμενες ροές, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που μπορεί να έχουν φτάσει από την αναφορά που εκδόθηκε. Το υπόλοιπο χρησιμοποιείται για την αποστολή όσων περισσότερων στοιχείων από τις καθυστερούμενες ροές γίνεται, εξυπηρετώντας σε ακολουθία round robin ξεκινώντας από όπου τελείωσε η εξυπηρέτηση του τελευταίου grant.



Σχήμα 6 – Έκδοση επιχορηγήσεων

Ενώ ο ανά-ροή προγραμματισμός είναι εφικτός για φορτία μέχρι περίπου 90%, ο αριθμός των ροών θα αυξηθεί χωρίς όρια αν το φορτίο θα πρέπει να προσεγγίσει ή να υπερβεί το 100% της χωρητικότητας του μήκος κύματος. Επομένως, είναι αναγκαίο να εφαρμόσει κάποια μορφή ελέγχου υπερφόρτωσης, τόσο για τη διατήρηση των επιδόσεων, όσο και για να εξασφαλιστεί ότι ο αριθμός των καθυστερούμενων ροών που περιμένουν για προγραμματισμό, παραμένει σχετικά μικρός. Η υπερφόρτωση θα πρέπει τυπικά να εκδηλωθεί πρώτα από κάποια πηγή που παρουσιάζει τοπικά έναν υπερβολικό αριθμό καθυστερούμενων ροών σε εξέλιξη. Αυτή η πηγή θα ενεργοποιήσει έναν μηχανισμό μείωσης του φορτίου, όπως να απορρίψει τα πακέτα από ένα ορισμένο σύνολο των ροών. Σε οποιαδήποτε άλλη πηγή που παρατηρείται

υπερφόρτωση, θα έχει παρόμοια συμπεριφορά μέχρι ενός συνολικού φορτίου που είναι διαχειρίσιμο όπως όχι περισσότερο από 90% του ολικού.

Η απόδοση του πρωτοκόλλου MAC έχει αξιολογηθεί από έναν συνδυασμό ανάλυσης και προσομοίωσης. Κυριάρχησε χαμηλή καθυστέρηση (οι μη-καθυστερούμενες ροές έχουν πολύ χαμηλή καθυστέρηση), μέχρι η ζήτηση να προσεγγίσει το όριο χωρητικότητας του καναλιού. Η χωρητικότητα της κίνησης αποδείχτηκε ότι είναι ίση με την τάξη του καναλιού και ανεξάρτητη από την επιπλέον κίνηση αναφορών και των guard χρόνων. Η ρυθμοαπόδοση των καθυστερούμενων ροών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των στοιχείων που εξυπηρετούνται. Ένας μεγάλος αριθμός πακέτων για αποστολή είναι επιθυμητός, εφ' όσον το πρωτόκολλο μεταφοράς είναι σε θέση να διατηρήσει μια αρκετά μεγάλη καθυστέρηση.

## 6.5 Αλγόριθμος DWFQ-MDBA

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας δυναμικός αλγόριθμος για την εσωτερική λειτουργία των ONU<sup>22</sup>. Είναι η σύνθεση ενός προγραμματιστή DWFQ (intra-ONU Dynamic Weighted Fair Queuing) ενσωματωμένο με τον αλγόριθμο MDBA (Multiservice Dynamic Bandwidth Allocation algorithm). Αυτός αποσκοπεί στο να ελαφρύνει το πρόβλημα της ποινής χαμηλού φόρτου που προκύπτει από τον προγραμματιστή αυστηρής προτεραιότητας που απασχολείται στο ONU, καθώς και αύξηση της χρησιμοποίησης του εύρους ζώνης στο κανάλι ανόδου στο GPON. Ο προτεινόμενος ενδο-ONU προγραμματιστής DWFQ εγγυάται τη δικαιοσύνη για την τοπική πρόσβαση όλων των υποστηριζόμενων κατηγοριών κυκλοφορίας στο παράθυρο μετάδοσης με το να ελέγχει τις υπηρεσίες που ανατίθενται σε αυτά για κάθε κατηγορία κίνησης. Ο MDBA εγγυάται τη συνολική δικαιοσύνη μεταξύ των ONUs με την αποτελεσματική ανάθεση του GPON upstream εύρους ζώνης, ενώ παράλληλα λύνει και το πρόβλημα του χαμηλού

φόρτου. Έτσι, το σύστημα DWFQ-MDBA μπορεί να εγγυηθεί την από άκρο σε άκρο (end-to-end, E2E) ποιότητα των υπηρεσιών (QoS) που απαιτείται για τις υποστηριζόμενες κατηγορίες υπηρεσιών.

Ο προγραμματιστής DWFQ υποστηρίζει ένα αναλογικό μοντέλο για τις διαφοροποιημένες υπηρεσίες (Proportional Differentiated Services, PDiffServ). Προσαρμόζει δυναμικά την προτεραιότητα των ουρών που έχουν ανατεθεί στις κατηγορίες κίνησης στο ONU με βάση τον εκτιμώμενο ρυθμό άφιξης της κίνησης και τη μετρημένη πληρότητα της ουράς. Αυτό ρυθμίζει την αναλογία μεταξύ των μέσων καθυστερήσεων ουράς των υπηρεσιών με το να ελέγχει τον ρυθμό των υπηρεσιών που έχουν ανατεθεί για την κλάση υπηρεσίας.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος MDBA υποστηρίζει PDiffServ με την αποτελεσματική ανάθεση του απαιτούμενου εύρους ζώνης σε κάθε κατηγορία που υποστηρίζεται από τον DWFQ προγραμματιστή. Υπολογίζει τον αριθμό των πακέτων που φτάνουν κατά τη διάρκεια του χρόνου αναμονής για την λήψη μηνύματος grant, και ακολούθως ζητάει επαρκές εύρος ζώνης για να εξυπηρετήσει όλα τα πακέτα που παρελήφθησαν. Αυτό μειώνει την μέση καθυστέρηση των πακέτων για όλες τις κατηγορίες κίνησης και βελτιώνει τη χρήση του GPON εύρους ζώνης για το κανάλι ανόδου.

Με τη χρήση αυτού του συνδυασμού έχουμε επίσης μειωμένη πολυπλοκότητα υπολογισμών στο OLT καθώς ανατίθενται επιπλέον αρμοδιότητες στα ONU. Επιπλέον μας δίνεται η δυνατότητα του διαμοιρασμού του συστήματος του GPON μεταξύ διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών αφού θα εγγυάται και από την πλευρά των χρηστών η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών τους, ανεξαρτήτως διαφορετικών πολιτικών δικτύου.

## 6.6 DBA βασισμένο σε bursty Multi-Service Traffic

Έχει δημιουργηθεί ένας DBA αλγόριθμος για πολλαπλές υπηρεσίες QoS που ορίζονται στο ITU-T G.983.4, ο οποίος δεν έχει καθοριστεί πλήρως και είναι ακόμα ανοιχτός για την υλοποίησή του και την εφαρμογή του από τους προγραμματιστές<sup>19</sup>. Η κίνηση που φτάνει στο OLT και στα ONUs έχει ταξινομηθεί και χωριστεί σε ξεχωριστές ουρές CoS (Class of Service) με διαφορετικό QoS ανάλογα τα Traffic Containers (T-CONTs) που χαρακτηρίζουν την ποιότητα της κατηγορίας. Τα T-CONTs διακρίνονται από το πεδίο Alloc-ID και σύμφωνα με την σύσταση G.983.4, η κίνηση κατατάσσεται στα T-CONTs 1, 2, 3 και 4.

Κάθε τύπος T-CONT σχετίζεται με ένα σύνολο παραμέτρων υπηρεσιών. Οι παράμετροι αυτοί είναι η μέγιστη καθυστέρηση πακέτων, η μέγιστη διακύμανση καθυστέρησης πακέτων και μέγιστη πιθανότητα απώλειας πακέτων. Η διαθεσιμότητα του εύρους ζώνης για την εξυπηρέτηση των T-CONTs με QoS εξασφαλίζεται από τη συμφωνία επιπέδου υπηρεσιών (SLA), δηλαδή τη σύμβαση παροχής υπηρεσιών διαπραγμάτευσης μεταξύ του πελάτη και του παρόχου υπηρεσιών.

Ο αλγόριθμος DBA θα εξετάσει τις εκρήξεις δεδομένων για την κατανομή τους από τη στιγμή που δημιουργούνται σε κάθε T-CONT. Μια ριπή θα προγραμματιστεί, όταν ένα όριο χρόνου επιτευχθεί με ένα προκαθορισμένο μέγιστο μέγεθος ριπής που επιτρέπεται. Αυτό θα προσφέρει μεγάλη αποτελεσματικότητα στη μεταφορά με λίγες επικεφαλίδες και υψηλή απόδοση με χαμηλή σηματοδότηση. Οι ριπές δεδομένων θα διαβιβάζονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο κατακερματισμού και ενθυλάκωσης GEM προτού εισαχθεί στο φορτίο.

Οι αρχές προγραμματισμού που εφαρμόζονται στην αποστολή δεδομένων καθόδου είναι πολύ απλές. Θα χρησιμοποιηθεί μια αρχή αυστηρής προτεραιότητας (Strict Priority, SP) όπου οι ριπές δεδομένων θα εξυπηρετούνται με βάση την προτεραιότητα της τάξης, στην οποία βρίσκονται λαμβάνοντας επίσης υπόψη και το συγκεκριμένο SLA. Οι ριπές με υψηλότερη προτεραιότητα

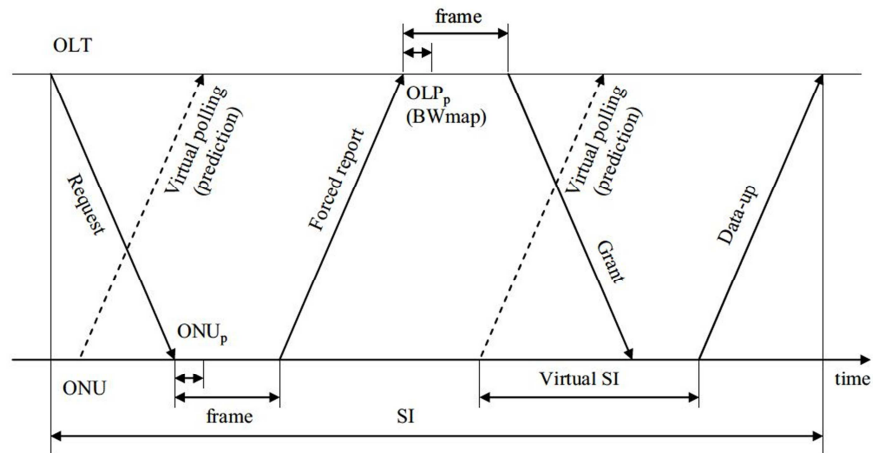
θα εξυπηρετηθούν πρώτες, ενώ αυτές χαμηλότερης προτεραιότητας θα περιμένουν για μετέπειτα χειρισμό.

Κατά την μετάδοση ανόδου θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική δημοσκοπήσεων με αναφορά κατάστασης (status reporting, SR), ώστε το OLT να γνωρίζει τις ριπές T-CONTs που παράγονται και αποθηκεύονται στο ONU και στη συνέχεια το OLT θα δημιουργήσει τις κατάλληλες επιχορηγήσεις για το ONU, το οποίο θα αποστέλλει τα εξουσιοδοτημένα δεδομένα στο πλαίσιο ανόδου. Η τεχνική SR αξιοποιείται σε κάθε διάστημα προγραμματισμού (Scheduling Interval, SI) ενημερώνοντας το μέγεθος της ριπής στο ONU για τις τρέχουσες T-CONT ριπές. Scheduling Interval είναι ο αριθμός των GPON πλαισίων που αποστέλλονται σε κάθε κύκλο δημοσκοπήσεων σε ένα ONU. Η παράμετρος SI είναι κρίσιμης σημασίας και προσαρμόζεται στις συνθήκες κίνησης ούτως ώστε το OLT να επιτύχει ολική και τρέχουσα πληροφόρηση έγκαιρα για τις ριπές T-CONT που δημιουργούνται σε κάθε ένα από τα ONUs. Μόλις το OLT λάβει γνώση για τις ανάγκες κίνησης των ONU, θα διανέμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης εφαρμόζοντας τις αρχές του SP προγραμματιστή βάση του συμφωνημένου SLA. Τα grants θα δημιουργηθούν και θα εισαχθούν στο πεδίο BWmap του πλαισίου καθόδου. Επιπλέον, όταν μια ριπή ανόδου T-CONT αποστέλλεται, δημιουργούνται επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις νέες ριπές που δημιουργούνται από το ίδιο το T-CONT και προστίθενται στο πεδίο DBRu.

Η λειτουργία του καναλιού ανόδου είναι ελεύθερη από συγκρούσεις καθώς όλα τα ONUs είναι χρονισμένα χρησιμοποιώντας μια διαδικασία αποστασιομέτρησης κατά την ενεργοποίησή τους και την καταχώρησή τους. Παρόλα αυτά μία επιπλέον καθυστέρηση μπορεί να επιβληθεί από την πλευρά του ONU, καθώς επίσης και ο χρόνος round trip time που είναι δύο φορές η καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ του OLT και του ONU το οποίο παρατηρείται σε κάθε τέτοιο ζευγάρι.

Η αξιολόγηση μέσα από προσομοιώσεις δείχνει ότι στην SR κίνηση δεδομένων εφαρμόζοντας αρχές Αυστηρού Προγραμματισμού (Strict Priority), παρατηρείται καλή συμπεριφορά στην καθυστέρηση των ουρών για όλες τις κατηγορίες δεδομένων τόσο για την κίνηση ανόδου όσο και για την κίνηση

καθόδου, κρατώντας χαμηλά την καθυστέρηση για τα υψηλής προτεραιότητας δεδομένα.



Σχήμα 7 – Αναφορά κατάστασης με ενδιάμεσα προγραμματισμού

## 6.7 Ένα νέο πρωτόκολλο MAC για την εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών

Παρακάτω παρουσιάζεται μια περιγραφή του νέου GPON DBA MAC πρωτοκόλλου στα πλαίσια μιας διαδικασίας προγραμματισμού βασισμένη στα frames, τη διαδικασία υποβολής αναφοράς των νέων ONUs, τον νέο μηχανισμό ισορροπίας μετάδοσης, καθώς και τον αλγόριθμο κατανομής εύρους ζώνης που βρίσκεται από κάτω. Η προσέγγιση των κεντροποιημένων δημοσκοπήσεων βασισμένη στη διαδικασία grant/αναφορών έχει ενσωματωθεί στη νέα αρχιτεκτονική DBA MAC ως ένας αποτελεσματικός μηχανισμός για δίκτυα PON. Το ενδιάμεσο διάστημα των δημοσκοπήσεων των ONUs για την κατάσταση των ουρών και τον προγραμματισμό των grants από το OLT είναι μια σημαντική πτυχή στον σχεδιασμό του πρωτοκόλλου DBA. Όπως επίσης και η συχνότητα των δημοσκοπήσεων είναι μια ακόμα κρίσιμη παράμετρος σε σχέση με την απόδοση του GPON MAC πρωτοκόλλου. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις συνεχείς αλλαγές της έντασης της κυκλοφορίας στις εγκαταστάσεις του πελάτη, οι πληροφορίες που αναπαράγει σε πραγματικό χρόνο για τη διακύμανση της



κυκλοφορίας είναι επίσης απαραίτητες για το OLT να κάνει σωστή προσαρμοστική διαιτησίας για το εύρος ζώνης. Το GPON έχει εγγενώς μια καθορισμένη περίοδο για τη μετάδοση κάθε πλαισίου της τάξης των 125μs τόσο για τη μετάδοση ανόδου όσο και για τη μετάδοση καθόδου. Επομένως έχει αναπτυχθεί μια διαδικασία προγραμματισμού που βασίζεται στα πλαίσια για να υποστηρίξει τη λειτουργία MAC μεταξύ του OLT και των ONUs. Εν μέσω αυτού του χρόνου προγραμματίζονται οι επιχορηγήσεις του OLT και οι αναφορές των ONUs. Σε αυτό το σχήμα, κάθε ουρά ανεξαρτήτως δεδομένων που της έχουν ανατεθεί, έχει ίσες πιθανότητες να στείλει μια αναφορά για το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Σε κάθε πλαίσιο ανόδου ένα ελάχιστο εύρος ζώνης προορίζεται για κάθε ουρά ONU για να μεταδώσει την αναφορά του και το αδρανές πλαίσιο GEM που ορίζεται για σκοπούς συγχρονισμού.

Η αναφορά του εύρους ζώνης για κάθε ουρά μεταφέρεται στο πεδίο DBRu και μεταδίδεται ενθυλακωμένο μαζί με τα υπόλοιπα δεδομένα του χρήστη προς το OLT. Ενώ όλες οι αναφορές DBRu στο πλαίσιο ανόδου φτάνουν στο OLT, πραγματοποιείται και ο προγραμματισμός των ανανεωμένων αναφορών από τα ONU, ώστε ο αλγόριθμος ανάθεσης εύρους ζώνης να επιχορηγήσει επιτυχώς grants βασισμένος στις νέες αναφορές. Ακολούθως στο πλαίσιο καθόδου τα grants, που παράγονται από το OLT για όλες της υπηρεσίες, ενσωματώνονται στην επιπλέον κεφαλίδα (overhead) του GTC πλαισίου και αναμεταδίδονται στο κανάλι καθόδου καθενός ONU.

Η αναφορά εύρους ζώνης που εκδίδεται από το ONU αντανakλά άμεσα το πραγματικό μέγεθος της ουράς αναμονής στο συγκεκριμένο ONU, ενώ αυτό δημοσκοπείται. Ωστόσο, θέμα του OLT είναι να προβεί σε ακριβή κατανομή εύρους ζώνης χρησιμοποιώντας τις αναφερθείσες πληροφορίες, καθώς υπάρχει νέα εισερχόμενη κίνηση κατά τη διάρκεια της περιόδου αναμονής του ONU. Για παράδειγμα, αν έχουν πρόσφατα φτάσει πακέτα και έχουν ήδη αποθηκευτεί στις προσωρινές ουρές του ONU, όταν τα σχετικά grants φτάσουν στο ONU μετά από έναν ολοκληρωμένο χρόνο επιστροφής πακέτων. Έτσι έχει προκύψει ένα βασικό ζήτημα, το πώς να υπολογίσει ή να καταγράψει το ποσό της κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια της περιόδου αναμονής των ONUs. Επιπλέον, ενώ το δίκτυο είναι

στημένο για να ανταποκριθεί σε ίδιες απαιτήσεις κυκλοφορίας, η εκρηκτικότητα αυτής της κίνησης αποκλείει την πρόβλεψη πληρότητας της ουράς με εύλογη ακρίβεια. Αυτό είναι ένα σημαντικό ζήτημα που δε μπορεί να αγνοηθεί στην ανάπτυξη GPON MAC. Επίσης η ποικιλία στα μοτίβα κίνησης σε ένα δίκτυο πρόσβασης είναι ένα άλλο εμπόδιο όσον αφορά την ενσωμάτωση πρόβλεψης κυκλοφορίας σε ένα πρωτόκολλο MAC GPON. Για να μπορέσουν οι αναφορές των ONUs να αντανακλούν την πραγματική διακύμανση της κυκλοφορίας στις εγκαταστάσεις του πελάτη και να αναπτύξουν μια προσαρμόσιμη σχέση μαζί με τη διαδικασία των grants και των αναφορών, έχει αναπτυχθεί μια δυναμική διαδικασία αναφοράς για τα ONUs.

Αντί της συμβατικής αναφοράς του τρέχοντος μεγέθους της ουράς, κάθε αύξησή της κατά το ενδιάμεσο διάστημα της μετάδοσης ανόδου του κάθε ONU, αναφέρεται ως μια σημαντική συνιστώσα. Στη διάρκεια του πλαισίου ανόδου για κάθε ONU, αυτό καταγράφει τον αριθμό και το μέγεθος των πακέτων που έχουν αφιχθεί μέσα σε αυτό το διάστημα, και ο συνολικός αριθμός καταχωρείται ως αύξηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο, η πληροφορία που καταγράφεται για κάθε ONU αναπαριστά τις αλλαγές στην κίνηση κατά τη διάρκεια του χρόνου αναμονής στην μετάδοση ανόδου.

Μια από τις απαιτήσεις του πρωτοκόλλου GPON MAC είναι η ενσωμάτωση της GEM λειτουργίας, ώστε τα αρχικά πακέτα να κατακερματιστούν σωστά, να ενθυλακωθούν στα GEM πλαίσια και να μεταδοθούν στις χρονοσχισμές που τους έχουν ανατεθεί. Είναι απαραίτητο για το ONU να παρακολουθεί το εύρος ζώνης που καταναλώνεται από τις GEM κεφαλίδες, ώστε τα δεδομένα προς αποστολή να εκμεταλλευτούν το εναπομείναν καθαρό εύρος ζώνης.

Η νέα προσέγγιση αναφορών παρέχει ένα μηχανισμό σύλληψης της διακύμανσης της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο και καθιερώνει μια σχέση μεταξύ της τρέχουσας αναφοράς του ONU και της τελευταίας ανάθεσης από την πλευρά του OLT.

Έχει αναπτυχθεί ένας νέος μηχανισμός μεταφοράς για να συμβαδίσει με τη δυναμική διαδικασία αναφοράς του ONU, με σκοπό να πετύχει την εκχώρηση εύρους ζώνης μέσω διαδοχικών αναθέσεων. Είναι πιθανόν κάποια πακέτα που αναμένουν για αποστολή να καθυστερήσουν μένοντας στις ουρές εξ αιτίας μεγάλων απαιτήσεων σε εύρος ζώνης ή διάθεσής του σε άλλες υπηρεσίες. Τέτοιες πληροφορίες παρακολουθούνται και διατηρούνται στον OLT. Βάση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, ισορροπία (balance) είναι η διαφορά του απαιτούμενου εύρους ζώνης και του πραγματικού εύρους που ανατέθηκε σε κάθε ουρά του ONU. Έτσι λοιπόν η διαχείριση του OLT γίνεται βάση των αναφορών του ONU και της παραμέτρου της ισορροπίας.

Στο πρωτόκολλο MAC, που βασίζεται σε μια διαδικασία χορήγησης/αναφοράς, είναι προφανές ότι η αποτελεσματικότητα και ακρίβεια των επιχορηγήσεων για το εύρος ζώνης είναι μια σημαντική πτυχή σε σχέση με την απόδοση του πρωτοκόλλου. Όπως οι αλγόριθμοι κατανομής που βρίσκονται από κάτω, έτσι και οι πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από το OLT για τη διαιτησία του εύρους ζώνης είναι ένας άλλος κυρίαρχος παράγοντας για την επίτευξη της υψηλότερης απόδοσης και της ακρίβειας. Επομένως με την ενσωμάτωση της νέας διαδικασίας αναφορών των ONUs με τον μηχανισμό ισορροπίας μεταφοράς, οι πληροφορίες μέσω των οποίων εκτελεί το OLT εκχώρηση εύρους ζώνης παράγονται με βάση το άθροισμα της ισορροπίας και των αναφορών που παράγονται με τη νέα διαδικασία. Το αποτέλεσμα που λαμβάνεται στη συνέχεια, χρησιμοποιείται από το OLT ως τιμή αναφοράς για την ανάθεση μιας ουράς ONU εντός ενός πλαισίου. Έτσι πραγματοποιείται και η διαιτησία του OLT για το εύρος ζώνης με βάση αυτές τις τιμές αναφοράς που επιτρέπουν ένα δυναμικό μηχανισμό προσαρμογής μέσω αυτών των διαδοχικών αναθέσεων. Τα grants που παράγονται ενσωματώνονται στο πεδίο PCBd και μεταδίδονται στο επόμενο πλαίσιο καθόδου, ενώ η ισορροπία καταγράφεται αθροιστικά από το OLT πλαίσιο προς πλαίσιο.

Χρησιμοποιώντας την ιεραρχία προτεραιότητας για εύρος ζώνης των διαφόρων T-CONTs υπηρεσιών, οι πληροφορίες των ONUs που έχουν αναφερθεί, καταγράφονται στην ισορροπία. Έπειτα το OLT εκτελεί δυναμική

ανάθεση εύρους ζώνης. Το νέο σχήμα με βάση την καινούρια διαδικασία υποβολής αναφορών και τον μηχανισμό ισορροπίας της κίνησης, έχουν ενσωματωθεί στον σχεδιασμό του πρωτοκόλλου DBA. Ο υποκείμενος αλγόριθμος κατανομής εύρους ζώνης υλοποιείται από την εξέταση των δύο πτυχών. Πρώτον, σύμφωνα με την ιεραρχία προτεραιότητας για εύρος ζώνης στο GPON για διαφορετικούς τύπους κίνησης, δίνεται η δυνατότητα για διαφορετική προτεραιότητα σε διαφορετικές ουρές του ONU. Η προτεραιότητα της ουράς είναι στενά συνδεδεμένη με τις υπηρεσίες T-CONT που περιέχει. Δεύτερον, για κάθε τύπο υπηρεσίας, το εύρος ζώνης κατανέμεται αναλογικά μεταξύ των ONUs ανάλογα με την τιμή αναφοράς που προέκυψε από τη νέα διαδικασία υποβολής αναφορών ONU και τον μηχανισμό ισορροπίας της κίνησης. Τέλος, ένας παράγοντας στον οποίο στηρίζεται ο αναλογικός αλγόριθμος είναι η αναλογία μεταξύ της μεμονωμένης αναφοράς μιας ουράς ενός ONU και του συνολικού αριθμού των τιμών για την ίδια ουρά σε όλα τα ONUs σε ένα πλαίσιο ανόδου.

Οι συγκρίσεις των χαρακτηριστικών απόδοσης κατά την προσομοίωση δείχνουν ότι το νέο πρωτόκολλο DBA δεν παρέχει μόνο σχετικά μικρές καθυστερήσεις, χαμηλότερη διακύμανση καθυστέρησης, δικαιοσύνη καθώς και υποστήριξη για διάφορες απαιτήσεις QoS στο GPON, αλλά συμβάλλει επίσης στη σημαντική βελτίωση της απόδοσης του δικτύου με μέσο όρο 22% αύξηση στη ρυθμοαπόδοση της upstream μετάδοσης στο GPON δίκτυο. Ειδικότερα, η σύγκριση των επιδόσεων με ένα συμβατικό πρωτόκολλο DBA καταδεικνύει την ικανότητα του νέου πρωτοκόλλου DBA να μετριάσει τον αντίκτυπο της ίδιας κίνησης στην απόδοση του GPON. Συνοψίζοντας, ένα δίκτυο GPON χρησιμοποιώντας το νέο πρωτόκολλο θα ωφεληθεί από τη βελτιωμένη απόδοση και αξιοπιστία για την παροχή πολλαπλών υπηρεσιών μαζί με την ενισχυμένη δυνατότητα του δικτύου για επεκτασιμότητα και την ανάπτυξη επιπλέον υπηρεσιών.

## 6.8 Αλγόριθμος προγραμματισμού με προσαρμόσιμα ενδιάμεσα χρόνου βασισμένο στο offset (Offset-based scheduling with flexible intervals)<sup>24</sup>

Το OLT πρέπει να καθορίσει τη βέλτιστη τιμή  $SI_i$  (schedule interval) για κάθε τύπο Alloc-ID (όπως ονομάζεται η ουρά με βάση την προτεραιότητα των περιεχομένων της), αφού λάβει υπόψη αρκετά αντίθετα μεταξύ τους κριτήρια στα πλαίσια της απόδοσης και της χρησιμοποίησης του δικτύου. Πρώτα απ' όλα το πεδίο DBRu που κουβαλάει τις αναφορές της τρέχουσας κατάστασης των ουρών κατά την μετάδοση ανόδου για ένα Alloc-ID και καλύπτει ένα σταθερό μέγεθος δεδομένων σε κάθε πλαίσιο. Για μικρά ενδιάμεσα χρόνου και χαμηλό ρυθμό δεδομένων, το bandwidth που σπαταλάται για τις αναφορές κατάστασης μπορεί να είναι σημαντικό. Έτσι συναντάμε τον πρώτο περιορισμό που υπαγορεύει πως η αναλογία της αναφοράς για εύρος ζώνης κάθε Alloc-ID<sub>i</sub> σε σχέση με τον εγγυημένο ρυθμό θα πρέπει να κρατηθεί χαμηλότερα από μια προκαθορισμένη τιμή που αναφέρεται ως  $MSRR_i$ .

Κάθε τύπος Alloc-ID είναι συνδεδεμένος με ένα σετ απαιτήσεων για QoS τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι η μέγιστη καθυστέρηση πακέτων, η ελάχιστη διακύμανση καθυστέρησης πακέτων και η πιθανότητα μεγαλύτερης απώλειας πακέτων. Απώλεια μπορεί να συμβεί κατά την υπερχείλιση του buffer της Alloc-ID ουράς. Έτσι υποθέτουμε πως οι ουρές έχουν απεριόριστο μέγεθος και χρησιμοποιούμε την καθυστέρηση πακέτων στην ουρά ως μετρική για την απόδοση του συστήματος.

Είναι προφανές πως η καθυστέρηση και η μεταβολή της καθυστέρησης επηρεάζονται από την επιλογή του  $SI_i$ . Ακολουθούμε μια προσέγγιση θέτοντας ένα χαμηλό όριο στη μεταβλητή  $SI_i$  για κάθε Alloc-ID ίσο με  $SI_i + \text{offset}$ . Μεγαλύτερο offset σημαίνει απλά μεγαλύτερη καθυστέρηση και το αντίστοιχο Alloc-ID μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα πιο στενό εύρος τιμών του  $SI_i$ . Οι επιδράσεις αυτές μας δίνουν τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε προς το καλύτερο την απόδοση των διαφόρων τύπων Alloc-ID ξεχωριστά από άλλες παραμέτρους.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του προτεινόμενου μηχανισμού είναι η χρήση των αναφορών για τον δυναμικό ρυθμό εκτίμησης των Alloc-IDs. Σε κάθε ανανέωση του διαστήματος προγραμματισμού, ο ρυθμός εκτίμησης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις παλιές και νέες αναφορές μεγέθους ουράς, καθώς και την παλιά τιμή  $SI_i$ . Μια πιο προχωρημένη λύση είναι η χρήση ακόμη πιο παλιών τιμών με τρόπο εκθετικού μέσου όρου. Στη συνέχεια, ο εκτιμώμενος ρυθμός χρησιμοποιείται για να κάνει μια γραμμική πρόβλεψη του αριθμού των συσσωρευμένων bytes στην ουρά του ONU κατά τη στιγμή που φτάνει η αναφορά για ανάθεση εύρους ζώνης στην πλευρά του ONU. Αυτή η πρόβλεψη χρησιμοποιείται κατά τη φάση της κατανομής, αντί της πραγματικής αναφοράς ουράς του ONU.

Σε κάθε περίπτωση, κατά τη στιγμή της ανανέωσης του ενδιάμεσου χρόνου (time interval), η λογική μονάδα του OLT πρέπει να καθορίσει τις βέλτιστες τιμές του SI εκτελώντας τα ακόλουθα βήματα για κάθε τύπο Alloc-IDI: Ανάμεσα σε όλες τις επιλέξιμες τιμές του SI (που παράγουν τρέχουσα κατάσταση αναφοράς μικρότερη από το  $MSRR_i$  και αρχίζουν με εκείνη που υπαγορεύεται από την παράμετρο offset), επιλέγει αυτήν που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο αδιάθετο χώρο (μεταξύ των τιμών που αντιστοιχούν στον ίδιο χώρο, επιλέγει το χαμηλότερο) με το να ελέγχει τις αντίστοιχες στήλες του πίνακα προγραμματισμού. Έπειτα υπολογίζει τον μέγιστο δυνατό συσσωρευμένο αριθμό των bytes τιμή βασισμένη στην προαναφερθείσα μέθοδο πρόβλεψης λαμβάνοντας υπόψη να μην καταπατήσει την τιμή του εγγυημένου ρυθμού  $GR_i$  ή το μέγεθος πλαισίου ανόδου.

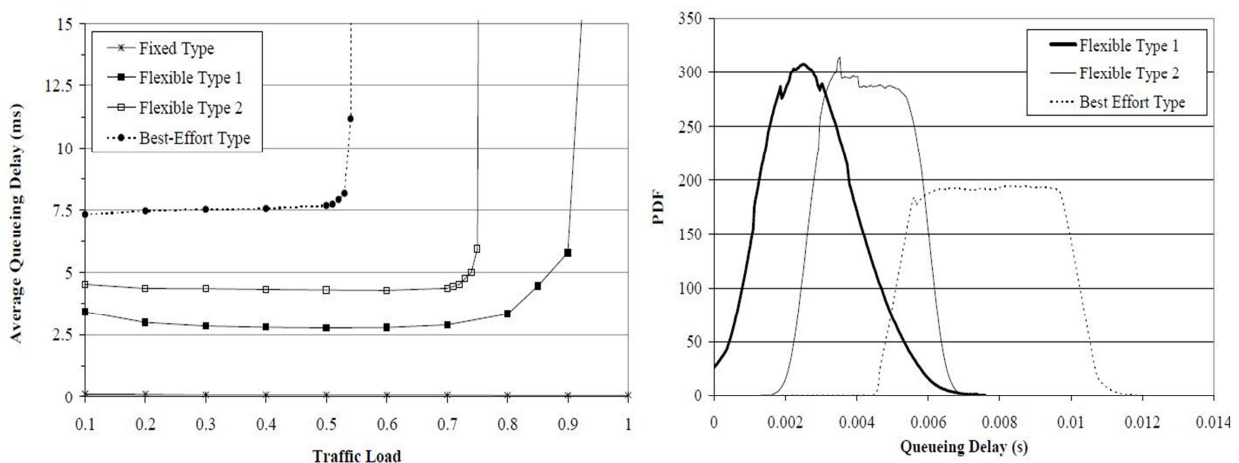
Η σειρά με την οποία εξετάζονται τα Alloc-IDs προκειμένου να ανανεώσουν τα διαστήματα προγραμματισμού επηρεάζει την απόδοσή τους, δεδομένου ότι αυτά που ανανεώνονται πρώτα μπορεί να μπλοκάρουν τα στοχευμένα διαστήματα προγραμματισμού των άλλων. Αυτό το ζήτημα μπορεί να λυθεί με την εφαρμογή μιας απλοϊκής πειθαρχίας προτεραιοτήτων στην εξέταση των διαφόρων Alloc-IDs, ενώ μεταξύ αυτών με την ίδια προτεραιότητα θα μπορούσε να εφαρμοστεί μια κυλιόμενη μέθοδος round robin, ώστε να παρέχεται μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη. Ο προτεινόμενος μηχανισμός θα

διανείμει αναθέσεις σε διαδοχικές σχισμές (slots) επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη αξιοποίηση του συστήματος, το οποίο δεν θα ήταν δυνατόν αν είχε χρησιμοποιηθεί μια άκαμπτη, off-line ανάθεση των διαστημάτων προγραμματισμού.

Μετά την παραπάνω διαδικασία, λαμβάνει χώρα ένας δεύτερος γύρος εξέτασης των ουρών για τα Alloc-IDs όπου ο υπολειπόμενος χώρος στο πλαίσιο ανόδου μπορεί να ανατεθεί στις ουρές με τον ίδιο τρόπο προτεραιότητας, αναθέτοντας επιπλέον εύρος ζώνης στις ουρές με πλεονάζον ρυθμό.

Στο τέλος, το εύρος ζώνης ανατίθεται στα Alloc\_IDs καλύτερης προσπάθειας τα οποία μπορούν να χρησιμοποιήσουν και το μη διατεθειμένο εύρος ζώνης μέχρι τον ρυθμό αιχμής τους, επιλέγοντας τους ενδιαμέσους χρόνους προγραμματισμού με τον τρόπο που περιγράφηκε πιο πάνω.

Το πρώτο γράφημα του σχήματος 8 απεικονίζει τη μέση καθυστέρηση ουράς για τους διαφορετικούς τύπους Alloc-ID σε συνάρτηση με τον συνολικό upstream φόρτο (εκφράζεται σε αναλογία των 10Gbps). Η παράμετρος offset είχε τιμή 0,15 και 30 για τον flexible τύπο 1,2 και της καλύτερης προσπάθειας αντίστοιχα. Τέλος, απεικονίζεται στο δεύτερο γράφημα η συνάρτηση πιθανότητας πυκνότητας (probability density function, PDF) της αναμονής ουράς με 50% μέσου ολικού upstream φόρτου.

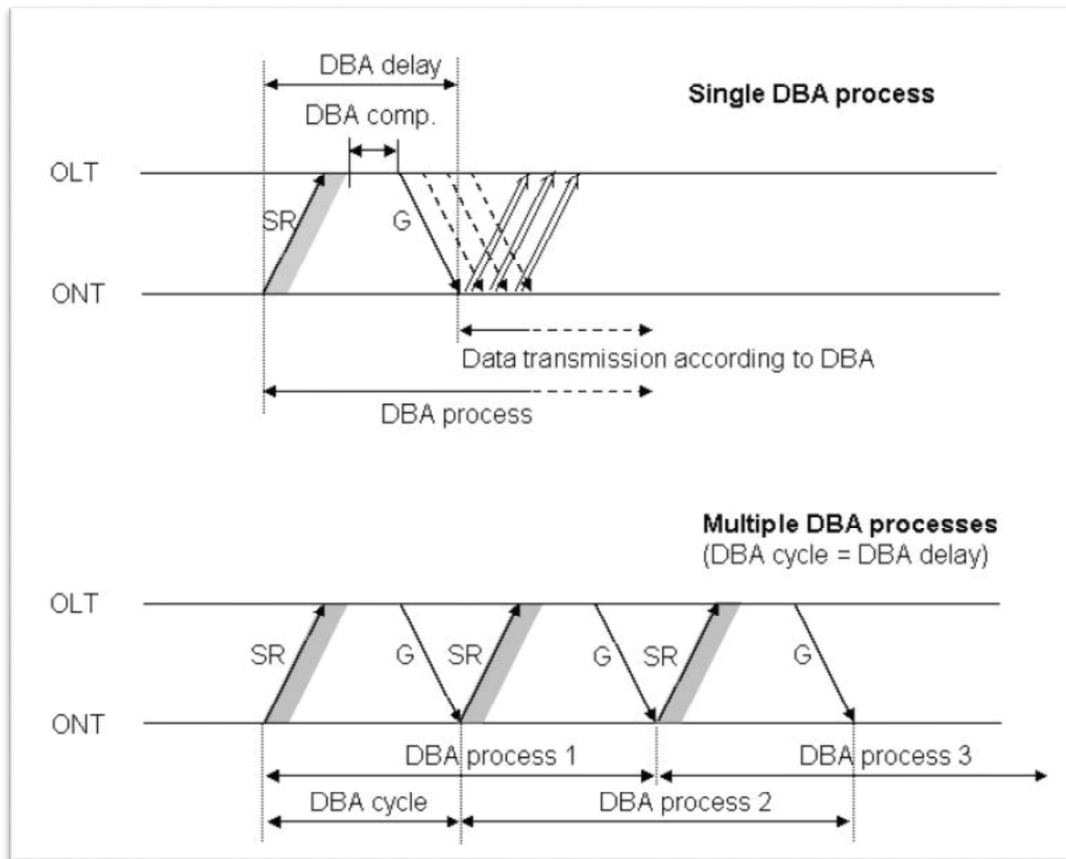


Σχήμα 8 – Αποτελέσματα προσομοίωσης

## **6.9 Εκτίμηση ελάχιστου εγγυημένου περιεχομένου T-Cont - Minimum Guaranteed T-Cont Content Estimation (MGTC)<sup>23</sup>**

Για το EPON η πιο γνωστή οικογένεια των αλγορίθμων βασίζεται στη διαστρωματοποιημένη δημοσκόπηση με προσαρμοστικό χρόνο κύκλου (Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time, IPACT). Στον IPACT οι διαδικασίες DBA παρεμβάλλονται σε σχέση με τις ριπές των ONUs. Αυτό σημαίνει ότι το OLT στέλνει την επιχορήγηση ενός ONU, πριν από την άφιξη μετάδοσης του προηγούμενου ONU. Στο GPON, λόγω του τρόπου ενσωμάτωσης των αναφορών κατάστασης και των μηνυμάτων grant στο πλαίσιο GPON, η διαστρωμάτωση προτιμάται να γίνεται με σεβασμό στα χρονικά διαστήματα (time intervals) ή στα GTC πλαίσια. Αυτό σημαίνει πως εναλλάσσονται μεταξύ τους διαφορετικές διαδικασίες DBA που σχετίζονται με διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Η μέθοδος που έχει επιλεγεί για την εναλλαγή των διαδικασιών DBA αποφασίζει τις κύριες προκλήσεις για την υλοποίηση του αλγόριθμου DBA. Αυτό συμβαίνει καθώς είναι δύσκολο ή αδύνατο για διαφορετικές διεργασίες DBA να υπάρχουν ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με τις άλλες διεργασίες DBA. Οντότητες που εξαρτώνται από τις σχέσεις μεταξύ των διαδικασιών, με βάση την επιλεγμένη μέθοδο της εναλλαγής, είναι επομένως πιο δύσκολο να ελεγχθούν. Στην IPACT η κύρια πρόκληση συνίσταται στην ικανοποίηση των απαιτήσεων της δικαιοσύνης και την εκπλήρωση συγκεκριμένων απαιτήσεων για QoS. Για τον DBA στο GPON ο βασικός στόχος είναι η ακριβή εκτίμηση απαιτήσεων εύρους ζώνης ανάλογα το T-CONT. Στο σχήμα απεικονίζονται πως οι πολλαπλές διαδικασίες DBA συμπλέκονται στο GPON DBA. Ο DBA κύκλος είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών εκτελέσεων του αλγόριθμου DBA.





Σχήμα 9 - Μονή και πολλαπλές λειτουργίες DBA

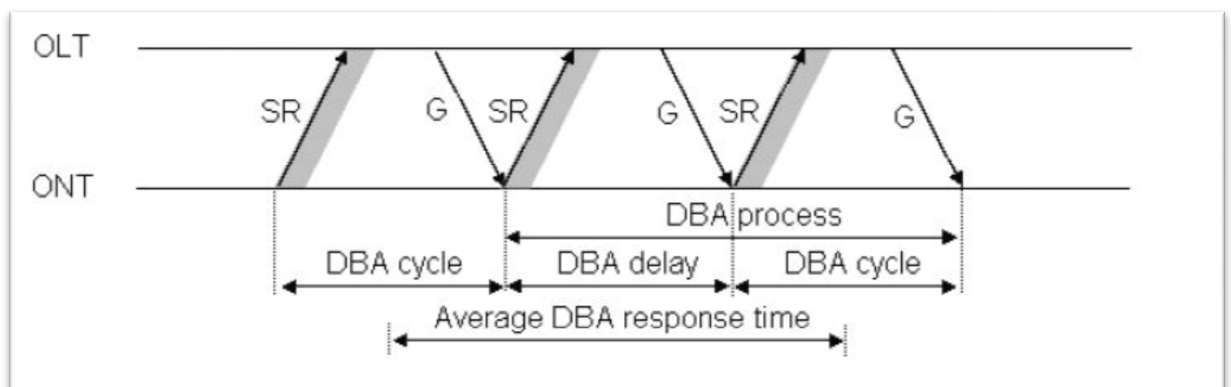
Εξαιτίας αυτής της εναλλαγής, οι πληροφορίες κατάστασης αναφοράς από ένα T-CONT μπορεί να είναι ξεπερασμένες, μόλις η προκύπτουσα από τον αλγόριθμο κατανομή του εύρους ζώνης χρησιμοποιηθεί για την upstream μετάδοση. Δεδομένα έχουν εισέλθει και έχουν εξέλθει της ουράς T-CONT από το χρονικό σημείο που εκδόθηκε η αναφορά κατάστασης. Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται ως ασυνέπεια SR (SR consistency). Η κατάσταση αυτή είναι ακόμη χειρότερη στο Next Generation PON (NG-PON), λόγω των αυξημένων ρυθμών upstream και των αποστάσεων μεταξύ του OLT και των ONUs. Κακή εκτίμηση της ζήτησης εύρους ζώνης οδηγεί σε προβλήματα υπερβολικής έκδοσης grant

(over-granting). Η υπερβολική έκδοση grants με τη σειρά της οδηγεί σε σοβαρά προβλήματα σε κατάσταση υψηλού φόρτου, καθώς η χωρητικότητα χρησιμοποιείται με ένα λιγότερο αποδοτικό τρόπο, όπου η χαμηλής προτεραιότητας κίνηση βιώνει σημαντικά μειωμένο εύρος ζώνης.

Στις συμβατικές DBA υλοποιήσεις, η ασυνέπεια SR με την τρέχουσα κίνηση στα T-CONT buffer συνήθως αγνοείται και ο SR υποτίθεται πως έχει σωστές μετρήσεις για απαιτήσεις εύρους ζώνης σε ένα T-CONT. Το παραπάνω θα θεωρείται ως ένα σχέδιο SR (SR scheme). Η χρήση αυτού του σχήματος SR βασίζεται στην υπόθεση ενός ίσου ρυθμού εισερχομένης και εξερχομένης κίνησης στην buffer ενός T-CONT, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάθεσης DBA. Αυτή η παραδοχή είναι συχνά αδύναμη για πιο ρεαλιστικές και εκρηκτικές καταστάσεις κίνησης. Μη ακριβείς εκτιμήσεις απαιτήσεων εύρους ζώνης ενός T-CONT μπορεί να οδηγήσουν σε περιστασιακές καταστάσεις αυξημένης έκδοσης χορηγήσεων (over-granting) στα T-CONTs. Βάση αυτού έχει προταθεί ένα νέο σχήμα για την εκτίμηση απαίτησης bandwidth χωρίς το πρόβλημα του over-granting και στις περισσότερες των περιπτώσεων με αισθητά καλύτερη απόδοση του δικτύου.

Ένα εναλλακτικό σχήμα εκτίμησης bandwidth επινοήθηκε για να ανταπεξέλθει στο πρόβλημα της SR ασυνέπειας. Το ελάχιστο εγγυώμενο περιεχόμενο T-CONT (minimum guaranteed T-CONT content, MGTC) υπολογίζεται από το SR αφαιρώντας τη γνωστή εξερχόμενη κίνηση, (γνωστή και ως προηγούμενος χορηγημένου bandwidth), ενώ η εισερχόμενη κίνηση προς το T-CONT θεωρείται ότι είναι μηδέν. Ως εκ τούτου, η εκτίμηση της ζήτησης εύρους ζώνης ρυθμίζεται με το αποτέλεσμα της προηγούμενης διαδικασίας εναλλαγής DBA που δεν είχε ακόμη συνέπειες για την απασχόληση του T-CONT buffer. Το MGTC αντιπροσωπεύει την ελάχιστη εγγυημένη απασχόληση T-CONT και παρέχει μια πιο συντηρητική εκτίμηση της ζήτησης εύρους ζώνης, σε σύγκριση με το σύστημα SR, εξαλείφοντας το over-granting για τα T-CONTs. Με την εξάλειψη αυτού, το εύρος ζώνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιο αποτελεσματικά στη μείωση των καθυστερήσεων εξαιτίας της έλλειψης χωρητικότητας (capacity shortage delay, CSD), δηλαδή καθυστερήσεις των πλαισίων Ethernet που

οφείλονται σε προσωρινή υπερφόρτωση του συστήματος PON. Ωστόσο, η χρήση του MGTC συστήματος οδηγεί σε αυξημένη καθυστέρηση του συστήματος DBA (DBA scheme delay, DSD) που αναφέρεται σε ένα προκαθορισμένο DBA και σχετίζεται με καθυστέρηση κάθε πλαισίου Ethernet. Με το MGTC υπάρχει ένας ελάχιστος χρόνος αναμονής στο T-CONT buffer για κάθε πλαίσιο Ethernet που είναι ίσο με έναν κύκλο DBA. Για τις μη κορεσμένες καταστάσεις (κίνηση υψηλής προτεραιότητας, χαμηλό φορτίο PON), ο μέσος χρόνος απόκρισης με το MGTC DBA είναι δύο κύκλοι και ο μέγιστος χρόνος αναμονής είναι τρεις κύκλοι DBA όπως φαίνεται και στο σχήμα 10.

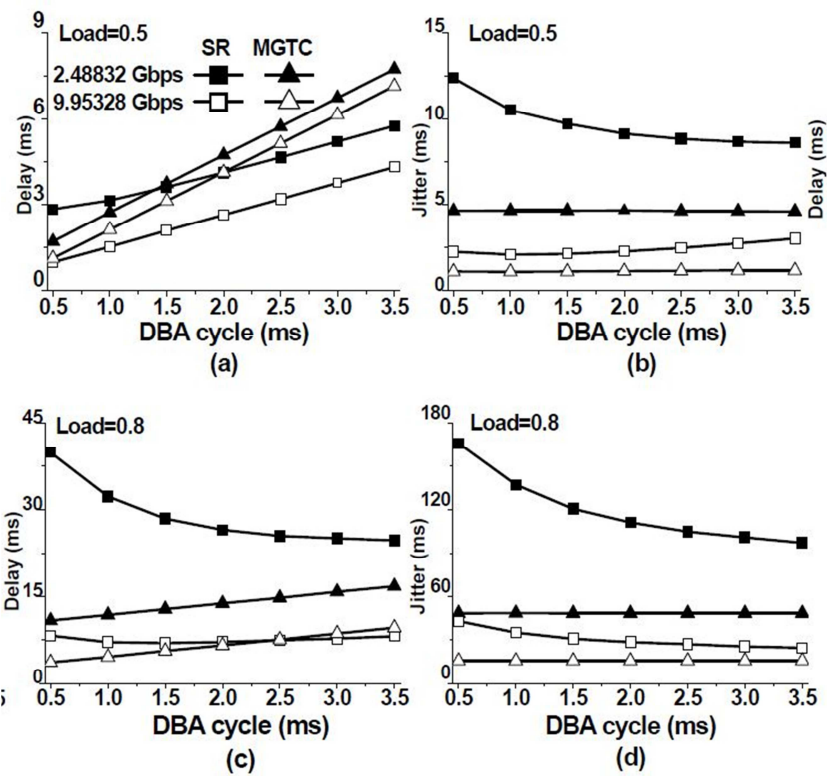


Σχήμα 10 - Μέσος χρόνος απόκρισης με το MGTC σχήμα

Για την αξιολόγηση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι η μέση καθυστέρηση (average delay) και η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter) σε συνάρτηση με τον κύκλο DBA για τα σχήματα SR και MGTC για διαφορετικούς ρυθμούς κίνησης ανόδου και διαφορετικές τιμές φόρτου της ίδιας (self-similar) κίνησης και τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 11. Σε χαμηλό φόρτο (a) η συμπεριφορά της καθυστέρησης κυριαρχείται από το DSP που είναι αναλογικό με τον κύκλο DBA. Και για τα δύο σχήματα υπάρχει διαφορά στη μέση καθυστέρηση για τους διαφορετικούς ρυθμούς κίνησης ανόδου το οποίο μπορεί να αποδοθεί στο CSD. Ακόμα και σε μέτριο φόρτο όπως 0.5 του ολικού, η εκρηκτικότητα προκαλεί αύξηση της μέσης καθυστέρησης σε στιγμές όπου το

PON είναι υπερφορτωμένο σε συνδυασμό με το CSD. Γενικά όμως, το SR σχήμα τα καταφέρνει καλά σε συνθήκες χαμηλού φόρτου, αφού το over-granting είναι ευεργετικό σε χαμηλό φόρτο. Επίσης οι μετρήσεις καθυστέρησης σε συνθήκες χαμηλού φόρτου είναι σχετικές με την καθυστέρηση κίνησης υψηλής προτεραιότητας σε συνθήκες συμφόρησης δικτύου, αφού η υψηλής προτεραιότητας κίνηση είναι ανεπηρέαστη από τη χαμηλής προτεραιότητας κίνηση.

Σε υψηλό φόρτο (c) για το SR σχήμα, η συμπεριφορά της καθυστέρησης κυριαρχείται από το CSD όπου η παρουσία του over-granting οδηγεί σε σοβαρή έλλειψη ικανότητας στο PON. Το μέγεθος του CSD εξαρτάται από την ικανότητα του DBA να χρησιμοποιήσει πλήρως την ικανότητα του PON. Στο SR σχήμα εξ αιτίας των εννοούμενων υποθέσεων κίνησης, το μέγεθος του CSD εξαρτάται από την ομοιότητα της κίνησης στους διαδοχικούς DBA κύκλους. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, δηλαδή μεγαλύτερους κύκλους DBA και μεγαλύτερους ρυθμούς κίνησης, η εκρηκτικότητα της κίνησης μειώνεται και αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μειωμένο CSD (c). Αυτός είναι επίσης και ο λόγος για την αργή αύξηση της μέσης καθυστέρησης στο SR σχήμα σε σύγκριση με το MGTC σε χαμηλό φόρτο (a). Υπάρχει επίσης μια μικρή συνεισφορά από το CSD στο MGTC σχήμα όπως φαίνεται από την αλλαγή μεταξύ αποτελεσμάτων καθυστέρησης σε υψηλούς και χαμηλούς ρυθμούς κίνησης (a,c). Αυτό δεν οφείλεται στο over-granting του εύρους ζώνης, αλλά στις συντηρητικές εκτιμήσεις για απαίτηση εύρους ζώνης στη μετάβαση από προσωρινό χαμηλό σε προσωρινό υψηλό φορτίο που οδηγεί σε μη χρησιμοποιηθείσα παραγωγική ικανότητα κατά τη διάρκεια της μεταβατικής φάσης που δυνητικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να ελαφρύνει τα T-CONTs.

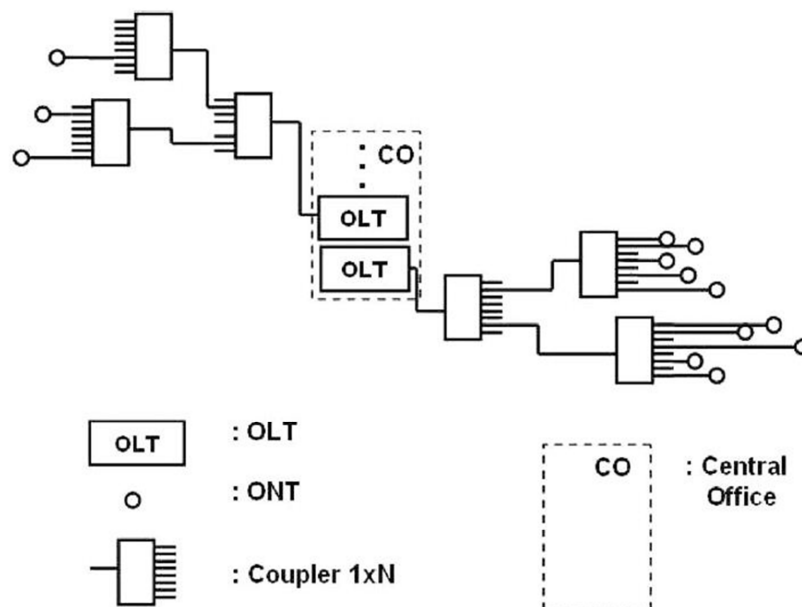


Σχήμα 11 - Μέση καθυστέρηση και jitter για SR και MGTC

Τα αποτελέσματα της διακύμανσης της καθυστέρησης στο b δείχνουν ότι το MGTC μειώνει σημαντικά η διακύμανση της καθυστέρησης. Αυτό γιατί το jitter σχετίζεται με το κυμαινόμενο CSD που κυριαρχεί στο SR απ' ότι το σταθερό DSD που υπάρχει στο MGTC.

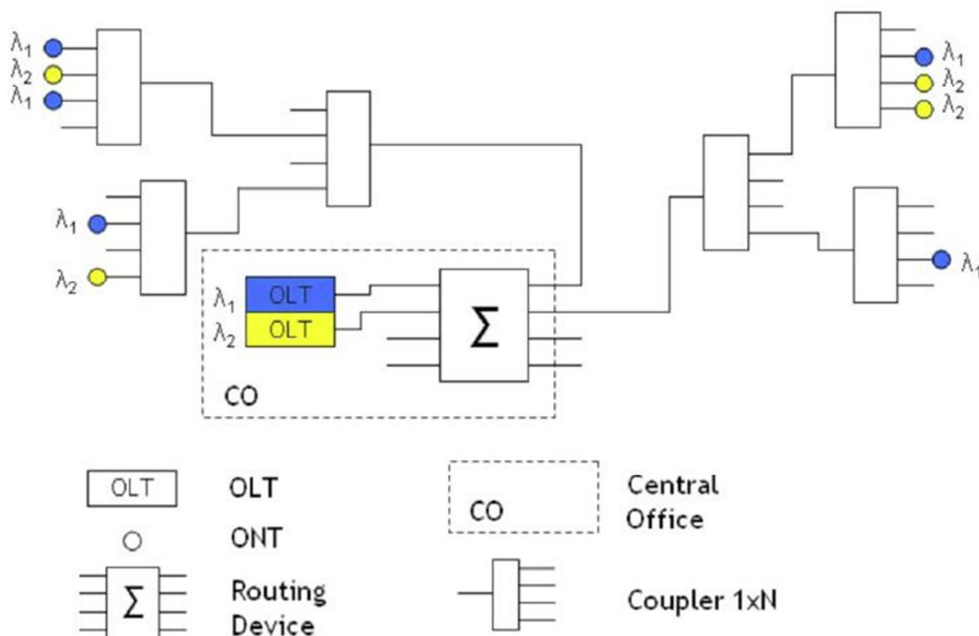
## 6.10 Fair Resource Distribution Within the Flexible WDMA/TDMA<sup>22</sup>

Ως γνωστόν η υποδομή της GPON αρχιτεκτονικής περιλαμβάνει ένα OLT από τη μεριά του παρόχου, και ένα ONU από τη μεριά του χρήστη. Στις κεντρικές εγκαταστάσεις του παρόχου (Central Office, CO) υπάρχει ένας σωρός από OLT κάρτες από όπου εξέρχεται από κάθε μια από αυτές μια ίνα που συνδέεται με έναν συγκεκριμένο αριθμό ONU στις εγκαταστάσεις των χρηστών σε μια ορισμένη περιοχή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αν για τη συγκεκριμένη περιοχή υπάρχουν ελλείψεις σε διαθέσιμο εύρος ζώνης ή επιπλέον αιτήσεις για νέες εγκαταστάσεις ONUs, θα πρέπει να εγκατασταθούν επιπλέον κάρτες OLT ακόμα και αν υπάρχει έξτρα χωρητικότητα πόρων σε διαφορετική περιοχή. Έτσι προτείνεται μια τροποποίηση της υπάρχουσας υποδομής στο φυσικό επίπεδο για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα και ταυτόχρονα να μεγιστοποιηθεί το κέρδος της στατικής πολύπλεξης του εύρους ζώνης μεταξύ των χρηστών. Η τροποποίηση αφορά μόνο τις εγκαταστάσεις του CO.



Σχήμα 12 - υπάρχουσα υποδομή GPON

Στις εγκαταστάσεις του CO προστίθεται μια συσκευή δρομολόγησης ( $\Sigma$ ) στην οποία συγκεντρώνονται οι οπτικές διεπαφές από τα OLT από τη μία πλευρά, και όλες οι οπτικές ίνες που φεύγουν προς τα ONUs από την άλλη πλευρά όπως φαίνεται και στο σχήμα 13. Ο δρομολογητής διανέμει τα οπτικά κανάλια ανάλογα με την πληρότητά τους. Κάθε OLT δέχεται δεδομένα στο συγκεκριμένο μήκος κύματος που του έχει οριστεί με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν παρεμβολές από τα υπόλοιπα κανάλια. Κατά την πλήρη εκπομπή όλα τα τερματικά λαμβάνουν το σήμα από όλα τα OLT, ενώ κατά την περιορισμένη εκπομπή κάθε τερματικό δέχεται το υποσύνολο του μήκους κύματος που προορίζεται μόνο για αυτό. Στον επιπρόσθετο εξοπλισμό του ONU συμπεριλαμβάνεται ένα ρυθμιζόμενο λέιζερ και ένα ρυθμιζόμενο φίλτρο που επιτρέπει στον κάθε χρήστη να στείλει και να λάβει δεδομένα σε κάθε μήκος κύματος σύμφωνα με τον φόρτο του δικτύου. Η όλη διαδικασία διαχειρίζεται από το CO το οποίο γνωρίζει τις απαιτήσεις ολόκληρου του δικτύου και έτσι επιτυγχάνεται η βέλτιστη χρήση δικτύου και σωστή κάλυψη απαιτήσεων QoS.



Σχήμα 13 - Προτεινόμενη αλλαγή σε φυσικό επίπεδο

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για να υλοποιηθεί η προτεινόμενη τροποποίηση ευέλικτου σχήματος (flexible scheme) που αντιπροσωπεύουν τα υπερ και τα κατά ανάμεσα στο κόστος επένδυσης και συντήρησης και στις επιδόσεις του δικτύου. Ο πρώτος είναι εξ' ολοκλήρου παθητικός, ο δεύτερος αφορά στη χρήση ενισχυτών οπτικών ημιαγωγών (Semiconductor optical amplifiers, SOAs) και ο τρίτος περιλαμβάνει τη χρήση ενισχυτών erbium-doped ινών (EDFAs) στις εγκαταστάσεις του CO. Η τοποθέτηση ενισχυτών στο CO τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν ανάμεσα σε όλα τα τερματικά καθώς και η αναλογία τιμής ανά χρήση είναι χαμηλότερη.

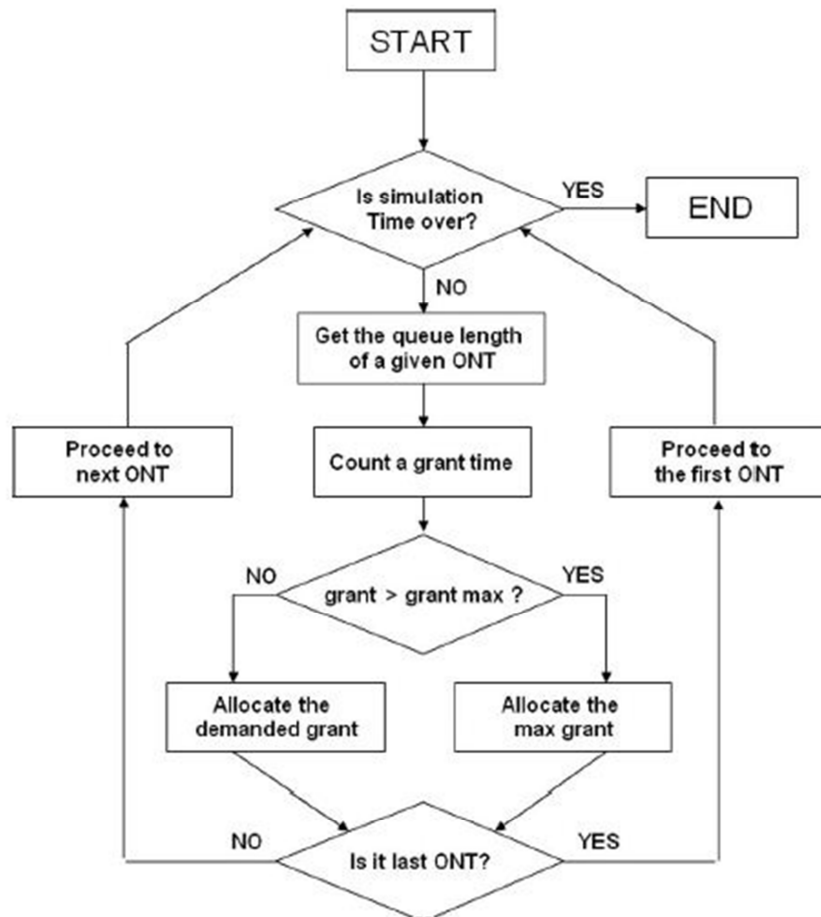
Το φυσικό επίπεδο του προτεινόμενου συστήματος που περιγράφηκε προηγουμένως, αποτελεί μια βάση που επιτρέπει να εφαρμοστεί ένας αποδοτικός αλγόριθμος κατανομής εύρους ζώνης. Η δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (DBA) στο πεδίο του χρόνου είναι ένας απλός και αποδοτικός τρόπος σύνδεσης απαιτήσεων και παροχών μέσα σε ένα μήκος κύματος. Ωστόσο, όταν η συνολική ζήτηση υπερβαίνει τη χωρητικότητα ενός οπτικού διαύλου, γίνεται απαραίτητη η εισαγωγή της δυναμικής κατανομής μήκους κύματος (Dynamic Wavelength Allocation, DWA) για να διατηρηθεί η υψηλή απόδοση του δικτύου με υψηλά επίπεδα QoS στους χρήστες. Ο συμπληρωματικός ρόλος αυτών των δύο μηχανισμών περιγράφεται παρακάτω.

## I. Time Domain

Το διάγραμμα του προτεινόμενου αλγόριθμου για ευέλικτη διανομή εύρους ζώνης στο πεδίο του χρόνου φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Βασίζεται στην αρχή όπου το OLT έχει ενημερωμένες πληροφορίες που αφορούν τις ανάγκες του κάθε ONU και έτσι μπορεί να αποδώσει grants ώστε το ισοζύγιο μεταξύ QoS των χρηστών και γενικότερης απόδοσης δικτύου να είναι το βέλτιστο. Η



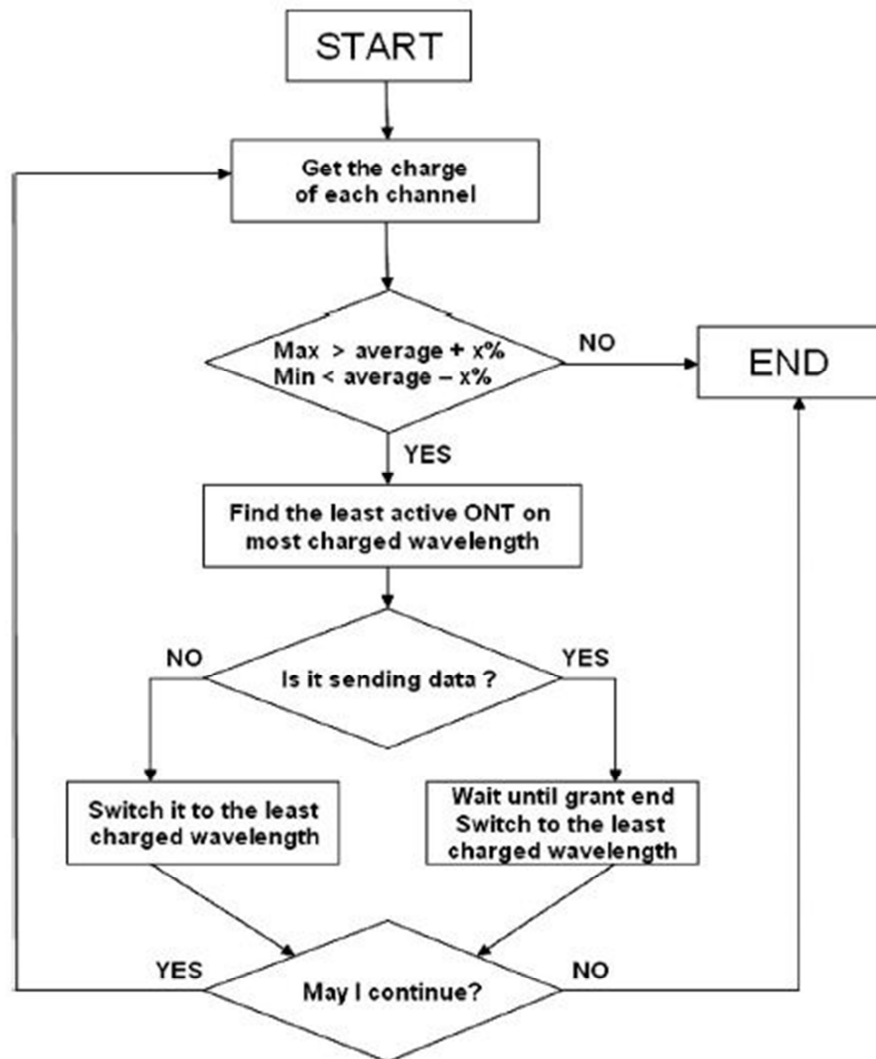
μετάδοση των επιχορηγήσεων σε κάθε πελάτη γίνεται με τρόπο round-robin. Αν η απαίτηση δεν ξεπεράσει το μέγιστο μέγεθος επιχορήγησης, το ONU λαμβάνει το απαραίτητο χρόνο μετάδοσης για να αδειάσει την προσωρινή του μνήμη. Σε διαφορετική περίπτωση λαμβάνει το μέγιστο grant και τα υπόλοιπα πακέτα περιμένουν για αποστολή στον επόμενο grant χρόνο. Αυτή η μέθοδος δίνει ίση πρόσβαση στο μέσο για κάθε χρήστη και εγγυάται πως τη επόμενη επιχορήγηση για ένα συγκεκριμένο ONU θα εκχωρηθεί πριν από μια σταθερή περίοδο χρόνου που την ορίζει ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος.



Σχήμα 14 - διάγραμμα κατανομής bandwidth σε πεδίο του χρόνου

## II. Wavelength Domain

Η ευκαμψία στο πεδίο ορισμού του μήκους κύματος, βασισμένη στην τροποποίηση του φυσικού επιπέδου που αναφέρθηκε, περιλαμβάνει την εναλλαγή των χρηστών από ένα υπερφορτωμένο οπτικό κανάλι σε ένα υποφορτωμένο, έτσι ώστε το συνολικό φορτίο να διανέμεται ομοιόμορφα σε όλους τους φορείς. Αυτή η διευθέτηση δημιουργεί βέλτιστες συνθήκες για την λειτουργία του DBA επειδή ίση κατανομή φορτίων σημαίνει και ίση κατανομή διαθέσιμης χωρητικότητας. Επίσης αυξάνει τον βαθμό απορρόφησης εκρήξεων δεδομένων από τη λειτουργία του DBA σε κάθε κανάλι. Το διάγραμμα του DWA αλγόριθμου που παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 15 εκτελείται περιοδικά και δέχεται σαν δεδομένα εισαγωγής τον συνολικό ρυθμό δεδομένων που φέρεται από κάθε οπτικό κανάλι. Αν η διαφορά μεταξύ του λιγότερου και περισσότερου φορτωμένου καναλιού είναι τόσο σημαντική, ο αλγόριθμος διαλέγει το λιγότερο ενεργό ONU που μεταδίδει και δέχεται δεδομένα σε ένα υπερφορτωμένο μήκος κύματος και το προστάζει να συντονίσει το λέιζερ του στο λιγότερο φορτωμένο κανάλι. Καθώς η όλη διαδικασία υποτίθεται πως είναι σχεδιασμένη, ώστε να έχει τη μικρότερη επίδραση στη λειτουργία του δικτύου, στην περίπτωση που το ONU μεταδίδει ή δέχεται δεδομένα τη στιγμή της αλλαγής, ο επανασυντονισμός καθυστερείται μέχρι να ολοκληρωθεί.

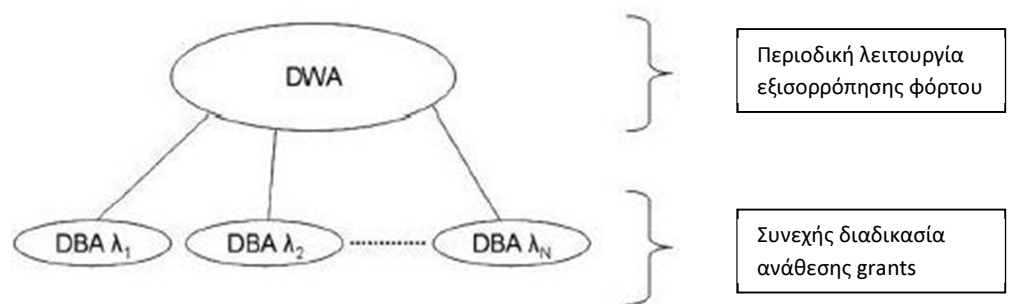


Σχήμα 15 - Διάγραμμα κατανομής bandwidth στο πεδίο του μήκους κύματος

### III. Συνδυασμένη λειτουργία

Αν και το DBA και το DWA βελτιώνουν τη λειτουργία του συστήματος ακόμα και αν εφαρμοστούν ανεξάρτητα, μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη

απόδοση, αν συνδυαστούν. Κατά την προσομοίωση και οι δυο μηχανισμοί ενώθηκαν με τον ακόλουθο τρόπο: κάθε μήκος κύματος είχε τη δική του DBA λειτουργία που απορροφούσε τις στιγμιαίες εκρήξεις κίνησης μέσα σε ένα κανάλι και το DWA επενέβαινε περιοδικά για να εξισορροπήσει τον φόρτο όλων των μηκών κύματος. Το σχήμα 16 δείχνει την αλληλεξάρτηση μεταξύ DBA και DWA.



Σχήμα 16 - Συνδυασμένη λειτουργία αλγορίθμων στο πεδίο χρόνου και μήκους κύματος

Επειδή κανείς δε μπορεί να προβλέψει εκ των προτέρων σε ποιο μήκος κύματος θα συμβούν οι εκρήξεις δεδομένων για να προετοιμαστεί κατάλληλα, θα πρέπει να διατηρείται εξίσου σε κάθε κανάλι η ικανότητα για αποστολή δεδομένων με τη μέθοδο της καλύτερης προσπάθειας. Κατά συνέπεια απαιτείται εξίσωση του μέσου φόρτου σε κάθε μήκος κύματος.

Η εφαρμογή του συνδυασμού των αλγορίθμων κατανομής έχει δύο πλεονεκτήματα. Το DBA μπορεί να αντιδράσει ταχύτατα, όταν συμβεί μια έκρηξη δεδομένων, ώστε η απόδοση του δικτύου και οι απαιτήσεις σε QoS των χρηστών να είναι σε υψηλά επίπεδα. Το DWA έχει να ακολουθήσει τις διακυμάνσεις ροής που είναι πιο αργές από τις εκρήξεις δεδομένων άφιξης, οπότε ο χρόνος επανασυντονισμού των οπτικών εξαρτημάτων δε χρειάζεται να είναι γρήγορος. Αυτό είναι σημαντικό καθώς ο χαμηλός χρόνος συντονισμού του λέιζερ και των φίλτρων έχει ως αποτέλεσμα βέλτιστη απόδοση του δικτύου με χαμηλό κόστος.

Οι προσομοιώσεις που έγιναν δείχνουν ανώτερες επιδόσεις χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη λύση από τη στατική ανάθεση εύρους

ζώνης. Η χρήση ευέλικτων μηχανισμών αλλαγής μήκους κύματος είναι ένας αποδοτικότερος τρόπος για τη μείωση της καθυστέρησης πακέτων και την καλύτερη κάλυψη αναγκών των χρηστών σε QoS. Το σταθερό σύστημα έχει αυξημένες καθυστερήσεις κυρίως λόγω του υπερφορτωμένου καναλιού που υποβαθμίζει σημαντικά τη γενική απόδοση όλου του συστήματος. Επίσης οι χρήστες παρατηρούν διαφορετική καθυστέρηση πακέτων το οποίο απεικονίζεται ως ένας αυξημένη τιμή τυπικής απόκλισης. Η διαφορετική τιμή τυπικής απόκλισης καθυστέρησης στη μετάδοση πακέτων σημαίνει διάφορα επίπεδα QoS προς τους χρήστες το οποίο είναι και το λιγότερο αρεστό στους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους.

Ένας άλλος τρόπος απεικόνισης της βελτίωσης που παρέχει ο συνδυασμός του DBA και DWA είναι αναλύοντας την κατάσταση των ουρών στα buffer των τερματικών. Τα αποτελέσματα που παρατηρούνται στην ανάπτυξη της ουράς και φαίνονται στον πίνακα 3, επιβεβαιώνουν επίσης την τάση της καθυστέρησης που παρατηρήθηκε. Ο μηχανισμός DBA κατανέμει το bandwidth σωστά σε ένα κανάλι όσο οι απαιτήσεις δεν ξεπερνούν τη χωρητικότητα αυτού του καναλιού. Σε διαφορετική περίπτωση τα δεδομένα στοιβάζονται στις ουρές για αποστολή και μεταδίδονται με όλο και υψηλότερη καθυστέρηση.

Καθυστέρηση [ms]	Πρωί		Απόγευμα		Βράδυ	
	DBA+DWA	DBA μόνο	DBA+DWA	DBA μόνο	DBA+DWA	DBA μόνο
Μέση	0.119	0.9079	0,123	1,087	0,1293	0,7957
Μέγιστη	0.732	4,82	1,27	13,04	1,306	9,806
Τυπική Απόκλιση	0.0232	0,671	0,034	1,04	0,0348	0,748

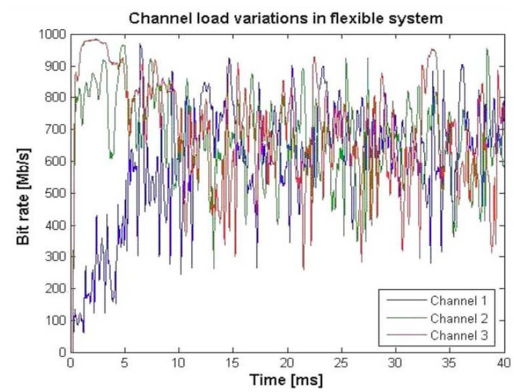
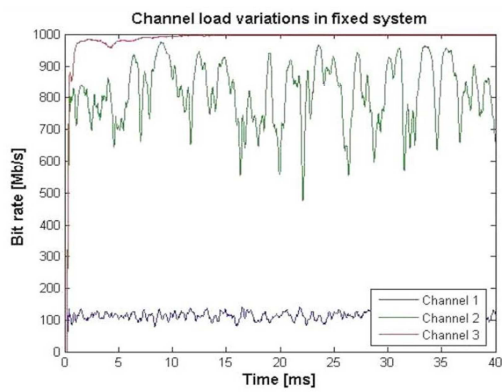
Πίνακας 3 - σύγκριση καθυστέρησης συστήματος για διαφορετικές περιόδους ημέρας

Ουρά [kbits]	Πρωί		Απόγευμα		Βράδυ	
	DBA+DWA	DBA μόνο	DBA+DWA	DBA μόνο	DBA+DWA	DBA μόνο
Μέση	12.99	94.16	16.8	52.08	17.74	64.71
Μέγιστη	986	4892	1462	19998	2186	11548
Τυπική Απόκλιση	29.28	318.33	36.89	460.12	50.06	317.47

Πίνακας 4 - σύγκριση μεγέθους ουράς συστήματος για διαφορετικές περιόδους ημέρας

Για να ολοκληρωθεί η εικόνα της συμπεριφοράς των δύο συγκρινόμενων συστημάτων, θα πρέπει να παρατηρήσουμε και τις διακυμάνσεις στην φόρτο του καναλιού. Φαίνεται πως όταν εφαρμόζεται μόνος του ο αλγόριθμος DBA, λειτουργεί αποδοτικά, όταν ο φόρτος του καναλιού φτάνει στο 60-90% της συνολικής του ικανότητας. Όσο είναι χαμηλός τα πακέτα αποστέλλονται στιγμιαία και στις δύο περιπτώσεις επομένως το κέρδος του συνδυασμού είναι μικρό.

Όταν το κανάλι υπερφορτωθεί, το σύστημα είναι κορεσμένο και όλα τα διανεμημένα grants έχουν το μέγιστο μέγεθος, το οποίο σημαίνει πως κατανέμονται με συνεχή τρόπο και όχι ανάλογα με τις απαιτήσεις. Η εφαρμογή του μηχανισμού DWA επιτρέπει στον φόρο να εξισορροπηθεί μεταξύ όλων των καναλιών επομένως η επιπλέον χωρητικότητα κάθε καναλιού χρησιμοποιείται από τον μηχανισμό DBA για να απορροφήσει τις εκρήξεις μετάδοσης πακέτων, που φαίνονται στο γράφημα ως απότομες ακμές. Αν όλα τα κανάλια είναι απασχολημένα με κίνηση που τα επίπεδά της φτάνουν κοντά στη μέγιστη χωρητικότητά του, απαιτείται επιπλέον βελτίωση του συστήματος προσθέτοντας νέα οπτικά κανάλια στην υπάρχουσα υποδομή.



Σχήμα 17 - Σύγκριση διακύμανσης φόρτου καναλιού για σταθερό και ευέλικτο σύστημα

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII

### Αξιολόγηση Αλγορίθμων DBA

---

#### 7.1 Παράμετροι Αξιολόγησης Αλγόριθμου DBA

Υπάρχουν τρεις σημαντικές παράμετροι για την αξιολόγηση των επιδόσεων DBA<sup>37</sup>:

- Καθυστέρηση (Latency) ή ο χρόνος που περιμένει ένα πακέτο στην ουρά αποστολής του ONU πριν από τη μετάδοση
- Δικαιοσύνη (Fairness) ή την ικανότητα να ευχαριστήσει/δυσανεστήσει εξίσου τη Συμφωνία σε Επίπεδο Υπηρεσιών (SLA) για όλα τα ONUs
- Αξιοποίηση (Utilization) ή το ποσοστό του εύρους ζώνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο κανάλι upstream.

Τα τρία αυτά κριτήρια είναι αλληλένδετα. Όπως περιγράφεται παρακάτω, παρατηρούνται μειωμένα αποτελέσματα αξιοποίησης σε κατάσταση αυξημένης καθυστέρησης, διότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης για να αδειάσει μια ουρά σε ένα ONU μειώνεται, και ως εκ τούτου απαιτείται περισσότερος χρόνος για να αδειάσει. Παρόμοια επίδραση είναι αισθητή και στην παράμετρο της δικαιοσύνης. Χαμηλές επιδόσεις δικαιοσύνης δείχνουν ότι κάποια ONUs θα εξυπηρετούνται πιο αργά από ότι άλλα. Κατά συνέπεια, η καθυστέρηση των αργά-εξυπηρετούμενων ONUs αυξάνεται.

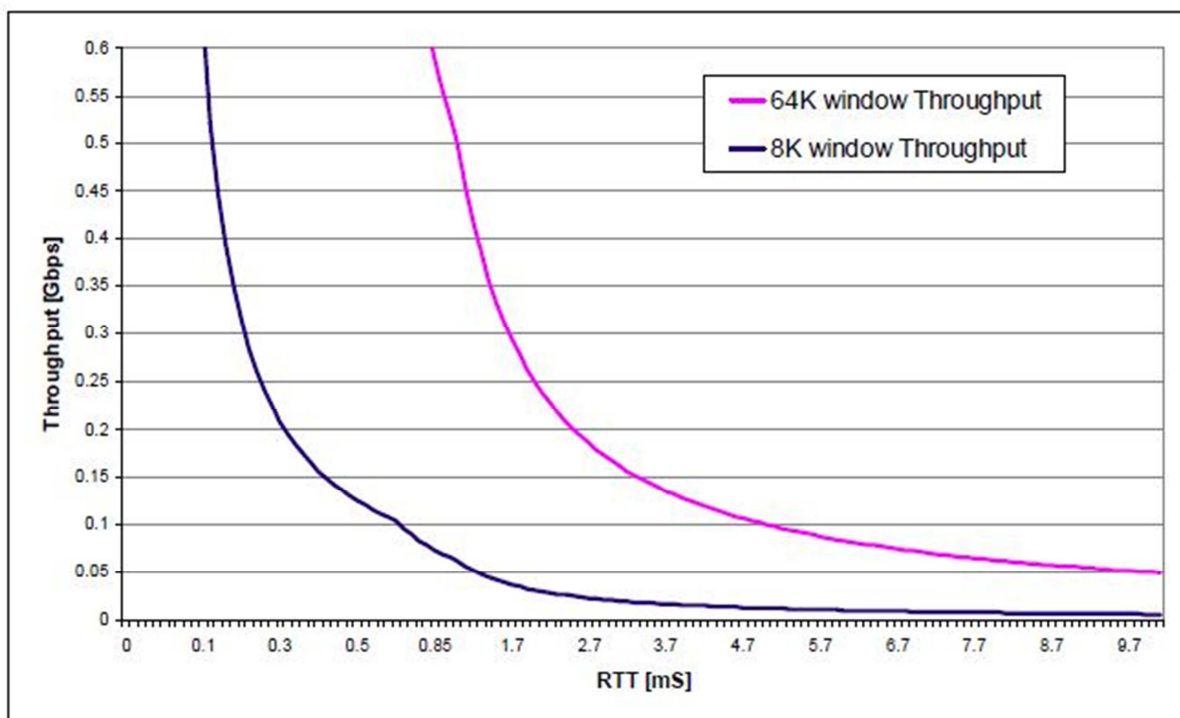
Κατά μία έννοια, η καθυστέρηση είναι η πιο σημαντική παράμετρος και ο καλύτερος δείκτης της ποιότητας του DBA αλγόριθμου. Αξιοποίηση και δικαιοσύνη έχουν βελτιστοποιηθεί, προκειμένου να βελτιωθεί και η καθυστέρηση. Με χαμηλή αξιοποίηση και φτωχή DBA δικαιοσύνη δε σημαίνει ότι δε μπορεί να



επιτευχθεί η χαμηλή καθυστέρηση, ειδικά σε σύνθετες περιπτώσεις δοκιμής. Ωστόσο, αυτό δείχνει έντονα ότι σε σενάρια υπό πραγματικές συνθήκες, όπου η κυκλοφορία τείνει να είναι καταιγιστική, η καθυστέρηση είναι πιθανόν να αυξηθεί για ορισμένα ή όλα από τα ONUs.

- Καθυστέρηση

Ουσιαστικά, η χαμηλή καθυστέρηση είναι απαραίτητη για τη γρήγορη downstream λειτουργία του πρωτοκόλλου TCP. Καθυστερώντας ένα TCP ACK μήνυμα ανόδου θα μπορούσε να περιοριστεί η πραγματική ταχύτητα λήψης. Από την πλευρά του χειριστή, η αύξηση του ρυθμού λήψης αυξάνει άμεσα την ικανοποίηση του πελάτη.



Σχήμα 1 - Επίδραση του RTT στην TCP ρυθμοαπόδοση

Το σχήμα 1 απεικονίζει την επίδραση του Round Trip Time (RTT) για διακίνηση TCP κίνησης. Έχουν χρησιμοποιηθεί δύο παράθυρα για την

απεικόνιση: 64Kbytes και 8Kbytes. Ο RTT περιλαμβάνει το σύνολο του χρόνου που απαιτείται από τον υπολογιστή μέχρι το διακομιστή και πίσω, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου επεξεργασίας σε κάθε άκρο, με το PON δίκτυο είναι ένα μόνο στοιχείο της καθυστέρησης. Σε ένα δίκτυο βελτιστοποιημένο για χαμηλή καθυστέρηση, το PON τμήμα της καθυστέρησης δε θα πρέπει να είναι ο κύριος υπαίτιος. Για παράδειγμα, προκειμένου να επιτευχθεί 100Mbit/s ρυθμοαπόδοση, ο συνολικός χρόνος RTT θα πρέπει να είναι 5ms. Υποθέτοντας πως η καθυστέρηση έξω από το PON τμήμα είναι 3ms, 2ms διατίθενται για την καθυστέρηση PON για την επίτευξη του στόχου. Μια καθυστέρηση του PON 7ms, για παράδειγμα, θα περιορίσει την απόδοση σε 50Mbps, παρά την ικανότητα του δικτύου να παρέχει διπλάσια ρυθμοαπόδοση. Όταν το δίκτυο πρόσβασης είναι υπαίτιο για τη συμφόρηση, ο διαχειριστής θα αναγκαστεί να καταβάλλει τεράστια προσπάθεια για τον περιορισμό της συνολικής καθυστέρησης του δικτύου στα 3ms, προσπάθεια και κόστος που θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αυτή η τεράστια προσπάθεια δε μπορεί να λειτουργήσει σωστά, καθώς η καθυστέρηση στο δίκτυο PON θα κατακλύσει τη συνολική καθυστέρηση του δικτύου.

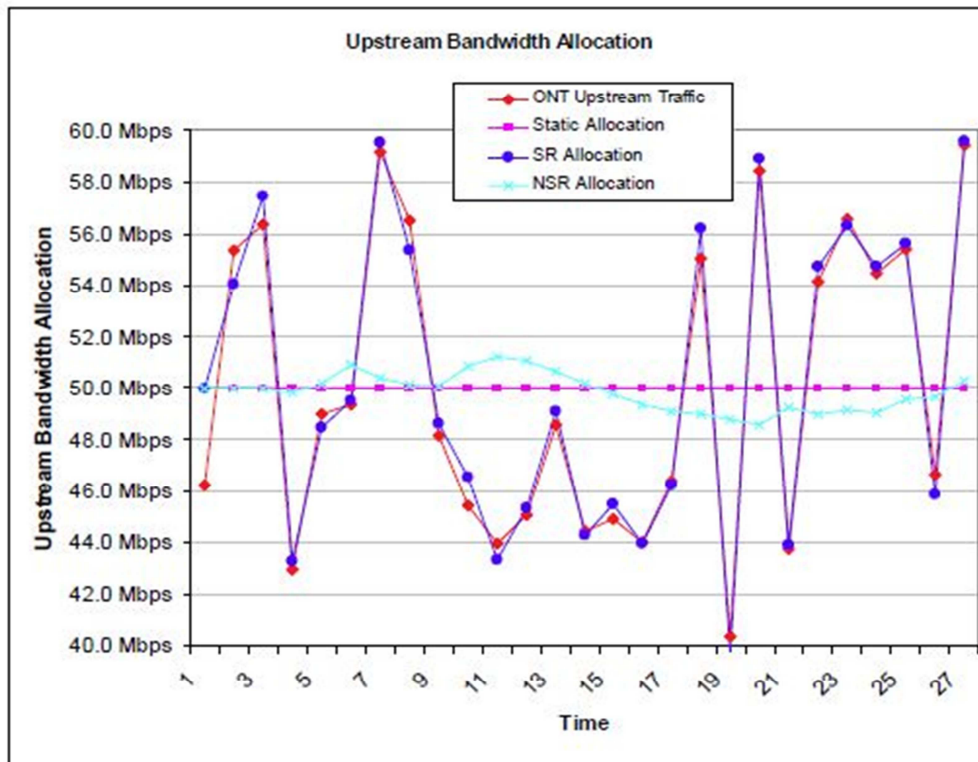
- ο Επίδραση ανάθεσης εύρους ζώνης στην upstream καθυστέρηση

Με τη στροφή προς πιο συμμετρικά δίκτυα, είναι σημαντικό να σχεδιάσουμε σωστά το βάθος της ουράς ανόδου στο ONU. Είναι σημαντικό να βρούμε την ισορροπία μεταξύ επαρκούς ουράς που αποτρέπει την απώλεια πακέτων, αλλά δεν προσθέτει καθυστέρηση που επηρεάζει την απόδοση TCP. Ο αλγόριθμος κατανομής εύρους ζώνης έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και για το απαιτούμενο μέγεθος προσωρινής μνήμης (buffer).

Στην παρακάτω προσομοίωση της upstream κίνησης σε ένα ONU, υποθέτουμε μια σύμβαση μετάδοσης ανόδου (SLA) των 50Mbps. Σε αυτό το παράδειγμα, ο συνδρομητής δημιουργεί κίνηση P2P και εφαρμογές αποστολή βίντεο και εικόνων. Αυτές οι εφαρμογές καταναλώνουν ολόκληρο το εύρος ζώνης

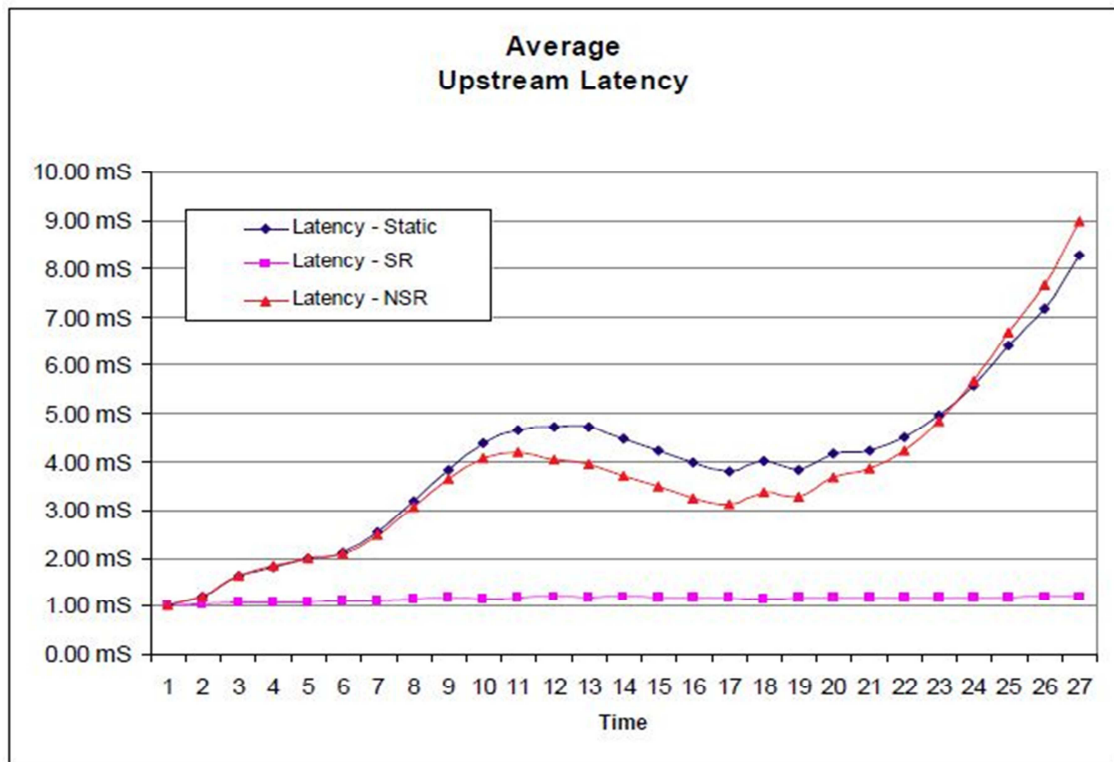
και κατά περιόδους με καταιγιστικό τρόπο , αλλά κατά μέσο όρο 50Mbps. Για τους σκοπούς της προσομοίωσης, η ουρά ανόδου του ONU είναι άπειρη, κατά συνέπεια δε γίνεται καμία απώλεια πακέτων και η καθυστέρηση ανόδου συσσωρεύεται. Προσομοιώνονται τρεις μέθοδοι κατανομής εύρους ζώνης από το OLT: στατική, δυναμική NSR και δυναμική SR. Υποτίθεται πως το δίκτυο είναι κορεσμένο, οπότε δεν υπάρχει πλεονάζον διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Το σχήμα 2 περιγράφει τη συσχέτιση μεταξύ της καταιγιστικής κίνησης ανόδου από το ONU και την κατανομή του εύρους ζώνης. Η εισερχόμενη κίνηση μέσα από τη θύρα UNI στο ONU είναι 50 Mbps. Όταν χρησιμοποιείται στατική κατανομή εύρους ζώνης, το OLT διαθέτει συνεχώς 50Mbps, ανεξαρτήτως της εισερχόμενης κυκλοφορίας και δεν παρακολουθεί τις ανάγκες του ONU. Όταν χρησιμοποιείται αλγόριθμος με βάση το NSR, το OLT είναι σε θέση να ανταποκρίνεται αργά, με ένα αντιστάθμισμα χρόνου στην εισερχόμενη ONU κίνηση, αλλά δεν έχει ορατότητα προς την πληρότητα της ουράς του. Το OLT δε μπορεί να διαθέσει το εύρος ζώνης κατά τρόπο που θα κρατήσει την ουρά στο ONU σχετικά άδεια και με χαμηλή καθυστέρηση. Όπως φαίνεται στο γράφημα, τα πακέτα ανόδου που συσσωρεύονται στην ουρά του ONU μεταδίδονται με αυξημένη καθυστέρηση. Σε όλα τα πραγματικά σενάρια, η ουρά θα είχε υπερχειλίσει. Τα πακέτα θα είχαν απορριφθεί και θα επανεκπέμπονταν χωρίς σαφή διαφορά μεταξύ του NSR DBA και της στατικής κατανομής.

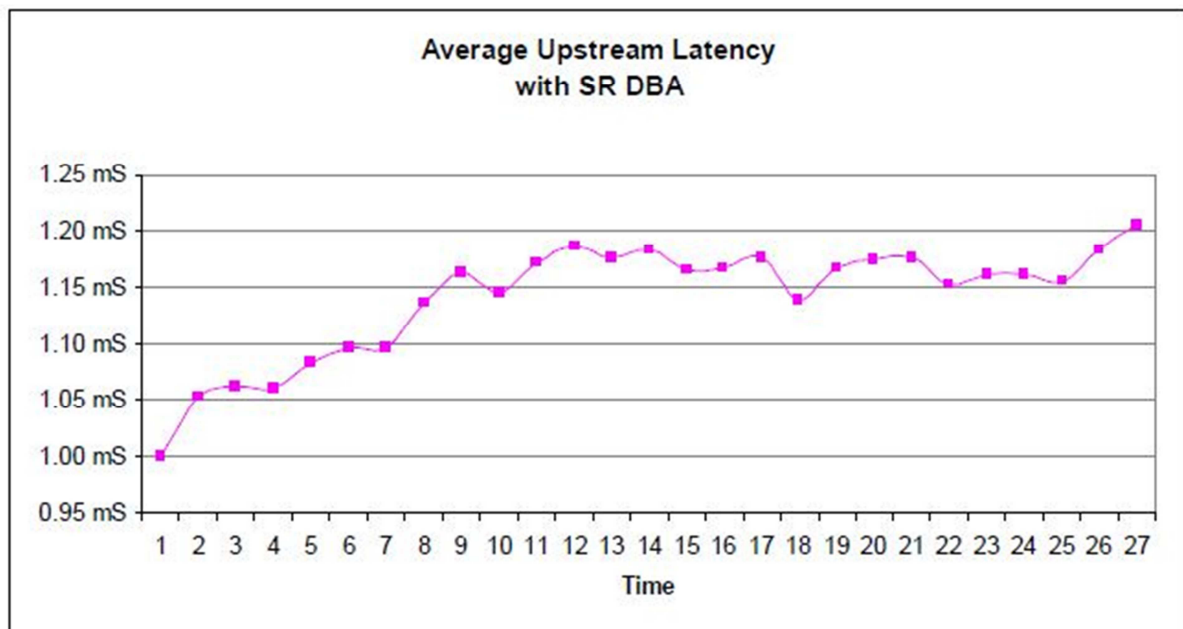


Σχήμα 2 - Κατανομή εύρους ζώνης με διαφορετικούς αλγόριθμους

Κατά την εφαρμογή της κατανομής εύρους ζώνης με αλγόριθμο τύπου SR, το OLT μπορεί να μετρήσει την εισερχόμενη κίνηση από το ONU και να έχει πλήρη ορατότητα στην πληρότητα της ουράς του ONU. Το SR αλγόριθμος παρακολουθεί επιτυχώς τις ανάγκες του ONU και αδειάζει την ουρά στον σωστό χρόνο. Όπως φαίνεται στα δύο παρακάτω σχήματα, η καθυστέρηση ανόδου διατηρείται χαμηλή και σχετικά σταθερή και δεν υπάρχει κίνδυνος υπερχείλισης της ουράς και απώλειας πακέτων.



Σχήμα 3 - Μέση καθυστέρηση με διαφορετικούς αλγόριθμους



Σχήμα 4 - Μέση καθυστέρηση με SR DBA

- ο Δικαιοσύνη (Fairness)

Η δικαιοσύνη είναι μία απαιτηλή παράμετρος. Ένας δίκαιος αλγόριθμος θα μπορούσε να εγγυηθεί ότι οι στερήσεις SLA κατανέμονται ισομερώς σε όλα τα ONUs. Ως ένα παράδειγμα, δύο ONUs με ταυτόσημες εγγυήσεις SLA της τάξης του 60% της προβλεπόμενης, θεωρείται ότι είναι δίκαιη κατανομή, σε σύγκριση με ένα ONU που λαμβάνει το 100% των εγγυήσεων και το άλλο μόνον το 20%.

Η δικαιοσύνη μπορεί να διασφαλιστεί μόνο λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες για την ουρά από κάθε ONU. Όσο λιγότερα ONUs συμπεριληφθούν, τόσο πιο δύσκολη είναι η παροχή δικαιοσύνης. Δεδομένου ότι εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο NSR ή χρησιμοποιώντας στατική κατανομή οι πληροφορίες των ουρών είναι άγνωστες, η δικαιοσύνη δε μπορεί να επιτευχθεί. Από την πλευρά του χειριστή, μεγαλύτερη δικαιοσύνη δείχνει αυστηρότερη τήρηση του SLA, αυξάνοντας την ικανοποίηση των πελατών.

## 7.2 Ασφάλεια

Το OLT εκπέμπει τα δεδομένα για όλα τα ONU στο δίκτυο, οπότε το βασικό σενάριο που θα πρέπει να υλοποιηθεί, ώστε να παρέχεται ασφάλεια στο δίκτυο, θα πρέπει να διασφαλίζει ότι δε θα είναι δυνατό για το κάθε ONU να βλέπει όλα τα δεδομένα τα οποία στέλνονται στην προς τα κάτω ζεύξη. Τα υπόλοιπα σενάρια που βασίζονται στην εν δυνάμει ικανότητα κάθε ONU να βλέπει τα δεδομένα από όλα τα ONU στην προς τα άνω ζεύξη αμελούνται στη μελέτη αυτή με το σκεπτικό ότι κάτι τέτοιο θα απαιτούσε σπατάλη πόρων<sup>37</sup>.

Για την ασφάλεια χρησιμοποιείται το Counter Mode (CTR) του πρωτοκόλλου κρυπτογραφίας Advanced Encryption Standard (AES) το οποίο

περιγράφεται στα δημοσιευμένα έγγραφα από το National Institute of Standards and Technology (NIST).

Συγκεκριμένα τα δεδομένα του payload για τα πλαίσια στην προς τα κάτω ζεύξη τα οποία υφίστανται και την κρυπτογραφία χωρίζονται στο OLT σε ομάδες των 16 byte. Η κάθε ομάδα υφίσταται αποκλειστικό-Η με 16 byte που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου AES, που λειτουργεί με προκαθορισμένου μήκους κλειδί των 128 bit, σε μία ομάδα 16 byte εισόδου. Τα 16 αυτά byte ή 128 bit εισόδου προκύπτουν από τα 46 bit ενός μετρητή αν το κάθε bit επαναληφθεί τρεις φορές (προκύπτουν 138 bit) και αποκοπούν τα 10 σημαντικότερα bit. Ο μετρητής αυτός ο οποίος είναι κοινός για το OLT και το ONU υλοποιείται, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται συγχρονισμός και αποτελείται από δυο επιμέρους ομάδες bit.

- Τα σημαντικότερα 30 bit δείχνουν αύξοντα αριθμό του τμήματος που μεταφέρεται, ανάλογη λειτουργία έχουμε αναφέρει στην περίπτωση του πεδίου Ident για τα super-frames.
- Τα λιγότερο σημαντικά 16 bit τίθενται στο μηδέν όταν αρχίζει η μετάδοση ενός πλαισίου στην προς τα κάτω ζεύξη και η τιμή τους αυξάνεται κατά ένα για κάθε μεταδιδόμενη τετράδα byte.

Η αντίστροφη διαδικασία λαμβάνει χώρα στα ONU, έτσι ώστε να προκύψει το αρχικό μήνυμα. Συγκεκριμένα το λαμβανόμενο κρυπτογραφημένο payload με μήκος 16 byte υφίσταται αποκλειστικό-Η με τα 16 byte της ομάδας εισόδου και προκύπτει το αρχικό μήνυμα, δεδομένου ότι ο μετρητής και κατά συνέπεια τα byte της ομάδας εισόδου είναι κοινά για το ONU και το OLT.

Στα παραπάνω θεωρήσαμε ότι το κλειδί είναι γνωστό και κοινό στο ONU και το OLT. Η γνωστοποίηση του κλειδιού αρχικοποιείται από το OLT και υλοποιείται με μηνύματα PLOAM. Λόγω του μικρού μεγέθους τους το κλειδί στέλνεται σε δυο κομμάτια και το κάθε κομμάτι στέλνεται τρεις φορές, ώστε να εξασφαλιστεί ότι OLT και ONU αναγνωρίζουν το ίδιο κλειδί.

### 7.3 Συμπεράσματα – Εξέλιξη

Οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης για την παροχή νέων υπηρεσιών μεγαλώνουν. Επιπλέον διαφορετικές κατηγορίες χρηστών έχουν μεγάλη ποικιλία αναγκών ανάλογα με το απαιτούμενο εύρος ζώνης και τις επιτρεπόμενες καθυστερήσεις μετάδοσης. Οι πάροχοι πρόσβασης αναγκάζονται να υιοθετήσουν νέους μηχανισμούς για να διανέμουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης στους χρήστες. Τα οπτικά δίκτυα κατάφεραν με αναλογικά μικρότερο κόστος ανάπτυξης και συντήρησης έναντι άλλων λύσεων να παρέχουν τις επιπλέον απαιτήσεις. Συναντώνται σε διάφορες υλοποιήσεις με τελευταία και πιο αποδοτική την τεχνολογία GPON. Εκεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορεί να μοιράζεται με δύο τρόπους, στατικό και δυναμικό.

Κατά τον πρώτο με στατική ανάθεση εύρους ζώνης, κάθε OLT δίνει κυκλικά ένα παράθυρο μετάδοσης σε κάθε συνδεδεμένο ONU για την αποστολή δεδομένων ανεξάρτητα αν έχει ή όχι να στείλει δεδομένα. Στην περίπτωση που αυτό είναι αδρανές, καταλαμβάνεται κενός χώρος στο κανάλι ανόδου εις βάρος άλλων ONU που έχουν περιεχόμενα για αποστολή. Επίσης ο τρόπος αυτός δε λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές κατηγορίες περιεχομένου με διαφορετική προτεραιότητα. Αποτέλεσμα αυτού είναι ένα μη αποδοτικό σύστημα, αφού σπαταλάται ένα πολύ μεγάλο κομμάτι του ρεύματος ανόδου, καθώς το OLT δεν έχει τρόπο να γνωρίζει το μη χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης και δεν παρέχει ποιότητα υπηρεσιών και δικαιοσύνη μεταξύ των συνδρομητών. Κατά συνέπεια αναζητείται ένας διαφορετικός τρόπος καλύτερης αξιοποίησης του συστήματος και αυτό επιτυγχάνεται με τον δυναμικό τρόπο ανάθεσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Η δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης στα παθητικά οπτικά δίκτυα είναι το βασικό εργαλείο για την απόδοση και δίκαιη χρησιμοποίηση ενός καναλιού ανόδου PON ενώ παράλληλα εγγυάται την ικανοποίηση απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσιών (QoS) ανάμεσα στους συνδρομητές για τις διάφορες κατηγορίες περιεχομένου. Αυτό πραγματοποιείται με συνεχείς δημοσκοπήσεις όλων των



συνδεδεμένων ONUs από το OLT για τις ανάγκες σε εύρος ζώνης και για το είδος της υπηρεσίας που πρόκειται να εξυπηρετήσουν. Καθώς όλο και περισσότερες μορφές κίνησης απαιτούν εκρηκτικές μεταδόσεις δεδομένων, η χρήση δυναμικών τρόπων ανάθεσης εύρους ζώνης κρίνεται απαραίτητη.

Έτσι έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι που διανέμουν το εύρος ζώνης δυναμικά σε όλους τους χρήστες πληρώνοντας τις απαιτήσεις του συστήματος και ταυτόχρονα επιτρέπουν την εξυπηρέτηση πολλών περισσοτέρων χρηστών σε σχέση με τις ονομαστικές ικανότητες του συστήματος (oversubscription). Αυτό πραγματοποιείται, είτε σε λογικό επίπεδο είτε σε φυσικό επίπεδο, χρησιμοποιώντας ρυθμιζόμενες συσκευές, δρομολογητές και φίλτρα.

Οι ανωτέρω εντάσσονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το αν ενημερώνουν τις συσκευές στις κεντρικές εγκαταστάσεις του παρόχου για το μέγεθος και την προτεραιότητα των περιεχομένων της ουράς για αποστολή. Οι αλγόριθμοι που αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια ως επί το πλείστον ανήκουν στην κατηγορία των Status Reporting (SR) καθώς το OLT γνωρίζει για τη φύση των προς αποστολή δεδομένων και αναθέτει ανάλογα το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Γενικότερα όλοι οι αλγόριθμοι έχουν βασικό στόχο τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση και τη διακύμανση της καθυστέρησης (jitter). Ίσως είναι και τα πρώτα προβλήματα που γίνονται άμεσα αντιληπτά στις διάφορες υπηρεσίες που απαιτούνται από τους χρήστες. Όπως φαίνεται και συνολικά στον παρακάτω πίνακα, βλέπουμε πως όλοι οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, βελτιώνουν το σύστημα στον τομέα της καθυστέρησης. Ο Flow Aware το επιτυγχάνει αυτό μέχρι ο φόρτος του συστήματος να φτάσει κοντά στο όριο χωρητικότητας του καναλιού ενώ ο DBA traffic-based δείχνει χαμηλές τιμές καθυστέρησης για τα υψηλής προτεραιότητας δεδομένα που είναι και το ζητούμενο. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο MAC για πολλαπλές υπηρεσίες βελτιώνει το σύστημα όσον αφορά τις καθυστερήσεις ενώ ο αλγόριθμος Fair Resource Distribution παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές για όλο το εύρος του φόρτου.

Στο κριτήριο της ρυθμοαπόδοσης (throughput) ο Offset-based Scheduling αλγόριθμος παρουσιάζει αυξημένες τιμές για μεσαίο και υψηλό φόρτο ενώ ο MDBA λύνει το πρόβλημα του χαμηλού φόρτου στη συνολική απόδοση του δικτύου. Μια αύξηση στη ρυθμοαπόδοση αναφορικά της τάξης του 22% έχουμε για το MAC protocol πολλαπλών υπηρεσιών, ενώ οι επιδόσεις του Flow Aware εξαρτώνται από το μέγεθος των στοιχείων που εξυπηρετεί. Η υλοποίηση του traffic-based DBA καταφέρνει και κρατάει χαμηλά τις κεφαλίδες των πλαισίων που διακινεί με αποτέλεσμα το μικρό overhead και την αυξημένη απόδοση του συστήματος.

Στον τομέα της δικαιοσύνης (fairness) διακρίνεται ο συνδυασμός των αλγορίθμων DWFQ και MDBA με τον πρώτο να παρέχει δικαιοσύνη για κάθε κατηγορία περιεχομένου (T-Cont) και τον δεύτερο συνολικά για το σύστημα.

Όσον αφορά τη διακύμανση της καθυστέρησης ο Fair Resource Distribution παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλές τιμές jitter καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης όπως και ο MGTC που δείχνει χαμηλές τιμές σε αυξημένο φόρτο.

Όλοι οι αλγόριθμοι σχεδιάστηκαν με σκοπό την παροχή ποιότητας υπηρεσιών από τους πάροχους προς τους χρήστες και το καταφέρνουν στο σύνολό τους. Το QoS είναι κρίσιμης σημασίας μετά την απόδοση και ταχύτητα του δικτύου καθώς διακινούνται δεδομένα πολλαπλών υπηρεσιών και προτεραιοτήτων. Οι ανάγκες καλύπτονται με βάση τη συμφωνία μεταξύ παρόχων και συνδρομητών (SLA).

Κατά την ανάπτυξη ενός συστήματος πρέπει ο δημιουργός να λάβει υπόψη πολλούς και καθοριστικούς παράγοντες αναγκών καθώς και τους στόχους του συστήματος. Να καλύψει όσο περισσότερες απαιτήσεις είναι δυνατόν και σίγουρα με το μικρότερο κόστος αναλογικά του συστήματος και των χρηστών που θα εξυπηρετήσει. Οι δεδομένες συνθήκες είναι κρίσιμης σημασίας όσο και η μελλοντική ανάπτυξη και συντήρηση του συστήματος. Δεν είναι λίγες οι φορές που νέες τεχνολογίες δε μπορούν να εφαρμοστούν λόγω ασύμφορου κόστους ή δε γίνεται να εγκαταλειφθούν οι υπάρχουσες. Σε μια τέτοια περίπτωση θα πρέπει να συνυπάρχουν στις ίδιες εγκαταστάσεις και γι' αυτό χρειάζεται λεπτομερής μελέτη κατά την υλοποίηση και εγκατάσταση. Επιπροσθέτως, οι

απαιτήσεις σε εύρος ζώνης συνεχώς αυξάνονται όπως δείχνουν τα μέχρι τώρα δεδομένα. Αυτό οφείλεται στην τεράστια άνοδο του αριθμού των χρηστών και την αύξηση των παρεχόμενων υπηρεσιών. Δεν είναι απίθανο ένα σύστημα να κριθεί ανεπαρκές λίγα χρόνια μετά την αρχική του λειτουργία. Έτσι σημαντικό για κάθε αλγόριθμο είναι η μελλοντική του επεκτασιμότητα.

Με βάση αυτό το κριτήριο και τις επιδόσεις του στα προηγούμενα, προτείνεται από τον γράφοντα ο αλγόριθμος Fair Resource Distribution within Flexible Interval ως ένας από τους πιο αποδοτικούς για να λύσει τα προβλήματα για τα οποία αναπτύχθηκε και προτάθηκε από τους δημιουργούς του. Ο συνδυασμός του DBA για κάθε κανάλι και η δυναμική πολύπλεξη μήκους κύματος συνολικά για το σύστημα τον διακρίνουν μεταξύ των άλλων. Οι επιδόσεις του στην καθυστέρηση και στη διακύμανση της καθυστέρησης και στη συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος είναι εντυπωσιακές για κάθε περίοδο της ημέρας και σε όλο το μήκος τιμών του φόρτου που δοκιμάστηκε. Παρέχει δικαιοσύνη σε κάθε ONU που συμμετέχει όπως και σταθερή ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταχύτατη λειτουργία του DBA για κάθε κανάλι καθώς απορροφάται η εκρηκτικότητα στη μετάδοση των δεδομένων. Όλο το παραπάνω κέρδος στις επιδόσεις αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο φόρτος του συστήματος. Για την υλοποίηση του απαιτείται μια συσκευή δρομολόγησης στις κεντρικές εγκαταστάσεις του παρόχου για κάθε πεπερασμένο αριθμό καρτών OLT και ένα ρυθμιζόμενο λέιζερ μαζί με ένα φίλτρο στη μεριά του χρήστη. Αυτές αναλαμβάνουν να μεταγάγουν την επικοινωνία ενός ONU που βρίσκεται σε κάποιο υπερφορτωμένο κανάλι σε κάποιο άλλο με λιγότερο φόρτο χωρίς να παραβιάζει το SLA κρατώντας το υποσχόμενο εύρος ζώνης σταθερό και τη συνολική απόδοση αρκετά υψηλά. Το κόστος της επένδυσης των επιπλέον συσκευών κρίνεται αρκετά μικρό αναλογικά με τους χρήστες από την ανάπτυξη και εγκατάσταση πρόσθετων αλγορίθμων για να επιτευχθούν οι ίδιες ή παρόμοιες επιδόσεις. Τέλος, ο σχεδιασμός του επιτρέπει την εύκολη και με σχετικά μικρό κόστος μελλοντική ανάπτυξη του συστήματος, αφού κάθε νέος συνδρομητής το επιβαρύνει ελάχιστα χωρίς να χρειάζεται εκ νέου σχεδιασμός της διάταξης των OLT στις κεντρικές εγκαταστάσεις (CO).



Εξοπλισμός που απαιτείται	Καθυστέρηση	Ρυθμοαπόδοση	Απώλεια πακέτων	Fairness	Jitter	QoS	Επεκτασιμότητα και Περιορισμοί
---------------------------	-------------	--------------	-----------------	----------	--------	-----	--------------------------------

<b>Flow Aware Mac Protocol</b>	Χρησιμοποιούνται επιλεκτικοί συνδέτες (OXCs) – οι πηγές εξοπλίζονται με fast-tunable πομπούς	Χαμηλή καθυστέρηση μέχρι το όριο χωρητικότητας	Εξαρτάται από το μέγεθος των στοιχείων που εξυπηρετεί				Είναι εφικτός μέχρι το 90% του φόρτου – απαιτείται μορφή ελέγχου υπερφόρτωσης	
<b>DWFQ - MDBA</b>		Επιτυγχάνεται μειωμένη πολυπλοκότητα στο OLT	Ο MDBA λύνει το πρόβλημα του χαμηλού φόρου		Ο DWFQ εγγυάται δικαιοσύνη σε κάθε T-Cont ενώ ο MDBA συνολικά για το Σύστημα	Ο συνδυασμός των 2 εγγυάται QoS από άκρο σε άκρο		
<b>DBA Multiservice Traffic – based</b>		Καλή συμπεριφορά των ουρών για όλα τα T-Conts - Χαμηλή για υψηλής προτεραιότητας δεδομένα	Επιτυγχάνεται μικρό overhead => μεγάλη ρυθμοαπόδοση	Η upstream μετάδοση είναι ελεύθερη από συγκρούσεις	Ανάλογα το T-Cont με βάση το SLA	Ανάλογα το T-Cont με βάση το SLA		
<b>Mac protocol για πολλαπλές Υπηρεσίες</b>		Σχετικά μικρές καθυστερήσεις	Αύξηση 22% της ρυθμοαπόδοσης		Εγγυάται Δικαιοσύνη για το Σύστημα	Χαμηλότερο Jitter	Υποστήριξη για διαφορετικές απαιτήσεις QoS	Ενισχυμένη επεκτασιμότητα συστήματος
<b>Offset-Based Scheduling – Flexible Intervals</b>		Χαμηλή καθυστέρηση πακέτων	Αυξημένη μετά την μέση τιμή συνολικού φόρτου Συστήματος	Ελαφρώς μικρότερος αριθμός απωλειών				
<b>MGTC</b>		Μειωμένη καθυστέρηση σε μεσαίο και αυξημένο φόρτο				Μειωμένο Jitter σε μεσαίο και αυξημένο φόρτο		
<b>Fair Resource Distribution</b>	Προστίθεται μια συσκευή δρομολόγησης στο CO – απαιτείται ρυθμιζόμενο laser και φίλτρο σε κάθε ONU	Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση	Τεράστιο κέρδος όταν αυξάνεται ο φόρτος του Συστήματος		Συνολική δικαιοσύνη για όλα τα ONUs	Εξαιρετικά χαμηλό Jitter	Προσφέρει σταθερό QoS για όλους τους χρήστες	Υποστηρίζεται η επεκτασιμότητα με χαμηλό αναλογικά κόστος ανά χρήστη

Πίνακας 1 - Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων αλγορίθμων

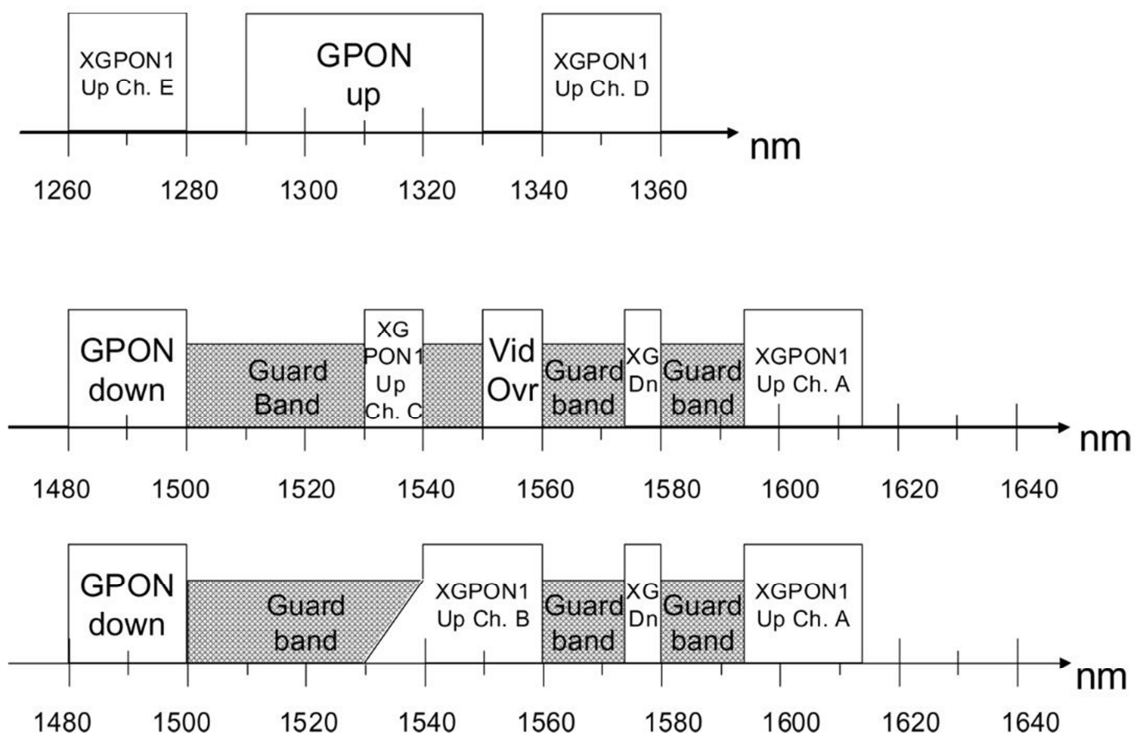
Οι υπάρχουσες υλοποιήσεις καλύπτουν επαρκώς τις τρέχουσες ανάγκες αλλά όπως είναι γνωστό αυτές αυξάνονται με ραγδαίους ρυθμούς. Νέες υπηρεσίες θα κάνουν την εμφάνισή τους και ολοένα και περισσότεροι χρήστες θα εντάσσονται στον παγκόσμιο ιστό. Οι αλγόριθμοι θα εξελίσσονται συνεχώς όπως θα παρουσιάζονται και καινούριοι πιο αποδοτικοί, αλλά όλα αυτά μέχρι ένα όριο. Η δεδομένη χωρητικότητα ενός καναλιού δεν αλλάζει παρά μόνο ο τρόπος αξιοποίησής της. Όταν όλα αυτά φτάσουν στα όριά τους και η αποδοτικότητα δεν αυξάνει άλλο, θα πρέπει να μεταβούμε σε ένα νέο σύστημα με πολλαπλάσια χωρητικότητα και ίσως διαφορετική τεχνολογία. Τα δίκτυα GPON έχουν όριο downstream τα 2.5Gbps και upstream τα 1.2Gbps μέχρι 2.4Gbps σε κάποιες υλοποιήσεις όπως φαίνεται και στον πίνακα.

	Down Mbps	Up Mbps	Body	Year
APON	155 622	155 155	ITU-T (FSAN)	1990
BPON	155 622	155 622	ITU-T G.983.x (FSAN)	1996
EPON	10-1000	10-1000	IEEE 802.3ah	2004
GPON	1.244 2.488	155 622 1.244 2.488	ITU-T G.984.x (FSAN)	2004
NG EPON	10 Gb/s	10 Gb/s 1 Gb/s	IEEE	Finish 2010
NG GPON	10 Gb/s	10 Gb/s 2.5 Gb/s	ITU-T (FSAN)	Finish 2011

Πίνακας 2- πίνακας σύγκρισης τεχνολογιών

Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί, για αρχή πειραματικά από το 2010 και 2011, ήδη προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη τόσο σε ταχύτητα όσο και σε απόσταση εξυπηρέτησης χρηστών. Οι προτάσεις είναι το 10G PON (ή XG-PON, ή New Generation PON, NG-PON) που καλύπτει ταχύτητες downstream μέχρι 10Gbps και upstream 2,5Gbps και σε μερικές περιπτώσεις 10Gbps, και έχει πιστοποιηθεί από την IEEE το '10 και από την ITU (FSAN) το '11, το οποίο είναι αποτέλεσμα τρίχρονης εξέλιξης. Το νέο σύστημα θα πρέπει να μπορεί να

συνυπάρχει με το υπάρχον GPON. Γι αυτό απαιτείται ένα φίλτρο από την πλευρά του ONU για το συγκεκριμένο φάσμα που εξυπηρετεί το 10G PON όπως περιγράφεται στη σύσταση ITU-T G.984.5. Επίσης μια συσκευή WDM χρειάζεται να εγκατασταθεί στις κεντρικές εγκαταστάσεις που θα συμπλέκει το σήμα από το υπάρχον GPON και το νέο XG-PON<sup>28,32</sup>.



Σχήμα 5- Σχεδιασμός διανομής μήκους κύματος

Ένας άλλος παράγοντας, που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι το θέμα της ασφάλειας δεδομένων<sup>54</sup>. Στο GPON στο μοντέλο ασφάλειας έπαιρνε ως δεδομένο πως το κανάλι ανόδου ήταν φυσικά ασφαλές και αυτό δεν χρειαζόταν δυνατά συστήματα ασφαλείας, παρόλο που ενδυναμώθηκαν στη συνέχεια. Στο XG-PON το σύστημα απαιτείται να υποστηρίζει την αμοιβαία αυθεντικοποίηση από το OLT και το ONU και να αυθεντικοποιεί την ακεραιότητα των μηνυμάτων διαχείρισης όπως και τα κλειδιά κρυπτογράφησης. Αυτές οι ενισχύσεις κάνουν δύσκολη τη μεταμφίεση ενός εισβολέα ως ένα ONU ή ένα OLT ακόμα και αν έχει πρόσβαση στις οπτικές ίνες ή παρεμβάλλεται στις μεταδόσεις του επιτιθέμενου ONU.

Και τέλος, μια νέα λειτουργία είναι η υποστήριξη ελαχιστοποίησης της ενέργειας που καταναλώνεται. Ο κύριος στόχος της εξοικονόμησης ενέργειας επιτυγχάνεται με τον τερματισμό των διεπαφών που δε χρησιμοποιούνται. Αυτό είναι αποτελεσματικό, αν συνδυαστεί και με τον ταυτόχρονο τερματισμό και του πομπού, όταν δεν υπάρχουν δεδομένα για αποστολή.

Ως μια ακόμα βελτίωση που θα μπορούσε να μελετηθεί για την επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων upstream θα ήταν η χρήση non-NRZ κωδικοποίησης που θα μπορούσε να επιφέρει αύξηση έως και 5Gbps στο υπάρχον XG-PON χωρίς μεγάλο επιπλέον κόστος και θα μπορούσε να συνυπάρχει εξίσου με το τρέχον GPON. Με τον έναν ή με τον άλλο τρόπο, το XG-PON υπόσχεται ότι είναι η σίγουρη λύση για τα μελλοντικά συστήματα ITU PONs.



---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

1. Wikipedia ([http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page))
2. *Passive Optical Networks* (Sami Lallukka & Pertti Raatikainen), VTT Publications 597, ESPOO 2009
3. *IEEE 802.3ah Ethernet in the First Mile Task Force*
4. (<http://grouper.ieee.org/groups/802/3/efm/public/sep01/>)
5. Knowledge Base Amit N. Bhagat (<http://sites.google.com/site/amitsciscozone/>)
6. *A Framework for Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms in TDM Ethernet Passive Optical Networks* (IEEE Transactions)
7. [http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Optical\\_fiber#History](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Optical_fiber#History)
8. *Οπτικές Ίνες*, (Αλέξανδρος Αλέξανδρής), Εκδόσεις "ΙΩΝ"
9. *Optical Networks, A practical perspective*, (Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan), Morgan Kaufmann Publisers
10. *Συστήματα Επικοινωνιών με Οπτικές Ίνες*, (Govind P. Agrawal), Εκδόσεις Τζιόλα
11. *Fiber Optic Connector Reference* [http://www.ertyu.org/steven\\_nikkel/fiberconnect.html](http://www.ertyu.org/steven_nikkel/fiberconnect.html)

12. *A Flow-aware MAC Protocol for a Passive Optical Metropolitan Area Network (Philippe Robert, James Roberts, INRIA, France, {philippe.robert,james.roberts} @inria.fr, 2011)*
  
13. *AN END-TO-END QOS SCHEME FOR GPON ACCESS NETWORKS (Hamada Alshaer and Mohamed Alyafei, Etisalat BT Innovation Center (EBTIC), Khalifa University, hamada.alshaer@kustar.ac.ae and [malyafi@etisalat.ae](mailto:malyafi@etisalat.ae), Abu Dhabi, 2011)*
  
14. *A Bandwidth Allocation Algorithm for Reducing the Average Delay in GPON, (Liu Yang, Zhang Guoping, Li Qing, College of physics science and technology, Huazhong Normal University, Wuhan, Hubei, China, [liuyang\\_mk@126.com](mailto:liuyang_mk@126.com) )*
  
15. *Analysis of upstream link bandwidth utilization in GPON with integrated network surveillance, (Hakjeon Bang, Madhan Thollabandi, Sungchang Kim, Dong-Soo Lee, Chang-Soo Park, 2010)*
  
16. *Dynamic Bandwidth Allocation Method for High Link Utilization to Support NSR ONUs in GPON, (Hakjeon Bang\*, Sungchang Kim\*\*, Dong-Soo Lee\*\*, Chang-Soo Park\* Department of Information and Communications, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Oryong-Dong, Buk-Gu, Gwangju, Republic of Korea, [starm021@gist.ac.kr](mailto:starm021@gist.ac.kr), [sungchang@etrLre.kr](mailto:sungchang@etrLre.kr), [d-soolee@etrLre.kr](mailto:d-soolee@etrLre.kr), [csp@gist.ac.kr](mailto:csp@gist.ac.kr), 2010)*
  
17. *GPON Scheduling Disciplines under Multi-Service Bursty Traffic and Long-Reach Approach, (2010, Josep Segarra, Member, IEEE, Vicent Sales and Josep Prat, Member, IEEE - Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona, 1-3, E-08034 Barcelona, Spain - [jsegarra@tsc.upc.edu](mailto:jsegarra@tsc.upc.edu), [vicent@tsc.upc.edu](mailto:vicent@tsc.upc.edu), [jprat@tsc.upc.edu](mailto:jprat@tsc.upc.edu))*
  
18. *GPON Upstream Link Utilization Analysis with Integrated Network Surveillance, (Hakjeon Bang, Madhan Thollabandi, Sungchang Kim, Dong-Soo Lee, Jongdeog Kim, and Chang-Soo Park, 2010)*

19. *A New efficient dynamic MAC protocol for the delivery of multiple services over GPON*, (Jin Jiang · John M. Senior, Science and Technology Research Institute, Faculty of Engineering and Information Sciences, University of Hertfordshire, College Lane, [j.jiang@herts.ac.uk](mailto:j.jiang@herts.ac.uk), Springer Science+Business Media, LLC 2009)
  
20. *An Improved Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for GPON* (Liu Yang, Zhang Guoping, Li Qing, College of physics science and technology, Huazhong Normal University, Wuhan, Hubei, China [liuyang\\_mk@126.com](mailto:liuyang_mk@126.com), 2009)
  
21. *Design of GPON for Digital Video Broadcast Signal Transmission*, (Zhang Naiqian Dept. Information Engineering Communication. University of China, Beijing, China, [ddznq@cuc.edu.cn](mailto:ddznq@cuc.edu.cn) 2009)
  
22. *Fair Resource Distribution Within the Flexible WDMA/TDMA Optical Access Network Based on GPON Infrastructure*, (Roman Glatty, Philippe Guignard, and Philippe Chanclou, 2009 Optical Society of America)
  
23. *Improved scheme for estimating T-CONT bandwidth demand in status reporting DBA for NG-PON*, (Björn Skubic, Biao Chen, Jiajia Chen, Jawwad Ahmed, Lena Wosinska Ericsson Research, Ericsson AB, Stockholm, Sweden; School of ICT, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden; Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China)
  
24. *Offset-Based Scheduling With Flexible Intervals for Evolving GPON Networks*, (Konstantinos Kanonakis, Member, IEEE, and Ioannis Tomkos, Member, IEEE - JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 27, NO. 15, AUGUST 1, 2009 - Athens Information Technology (AIT), 19002, Peania, Athens, Greece (e-mail: [kkan@ait.edu.gr](mailto:kkan@ait.edu.gr), [itom@ait.edu.gr](mailto:itom@ait.edu.gr))
  
25. *Efficient Scheduling Disciplines for next Generation QoS-Aware GPON Networks*, (Konstantinos Kanonakis, Student Member, IEEE, Ioannis Tomkos, Member, IEEE High-Speed Networks and Optical Communications Group, Athens Information Technology Center 19002 Athens, Greece Tel: +30 210 6682823, e-mail: [kkan@ait.edu.gr](mailto:kkan@ait.edu.gr); [itom@ait.edu.gr](mailto:itom@ait.edu.gr), 2009)

26. *High-definition IPTV Broadcasting Architecture over Gigabit-capable Passive Optical Network*, (2007, Hiroki Ikeda, Jun Sugawa, Yoshihiro Ashi and Kenichi Sakamoto - Hitachi Communication Technologies, Ltd. 1-280 Koigakubo 216 Totsuka-cho, Totsuka-ku, Kokubunji, Tokyo 185-8601 Japan Yokohama-shi, Kanagawa 244-8567 Japan)
27. *Dynamic bandwidth assignment MAC protocol for differentiated services over GPON*, (J. Jiang, M.R. Handley and J.M. Senior (Optical Networks Group, Science and Technology Research Institute, University of Hertfordshire, College Lane, Hatfield, Herts, AL10 9AB, United Kingdom) E-mail: [j.jiang@herts.ac.uk](mailto:j.jiang@herts.ac.uk) )
28. *The XG-PON System: Cost Effective 10 Gb/s Access* (Frank J. Effenberger, Senior Member, IEEE)
29. *Migration from G(E)PON to NGPON* (Edvin Skaljo, Mujo Hodzic and Ismet Bektas, BH Telecom, Department for terminal devices, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, [skaljo@bhtelecom.ba](mailto:skaljo@bhtelecom.ba))
30. *Challenges and opportunities for migration towards 10GPON* (Hans Mickelsson\*a, Einar In De Betou, Björn Skubic, Stefan Dahlfort, Ericsson Research, Ericsson AB, Färögatan 6, SE-164 80 Stockholm, Sweden)
31. *World's First XG-PON Field Trial* (Shweta Jain, Frank Effenberger, Andrea Szabo, Zhishan Feng, Albert Forcucci, Wei Guo, Yuanqiu Luo, Robert Mapes, Yixin Zhang,, Vincent O'Byrne 1 Verizon, 117 West Street, Waltham, MA, 02451 Huawei Technologies, 2330 Central Expressway, Santa Clara, CA 95050, Verizon, 13100 Columbia Pike, D-35A, Silver Spring, MD 20904)
32. *Next Generation PON Systems – Current Status* (Marek Hajduczenia<sup>1,2</sup> Member IEEE, Henrique J. A. da Silva<sup>2</sup> Member IEEE, ZTE Corporation, Network Product Department, Rua Carlos Alberto da Mota Pinto 9, 6a, Amoreiras Plaza, Lisbon, Portugal, Instituto de Telecomunicações, Departamento de Engenharia, Electrotécnica e de Computadores,

Universidade de Coimbra, Pólo II, 3030-290 Coimbra, Portugal Corresponding author:  
[marek.hajduczenia@zte.com.cn](mailto:marek.hajduczenia@zte.com.cn))

33. *A Comparison of Dynamic Bandwidth Allocation for EPON, GPON, and Next-Generation TDM PON* (Björn Skubic, Ericsson Research, Jiajia Chen, Zhejiang University and Royal Institute of Technology (KTH/ICT) Jawwad Ahmed and Lena Wosinska, Royal Institute of Technology (KTH/ICT) Biswanath Mukherjee, University of California, Davis)
34. *Communication Solutions, Δίκτυα Πρόσβασης Νέας Γενιάς, Τεχνολογίας WDM PON*, Αλέξανδρος Ρούστας ([a.roustas@linksa.gr](mailto:a.roustas@linksa.gr)), Θρασύβουλος Ταμπακάκης ([t.tampakakis@linksa.gr](mailto:t.tampakakis@linksa.gr)), LINK SA.
35. *Delay and Jitter in Long-Reach GPON* (Timothy G. Smith, Kerry Hinton and Rodney S. Tucker Centre for Energy-Efficient Telecommunications (CEET), The University of Melbourne, Victoria, Australia, Phone: +61383447682, Fax: +61383443823, Email: [t.smith@ee.unimelb.edu.au](mailto:t.smith@ee.unimelb.edu.au) )
36. *Dynamic Bandwidth Allocation in GPON Networks* (Joanna Ozimkiewicz, Sarah Ruepp, Lars Dittmann, Henrik Wessing, Technical University of Denmark, DTU Fotonik, Kgs. Lyngby, Denmark, [ozimki@gmail.com](mailto:ozimki@gmail.com) , fsrru ladit [heweg@fotonik.dtu.dk](mailto:heweg@fotonik.dtu.dk) , Sylvia Smolorz, Nokia Siemens Networks Munich Germany [sylvia.smolorz@nsn.com](mailto:sylvia.smolorz@nsn.com) )
37. *The Importance of Dynamic Bandwidth Allocation in GPON Networks* (by Onn Haran, Fellow and Amir Sheffer, Product Line Manager, Issue No. 1: January 2008 PMC-Sierra, Inc.)
38. *Evaluation of Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms for G-PON Systems using a reconfigurable Hardware Testbed* (Harald Widiger, Andy Strzeletz, and Dirk Timmermann, Institute of Applied Microelectronics and Computer Engineering, University of Rostock, 18051 Rostock, Germany, Telephone: +49 (0)381 498-7276 [fharald.widiger;andy.strzeletz;dirk.timmermann@uni-rostock.de](mailto:fharald.widiger;andy.strzeletz;dirk.timmermann@uni-rostock.de) )
39. *Broadband Access Networks* (Xavier Fernando, SMIEEE, Ryerson University, Canada, <http://www.ee.yerson.ca/~fernando>)
40. *Challenges and Trends in Optical Networking: A Bottom-Up Approach* (Paulo Monteiro<sup>1,2</sup>, Joao Pedro<sup>1</sup> Silvia Pato<sup>1</sup>, Joao Gomes<sup>1</sup>, Rui Morais<sup>1</sup> Joao Santos<sup>1</sup>, Rui Meleiro<sup>1</sup>, Harald Rohde<sup>3</sup> ,

RudolfWinkelmann<sup>3</sup> | Nokia Siemens Networks Portugal S.A., Rua Irmaos Siemens 1,2720-093 Amadora, Portugal, [paulo.1.monteiro@nsn.com](mailto:paulo.1.monteiro@nsn.com)<sup>2</sup> Instituto de Telecomunicações, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal <sup>3</sup> Nokia Siemens Networks GmbH & Co. KG, St. Martin-Strasse 53,81669 Munich, Germany)

41. Development of 10 Gb/s EPON in IEEE 802.3av (IEEE STANDARDS IN COMMUNICATIONS AND NETWORKING - Marek Hajduczenia, Nokia Siemens Networks, Portugal and University of Coimbra, Henrique J. A. da Silva, University of Coimbra Paulo P. Monteiro, Nokia Siemens Networks Portugal S. A. and University of Aveiro)
42. Gigabit Passive Optical Network – GPON (Ivica Cale, T-HT d.d., Split, Croatia, [ivica.cale1@t.ht.hr](mailto:ivica.cale1@t.ht.hr), Aida Salihovic, University Computing Centre, University of Zagreb, Croatia, [aida.salihovic@srce.hr](mailto:aida.salihovic@srce.hr), Matija Ivekovic RECRO-NET d.o.o., Zagreb, Croatia [mivekovic@recro-net.hr](mailto:mivekovic@recro-net.hr))
43. Resource Management for Broadband Access over Time-Division Multiplexed Passive Optical Networks (Yuanqiu Luo, NEC Laboratories America, Si Yin and Nirwan Ansari, New Jersey Institute of Technology, Ting Wang, NEC Laboratories America)
44. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review (Amitabha Banerjee, Department of Computer Science, University of California, Davis, California 95616, [banerjea@cs.ucdavis.edu](mailto:banerjea@cs.ucdavis.edu))
45. Research on the Application of GPON Technologies (Wang Zhaoqing, College of Information Science and Technology, Hainan University, Haikou, Hainan 570228 China. [Hnhk266@163.com](mailto:Hnhk266@163.com))
46. PON Measurements and Monitoring Solutions for FTTH Networks During Deployment and Operation (A. Ehrhardt, F. Escher, L. Schürer, H.-M. Foisel, A. Templin, M. Adamy, C. Gerlach, Deutsche Telekom Netzproduktion GmbH, FMED, Winterfeldtstraße 21-27, 10781 Berlin, German, e-mail: [A.Ehrhardt@telekom.de](mailto:A.Ehrhardt@telekom.de))
47. Access Services Availability and Traffic Forecast in PON Deployment (Josep Segarra, Member, IEEE, Vicent Sales and Josep Prat, Member, IEEE, Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona, 1-3, E-08034 Barcelona, Spain, e-mail: [jsegarra@tsc.upc.edu](mailto:jsegarra@tsc.upc.edu), [vicent@tsc.upc.edu](mailto:vicent@tsc.upc.edu), [jprat@tsc.upc.edu](mailto:jprat@tsc.upc.edu))

48. 10G EPON vs. XG-PON1 efficiency (Pamela Begovic, Nasuf Hadziahmetovic, Darijo Raca, Faculty of Electrical Engineering, University of Sarajevo, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, [pamela.begovic@etf.unsa.ba](mailto:pamela.begovic@etf.unsa.ba) )
49. Standardization Trends and Prospective Views on the Next Generation of Broadband Optical Access Systems (Frank J. Effenberger, Member, IEEE, Jun-ichi Kani, and Yoichi Maeda, Member, IEEE)
50. Optical Access Solutions Beyond 10G-EPON/XG-PON (Jörg-Peter Elbers ADVA AG Optical Networking, Fraunhoferstr. 9a, 82152 Martinsried, Germany [JElbers@ADVAoptical.com](mailto:JElbers@ADVAoptical.com) )
51. Full-Service MAC Protocol for Metro-Reach GPONs (Ching-Hung Chang, Noemí M. Alvarez, Pandelis Kourtessis, Member, IEEE, Rubén M. Lorenzo, and John M. Senior)
52. Efficient Transport of Packets with Multicast Mechanism in GPON (ShuaiZHANG, School of Software, University, of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731 , P.R. China, [zhshuai\\_85@163.com](mailto:zhshuai_85@163.com) )
53. A G.984 GPON Exhibiting Multi-Wavelength Protocol Functionalities (Ali Gliwan, Pandelis Kourtessis, and John M Senior, Optical Networks Group, Science and Technology Research Institute (STRI), University of Hertfordshire, Hatfield, UK, {A.Gliwan,P.Kourtessis,J.M.Senior}@Herts.ac.uk)
54. 10G GPON Management System Study and Implementation (Jia Li, LiTH-ISY-EX--09/4079—SE, Stockholm, 2009)
55. Fragmentation in a Novel Implementation of Slotted GPON Segmentation and Reassembly (Yixuan Qin<sup>1</sup>, Martin Reed<sup>1</sup>, Zheng Lu<sup>1</sup>, David Hunter<sup>1</sup>, Albert Rafel<sup>2</sup>, and Justin Kang, Department of Computing and Electronic Systems, University of Essex, Wivenhoe Park, Colchester, Essex CO4 3SQ, UK {yqin,mjreed,zlu,dkhunter}@essex.ac.uk, BT, Adastral Park, Ipswich, IP5 3RE, UK {albert.2.rafel,justin.kang}@bt.com)
56. Burst Mode Receiver for GPON (M. Kumarasamy Raja, Dan Lei Yan, Wooi Gan Yeoh, Institute of Microelectronics, A\*STAR (Agency for Science, Technology and Research), Singapore)

57. Availability and cost estimation of secured FTTH architectures (I. Boyer Heard is with the Orange Labs, France Telecom, 2 avenue Pierre Marzin, 22300 Lannion, FRANCE (phone: +33-296059448; fax: 33- 296051252; e-mail: [marieisabelle.boyerheard@orange-ftgroup.com](mailto:marieisabelle.boyerheard@orange-ftgroup.com) )