



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΜΣ: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

STUDY ON PASIVE OTICAL NETWORKS

Επιβλέπων: Στεργίου Ελευθέριος

ΔΕΠ Επίκουρος Καθηγητής

Άρτα, 2025

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Τόπος, Ημερομηνία

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Όνομα Επίθετο,

τίτλος, βαθμίδα

2. Μέλος επιτροπής

Όνομα Επίθετο,

τίτλος, βαθμίδα

3. Μέλος επιτροπής

Όνομα Επίθετο,

τίτλος, βαθμίδα

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου σε ορισμένους ανθρώπους που με βοήθησαν να ολοκληρώσω αυτή τη διπλωματική εργασία. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Στεργίου Ελευθέριο για την επιλογή του θέματος, την πρόσβαση σε βοηθητικό υλικό, τις συμβουλές και την άμεση βοήθεια που μου παρείχε σε κάθε σημείο ανάπτυξης της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τη σύζυγο μου για την ηθική και έμπρακτη βοήθεια που μου παρείχαν, όχι μόνο όσον αφορά την ολοκλήρωση της εργασίας και των σπουδών μου, αλλά και σε κάθε σημαντικό σημείο στη ζωή μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON) έχουν αρχίσει να γίνονται μια δημοφιλής λύση δικτύου πρόσβασης οπτικών ινών λόγω της διαφάνειας των υπηρεσιών, της αποδοτικότητας κόστους, της εξοικονόμησης ενέργειας και της υψηλότερης ασφάλειας που παρέχουν σε σχέση με άλλα δίκτυα πρόσβασης πληροφοριών. Τα PON χρησιμοποιούν παθητικά εξαρτήματα χαμηλής ισχύος που εξαλείφουν την ανάγκη για τροφοδοσία ισχύος στο δίκτυο διανομής των ινών. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τρεις διαφορετικές γενιές PON που βασίζονται στα πρότυπα APON, BPON, PON Ethernet και Gigabit PON. Επίσης παρουσιάζεται η πρώτη γενιά του PON από την άποψη των φυσικών επιπέδων και των επιπέδων σύνδεσης δεδομένων που αποτελεί και τη βάση για συζήτηση σχετικά με τις διαφορετικές προσεγγίσεις που ακολουθούνται για το στάδιο 1 PON επόμενης γενιάς (NG-PON1). Επιπλέον, ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης είναι η ανασκόπηση των τεχνολογιών που προτείνονται για το στάδιο 2 της επόμενης γενιάς PON (NG-PON2), επισημαίνοντας τη σημαντική συμβολή και τους περιορισμούς των αντίστοιχων τεχνολογιών. Οι υβριδικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν πολλαπλές τεχνολογίες εισάγονται ως λύση για την εξάλειψη των σημαντικών περιορισμών και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο, το NG-PON2 εξακολουθεί να εμφανίζει μια σειρά μειονεκτημάτων, όπως το υψηλό κόστος, η περιορισμένη εμβέλεια, η χωρητικότητα και η κατανάλωση ενέργειας που συζητούνται στο τέλος αυτής της εργασίας. Τέλος θα παρουσιάσουμε και θα εξηγήσουμε την κατασκευή τέτοιου δικτύου στην πόλη της Άρτας από γνωστό τηλεπικοινωνιακό πάροχο.

Λέξεις-κλειδιά: PON, FTTH

ABSTRACT

Passive optical networks (PONs) have started to become a popular fiber access network solution because of the service transparency, cost efficiency, energy savings and higher security they provide compared to other information access networks. PONs use low-power passive components that eliminate the need to feed power into the fiber distribution network. Three different generations of PONs based on APON, BPON, Ethernet PON and Gigabit PON standards will then be presented. It also presents the first generation of PON from the point of view of the physical and data link layers and forms the basis for a discussion of the different approaches taken for next-generation PON stage 1 (NG-PON1). Furthermore, the main objective of this study is to review the technologies proposed for next generation PON stage 2 (NG-PON2), highlighting the important contribution and limitations of the respective technologies. Hybrid approaches that combine multiple technologies are introduced as a solution to eliminate significant limitations and improve overall system performance. However, NG-PON2 still exhibits a number of disadvantages, such as high cost, limited range, capacity, and power consumption, which are discussed at the end of this paper. Finally, we will present and explain the construction of such a network in the city of Arta by a well-known telecommunications provider.

Keywords: PON, FTTH

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT.....	vi
1. Εισαγωγή.....	ix
1.1. Τύποι οπτικών δικτύων	x
2. Δίκτυα EPON και GPON	1
2.1 Φυσική υλοποίηση	1
2.2 Μετάδοση και σύνδεση δεδομένων.....	2
2.3 Τα Παθητικά δίκτυα της 1 ^{ης} επόμενης γενεάς (NG-PON1).....	7
2.3.1 Μετάβαση από το δίκτυο EPON στο δίκτυο XG-EPON	7
2.3.2 Μετάβαση από το δίκτυο GPON στο δίκτυο XG-GPON	8
2.4 Τα Παθητικά δίκτυα της 2ης επόμενης γενεάς (XG-GPON2).....	10
2.4.1 Συνδυασμός των παραπάνω τεχνολογιών.....	10
2.4 Τεχνολογία NG-PON2	11
2.4.1 Δίκτυα TDM-PON υψηλής ταχύτητας	11
2.4.2 Το Παθητικό δίκτυο WDM-PON	12
2.4.3 Το παθητικό δίκτυο OCDM-PON	17
2.4.4 Το Οπτικό δίκτυο OFDM-PON.....	19
2.4.5 Το δίκτυο UNI-PON.....	21
2.4.6 Το δίκτυο PDM-PON	21
3. Το πρότυπο παθητικό δίκτυο APON	22
3.1. Ιστορική αναδρομή ανάπτυξης του προτύπου APON	23
3.2. Μέθοδοι πρόσβασης σε κοινόχρηστα μέσα.....	24
3.3. Πρωτόκολλο επικοινωνίας στο APON.....	25
3.4. Δυναμική κατανομή εύρους ζώνης.....	26
3.5 Το παθητικό δίκτυο SuperPON	27
4. Το Πρότυπο παθητικό δίκτυο BPON	28

4.1. Ιστορική αναδρομή προτύπου BPON.....	28
4.2. Αρχιτεκτονική προτύπου BPON-Λειτουργικά χαρακτηριστικά	29
4.3 Σύγχρονες Μελέτες σχετιζόμενες με την τεχνολογία BPON.....	30
4.4. Εφαρμογή προτύπων BPON, EPON	32
5 Τρέχουσες μελέτες και τάσεις των παθητικών Οπτικών δικτύων.....	34
6. Εφαρμογή στην πόλη της Άρτας	38
6.1 Εισαγωγή.....	38
6.2 Αποτύπωση σε χάρτη (GIS)	38
6.3 Ενεργός Εξοπλισμός.....	41
6.4 Υποδομές	42
6.4.1. Καμπίνες PON.....	43
6.4.2. Καμπίνες NGA.....	44
6.4.3. Splitter Καμπινών.....	45
6.4.4. Χωματουργικά.....	45
6.5 Μετρήσεις	46
6.5.1. Όργανα	46
6. Συμπεράσματα	47
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	48

1. Εισαγωγή

Με την πάροδο των χρόνων η τεχνολογία εξελίσσεται. Όμοια και στις τηλεπικοινωνίες οι ανάγκες των ανθρώπων δημιούργησαν την ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες. Έτσι στην εποχή που ζούμε παράλληλα με το καλώδια χαλκού που αφορούσαν το μέσο μετάδοσης του σήματος και κατ' επέκταση τον τρόπο επικοινωνίας των ανθρώπων. Με την πρόοδο στα συστήματα επικοινωνίας, δημιουργήθηκε ανάγκη για μεγάλο εύρος ζώνης για την αποστολή περισσότερων δεδομένων με υψηλότερη ταχύτητα. Οι οικιακοί συνδρομητές απαιτούν δίκτυο υψηλής ταχύτητας για υπηρεσίες φωνής και πολυμέσα. Ομοίως, οι εταιρικοί συνδρομητές απαιτούν ευρυζωνική υποδομή ώστε να μπορούν να επεκτείνουν τα τοπικά τους δίκτυα και να ενσωματώσουν ραχοκοκαλιά του διαδικτύου. Αυτό απαιτεί δίκτυα υψηλότερης χωρητικότητας με χαμηλότερο κόστος. Η τρέχουσα «εποχή της τεχνολογίας» είναι το αποτέλεσμα πολλών λαμπρών ανακαλύψεων, αλλά είναι η ικανότητά να μεταδίδουμε πληροφορίες και τα μέσα που χρησιμοποιούνται για να το κάνουμε αυτό είναι ίσως το πιο υπεύθυνο για την εξέλιξή της. Προχωρώντας από το χάλκινο σύρμα ενός αιώνα πριν στο σημερινό καλώδιο οπτικών ινών, η αυξανόμενη ικανότητά μας να μεταδίδουμε περισσότερες πληροφορίες, πιο γρήγορα και σε μεγαλύτερες αποστάσεις έχει διευρύνει τα όρια της τεχνολογικής μας ανάπτυξης σε όλους τους τομείς (Żotkiewicz, 2018). Η τεχνολογία οπτικής επικοινωνίας δίνει τη λύση για μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Με την ανάπτυξη των οπτικών δικτύων, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα μετάδοσης, υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης bit και μεγαλύτερη απόσταση μετάδοσης. Το PON χρησιμοποιεί μια αποκλειστική οπτική ίνα, για να παρέχει ουσιαστικά απεριόριστο εύρος ζώνης, χωρίς τη χρήση ενεργού στοιχείου εντός του δικτύου. Προσφέρει μια πραγματική υπηρεσία τριπλής αναπαραγωγής φωνής, βίντεο και δεδομένων σε ένα δίκτυο.

Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο (PON) είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου οπτικών ινών διανομής από ένα σημείο σε πολλά σημεία, στην οποία χρησιμοποιούνται οπτικοί διαχωριστές (splitter) χωρίς τροφοδοσία για να επιτρέψουν σε μία μόνο οπτική ίνα να εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολλαπλούς χώρους. Η τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών δεν σταματά ποτέ να εξελίσσεται. Όπως φαίνεται από την εξέλιξη των προτύπων από το APON στο BPON και εν συνεχεία στο GPON και από το EPON στο GEPON, η βιομηχανία αναζητά τρόπους για να προσφέρει ακόμη περισσότερο εύρος ζώνης σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις. Δύο τρόποι για να γίνει αυτό είναι: 1) αυξάνοντας τον αριθμό των οπτικών μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται στην οπτική ίνα PON και 2) αυξάνοντας το εύρος ζώνης και την απόδοση

του εύρους ζώνης κάθε μήκους κύματος. Μια διαμόρφωση PON μειώνει την ποσότητα των οπτικών ινών και του κεντρικού εξοπλισμού γραφείου που απαιτείται σε σύγκριση με τις αρχιτεκτονικές από σημείο σε σημείο. Όλα τα συστήματα PON έχουν ουσιαστικά την ίδια θεωρητική χωρητικότητα σε οπτικό επίπεδο. Τα όρια στην ανάντη και στην κατάντη μεταφορά δεδομένων αλλά και το συνολικό εύρος ζώνης ορίζονται κυρίως από το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την κατανομή της χωρητικότητας και τη διαχείριση της σύνδεσης.

1.1. Τύποι οπτικών δικτύων

Στη συνέχεια δίνονται οι διαθέσιμοι τύποι οπτικών δικτύων.

Οπτική ίνα στο σπίτι (FTTH)

Το δίκτυο πρόσβασης, γνωστό και ως «δίκτυο του πρώτου μιλίου», συνδέει τα κεντρικά γραφεία του παρόχου υπηρεσιών (CO) με επιχειρήσεις και οικιακούς συνδρομητές. Αυτό το δίκτυο αναφέρεται επίσης στη βιβλιογραφία ως δίκτυο πρόσβασης συνδρομητών ή τοπικός βρόχος. Η ζήτηση για μια νέα γενιά υπηρεσιών που απαιτούν εύρος ζώνης και η παράδοση τριπλής αναπαραγωγής στους πελάτες (φωνή, δεδομένα και βίντεο) πυροδότησε έντονο ανταγωνισμό μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών παγκόσμια. Αυτές οι εξελίξεις παρακίνησαν τους παρόχους υπηρεσιών σε όλο τον κόσμο να επενδύσουν στο FTTx (Fiber To The x). Το FTTx είναι ένα ακρωνύμιο που περιλαμβάνει μια σειρά από τεχνολογίες οπτικής πρόσβασης, όπως Fiber To The Node (FTTN), Fiber To The Cabinet (FTTC), Fiber To The Business—or Building—(FTTB), Fiber To The Home (FTTH) και Fiber To The Premises (FTTP) (Wong, 2014). Υπάρχουν κυρίως δύο αρχιτεκτονικές FTTH που παρουσιάζουν τρέχον ενδιαφέρον, τα Ενεργά Οπτικά Δίκτυα (AON) και τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (PON).

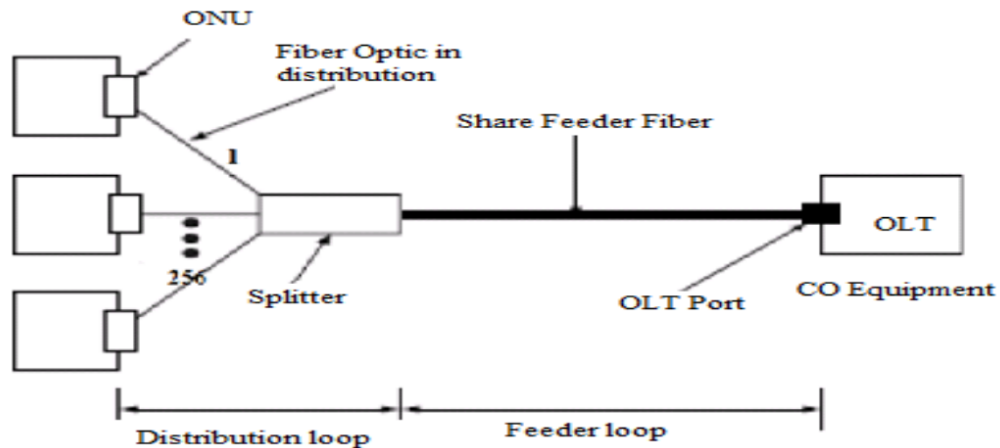
Ενεργά Οπτικά Δίκτυα (AON- Active Optical Network)

Ένα ενεργό οπτικό σύστημα χρησιμοποιεί εξοπλισμό μεταγωγής με ηλεκτρική ενέργεια, όπως δρομολογητή ή μεταγωγείς, για τη διαχείριση της διανομής ενός κεντρικού σήματος και των επιμέρους σημάτων σε συγκεκριμένους πελάτες. Αυτό το switch λειτουργεί και κλείνει με διάφορους τρόπους για να κατευθύνει τα εισερχόμενα και εξερχόμενα σήματα στη κάθε φορά σωστή θέση. Σε ένα τέτοιο σύστημα, ένας πελάτης μπορεί να έχει μια αποκλειστική οπτική ίνα που 'τρέχει' στο σπίτι του (Abrams et al., 2005).

Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (PON-Passive Optical Network)

Το παθητικό οπτικό δίκτυο (PON) είναι ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών που χρησιμοποιεί οπτική ίνα από ένα σημείο σε πολλαπλά σημεία. Στις εγκαταστάσεις αυτές χρησιμοποιούνται οπτικοί διαχωριστές (splitters) χωρίς τροφοδοσία για να επιτρέψουν σε μία μόνο οπτική ίνα να εξυπηρετεί πολλαπλές εγκαταστάσεις διαχωρίζοντας το σήμα προς κάθε χρήστη. Αυτό το δίκτυο ονομάζεται παθητικό επειδή στο κεντρικό γραφείο και στους συνδρομητές δεν χρησιμοποιείται στοιχείο ισχύος. επομένως μειώνεται το κόστος του δικτύου και της εγκατάστασής του. Ένα PON μειώνει την ποσότητα των οπτικών ινών και του κεντρικού εξοπλισμού γραφείου που απαιτείται, σε σύγκριση με αρχιτεκτονικές από σημείο σε σημείο. Το PON είναι μια μορφή δικτύου πρόσβασης με χρήση οπτικών ινών. Προσφέρει μια πραγματική υπηρεσία τριπλής αναπαραγωγής φωνής, βίντεο και δεδομένων σε ένα δίκτυο.

Η αρχιτεκτονική των PON αποτελείται από τρία κύρια στοιχεία δικτύου όπως το Optical Line Terminal (OLT), το Passive Optical Splitter και το Optical Network Unit (ONU). Το τερματικό οπτικής γραμμής (OLT) που βρίσκεται στο κεντρικό γραφείο (CO) διαμορφώνει το κύμα φωτός και το μεταδίδει μέσω οπτικών ινών στις μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) που εξυπηρετούν τον τελικό χρήστη. Έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ουσιαστικά απεριόριστο εύρος ζώνης στον συνδρομητή. Την αρχιτεκτονική αυτή μπορούμε να την ορίσουμε ως βασική τοπολογία PON (από σημείο σε πολλαπλά σημεία), καθώς χρησιμοποιεί μια ενιαία οπτική ίνα για να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες συνήθως μεταξύ 32 και 128. Ένα PON είναι μια ενιαία, κοινόχρηστη οπτική ίνα (κοινόχρηστη οπτική ίνα τροφοδοσίας) που χρησιμοποιεί έναν παθητικό οπτικό διαχωριστή (splitter) για να διαιρέσει το σήμα προς μεμονωμένους συνδρομητές όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική PON(Wen-Piao Lin, 1997).

Υπάρχουν πολλά πρότυπα PON όπως το APON, το BPON, το EPON ή το GPON, ανάλογα i) με την απόσταση μεταξύ OLT και ONU και ii) τους ρυθμούς δεδομένων στην κατάντη και ανάντη μετάδοση. Στη συνέχεια αναπτύσσουμε με συντομία τις τέσσερις (4) πιο πάνω αρχιτεκτονικές:

- **APON** (ATM PON): Πρόκειται για ασύγχρονη λειτουργία μεταφοράς PON. Αυτά τα δίκτυα αναφέρονται ως APON (ATM Passive Optical Network) και είναι τυποποιημένα σύμφωνα με το πρότυπο ITU-T G.983.1 με βάση τη μετάδοση cells δικτύου ATM. Ήταν το πρώτο δίκτυο που ορίστηκε από το FSAN (Full Service Access Network). Το APON προσφέρει μέγιστο ρυθμό 155Mbps από κοινού μεταξύ του πλήθους ONUs που είναι συνδεδεμένα στο PON. Το αρχικό του πρόβλημα ήταν ο περιορισμός των 155Mbps, ο οποίος αργότερα αυξήθηκε στα 622Mbps. Το ATM PON συνδέει έως και 32 συνδρομητές στο PON.
- **BPON** (Broadband Passive Optical Network): Δηλαδή Ευρυζωνικό παθητικό οπτικό δίκτυο. Το BPON είναι ένα πρότυπο ITU-T G.983.x. Προήλθε ως εξέλιξη του APON, και έχει τον ίδιο περιορισμό ταχύτητας. Τα δίκτυα BPON βασίζονται επίσης στη μετάδοση cells του ATM δικτύου, αλλά διαφέρουν από το APON καθώς υποστηρίζουν άλλα ευρυζωνικά πρότυπα. Τα δίκτυα BPON ορίστηκαν για πρώτη φορά με σταθερό ρυθμό μετάδοσης 155Mbps τόσο για ανερχόμενη όσο και για κατερχόμενη ζεύξη. Αλλά αργότερα τροποποιήθηκαν για να εισαγάγουν ασύμμετρα κανάλια:

Downlink: 622Mbps

Uplink: 155Mbps

Για μία (1) οπτική ίνα ανά ONU και κοινή χρήση αυτής για ανάντη και κατάντη. Καθιερώθηκε να χρησιμοποιείται:

Για το Καθοδικό κανάλι: $\lambda=1480-1500\text{nm}$

Για το Ανοδικό κανάλι: $\lambda=1260-1360\text{nm}$

Και στην ειδική περίπτωση μεταφοράς Βίντεο: $\lambda=1550-1560\text{nm}$

Για δύο (2) ίνες για κάθε ONU, μία για ανάντη και μία για κατάντη. Καθιερώθηκε να χρησιμοποιείται:

Για το Καθοδικό κανάλι: $\lambda=1260-1360\text{nm}$

Για το Ανοδικό κανάλι: $\lambda=1260-1360\text{nm}$

Και στην ειδική περίπτωση μεταφοράς Βίντεο: $\lambda=1550-1560\text{nm}$.

- EPON (Ethernet Passive Optical Network): Το EPON είναι το πρότυπο IEEE 802.3 και είναι μια κατηγορία δικτύων που βασίζεται στην τεχνική Ethernet. Ένα EPON συνδυάζει τον χαμηλού κόστους εξοπλισμό Ethernet και την υποδομή οπτικών ινών και μπορεί να χρειάζεται και να μεταδίδει απευθείας πλαίσια δεδομένων Ethernet. Μπορεί να παρέχει χωρητικότητα 1Gbps τόσο στην ανάντη όσο και στην κατάντη κατεύθυνση. Αυτές οι δυνατότητες επιτρέπουν στα δίκτυα EPON να μεταδίδουν κίνηση δεδομένων, φωνής και βίντεο. Η τεχνολογία EPON χρησιμοποιεί επίσης το παράθυρο των 1310nm για την ανοδική ροή και το παράθυρο των 1490nm για την κατάντη μετάδοση. Αυτό το πρότυπο επιτρέπει τη μετάδοση σε κατάντη και ανοδική ροή κάτω από μόνο μία (1) οπτική ίνα μονής λειτουργίας με μέγιστη εμβέλεια 10km μεταξύ διαχωριστή (splitter) και ONU και υπάρχει πρόβλεψη για επέκταση της απόστασης στα 20km. Το πρότυπο EPON καθορίζει ένα αποκλειστικό μήκος κύματος για τη μετάδοση βίντεο από το OLT στο ONU. Συγκεκριμένα, τα μήκη κύματος είναι:
Καθοδικό κανάλι: $\lambda=1480-1500\text{nm}$
Ανοδικό κανάλι: $\lambda=1260-1360\text{nm}$ και
Ειδική περίπτωση μεταφοράς Βίντεο: $\lambda=1550-1560\text{nm}$
- GPON (Gigabit PON): Το πιο προηγμένο πρότυπο που εξακολουθεί να λειτουργεί είναι η εξέλιξη του BPON. Για να ανταποκριθεί στην ταχέως αυξανόμενη ζήτηση και να εργαστεί καλύτερα με τις αλλαγές στις τεχνολογίες επικοινωνίας, η ITU-T δημιούργησε τη σειρά

προτύπων ITU-T G.984.x για PON χωρητικότητας Gigabit, τα οποία αποτελούν τη βάση του προτύπου GPON (Gigabit PON). Διάφοροι ρυθμοί μετάδοσης επιτρέπονται από το GPON στην περιοχή από 622Mbps έως 2.488Gbps στο κανάλι κατάντη. Όπως και το BPON, αυτό το πρότυπο επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων τόσο συμμετρική όσο και ασύμμετρη όπου οι ρυθμοί μετάδοσης για κάθε ένα είναι:

Συμμετρική μετάδοση: ρυθμοί ροής μεταξύ 622Mbps και 2.488Gbps προσφέρονται τόσο για το κατάντη όσο και για το ανοδικό κανάλι. Ασύμμετρη μετάδοση: Δηλαδή, διαφορετικοί ρυθμοί ροής για κατάντη και ανάντη κανάλι, συγκεκριμένα:

Καθοδικό κανάλι: έως 2.488Gbps.

Ανοδικό κανάλι: έως 1.244Gbps.

Τα μήκη κύματος της εργασίας που ορίζει το πρότυπο GPON ποικίλλουν ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται 1 ή 2 οπτικές ίνες για κάθε ONT (Optical Network Terminal), αν και για τα δύο ορίζει ένα αποκλειστικό μήκος κύματος για μετάδοση βίντεο από το OLT στο ONT, το οποίο είναι διαφορετικό από αυτά που χρησιμοποιούνται στη μετάδοση φωνής και δεδομένων.

Για μια (1) οπτική ίνα ανά ONT, κοινόχρηστη για μετάδοση και λήψη:

Καθοδικό κανάλι: $\lambda=1480-1500\text{nm}$

Ανοδικό κανάλι: $\lambda=1260-1360\text{nm}$ και

Σε περίπτωση μεταφοράς Βίντεο: $\lambda=1550\text{nm}$

Για δύο (2) οπτικές ίνες για κάθε ONT, μία για μετάδοση και άλλη μία για λήψη:

Καθοδικό κανάλι: $\lambda=1260-1360\text{nm}$

Ανοδικό κανάλι: $\lambda=1260-1360\text{nm}$ και

Σε περίπτωση μεταφοράς Βίντεο: $\lambda=1550\text{nm}$.

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Παθητικών Οπτικών δικτύων.

- Το παθητικό οπτικό τοπικό δίκτυο είναι μια νέα δοκιμασμένη λύση δικτύου πρόσβασης.
- Το παθητικό οπτικό τοπικό δίκτυο είναι ένας καλός τρόπος για τη δομή ενός LAN, επειδή:
 - Ίσοπεδώνει το Τοπικό Δίκτυο.
 - Απλοποιεί τις μετακινήσεις, τις προσθήκες και τις αλλαγές δικτύου.
 - Δεν περιορίζεται από τους περιορισμούς απόστασης και εύρους ζώνης των δικτύων συνεστραμμένου ζεύγους.
 - Είναι ασφαλές από τη σχεδιάσή του, με βάση την οπτική ίνα και την ενσωματωμένη

κρυπτογράφηση.

- Μπορεί να εξαλείψει τις ‘ντουλάπες’ καλωδίωσης.
- Εξαλείφει την ανάγκη για υποδομή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, για ισχύ και ψύξη
- Αντίθετα, χρησιμοποιεί μικρότερα, ελαφρύτερα, φθηνότερα καλώδια.
- Ουσιαστικά εξαλείφει την ανάγκη ανανέωσης των υποδομών καλωδίωσης.
- Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, μόνο τα ενεργά τελικά σημεία χρειάζονται ανανέωση και όχι η καλωδίωση η οποία υπάρχει.

Ένα PON επιτρέπει μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των κεντρικών γραφείων και των χώρων πελατών. Ενώ αντίθετα με την χρήση της παλαιότερης τεχνολογίας Digital Subscriber Line (DSL), η μέγιστη απόσταση μεταξύ του κεντρικού γραφείου και του πελάτη είναι περίπου 5,5km. Ένας τοπικός βρόχος PON μπορεί να λειτουργήσει σε αποστάσεις άνω των 20km. Τέλος, είναι αξιοσημείωτο ότι το υψηλό εύρος ζώνης που επιτρέπεται από συστήματα που βασίζονται σε αρχιτεκτονικές PON να μπορούν να φτάσουν τον ρυθμό των 10Gbps μέχρι τον χρήστη. Η ανάγκη αύξησης του εύρους ζώνης και της ταχύτητας είναι στις μέρες μας απλώς μια ακόμη δικαιολογία για τη χρήση των PONs. Αυτή είναι μια ουσιαστική υποστήριξη για υπηρεσίες όπως το HD Video και Demand Services.

Ωστόσο, παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που έχει το PON για να διαθέτει εγγενή διαμόρφωση, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα που σχετίζονται με αυτό. Ωστόσο, αυτά δεν είναι αρκετά σημαντικά ώστε να αποφευχθεί η επιλογή του PON ως η καλύτερη δυνατή δικτυακή επιλογή. Ένα από τα πρώτα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι αυτό που προκαλείται από τη διανομή πληροφοριών από το OLT στα διαφορετικά ONT. Το γεγονός ότι ένας διαιρέτης διανέμει πληροφορίες από το OLT σε όλα τα ONT που είναι συνδεδεμένα στο ίδιο δέντρο διανομής, προκαλεί κάποια μείωση της απόδοσης του δικτύου.

Η συνολική χωρητικότητα διαιρείται σε πολλά ONT τα οποία είναι συνδεδεμένα με τον διαχωριστή, έτσι ώστε η απόδοση του καναλιού να είναι χαμηλότερη από ό,τι σε μια ζεύξη από σημείο σε πολλαπλά σημεία. Επιπλέον, επειδή το PON έχει μια προκαθορισμένη ταχύτητα, αναγκάζεται να λειτουργεί με αυτήν την ταχύτητα, αλλά παρέχει διαφορετικές ταχύτητες στην εξυπηρέτηση πελατών. Για παράδειγμα, ένα ONT που παρέχει 100Mbps στον πελάτη απαιτείται για να λειτουργεί με υψηλότερους ρυθμούς ταχύτητας, δηλ.: 1,25Gbps ή 2,5Gbps. Επιπλέον, το γεγονός ότι όλες οι πληροφορίες ρέουν μέσω του ίδιου φυσικού καναλιού αυξάνει την πιθανότητα sniffing στο δίκτυο και συνεπώς, απώλεια

ασφάλειας. Αυτό συνεπάγεται την αναγκαστική δημιουργία υψηλού επιπέδου κρυπτογράφησης.

Όσον αφορά την ασφάλεια, η αρχιτεκτονική PON είναι ευαίσθητη σε εξωτερικές δολιοφθορές. Αυτό το πρόβλημα προκύπτει από τη φύση του ίδιου του μέσου μετάδοσης. Η έγχυση σταθερού φωτός με ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος καλύπτει όλες τις επικοινωνίες και τις υπηρεσίες που τείνουν να πέφτουν. Μια άλλη σημαντική πτυχή είναι το γεγονός ότι ένα δέντρο διανομής εξαρτάται αποκλειστικά από ένα μόνο OLT. Ένα σφάλμα στην κεφαλίδα OLT συνεπάγεται υψηλό αντίκτυπο στο δίκτυο, αφού επηρεάζονται όλα τα ONTs και τα διαχωριστικά(splitters) που είναι συνδεδεμένα σε αυτό. Ωστόσο, η εγκατάσταση λίγων OLT προϋποθέτει μια αρκετά σημαντική μείωση του κόστους ανάπτυξης του δικτύου.

2. Δίκτυα EPON και GPON

Αν και το EPON (Ethernet Passive Optical Network) και το GPON (Gigabit Passive Optical Network) παρέχουν τις ίδιες υπηρεσίες στους πελάτες, υπάρχουν ορισμένες διαφορές στα επίπεδα φυσικής σύνδεσης και μετάδοσης των δεδομένων, που οδηγούν σε ορισμένες παραλλαγές στα χαρακτηριστικά του κάθε προτύπου (Keiji Tanaka, 2010). Οι Εικόνες 2 και 3 δείχνουν τη δομή του EPON και του GPON αντίστοιχα. Οι διαφορές στα επίπεδα φυσικής σύνδεσης και μετάδοσης δεδομένων συζητούνται σε αυτήν την ενότητα και συνοψίζονται στον Πίνακα 1 (J.J. Vegas Olmos; J. Sugawa; H. Ikeda; K. Sakamoto, 2011).

Πίνακας 1: Σύγκριση EPON και GPON (J.J. Vegas Olmos; J. Sugawa; H. Ikeda; K. Sakamoto, 2011).

Χαρακτηριστικά	EPON	GPON
Πρότυπο	IEEE	ITU-T
Ταχύτητα μετάδοσης	DS: 1,2Gbps US: 1,2Gbps	DS: 1,2/2,4Gbps US: 1,5/6,2/1,2/2,4Gbps
Αναλογία Splitter	1:16	1:64
Κωδικοποίηση	8B/10B	NRZ
Πρωτόκολλο	Ethernet	ATM
Ασφάλεια	Επισφαλής	AES
QoS	Δεν υποστηρίζεται	Υποστηρίζεται
FEC	RS (255, 239)	RS (255, 239)

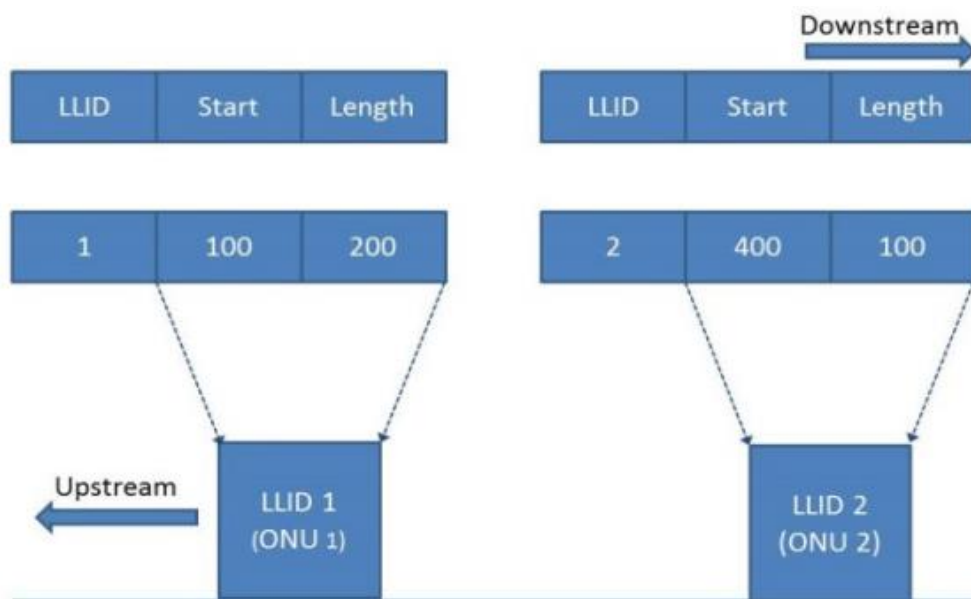
2.1 Φυσική υλοποίηση

Οι παραλλαγές μεταξύ των δύο προτύπων στο φυσικό επίπεδο περιλαμβάνουν: το ρυθμό (bit/sec), το μήκος κύματος και την αναλογία του διαχωριστή(splitter). Όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης (bit/sec), το αναπτυγμένο EPON προσφέρει ρυθμό μετάδοσης 1,2Gbps τόσο για μεταδόσεις κατάντη (download), όσο και για ανάντη (upload). Ωστόσο, ως αποτέλεσμα της κωδικοποίησης γραμμής 8B/10B, ο πραγματικός διαθέσιμος ρυθμός είναι 1Gbps (Skubic et al., 2009). Αντίθετα, το GPON υποστηρίζει διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης κατάντη και ανοδικής ροής δεδομένων. Για καθοδική μετάδοση, το GPON χρησιμοποιεί ρυθμούς 1,2Gbps ή 2,4Gbps, ενώ για ανάντη μετάδοση προσφέρει 1,5Gbps, 6,2Gbps, 1,2Gbps ή 2,4Gbps. Τυπικά το GPON λειτουργεί χρησιμοποιώντας 1,2Gbps για

μετάδοση ανάντη και 2,4Gbps για μετάδοση κατάντη (Selmanovic & Skaljo, 2010). Τα δίκτυα EPON και GPON ορίζουν τις ίδιες ζώνες μήκους κύματος για την κατάντη μετάδοση που είναι 1480 - 1500nm και αμφότερα παρέχουν μια ξεχωριστή ζώνη μήκους κύματος για ένα σήμα βίντεο που είναι 1550nm. Για τις ανοδικές ζώνες μήκους κύματος, το EPON χρησιμοποιεί μια ζώνη μήκους κύματος 1260 - 1360nm και το GPON χρησιμοποιεί μια ζώνη μήκους κύματος 1290 - 1330nm (v. Eržen and B. Batagelj, n.d.). Η αναλογία διαχωρισμού (splitter) που υποστηρίζεται από το EPON είναι 16 χρήστες, ενώ το GPON υποστηρίζει υψηλότερη αναλογία διαρροής έως και 64 χρήστες.

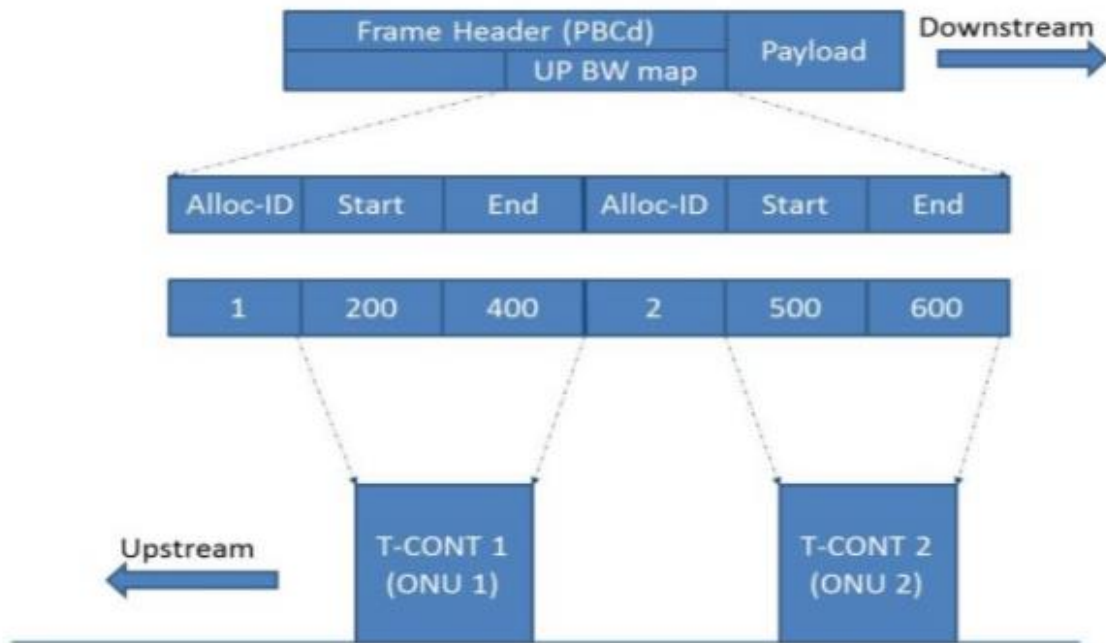
2.2 Μετάδοση και σύνδεση δεδομένων

Η Εικόνα 2 παρουσιάζει τη δομή πλαισίου EPON που χρησιμοποιεί το εγγενές πλαίσιο Ethernet για τη μετάδοση κίνησης. Το επόμενο επίπεδο MAC έχει την ίδια λειτουργία με ένα τυπικό Gigabit Ethernet MAC (GbE MAC), όπου η κίνηση μεταδίδεται σε όλους τους χρήστες. Στο κατάντη πλαίσιο, το πεδίο προοιμίου περιέχει ένα λογικό αναγνωριστικό συνδέσμου (LLID) το οποίο είναι ένα μοναδικό αναγνωριστικό που εκχωρείται από το OLT σε κάθε ONU. Τα ONU αναγνωρίζουν τη ληφθείσα κίνηση αντιστοιχίζοντας το LLID του ληφθέντος πλαισίου με το δικό του LLID και εάν υπάρχει αντιστοίχιση τότε θα αποδεχτεί το ληφθέν πλαίσιο, διαφορετικά απορρίπτεται.



Εικόνα 2: Δομή EPON (Abbas & Gregory, 2016).

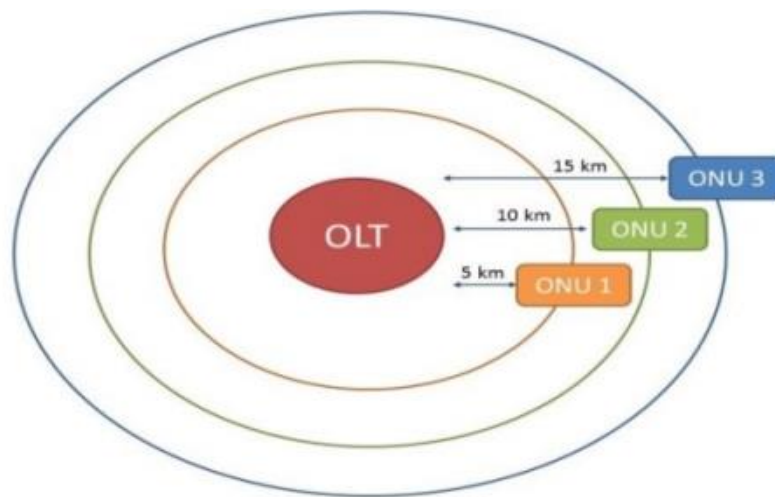
Για ανοδική μετάδοση, το επίπεδο MAC έχει τροποποιηθεί από το IEEE ώστε να λειτουργεί χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση TDMA, όπου το OLT εκχωρεί μια συγκεκριμένη χρονική θυρίδα σε κάθε ONU λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση μεταξύ κάθε ONU και OLT (Chen guangjun, 2012).



Εικόνα 3: Δομή GPON (Abbas & Gregory, 2016).

Η Εικόνα 3 δείχνει τη δομή πλαισίου του GPON. Το κατάντη επίπεδο MAC λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως ένα SONET με πλαίσιο GFP. Υποστηρίζει ένα πλαίσιο μήκους 125μs που χρησιμοποιεί TDM για να διαιρέσει το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταξύ των χρηστών, ενώ το επίπεδο MAC upstream βασίζεται στο TDMA. Το GPON υποστηρίζει δύο επίπεδα ενθυλάκωσης όπου το πλαίσιο Ethernet είναι ενθυλακωμένο σε ένα πλαίσιο της μεθόδου ενθυλάκωσης GPON (GEM) το οποίο ενθυλακώνεται ξανά σε ένα πλαίσιο σύγκλισης μετάδοσης GPON (GTC). Το πλαίσιο GTC περιλαμβάνει επίσης cells του ATM δικτύου και κίνηση TDM.

Το **κατάντη πλαίσιο** μεταδίδεται σε κάθε ONU και οι ONU χρησιμοποιούν τις πληροφορίες στο πεδίο του Φυσικού Ελέγχου για πεδίο κατάντη μετάδοσης (PCBd) για εξαγωγή των δικών του δεδομένων. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση, το κατάντη πλαίσιο θα μεταδίδεται συνεχώς και θα χρησιμοποιείται για συγχρονισμό χρόνου (Ricciardi et al., 2012).



Εικόνα 4: Συσκευές ONUs σε διαφορετική απόσταση από το OLT (Abbas & Gregory, 2016).

Το **ανάντη πλαίσιο** περιέχει πολλαπλές ριπές μετάδοσης που φτάνουν από τις ONU. Μαζί με το ωφέλιμο φορτίο, κάθε ένα από τα ανάντη καρέ ριπής αποτελείται από το Physical Layer Overhead (PLOu), ένα διάστημα κατανομής εύρους ζώνης που περιέχει την αναφορά δυναμικού εύρους ζώνης ανάντη (DBRu) και αναγνωριστικά κατανομής (Alloc-IDs). Όταν η κυκλοφορία φτάσει στο OLT, η κυκλοφορία ONU βρίσκεται σε ουρά με βάση τις Κατηγορίες Υπηρεσιών (CoS) με ποικίλο QoS που εξαρτάται από τον τύπο των πλαισίων κυκλοφορίας που καθορίζεται στο Alloc-ID. Το GPON εισάγει πέντε τύπους πλαισίων που παρέχουν QoS στην ανάντη κατεύθυνση. Τα πλαίσια αυτά χρησιμοποιούνται στο GPON για τη δημιουργία εικονικής σύνδεσης μεταξύ ONU και OLT καθώς και για τη διαχείριση της μετάδοσης μικρών πακέτων (Segarra et al., 2013). Οι 5 τύποι των πλαισίων αυτών είναι:

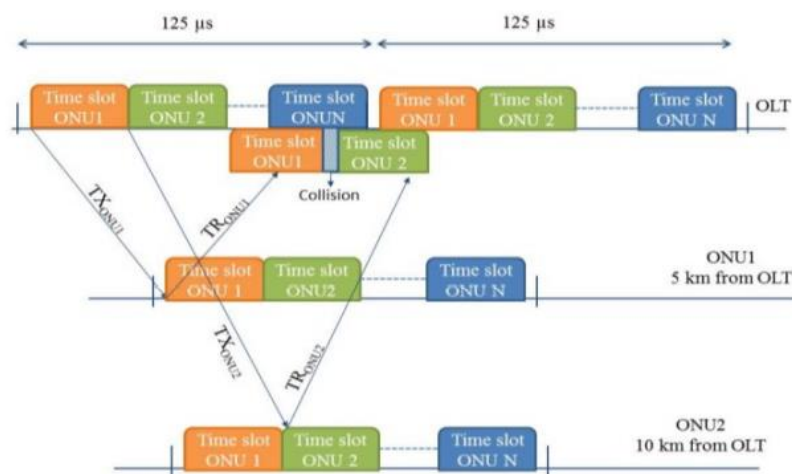
- 1) Ο τύπος 1 που υποστηρίζει το σταθερό εύρος ζώνης που είναι ευαίσθητο στο χρόνο. Το jitter του πλαισίου αυτού είναι 0 το οποίο ενισχύει την καταλληλότητα που έχει για την κυκλοφορία δεδομένων σταθερού ρυθμού (CBR).
- 2) Ο τύπος 2 υποστηρίζει το 'εξασφαλισμένο' εύρος ζώνης το οποίο όμως έχει μεγαλύτερη καθυστέρηση από ότι στην περίπτωση του T-CONT Type-1. Καθορίζεται με ένα 'εργαλείο' με το οποίο ορίζεται δεσμευμένο όριο κίνησης, το λεγόμενο CIR.
- 3) Ο τύπος 3 υποστηρίζει τα εξασφαλισμένα αλλά μη εγγυημένα εύρη ζώνης παρέχοντας όμως εγγυημένο ελάχιστο όριο (CIR) και διεκπεραιώνει και πλεονάζον Ποσοστό

Υπερβολικών Πληροφοριών (EIR). Αυτός ο τύπος είναι κατάλληλος για κίνηση μεταβλητού ρυθμού δεδομένων (VBR) που όμως δεν εγγυάται καθυστέρηση.

4) Ο τύπος 4 υποστηρίζει υπηρεσίες Best-Effort, όπως είναι πχ. η περιήγηση στο Internet, το SMTP Service και το FTP Service.

5) Τύπος 5. Αυτός ο τύπος είναι μείγμα όλων των παραπάνω τύπων. Είναι κατάλληλος για γενικές ροές κυκλοφορίας πληροφοριών (Messerli & Grossman, 2002).

Οι συσκευές ONU βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από το OLT όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.

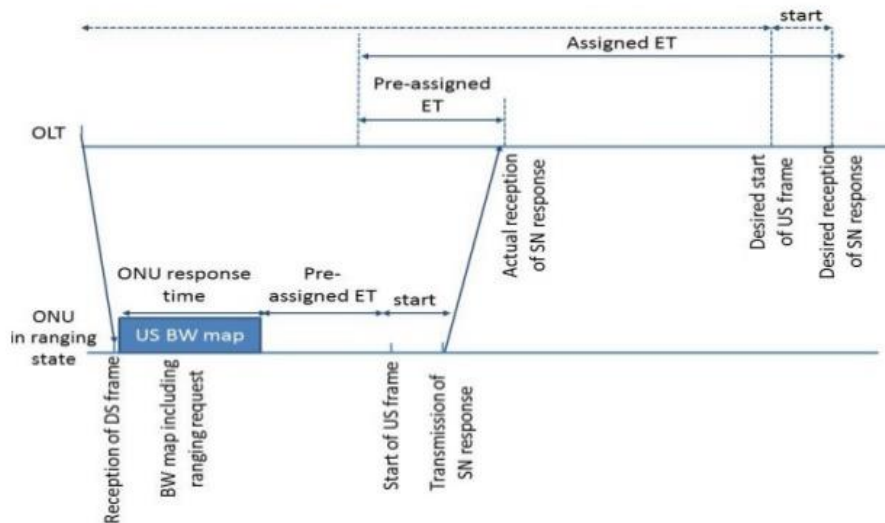


Εικόνα 5: Ανοδική κυκλοφορία. Σύγκρουση πλαισίων ONUs (Messerli & Grossman, 2002).

Όταν κάθε ONU μεταδίδει την ανάντη κυκλοφορία του κατά τη διάρκεια μιας καθορισμένης χρονικής θυρίδας, υπάρχει η πιθανότητα σύγκρουσης πλαισίων προερχόμενα από διαφορετικά ONUs σε κάποιο σημείο λόγω της διαφοράς στην καθυστέρηση διάδοσης. Αυτό το σενάριο απεικονίζεται στην Εικόνα 6.

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι μεταδόσεις ανάντη δε συγκρούονται, εκτελείται μια διαδικασία εμβέλειας από το OLT κατά την ενεργοποίηση και την καταχώριση των διαφόρων ONUs με τα οποία συνεργάζονται. Η διαδικασία εμβέλειας βασίζεται στον υπολογισμό ενός συγκεκριμένου χρόνου καθυστέρησης για κάθε ONU ανάλογα με την απόστασή του από το OLT για να εξισωθεί η καθυστέρηση μετάδοσής του με άλλα ONUs. Αυτή η καθυστέρηση ονομάζεται Καθυστέρηση Ισοστάθμισης (ED). Κάθε ONU θα αποθηκεύει και θα εφαρμόζει την δική του καθυστέρηση ισοστάθμισης σε όλες τις

μεταδόσεις ανάντη. Οι τιμές ED μεταδίδονται σε άλλα ONUs χρησιμοποιώντας μηνύματα Physical Layer Operations and Maintenance (PLOAM) και κάθε ONU συνεχίζει τη μετάδοσή του με βάση το ED.



Εικόνα 6: Κατάσταση 'εμβέλειας' (Messerli & Grossman, 2002).

Η Εικόνα 6 δείχνει μια συσκευή ONU σε κατάσταση 'εμβέλειας'. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ ένα ONU είναι ενεργό και στέλνει κίνηση, οι μεταδόσεις από άλλα ONU πρέπει να ανασταλούν (BOSTERN K, 2018). Επιπλέον, το πρωτόκολλο ελέγχου πολλαπλών σημείων (MPCP) έχει εισαχθεί για τη διευκόλυνση της διαδικασίας δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης. Αυτό εκτελείται στο επίπεδο MAC. Για το δίκτυο EPON, το MPCP μπορεί να εκτελεστεί σε έναν από τους δύο τρόπους λειτουργίας του. Πρώτον, στην κανονική λειτουργία, όπου χρησιμοποιεί τα δύο μηνύματα ελέγχου για τον έλεγχο της κατανομής του εύρους ζώνης, τα οποία είναι τα μηνύματα GATE και REPORT.

Στην **κατάντη κατεύθυνση**, τα μηνύματα GATE ταξιδεύουν από το OLT στα ONUs και μεταφέρουν τις εκχωρημένες πληροφορίες εύρους ζώνης.

Στην **ανοδική κατεύθυνση**, τα μηνύματα REPORT που περιέχουν πληροφορίες αιτήματος εύρους ζώνης αποστέλλονται από τις μονάδες ONU στο OLT.

Ένας συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατανομής της του εύρους ζώνης για καθένα από τα ONU.

Η δεύτερη λειτουργία είναι η αυτόματη ανακάλυψη. Αυτή βασίζεται σε τρία μηνύματα ελέγχου που είναι τα: REGISTER, REGISTER_REQUEST και REGISTER_ACK. Αυτά τα μηνύματα χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη και την εγγραφή ενός νέου ONU. Επιπλέον, αναφέρει πληροφορίες σχετικά με το ONU, συμπεριλαμβανομένων της διεύθυνσης MAC και των καθυστερήσεων μετ' επιστροφής (RTTs) (Chocliouros, 2010). Στο σενάριο GPON, τα μηνύματα εκχώρησης εύρους ζώνης αποστέλλονται με βάση το πλαίσιο T-CONT. Όπως στο δίκτυο EPON, το πρωτόκολλο MPCP υλοποιείται για να διευκολύνει τη δυναμική κατανομή εύρους ζώνης στο GPON. Δύο κύριες προσεγγίσεις που υποστηρίζονται στο GPON για να συμπεράνουμε την κατάληψη της κατάστασης buffer κάθε πλαίσιο T-CONT που είναι η Δυναμική κατανομή εύρους ζώνης αναφοράς κατάστασης και η DBA παρακολούθησης κυκλοφορίας. Στην περίπτωση του DBA αναφοράς κατάστασης, κάθε ONU στέλνει απευθείας πληροφορίες αναφοράς κατάστασης στο OLT. Ενώ, στο DBA παρακολούθησης κυκλοφορίας, το συμπέρασμα της κατάστασης προσωρινής αποθήκευσης του πλαισίου T-CONT στο OLT εξαρτάται από τις ιστορικές πληροφορίες της χρήσης εύρους ζώνης και την ποσότητα του καθορισμένου εύρους ζώνης.

2.3 Τα Παθητικά δίκτυα της 1^{ης} επόμενης γενεάς (NG-PON1)

Το παθητικό δίκτυο NG-PON1 έχει εισαχθεί για να επιτυγχάνει ρυθμό μετάδοσης έως και 10Gbps. Τα πιθανά σενάρια για την αναβάθμιση του συζητούνται σε αυτήν την ενότητα.

Πίνακας 2: Σύγκριση 1G-EPON και XG-EPON (S. Gorshe and J. Mandin, 2009).

Χαρακτηριστικό	1G-EPON	XG-EPON
Ρυθμός μετάδοσης	Συμμετρικό 1Gbps	Συμμετρικό 10Gbps Ασύμμετρο 10/1Gbps
Μήκος κύματος (nm)	US: 1260 – 1360 DS: 1480 - 1500	US: 1260 – 1280 DS: 1575 - 1580
Γραμμή κώδικα	8B/10B	64B/66B
FEC	SR (255, 239)	Υποχρεωτικό RS (255, 223)

2.3.1 Μετάβαση από το δίκτυο EPON στο δίκτυο XG-EPON

Το παθητικό δίκτυο XG-EPON κληρονομεί πολλές δυνατότητες από το προηγούμενα αναπτυγμένο παθητικό δίκτυο EPON. Ωστόσο, χρειάστηκαν ορισμένες τροποποιήσεις στο φυσικό επίπεδο. Αυτές οι τροποποιήσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 2 (S. Gorshe and J.

Mandin, 2009).

Όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης, το XG-EPON υποστηρίζει δύο λειτουργίες φυσικού επιπέδου. Η πρώτη είναι συμμετρική μετάδοση με 10Gbps. Ο δεύτερος τρόπος είναι η ασύμμετρη μετάδοση με 10Gbps για την κατάντη μετάδοση και 1Gbps για την ανάντη μετάδοση (S. Gorshe and J. Mandin, 2009). Το XG-EPON χρησιμοποιεί τη ζώνη μήκους κύματος 1260 - 1280nm για κυκλοφορία ανάντη και τη ζώνη μήκους κύματος 1575 - 1580nm για κυκλοφορία κατάντη. Η κωδικοποίηση γραμμής που εφαρμόζεται στο XG-EPON είναι 64B/66B, η οποία είναι μια βελτιωμένη έκδοση του 8B/10B. Έτσι, μειώνει την επιβάρυνση bit-to baud από 20% σε 3%. Επιπλέον, το FEC ήταν προαιρετικό στο αναπτυγμένο EPON, αλλά έχει καταστεί υποχρεωτική προϋπόθεση για το XG-EPON με τη χρήση του RS (255, 223). Οι υποστηριζόμενες αναλογίες διαχωρισμού XG-EPON είναι 1:16 με απόσταση τουλάχιστον 10km και αναλογία διαχωρισμού 1:32 με απόσταση τουλάχιστον 20km (Keiji Tanaka, 2010). Η τεχνική TDM που χρησιμοποιείται στο EPON επιτρέπει στο αναπτυγμένο EPON και το XG-EPON να συνυπάρχουν. Ωστόσο, απαιτείται ένα OLT πολλαπλών ρυθμών για την παροχή προενίσχυσης με τη χρήση οπτικών ενισχυτών τύπου ημιαγωγών (SOA).

2.3.2 Μετάβαση από το δίκτυο GPON στο δίκτυο XG-GPON

Το νεότερο δίκτυο XG-GPON έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το αναπτυγμένο GPON με ορισμένες παραλλαγές στο φυσικό επίπεδο οι οποίες οδηγούν σε σημαντικές βελτιώσεις στην τελική απόδοση. Οι παρεμβάσεις αυτές περιλαμβάνουν την αναλογία διαχωρισμού (splitter), τον προϋπολογισμό ισχύος και την προσβασιμότητα (Πίνακας 3). Η πλαισίωση και η διαδικασία διαχείρισης του Data Link επιπέδου δεν έχουν αλλάξει, γεγονός που οδηγεί στην μειωμένη πολυπλοκότητα της μετάβασης στα νέα standards. Το δίκτυο XG-GPON χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία που ονομάζεται XG-GPON1 παρέχει ασύμμετρη μετάδοση με 10Gbps downstream και 2,5Gbps upstream.

Πίνακας 3: Σύγκριση GPON και XG-GPON (S. Gorshe and J. Mandin, 2009).

Χαρακτηριστικό	GPON	XG-GPON
Ρυθμός μετάδοσης	2,4/1,2Gbps	1: Ασύμμετρο 10/2,5Gbps 2: Συμμετρικό 10Gbps
Μήκος κύματος (nm)	US: 1290 – 1330 DS: 1480 - 1500	US: 1260 – 1280 DS: 1575 - 1580

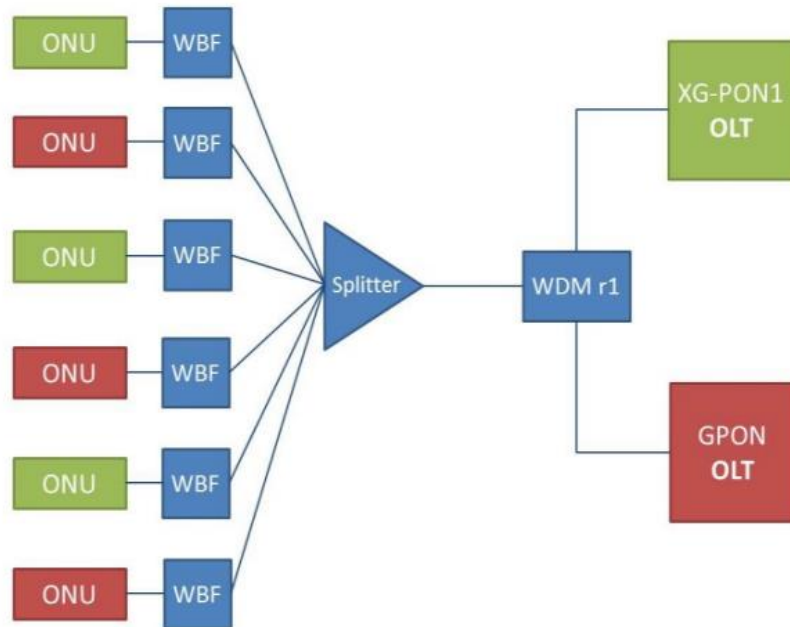
FEC	SR (255, 239)	RS (255, 223)
-----	---------------	---------------

Η δεύτερη κατηγορία είναι το XG-GPON2 που παρέχει συμμετρική μετάδοση 10Gbps (L. Leng, n.d.). Λεπτομέρειες σχετικά με το φυσικό επίπεδο XG-GPON1 έχουν περιγραφεί στο ITU-T G.987.2. Ενώ, το πρότυπο φυσικού επιπέδου XG-GPON2 δεν έχει ακόμη οριστικοποιηθεί.

1) Το παθητικό δίκτυο XG-GPON1

Σύμφωνα με τη σύσταση G.987.1 για το XG-GPON1 δίκτυο, έχουν προταθεί δύο σενάρια για να ενεργοποιηθεί η μεταφορά από το GPON στο νεότερο XG-GPON1. Το πρώτο σενάριο είναι μια μετανάστευση η οποία συνίσταται στην αντικατάσταση της χάλκινης σύνδεσης με μια οπτική σύνδεση. Η άλλη επιλογή είναι το σενάριο μετανάστευσης, το οποίο είναι μια αναβάθμιση του υπάρχοντος συστήματος GPON και συγκεκριμένα την αντικατάσταση ή την αναβάθμιση ορισμένων από τα στοιχεία του δικτύου, όπως μονάδες ONU ή μονάδες OLT, εάν είναι απαραίτητο (Horváth et al., 2015). Η κατάντη ζώνη μήκους κύματος που επιλέχθηκε για το XG-GPON1 είναι μεταξύ 1575 και 1580nm και η ζώνη μήκους κύματος ανάντη είναι μεταξύ 1260 και 1280nm. Οι ζώνες μήκους κύματος επιλέχθηκαν για να μεγεθύνουν τη ζώνη προστασίας μεταξύ των εν χρήση μηκών κύματος, γεγονός που μειώνει τις παρεμβολές σήματος.

Η συνύπαρξη του XG-GPON1 με το αναπτυγμένο GPON είναι ένα σημαντικό κριτήριο όταν εξετάζεται η αναβάθμιση. Παρόλο που αυτή η προσέγγιση μειώνει το συνολικό κόστος, υπάρχει ένα πρόσθετο κόστος που σχετίζεται με το φιλτράρισμα μήκους κύματος που απαιτείται στα ONU. Η Εικόνα 7 δείχνει το σενάριο συνύπαρξης, όπου στο κεντρικό γραφείο (CO) υπάρχουν δύο OLTs, το ένα για να υλοποιεί τη σύνδεση GPON και το άλλο για τη σύνδεση XG-GPON1. Επιπλέον, βλέπουν τον νέο εξοπλισμό με το όνομα WDMr1 που είναι εγκατεστημένος στο κεντρικό γραφείο (CO). Η πολυπλεξία/αποπολυπλεξία του σήματος τόσο των OLT όσο και των RF είναι η λειτουργικότητά του. Από την πλευρά του χρήστη, απαιτείται ένα φίλτρο αποκλεισμού μήκους κύματος (WBF) προκειμένου να διαφοροποιηθεί η κίνηση δεδομένων PON (Dias et al., 2022).



Εικόνα 7: Συνύπαρξη GPON και XG-PON1 (Abbas & Gregory, 2016).

2.4 Τα Παθητικά δίκτυα της 2ης επόμενης γενεάς (XG-GPON2)

Ο κύριος στόχος του XG-GPON2 είναι να προσφέρει συμμετρική μετάδοση αυξάνοντας την ανάντη μετάδοση έως και 10Gbps. Η προσδοκία συνύπαρξης των δικτύων GPON και XG-GPON1/XG-GPON2 παρουσιάζεται ορισμένα μειονεκτήματα. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί διαφορετικούς δέκτες στο OLT προκειμένου να ληφθούν τα ανοδικά δεδομένα με διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης. Επιπλέον, δεν είναι βέβαιο ότι η διαδικασία κατακερματισμού θα υποστηρίζεται, όταν στην ανάντη μετάδοσης χρησιμοποιείται υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης.

2.4.1 Συνδυασμός των παραπάνω τεχνολογιών

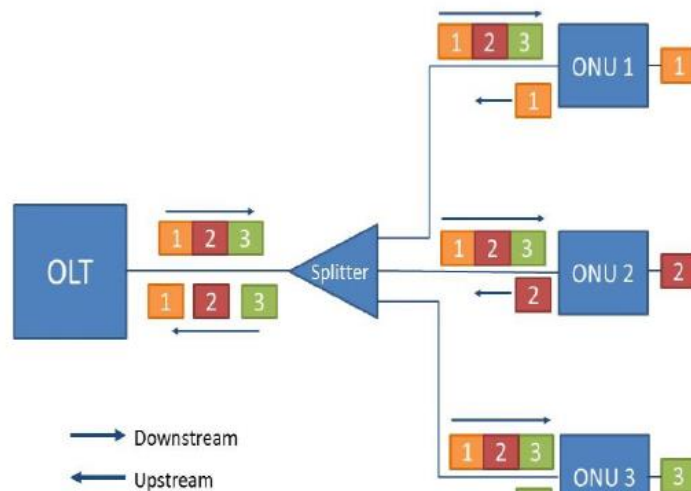
Το μικτό σενάριο είναι μια άλλη πιθανή αναβάθμιση σε NG-PON1. Σε αυτή την πλατφόρμα, το GPON και το XG-EPON συνυπάρχουν μεταξύ τους και λειτουργούν στην ίδια υποδομή. Ωστόσο, αυτό το σενάριο απαιτεί κατάλληλο διαχωρισμό ζώνης μήκους κύματος με τη βοήθεια ενός φίλτρου WDM στο OLT προκειμένου να εξαλειφθούν οι παρεμβολές (Wang et al., 2003).

2.4 Τεχνολογία NG-PON2

Έχουν διεξαχθεί μελέτες για αρκετές τεχνολογίες NG-PON2 οι οποίες προσφέρουν έως και 100Gbps. Αυτό περιλαμβάνει δίκτυα υψηλής ταχύτητας TDM-PON, WDM-PON, OCDM-PON, OFDM-PON καθώς και υβριδικές τεχνολογίες.

2.4.1 Δίκτυα TDM-PON υψηλής ταχύτητας

Το δίκτυο TDM-PON επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας ένα μόνο μήκος κύματος. Μια τυπική δομή TDM-PON φαίνεται στην Εικόνα 8. Η downstream κίνηση μεταδίδεται σε όλους τους χρήστες και παραχωρείται συγκεκριμένος χρόνος από το OLT σε κάθε ONU για τον έλεγχο των μεταδόσεων ανάντη.



Εικόνα 8: Αρχιτεκτονική TDM (Abbas & Gregory, 2016).

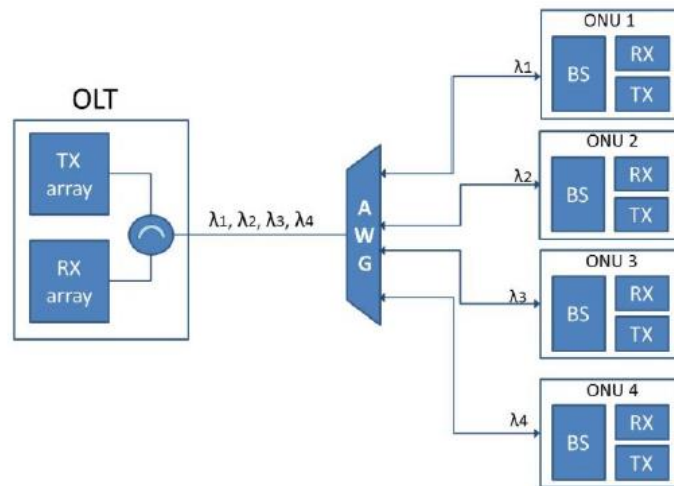
Ωστόσο, το δίκτυο TDM-PON είναι μια απλή και οικονομικά αποδοτική τεχνολογία. έχει περιορισμένη επεκτασιμότητα λόγω του γεγονότος ότι τα ONU μοιράζονται το εύρος ζώνης. Η αύξηση του ρυθμού bit για όλους τους χρήστες θα είναι μια πρόκληση, επειδή κάθε δέκτης ONU λειτουργεί κατά κανόνα με ρυθμό μετάδοσης που είναι υψηλότερος από τον ρυθμό μετάδοσης που έχει εκχωρηθεί ανά ONU. Η χρήση ενός επεξεργαστή ψηφιακού σήματος υψηλής ταχύτητας και μιας συστοιχίας πύλης προγραμματιζόμενης στο πεδίο για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης σε υψηλότερο από 10Gbps αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα (Sotiropoulos et al., 2013a; Yoshima et al., 2012).

Επιπλέον, το δίκτυο TDM-PON δεν είναι πολύ ασφαλές λόγω της κοινής υποδομής και ανοίγει την πιθανότητα υποκλοπής και άλλων επιθέσεων. Επιπλέον, η διακύμανση της απόστασης μεταξύ ONU και OLT είναι ένα άλλο μειονέκτημα διότι αυτό προκαλεί διακύμανση στην οπτική ισχύ και κατά συνέπεια, ο δέκτης OLT λειτουργεί σε λειτουργία ‘ριπής’ (Yoshima et al., 2012). Προκειμένου να αναβαθμιστεί το τρέχον TDM-PON ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της τεχνολογίας NG-PON2, έχουν διερευνηθεί ένας αριθμός προσεγγίσεων για την αύξηση της χωρητικότητας του TDM-PON, όπως:

- Συμβατικά συστήματα ON OFF Key (OOK): Η εφαρμογή του OOK είναι ο ευκολότερος τρόπος για να αυξήσετε τη χωρητικότητα του δικτύου TDM-PON. Ωστόσο, αυτή η λύση δεν είναι ευνοϊκή για μελλοντικά PON επειδή απαιτεί δέκτη ‘ριπής’ λειτουργίας 40Gbps, ηλεκτρονικά και φωτονικά υψηλού κόστους (πχ. 40GHz) καθώς και δέκτες υψηλής ευαισθησίας (Sotiropoulos et al., 2013b).
- Με δυαδική διαμόρφωση: αυτό το σχήμα είναι παρόμοιο με το αναπτυγμένο σύστημα PON που χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος για κατάντη και ένα άλλο για ανάντη μετάδοση πληροφοριών. Παρέχει για κατάντη μετάδοση στα ONU εύρος ζώνης της τάξεως των 20GHz και έτσι μειώνει τη διακοπή.
- Με ξεχωριστή μετάδοση και παρεμβολές bit: Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί δύο μήκη κύματος, ένα για το κατέβασμα πληροφοριών που υποστηρίζει ρυθμό της τάξεως 40Gbps και ένα άλλο μήκος κύματος για μετάδοση ανεβάσματος πληροφοριών που υποστηρίζει ρυθμό 10Gbps. Η παρεμβολή bit εισάγεται στο πλαίσιο κατάντη όπου σε κάθε ONU εκχωρείται εκ των προτέρων μια μετατόπιση και ένα διάστημα. Αυτή η τεχνική απαιτεί ο δέκτης ONU να λειτουργεί με ρυθμό μικρότερο από 40Gbps. Γενικώς, απλοποιεί τη διαδικασία μετάδοσης, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και περιορίζει το ηλεκτρονικό κύκλωμα του δέκτη (ONU).
- Σειριακό 40G NRZ- 40G και σειριακό non-Return-To-Zero (NRZ): είναι μια άλλη προσέγγιση που έχει διερευνηθεί προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του παλαιού τύπου TDM-PON. Ωστόσο, έχει έναν περιορισμό απόστασης μετάδοσης λόγω της χρωματικής διασποράς που παρουσιάζεται και της σχετικής απαίτησης οπτικής ισχύος στον δέκτη (D. Liu et al., 2012).

2.4.2 Το Παθητικό δίκτυο WDM-PON

Το παθητικό δίκτυο WDM-PON έχει θεωρηθεί ως εναλλακτική τεχνολογία του TDM-PON. Μια τυπική δομή WDM-PON φαίνεται στην Εικόνα 9. Παρέχει μια εικονική σύνδεση σημείου προς σημείο μεταξύ του OLT και πολλών ONUs. όπου, σε κάθε ONU εκχωρείται διαφορετικό μήκος κύματος για μετάδοση.



Εικόνα 9: Δομή WDM-PON (Abbas & Gregory, 2016).

Η κύρια διαφορά μεταξύ της υλοποίησης του WDM-PON και του TDM-PON είναι ότι το WDM-PON χρησιμοποιεί μια συσκευή WDM στο ODN, όπως συστοιχία κυματοδηγών (AWG) αντί για διαχωριστή ισχύος. Αυτό οδηγεί σε δραματική μείωση της απώλειας ισχύος και κατά συνέπεια υποστηρίζει μεγάλο αριθμό ONUs. Αυτός ο τύπος WDM ονομάζεται δρομολόγηση μήκους κύματος. Κάθε θύρα του AWG εκχωρείται σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Κάθε πομπός στο ONU εκπέμπει ένα σήμα στο μήκος κύματος που καθορίζεται για συγκεκριμένη θύρα. Αυτή η αρχιτεκτονική προσφέρει μικρότερη απώλεια εισαγωγής και απλή δομή δέκτη ONU. Ωστόσο, το OLT απαιτείται για την εγκατάσταση ενός τυπικού δέκτη και μιας συσκευής αποπολυπλεξίας μήκους κύματος.

Η ανάντη μετάδοση σε μια πίσω δομή του βρόχου WDM επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ή δύο συνδέσμων οπτικών ινών. Στην περίπτωση μιας απλής ζεύξης ίνας, η αμφίδρομη μετάδοση του φωτός και του διαμορφωμένου σήματος οδηγεί σε θόρυβο Rayleigh Backscattering (RB). Αυτό το ζήτημα επηρεάζει την απόδοση των μεταδόσεων κατάντη και ανάντη και κατά συνέπεια υποβαθμίζει την απόσταση μετάδοσης και την ευαισθησία του δέκτη (Feng et al., 2014). Υπάρχουν πολλά σχήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον μετριασμό του θορύβου RB, για παράδειγμα:

- Με χρήση διαμόρφωσης φάσης. Σε πολλές περιπτώσεις ο θόρυβος RB μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας τη διαμόρφωση μετατόπισης μήκους κύματος (WS-ASK). Επιπλέον, ο ρόλος της διαμόρφωσης φάσης χωρίς επιστροφή στο μηδέν δηλ. διαμόρφωση PM-NRZ έχει εξεταστεί για τη μείωση του θορύβου BR, και έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με τη χρήση ενός οπτικού φίλτρου.
- Με χρήση διπλού παράλληλου διαμορφωτή Mach-Zehnder (DP-MZM).
- Με μίξη τεσσάρων κυμάτων (FWM).

Ένα βασικό πλεονέκτημα του WDM-PON είναι ότι επιτρέπει σε κάθε ONU να εκπέμπει στη μέγιστη ταχύτητα, καθώς το εύρος ζώνης OLT δεν είναι κοινόχρηστο. Έτσι, είναι σε θέση να υποστηρίζει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων [36]. Ένας άλλος τύπος WDM-PON βασίζεται σε διαχωριστή και είναι γνωστός ως διακόπτης μήκους κύματος WDM-PON στον οποίο ο διαχωριστής ισχύος υλοποιείται για τη διανομή των εισερχόμενων σημάτων εξίσου σε όλα τα ONU. Ωστόσο, κάθε ONU απαιτείται να είναι εξοπλισμένο με ένα φίλτρο μήκους κύματος για την επιλογή συγκεκριμένου μήκους κύματος. Αν και το PON μεταγωγής μήκους κύματος θεωρεί απλή και κατανεμημένη δομή, η απώλεια σήματος του είναι υψηλότερη από το δρομολογημένο PON μήκους κύματος (Banerjee et al., 2005). Το WDM-PON ταξινομείται σε δύο κατηγορίες με βάση τον αριθμό των υποστηριζόμενων μηκών κύματος και την απόσταση μεταξύ των επιμέρους μηκών κύματος που μεταδίδονται σε μία μόνο οπτική ίνα.

Η πρώτη κατηγορία είναι η **Dense WDM (DWDM)** και το σχέδιο μήκους κύματος της ορίζεται από το ITU-T G.694.1 και

η δεύτερη κατηγορία είναι το **Coarse WDM (CWDM)** και το σχέδιο μήκους κύματος ορίζεται από το ITU-T G.694.2.

Ο κύριος στόχος του DWDM είναι να *αυξήσει τη χωρητικότητα* του δικτύου ελαχιστοποιώντας την απόσταση μήκους κύματος. Το CWDM στοχεύει στη *μείωση του κόστους* όπου η απόσταση μήκους κύματος είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτρέπει στους πομπούς να ελέγχονται με μεγαλύτερη ακρίβεια (Muciaccia et al., 2014b). Στη συνέχεια δίνονται κάποιες αντιπροσωπευτικές μελέτες:

1) **WDM-PON**: Σε ένα ODN που βασίζεται σε διαχωριστή μήκους κύματος, μια πηγή φωτός χωρίζεται φασματικά και κατανέμεται σε ανακλαστικά ONU. Αυτή η προσέγγιση είναι

ώριμη και διαθέσιμη στο εμπόριο. Ωστόσο, τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα απαιτούν ο διαχωριστής (splitter) μήκους κύματος να λειτουργεί πάνω από το διαχωριστή ισχύος, γεγονός που επιβάλλει τη μεγαλύτερη πρόκληση όσον αφορά τον προϋπολογισμό σύνδεσης. Επιπλέον, η δυνατότητα επίτευξης ρυθμού δεδομένων άνω του 1Gbps δεν είναι σαφής, καθώς υπερβαίνει τις δυνατότητες του τρέχοντος συστήματος (Sotiropoulos et al., 2013c).

2) **WDM-PON με επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος:** Αυτή η προσέγγιση εκχωρεί ένα μήκος κύματος σε κάθε χρήστη για μετάδοση κατάντη και ανάντη. Η επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος ενεργοποιείται από τον πομπό που βασίζεται σε ενισχυτή ημιαγωγών. Αυτός ο ενισχυτής διαμορφώνει το σήμα καθοδικής ροής σε μορφή αντίστροφης επιστροφής στο μηδέν και το σήμα ανάντη σε μορφή επιστροφής στο μηδέν.

3) **Συντονισμό WDM-PON:** Αυτή η προσέγγιση βασίζεται σε μια μονάδα πομπού με δυνατότητα συντονισμού χαμηλού κόστους αντί για τη συμβατική μονάδα. Η μείωση του κόστους επιτυγχάνεται με την αφαίρεση των θερμοηλεκτρικών ψυκτών. Ο συντονισμός στο ανάντη πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το κοινόχρηστο κλειδί κυμάτων που βασίζεται σε OLT. Ωστόσο, απαιτούνται συντονισμένοι δέκτες σε κάθε ONU για την εκτέλεση 'άχρωμης' λειτουργίας (Nesbet, 2015).

4) **Εξαιρετικά πυκνό συνεκτικό WDM-PON:** Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στη συνεκτική ανίχνευση όπου τα κανάλια βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση (περίπου $\Delta f=3\text{GHz}$). Ο ρυθμός δεδομένων 1Gbps εκχωρείται σε κάθε χρήστη, ο οποίος χρησιμοποιεί αποκλειστικά ένα διαμορφωμένο μήκος κύματος τετραγωνικής μετατόπισης φάσης (QPSK). Ωστόσο, οι πομποί και οι δέκτες είναι πολύ περίπλοκα συστήματα και ακριβά. Έτσι, περισσότερες βελτιώσεις στη φωτονική ολοκλήρωση είναι απαραίτητες για χρήση στην πρακτική εφαρμογή.

5) **Self-seeded WDM-PON:** Σε αυτό το σχήμα, το αρχικό φως του ONU δημιουργείται μόνο του από έναν ανακλαστήρα στην κοινή θύρα του διαχωριστή μήκους κύματος. Ωστόσο, το μήκος της οπτικής ίνας καθόδου (η ίνα μεταξύ του διαχωριστή (splitter) και του ONU) είναι περιορισμένο (Keiji Tanaka, 2010).

Έχουν προταθεί διάφορα σχήματα που επιτρέπουν τη μετάβαση από το TDM-PON στο WDM-PON. Η τεχνολογία Hybrid TDM/WDM PON ή SUCCESS-HPON (The Stanford University ACCESS) παρέχει μια οικονομικά αποδοτική και ομαλή διαδρομή μετάβασης από το δίκτυο TDM στο WDM. Το SUCCESS-HPON βασίζεται σε ειδικά laser στα ONUs

στοιχεία συντονισμού της τεχνολογίας WDM στο OLT. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνει εύρος ζώνης ισοδύναμο με το καθαρό εύρος ζώνης WDM-PON με πιο χαμηλότερο κόστος (Sahu, 2020).

Επίσης, έχει προταθεί ένα άλλο σύστημα μετανάστευσης. Σε αυτό το σχήμα, η τεχνική διαμόρφωσης με μετατόπιση φάσης (DPSK) χρησιμοποιείται για το κατάντη σήμα. Η διαμόρφωση με μετατόπισης πλάτους και με μετατόπιση μήκους κύματος (WS-ASK) χρησιμοποιείται για το ανάντη σήμα. Στο ONU, εφαρμόζεται ένα οπτικό φίλτρο για την επιλογή του προβλεπόμενου μήκους κύματος κατάντη και για την αποδιαμόρφωση του σήματος κατάντη. Το ανάντη σήμα παράγεται με αποδιαμόρφωση σήματος και βασίζεται στην επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος κατάντη. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος, εκτός από την ομαλή μετάβαση, είναι ότι δεν απαιτεί αλλαγές στην υπάρχουσα υποδομή οπτικών ινών.

Μια αρχιτεκτονική πολλαπλών PONs που βασίζεται σε μια αραιή συστοιχεία κυματοδηγών AWG στο OLT έχει εισαχθεί για να επιτρέψει την ομαλή διαδρομή μετάβασης από το TDM-PON στο WDM-PON (Shachaf et al., 2007). Η συστοιχία κυματοδηγού AWG έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει πολλά TDM-PON και WDM-PON χρησιμοποιώντας ρυθμιζόμενο λέιζερ στο OLT. Επιπλέον, ο διαχωριστής στην πλευρά διανομής αντικαθίσταται από μια μονάδα πολυπλεξίας που λειτουργεί για να δικαιολογήσει παράλληλες διεργασίες TDM-PON και WDM-PON. Αυτό παρέχει το απαιτούμενο εύρος ζώνης στα διάφορα ONUs. Στην πλευρά του ONU, τα RSOAs απαιτούνται για την υλοποίηση άχρωμων πομποδεκτών, και ως εκ τούτου, δεν απαιτείται αλλαγή από την πλευρά των πελατών.

Το χαρακτηριστικό του ‘πολλαπλού’ μήκους κύματος στο WDM-PON προσφέρει πολλά μοναδικά χαρακτηριστικά. Πρώτον, κάθε χρήστης μπορεί να αναβαθμίσει τη χωρητικότητά του χωρίς να χρειάζεται μια νέα οπτική ίνα. Επιπλέον, η αναβάθμιση δε θα επηρεάσει άλλους χρήστες. Δεύτερον, βελτιώνεται η ασφάλεια και εξαλείφεται το ενδεχόμενο ζήτημα υποκλοπής (Zhang et al., 2015).

Παρά αυτά τα χαρακτηριστικά, ορισμένοι περιορισμοί καθιστούν το WDM-PON ακατάλληλη τεχνολογία για το NG-PON2. Με τον περιορισμό του αριθμού των μηκών κύματος που επιτρέπονται στο σύστημα και με την απαίτηση μεγάλου εύρους ζώνης, οδηγεί σε αναποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης (Hernandez et al., 2012). Επιπλέον, το

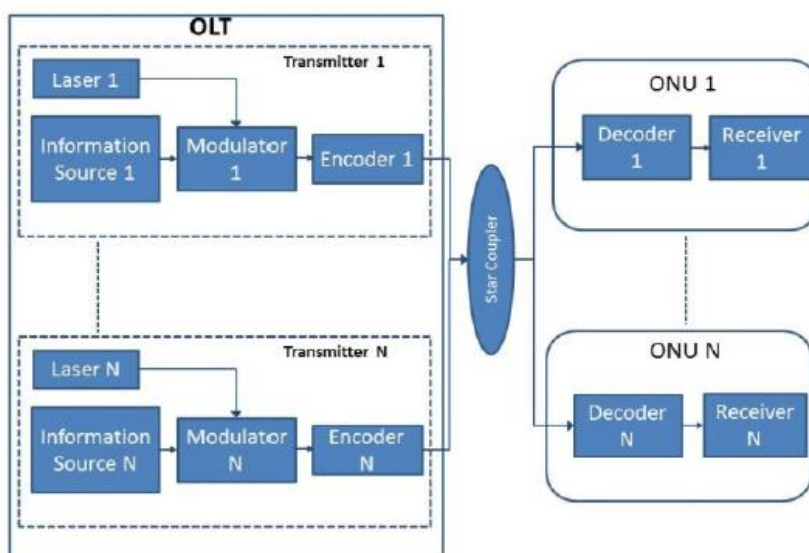
αυξημένο κόστος είναι ένα σημαντικό ζήτημα στο WDM-PON. Το κόστος αυξάνεται λόγω της ανάγκης για επιπλέον εξοπλισμό, όπως 'έγχρωμα' ONUs και ανάγκη πομποδέκτη για κάθε μήκος κύματος στο OLT (Zhang et al., 2015).

2.4.3 Το παθητικό δίκτυο OCDM-PON

Η εισαγωγή της τεχνολογίας OCDM-PON (Orthogonal Chirp Multiplexing -PON) οδηγεί σε σημαντικές βελτιώσεις στην τεχνολογία NG-PON2. Στα πλεονεκτήματα περιλαμβάνονται η εξαιρετικά αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης, η καλή απόδοση συσχέτισης, η ασύγχρονη μετάδοση, η ευελιξία της κατανομής των χρηστών, η χαμηλή καθυστέρηση επεξεργασίας σήματος καθώς και η βελτίωση της ασφάλειας του δικτύου (Satoshi Yoshima, 2013).

Το δίκτυο OCDM μπορεί να τδιακριθεί ί σε δύο κύριες κατηγορίες: Το 'συνεκτικό' σύστημα και το 'ασυνεπές' σύστημα. Στο 'συνεκτικό' σύστημα, το δίκτυο OCDM υλοποιείται μέσω μιας διπολικής προσέγγισης η οποία απαιτεί πληροφορίες σχετικά με τη φάση των φορέων. Από την άλλη πλευρά, το 'ασυνεπές' σύστημα εφαρμόζεται μέσω μιας μονοπολικής προσέγγισης. Λόγω της απλότητας του υλικού καθώς και της μη εξάρτησής του από την ανίχνευση συγχρονισμού φάσεων, το 'ασυνεπές' σύστημα έχει αναδειχθεί ως το προτιμώμενο σχήμα ανίχνευσης. Η Εικόνα 10 δείχνει τη βασική δομή του δικτύου OCDM, το οποίο έχει τέσσερα κύρια στοιχεία τα οποία περιλαμβάνουν: τον πομπό, τον κωδικοποιητή, τον αποκωδικοποιητή και το δέκτη.

Στον πομπό, μια πηγή πληροφοριών παρέχει ένα bit δεδομένων ανά laser σε κάθε T δευτερόλεπτο. Στη συνέχεια, ο κωδικοποιητής πολλαπλασιάζει το bit δεδομένων «όταν ισούται με 1» με μια κωδική λέξη. Η κωδική λέξη μπορεί να σχηματιστεί με μονοδιάστατη κωδικοποίηση χρησιμοποιώντας το πεδίο χρόνου ή μήκους κύματος ή από ένα διδιάστατο σχήμα κωδικοποίησης, το οποίο είναι ένας συνδυασμός και των δύο τομέων. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει πλεονεκτήματα των τρισδιάστατων μεγεθών (K. W. Shum, 2015). Οι παλμοί που δημιουργούνται αναφέρονται ως chirp και έχουν διάρκεια $T_c = T/n$, όπου το T δίνει τη διάρκεια κάθε bit και το n το μήκος του κώδικα.



Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική δικτυακής τεχνολογίας OCDM (Abbas & Gregory, 2016).

Το πολύ-πεπλεγμένο σήμα μεταδίδεται σε όλους τους χρήστες. Το σήμα φτάνει στον δέκτη και εν συνεχεία περνά μέσα από τον αποκωδικοποιητή. Ο αποκωδικοποιητής ‘ταιριάζει’ με βάση τον κωδικό και δέχεται μόνο το σήμα που αφορά τον συγκεκριμένο χρήστη. Στη συνέχεια, η έξοδος του αποκωδικοποιητή περνά από φωτοανίχνευση και ενσωμάτωση. Στη συνέχεια, γίνεται δειγματοληψία της ισχύος εξόδου για κάθε διάστημα bit και συγκρίνεται με την τιμή κατωφλίου για να παρέχεται μια εκτίμηση του μεταδιδόμενου bit. Η απόδοση του δικτύου OCDM εξαρτάται από την απόδοση των κωδικών διευθύνσεων που έχουν σχεδιαστεί ώστε να είναι ορθογώνιοι προκειμένου να μειωθούν οι παρεμβολές πολλαπλής πρόσβασης. Η απόδοση της δομής του δέκτη που πρέπει να λειτουργεί με επιτυχία σε περιβάλλον που περιλαμβάνει διάφορες πηγές θορύβου (K. S. Sri and T. Sundararajan, 2013). Έχουν διερευνηθεί διάφοροι τύποι κωδικών και οι κωδικοί και οι αντίστοιχες συσκευές κωδικοποίησης φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Διαφορετικοί τύποι OCDM κώδικα (Yin H and R. D, 2007).

	Όνομα κωδικοποίησης	Διπολικό Μονοπολικό	Εγγενές Μη-εγγενές	Κώδικες
Κώδικας	Πλάτος παλμού	Μονοπολικό	Μη-εγγενές	OOC/PC

1D				QCC/HCC
	Παλμική φάση	Διπολικό	Εγγενές	-M - αλληλουχία -Κώδικας Gold -Κώδικες Walsh-Hadamard
	Φασματικό πλάτος	Μονοπολικό	Μη-εγγενές	
	Φασματική φάση	Διπολικό	Εγγενές	
Κώδικας 2D	Διάδοση χρόνου μήκους κύματος	Μονοπολικό	Μη-εγγενές	2-D WH/TS OOC
	Κωδικοποίηση χώρου	Μονοπολικό	Μη-εγγενές	2-D Χωρικοί κώδικες
Κώδικας 3D	3D κωδικοποίηση	Μονοπολικό	Μη-εγγενές	Χώρος/χρόνος/μήκος κύματος Κωδικοί πόλωσης/χρόνου/μήκους κύματος

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται μια σύγκριση διαφορετικών δομών δέκτη τεχνολογίας OCDM.

Πίνακας 5: Σύγκριση των υπαρχόντων δομών δέκτη (Zahedi & Salehi, 2000).

Δομή δέκτη	Χαρακτηριστικά
Δέκτης παθητικής συσχέτισης	Φτηνό, ακατάλληλο για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, υψηλή απώλεια ισχύος
Δέκτης ενεργού συσχέτισης	Ακριβό, υποστηρίζει εφαρμογές υψηλής ταχύτητας
Οπτικός σκληρός περιοριστής και παθητικός δέκτης συσχέτισης	Δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, βασίζεται στη διαθεσιμότητα οπτικού σκληρού περιοριστή
Οπτικός περιοριστής σκληρού και ενεργός δέκτης συσχέτισης	Υποστηρίζει εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, βασίζεται στη διαθεσιμότητα ενός οπτικού περιοριστή σκληρού υλικού
Διπλός οπτικός σκληρός περιοριστής και παθητικός δέκτης συσχέτισης	Ακατάλληλο για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, ακριβό, καλή απόδοση
Διπλός οπτικός περιοριστής σκληρού και ενεργός δέκτης συσχέτισης	Υποστηρίζει εφαρμογές μεσαίας έως υψηλής ταχύτητας, υψηλής απώλειας ισχύος
Ανιχνευτής τσιπ υψηλής ταχύτητας	Δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, χαμηλή απώλεια ισχύος

2.4.4 Το Οπτικό δίκτυο OFDM-PON

Το OFDM-PON θεωρείται ως το πιο ελκυστικό σύστημα λόγω της επεκτασιμότητας και της ικανότητάς του να παρέχει ρυθμό μετάδοσης έως και 40Gbps ανά χρήστη. Το OFDM για το

NG-PON2 χρησιμοποιείται ως τεχνική πολυπλεξίας καθώς είναι φασματικά αποδοτική μέθοδος διαμόρφωσης. Η τεχνική OFDM προσφέρει ευελιξία και δυναμική κατανομή του εύρους ζώνης, επιτρέπει πολλαπλές υπηρεσίες και επιτυγχάνει υψηλή φασματική απόδοση. Το OFDM χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό ορθογώνιων μεταδοτών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση για να μεταφέρουν τα σήματα. Αυτοί οι μεταδότες διαμορφώνονται με χαμηλό ρυθμό συμβόλων χρησιμοποιώντας συμβατικές ή προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης (Muciaccia et al., 2014b).

Η αρχιτεκτονική OFDM-PON είναι παρόμοια με τη συμβατική PON. Χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά μήκη κύματος για μεταδόσεις κατάντη και ανάντη. Το OLT δημιουργεί πολλαπλούς ορθογώνιους 'υποφορείς' που έχουν εκχωρηθεί σε διαφορετικά ONUs. Κάθε δευτερεύων φορέας χωρίζεται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Το OLT εκτελεί τη διαδικασία κατάτμησης και διανέμει το συνολικό εύρος ζώνης στους δευτερεύοντες φορείς, στις χρονοθυρίδες ή και στα δύο σε διαφορετικά ONUs ανάλογα με τη ζήτησή τους (Shachaf et al., 2007). Για κατάντη μετάδοση, κάθε ONU αναγνωρίζει τους δικούς του υποφορείς OFDM ή/και χρονοθυρίδες με βάση τις πληροφορίες που λαμβάνονται από το OLT. Για την ανάντη μετάδοση, το OLT εργάζεται για τη συναρμολόγηση των υποπλαισίων που προέρχονται από διαφορετικά ONU για να δημιουργήσει ένα πλήρες πλαίσιο OFDMA. Με την εφαρμογή της τεχνικής πολυπλεξίας OFDM, μπορούν να επιτευχθούν διάφορα οφέλη. Πρώτον, το συνολικό κόστος μειώνεται επειδή το κόστος της πολύπλοκης οπτικής διαμόρφωσης στο OLT μπορεί να μοιραστεί μεταξύ των χρηστών. Επιπλέον, το ONU εφαρμόζει μια απλή και φθηνή οπτική διαμόρφωση προκειμένου να αναγνωρίζει δεδομένα για αυτό το ONU. Επιπλέον, η τεχνολογία OFDM-PON συμβάλλει στη μείωση του κόστους χρησιμοποιώντας οικονομικά αποδοτικές ηλεκτρονικές συσκευές αντί για οπτικές συσκευές. Το αλληλεπικαλυπτόμενο χαρακτηριστικό του OFDM δεν παράγει παρεμβολές που οδηγεί στην αποτελεσματική χρήση των φασματικών πόρων. Επιπλέον, σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, το OFDM-PON παρέχει έναν δισδιάστατο χάρτη εύρους ζώνης με λεπτότερη ευαισθησία, προσφέροντας ευελιξία στην εκχώρηση του εύρους ζώνης σε διαφορετικά επίπεδα.

Παρά τα τεράστια πλεονεκτήματα του OFDM, έχουν εντοπιστεί ορισμένοι περιορισμοί. Το OFDM-PON απαιτεί πολύπλοκους δέκτες που εξαρτώνται από DSP και FPGA υψηλής ταχύτητας. Επιπλέον, το OFDM-PON βρίσκεται σε μειονεκτική θέση λόγω του θορύβου και του υψηλού Peak Average Power Ratio (PAPR). Το ζήτημα του PAPR εμφανίζεται ως

αποτέλεσμα ημιτονοειδών σημάτων από πολλαπλούς υποφορείς OFDM που παρεμβαίνουν εποικοδομητικά στον τομέα του χρόνου. Η παρέμβαση αυτή δημιουργεί υψηλότερη τιμή πλάτους από τη μέση τιμή πλάτους του σήματος. Ο θόρυβος δημιουργείται ως αποτέλεσμα παρεμβολών όταν ανιχνεύονται πολλαπλά σήματα από πολλούς χρήστες στη φωτοδίοδο στο OLT. Τέτοιες παρεμβολές οδηγούν σε υποβάθμιση της απόδοσης. Η μετατόπιση συχνότητας είναι επίσης ένα μειονέκτημα της τεχνικής OFDM που συμβαίνει λόγω της αναντιστοιχίας των χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων (Bindhaiq et al., 2015).

2.4.5 Το δίκτυο UNI-PON

Το υψηλό κόστος και η σπατάλη πόρων είναι οι κύριοι περιορισμοί στις υπάρχουσες τεχνικές πολυπλεξίας αναγκάζοντας τους ερευνητές να σκεφτούν πιο κατάλληλες και αποτελεσματικές μεθόδους. Ορισμένοι ερευνητές κατέληξαν στην ιδέα του δικτύου UNI-PON.

Στο δίκτυο UNI-PON ο χειρισμός δεδομένων γίνεται στο OLT χρησιμοποιώντας υπολογιστικό νέφος. Στα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας UNI-PON περιλαμβάνονται πρόσβαση σε όλες τις υπηρεσίες για όλους τους χρήστες, χαμηλότερο κόστος και συνδεσιμότητα ραδιοφωνικών απομακρυσμένων μονάδων, προσαρμογή πολλαπλών ρυθμών και δυναμική κατανομή εύρους ζώνης. Οι Liu et al. (2012) χρησιμοποίησαν ένα προσαρμοστικό αλγόριθμο φυσικών επιπέδων για την επίτευξη πολλαπλών ρυθμών και δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης. Με την ταχεία πρόοδο της τεχνολογίας τα συστήματα θα πρέπει να είναι ανθεκτικά για να υιοθετήσουν μελλοντικές αλλαγές. Επομένως, η τεχνολογία UNI-PON μπορεί να είναι μια κατάλληλη επιλογή για τα μελλοντικά δίκτυα.

2.4.6 Το δίκτυο PDM-PON

Η τεχνολογία PDM-PON χρησιμοποιεί ορθογώνιες πολώσεις στο ίδιο μήκος κύματος. Έχει ικανοποιητική χωρητικότητα αλλά λόγω της συμπεριφοράς πόλωσης στην οπτική ίνα, θα ήταν πολύ δύσκολο να διαχωριστούν τα σήματα στο άκρο λήψης.

3. Το πρότυπο παθητικό δίκτυο APON

Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο που βασίζεται στην τεχνολογία ATM αντιπροσωπεύει το πρώτο πρότυπο ενός παθητικού οπτικού δικτύου που εγκρίθηκε από την ITU το 1998. Ολόκληρο το πρότυπο βασίστηκε στην δικτυακή τεχνολογία ATM και ορίζεται στη Σύσταση G.983.1 (J. A. Hernandez et al., 2019). Η τεχνολογία ATM είναι μια τεχνολογία δικτύωσης που υιοθετήθηκε για μεγάλα δίκτυα. Ο λόγος για τη χρήση της τεχνολογίας ATM ήταν η ανάλυση μιας πρότυπης δικτύωσης για ταυτόχρονη μετάδοση υπηρεσιών φωνής και δεδομένων. Ένα ATM δίκτυο χρησιμοποιεί cells ως μονάδες μεταφοράς δεδομένων. Τα cells εισήχθησαν για την επίλυση προβλημάτων/συγκρούσεων με δίκτυα που βασίζονται σε τεχνολογίες μεταγωγής κυκλωμάτων και πακέτων. Τα κελιά είναι μονάδες δεδομένων σταθερού μεγέθους (σχετικά μικρού μεγέθους). Το κελί ATM αποτελείται από 53byte: κεφαλίδα 5byte, και δεδομένα 48byte. Τα ATM switches μπορούν να επεξεργάζονται γρήγορα cells λόγω των δυνατοτήτων επεξεργασίας που βασίζονται μόνο σε υλικό. Το κόστος αυτών των διακοπών μπορεί να είναι πολύ υψηλό. Ως εκ τούτου, η χρήση αυτής της συγκεκριμένης τεχνολογίας έχει μειωθεί.

Τα δίκτυα ATM μπορούν να παρέχουν στους χρήστες υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς (από 1,5Mb/s έως 2,4Gb/s). Η επικοινωνία μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας σταθερά ή εικονικά κυκλώματα. Τα δίκτυα ATM εγγυώνται επίσης την ποιότητα των υπηρεσιών (QoS) για διαφορετικούς τύπους ροών δεδομένων. Ωστόσο, βεβαιωθείτε ότι η ανίχνευση σφαλμάτων ή η αστοχία συσκευών μάλλον δεν υποστηρίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό.

Η τεχνολογία ATM τέθηκε σταδιακά σε λειτουργία στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Η αρχική ώθηση που οδήγησε στη μαζική ανάπτυξη του ATM ήταν η υιοθέτηση του ATM ως τεχνολογία μετάδοσης για ένα ψηφιακό δίκτυο ολοκληρωμένων ευρυζωνικών υπηρεσιών (B-ISDN), το οποίο εγκρίθηκε από την ITU. Η αρχική φιλοσοφία ενός δικτύου ATM ήταν να παρέχει ολοκληρωμένες υπηρεσίες για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που θα είναι διαθέσιμες σε επιχειρήσεις και τελικούς χρήστες. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, αυτή η τεχνολογία υιοθετήθηκε και από τη βιομηχανία των υπολογιστών. Ο λόγος για αυτό ήταν πιθανώς η αυξανόμενη ζήτηση για όλο και μεγαλύτερα εύρη ζώνης και υποστήριξη σε μια ποικιλία εφαρμογών πολυμέσων. Η εφαρμογή ATM είχε τα ακόλουθα πλεονεκτήματα (van de Voorde & van der Plas, 1997):

- Η υποδομή και οι διεπαφές είναι ανεξάρτητες από την εφαρμογή.
- Πλήρης υποστήριξη πολυπλεξίας/αποπολυπλεξίας.
- Αποτελεσματικός χειρισμός τόσο μεταβλητών όσο και σταθερών ρυθμών (bit rates).

- Καλή υποστήριξη σε υπηρεσίες πολυμέσων ευαίσθητων σε καθυστέρηση.
- Απλοποιημένη διαχείριση και λειτουργία δικτύου.
- Υπόσχεση μελλοντικής ασφάλειας.

3.1. Ιστορική αναδρομή ανάπτυξης του προτύπου APON

Η πρώτη δοκιμή αυτού του προτύπου σε κανονική λειτουργία πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1990. Από το 1995, έχει εμφανιστεί μια διεθνής πρωτοβουλία παρόχων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και ενός δικτύου πρόσβασης πλήρους εξυπηρέτησης κατασκευαστών τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού (FSAN), το οποίο έχει συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας. Η τυποποίηση των οργανισμών ITU, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προέκυψε το 1998. Το 2001, το πρότυπο APON έγινε η τεχνολογία η οποία εξετάστηκε για την ανάπτυξη δικτύων πρόσβασης FTTH (Chanclo et al., 2006).

Κατά την ανάπτυξη του προτύπου APON, το FSAN συνδύασε δύο βασικές τεχνολογίες: την τεχνολογία του δικτύου ATM και του παθητικού δικτύου PON. Στην περίπτωση δικτύων πρόσβασης που βασίζονται στην παραδοσιακή τεχνολογία ATM, χρησιμοποιείται ένας στατικός πολυπλέκτης. Η πολυπλεξία στο δίκτυο παρέχεται από access switches που συνδυάζουν μεγάλο αριθμό εισερχόμενων ροών δεδομένων από τελικούς χρήστες σε μία εξερχόμενη ροή δεδομένων. Ωστόσο, αυτά τα στοιχεία είναι ενεργά στοιχεία, δηλ. απαιτούν παροχή ρεύματος. Αυτές οι συσκευές πρέπει να τοποθετούνται στη διαδρομή μεταξύ του παρόχου υπηρεσιών και του τελικού χρήστη. Το κόστος συντήρησης των access switches, και το κόστος της τροφοδοσίας τους, δεν είναι ευκαταφρόνητο στοιχείο, αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος λειτουργίας του δικτύου πρόσβασης. Στην περίπτωση υλοποίησης παθητικού δικτύου PON, αυτοί οι διακόπτες ενεργής πρόσβασης αντικαθίστανται από παθητικούς οπτικούς διανομείς (splitter). Μία από τις πρώτες προδιαγραφές APON ήταν της τάξης των 155Mb/s. ο μέγιστος λόγος διανομής ορίστηκε σε 32. Δηλαδή, αυτή η προδιαγραφή αφορούσε το πολύ 32 τελικούς χρήστες, με πλήρη χρήση του παθητικού οπτικού διανομέα (splitter), και ο μέγιστος ρυθμός για έναν χρήστη είναι περίπου 4,8Mb/s. Η πρώτη γενιά δεν θα είχε σημαντική βελτίωση. Ωστόσο, ήταν μια συμμετρική παραλλαγή που ήταν σε θέση να επιτύχει παρόμοιες ταχύτητες μετάδοσης με την τεχνολογία ασύμμετρης ψηφιακής συνδρομητικής γραμμής (ADSL) η οποία βρήκε μεγάλη χρήση εκείνη την εποχή. Για την υπηρεσία τριπλής αναπαραγωγής (βίντεο, φωνή και δεδομένα), η πρώτη γενιά θα ήταν επίσης ακατάλληλη.

Στη δεύτερη γενιά του APON, ορίστηκε μια ασύμμετρη παραλλαγή. Η κατάντη κατεύθυνση παρείχε στους χρήστες ρυθμό μεταφοράς 622Mb/s. Ο ρυθμός μετάδοσης ανάντη παρέμεινε

ισοδύναμος με τον ρυθμό μετάδοσης πρώτης γενιάς: 155Mb/s. Ο μέγιστος λόγος διαχωρισμού ορίστηκε σε 32. Στη συγκεκριμένη περίπτωση (όταν ο διανομέας ήταν πλήρως κατειλημμένος), ο μέγιστος ρυθμός για έναν μόνο χρήστη ήταν περίπου 19,4Mb/s (στην κατεύθυνση προς τα κάτω). Η τρίτη γενιά του APON ήταν μια συμμετρική παραλλαγή με ρυθμό μεταφοράς 622Mb/s και ο μέγιστος λόγος διαχωρισμού(split) παρέμεινε αμετάβλητος σε σύγκριση με τις δύο προηγούμενες γενιές (James & Fisher, 2002). Για οικονομικούς λόγους, οι οπτικές γραμμές δεν κατέληξαν σε τελικούς χρήστες. Πολλοί τελικοί χρήστες συνδέθηκαν σε ένα μόνο ONU επαναχρησιμοποιώντας το ήδη λειτουργικό 'χάλκινο' δίκτυο. Ως αποτέλεσμα ότι τα μεταγενέστερα δεδομένα αποστέλλονται σε όλα τα ONUs του δικτύου, ο αριθμός των ONUs που συνδέονται με την οπτική τοπολογία δέντρου περιορίστηκε σε 64. Χρησιμοποιώντας αυτήν την προσέγγιση, το κόστος ισχύος του συστήματος (από την πλευρά του παρόχου) μπορεί να περιοριστεί. Η τυπική εμβέλεια του συστήματος APON ήταν περίπου 10km.

3.2. Μέθοδοι πρόσβασης σε κοινόχρηστα μέσα

Ο σχεδιασμός μιας κατάλληλης μεθόδου πρόσβασης για το πρότυπο APON ήταν ένα αρχικό πρόβλημα επειδή η συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα μετάδοσης έπρεπε να κατανομηθεί ομοιόμορφα μεταξύ όλων των ενεργών μονάδων ONU. Επιπλέον, η μέθοδος πρόσβασης δεν πρέπει με κανέναν τρόπο να διαταράσσει τα χαρακτηριστικά μεταφοράς της τρέχουσας τεχνολογίας ATM. Γενικά, η δομή PON είναι συγκεντρωτική. Το κύριο στοιχείο αυτής της δομής είναι η μονάδα OLT, η οποία ελέγχει την κατανομή του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Το 1987, η έρευνα είχε ήδη ξεκινήσει για ένα σύστημα που εφαρμόζει την προσέγγιση κατανομής με πολύπλεξη χρόνου TDMA. Η έρευνα ξεκίνησε από την British Telecom και πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια BT. Αυτή η έρευνα διεξήχθη σε ένα σύστημα γνωστό ως τηλεφωνία μέσω PON—τηλεφωνία μέσω PON (T-PON)—το οποίο προσέφερε υπηρεσίες τηλεφωνίας PON (Hossen & Hanawa, 2012). Το πρώτο σύστημα που βασίζεται στη μέθοδο TDMA κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε σε πραγματικό χρόνο το 1989. Αυτή η συγκεκριμένη μέθοδος πρόσβασης έχει αποδειχθεί επιτυχής όταν συνδυάζεται με την τότε πολλά υποσχόμενη τεχνολογία ATM (Chanclou et al., 2006). Στην κατάντη κατεύθυνση (OLT → ONU), χρησιμοποιείται τεχνική TDM και στην αντίθετη (ανοδική) κατεύθυνση (ONU → OLT), χρησιμοποιείται τεχνική TDMA. Στην περίπτωση μετάδοσης ανάντη, το ATM προστίθεται στις κυψέλες που χρησιμοποιούνται για τον συγχρονισμό του εύρους ισχύος και του ρολογιού. Οι κυψέλες ATM από τις μονάδες δικτύου τελικού σημείου συγχωνεύονται στην ανάντη κατεύθυνση στην έξοδο του παθητικού οπτικού διανομέα στη ροή δεδομένων που

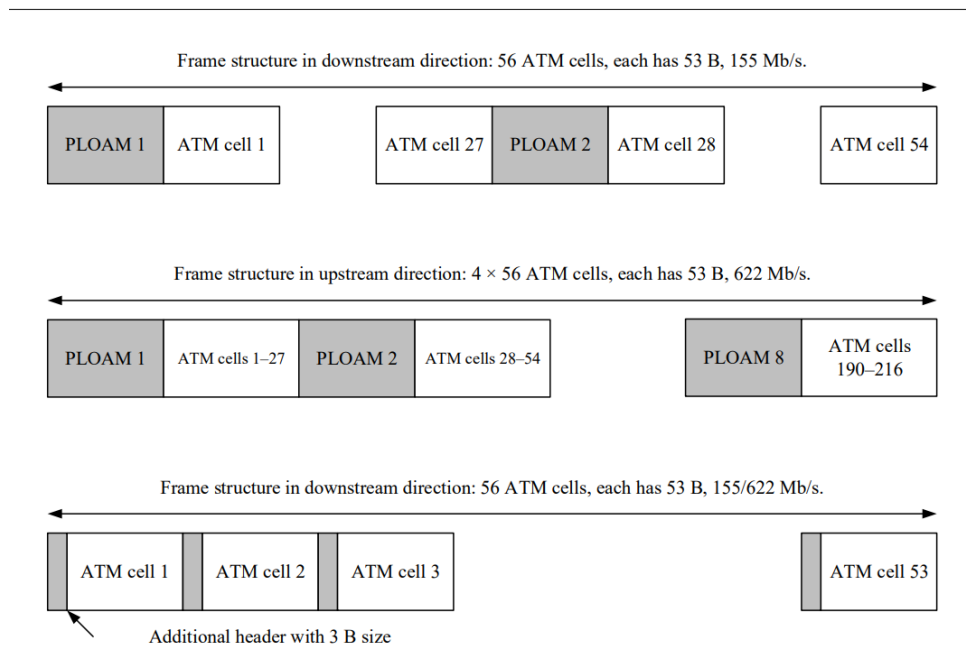
προκύπτει. Επειδή στην ανάντη κατεύθυνση μπορεί να συμβεί μια σύγκρουση μεταξύ δύο κυψελών που μεταδίδονται από διαφορετικές πηγές. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ο πολυπλέκτης με τεχνική TDMA. Στην κατάντη κατεύθυνση, δεν συμβαίνουν συγκρούσεις.

3.3. Πρωτόκολλο επικοινωνίας στο APON

Για τα πλαίσια που αποστέλλονται στην κατάντη κατεύθυνση, (α) ο βασικός ρυθμός μεταφοράς 155Mb/s περιέχει συνολικά 56 cells ATM (κάθε ένα από τα cells έχει μέγεθος 53byte). και (β) για 622Mb/s, το πλαίσιο περιέχει συνολικά 224 κελιά ATM. Δύο κελιά είναι πάντα δεσμευμένα: μηνύματα λειτουργίας φυσικού επιπέδου και διαχείρισης και συντήρησης (PLOAM). Το πρώτο μήνυμα βρίσκεται στην αρχή του πλαισίου και το δεύτερο μήνυμα βρίσκεται στη μέση του πλαισίου. Τα υπόλοιπα μηνύματα που περιέχονται στο πλαίσιο είναι κελιά ATM που μεταδίδουν δεδομένα χρήστη (Jongwook Jang & Park, 2000).

Στην κατάντη κατεύθυνση, τα μηνύματα PLOAM χρησιμοποιούνται για την παροχή παραχωρήσεων. Αυτές οι παραχωρήσεις μεταδίδονται συνεχώς από τη μονάδα OLT σε όλα τα συνδεδεμένα ONUs. Οι παραχωρήσεις χρησιμεύουν ως άδειες για μεμονωμένες ONUs να μεταφέρουν δεδομένα χρήστη σε ATM cells, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την εκχώρηση εύρους ζώνης σε μονάδες ONUs (Jongwook Jang & Park, 2000). Στην ανάντη κατεύθυνση, η μεταφορά των πλαισίων είναι ένα σύμπλεγμα κυψελών ATM και κάθε κελί περιέχει μια κεφαλίδα 3B που διευκολύνει τον διαχωρισμό και το συγχρονισμό cells στον δέκτη (μηνύματα PLOAM και κελιά ATM). Μια μονάδα OLT πρέπει να έχει αυτούς τους δέκτες. Επιπλέον, είναι σημαντικό η μονάδα OLT να μπορεί να συγχρονίζεται με τα ONU που ενδέχεται να βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από το OLT.

Στην ανοδική κατεύθυνση, τα μηνύματα PLOAM χρησιμοποιούνται από τα ONUs για τη μετάδοση πληροφοριών μεγέθους ουράς για το OLT. Το OLT μπορεί να εφαρμόσει αυτές τις πληροφορίες για να εκχωρήσει το απαραίτητο εύρος ζώνης. Η δομή του πλαισίου APON φαίνεται στην Εικόνα 11. Τα πλαίσια που αποστέλλονται στην κατάντη κατεύθυνση ποικίλλουν ανάλογα με την ταχύτητα μεταφοράς, ενώ τα πλαίσια που αποστέλλονται στην ανάντη κατεύθυνση παραμένουν τα ίδια για τις συμμετρικές και ασύμμετρες παραλλαγές.



Εικόνα 11: Δομή πλαισίων παθητικού οπτικού δικτύου (APON) λειτουργίας ασύγχρονης μεταφοράς (G.983.1: Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks (PON)., n.d.).

3.4. Δυναμική κατανομή εύρους ζώνης

Στην περίπτωση των παθητικών οπτικών δικτύων, υπάρχει μια σύνδεση από σημείο σε πολλαπλό σημείο με ένα κεντρικό σημείο (OLT), το οποίο είναι ‘ανώτερο’ από όλα τα άλλα τελικά σημεία. Αυτή η δομή είναι μια ιεραρχική δομή που είναι χαρακτηριστική των τοπολογιών ‘δέντρων’. Παρατηρούνται ορισμένες διαφορές με τις κλασικές συνδέσεις από σημείο σε σημείο, όπως η στατική εκχώρηση εύρους ζώνης για μια συγκεκριμένη σύνδεση. Εάν χρησιμοποιηθεί η εκχώρηση στατικού εύρους ζώνης για το σύστημα APON με ρυθμό μεταφοράς 155Mb/s (πρώτης γενιάς, συμμετρικό), καθένας από τους 32 τελικούς χρήστες θα είχε εφοδιαστεί με ρυθμό μετάδοσης 4,8Mb/s και στις δύο μεταδόσεις κατευθύνσεις.

Η δυναμική κατανομή εύρους ζώνης (DBA) βασίζεται στην ιδέα ότι όλοι οι συνδεδεμένοι τελικοί χρήστες δεν χρειάζονται το πλήρες εύρος ζώνης σε μια δεδομένη στιγμή. Η εφαρμογή αυτού του μηχανισμού δεν αποτελεί πρόβλημα στο δίκτυο APON επειδή ο ρυθμός μετάδοσης είναι σχετικά υψηλός και τα προβλήματα που βασίζονται στην καθυστέρηση ελαχιστοποιούνται. Το 2001, η ITU εξέδωσε τη Σύσταση G.983.4, η οποία εφαρμόζει έναν μηχανισμό και συστήματα DBA που βασίζονται στο αρχικό G.983.1, τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα στη σύσταση. Ο μηχανισμός DBA έχει τρεις διαφορετικές στρατηγικές (James & Fisher, 2002):

1. Αναφορά χωρίς κατάσταση.
2. Η ίδια η αναφορά κατάστασης.
3. Υβριδική αναφορά.

Στην περίπτωση της 1^{ης} αναφοράς, η κίνηση μέσω της μονάδας OLT παρακολουθείται. Εάν η πληρότητα των συσχετισμένων ουρών αυξηθεί, η μονάδα αξιολογεί αυτό το συμβάν ως απαίτηση για την αύξηση του εύρους ζώνης. Στη 2^η περίπτωση, το ONU αναφέρει την κατάστασή του στο OLT. Εάν το ONU απαιτεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης, στέλνει το αίτημα στο OLT. Τέλος, η 3^η περίπτωση δηλαδή η υβριδική αναφορά περιλαμβάνει έναν συνδυασμό των δύο προηγούμενων τύπων.

3.5 Το παθητικό δίκτυο SuperPON

Την εποχή της ανάπτυξης του προτύπου APON, η έρευνα για μια νεώτερη τεχνολογία PON είχε ήδη ξεκινήσει. Η έρευνα βασίστηκε στην υπόθεση ότι η ζήτηση για καλύτερη πρόσβαση θα συνέχιζε να αυξάνεται. Το ερευνητικό έργο προηγμένων τεχνολογιών και υπηρεσιών επικοινωνίας (ACTS) — με το όνομα AC50 φωτονικό δίκτυο τοπικής πρόσβασης (PLANET) — επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας PON για ακόμα μεγαλύτερα δίκτυα με υψηλότερη αναλογία διανομέα(splitter). Τον Μάρτιο του 1997 πραγματοποιήθηκε μια εργαστηριακή δοκιμή οπτικής μετάδοσης: ένα μεγάλο δίκτυο με υψηλή αναλογία διανομής. Το 1998, διεξήχθη στις Βρυξέλλες δοκιμή μετάδοσης πολυμέσων στο λεγόμενο δίκτυο SuperPON. Το SuperPON είχε πολύ φιλόδοξες παραμέτρους (υποθέσεις): λήφθηκε υπόψη ως μέγιστο η απόσταση των 100km και η συνολική ιεραρχική κατανομή (hub) ορίστηκε στο 2048. Υποστηρίχθηκαν δύο ρυθμοί μεταφοράς: 2,4Gb/s (κατεύθυνση κατάντη) και 311Mb/s (κατεύθυνση ανάντη). Το εύρος ζώνης εκτιμήθηκε ότι να είναι επαρκές για 15.000 τελικούς χρήστες. Το SuperPON εξυπηρετεί αρχιτεκτονική FTTC ή FTTB. Η σύνδεση ακόμη περισσότερων χρηστών θα ήταν δυνατή (Wen-Piao Lin, 1997). Η τεχνολογία SuperPON βασίζεται στη μεταφορά ATM cells. Ωστόσο, είναι απαραίτητοι οι οπτικοί ενισχυτές. Προτάθηκε ότι θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την κατάντη κατεύθυνση ο ενισχυτής Ερβίου (EDFA). Στην περίπτωση της ανάντη κατεύθυνσης, θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένας οπτικός ενισχυτής ημιαγωγών (SOA). Ο λόγος για τη χρήση του ενισχυτή SOA ήταν η ανάγκη για γρήγορη εναλλαγή και για τη μείωση του επιπέδου του σχετικού θορύβου.

4. Το Πρότυπο παθητικό δίκτυο BPON

Το Broadband Passive Optical Network (BPON) είναι το δεύτερο πρότυπο PON που ορίστηκε από την ITU με την σύσταση G.983.3. Η έγκριση αυτής της σύστασης το 2001 προκάλεσε την εφαρμογή του πολυπλέκτη διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) και συνέβαλε στη χρήση πολλαπλών υφιστάμενων οπτικών διαδρομών μετάδοσης. Το πρότυπο BPON βασίζεται στο προηγούμενο πρότυπο APON (συμβατό προς τα πίσω) και εφαρμόζει τους ίδιους ρυθμούς μεταφοράς για τη μετάδοση. Το κύριο πλεονέκτημα του νέου προτύπου ήταν η εισαγωγή του WDM στα παθητικά οπτικά δίκτυα. Η αρχή ενός πεπλεγμένου μήκους κύματος δίνει την δυνατότητα μετάδοσης σε μια οπτική ίνα διαφορετικών μηκών κύματος. Διάφορες πηγές οπτικού σήματος εκπέμπουν σε διαφορετικά μήκη κύματος. Το πλεονέκτημα αυτής της λύσης είναι η δυνατότητα σύνδεσης πολλαπλών καναλιών σε μία μόνο οπτική ίνα. Διαφορετικά, αυτά τα κανάλια θα έπρεπε να μεταδίδονται χωριστά, δηλαδή το καθένα σε μια οπτική ίνα.

Η τεχνολογία WDM έχει κάποιες ομοιότητες με την πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM). Στην πολυπλεξία FDM, οι μεταδόσεις γίνονται σε διαφορετικές συχνότητες. Στην τεχνολογία WDM, οι μεταδόσεις γίνονται σε διαφορετικά μήκη κύματος. Στην αρχή μιας οπτικής διαδρομής, τα σήματα από πολλαπλούς πομπούς πρέπει να συγχωνεύονται σε μια ενιαία οπτική ίνα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ένα κατάλληλο ζεύγος πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη.

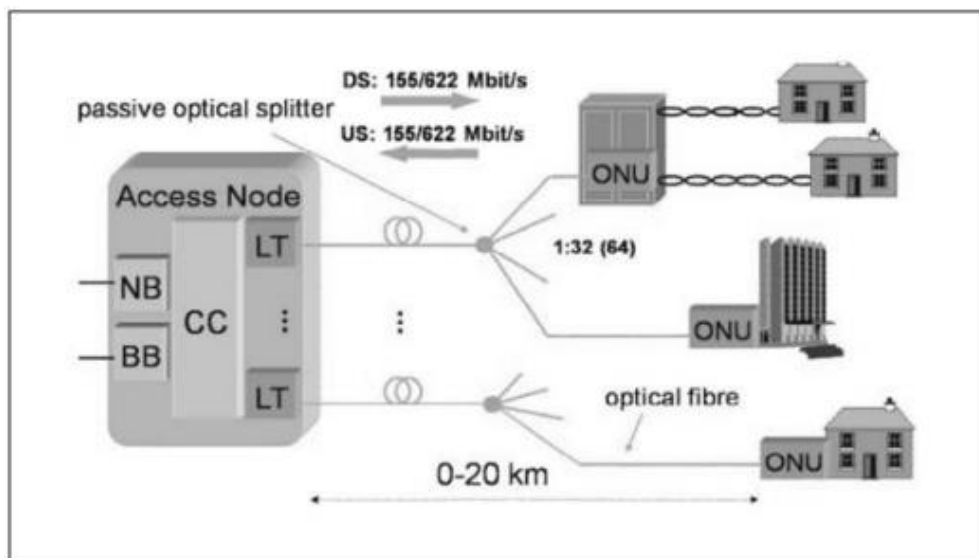
4.1. Ιστορική αναδρομή προτύπου BPON

Το πρότυπο BPON έχει επιτρέψει αρκετές βελτιώσεις σε σχέση με τον προκάτοχό του. Ο διαχωρισμός της κίνησης σε κατηγορίες έχει επεκταθεί από υπηρεσίες φωνής, ιδίως υπηρεσίες κλασικής τηλεφωνίας και πρωτοκόλλου φωνής μέσω Διαδικτύου (VoIP). Το φάσμα των μηκών κύματος για την κατάντη κατεύθυνση χωρίστηκε σε δύο ζώνες. Η πρώτη ζώνη χρησιμοποιήθηκε για υπάρχοντα πρωτόκολλα BPON και η δεύτερη ζώνη προοριζόταν να δεσμευτεί για μετάδοση υπηρεσιών βίντεο. Με το πρότυπο BPON, μία ή δύο οπτικές ίνες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση. Στην περίπτωση μιας απλής ίνας, χρησιμοποιήθηκαν μήκη κύματος 1310nm και 1550nm για την κατάντη κατεύθυνση και την ανάντη κατεύθυνση, αντίστοιχα. Όταν χρησιμοποιήθηκαν δύο οπτικές ίνες (η πρώτη ίνα για την κατάντη κατεύθυνση, η δεύτερη για την ανάντη κατεύθυνση), χρησιμοποιήθηκε ένα μήκος κύματος 1310nm. Η ITU έχει διαθέσει μια νέα ζώνη μηκών κύματος μεταξύ 1500 και 1550nm για το WDM. Το μήκος κύματος των 1550nm χρησιμοποιήθηκε για μετάδοση σήματος βίντεο. Για ένα πολυπλεξία μήκους κύματος, τροποποιήθηκαν τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται

για τη μετάδοση μιας μοναδικής οπτικής ίνας. Για την κατάντη κατεύθυνση, επιλέχθηκε ένα μήκος κύματος 1310nm. Για την ανάντη κατεύθυνση, χρησιμοποιήθηκε ένα μήκος κύματος 1490nm. Το DBA τυποποιήθηκε στο G.983.4 και επέτρεψε την αυξημένη χωρητικότητα μετάδοσης στην ανάντη κατεύθυνση. Η σταδιακή ανάπτυξη του δικτύου BPON έχει φτάσει στο αποκορύφωμά της. Με τη νέα χιλιετία, ο τομέας του ψηφιακού βίντεο έχει αναπτυχθεί. Η υψηλότερη δυνατή ταχύτητα του προτύπου BPON (622Mb/s) θα ήταν ανεπαρκής για μετάδοση ψηφιακού σήματος υψηλής ευκρίνειας, ειδικά όταν αυτή η ταχύτητα μοιράζεται σε 32 τελικούς χρήστες. Η ανάπτυξη παθητικών οπτικών δικτύων έχει επικεντρωθεί σε νέα πρότυπα που μπορούν να παρέχουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και τη δυνατότητα σύνδεσης πολλαπλών τελικών σημείων.

4.2. Αρχιτεκτονική προτύπου BPON-Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Η Εικόνα 12 αντιπροσωπεύει τη γενική αρχιτεκτονική του ευρυζωνικού παθητικού οπτικού δικτύου. Είναι προφανές από το σχήμα ότι μια τυπική αρχιτεκτονική BPO περιλαμβάνει μέγιστη απόσταση 20km μεταξύ της μονάδας οπτικού δικτύου (ONU) και του τερματικού οπτικής γραμμής (OLT). Μια αρχιτεκτονική μπορεί να αποτελείται από συμμετρικό ή ασύμμετρο PON με μέγιστο 622Mb/s και 1,244Mb/s για ανάντη και κατάντη μετάδοση δεδομένων αντίστοιχα προς τους πελάτες (S.F. Shaukat, 2011).



Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική παθητικού οπτικού δικτύου BPON.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 12, ένας παθητικός οπτικός διαχωριστής χρησιμοποιείται μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των τοποθεσιών χρηστών. Λόγω της ανάπτυξης του παθητικού

οπτικού φίλτρου στο BPON, είναι εφικτή η λειτουργία χωρίς ιδιαίτερη συντήρηση. Είναι ένας από τους πιο αποδοτικούς τρόπους επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών τύπων PON.

Υπάρχουν τρεις κύριοι παράγοντες που χρησιμοποιούνται στο BPON για την επίτευξη απόδοσης υπηρεσιών υψηλής ποιότητας. Αυτοί οι τρεις βασικοί παράγοντες περιλαμβάνουν: i) την οργάνωση του περιεχομένου της προσωρινής μνήμης, ii) τον σωστό συγχρονισμό της κυκλοφορίας ανάντη και iii) την αποτελεσματική χρήση εύρους ζώνης. Αυτά τα τρία είναι τα μοναδικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του BPON.

A. Διακίνηση βίντεο. Η μετάδοση του βίντεο βασίζεται σε ένα στοιχείο που ονομάζεται 'πομπός κεφαλής'. Η κύρια λειτουργία του 'πομπού κεφαλής' είναι να λαμβάνει περιεχόμενο από διαφορετικές ψηφιακές καθώς και αναλογικές πηγές (Abbas & Gregory, 2016b). Το σύστημα μετάδοσης χρησιμοποιεί το ίδιο πρότυπο που χρησιμοποιεί η δικτύωση CATV για τη διανομή της κίνησης βίντεο στους συνδρομητές. Η κίνηση φωνής μπορεί εύκολα να μεταδοθεί χρησιμοποιώντας την ίδια οπτική ίνα 1490nm καθώς χρησιμοποιεί διαφορετικό μήκος κύματος. Κατά συνέπεια, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε τεχνική κωδικοποίησης για το βίντεο. Θα μπορούσε να είναι ψηφιοποίηση μετατόπισης φάσης τετραγωνισμού (QPSK), διαμόρφωση πλάτους τετραγωνισμού 64 σημείων (QAM 64), διαμόρφωση πλάτους τετραγωνισμού 256 σημείων (QAM 256) και άλλα (Luo et al., 2013).

B. Διακίνηση δεδομένων και φωνής. Το τερματικό οπτικής γραμμής που βρίσκεται στο κεντρικό γραφείο είναι υπεύθυνο για την πλήρη διασύνδεση μεταξύ των χρηστών και το δίκτυο μεταφορέων ανταλλαγής. Οι πληροφορίες μεταδίδονται σε όλα τα ONT από το τερματικό οπτικής γραμμής με τη μορφή ATM cells που χρησιμοποιούν τη τεχνική πολύπλεξης TDM (Time Division Multiplexing). Οι πληροφορίες που μεταδίδονται από το OLT προς τα ONUs είναι με τη μορφή δεδομένων ή φωνής που ελήφθησαν από το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Υπάρχουν συνολικά τρεις επιλογές στην κατάντη κατεύθυνση των δικτύων BPON, οι οποίες είναι 155,52, 622,08 και 1244,16Mb/s.

4.3 Σύγχρονες Μελέτες σχετιζόμενες με την τεχνολογία BPON

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται μελέτες σχετικά με την εφαρμογή της τεχνολογίας BPON.

Οι (Shaukat, 2011) παρουσίασαν την ανάλυση των ευρυζωνικών παθητικών οπτικών δικτύων. Το κύριο κίνητρο της έρευνας ήταν η βελτίωση της απόδοσης του τμήματος πρόσβασης και η παροχή λύσεων υψηλής κλιμάκωσης στους παρόχους υπηρεσιών, ώστε η οπτική ίνα να φτάνει στον τελικό χρήστη. Αξιολόγησαν επίσης το Ευρυζωνικό Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (BPON)

για κυκλοφορία ανάντη και κατάντη, ώστε να μπορέσουν να επιτύχουν τον στόχο τους. Ανέλυσαν το σύστημα με βάση τα μήκη κύματος, τον αριθμό των χρηστών, την τεχνική κωδικοποίησης, το μήκος της ίνας και τους ρυθμούς δεδομένων. Η έρευνα ανέλυσε επίσης την επίδρασή τους στη βασική παράμετρο απόδοσης Bit Error Rate (BER) με τη βοήθεια του OptiSystem Simulator έκδοση 7. Βρέθηκε ότι οι πιο σημαντικές παράμετροι, όπως ο αριθμός χρήστη, η απόδοση, το σύστημα και η επεκτασιμότητα έχουν βελτιστοποιηθεί με τη βοήθεια του OptiSystem έκδοση 7. Από το αποτέλεσμα, συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο αριθμός των χρηστών διπλασιάζεται προς την κατάντη κατεύθυνση όταν αλλάζει ο χαμηλότερος ρυθμός δεδομένων, έτσι ώστε να μπορούν να διατηρήσουν τα ίδια αποτελέσματα του ρυθμού σφάλματος bit στο μήκος της οπτικής ίνας. Ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων υποβαθμίζει την απόδοση του συστήματος στο διαφορετικό μήκος της ίνας και ο αριθμός των χρηστών είναι σταθερός στην κατεύθυνση προς τα κάτω. Παρατηρήθηκε επίσης από το αποτέλεσμα ότι ο ρυθμός δεδομένων μειώνεται αυξάνοντας το μήκος της ίνας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ίδια τιμή του ρυθμού σφάλματος bit και κατά την αλλαγή του μήκους της ίνας, αναπτύσσεται μια αντίστροφη εκθετική σχέση όταν ο λόγος διαχωρισμού της ίνας αυξάνεται. Από τα προκύπτοντα αποτελέσματα βρέθηκε ότι η χρήση των διαφορετικών ρυθμών δεδομένων επηρεάζει την απόδοση του δικτύου όταν αλλάζει το μήκος της ίνας.

Σε παρόμοια έρευνα για την τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης που χρησιμοποιείται για το παθητικό οπτικό δίκτυο, οι Chi et al., (2009) χρησιμοποίησαν τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες δικτύου πρόσβασης οπτικών ινών. Αρχικά σχεδίασαν τον ισοσταθμιστή ισχύος σήματος ισχύος με τη βοήθεια του FP-LD στον ακροδέκτη οπτικής γραμμής που εφαρμόζεται στο TDM-PON και μια δυναμική ισχύ ανάντη 2dB με εύρος από -5 έως -25dBm που ανακτούσε τη μέγιστη διακύμανση ισχύος 1,7dB. Διερεύνησαν επίσης σχετικά με τα συστήματα TDM/PON/WDM που είναι απλά και οικονομικά με τη λειτουργία αυτοπροστατευόμενης λειτουργίας. Η μελέτη πρότεινε την οικονομικά αποδοτική πηγή φωτός CW στο RSOA για 25GB/s για την ανάντη μετάδοση τόσο στο WDM-PON όσο και στο μηχανισμό αυτοίασης έναντι της βλάβης της ίνας. Από το αποτέλεσμα, συνήχθη το συμπέρασμα ότι οι βασικές τεχνολογίες πρόσβασης είναι χρήσιμες για τα ευρυζωνικά δίκτυα FTTH επόμενης γενιάς.

Τεχνολογικές πρόοδοι για τις ευρυζωνικές τεχνολογίες παθητικού οπτικού δικτύου παρουσιάστηκαν από τους (Dhaini & Assi, 2009). Οι ερευνητές περιγράφουν τις τρεις νέες τεχνολογίες, όπως η επιβιώσιμη δικτύωση, η πολυπλεξία διαίρεσης δυναμικού εύρους ζώνης και πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος. Η προσθήκη αυτών των νέων τεχνολογιών στην οικογένεια ευρυζωνικών παθητικών οπτικών δικτύων των λύσεων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χρησιμότητάς τους με την ενίσχυση τους αξιοπιστία, αποτελεσματικότητα και

χωρητικότητα.

Οι (Abbas & Gregory, 2016b) επίσης διερεύνησαν την επόμενη γενιά των παθητικών οπτικών δικτύων και ανέδειξαν επίσης τις τεχνικές πολυπλεξίας και τις απαιτήσεις για το NG-PON2. Παρουσίασαν επίσης τις τρεις διαφορετικές γενιές παθητικών οπτικών δικτύων που βασίζονται στο πρότυπο Gigabit PON και Ethernet PON. Το PON πρώτης γενιάς περιγράφεται σχετικά με το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων. Ο κύριος στόχος της έρευνάς τους ήταν η ανασκόπηση των τεχνολογιών που προτείνονται για την επόμενη γενιά PON (NG-PON2). Η υβριδική μέθοδος συνδυάζει τις πολλαπλές τεχνολογίες και εισάγει μια λύση, η οποία βοηθά στην άρση των περιορισμών ώστε να βελτιωθεί η συνολική απόδοση του συστήματος.

Οι (Bindhaiq et al., 2015b) υποστήριξαν τη δικτύωση που σχετίζεται με το παθητικό οπτικό δίκτυο (PON). Κατέληξαν ότι τα ζητήματα της οπτικής μεταγωγής και δικτύωσης βοηθούν στην απόδειξη του στιγμιότυπου της τελευταίας τεχνολογίας στη δικτύωση που υποστηρίζεται από παθητικό οπτικό δίκτυο.

Σε μια άλλη μελέτη των (Żotkiewicz, 2018), έγινε βελτιστοποίηση του σχεδιασμού παθητικού οπτικού δικτύου, καθώς συνδέεται με μεγάλες επενδύσεις κεφαλαίου. Για τη βελτιστοποίηση της θέσης των πρωτογενών και δευτερευόντων κόμβων και των επιπέδων διαχωρισμού τους, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τις τεχνικές της μαθηματικής μοντελοποίησης και του γενετικού αλγόριθμου και ανέθεσαν επίσης τους πελάτες σε δευτερεύοντες κόμβους και από δευτερογενείς κόμβους σε πρωτεύοντες κόμβους χρησιμοποιώντας ορισμένους περιορισμούς όπως τεχνικά χαρακτηριστικά και εξασθενήσεις συστήματος όλου του εξοπλισμού.

Τέλος, ο (Wong, 2014) παρουσίασε την αρχιτεκτονική επιβίωσης για παθητικά οπτικά δίκτυα πολυπλεξίας με διαίρεση του χρόνου και του μήκους κύματος. Οι άμεσες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά PON σε TWDM-PON είναι ακατάλληλες καθώς χάνουν το σήμα στην ανάντη μετάδοση για να ενεργοποιήσουν την εναλλαγή προστασίας. Τα TWDM-PON χρησιμοποιούνται για απώλεια μεταβίβασης ανάντη, μονάδες οπτικού δικτύου σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας και για ενεργοποίηση της εναλλαγής προστασίας. Απαιτούν τις μονάδες παρακολούθησης για τον πιο ευαίσθητο εντοπισμό του σφάλματος. Τρεις βιώσιμες αρχιτεκτονικές χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη αυτού του ζητήματος από τις προδιαγραφές TWDM-PON. Αυτές οι αρχιτεκτονικές εντοπίζουν και προστατεύουν τη μεταγωγή από αστοχία πολλαπλών σημείων και δεν βασίζονται στην ανοδική μετάδοση για την ενεργοποίηση LOS.

4.4. Εφαρμογή προτύπων BPON, EPON

Η δοκιμή του **BPON** πραγματοποιήθηκε το 1999 από την αμερικανική εταιρεία BellSouth. Σε αυτή τη δοκιμή, οι τελικοί χρήστες έλαβαν τριπλή υπηρεσία (Video, φωνή και data). Το VoD

διανεμήθηκε σε ξεχωριστό οπτικό καλώδιο. και η λήψη πραγματοποιήθηκε μέσω της μονάδας βίντεο τερματισμού οπτικού δικτύου (ONT). Για τις υπηρεσίες Internet και τις τηλεφωνικές υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας, χρησιμοποιήθηκε μια άλλη μονάδα ONT. Το σύστημα BPON που αναπτύχθηκε λειτουργούσε με μήκη κύματος 1490nm (κατεύθυνση προς τα κάτω), 1310nm (κατεύθυνση ανάντη) και 1550nm (σήματα βίντεο). Αναπτύχθηκε μια ασύμμετρη παραλλαγή με ταχύτητα 622Mb/s στην κατάντη κατεύθυνση και ταχύτητα 155Mb/s στην ανάντη κατεύθυνση (Abrams et al., 2005). Το 2002 κατασκευάστηκαν στην Ιαπωνία δίκτυα βασισμένα στο πρότυπο BPON. Το 2004, η Verizon ένωσε περισσότερα από ένα εκατομμύριο νοικοκυριά με το BPON. Τα πλεονεκτήματα ήταν η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις, δηλαδή έως και 20km, οι πολλαπλές συνδέσεις έως και 64 ONT και η απαίτηση για κατανάλωση λιγότερης ενέργειας.

Κατά τη διάρκεια του 2001, η IEEE ανέπτυξε ένα νέο παθητικό δίκτυο το **EPON**, δημιουργώντας ισχυρό ανταγωνισμό λόγω του κόστους απόκτησης των ATM switches, το οποίο είναι σχετικά υψηλό σε σύγκριση με το κόστος απόκτησης των Ethernet switches. Η ίδια κατάσταση ισχύει και για τις κάρτες δικτύου καθώς και για άλλα εξαρτήματα. Το πρότυπο EPON είναι διαδεδομένο στην Ασία, κυρίως στην Κίνα, την Κορέα και την Ιαπωνία. Το 2005, το πρότυπο EPON έγινε η κυρίαρχη τεχνολογία PON στην Ιαπωνία (Gianordoli et al., 2006).

5 Τρέχουσες μελέτες και τάσεις των παθητικών Οπτικών δικτύων

Οι έρευνες εκτός από το WDM PON εστιάζουν επίσης σε πολύ πιο εξελιγμένα παθητικά οπτικά δίκτυα όπως το OFDM PON. Το παθητικό οπτικό δίκτυο (OFDM PON) είναι μια άλλη καινοτόμος τεχνική επικοινωνίας. Η τεχνολογία OFDM αποτελεί τον πυρήνα της τεχνολογίας μετάδοσης που χρησιμοποιείται σε ασύρματα συστήματα επόμενης γενιάς, συμπεριλαμβανομένου του 3GPP LTE. Το OFDM PON εκχωρεί δυναμικά το εύρος ζώνης και έχει υψηλή ποιότητα μετάδοσης. Το δίκτυο αυτό μπορεί να επεκταθεί έως και 100km, σε αντίθεση με το TDM PON που μπορεί να φτάσει έως και τα 20km στην πράξη και θεωρητικά στα 60km. Το δίκτυο WDM PON μπορεί να φτάσει έως και τα 60km στην πράξη. Το παθητικό δίκτυο OFDM PON έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το OFDM PON μαζί με το WDM PON μπορεί να είναι ανταγωνιστικές τεχνολογίες ως δίκτυα 2^{ης} γενιάς. Επίσης, δεδομένου ότι η αναβάθμιση του GPON δεν είναι βιώσιμη τεχνική και όταν οι απαιτήσεις εύρους ζώνης είναι υψηλές, η αναβάθμιση σε WDM PON από TDM PON με την αντικατάσταση του διαχωριστή (splitter) με ένα AWG mux/demux σε απομακρυσμένο κόμβο φαίνεται να είναι μια ικανοποιητική λύση. Επίσης, το WDM PON παρέχει μεγαλύτερη επεκτασιμότητα, διαλειτουργικότητα και πιο σημαντική ασφάλεια. Εάν μπορέσουμε να αντιμετωπίσουμε τις προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος, το WDM PON θα γίνει η επόμενη γενιά παθητικών δικτύων πρόσβασης οπτικών ινών. Η τεχνολογία FTTH αναβαθμίζεται μέρα με τη μέρα. Για την ανάπτυξη δικτύων οπτικής πρόσβασης, θα πρέπει να υπάρχουν οικονομικά αποδοτικές λύσεις που να προσφέρουν ευρυζωνικές υπηρεσίες στους συνδρομητές διατηρώντας παράλληλα χαμηλό κόστος. Το κόστος των ONUs έχει άμεση επίδραση στο κόστος ολοκλήρου του δικτύου οπτικής πρόσβασης.

Σύμφωνα με τους (Prat et al., n.d.), ένα δίκτυο PON με ρυθμό 1,25Gbps βασισμένο σε έναν ανακλαστικό οπτικό ενισχυτή ημιαγωγών (RSOA) ήταν ικανό να φτάσει έως και 30km με χρήση ενισχυτών RSOA και ηλεκτροοπτικό πομποδέκτη στην πλευρά των ONUs. Ο διαμορφωτής Mach Zehnder χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση των κατάντη δεδομένων με ταχύτητα 1,25Gbps. Στο δίκτυο πρόσβασης υπήρχε μόνο ένα οπτικό στοιχείο που είναι το RSOA και λειτουργεί ως διαμορφωτής και φωτοανιχνευτής. Ένα κύκλωμα διασύνδεσης για το RSOA υλοποιήθηκε για να διαχωρίσει το λαμβανόμενο σήμα κατάντη και τα δεδομένα ONU ανάντη μέσω ενός ηλεκτρικού switch που ενεργοποιεί τη λειτουργία λήψης ή μετάδοσης την αντίστοιχη στιγμή.

Το WDM-PON παρουσιάστηκε από τους (Guo & Tran, 2012) όπου χρησιμοποιήθηκαν τα RSOA. Διαμόρφωσαν το σήμα ζώνης βάσης και το σήμα πολυπλεξίας (SCM) ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας μια ενιαία δίοδο laser (LD), γεγονός που καθιστά το σύστημα οικονομικά αποδοτικό. Ένα συμμετρικό σύστημα PON 1-Gb/s επιτεύχθηκε με σήμα SCM 20-Mb/s στα 2,2GHz για μετάδοση. Το WDM-PON που βασίζεται στο 'άχρωμο' ONU είναι δυνατό με την πηγή πολλαπλού μήκους κύματος, τη συντονιζόμενη πηγή, τα AWG και τα RSOA, το RSOA κάνει δύο εργασίες, η μία είναι να παρέχει το κέρδος στα σήματα και να διαμορφώνει τα δεδομένα στα 1,25Gb/s. Τα RSOA όταν λειτουργούν σε κορεσμένη λειτουργία παρέχουν την πλήρη επαναδιαμόρφωση η οποία είναι και αποτελεσματική και δυνατή.

Μια νέα μέθοδος συστήματος διπλής κωδικοποίησης προτάθηκε από τους (Presi et al., 2008) όπου έκαναν χρήση του IRZ για την κατάντη μετάδοση και του RZ για την ανάντη μετάδοση. Με την προτεινόμενη προσέγγιση η εμβέλεια του WDM PON που βασίζεται σε RSOA αυξάνεται χωρίς τον ενσωματωμένο ενισχυτή. Επίσης, πραγματοποιήθηκε πείραμα αμφίδρομης μετάδοσης χωρίς σφάλματα με RSOA και ταχύτητα δεδομένων 1,25Gbps σε απόσταση προσέγγισης 80km. Αντίστοιχα, οι (Tian et al., 2008) έχουν προτείνει μια τεχνολογία WDM-PON για κατάντη πολλαπλή μετάδοση μέσω της συμβατικής unicast υπηρεσίας δεδομένων χωρίς τη χρήση πρόσθετου φορέα φωτός, και τα αντίστοιχα 'χρωματιστά' εξαρτήματα που απαιτούνται στο ONU, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση του κόστους του συστήματος. Ωστόσο, αυτά τα σχήματα μπορεί να απέχουν πολύ από μια οικονομικά αποδοτική λύση επειδή απαιτούνται πρόσθετες οπτικές συσκευές για την ενίσχυση της χωρητικότητας του καναλιού.

Άλλοι ερευνητές (Won, 2009) παρουσίασαν ένα WDM-PON ικανό για ταχύτητες 1,25Gbps, το οποίο ήταν σε θέση να υποστηρίξει αμφίδρομη κίνηση και πρότειναν να χρησιμοποιηθεί η άμεση διαμόρφωση για την κατάντη και η καταστολή οπτικού φορέα για την ανάντη. Δεν παρατήρησαν καμία επίδραση διαφωνίας και το BER ήταν κάτω από τα όρια. Με τα 1,25Gbps επιτεύχθηκε η μετάδοση χωρίς σφάλματα για το μήκος ινών 23km. Το κόστος του προτεινόμενου συστήματος ήταν χαμηλό καθώς η μοναδική πηγή φωτός χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του σήματος τόσο για το ανάντη όσο και για το κατάντη. Το σήμα για το κατάντη παράγεται χρησιμοποιώντας την ιδέα της καταστολής του φορέα και του κλειδώματος έγχυσης του laser FP. το σήμα για το ανάντη δημιουργήθηκε με διάσπαση του τμήματος της ισχύος του laser. Το προτεινόμενο ONU ήταν ανεξάρτητο από το μήκος κύματος, το μήκος κύματος εκπομπής εξαρτάται από το συντονισμένο μήκος κύματος του laser FP.

Οι (Banchi et al., 2011) ανέφεραν τις κατανεμημένες ανακλάσεις με βάση τη σκέδαση Rayleigh από τα άκρα της οπτικής ίνας στο ONU, το ανακλώμενο σήμα μπορεί να ονομαστεί

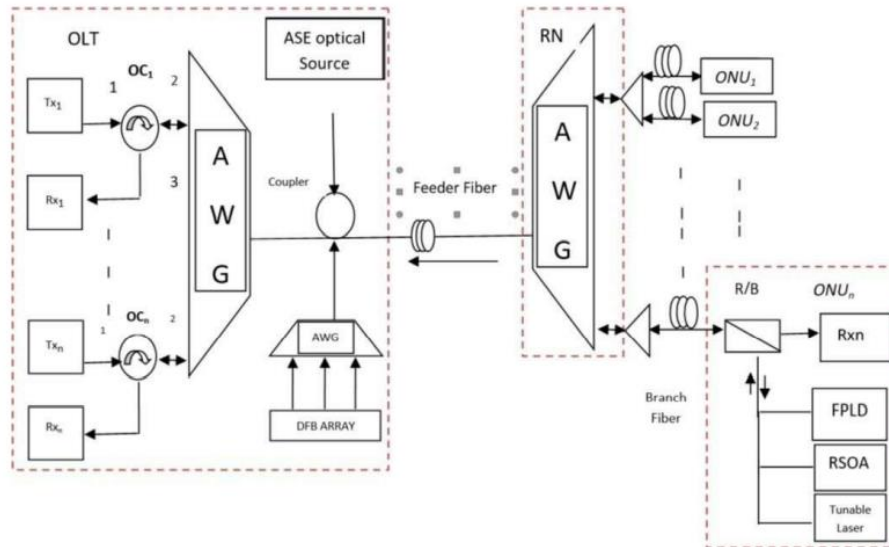
‘οπισθοσκέδαστο’ σήμα Rayleigh. Οι ανακλάσεις έχουν ως αποτέλεσμα το φαινόμενο crosstalk που οδηγεί σε παραμόρφωση των σημάτων και υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Η συνομιλία εντός της ζώνης στο άχρωμο ONU είναι ένα ανεπιθύμητο αποτέλεσμα και υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τη μείωση αυτού του αποτελέσματος. Επιπλέον, προτάθηκε το μοντέλο που βασίζεται σε μπλοκ DC το οποίο μπλοκάρει τα περισσότερα σήματα παλμών χαμηλής συχνότητας που είναι το αποτέλεσμα της διαδικασίας φωτοανίχνευσης και φιλτραρίσματος. Ένας άλλος τρόπος μείωσης της αλληλεπίδρασης είναι η διεύρυνση του εκπεμπόμενου οπτικού φάσματος. Το RZ με RSOA βρέθηκε ότι διευρύνει το φάσμα του σήματος ανάντη.

Το απλό ευρυζωνικό σήμα μπορεί να χωριστεί σε πολλά μέρη με τεμαχισμό φάσματος των ευρυζωνικών σημάτων, σύμφωνα με τους (Choi & Lee, 2011). Το κόστος αυτού του σχήματος είναι πολύ υψηλό και επίσης αυτές οι πηγές είναι πολύ δαπανηρές και η συντήρηση είναι πολύ δύσκολη. Το χαμηλότερο κόστος μπορεί να επιτευχθεί με ασυνάρτητες πηγές φωτός όπως EDFA, LED κ.λπ. Αυτά τα εξαρτήματα είναι φθηνότερα σε σύγκριση με τις συνεκτικές πηγές, γεγονός που καθιστά τις ασυνάρτητες πηγές κατάλληλες σε εφαρμογές δικτύων πρόσβασης με ευαισθησία στο κόστος.

Συμφωνα με τους ερευνητές, (Termos et al., 2021) ένα σχήμα επαναδιαμόρφωσης που βασίζεται στην πολυπλεξία ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας TWDM (TWDM OFDM-PON) αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική λύση με τη βοήθεια της κοινής χρήσης οπτικών μήκος κύματος και την ανάπτυξη ‘άχρωμου’ ONU. Η χρήση διαμόρφωσης OFDM παρέχει καλύτερη ανοχή χρωματικής διασποράς και επίσης η κατανομή εύρους ζώνης στους χρήστες παθητικού οπτικού δικτύου γίνεται ευέλικτη. Οι ερευνητές παρατήρησαν τα αποτελέσματα του συστήματος ως προς το Συντελεστή Ποιότητας και το ποσοστό σφάλματος bit (BER) και τα καλύτερα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στην περίπτωση της προτεινόμενης μεθόδου για τη μικρότερη ποσότητα μεταδιδόμενης ισχύος.

Οι (El-Nahal & Hanik, 2020) παρουσίασαν στην εργασία τους το σχέδιο χρήσης άχρωμου ONU με τη βοήθεια του FPLD. Η δίοδος laser fabry parot (FPLD) είναι ένα laser ταλαντωτή. Παρουσίασαν ότι το FPLD είναι ικανό να λειτουργεί ως ‘άχρωμος’ πομπός της ανάντη και για την κατάντη μετάδοση το κλειδωμένο με έγχυση FPLD μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο ONU. Το μήκος κύματος ταλάντωσης του FPLD κλειδώνεται στη λειτουργία έγχυσης στην περίπτωση που το σήμα κατάντη εγχύεται στο FPLD. Επίσης, η ταχύτητα διαμόρφωσης μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας την ανάκλαση της ακραίας όψης με βελτιωμένη κατασκευή, όπως προτείνεται από τους (Deniel et al., 2012) με χρήση του RSOA. Συγκεκριμένα, πρότειναν ένα WDM-PON που βασίζεται στο RSOA που επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος. Με το RSOA η χρήση των EDFA από το σύστημα μπορεί να μειωθεί καθώς το RSOA

παρέχει μεγάλο κέρδος στα σήματα. Τα TLD απαιτούν μια πρόσθετη μέθοδο ελέγχου μήκους κύματος για την επίτευξη ‘άχρωμων’ λειτουργιών (de Felipe et al., 2013). Η Εικόνα 13 περιγράφει το διαφορετικό ‘άχρωμες’ τεχνικές για NG-PON2.



Εικόνα 13: Διαφορετικές άχρωμες τεχνικές για το NG-PON 2.

6. Εφαρμογή στην πόλη της Άρτας

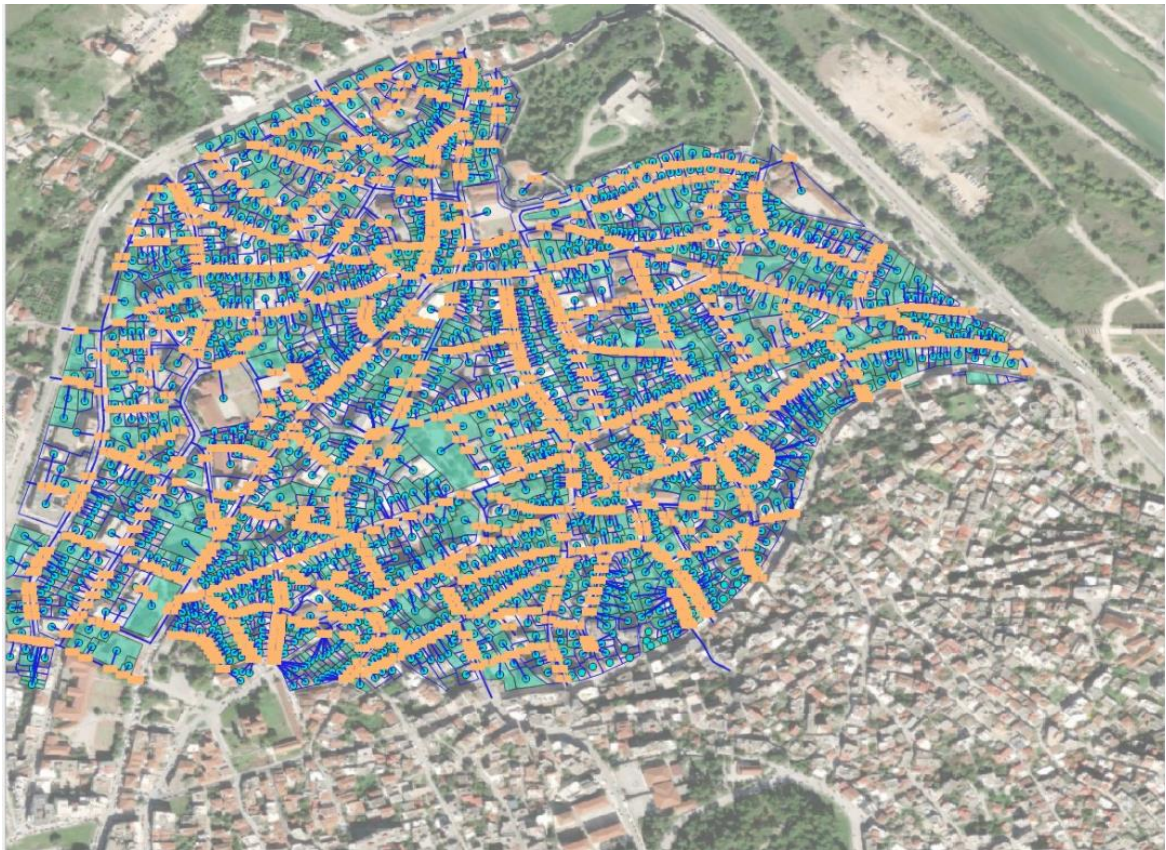
6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε και θα αποτυπώσουμε την υλοποίηση Παθητικών Οπτικών Δικτύων στην πόλη της Άρτας λόγω πνευματικών δικαιωμάτων δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στοιχεία τηλεπικοινωνιακών παρόχων. Έτσι την αποτύπωση σε χάρτη για την πόλη της Άρτας θα την κάνουμε με τη χρήση του προγράμματος QGIS. Με τη χρήση του προγράμματος λοιπόν και χρησιμοποιώντας το χάρτη της πόλης της Άρτας θα αποτυπώσουμε ένα δικό μας δίκτυο οπτικών ινών που δεν βασίζεται σε πραγματικά στοιχεία. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στον ενεργό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται από την πλευρά των πελατών. Τον ενεργό εξοπλισμό καθώς και τις υποδομές που χρησιμοποιεί ο εκάστοτε πάροχος για κατασκευή του δικτύου. Τέλος θα δείξουμε εργαλεία που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις καθώς και για τη δημιουργία του δικτύου από την αρχή μέχρι το τελικό σημείο που είναι ο πελάτης.

6.2 Αποτύπωση σε χάρτη (QGIS)

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα QGIS ψηφιοποιήσαμε το χάρτη της Άρτας για να μπορέσουμε να τον εισάγουμε στο πρόγραμμα και να μπορέσουμε να τον επεξεργαστούμε. Ψηφιοποιήσαμε λοιπόν ένα κομμάτι του χάρτη που θέλουμε να φαίνεται η έκταση του ftth δικτύου στην πόλη. Στη συνέχεια ξεκινήσαμε να «χτίζουμε» πάνω σε αυτό. Αποτυπώσαμε λοιπόν το δίκτυο κορμού το οποίο ξεκινάει για να συνδέσει όλες τις οπτικές καμπίνες μεταξύ τους, στη συνέχεια το δίκτυο που φεύγει απ την εκάστοτε καμπίνα και χαράζει την πορεία του για τις οικίες που θα εξυπηρετήσει. Δημιουργήσαμε κτίρια τα οποία είναι διασυνδεδεμένα και κτίρια που είναι σε αναμονή σύνδεσης και χρησιμοποιήσαμε χρωματικό διαχωρισμό. Εμπλουτίσαμε το project μας με πληροφορίες που θα χρησιμοποιούσε κάποιος μηχανικός – τεχνικός αν διάβαζε αυτό το σχέδιο. Τέτοιες πληροφορίες είναι συντεταγμένες, αποστάσεις, πλήθος ινών κλπ.

Ξεκινώντας βλέπουμε στην πρώτη εικόνα ένα γενικό χάρτη της πόλης καθώς επίσης και το κομμάτι το οποίο καλύπτεται από το ftth δίκτυο. Το μόνο που ξεχωρίζει και μας βοηθά στο να το καταλάβουμε είναι οι χρωματισμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί.

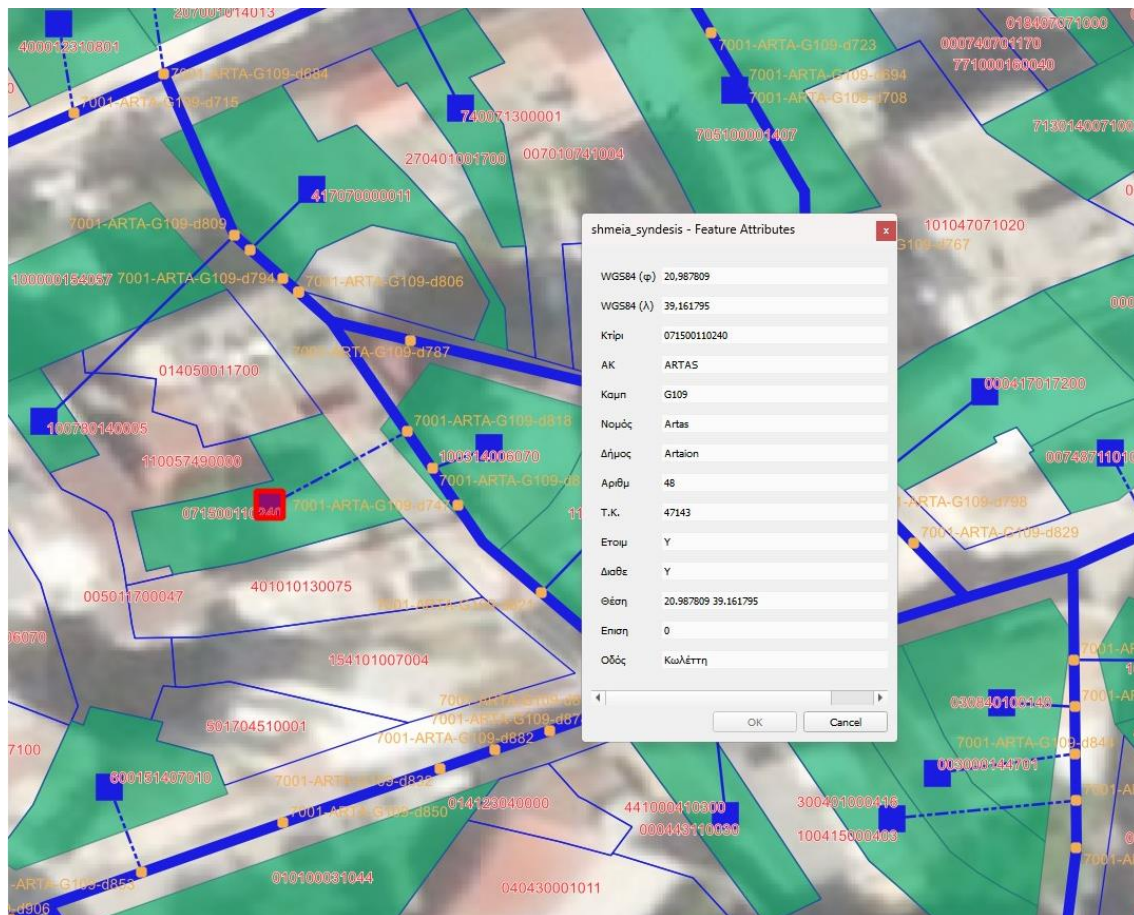


Στη συνέχεια εμβαθύνουμε στην πόλη για να αρχίσουν να γίνονται πιο ευδιάκριτες οι πληροφορίες που έχει το σχέδιό μας. Έτσι στη συνέχεια βλέπουμε ένα κομμάτι της πόλης. Με έντονο μπλε χρώμα φαίνεται ο κύριος κορμός των ινών που έχουν βγει απ την καμπίνα και οδεύουν στις οικίες. Με λεπτότερες μπλε γραμμές φαίνονται κατασκευές που γίνονται για συνδεθεί το κάθε κτίριο. Οι κατασκευές αυτές ονομάζονται και απομαστεύσεις καθώς η διαδικασία απαιτεί να ανοιχτεί στο σημείο εκείνο ο κύριος κορμός και να χρησιμοποιήσουμε μια ίνα. Με μπλε τετράγωνα φαίνονται οι τερματικές συνδέσεις που γίνονται στο κάθε κτίριο. Οι εισαγωγές αυτές ονομάζονται BEP. Ανοίγοντάς τες κάποιος βλέπει πόσοι πελάτες μπορούν να συνδεθούν. Για να μπορέσει να γίνει αυτό έχει προηγηθεί μελέτη του κτιρίου ως προς το πόσοι όροφοι υπάρχουν, πόσα διαμερίσματα ανά όροφο αν υπάρχουν στο ισόγειο καταστήματα. Αφού ολοκληρωθεί η μελέτη όταν είναι να γίνει η κατασκευή στην καμπίνα για την συγκεκριμένη ίνα μπαίνει το αντίστοιχο splitter. Αυτό σημαίνει ότι το splitting της ίνας θα είναι είτε 1:8 ή 1:16 ή 1:32 δηλαδή απ τη συγκεκριμένη ίνα θα εξυπηρετηθούν ή 8 ή 16 ή 32 πελάτες. Αν τώρα το κτίριο τυγχάνει να είναι μεγάλο και χρειαστεί περισσότερους από 32 πελάτες τότε χρησιμοποιείται και δεύτερη ίνα. Στις συνδέσεις φαίνονται λεπτές μπλε γραμμές και διακεκομμένες. Οι διακεκομμένες αναφέρονται σε κατασκευή που έχει γίνει με τη χρήση σωλήνωσης ενώ οι συνεχόμενες σε κατασκευή που έχει γίνει εναερίως λόγω δυσκολίας ως προς την εκσκαφή. Επίσης στην εικόνα βλέπουμε αρίθμηση ως προς το κτίριο με

πορτοκαλί χρώμα το λεγόμενο building id το οποίο είναι μοναδικό για κάθε κτίριο και το χαρακτηρίζει πάνω στο χάρτη για να μπορεί να γίνει χρήση του σαν σημείο αναφοράς.



Στη συνέχεια έχουμε απεικονίσει κάποιες πληροφορίες σχετικά με το σημείο τερματισμού που πιθανόν να χρειαζόταν κάποιος μηχανικός – τεχνικός. Βλέπουμε λοιπόν τις συντεταγμένες του σημείου, πληροφορίες σχετικές της πόλης (TK, όνομα οδού, αρίθμηση), την καμπύνα απ την οποία εξυπηρετείται, αν είναι συνδεδεμένο το κτίριο καθώς και το αν έχει διαθεσιμότητα. Με πορτοκαλί φαίνονται οι τομές (απομαστεύσεις) που γίνονται για τη σύνδεση του κτιρίου και οι οποίες έχουν και αυτές τις πληροφορίες τους όπως την καμπύνα που συνδέονται και μετά τη θέση που συνδέονται μέσα στην καμπύνα (πχ. d20).



Εδώ έχουμε φτιάξει να μας δίνει πληροφορίες σχετικά με την κάθε ίνα. Έτσι μαρκάροντας την ίνα που φαίνεται με κόκκινο μας δίνει τις σχετικές πληροφορίες. Ας πούμε εδώ μας λέει πόσα μέτρα είναι η συγκεκριμένη ίνα (πχ 48m), την αρίθμησή της σχετικά με τον κορμό που αποτελείται από 96 ίνες (πχ 77).

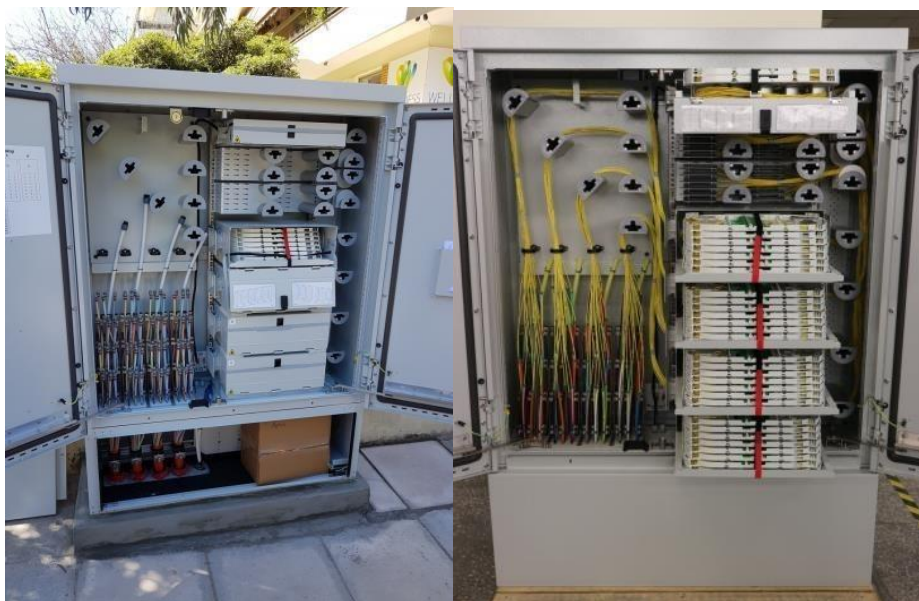
6.3 Ενεργός Εξοπλισμός



6.4 Υποδομές

Εδώ θα παρουσιάσουμε τις υποδομές που έχουν κατασκευαστεί και εγκατασταθεί στην πόλη. Ξεκινάμε με την καμπίνα οπτικών ινών, όπου βλέπουμε την οργάνωση την οποία έχει και θα εξηγήσουμε και τι περιλαμβάνει.

6.4.1. Καμπίνες PON



Αρστερά βλέπουμε την καμπίνα όταν εγκαθίσταται και δεξιά όταν γίνεται πλήρης ανάπτυξη. Η συγκεκριμένη καμπίνα μπορεί να υποστηρίξει με και 96 κτίρια. Οι χώροι της καμπίνας κατανομούνται ως εξής:

- ODF ζευκτικού ΚΟΙ χωρητικότητας 2x12 SC/APC
- Περιοχή Τοποθέτησης Splitter χωρητικότητας 24x 1:4 splitter με προερματισμένα κορδόνια SC/APC (δυντότητα εγκατάστασης και splitter 1:32)
- ODF οπτικού δικτύου διανομής χωρητικότητας 4x96 SC/APC. Περιλαμβάνει 4 υποϊκρίωματα με 8 πλαίσια το καθένα που με 12 όρια τερματισμού άρα 384 συνδέσεις)
- Χώρος διασύνδεσης σωληνίσκων χωρητικότητας 96 σωληνίσκων 4/7mm από 4 πολυσωλήνια (24x4/7+1x14/10) κατάλληλα διατεταγμένα καθ' ύψος.
- Χώρος αποθήκευσης περίσσειας κατάλληλου μήκους δικτύου διανομής.

Επίσης έχει γίνει μελέτη για αναβάθμιση των υφιστάμενων καμπινών που είχαν εγκατασταθεί τα προηγούμενα χρόνια στα πλαίσια του FFTC (Fibet To The Cabinet). Το έργο αυτό είχε πραγματοποιηθεί έτσι ώστε να βελτιωθούν οι ταχύτητες σε περιοχές που τα παλιά KV υπερέβαιναν τα 700μ από τα Αστικό Κέντρο. Πιο κάτω θα δούμε πως είναι αυτές οι καμπίνες και πως μπορεί να γίνει η αναβάθμισή τους καθώς και η χωρητικότητά τους.

6.4.2. Καμπίνες NGA

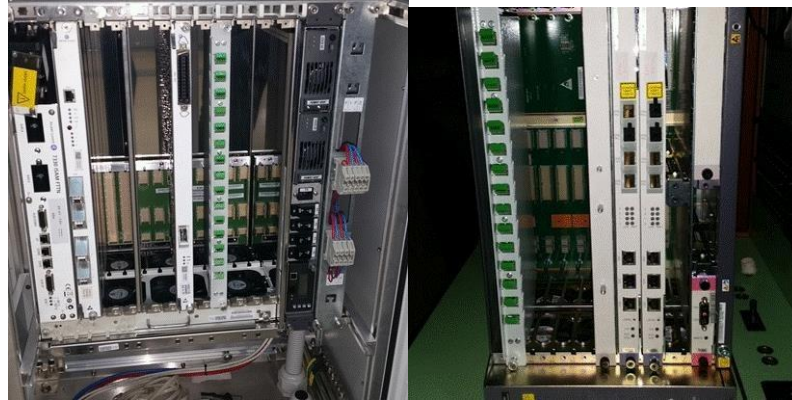


Αυτές είναι οι δυο διαφορετικού τύπου καμπίνες, οι οποίες είναι οι Γ3 αριστερά και Γ2 δεξιά. Εγκαθίστανται ανάλογα με τη χωρητικότητα που είχε το εκάστοτε παλιό KV. Σε αυτές τις καμπίνες έχει γίνει μελέτη για το πώς θα μετατραπούν και τι ανάγκες θα μπορούν να καλύψουν. Υπάρχουν βέβαια κάποιες ιδιαιτερότητες ανάλογα με τον προμηθευτή που χρησιμοποιήσουμε (Nokia / Huawei) τις οποίες και θα δούμε. Έτσι έχουμε:

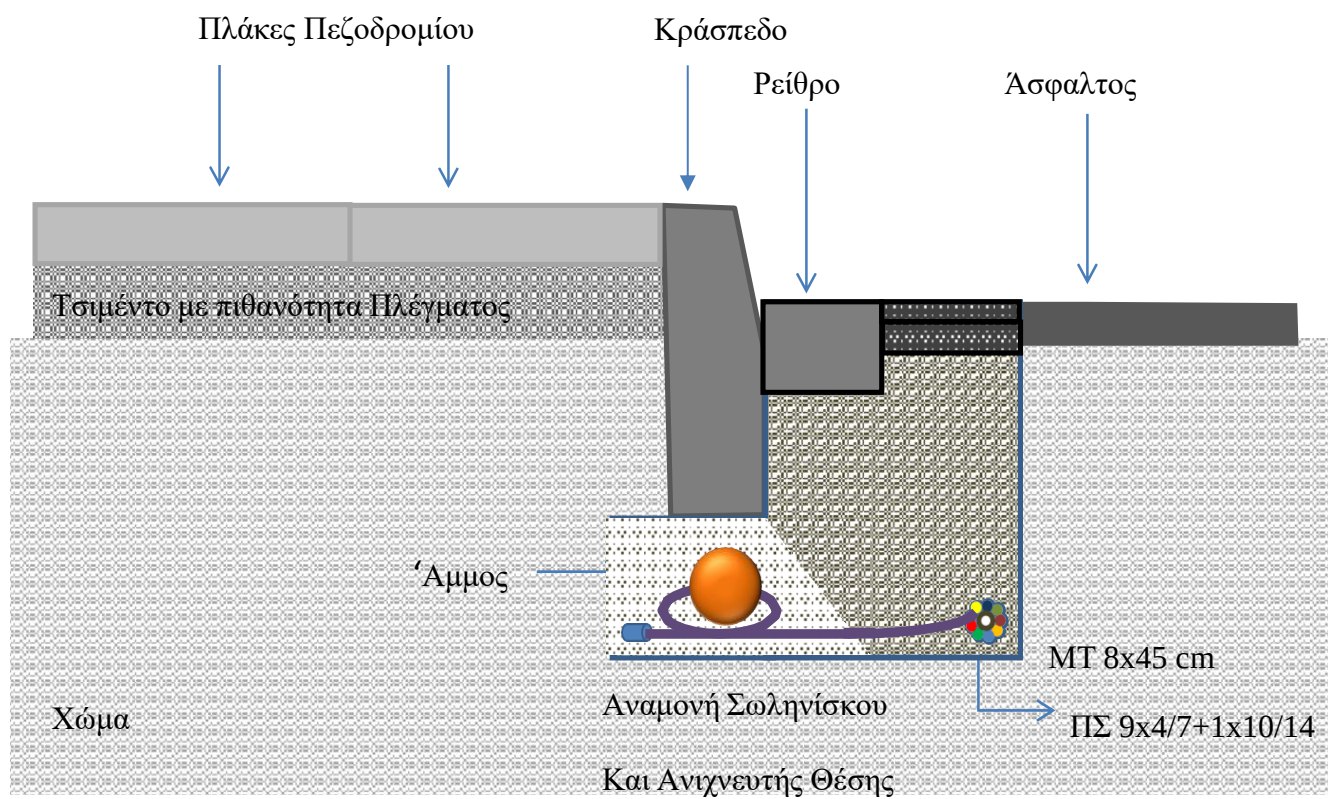
- Στο χώρο του ενεργού εξοπλισμού στα δεξιά δηλαδή τις κάθε καμπίνας, θα γίνει η εγκατάσταση των splitter και του odf διανομής.
- Σε ελεύθερο slot του DSLAM subrack εγκαθίστανται 3-4 Huawei mini dslam αλλιώς 5 Nokia mini dslam
- Γίνεται ανάπτυξη αυτόνομων μονάδων splitter block 3x 1:4 και 1x 1:16 για εγκατάσταση σε dslam slot και των δυο κατασκευαστών.

6.4.3. Splitter Καμπινών

Και η εικόνα των splitter είναι πιο κάτω για Huawei και Nokia αντίστοιχα.



6.4.4. Χωματουργικά



6.5 Μετρήσεις

6.5.1. Όργανα



6. Συμπεράσματα

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα αποτελούν μια πολύ διαδεδομένη και σημαντική λύση στον τομέα των επικοινωνιών μέσω διαδικτύου. Παρουσιάστηκε μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση για τις τεχνολογίες PON. Συζητήθηκε ο τρόπος που δημιουργήθηκε η τεχνολογία PON και πώς αυτή εξελίχθηκε με την πάροδο του χρόνου. Η βασική αρχιτεκτονική και τα απαραίτητα στοιχεία οποιουδήποτε παθητικού οπτικού δικτύου μελετήθηκαν διεξοδικά. Οι βασικοί παράγοντες που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του PON ξεκινώντας από το APON στο NG-PON2 συζητούνται επίσης σε αυτή την εργασία. Έχουμε επίσης πραγματοποιηθεί μια συγκριτική ανάλυση των διαφορετικών τεχνολογιών PON και συζητήθηκε η συνύπαρξη αυτών των τεχνολογιών με το υπάρχον δίκτυο PON. Συζητήθηκαν επίσης οι διάφορες λύσεις που είναι βιώσιμες για το δίκτυο PON επόμενης γενιάς. Λόγω του κόστους, των απαιτήσεων αναβάθμισης του δικτύου και της συνύπαρξης με το παλαιού τύπου δίκτυο PON, το TWDM-PON επιλέγεται ως η κύρια λύση για το NG-PON2. Ιδιαίτερη αναφορά πραγματοποιήθηκε επίσης στο τι θα είναι το μέλλον μετά το NG-PON2, καθώς το NG-PON2 δε θα είναι το τέλος της εποχής του PON. Οι διαφορετικές τεχνολογίες που θα ανταγωνιστούν το NG-PON2 στο μέλλον και το 100G EPON.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbas, H. S., & Gregory, M. A. (2016a). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of Network and Computer Applications*, 67, 53–74. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.015>
- Abbas, H. S., & Gregory, M. A. (2016b). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of Network and Computer Applications*, 67, 53–74. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.015>
- Abrams, M., Becker, P. C., Fujimoto, Y., O’Byrne, V., & Piehler, D. (2005). FTTP deployments in the United States and Japan-equipment choices and service provider imperatives. *Journal of Lightwave Technology*, 23(1), 236–246. <https://doi.org/10.1109/JLT.2004.840340>
- Ansari, N., & Zhang, J. (2013). *Media Access Control and Resource Allocation in GPON* (pp. 23–28). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3939-4_3
- Banchi, L., Corsini, R., Presi, M., & Ciaramella, E. (2011). Investigation of the Effects of Chirped RZ Signals in Reducing the Transmission Impairments in R-SOA-Based Bidirectional PONs. *Journal of Lightwave Technology*, 29(8), 1165–1171. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2120596>
- Banerjee, A., Park, Y., Clarke, F., Song, H., Yang, S., Kramer, G., Kim, K., & Mukherjee, B. (2005). Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [Invited]. *Journal of Optical Networking*, 4(11), 737. <https://doi.org/10.1364/JON.4.000737>
- Bindhaiq, S., Supa’at, A. S. M., Zulkifli, N., Mohammad, A. B., Shaddad, R. Q., Elmagzoub, M. A., & Faisal, A. (2015a). Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2). *Optical Switching and Networking*, 15, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2014.06.007>
- Bindhaiq, S., Supa’at, A. S. M., Zulkifli, N., Mohammad, A. B., Shaddad, R. Q., Elmagzoub, M. A., & Faisal, A. (2015b). Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2). *Optical Switching and Networking*, 15, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2014.06.007>
- BOSTERN♦K, Z. (2018). Bandwidth Scheduling Methods for the Upstream Traffic in Passive Optical Networks. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1(4), 11–14. <https://doi.org/10.15199/48.2018.04.03>
- Chanclou, P., Gosselin, S., Palacios, J. F., Alvarez, V. L., & Zouganeli, E. (2006). Overview of the optical broadband access evolution: a joint article by operators in the IST network of excellence e-Photon/One. *IEEE Communications Magazine*, 44(8), 29–35. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2006.1678106>

- Chen, C., Zhang, C., Zhang, W., Jin, W., & Qiu, K. (2014). Scalable and reconfigurable generation of flat optical comb for WDM-based next-generation broadband optical access networks. *Optics Communications*, 321, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.01.059>
- Chen guangjun. (2012). A design method for Ethernet Passive Optical Network. *2012 International Conference on Computer Science and Information Processing (CSIP)*, 1000–1003. <https://doi.org/10.1109/CSIP.2012.6309025>
- Chi, S., Yeh, C.-H., & Chow, C.-W. (2009). *Broadband access technology for passive optical network* (B. B. Dingel, R. Jain, & K. Tsukamoto, Eds.; p. 723408). <https://doi.org/10.1117/12.816599>
- Chocliouros, I. (2010). *Optical Access Networks and Advanced Photonics* (I. P. Chochliouros & G. A. Heliotis, Eds.). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-60566-707-2>
- Choi, B.-H., & Lee, S. S. (2011). The effect of AWG-filtering on a bidirectional WDM-PON link with spectrum-sliced signals and wavelength-reused signals. *Optics Communications*, 284(24), 5692–5696. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.09.007>
- D. de Felipe et al. (2013). 40nm tuneable source for colourless ONUs based on dual hybridly integrated polymer waveguide grating lasers. *39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013)*, 1–3.
- D. K. Mynbaev. (2005). *Broadband optical access: components for passive optical networks (overview)*. (WDM Networking IV).
- Deniel, Q., Saliou, F., Neto, L. A., Genay, N., Charbonnier, B., Erasme, D., & Chanclo, P. (2012). Up to 10 Gbit/s transmission in WDM-PON architecture using External Cavity Laser based on Self-Tuning ONU. *National Fiber Optic Engineers Conference, JTh2A.55*. <https://doi.org/10.1364/NFOEC.2012.JTh2A.55>
- Dhaini, A., & Assi, C. (2009). *Quality of Service in Ethernet Passive Optical Networks (EPONs)* (pp. 169–196). https://doi.org/10.1007/978-0-387-92131-0_8
- Dias, L. P., dos Santos, A. F., Pereira, H. A., de Andrade Almeida, R. C., Giozza, W. F., de Sousa, R. T., & Assis, K. D. R. (2022). Evolutionary Strategy for Practical Design of Passive Optical Networks. *Photonics*, 9(5), 278. <https://doi.org/10.3390/photonics9050278>
- El-Nahal, F., & Hanik, N. (2020). Technologies for future wavelength division multiplexing passive optical networks. *IET Optoelectronics*, 14(2), 53–57. <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2018.5056>
- Feng, H., Ge, J., Xiao, S., & Fok, M. P. (2014). Suppression of Rayleigh backscattering noise using cascaded-SOA and microwave photonic filter for 10 Gb/s loop-back WDM-PON. *Optics Express*, 22(10), 11770. <https://doi.org/10.1364/OE.22.011770>
- G.983.1: *Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks (PON)*. (n.d.).

- Gianordoli, S., Rasztoivits-Wiech, M., Stadler, A., & Grabenhorst, R. (2006). Next generation PON. *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 123(3), 78–82. <https://doi.org/10.1007/s00502-006-0320>
- Guo, Q., & Tran, A. v. (2012). Combined utilization of partial-response coding and equalization for high-speed WDM-PON with centralized lightwaves. *Optics Express*, 20(27), 27981. <https://doi.org/10.1364/OE.20.027981>
- Hernandez, J. A., Sanchez, R., Martin, I., & Larrabeiti, D. (2019). Meeting the Traffic Requirements of Residential Users in the Next Decade with Current FTTH Standards: How Much? How Long? *IEEE Communications Magazine*, 57(6), 120–125. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1800173>
- Hernandez, M., Arcia, A., Alvizu, R., & Huerta, M. (2012). A review of XDMA-WDM-PON for Next Generation Optical Access Networks. *2012 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GIIS.2012.6466763>
- Horváth, T., Kočí, L., Jurčík, M., & Filka, M. (2015). Coexistence GPON, NG-PON, and CATV systems. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 21(2), 61–66. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V21P211>
- Hossen, M., & Hanawa, M. (2012). Adaptive limited DBA algorithm for multi-OLT PON-based FTTH and wireless sensor networks. *2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 372–377. <https://doi.org/10.1109/APCC.2012.6388164>
- James, K. A., & Fisher, S. (2002). Developments In Optical Access Networks. *BT Technology Journal*, 20(4), 81–90. <https://doi.org/10.1023/A:1021378600830>
- J.J. Vegas Olmos; J. Sugawa; H. Ikeda; K. Sakamoto. (2011). GPON and 10G-EPON coexisting systems and filtering issues at the OLT. *16th Opto-Electronics and Communications Conference*.
- Jongwook Jang, & Park, E. K. (2000). Dynamic resource allocation for quality of service on a PON with home networks. *IEEE Communications Magazine*, 38(6), 184–190. <https://doi.org/10.1109/35.846092>
- K. S. Sri and T. Sundararajan. (2013). Auto-correlation and cross-correlation analysis of prime and walsh codes for optical CDMA networks. *(ICCSP)International Conference Communications and Signal Processing* , 639–643.
- K. W. Shum. (2015). Optimal three-dimensional optical orthogonal codes of weight three. . *Designs, Codes and Cryptography*, 75, 109–126.
- Keiji Tanaka, A. A. and Y. H. (2010). IEEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4), 651–661.
- L. Leng, L. W. B. L. and J. Y. (n.d.). *The Present Situation and Development Trend of 10G PON Technology*.

- Li, Z., Yi, L., Zhang, Y., Dong, Y., Xiao, S., & Hu, W. (2012). Compatible TDM/WDM PON Using a Single Tunable Optical Filter for Both Downstream Wavelength Selection and Upstream Wavelength Generation. *IEEE Photonics Technology Letters*, 24(10), 797–799. <https://doi.org/10.1109/LPT.2012.2186435>
- Liu, B., Xin, X., Zhang, L., & Yu, J. (2012). 10992-Gb/s WDM-OFDMA Uni-PON with Dynamic Resource Allocation and Variable Rate Access. *Optics Express*, 20(10), 10552. <https://doi.org/10.1364/OE.20.010552>
- Liu, D., Fu, S., Tang, M., Shum, P., & Liu, D. (2012). Rayleigh backscattering noise in single-fiber loopback duplex WDM-PON architecture. *Frontiers of Optoelectronics*, 5(4), 435–438. <https://doi.org/10.1007/s12200-012-0292-8>
- Luo, Y., Zhou, X., Effenberger, F., Yan, X., Peng, G., Qian, Y., & Ma, Y. (2013). Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2). *Journal of Lightwave Technology*, 31(4), 587–593. <https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2215841>
- Messerli, F. H., & Grossman, E. (2002). Beta-blocker therapy and depression. *JAMA*, 288(15), 1845–1846; author reply 1846.
- Muciaccia, T., Gargano, F., & Passaro, V. (2014a). Passive Optical Access Networks: State of the Art and Future Evolution. *Photonics*, 1(4), 323–346. <https://doi.org/10.3390/photonics1040323>
- Muciaccia, T., Gargano, F., & Passaro, V. (2014b). Passive Optical Access Networks: State of the Art and Future Evolution. *Photonics*, 1(4), 323–346. <https://doi.org/10.3390/photonics1040323>
- N. Ghazisaidi, M. S. and M. M. (2011). Survivability Analysis of Next-Generation Passive Optical Networks and Fiber-Wireless Access Networks. *IEEE Transactions on Reliability*, 60(2), 479–492.
- Nesset, D. (2015). NG-PON2 Technology and Standards. *Journal of Lightwave Technology*, 33(5), 1136–1143. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2389115>
- Prat, J., Arellano, C., Polo, V., & Bock, C. (n.d.). Optical Network Unit Based on a Bidirectional Reflective Semiconductor Optical Amplifier. In *Optical Networks and Technologies* (pp. 273–278). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-387-23178-1_32
- Presi, M., Proietti, R., Prince, K., Contestabile, G., & Ciaramella, E. (2008). A 80 km reach fully passive WDM-PON based on reflective ONUs. *Optics Express*, 16(23), 19043. <https://doi.org/10.1364/OE.16.019043>
- Ricciardi, S., Santos-Boada, G., Careglio, D., & Domingo-Pascual, J. (2012). GPON and EP2P: A techno-economic study. *2012 17th European Conference on Networks and Optical Communications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NOC.2012.6249954>
- S. Gorshe and J. Mandin. (2009). Introduction to IEEE 802.3 av 10Gbit/s Ethernet Passive Optical Networks (10G EPON). *China Communications*, 6, 136–147.

- Sahu, P. P. (2020). FTTH Standards, Deployments, and Issues. In *Advances in Optical Networks and Components* (pp. 403–411). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429293962-10>
- Satoshi Yoshima, Y. T. N. K. N. W. J. N. and K.-I. K. (2013). Full-Duplex, Extended-Reach 10G-TDM-OCDM-PON System Without En/Decoder at ONU. *Journal of Lightwave Technology*, 31(1), 43–49.
- Segarra, J., Sales, V., & Prat, J. (2013). GPON Redundancy Eraser Algorithm for Long-Reach extension. *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2013.6602857>
- Selmanovic, F., & Skaljo, E. (2010). GPON in Telecommunication Network. *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*, 1012–1016. <https://doi.org/10.1109/ICUMT.2010.5676500>
- S.F. Shaukat, U. I. and S. N. (2011). Monte Carlo Analysis of Broadband Passive Optical Networks. *IDOSI*, 12(8), 1156–1164.
- Shachaf, Y., Chang, C.-H., Kourtessis, P., & Senior, J. M. (2007). Multi-PON access network using a coarse AWG for smooth migration from TDM to WDM PON. *Optics Express*, 15(12), 7840. <https://doi.org/10.1364/OE.15.007840>
- Skubic, B., Jiajia Chen, Ahmed, J., Wosinska, L., & Mukherjee, B. (2009). A comparison of dynamic bandwidth allocation for EPON, GPON, and next-generation TDM PON. *IEEE Communications Magazine*, 47(3), S40–S48. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4804388>
- Sotiropoulos, N., Koonen, T., & de Waardt, H. (2013a). Advanced Differential Modulation Formats for Optical Access Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(17), 2829–2843. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2267271>
- Sotiropoulos, N., Koonen, T., & de Waardt, H. (2013b). Advanced Differential Modulation Formats for Optical Access Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(17), 2829–2843. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2267271>
- Sotiropoulos, N., Koonen, T., & de Waardt, H. (2013c). Advanced Differential Modulation Formats for Optical Access Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(17), 2829–2843. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2267271>
- Termos, H., Mansour, A., & Nasser, A. (2021). Simultaneous up- and down-frequency mixing based on a cascaded SOA-MZIs link. *Applied Optics*, 60(27), 8336. <https://doi.org/10.1364/AO.432179>
- Tian, Y., Chang, Q., & Su, Y. (2008). A WDM passive optical network enabling multicasting with color-free ONUs. *Optics Express*, 16(14), 10434. <https://doi.org/10.1364/OE.16.010434>

- v. Eržen and B. Batagelj. (n.d.). *NG-PON1: technology presentation, implementation in practice and coexistence with the GPON system*.
- van de Voorde, I., & van der Plas, C. (1997). Full service optical access networks: ATM transport on passive optical networks. *IEEE Communications Magazine*, 35(4), 70–75. <https://doi.org/10.1109/35.570721>
- Wang, G., Christensen, N. D., Wigdahl, B., Guttentag, S. H., & Floros, J. (2003). Differences in N-linked glycosylation between human surfactant protein-B variants of the C or T allele at the single-nucleotide polymorphism at position 1580: implications for disease. *The Biochemical Journal*, 369(Pt 1), 179–184. <https://doi.org/10.1042/BJ20021376>
- Wen-Piao Lin. (1997). Reducing multiple optical carriers interference in broad-band passive optical networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9(3), 368–370. <https://doi.org/10.1109/68.556076>
- Wong, E. (2014). Survivable architectures for time and wavelength division multiplexed passive optical networks. *Optics Communications*, 325, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.03.084>
- Xu, L., Chow, C. W., & Tsang, H. K. (2011). Bidirectional colorless wired and wireless WDM-PON with improved dispersion tolerance for radio over fiber. *Optics Communications*, 284(14), 3518–3521. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.03.085>
- Y. Won, D. K. Y. P. S. P. and S. H. (2009). Optical Fiber Technology 1.25-Gb / s bidirectional colorless WDM-PON based on RSOA using subcarrier detection and optical carrier suppression,. *Opt. Fiber Technol.*, 15(2), 141–144.
- Yi, L., Li, Z., Dong, Y., Xiao, S., Chen, J., & Hu, W. (2012). Upstream capacity upgrade in TDM-PON using RSOA based tunable fiber ring laser. *Optics Express*, 20(9), 10416. <https://doi.org/10.1364/OE.20.010416>
- Yin H and R. D. (2007). *Optical code division multiple access theory and application*,.
- Yoshima, S., Noda, M., Igawa, E., Shirai, S., Ishii, K., Nogami, M., & Nakagawa, J. (2012). Recent progress of high-speed burst-mode transceiver technologies for TDM-PON systems. *2012 21st Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*, 59–62. <https://doi.org/10.1109/WOCC.2012.6198148>
- Zahedi, S., & Salehi, J. A. (2000). Analytical comparison of various fiber-optic CDMA receiver structures. *Journal of Lightwave Technology*, 18(12), 1718–1727. <https://doi.org/10.1109/50.908700>
- Zhang, Z., Felipe, D., Katopodis, V., Groumas, P., Kouloumentas, C., Avramopoulos, H., Dupuy, J.-Y., Konczykowska, A., Dede, A., Beretta, A., Vannucci, A., Cangini, G., Dinu, R., Schmidt, D., Moehrl, M., Runge, P., Choi, J.-H., Bach, H.-G., Grote, N., ... Schell, M. (2015). Hybrid Photonic Integration on a Polymer Platform. *Photonics*, 2(3), 1005–1026. <https://doi.org/10.3390/photonics2031005>
- Żotkiewicz, M. (2018). Classifiers Applied to Dimensioning of Splitters in PON Design. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(6), 633. <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000633>

[Οπισθόφυλλο. Κενή σελίδα]