



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

*WDM-PONs: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ*

ΜΠΑΚΑΛΑΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:

ΜΠΑΖΙΑΝΑ ΠΕΡΙΣΤΕΡΑ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Λαμία, Φεβρουάριος 2024



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE
DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

*WDM-PONs: STUDY AND
PERFORMANCE OPTIMAZATION*

BAKALAROS KONSTANTINOS

BACHELOR'S THESIS

SUPERVISING PROFESSOR

BAZIANA PERISTERA, ASSOCIATE PROFESSOR OF THE DEPARTMENT OF COMPUTER
SCIENCE AND TELECOMMUNICATIONS, UNIVERSITY OF THESSALY

Lamia , February 2024

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 20 / 03 / 2024

Ο Δηλών

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

Το παρόν σύγγραμμα αποτελεί πτυχιακή εργασία με θέμα «WDM-PONs: Μελέτη και βελτιστοποίηση απόδοσης» που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο των προπτυχιακών μου σπουδών, στο Πανεπιστήμιο της Λαμίας, στο τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024.

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs) είναι η κυριότερη τεχνολογία δικτύων πρόσβασης στις μέρες μας. Παρέχουν υψηλό εύρος ζώνης και υποστηρίζουν πολλές εφαρμογές που απαιτούν ταχύτητα και απόδοση. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν πρωτόκολλα πρόσβασης που βασίζονται πάνω στα PONs, ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες μας για ευρυζωνικότητα.

Η πτυχιακή εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στην οπτική ίνα, στην πολυπλεξία των οπτικών σημάτων και στα οπτικά δίκτυα πρώτης και δεύτερης γενιάς. Στην συνέχεια δίνεται βάση στα PONs, διάφορες κατηγορίες τους αλλά και στα δίκτυα πρόσβασης Fiber To The X (FTTx). Έπειτα παρουσιάζονται τα πρωτόκολλα πρόσβασης που μελετήθηκαν, δηλαδή το πρωτόκολλο ανόδου και το πρωτόκολλο καθόδου. Τα πρωτόκολλα αυτά έχουν στόχο την μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης και την δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης στους χρήστες. Τέλος παρουσιάζονται, με την μορφή διαγραμμάτων, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ενώ γίνεται και μια επεξήγηση πάνω σε αυτά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό, νιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν να ολοκληρώσω την εργασία αυτή.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, κα Μπαζιάνα Περιστερά, για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου αλλά κυρίως για την άψογη συνεργασία μας στην υλοποίηση της πτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πάνω απ' όλα την οικογένεια μου. Η διαρκή στήριξη τους και η υπομονή τους με ώθησαν να φτάσω ως εδώ, επομένως η διαδρομή μου από την αρχή των σπουδών μου μέχρι και σήμερα οφείλεται σε αυτούς.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πριν την εκτεταμένη χρήση των οπτικών ινών, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι χρησιμοποιούσαν τα χάλκινα καλώδια ως κύρια μέσα μετάδοσης. Η τεχνολογία αυτή ήταν περιοριστική για τους παρόχους ως προς την ταχύτητα και την απόσταση μετάδοσης του σήματος. Στο παρελθόν αυτός ο περιορισμός δεν αποτελούσε πρόβλημα διότι οι ανάγκες των χρηστών για εύρος ζώνης και ταχύτητα μετάδοσης ήταν μικρότερες από ότι είναι σήμερα. Πλέον λόγω της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας οι ανάγκες αυτές αυξάνονται συνεχώς. Εφαρμογές που χρησιμοποιούν καθημερινά οι χρήστες, όπως τα νέα online videogames, οι τηλεδιασκέψεις, η τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence, AI), η επαυξημένη πραγματικότητα (augmented reality, AR), η προβολή ταινιών μέσω πλατφόρμας streaming και η τεχνολογία Internet Of Things (IoT), απαιτούν ευρυζωνικότητα και χαμηλούς χρόνους απόκρισης. Έτσι οι πάροχοι δικτύων ερευνούν τρόπους για να καταφέρουν να καλύψουν τις αυξανόμενες ανάγκες που υπάρχουν. Στο πλαίσιο αυτό παρατηρήθηκε σημαντική εξέλιξη στα οπτικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα στα παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks, PONs). Η εφαρμογή των οπτικών ινών αποτελεί μια επαναστατική εξέλιξη στις τηλεπικοινωνίες.

Έτσι, η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη πρωτοκόλλων μετάδοσης στα PONs της τελευταίας γενιάς, τα XG-PONs. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν δύο πρωτόκολλα, ένα για την ροή καθόδου και ένα για την ροή ανόδου. Και στις δύο ροές μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίο εισέρχονται τα πακέτα μέσα στο πλαίσιο μετάδοσης. Ο σκοπός αυτών των πρωτοκόλλων είναι η ικανοποίηση των αναγκών των τελικών χρηστών και η μέγιστη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας.

Περίληπτικά λοιπόν, στην εργασία αυτή, πρωτίστως γίνεται μια εισαγωγή στην οπτική ίνα και στα οπτικά δίκτυα. Στη συνέχεια αναλύονται τα PONs και τα δίκτυα πρόσβασης. Έπειτα περιγράφονται αναλυτικά τα πρωτόκολλα πρόσβασης που μελετήθηκαν και κλείνοντας παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων τα αποτελέσματα της μέσης καθυστέρησης των πακέτων και της δίκαιης κατανομής του εύρους ζώνης.

Λέξεις κλειδιά:

PONs, Οπτική ίνα, WDM

ABSTRACT

Before the widespread use of fiber optics, telecommunications providers used copper cables as their primary means of transmission. This technology was limiting the speed and transmission distance of the signal for operators. In the past, this limitation was not a problem because users' needs for bandwidth and transmission speed were lower than they are today. Now, due to the rapid development of technology, these needs are constantly increasing. Applications that users use every day, such as new online video games, video conferencing, artificial intelligence (AI), augmented reality (AR), movie viewing through a streaming platform and Internet Of Things (IoT) technology, require broadband and low response times. So network providers are looking for ways to meet the growing needs that exist. In this context, there has been a significant development in optical networks and more specifically in passive optical networks (PONs). The application of fiber optics is a revolutionary development in telecommunications.

Thus, this thesis aims to study transmission protocols in the latest generation PONs, XG-PONs. More specifically, two protocols were studied, one for the cathode flow and one for the anode flow. In both streams, the way packets enter the transmission frame was studied. The purpose of these protocols is to satisfy the needs of end users and maximize fiber bandwidth.

In summary, therefore, in this work, there is primarily an introduction to fiber optics and optical networks. PONs and access networks are then analyzed. Then the access protocols studied are described in detail and in closure the results of average packet latency and fair bandwidth distribution are presented in the form of diagrams.

Keywords:

PONs, Fiber Optics, WDM

Table of Contents

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	6
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ABSTRACT	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ.....	13
1.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	13
1.1.2 ΕΙΔΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ.....	14
1.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	15
1.3 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	16
1.3.1 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΜΕ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	16
1.3.2 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΜΕ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΧΡΟΝΟΥ	17
1.4 ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΩΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ.....	18
1.5 ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: PONS	21
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	21
2.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΩΝ PONS.....	22
2.3 A-PONS.....	23
2.4 B-PONS	24
2.5 E-PONS	26
2.5.1 A-PON TO E-PON	26
2.5.2 E-PON DOWNSTREAM	27
2.5.3 E-PON UPSTREAM	27
2.5.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ E-PONS.....	28
2.6 G-PONS.....	29
2.6.1 DOWNSTREAM G-PON FRAME	30
2.6.2 UPSTREAM GPON FRAME.....	31
2.6.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ G-PONS	32
2.7 GE-PONS	34
2.8 NG-PONS	34
2.9 XG-PONS	36
2.9.1 ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	37
2.9.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΣΤΟ XG-PON	37
2.10 PONS ΜΕ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (WDM-PONS).....	39
2.11 ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ	41
2.11.1 FIBER TO THE HOME (FTTH)	41
2.11.2 FIBER TO THE BUILDING (FTTB).....	42
2.11.3 FIBER TO THE CURB (FTTC)	42
2.11.4 FIBER TO THE NEIGHBORHOOD (FTTN).....	43
2.11.5 FIBER TO THE ROOM (FTTR)	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΕ XG-PON.....	44
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	44

3.2 ΣΤΟΧΟΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ	44
3.2.1 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΚΑΘΟΔΟΥ (ΠΚ).....	45
3.2.2 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΑΝΟΔΟΥ (ΠΑ).....	47
3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	49
 <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</u>	<u>50</u>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	50
4.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	50
4.2.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΡΟΗΣ ΚΑΘΟΔΟΥ	50
4.2.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΡΟΗΣ ΑΝΟΔΟΥ	51
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	52
 <u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</u>	<u>57</u>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

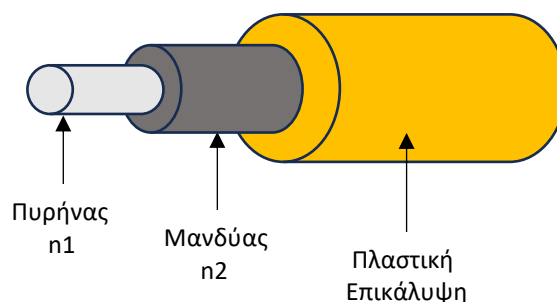
Τα οπτικά δίκτυα έχουν αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, παρέχοντας εύρος ζώνης που ξεπερνά άλλες τεχνολογίες μετάδοσης. Ήταν αναγκαία η εύρεση ενός νέου δικτύου που θα κάλυπτε τις νέες ανάγκες μας για ευρυζωνικότητα. Εξαιτίας των νέων τεχνολογιών, όπως τα νέα βιντεοπαιχνίδια εικονικής πραγματικότητας, τις τηλεδιασκέψεις που κάνουμε και τις ταινίες που παρακολουθούμε, η κίνηση στο διαδίκτυο είναι αυξημένη. Την λύση σε αυτό το πρόβλημα ήρθαν να δώσουν τα οπτικά δίκτυα, που αποτελούν την οικονομικότερη και καταλληλότερη επιλογή για την ενσύρματη επικοινωνία τόσο στα δίκτυα κορμού όσο και στα δίκτυα πρόσβασης.

1.1 Οπτική ίνα

1.1.1 Ορισμός

Η οπτική ίνα είναι ένα λεπτό νήμα γυαλιού ή πλαστικού που μέσα από αυτή μεταδίδεται η πληροφορία σε μεγάλες αποστάσεις με την χρήση του φωτός. Όπως βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα 1.1 δομείται από δύο περιοχές, την εσωτερική που ονομάζεται πυρήνας και την εξωτερική που ονομάζεται μανδύας. Ο πυρήνας έχει μεγάλο δείκτη διάθλασης n_1 και σκοπός του είναι να μεταδίδει το οπτικό σήμα. Ενώ ο μανδύας έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης n_2 και έχει ως στόχο να περιορίζει το οπτικό σήμα μέσα στο πυρήνα. Η επικάλυψη της ίνας είναι πλαστική και αποτελείται από ανθεκτικό υλικό με στόχο να προστατεύσει το εσωτερικό μέρος του καλωδίου από εξωτερικές φθορές.

Ως μέσο μετάδοσης, οι οπτικές ίνες διαδίδουν τα οπτικά κύματα που έχουν παραχθεί από μια οπτική πηγή, συνήθως λέιζερ ή LED. Τα κύματα αυτά έχουν υψηλή συχνότητα τα οποία υπερτίθενται ψηφιακά ή αναλογικά. Η διάδοση του σήματος επιτυγχάνεται μέσα στη περιοχή του πυρήνα της οπτικής ίνας επειδή ο δείκτης διάθλασης του είναι μεγαλύτερος από αυτό του μανδύα, δηλαδή $n_1 > n_2$. [1]



Σχήμα 1.1 Δομή οπτικής ίνας

Για την μετάδοση της πληροφορίας χρειάζεται ένας πομπός και ένας δέκτης. Ο πομπός είναι σημαντικός γιατί μετατρέπει το ψηφιακό σήμα που προέρχεται από μία ψηφιακή επεξεργασία, σε πληροφορία φωτός. Ενώ ο δέκτης λαμβάνει το οπτικό σήμα και το μετατρέπει σε ψηφιακό. [2]

1.1.2 Είδη οπτικών ινών

Με την πάροδο των χρόνων έχουν προτυποποιηθεί δύο τύποι οπτικών ινών. Οι τύποι αυτοί διαφέρουν ως προς τον ρυθμό και τις ροές μετάδοσης δεδομένων. Για κάθε τύπο οπτικής ίνας υπάρχουν διεθνή πρότυπα με προδιαγραφές στα χαρακτηριστικά μετάδοσης, γεωμετρικά, μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά.

Γενικότερα οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

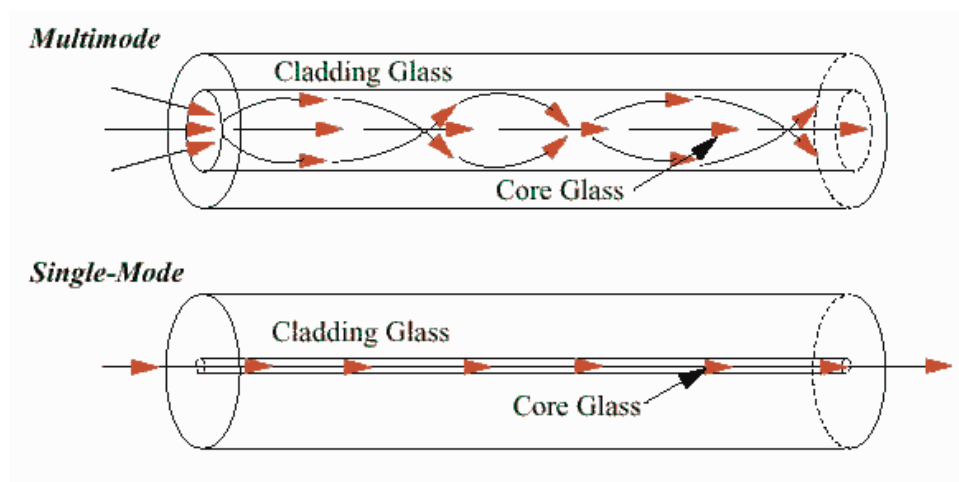
- Μονοτροπικές οπτικές ίνες -> Υποστηρίζουν έναν ρυθμό μετάδοσης.
- Πολυτροπικές οπτικές ίνες -> Υποστηρίζουν πολλούς ρυθμούς μετάδοσης.

1.1.2.1 Μονοτροπικές οπτικές ίνες (Single Mode)

Οι μονοτροπικές οπτικές ίνες έχουν μικρή διάμετρο που δεν ξεπερνάει τα 10μm. Έτσι επιτρέπεται η διέλευση σε περιορισμένο πλήθος ακτίνων. Οι ακτίνες αυτές ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή και αυτός είναι ο λόγος που επιλέγονται για την μετάδοση δεδομένων σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

1.1.2.2 Πολυτροπικές οπτικές ίνες (Multi Mode)

Οι πολυτροπικές οπτικές ίνες έχουν μεγαλύτερη διάμετρο και είναι πιο χοντρές από τις μονοτροπικές. Έχουν διάμετρο πυρήνα 50-100μm και λόγω του μεγέθους τους μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα πολλά κύματα φωτός.[2]



Σχήμα 1.2 Είδη Οπτικών Ινών [3]

1.1.3 Εφαρμογές οπτικών ινών

Τα περισσότερα χάλκινα καλώδια έχουν αντικατασταθεί πλέον από οπτικές ίνες. Οι οπτικές ίνες επιτρέπουν την μετάδοση φωτεινών σημάτων σε μεγαλύτερες αποστάσεις και με υψηλότερη ταχύτητα μετάδοσης από τα χάλκινα καλώδια.

Την εφαρμογή της οπτικής ίνας την συναντάμε σε δίκτυα που εξυπηρετούν εφαρμογές ευαίσθητες στον χρόνο και απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης όπως:

- Τα online videogames
- Τις τηλεδιασκέψεις
- Την εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality, VR)
- Την επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality, AR)
- Την τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence, AI)
- Το Internet Of Things (IOT)
- Την προβολή ταινιών μέσω streaming πλατφόρμας.
- Τις τηλεπικοινωνίες

Όλα τα παραπάνω έχουν μεγάλη απαίτηση για εύρος ζώνης, πράγμα που το καλύπτει η οπτική ίνα, αφού προσφέρει εύρος ζώνης ίσο με 100 Gbps. Επιπλέον, έχει μικρές απώλειες δεδομένων και προσδίδει μεγαλύτερη ασφάλεια, καθώς είναι δυσκολότερο να την παραβιάσει κανείς. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της οπτικής ίνας είναι το χαμηλό κόστος παραγωγής της, αφού είναι φτιαγμένη από γυαλί.[1]

1.3 Πολυπλεξία οπτικών σημάτων

Η συνεχής πίεση για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων εξασφάλισε την ταχεία ανάπτυξη των οπτικών εξαρτημάτων και τρόπους για την γρηγορότερη μετάδοση των δεδομένων μέσω της ίνας. Η πολυπλεξία είναι ο μηχανισμός με τον οποίο πολλαπλά σήματα συγχωνεύονται σε ένα κοινόχρηστο κανάλι που κάνει χρήση όλου του εύρους ζώνης που αποδίδει μία οπτική ίνα.

Οι κυριότερες τεχνικές πολυπλεξίας στα οπτικά δίκτυα είναι οι εξής:

- Τεχνική πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength division multiplexing, WDM)
- Τεχνική πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου (Time division multiplexing, TDM)

1.3.1 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος

Η πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing, WDM) χρησιμοποιείται στην οπτική ίνα και μας επιτρέπει να μεταδίδουμε διαφορετικές πληροφορίες, σε διαφορετικά μήκη κύματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.



Σχήμα 1.3 Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Στο παραπάνω σχήμα 1.3 απεικονίζεται ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί την τεχνολογία WDM. Κάθε "λ" είναι ένα διαφορετικό μήκος κύματος. Η διαδικασία ξεκινάει με κάθε πομπό (Transmitter) να μεταδίδει δεδομένα σε διαφορετικό μήκος κύματος (λ). Στη συνέχεια τα δεδομένα περνάνε στον πολυπλέκτη (MUX), ο οποίος με την σειρά του τα πολυπλέκει και τα μεταδίδει προς τον αποπολυπλέκτη (DEMUX), μέσω της οπτικής ίνας. Ο DEMUX έχει την

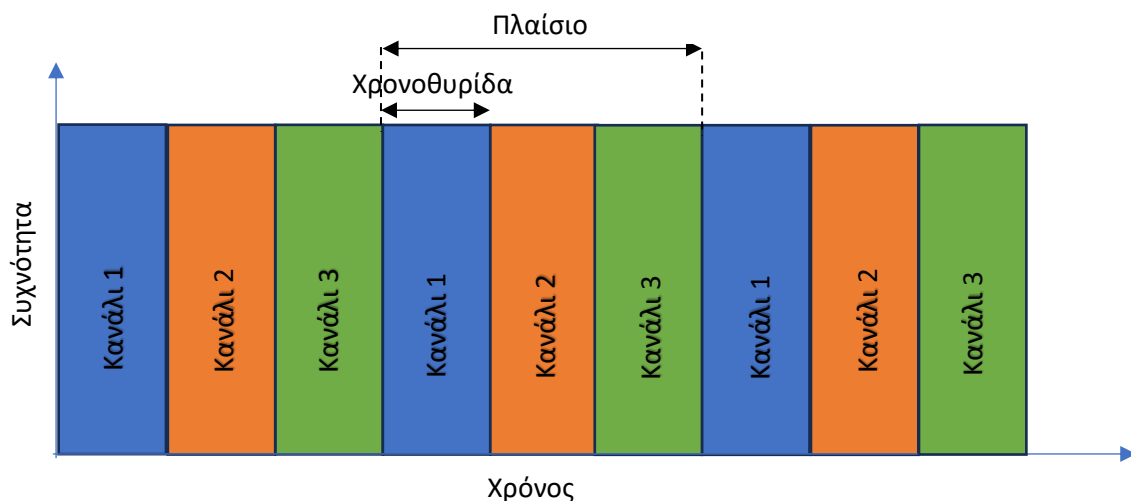
λειτουργία να αποπολυπλέκει το σήμα που έλαβε και έπειτα να στέλνει ξεχωριστά σε κάθε δέκτη (Receiver) την πληροφορία που του ανήκει, με βάση το μήκος κύματος που υπάρχει.

Η χρήση της τεχνικής αυτής έχει κάποια πλεονεκτήματα. Το βασικότερο είναι ότι αυξάνει σημαντικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος, καθώς κάθε transmitter μεταδίδει σε διαφορετικό μήκος κύματος. Ακόμη, το κόστος μετάδοσης είναι χαμηλότερο λόγω της χρήσης φωτός αντί για ρεύμα, όπως γινόταν στα καλώδια χαλκού. Συμπερασματικά, ένα οπτικό δίκτυο μπορεί να βελτιωθεί αν χρησιμοποιηθεί η τεχνική WDM.

Η τεχνική WDM συνήθως συναντάται σε δίκτυα ευρείας περιοχής (WAN) και σε τοπικά δίκτυα (LAN). Στα δίκτυα αυτά όλοι οι χρήστες είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με οπτική ίνα και χρησιμοποιούν την τεχνική WDM ώστε να αποφύγουν πιθανές συγκρούσεις δεδομένων και να έχουν τον μικρότερο δυνατό χρόνο καθυστέρησης. [4]

1.3.2 Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου

Η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM) χρησιμοποιείται στην οπτική ίνα και μας επιτρέπει να μεταδίδουμε διαφορετικά δεδομένα, σε διαφορετικό χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.



Σχήμα 1.4 Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου

Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η TDM. Η τεχνική αυτή στηρίζεται στον επιμερισμό του χρόνου. Γίνεται ανάθεση όλου του εύρους ζώνης σε έναν μόνο κόμβο αλλά σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Ο χρόνος διαχωρίζεται σε ισομεγέθη τμήματα που τα ονομάζουμε πλαίσια (time frames). Ένα πλαίσιο χωρίζεται σε μικρότερα ισομεγέθη τμήματα που

ονομάζονται χρονοθυρίδες ή κανάλια (time slots). Κάθε κόμβος του δικτύου χρησιμοποιεί μια χρονοθυρίδα για αποκλειστική μετάδοση σε όλο το εύρος ζώνης. [4]

Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται ένα κανάλι επικοινωνίας οι χρονοθυρίδες μένουν κενές, χωρίς να μεταφέρουν πληροφορίες. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποφευχθεί με την στατιστική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου. Τα δεδομένα αποθηκεύονται πρώτα σε έναν καταχωρητή και έπειτα μεταδίδονται μέσω των χρονοθυρίδων. Έτσι σε κάθε χρονοθυρίδα εκτός του σήματος, υπάρχει και η πληροφορία της διεύθυνσης του παραλήπτη.

Όλοι οι κόμβοι του δικτύου έχουν όλο το εύρος ζώνης για χρήση, απαιτείται όμως να υπάρχει τέλειος συγχρονισμός μεταξύ τους ώστε να αποφύγουμε τις χρονικές επικαλύψεις διαφορετικών μεταδόσεων.

Το πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι μπορεί να δοθεί διαφορετικό εύρος ζώνης σε διαφορετικούς χρήστες.

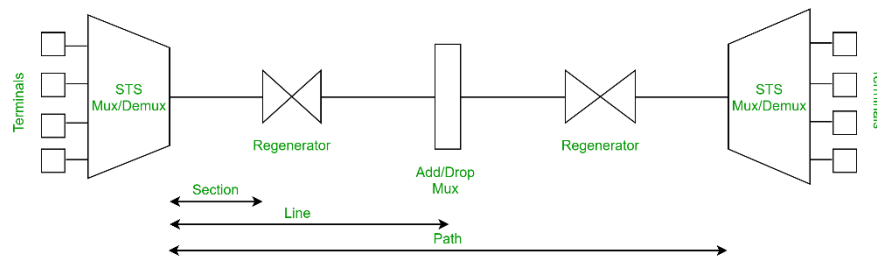
1.4 Οπτικά Δίκτυα Πρώτης Γενιάς

Σκοπός της υλοποίησης των οπτικών δικτύων πρώτης γενιάς ήταν η αντικατάσταση των χάλκινων καλωδίων με οπτικές ίνες. Στα δίκτυα αυτά, η οπτική ίνα χρησιμοποιείται κυρίως ως μέσο μετάδοσης, σε κάθε κόμβο όμως γίνεται μετατροπή της μορφής του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό και η δρομολόγηση του, γίνεται στο ηλεκτρικό επίπεδο. Με άλλα λόγια, οι οπτικές ίνες είναι μέσα μετάδοσης στις ζεύξεις σημείου προς σημείο, αλλά στους κόμβους ο χειρισμός του σήματος γίνεται ηλεκτρονικά.

Στην πρώτη γενιά οπτικών δικτύων επιτεύχθηκε ο ρυθμός μετάδοσης μερικών Mbps, αυτό έγινε λόγω της χρήσης των οπτικών ινών. Τα κυριότερα οπτικά δίκτυα πρώτης γενιάς είναι το Synchronous Optical NETwork (SONET) και το Synchronous Digital Hierarchy (SDH). Το SONET είναι δίκτυο κορμού στην τηλεπικοινωνιακή υποδομή των ΗΠΑ και του Καναδά, ενώ το SDH του υπόλοιπου κόσμου. Οι ρυθμοί μετάδοσης του SONET είναι από 51.84 Mbps, με ονομασία STS-1 και φτάνει μέχρι και 39813.12 Mbps με ονομασία STS-768 [2]. Αντίστοιχα στο SDH έχουμε τους ίδιους ρυθμούς μετάδοσης με διαφορετικά ονόματα, STM-0 και STM-256.

Τα ηλεκτρόνια, που χρησιμοποιούνται στον χαλκό, έχουν μικρότερες δυνατότητες ως προς την μετάδοση δεδομένων από ότι τα φωτόνια, που χρησιμοποιούνται στην οπτική ίνα. Αυτός είναι και ο λόγος που τα δίκτυα αυτά παρουσιάζουν μεγάλη συμφόρηση. Όταν δύο τερματικοί κόμβοι συνδέονται, και η μεταξύ τους σύνδεση περνάει από πολλούς ακόμη κόμβους ενδιάμεσα, το σήμα μετατρέπεται πολλές φορές από ηλεκτρονικό σε οπτικό και

αντίστροφα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται καθυστερήσεις, προβλήματα συμφόρησης και απώλειες πληροφοριών. Ένα αντίστοιχο δίκτυο πρώτης γενιάς είναι και το FDDI (Fiber Distributed)[5].



Σχήμα 1.6 SONET [6]

1.5 Οπτικά Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς είναι μια νέα τεχνολογία οπτικών επικοινωνιών που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των χρηστών για εύρος ζώνης. Για την μεταφορά δεδομένων, τα δίκτυα αυτά, χρησιμοποιούν την οπτική ίνα αφού παρέχει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης.

Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούν τεχνολογίες φωτός, για την μετάδοση δεδομένων.

Τα χαρακτηριστικά των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς είναι:

- **Το υψηλό εύρος ζώνης:** τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς είναι ικανά να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες.
- **Υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων:** τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς έχουν υψηλή χωρητικότητα και μπορούν να μεταδίδουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων της τάξης εκατοντάδων Gbps. Επίσης, τα δίκτυα αυτά υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών, όπως οι τηλεπικοινωνίες, το διαδίκτυο, η αναμετάδοση βίντεο και άλλες εφαρμογές.
- **Ανεπτυγμένη διαχείριση κίνησης:** η κίνηση στο δίκτυο διαχειρίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθεί η καθυστέρηση και να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου.
- **Ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών:** ενσωματώνουν νέες τεχνολογίες όπως τα συστήματα μεταγωγής και οι οπτικοί ενισχυτές σήματος, με σκοπό να αυξήσουν την απόδοση και την αποτελεσματικότητα του δικτύου.
- **Τεχνολογία πολυπλεξίας:** χρησιμοποιούν την τεχνική πολυπλεξίας WDM.

Οι οπτικές επικοινωνίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Η ανάπτυξη των οπτικών δικτύων δεύτερης γενιάς συνεισφέρει στην ικανοποίηση των αυξημένων απαιτήσεων της ψηφιακής εποχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: PONs

2.1 Εισαγωγή

Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο (PON) βασίζεται στη χρήση πολλαπλών ζωνών κύματος και μίας οπτικής ίνας διπλής κατεύθυνσης. Στο συγκεκριμένο δίκτυο δεν υπάρχουν εξαρτήματα μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των χρηστών. Αντιθέτως υπάρχουν μόνο παθητικές οπτικές συσκευές που τοποθετούνται στο δίκτυο για να καθοδηγούν τα σήματα που έρχονται σε μία ζώνη κύματος, είτε προς τον χρήστη, είτε από τον χρήστη. [7]

Τα PONs είναι μια πολύ αξιόπιστη λύση δικτύων πρόσβασης, καθώς επιτρέπουν τη χρήση ευρυζωνικών υπηρεσιών. Αποτελούν μια αρκετά οικονομική λύση, με αποτέλεσμα να είναι προσιτές σε πολλά νοικοκυριά και σε μικρές επιχειρήσεις.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης PON ως δίκτυο πρόσβασης είναι τα εξής:

- Τα PONs επιτρέπουν στο κέντρο σύνδεσης και στον συνδρομητή να βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Οι ενσύρματες γραμμές DSL μπορούν να καλύψουν αποστάσεις έως 5,5 χιλιόμετρα, ενώ οι τοπικοί βρόχοι PON μπορούν να λειτουργήσουν σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 20 χιλιόμετρα.
- Η χρήση των PONs μειώνει τον αριθμό των οπτικών ινών στον τοπικό βρόχο, μειώνοντας έτσι το κόστος.
- Τα PONs παρέχουν εύρος ζώνης μέχρι και 2.5 Gbps. Ο λόγος της υψηλής ευρυζωνικότητας είναι ότι η οπτική ίνα εγκαθίσταται μέχρι τον τελικό χρήστη.
- Επειδή τα PONs είναι δίκτυα ενός σημείου προς πολλά σημεία, είναι κατάλληλα για την μετάδοση πληροφορίας.
- Δεν απαιτούνται πολυπλέκτες και αποπολυπλεκτές στα σημεία διαχωρισμού των PONs. Αυτό σημαίνει ότι οι διαχειριστές του δικτύου απαλλάσσονται από την διαδικασία συντήρησης και τροφοδότησης αυτών των στοιχείων. Αντί για ενεργά στοιχεία, εγκαθίστανται παθητικά στοιχεία στα σημεία διαχωρισμού, τα οποία δεν απαιτούν τροφοδοσία και μπορούν να θαφτούν στο έδαφος χωρίς να απαιτούν συντήρηση στο μέλλον.
- Τα PONs επιτρέπουν εύκολη αναβάθμιση. Παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και χρησιμοποιούν πολλαπλά μήκη κύματος. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις για υψηλή ποιότητα και υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων.

2.2 Βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής των PONs

Όπως προαναφέραμε, η ανάγκη μας για εύρος ζώνης συνεχώς αυξάνεται. Έτσι για να ικανοποιηθούν αυτές οι ανάγκες πρέπει να επεκτείνουμε την οπτική δικτύωση από την πλευρά του μητροπολιτικού δικτύου προς το δίκτυο πρόσβασης. Τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης που θα αναλύσουμε είναι τα σημείου-προς πολλά σημεία (point-to-multipoint) και τα σημείου-προς-σημείο (point-to-point). [1].

Τα βασικότερα στοιχεία της αρχιτεκτονικής των οπτικών δικτύων πρόσβασης είναι τα εξής:

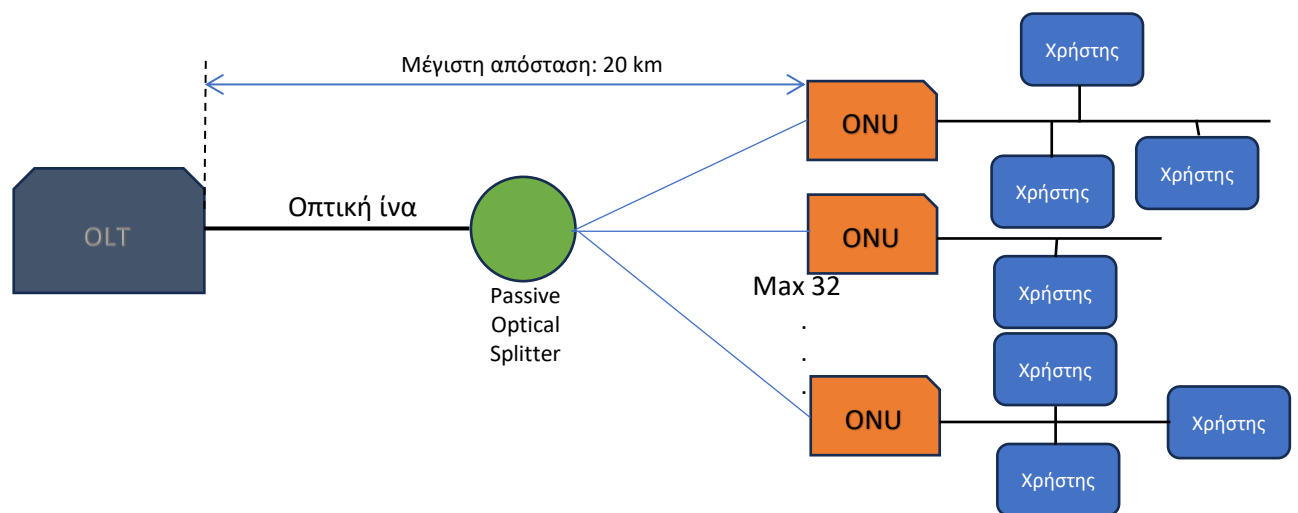
Optical Network Unit (ONU): Ο ONU, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από τα σπίτια των τελικών χρηστών που εξυπηρετεί. Αυτές οι εγκαταστάσεις συνήθως τις αποκαλούμε καφάο. Αυτά τα καφάο είναι φτιαγμένα από υλικά που αντέχουν όλες τις καιρικές συνθήκες, όπως βροχές, ήλιο. Επίσης είναι προστατευμένα από υποκλοπές. Εφόσον βρίσκονται διάσπαρτα μέσα στη πόλη χρειάζονται ενέργεια, αυτή την ενέργεια την λαμβάνουν από τις κολώνες του ρεύματος που υπάρχουν κοντά, επιπλέον έχουν μία εφεδρική μπαταρία σε περίπτωση βλάβης.

Optical Line Terminal (OLT): Ο OLT, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, βρίσκεται στο κεντρικό γραφείο του παρόχου. Στόχος του είναι να ελέγχει την κίνηση από και προς αυτόν αλλά και να ενημερώνει το δίκτυο. Ένας OLT πρέπει να είναι ικανός να εξυπηρετεί τους χρήστες που βρίσκονται ακόμη και 20 χιλιόμετρα μακριά του. Ακόμα, πρέπει να μπορεί να εξυπηρετεί πολλούς ONUs και ακόμη περισσότερους τελικούς χρήστες που είναι συνδεδεμένοι σε ένα ONU.

Ροή καθόδου (Downstream, OLT -> ONUs): Η πληροφορία που λαμβάνει ο OLT από τα μητροπολιτικά δίκτυα μεταδίδεται στους ONUs.

Ροή ανόδου (Upstream, ONU -> OLT): Η πληροφορία που στέλνουν οι χρήστες μεταδίδεται προς τον OLT.

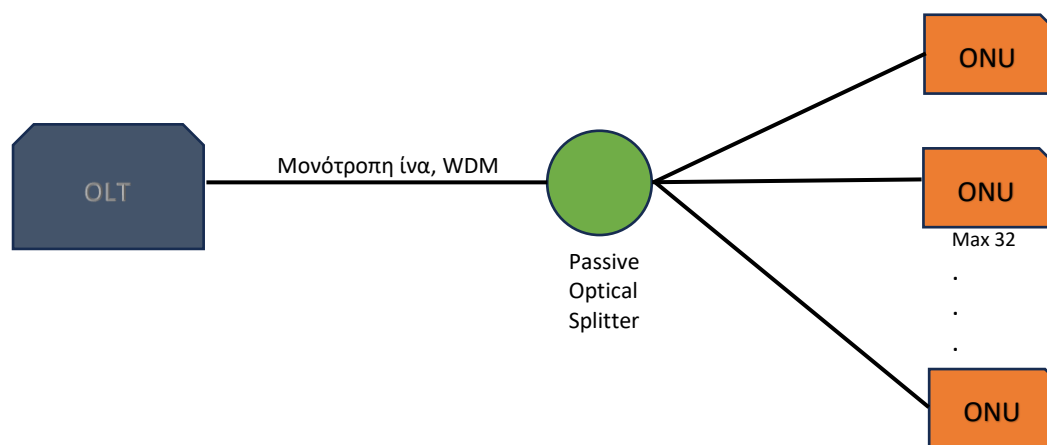
Η σύνδεση από και προς τον τελικό χρήστη μπορεί να γίνει με την χρήση χάλκινου καλώδιού, οπτικής ίνας ή ασύρματα.



Σχήμα 2.1 Τοπολογία PON

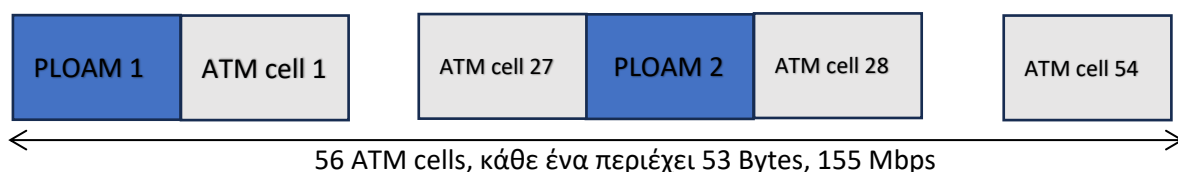
2.3 A-PONs

Το Asynchronous Passive Optical Network (A-PON) βασίζεται κυρίως στο πρωτόκολλο Asynchronous transfer mode (ATM), αφού η μετάδοση γίνεται μέσω ATM cells και μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και 64 ONUs. Ακόμη υποστηρίζει 4 κλάσεις, στην περίπτωση μας ορίζονται ως Traffic Containers. Η πολυπλεξία της πληροφορίας γίνεται με βάση το αναγνωριστικό σύνδεσης VPI/VCI που βρίσκεται στο επίπεδο ATM. (Βλέπε σχ. 2.2)



Σχήμα 2.2 A-PON

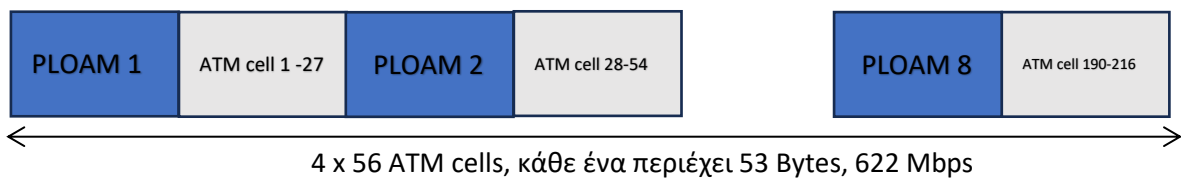
Η πολυπλεξία δεδομένων υποστηρίζεται μόνο στην τεχνολογία ATM. Η τεχνική TDMA εφαρμόζεται σε χρονοθυρίδες διάρκειας 53 bytes (data payload) και η ταχύτητα μετάδοσης είναι 155,52 Mbps και στις δύο ροές. Οι διευθύνσεις στο επίπεδο MAC παραπέμπουν στο αναγνωριστικό (ID) της ONU και μπορούμε να έχουμε μέχρι 64.



Σχήμα 2.3 Πλαίσιο ροής καθόδου A-PON

Στο σχήμα 2.3 βλέπουμε την δομή ενός πλαισίου A-PON στην Downstream ροή. Τα PLOAM μηνύματα (Physical Layer Operations, Administration, and Maintenance) χρησιμοποιούνται για την μετάδοση “grants”. Τα “grants” αυτά μεταδίδονται συνεχώς από τον OLT προς όλους τους ONUs. Περιλαμβάνουν 53 άδειες μετάδοσης, 12 ειδικά μηνύματα, CRC και πληροφορίες συγχρονισμού.[8]

Η χωρητικότητα που μπορούμε να αξιοποιήσουμε στο κανάλι καθόδου είναι $155 \times 54/56 = 149,9$ Mbps. Πέρα από αυτό κάθε πρότυπο επιλέγει πώς θα γίνει ο προγραμματισμός των αδειών.



Σχήμα 2.4 Πλαίσιο Ροής Ανόδου A-PON

Στο παραπάνω σχήμα 2.4 βλέπουμε την δομή ενός πλαισίου ροής ανόδου A-PON. Εδώ τα PLOAM μηνύματα χρησιμοποιούνται από τους ONUs για την μετάδοση πληροφοριών σχετικά με το μέγεθος του πλαισίου που μεταδίδουν. Η χωρητικότητα εύρους ζώνης που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι $155 \times 53/56 = 149,1$ Mbps. Λιγότερα δηλαδή από ότι στη ροή καθόδου. Ο MAC controller μπορεί να δεσμεύσει δυναμικά στον OLT ένα κελί στο πλαίσιο ανόδου για την μετάδοση αιτήσεων με την τεχνική WDM.[8]

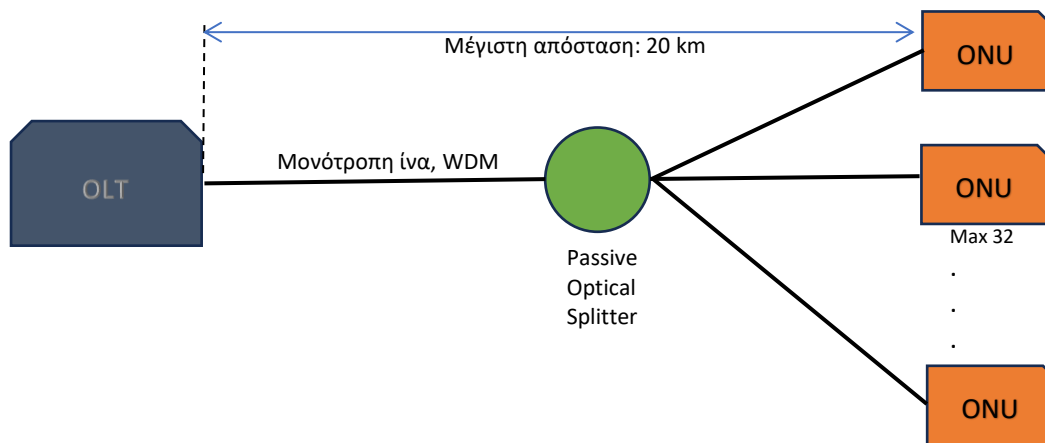
Θα μπορούσε ο προγραμματισμός των αδειών να έχει καθοριστεί σταθερά στον χρόνο, αυτό σημαίνει ότι θα είναι ισοδύναμο με μία υπηρεσία σταθερής τιμής (leased line). Το παρόν πρότυπο ορίζει συγκεκριμένη χρήση χρονοθυρίδων καναλιού για την μετάδοση αιτημάτων από τους ONUs. Για την εξοικονόμηση εύρους ζώνης γίνεται χρήση της TDM πολυπλεξίας. [8]

2.4 B-PONs

Το Broadband Passive Optical Network (B-PON) προτυποποιήθηκε στο Full Service Access Network (FSAN). Ακόμη προτυποποιήθηκε στις συστάσεις της International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) G.983.1, G983.2 και G983.3.

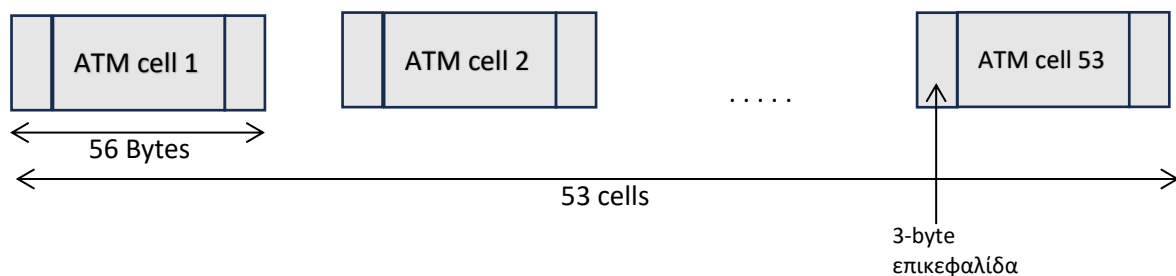
Γενικότερα υπάρχουν δύο κατηγορίες PON, η συμμετρική κατηγορία PON και η ασύμμετρη κατηγορία PON. Στην συμμετρική κατηγορία δίνεται ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων ίση με 155.5 Mbps και στις δύο ροές. Στην ασύμμετρη κατηγορία δίνεται ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων ίση με 622.08 Mbps στην ροή καθόδου και 155.52 Mbps στην ροή ανόδου. Η τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται στο δίκτυο B-PON είναι η WDM.[9]

Ένα παράδειγμα ενός συμμετρικού WDM B-PON δικτύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.5. Η οπτική ίνα συνδέεται στον OLT, και χωρίζεται στον optical splitter σε 2 ή παραπάνω οπτικές ίνες. Οι ίνες αυτές καταλήγουν στους ONUs και μετά στους τελικούς χρήστες. Η οπτική ίνα που βρίσκεται ανάμεσα στον optical splitter και στον OLT χρησιμοποιεί το εύρος ζώνης των ONUs που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Τέλος η μεγαλύτερη απόσταση που μπορεί να έχει ένας ONU από έναν OLT είναι 20 χιλιόμετρα.

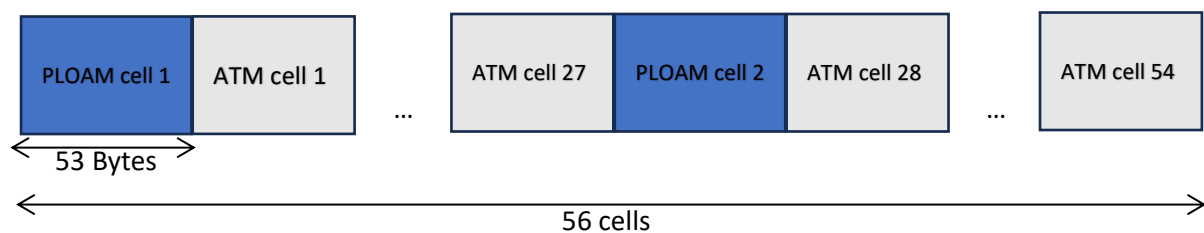


Σχήμα 2.5 B-PONs

Στην παρακάτω εικόνα 2.6 παρουσιάζεται το πλαίσιο μετάδοσης στην upstream ροή. Στην ροή ανόδου το πλαίσιο περιέχει 53 cell slots, κάθε ένα από αυτά είναι 56 bytes. Κάθε cell slot περιλαμβάνει 53-byte ATM cell και 3-byte επικεφαλίδα, η οποία χρησιμοποιείται για κρατάει την χρονική στιγμή, το προοίμιο και τον οριοθέτη. . [9]



Σχήμα 2.6 Πλαίσιο ροής ανόδου B-PON



Σχήμα 2.7 Πλαίσιο ροής καθόδου B-PON

Σε κάθε πλαίσιο καθόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7, περιλαμβάνονται πολλά πακέτα για διαφορετικούς ONUs. Όταν ένα πλαίσιο φτάσει στον ONU, αυτός επιλέγει μόνο όσα πακέτα προορίζονται για αυτόν, τα υπόλοιπα πακέτα απορρίπτονται. Στο πλαίσιο ο OLT δίνει στον ONU την άδεια να στείλει δεδομένα μέσω του Downstream PLOAM κελιού. Η απόσταση μεταξύ κάθε ONU και OLT διαφέρει, έτσι ο OLT θα πρέπει να μπορεί να λάβει πλαίσια από όλους τους ONUs, χωρίς να υπάρχει καμία σύγκρουση μεταξύ τους. Για να επιτευχθεί αυτό, ο OLT μετράει την απόσταση που βρίσκεται ο κάθε ONU, έπειτα ενημερώνει τον ONU να προσθέσει ένα delay, έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ τους να είναι περίπου 20km. [9]

2.5 E-PONs

2.5.1 A-PON to E-PON

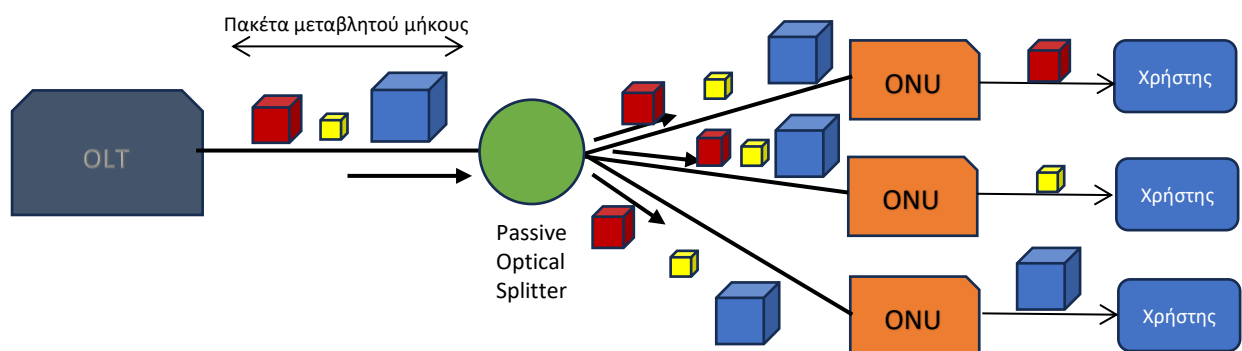
Για πολύ καιρό δεν υπήρχαν άλλα δίκτυα πρόσβασης. Έτσι τα A-PONs ήταν τα μοναδικά δίκτυα πρόσβασης. Έπειτα, έγινε η πρόταση από την ITU G.983 για το Full Service Access Network (FSAN). Η ιδέα ήταν να δημιουργηθεί ένα PON δίκτυο που θα στηρίζεται πάνω στην οπτική ίνα και θα χρησιμοποιεί ασύγχρονο τρόπο για την μεταφορά πακέτων (ATM) σαν να είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου 2. Το 1995 όταν ξεκίνησε η λειτουργία του FSAN, το ATM πίστευε ότι θα γίνει η επικρατέστερη τεχνολογία στο LAN, στο MAN και στα δίκτυα κορμού. Η τεχνολογία Ethernet όμως είχε ήδη πάρει την πρωτιά. Το Ethernet είχε ξεκινήσει ήδη να γίνεται παγκόσμια αποδεκτό και το χρησιμοποιούσαν ήδη πάνω από 320 εκατομμύρια χρήστες στον κόσμο [19]. Με την χρήση του γρήγορου πλέον Ethernet ξεκίνησαν να βγαίνουν και προϊόντα των 10 Gigabit Ethernet. Το Ethernet είναι πολύ εύκολο στη χρήση του και το βλέπουμε σε MAN και WAN δίκτυα. Παράλληλα ενώ το 95% των LAN δικτύων είναι με

Ethernet, η τεχνική ATM-PON δεν αποτελεί την καλύτερη λύση για να συνδεθούν δύο Ethernet δίκτυα. [10]

Το μοντέλο IEEE 802.3 έδωσε δύο βασικές προοπτικές για το Ethernet δίκτυο (E-PON). Η πρώτη ιδέα ήταν να αναπτυχθεί ένα κοινό μέσο, χρησιμοποιώντας πολλαπλή πρόσβαση με το πρωτόκολλο ανίχνευσης σύγκρουσης (CSMA/CD). Η δεύτερη ιδέα ήταν να μπορούν οι σταθμοί να συνδεθούν μέσω ενός μεταγωγού χρησιμοποιώντας πολυπλέκτες. Η ιδιαιτερότητα του EPON είναι ότι δεν μπορεί να θεωρηθεί ούτε κοινόχρηστο μέσο ούτε σημείο-προς-σημείο αλλά συνδυασμός των δύο.

2.5.2 E-PON Downstream

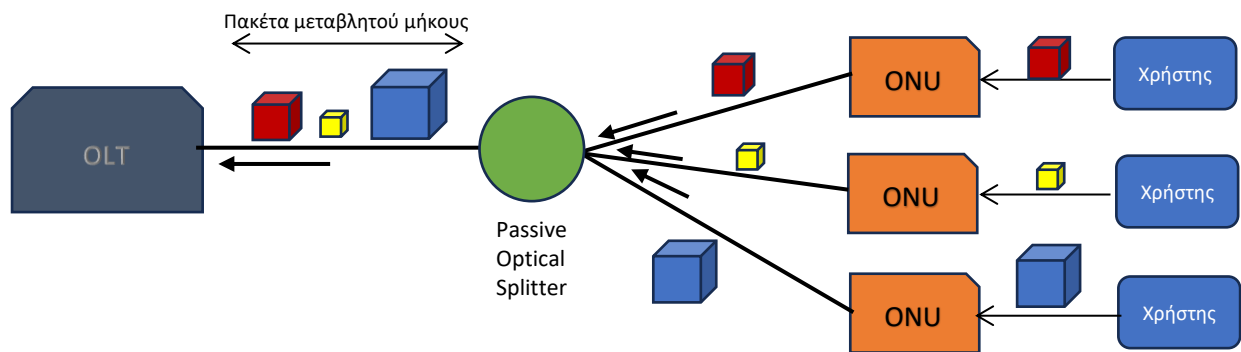
Στην ροή καθόδου, τα πλαίσια στέλνονται από τον OLT προς τους ONUs μέσω του παθητικού συζευκτή (Passive optical splitter), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Ο αριθμός που μπορεί να διακλαδωθεί η οπτική ίνα είναι μεταξύ 4 και 64. Το E-PON χρησιμοποιεί την μέθοδο broadcast, έτσι ο κάθε ONU επιλέγει τον προορισμό των πακέτων του. [10]



Σχήμα 2.8 EPON Downstream

2.5.3 E-PON Upstream

Στην ροή ανόδου το κάθε ONU στέλνει το δικό του πλαίσιο κατευθείαν στον OLT, μέσω του Passive optical splitter, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9. Στην περίπτωση αυτή, ένα EPON δίκτυο λειτουργεί με την σημείο-προς-σημείο αρχιτεκτονική, χωρίς όμως να υπάρχουν συγκρούσεις των πλαισίων. [10]



Σχήμα 2.9 EPON Upstream Frame [20]

2.5.4 Χαρακτηριστικά E-PONs

2.5.4.1 Πολλαπλή Πρόσβαση

Ένας τρόπος για τον διαχωρισμό των καναλιών είναι να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική WDM. Αν και από θεωρητικής πλευράς είναι μια πολύ καλή λύση, το κόστος του παραμένει απαγορευτικό για ένα δίκτυο πρόσβασης. Η χρήση της WDM τεχνικής θα χρειαζόταν είτε έναν συντονιζόμενο δέκτη, είτε ένα πίνακα που θα αποθήκευε ο OLT τα διαφορετικά κανάλια. Ακόμα ένα πρόβλημα για το δίκτυο είναι ότι θα υπήρχαν πολλοί διαφορετικοί τύποι ONU βασισμένοι σε ένα μήκος κύματος, αντί να υπάρχει μόνο ένας τύπος. Επιπλέον, θα υπήρχε μεγάλο πρόβλημα αν χρειαζόταν συντήρηση ενός ONU και ο τελικός χρήστης δεν έχει την γνώση να το φτιάξει. Για όλους τους παραπάνω λόγους ένα δίκτυο WDM-PON δεν μπορεί να λειτουργήσει στη σημερινή εποχή.

Η πιο αποδοτική μέθοδος για την πολλαπλή πρόσβαση σε ένα οπτικό δίκτυο E-PON είναι η TDM, διότι επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί μία ίνα και στο Upstream και στο Downstream. Αυτό αποτελεί μια καλή οικονομική λύση. Η μέθοδος αυτή λειτουργεί με χρονοσχισμές. Ο OLT παρέχει σε κάθε ONU μια συγκεκριμένη χρονοσχισμή στην οποία μπορεί να μεταδώσει. Κάθε χρονοσχισμή μπορεί να μεταφέρει πολλά Ethernet πλαίσια. Επιπλέον κάθε ONU θα πρέπει να αποθηκεύει στον Buffer του τα πακέτα που θέλει να μεταδώσει ο κάθε χρήστης, έως ότου έρθει η στιγμή της μετάδοσης. Όταν έρχεται η στιγμή αυτή, κάθε ONU γεμίζει το πλαίσιο με βάση το εύρος ζώνης που του έχει δώσει ο OLT. Παράλληλα, ο OLT είναι ο μόνος που μπορεί να ελέγξει τις χρονοσχισμές που δίνονται στους ONUs. [10].

2.5.4.2 Ασφάλεια

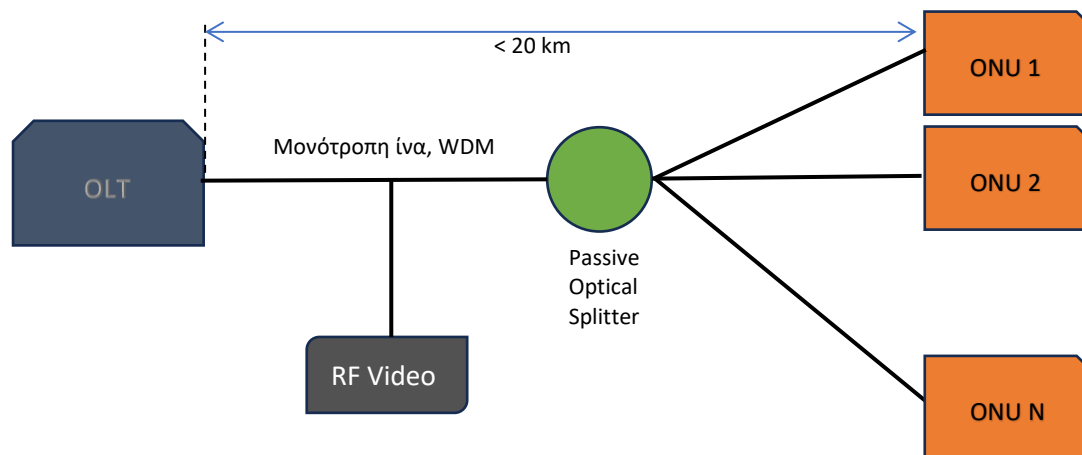
Είναι σημαντικό να υπάρχει ασφάλεια σε ένα δίκτυο, στην περίπτωση του E-PON αυτό δεν χρειάζεται. Ο λόγος είναι ότι χρησιμοποιείται μία τοπολογία σημείου-προς-σημείο, έχουμε δηλαδή μία ιδιωτική επικοινωνία μεταξύ δύο χρηστών. Σε ένα κοινόχρηστο Ethernet δίκτυο που χρησιμοποιεί πολυπλέκτες δεν έχουμε ανάγκη για ασφάλεια εφόσον οι χρήστες ακολουθούν την ίδια πολιτική.[10]

Παρ' όλα αυτά ένα δίκτυο Ethernet που χρησιμοποιεί την τοπολογία σημείο-προς-πολλά σημεία διαφέρει από τα προλεγόμενα. Το EPON χρησιμοποιεί ένα κανάλι μετάδοσης στην ροή καθόδου για να εξυπηρετεί τους χρήστες. Στην ουσία, ένα E-PON δίκτυο δεν θεωρείται σημείου-προς-σημείο δίκτυο, οι ONUs δηλαδή δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους ή να γνωρίζουν για την ύπαρξη ο ένας του άλλου. Παράλληλα, χρειάζονται κάποιοι μηχανισμοί κρυπτογράφησης, ώστε να μπορούν οι ONUs να διαβάζουν τα πακέτα που πρόκειται να μεταφέρουν. Η κρυπτογράφηση και η αποκρυπτογράφηση μπορούν να εφαρμοστούν στο φυσικό επίπεδο, στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων ή και στα παραπάνω επίπεδα. Εφαρμόζοντας τον μηχανισμό αυτόν πάνω από το επίπεδο MAC, θα κρυπτογραφηθούν μόνο το πλαίσιο MAC και η επικεφαλίδα θα παραμείνει κενή. Στην περίπτωση αυτή το υποεπίπεδο MAC θα εγγυηθεί ότι το πλαίσιο έχει παραληφθεί πριν περάσει σε επόμενο υποεπίπεδο για αποκρυπτογράφηση. Όλο αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί ο κάθε ONU να διαβάσει το φορτίο που θέλει να μεταδώσει ο άλλος, χωρίς όμως να γνωρίζει ο ένας την διεύθυνση MAC του άλλου.

2.6 G-PONs

Ο εξοπλισμός μετάδοσης σε ένα δίκτυο Gigabit Passive Optical Network (G-PON) αποτελείται μόνο από τον OLT και τους ONUs. Στο παρακάτω σχήμα (2.10) παρουσιάζεται αρχιτεκτονική του δικτύου G-PON.

Ξεκινώντας από τα γραφεία του κεντρικού πάροχου, μία μονοτροπική οπτική ίνα καταλήγει στον οπτικό διαχωριστή (optical splitter) που βρίσκεται κοντά στους τελικούς χρήστες. Στο σημείο αυτό η ίνα διαχωρίζεται σε 2 έως 32 κομμάτια και καταλήγει στους τελικούς χρήστες που έχει να εξυπηρετήσει. Η απόσταση του OLT με τους ONUs δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 20 χιλιόμετρα. [11]



Σχήμα 2.10 G-PON

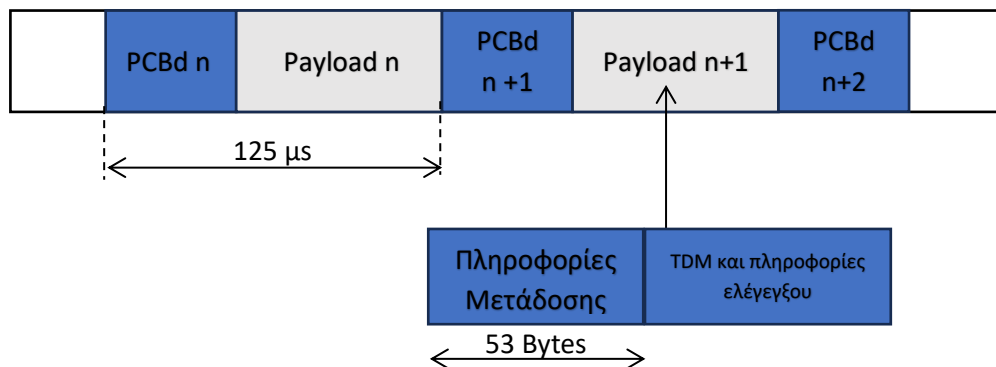
Η τεχνολογία G-PON διαφέρει τόσο στο Upstream όσο και στο Downstream στις τιμές του εύρους ζώνης. (Βλέπε σχ 2.11)

Ροή ανόδου	Ροή καθόδου
155.52 Mbps	1244.1 Mbps
6220.8 Mbps	2488.32 Mbps
1244.16 Mbps	
2488.32 Mbps	

Σχήμα 2.11 G-PON bit rate [11]

2.6.1 Downstream G-PON Frame

Στην ροή καθόδου τα δεδομένα μεταφέρονται από τον OLT προς τους ONUs με την τεχνική TDM. Η μετάδοση ενός πλαισίου γίνεται κάθε 125μs. Κάθε ONU πρέπει να λαμβάνει υπόψη μόνο τα πλαίσια που προορίζονται για αυτόν. Αυτό εξασφαλίζεται από την κρυπτογράφηση που έχει γίνει πριν μεταδοθεί το πλαίσιο. Σε κάθε πλαίσιο της ροής καθόδου συνάπτονται το Physical Control Block Diagram (PCBd), ένα κομμάτι του ATM και ένα του GPON Encapsulation Method (GEM) [11]. Το Downstream πλαίσιο δίνει κάποιο χρόνο στον ONU για να απαντήσει με ένα control μήνυμα για το πότε θέλει να στείλει ένα πλαίσιο ανόδου.[11]



Σχήμα 2.12 GPON Downstream Frame

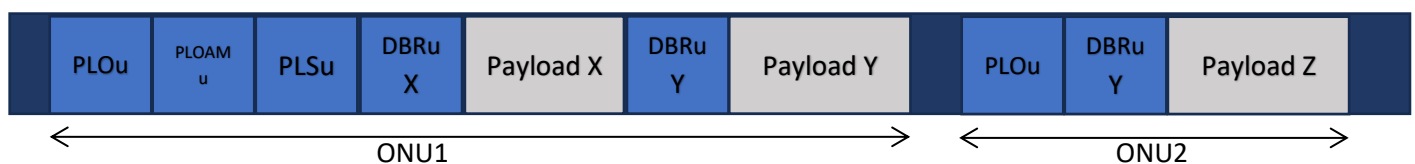
Στην παραπάνω εικόνα (2.12) φαίνεται το πλαίσιο καθόδου. Το μέγεθος του PCBd είναι ίδιο και για τις δύο κατευθύνσεις αλλά είναι σχετικό με την δομή του πλαισίου. Ακόμη και αν δεν υπάρχουν δεδομένα να μεταφερθούν στην ροή καθόδου, το πλαίσιο στέλνεται. Αυτό συμβαίνει για να υπάρχει μια συνοχή στον χρόνο. [11]

2.6.2 Upstream GPON Frame

Στην ροή ανόδου χρησιμοποιείται η τεχνική TDMA, την οποία διαχειρίζεται ο OLT και δίνει ένα χρονικό όριο σε κάθε ONU για να στείλει τα δεδομένα του.

Στο πλαίσιο ανόδου περιλαμβάνονται κάποια πεδία ελέγχου. Τα πεδία αυτά είναι [18]:

- To Physical Layer Overhead (PLOu).
- To Physical Layer Operations Administration and Management (PLOAMu).
- To Power Leveling Sequence upstream (PLSu).
- To Dynamic Bandwidth Report upstream (DBRu).



Σχήμα 2.13 G-PON Upstream Frame [18]

Στο παραπάνω σχήμα 2.13 βλέπουμε το πλαίσιο ανόδου. Το μήκος του πλαισίου είναι ίδιο και στην ροή ανόδου και στην ροή καθόδου. Κάθε πλαίσιο περιλαμβάνει έναν αριθμό μετάδοσης από κάθε ONU. Το BWmap είναι αυτό που κρατάει τον συγκεκριμένο αριθμό. Σε κάθε χρονικό διάστημα που ετοιμάζεται να σταλθεί ένα πλαίσιο, ο κάθε ONU μπορεί να

περιλαμβάνει στην επικεφαλίδα του ένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά μαζί με την πληροφορία που θέλει να μεταδώσει ο κάθε χρήστης.

2.6.3 Χαρακτηριστικά G-PONs

2.6.3.1 Εύρος Λειτουργίας

Τα μήκη κύματος που λειτουργεί η τεχνολογία αυτή είναι 1480-1500nm στο Downstream και 1260-1560nm στο Upstream. Ακόμη, στην διανομή RF Video στο Downstream μπορεί να χρησιμοποιηθεί κύμα μεταξύ 1550-1560 nm. [18]

2.6.3.2 Διόρθωση Σφαλμάτων

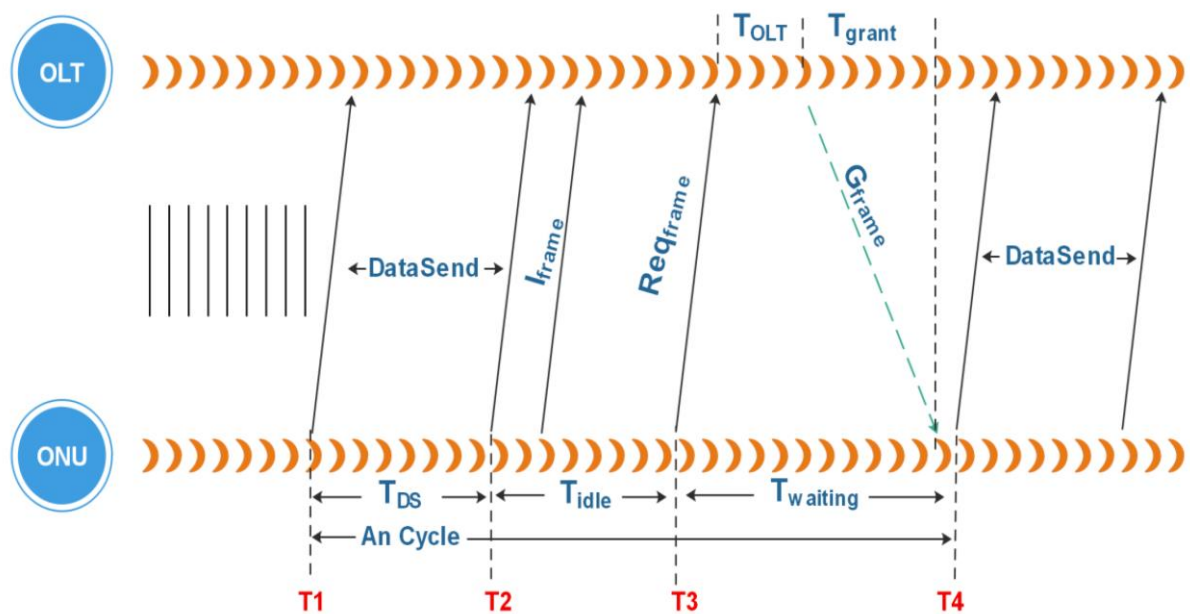
Η διόρθωση σφαλμάτων (Forward Error Correction, FEC) είναι μια μέθοδος που σύμφωνα με μαθηματικούς υπολογισμούς ανιχνεύει τα λάθη στα δεδομένα που είναι προς αποστολή και τα διορθώνει. Η FEC οδηγεί σε αύξηση του link budget κατά περίπου 3-4 dB. Άρα υποστηρίζει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και μεγαλύτερη απόσταση από τον OLT προς τον ONU.[18]

2.6.3.3 Transmission Containers

Τα Transmission Containers (T-CONT) χρησιμοποιούνται σε ένα δίκτυο G-PON για να διαχειρίζονται το εύρος ζώνης στην upstream ροή. Στόχος τους είναι η βελτίωση της ευρυζωνικότητας. Ο ONU στέλνει κίνηση χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα T-CON. Τα T-CON επιτρέπουν την υλοποίηση Quality of Service (QoS) στην Upstream ροή [18]. Οι τύποι T-CONTs που υπάρχουν είναι πέντε και μπορούν να εκχωρηθούν από τον χρήστη. Το T-CON1 λειτουργεί για εφαρμογές που απαιτούν χρονική ευαισθησία (VoIP) και είναι υπεύθυνο για να εξασφαλίζει να παραμένει σταθερό εύρος ζώνης. Το T-CON2 κάνει την ίδια δουλειά με το T-CON1 αλλά λειτουργεί σε εφαρμογές που δεν χρειάζονται σταθερό εύρος ζώνης. Το T-CON3 είναι μια συνδυασμένη εκχώρηση με ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης συν την προσθήκη μη εγγυημένου. Το T-CON4 είναι best effort, δυναμικά εκχωρούμενου δηλαδή χωρίς να έχει κάποια εγγύηση για εκχώρηση εύρους ζώνης. Τέλος το T-CON5 είναι ένας συνδυασμός όλων των παραπάνω.

2.6.3.4 Δυναμική Κατανομή Εύρους ζώνης

Η Δυναμική Κατανομή του Εύρους Ζώνης (Dynamic bandwidth allocation, DBA) είναι μια μέθοδος που επιτρέπει στον τελικό χρήστη να χρησιμοποιήσει όσο εύρος ζώνης χρειάζεται. Το DBA ελέγχεται από τον OLT, ο οποίος δίνει το εύρος ζώνης στους ONUs. Αυτή η τεχνική λειτουργεί μόνο στην Upstream ροή αφού στο Downstream έχουμε broadcast μετάδοση.



Σχήμα 2.14 G-PONs DBA [23]

Για να καθοριστεί το εύρος ζώνης που πρέπει να ανατεθεί σε κάθε ONU, ο OLT πρέπει να γνωρίζει την κίνηση του T-CON που έχει σχέση με το κάθε ONU. Στην μέθοδο status reporting [18] ένα T-CON δείχνει πόσα πακέτα περιέχονται μέσα στο Buffer του. Μόλις ο OLT λάβει αυτή την πληροφορία τότε διανέμει σε κάθε ONU το εύρος ζώνης που χρειάζεται. Στην περίπτωση που ο ONU δεν έχει να στείλει κάποια πληροφορία, στέλνει ένα κενό κελί ώστε να γίνει ενημέρωση ότι έχει άδειο τον buffer του. Έτσι ενημερώνεται ο OLT ότι δεν υπάρχουν άλλες εκχωρήσεις για αυτό το T-CON, άρα οι εκχωρήσεις μπορούν να ανατεθούν σε άλλα T-CONs. Στην περίπτωση που ένα ONU έχει πολλά δεδομένα που θέλουν να μεταδοθούν στον buffer του, ο OLT μπορεί να αναθέσει πολλαπλά T-CONs στο συγκεκριμένο ONU.

2.6.3.5 Ασφάλεια

Η βασική λειτουργία του G-PON είναι να στέλνει τα δεδομένα στην Downstream ροή, προς τους ONUs. Κάθε ONU έχει μια συγκεκριμένη χρονοθυρίδα για να λάβει τα δεδομένα που προορίζονται προς αυτόν, σύμφωνα με την τεχνική TDM. Το πρόβλημα που εμφανίζεται στην downstream ροή είναι η ευκολία υποκλοπής δεδομένων. Αυτό μπορεί να συμβεί με τον προγραμματισμό ONUs που καταγράφουν κάθε πλαίσιο που έρχεται από τον OLT. Στην Upstream ροή η διάδοση γίνεται με point-to-point, αυτό έχει ως επακόλουθο να είναι αδύνατη

η υποκλοπή δεδομένων. Λόγω αυτού, κάθε πληροφορία στην Upstream ροή λειτουργεί σαν κλειδί και μπορεί να σταλθεί μέσω ενός απλού κειμένου.

Παράλληλα, το GPON προτείνει την τεχνολογία G.984.3 σαν μηχανισμό ασφαλείας, αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει μόνο στον ONU που του ανήκει το εκάστοτε δεδομένο να το διαβάσει. Ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης που χρησιμοποιείται ονομάζεται Advanced Encryption Standard (AES). Επιτρέπονται μόνο κλειδιά των 128, 192, 256 byte, με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολο να παραβιαστεί η κρυπτογράφηση. Το κλειδί μπορεί να αλλάζει με τον χρόνο χωρίς όμως να αλλάζουν τα δεδομένα που μεταδίδονται.[18]

2.6.3.6 Προστασία

Ένα δίκτυο G-PON περιλαμβάνει δύο τύπους ασφάλειας, την αυτόματη και την αναγκαστική. Η πρώτη ενεργοποιείται όταν βρεθεί ένα σφάλμα, για παράδειγμα αν χαθεί το σήμα ή αν χαθεί το πλαίσιο. Η δεύτερη ενεργοποιείται όταν γίνεται ένα συμβάν, για παράδειγμα όταν αλλάζει η οπτική ίνα στο δίκτυο. Παρ' όλα αυτά η προστασία σε ένα δίκτυο G-PON είναι ένας προαιρετικός μηχανισμός και η εγκατάστασή του γίνεται εφόσον μπορεί να στηριχθεί οικονομικά.[18]

2.7 GE-PONs

Η τεχνολογία gigabit Ethernet PONs (GE-PONs) αποτελεί μια πιο βελτιωμένη τεχνολογία από αυτή της G-PON που προαναφέραμε. Οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης που προσφέρει είναι:

- **Στην Downstream Ροή:** 1.2 Gbps ή 2.5 Gbps
- **Στην Upstream Ροή:** 155 Mbps ή 622 Mbps ή 1.2 Mbps ή 2.5 Mbps.

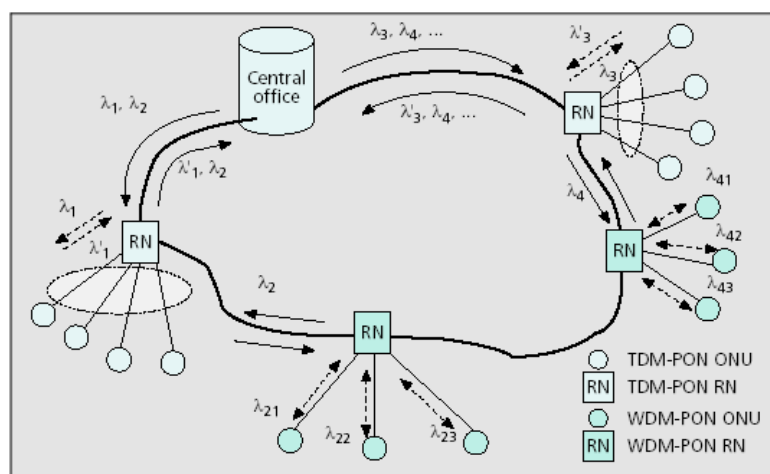
Όπως γίνεται αντιληπτό δεν γίνεται ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης της Upstream ροής να είναι μεγαλύτερος από την Downstream.[12]

2.8 NG-PONs

Σήμερα, οι τεχνολογίες TDM-PON έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης όταν η χωρητικότητα του δικτύου δεν εξυπηρετεί τις ανάγκες των χρηστών. Η πρόκληση για την αναβάθμιση του εύρους ζώνης των ήδη υπάρχων TDM-PON λύνεται με την χρήση του πρωτόκολλου Media access control (MAC), αυτό όμως αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία.[18] Ακόμη, τα TDM-PON λειτουργούν σε ένα μήκος κύματος. Στην περίπτωση που έχουμε RF Video και ένα μήκος κύματος για το Upstream, υπάρχουν συνολικά δύο μήκη

κύματος[18]. Έτσι ο μέσος όρος του εύρους ζώνης ανέρχεται σε κάποια Mbps. Ακόμη, η τρέχουσα τοπολογία TDM-PON είναι δενδροειδής, δεν είναι εύκολη η αποκατάσταση και η προστασία της. Με το υπάρχον σενάριο TDM-PON, όταν πρέπει να προστεθούν παραπάνω χρήστες, είναι ανάγκη να αναπτυχθεί ένα εντελώς καινούριο PON, το οποίο θα έχει την δυνατότητα να εξυπηρετεί έως και 32 χρήστες. Πέραν αυτού πρέπει να εγκατασταθούν περισσότεροι πομποί και δέκτες στον OLT, έτσι ώστε να εξυπηρετεί παραπάνω χρήστες. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την οικονομική επιβάρυνση του δικτύου, εφόσον χρειάζεται παραπάνω τροφοδοσία και μια περίπλοκη καλωδίωση. Οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν μας οδήγησαν στον σχεδιασμό ενός πιο ευέλικτου δικτύου, με στόχο την επίλυση των βασικών προβλημάτων. [13]

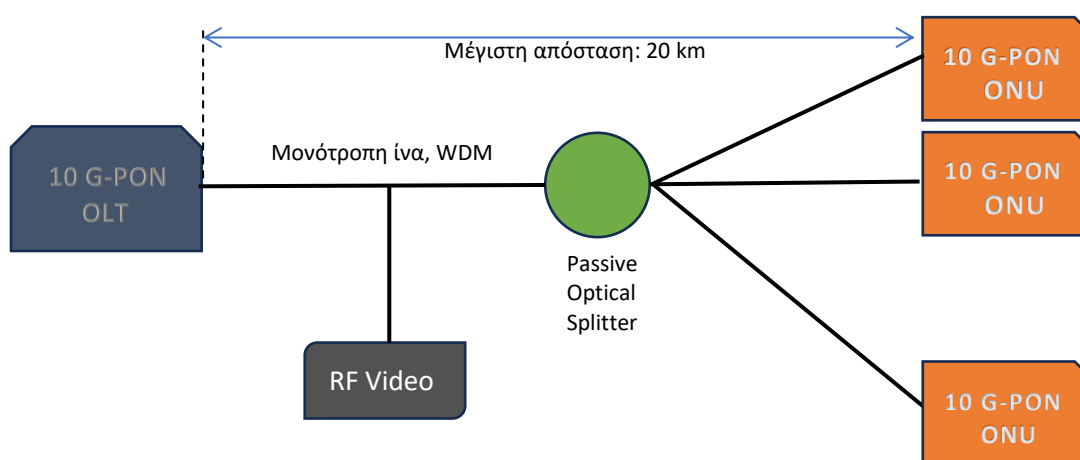
Η αρχιτεκτονική του Next Generation Passive Optical Network (NG-PON) έχει τα TDM-PONs και WDM-PONs ως αποστήματά του. Η πληθώρα των αρχιτεκτονικών που συνθέτουν αυτή την αρχιτεκτονική είναι η TDM-PON ONU, TDM-PON RN, WDM-PON ONU και WDM-PON RN, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.15. Η βασική τοπολογία ορίζεται από έναν οπτικό δακτύλιο μιας μονότροπης οπτικής ίνας με παθητικά αστέρια (PON), τα οποία προσάπτονται σε αυτήν. Ο απομακρυσμένος κόμβος είναι ουσιαστικά το κέντρο του δικτύου αστέρα, στον οποίο είναι συγκεντρωμένα τα τοπικά δίκτυα, αυτά αποτελούν τους κλάδους του οπτικού δικτύου. Οι ONUs που επικοινωνούν με τον RN, ακούν και μιλούν με τον πομποδέκτη του ONU. Συμπερασματικά, υπάρχει μια σύνδεση σημείου-προς-σημείο μεταξύ κάθε OLT και RN. Τέλος, κανένα από τα μήκη κύματος δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στον δακτύλιο συλλογής. [14]



Σχήμα 2.15 Δίκτυο NG-PON [13]

2.9 XG-PONs

Αφού εδραιωθήκαν τα PONs δίκτυα και ξεκίνησαν να παρέχουν εύρος ζώνης 1 Gbps, σύμφωνα με τις ενδείξεις του ITU-T G.984.x, ξεκίνησαν και οι προσπάθειες για τα δίκτυα PON που θα παρείχαν εύρος ζώνης ίσο με 10 Gbps. Στην ουσία αυτό θα λειτουργούσε σαν μια εξέλιξη των πρώην G-PON δικτύων. Αργότερα, με την χρήση του WDM γεννήθηκε και το δίκτυο 10G-PON ή XG-PON, σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές της ITU-T G.984.x. Το XG-PON ξεκίνησε να χρησιμοποιείται το 2010. Χρησιμοποιείται για την μετάδοση δεδομένων, και προσφέρει ταχύτητα μετάδοσης 10 Gbps στην downstream και 2.5 Gbps στην upstream ροή. Η αρχιτεκτονική του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16 Αρχιτεκτονική XG-PON

Το εύρος ζώνης της οπτικής ίνα λοιπόν διαιρείται μεταξύ 2 έως 32 ONUs. Η αρχιτεκτονική των PONs είναι ένας πιο οικονομικά αποδοτικός τρόπος και έχει ως στόχο τα δίκτυα πρόσβασης να μπορούν να ανταπεξέλθουν στην ζήτηση των χρηστών για ευρυζωνικότητα.

Η ταχύτητα των 10 Gbps που παρέχει το XG-PON, διαμοιράζεται σε όλους τους χρήστες που είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο παθητικό δίκτυο, όπως συνέβαινε και στο πρότυπο G-PON και E-PON. Ακόμη, για την αποφυγή σύγκρουσης των πλαισίων που μεταδίδονται έχουν ενσωματωθεί οι τεχνικές πολυπλεξίας TDM και WDM. Παράλληλα, στους τελικούς χρήστες παρέχεται μια συσκευή που μετατρέπει το οπτικό σήμα, σε σήμα παρόμοιο με το καλώδιο που χρησιμοποιούν στο κτήριό τους, πχ Ethernet, απλή ή ενσύρματη τηλεφωνική υπηρεσία.

2.9.1 Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο, το οποίο αποκαλείται και Physical Media Dependent (PMD) σύμφωνα με το ITU-T G.987.2, αποτελείται από ένα συγκεκριμένο οπτικό δίκτυο πρόσβασης που είναι ικανό να ικανοποιήσει τις μεγάλες ανάγκες που υπάρχουν για εύρος ζώνης. Μια ιδιαιτερότητα που έχει το XG-PON είναι ότι μπορεί να παρέχει περισσότερο ελεύθερο εύρος ζώνης με μικρότερο κόστος από το GPON.[15]

Το σύστημα XG-PON μπορεί να χωριστεί σε XG-PON1 και XG-PON2. Το XG-PON1 παρέχει ταχύτητες μετάδοσης 2.5 Gbps στην Upstream ροή και 10 Gbps στην Downstream ροή. Ενώ το XG-PON2 παρέχει ταχύτητες μετάδοσης 10Gbps και στις δύο ροές. Σύμφωνα όμως με το ITU-T G.987.x χρησιμοποιείται μόνο το XG-PON1. Όπως καταλαβαίνουμε με την εξέλιξη της τεχνολογίας, έχουμε πάει από το GPON στο XG-PON1 και στο XG-PON2.[15]

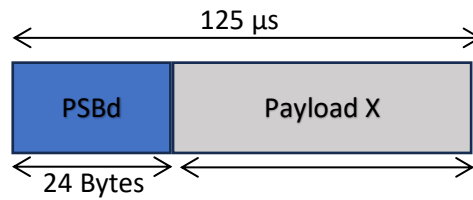
2.9.2 Δυναμική Κατανομή Του Εύρους Ζώνης Στο XG-PON

Σε ένα XG-PON δίκτυο ο OLT παρέχει έλεγχο πρόσβασης στα πολυμέσα, στη ροή ανόδου. Ουσιαστικά κάθε πλαίσιο καθόδου έρχεται με ένα bandwidth map (BWmap) που υποδεικνύει την τοποθεσία που θα σταλεί το πλαίσιο ανόδου από διάφορους ONUs. Η επικεφαλίδα του πλαισίου καθόδου XGTC περιλαμβάνει ένα πεδίο με το BWmap, που σχετίζεται με το διαθέσιμο εύρος ζώνης που έχει δοθεί σε έναν ONU με βάση το allocation ID (Alloc-ID) του. Παράλληλα, στο πλαίσιο ανόδου η κατανομή των πακέτων γίνεται με την χρήση του Dynamic Bandwidth Report upstream (DBRu). Το DBRu περιλαμβάνει το Buffer Occupancy (BuffOcc). Το BuffOcc μετρά την συνολική κίνηση του δικτύου.[15]

Το XG-PON χρησιμοποιεί την τοπολογία σημείου - προς - πολλά σημεία για την σύνδεση μεταξύ του OLT με τους ONUs. Λόγω ότι το XG-PON παρέχει πολύ διαθέσιμο ελεύθερο εύρος ζώνης, η κατανομή του εύρους γίνεται με βάση το Service Level Agreements (SLA), το οποίο είναι σχετικό με τα QoS Quality of Services (QoS).[15]

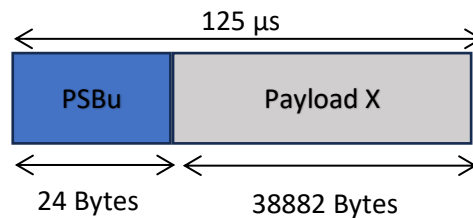
Πιο συγκεκριμένα η κατανομή γίνεται ιεραρχικά και με σκοπό να μην αδικηθεί κανένας ONU. Αρχικά ο ONU διανέμει σε κάθε Alloc-ID ένα σταθερό εύρος ζώνης, για το πλαίσιο ανόδου, αυτό ονομάζεται Fixed Bandwidth. Έπειτα, αν ένα Alloc-ID χρειάζεται να καταναλώσει περισσότερο εύρος ζώνης ο OLT του το δίνει, αυτό ονομάζεται Assured Bandwidth. Έπειτα, ο OLT κοιτάει να διαμοιράσει το εύρος ζώνης που δεν καταναλώθηκε από τους ONUs, στόχο δηλαδή έχει είτε να μείνουν ικανοποιημένες οι ανάγκες τους για εύρος ζώνης, είτε να ξεμείνει από διαθέσιμο ελεύθερο εύρος ζώνης, αυτό ονομάζεται non-assured Bandwidth. Τέλος, ο OLT διανέμει το υπόλοιπο ελεύθερο εύρος ζώνης στα στοιχεία του δικτύου που συμφέρουν. [15]

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δομές των πλαισίων και για τις δύο ροές του δικτύου XG-PON



Σχήμα 2.17 Πλαίσιο καθόδου XG-PON

Στο σχήμα 2.17 απεικονίζεται ένα downstream πλαίσιο. Η περιοχή PSBd περιλαμβάνει 24 Bytes και είναι η επικεφαλίδα του πλαισίου, ενώ το Payload περιλαμβάνει 155.496 Bytes και περιέχει τις πληροφορίες που μεταδίδονται στους ONUs. Κάθε πλαίσιο μετάδοσης περιλαμβάνει συνολικά 155.520 Bytes. [15]



Σχήμα 2.18 Πλαίσιο ανόδου XG-PON

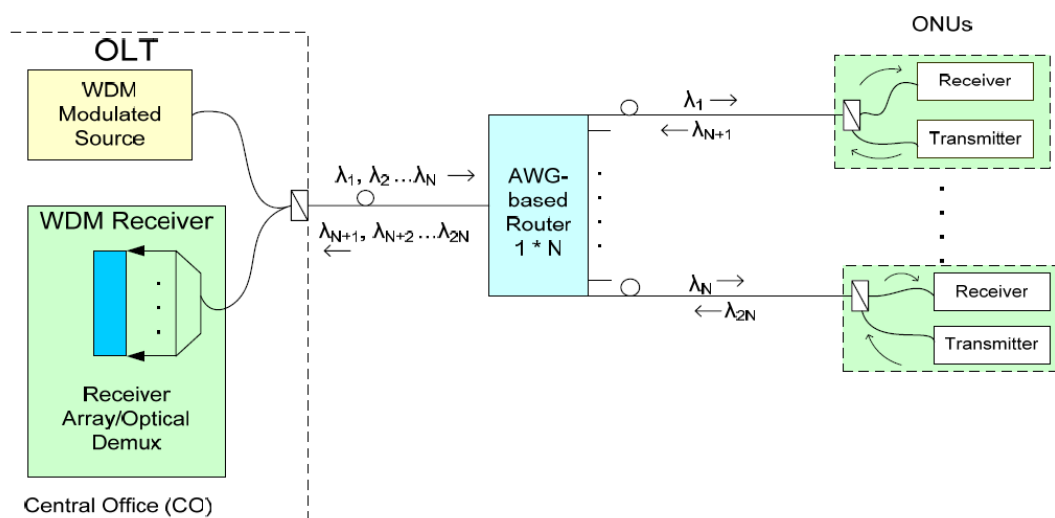
Στο σχήμα 2.18 απεικονίζεται ένα πλαίσιο ανόδου, το πλαίσιο δηλαδή που μεταδίδει τις πληροφορίες του ο κάθε ONU. Εδώ το πεδίο PSBu είναι η επικεφαλίδα του πλαισίου, ενώ το Payload περιέχει την πληροφορία που θέλει να μεταδώσει ο κάθε ONU. Το πλαίσιο ανόδου μεταδίδεται κάθε 125μs. Εκεί ο κάθε ONU, σύμφωνα με ένα πρωτόκολλο μετάδοσης, βάζει τα πακέτα που θέλει να μεταδώσει. Στη συνέχεια το πλαίσιο αυτό μεταδίδεται προς τον OLT. [15]

Συμπερασματικά, τα δίκτυα XG-PON αποτελούνται από ασύμμετρους και συμμετρικούς τύπους. Στον συμμετρικό τύπο δίνεται ταχύτητα μετάδοσης 10 Gbps και για τις δύο ροές, ενώ στον ασύμμετρο δίνεται 10Gbps στην downstream ροή και 2.5 Gbps στην upstream. Στον συμμετρικό τύπο, έχουμε ανάγκη για ακριβότερα λέιζερ ώστε να γίνεται τόσο γρήγορα η μετάδοση. [15]

2.10 PONs με Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM-PONs)

Τα TDM-PONs λειτουργούν με μία μονότροπη ίνα. Στα TDM-PONs έχουμε χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης του δικτύου, μαζί με την μεγάλη χωρητικότητα που μας παρέχει η οπτική ίνα. Η χρήση ενός οπτικού splitter μας βοηθάει να έχουμε πολλούς ONUs, μέχρι 32 και να απέχουν το πολύ 20km από τον OLT, ή 64 και να απέχουν 10km. Την λύση στο πρόβλημα του πλήθους των ONU έρχεται να δώσει το WDM-PON, η τεχνική αυτή παρέχει επεκτασιμότητα επειδή μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλά κύματα φωτός μέσα από την ίδια οπτική ίνα. Ακόμη είναι απόλυτα διαφανής στο ρυθμό μετάδοσης και δεν υπάρχουν απώλειες σήματος λόγω διασποράς ισχύος.

Στην κατασκευή ενός WDM-PON υπάρχει ένα διαφορετικό κανάλι κύματος από τον OLT προς τους ONUs, τόσο στο Upstream όσο και στο Downstream, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19. Η σύνδεση μεταξύ του OLT και των ONUs γίνεται με μορφή σημείο-προς-σημείο, πράγμα που διαφέρει από την τοπολογία του TDM-PON που είναι σημείο-προς-πολλά σημεία. Στο WDM-PON κάθε ONU μπορεί να λειτουργεί σε ρυθμό που αγγίζει τον ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps προς τους τελικούς χρήστες. Ακόμη, διάφορα κύματα μπορούν να λειτουργήσουν σε διάφορους ρυθμούς μετάδοσης, αν είναι απαραίτητο. Ουσιαστικά, για την υποστήριξη των WDM-PON δικτύων είναι αναγκαία η χρήση πολλών μηκών κύματος. [13]

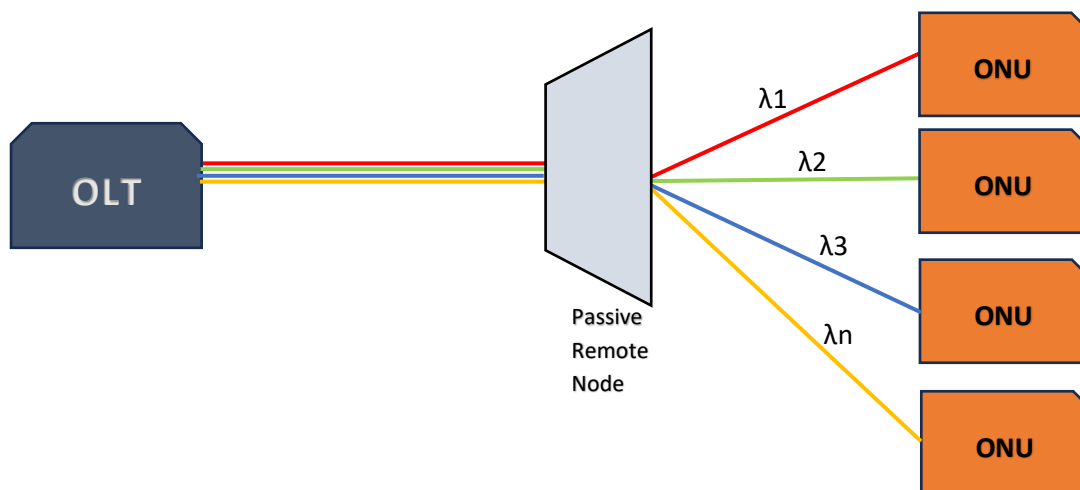


Σχήμα 2.19 Αρχιτεκτονική WDM-PON [13]

Για την Downstream ροή, βλέποντας το σχήμα 2.19, καταλαβαίνουμε ότι τα κανάλια κύματος δρομολογούνται από τον OLT προς τους ONUs μέσω ενός παθητικού δρομολογητή (Arrayed Waveguide Grating, AWG), αυτός είναι τοποθετημένος σε έναν «απομακρυσμένο

κόμβο». Το AWG είναι μια παθητική οπτική συσκευή και έχει την ιδιότητα της περιοδικότητας. Πιο συγκεκριμένα πολλά φασματικά σήματα δρομολογούνται στην ίδια έξοδο από μία είσοδο. Αυτό επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των καναλιών κύματος. Για την μετάδοση πολλαπλών κυμάτων σε διάφορα ONUs χρησιμοποιείται μια πολυκυματική πηγή.[13]

Αντίθετα, στην Upstream ροή, ο OLT χρησιμοποιεί έναν WDM αποπολυπλέκτη για να λαμβάνει τα σήματα. Κάθε ONU είναι εξοπλισμένος με έναν πομπό και έναν δέκτη για την λήψη και την μετάδοση στα αντίστοιχα κύματα. [13]



Σχήμα 2.21 Δίκτυο WDM-PON

Τέλος, οι αποφάσεις για το χρονικό διάστημα που θα μεταδώσει ο κάθε ONU αναφέρονται στο πρόβλημα της δυναμικής ανάθεσης μήκους κύματος (Dynamic Wavelength Assignment, DWA). Υπάρχουν δύο κατηγορίες DWA, η Offline DWA και η Online DWA. Στην Online DWA γίνεται ανάθεση ξεχωριστού μήκους κύματος για κάθε αίτημα που στέλνει ο ONU. Ακόμη, η Online DWA οδηγεί σε μικρότερες καθυστερήσεις πακέτων όταν υπάρχει αυξημένη κίνηση στο δίκτυο. Αντίθετα, η Offline DWA περιμένει να λάβει όλα τα αιτήματα των ONUs και μετά αποφασίζει ποιος θα έχει περισσότερα δικαιώματα μετάδοσης. Σε αυτή την κατηγορία οι αποφάσεις ανάθεσης είναι δικαιότερες διότι βασίζονται σε περισσότερα δεδομένα. [16]

2.11 Δίκτυα Πρόσβασης

Η απόσταση του τελικού χρήστη με τον ONU, το σημείο δηλαδή που ξεκινάει η οπτική ίνα, παίζει σημαντικό ρόλο για την αρχιτεκτονική που θα χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο πρόσβασης. Η πιο γνωστή σε όλους αρχιτεκτονική είναι αυτή όπου η οπτική ίνα φτάνει μέχρι μέσα στο σπίτι (FTTH). Με αυτό τον τρόπο γεννιέται μια οικογένεια αρχιτεκτονικών δικτύου FTTx στην οποία: [3]

1. **Upload:** Τα δεδομένα μεταφέρονται από τους ONUs προς τον OLT. Η πολύπλεξη των δεδομένων αυτών γίνεται με την τεχνική πολλαπλής διαίρεσης χρόνου (TDMA)
2. **Download:** Τα δεδομένα μεταφέρονται από τον OLT προς τους ONUs με την χρήση broadcast, εφόσον χρησιμοποιείται μόνο ένα μήκος κύματος.

2.11.1 Fiber To The Home (FTTH)

Στην αρχιτεκτονική Fiber To The Home (FTTH) η οπτική ίνα φτάνει μέχρι και το σπίτι του τελικού χρήστη, όπου βρίσκεται και ο ONU. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο τελικός χρήστης να έχει πολύ μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Ο τελικός χρήστης δηλαδή, έχει την δυνατότητα να αξιοποιήσει όλη την διαθέσιμη χωρητικότητα της οπτικής ίνας.

Οι τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται είναι η TDM. Η τεχνική αυτή όμως δεν μας επιτρέπει να μεταδώσουμε μεγάλο όγκο δεδομένων. Αυτό συμβαίνει διότι χρησιμοποιείται μια μονοτροπική ίνα. Στην περίπτωση που πολλοί χρήστες θέλουν να μεταδώσουν μεγάλο όγκο δεδομένων χρησιμοποιείται η τεχνική πολυπλεξίας WDM. [12]



Σχήμα 2.22 Fiber To The Home

2.11.2 Fiber To The Building (FTTB)

Το Fiber To The Building (FTTB) είναι μια τεχνολογία στην οποία η οπτική ίνα φτάνει στο κτίριο όπου βρίσκεται η κατοικία του τελικού χρήστη (συνήθως ο σκελετός διανομής), δεν φτάνει όμως στις εγκαταστάσεις του χρήστη, όπως γίνεται στην τεχνολογία FTTH. Ως αποτέλεσμα, το FTTB είναι πιο αργό από το FTTH αλλά έχει σημαντικά χαμηλότερο κόστος, αφού δεν χρειάζεται να γίνει εγκατάσταση περεταίρω εξοπλισμού στον κάθε ένα τελικό χρήστη. [2]

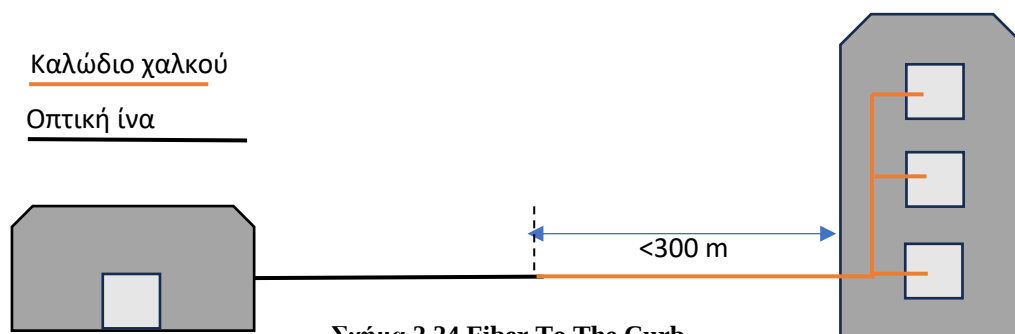


Σχήμα 2.23 Fiber To The Building

2.11.3 Fiber To The Curb (FTTC)

Στην αρχιτεκτονική Fiber To The Curb (FTTC) η οπτική ίνα εκτείνεται από τον OLT, μέχρι και μια καμπίνα, έναν ONU. Η καμπίνα αυτή υπάρχει στο πεζοδρόμιο και εξυπηρετεί τους κοντινούς χρήστες. Οι χρήστες με την σειρά τους χρησιμοποιούν χάλκινο καλώδιο, εφόσον υπάρχει στον τοπικό βρόγχο. Σε αυτή την περίπτωση το χάλκινο καλώδιο μας περιορίζει, εφόσον επιτρέπει ταχύτητες μερικών δεκάδων Mbps. Αυτή η τεχνική είναι ιδανική για να εξυπηρετήσει μεγάλο όγκο χρηστών που βρίσκονται σε μια περιοχή όπως ένα οικοδομικό τετράγωνο, αλλά δεν θα έχουν τόσες μεγάλες απαιτήσεις ευρυζωνικότητας.

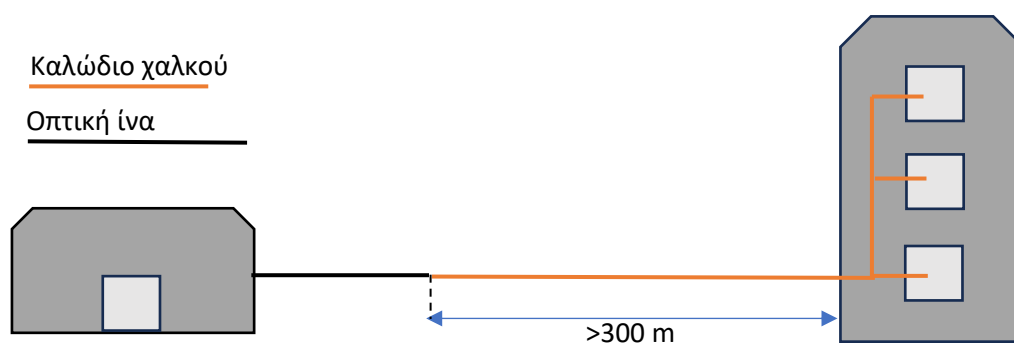
Στην αρχιτεκτονική αυτή, η εκπομπή δεδομένων, από τον OLT προς τους ONUs γίνεται με την τεχνική broadcast. Η TDMA χρησιμοποιείται για να διαμοιράσει το εύρος ζώνης στους ONUs. [17]



Σχήμα 2.24 Fiber To The Curb

2.11.4 Fiber To The Neighborhood (FTTN)

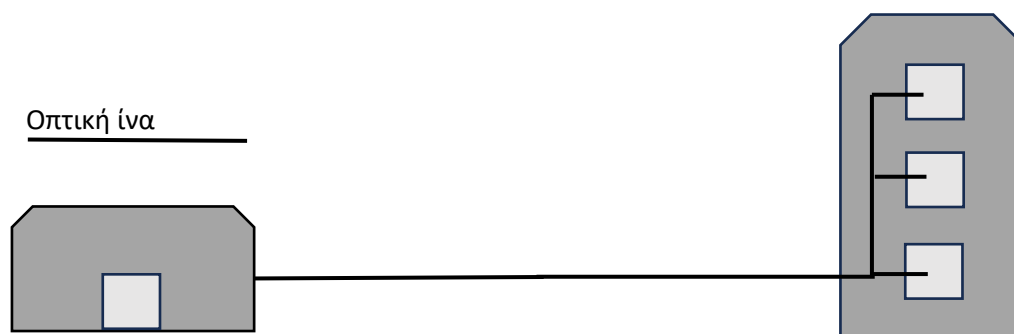
Στην αρχιτεκτονική Fiber To The Neighborhood (FTTN) η οπτική ίνα τερματίζει σε έναν ONU που απέχει περίπου 1 km από το κτήριο του τελικού χρήστη. Από την μεριά του τελικού χρήστη προς τον ONU η σύνδεση γίνεται με την ήδη εγκατεστημένη δικτυακή υποδομή, πχ χάλκινα καλώδια. Με λίγα λόγια το μητροπολιτικό δίκτυο συνδέεται μέσω οπτικής ίνας με τους ONUs, ενώ η μετάδοση προς τους τελικούς χρήστες γίνεται μέσω καλωδίων χαλκού. [14]



Σχήμα 2.25 Fiber To The Neighborhood

2.11.5 Fiber To The Room (FTTR)

Στην αρχιτεκτονική Fiber To The Room η οπτικής ίνας φέρνει υψηλές ταχύτητες σύνδεσης στα δωμάτια ενός κτηρίου, ενός σπιτιού ή σε ένα συγκρότημα κατοικιών.



Σχήμα 2.26 Fiber To The Room

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πρωτόκολλα Πρόσβασης σε XG-PON

3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία μελετήσαμε ένα δίκτυο τεχνολογίας XG-PON. Το δίκτυο αυτό έχει ταχύτητα μετάδοσης στη ροή καθόδου ίση με 9.9 Gbps και στη ροή ανόδου ίση με 2.4 Gbps. Το δίκτυό μας, κατέχει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που προαναφέραμε για τα δίκτυα XG-PON. Για την διαχείριση του εύρους ζώνης μελετήθηκε το πρωτόκολλο ανόδου (ΠΑ) στην Upstream ροή και το πρωτόκολλο καθόδου στην Downstream ροή (ΠΚ). Τέλος το πλήθος των ONUs μεταβάλλεται από 2 μέχρι και 18. Στις παρακάτω ενότητες θα αναπτυχθούν το ΠΚ και το ΠΑ.

3.2 Στόχος πρωτοκόλλων πρόσβασης

Κάθε τελικός χρήστης είναι συνδεδεμένος με έναν ONU. Οι ONUs είναι συνδεδεμένοι με την σειρά τους με τον OLT. Ακόμη υπάρχει ένας παθητικός οπτικός διαχωριστής (Splitter) που διασυνδέει τον OLT με τους ONUs. Ο OLT αλλά και οι ONUs έχουν χρησιμοποιούν πακέτα για να μεταδώσουν τα δεδομένα τους. Τα πακέτα αυτά αποθηκεύονται στους buffers των OLT και των ONUs. Για την μετάδοση χρησιμοποιούνται τα πλαίσια μετάδοσης. Στα πλαίσια μετάδοσης περνάνε τα πακέτα που μεταδίδονται. Για την κατανομή των πακέτων σε ένα πλαίσιο μετάδοσης χρησιμοποιείται κάποιο πρωτόκολλο πρόσβασης.

Το ιδανικότερο πρωτόκολλο πρόσβασης που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στα PONs είναι το First-In First-Out. Πιο συγκεκριμένα, όποιο πακέτο είναι στη πρώτη θέση του buffer, θα περάσει και στη πρώτη θέση του πλαισίου μετάδοσης. Άρα θα μεταδοθεί και πρώτο. Αυτό όμως θα λειτουργούσε μόνο αν όλοι οι ONUs βρίσκόντουσαν στην ίδια απόσταση με τον OLT. Αντίθετα, σε ένα δίκτυο PON, δεν έχουν όλοι οι ONUs την ίδια απόσταση με τον OLT.

Όπως καταλαβαίνουμε, η διαφορετική θέση του κάθε ONU μαζί με το propagation delay που υπάρχει μπορεί να αποφέρει πολλά προβλήματα στην κατανομή του εύρους ζώνης και στις δύο ροές. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να αδικηθούν οι ONUs που βρίσκονται πιο μακριά από τον OLT και ως αποτέλεσμα να έχουν υψηλή μέση καθυστέρηση στα πακέτα τους. Για να αποφύγουμε αυτές τις αδικίες, έχουν δημιουργηθεί τα πρωτόκολλα ανόδου (ΠΑ) που χρησιμοποιείται στην ροή ανόδου και το πρωτόκολλο καθόδου (ΠΚ) που χρησιμοποιείται στη ροή καθόδου.

Στην ουσία το Π.Α έχει ως κριτήριο την απόσταση του κάθε ONU από τον OLT, ώστε να επιλέξει το πακέτο που θα μεταδοθεί. Πιο συγκεκριμένα, το ΠΑ εξετάζει το εύρος ζώνης που ζητάει ο κάθε ONU και τον εξυπηρετεί ανάλογα με το εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο. Στην ουσία κάθε φορά που ετοιμάζεται ένα πλαίσιο ανόδου να μεταδοθεί, κάθε ONU βάζει μέσα στο πλαίσιο τα πακέτα που έχει στον buffer του, με την προϋπόθεση το μέγεθος των πακέτων αυτών να μην ξεπερνάει το εύρος ζώνης που έχει δοθεί στον ONU. Έτσι εξυπηρετούνται οι ONUs που ζητάνε αρκετό εύρος ζώνης, χωρίς όμως να αδικούνται οι ONUs που δεν χρειάζονται τόσο εύρος ζώνης.

Αντίθετα, το ΠΚ έχει ως κριτήριο την απόσταση του κάθε ONU από τον OLT, ώστε να επιλέξει το πακέτο που θα μεταδοθεί. Στην ουσία ο ONU που βρίσκεται σε μακρινότερη απόσταση είναι και αυτός που θα λάβει το πακέτο του γρηγορότερα. Έτσι, θα υπάρχει ένας δίκαιος χρόνος καθυστέρησης πακέτων για όλους τους ONUs.

Συνοψίζοντας, οι βασικότεροι στόχοι των πρωτοκόλλων ανόδου και καθόδου είναι να υπάρχει διασφάλιση της δίκαιης διαδικασίας στην μετάδοση πακέτων αλλά και να διαμοιράζεται δυναμικά το εύρος ζώνης και στις δύο ροές.

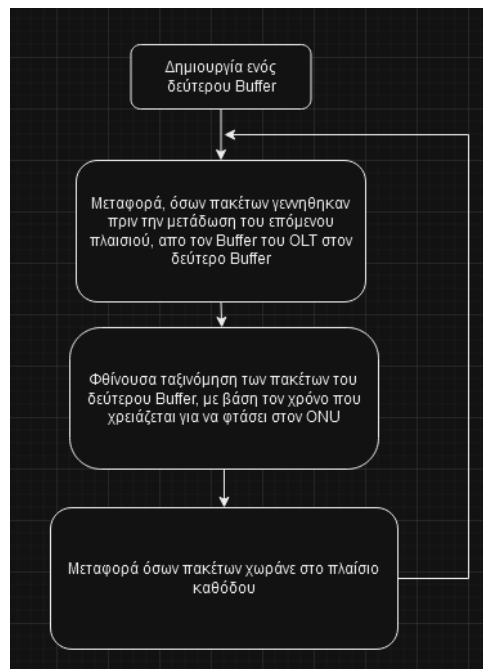
Σημειώνεται ότι τα πρωτόκολλα αυτά έχουν προταθεί στις εργασίες [20-21]. Στην παρούσα εργασία προτείνεται η βελτίωση τους έτσι ώστε να επιτευχθεί η βελτίωση της μέγιστης διέλευσης των πακέτων καθώς και η δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης στους ONUs. Στη συνέχεια θα περιγράφει με λεπτομερείς η τροποποίηση των πρωτοκόλλων.

3.2.1 Πρωτόκολλο Καθόδου (ΠΚ)

Το ΠΚ βελτιώνει την απόδοση του πρωτοκόλλου που προτάθηκε στην εργασία [21]. Εκεί κάθε πακέτο έχει μεταβλητό μέγεθος από 64 μέχρι 1518 Bytes, ενώ το μέγεθος του πλαισίου είναι ίσο με 155520 Bytes, μείον τα bytes της επικεφαλίδας, και μεταδίδεται κάθε 125μs. Στο πρωτόκολλο καθόδου που παρουσιάζεται στο [21], πριν την μετάδοση κάθε πλαισίου, ελέγχονται οι προορισμοί των πακέτων του κάθε ONU. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε πακέτο που υπάρχει μέσα στον buffer του OLT μετριέται ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει το πακέτο στον προορισμό του. Στην συνέχεια, συγκρίνονται, ανά δύο, οι χρόνοι μετάδοσης κάθε πακέτου. Έτσι το πακέτο με τον μεγαλύτερο χρόνο μετάδοσης θα περάσει και στην πρώτη θέση του πλαισίου. Το άλλο πακέτο ξαναγυρνάει στον buffer του OLT. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται κάθε 125μs, έως ότου να μην υπάρχουν άλλα πακέτα για μετάδοση στον buffer του OLT. Το πρωτόκολλο αυτό έχει ως αποτέλεσμα να λάβουν γρηγορότερα τα πακέτα τους οι ONUs που βρίσκονται πιο μακριά από τον OLT. Έτσι υπάρχει ένας δίκαιος χρόνος καθυστέρησης για όλους τους ONUs.

Στην παρούσα πτυχιακή τροποποιήσαμε το πρωτόκολλο της εργασίας [21] με σκοπό να ελέγξουμε την απόδοσή του όταν όλα τα πακέτα έχουν μέγεθος 1500 Bytes αλλά και να μειώσουμε τον χρόνο που χρειάζεται ώστε να "τρέξει" το πρωτόκολλο. Πιο συγκεκριμένα, στο ΠΚ έχουμε ένα πλαίσιο καθόδου, που λειτουργεί σαν μια ουρά, έχει μέγεθος ίσο με 155520 Bytes μείον τα bytes της επικεφαλίδας και μεταδίδεται κάθε 125μs. Το πλαίσιο αυτό γεμίζει με πακέτα από τον Buffer του OLT. Πριν την αποθήκευση των πακέτων στο πλαίσιο, υπάρχει ακόμη ένας buffer, ο buffer του πρωτοκόλλου. Αυτός ο buffer γεμίζει με πακέτα, από τον buffer του OLT, με βάση τον χρόνο γέννησης τους. Πιο συγκεκριμένα, ο δεύτερος buffer αποθηκεύει όσα πακέτα γεννήθηκαν πριν την μετάδοση του πλαισίου. Έπειτα γίνεται φθίνουσα ταξινόμηση στο buffer αυτόν. Στην πρώτη θέση μπαίνει το πακέτο που χρειάζεται τον περισσότερο χρόνο για να φτάσει στον ONU όπου προορίζεται. Στην συνέχεια γεμίζει το πλαίσιο με τα πακέτα από τον δεύτερο buffer έως ότου να μην χωράνε άλλα. Τα υπόλοιπα πακέτα παραμένουν στον δεύτερο buffer έως ότου να μεταδοθούν όλα. Τέλος γίνεται η μετάδοση του πλαισίου προς τους ONUs. Το πρωτόκολλο αυτό λειτουργεί έως ότου να μην υπάρχουν άλλα πακέτα για μετάδοση.

Η τροποποίηση που έγινε στο πρωτόκολλο που παρουσιάζεται στην εργασία [21] επιτυγχάνει την μέγιστη απόδοση του δικτύου XG-PON, εφόσον όλα τα πακέτα έχουν μέγεθος 1500 Bytes. Επίσης ελαχιστοποιείται ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να τρέξει το πρωτόκολλο. Αυτό συμβαίνει διότι η τεχνική bubblesort που χρησιμοποιήθηκε στο [21] ελέγχει μόνο δύο πακέτα από τον buffer του OLT. Στο ΠΚ υπάρχει ακόμη ένας buffer του πρωτοκόλλου. Εκεί μεταφέρονται όσα πακέτα γεννήθηκαν πριν από την μετάδοση του πλαισίου, πριν από τα 125μs δηλαδή. Στη συνέχεια γίνεται φθίνουσα ταξινόμηση στα πακέτα που υπάρχουν στον buffer του πρωτοκόλλου. Έπειτα μεταφέρονται 103 πακέτα από αυτόν τον buffer στο πλαίσιο. Με άλλα λόγια γεμίζει το πλαίσιο. Στη συνέχεια εισέρχονται τα επόμενα πακέτα στον δεύτερο buffer, μαζί με όσα έχουν απομείνει από πριν. Εκεί ξαναγίνεται η ταξινόμηση και επαναλαμβάνεται η διαδικασία φόρτωσης του πλαισίου.



Σχήμα 3.1 Αλγόριθμος Π.Κ

3.2.2 Πρωτόκολλο Ανόδου (ΠΑ)

Το πρωτόκολλο ανόδου (ΠΑ) που μελετήθηκε στην συγκεκριμένη πτυχιακή είναι εμπνευσμένο από το [20]. Εκεί τα πακέτα έχουν μεταβαλλόμενο μέγεθος από 64 μέχρι 1518 Bytes. Το ΠΑ αποτελεί ένα εξελιγμένο πρωτόκολλο αυτού, διότι εξετάζεται η απόδοση του πρωτοκόλλου όταν τα πακέτα έχουν σταθερό μέγεθος ίσο με 1500 Bytes. Αυτό συμβαίνει διότι αυτό είναι το συνηθισμένο μέγεθος πακέτων στο Ethernet δίκτυο. Επίσης τα περισσότερα δίκτυα πρόσβασης είναι Ethernet, για αυτό τον λόγο στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν πακέτα των 1500 Bytes. Παράλληλα μειώνεται ο χρόνος που χρειάζεται να "τρέξει" το πρωτόκολλο διότι τροποποιήθηκαν κάποιες λειτουργίες που θα αναφερθούν παρακάτω.

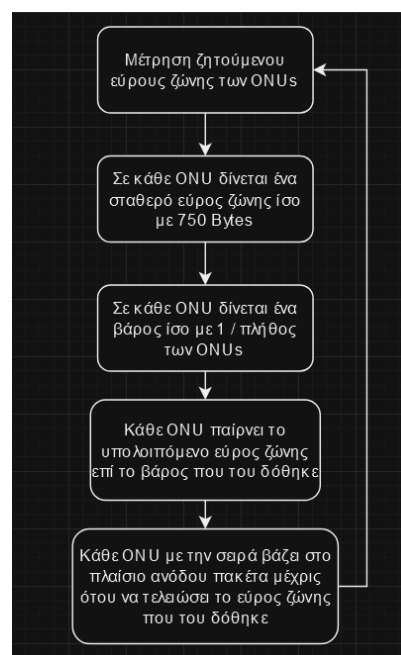
Όπως το πρωτόκολλο καθόδου, έτσι και το πρωτόκολλο ανόδου χρησιμοποιεί πλαίσια για την μετάδοση δεδομένων. Τα πλαίσια αυτά έχουν μέγεθος ίσο με 38882 Bytes και μεταδίδονται κάθε 125μs. Στη ροή ανόδου όμως το πλαίσιο μεταδίδεται από τους ONUs προς τον OLT. Ο κάθε ONU θέλει να μεταδώσει κάποια δεδομένα με την μορφή πακέτων προς τον OLT. Κάθε πακέτο έχει μέγεθος ίσο με 1500 Bytes.

Το δίκτυο X-PON μπορεί να μεταφέρει μέχρι και 2.4 Gbps στη ροή ανόδου. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούν όλοι οι ONUs να εξυπηρετηθούν αμέσως. Έτσι, ο OLT δίνει το ίδιο εύρος ζώνης σε κάθε ONU, ανεξάρτητα από το εύρος ζώνης που ζητάει.

Το πρωτόκολλο που παρουσιάζεται στην εργασία [20] δημιουργεί πακέτα μεταβλητού μεγέθους από 64 μέχρι 1518 Bytes. Στην συνέχεια γίνεται ένας διαχωρισμός των ONUs σε

υπερφορτωμένους και μη-υπερφορτωμένους με βάση το εύρος ζώνης που ζητάνε. Με βάση δηλαδή το πόσα πακέτα θέλει να μεταδώσει ο καθένας. Έπειτα υπολογίζεται το BUP του κάθε ONU. Όπου BUP είναι ίσο με το συνολικό εύρος ζώνης που ζητάει ο ONU, προς το συνολικό εύρος ζώνης που του δόθηκε. Στη συνέχεια δίνεται ένα βάρος στον κάθε ONU ανάλογα με το εύρος ζώνης που ζητάει. Σύμφωνα με μια τυχαία τιμή, όποιος ONU ζητάει παραπάνω εύρος ζώνης από όσο πρέπει, τότε το εύρος ζώνης που του δόθηκε μειώνεται και μοιράζεται στους υπόλοιπους. Έτσι μειώνεται το εύρος ζώνης που έχει δοθεί στους μη-υπερφορτωμένους και διαμοιράζεται στους υπερφορτωμένους. Τέλος όσο εύρος ζώνης έχει απομείνει μοιράζεται σε όλους τους ONUs. Στη συνέχεια, ο κάθε ONU με την σειρά γεμίζει το πλαίσιο ανόδου, σύμφωνα με το εύρος ζώνης που του έχει δοθεί. Μόλις εξυπηρετηθούν όλοι οι ONUs και γεμίσει το πλαίσιο, στέλνεται προς τον OLT. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε 125μs, έως ότου να μην έχει κανένας ONU πακέτα στον Buffer του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μοιράζονται δίκαια όλοι οι ONUs το εύρος ζώνης.

Η τροποποίηση που έγινε στην παρούσα εργασία είναι το σταθερό μέγεθος των πακέτων που είναι ίσο με 1500 Bytes. Αυτό έχει ως στόχο τον έλεγχο της απόδοσης του πρωτοκόλλου όταν γεμίζει με πακέτα μεγάλου μεγέθους. Επίσης δεν υπάρχει διαχωρισμός σε υπερφορτωμένους ONUs και μη υπερφορτωμένους. Αντίθετα δίνεται στην αρχή ένα σταθερό εύρος ζώνης σε κάθε ONU ίσο με 750 Bytes. Στη συνέχεια κάθε ONU παίρνει ένα βάρος ίσο με το ένα προς το πλήθος των ONUs. Τέλος μοιράζεται σε όλους τους ONUs το υπολειπόμενο εύρος ζώνης επί το βάρος που έχει ο ONU. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει δίκαια διανομή του εύρους ζώνης σε όλους τους ONUs.



Σχήμα 3.1 Αλγόριθμος Π.Α

3.3 Σχεδίαση του δικτύου προσομοίωσης

	Downstream Ροή	Upstream Ροή
Πλήθος ONUs	2 έως 18	
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	9.95328 Gbps.	2.488 Gbps.
Μέγεθος πακέτων	1500 Bytes	
Μέγεθος πλαισίου	155.520 Bytes	38.882 Bytes
Χρόνος αποστολής πλαισίου	Ένα πλαίσιο κάθε 125μs	
Κατανομή γέννησης πακέτων	Κατανομή Poisson	
Απόσταση OLT με ONUs	20 έως 60 χιλιόμετρα	
Προορισμός πακέτου	Τυχαίος	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποτελέσματα Προσομοίωσης

4.1 Εισαγωγή

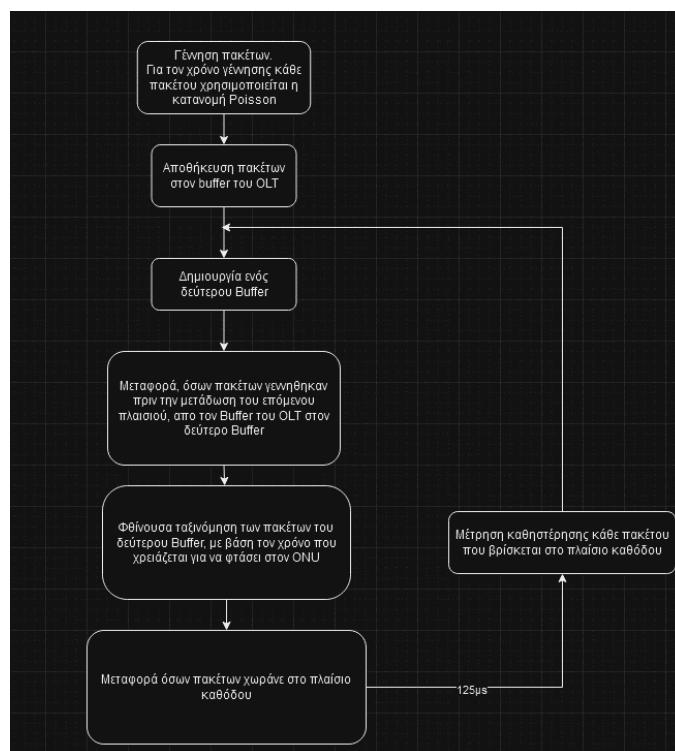
Στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται η παρουσίαση των αλγορίθμων προσομοίωσης καθώς και τα αποτελέσματα, με μορφή γραφήματος, που εξήχθησαν χρησιμοποιώντας τα παραπάνω πρωτόκολλα πρόσβασης. Επίσης γίνεται επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

4.2 Αλγόριθμοι προσομοίωσης

Παρακάτω γίνεται η ανάλυση των ροών ανόδου και καθόδου με την μορφή διαγραμμάτων ροής. Η γλώσσα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση είναι η C++. Η ανάλυση των προγραμμάτων θα γίνει με διαγράμματα ροής ώστε να γίνουν πιο κατανοητά.

4.2.1 Αλγόριθμος ροής καθόδου

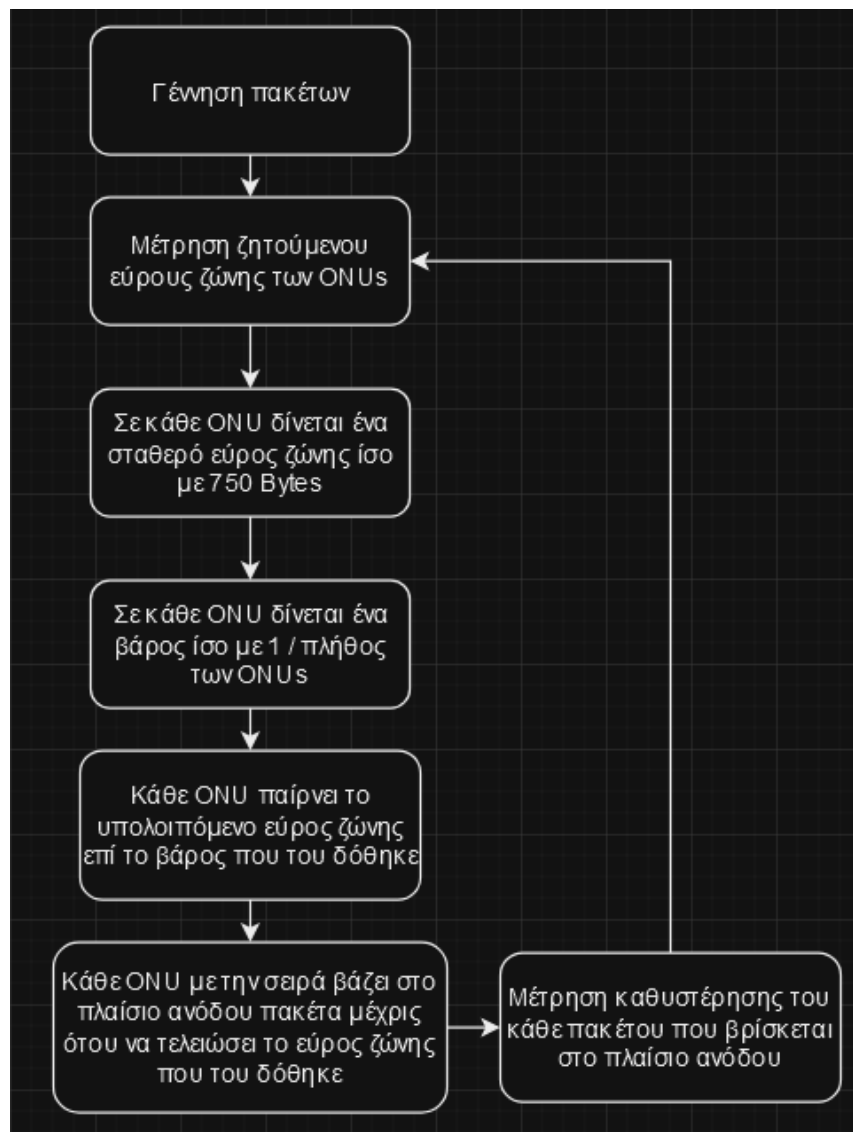
Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος του προγράμματος ροής καθόδου. Στο σχήμα βλέπουμε ότι αρχικά γεννιούνται τα πακέτα και αποθηκεύονται στον buffer του OLT. Έπειτα “τρέχει” το ΠΚ που κατανέμει τα πακέτα μέσα στο πλαίσιο καθόδου. Τέλος μετριέται η καθυστέρηση του κάθε πακέτου που υπάρχει μέσα στο πλαίσιο καθόδου. Το πρόγραμμα “τρέχει” έως ότου να μην υπάρχουν άλλα πακέτα για μετάδοση στον buffer του OLT.



Σχήμα 4.1 Αλγόριθμος ροής καθόδου

4.2.2 Αλγόριθμος ροής ανόδου

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος του προγράμματος ροής ανόδου. Στο σχήμα βλέπουμε ότι αρχικά γεννιούνται πακέτα. Τα πακέτα αυτά αποθηκεύονται στον buffer του ONU από τον οποίο έχουν γεννηθεί. Στην συνέχεια "τρέχει" το ΠΑ που κατανέμει τα πακέτα μέσα στο πλαίσιο ανόδου. Τέλος μετρίεται η καθυστέρηση του κάθε πακέτου που υπάρχει σε κάθε πλαίσιο μετάδοσης. Το πρόγραμμα "τρέχει" έως ότου να μην υπάρχει κανένα πακέτο για μετάδοση στους buffers των ONUs.



Σχήμα 4.2 Αλγόριθμος ροής ανόδου

4.3 Αποτελέσματα

Για την κατανομή πακέτων στα πλαίσια μετάδοσης του δίκτυο XG-PON μελετήθηκαν το πρωτόκολλο καθόδου (ΠΚ) στη ροή καθόδου και το πρωτόκολλο ανόδου (ΠΑ) στη ροή ανόδου. Επίσης τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν στο μέγιστο τις δυνατότητες των XG-PON δικτύων, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος μετάδοσης των πακέτων.

Οι μετρήσεις που έγιναν είναι οι εξής:

- Ο μέσος χρόνος καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων το οποίο μετρήθηκε σε msec.

Σε ένα δίκτυο XG-PON, το delay μετράει τον χρόνο που χρειάζεται για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ του OLT και των ONUs. Η μέτρηση του εξαρτάται από τέσσερις παράγοντες:

1. Καθυστέρηση μετάδοσης (Transmission Delay): Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων μέσω της οπτικής ίνας.
2. Καθυστέρηση διάδοσης (Propagation Delay): Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων από τον OLT προς έναν ONU ή αντίστροφα.
3. Καθυστέρηση αναμονής (Queuing Delay): Ο χρόνος που απαιτείται όταν τα δεδομένα περιμένουν σε έναν buffer για να μεταδοθούν.

Πιο συγκεκριμένα:

$$\text{Delay} = (\text{Transmission Delay} + \text{Propagation Delay} + \text{Queuing Delay}) \quad (1)$$

- Η μετρική Jain's (delay) Fairness Index[24]

Η DFI υπολογίζεται ως:

$$J(t_1, t_2, \dots, t_N) = \frac{(\sum_{k=0}^n t_i)^2}{N * \sum_{k=0}^n t_i^2} \quad (2)$$

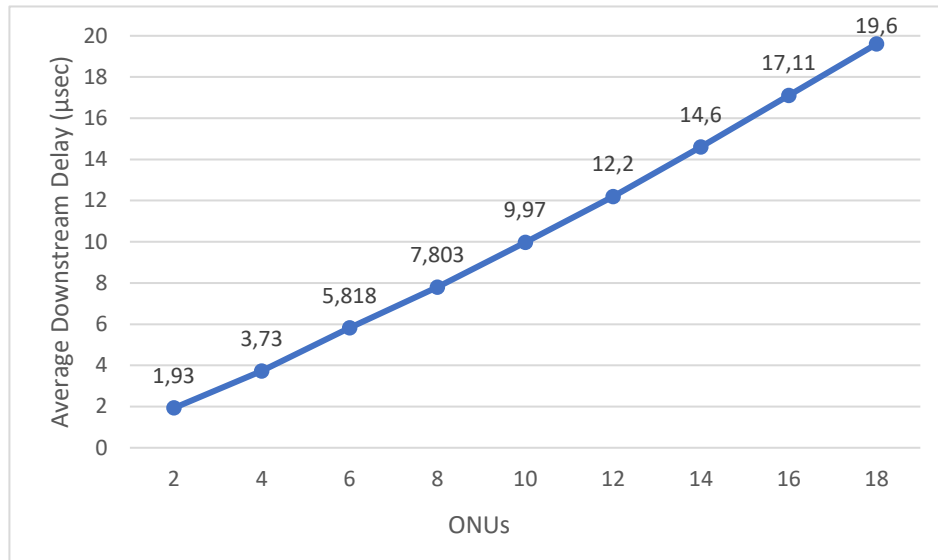
Στην παραπάνω εξίσωση η μεταβλητή t_i εκφράζει μέση καθυστέρηση των πακέτων για κάθε έναν ONU. Το t_i δηλαδή, συμβολίζει το άθροισμα του delay του κάθε πακέτου που οδηγείται για κάθε ONU διά τον αριθμό των πακέτων που υπάρχουν μέσα στο κάθε πλαίσιο. Ουσιαστικά το DFI εκφράζει την δικαιοσύνη του πρωτοκόλλου και στόχος είναι η τιμή της να βρίσκεται κοντά στο 1.[24]

- Το Throughput σε Gbps του δικτύου.

Το throughput αναφέρεται στην πραγματική ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων από τον OLT προς τους ONUs ή αντίστροφα. Η μέτρηση του αποτελεί ένα σημαντικό μέτρο για την απόδοση του δικτύου. Η τιμή του throughput υπολογίζεται από το

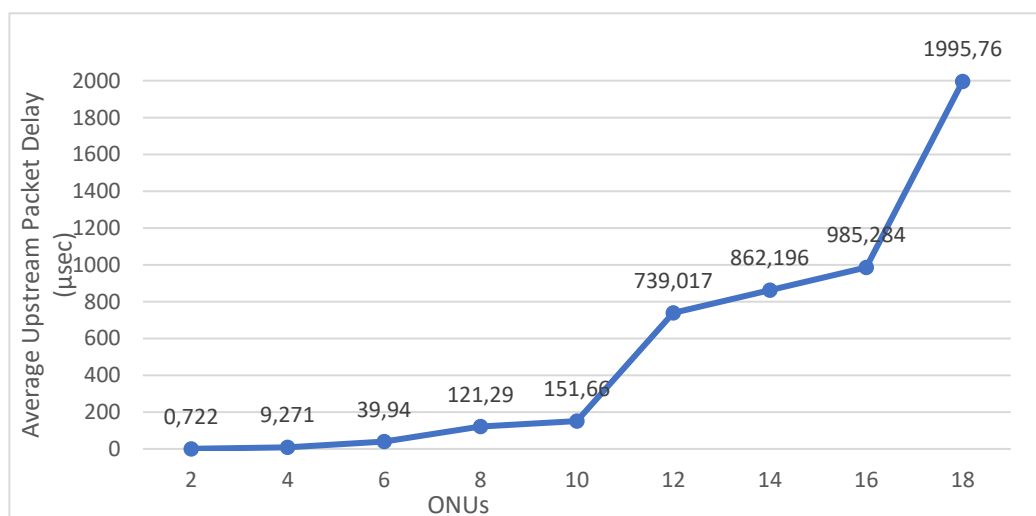
μέγεθος των δεδομένων που μεταδίδονται προς τον χρόνο που χρειάστηκε για να μεταδοθούν.

Το πείραμα εξετάζει την απόδοση του δικτύου καθώς αυξάνονται οι ONU's. Πιο συγκεκριμένα οι ONU's ξεκινάνε από 2 και αυξάνονται κατά 2 μέχρι να φτάσουν τους 18.



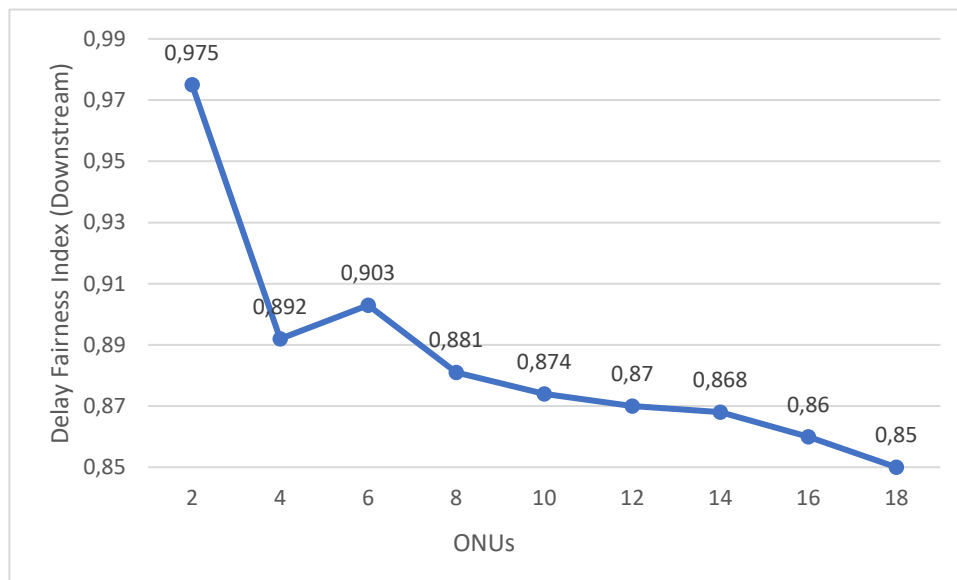
Γράφημα 1: Ο μέσος όρος του συνολικού Delay των Downstream πακέτων καθώς αυξάνεται το πλήθος των ONU's

Στο Γράφημα 1 παρουσιάζεται ο μέσος όρος του συνολικού Delay των πακέτων στη ροή καθόδου καθώς αυξάνεται το πλήθος των ONU's. Βλέπουμε πως το Average Downstream Packet Delay (ADPD) αυξάνεται, όσο αυξάνεται και το πλήθος ONU's. Αυτό γίνεται διότι με κάθε νέα προσθήκη ONU, αυξάνεται και το φορτίο στο δίκτυο.



Γράφημα 2: Ο μέσος όρος του συνολικού Delay των Upstream πακέτων καθώς αυξάνεται το πλήθος των ONU's

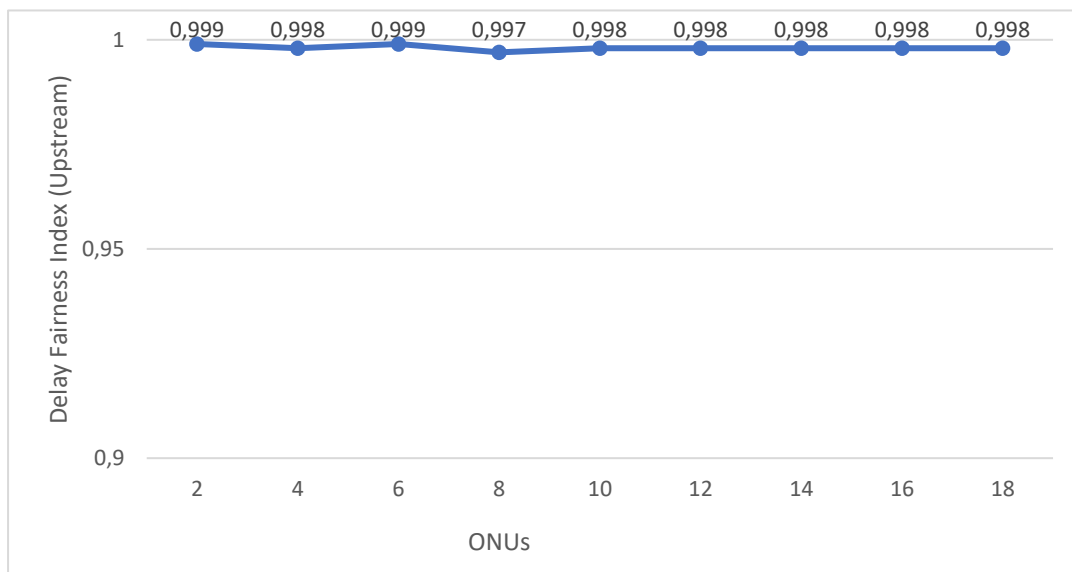
Στο γράφημα 2 παρουσιάζεται το μέσο Delay των Upstream πακέτων καθώς αυξάνουμε το πλήθος των ONUs. Παρατηρούμε ότι η μέση καθυστέρηση των πακέτων αυξάνεται, όσο αυξάνεται και το πλήθος των ONUs. Αυτό συμβαίνει διότι με την προσθήκη κάθε ONU, αυξάνεται και το φορτίο του δικτύου.



Γράφημα 3: Το DFI στη ροή καθόδου καθώς αυξάνεται το πλήθος των ONUs

Στο Γράφημα 3 παρουσιάζεται το DFI της ροής καθόδου, καθώς αυξάνεται το πλήθος των ONUs. Βλέπουμε ότι το DFI μειώνεται όσο αυξάνεται το πλήθος των ONUs. Αυτό συμβαίνει διότι με την προσθήκη κάθε ONU, αυξάνεται φορτίο στο δίκτυο και το πρωτόκολλο γίνεται λιγότερο δίκαιο.

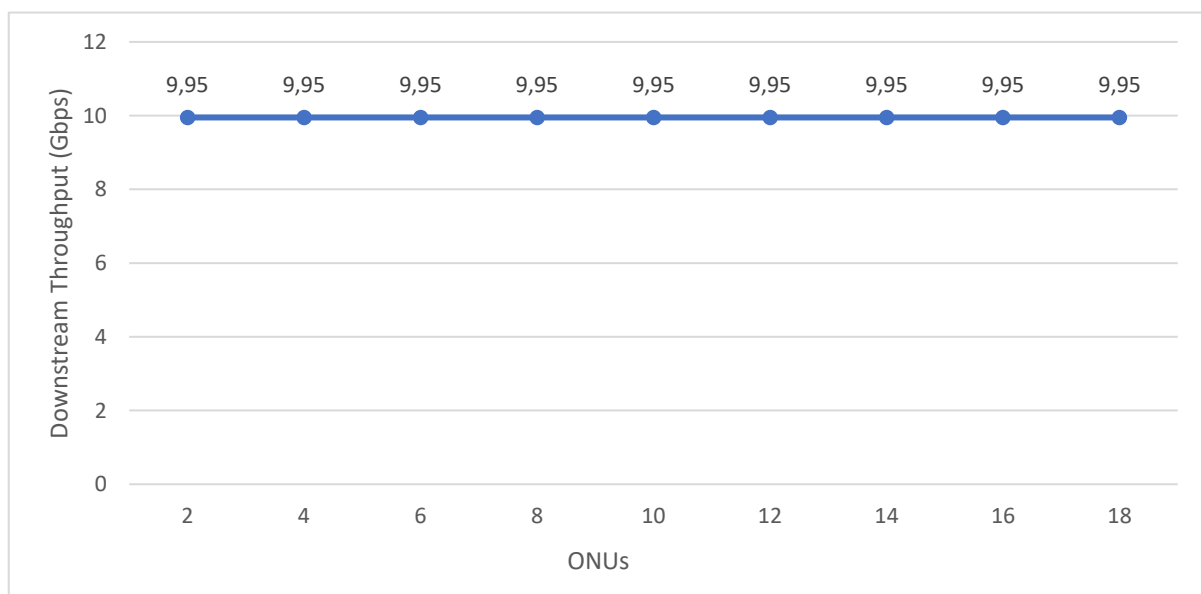
Στόχος του πρωτόκολλου ΠΚ είναι η δίκαιη κατανομή των πακέτων μέσα σε κάθε πλαίσιο. Αυτό έγινε με επιτυχία εφόσον το DFI είναι κοντά στο ένα και συγκεκριμένα πάνω από 0,85.



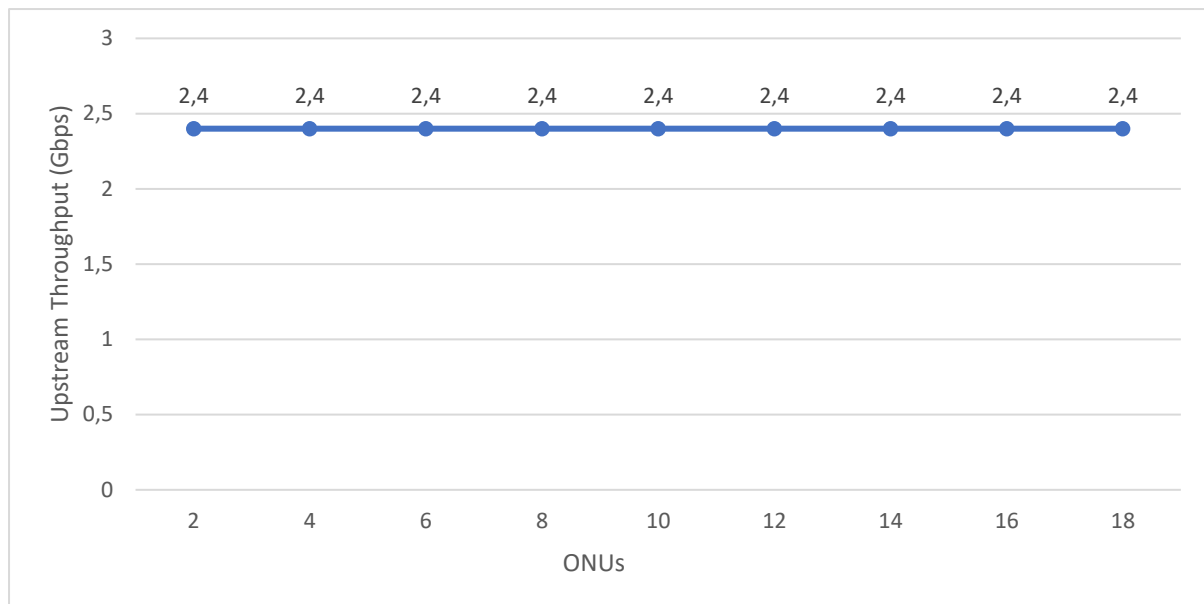
Γράφημα 4: Το DFI στη ροή ανόδου καθώς αυξάνεται το πλήθος των ONUs

Στο γράφημα 4 βλέπουμε ότι το ΠΑ καταφέρνει να κρατήσει το DFI της ροής ανόδου πάνω από 0.99, ακόμη και όταν υπάρχουν 18 ONUs στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει λόγω του ΠΑ που επιτρέπει στον OLT να παρακολουθεί την κίνηση στο δίκτυο και να παίρνει πάντα τις σωστές αποφάσεις για το πως θα κατανέμει το εύρος ζώνης.

Συνοπτικά λοιπόν, το πρωτόκολλο ΠΑ επιτυγχάνει να πραγματοποιήσει, για όλους τους ONUs που συμμετάσχουν στο XG-PON δίκτυο, μια αποδεκτότερη αλλά και δικαιότερη κατανομή του εύρους ζώνης.



Γράφημα 5: Το Throughput στη ροή καθόδου του δικτύου καθώς αυξάνεται το πλήθος των ONUs



Γράφημα 6: Το Throughput στη ροή καθόδου του δικτύου καθώς αυξάνεται το πλήθος των ONUs

Στο γράφημα 5 και 6 παρουσιάζονται τα συνολικά throughput του δικτύου και στις δύο ροές. Στην ροή καθόδου έχουμε throughput ίσο με 9.95 Gbps, ενώ στη ροή ανόδου έχουμε 2.4 Gbps. Φαίνεται ότι η αλλαγή του πλήθους των ONUs δεν επηρεάζει την απόδοση του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι το δίκτυο λειτουργεί στους μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Κάθε πλαίσιο ανόδου που στέλνεται δηλαδή είναι γεμάτο με πακέτα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, εξήχθη το συμπέρασμα ότι τα παραπάνω πρωτόκολλα είναι ιδανικά για ένα δίκτυο XG-PON. Πιο συγκεκριμένα, και τα δύο πρωτόκολλα ικανοποιούν τις ανάγκες των χρηστών για ευρυζωνικότητα, μοιράζοντας δίκαια το εύρος ζώνης σε αυτούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κυριάκος Βλάχος, «Συστήματα Επικοινωνιών με Οπτικές Ίνες», 2009.
- [2] www.wikipedia.org
- [3] <https://stl.tech/blog/single-mode-fiber-optical-cable-vs-multimode-fiber-optical-cable/>
- [4] Svetlana Nikolaevna Khonina, Nikolay Lvovich Kazanskiy, Muhammad Ali Butt² and Sergei Vladimirovich Karpeev. “Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review”, 2022
- [5] Α.Σ. Πομπόρτσης, “Εισαγωγή στις Σύγχρονες Τεχνολογίες Επικοινωνιών”, εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2009.
- [6] <https://www.geeksforgeeks.org/synchronous-optical-network-sonet/>
- [7] Gerd Keiser, “Optical Fiber Communications” Fifth Edition, 2016
- [8] Abbas, Huda Saleh, and Mark A. Gregory. "The next generation of passive optical networks: A review." Journal of network and computer applications 67 (2016): 53-74.
- [9] Horvath, Tomas, et al. "Passive optical networks progress: A tutorial." Electronics 9.7 (2020): 1081.
- [10] Kramer, Glen, and Gerry Pesavento. "Ethernet passive optical network (EPON): Building a next-generation optical access network." IEEE Communications magazine 40.2 (2002): 66-73.
- [11] Zaidi, Atif Raza, et al. "Performance Evaluation of Gigabit Passive Optical Network (GPON) in Various Network Topologies: A Comparative Analysis." Journal of Computing & Biomedical Informatics 5.02 (2023): 180-187
- [12] Μπέττυ Μπαζιάνα και Αντώνης Μποργης, “Οπτικές επικοινωνίες και δίκτυα”, Εκδόσεις Κάλλιπος, 2023
- [13] Fu-Tai An, K.S.Kim, D.Guiterrez, S.Yam, E.Hu, K.Shrikhande and L.G. Kazovsky, "SUCCESS: A Next generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture.” J.Lightwave, vol-23, pp 2557-2569.
- [14] Analysis of Next Generation PON Architecture for Optical Broadband Access Networks, Manish Choudhary and Bipin Kumar Centre For Development of Telematics, Delhi
- [15] Comprehensive performance analysis of dynamic bandwidth allocation schemes for XG-PON system

- [16] Banerjee, Amitabha, et al. "Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review." *Journal of optical networking* 4.11 (2005): 737-758.
- [17] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems"
- [18] Cale, Ivica, Aida Salihovic, and Matija Ivekovic. "Gigabit passive optical network-GPON." 2007 29th International conference on information technology interfaces. IEEE, 2007.
- [19] Leino, D.: 10 Gigabit-capable Passive Optical Network Transmission Convergence layer design. MSc Thesis, Aalto University (2010)
- [20] P. Sarigiannidis, G. Papadimitriou, P. Nikopolitidis, E. Varvarigos, M. Louta, V. Kakali, "IFAISTOS: A Fair and Flexible Resource Allocation Policy for NextGeneration Passive Optical Networks".
- [21] P. Sarigiannidis, G. Papadimitriou, E. Varvarigos, K. Yiannopoulos, "Towards a Fair and Efficient Downlink Bandwidth Distribution in XG-PON Frameworks".
- [22] Yamashita, VMitsuhiko Yano VKazuo Yamaguchi VHaruo. "ATM-PON." *FUJITSU Sci. Tech. J* 35.1 (1999): 56-70.
- [23] Memon, Kamran Ali, et al. "Demand forecasting DBA algorithm for reducing packet delay with efficient bandwidth allocation in XG-PON." *Electronics* 8.2 (2019): 147.
- [24] Jain, Rajendra K., Dah-Ming W. Chiu, and William R. Hawe. "A quantitative measure of fairness and discrimination." *Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, Hudson, MA* 21 (1984).