

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υλοποίηση Σχημάτων
Κατανομής Εύρους
Ζώνης σε Παθητικά
Οπτικά Δίκτυα XG-PON

Development of Bandwidth Allocation
Schemes for Passive Optical Networks
XG-PON

Συντάκτης: Ντέβα Μαρίνα
Επιβλέπων: Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης, Επίκουρος Καθηγητής

30/6/2016

Ευχαριστίες

Με αφορμή την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την ολοκλήρωση των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν να φτάσω σε αυτό το σημείο.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ και να ερευνήσω ένα τόσο ενδιαφέρον και σημαντικό θέμα, όπως αυτό των Οπτικών επικοινωνιών και των Παθητικών Οπτικών Δικτύων. Οι γνώσεις που αποκόμισα από αυτήν την εργασία σίγουρα θα αποτελέσουν σημαντικό εφόδιο στην μετέπειτα πορεία μου.

Στη συνέχεια, δεν θα παρέλειπα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου και με ενθάρρυναν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας αλλά και κατά την διάρκεια των σπουδών μου, φίλους και συμφοιτητές.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πάνω απ' όλα τους γονείς μου, χωρίς την καθοριστική συμβολή των οποίων δεν θα είχα φτάσει μέχρι εδώ σήμερα, για την υποστήριξη τους και για όλα όσα μου παρείχαν, ώστε να μπορώ να ολοκληρώσω ανεπηρέαστη τις σπουδές μου και να πραγματοποιήσω τους στόχους μου.

Πρόλογος

Η ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα του διαδικτύου και ο μεγάλος όγκος δεδομένων που μεταφέρονται μέσω αυτού, καθιστούν αναγκαία την εξέλιξη των δικτύων επικοινωνιών με στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση των χρηστών. Επίσης, αξιοσημείωτη είναι και η αναγκαιότητα για όλο και πιο υψηλές ταχύτητες μετάδοσης.

Τα δίκτυα οπτικών ινών τείνουν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες αυτές, παρέχοντας μεγάλο εύρος ζώνης, το οποίο ξεπερνά κατά εκατοντάδες φορές αυτό ενός κοινού καλωδίου. Οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εξασφαλίζουν ταχύτητες της τάξεως των Gbps, που με τη σειρά τους προσφέρουν αστραπιαία μεταγωγή δεδομένων και αξιόπιστες υπηρεσίες.

Στην παρούσα εργασία, αναφέρονται αρχικά οι χρήσεις και η σπουδαιότητα των δικτύων επικοινωνιών. Έπειτα, αναλύονται οι οπτικές τεχνολογίες και οι εφαρμογές τους μέχρι σήμερα. Στη συνέχεια, αναλύεται το πρότυπο ITU-T G.987.3, το οποίο αναφέρεται στην λειτουργία του συστήματος XG-PON, ένα παθητικό οπτικό δίκτυο που προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 10 Gbps στο downstream. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, παρουσιάζεται έπειτα ένα μοντέλο υλοποίησης του XG-PON δικτύου, στο οποίο χρησιμοποιείται δυναμική κατανομή εύρους ζώνης στις οντότητες κίνησης. Τέλος, πάνω στο υπάρχον μοντέλο γίνεται βελτιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης του δικτύου με την τεχνική Ant Colony Optimization (ACO).

Keywords

Παθητικά οπτικά δίκτυα, passive optical network, optical access network
PON, 10-gigabit PON, XGEM, XGTC, XG-PON, , ant colony optimization, ACO.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	2
Πρόλογος.....	3
Πίνακας περιεχομένων	5
1. Εισαγωγή στα Δίκτυα.....	11
1.1. Σύντομη Ιστορική αναδρομή	11
1.2. Χρήσεις των δικτύων υπολογιστών	14
1.3. Βασικά στοιχεία υλοποίησης Δικτύων	16
1.4. Διασύνδεση Δικτύων	17
1.5. Είδη Δικτύων	20
1.6. Υλοποίηση της Διασύνδεσης	21
2. Οπτικές Τεχνολογίες.....	24
2.1. Οπτικές ίνες - Εισαγωγή.....	24
2.1.1 Πώς λειτουργούν	25
2.1.2 Είδη Οπτικών Ινών	26
2.1.3 Εφαρμογές Οπτικών Ινών	28
2.1.3 Πλεονεκτήματα χρήσης οπτικών ινών.....	29
2.2 Μετάδοση στα οπτικά δίκτυα	30
2.2.1 Οπτικός πομπός	30
2.2.2 Οπτικός δέκτης.....	31
2.2.3 Οπτικοί ενισχυτές.....	32
2.2.3.1. Βασικές παράμετροι οπτικών ενισχυτών	32
2.3. Οπτική Πολυπλεξία.....	34
2.3.1 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM).....	35
2.3.2 Οπτική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (OTDM)	36

2.3.3	Οπτική πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα	37
3.	Παθητικά Οπτικά Δίκτυα.....	39
3.1.	APON	41
3.2.	EPON	42
3.3.	GPON.....	43
3.4.	XG-PON	44
3.5.	Σύγκριση Τεχνολογιών	45
4.	Πρότυπο ITU-T G.987.3 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON).....	46
4.1.	Επισκόπηση του επιπέδου μετάδοσης XG-PON transmission convergence layer (XGTC)	46
4.2.	Λειτουργίες του επιπέδου XGTC.....	49
4.2.1.	XGTC service adaptation sublayer	49
4.2.2.	XGTC framing sublayer.....	49
4.2.3.	XGTC PHY adaptation sublayer	50
4.3	Time division multiplexing architecture.....	51
4.4	Media access control	52
5.	Προτεινόμενο Σχήμα Υλοποίησης XG-PON.....	54
5.1.	Διαμοίραση πόρων και ποιότητα υπηρεσιών	54
5.2.	Αρχές για την διάθεση πόρων στο ρεύμα ανόδου(upstream) και καθόδου(downstream)	54
5.3.	Δυναμική διάθεση εύρους ζώνης.....	55
5.3.1	Ανάλυση δυναμικής διαμοίρασης εύρους ζώνης στο παθητικό οπτικό δίκτυο.....	56
5.3.2	Λειτουργικές απαιτήσεις του μηχανισμού DBA	57
5.3.3	Μέθοδοι δυναμικής διάθεσης εύρος ζώνης	57
5.4.	Μοντέλο υλοποίησης συστήματος XG-PON και μηχανισμού δυναμικής διαμοίρασης εύρους ζώνης (DBA)	58

5.4.1	Χρήση συμβόλων	58
5.4.2	Upstream PHY frames	58
5.4.3	Η Μορφή του BWmap	59
5.4.4	Διάθεση πάγιου fixed εξασφαλισμένου (assured) και best effort εύρους ζώνης.....	60
5.4.5	Στοιχεία για την υλοποίηση της προσομοίωσης	61
5.4.6	Σχεδιασμός προσομοίωσης	63
5.4.7	Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος XG-PON με μηχανισμό δυναμικής διάθεσης εύρους ζώνης (DBA).....	69
6.	Προσαρμογή του πάγιου εύρους ζώνης (Fixed Bandwidth) με τη χρήση της τεχνικής Αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony) και βελτιστοποίηση καθυστέρησης.....	79
6.1.	Τεχνική βελτιστοποίησης Ant Colony	79
6.2.	Μοντέλο υλοποίησης και εφαρμογής του αλγορίθμου ACO.....	81
6.2.1	Σχέδιο υλοποίησης	82
6.3.	Εξαγωγή και σχολιασμός αποτελεσμάτων	85
	Σύνοψη.....	87
	Παράρτημα.....	88
	Βιβλιογραφία	94

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1: Φρυκτωρίες	11
Εικόνα 2: Υδραυλικός Τηλέγραφος	12
Εικόνα 3: Wide Area Network	20
Εικόνα 4: Τοπολογίες Δικτύου	22
Εικόνα 5: Διασύνδεση Ethernet	22
Εικόνα 6: Οπτικές Ύνες	24
Εικόνα 7: Ολικές Ανακλάσεις στην Οπτική Ύνα	25
Εικόνα 8: Δομή Οπτικής Ύνας	26
Εικόνα 9: Είδη Οπτικών Ύνων	27
Εικόνα 10: Οπτικό Επικοινωνιακό Σύστημα	34
Εικόνα 11: Μεταδότης με πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος	36
Εικόνα 12: Μοντέλο μετάδοσης με διαίρεση χρόνου	37
Εικόνα 13: Πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα	38
Εικόνα 14: Μοντέλο Παθητικού Οπτικού Δικτύου (Ροή Καθόδου)	39
Εικόνα 15: Μοντέλο FTTX	40
Εικόνα 16: Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου (Ρεύμα Ανόδου)	41
Εικόνα 17: Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου (Ρεύμα Καθόδου)	42
Εικόνα 18: Παθητικό Οπτικό Δίκτυο	43
Εικόνα 19: Παθητικό Οπτικό Δίκτυο GPON	43
Εικόνα 20: Πολυπλέκτης με διαίρεση μήκους κύματος για GPON και XGPON συστήματα	44
Εικόνα 21: Μοντέλο Επιπέδου μετάδοσης XGPON (Ροή Καθόδου)	47
Εικόνα 22: Μοντέλο Επιπέδου Μετάδοσης XGPON (Ροή Καθόδου)	48
Εικόνα 23: Ροή Πληροφοριών στο επίπεδο XGTC	50
Εικόνα 24: Πολυπλεξία ροής καθόδου XGPON	51

Εικόνα 25: Πολυπλεξία Ροής Ανόδου XGPON	52
Εικόνα 26: XGTC Media Access Control Concept.....	53
Εικόνα 27: PON DBA Abstraction.....	56
Εικόνα 28: Upstream PHY frame	59
Εικόνα 29: Μορφή Bandwidth Map	59
Εικόνα 30: Διατιθέμενο εύρος ζώνης	60
Εικόνα 31: Περιβάλλον Matlab	61
Εικόνα 32: Matlab .m file.....	62
Εικόνα 33: Διάγραμμα Ροής κυρίως συνάρτησης XGPON	65
Εικόνα 34: Διάγραμμα ροής event1	66
Εικόνα 35: Διάγραμμα ροής event4	68
Εικόνα 36 Ρυθμοαπόδοση δικτύου για κίνηση Live Streaming	70
Εικόνα 37 Ρυθμοαπόδοση του δικτύου για κίνηση VoIP	71
Εικόνα 38 Ρυθμοαπόδοση του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming TCP	71
Εικόνα 39 Ρυθμοαπόδοση του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming UDP	72
Εικόνα 40 Μέση καθυστέρηση του δικτύου για κίνηση Live Streaming	73
Εικόνα 41 Μέση καθυστέρηση του δικτύου για κίνηση VoIP.....	73
Εικόνα 42 Μέση καθυστέρηση του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming TCP	74
Εικόνα 43 Μέση καθυστέρηση του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming UDP	74
Εικόνα 44 Διακύμανση καθυστέρησης του δικτύου για κίνηση Live Streaming	76
Εικόνα 45 Διακύμανση της καθυστέρησης του δικτύου για κίνηση VoIP	76
Εικόνα 46 Διακύμανση της καθυστέρησης του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming TCP.....	77

Εικόνα 47 Διακύμανση της καθυστέρησης του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming UDP	77
Εικόνα 48: Διάγραμμα ροής Ant Colony.....	84
Εικόνα 49 Μέση Καθυστέρηση προς ONUs με τη χρήση του Ant Colony.....	85

Πίνακας πινάκων

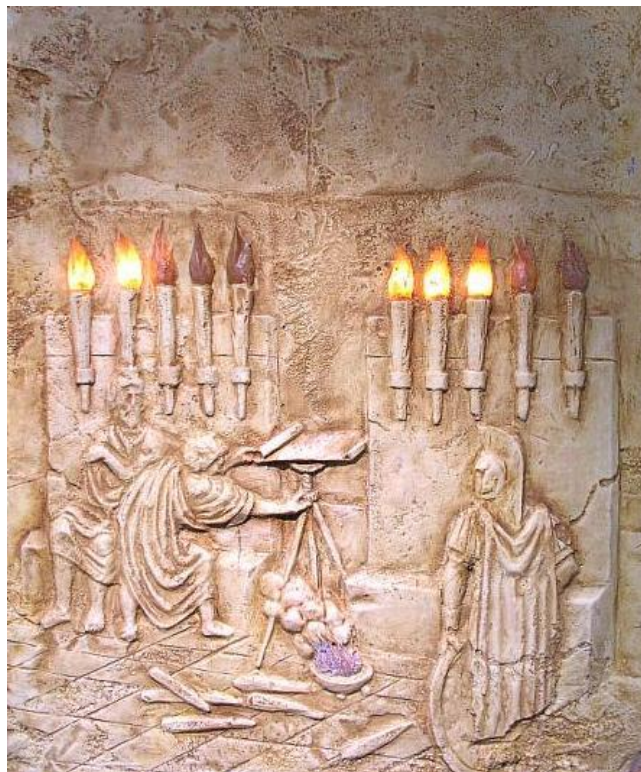
Πίνακας 1: Σύγκριση Τεχνολογιών Παθητικού Οπτικού Δικτύου	45
Πίνακας 2: Μορφή Event List	63
Πίνακας 3: Παραλλαγές Αλγορίθμου Ant Colony.....	80
Πίνακας 4: Ποσοστά βελτίωσης μέσου όρου καθ..... υστέρησης	86
Πίνακας 5: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τις τιμές μέσης καθυστέρησης.....	86

1. Εισαγωγή στα Δίκτυα

1.1. Σύντομη Ιστορική αναδρομή

Δεν θα μπορούσαμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση των σημερινών δικτύων και τεχνικών θεμάτων αφήνοντας ασχολίαστο το πώς φτάσαμε ως εδώ και με ποιον τρόπο ξεκίνησαν οι τηλεπικοινωνίες να λαμβάνουν χώρα στους αρχαίους χρόνους.

Οι **φρυκτωρίες** ήταν ένα σύστημα συνεννόησης στην αρχαία Ελλάδα με σημάδια που μεταβιβάζονταν από περιοχή σε περιοχή με τη χρήση πυρσών κατά τη διάρκεια της νύχτας (φρυκτός = πυρσός και ώρα = φροντίδα). Ο Αισχύλος στο έργο του *Αγαμέμνων* περιγράφει την είδηση της πτώσης της Τροίας, η οποία μεταδόθηκε ως τις Μυκήνες με τις φρυκτωρίες.^[1] Ενδιάμεσοι σταθμοί μεταδόσεως υπήρχαν στην Ίδη της Μυσίας, στο Ακρωτήρι της Λήμνου (σημερινή Πλάκα), στον Άθω, στο βουνό Μάκιστο και στις πλαγιές του Αραχναίου. Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε για πολλούς αιώνες μέχρι το 1850 αλλά μπορούσε να μεταφέρει μηνύματα μόνο με ένα κοινό κώδικα. [1]



Εικόνα 1: Φρυκτωρίες

Ο οπτικός τηλεγράφος ήταν ένας τρόπος επικοινωνίας που εφευρέθηκε από τους Έλληνες μηχανικούς Κλεονέξη και Δημόκλειτο τον 2^ο αιώνα π.Χ και βασιζόταν στον τρόπο επικοινωνίας με φρυκτωρίες που αναφέρθηκε προηγουμένως. Σύμφωνα μ' αυτόν, χρησιμοποιούσαν δύο ομάδες από 5 δαυλούς η καθεμία και κάθε φορά που ήθελαν να στείλουν ένα σήμα, άναβαν φωτιά στους αντίστοιχους δαυλούς και ο σταθμός στον άλλο λόφο (συνήθως 30 χιλιόμετρα μακριά) αναμετέδιδε το μήνυμα στον επόμενο λόφο κ.ο.κ. Το σύστημα κωδικοποίησης ήταν το εξής :

Α	β	γ	δ	ε
Ζ	η	θ	ι	κ
Λ	μ	ν	ξ	ο
Π	ρ	σ	τ	υ
Φ	χ	ψ	ω	

Δηλ., όταν ήθελαν να στείλουν το γράμμα ο, άναβαν 5 δαυλούς στη δεξιά ομάδα και 3 δαυλούς στην αριστερή ομάδα.[1]

Ο υδραυλικός τηλεγράφος ήταν ένας τρόπος επικοινωνίας που εφευρέθηκε τον 4^ο αιώνα π.Χ. από τον Αρκάδα στρατηγό Αινεία τον Τακτικό. Σύμφωνα μ' αυτόν γέμιζαν έναν κάδο με νερό. Στον απέναντι λόφο υπήρχε ένας ακριβώς ίδιος κάδος με την ίδια βρύση στη βάση του κάδου. Οι δύο κάδοι είχαν μια ράβδο η οποία επέπλεε πάνω στο νερό και είχε χαραγμένους πάνω της διάφορους κωδικούς. Κάθε φορά που ήθελαν να στείλουν ένα σήμα, ανύψωναν έναν πυρσό και οι δύο σταθμοί (πομπός και δέκτης) άνοιγαν τις βρύσες τους την ίδια στιγμή. Το νερό έβγαινε με τον ίδιο ρυθμό και όταν η επιφάνειά του νερού στον σταθμό του πομπού έφθανε στον κωδικό που ήθελαν να στείλουν, κατέβαζαν τον πυρσό και έκλειναν τη βρύση. Τότε μπορούσε ο δέκτης να διαβάσει τον κωδικό του σήματος πάνω στη ράβδο. Αυτό το σύστημα επικοινωνίας απαιτούσε πολύ καλό συγχρονισμό των δύο σταθμών για να μπορέσει να δουλέψει σωστά.[1]



Εικόνα 2: Υδραυλικός Τηλέγραφος

Τα ιστορικά βήματα στις τηλεπικοινωνίες

- 1839 Τηλέγραφος (Cooke, Wheatstone)
- 1844 Κώδικας Morse (--)
- 1850-1860 Πρώτα Υποβρύχια Τηλεγραφικά καλώδια
- 1876 Τηλέφωνο (A. G. Bell, E. Gray)
- 1879 Πρώτο τηλεφωνικό κέντρο (PBX)
- 1896 Ασύρματη μετάδοση (Marconi)
- 1916-1920 Πρώτες Ραδιοφωνικές εκπομπές
- 1926-1936 Πειράματα τηλεόρασης
- 1936 Πρώτες δοκιμαστικές εκπομπές TV (Λονδίνο)
- 1935 Πρώτο πρακτικό RADAR (Sir R. Watson-Watt)
- 1954 Πρώτο standard έγχρωμης τηλεόρασης (NTSC)
- 1960 Πρώτος τηλεπ. δορυφόρος (Echo I)
- 1962 Πρώτα ψηφιακά συστήματα μετάδοσης TDM
- 1966 Πρόταση χρήσης οπτικών ινών (K.C. Kao, G.A. Hockman)
- 1970- ARPANET: το πρώτο δίκτυο υπολογιστών
- 1970- Ψηφιακά συστήματα επικοινωνιών
- 1980- Πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας
- 1980- Δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης
- 1990- Διαδίκτυο (Internet) - Εφαρμογή World Wide Web
- 2000- Δίκτυα Ολοκληρωμένων υπηρεσιών [2]

1.2. Χρήσεις των δικτύων υπολογιστών

Πριν αρχίσουμε να αναφέρουμε τα τεχνικά θέματα, αξίζει να αφιερώσουμε λίγο χρόνο για να δούμε τους λόγους για τους οποίους ο κόσμος ενδιαφέρεται για τα δίκτυα υπολογιστών και τους σκοπούς για τους οποίους μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Θα ξεκινήσουμε με τις παραδοσιακές χρήσεις και έπειτα θα προχωρήσουμε στις πιο πρόσφατες εξελίξεις.

➤ Υπηρεσίες στο διαδίκτυο

Ο κατάλογος των υπηρεσιών Διαδικτύου που ακολουθεί απέχει πολύ από το να χαρακτηριστεί πλήρης, είναι όμως αντιπροσωπευτικός:

- Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e – mail): είναι η ηλεκτρονική εκδοχή του παραδοσιακού ταχυδρομείου. Ο χρήστης χρησιμοποιεί μια εφαρμογή «πελάτη e – mail» για να αποστείλει τα μηνύματά του στο ηλεκτρονικό ταχυδρομικό κουτί του παραλήπτη, το οποίο φυλάσσεται σε κάποιον εξυπηρετητή e – mail. Ανάλογη εφαρμογή πελάτη χρησιμοποιεί ο χρήστης και για τη λήψη των προσωπικών του μηνυμάτων από τον εξυπηρετητή και την ανάγνωσή τους.
- Μεταφορά αρχείων (file transfer, ftp): ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί με έναν εξυπηρετητή διάθεσης αρχείων, στον οποίο έχει πρόσβαση, να δει τα περιεχόμενά του και να ανακτήσει ή να αποθηκεύσει αξιόπιστα πλήθος αρχείων από/σε αυτόν.
- Ομάδες ειδήσεων (newsgroup): είναι το ηλεκτρονικό ισοδύναμο των παραδοσιακών πινάκων ανακοινώσεων. Η αντίστοιχη εφαρμογή – πελάτη του χρήστη συνδέεται με τον εξυπηρετητή ομάδων ειδήσεων, επιλέγει μία ή περισσότερες ομάδες ειδήσεων και διαβάζει επιλεκτικά τα άρθρα που τον ενδιαφέρουν. Επιπλέον, μπορεί να δημοσιεύσει και ένα δικό του άρθρο σε κάποια ομάδα ειδήσεων.
- Ανοικτή συνομιλία (Internet Relay Chat, IRC): διάφοροι εξυπηρετητές ανοικτής συνομιλίας στο Διαδίκτυο σας δίνουν τη δυνατότητα να συζητήσετε με ένα ή περισσότερα άτομα θέματα κοινού ενδιαφέροντος. Για τη σύνδεση απαιτείται η χρήση ειδικής εφαρμογής – πελάτη και συνήθως παρέχεται η δυνατότητα μετάδοσης φωνής και εικόνας.

▪ Εφαρμογές στον εργασιακό χώρο

Η χρήση των υπολογιστών έχει μεγάλη επίδραση στον εργασιακό χώρο. Επιπλέον, η διασύνδεσή τους σε δίκτυο Η/Υ αυξάνει τη λειτουργικότητά τους προσθέτοντας δυνατότητες όπως, π.χ. οι ακόλουθες:

- Διαμοιρασμός εφαρμογών: οι ακριβές εφαρμογές (όπως, π.χ. ένα στατιστικό πακέτο, ένας προσομοιωτής ή ένα εικονικό εργαστήριο) μπορούν να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα από διάφορους χρήστες στο εταιρικό δίκτυο, χωρίς να είναι απαραίτητη η εγκατάστασή τους σε καθενός τον υπολογιστή ξεχωριστά.

- Διαμοιρασμός περιφερειακών συσκευών: όλα τα συστήματα του εταιρικού δικτύου θα μπορούν να χρησιμοποιούν ακριβές περιφερειακές συσκευές, όπως, π.χ. έναν έγχρωμο εκτυπωτή laser, ένα σαρωτή υψηλής ευκρίνειας κ.ά.
- Τηλεδιάσκεψη: αποτελεί μια εναλλακτική οικονομική λύση για τα επαγγελματικά ταξίδια. Όλοι οι χρήστες βρίσκονται και συνομιλούν σε έναν «εικονικό» χώρο, μοιράζονται τις ηλεκτρονικές σημειώσεις τους και θα γράφουν τις παρατηρήσεις τους.
- τηλε – ιατρική: η άμεση πρόσβαση σε ιατρικές πληροφορίες τεράστιου όγκου, η αναζήτηση παρόμοιων περιστατικών και η «ζωντανή» σύνδεση του ιατρικού και νοσηλευτικού προσωπικού με κόμβους επιστημονικής υποστήριξης είναι δυνατότητες που μπορούν να υποστηρίξουν αποδοτικά τα σημερινά δίκτυα και έχουν επιφέρει σημαντική βελτίωση στο επίπεδο των προσφερόμενων ιατρικών υπηρεσιών.
- τηλε – εκπαίδευση: κάθε εκπαιδευόμενος μπορεί από το χώρο του να παρακολουθεί τη διδασκαλία ενός θέματος όποτε θέλει, με το ρυθμό που κρίνει αποδοτικό, επιλέγοντας ή επαναλαμβάνοντας τμήματά της, και έχοντας ταυτόχρονα πρόσβαση σε μια τεράστια ποικιλία επικουρικού και συμπληρωματικού υλικού, όπως, π.χ. ψηφιακές βιβλιοθήκες, ηλεκτρονικά εργαστήρια, εκπαιδευτικό λογισμικό κ.ά.
- ηλεκτρονικό εμπόριο: ο κάθε άνθρωπος μπορεί να κάνει μια έρευνα αγοράς για τα προϊόντα που τον ενδιαφέρουν πριν τα αγοράσει. Η μεγάλη διαφορά όμως είναι ότι κάνει την έρευνα αγοράς από το χώρο του, εύκολα και γρήγορα, και ψάχνοντας σε οποιοδήποτε ηλεκτρονικό κατάστημα του πλανήτη διαθέτει τέτοια προϊόντα. Επιπλέον, από το χώρο του, μπορεί να πραγματοποιήσει, με ασφάλεια και μυστικότητα, και οποιαδήποτε εμπορική συναλλαγή επιθυμεί, όπως, π.χ. παραγγελίες, πληρωμές κ.ά.

➤ Ψυχαγωγία

- διανομή ψυχαγωγικών προγραμμάτων: η εκπομπή ραδιοφωνικών προγραμμάτων υψηλής πιστότητας και τηλεοπτικών προγραμμάτων υψηλής ευκρίνειας, η επιλογή προβολής ταινιών ή εκτέλεσης μουσικών έργων κατ' απαίτηση και η «ζωντανή» σύνδεση με οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη (ή και εκτός αυτού), στο οποίο εξελίσσεται ένα ενδιαφέρον φαινόμενο ή παρουσιάζεται μια ευχάριστη εκδήλωση, είναι από τις σημαντικότερες υπηρεσίες στα δίκτυα υψηλής απόδοσης.

1.3. Βασικά στοιχεία υλοποίησης Δικτύων

- **Διακομιστής αρχείων (File Server)**

Είναι ο πυρήνας του δικτύου και συνήθως ένας πολύ γρήγορος μικροϋπολογιστής που τρέχει το λειτουργικό σύστημα του δικτύου και διαχειρίζεται τη ροή των δεδομένων. Είναι ο μεγαλύτερος υπολογιστής του δικτύου με μεγάλες αποθηκευτικές ικανότητες (συνήθως με σκληρούς δίσκους μερικών GigaBytes) και μεγάλη κεντρική μνήμη.

Μερικές από τις υπηρεσίες που παρέχει ο file server είναι:

1. αποθήκευση των προγραμμάτων του λειτουργικού συστήματος του δικτύου καθώς και βοηθητικών προγραμμάτων.
2. αποθήκευση των προγραμμάτων και των δεδομένων των χρηστών του δικτύου.
3. διαχείριση του συστήματος αρχείων, των διαμοιραζόμενων περιφερειακών συσκευών, της δυνατότητας προσπέλασης των χρηστών και της ασφάλειας του δικτύου.
4. παρακολούθηση της λειτουργίας και της αποδοτικότητας του δικτύου.

Είναι πιθανόν να υπάρχουν περισσότεροι από ένας servers για να υποστηρίξουν όλες αυτές τις λειτουργίες. Αυτοί αναφέρονται σαν dedicated servers (αφιερωμένοι servers) και μπορούν να είναι:

- communication servers (επικοινωνιών): Διαχειρίζονται τις συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου καθώς και τις συνδέσεις με άλλα τοπικά δίκτυα ή μεγαλύτερα συστήματα (mainframes) και παρέχουν τη δυνατότητα χρήσης ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail).
- backup servers: Εξυπηρετούν τη λήψη αντιγράφων ασφαλείας των αρχείων και των δεδομένων.
- database servers: Αποθηκεύουν βάσεις δεδομένων ή object-oriented πληροφορίες που προσπελούνται από τους χρήστες.
- print servers: Εξυπηρετούν τις εκτυπώσεις στο δίκτυο δίνοντας το δικαίωμα στους χρήστες να προσαρτώνται στους εκτυπωτές του δικτύου μέσω των ουρών εκτύπωσης.

- **Σταθμοί εργασίας (workstations)**

Είναι προσωπικοί υπολογιστές με το δικό τους λειτουργικό σύστημα συνδεδεμένοι φυσικά με το διακομιστή αρχείων μέσω καλωδίων και καρτών επικοινωνίας. Οι χρήστες δεν χρησιμοποιούν τον file server απευθείας, αλλά μόνον μέσω των σταθμών εργασίας. Μερικές φορές, ένας σταθμός εργασίας αναφέρεται και σαν κόμβος.

- **Κάρτες διασύνδεσης δικτύου (NIC - Network Interface Card)**

Για να είναι δυνατή η σύνδεση, ο file server και κάθε σταθμός εργασίας, περιέχει μια κάρτα διασύνδεσης δικτύου, μέσω της οποίας συνδέεται με όλες

τις υπόλοιπες συσκευές. Κάθε κάρτα δικτύου σχεδιάζεται για ένα συγκεκριμένο τύπο δικτύου π.χ. Ethernet, FDDI, token ring κλπ. Λειτουργούν στο φυσικό επίπεδο του μοντέλου OSI καθορίζοντας πρωτόκολλα για τα μηχανικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της διασύνδεσης.

- **Καλώδιο σύνδεσης**

Τα συνηθέστερα καλώδια είναι τα χάλκινα των οπτικών ινών. Τα χάλκινα είναι φθηνά και αποτελούν την πλειοψηφία των εγκαταστάσεων, ενώ οι οπτικές ίνες κερδίζουν συνεχώς έδαφος, λόγω της μείωσης του κόστους, της απλοποίησης των τεχνικών εγκατάστασης και της ανάγκης για ολοένα και μεγαλύτερη ταχύτητα.[4]

1.4. Διασύνδεση Δικτύων

Όταν δύο ή περισσότερα δίκτυα συνδέονται μεταξύ τους, τότε λέμε ότι έχουμε ένα συνδεδεμένο δίκτυο ή διαδίκτυο (internetwork ή internet). Τα επιμέρους δίκτυα συνδέονται μεταξύ τους με ενδιάμεσες συσκευές, όπως οι δρομολογητές και οι πύλες.

Για τη δημιουργία ενός μεγαλύτερου δικτύου μπορούμε να συνδέσουμε πολλά μικρότερα δίκτυα. Οι συνδέσεις που θα χρησιμοποιηθούν μπορεί να είναι:

1. Δίκτυα μικρών αποστάσεων ή τοπικά δίκτυα (Local Area Networks, LAN)
2. Δίκτυα ευρείας περιοχής (Wide Area Networks, WAN)

- LAN-LAN
- LAN-WAN
- WAN-WAN
- LAN-WAN-LAN

Για να είναι δυνατή η επικοινωνία των επιμέρους δικτύων μεταξύ τους χρειάζονται ορισμένες ενδιάμεσες συσκευές, όπως οι **επαναλήπτες (repeaters ή regenerators)**, οι **γέφυρες (bridges)**, οι **δρομολογητές (routers)** και οι **πύλες (gateways)**.

- *Επαναλήπτες (repeaters ή regenerators)*

Οι επαναλήπτες λειτουργούν στο φυσικό επίπεδο του OSI μοντέλου. Χρησιμεύουν για την ενίσχυση των σημάτων που μεταφέρονται στο δίκτυο. Ένα σήμα μπορεί να ταξιδέψει ορισμένη απόσταση πριν εξασθενήσει ή αλλοιωθεί. Η τοποθέτηση ενός επαναλήπτη στην κατάλληλη θέση λαμβάνει το σήμα πριν αυτό αλλοιωθεί, το ανανεώνει και το φέρνει στην αρχική του μορφή. Στη συνέχεια το επανατοποθετεί στην πορεία του. Κατά συνέπεια το σήμα μεταδίδεται στην αρχική του μορφή από ένα σημείο που είναι πιο κοντά στον προορισμό του. Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι ο επαναλήπτης δεν είναι ενισχυτής σήματος. Ο ενισχυτής ενισχύει οποιοδήποτε σήμα φτάσει σε αυτόν ενώ ο επαναλήπτης δημιουργεί ένα bit προς bit αντίγραφο του

αρχικού σήματος. Η θέση του επαναλήπτη στο δίκτυο είναι πολύ βασική, διότι πρέπει να τοποθετηθεί πριν οι αλλοιώσεις μεταβάλλουν την ταυτότητα και το περιεχόμενο του αρχικού σήματος. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την θέση ενός επαναλήπτη στο OSI μοντέλο.

- *Γέφυρες (bridges)*

Οι γέφυρες λειτουργούν στο επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων του OSI μοντέλου. Συνδέουν τμήματα του δικτύου τα οποία χρησιμοποιούν το ίδιο πρωτόκολλο επικοινωνίας. Χωρίζουν ένα υπερφορτωμένο δίκτυο σε μικρότερα τμήματα.

Σε αντίθεση με τους επαναλήπτες, οι γέφυρες ξεχωρίζουν και μεταδίδουν το σήμα μόνο στο τμήμα στο οποίο βρίσκεται ο παραλήπτης του. Έτσι βοηθάνε στη ρύθμιση της κυκλοφορίας και στην απομόνωση προβλημάτων.

Όταν ένα πακέτο φτάσει στη γέφυρα, αυτή ενισχύει το σήμα και ταυτόχρονα ελέγχει τη διεύθυνση προορισμού. Το νέο αντίγραφο του σήματος μεταδίδεται μόνο στο τμήμα στο οποίο βρίσκεται η διεύθυνση αυτή.

Με την εισαγωγή του πακέτου, διαβάζεται η διεύθυνση προορισμού που υπάρχει σε αυτό και στη συνέχεια συγκρίνεται με έναν πίνακα που περιέχει τις διευθύνσεις όλων των τερματικών που βρίσκονται σε όλα τα τμήματα του δικτύου. Όταν βρεθεί ο σταθμός προορισμού, τότε η γέφυρα προσδιορίζει σε ποιο τμήμα βρίσκεται και αποστέλλει το πακέτο μόνο σε αυτό.

Ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας του πίνακα διευθύνσεων, οι γέφυρες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Απλές γέφυρες (simple bridges)
2. Γέφυρες με δυνατότητες εκμάθησης (learning bridges)
3. Γέφυρες πολλαπλών θυρών (multiport bridges)[4]

- *Δρομολογητές (Routers)*

Οι δρομολογητές έχουν πρόσβαση σε όλα τα επίπεδα του δικτύου και περιέχουν λογισμικό που τους επιτρέπει να αποφασίσουν ποιο από τα διαθέσιμα μονοπάτια του δικτύου πρέπει να χρησιμοποιηθεί για κάποια μετάδοση. Λειτουργούν στο επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων.

Οι δρομολογητές μεταβιβάζουν πληροφορίες μεταξύ πολλών διασυνδεδεμένων δικτύων. Ένα πακέτο που ξεκινάει από ένα σταθμό ενός δικτύου για να φτάσει σε ένα σταθμό γειτονικού δικτύου περνάει πρώτα από τον κοινό δρομολογητή, ο οποίος το στέλνει στο δίκτυο προορισμού. Αν τα δίκτυα δεν είναι γειτονικά, τότε ο αρχικός δρομολογητής στέλνει τα πακέτα στον επόμενο δρομολογητή που βρίσκεται προς την κατεύθυνση προορισμού, μέχρι να φτάσει στον τελικό κόμβο.

Ο δρομολογητής λαμβάνει πακέτα από το δίκτυο και επιλέγει την καλύτερη διαδρομή για τη μετάδοσή τους σε αυτό. Δημιουργούν έναν πίνακα δρομολόγησης, ο οποίος περιέχει τις διευθύνσεις όλων των συσκευών στο

δίκτυο (routing table). Η προώθηση των πακέτων από τον αποστολέα στον παραλήπτη γίνεται χρησιμοποιώντας τον πίνακα αυτό.

Οι δρομολογητές δεν μπορούν να συνδέσουν δίκτυα διαφορετικού τύπου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι πύλες (gateways). Για να λειτουργήσουν οι δρομολογητές απαιτείται η χρήση ορισμένων πρωτοκόλλων.

1. Πρωτόκολλα Δρομολογητών

Για να λειτουργήσουν οι δρομολογητές στο δίκτυο πρέπει να μπορεί να υπάρχει επικοινωνία σε όλα τα επίπεδα του OSI μοντέλου. Αυτό γίνεται χάρη στη δυνατότητα των δρομολογητών να υποστηρίζουν πρωτόκολλα επικοινωνίας, μεταφοράς και δρομολόγησης.

2. Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Υποστηρίζουν τη μεταφορά δεδομένων από ένα σταθμό ενός δικτύου σε ένα σταθμό άλλου δικτύου. Λειτουργούν στο επίπεδο δικτύου του OSI μοντέλου.

3. Πρωτόκολλα Μεταφοράς

Αντιπροσωπεύει τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρονται φυσικά οι πληροφορίες στο δίκτυο.

4. Πρωτοκόλλα δρομολόγησης

Είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία μονοπατιών μεταξύ των δρομολογητών. Υπάρχουν δύο είδη πρωτοκόλλων δρομολόγησης: τα εσωτερικού τομέα (interior domain) και τα εξωτερικού τομέα (exterior domain), όπου ως τομέα (domain) θεωρούμε μια ομάδα δικτύων, πχ ένα πανεπιστήμιο.

➤ Πύλες (Gateways)

Οι πύλες λειτουργούν και στα επτά επίπεδα του OSI μοντέλου. Ουσιαστικά χρησιμεύουν για τη μετατροπή ενός επικοινωνιακού πρωτοκόλλου σε άλλο. Πρόκειται για λογισμικό που υπάρχει εγκατεστημένο μέσα στους δρομολογητές.[3][4]

1.5. Είδη Δικτύων

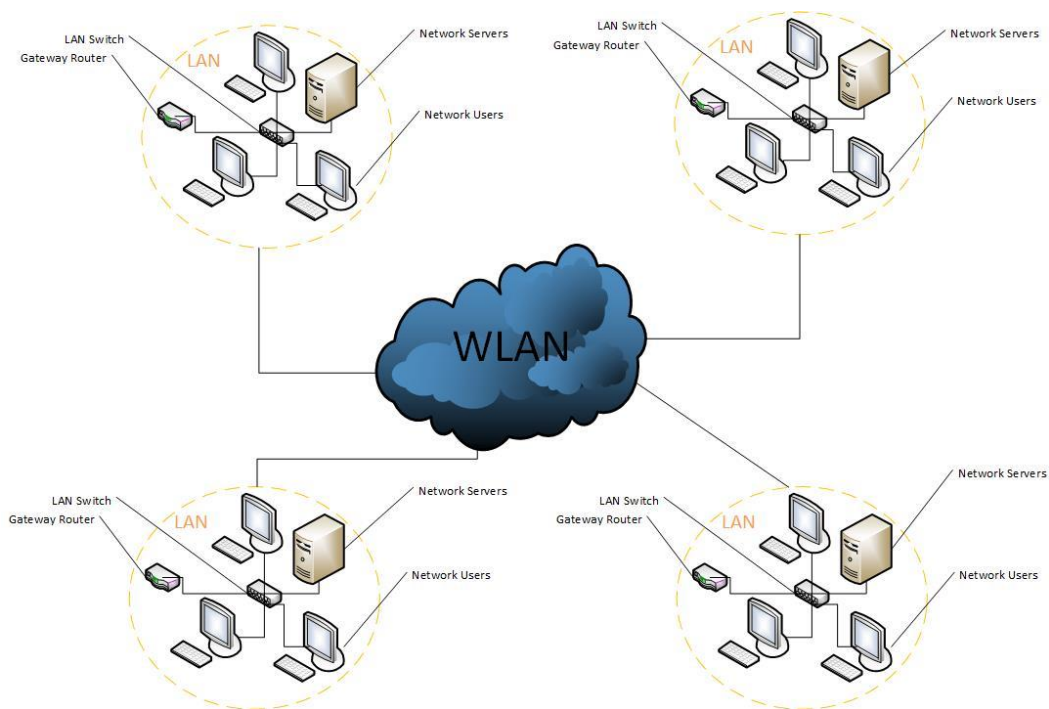
Είδη Δικτύων με βάση την γεωγραφική ανάπτυξη διακρίνονται σε :

- Δίκτυα ευρείας περιοχής (Wide Area Networks, WAN)

Που καλύπτουν αποστάσεις μερικών χιλιομέτρων (συνήθως άνω των 5 km) στην ίδια πόλη, μέχρι χιλιάδων χιλιομέτρων σε διαφορετικές πόλεις - κράτη - ηπείρους. Αποτελούνται από υπολογιστές, τηλεπικοινωνιακές συσκευές και γραμμές. Παραδείγματα τέτοιων δικτύων είναι τα δίκτυα των αεροπορικών εταιρειών, τα τραπεζικά δίκτυα, τα δημόσια δίκτυα δεδομένων κλπ.

- Δίκτυα μικρών αποστάσεων ή τοπικά δίκτυα (Local Area Networks, LAN)

Που καλύπτουν μικρές αποστάσεις (μερικών εκατοντάδων μέτρων ή λίγων χιλιομέτρων) και περιορίζονται στα πλαίσια μιας επιχείρησης. Ο διαχωρισμός τους από τα δίκτυα ευρείας περιοχής οφείλεται στο ότι χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές λειτουργίας.



Εικόνα 3: Wide Area Network

- Αστικά Δίκτυα (Metropolitan Area Networks, MAN)

Που καλύπτουν δίκτυα που δεν ξεπερνούν τα σύνορα μιας πόλης. Είναι ταχύτερα από τα τοπικά δίκτυα και μπορούν να μεταδίδουν εικόνα, φωνή και δεδομένα αποδοτικότερα.

Με βάση τον τηλεπικοινωνιακό φορέα εξυπηρέτησης διακρίνονται σε:

- **Ιδιωτικά δίκτυα (Private Networks)**

Ανήκουν εξ ολοκλήρου σε ιδιωτικούς οργανισμούς και χρησιμοποιούν είτε αποκλειστικές γραμμές επικοινωνίας δημόσιων τηλεπικοινωνιακών φορέων (leased lines) χωρίς να τις μοιράζονται με άλλους χρήστες ή ιδιόκτητες γραμμές επικοινωνίας.

- **Δημόσια δίκτυα (Public Networks)**

Που εξυπηρετούν τις διασυνδέσεις μεταξύ απομακρυσμένων σημείων. Χρησιμοποιούνται όταν η απόσταση είναι μεγάλη και καθίσταται απαγορευτική, λόγω κόστους, η χρήση αποκλειστικών γραμμών ή όταν ο φόρτος μεταξύ των σημείων δεν είναι μεγάλος και επιτυγχάνεται έτσι μεγάλη ταχύτητα μεταφοράς.[3][4]

1.6. Υλοποίηση της Διασύνδεσης

Για να επικοινωνήσουν δύο υπολογιστικά συστήματα πρέπει να υπάρξει μεταξύ τους φυσική και λογική διασύνδεση.

I. Διασύνδεση σε Φυσικό επίπεδο. Η διασύνδεση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας:

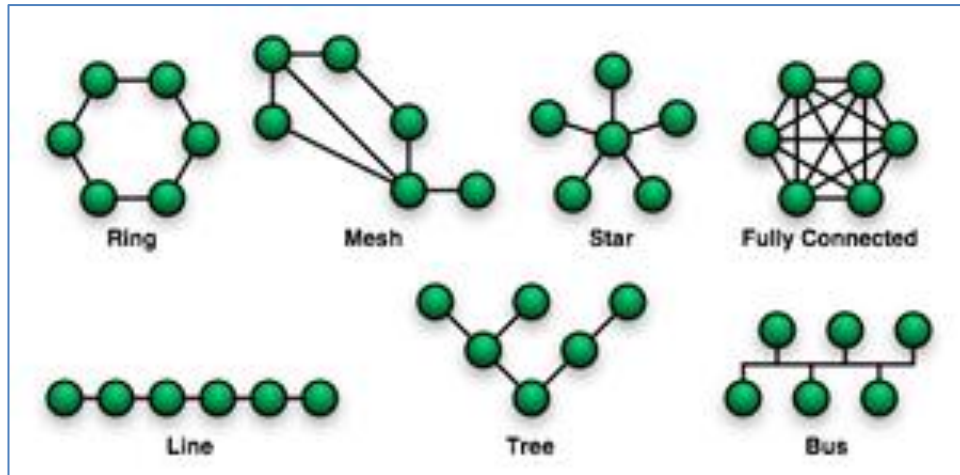
- **Φυσικό Μέσο Μετάδοσης**

Είναι το μέσο ή ο φορέας που διακινεί την πληροφορία. Τα πιο συνηθισμένα μέσα είναι το ομοαξονικό καλώδιο, το ζεύγος συνεστραμμένων καλωδίων και οι οπτικές ίνες. Κάθε μέσο έχει τα δικά του φυσικά χαρακτηριστικά, εύρος ζώνης και ανοχή στον θόρυβο επηρεάζοντας άμεσα τον τρόπο και την ταχύτητα μετάδοσης.

- **Τοπολογία Δικτύου**

Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο διασυνδέονται μεταξύ τους οι συσκευές του δικτύου. Η πιο απλή είναι η σύνδεση σημείο με σημείο. Οι υπόλοιπες τοπολογίες χαρακτηρίζονται σαν δίκτυα ακρόασης, όπου κάθε κόμβος συνδέεται με όλους τους υπόλοιπους. Τέτοιες τοπολογίες είναι:

- αρτηρίας ή διαύλου (bus)
- δακτυλίου (ring)
- αστέρα (star)
- δένδρου (tree)
- δικτυωτή (mesh)

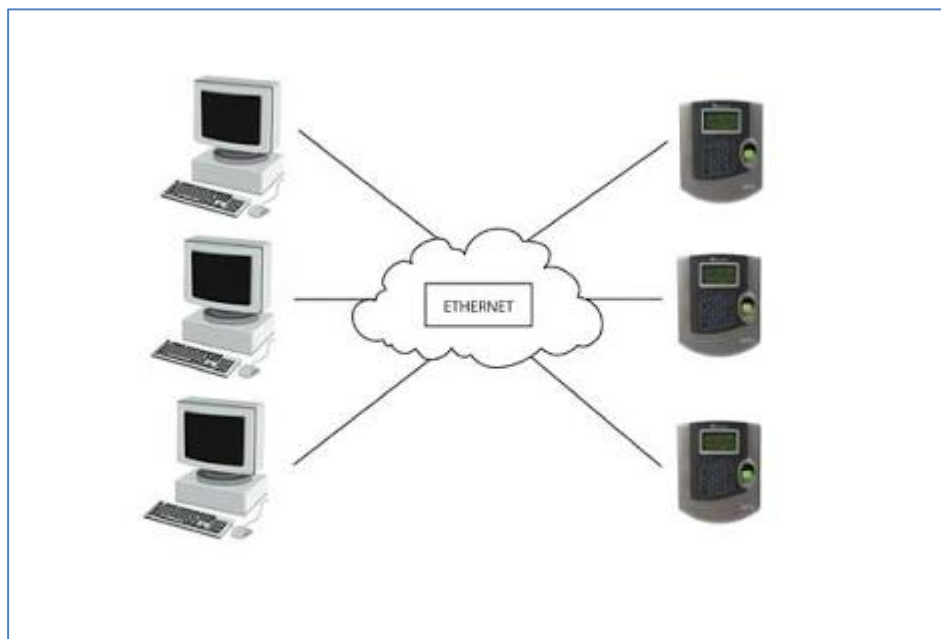


Εικόνα 4: Τοπολογίες Δικτύου

- Μέθοδος πρόσβασης στο μέσο

Στα δίκτυα ακρόασης, όπου όλοι οι κόμβοι έχουν πρόσβαση σε κοινό μέσο, απαιτείται μια μέθοδος που θα εξασφαλίζει ποιος κόμβος μεταδίδει κάθε φορά. Οι βασικές μέθοδοι είναι 3 :

- με ανταγωνισμό (π.χ. Ethernet)
- με διαβούλευση (π.χ. Token Ring)
- με πολυπλεξία (π.χ. Time Division Multiplexing)



Εικόνα 5: Διασύνδεση Ethernet

- Τεχνική Μετάδοσης και κωδικοποίησης των δεδομένων

Η πληροφορία, προκειμένου να μεταδοθεί, πρέπει να μετατραπεί στη μορφή που το μέσο μπορεί να μεταδώσει. Οι κυριότερες τεχνικές μετάδοσης είναι:

- βασικής / ευρείας ζώνης
- ψηφιακού / αναλογικού σήματος
- διαμόρφωση / αποδιαμόρφωση
- σύγχρονη / ασύγχρονη

- Ταχύτητα μετάδοσης

Μετρείται σε bits/sec και εξαρτάται από το μέσο και την τεχνική μετάδοσης, το εύρος ζώνης και τη μέθοδο πρόσβασης στο μέσο.

- Εξοπλισμός διασύνδεσης

Είναι τα εξαρτήματα που συνδέουν τις συσκευές με το μέσο επικοινωνίας.

- II. Διασύνδεση σε Λογικό επίπεδο. Εκτός από τη φυσική διασύνδεση πρέπει να δημιουργηθεί μια λογική σύνδεση μεταξύ των κόμβων που θα επικοινωνήσουν. Η σύνδεση πρέπει να περιλαμβάνει τις εξής λειτουργίες:

- αποκατάσταση σύνδεσης

Υλοποιείται με μηχανισμούς λογικής σύνδεσης και ανεύρεσης του κόμβου προορισμού μέσω διευθυνσιοδότησης.

- μεταφορά δεδομένων

Υλοποιείται με λειτουργίες κατακερματισμού της προς μετάδοση πληροφορίας σε πακέτα δεδομένων, με την δρομολόγηση των πακέτων, την ανίχνευση λαθών και την επαναμετάδοση, τον έλεγχο ροής και ακολουθίας των πακέτων και την επανασυναρμολόγηση της πληροφορίας στον κόμβο προορισμού.

- τερματισμός σύνδεσης

Υλοποιείται με μηχανισμούς τερματισμού της σύνδεσης.

Όλες οι διασυνδέσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση πρωτοκόλλων επικοινωνίας τα οποία, ανεξάρτητα της αρχιτεκτονικής που χρησιμοποιείται, οργανώνονται σε ομάδες.[3][4]

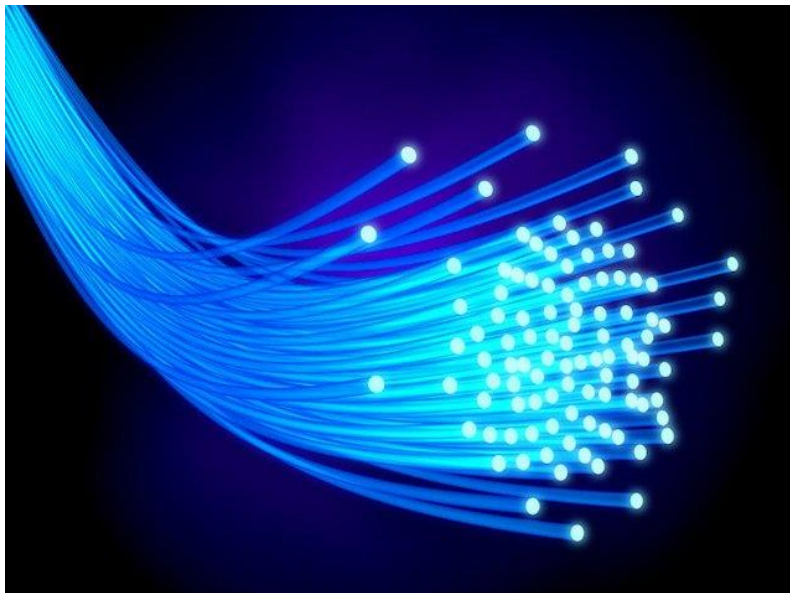
2.Οπτικές Τεχνολογίες

2.1. Οπτικές ίνες - Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό, τα καλώδια κατασκευάζονται από χαλκό ή κράματά του. Όμως, ο χαλκός παράγεται σε λίγες μόνο χώρες του κόσμου. Έτσι οι υπόλοιπες χώρες είναι εξαρτημένες από αυτές που τον παράγουν. Οι ερευνητές ωθήθηκαν στο να προτείνουν πιο συμφέρουσες εναλλακτικές λύσεις παρακινούμενοι και από την προσπάθεια απεξάρτησης από τις χώρες παραγωγής χαλκού και από την προσπάθεια αποτροπής υποκλοπών στις τηλεπικοινωνίες καθώς και μεταφοράς μεγαλύτερου «όγκου» πληροφοριών. Έτσι οδηγηθήκαμε στην κατασκευή των οπτικών ινών.

Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτές κυλινδρικές ίνες γυαλιού ή πλαστικού με διάμετρο μικρότερη των 8μm (δηλαδή πιο λεπτές από μία τρίχα). Είναι διαφανείς και εύκαμπτες.

Με τη βοήθεια των οπτικών ινών μπορούμε να «αναγκάσουμε» μία φωτεινή δέσμη να ακολουθήσει όποια διαδρομή επιθυμούμε. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι, όπως με ένα εύκαμπτο λάστιχο ποτίσματος μπορούμε να οδηγήσουμε το νερό από τη βρύση σε ένα σημείο του κήπου μας, έτσι και με τις οπτικές ίνες μπορούμε να «οδηγήσουμε» το φως από μία ακίνητη πηγή σε οποιοδήποτε σημείο θέλουμε. Γι' αυτό, λέμε ότι μία οπτική ίνα είναι ένας **φωτοαγωγός** ή **φωτοοδηγός**. [5][6]

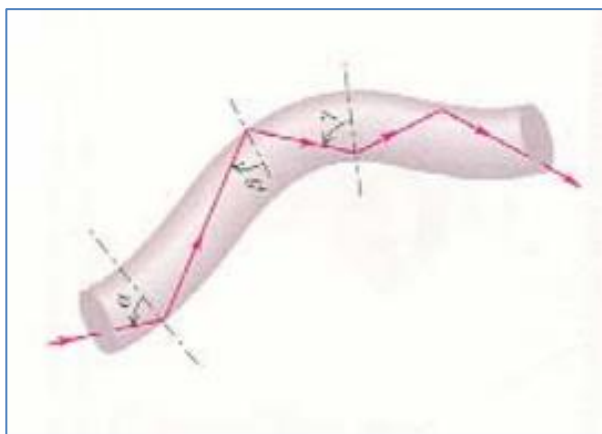


Εικόνα 6: Οπτικές Ίνες

2.1.1 Πώς λειτουργούν

Κλείνουμε ένα λαμπτήρα σε ένα αδιαφανές κουτί και τον ανάβουμε. Αυτός δε φωτίζει το περιβάλλον. Τώρα με μία λεπτή βελόνα ανοίγουμε μία οπή στο κουτί. Από αυτό ξεπηδά μία λεπτή ακτίνα φωτός, που διαδίδεται ευθύγραμμα.

Στη συνέχεια παίρνουμε μία οπτική ίνα και τη «σφηνώνουμε» στην οπή. Το φως που φτάνει στην άκρη της ίνας προσπίπτει στην κυλινδρική της επιφάνεια, από μέσα, με γωνία μεγαλύτερη από την οριακή γωνία και παθαίνει ολική ανάκλαση. Έτσι το φως μετά από συνεχείς ολικές ανακλάσεις βγαίνει από το άλλο άκρο της οπτικής ίνας, ακόμη κι αν αυτή είναι καμπυλωμένη.



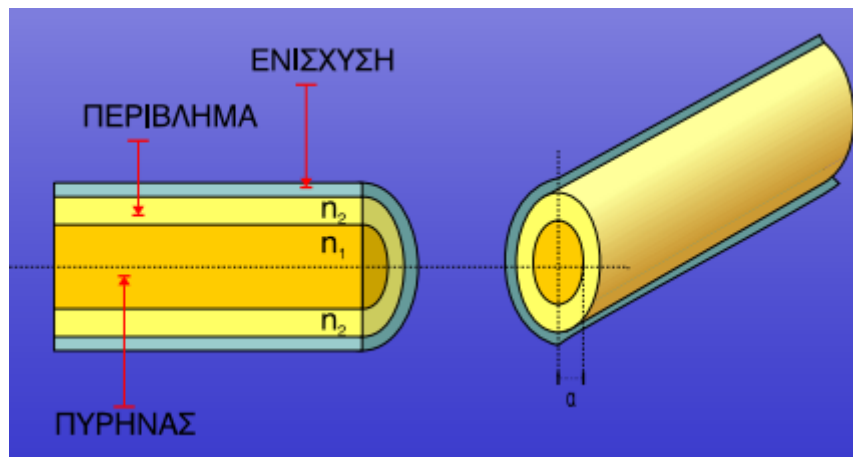
Εικόνα 7: Ολικές Ανακλάσεις στην Οπτική Ίνα

Στην πράξη, χρησιμοποιούμε δέσμη οπτικών ινών. Αν οι ίνες αποτελούνταν μόνο από ένα υλικό, τότε το φως που «ταξιδεύει» στο εσωτερικό τους θα περνούσε, όταν θα έρχονταν σε επαφή, από τη μία ίνα στην άλλη. Γι' αυτό κάθε ίνα επικαλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα υλικού μικρότερου δείκτη διάθλασης ή με πολλά λεπτά στρώματα, έτσι ώστε κάθε επόμενο στρώμα να έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από το προηγούμενο. Τέλος στο σύστημα της γυάλινης ίνας τοποθετείται ένα περίβλημα που την προστατεύει και την κάνει πιο ανθεκτική σε μηχανικές καταπονήσεις.

Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, κάθε οπτική ίνα αποτελείται από τρία μέρη:

1. Την κεντρική γυάλινη κυλινδρική ίνα, που ονομάζεται **πυρήνας** και είναι το τμήμα στο οποίο διαδίδεται το φως.
2. Την επικάλυψη (απλή ή πολλαπλή), που είναι ένας ομόκεντρος με τον πυρήνα κύλινδρος. Έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα, για να παθαίνει το φως συνεχείς ολικές ανακλάσεις. Η επικάλυψη αυτή ονομάζεται **μανδύας**.

3. Το **περίβλημα**, που είναι ένα αδιαφανές πλαστικό.



Εικόνα 8: Δομή Οπτικής Ίνας

Το φως κατά το «ταξίδι» του σε μία οπτική ίνα εξασθενεί. Αυτό συμβαίνει συνήθως για τους παρακάτω λόγους:

1. Λόγω **απορρόφησης**, που οφείλεται στις ξένες προσμείξεις που υπάρχουν στο γυαλί.
2. Λόγω **σκέδασης** το φως διεισδύει στο μανδύα και διασκορπίζεται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα, αν στην οπτική ίνα υπάρχουν συνδέσεις.
3. Λόγω **κακής κατασκευής** υπάρχουν στη διάμετρο του πυρήνα, για παράδειγμα, μικροδιακυμάνσεις.
4. Λόγω **μεγάλης καμπής** της οπτικής ίνας.[5][6]

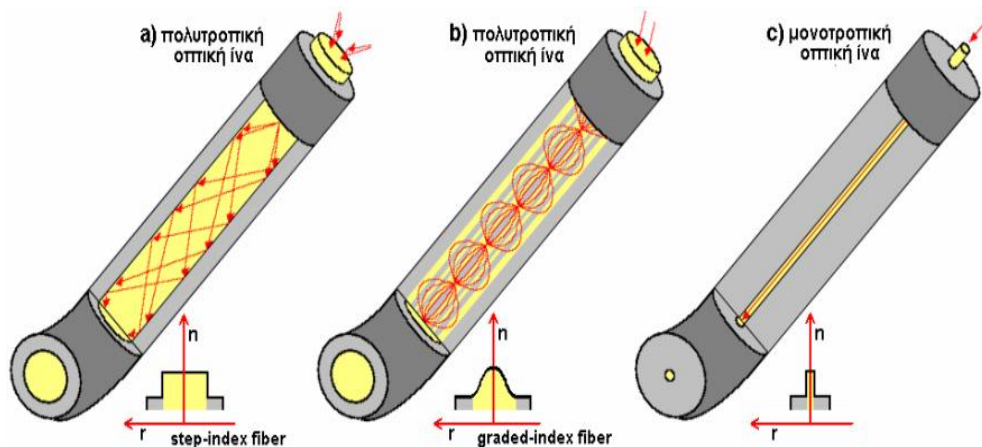
2.1.2 Είδη Οπτικών Ινών

Με την πάροδο των χρόνων έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι οπτικών ινών που ο κάθε ένας υποστηρίζει τις ιδιαίτερες απαιτήσεις διάφορων τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών. Για όλους τους τύπους των οπτικών ινών υπάρχουν διεθνή πρότυπα στα οποία προδιαγράφονται τα χαρακτηριστικά μετάδοσης καθώς και τα γεωμετρικά, μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά αυτών. Οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το αν υποστηρίζουν έναν ή πολλούς ρυθμούς μετάδοσης:

- **Απλού τύπου (Single mode):** Οι οπτικές ίνες απλού τύπου ή μονοτροπικές ίνες έχουν διαστάσεις μέχρι 10 μ m. Τα κύματα φωτός ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή και τα δεδομένα μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις.
- **Πολλαπλού τύπου (Multi-mode):** Οι οπτικές ίνες πολλαπλού τύπου ή πολυτροπικές ίνες έχουν διαστάσεις από 50 – 100 μ m, είναι πιο "χοντρές" από τις απλού τύπου, αλλά μπορούν να στείλουν

παράλληλα, σε ξεχωριστό μονοπάτι, πολλά κύματα φωτός. Το κάθε κύμα φωτός, εισέρχεται στην οπτική ίνα υπό ελαφρώς διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα, και ακολουθεί το δικό του μονοπάτι μέσα της, μέσω των διαδοχικών ανακλάσεων στο περίβλημα. Αυτό συμβαίνει παράλληλα με πολλά κύματα φωτός (όλα σε διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα) κι έτσι μπορούμε να στείλουμε παράλληλα τεράστιο όγκο δεδομένων.

- **Ίνα κλιμακωτού δείκτη διάθλασης:** Στην πιο απλή μορφή της, μία οπτική ίνα αποτελείται από έναν κυλινδρικό πυρήνα από γυαλί πυριτίου, ο οποίος περιβάλλεται από ένα περίβλημα με δείκτη διάθλασης μικρότερο από εκείνο του πυρήνα. Εξαιτίας της απότομης αλλαγής του δείκτη διάθλασης στην επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος, οι ίνες αυτές ονομάζονται ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης.
- **Ίνα βαθμιαίου δείκτη διάθλασης:** Στις ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης, η ίνα περιβάλλεται από ένα περίβλημα με δείκτη διάθλασης μικρότερο από εκείνο του πυρήνα. Ακόμα, ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα στις ίνες βαθμιαίου δείκτη δεν είναι σταθερός, αλλά μειώνεται σταδιακά από την τιμή του δείκτη n_1 στο κέντρο του πυρήνα, ως την ελάχιστη τιμή του n_2 στην επιφάνεια επαφής πυρήνα-περιβλήματος.[5][6]



Εικόνα 9: Είδη Οπτικών Ίνων

2.1.3 Εφαρμογές Οπτικών Ινών

Οι οπτικές ίνες βρίσκουν πάρα πολλές εφαρμογές. Οπτικές ίνες μεγάλης διαμέτρου και μικρής καθαρότητας (συνήθως πλαστικές) χρησιμοποιούνται στην κατασκευή φωτεινών επιγραφών, στη διακόσμηση και στο φωτισμό πισινών. Έτσι αποτρέπεται ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.

Δέσμη οπτικών ινών (με μία μόνο λάμπα) φωτίζει πολλές προθήκες καταστημάτων ή πολλούς πίνακες ζωγραφικής στις γκαλερί, ώστε να εξοικονομούμε ηλεκτρική ενέργεια.

Παρόμοια συστήματα χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς, για να εντοπίσουν βλάβες στο εσωτερικό των μηχανών.

Η πιο σημαντική εφαρμογή των οπτικών ινών αφορά τις τηλεπικοινωνίες. Ίσως όλοι μας έχουμε ακούσει για τη χρήση των οπτικών ινών στις ψηφιακές (digital) τηλεπικοινωνίες. Η χρήση τους έφερε την επανάσταση στο χώρο αυτό για τους λόγους που αναφέρουμε παρακάτω:

- Με τη βοήθεια μίας ίνας μπορούμε να μεταφέρουμε ταυτόχρονα και χωρίς παρεμβολές χιλιάδες τηλεφωνήματα, δεκάδες εκπομπές τηλεοπτικών καναλιών και μεγάλο αριθμό δεδομένων υπολογιστών.
- Οι διαστάσεις των καλωδίων των οπτικών ινών και το βάρος τους είναι πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα του χαλκού. Λόγου χάρη, ένα καλώδιο οπτικών ινών μπορεί να αντικαταστήσει χάλκινο καλώδιο δεκαπλάσιας, περίπου, διαμέτρου και τριανταπλάσιου, περίπου, βάρους.
- Κατά τη μεταφορά των πληροφοριών δεν έχουμε παράσιτα.
- Είναι πολύ δύσκολη η υποκλοπή (τοποθέτηση «κοριών») ή η συνακρόαση.
- Δε χρειάζονται γείωση.
- Μπορούν να παραχθούν από κάθε χώρα με συνέπεια την ανεξάρτηση της από χώρες που παράγουν χαλκό. Έτσι επιτυγχάνεται και τεχνολογική διάχυση. Στην Ελλάδα υπάρχουν εργοστάσια παραγωγής οπτικών ινών, δηλαδή επεξεργασίας του διοξειδίου του πυριτίου, με πρώτη ύλη την άμμο.

Να αναφέρουμε επίσης ότι οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα επιστημονικά όργανα ανίχνευσης παραμορφώσεων, πίεσης, θερμοκρασίας (ηφαιστειών και πυρηνικών αντιδραστήρων), καθώς και άλλων μεγεθών.

Μελλοντικά οι αεροναυπηγοί προσανατολίζονται στην κατασκευή αεροσκαφών τα οποία, αντί για μεταλλικό περίβλημα, θα έχουν περίβλημα από οπτικές ίνες και πολυμερή. Έτσι μέσω των οπτικών ινών ο πιλότος θα ενημερώνεται συνεχώς για την κατάσταση του αεροσκάφους του, για την πίεση που δέχεται, τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του, για κάποια πιθανή παραμόρφωση κτλ. Θα κατασκευαστούν δηλαδή αεροσκάφη με «δέρμα» που αισθάνεται.[5][6]

2.1.4 Πλεονεκτήματα χρήσης οπτικών ινών

Η υψηλή διείσδυση της τεχνολογίας των οπτικών ινών στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες δεν είναι τυχαία, αλλά αντίθετα οφείλεται στον μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων της, τα οποία συνοψίζονται στα εξής:

1) Χαμηλό κόστος.

Η δημιουργία ενός καλωδίου οπτικών ινών είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά, σε σχέση με ένα χάλκινο καλώδιο ίδιας απόστασης και δυνατοτήτων. Αυτό ωφελεί αρχικά τους παρόχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών, οι οποίοι με μικρότερο κόστος παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες. Τελικά, αυτό μειώνει και τις ανάγκες απόσβεσης εξόδων των παρόχων, επομένως ωφελεί και τον καταναλωτή, που επιβαρύνεται με μικρότερες χρεώσεις για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιεί.

2) Υψηλό bandwidth

Ξεπερνά κατά εκατοντάδες φορές αυτό ενός κοινού καλωδίου. Οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εξασφαλίζουν ταχύτητες της τάξεως των Gbps, που με τη σειρά τους προσφέρουν αστραπιαία μεταγωγή δεδομένων και αξιόπιστες υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω πρωτοκόλλου IP.

3) Μικρή εξασθένηση του σήματος

Χάρη στην υψηλή ποιότητα του γυαλιού που χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης. Ακόμη και αν υπάρξει εξασθένηση σήματος, αυτό ενισχύεται πολύ εύκολα μέσω των κατάλληλων ενισχυτών.

4) Μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές απώλειες σήματος, καθώς και στον τρόπο μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή με τη χρήση φωτεινής δέσμης, που απαιτεί πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το ηλεκτρικό σήμα.

5) Αμιγώς ψηφιακό σήμα

Εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα επικοινωνίας και αποφυγή προβλημάτων που θα προέκυπταν σε μια αναλογική μετάδοση. Στον κόσμο της ψηφιακής πληροφορίας, τα δεδομένα αναπαρίστανται από τους αριθμούς 0 και 1, οι οποίοι ονομάζονται bits. Το 0 ισοδυναμεί με την κατάσταση «κλειστό» και το 1 με την κατάσταση «ανοικτό». Μια ακολουθία 8 bits σχηματίζουν 1 ψηφιακή λέξη που λέγεται byte ή octet. Οι οπτικές ίνες μεταδίδουν τις φωτεινές αναλαμπές με υψηλή αξιοπιστία, μεταφέροντας τα bytes με πολύ μικρότερες αλλοιώσεις σε σχέση με αυτές ενός κοινού καλωδίου δικτύου, ή μιας ασύρματης σύνδεσης δεδομένων.

6) Υψηλή διαθεσιμότητα

Οφείλεται κυρίως στην ανθεκτική κατασκευή των σύγχρονων οπτικών καλωδίων, που μειώνει στο ελάχιστο το ενδεχόμενο εξωτερικής ζημιάς.

7) Μικρές διαστάσεις και βάρος

Καθώς ένα μικρό και ελαφρύ καλώδιο οπτικών ινών, μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από ένα μεγαλύτερο και πιο βαρύ χάλκινο καλώδιο. Έτσι, απαιτείται πολύ λιγότερος χώρος για την υλοποίηση ενός δικτύου οπτικών ινών.

2.2 Μετάδοση στα οπτικά δίκτυα

2.2.1 Οπτικός πομπός

Ο ρόλος του οπτικού πομπού είναι να μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε μια οπτική μορφή και να εισάγει το τελικό οπτικό σήμα μέσα στην οπτική ίνα η οποία χρησιμεύει σαν κανάλι επικοινωνίας. Τα βασικά μέρη ενός οπτικού πομπού είναι μια οπτική πηγή, ένας διαμορφωτής και ένας ζεύκτης με το τηλεπικοινωνιακό κανάλι.

Το κύκλωμα οδήγησης συνήθως αποτελείται από ένα τρανζίστορ και χρησιμοποιείται για να ανάβει και να σβήνει την πηγή φωτός σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Έτσι χρησιμοποιώντας το τρανζίστορ, μπορούμε να καταφέρουμε μια πολύ δυνατή πηγή φωτός να ανοίγει και να κλείνει στα χρονικά διαστήματα που εμείς επιθυμούμε. Πιο συγκεκριμένα, ο σκοπός των κυκλωμάτων οδήγησης είναι να παρέχουν ηλεκτρική ισχύ στην οπτική πηγή και να διαμορφώνουν την έξοδο του φωτός, σύμφωνα με το σήμα που πρόκειται να μεταδοθεί. Τα κυκλώματα αυτά είναι σχετικά απλά για τους πομπούς LED, αλλά γίνονται όλο και πιο περίπλοκα για οπτικούς πομπούς υψηλού ρυθμού μετάδοσης bit, οι οποίοι χρησιμοποιούν Laser με ημιαγωγούς, που πολώνονται κοντά στο επίπεδο κατωφλίου και έπειτα διαμορφώνονται μέσω ενός ηλεκτρικού σήματος, που εξαρτάται από το χρόνο. Επομένως, τα κυκλώματα οδήγησης έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν ένα σταθερό ρεύμα πόλωσης καθώς και ένα διαμορφωμένο ηλεκτρικό σήμα. Επιπλέον, συχνά χρησιμοποιείται ένας βοηθητικός βρόχος για να διατηρήσει τη μέση οπτική ισχύ.

Η οπτική πηγή μπορεί να είναι ένα LED ή ένα Laser (και είναι το κυριότερο εξάρτημα των οπτικών πομπών). Τα οπτικά συστήματα επικοινωνίας συχνά χρησιμοποιούν οπτικές πηγές με ημιαγωγούς όπως για παράδειγμα φωτοδιόδους (LED) και Laser με ημιαγωγούς, λόγω των διάφορων πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Μερικά από τα πλεονεκτήματα είναι το μικρό μέγεθος, η υψηλή απόδοση, η μεγάλη αξιοπιστία, η κατάλληλη περιοχή μηκών κύματος, η μικρή επιφάνεια εκπομπής σε σχέση με τις διαστάσεις του πυρήνα της οπτικής ίνας και η δυνατότητα άμεσης διαμόρφωσης σε σχετικά υψηλές συχνότητες και έτσι εξαλείφεται η ανάγκη χρήσης ενός εξωτερικού διαμορφωτή μέσα στον οπτικό πομπό. Η τεχνολογία βέβαια με Laser είναι πιο ακριβή και μπορεί να γίνει χρήση της για πιο μεγάλες αποστάσεις. Οι πομποί εκπέμπουν φως σε

συγκεκριμένες κυματομορφές, δηλαδή αυτοί με τα LEDs εκπέμπουν σε εύρος 850 και 1310 nm με συχνότητα περίπου 200 MHz ενώ αυτοί με τα Laser εκπέμπουν σε εύρος 1310 ή 1550nm με συχνότητα περίπου 1 GHz. Βέβαια οι ρυθμοί των δεδομένων που μπορούν να υποστηρίξουν οι σύγχρονοι πομποί είναι μέχρι 10 Gbps. Παρόλο που μερικές φορές χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός διαμορφωτής, στις περισσότερες περιπτώσεις παραλείπεται, αφού η έξοδος μιας οπτικής πηγής από ημιαγωγό μπορεί να διαμορφωθεί κατευθείαν αλλάζοντας το ρεύμα που τη διαρρέει. Μία τέτοια τεχνική απλοποιεί τη σχεδίαση του πομπού και είναι γενικά αποδοτική ως προς το κόστος. Τέλος, ο ζεύκτης καναλιών είναι τυπικά ένας μικροφακός που εστιάζει το οπτικό σήμα στο επίπεδο εισόδου της οπτικής ίνας με τη μέγιστη δυνατή απόδοση.[7][8]

2.2.2 Οπτικός δέκτης

Ο ρόλος ενός οπτικού δέκτη είναι να μετατρέπει το οπτικό σήμα πάλι σε ηλεκτρικό και να ανακτά τις πληροφορίες που έχουν μεταδοθεί μέσω ενός οπτικού συστήματος. Το βασικό του εξάρτημα είναι ένας φωτοανιχνευτής που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό παλμό μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Το ζητούμενο βέβαια είναι το μήκος κύματος που αναγνωρίζει ο δέκτης να είναι παρόμοιο μ' αυτό που στάλθηκε από τον πομπό.

Ο ζεύκτης εστιάζει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα πάνω στο φωτοανιχνευτή. Σαν φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούνται φωτοδίοδοι ημιαγωγών λόγω της συμβατότητας τους με το συνολικό σύστημα. Ο ανιχνευτής φωτός είναι συνήθως ένα φωτοτρανζίστορ ή μια φωτοδίοδος, όπου μετατρέπει την φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Η σχεδίαση του αποδιαμορφωτή εξαρτάται από τον τύπο της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται από το σύστημα οπτικών ινών. Η χρήση διαμορφώσεων FSK και PSK, που γενικά είναι κατάλληλες για σύμφωνα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, απαιτεί ετερόδυνη ή ομόδυνη τεχνική αποδιαμόρφωσης. Τέτοιοι σύμφωνοι δέκτες έχουν πολλά εξαρτήματα και είναι σχετικά ακριβοί. Συχνά, το λαμβανόμενο σήμα είναι υπό μορφή οπτικών παλμών που αναπαριστούν το bit "1" ή το bit "0" και μετατρέπονται κατευθείαν σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Η αποδιαμόρφωση γίνεται από ένα κύκλωμα λογικής επιλογής που αναγνωρίζει τα bit σαν "1" ή σαν "0" ανάλογα με το πλάτος του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ακρίβεια του κυκλώματος λογικής επιλογής εξαρτάται από το λόγο σήματος προς θόρυβο SNR, του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται στο φωτοανιχνευτή.

Οι απαιτήσεις για έναν φωτοανιχνευτή είναι παρόμοιες με εκείνες μίας οπτικής πηγής. Θα πρέπει να έχει μεγάλη ευαισθησία, γρήγορη απόκριση, χαμηλό θόρυβο, χαμηλό κόστος και μεγάλη αξιοπιστία. Τέλος, το μέγεθός του είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του πυρήνα της οπτικής ίνας.[7][8][9]

2.2.3 Οπτικοί ενισχυτές

Η παρουσία συσκευών ενίσχυσης οπτικού σήματος καθίσταται απαραίτητη, λόγω της εξασθένησής του κατά τη μετάδοσή του μέσα από την ίνα. Πριν την ανάπτυξή τους, ο μόνος τρόπος να ενισχυθεί το σήμα ήταν μέσω ηλεκτρικής αναγέννησης, δηλαδή να μετατραπεί το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, να ενισχυθεί, να ξανά μετατραπεί σε οπτικό και ακολούθως να μεταδοθεί. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε μία ξεχωριστή συσκευή (regenerator - αναγεννητή) για κάθε μήκος κύματος. Αντιθέτως, ο οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει ταυτόχρονα όλα τα μήκη κύματος σε μια ίνα. Έτσι, το κόστος της ενίσχυσης μπορεί να κατανεμηθεί σε διάφορους χρήστες ή εφαρμογές.

Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι πως, επειδή είναι αυστηρά οπτικές συσκευές, είναι ανεξάρτητες από πρωτόκολλο και ρυθμό μετάδοσης. Αυτό το γεγονός παρέχει ευελιξία στο ότι μια σύνδεση μπορεί να υποστηρίξει διάφορα πρωτόκολλα (π.χ. ATM, SONET, PPP) με οποιονδήποτε ρυθμό μετάδοσης. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως πρόκειται για μικρές σε μέγεθος συσκευές και με ελάχιστες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ κάτι που αποτελεί πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Επιπρόσθετα της χρήσης των συσκευών αυτών στις οπτικές συνδέσεις, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και για την ενίσχυση της ισχύος του σήματος μετά από διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης, οι οποίες προκαλούν απώλειες στο σύστημα. Ειδικά για την περίπτωση της τεχνολογίας WDM, η οποία επιβάλλει την εκπομπή υψηλών ρυθμών σημάτων και σε μεγάλες αποστάσεις, ο ιδανικός τύπος οπτικού ενισχυτή είναι ο Ινο-Οπτικός Ενισχυτής Ερβίου (Erbium-Doped Fiber Amplifier EDFA).[10][11]

2.2.3.1. Βασικές παράμετροι οπτικών ενισχυτών

Υπάρχουν αρκετές οπτικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα συγκεκριμένο οπτικό ενισχυτή. Για τον πρακτικό σχεδιασμό ενός οπτικού συστήματος είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι:

➤ Κέρδος

Το κέρδος ενός οπτικού ενισχυτή αναφέρεται από τον κατασκευαστή και δηλώνει τη διαφορά σε dB της ισχύος του σήματος εισόδου με τη ισχύ του σήματος εξόδου. Στον υπολογισμό του κέρδους συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες από τον απομονωτή αλλά όχι οι απώλειες από την κόλληση του ενισχυτή στη γραμμή μετάδοσης του συστήματος. Σε εργαστηριακό περιβάλλον έχει επιτευχθεί κέρδος κοντά στα 50 dB. Οι συνηθισμένοι ενισχυτές που κυκλοφορούν στην αγορά παρέχουν κέρδος κοντά στα 30 dB.

➤ Κέρδος εύρους ζώνης

Το κέρδος εύρους ζώνης μπορεί να οριστεί με διάφορους τρόπους. Η πιο σημαντική πληροφορία που μας παρέχει είναι η μέγιστη απόκλιση από το καθορισμένο κέρδος του ενισχυτή μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα μηκών κύματος. Τις περισσότερες φορές παρέχεται από τον κατασκευαστή

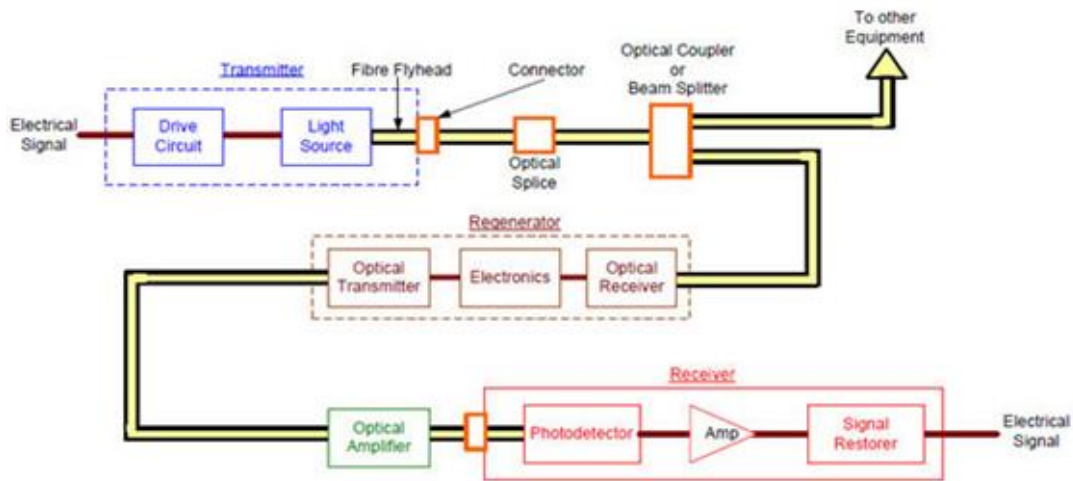
ένα διάγραμμα του κέρδους του ενισχυτή σε συνάρτηση με το μεταδιδόμενο μήκος κύματος για συγκεκριμένη τιμή ισχύος εισόδου. Το διάγραμμα αυτό μας βοηθά να επιλέξουμε το κεντρικό μήκος κύματος στο οποίο θα μεταδίδει ο πομπός.

- **Ισχύς σήματος εξόδου**

Λόγω φαινομένων κορεσμού, το κέρδος μειώνεται όταν η ισχύς εισόδου ξεπερνά κάποια συγκεκριμένη τιμή. Στην περίπτωση αυτή, ο ενισχυτής δεν είναι πια ενεργός και λέμε ότι βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το ποσό της ισχύος σήματος που μπορούμε να πάρουμε από κάποιον ενισχυτή για συγκεκριμένο επίπεδο άντλησης. Στα περισσότερα βιβλία η ισχύς εξόδου κορεσμού, ορίζεται ως η ισχύς σήματος εξόδου για την οποία το κέρδος μειώνεται κατά 3 dB από την τιμή που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής. Οι κατασκευαστές συνήθως καθορίζουν το ποσό της ισχύος εξόδου που μπορεί να αποδώσει ένας ενισχυτής σε συνάρτηση της ισχύος σήματος εισόδου. Με χρήση μεγαλύτερων επιπέδων άντλησης, μπορούμε να αυξήσουμε την ισχύ του σήματος εξόδου.

- **Συντελεστής θορύβου**

Κυριότερη συνιστώσα θορύβου είναι η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή, ASE. Κατά το φαινόμενο αυτό ένα διεγερμένο ιόν αποδιεγείρεται εξαναγκασμένα χωρίς την πρόσπτωση φωτονίου σήματος. Το ασύμφωνο φωτόνιο που παράγεται ενισχύεται κινούμενο και προς τα δυο τερματικά άκρα, με αποτέλεσμα στην έξοδο να έχουμε σήμα, άσχετο με το πραγματικό σήμα, που μπορεί να μην υπάρχει. Το σημαντικότερο μέγεθος που χρησιμοποιείται στην πράξη για το θορυβικό χαρακτηρισμό ενός οπτικού ενισχυτή είναι ο συντελεστής θορύβου. Ο συντελεστής θορύβου δίνει τη μεταβολή του σηματοθορυβικού λόγου κατά μήκος της ίνας. Καθώς ο ενισχυτής εισάγει πάντα πρόσθετο θόρυβο, είναι λογικό να αναμένουμε ότι ο συντελεστής θορύβου θα είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας, δηλαδή η ίνα δε μπορεί να βελτιώσει τον SNR του σήματος. Μπορεί να δειχτεί ότι για υψηλό σήμα εισόδου, η μεγαλύτερη πηγή θορύβου είναι ο όρος που προκύπτει από την αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας του ενισχυτή. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε, ότι για ένα συγκεκριμένο σήμα εισόδου, υπάρχει ένα βέλτιστο ζεύγος (μήκος ίνας, ισχύς άντλησης), για το οποίο ο συντελεστής θορύβου παίρνει την ελάχιστη τιμή του. Αυξάνοντας το μήκος της ίνας και την ισχύ άντλησης θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ASE προς την αντίθετη κατεύθυνση και τον κορεσμό του κέρδους στο μπροστινό μέρος όπου το σήμα είναι χαμηλό.[12][13]



Εικόνα 10: Οπτικό Επικοινωνιακό Σύστημα

2.3. Οπτική Πολυπλεξία

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της οπτικής ίνας είναι το τεράστιο εύρος ζώνης, με αποτέλεσμα να αποτελεί ιδανικό μέσο για τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, που χαρακτηρίζονται από την έκρηξη του Internet και τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για προσφορά πολυμεσικής πληροφορίας.

Συγκεκριμένα, η μεγάλη συχνότητα του οπτικού φέροντος στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας δημιουργεί ένα τεράστιο διαθέσιμο εύρος ζώνης, που μπορεί να φτάσει τα 50 THz και το οποίο, όμως, στην πράξη δεν αξιοποιείται πλήρως. Τα φαινόμενα της διασποράς και της μη γραμμικότητας στην οπτική ίνα καθώς και η ταχύτητα των ηλεκτρονικών διατάξεων, όπου οι λειτουργίες όπως η μεταγωγή (switching), η δρομολόγηση (routing) και η αναγέννηση των οπτικών παλμών (pulse regeneration) πραγματοποιούνται στην ηλεκτρονική περιοχή, περιορίζουν το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης με τον οποίο ένας τελικός χρήστης αποκτά πρόσβαση στο δίκτυο σε μερικά μόλις Gbps.

Λύση στο πρόβλημα της περιορισμένης εκμετάλλευσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης των οπτικών ινών δίνεται με τη μετάδοση πολλαπλών οπτικών καναλιών μέσω της ίδιας ίνας.

Οι τεχνικές πολυπλεξίας καναλιών, που επιτυγχάνουν μεγαλύτερη χωρητικότητα ενός οπτικού δικτύου επικοινωνιών χωρίς την εγκατάσταση νέων ινών είναι οι εξής:

- Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM)

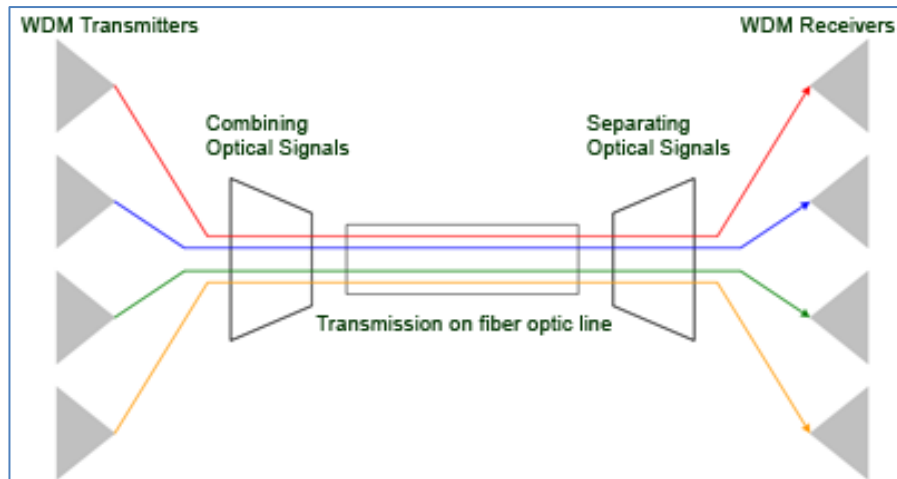
- Οπτική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Optical Time Division Multiplexing-OTDM)
- Τεχνική πολυπλεξίας με διαίρεση κώδικα (Optical Code Division Multiplexing-OCDM)

Τα οπτικά συστήματα που κάνουν χρήση αυτών των τεχνικών οπτικής πολυπλεξίας ονομάζονται πολυκαναλικά συστήματα επικοινωνίας και προκάλεσαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά τη διάρκεια του 1990.

2.3.1 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM)

Η Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM) μπορεί να οριστεί σαν μια διαδικασία που έχει στόχο την αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης σε μια οπτική ζεύξη μέσω της χρησιμοποίησης πολλών καναλιών σε διαφορετικά και προκαθορισμένα φέροντα μήκη κύματος. Τα διάφορα φέροντα αυτά μπορούν να έχουν διαφορετικούς και ανεξάρτητους μεταξύ τους ρυθμούς μετάδοσης που στην συνέχεια πολυπλέκονται με οπτικό τρόπο και μεταδίδονται. Ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σχεδίαση συστημάτων WDM απαιτείται και καθοριστικοί παράγοντες για αυτό είναι το εύρος των καναλιών καθώς και η μεταξύ τους απόσταση, η ολική οπτική ισχύς που εισάγεται προς μετάδοση, τα μη – γραμμικά φαινόμενα που προκύπτουν καθώς και οι περιορισμοί και οι ατέλειες που έχουν σαν αίτιο την οπτική ενίσχυση με την βοήθεια οπτικών ενισχυτών.

Η τεχνική WDM γεφυρώνει το τεράστιο χάσμα μεταξύ ηλεκτρονικού και οπτικού ρυθμού μετάδοσης, πολυπλέκοντας διάφορα WDM κανάλια στην ίδια οπτική ίνα και επιτρέποντας στον τελικό χρήστη να μεταδίδει ανεξάρτητα από τους άλλους. Πιο συγκεκριμένα, οι έξοδοι των πομπών που ο καθένας λειτουργεί στη δική του φέρουσα συχνότητα και μπορεί να υποστηρίξει διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης, διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας ανεξάρτητα ηλεκτρικά κύματα bit και στη συνέχεια πολυπλέκονται για να μεταδοθούν ταυτόχρονα και ανεξάρτητα μέσα στην οπτική ίνα. Κάθε κανάλι, λοιπόν, λειτουργεί σε διαφορετική περιοχή του οπτικού φάσματος με αποτέλεσμα την αποφυγή των μεταξύ τους παρεμβολών.



Εικόνα 11: Μεταδότης με πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος

2.3.2 Οπτική πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (OTDM)

Η τεχνική OTDM προσφέρει ικανοποιητικές λύσεις στα προβλήματα της WDM τεχνικής, υποστηρίζοντας παράλληλα πολύ υψηλές χωρητικότητες. Συγκεκριμένα, σε ένα κανάλι που λειτουργεί σε μια ορισμένη συχνότητα παρέχεται η δυνατότητα επίτευξης ρυθμού μετάδοσης έως και 1Tbps.

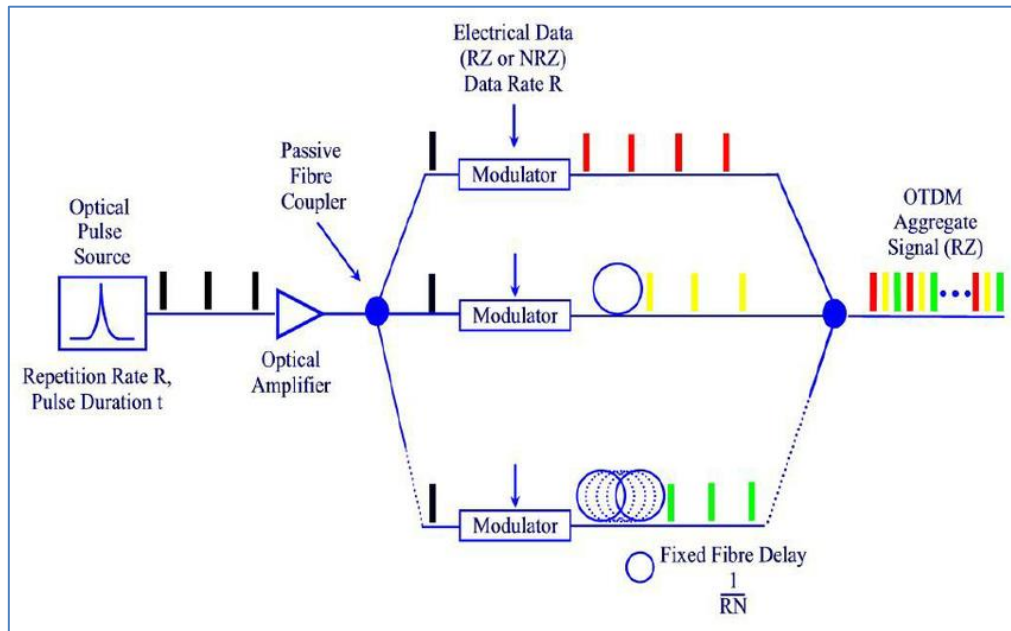
Με τη χρήση της OTDM, οπτικά σήματα N με συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης B χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα συχνότητα και πολυπλέκονται σχηματίζοντας ένα οπτικό σήμα με ρυθμό μετάδοσης NB .

Πιο συγκεκριμένα, ένα laser παράγει περιοδικούς παλμούς για κάθε ρυθμό μετάδοσης κάθε οπτικού σήματος και στην έξοδο του laser παράγονται N ανεξάρτητες ηλεκτρικές ροές bit με ρυθμό μετάδοσης B , οι οποίες πολυπλέκονται διαμορφώνοντας το τελικό σύνθετο οπτικό σήμα με ρυθμό NB .

Απαραίτητη για τη χρησιμοποίηση συστημάτων που χρησιμοποιούν την OTDM είναι και η ανάπτυξη οπτικών δεκτών νέου τύπου, όπου η αποπολυπλεξία πραγματοποιείται οπτικά. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών αποπολυπλεξίας αποτελεί η ύπαρξη ενός σήματος χρονισμού, δηλαδή μιας σειράς περιοδικών παλμών με ρυθμό μετάδοσης ίσο προς αυτόν ενός απλού καναλιού.

Η OTM τεχνική παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την WDM, τα οποία σχετίζονται με τη δυνατότητα απλούστερης διαχείρισης του δικτύου και τη μεγαλύτερη προσφορά χωρητικότητας και την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας. Επιπρόσθετα, επιτυγχάνεται μείωση των προβλημάτων εξαιτίας των μη γραμμικών φαινομένων, καθώς πλέον γίνεται χρήση ενός μόνο μήκους κύματος από τα πολυπλεγμένα οπτικά σήματα, ενώ παράλληλα η απαίτηση για μία μόνο ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη καθιστά την τεχνική OTDM οικονομικά πιο συμφέρουσα.

Στο σημείο αυτό χρειάζεται να τονισθεί πως οι τεχνικές WDM και OTDM αποτελούν δύο συμπληρωματικά και όχι ανταγωνιστικά είδη πολυπλεξίας, που ο συνδυασμός τους αποτελεί τη βέλτιστη λύση των σύγχρονων οπτικών συστημάτων επικοινωνίας για αύξηση της απόδοσης τους μέσα από την χρήση λίγων οπτικών καναλιών με υψηλές ταχύτητες μετάδοσης.



Εικόνα 12: Μοντέλο μετάδοσης με διαίρεση χρόνου

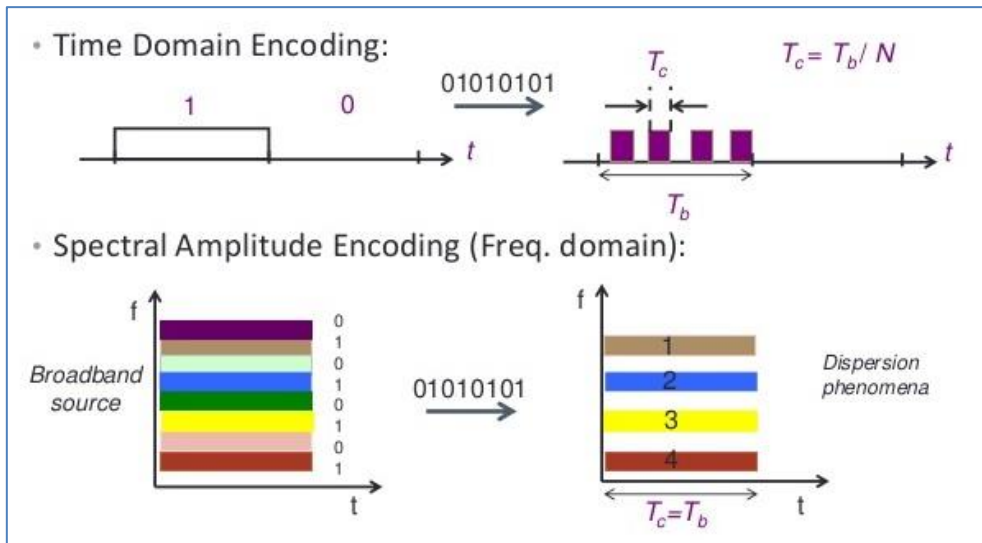
2.3.3 Οπτική πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα

Η τεχνική OCDM επιτρέπει στους χρήστες να έχουν τυχαία προσπέλαση σε οποιοδήποτε κανάλι και σε αυθαίρετο χρόνο. Το σήμα κάθε καναλιού κωδικοποιείται με τη χρήση ενός οπτικού κώδικα ανεξάρτητου του ίδιου του σήματος, οπότε και προκαλείται επέκταση του φάσματος του οπτικού σήματος σε μία σχετικά μεγάλη περιοχή συγκριτικά με το ελάχιστο εύρος ζώνης που απαιτείται για τη μετάδοση.

Η τεχνική αυτή παρέχει τη δυνατότητα κωδικοποίησης των bit των δεδομένων ενός καναλιού είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας ή σε συνδυασμό και των δύο. Κατά την κωδικοποίηση στο πεδίο του χρόνου, κάθε bit των δεδομένων χωρίζεται με βάση το χρησιμοποιούμενο οπτικό κώδικα σε μικρότερες χρονικές μονάδες, τα chips, με αποτέλεσμα ο ενεργός ρυθμός μετάδοσης να αυξάνεται κατά M , όπου M το μήκος του κώδικα σε bits. Κατά τη δεύτερη μέθοδο, στο πεδίο της συχνότητας, το μεταδιδόμενο bit αντιστοιχίζεται σε μία μοναδική ομάδα από μήκη κύματος που αποτελούν τον αντίστοιχο κώδικα, ενώ με τη χρήση του

συνδυασμού των παραπάνω τεχνικών, το bit κωδικοποιείται σε μια διαδοχή από chips με διαφορετικά μήκη κύματος.

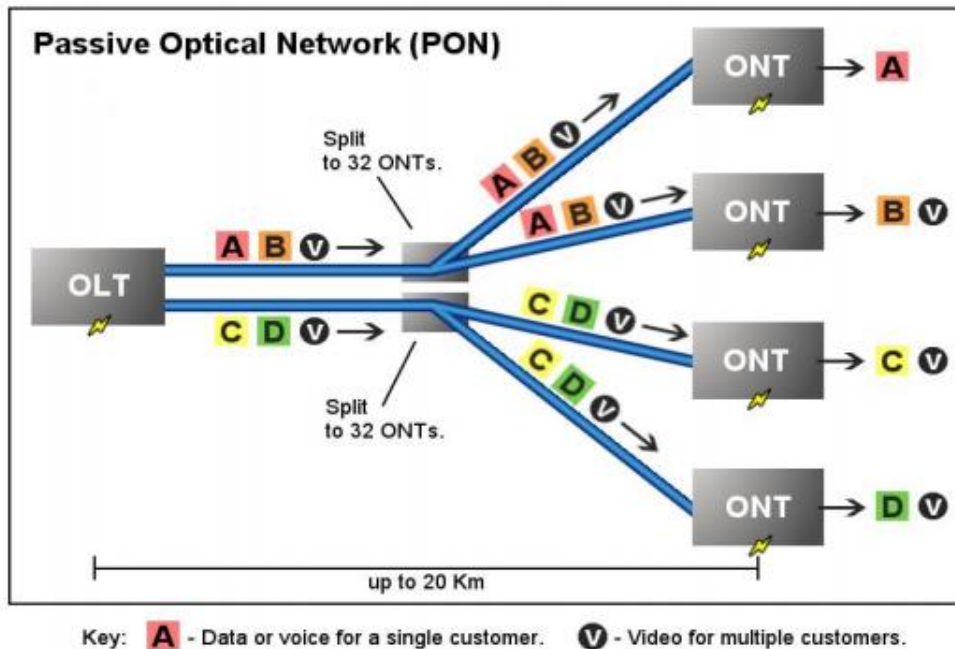
Με τη χρήση της τεχνικής OCDM επιτυγχάνεται η ασφάλεια των δεδομένων και αποφεύγεται η ανάμειξη των σημάτων, καθώς δεδομένου ενός κωδικοποιητή που μεταδίδει ένα σήμα με βάση έναν ορισμένο οπτικό κώδικα, μόνο ένας αποκωδικοποιητής εφοδιασμένος με τον ίδιο κώδικα μπορεί να ανακτήσει το αρχικό σήμα σωστά. Για το λόγο αυτό, ο κώδικας ονομάζεται και κλειδί, αφού εξασφαλίζει ένα είδος ταυτότητας για το σήμα.[14]



Εικόνα 13: Πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα

3. Παθητικά οπτικά δίκτυα (PONS)

Τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, είναι αυτά που στους κόμβους διανομής χρησιμοποιούν παθητικό εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν διαχωριστές για την πολλαπλή μετάδοση ενός σήματος σε πολλές Οπτικές Μονάδες Δικτύου, τυπικά 32. Αποτελούνται από έναν Τερματιστή Οπτικής Γραμμής (Optical Line Termination, OLT) στο κεντρικό γραφείο του φορέα παροχής υπηρεσιών και τις οπτικές μονάδες δικτύου (ONUs) κοντά στους τελικούς χρήστες. Αυτό επιτρέπει την εξοικονόμηση σε οπτικές ίνες αλλά και σε εξοπλισμό κυρίων καταναμητών, που χρησιμοποιείται στις σημείο-προς-σημείο συνδέσεις.



Εικόνα 14: Μοντέλο Παθητικού Οπτικού Δικτύου (Ροή Καθόδου)

Τα PONs έχουν μια τοπολογία δέντρου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η κάλυψή τους με χρήση ελάχιστων διαχωριστών, μειώνοντας κατά συνέπεια τις απώλειες οπτικής ισχύος. Αυτό είναι σημαντικό, καθώς το παθητικό δίκτυο διανομής δεν έχει κανέναν ενισχυτή ή αναγεννητή.

Υπάρχουν τρεις τυποποιημένες εκδόσεις PON:

- Ethernet PON (EPON, IEEE 802.3ah),
- ATM PON και Broadband PON (APON-BPON, ITU-T G.983) και
- Gigabit PON (GPON, ITU-T G.984)

Όλες χρησιμοποιούν δύο μήκη κύματος, ένα για την προς τα κάτω και ένα για την προς τα πάνω μετάδοση δεδομένων. Αυτά τα μήκη κύματος μοιράζονται χρονικά μεταξύ των χρηστών, με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDMA - PONs). Το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά χρήστη περιορίζεται έτσι από αυτό το μοίρασμα. Ένα τρίτο μήκος κύματος μπορεί προαιρετικά να χρησιμοποιηθεί για την προς τα κάτω μετάδοση αναλογικής τηλεόρασης (RF). Η Πολυπλεξία Μήκους Κύματος (WDM) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα PON για να αυξήσει τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου.

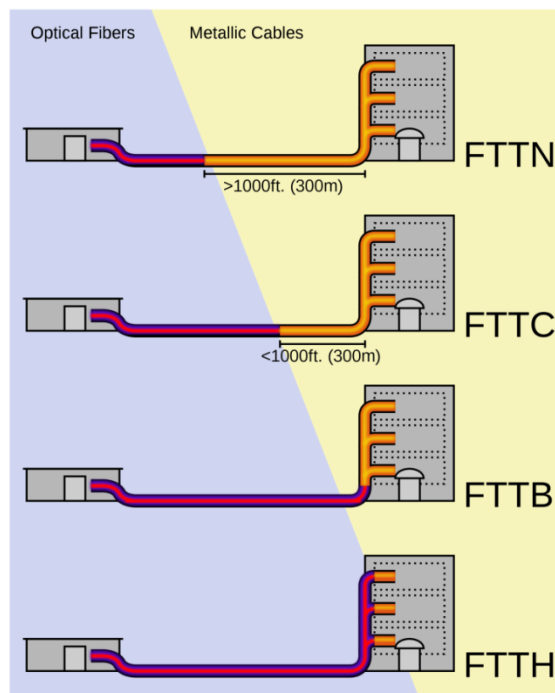
Ο γενικός όρος **Fiber to the x (Οπτική μέχρι το x)** ή **FTTx** περιγράφει κάθε αρχιτεκτονική δικτύου που χρησιμοποιεί οπτικές ίνες για να αντικαταστήσει ολόκληρο ή μέρος του τοπικού βρόχου που χρησιμοποιείται για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.

Οι τέσσερις τεχνολογίες που ανήκουν στην οικογένεια FTTx είναι οι εξής:

- Fiber to the Node ή Fiber to the Neighborhood (FTTN) ή Fiber to the Cabinet (FTTCab)
- Fiber to the Curb (FTTC)
- Fiber to the Building (FTTB)
- Fiber to the Home (FTTH)

Στην πράξη η διαφορά ανάμεσα στο FTTN και το FTTC είναι μικρή, και συχνά το δεύτερο θεωρείται υποκατηγορία του πρώτου.

Χρησιμοποιείται επίσης ο όρος **Fiber to the Premises (FTTP)**, για τον οποίο όμως υπάρχουν αντικρουόμενοι ορισμοί. Κάποιοι ταυτίζουν το FTTP με το FTTB, άλλοι το ταυτίζουν με το FTTH, και άλλοι το θεωρούν γενικότερο όρο που περιλαμβάνει και το FTTB και το FTTH.[5][15]

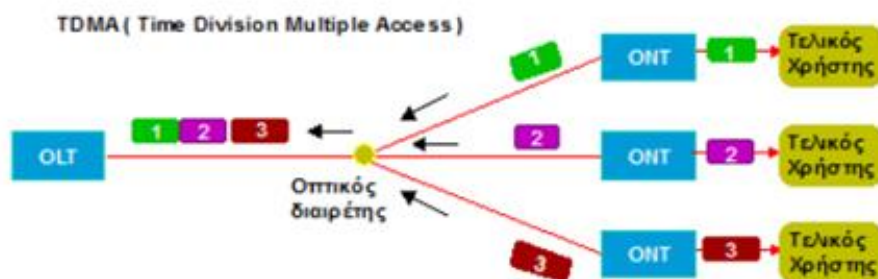


Εικόνα 15: Μοντέλο FTTX

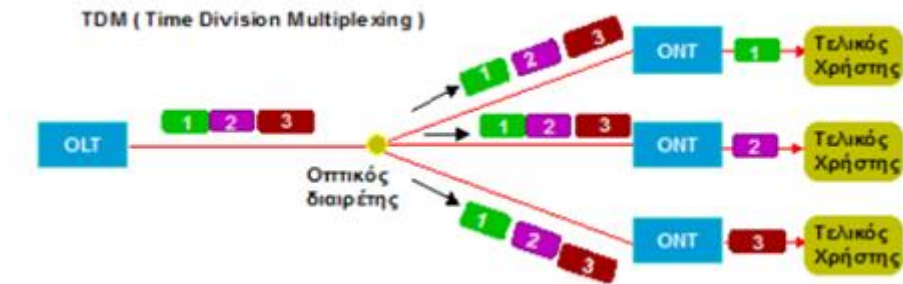
3.1 APON

Το 1995, οι πάροχοι των ΗΠΑ ένωσαν τις δυνάμεις τους στην FSAN για να προτυποποιήσουν την τεχνολογία PON. Τα αποτελέσματα των προσπαθειών τους τυποποιήθηκαν στις συστάσεις της ITU G.983 και G.984. Η ελλοχεύουσα τεχνολογία μετάδοσης για την πρώτη κατηγορία προτύπου βασίζεται στην ATM-ενθυλάκωση. Λόγω αυτού, ονομάστηκε ATM PON (APON) και θεωρήθηκε τότε ως η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις που είχαν οι χρήστες όσον αφορά τις υπηρεσίες. Η θεώρηση αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι εκείνη την εποχή, οι λογικότερες και πιο συμφέρουσες επιλογές ήταν, για τον τρόπο μεταφοράς δεδομένων το ATM και για την τοπολογία των δικτύων πρόσβασης τα PONs. Το ATM θεωρείτο το καταλληλότερο για να υποστηρίξει πολλαπλά πρωτόκολλα και τα PONs 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 A-PON.

Στο A-PON, με κριτήρια την απλότητα αλλά και το κόστος, επιλέχθηκε η τεχνική TDM για την προς τα κάτω (downstream) ροή και για την πολλαπλή προσπέλαση στο μέσο. Για την προς τα πάνω (upstream) ροή επιλέχθηκε η τεχνική TDMA. Τα βασικά στοιχεία του δικτύου είναι τα εξής: το OLT, οι ONUs και ο παθητικός οπτικός διαιρέτης. Στο A-PON μία οπτική ίνα διαιρείται παθητικά μέχρι και 64 φορές, με αποτέλεσμα 64 ONUs να διαμοιράζονται τη χωρητικότητα της. Η παθητική διαίρεση επιτρέπει στους χρήστες να διαμοιράζονται το εύρος ζώνης και κατ' επέκταση το κόστος. Αυτό μειώνεται ακόμα περισσότερο με τη μείωση του αριθμού των οπτο- ηλεκτρονικών στοιχείων που απαιτούνται για το OLT, δεδομένου ότι περισσότερες της μίας ONU διαμοιράζονται μια διεπαφή.[16]



Εικόνα 16: Πολυλεξία με Διαίρεση Χρόνου (Ρεύμα Ανόδου)

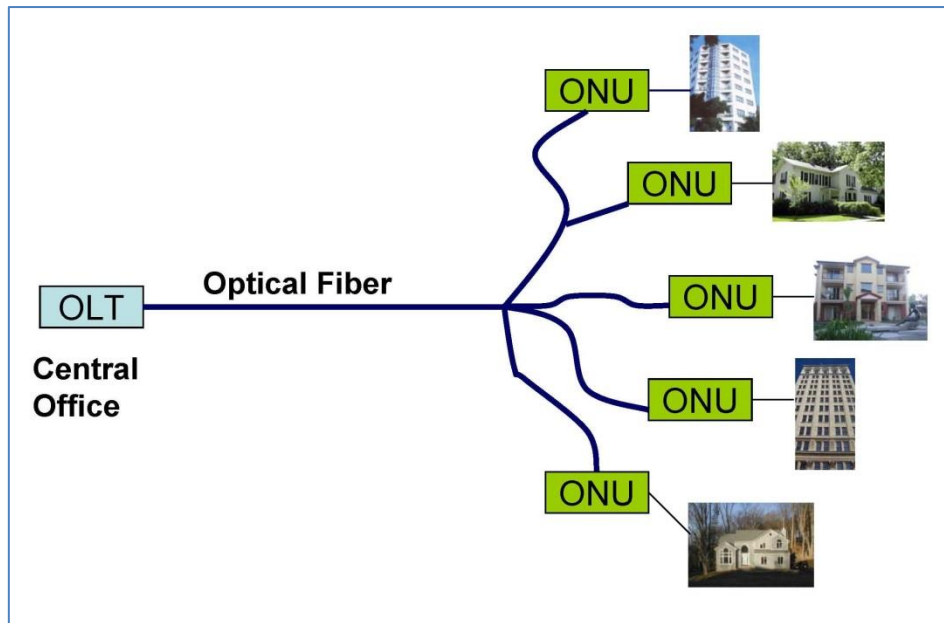


Εικόνα 17: Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου (Ρεύμα Καθόδου)

3.2 EPON

Μια ξεχωριστή προσπάθεια τυποποίησης PON άρχισε με βάση το IEEE Ethernet πρωτόκολλο. Η ιδέα εδώ ήταν να χρησιμοποιηθεί η τεράστια υποδομή Ethernet χαμηλού κόστους για να γίνει απλούστερη και πιο φθηνή τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα PON. Το μειονέκτημα είναι ότι το Ethernet είναι κατασκευασμένο συνήθως για εκρηκτικού ρυθμού υπηρεσίες και όχι για υπηρεσίες σταθερού ρυθμού ή πολυπλεξίας TDM. Το EPON αναπτύχθηκε και τυποποιήθηκε ως το IEEE 802.ah πρότυπο. Το πρότυπο εστιάζει κυρίως στο φυσικό στρώμα μετάδοσης και έτσι η διαλειτουργικότητα των υψηλότερων στρωμάτων δεν είναι εγγυημένη. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για το EPON είναι θεωρητικά τα 1,25 Gbit/s, αλλά λόγω της χρήσης της κωδικοποίησης 8B/10B, αυτός γίνεται ουσιαστικά 1 Gbit/s.

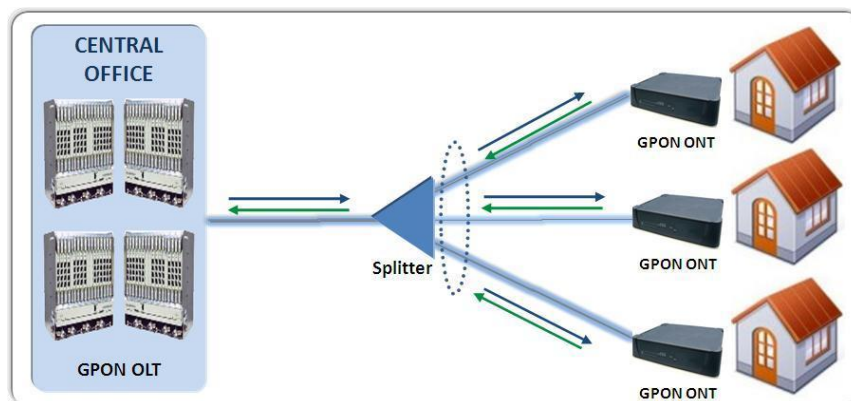
Η κύρια διαφορά μεταξύ A-PON και E-PON είναι ότι τα δεδομένα στο δεύτερο μεταφέρονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους (ως και 1518 bytes) σύμφωνα με το πρωτόκολλο της IEEE 802.3 για το Ethernet. Αντίθετα στο A-PON μεταφέρονται σε κελιά ATM των 53 bytes όπως επιβάλλεται από το πρωτόκολλο ATM. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι δύσκολη και όχι αποδοτική η μεταφορά σε ένα δίκτυο A-PON κίνησης που βασίζεται στην IP, όπου τα δεδομένα χωρίζονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους (ως και 65535 bytes). Για να μεταφερθεί η IP κίνηση στο A-PON τα πακέτα θα πρέπει να καταμηθούν σε κομμάτια των 48 bytes και στο κάθε ένα από αυτά να προσαρτηθεί μια επικεφαλίδα ATM των 5 bytes. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, πολύπλοκη και προσθέτει επιπλέον κόστος στις ONUs και στο 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. [17][24][25][42]



Εικόνα 18: Παθητικό Οπτικό Δίκτυο

3.3 GPON

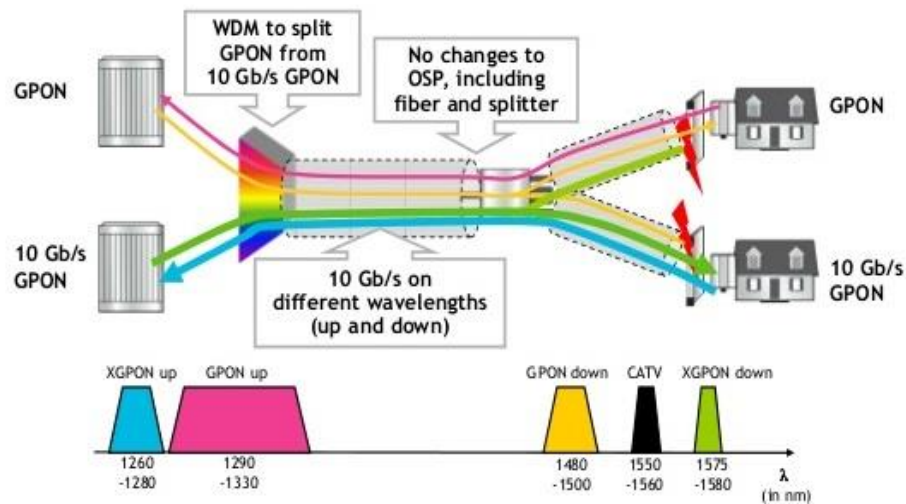
Καθώς η ενθυλάκωση της IP κυκλοφορίας σε πακέτα ATM δημιουργεί μεγάλο πλεόνασμα δεδομένων που οφείλονται στην επικεφαλίδα, και στην προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα πιο ευέλικτο πρότυπο, αναπτύχθηκε το GPON (Gigabit PON). Στο GPON, η ενθυλάκωση πραγματοποιείται μέσω ενός πρωτοκόλλου που λέγεται Generic Framic Protocol, μία ευέλικτη μέθοδο που επιτρέπει τη διαχείριση πληροφοριών μεταβλητού ρυθμού δεδομένων. Χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα πακέτα μεταβλητού μήκους και προσφέρεται η δυνατότητα στα δεδομένα που είναι ευαίσθητα στην καθυστέρηση, όπως η φωνή και το βίντεο, να μπαίνουν σε προτεραιότητα και τα υπόλοιπα δεδομένα να ακολουθούν (Quality of Service, QoS). Το δίκτυο GPON παραδίδει μέχρι 2,488 Gbps ρυθμό δεδομένων και προς τις δύο κατευθύνσεις και είναι ικανό να προσφέρει υπηρεσίες triple play (φωνή, βίντεο, δεδομένα). [18][41]



Εικόνα 19: Παθητικό Οπτικό Δίκτυο GPON

3.4 XG-PON

Όσο η ζήτηση για διαδικτυακή ταχύτητα συνεχίζει να αυξάνεται, τόσο νέες και ταχύτερες τεχνολογίες εμφανίζονται στο προσκήνιο, βασιζόμενες σε ήδη υπάρχοντα πρότυπα. Το XG-PON (επίσης γνωστό και ως 10G-PON) είναι η επόμενη, εξαιρετικά γρήγορης ταχύτητας, γενιά για τους παρόχους G-PON, σχεδιασμένη να συνυπάρχει με τον ήδη εγκατεστημένο G-PON εξοπλισμό στο ίδιο δίκτυο.



Εικόνα 20: Πολυπλέκτης με διαίρεση μήκους κύματος για GPON και XGPON συστήματα

Το XG-PON είναι ένα πρότυπο δικτύωσης του 2010 για συνδέσεις δεδομένων, ικανό να παρέχει κοινή ταχύτητα πρόσβασης στο Internet μέχρι και 10 Gbps. Είναι δηλαδή ένα πρότυπο επόμενης γενιάς, το οποίο θεωρείται η συνέχεια του G-PON που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Τα χαρακτηριστικά των δικτύων XGPON περιγράφονται αναλυτικά στο πρότυπο G.987 της ITU-T, το οποίο θα αναλυθεί εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια.[19][21][22][45]

3.5 Σύγκριση Τεχνολογιών

- EPON vs GPON [18][40][41]

Πίνακας 1: Σύγκριση Τεχνολογιών Παθητικού Οπτικού Δικτύου

	IEEE 802.3ah (EPON)	ITU-T G.984 (GPON)	ITU-T G.987.3 (XG-PON)
Downstream	1250 Mbps	2500 or 1250 Mbps	10000 Mbps
Upstream	1250 Mbps	1250 or 622 Mbps	2500 Mbps
Downstream λ	1550 nm	1490 & 1550 nm	1575 & 1580 nm
Upstream λ	1310 nm	1310 nm	1260 & 1280 nm
Protocol	Ethernet	ATM, Ethernet, TDM, GEM	Full service support
Distance	20 km	10 or 20 km	Up to 60 km
Split ratio	1:32	1:32, 1:64, (1:128 planned)	1:64 (1:256 in the logical layer)

4. Πρότυπο ITU-T G.987.3 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON)

Η διεθνής ένωση τηλεπικοινωνιών (ITU) είναι η εξειδικευμένη υπηρεσία των ηνωμένων εθνών στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών, πληροφοριών και επικοινωνιακών τεχνολογιών (ICTs). Ο τομέας τυποποίησης (ITU-T) αποτελεί κύριο όργανο της ITU και είναι υπεύθυνος για την μελέτη τεχνικών και λειτουργικών θεμάτων καθώς επίσης και για την έκδοση προτύπων πάνω σε αυτά τα θέματα, με σκοπό την προτυποποίηση των τηλεπικοινωνιών σε παγκόσμια βάση.

Η παγκόσμια συνέλευση προτυποποίησης των τηλεπικοινωνιών (World Telecommunication Standardization Assembly, WTSA), η οποία συγκαλείται κάθε τέσσερα χρόνια, αποφασίζει τα θέματα για μελέτη από τις ομάδες μελέτης της ITU-T, με σκοπό την παραγωγή προτύπων πάνω σε αυτά.

Η αποδοχή των προτύπων της ITU-T καλύπτεται πάλι από την ανάλυση της WTSA.

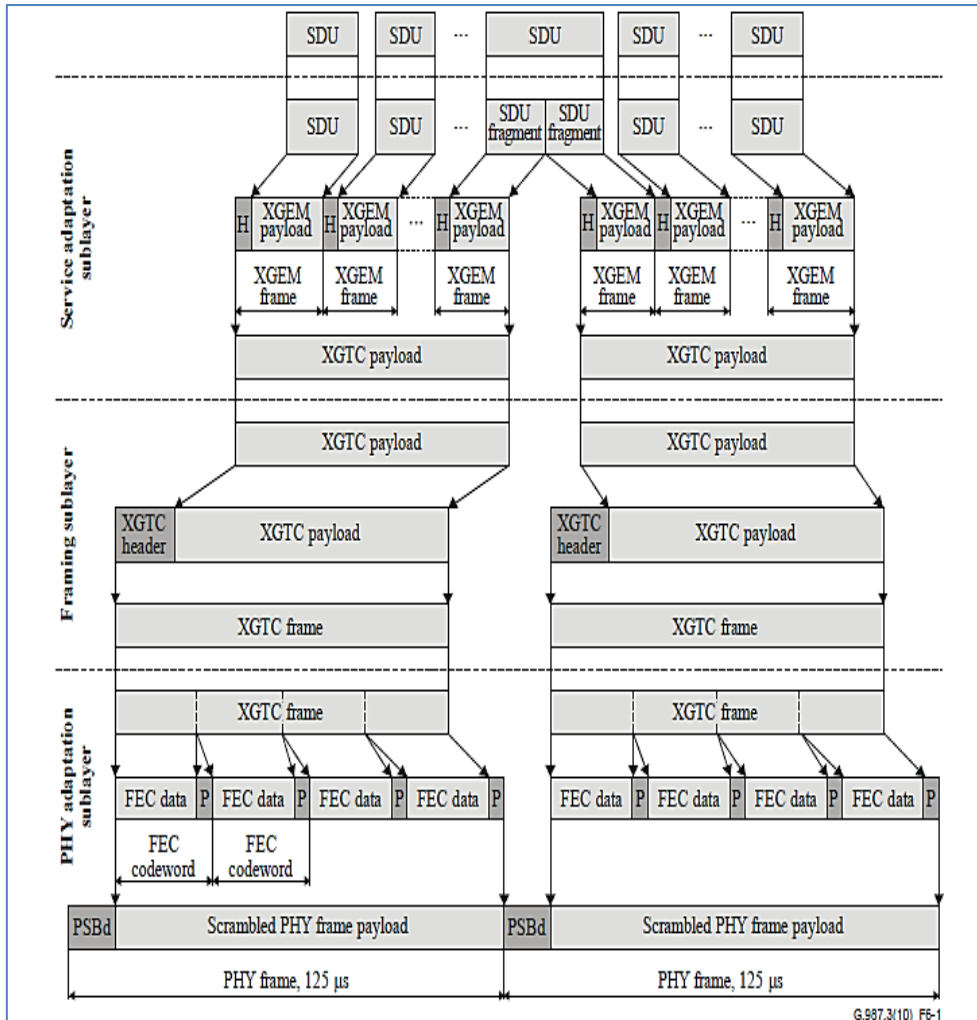
Σε κάποια πεδία τεχνολογίας πληροφοριών τα οποία είναι στα όρια της ITU-T, τα απαραίτητα πρότυπα υλοποιούνται σε συνεργασία με την ISO και την IEC. [19][20][21][22]

4.1. Επισκόπηση του επιπέδου μετάδοσης XG-PON transmission convergence layer (XGTC)

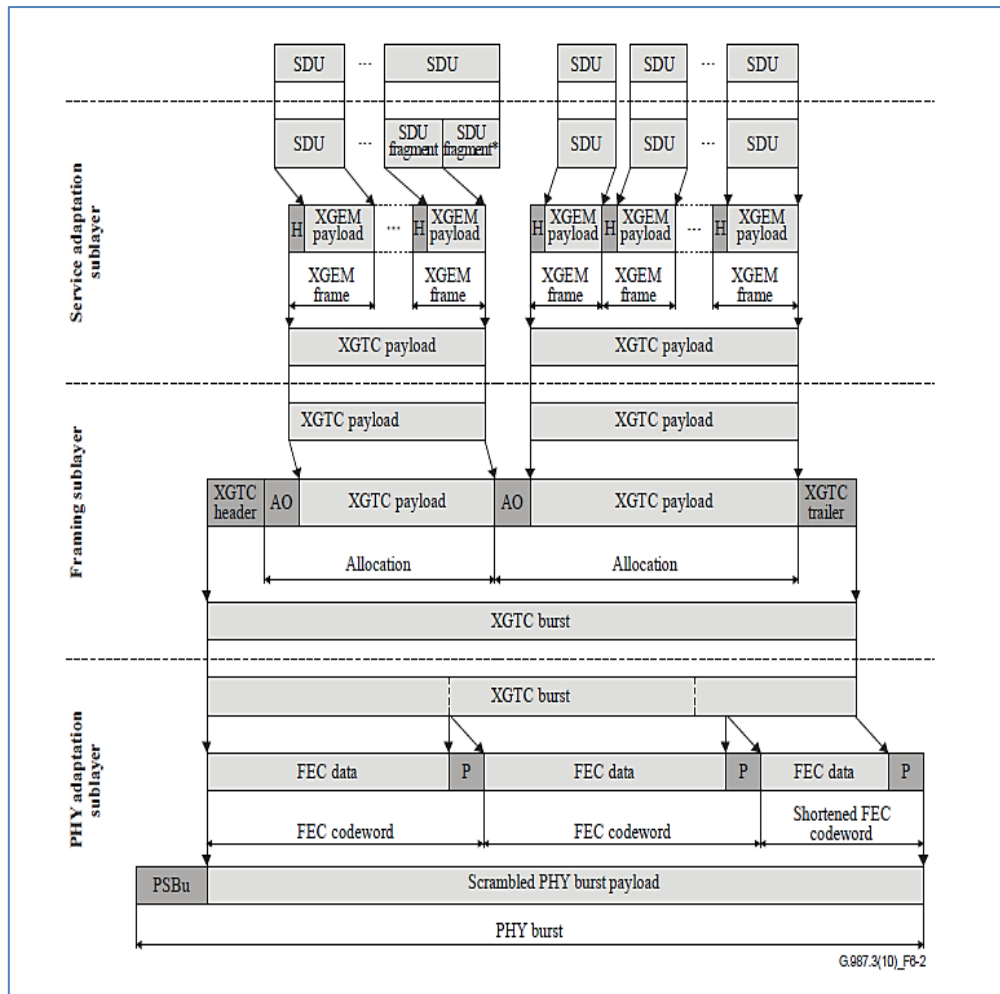
Το επίπεδο XGTC είναι μέρος του πρωτοκόλλου XG-PON και περιγράφει από τη μία πλευρά τη δομή και τις διαδικασίες αντιστοίχισης με τις μονάδες δεδομένων SDUs των ανώτερων επιπέδων, και των κατάλληλων ροών bits για τη διαμόρφωση του οπτικού σήματος από την άλλη.

Το επίπεδο XGTC αποτελείται από τρία υποεπίπεδα : το επίπεδο προσαρμογής XGTC service adaptation sublayer, το υποεπίπεδο τμηματοποίησης πλαισίου framing sublayer και το φυσικό επίπεδο προσαρμογής XGTC PHY adaptation sublayer. Το επίπεδο XGTC βρίσκεται και στην πλευρά του OLT και των ONUs σε ένα σύστημα XG-PON. Στο downstream το interface μεταξύ του XGTC επιπέδου και του PMD επιπέδου αναπαριστάται με μία συνεχή ροή bits πλαισίων 125μs. Στο upstream αναπαρίσταται από μία ακολουθία ακριβούς χρόνου ροών. Τα κύρια στάδια

διαμόρφωσης της αντιστοίχισης μεταξύ των μονάδων δεδομένων και της ροής bit του φυσικού επιπέδου για το downstream και το upstream φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.[19][20][21][22]



Εικόνα 21: Μοντέλο Επιπέδου μετάδοσης XG-PON (Ροή Καθόδου)



Εικόνα 22: Μοντέλο Επιπέδου Μετάδοσης XGPON (Ροή Καθόδου)

4.2. Λειτουργίες του επιπέδου XGTC

4.2.1 XGTC service adaptation sublayer

Το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για την ενθυλάκωση την πολύπλεξη και την οριοθέτηση των SDUs για την μετάδοση τους στο παθητικό οπτικό δίκτυο.

Στην πλευρά του μεταδότη το XGTC δέχεται τα πλαίσια SDUs και την κίνηση OMCI, εκτελεί τμηματοποίηση και προσδίδει ένα XGEM Port-ID και ενθυλάκωση για την παραγωγή του XGEM πλαισίου. Το XGEM payload μπορεί προαιρετικά να είναι κρυπτογραφημένο. Μια σειρά από πλαίσια XGEM αποτελεί ένα πλαίσιο XGTC στο downstream ή μία ριπή XGTC στο upstream.

Στην πλευρά του παραλήπτη το XGTC τα πλαίσια ή τις ριπές, οριοθετεί τα XGEM πλαίσια, τα φιλτράρει με βάση το Port-ID, αναδιαμορφώνει το τμηματοποιημένο SDU και το μεταφέρει στους αντίστοιχους χρήστες.

Το XGTC μπορεί λογικά να διαχωριστεί σε ένα μηχανισμό XGEM υπεύθυνο για την πολύπλεξη και το φιλτράρισμα των Port-Ids και δύο μηχανισμούς για την προσαρμογή των μονάδων δεδομένων και των OMCI.[19]

4.2.2 XGTC framing sublayer

Το επίπεδο τμηματοποίησης είναι υπεύθυνο για την κατασκευή και τη ανάλυση των πεδίων που υποστηρίζουν την απαραίτητη διαχείριση της λειτουργικότητας του παθητικού οπτικού δικτύου. Η δομή των πλαισίων είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε τα πλαίσια και τα στοιχεία τους να είναι ευθυγραμμισμένα σε όρια λέξεων των 4-byte.

Στην πλευρά του μεταδότη το επίπεδο XGTC δέχεται τα πλαίσια XGEM διαμορφώνει το XGTC payload από το XGTC service adaptation layer και κατασκευάζει το downstream XGTC frame η το upstream burst παρέχοντας ενσωματωμένα πεδία OAM και PLOAM messaging. Το μέγεθος κάθε downstream frame ή upstream burst payload βρίσκεται αφαιρώντας το πεδίο διαχείρισης εύρους ζώνης και το πεδίο PLOAM από το καθορισμένο μέγεθος του XGTC downstream πλαισίου. Στο upstream μία ριπή XGTC πολυπλέκει το φόρτο XGTC που σχετίζεται με πολλαπλά Alloc-Ids και το μέγεθος του κάθε φόρτου καθορίζεται σύμφωνα με τις πληροφορίες για την διαχείριση εύρους ζώνης.

Στην πλευρά του παραλήπτη το XGTC framing sublayer δέχεται τις ριπές XGTC, αναλύει τα πεδία που περιέχονται αφαιρώντας το πεδίο διαχείρισης και το πεδίο PLOAM και μεταφέρει τον φόρτο XGTC στο service adaptation layer. Το πεδίο PLOAM μεταφέρεται στον μηχανισμό επεξεργασίας PLOAM.

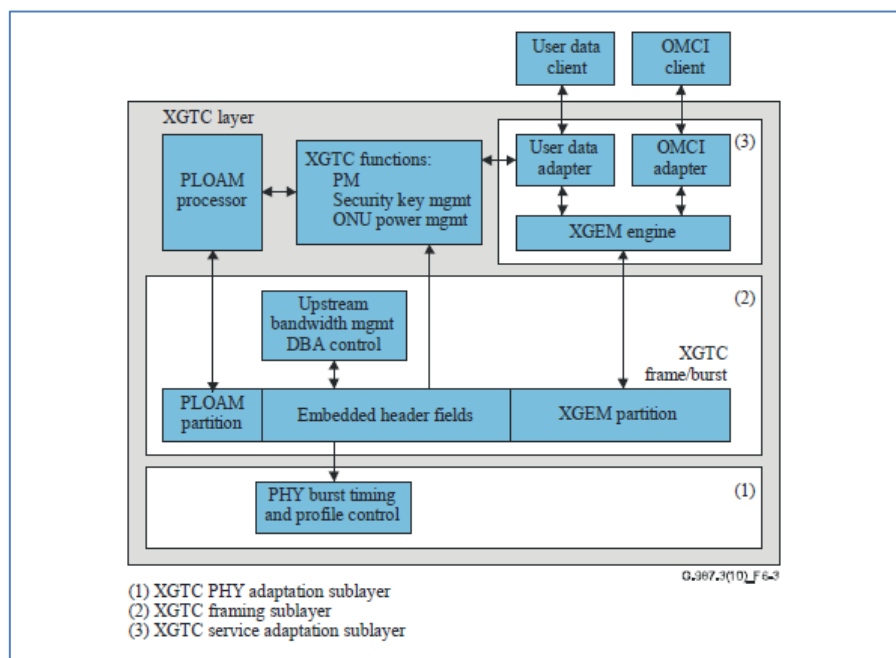
Οι ενσωματωμένες πληροφορίες OAM και οι πληροφορίες διαχείρισης εύρους ζώνης επεξεργάζονται στο ίδιο το framing sublayer, παρέχοντας αναλυτικούς ελέγχους στο PHY adaptation layer (upstream PHY burst timing and profile control), και στο service adaptation layer (encryption key indication). Οι υπόλοιπες πληροφορίες OAM μεταφέρονται σε οντότητες ελέγχου έξω από το framing sublayer όπως είναι το ONU power management και τα performance monitoring blocks.[19]

4.2.3 XGTC PHY adaptation sublayer

Το φυσικό επίπεδο περιλαμβάνει τις λειτουργίες που ρυθμίζουν το bitstream διαμορφώνοντας τον οπτικό μεταδότη με στόχο τη βελτίωση των ιδιοτήτων ανίχνευσης, υποδοχής και ευθυγράμμισης του σήματος που μεταδίδεται στο οπτικό μέσο.

Στην πλευρά του μεταδότη το φυσικό επίπεδο δέχεται τα πλαίσια XGTC (downstream) ή τις ριπές (upstream) από το XGTC framing sublayer, τα διαχωρίζει σε FEC datablocks, υπολογίζει και αποδίδει το FEC parity field σε καθένα από αυτά και εκτελεί κρυπτογράφηση του προστατευόμενου FEC περιεχομένου, τοποθετεί το physical synchronization block που είναι κατάλληλο για την μετάδοση downstream ή upstream και παρέχει χρονική ευθυγράμμιση του τελικού bitstream.

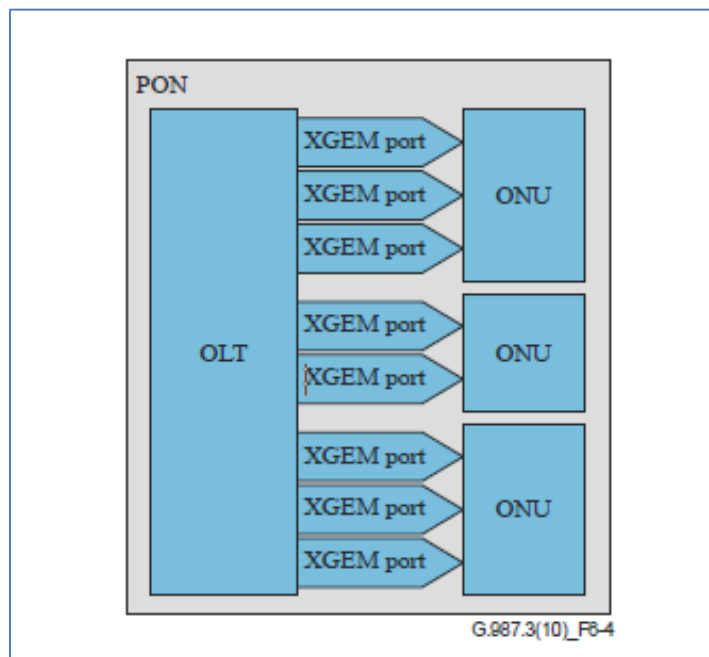
Στην πλευρά του παραλήπτη εκτελείται συγχρονισμός και ευθυγράμμιση της εισερχόμενης ροής bit, αποκρυπτογράφηση του περιεχομένου του PHY frame ή του PHY burst, forward error correction και αφαιρούνται τα FEC parity symbols, μεταφέροντας το τελικό XGTC frame ή burst στο XGTC framing sublayer. [19]



Εικόνα 23: Ροή Πληροφοριών στο επίπεδο XGTC

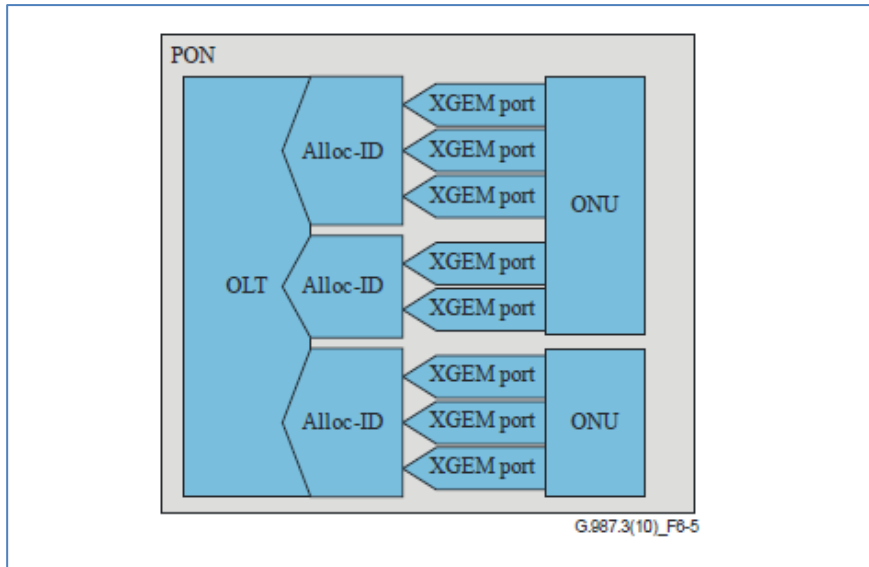
4.3 Time division multiplexing architecture

Στην κατεύθυνση του downstream, η λειτουργία της πολύπλεξης της κίνησης είναι κεντρική. Το OLT πολυπλέκει τα XGEM πλαίσια στο μέσο μετάδοσης χρησιμοποιώντας το XGEM Port-ID σαν κλειδί για την αναγνώριση των XGEM πλαισίων ανήκουν σε διαφορετικές λογικές συνδέσεις. Κάθε ONU φιλτράρει το downstream XGEM frame σύμφωνα με το Port-ID και επεξεργάζεται τα πλαίσια που ανήκουν σε αυτήν και μόνο.



Εικόνα 24: Πολυπλεξία ροής καθόδου XGPON

Στο ρεύμα ανόδου η λειτουργία της πολύπλεξης της κίνησης είναι κατανεμημένη. Το OLT παραχωρεί ευκαιρίες μετάδοσης ή upstream bandwidth allocations στις οντότητες που μεταφέρουν κίνηση στις ONUs. Οι ONUs που είναι αποδέκτες του εύρους ζώνης που χορηγείται αναγνωρίζονται από το allocation ID (Alloc-ID). Οι διαμοίραση του εύρους ζώνης για κάθε Alloc-ID πολυπλέκεται στο χρόνο και καθορίζεται από το OLT στο bandwidth map που μεταδίδεται downstream. Σε κάθε χορήγηση εύρους ζώνης η ONU χρησιμοποιεί το XGEM Port-ID για την αναγνώριση των πλαισίων που ανήκουν σε διαφορετικές λογικές συνδέσεις.[19]



Εικόνα 25: Πολυπλεξία Ροής Ανόδου XGPON

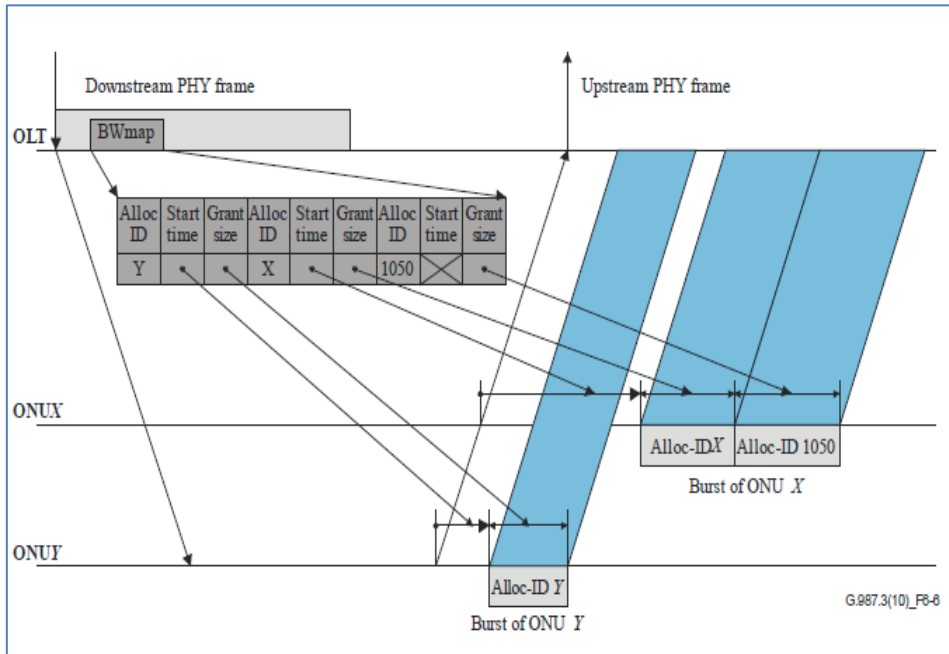
4.4 Media Access Control

Σε ένα σύστημα XG-PON το OLT παρέχει media access control για την κίνηση στο ρεύμα ανόδου. Στο βασικό σενάριο κάθε downstream PHY frame περιέχει ένα bandwidth map (BWmap) το οποίο δείχνει την θέση των upstream μεταδόσεων από διάφορες ONUs στο αντίστοιχο PHY frame. Το σενάριο του media access control στο σύστημα XG-PON φαίνεται στην εικόνα 3.6.

Το OLT μεταδίδει ένα downstream PHY frame κάθε 125μs. Εξαιτίας των διαφόρων αποστάσεων της οπτικής ίνας, κάθε PHY frame φτάνει σε διαφορετικές ONUs σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Με κάθε λαμβανόμενο downstream frame, κάθε ONU συνδέει το αντίστοιχο upstream PHY frame. Οι καθυστερήσεις εξισορρόπησης που εγκαθιδρύονται από κάθε ONU εξυπηρετούν στην ρύθμιση της αρχής κάθε PHY upstream frame με τέτοιο τρόπο ώστε να μην φτάνουν PHY frames στο OLT στον ίδιο χρόνο.

Για κάθε PHY frame το OLT δημιουργεί και αποστέλλει στο downstream ένα BWmap που καθορίζει μία ακολουθία μη επικαλυπτόμενων upstream μεταδόσεων από διαφορετικές ONUs. Το BWmap περιέχει έναν αριθμό εύρων ζώνης που διαμοιράζονται στις ONUs σε κάθε διαφορετικό Alloc-ID. Μια ακολουθία από μία ή περισσότερες δομές που αντιστοιχίζονται σε Alloc-IDs που ανήκουν σε μία συγκεκριμένη ONU σχηματίζουν σειρές ριτών διαμοίρασης εύρους ζώνης (burst allocation series). Κάθε burst allocation series περιέχει ένα δείκτη που δείχνει την έναρξη της ριτής στο upstream PHY frame (start pointer) και μια ακολουθία από εύρη ζώνης (grant sizes) στα οποία επιτρέπεται να μεταδώσει η ONU. Οι start pointers αναφέρουν το offset του PHY frame (στο PHY adaptation sublayer), ενώ τα grant sizes αναφέρονται στον φόρτο του XGTC frame (στο framing adaptation sublayer).

Οι start pointers και τα grant sizes εκφράζονται σε μονάδες λέξεων(one word equals 4 bytes). Μία λέξη διαμοίρασης ανά PHY frame αντιστοιχεί σε ρυθμό δεδομένων 256kbit/s. Το OLT μπορεί να επιτρέψει τη μετάδοση υψηλότερων ρυθμών δεδομένων ελέγχοντας το μέγεθος και τη συχνότητα των grants και μπορεί να ρυθμίσει τον αποτελεσματικότερο ρυθμό μέσω δυναμικού προγραμματισμού. [19][22][23]



Εικόνα 26: XGTC Media Access Control Concept

5 Προτεινόμενο σχήμα υλοποίησης XG-PON

5.1. Διαμοίραση πόρων και ποιότητα υπηρεσιών

Σε ένα δίκτυο οπτικής πρόσβασης που βασίζεται στο πρότυπο XG-PON οι δυνατότητες QoS υποστηρίζονται από το OLT και τις ONUs και σχετίζονται με τους τρόπους και τα μέσα για την διαμοίραση των διαθέσιμων πόρων, συμπεριλαμβανομένης της χωρητικότητας που χρειάζεται για την επεξεργασία, του buffer space και του ψηφιακού εύρους ζώνης των συνδέσεων επικοινωνίας, σε ξεχωριστές ροές κίνησης και σε σύνολα ροών κίνησης. [19]

5.2. Αρχές για την διάθεση πόρων στο ρεύμα ανόδου(upstream) και καθόδου(downstream)

Μια ροή κίνησης εφοδιάζεται με συγκεκριμένα σύνολα downstream και upstream παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να αναπαρασταθούν από έναν traffic descriptor. Στην πιο γενική περίπτωση ένας traffic descriptor έχει τη μορφή:

$$D = \{R_F, R_A, R_M, \chi_{AB}, P, \omega\}$$

R_F: Fixed bandwidth [bit/s];

R_A: Assured bandwidth [bit/s];

R_M: Maximum bandwidth [bit/s];

χ_{AB}: Ternary eligibility indicator for additional bandwidth assignment: {none, non-assured (NA), best-effort (BE)};

P: Priority for best-effort bandwidth assignment;

ω: Weight for best-effort bandwidth assignment.

Fixed bandwidth, $R_F \geq 0$, αντιπροσωπεύει το μέρος της χωρητικότητας του μέσου που διατίθεται στην ροή κίνησης, ανεξάρτητα από την απαίτηση της κίνησης και όλο τον υπόλοιπο φόρτο.

Assured bandwidth, $RA \geq 0$, αντιπροσωπεύει το μέρος της χωρητικότητας του μέσου που διατίθεται στην ροή κίνησης στην περίπτωση που υπάρχει παραπάνω ζήτηση, ανεξάρτητα από τις συνθήκες φόρτου του μέσου.

Maximum bandwidth, $RM > 0$, αντιπροσωπεύει το ανώτατο όριο του ολικού εύρους ζώνης που μπορεί να διατεθεί στην ροή κίνησης κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

Ο traffic descriptor πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω αμετάβλητες συνθήκες:

$$RM \geq RF + RA$$

$$\text{if } \chi_{AB} = NA, \text{ then } RM > RF + RA > 0$$

$$\text{if } \chi_{AB} = BE, \text{ then } RM > RF + RA \geq 0$$

Επιπρόσθετα, η ολική κίνηση θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη σταθερότητας:

$$\sum_i (R_F^i + R_A^i) \leq C$$

Όπου το άθροισμα αντιπροσωπεύει όλες τις ροές κίνησης upstream και downstream στο παθητικό οπτικό δίκτυο και το C είναι η χωρητικότητα της ροής ανόδου ή καθόδου. [19][38][39][43]

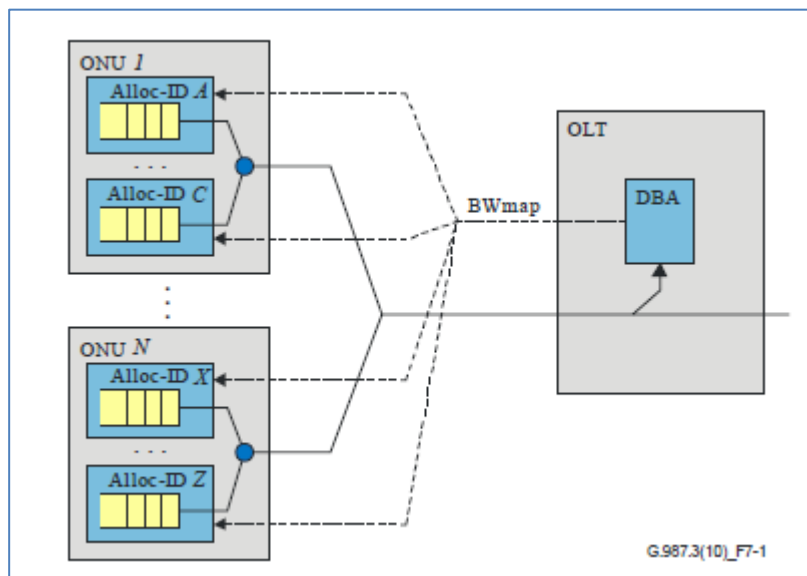
5.3. Δυναμική διάθεση εύρους ζώνης

Η δυναμική διάθεση του εύρους ζώνης σε ένα σύστημα XG-PON είναι η διαδικασία κατά την οποία το OLT διαθέτει ευκαιρίες κίνησης upstream στις οντότητες κίνησης (ONUs), βασιζόμενο στη δυναμική παρατήρηση της δραστηριότητας τους και στις ρυθμισμένες συμβάσεις κίνησής τους. Η ενδείξεις της κατάστασης κίνησης μπορεί να είναι σαφής με τη βοήθεια της ένδειξης της κατάστασης του buffer της κάθε ONU, ή να υπονοείται μέσω της μετάδοσης κενών XGEM πλαισίων κατά τη διάρκεια της upstream κίνησης.

Σε σύγκριση με τη στατική διαμοίραση εύρους ζώνης, ο μηχανισμός δυναμικής διάθεσης εύρους ζώνης (DBA), βελτιώνει την εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης αντιδρώντας κατάλληλα στο μοτίβο των ριπών κίνησης κάθε των ONUs. Τα πρακτικά πλεονεκτήματα του DBA είναι διπλά. Αρχικά, μπορούν να προστεθούν στο δίκτυο περισσότεροι συνδρομητές εξαιτίας της πιο αποδοτικής χρήσης του εύρους ζώνης. Δεύτερον, οι συνδρομητές μπορούν να απολαύσουν ενισχυμένες υπηρεσίες, όπως αυτές που απαιτούν ποικίλους ρυθμούς μετάδοσης σε μεγέθη τα οποία δεν θα μπορούσαν να επιτευχθούν στατικά.[38][39][43][45]

5.3.1 Ανάλυση δυναμικής διαμοίρασης εύρους ζώνης στο παθητικό οπτικό δίκτυο

Στο σύστημα XG-PON η οντότητα για την οποία δίνεται η εκάστοτε δυνατότητα κίνησης με συγκεκριμένο εύρος ζώνης ορίζεται με το allocation ID (Alloc-ID). Ανεξάρτητα του αριθμού των Alloc-Ids που αποδίδονται σε κάθε ONU, το OLT μοντελοποιεί τις συνθήκες κίνησης που σχετίζονται με κάθε Alloc-ID σαν μία αυτόνομη λογική ουρά και για την διάθεση του εύρους ζώνης θεωρεί όλα τα Alloc-IDs που έχουν δημιουργηθεί για το δεδομένο παθητικό δίκτυο σαν ανεξάρτητες οντότητες στο ίδιο επίπεδο λογικής ιεραρχίας.



Εικόνα 27: PON DBA Abstraction

Για κάθε λογική ουρά (buffer) από Alloc-Ids, ο μηχανισμός DBA του OLT συμπεραίνει τη χωρητικότητά της συλλέγοντας αναφορές κατάστασης ή παρατηρώντας το αδρανές upstream πλαίσιο ή και τα δύο. Η λειτουργία του DBA παρέχει έπειτα τα δεδομένα στο OLT scheduler, το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραγωγή του bandwidth map (BWmap). Το BWmap ορίζει το μέγεθος και τον χρονισμό της μετάδοσης upstream για κάθε Alloc-ID και μεταδίδεται στις ONUs έμμεσα στην downstream κίνηση. [19][44][45][46]

5.3.2 Λειτουργικές απαιτήσεις του μηχανισμού DBA

Η δυναμική διάθεση εύρους ζώνης στο σύστημα XG_PON περιλαμβάνει τις ακόλουθες λειτουργίες. Αυτές οι λειτουργίες εφαρμόζονται στο επίπεδο των ανεξάρτητων Alloc-Ids και των παραμέτρων του παρεχόμενου εύρους ζώνης τους:

1. Αναφορά κατάστασης της χωρητικότητας της λογικής ουράς κίνησης
2. Ενημέρωση της διάθεσης εύρους ζώνης σύμφωνα με την αναφερόμενη κατάσταση χωρητικότητας της ουράς.
3. Αναφορά των διαθέσεων εύρους ζώνης σύμφωνα με την ενημερωμένη διάθεση του εύρους ζώνης στο προηγούμενο βήμα.
4. Διαχείριση των λειτουργιών δυναμικής διάθεσης εύρους ζώνης.

Το οπτικό τερματικό γραμμής OLT απαιτείται να υποστηρίζει δυναμική διαμοίραση εύρους ζώνης.

5.3.3 Μέθοδοι δυναμικής διάθεσης εύρους ζώνης

Βασιζόμενοι στο μηχανισμό αναφοράς χωρητικότητας της ουράς από τις ONUs, δύο μέθοδοι μπορούμε να διακρίνουμε δύο μεθόδους:

- Η αναφορά κατάστασης (status reporting-SR) που βασίζεται στις σαφείς αναφορές χωρητικότητας που ενδείκνυνται από το OLT στις ONUs.
- Η παρακολούθηση κίνησης (traffic monitoring-TM) που βασίζεται στην παρατήρηση των αδρανών XGEM πλαισίων και της σύγκρισής τους με το αντίστοιχο BWmap.

Το οπτικό τερματικό γραμμής (OLT) του συστήματος XG-PON πρέπει να υποστηρίζει και τους δύο παραπάνω μηχανισμούς και να είναι ικανό να εφαρμόσει τις λειτουργίες του μηχανισμού διάθεσης εύρους ζώνης που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.3.2 με δίκαιο τρόπο. Τα κριτήρια αποδοτικότητας και δικαιοσύνης μπορούν να βασίζονται σε ολόκληρη τη χρησιμοποίηση του παθητικού οπτικού δικτύου, στις ανεξάρτητες επιδόσεις των ONUs, να μπορούν να δοκιμάζονται σύμφωνα με τους αντίστοιχους στόχους και να συγκριθεί η επίδοσή τους για πολλαπλές ONUs.

Μια οπτική μονάδα δικτύου (ONU) σε ένα σύστημα XG_PON πρέπει να υποστηρίζει status reporting(SR) και να μεταδίδει αναφορές δυναμικής διαμοίρασης εύρους ζώνης στην upstream μετάδοση όπως απαιτείται από το OLT. [38][39][43][44][45][46]

5.4. Μοντέλο υλοποίησης συστήματος XG-PON και μηχανισμού δυναμικής διαμοίρασης εύρους ζώνης (DBA)

5.4.1 Χρήση συμβόλων

R_F : πάγιο εύρος ζώνης που δίνεται σε κάθε ONU (fixed bandwidth).

R_A : εξασφαλισμένο επιπρόσθετο εύρος ζώνης που διαμοιράζεται στις οπτικές μονάδες δίκτυο, αφού έχει εξαντληθεί το fixed bandwidth.

Best effort: εύρος ζώνης που διατίθεται στις οπτικές μονάδες σύμφωνα με τις απαιτήσεις κίνησης τους, αφού έχει εξαντληθεί και το R_A .

R_M : μέγιστο εύρος ζώνης που μπορεί να διατεθεί στις οπτικές μονάδες.

$R_{offered}$: το συνολικό εύρος ζώνης που διατίθεται κάθε φορά στις οπτικές μονάδες

Remaining bandwidth: υπολοιπόμενο εύρος ζώνης που μπορεί να διατεθεί στις ONUs σε κάθε κύκλο

BWmap: πίνακας διαμοίρασης εύρους ζώνης στις ONUs.

RTT: χρόνος διάδοσης στις ONUs (round trip time), προκύπτει ανάλογα με την απόσταση της κάθε οπτικής μονάδας από το οπτικό τερματικό γραμμής (OLT).

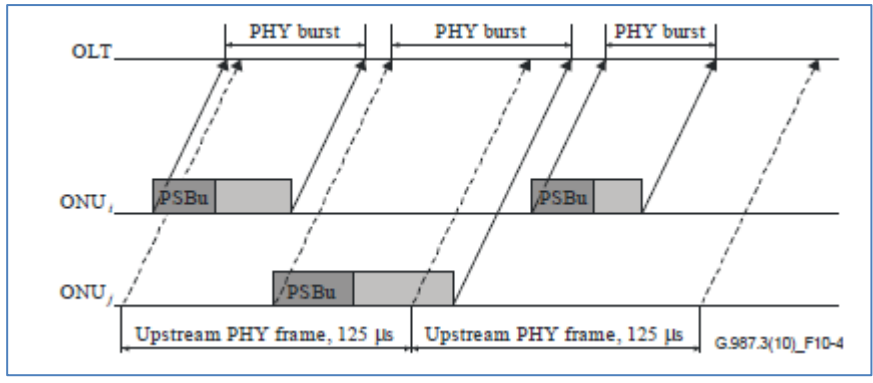
Frame arrivals: η χρονική στιγμή που φτάνει κάθε πλαίσιο από την ONU στο OLT

Burst arrivals: η χρονική στιγμή που φτάνει κάθε ριπή από το OLT στην αντίστοιχη ONU.

5.4.2 Upstream PHY frames

Η διάρκεια ενός πλαισίου στο κανάλι ανόδου έχει διάρκεια 125μs, το οποίο με ρυθμό μετάδοσης upstream 2,48832 Gbit/s, αντιστοιχεί στο μέγεθος των 38880 bytes (9720 words), αυτό είναι το R_M .

Όπως απαιτεί το OLT, κάθε ONU καθορίζει το σημείο έναρξης κάθε upstream πλαισίου, επιδιώκοντας να μην υπάρχουν παρεμβολές από τις αφίξεις των υπόλοιπων οπτικών μονάδων. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται ένα offset συγχρονισμού (upstream physical synchronization block-PSBu), όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. [19]



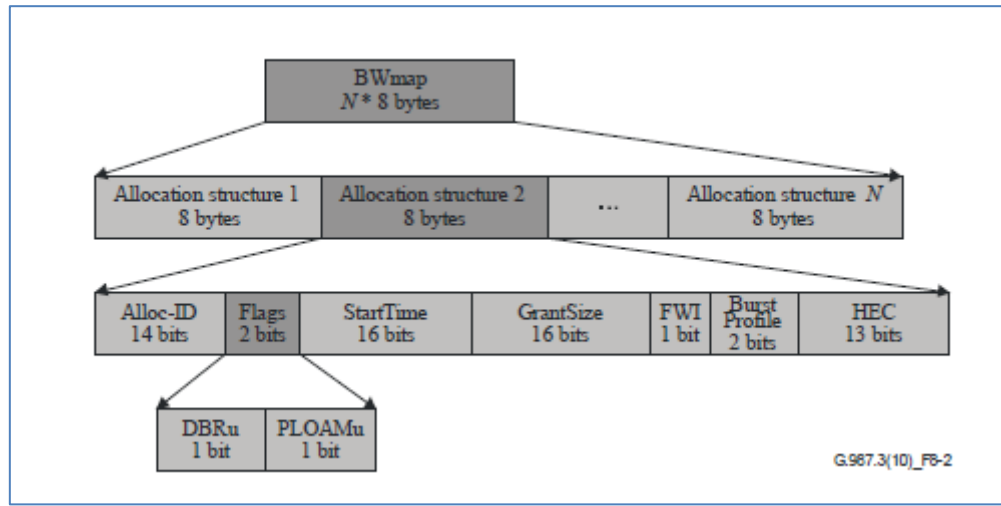
Εικόνα 28: Upstream PHY frame

5.4.3 Η Μορφή του BWmap

Ο πίνακας διαμοίρασης εύρους ζώνης είναι μία σειρά από 8bit δομές διάθεσης εύρους ζώνης. Ο αριθμός των δομών αυτών εξαρτάται από τον αριθμό των ONUs (N) και αντιστοιχεί σε 8 x Nbytes.

Κάθε δομή καθορίζει μία διάθεση εύρους ζώνης σε ένα συγκεκριμένο Alloc-ID. Η δομή του BWmap φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Ο πίνακας διαμοίρασης εύρους ζώνης ενημερώνεται κάθε 125μs σύμφωνα με τις συνθήκες κίνησης των οπτικών μονάδων.



Εικόνα 29: Μορφή Bandwidth Map

5.4.4 Διάθεση πάγιου fixed εξασφαλισμένου (assured) και best effort εύρους ζώνης

Το πάγιο μέγεθος εύρους ζώνης διατίθεται στις ONUs στην αρχή της προσομοίωσης και είναι για όλες το ίδιο.

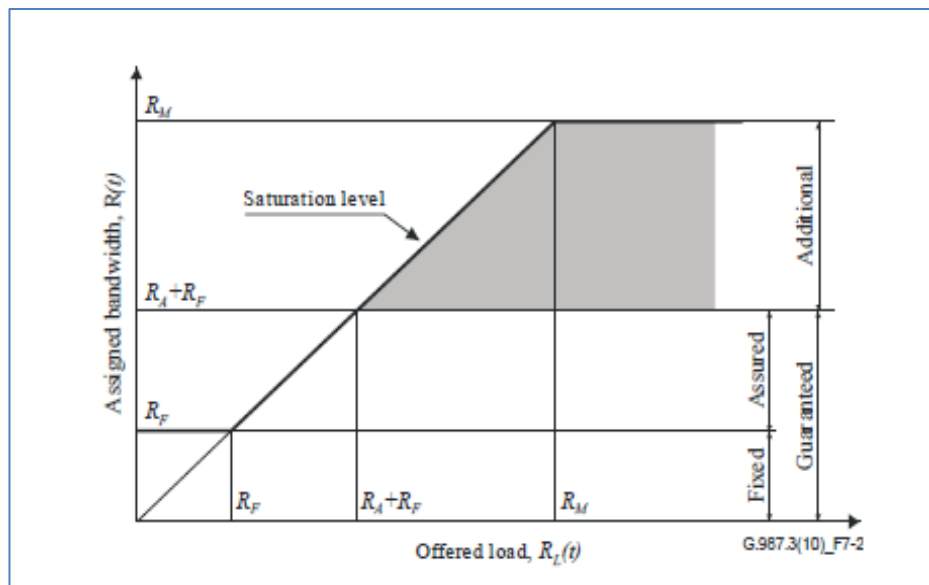
Έπειτα, από το εύρος ζώνης που απομένει, ένα μέρος εξασφαλίζεται σαν assured bandwidth και διαμοιράζεται στις οπτικές μονάδες όταν αυτές αιτούνται παραπάνω εύρος ζώνης από το πάγιο και είναι και αυτό για όλες το ίδιο.

Τέλος, όταν εξαντληθεί και το εξασφαλισμένο εύρος ζώνης και υπάρχει ακόμα ανικανοποίητη κίνηση σε κάποιες ή σε όλες τις οπτικές μονάδες, το υπολειπόμενο εύρος ζώνης μέχρι να εξαντληθεί το μέγιστο (R_F) διαμοιράζεται στις ανικανοποίητες ONUs σύμφωνα με την απαίτηση κίνησης τους (Best Effort).

Αρχικά, το OLT διαθέτει το πάγιο εύρος ζώνης σε όλες τις οπτικές μονάδες δικτύου, ανεξάρτητα από τις συνθήκες κίνησης τους. Στη συνέχεια, το OLT διαμοιράζει το εξασφαλισμένο εύρος ζώνης μέχρι να καλυφθεί το όριο του R_A , ή μέχρι να ικανοποιηθεί η απαιτούμενη κίνηση.

Το μοντέλο αναφοράς απαιτεί να μην ξεπερνιέται το ανώτατο όριο εύρους ζώνης R_M , οπότε θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη:

$$R_{\text{offered}} \leq R_A + R_F$$



Εικόνα 30: Διατιθέμενο εύρος ζώνης

5.4.5 Στοιχεία για την υλοποίηση της προσομοίωσης

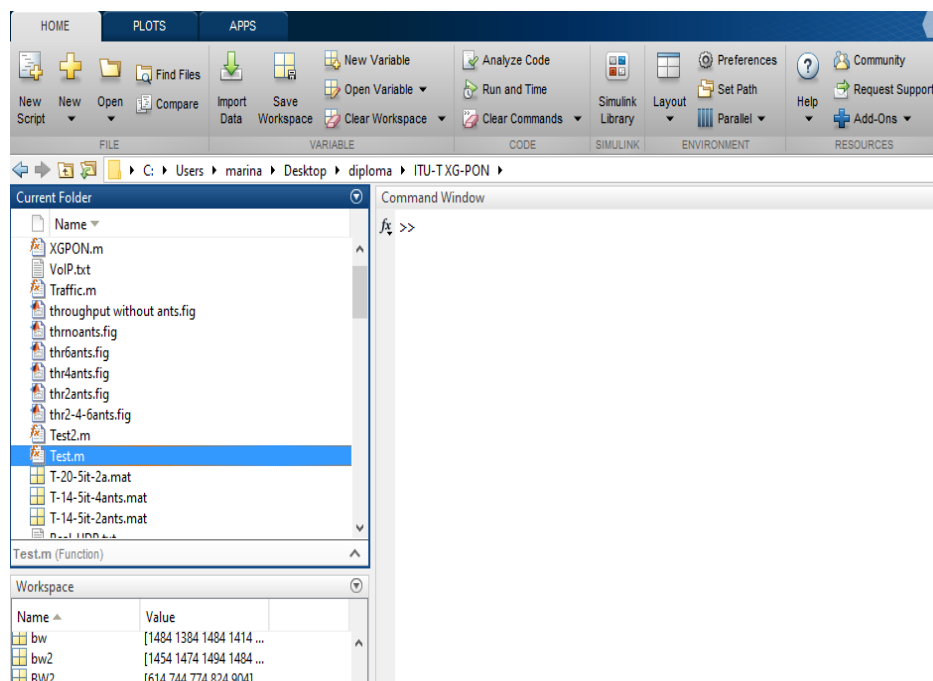
- **To εργαλείο MATLAB**

Για την εκτέλεση της προσομοίωσης του συστήματος XG-PON εφαρμόστηκε γεγονοδηγούμενος προγραμματισμός (event-driven) και χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Matlab.

Το MATLAB (*matrix laboratory*) είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Αποθηκεύει και κάνει τις πράξεις με βάση την άλγεβρα μητρών. Η τρέχουσα έκδοσή του είναι η R2016a η οποία κυκλοφόρησε τον Μάρτιο του 2016.

Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο είναι πολύ "ισχυρό" και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό καθώς περιέχει εντολές από την C++ όπως την while, την switch και την if. Στον τομέα των γραφικών όσον αφορά τον μαθηματικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει συναρτήσεις πραγματικές, μιγαδικές, πεπλεγμένες συναρτήσεις δύο μεταβλητών και άλλες. Όσον αφορά τον στατιστικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει ιστογράμματα, τομογράμματα, ραβδοδιαγράμματα, εμβαδογράμματα και άλλα.

- **Το περιβάλλον Matlab**



Εικόνα 31: Περιβάλλον Matlab

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το default layout του εργαλείου, το οποίο περιλαμβάνει το Command Window, στο οποίο εκτελούνται όλες οι εντολές, τον φάκελο με τα αρχεία στον οποίο βρισκόμαστε καθώς και το Workspace που περιέχει όλες τις μεταβλητές που έχουν δημιουργούνται κατά την εκτέλεση εντολών και προγραμμάτων.

Τα προγράμματα μπορούν να γραφούν σαν scripts ή συναρτήσεις σε εκτελέσιμα αρχεία .m. Ένα τέτοιο αρχείο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. [5][54]

```

Editor - C:\Users\marina\Desktop\diploma\ITU-T XG-PON\Test2.m
1 function [ throughput,avgdelay,drop_ratio,jitter,BWmap,remaining_bw,remaining_data,RTT] = Test2( N,S,
2
3     flag=true;
4
5     Event_List=zeros(3,2*N+2);           %the events 1 and 2 are executed for each onu seperately
6
7     Event_List(1,1:N)=1;                 %frame arrivals to the ONUs
8     Event_List(2,1:N)=0;
9     Event_List(3,1:N)=1:N;
10
11    Event_List(1,N+1:2*N)=2;             %event 2 first broadcast trasmission to the ONUs by the O
12    Event_List(2,N+1:2*N)=0;
13    Event_List(3,N+1:2*N)=1:N;
14
15
16    Event_List(1,2*N+1)=5;               %termination event
17    Event_List(2,2*N+1)=5;
18
19    Event_List(1,2*N+2)=4;
20    Event_List(2,2*N+2)=0;
21
22
23    Q3D=zeros(3,1,N);
24    Q3D_Index=zeros(N);
25
26    % Rf=1/7*38880/N;

```

Εικόνα 32: Matlab .m file

- **Αρχές Γεγονοδηγούμενου Προγραμματισμού (Event-driven Programming)**

Σύμφωνα με τις αρχές του γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού, κάθε λειτουργία (function) που χρησιμοποιείται από το σύστημα αποτελεί ένα ξεχωριστό γεγονός (event). Κάθε γεγονός λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές σύμφωνα με τις ανάγκες της υλοποίησης. Συνακόλουθα, χρειάζεται ένας προγραμματισμός με βάση το χρόνο για την εκτέλεση των γεγονότων. Ο χρονοπρογραμματισμός αυτός υλοποιείται με τη βοήθεια μίας δομής στην οποία αποθηκεύονται τα γεγονότα που πρόκειται να συμβούν σε καθορισμένες χρονικές στιγμές. Η δομή αυτή ονομάζεται λίστα γεγονότων ή αλλιώς Event List.

Το Event List στην πιο απλή μορφή αποτελεί ένα πίνακα, του οποίου η κάθε στήλη αντιστοιχεί και σε ένα γεγονός. Στην πρώτη γραμμή κάθε στήλης περιέχεται το id του γεγονότος, στην δεύτερη η χρονική στιγμή στην οποία το γεγονός θα λάβει χώρα και στην τρίτη η προτεραιότητα εκτέλεσης του

γεγονότος. Ως εκ τούτου, τα γεγονότα εκτελούνται ανά στήλη με την σειρά που έχουν τοποθετηθεί στον πίνακα.

Η μορφή ενός ενδεικτικού Event List φαίνεται παρακάτω:

Πίνακας 2: Μορφή Event List

	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5
Id	1	2	3	4	5
Timestamp	0	0.4	0.7	1.2	10
Priority	3	4	1	2	5

Στην αρχή της προσομοίωσης το γεγονός που θα συμβεί πρώτο έχει στην δεύτερη γραμμή μηδενικό χρόνο και βρίσκεται στην πρώτη στήλη. Για κάθε γεγονός που εκτελείται διαγράφεται κάθε φορά η αντίστοιχη στήλη στο Event List.

Η έναρξη και η λήξη της προσομοίωσης καθορίζεται από μία σημαία flag, η οποία στην αρχή έχει μία τιμή που υποδεικνύει ότι η προσομοίωση είναι σε εξέλιξη, πχ *true*. Όσο η σημαία είναι *true*, λαμβάνεται το id του γεγονότος που είναι πρώτο στη λίστα και αυτό εκτελείται. Στο τέλος της εκτέλεσης γίνεται ταξινόμηση του πίνακα των γεγονότων με βάση την δεύτερη γραμμή που περιέχει το χρόνο εκτέλεσης και σε περίπτωση που δύο ή παραπάνω γεγονότα έχουν τον ίδιο χρόνο ταξινομούνται με βάση την τρίτη γραμμή που περιέχει την προτεραιότητα εκτέλεσης. Η τιμή της σημαίας αλλάζει από το event τερματισμού της προσομοίωσης, του οποίου ο χρόνος εκτέλεσης καθορίζεται από τον προγραμματιστή και τοποθετείται όπως είναι λογικό στην τελευταία στήλη του πίνακα. [5][54]

5.4.6 Σχεδιασμός προσομοίωσης

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε μία 3D ουρά, στην οποία αποθηκεύονται τα πακέτα που φτάνουν σε κάθε ONU. Τα πακέτα αποθηκεύονται ανά στήλη στην πρώτη γραμμή της οποίας υπάρχει το id του πακέτου, στην δεύτερη το μέγεθος του πακέτου σε bytes και στην τρίτη ο χρόνος άφιξης του πακέτου στην ONU. Η τρίτη διάσταση της ουράς εξυπηρετεί τον αριθμό των οπτικών μονάδων.

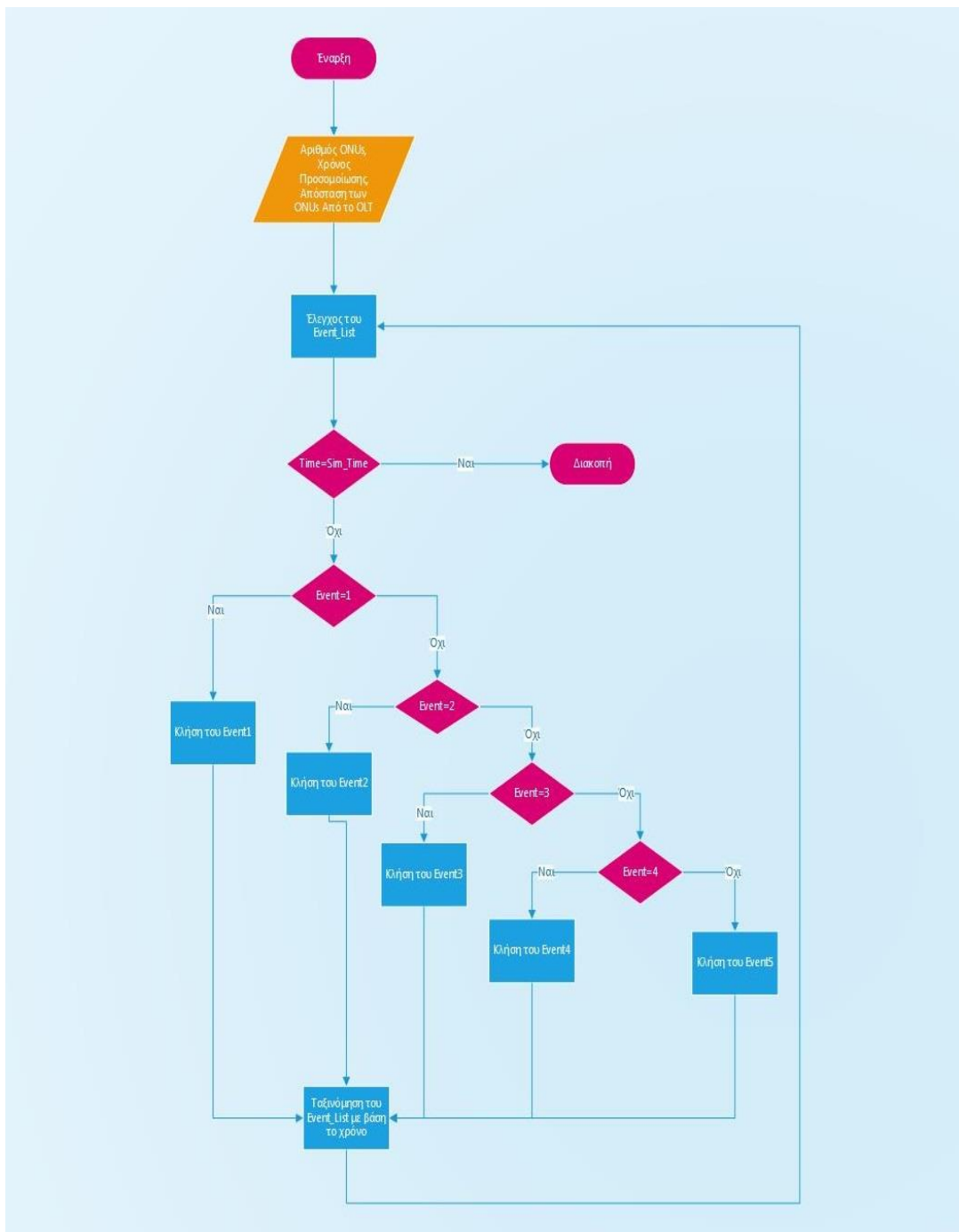
Επίσης χρησιμοποιήθηκαν πέντε γεγονότα:

1. Event αφίξεων των πακέτων δεδομένων στις οπτικές μονάδες δικτύου (ONUs).

2. Event αφίξεων των πακέτων δεδομένων στο οπτικό τερματικό γραμμής (OLT).
3. Event διαγραφής των πακέτων που έχουν μεταφερθεί στο OLT από την ουρά αποθήκευσης.
4. Ανανέωση του Bandwidth Map.
5. Τερματισμός της προσομοίωσης.

Η κυρίως ροή της προσομοίωσης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.

Διάγραμμα Ροής

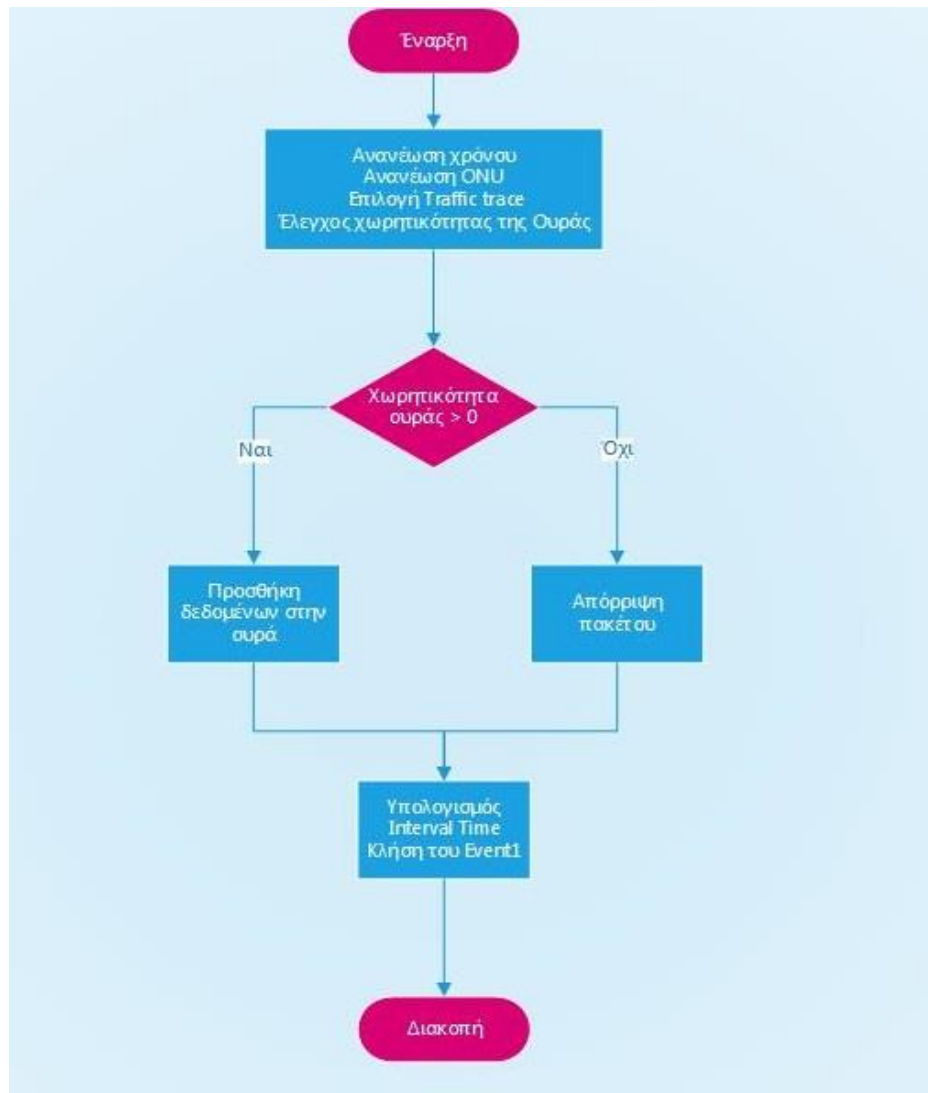


Εικόνα 33: Διάγραμμα Ροής κυρίως συνάρτησης XGPON

- **Event 1 – αφίξεις πακέτων δεδομένων στις ONUs**

Στο γεγονός αυτό γίνεται η εισαγωγή των πακέτων που φτάνουν σε κάθε ONU στην 3D ουρά και ελέγχεται παράλληλα η χωρητικότητά της. Το γεγονός αυτό καλεί τον εαυτό του σε μεσοδιάστημα που προκύπτει σύμφωνα με την επιλεγμένη κίνηση δεδομένων (Live Streaming, VoIP, Real Media TCP, Real Media TCP).

Διάγραμμα Ροής



Εικόνα 34: Διάγραμμα ροής event1

- **Event 2 – αφίξεις πακέτων από το OLT στις ONUs (downstream transmission)**

Εδώ υπολογίζεται ο χρόνος που φτάνουν τα πλαίσια δεδομένων από το οπτικό τερματικό γραμμής σε κάθε οπτική μονάδα δικτύου. Την χρονική στιγμή που φτάνει κάθε πλαίσιο δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει και τον πίνακα διαμοίρασης εύρους ζώνης (BWmap), σε κάθε ONU καλείται το event 3 για την μετάδοση στο ρεύμα ανόδου. Στον χρόνο αυτόν συμπεριλαμβάνεται και ένα χρονικό διάστημα ελέγχου (guard time), έτσι ώστε να μην υπάρχουν συγκρούσεις στην μετάδοση προς το OLT.

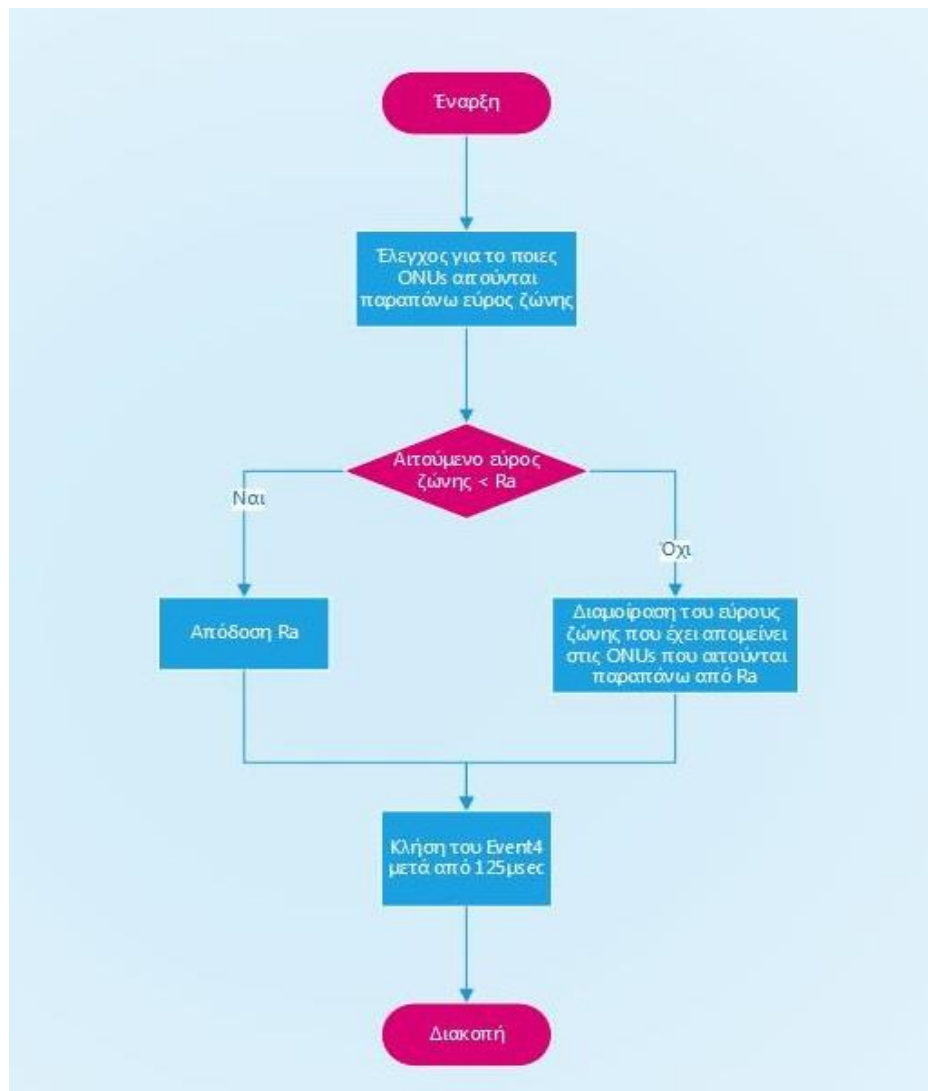
- **Event 3 – διαγραφή των πακέτων που μεταδίδονται στο OLT**

Τα πακέτα που στέλνει κάθε οπτική μονάδα δικτύου αφαιρούνται από την αντίστοιχη διάσταση της 3D ουράς και υπολογίζεται η καθυστέρηση μετάδοσης. Επίσης, υπολογίζεται ο χρόνος μετάδοσης. Την χρονική στιγμή που φτάνει κάθε πακέτο το οπτικό τερματικό γραμμής καλείται πάλι το event 2 για να επαναληφθεί η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Το event 3, δηλαδή, καλεί το event 2 και αντιστρόφως.

- **Event 4 – Ανανέωση του πίνακα εύρους ζώνης (BWmap)**

Στο γεγονός αυτό ανανεώνεται το BWmap σύμφωνα με την κατάσταση κίνησης που επικρατεί στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχεται ποιες οπτικές μονάδες έχουν στείλει απάντηση στο οπτικό τερματικό γραμμής και για αυτές ελέγχεται η απαίτηση κίνησης. Δηλαδή, αν κάποια οπτική μονάδα αιτείται παραπάνω εύρος ζώνης από το fixed bandwidth της δίνεται μέχρι να φτάσει το όριο του assured bandwidth (Ra). Έπειτα στις οπτικές μονάδες που αιτούνται παραπάνω και από το όριο του Ra, το εύρος ζώνης που έχει απομείνει μοιράζεται σε αυτές τις οπτικές μονάδες, μέχρι να καταναλωθεί όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου (Rm). Το γεγονός αυτό καλεί τον εαυτό του κάθε 125μsec.

Διάγραμμα Ροής



Εικόνα 35: Διάγραμμα ροής event4

○ Event 5 – Λήξη προσομοίωση και εξαγωγή στατιστικών μετρήσεων

Στο τελευταίο event γίνεται η εξαγωγή των στατιστικών μετρήσεων από όλη την προσομοίωση. Υπολογίζονται δηλαδή, η ρυθμοαπόδοση του δικτύου, ο μέσος όρος της καθυστέρησης καθώς και η διακύμανση της καθυστέρησης και ο μέσος αριθμός πακέτων που έχουν απορριφθεί.

5.4.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος XG-PON με μηχανισμό δυναμικής διάθεσης εύρους ζώνης (DBA)

➤ Δεδομένα προσομοίωσης

- 1) Η προσομοίωση εκτελέστηκε σύμφωνα με ίχνη κίνησης για τις αφίξεις των πακέτων δεδομένων στις οπτικές μονάδες δικτύου, για συγκεκριμένους τύπους υπηρεσιών, οι οποίες είναι:
 - Live Streaming
 - Voice over IP (VoIP)
 - Real media streaming-TCP
 - Real media streaming-UDP

και η επιλογή των χρόνων άφιξης βάση πιθανοτήτων από τα συγκεκριμένα ίχνη κίνησης.

- 2) Οι αποστάσεις των οπτικών μονάδων από το οπτικό τερματικό γραμμής ρυθμίστηκαν στην αρχή της προσομοίωσης και αντιστοιχούν σε εύρος 32 – 70 χιλιομέτρων με την απόσταση να αυξάνεται ανά 2 χιλιόμετρα για κάθε ONU. Δηλαδή, η 1^η οπτική μονάδα θα έχει 32χ χιλιόμετρα απόσταση από το OLT, η 2^η 34, η 3^η 36 κτλ.
- 3) Ο χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής (Round Trip Time – RTT) για κάθε οπτική μονάδα υπολογίστηκε στην αρχή της προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση κάθε οπτικής μονάδας από το OLT και ότι, τα δεδομένα στην οπτική ίνα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός.

Ταχύτητα μετάδοσης στην οπτική ίνα: 2×10^5 km/sec

RTT(sec): distance from OLT(km)/ 2×10^5

- 4) Το πάγιο εύρος ζώνης (R_F) αντιστοιχεί στο 1/7 του μέγιστου εύρους ζώνης (R_M) και το εξασφαλισμένο εύρος ζώνης (R_a) στα 5/14 του μέγιστου.

➤ Εκτέλεση των event

- Τα event αρχικοποιούνται στον πίνακα Event_List κατά την έναρξη της προσομοίωσης και έχουν όλα αρχική χρονική στιγμή εκτέλεσης 0sec, εκτός από το event τερματισμού το οποίο θα λάβει χώρα στο τέλος της προσομοίωσης, οπότε ο χρόνος εκτέλεσης του ισούται με την διάρκεια της προσομοίωσης (Simulation Time (S)) που δίνεται σαν παράμετρος εισόδου στο σύστημα.
- Το πρώτο και το δεύτερο γεγονός εκτελούνται για όλες τις οπτικές μονάδες δικτύου και καλούνται για κάθε μία ξεχωριστά.
- Το τρίτο γεγονός καλείται και αυτό για κάθε μία από τις οπτικές μονάδες, δεν αρχικοποιείται όμως στον πίνακα του Event_List, καθώς καλείται μέσω του δεύτερου γεγονότος.
- Το τέταρτο γεγονός καλείται κάθε φορά για όλες τις οπτικές μονάδες και ενημερώνει τον πίνακα διάθεσης εύρους ζώνης για κάθε μία από αυτές.

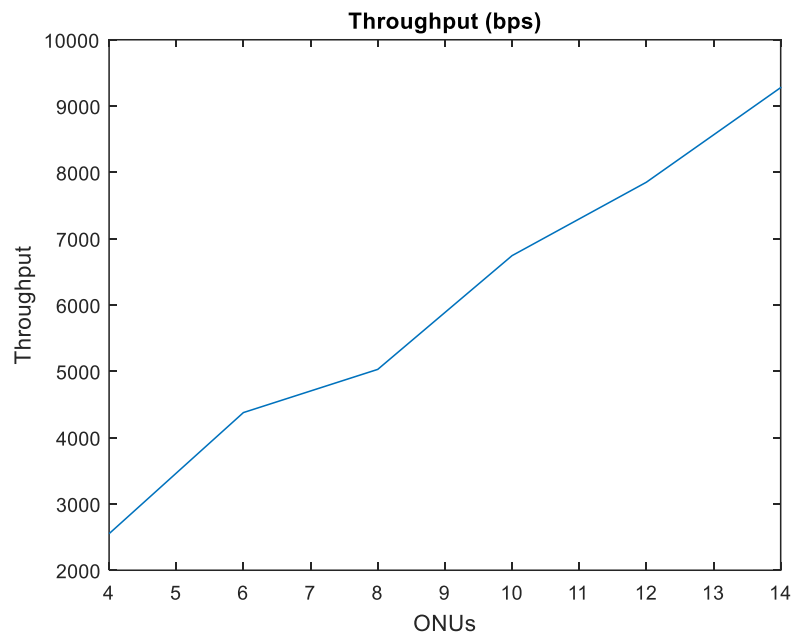
➤ Γραφήματα Απόδοσης Δικτύου

Τα γραφήματα που ακολουθούν δείχνουν την καθυστέρηση, τη διακύμανση καθυστέρησης καθώς και τη ρυθμοαπόδοση του παθητικού οπτικού δικτύου για 2 έως 20 οπτικές μονάδες.

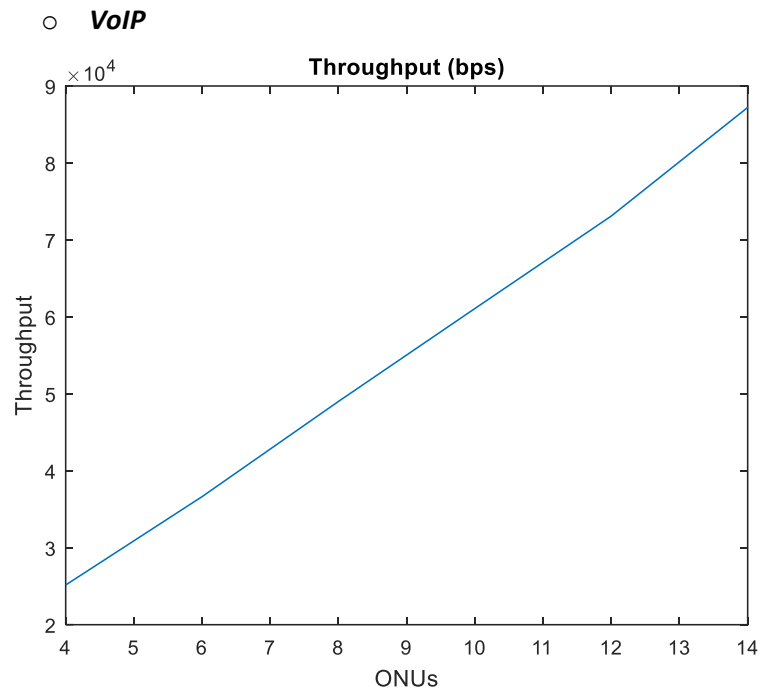
Ο χρόνος προσομοίωσης ρυθμίστηκε στο 1 δευτερόλεπτο.

- **Ρυθμοαπόδοση**

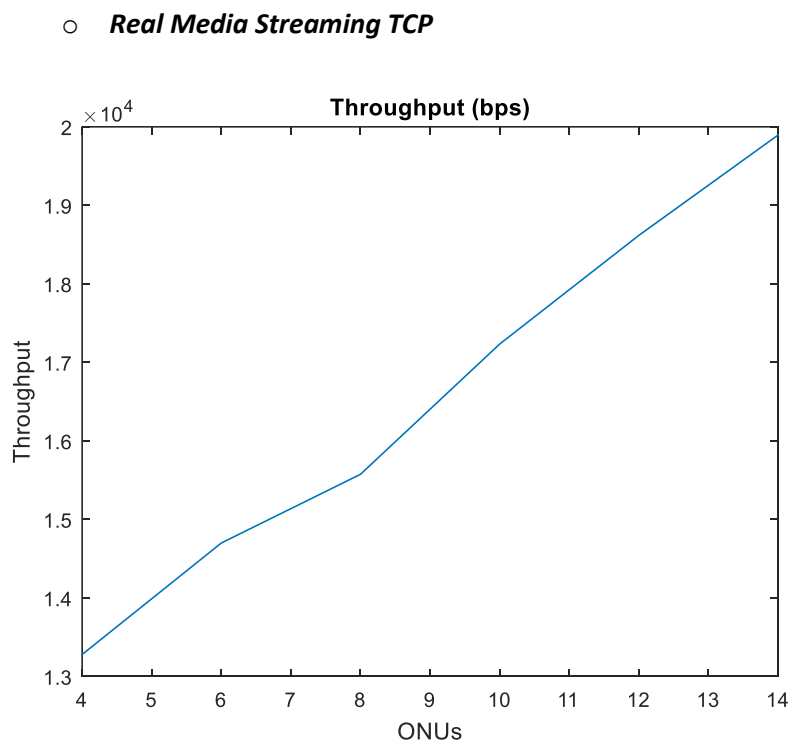
- **Live Streaming**



Εικόνα 36 Ρυθμοαπόδοση δικτύου για κίνηση Live Streaming

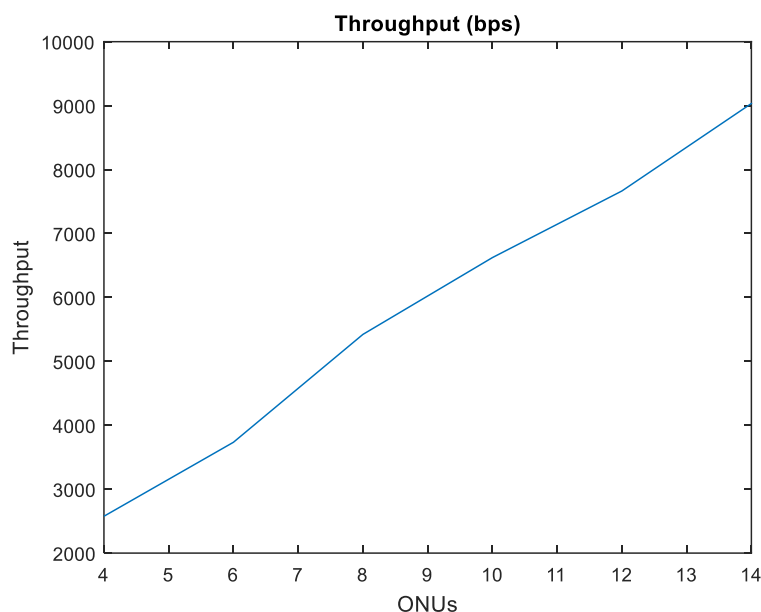


Εικόνα 37 Ρυθμοαπόδοση του δικτύου για κίνηση VoIP



Εικόνα 38 Ρυθμοαπόδοση του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming TCP

○ **Real Media Streaming UDP**



Εικόνα 39 Ρυθμοαπόδοση του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming UDP

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η ρυθμοαπόδοση του δικτύου. Όπως ήταν αναμενόμενο τα επίπεδα του Throughput αυξάνονται συνεχώς καθώς αυξάνεται ο αριθμός των οπτικών μονάδων που προστίθενται στο δίκτυο, αφού αυξάνεται και η κίνηση των δεδομένων. Μεγάλα επίπεδα ρυθμοαπόδοσης συναντάμε στην περίπτωση της κίνησης VoIP.

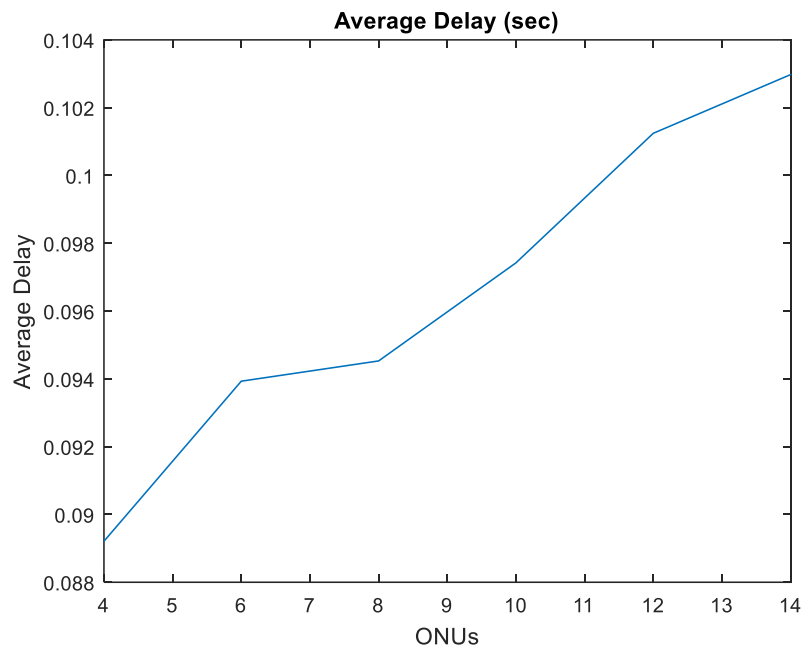
Παρακάτω ακολουθούν τα διαστήματα εμπιστοσύνης για κάθε αριθμό ONUs.

• **Διαστήματα Εμπιστοσύνης**

ONUs/Traffic (bytes)	2	4	6	8	10
Live Streaming	2782±124	4485±396	5032±427	6725±519	7903±763
TCP	1335±234	1473±229	1561±582	1715±715	1972±455
UDP	2832± 99	3752±309	5512±406	6892±349	7613±129
VoIP	2713±393	3643± 66	5725±526	6112±507	7215±842

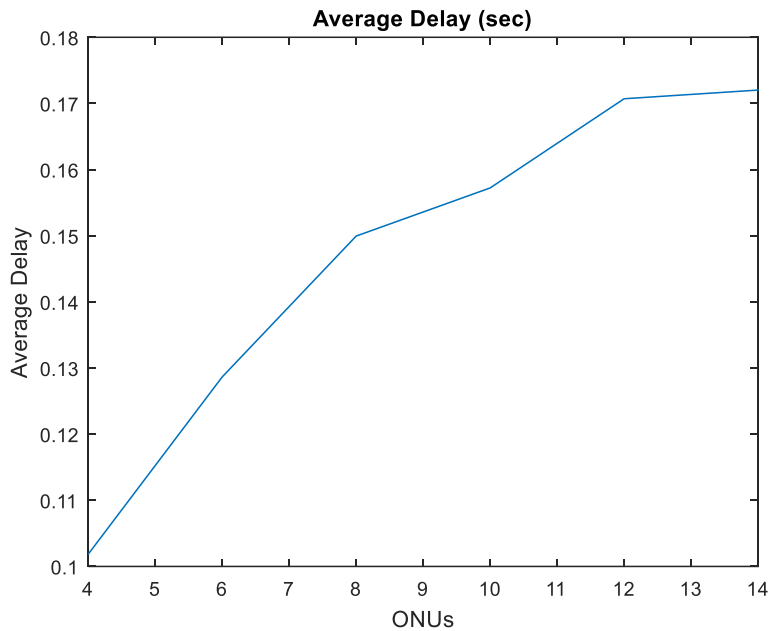
- **Μέση Καθυστέρηση**

- **Live Streaming**



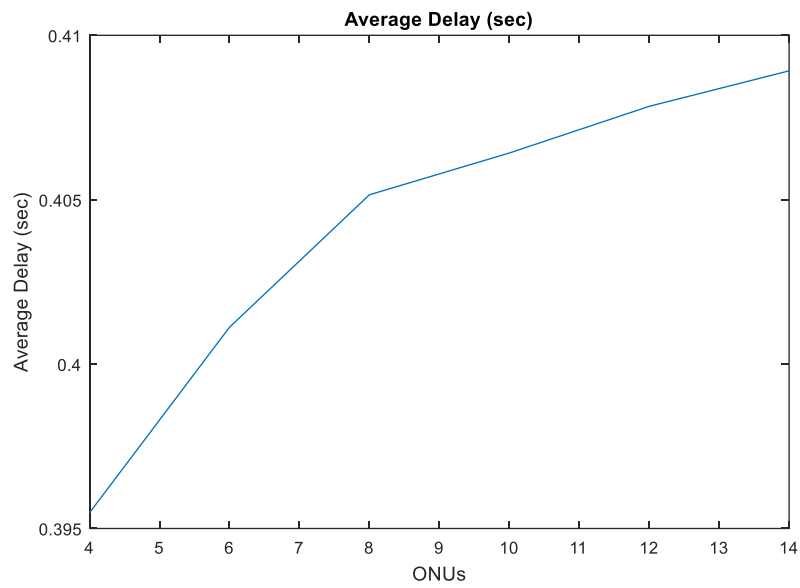
Εικόνα 40 Μέση καθυστέρηση του δικτύου για κίνηση Live Streaming

- **VoIP**



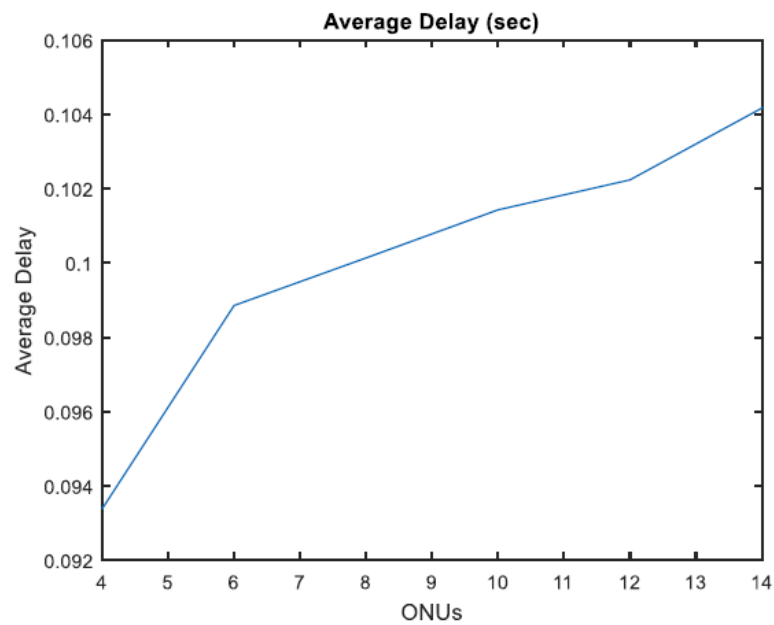
Εικόνα 41 Μέση καθυστέρηση του δικτύου για κίνηση VoIP

○ **Real Media Streaming TCP**



Εικόνα 42 Μέση καθυστέρηση του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming TCP

○ **Real Media Streaming UDP**



Εικόνα 43 Μέση καθυστέρηση του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming UDP

Η μέση καθυστέρηση ομοίως με την ρυθμοαπόδοση του δικτύου που αναφέρθηκε προηγουμένως αυξάνεται και αυτή γραμμικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των οπτικών μονάδων στο δίκτυο. Αυτό είναι εύλογο συνακόλουθο, αφού όσο αυξάνονται οι οπτικές μονάδες αυξάνεται και ο συνολικός φόρτος του δικτύου και το οπτικό τερματικό γραμμής (OLT) πρέπει να εξυπηρετήσει περισσότερες ONUs. Για το λόγο αυτό, ο ρυθμός εξυπηρέτησης μειώνεται, αφού ο προγραμματισμός της μετάδοσης upstream γίνεται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις οπτικές μονάδες που έχουν δεδομένα για μετάδοση.

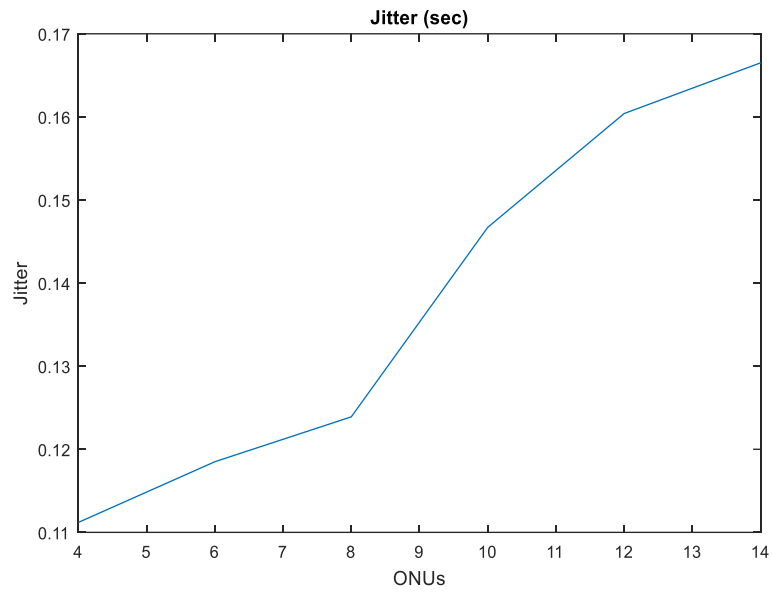
Από τα διαστήματα εμπιστοσύνης που ακολουθούν μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα καθώς οι διαφορές που παρουσιάζονται είναι της τάξης των χιλιοστών του δευτερολέπτου.

- **Διαστήματα εμπιστοσύνης**

ONUs/Traffic (sec)	2	4	6	8	10
Live Streaming	0.0887± 0,0194	0.9432± 0,0079	0.9445± 0,0196	0.0971± 0,0053	0.015± 0,0084
TCP	0.3954± 0,0138	0.4028± 0,0057	0.4051± 0,0130	0.4062± 0,0027	0.04078± 0,0110
UDP	0.0934± 0,0067	0.09897± 0,0121	0.1006± 0,0097	0.1018± 0,0071	0.1028± 0,0076
VoIP	0.1033± 0,0016	0.1284± 0,0044	0.1520± 0,0038	0.1593± 0,0034	0.1715± 0,0056

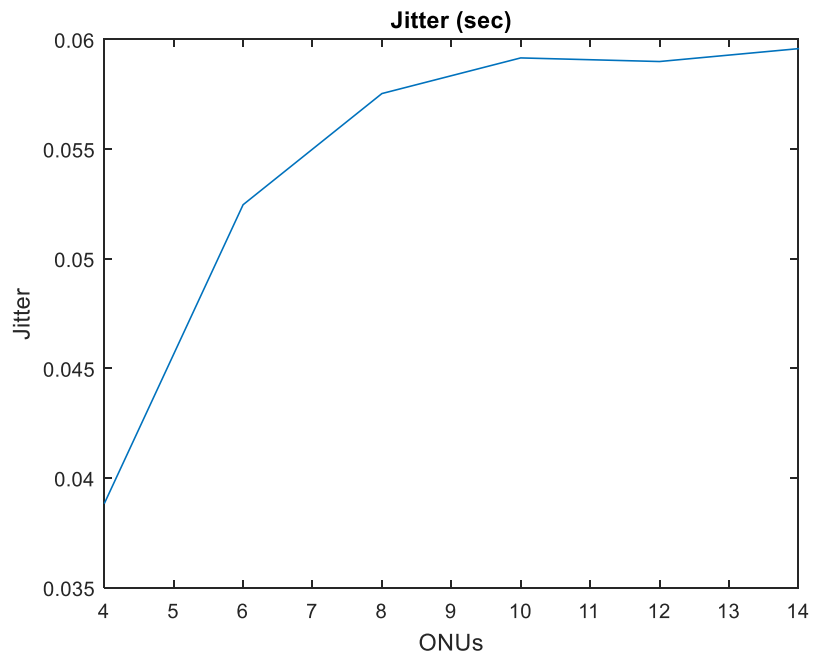
➤ Διακύμανση καθυστέρησης

○ *Live Streaming*



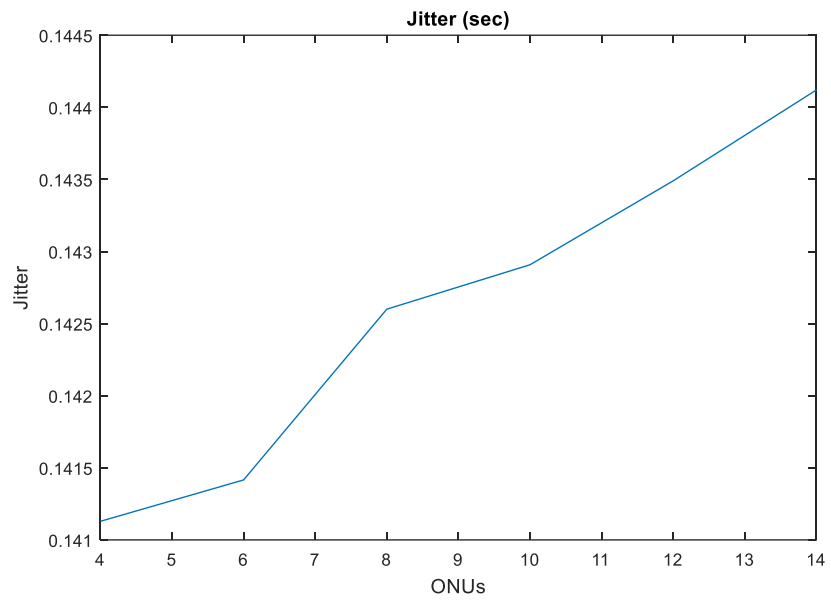
Εικόνα 44 Διακύμανση καθυστέρησης του δικτύου για κίνηση Live Streaming

○ *VoIP*



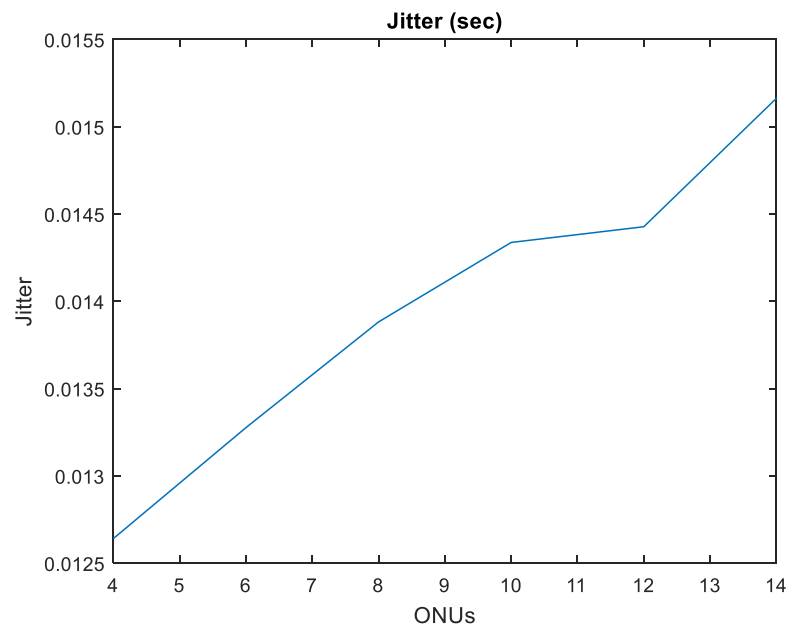
Εικόνα 45 Διακύμανση της καθυστέρησης του δικτύου για κίνηση VoIP

○ **Real Media Streaming TCP**



Εικόνα 46 Διακύμανση της καθυστέρησης του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming TCP

○ **Real Media Streaming UDP**



Εικόνα 47 Διακύμανση της καθυστέρησης του δικτύου για κίνηση Real Media Streaming UDP

Αντίστοιχα αυξανόμενα είναι και τα διαγράμματα της διακύμανσης καθυστέρησης που φαίνονται παραπάνω. Επίσης, διακρίνεται ότι οι τιμές της καθυστέρησης δεν αποκλίνουν σημαντικά από τη μέση τιμή του δείγματος.

- **Διαστήματα Εμπιστοσύνης**

ONUs/Traffic (sec)	2	4	6	8	10
Live Streaming	0.11150± 0,00337	0.11892± 0,00325	0.12435± 0,00291	0.14753± 0,00133	0.15712± 0,00191
TCP	0.14128± 0,00317	0.141435 ± 0,00121	0.142676 ± 0,00116	0.142875 ± 0,00070	0.1435± 0,00247
UDP	0.012712 ± 0,00237	0.013255 ± 0,00117	0.01381± 0,00186	0.01473± 0,00152	0.01482± 0,00108
VoIP	0.03582± 0,00084	0.04591± 0,00162	0.055713 ± 0,00128	0.05585± 0,00120	0.05591± 0,00077

6. Προσαρμογή του πάγιου εύρους ζώνης (Fixed Bandwidth) με τη χρήση της τεχνικής Αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony) και βελτιστοποίηση καθυστέρησης

6.1. Τεχνική βελτιστοποίησης Ant Colony

Η τεχνική βελτιστοποίησης Ant Colony Optimization (ACO) είναι ένας τρόπος σχεδιασμού ευρετικών αλγορίθμων (meta heuristic algorithms) για συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Οι Meta heuristic αλγόριθμοι αποτελούν σενάρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό ευρετικών μεθόδων που εφαρμόζονται σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων. Με άλλα λόγια, ένας αλγόριθμος Meta heuristic είναι μία αλγοριθμική δομή (framework) γενικού σκοπού που μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικά προβλήματα με σχετικά λίγες αλλαγές. Παραδείγματα τέτοιων αλγορίθμων είναι ο tabu search, η επαναληπτική τοπική αναζήτηση (iterated local search) και η Ant Colony Optimization.[50][51][52]

Ο πρώτος αλγόριθμος βασισμένος σε αυτό το πλαίσιο παρουσιάστηκε το 1991 από τον Marco Dorigo με την διδακτορική διατριβή του 'Optimization, learning and Natural Algorithms', μοντελοποιώντας τον τρόπο με τον οποίο τα μυρμήγκια αντιμετωπίζουν το πρόβλημα εύρεσης τροφής χρησιμοποιώντας φερομόνες, και από τότε πολλές παραλλαγές της βασικής αυτής δομής έχουν καταγραφεί στην βιβλιογραφία, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3: Παραλλαγές Αλγορίθμου Ant Colony

Algorithm	Authors	Year	References
<i>Ant System</i>	Dorigo Et Al	1991	[54][55]
<i>Elitist As.</i>	Dorigo Et Al	1992	[55][56]
<i>Ant –Q</i>	Cambardella & Dorigo	1995	[57]
<i>Ant Colony System</i>	Dorigo & Cambardella	1996	[58][59]
<i>Max-Min As</i>	Stutzle & Hoos	1996	[60][61]
<i>Rank –Based As</i>	Bullnheimer Et Al	1997	[62][63]

Τα μυρμήγκια είναι ικανά να βρουν το κοντινότερο στην αποικία τους μονοπάτι για την εύρεση τροφής. Ενώ περπατούν, τα μυρμήγκια αφήνουν φερομόνη στο έδαφος και ακολουθούν τη φερομόνη που νωρίτερα έχει καταβληθεί από άλλα μυρμήγκια. Στην τεχνική ACO ένας αριθμός μυρμηγκιών ‘χτίζουν’ λύσεις σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και ανταλλάσσουν πληροφορίες της ποιότητάς τους μέσω ενός σχήματος επικοινωνίας που είναι αντίστοιχο αυτού των αληθινών μυρμηγκιών.

Για τη εύρεση του συντομότερου μονοπατιού, τα κινούμενα μυρμήγκια αφήνουν ένα μέρος φερομόνης στο έδαφος, έτσι ώστε ένα μυρμήγκι λαμβάνοντας υπόψη το προηγούμενο ίχνος μπορεί να την εντοπίσει και να αποφασίσει με υψηλή πιθανότητα να την ακολουθήσει. Σαν αποτέλεσμα, η συλλογική συμπεριφορά των μυρμηγκιών είναι ένας τρόπος επανατροφοδότησης, όπου η πιθανότητα με την οποία κάθε μυρμήγκι επιλέγει ένα μονοπάτι αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό των μυρμηγκιών που έχουν ακολουθήσει αυτό το μονοπάτι προηγουμένως.

Η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών είναι ένα επαναληπτικός καταναμημένος αλγόριθμος. Σε κάθε επανάληψη, θεωρείται ένα σύνολο μυρμηγκιών (cooperating agents) κάθε ένα από αυτά χτίζει μία λύση περπατώντας από ακμή σε ακμή πάνω στον γράφο με τον περιορισμό να μην επισκέπτεται την ίδια ακμή πάνω από μία φορά. Σε κάθε βήμα κατασκευής της λύσης, κάθε μυρμήγκι επιλέγει την εκάστοτε ακμή που θα επισκεφθεί σύμφωνα με έναν στοχαστικό μηχανισμό που βασίζεται στο ίχνος της φερομόνης: όταν βρίσκεται στην ακμή i , η επόμενη ακμή επιλέγεται στοχαστικά ανάμεσα στις υπόλοιπες που δεν έχει επισκεφθεί. Συγκεκριμένα, αν δεν έχει ακόμα επισκεφθεί την ακμή j , μπορεί να την επιλέξει με πιθανότητα ανάλογη με την φερομόνη που έχει καταβληθεί σε αυτήν από προηγούμενα μυρμήγκια. Στο τέλος μιας επανάληψης, οι τιμές των φερομόνων ρυθμίζονται κατάλληλα για να εξασφαλισθεί η καλύτερη ποιότητα των λύσεων που έχουν κατασκευασθεί.[47][48][49]

6.2. Χρήσεις της τεχνικής Ant Colony

Ο πρώτος αλγόριθμος ονομάζεται Ant System και έχει ως στόχο να λύσει το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή που αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης διαδρομής. Ο γενικός αλγόριθμος είναι απλός και μελετά ένα σύνολο από μυρμήγκια που κάνουν κυκλικές διαδρομές κατά μήκος των πόλεων. Το μυρμήγκι επιλέγει να πάει σε μια πόλη με βάση ορισμένους κανόνες:

1. Θα πρέπει να επισκεφτεί κάθε πόλη μόνο μια φορά;
2. Μια μακρινή πόλη έχει λιγότερες πιθανότητες να επιλεγεί;
3. Αν η ποσότητα φερομόνης σε μια πόλη είναι έντονη τότε η πιθανότητα να επιλεγεί η πόλη είναι μεγαλύτερη;
4. Με την ολοκλήρωση της διαδρομής η κατάθεση φερομόνης δείχνει αν η διαδρομή είναι σύντομη;

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης αποικιών έχουν εφαρμοστεί σε πολλά προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, όπως η δρομολόγηση οχημάτων. Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βέλτιστων λύσεων στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή. Έχουν ένα πλεονέκτημα σε σχέση με άλλους αλγορίθμους όσον αφορά την αναδιάταξη και την αλλαγή στο γράφημα: ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργεί συνεχώς και να προσαρμοστούν αλλαγές σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι ενδιαφέρον όσον αφορά τη δρομολόγηση του δικτύου και σε συστήματα αστικών μεταφορών.[46][47][56][56]

6.3. Μοντέλο υλοποίησης και εφαρμογής του αλγορίθμου ACO

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή του αλγορίθμου επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης του δικτύου XG-PON που έχει υλοποιηθεί για τα δεδομένα της κίνησης VoIP.

Όπως περιγράφηκε και στην προηγούμενη ενότητα κάθε μυρμήγκι αναζητά λύσεις ελάχιστου κόστους. Για να γίνει αυτό, δοκιμάζονται διάφορες τιμές για το πάγιο εύρος ζώνης (fixed bandwidth) και υπολογίζονται οι τιμές τις καθυστέρησης που προκύπτουν από αυτές.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε μυρμήγκι δοκιμάζει τιμές για το fixed bandwidth στο εύρος 64 έως 1518 bytes. Το ποσοστό της φερομόνης που εναποτίθεται στην εκάστοτε λύση εύρους ζώνης (vertex) αντιστοιχεί στην διαφορά της υπολογιζόμενης κάθε φορά καθυστέρησης από το ορισμένο κατώφλι (T_i) που έχει οριστεί για την τιμή της καθυστέρησης σύμφωνα με την Cisco για κίνηση VoIP και αντιστοιχεί σε 0.200 sec. Σε περίπτωση που η διαφορά αυτή είναι αρνητική αντικαθίσταται με 0. Ισχύει δηλαδή η παρακάτω συνθήκη:

$$Pheromone = \begin{cases} T_i - average\ delay, & T_i - average\ delay \geq 0 \\ 0, & T_i - average\ delay < 0 \end{cases}$$

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων.

Μετά το τέλος κάθε επανάληψης η φερομόνη ανανεώνεται σύμφωνα με τον παρακάτω κανόνα για να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός σε τοπικά βέλτιστα:

$$pheromone = (1 - \rho) * pheromone$$

6.3.1 Σχέδιο υλοποίησης

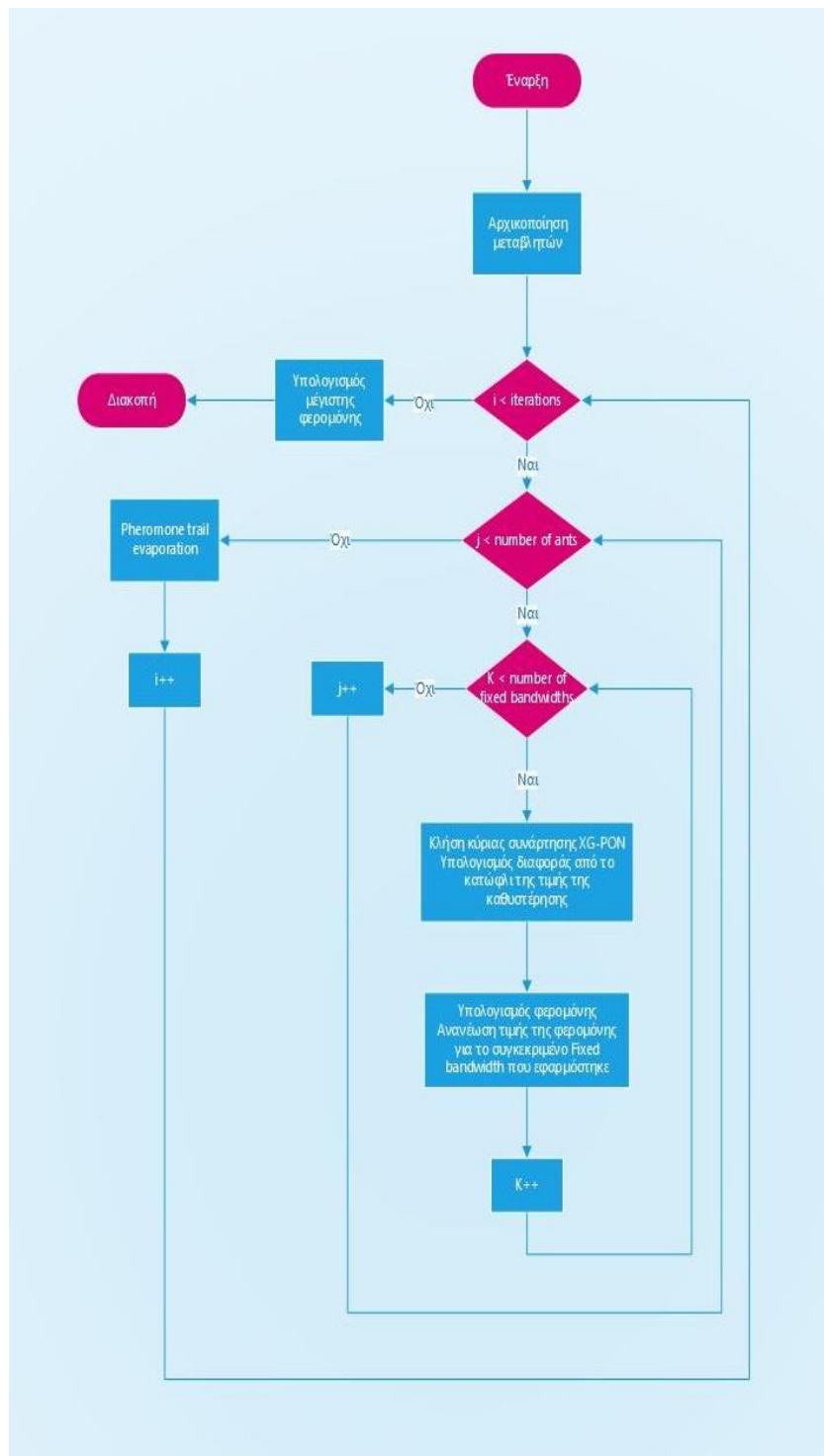
➤ Δεδομένα Προσομοίωσης

1. Η προσομοίωση εκτελέστηκε για 2, 4 και 6 μυρμήγκια και για 10 επαναλήψεις σε κάθε εκτέλεση.
2. Ο αριθμός των οπτικών μονάδων για τις οποίες έγιναν τα πειράματα είναι από 2 μέχρι 10.
3. Το όριο για την τιμή της καθυστέρησης ορίστηκε στα 0.200sec.
4. Οι τιμές που δοκιμάστηκαν για το πάγιο εύρος ζώνης (R_F) είναι από 64 μέχρι 1518 bytes και αυξάνονται κατά 10 bytes κάθε φορά.
5. Η διάρκεια εκτέλεσης του κυρίως κώδικα για το σύστημα XG-PON ορίστηκε στο 1sec.

➤ Ψευδοκώδικας

```
Start
For i=1:Number of iterations
  For j=1:Number of Ants
    For k=1:length(Fixed Bandwidth)
      Calculate average delay and jitter from the main
      XG-PON function;
      Calculate difference from threshold:  $d = T1 -$ 
      average delay;
      Calculate pheromone:  $dt = d$ ;
      Update pheromone:  $t = t + dt$ ;
    End
  End
  pheromone evaporation:  $t = (1-p) * t$ ;
End
Calculate maximum pheromone;
End
```

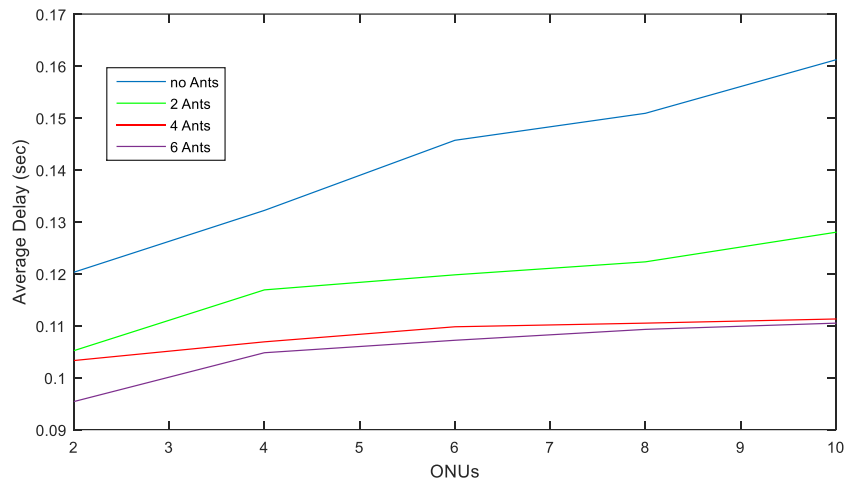
➤ Διάγραμμα Ροής



Εικόνα 48: Διάγραμμα ροής Ant Colony

6.4. Εξαγωγή και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Ο αλγόριθμος Ant Colony υλοποιήθηκε για 2, 4 και 6 ants, για 10 επαναλήψεις και οι προτεινόμενες τιμές για το πάγιο εύρος ζώνης εφαρμόστηκαν στο αρχικό σχήμα XG-PON. Από αυτό προέκυψαν οι αντίστοιχες τιμές για την μέση καθυστέρηση για 2,4,6,8 και 10 οπτικές μονάδες δικτύου αντίστοιχα οι οποίες παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα και συγκρίνονται με τις τιμές που προέκυψαν από την εκτέλεση της προσομοίωσης χωρίς την εφαρμογή του αλγορίθμου.



Εικόνα 49 Μέση Καθυστέρηση προς ONUs με τη χρήση του Ant Colony

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η μέση καθυστέρηση του δικτύου βελτιώνεται σε πολύ σημαντικό βαθμό με τη χρήση της τεχνικής βελτιστοποίησης Ant Colony. Η βελτίωση αυτή γίνεται πιο έντονη καθώς ο αριθμός των οπτικών μονάδων αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί, με την τεχνική αποικίας μυρμηγκιών παρατηρείται η συνολική κίνηση του δικτύου ανάλογα με τον αριθμό των οπτικών μονάδων που υπάρχουν σε αυτό και δίνεται αντίστοιχο πάγιο εύρος ζώνης ανάλογα με τον πλήθος τους.

Στο διάγραμμα αυτό διακρίνονται επίσης κάποιες ανομοιομορφίες στα μεγέθη του μέσου όρου καθυστέρησης, όσο αναφορά στην εφαρμογή της τεχνικής με 2 και με 4 μυρμηγκία και για αριθμό οπτικών μονάδων μεγαλύτερο του 8. Στο σημείο αυτό παρατηρείται αμυδρή μείωση του μέσου όρου καθυστέρησης της τάξεως του 10^{-3} , ενώ το αναμενόμενο αποτέλεσμα θα ήταν η μέση καθυστέρηση να αυξάνεται με κάθε οπτική μονάδα που προστίθεται στο δίκτυο. Παρόλα αυτά, μπορούμε να πούμε ότι η μείωση αυτή είναι αμελητέα.

Τα ποσοστά βελτίωσης του μέσου όρου καθυστέρησης του δικτύου όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα είναι πολύ σημαντικά, φτάνοντας το ποσοστό του 86,3% στην εκτέλεση στην οποία χρησιμοποιήθηκαν 6 μυρμηγκία και στο δίκτυο υπήρχαν 6 οπτικές μονάδες δικτύου.

Πίνακας 4: Ποσοστά βελτίωσης μέσου όρου καθυστέρησης

No ONUs/ No Ants	2 ants	4 ants	6 ants
6 ONUs	79,35%	78,28%	86,36%
8 ONUs	76,96%	76,3%	70,48%
10 ONUs	71,38%	75,77%	71,38%

- Προτεινόμενα πάγια εύρη ζώνης από τον αλγόριθμο Ant Colony και διαστήματα εμπιστοσύνης για τις προκύπτουσες τιμές μέσης καθυστέρησης

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτονται τα προτεινόμενα πάγια εύρη ζώνης, έτσι όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου Ant Colony, καθώς και τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης για τις τιμές τις μέσης καθυστέρησης.

Πίνακας 5: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τις τιμές μέσης καθυστέρησης

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, τα διαστήματα εμπιστοσύνης είναι της τάξης 10^{-3} (sec), Κάτι το οποίο μας δείχνει ότι οι τιμές του πάγιου εύρους ζώνης που δοκιμάστηκαν από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης δεν προκαλούν μεγάλη απόκλιση στις τιμές της μέσης καθυστέρησης του δικτύου. Ως εκ τούτου, συμπεραίνεται ότι η συγκεκριμένη τεχνική βελτιστοποίησης μπορεί να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

No Ants/Number of ONUs	2 ONUs	4 ONUs	6 ONUs	8 ONUs	10 ONUs
2 Ants	0.1052± 0.00673	0.1169± 0,00344	0.1198± 0.00226	0.1223± 0.00389	0.1280± 0.00378
4 Ants	0.1013± 0.00877	0.1069± 0,00612	0.1098± 0.00299	0.1105± 0,00246	0.1113± 0.00299
6 Ants	0.0954± 0.00547	0.1048± 0,00854	0.1072± 0.00284	0.1093± 0,00475	0.1105± 0.00544

Σύνοψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η λειτουργία του παθητικού οπτικού δικτύου XG-PON, το οποίο είναι μπορεί να ικανοποιήσει μεγάλο μέρος των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων κίνησης, εξυπηρετώντας ταχύτητες των 10Gbps στο ρεύμα καθόδου.

Επίσης, με τη χρήση της τεχνικής βελτιστοποίησης Ant Colony έγινε προσπάθεια μείωσης των τιμών της μέσης καθυστέρησης του δικτύου, δοκιμάζοντας και επιλέγοντας από ένα μεγάλο εύρος τιμών πάγιου εύρους ζώνης εκείνο το οποίο συντελεί στην μείωση της καθυστέρησης και συνακόλουθα στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

Ο αλγόριθμος ACO βρίσκει τις καλύτερες λύσεις που κατασκευάστηκαν από προηγούμενες επαναλήψεις. Συγκεκριμένα σε κάθε σύνθεση του γράφου αντιστοιχεί μια μεταβλητή (τεχνητή φερομόνη) και ανάλογα πόσο καλύτερη είναι η λύση, τόσο περισσότερη είναι η τεχνητή φερομόνη. Στο τέλος που θα έχουμε όλες τις πιθανές λύσεις , θα δούμε την ποσότητα της τεχνητής φερομόνης ώστε να δούμε πια είναι η βέλτιστη.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν η βελτίωση που παρατηρήθηκε στο μέσο όρο καθυστέρησης κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί σημαντικό παράδειγμα της χρησιμότητας της τεχνικής Ant Colony στην προσομοίωση της κίνησης ενός δικτύου επικοινωνιών.

Ελπίζουμε ότι η υλοποίηση και η ένταξη του δικτύου XG-PON δεν θα αργήσει να συμβάλει στην ανάπτυξη των παρόντων παθητικών δικτύων, καθώς και στην κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους των αναγκών των χρηστών.

Παράρτημα

- **Main XGPON function**

```
function [
throughput,avgdelay,drop_ratio,jitter,BWmap,remaining_bw,remaining_d
ata,RTT] = XGPON( N,S)

    flag=true;

    %the events 1 and 2 are executed for each onu seperately
    Event_List=zeros(3,2*N+2);

    %frame arrivals to the ONUs
    Event_List(1,1:N)=1;
    Event_List(2,1:N)=0;
    Event_List(3,1:N)=1:N;

    %event 2 first broadcast trasmission to the ONUs by the OLT
    Event_List(1,N+1:2*N)=2;
    Event_List(2,N+1:2*N)=0;
    Event_List(3,N+1:2*N)=1:N;

    %termination event
    Event_List(1,2*N+1)=5;
    Event_List(2,2*N+1)=S;

    Event_List(1,2*N+2)=4;
    Event_List(2,2*N+2)=0;

    Q3D=zeros(3,1,N);
    Q3D_Index=zeros(N);

    Rf=1/7*38880/N;
    Ra=5/14*38880/N;
    BWmap(2,1:N)=Rf % (Byte)

    remaining_bw=38880-(1/7*38880) % (Byte)
    % remaining_bw=38880-Rf*N;
    % Ra=remaining_bw/2;

    dropped_packets=0;
    id=0;
    packet=0;
    frame_arrivals=zeros(1,N);
    burst_arrivals=zeros(1,N);
    sendData=0;
    remaining_data=zeros(1,N);
    delay=0;
    delay_counter=1;
    delays=[];
    counter=0;
    T1=[];
    c=1;
    T2=[];
    c2=1;

    %read traffic traces
    [array_LiveStr,intervals_LiveStr]=Traffic('Live_Str.txt');
    [array_rTCP,intervals_rTCP]=Traffic('Real_TCP.txt');
    [array_rUDP,intervals_rUDP]=Traffic('Real_UDP.txt');
    [array_VoIP,intervals_VoIP]=Traffic('VoIP.txt');

    km=zeros(N);
```



```

for i=1:N
    km(i)=30+2*i;
end

RTT=zeros(1,N);

%2/3*3*10^8m/s -> 2*10^5km/s -> transmission rate in optical fiber
for i=1:N
    RTT(i)=km(i)/(2*10^5);           %RTT/2 (seconds)
end
RTT=(sortrows(RTT))';

while flag

    event=Event_List(1,1);

    if event==1

        [Event_List,T,Q3D,Q3D_Index,id,dropped_packets,packet,
        counter]=
        Event1(Event_List,Q3D,Q3D_Index,dropped_packets,id,pac
        ket,array_LiveStr,intervals_LiveStr,
        array_rTCP,intervals_rTCP,array_rUDP,intervals_rUDP,ar
        ray_VoIP,intervals_VoIP,counter);

    elseif event==2

        [Event_List,T,frame_arrivals,BWmap,c,T1]=
        Event2(Event_List,frame_arrivals,BWmap,RTT,burst_arriv
        als,c,T1);

    elseif event==3

        [Event_List,T,remaining_data,delay,Q3D,sendData,burst_
        arrivals,delay_counter,delay]=
        Event3(Event_List,sendData,remaining_data,Q3D,RTT,BWma
        p,delay,burst_arrivals,delay_counter,delay);

    elseif event==4

        [Event_List,T,BWmap,remaining_bw,c2,T2,burst_arrivals]
        =
        Event4(Event_List,BWmap,remaining_bw,burst_arrivals,Q3
        D,Ra,c2,T2);

    elseif event==5

        [Event_List,T,throughput,avgdelay,flag,drop_ratio,jitt
        er]=
        Event5(Event_List,sendData,delay,id,flag,dropped_packe
        ts,packet,delay);

    end

    Event_List(:,1)=[];
    Event_List=(sortrows(Event_List',[2,1]))';

```

```

end

end

%packet arrivals at the ONUs
function
[Event_List,T,Q3D,Q3D_Index,id,dropped_packets,packet,counter]=Event
1(Event_List,Q3D,Q3D_Index,dropped_packets,id,packet,array_LiveStr,i
ntervals_LiveStr,array_rTCP,intervals_rTCP,array_rUDP,intervals_rUDP
,array_VoIP,intervals_VoIP,counter)

    T = Event_List(2,1);
    onu=Event_List(3,1);

    %select traffic

    array=array_VoIP;
    intervals=intervals_VoIP;

    %select packet size
    r=rand();

    if r<=array(3,1)
        packetsize=array(1,1);
    end
    for i=1:size(array,2)-1
        if r<=sum(array(3,1:i))+array(3,i+1)
            packetsize=array(1,i+1);
            break;
        end
    end
    %insert packet in the 3D queue
    packet=packet+1;

    if sum(Q3D(2,:,onu))>5000
        disp('dropped packet')
        dropped_packets=dropped_packets+1;
    else
        disp('packets inserted in the queue')
        id=id+1;
        Q3D_Index(onu)=Q3D_Index(onu)+1;
        Q3D(1,Q3D_Index(onu),onu)=id;
        Q3D(2,Q3D_Index(onu),onu)=packetsize;
        Q3D(3,Q3D_Index(onu),onu)=T;
    end

    %select time interval
    r1=rand();

    if r1<=intervals(1,3)
        IT=intervals(1,1);
    end
    for i=1:size(intervals,1)-1
        if r1<=sum(intervals(1:i,3))+intervals(i+1,3)
            IT=intervals(i+1,1);
            break;
        end
    end

    %call event 1 to insert the next packet in the onu at the
    selected interval
    Event_List(1,end+1)=1;
    Event_List(2,end)=T+IT;
    Event_List(3,end)=onu;
end

```

end

%packet arrivals at the OLT

```
function [Event_List,T,frame_arrivals,BWmap,c,T1]=Event2(Event_List,frame_arrivals,BWmap,RTT,burst_arrivals,c,T1)
```

```
T=Event_List(2,1);  
onu=Event_List(3,1);  
c=c+1;  
T1(c)=T;
```

```
packetsize=155520; %BWmap(Byte) included
```

```
% (seconds) -> the time in which the packet reaches  
% each ONU (propagation delay + transmission delay)  
frame_arrival=T+(packetsize*8)/(10^9)+RTT(onu);
```

```
%guard time check
```

```
for i=1:size(frame_arrivals)  
    if i~=onu  
        if frame_arrival<frame_arrivals(i)+0.00005  
            frame_arrival=frame_arrival+0.00005;  
        end  
    end  
end
```

```
frame_arrivals(onu)=frame_arrival;
```

```
BWmap(1,onu)=frame_arrivals(onu)
```

```
%call event 3 to delete transferd data from the ONU's queue  
%if the specific onu has replied  
Event_List(1,end+1)=3;  
Event_List(2,end)=frame_arrivals(onu);  
Event_List(3,end)=onu;
```

end

%delete the data that will be trasmitted upstream from the 3D queue

```
function [Event_List,T,remaining_data,delay,Q3D,sendData,burst_arrivals,delay_counter,delay_counter,delay_counter]=Event3(Event_List,sendData,remaining_data,Q3D,RTT,BWmap,delay,burst_arrivals,delay_counter,delay_counter)
```

```
T=Event_List(2,1);  
onu=Event_List(3,1);
```

```
data=0;  
k=1;
```

```
while data<=BWmap(2,onu) && k<=size(Q3D,2)
```

```
    if Q3D(2,k,onu)>0  
        data=data+Q3D(2,k,onu);  
        sendData=sendData+Q3D(2,k,onu); % (Byte)  
        delay=delay+(T-Q3D(3,k,onu));  
        delays(delay_counter)=T-Q3D(3,k,onu);  
        delay_counter=delay_counter+1;  
        Q3D(:,k,onu)=0;  
    end  
    k=k+1;
```

```

end

remaining_data(1, onu) = sum(Q3D(2, :, onu)); % (Byte)

% (seconds) -> burst arrival at the OLT (propagation delay +
transmission delay)
burst_arrivals(1, onu) = T + (data * 8) / (2.5 * 10^9) + RTT(onu);
t = ceil(burst_arrivals(1, onu) / (125 * (10^-6))) * (125 * (10^-6));

Event_List(1, end+1) = 2;
Event_List(2, end) = T + t;
Event_List(3, end) = onu;

end

% update BWmap
function [Event_List, T, BWmap, remaining_bw, c2, T2, burst_arrivals] = Event
4(Event_List, BWmap, remaining_bw, burst_arrivals, Q3D, Ra, c2, T2)

T = Event_List(2, 1);

% check which ONUs have already send a response to the OLT
onus = [];
for i = 1:length(burst_arrivals)
    if burst_arrivals(1, i) <= T && burst_arrivals(1, i) ~= 0
        onus(end+1) = i;
        burst_arrivals(1, i) = 0;
    end
end

% check which ONUs are asking for more than fixed bandwidth but
less than assured
% assign to them the required bandwidth
unsatisfied = [];
for i = 1:length(onus)
    if sum(Q3D(2, :, onus(i))) > BWmap(2, onus(i)) &&
sum(Q3D(2, :, onus(i))) <= Ra
        if remaining_bw >= sum(Q3D(2, :, onus(i))) - BWmap(2, onus(i))
            remaining_bw = remaining_bw - (sum(Q3D(2, :, onus(i))) -
BWmap(2, onus(i)))
            BWmap(2, onus(i)) = sum(Q3D(2, :, onus(i)));
        end
    end

    % check which ONUs are asking for more than assured bandwidth
elseif sum(Q3D(2, :, onus(i))) > Ra
    unsatisfied(end+1) = onus(i)
end
end

% share the remaining bandwidth to the ONUs that are asking for
more than assured
if ~isempty(unsatisfied)
    Rs = remaining_bw / length(unsatisfied);
    if Rs > 0
        for i = 1:length(unsatisfied)
            if remaining_bw >= Rs
                if Rs >= (sum(Q3D(2, :, unsatisfied(i))) -
BWmap(2, unsatisfied(i)))
                    remaining_bw = remaining_bw -
(sum(Q3D(2, :, unsatisfied(i))) - BWmap(2, unsatisfied(i)))
                BWmap(2, unsatisfied(i)) = sum(Q3D(2, :, unsatisfied(i)));
            else
                BWmap(2, unsatisfied(i)) = Rs;
            end
        end
    end
end

```

```

        remaining_bw=remaining_bw-Rs
    end
    else
        break;
    end
end
end
end

BWmap

Event_List(1,end+1)=4;
Event_List(2,end)=T+125*(10^-6);

end

%termination event
function [Event_List,T,throughput,avgdelay,flag,drop_ratio,jitter]=Event5(Event_List,sendData,delay,id,flag,dropped_packets,packet,delays)

T=Event_List(2,1);
flag=false;
throughput=sendData/T; %bps
avgdelay=delay/id; %s
drop_ratio=dropped_packets/packet;
sum=0;
for i=1:length(delays)
    sum=sum+(delays(i)-avgdelay)^2;
end
jitter=sum/length(delays);

end

```

|

Βιβλιογραφία

- [1] [Κώστας Στυλιάδης] *Τηλεπικοινωνίες, Από τις φρυκτωρίες στους δορυφόρους* (5/1999)
- [2] [Jean Walrand] *Δίκτυα Επικοινωνιών* (ελληνική έκδοση, Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών), Mc Graw Hill1 (1998)
- [3] [A. Tanenbaum] *Δίκτυα Υπολογιστών*, Κλειδάριθμος (1996)
- [4] [Google] <https://sites.google.com/site/>
- [5] [Wikipedia] <https://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>.
- [6] [Γ.Ι. Παπαδημητρίου, Π.Α. Τσιμούλας, Μ.Σ. Obaidat και Α.Σ. Πομπόρτσης] *Multiwavelength Optical LANs*, Wiley & Sons Editions (2003)
- [7] [G. P. Agrawal] *Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες*, Εκδ. Τζιόλα (2000)
- [8] [R.P.Khare] *Fiber Optics and Optoelectronics* (2004)
- [9] [Chomycz Bob] *Fiber Optic Installer's Field Manual* (2000)
- [10][Anurag Sharma] *Fiber Optics and Photonics* (1999)
- [11][Keigo Lizuka] *Photonics for Fiber and Integrated Optics* (1998)
- [12][John G. Nellig] *Understanding Telecommunications and Lightwave Systems : an Entry-Level Guide* (1996)
- [13][Djafar K. Mynbaev and Lowell L. Scheiner] *Fiber-Optic Communications Technology*, PrenticeHall (2001)
- [14][Α.Σ. Πομπόρτσης] *Εισαγωγή στις Σύγχρονες Τεχνολογίες Επικοινωνιών*, εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ (2009)
- [15][David Cleary] *Fundamentals of a Passive Optical Network (PON)*
- [16][eLUMINANT] *Asynchronous Transfer Mode (ATM) and Passive Optical Networks (PONs)*, The International Engineering Consortium (2000)
- [17][Alloptic] *Ethernet Passive Optical Networks*, The International Engineering Consortium (2001)
- [18][ITU Recommendations G.984.1] *Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON)*, General characteristics (2003)
- [19][ITU-T G.789.3] Recommendation ITU-T G.789.3 (10/2010), *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification*
- [20][ITU-T G.709] Recommendation ITU-T G.709/Y.1331 (2009), *Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)*.
- [21][ITU-T G.987] Recommendation ITU-T G.987 (2010), *10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms*.
- [22][ITU-T G.987.1] Recommendation ITU-T G.987.1 (2010), *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*.
- [23][ITU-T G.988] Recommendation ITU-T G.988 (2012), *ONU management and control interface (OMCI) specification*.
- [24][ITU-T I.432.1] Recommendation ITU-T I.432.1 (1999), *B-ISDN user-network interface –Physical layer specification: General characteristics*.
- [25][ATIS-0300220] ATIS-0300220.2005, *Representation of the Communications Industry Manufacturers, Suppliers, and Related Service Companies for Information Exchange*.
- [26][IEEE 802.1X] IEEE Standard 802.1X-2010, *Port-Based Network Access Control*.

- [27][IETF RFC 3748] IETF RFC 3748 (2004), *Extensible Authentication Protocol (EAP)*.
- [28][IETF RFC 5216] IETF RFC 5216 (2008), *The EAP-TLS Authentication Protocol*.
- [29][IETF RFC 5247] IETF RFC 5247 (2008), *Extensible Authentication Protocol (EAP) Key Management Framework*.
- [30][IETF RFC 5433] IETF RFC 5433 (2009), *Extensible Authentication Protocol – Generalized Pre-Shared Key (EAP-GPSK) Method*.
- [31][NIST FIPS-197] NIST Federal Information Processing Standards Publication 197 (2001), *Advanced Encryption Standard (AES)*.
- [32][NIST SP800-38A] NIST Special Publication 800-38A (2001), *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation – Methods and Techniques*.
- [33][NIST SP800-38B] NIST Special Publication 800-38B (2005), *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The CMAC Mode for Authentication*.
- [34][G. Pesavento and M. Kesley] *PONs for the Broadband Local Loop*, Lightwave, vol. 16, no. 10 (1999)
- [35][B. Lung] *PON Architecture 'Futureproofs' FTTH*, Lightwave, vol. 16, no. 10 (1999)
- [36][S. Clavenna] *Metro Optical Ethernet*, Lightreading (2000)
- [37][D. J. Shin, D. K. Jung, H. S. Shin, J. W. Kwon, S. Hwang, Y. Oh and C. Shim] *Hybrid WDM/TDM-PON with wavelength selection-free transmitters*, J. Lightw. Technol., (Jan 2005)
- [38][F. An, K. S. Kim, D. Gutierrez, S. Yam, E. Hu, K. Shrikhande, and L. G. Kazovsky] *SUCCESS: A next-generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture*, J. Lightw. Technol., (Nov. 2004)
- [39][Y.-L. Hsueh, M. S. Rogge, S. Yamamoto, and L. G. Kazovsky] *A highly flexible and efficient passive optical network employing dynamic wavelength allocation*, J. Lightw. Technol., (Jan. 2005)
- [40][D. Parsons] *GPON vs. EPON Costs Comparison*, BroadLight Inc., (June 2005)
- [41][M.-S. Han et al] *Efficient Dynamic Bandwidth Allocation for FSAN-Compliant GPON*, OSA J. Opt. Netw., (July 2008)
- [42][Photonic Network Communications] *Ethernet PON (ePON): Design and Analysis of an Optical Access Network*
- [43][Glen Kramer and Biswanath Mukherjee, University of California, Davis Gerry Pesavento, Alloptic, Inc. Livermore] *IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON (EPON)*
- [44][Ahmad R. Dhaini, Chadi M. Assi, Member, IEEE, Martin Maier, Member IEEE, and Abdallah Shami, Member, IEEE] *Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation in Hybrid TDM/WDM EPON Networks*
- [45][Frank J. Effenberger, Senior Member, IEEE] *The XG-PON System: Cost Effective 10 Gb/s Access*
- [46][Man-Soo HAN Dept. of Information and Communications, Mokpo National Univ., Korea] *Simple and Feasible Dynamic Bandwidth and Polling Allocation for XGPON*
- [47][Saad Ghaleb Yaseen, Nada M. A.AL-Slamy, Department of Management Information Systems, College of Economics & Business, Al-Zaytoonah University of Jordan] *Ant Colony Optimization*

- [48] [M. Dorigo, Luca M. G.] *Ant Colony system: A Cooperative learning approach to the Travelling Salesman Problem*, IEEE transaction on evolutionary computation, Vol. 1, No. 1, (1997)
- [49] [S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt Jr., and M.P. Vecchi] *Optimization by Simulated Annealing*, Science, vol. 220, pp. 671-680, (1983)
- [50] [F. Glover and M. Laguna] *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, (1997)
- [51] [H.R. Lourenco, O. Martin, and T. Stutzle] *Iterated Local Search*, in Handbook of Metaheuristics, ser. International Series in Operations Research & Management Science, F. Glover and G.Kochenberger, Eds., Kluwer Academic Publishers, vol. 57, pp. 321-353, (2002)
- [52] [J. Holland] *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor: University of Michigan Press, (1975)
- [53] [Mathworks] <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [54] [A. Coloni, M. Dorigo and V. Maniezzo] *Distributed optimization by ant colonies*, Proceedings of ECAL 91, European Conference on Artificial Life, Elsevier Publishing, Amsterdam (1991)
- [55] [M. Dorigo, G. Di Caro, and L.M. Gambardella], *Ant algorithm for discrete optimization*, Artificial Life, vol. 5, no. 2, pp. 137-172 (1999)
- [56] [M. Dorigo and G. Di Caro] *The Ant Colony Optimization meta-heuristic* (1999)
- [57] [M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stitzle] *Ant Colony Optimization: Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique*, IEEE computational intelligence magazine (2006)
- [58] [M. Dorigo, Vittorio, Maniezzo and Alberto Coloni] *The Ant system: Optimization by A Colony of Cooperating Agents*, IEEE Transaction on system (1996)
- [59] [S. Lin.] *Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem*, Bell systems Journal (1965)
- [60] [Christopher M. White, Gary G. Yen] *A Hybrid Evolutionary Algorithm for Traveling Salesman Problem*, school of Electrical and Computer Engineering, Oklahoma State University, USA.
- [61] [L. Bianchi, L.M. Gambardella, M. Dorigo] *An Ant Colony Optimization Approach to the probabilistic Traveling Salesman Problem*, In Proceedings of PPSN-VII, Seventh International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, Lecture Notes in Computer Science (2002)
- [62] [P. Jungie, W. Dingwei] *An Ant Colony Optimization Algorithm for Multiple Travelling Salesman Problem*, ICICIC apos; 06. first international conference on Volume 1 (2006)
- [63] [M. Dirigo and Thomas Stutzle] *Ant Colony Optimization*, MIT Press Cambridge (2004)