

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΤΟΠΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΤΣΑΒΔΑΡΙΔΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια
ΠΕΤΡΙΔΟΥ ΣΟΦΙΑ, Επίκουρη Καθηγήτρια

Θεσσαλονίκη, Αύγουστος 2020

Περίληψη

Η τεχνολογία των Παθητικών Οπτικών Τοπικών Δικτύων (Passive Optical Local Area Network - POL) θεωρείται το μέλλον στα τοπικά δίκτυα, καθώς η χρήση της οπτικής ίνας εντός τοπικής περιοχής και όχι απλά ως μέσου σε δίκτυα πρόσβασης συνοδεύεται από πλεονεκτήματα όπως η ταχύτητα, η απόδοση, η ανθεκτικότητα, η ασφάλεια και η κλιμάκωση. Προβλέπεται ότι στο άμεσο μέλλον το 30% των LANs θα υλοποιείται με τεχνολογία POL. Τα Παθητικά Οπτικά Τοπικά Δίκτυα πολλοί πιστεύουν ότι θα έχουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη και εφαρμογή του Tactile Internet, του Internet που εκτός από οπτικά και ηχητικά ερεθίσματα θα εισαγάγει και ένα νέο, αυτό της αφής. Ο άνθρωπος θα μπορεί να χειρίζεται απομακρυσμένα, ρομποτικούς βραχίονες με την ίδια ευκολία και αίσθηση σαν να ήταν εκεί. Πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής μπορεί να είναι η βιομηχανική παραγωγή, η ιατρική αλλά και ο απομακρυσμένος έλεγχος καταστάσεων σε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως πυρηνικά ατυχήματα. Για να επιτευχθεί αυτή η αμεσότητα στον χειρισμό την απόκριση και την αίσθηση, πρέπει να υπάρχει πολύ μικρό latency, σε συνδυασμό με μεγάλη διαθεσιμότητα, αξιοπιστία και ασφάλεια.

Λέξεις Κλειδιά: POL, PON, TWDM, TDM, WDM, TI, TI-DWBA.

Abstract

Passive Optical Local Area Network (POL) technology is considered the future of local area networks, as the use of fiber optics within a local area and not just as a mean of access networks is accompanied by advantages such as speed, performance, durability, safety and scalability. It is predicted that in the near future 30% of LANs will be implemented with POL technology. Many believe that the Passive Optical Local Area Networks will play a key role in the development and implementation of Tactile Internet, the Internet that in addition to visual and audio stimulus will introduce a new one, that of touch (haptic). Human will be able to operate remote, robotic arms with the same ease and feel as if he were there. Scope of application of this technology can be industrial production, medicine and remote control of situations in adverse environmental conditions such as nuclear accidents. To achieve this immediacy in handling the response and feel, there must be very little latency, combined with high availability, reliability and safety.

Keywords: POL, PON, TWDM, TDM, WDM, TI, TI-DWBA

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την εκτίμησή μου στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, επίκουρη καθηγήτρια κ. Πετρίδου Σοφία για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ και να μελετήσω αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα καθώς και για τη βοήθεια και τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη και συμπαράσταση που μου προσφέρουν σε κάθε προσπάθειά μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Αντικείμενο έρευνας	1
1.2	Σκοπός της διπλωματικής	2
1.3	Μεθοδολογία	2
1.4	Δομή Εργασίας	2
2	Παθητικά Οπτικά Τοπικά Δίκτυα	3
2.1	Εισαγωγή	3
2.2	Οπτικές Ύφες	4
2.2.1	Είδη Οπτικών Ινών	7
2.2.2	Οπτικοί Πομποί	8
2.3	Προδιαγραφές μονότροπης οπτικής ίνας κατά ITU	9
2.4	Παθητικά οπτικά δίκτυα	13
2.4.1	Εισαγωγή	13
2.4.2	Αρχιτεκτονική δικτύου POL	15
2.4.3	Οικονομικά/Περιβαλλοντικά Πλεονεκτήματα POL	18
2.4.4	Τεχνικά Πλεονεκτήματα POL	20
2.5	ATM PON – Broadband PON (APON/BPON)	22
2.6	Ethernet PON (EPON)	24
2.7	Gigabit PON (GPON)	25
2.7.1	Αρχιτεκτονική GPON	25
2.7.2	Σύσταση G.984.1 (GPON)	26
2.7.3	Σύσταση G.984.2	27
2.7.4	Επίπεδο Σύγκλισης Μετάδοσης G.984.3	30
2.8	XG-PON	33
2.9	NG-PON	34
3	Πρωτόκολλα Επιπέδου Πρόσβασης	36
3.1	Εισαγωγή	36
3.2	Τεχνικές Υλοποίησης	36
3.3	Σημαντικές επιλογές του TWDM-PON	39

3.4 Τεχνικές Παράμετροι ζεύξης για TWDM-PON	42
3.5 Λοιπές Τεχνικές Απαιτήσεις	43
3.5.1 ONU χωρίς εξάρτηση από το μήκος κύματος	43
3.5.2 Ευελιξία φάσματος	43
3.5.3 Μεταγωγή ONU σε διαφορετικά μήκη κύματος	44
3.5.4 Ανίχνευση και μείωση επίδρασης αυθαίρετων ONU	45
3.5.5 Απαιτήσεις ανθεκτικότητας και εφεδρείας	46
3.5.6 Απαιτήσεις επέκτασης εμβέλειας	46
3.5.7 Μείωση κατανάλωσης ενέργειας	47
3.6 Μετάβαση	48
4 Απτικό Διαδίκτυο – Δυναμική Κατανομή Εύρους Ζώνης	51
4.1 Εισαγωγή	51
4.2 Γενική Περιγραφή	52
4.3 Κοινωνικές Επιδράσεις	53
4.4 Αρχιτεκτονική Απτικού Διαδικτύου	55
4.4.1 Απτικές Συσκευές	57
4.4.2 Κωδικοποίηση / αποκωδικοποίηση	58
4.4.3 Πολυτροπική πληροφορία αισθήσεων	60
4.4.4 Ευστάθεια του απτικού ελέγχου	61
4.4.5 Υπεραξιοπιστία	61
4.4.6 Υπεραποκρισιμότητα	63
4.4.7 Συνεργατικές, πολυχρηστικές απτικές επικοινωνίες	64
4.4.8 Ασφάλεια	64
4.5 TI-DWBA	65
5 Μοντελοποίηση EPON	69
5.1 Εισαγωγή	69
5.2 Ερωτήματα	70
6 Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες	77
6.1 Συμπεράσματα	77
6.2 Μελλοντικές εργασίες	77

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Σύγκριση απαιτήσεων σε χώρο και βάρος μεταξύ ηλεκτρικής και οπτικής καλωδίωσης (Nikos Anerousis et al, 2013).....	6
Εικόνα 2: Πολύτροπη και μονότροπη οπτική ίνα	7
Εικόνα 3: Διαφορετικές αρχιτεκτονικές στα δίκτυα πρόσβασης (Mukherjee, 2006).	14
Εικόνα 4: Παραδοσιακή αρχιτεκτονική τριών επιπέδων (Nokia, 2016).	15
Εικόνα 5: Γενική Αρχιτεκτονική POL (Nokia, 2016).....	16
Εικόνα 6: Λεπτομερής Αρχιτεκτονική POL (Sean McCloud, 2017).....	17
Εικόνα 7: Χρονική Εξέλιξη των Δικτύων PON.....	22
Εικόνα 8: Αρχιτεκτονική GPON	26
Εικόνα 9: Προσθήκη χρόνου ασφαλείας ανάμεσα σε ριπές (ITU-T Recommendation G.984.2, 2003).	29
Εικόνα 10: Πλαίσιο GPON Κατεύθυνσης Καθόδου (ITU-T Recommendation G.984.3, 2010).....	30
Εικόνα 11: Δομή υποπεδίου US BW Map	32
Εικόνα 12: Πλαίσιο GPON κατεύθυνσης ανόδου	32
Εικόνα 13: PON με χρήση TDM (Y.Luo, 2013).	37
Εικόνα 14: PON με χρήση WDM (Y.Luo, 2013).....	38
Εικόνα 15: Κατανομή μηκών κύματος για TWDM-PON και συνύπαρξη (α) με GPON και XG-PON, (β) μόνο με GPON (H.Yang, 2013).	40
Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική Δικτύου με συνύπαρξη όλων των τεχνολογιών	41
Εικόνα 17: Δυναμικό σύστημα TWDM-PON (H.Yang, 2013).....	45
Εικόνα 18: Αρχιτεκτονική Απτικού Διαδικτύου (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).....	57
Εικόνα 19: Εφαρμογή του αλγόριθμου πρόβλεψης για περιορισμό των δεδομένων (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).	60
Εικόνα 20: Νοσοκομειακή εγκατάσταση με υπηρεσία TI. Το TWDM-POL συνδέει όλα τα σημεία ενδιαφέροντος με αισθητήρες BAN (Body Area Network) μεταξύ τους και με το διαδίκτυο (E.Wong, 2016).	66

Εικόνα 21: Η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς σε 1 ONU 1000 πακέτα με διαφορετικούς ρυθμούς άφιξης.	71
Εικόνα 22: Η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς σε 4 ONUs 1000 πακέτα με μεταβαλλόμενο ρυθμό άφιξη.	72
Εικόνα 23: Η αναμενόμενη καθυστέρηση σε σχέση με την διάρκεια του sleep mode. .	73
Εικόνα 24: Η πιθανότητα μία ONU να βρεθεί σε sleep mode όσο είναι σε listen mode.	74
Εικόνα 25: Η αποδεκτή καθυστέρηση και το class of Service.	75
Εικόνα 26: Η αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τον ρυθμό άφιξης και το sleep mode.....	76

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Συγκριτική παράθεση χαρακτηριστικών των ινών με τα χάλκινα καλώδια....	5
Πίνακας 2: Προδιαγραφές Μονότροπης Οπτικής Ίνας (Σύσταση G.652.B της ITU-T) (ITU-T Recommendation G.652, 2016).	13
Πίνακας 3: Σύγκριση Τεχνολογιών PON	21
Πίνακας 4: Κλάσεις ισχύος GPON.	28
Πίνακας 5: Προδιαγραφές NG-PON2, σύμφωνα με την σύσταση ITU-T G989.1	42
Πίνακας 6: Χώρος καταστάσεων μοντέλου με μία ONU.	70
Πίνακας 7: Πίνακας τιμών για το ερώτημα ποια η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς σε 1 ONU 1000 πακέτα με μεταβαλλόμενο ρυθμό άφιξης.	71
Πίνακας 8: Χώρος καταστάσεων μοντέλου με τέσσερις ONUs.	72
Πίνακας 9: Πίνακας τιμών για το ερώτημα ποια η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς σε 4 ONU 1000 πακέτα με μεταβαλλόμενο ρυθμό άφιξης.	72
Πίνακας 10: Η αναμενόμενη καθυστέρηση για μοντέλο με μία και τέσσερις ONU.	73
Πίνακας 11: Η πιθανότητα μία ONU να βρεθεί σε sleep mode όσο είναι σε listen mode σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.	74
Πίνακας 12: Αναμενόμενη καθυστέρηση στην μετάδοση πακέτων φωνής και βίντεο. .	75
Πίνακας 13: Αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας.....	76

Λίστα με ακρωνύμια

10G-PON = 10 Giga Ethernet PON
ADSL = Asymmetric DSL
AllocID = Allocation Identifier
APON = Asynchronous PON
ARQ = Automatic Repeat reQuest
ATM = Asynchronous Transfer Mode
BAN = Body Area Network
BER = Bit Error Rate
BIP = Bit Interleaved Parity
BPON = Broadband PON
CapEx = Capital Expenditure
CRC = Cyclic Redundancy Check
DBR = Dynamic Bandwidth Report
DFB = Distributed Feedback
DGD = Differential Group Delay
EFM = Ethernet at First Mile
EPON = Ethernet PON
FEC = Forward Error Correction
FSAN = Full Service Access Network
FTTB/H = Fiber To The Building/Home
FTTD = Fiber To The Desktop
FTTH = Fiber To The Home
FTTx = Fiber-To-The-x where x stands for the place the ONU is located
GEM = GPON Encapsulation Method
GEAPON = Giga Ethernet PON
GFP = Generic Framing Procedure
GPON = Gigabit PON
GTC Layer = GPON Transmission Convergence layer
HIS = Human System Interface
IoT = Internet of Things
IP = Internet Protocol
IPTV = Internet Protocol television
ITU-T = International Telecommunication Union
LAN = Local Area Network
LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED = Light Emitting Diode
LTE = Long-Term Evolution
MAC = Media Access Control
MAN = Metropolitan Area Network
MLSE = Maximum Likelihood Sequence Estimation
MSE = Mean Squared Error

NCS = Networked Control Systems
NG-PON = New Generation Passive Optical Network
NRZ = Non Return to Zero
OFDM = orthogonal frequency-division multiplexing
OLT = Optical Line Terminal
ONU = Optical Network Unit
OpEx = Operational Expenditure
OSI = Open Systems Interconnection
PCB = Physical Control Block
Plend = Payload Length Indicator
PLO = Physical Layer Overhead
PLOAM = Physical Layer OAM
PLOAM = Physical Layer Operation, Administration, and Management
PLS = Power Leveling Sequenc
PMD = Physical Medium Dependent
POL = Passive Optical LAN
PON = Passive Optical Network
QoS = Quality of Service
RTP = Real-time Transport Protocol
SC/APC = Subscriber Connector/Angle-polished Physical Contact
Sstart = Start Pointer
Sstop = Stop Pointer
TCP = Transmission Control Protocol
TDM = Time Division Multiplexing
TDMA = Time Division Multiple Access
TI = Tactile Internet
TIA = Telecommunication Industries Association
TTI = Transmission Time Interval
TWDM = Time Wavelength Division Multiplexing
UDP = User Datagram Protocol
UPS = Uninterruptible Power Supply
URC = Ultra-Reliable Communication
VDSL = Very high data rate DSL
WAN = Wide Area Networks
WAP = Wireless Access Point
WDM = Wavelength Division Multiplexing
WDM = Wavelength Division Multiplexing
XG-PON = 10 Giga Ethernet PON
IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineering
TI-DWBA = Tactile Internet – Dynamic Wavelength & Bandwidth Allocation

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο έρευνας

Το διαδίκτυο από τότε που παρουσιάστηκε πρώτη φορά έως και σήμερα, συνεχώς εξελίσσεται. Η ανάγκη για περισσότερο εύρος ζώνης αυξάνεται καθώς αυξάνεται και ο αριθμός των συσκευών που είναι συνδεδεμένες σε αυτό. Φορητοί υπολογιστές, έξυπνα κινητά, έξυπνα ρολόγια, ταμπλέτες, αισθητήρες και συσκευές «έξυπνου σπιτιού», απτικές συσκευές, έχουν διαφορετικές απαιτήσεις συνδεσιμότητας, καθυστέρησης, εύρους ζώνης, εγγυημένης απόδοσης ή εξαιρετικά αξιόπιστης. Δηλαδή μια πραγματική πρόκληση για τους παρόχους δίνοντάς τους την ίδια στιγμή την δυνατότητα να παρουσιάσουν νέες τεχνολογίες. Μία τέτοια πρόκληση είναι και οι περιορισμοί των δικτύων με καλώδια χαλκού και οι αντικατάστασή τους από τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Network - PON). Το Παθητικό Οπτικό Δίκτυο Επόμενης Γενεάς 2 (Next-Generation Passive Optical Networking 2 - NG-PON2), είναι αυτό που έχει της δυνατότητες να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των χρηστών ακόμα και για τις απαιτητικές απτικές συσκευές.

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON) μπορούν να υποστηρίξουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών, όπως υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο, με την χρήση μίας μονής οπτικής ίνας, καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια ανά μετάδοση bit συγκριτικά με ένα δίκτυο χαλκού, λόγω της παθητικής φύσης της.

Στα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON), οι μονάδες οπτικού δικτύου (ONU) είναι οι περισσότερο ενεργοβόρες συσκευές, καθώς είναι υπεύθυνες για σχεδόν το 65% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ενός PON (Tucker, 2011). Ο λόγος είναι, ότι ένα ONU κάνει λήψη και έλεγχος όλων των πακέτων, ακόμη και όταν αυτά δεν προορίζεται για αυτό. Η εισαγωγή ένας μηχανισμού που να θέτει τις ONU σε sleep mode έτσι ώστε να μην καταναλώνουν ενέργεια για την λήψη δεδομένων που δεν τα αφορούν αλλά να επιστρέφουν σε active mode όταν γίνεται μετάδοση δεδομένων που τα αφορά, αποτελεί αντικείμενο μελέτης παγκοσμίως (Fiammengo, 2011), (D. P. Van, 2014).

1.2 Σκοπός της διπλωματικής

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι να διερευνηθούν οι διαφορετικοί τύποι αρχιτεκτονικών PON ως μια προσέγγιση της εισαγωγής των οπτικών ινών στα δίκτυα πρόσβασης. Η παρουσίαση του απτικού διαδικτύου που με την σειρά του θα εισαγάγει την αφή και την κίνηση στον χρήστη του.

1.3 Μεθοδολογία

Για να πετύχουμε αυτό το σκοπό, θα ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

- Θα μελετηθούν οι διαφορετικές γενιές PONs μέσω μιας ανάλυσης σε βάθος στην βιβλιογραφία από ποικίλες πηγές.
- Θα μελετηθούν οι μελλοντικές τάσεις στα οπτικά δίκτυα πρόσβασης όπως το NG-PON2.
- Θα μελετηθεί το απτικό διαδίκτυο, βασικές έννοιες και τα χαρακτηριστικά του.
- Θα μοντελοποιηθεί ένα EPON με την χρήση του πακέτου προγράμματος Prism Model Checker.
- Θα εκτιμηθεί η απόδοση του δικτύου EPON.
- Θα αναλυθούν τα αποτελέσματα.
- Συμπεράσματα και μελλοντικές μελέτες.

1.4 Δομή Εργασίας

Αυτή η διπλωματική αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 2 όπου γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες των Παθητικών Οπτικών Δικτύων καθώς και των οπτικών ινών.

Κεφάλαιο 3 όπου γίνεται αναφορά στα πρωτόκολλα επιπέδου πρόσβασης.

Κεφάλαιο 4 όπου γίνεται η παρουσίαση του Απτικού Διαδικτύου και της Δυναμικής Κατανομής Εύρους Ζώνης.

Κεφάλαιο 5 όπου γίνεται η μοντελοποίηση EPON αποτελούμενο από ένα OLT και τέσσερεις ONUs και σύγκριση αποτελεσμάτων με ίδιο μοντέλο αποτελούμενο από ένα OLT και ένα ONU.

Κεφάλαιο 6 με τα συμπεράσματα.

2 Παθητικά Οπτικά Τοπικά Δίκτυα

2.1 Εισαγωγή

Από τη δεκαετία του 1980, στα τοπικά δίκτυα, το φυσικό μέσο που χρησιμοποιείται αποκλειστικά είναι τα χάλκινα καλώδια συνεστραμμένων ζευγών (twisted pairs cables). Οι οπτικές ίνες, όπου υπάρχουν, περιορίζονται στην κατακόρυφη καλωδίωση, για την σύνδεση ενεργού εξοπλισμού μεταξύ τους, με προτίμηση στις πολύτροπες για οικονομικούς κυρίως λόγους.

Τα χάλκινα καλώδια, παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα και η ευρεία εγκατεστημένη βάση τους, έχει κατά κάποιον τρόπο, καταστήσει δύσκολη την αντικατάσταση και απαξίωση τους, ωστόσο έχουν αγγίξει το θεωρητικό όριο των επιδόσεών τους. Επιπροσθέτως, η αρχιτεκτονική των δικτύων αυτών, απαιτεί την ύπαρξη πολλών ενεργών συσκευών, που τόσο από πλευράς διαχείρισης, όσο και κατανάλωσης ενέργειας, ειδικά σε βάθος χρόνου αυξάνουν το κόστος για την επιχείρηση, καθιστώντας έτσι το συχνά αναφερόμενο μεγάλο κόστος των οπτικών δικτύων ένα μύθο. Στην συνέχεια θα δοθεί έμφαση στις προδιαγραφές, που τα παθητικά οπτικά δίκτυα αλλά και η οπτική ίνα αυτή καθαυτή θα πρέπει να ακολουθούν, για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να αποδώσουν το αναμενόμενο.

Τα παθητικά οπτικά τοπικά δίκτυα (Passive Optical LANs – POL) είναι η τεχνολογία που αναμένεται να κυριαρχήσει σε επίπεδο τοπικού δικτύου, ακριβώς όπως τα παθητικά οπτικά δίκτυα έχουν τη μερίδα του λέοντος στα ανεπτυγμένα δίκτυα οπτικής ίνας έως το σπίτι (Fiber To The Home – FTTH). Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο, ακολουθεί την αρχιτεκτονική σημείου προς πολλά σημεία (point-to-multipoint), που τώρα εφαρμόζεται για την παροχή ίνας ως τον υπολογιστή (Fiber To The Desktop – FTDD), στην οποία χρησιμοποιούνται παθητικοί οπτικοί διαχωριστές για να επιτρέψουν σε μια μοναδική οπτική ίνα να εξυπηρετεί πολλά τελικά σημεία, με πολλές υπηρεσίες. Οι λύσεις POL είναι υλοποιήσεις της τεχνολογίας PON, που έχουν βελτιστοποιηθεί για περιβάλλοντα εταιρικού LAN. Αν και αυτή η τεχνολογία έχει διατεθεί μόνο τα τελευταία λίγα χρόνια, κερδίζει γρήγορα έδαφος στον κλάδο των τοπικών επικοινωνιών.

2.2 Οπτικές Ίνες

Παρόλη την ευρύτητα της χρήσης των χάλκινων καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών, τόσο στα τοπικά δίκτυα, όσο και στο δίκτυο πρόσβασης του τηλεφωνικού δικτύου, τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει ραγδαία διάδοση των οπτικών ινών στις τηλεπικοινωνίες. Έχουν κυριαρχήσει στον κορμό των δικτύων των παρόχων υπηρεσιών διαδικτύου, στην κατακόρυφη καλωδίωση των τοπικών δικτύων επιχειρήσεων, σε μητροπολιτικά δίκτυα, ενώ σταδιακά εισέρχονται και στο συνδρομητικό δίκτυο, ή δίκτυο πρόσβασης, πολλών παρόχων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οι οπτικές ίνες είναι κυματοηγοί από πλαστικό ή γυαλί, μέσω των οποίων διέρχεται φως, με το οποίο κωδικοποιείται η προς μετάδοση πληροφορία. Για την επίτευξη πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας, χρησιμοποιούνται σε ζεύγη, μία ίνα ανά κατεύθυνση, συχνά τις συναντάμε σε δέσμες, σχηματίζοντας τα οπτικά καλώδια (G.P.Agrawal, 2010).

Κάθε οπτική ίνα αποτελείται από τον πυρήνα (core) και το περίβλημα (cladding), που τοποθετούνται ως ομοαξονικοί κύλινδροι, με το περίβλημα να περικλείει τον πυρήνα. Ο πυρήνας διαθέτει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από το περίβλημα, ώστε το φως που εισέρχεται σε αυτόν να ταξιδεύει κατά μήκος του χωρίς να διαθλάται στο περίβλημα και να φτάνει στο άκρο του δέκτη. Η διάμετρος του πυρήνα κυμαίνεται από λίγα μm έως δεκάδες μm, ενώ του περιβλήματος συνήθως ξεπερνά τα 100μm.

Οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των καλωδίων χαλκού, με τα κυριότερα να είναι το μεγαλύτερο εύρος ζώνης, που οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, η πολύ μικρότερη απόσβεση, που επιτρέπει επικοινωνία σε μεγαλύτερες αποστάσεις, η θωράκιση τους στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και στις παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων, η μη πρόκληση παρεμβολών προς άλλα φυσικά μέσα, ο ιδιαίτερα χαμηλός ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων (Bit Error Rate – BER), το ελαφρύ και μικρού όγκου υλικό και η αυξημένη ασφάλεια από υποκλοπές με φυσική επέμβαση σε αυτές.

Τις προηγούμενες δεκαετίες, η εγκατάσταση των οπτικών ινών θεωρείτο δύσκολη, εν μέρει λόγω της απαίτησης τους για μεγάλη ακτίνα στρέψης, τις καθιστούσε ακόμα λιγότερο ελκυστικές για ενδοκτηριακές εγκαταστάσεις. Φυσικά, η

μικρή εξοικείωση των εγκαταστατών με τις απαιτήσεις των οπτικών ινών όξυνε το πρόβλημα, ωστόσο υπήρχε και αντικειμενικό ζήτημα. Οι επιδόσεις τους, δεν ήταν συνήθως αρκετές για να υπερκεράσουν αυτούς τους περιορισμούς. Όταν όμως το 2002 παρήχθη η πρώτη ίνα με ακτίνα στρέψης 10 mm, ήρθη ένα σημαντικό εμπόδιο στην περαιτέρω διάδοσή τους. Φυσικά, έκτοτε έχουν βελτιωθεί ακόμα περισσότερο, επιτρέποντας ακτίνα στρέψης έως 5 mm. Στον Πίνακα 1 γίνεται μια συγκριτική παράθεση χαρακτηριστικών των ινών με τα χάλκινα καλώδια.

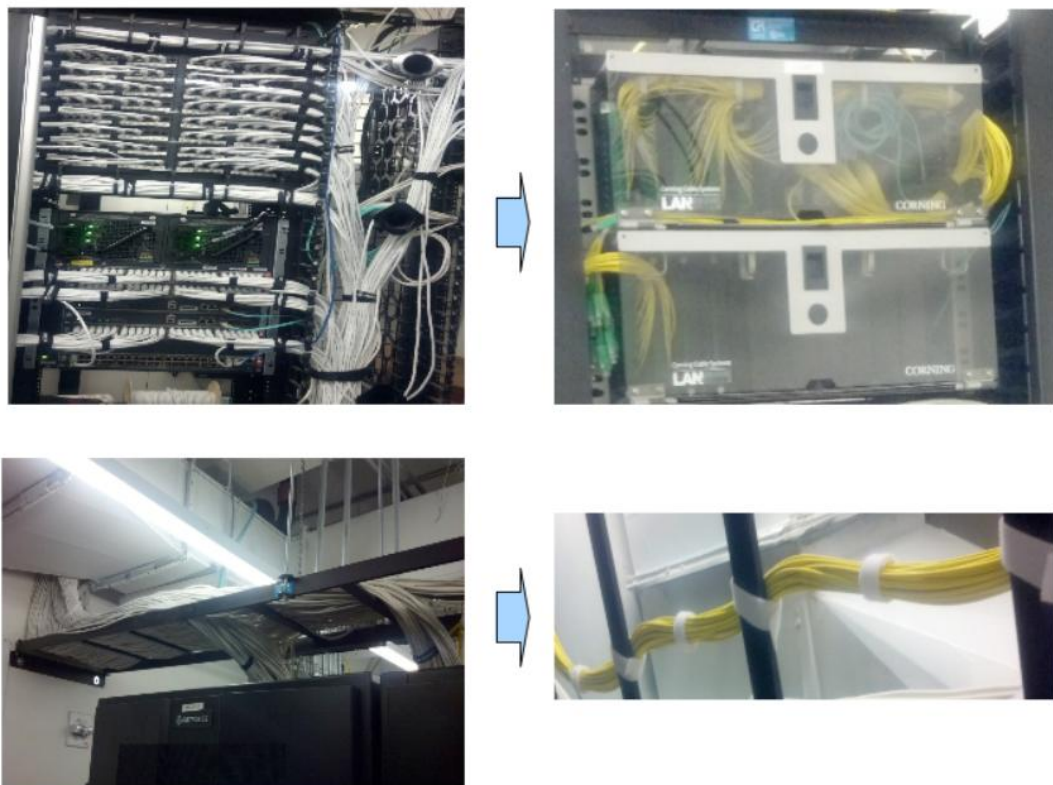
Χαρακτηριστικά	Πολύτροπη Ίνα	Μονότροπη Ίνα	UTP κατηγορίας 6	UTP κατηγορίας 6a
Απόσταση (για ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps)	400 m	80 km	45 m	100m
Εξωτερική Διάμετρος	2,9 mm	2,9 mm	5,7 mm	7,5 mm
Βάρος	6 kg/km	5,95 kg/km	32,725 kg/km	58 kg/km
Ελάχιστη Ακτίνα Στρέψης	25 mm	5 mm	22,8 mm	30 mm
Τάνυση	220 N	222 N	111 N	111 N

Πίνακας 1: Συγκριτική παράθεση χαρακτηριστικών των ινών με τα χάλκινα καλώδια.

Τα πλεονεκτήματα των ινών σε θέμα εγκατάστασης εντός ενός κτηρίου λοιπόν, είναι η μικρότερη ακτίνα στρέψης, καθώς η δυσκαμψία των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών και ειδικά των θωρακισμένων τα καθιστά δυσκολότερα στο χειρισμό. Όταν μέρος της καλωδίωσης πρέπει να περάσει από κανάλια, ψευδοροφές, ψευδοπατώματα τραβώντας τα από το άλλο άκρο, παρόλο που το μεταλλικό καλώδιο θα έπρεπε να έχει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, η τάνυση από ένα όριο και πάνω ενδέχεται να χαλάσει τη συστροφή των ζευγών και να προκαλέσει διομιλία, η ίνα τελικά αποδεικνύεται ανθεκτικότερη. Ένα άλλο προφανές πλεονέκτημα είναι η μικρότερη διατομή της ίνας, που είναι λιγότερο από τη μισή ενός καλωδίου κατηγορίας

6a. Συνεπώς, τα κανάλια και οι οδηγοί των ικριωμάτων δε γεμίζουν τόσο γρήγορα, εξοικονομούμε χώρο και η εγκατάσταση είναι ευκολότερη. Ακόμα περισσότερο πλεονεκτούν λόγω ελάχιστου βάρους, σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια, που με τη σειρά του οδηγεί σε εξοικονόμηση πρώτων υλών (χαλκού και πλαστικού), παράγει λιγότερα απόβλητα, σε περίπτωση αποξήλωσης και εξασφαλίζει περιβαλλοντολογικές πιστοποιήσεις στα κτήρια, τα οποία τις χρησιμοποιούν αντί χαλκού, αυξάνοντας έτσι την αξία τους και μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αυτών που θα τα επιλέξουν για τις εγκαταστάσεις τους.

Σε ένα οπτικό δίκτυο επιτυγχάνετε μεγαλύτερη απόσταση της τάξης αρκετών χιλιομέτρων συγκριτικά με τα αυστηρά 100 μέτρα του δικτύου χάλκινων καλωδίων οποιασδήποτε κατηγορίας καλωδίου συνεστραμμένων ζευγών, που επηρεάζει την αρχιτεκτονική του δικτύου, όπως είδαμε στην παράγραφο 2.2.



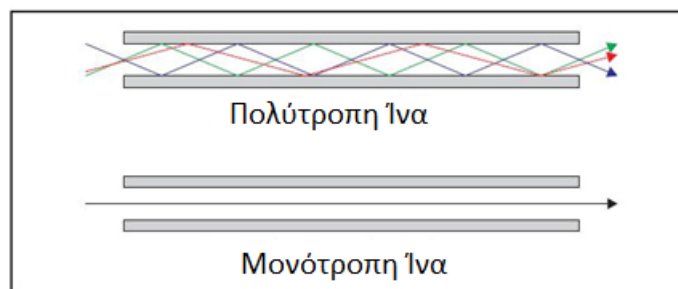
Εικόνα 1: Σύγκριση απαιτήσεων σε χώρο και βάρος μεταξύ ηλεκτρικής και οπτικής καλωδίωσης (Nikos Anerousis et al, 2013).

2.2.1 Είδη Οπτικών Ινών

Οι οπτικές ίνες, με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους και των επιδόσεων τους, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις μονότροπες ή μονόρρυθμες (single mode) και τις πολύτροπες ή πολύρρυθμες (multimode). Οι πολύτροπες ίνες έχουν πυρήνα με τυπική διάμετρο 50μm, 62.5μm ή 100μm με επίστρωση (cladding) διαμέτρου 125μm. Οι μονότροπες ίνες έχουν μικρότερη διάμετρο πυρήνα από 5μm έως 10μm. Στις πολύτροπες ίνες, οι διάφορες ακτίνες του οπτικού σήματος ανάλογα με την είσοδο τους στην οπτική ίνα οδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Ο τρόπος αυτός μετάδοσης ονομάζεται πολύτροπος (multimode) καθώς έχουμε πολλούς δρόμους μετάδοσης, πρακτικά χιλιάδες που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της κεντρικής ίνας τόσο λιγότερους δρόμους μετάδοσης έχουμε. Όταν η διάμετρος μειωθεί στο επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου οπτικού σήματος, τότε ένας μόνο τρόπος μετάδοσης παραμένει, η ευθεία μετάδοση που ονομάζεται μονότροπη (single mode). Το πλήθος των διαφορετικών τρόπων μετάδοσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ίνας και το μήκος κύματος του φωτός (G.P.Agrawal, 2010).

Χαρακτηριστικά της ίνας που καθορίζουν τη μονότροπη ή μη λειτουργία της, είναι η ακτίνα του πυρήνα της (a), η τιμή του δείκτη διάθλασης του πυρήνα (n_1) και της επίστρωσης (n_2) και το μήκος κύματος του φωτός, που διαδίδεται εντός της (λ). Αν η κανονικοποιημένη συχνότητα V είναι μικρότερη από 2,405, η ίνα λειτουργεί μονότροπα (G.P.Agrawal, 2010).

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$



Εικόνα 2: Πολύτροπη και μονότροπη οπτική ίνα

Μέσω των μονότροπων ινών, επιτυγχάνονται μεγαλύτερες αποστάσεις διάδοσης του σήματος, ενώ εξαφανίζεται ένας περιοριστικός παράγοντας, που είναι η διασπορά μεταξύ ρυθμών (intermodal dispersion), που διευρύνει χρονικά έναν παλμό μέχρι αυτός να φτάσει στο δέκτη, γιατί κάθε ακτίνα, λόγω διαφορετικής διαδρομής εντός της ίνας, χρειάζεται διαφορετικό χρόνο για να τη διασχίσει. Σε πρακτικά συστήματα, οι πολύτροπες ίνες επιτυγχάνουν αποστάσεις της τάξης μερικών εκατοντάδων μέτρων, που τις καθιστά κατάλληλες για χρήση εντός κτηρίων. Παρόλο που φαίνεται να είναι σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα αυστηρά 100 μέτρα, που επιτυγχάνει το καλώδιο χάλκινων συνεστραμμένων ζευγών, δε μπορεί να συγκριθεί με τα δεκάδες χιλιόμετρα, που εύκολα επιτυγχάνονται με μονότροπη ίνα. Συνεπώς, η χρήση μονότροπων ινών προκρίνεται για συστήματα PON αλλά και POL, ώστε να μην υπάρξει ποτέ αδυναμία κάλυψης ενός σημείου του δικτύου λόγω αυξημένης απόστασης.

2.2.2 Οπτικοί Πομποί

Η οπτική ίνα, είναι μόνο το φυσικό μέσο μετάδοσης, για να γίνει εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της πρακτικά σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα, χρειάζονται κατάλληλοι πομποί και δέκτες, που οι μεν να μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα που λαμβάνουν από το δίαυλο της συσκευής που είναι συνδεδεμένοι σε οπτικό, ενώ οι δε να μετατρέπουν το οπτικό σήμα που λαμβάνουν από την ίνα σε ηλεκτρικό, για να το στείλουν στην επόμενη βαθμίδα του δέκτη.

Οι τύποι πομπών που χρησιμοποιούνται είναι οι LASER και οι LED. Κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες, έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, και διαφορετικό πεδίο εφαρμογής.

Τα LASER παράγουν φως μεγαλύτερης ισχύος, που σε συνδυασμό με τη χαμηλή απόσβεση της ίνας δύναται να μεταφερθεί σε μεγάλη απόσταση. Επίσης, το φως που παράγουν έχει μικρότερο φασματικό εύρος γραμμής και έτσι είναι λιγότερο επιρρεπές στη διασπορά κατά τη μεταφορά του εντός της ίνας. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών του παραγόμενου φωτός, τα LASER χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μονότροπες ίνες, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για μετάδοση μεγάλων αποστάσεων. Ωστόσο,

παρουσιάζουν αυξημένο κόστος και έτσι αποφεύγεται η χρήση τους σε ενδοκτηριακές εγκαταστάσεις, όπου δε θα απολαμβάνουμε το σημαντικότερο τους πλεονέκτημα.

Τα LED είναι φθηνότερα, με σχεδόν άπειρο χρόνο ζωής, δε μπορούν όμως να εκπέμψουν μεγάλη ισχύ, ούτε τόσο στενή δέσμη φωτός, όσο τα LASER. Το φως που παράγουν έχει μεγάλο φασματικό εύρος και θα υπόκειται σε σημαντική χρωματική διασπορά, αν ταξίδευε σε μεγάλη απόσταση. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με πολύτροπες ίνες εντός ενός data center ή στην κατακόρυφη καλωδίωση ενός κτηρίου.

Ως συμπέρασμα από την παράθεση και σύγκριση των χαρακτηριστικών των οπτικών ινών, η επιλογή της μονότροπης ίνας με πομπό LASER για χρήση σε παθητικά οπτικά δίκτυα, είτε για την πρόσβαση οικιών, καταστημάτων και επιχειρήσεων στο διαδίκτυο, μέσω της υποδομής ενός παρόχου, ή για τη χρήση σε τοπικά δίκτυα εντός ενός μεγάλου κτηρίου ή συγκροτήματος (campus) θεωρείται η ιδανική. Ο περιορισμός στην απόσταση που συνεπάγεται η χρήση πολύτροπης ίνας με LED καθιστά απαγορευτική τη χρήση της στις περισσότερες περιπτώσεις, ενώ, στο Κεφάλαιο 3 θα παρουσιασθεί, η μονότροπη ίνα ως η καταλληλότερη για χρήση πολυπλεξίας μήκους κύματος.

2.3 Προδιαγραφές μονότροπης οπτικής ίνας κατά ITU

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union – ITU) έχει συγκεντρώσει και κωδικοποιήσει τις προδιαγραφές που πρέπει να ακολουθεί η μονότροπη οπτική ίνα, που θα χρησιμοποιηθεί για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς, στη σύσταση G.652, τις οποίες θα παραθέσουμε και αναλύσουμε στην παράγραφο αυτή. Περιγράφεται μια μονότροπη οπτική ίνα, με μηδενισμό της διασποράς περί τα 1310nm, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο 2^ο και 3^ο παράθυρο μετάδοσης (1310nm και 1550nm).

Τα γεωμετρικά, οπτικά, μηχανικά και τηλεπικοινωνιακά χαρακτηριστικά της, περιγράφονται παρακάτω, χωρισμένα σε τρεις άξονες (ITU-T Recommendation G.652, 2016):

- Χαρακτηριστικές ιδιότητες της ίνας, που παραμένουν κατά την εγκατάσταση.
- Χαρακτηριστικές ιδιότητες του καλωδίου, όπως παραδίδεται.

- Χαρακτηριστικές ιδιότητες της ζεύξης, που χαρακτηρίζουν συνδυασμένα καλώδια και περιγράφουν μεθόδους εκτίμησης των παραμέτρων με βάση μετρήσεις ή υπολογισμούς.

Τα χαρακτηριστικά της ίνας παρέχουν ένα ελάχιστο πλαίσιο σχεδίασης για κατασκευή ινών, είτε αφορά μεμονωμένες ίνες, ίνες που είναι ενσωματωμένες σε τύμπανο περιέλιξης ή εγκατεστημένες ίνες.

Διάμετρος Πεδίου Ρυθμού: Ορίζονται τόσο ονομαστική τιμή, όσο και ανοχή (απόκλιση) γύρω από αυτήν στα 1310nm.

Διάμετρος Επίστρωσης: Η συνιστώμενη ονομαστική τιμή της διαμέτρου της επίστρωσης (cladding) της ίνας είναι 125μm, με ανοχή που πρέπει να κυμαίνεται στα όρια του Πίνακα 2.

Σφάλμα Εκκεντρότητας Πυρήνα: Το σφάλμα αυτό δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή του Πίνακα 2.

Μη κυκλικότητα Πεδίου Ρυθμού: Στην πράξη, η μη κυκλικότητα του πεδίου του ρυθμού των ινών, που ονομαστικά είναι απόλυτα κυκλικό, είναι αρκετά μικρό για να μην επηρεάζει τη διάδοση. Έτσι, δεν είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί ακριβής τιμή, ούτε να μετρηθεί σε ελέγχους αποδοχής της ίνας.

Μη κυκλικότητα επίστρωσης: Δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή στον Πίνακα 2.

Μήκος Κύματος Αποκοπής: Διακρίνονται δύο τύποι μήκους κύματος αποκοπής, για το καλώδιο (λ_{cc}) και την ίνα (λ_c). Η σχέση μεταξύ τους εξαρτάται από τη σχεδίαση της ίνας και του καλωδίου και τις συνθήκες ελέγχου. Γενικά, $\lambda_{cc} < \lambda_c$, ωστόσο δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί μια γενικευμένη ποσοτική σχέση. Η σημασία της διασφάλισης μονότροπης διάδοσης στο ελάχιστο μήκος καλωδίου μεταξύ ενώσεων στο ελάχιστο μήκος κύματος λειτουργίας είναι τεράστια. Αυτό επιτυγχάνεται, συνιστώντας το μέγιστο μήκος κύματος αποκοπής ενός καλωδίου μονότροπης ίνας λ_{cc} στα 1260nm, ή για τα χειρότερα σενάρια μήκους και κάμψεων, το μήκος κύματος αποκοπής της ίνας λ_c να είναι 1260nm. Η μέγιστη τιμή προσδιορίζεται στον Πίνακα 2.

Απώλεια Μακροκάμψεων: Ποικίλει με το μήκος κύματος, την ακτίνα κάμψης και τον αριθμό των τυλιγμάτων γύρω από τύμπανο περιέλιξης συγκεκριμένης ακτίνας. Δεν πρέπει να ξεπερνά τη μέγιστη τιμή που δίνεται στον Πίνακα 2. Μετράται με δοκιμές, ενώ ο αριθμός των τυλιγμάτων πρέπει να συμβαδίζει με την ελάχιστη ακτίνα

κάμψης, που είναι αποδεκτή για μακροπρόθεσμη ανάπτυξη ινών σε εγκαταστάσεις, ώστε να αποφευχθεί βλάβη στατικής κόπωσης.

Υλικά ίνας: Τα συστατικά από τα οποία έχει κατασκευαστεί η ίνα πρέπει να αναφέρονται, ειδικά σε περίπτωση ένωσης με σύντηξη ινών από διαφορετικά συστατικά, ώστε οι απώλειες να μην ξεπερνάν τα όρια.

Προστατευτικά υλικά: Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών επικάλυψης των ινών και ο καλύτερος τρόπος απομάκρυνσής τους, αν πρέπει να γίνει, πρέπει να αναφέρονται. Στην περίπτωση ίνας με μονή επικάλυψη, επίσης πρέπει να γίνεται μνεία.

Επίπεδο μηχανικής αντοχής: Ο συντελεστής μηχανικής αντοχής σ_p δεν πρέπει να είναι μικρότερος από αυτόν του Πίνακα 2.

Δείκτης διάθλασης: Γενικά δε χρειάζεται να είναι γνωστός.

Ομοιομορφία κατά μήκος της χρωματικής διασποράς: Υπό εξέταση. Για συγκεκριμένο μήκος κύματος, η τοπική απόλυτη τιμή του συντελεστή διασποράς μπορεί να απέχει από την τιμή που μετράται σε μεγάλο μήκος ίνας. Αν η τιμή μειωθεί τόσο σε ένα μήκος κύματος, το οποίο είναι κοντά σε χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος σε σύστημα πολυπλεξίας WDM, το φαινόμενο ανάμειξης τεσσάρων κυμάτων μπορεί να προκαλέσει τη διάδοση ισχύος σε άλλα μήκη κύματος, ακόμα και σε χρησιμοποιούμενα στο σύστημα πολυπλεξίας μας. Το πλάτος της ισχύος της ανάμειξης τεσσάρων κυμάτων είναι συνάρτηση της απόλυτης τιμής του συντελεστή διασποράς, την κλίση της χρωματικής διασποράς, των ενεργών μηκών κύματος, της οπτικής ισχύος και της απόστασης στην οποία η ανάμειξη λαμβάνει χώρα. Για συστήματα πυκνής πολυπλεξίας στην περιοχή του 3^{ου} παραθύρου, η χρωματική διασπορά των ινών είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μη συμβεί το φαινόμενο της ανάμειξης τεσσάρων κυμάτων, άρα δεν επηρεάζει τη λειτουργία.

Χρωματική διασπορά: Ο συντελεστής χρωματικής διασποράς $D(\lambda)$ προσδιορίζεται θέτοντας όρια στις παραμέτρους της καμπύλης χρωματικής διασποράς, που είναι συνάρτηση του μήκους κύματος στην περιοχή του 2^{ου} παραθύρου. Το όριο του συντελεστή, για κάθε μήκος κύματος, υπολογίζεται με το ελάχιστο μήκος κύματος μηδενικής διασποράς $\lambda_{0,\min}$, το μέγιστο μήκος κύματος μηδενικής διασποράς, $\lambda_{0,\max}$ και τη μέγιστη κλίση μηδενικής διασποράς, $S_{0,\max}$, ως εξής:

$$D(\lambda) \leq \frac{\lambda \cdot S_{0,max}}{4} \left[1 - \frac{\lambda_{0,min}}{\lambda} \right]^4 \quad (2)$$

Οι τιμές των παραμέτρων οριοθετούνται σύμφωνα με τον Πίνακα 2.

Από τα 1460nm ως τα 1625nm, ο συντελεστής χρωματικής διασποράς περιορίζεται από την παρακάτω ανίσωση:

$$8,625 + 0,052 \cdot (\lambda - 1460) \leq D(\lambda) \leq 12,472 + 0,068 \cdot (\lambda - 1460) \quad (3)$$

Συντελεστής Εξασθένησης: Προσδιορίζεται η μέγιστη τιμή του σε ένα ή περισσότερα μήκη κύματος στο 2^ο και 3^ο παράθυρο μετάδοσης. Με αυτές τις μετρήσεις, μπορεί να υπολογιστεί και σε άλλα μήκη κύματος. Οι τιμές του δεν πρέπει να ξεπερνάν τις τιμές στον Πίνακα 2, με τη σημείωση ότι αυτές δεν ισχύουν σε μικρά καλώδια, όπως τα κορδόνια διασύνδεσης εντός ικριωμάτων, καλώδια εσωτερικού χώρου κτλ. Σε αυτές τις εξαιρέσεις, ο συντελεστής μπορεί να φτάσει το 1 dB/km, ασχέτως μήκους κύματος, ενώ δεν προσδιορίζεται για μήκη κύματος πάνω από 1625nm.

Συντελεστής Διασποράς Τρόπου Πόλωσης: Ο συντελεστής αυτός προσδιορίζεται στατιστικά και όχι για κάθε μεμονωμένη ίνα. Οι κατασκευαστές πρέπει να παρέχουν μια τιμή για το συντελεστή, που θα είναι το στατιστικά άνω φράγμα για τις ίνες που περιέχονται στο καλώδιο που κατασκευάζει, εφεξής PMD_Q, υπολογισμένο σε M τμήματα του καλωδίου. Υφίσταται μικρή πιθανότητα, Q, ο συνολικός συντελεστής PMD να ξεπεράσει την άνω φραγμένη τιμή. Για τις τιμές των M και Q του Πίνακα 2, η τιμή του PMD_Q δε θα ξεπερνά το μέγιστο συντελεστή PMD, όπως προσδιορίζεται στον ίδιο πίνακα.

Τα όρια στην κατανομή του συντελεστή ερμηνεύονται ως σχεδόν αντίστοιχα με τα όρια της στατιστικής διακύμανσης της Διαφορικής Καθυστέρησης Ομάδας (Differential Group Delay – DGD), που ποικίλει τυχαία με το χρόνο και το μήκος κύματος. Όταν η κατανομή του συντελεστή καθορίζεται για ένα καλώδιο οπτικών ινών, μπορούν να καθοριστούν αντίστοιχα όρια της διακύμανσης της DGD.

Ιδιότητες Ύψας			
Ιδιότητα	Λεπτομέρειες	Τιμή	Μονάδα
Διάμετρος Πεδίου Ρυθμού	Μήκος Κύματος	1310	Nm
	Ονομαστικές Τιμές	8,6 – 9,5	Mm
	Ανοχή	±0,6	Mm
Διάμετρος Επίστρωσης	Ονομαστική	125	Mm
	Ανοχή	±1	Mm
Σφάλμα Εκκεντρότητας Πυρήνα	Μέγιστο	0,6	Mm
Μη κυκλικότητα επίστρωσης	Μέγιστη	1	%
Μήκος Κύματος Αποκοπής	Μέγιστο	1260	Nm
Απώλεια Μακροκάμψεων	Ακτίνα	30	Mm
	Αριθμός Τυλιγμάτων	100	
	Μέγιστη στα 1625 nm	0,1	dB
Επίπεδο μηχανικής αντοχής	Ελάχιστο	0,69	GPa
Παράμετρος Χρωματικής Διασποράς	$\lambda_{0,min}$	1300	Nm
	$\lambda_{0,max}$	1324	Nm
	$S_{0,max}$	0,092	Nm
Συντελεστής Εξασθένησης	Μέγιστος στα 1310 nm	0,4	dB/km
	Μέγιστος στα 1550 nm	0,35	dB/km
	Μέγιστος στα 1625 nm	0,4	dB/km
Συντελεστής PMD	M	20	Καλώδια
	Q	0,01	%
	PMD _Q	0,2	ps/ \sqrt{km}

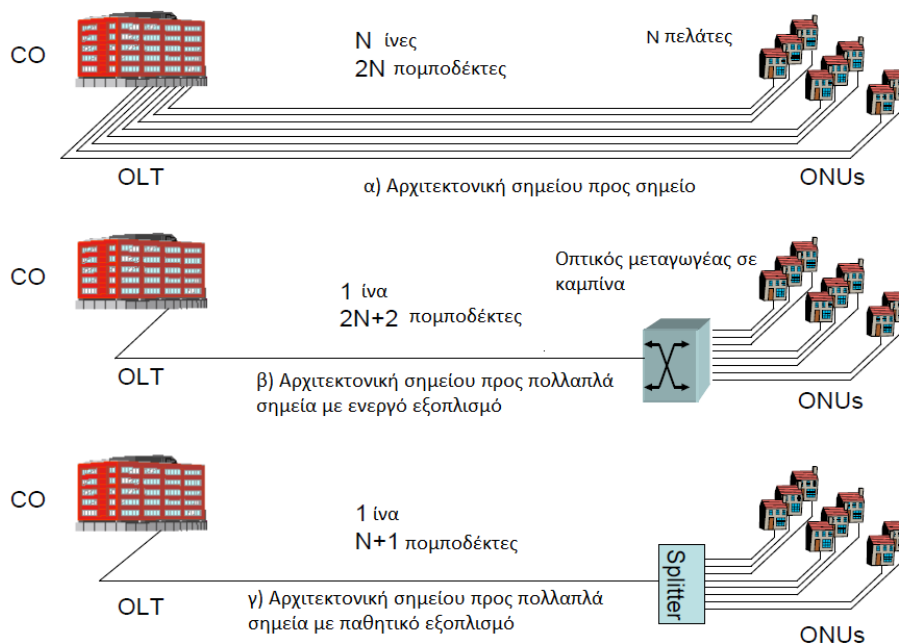
Πίνακας 2:Προδιαγραφές Μονότροπης Οπτικής Ύψας (Σύσταση G.652.B της ITU-T) (ITU-T Recommendation G.652, 2016).

2.4 Παθητικά οπτικά δίκτυα

2.4.1 Εισαγωγή

Από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της οικογένειας τεχνολογιών xDSL, είχε διαφανεί ότι τα όρια της χρήσης του χαλκού στο δίκτυο πρόσβασης ήταν πεπερασμένα

και δε θα μπορούσαν να καλύψουν σε βάθος χρόνου τις ανάγκες για γρήγορη πρόσβαση στο διαδίκτυο. Για αυτό το λόγο, παράλληλα γινόταν προσπάθεια για την ανάπτυξη τεχνολογιών οπτικού δικτύου πρόσβασης. Τα δίκτυα αυτά έχουν τα πλεονεκτήματα της οπτικής ίνας με την οποία υλοποιούνται, δηλαδή τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, τη μεγάλη απόσταση κάλυψης, το χαμηλό BER, την αυξημένη ασφάλεια και τις μικρότερες διαστάσεις και βάρος ως υλικό. Έγινε επίσης γρήγορα σαφές ότι τεχνικές σημείου προς σημείο, από το σημείο παρουσίας του παρόχου έως τις εγκαταστάσεις των πελατών, θα είχαν δυσβάστακτο οικονομικό κόστος και έτσι προκρίθηκαν τεχνικές σημείου προς πολλά σημεία. Η σύνδεση του πλησιέστερου κόμβου του παρόχου με μία περιοχή που καλύπτει, θα γινόταν με μία οπτική ίνα. Αποτέλεσε δίλημμα το αν θα τερμάτιζε σε ενεργό εξοπλισμό, ο οποίος μετά θα συνέδεε με άλλες ίνες τους πελάτες στον εξοπλισμό αυτόν ή σε έναν παθητικό διαχωριστή, μέσω του οποίου θα έφτανε η ίνα στον τελικό πελάτη. Οι αρχιτεκτονικές απεικονίζονται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Διαφορετικές αρχιτεκτονικές στα δίκτυα πρόσβασης (Mukherjee, 2006).

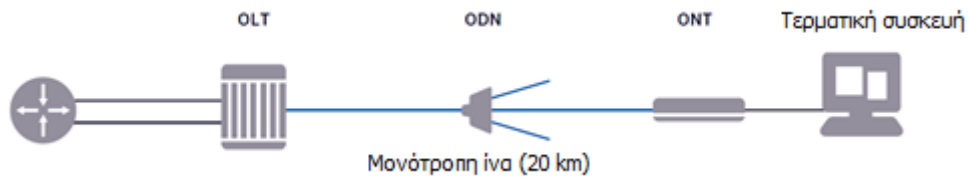
Η αρχιτεκτονική που επικράτησε είναι αυτή του παθητικού οπτικού δικτύου. Θεωρήθηκε ότι παρουσιάζει τα βέλτιστα χαρακτηριστικά απόδοσης/κόστους, με επιπλέον γνώμονα την ταχύτητα και ευκολία ανάπτυξης.

2.4.2 Αρχιτεκτονική δικτύου POL

Κυρίαρχο στοιχείο στην αρχιτεκτονική των παραδοσιακών LAN είναι ο μεταγωγέας (switch). Πρόκειται για δικτυακή συσκευή, πάνω στην οποία συνδέονται όλες οι τερματικές συσκευές, με καλώδια συνεστραμμένων ζευγών και μετά αυτές συνδέονται μεταξύ τους, για να παρέχουν επικοινωνία μεταξύ όλων των σημείων ενός δικτύου. Συνηθίζεται να ακολουθείται το ιεραρχικό μοντέλο τριών επιπέδων, πρόσβασης-συγκέντρωσης-κορμού όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Η παρουσία μεγάλου αριθμού μεταγωγέων, με λίγες θύρες ο καθένας, υπαγορεύεται από τον περιορισμό των 100 μέτρων των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών, μεταξύ δύο ενεργών συσκευών. Έτσι, είναι αναγκαία η δέσμευση αρκετού χώρου εντός των κτηριακών εγκαταστάσεων, για την παρουσία και τη λειτουργία αυτού μεγάλου σε αριθμό, μεταγωγέων, ενώ επιλέγετε χωροταξικά ένα κεντρικό σημείο για τον κύριο χώρο δικτυακού εξοπλισμού, όπου θα στεγάζονται οι μεταγωγείς κορμού, οι εξυπηρετητές, η σύνδεση με το διαδίκτυο, το τηλεφωνικό κέντρο και όλος ο συναφής εξοπλισμός. Φυσικά, όλα αυτά τα σημεία παρουσίας, πρέπει να είναι συνδεδεμένα καλωδιακά μεταξύ τους, γεγονός που προσδίδει επιπλέον πολυπλοκότητα και κόστος στην εγκατάστασή μας.



Εικόνα 4: Παραδοσιακή αρχιτεκτονική τριών επιπέδων (Nokia, 2016).



Εικόνα 5: Γενική Αρχιτεκτονική POL (Nokia, 2016).

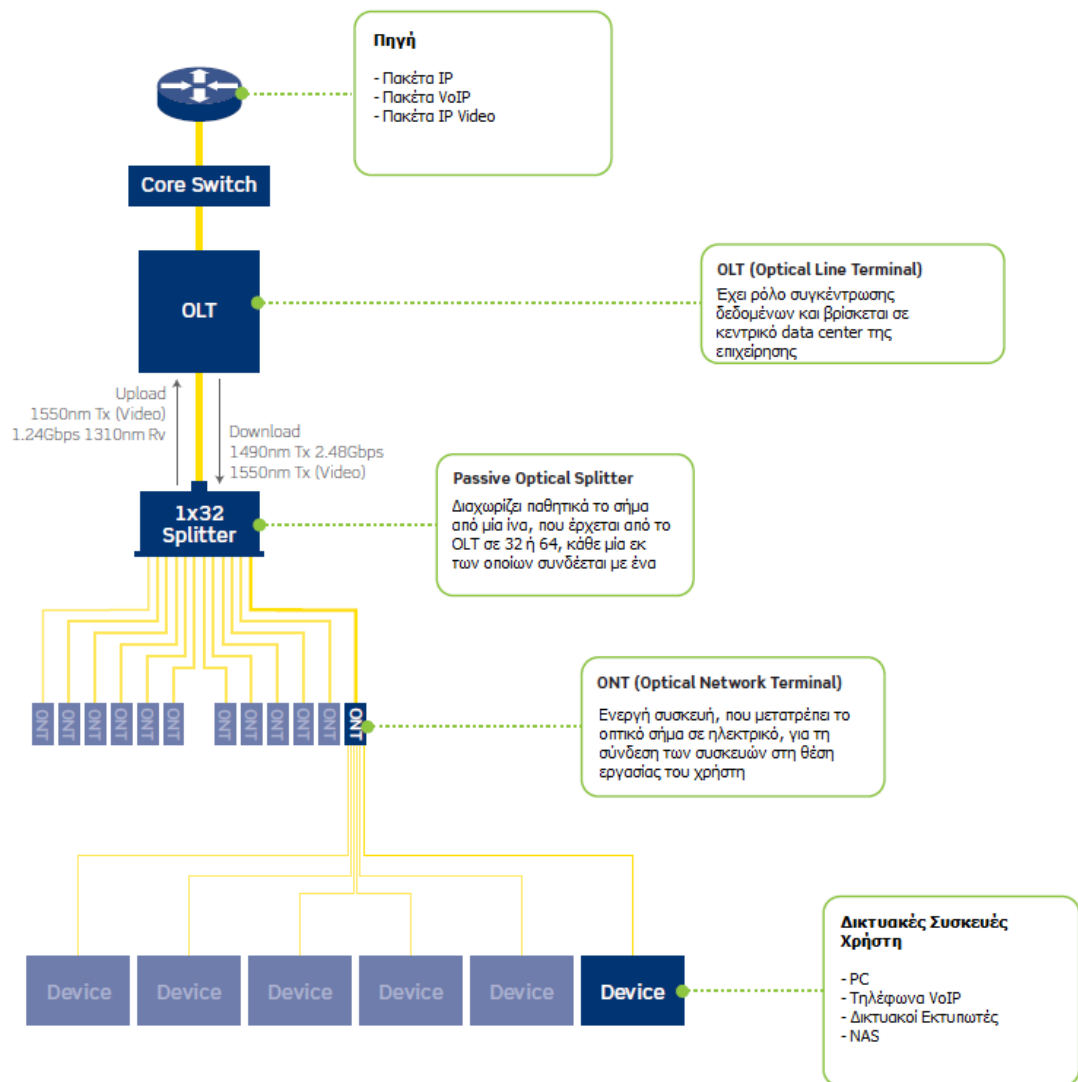
Η αρχιτεκτονική ενός POL, προσφέρει μια πιο επίπεδη, κεντροκοποιημένη αρχιτεκτονική. Επιτρέπει την ανάπτυξη του βασικού δικτυακού εξοπλισμού σε ένα σημείο της επιλογής του καθενός και παρέχει ευελιξία ως προς τον τρόπο όδευσης της ίνας εντός της εγκατάστασής, είτε αυτή είναι ένα μεμονωμένο κτήριο ή μια ομάδα κτηρίων σε ένα εκτεταμένο campus, αγνοώντας παντελώς παραμέτρους όπως ο θόρυβος λόγω συγκέντρωσης πολλών καλωδίων ή γεινιάσής τους με καλώδια ισχυρών ρευμάτων. Ο απαιτούμενος ενεργός εξοπλισμός είναι σαφώς λιγότερος, ο χώρος που θα δεσμευτεί, τα ικρίσματα που θα χρειαστούν, η κατανάλωση ρεύματος, μειώνονται δραστικά.

Αυτά όμως είναι μόνο ένα μέρος αυτής της βελτιωμένης αρχιτεκτονικής. Η απλούστευση της εποπτείας, διαχείρισης και συντήρησης του εξοπλισμού είναι ένα σημαντικότατο πλεονέκτημα, ενώ η αποφυγή μεταγωγής (Layer 2) ή δρομολόγησης (Layer 3) της κίνησης σε τόσες συσκευές, που πλέον δεν είναι αναγκαίο, δίνει ταχύτερους χρόνους απόκρισης και μείωση της καθυστέρησης της επικοινωνίας.

Η κεντροκοποιημένη αρχιτεκτονική ενός POL καθίσταται εφικτή από την τεχνολογία GPON (Gigabit Passive Optical Network), που έχει δοκιμαστεί με επιτυχία σε υλοποιήσεις FTTB και FTTH. Πρόκειται για την ταχύτερα αναπτυσσόμενη τεχνολογία σε παγκόσμιο επίπεδο, η οποία παρέχει στους χρήστες της φωνή, βίντεο και δεδομένα πάνω από μία οπτική ίνα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, κεντρικά στοιχεία του δικτύου είναι το OLT και το ONT, τα οποία ήδη έχουν αναφερθεί και θα γίνει αναλυτικότερη παρουσίαση τους στη συνέχεια αλλά και οι παθητικοί διαχωριστές που επιτρέπουν στις ίνες να συνδέουν τα ONT των χρηστών με το OLT του δικτύου.

Το OLT είναι ο κεντρικός κόμβος πρόσβασης, που συγκεντρώνει την κίνηση από τις συσκευές των χρηστών. Μπορεί να ταυτοποιεί τους χρήστες, να εφαρμόζει πολιτικές ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), να συλλέγει στατιστικά χρήσης και να εποπτεύει τις επιδόσεις του δικτύου. Διαθέτει θύρες PON, που

επιτρέπουν τη σύνδεση πολλών οπτικών ινών, που συνδέονται σε παθητικούς διαχωριστές. Το ONT τερματίζει την ίνα στις εγκαταστάσεις ή τη θέση εργασίας του χρήστη, μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και διαθέτει θύρες Ethernet για τη σύνδεση των συσκευών του χρήστη.



Εικόνα 6: Λεπτομερής Αρχιτεκτονική POL (Sean McCloud, 2017).

Η πυκνότητα θυρών που επιτυγχάνουμε με ένα POL είναι πολλαπλάσια ενός κλασικού Ethernet. Με 16 θύρες PON σε κάθε κάρτα του OLT, με συνηθισμένο λόγο 1 προς 32, κάθε κάρτα του OLT μπορεί να υποστηρίξει 512 ONT. Αν υπολογίσουμε 4 τέτοιες κάρτες ανά OLT, τότε καταλήγουμε σε δυνατότητα για 2048 ONT, καθένα εκ των οποίων μπορεί να διαθέτει αρκετές θύρες Ethernet καθώς και τηλεφωνικές θύρες

ή δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης συσκευών. Μια συνηθισμένη αρχιτεκτονική, μπορεί να υποστηρίξει περίπου 8000 συνδεδεμένες συσκευές. Το GPON παρέχει σήμερα ρυθμούς μετάδοσης 2.5 Gbps στην κατεύθυνση καθόδου και 1.2 Gbps στην κατεύθυνση ανόδου, που στο μέλλον θα μπορούν να φτάσουν τα 10 ή τα 40 Gbps, χωρίς αλλαγή της οπτικής υποδομής. Το καθοριστικό βήμα που θα επιτρέψει αυτήν την εξέλιξη είναι η εισαγωγή της τεχνολογίας πολυπλεξίας τόσο σε μήκος κύματος όσο και στο χρόνο (Time Wavelength Division Multiplexing - TWDM), και θα αναλυθεί στο 3^ο κεφάλαιο. Θα μπορεί να συνυπάρχει με τα GPON μέσω βελτιωμένων OLT, χωρίς καμία άλλη αλλαγή στην υποδομή, με δυνατότητα σταδιακής εισαγωγής της σε σημεία του δικτύου που πραγματικά τη χρειάζονται. Έτσι, η υποδομή θα μπορέσει να αξιοποιείται, ενσωματώνοντας νέες τεχνολογίες με λίγες αναβαθμίσεις για αρκετές δεκαετίες. Τονίζεται και πάλι, ότι για μια επιχείρηση που θα επιλέξει τη λύση POL, το OLT είναι ο μοναδικός ενεργός εξοπλισμός που θα χρειαστεί για τα επίπεδα κορμού και συγκέντρωσης, ενώ τα ONT των θέσεων εργασίας είναι τάξεις μεγέθους απλούστερα και οικονομικότερα από το πλέον low end switch της αγοράς.

2.4.3 Οικονομικά/Περιβαλλοντικά Πλεονεκτήματα POL

Τα βασικά κίνητρα για την υιοθέτηση και τη διεύθυνση των POL είναι:

- Επεκτασιμότητα και αξιοπιστία
- Ευκολία χρήσης και διαχείρισης
- Εξοικονόμηση ενέργειας και περιβαλλοντική βιωσιμότητα
- Συνδεσιμότητα βέλτιστου εύρους ζώνης
- Προηγμένη ασφάλεια
- Χαμηλότερο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership – TCO) (Nikos Anerousis et al, 2013).

Με κίνητρο ενός ή περισσότερων από τα παραπάνω κριτήρια, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων επιλέγουν όλο και περισσότερο την εγκατάλειψη ενός κλασικού Ethernet LAN και επωφελούνται από αυτό που προσφέρει ένα παθητικό τοπικό οπτικό δίκτυο για το μακροπρόθεσμο όφελος στους οργανισμούς τους. Το POL ταιριάζει καλύτερα σε μεγαλύτερες υλοποιήσεις LAN, όπου η επεκτασιμότητα και η άμεση εξοικονόμηση κόστους γίνεται περισσότερο αντιληπτή, ενώ μπορούν να ωφεληθούν

από τα μακροπρόθεσμα λειτουργικά οφέλη των λύσεων αυτών. Πιθανοί ενδιαφερόμενοι για τέτοιες λύσεις είναι ενδεικτικά, αλλά όχι αποκλειστικά, υπουργεία και άλλοι κρατικοί φορείς, μεγάλα ξενοδοχεία και θέρετρα, εκπαιδευτικά ιδρύματα, νοσοκομεία, μεγάλες επιχειρήσεις, τράπεζες, ΜΜΕ, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αεροδρόμια, γήπεδα και άλλα.

Μέχρι πρόσφατα, το υψηλό κόστος ενός οπτικού LAN, που είναι επεκτάσιμο, αναβαθμίσιμο και ανθεκτικό σε αλλαγές λόγω μελλοντικών εξελίξεων, το καθιστούσε μη ελκυστικό για τους περισσότερους οργανισμούς. Ωστόσο, σήμερα, το κόστος κεφαλαίου (Capital Expenditure – CapEx) που σχετίζεται με τον εξοπλισμό και την υποδομή των POL μπορεί να φτάσει έως και 40 τοις εκατό λιγότερο από την παραδοσιακή λύση δικτύου Ethernet με βάση το χαλκό. Επιπλέον, η ανάπτυξη ενός συστήματος POL μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση 50 έως 70 τοις εκατό στα λειτουργικά έξοδα (Operational Expenditure – OpEx) του συστήματος σε σύγκριση με ένα σύστημα χαλκού λόγω λιγότερης κατανάλωσης ενέργειας, μειωμένων απαιτήσεων ψύξης, μικρότερης ανάγκης εγκατάστασης UPS και χαμηλότερου κόστους εποπτείας και συντήρησης. Αυτό το καθόλου αμελητέο χαμηλό TCO μαζί με τα πολλά άλλα οφέλη της μελλοντικής βιωσιμότητας της υποδομής ινών, συμβάλλει στην απόκτηση ελκυστικότητας των POL στην αγορά (Nikos Anerousis et al, 2013).

Εκτός από το κόστος σε αμιγώς οικονομικούς όρους, δε μπορούμε να παραβλέψουμε τα περιβαλλοντικά οφέλη, σε όρους κατανάλωσης πρώτων υλών, κατανάλωσης ενέργειας και παραγωγής αποβλήτων. Η Ένωση Βιομηχανιών Τηλεπικοινωνιών (Telecommunication Industries Association - TIA) αναφέρει: «Οι υποδομές τηλεπικοινωνιών επηρεάζουν την κατανάλωση πρώτων υλών. Οι μέθοδοι σχεδιασμού και εγκατάστασης των υποδομών επηρεάζουν επίσης τη διάρκεια ζωής του προϊόντος και τη βιωσιμότητα του κύκλου ζωής του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Αυτές οι πτυχές των τηλεπικοινωνιακών υποδομών επηρεάζουν το περιβάλλον μας. Δεδομένου ότι οι κύκλοι ζωής των κτηρίων σχεδιάζονται συνήθως για δεκαετίες, απαιτούνται ενδιάμεσες τεχνολογικές αναβαθμίσεις ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Η διαδικασία σχεδιασμού και εγκατάστασης τηλεπικοινωνιακών υποδομών διευρύνει την ανάγκη για βιώσιμες υποδομές σε σχέση με τη ζωή κτηρίων, τον κύκλο ζωής του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και τις εκτιμήσεις των επιπτώσεων στα περιβαλλοντικά

απόβλητα» (TIA-569-C, 2012). Η υιοθέτηση POL από έναν οργανισμό προωθεί τη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, επιτρέποντας όλα τα ακόλουθα:

- Μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ανά θύρα Ethernet σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες, καθώς και την ουσιαστική εξάλειψη των απαιτήσεων τροφοδοσίας, εξαερισμού και κλιματισμού στην αίθουσα τηλεπικοινωνιών.
- Μειωμένη φυσική υποδομή εγκαταστάσεων καλωδίων (σημαντική μείωση των υλικών καλωδίωσης και διασύνδεσης, απαιτούνται έως και 90% λιγότερα υλικά καλωδίωσης, ανάλογα με τη διαμόρφωση).
- Μείωση της επιφάνειας των κτηρίων που απαιτείται για τις απαιτήσεις τηλεπικοινωνιακού χώρου, εξαλείφοντας την ανάγκη ενεργού ηλεκτρονικού εξοπλισμού που συνήθως απαιτείται σε κάθε όροφο.
- Αύξηση του κύκλου ζωής της υποδομής, χρησιμοποιώντας μονότροπες οπτικές ίνες υψηλού εύρους ζώνης, σε μεγάλες αποστάσεις, επιτρέποντας περαιτέρω μια βιώσιμη υποδομή ικανή να υποστηρίζει μελλοντικές γενιές ηλεκτρονικών κατά τη διάρκεια ζωής του κτηρίου.

2.4.4 Τεχνικά Πλεονεκτήματα POL

Η τεχνολογία POL χρησιμοποιεί μονότροπη ίνα, η οποία είναι απαραίτητη για να επιτρέψει την πολυπλεξία σημάτων με διαίρεση μήκους κύματος σημάτων και προς τις δύο κατευθύνσεις σε μία μόνο ίνα. Ενσωματώνει επίσης τη χρήση παθητικών οπτικών διαχωριστών, που βρίσκονται οπουδήποτε μεταξύ του κύριου εξοπλισμού συγκέντρωσης, συνήθως τερματικά οπτικής γραμμής (Optical Line Terminals – OLT) και των τερματικών των χρηστών, γνωστά ως τερματικά οπτικού δικτύου (Optical Network Terminals – ONT). Υποστηρίζονται αποστάσεις έως 20 χιλιόμετρα και η συνηθέστερη τοπολογία περιλαμβάνει τη διακλάδωση από μια θύρα του OLT σε έως 32 ONT, που βρίσκονται εντός αυτής της απόστασης. Με 4 θύρες Gigabit Ethernet ανά ONT, ένα μόνο OLT μπορεί να υποστηρίξει έως και 7192 θύρες Gigabit Ethernet.

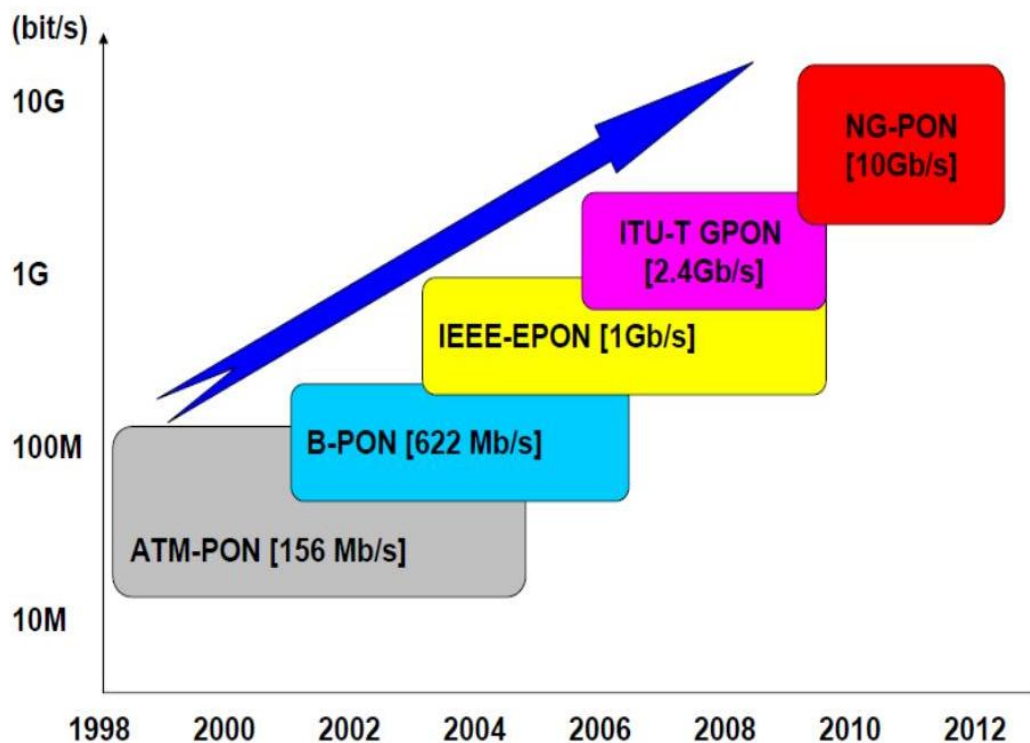
Όπως απαιτείται για το POL, το πρότυπο TIA 568-C.0 έχει προκρίνει εδώ και καιρό τις μονότροπες ίνες στα υποσυστήματα καλωδίωσης του δικτύου κορμού και των

οριζόντιων συνδέσεων και καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις απόδοσης στο πρότυπο TIA-568-C.3 (TIA-568-C.3, 2008). Όσον αφορά τις υποστηριζόμενες τοπολογίες, το TIA-568-C.0 (TIA-568-C.0, 2009) απαιτεί τη γενική εγκατάσταση δομημένης καλωδίωσης σε έναν ιεραρχικό αστέρα. Όσον αφορά την οριζόντια κατανομή ινών, το πρότυπο προτείνει τουλάχιστον δύο ίνες σε κάθε θέση εργασίας.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα σημαντικότερα πρότυπα που έχουν εκδοθεί, με έμφαση στις πλέον σύγχρονες τεχνολογίες (GPON & XG-PON) και συντομότερη αναφορά στις παλαιότερες τεχνολογίες (APON/BPON & EPON), που όμως εν πολλοίς έθεσαν τις βάσεις για τη μελλοντική ανάπτυξη των σύγχρονων προτύπων. Στον Πίνακα 3 καταγράφουμε τα πρότυπα, το έτος που εισήχθησαν ως πρότυπα και κάποιους βασικούς ποιοτικούς δείκτες κάθε μίας, για μία σύντομη επισκόπηση και σύγκριση μεταξύ τους, ενώ στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η εξέλιξη των δικτύων αυτών και των ρυθμών μετάδοσης που μπορούν να επιτύχουν.

Τεχνολογία	Έτος	Ρυθμός Καθόδου	Ρυθμός Ανόδου	Εμβέλεια
APON/BPON	1998	1,244 Gbps	622 Mbps	20 km
EPON	2001	1,25 Gbps	1,25 Gbps	20 km
GPON	2004	2,48 Gbps	2,48 Gbps	20 km
XGPON	2009	10 Gbps	10 Gbps	20 km

Πίνακας 3: Σύγκριση Τεχνολογιών PON



Εικόνα 7: Χρονική Εξέλιξη των Δικτύων PON

2.5 ATM PON – Broadband PON (APON/BPON)

Τα APON (ATM-PON) και BPON (Broadband-PON) δίκτυα στην ουσία αποτελούν διαφορετικές ονομασίες για την ίδια οικογένεια παθητικών οπτικών δικτύων, η οποία βασίζεται πάνω στη σειρά συστάσεων G.983 της ITU-T. Το 1995 η ένωση Full Service Access Network (FSAN), στην οποία συμμετέχουν μερικοί από τους μεγαλύτερους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, ανεξάρτητα εργαστήρια δοκιμών και προμηθευτές εξοπλισμού, στοχεύοντας στην καλύτερη εξυπηρέτηση των εταιρικών πελατών, παρέχοντάς τους πολλαπλές υπηρεσίες ευρυζωνικότητας, κατέληξε στην σχεδίαση ενός παθητικού οπτικού δικτύου που βασίζεται πάνω στην ασύγχρονη μέθοδο μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode - ATM). Το πρότυπο αυτό αρχικά ονομάστηκε APON, αλλά σύντομα επικράτησε η ονομασία BPON ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε στενή σύνδεση με την μέθοδο ATM. Το 1998 η ITU-T ξεκίνησε την προτυποποίηση των δικτύων BPON μέσω της σειράς συστάσεων G.983.

Στο APON, με κριτήρια την απλότητα αλλά και το κόστος, επιλέχθηκε η τεχνική TDM για τη ροή καθόδου και για την πολλαπλή προσπέλαση στο μέσο. Για τη ροή

ανόδου επιλέχτηκε η τεχνική TDMA. Τα βασικά στοιχεία του δικτύου είναι τα εξής: το OLT, οι ONUs και ο παθητικός οπτικός διαιρέτης. Στο APON μία οπτική ίνα διαιρείται παθητικά μέχρι και 64 φορές, με αποτέλεσμα 64 ONUs να διαμοιράζονται τη χωρητικότητα της. Η παθητική διαίρεση επιτρέπει στους χρήστες να διαμοιράζονται το εύρος ζώνης και κατ' επέκταση το κόστος. Αυτό μειώνεται ακόμα περισσότερο με τη μείωση του αριθμού των οπτό-ηλεκτρονικών στοιχείων που απαιτούνται για το OLT, δεδομένου ότι περισσότερες της μίας ONU διαμοιράζονται μια διεπαφή.

Δεδομένου ότι στο κανάλι ανόδου χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο TDMA, κάθε ONU πρέπει να είναι συγχρονισμένη χρονικά με όλες τις άλλες. Αυτό πραγματοποιείται με μία διαδικασία που ονομάζεται μέτρηση απόστασης (ranging) των ONU και βασίζεται στη λογική ότι το OLT πρέπει να καθορίσει πόσο μακριά βρίσκεται η κάθε ONU από αυτό, έτσι ώστε να της παραχωρήσει τη βέλτιστη χρονική σχισμή, μέσα στην οποία θα πρέπει να εκπέμψει για να αποφευχθούν προβλήματα συγκρούσεων μετάδοσης.

Στο APON χρησιμοποιείται μία οπτική ίνα τόσο για το κανάλι ανόδου όσο και για το κανάλι καθόδου, οπότε χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά μήκη κύματος: 1550nm για την κατεύθυνση καθόδου και 1310nm για την κατεύθυνση ανόδου. Τα κελιά ATM μετατρέπονται απευθείας σε οπτικό κύμα και στέλνονται στο δίκτυο PON.

Τα BPON αποτέλεσαν τον πρόδρομο όλων των παθητικών οπτικών δικτύων που κυριαρχούν στις μέρες μας. Στα χρόνια που αποτελούσαν την μοναδική πρόταση για το δίκτυο πρόσβασης, είχαν να προσφέρουν πρωτοφανή πλεονεκτήματα. Ταχύτητες μετάδοσης 1244 Mbps για τη ροή καθόδου και 622 Mbps για τη ροή ανόδου, μέγιστη εμβέλεια του δικτύου τα 20 km, λόγω διαχωρισμού του οπτικού σήματος 1:64, πλεονεκτήματα που αποτέλεσαν κληρονομιά και για τις επόμενες γενιές των TDM παθητικών οπτικών δικτύων.

Ωστόσο, η πρόοδος της τεχνολογίας και η συνεχής ανάγκη για την εύρεση της βέλτιστης λύσης δεν άργησε να οδηγήσει στην εγκατάλειψη της χρήσης των BPON δικτύων, σε αρκετό μεγάλο ποσοστό, και την στροφή στα πιο σύγχρονα EPON και GPON. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα BPON περιορίζονταν στην μετάδοση συγκεκριμένου μήκους ATM κελιών, γεγονός που οδηγούσε σε πολύ μεγάλο κατακερματισμό των δεδομένων. Βέβαια το πιο μεγάλο πλεονέκτημα των EPON και

GPON, που ακολούθησαν, είναι φυσικά οι μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης και για τα δύο ρεύματα της κίνησης. Έτσι λοιπόν οι πάροχοι στράφηκαν προς τα πιο σύγχρονα TDM PONs.

2.6 Ethernet PON (EPON)

Το Ethernet έχει εξελιχθεί στο πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας στα τοπικά δίκτυα (LANs), ενώ έχει προεκταθεί τόσο στα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs) όσο και στα δίκτυα ευρείας περιοχής (WANs). Η χρήση του Ethernet σαν τεχνολογία μετάδοσης στο πρώτο μίλι (Ethernet at First Mile - EFM) επιτρέπει την ανάπτυξη δικτύων πρόσβασης με IP και Ethernet δυνατότητες, όπου τα δεδομένα μεταφέρονται ενθυλακωμένα μέσα σε πλαίσια Ethernet. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή του κόστους και της πολυπλοκότητας της μετατροπής ανάμεσα σε διαφορετικά πρωτόκολλα, σε αντίθεση με ότι συμβαίνει με τις υλοποιήσεις BPON. Επιπρόσθετα, η χρησιμοποίηση Ethernet στο πρώτο μίλι επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου να εκμεταλλευτούν τα υπάρχοντα, και γνώριμα σε αυτούς, εργαλεία διαχείρισης και ανάλυσης του δικτύου, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για την παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός απλού δικτύου Ethernet. Το EPON παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, μειωμένο κόστος και ευρύτερες υπηρεσίες από το APON, ενώ η αρχιτεκτονική του είναι παρόμοια και κληρονομεί πολλά χαρακτηριστικά του G.983 που αφορά στα APON.

Η κύρια διαφορά μεταξύ APON και EPON είναι ότι τα δεδομένα στο δεύτερο μεταφέρονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους ως και 1518 bytes σύμφωνα με το πρωτόκολλο της IEEE 802.3 (IEEE 802.3, 2018) για το Ethernet. Αντίθετα στο APON μεταφέρονται σε κελιά ATM των 53 bytes όπως επιβάλλεται από το πρωτόκολλο ATM. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι δύσκολη και όχι αποδοτική η μεταφορά σε ένα δίκτυο APON κίνησης που βασίζεται στην IP, όπου τα δεδομένα χωρίζονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους ως και 65535 bytes. Για να μεταφερθεί η IP κίνηση στο APON τα πακέτα θα πρέπει να διασπαστούν σε κομμάτια των 48 bytes και στο κάθε ένα από αυτά να προσαρτηθεί μια επικεφαλίδα ATM των 5 bytes. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, πολύπλοκη και προσθέτει επιπλέον κόστος στις ONUs και στο OLT. Για κάθε τμήμα δεδομένων των 48 bytes έχουμε σπατάλη εύρους 5 bytes. Αντίθετα, το

Ethernet είναι φτιαγμένο για να καλύψει κίνηση IP και μειώνει δραστικά τις επικεφαλίδες σε σχέση με το ATM.

Όπως στα δίκτυα BPON, έτσι και στα EPON χρησιμοποιείται η περιοχή μήκους κύματος των 1490nm για μετάδοση κίνησης φωνής και δεδομένων στη ροή καθόδου, ενώ για τη ροή ανόδου χρησιμοποιείται η περιοχή των 1310nm. Το παράθυρο των 1550nm είναι διαθέσιμο για άλλες υπηρεσίες, όπως μετάδοση (broadcasting) video από τον OLT προς τους χρήστες. Αφού βασίζεται στο Gigabit Ethernet πρωτόκολλο, ένα EPON δίκτυο έχει ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης τα 1250Mbps, τα οποία μεταδίδονται με τη χρήση κωδικοποίησης 8B10B. Σε αυτή την κωδικοποίηση δύο επιπλέον περιττά bit ενσωματώνονται σε κάθε 8-bit μπλοκ δεδομένων, με σκοπό να παρέχουν επαρκή χρόνο για την ανάκτηση του σήματος, αλλά και να διαθέτουν υπηρεσίες παρακολούθησης λαθών στη μετάδοση.

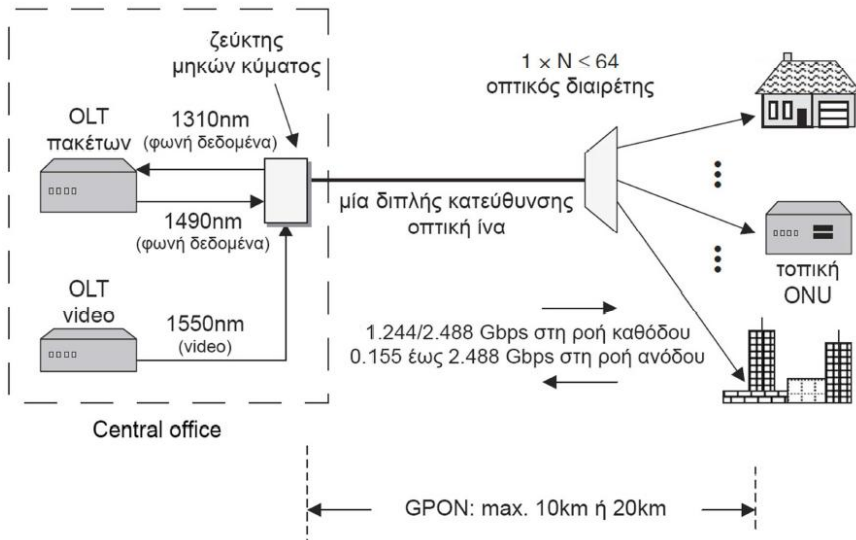
2.7 Gigabit PON (GPON)

Το 2001 η FSAN (Full Service Access Network Group) στράφηκε στην σχεδίαση του GPON (Gigabit Passive Optical Network) με σκοπό την ανάπτυξη παθητικών οπτικών δικτύων με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων τουλάχιστον ενός Gbps. Δυο χρόνια αργότερα, η ITU-T προχώρησε στην προτυποποίηση του πρωτοκόλλου GPON μέσω της σειράς συστάσεων G.984. Πολλά από τα χαρακτηριστικά προγενέστερων προτύπων διατηρήθηκαν και στο GPON, ώστε να είναι συμβατό με τις τεχνολογίες που είχαν ήδη αναπτυχθεί. Εξαιτίας του μεγάλου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, τα GPON παρέχουν πλήρη υποστήριξη υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων υπηρεσιών φωνής, Ethernet, αξιοποιώντας το επίπεδο σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence Layer - GTC Layer), που αναπτύχθηκε βασιζόμενο στη μέθοδο Generic Framing Procedure (GFP) της ITU-T G.7041 (ITU-T, 2016).

2.7.1 Αρχιτεκτονική GPON

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 8, η διάταξη ενός GPON δικτύου ακολουθεί την πεπατημένη της κλασικής μορφής ενός PON. Διατηρεί ένα μεγάλο πλήθος από λειτουργίες που έχουν χρησιμοποιηθεί σε δίκτυα BPON και EPON, όπως για

παράδειγμα, τη δυναμική κατανομή εύρους ζώνης και τη χρήση μηνυμάτων οργάνωσης, διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου.



Εικόνα 8: Αρχιτεκτονική GPON

Ωστόσο, σε αντίθεση με την αρχιτεκτονική των BPON και EPON, τα οποία είχαν αναπτυχθεί υπό την οπτική γωνία των κατασκευαστών εξοπλισμού, ο τρόπος λειτουργίας και σχεδίασης των GPON καθοδηγείται από τις ανάγκες του πελάτη. Αυτό αντικατοπτρίζεται στις απαιτούμενες προδιαγραφές των υπηρεσιών GPON, οι οποίες περιγράφονται στην σύσταση G.984.1 (ITU-T Recommendation G.984.1, 2008). Αυτή η σύσταση λαμβάνει υπόψη τις συνολικές απαιτήσεις των κορυφαίων παρόχων υπηρεσιών επικοινωνίας στον κόσμο (Nikos Anerousis et al, 2013).

2.7.2 Σύσταση G.984.1 (GPON)

Πρώτα από όλα, ένα GPON θα πρέπει να είναι full-service δίκτυο. Κάτι που σημαίνει ότι θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει στους συνδρομητές του όλων των ειδών τις υπηρεσίες. Αυτό συμπεριλαμβάνει 10/100/1000 Mbps Ethernet, αναλογική τηλεφωνία, συνδέσεις T1/E1 δηλαδή 1.544 Mbps και 2.048 Mbps, ATM συνδέσεις των 155 Mbps, καθώς επίσης και υψηλού εύρους ζώνης μισθωμένες γραμμές. Οι ονομαστικές τιμές ρυθμού μετάδοσης για την κατεύθυνση καθόδου είναι 1.25 Gbps και

2.5 Gbps, ενώ για την κατεύθυνση ανόδου οι τιμές είναι 155 Mbps, 622 Mbps, 1.25 Gbps και 2.5 Gbps. Οι ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να είναι είτε συμμετρικοί είτε ασύμμετροι, με τους υψηλότερους ρυθμούς να χρησιμοποιούνται στην κατεύθυνση από το OLT προς τις ONUs (ITU-T Recommendation G.984.1, 2008).

Τα μήκη κύματος ορίζονται στην περιοχή των 1480nm με 1500nm για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων της κατεύθυνσης καθόδου, ενώ αντίστοιχα, για την κατεύθυνση ανόδου ορίζονται στην περιοχή των 1260nm με 1360nm. Επομένως οι μέσες τιμές των 1490nm και 1310nm είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα BPON και EPON δίκτυα. Επιπρόσθετα, η περιοχή των 1550nm με 1560nm χρησιμοποιείται για μετάδοση video στην κατεύθυνση καθόδου (broadcasting) (ITU-T Recommendation G.984.1, 2008).

Ανάλογα με τις προδιαγραφές των οπτικών πομποδεκτών, η φυσική εμβέλεια ενός GPON δικτύου φθάνει maximum τα 10 ή 20 km. Παράλληλα, ο λόγος διαχωρισμού φτάνει το 1:64, εξυπηρετώντας έτσι μέγιστο αριθμό 64 ONUs.

2.7.3 Σύσταση G.984.2

Η σύσταση G.984.2 της ITU-T περιγράφει τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές για το φυσικό επίπεδο του GPON, το οποίο ισοδυναμεί με το αντίστοιχο φυσικό επίπεδο του μοντέλου αναφοράς OSI (ITU-T Recommendation G.984.2, 2003). Οι προδιαγραφές συμπεριλαμβάνουν μετατροπές σήματος από ηλεκτρικό σε οπτικό, από οπτικό σε ηλεκτρικό, καθώς επίσης ανάκτηση χρονισμού, και μηχανισμούς διόρθωσης λαθών.

Κύριο μέλημα της G.984.2 ήταν να ορίσει λεπτομερώς την απόδοση των οπτικών πομποδεκτών στις αποστάσεις μετάδοσης των 10 και 20 km. Για υπολογισμούς κόστους ισχύος, το GPON χρησιμοποιεί τις ίδιες κλάσεις οπτικών που έχουν οριστεί και στα BPON δίκτυα. Οι τιμές των κλάσεων εμφανίζονται στον πίνακα 4 που ακολουθεί.

Κλάση	Απώλειες
A	5 έως 20 db
B	10 έως 25 db
C	15 έως 30 db

Πίνακας 4: Κλάσεις ισχύος GPON.

Σε αυτές τις τιμές εξασθένησης σήματος εμπεριέχονται απώλειες που προκύπτουν από την οπτική ίνα, από συναρμογές, συνδέσμους, καθώς και οπτικούς διαχωρισμούς. Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πιθανή εμφάνιση πρόσθετων υποβαθμίσεων σήματος, οι οποίες προκύπτουν από πρόσθετες συναρμογές, ή και πρόσθετα μήκη ινών, λόγω επισκευής οπτικών καλωδίων, επιδράσεις από περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθώς επίσης και απρόβλεπτες φθορές στη λειτουργία των παθητικών στοιχείων του δικτύου.

Ένα σημαντικό σκέλος της G.984.2 αφορά στις προδιαγραφές των χρονικών παραμέτρων της μετάδοσης ριπών κίνησης. Αν και το GPON είναι ένα σύγχρονο δίκτυο στο οποίο ο OLT ενημερώνει τις ONUs για το πότε μπορούν να μεταδώσουν, αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει μια χρονική αβεβαιότητα.

Παρόλο που αυτό συμβαίνει και στα BPON και EPON δίκτυα, οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης μετατρέπουν αυτή την αβεβαιότητα σε πολύ κρίσιμη παράμετρο ενός GPON δικτύου.

Από τη στιγμή που η διαδικασία εύρεσης απόστασης έχει περιορισμένη ακρίβεια, ένας χρόνος ασφαλείας προστίθεται ανάμεσα σε διαδοχικές ριπές από ONUs με σκοπό να αποφευχθούν οι συγκρούσεις ανεξάρτητων πακέτων. Αυτός ο τρόπος διευθέτησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5 (ITU-T Recommendation G.984.2, 2003).

Αν μια ONU βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από τον OLT, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ο αισθητήρας φωτός του OLT να ανιχνεύσει μια σχετικά μεγάλης οπτικής ισχύος δέσμη φωτός από την συγκεκριμένη ONU. Για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του αισθητήρα φωτός του OLT, η σύσταση G.984.2 επιτρέπει στον πομπό της ONU να ελέγχει την οπτική ισχύ του σήματός της, επιλέγοντας να εφαρμόσει πάνω του μια από τις τρεις διαθέσιμες λειτουργίες ισχύος. Στη λειτουργία 1, ο πομπός της ONU λειτουργεί στο κανονικό επίπεδο οπτικής ισχύος του. Στις λειτουργίες 2 και 3, η οπτική

ισχύς περιορίζεται κατά 3 και 6 dB αντίστοιχα σε σχέση με την τιμή της στην λειτουργία 1. Έτσι, αν ο OLT λάβει ένα δυνατή ισχύος σήμα, μπορεί να δώσει εντολή στην ONU να ελαττώσει την ισχύ του σήματος της.



Εικόνα 9: Προσθήκη χρόνου ασφαλείας ανάμεσα σε ριπές (ITU-T Recommendation G.984.2, 2003).

Η σύσταση G.984.2, στοχεύοντας στη συγκράτηση του κόστους των οπτικών πομποδεκτών σε χαμηλά επίπεδα, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την ακεραιότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων, ορίζει την χρήση της τεχνικής ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction - FEC). Η χρησιμοποίηση της FEC στα GPON δίκτυα είναι απαραίτητη εξαιτίας των υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων που μειώνουν την οπτική ισχύ του σήματος με δυο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι μέσω της μείωσης της ευαισθησίας του δέκτη λόγω των υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Αυτό συμβαίνει γιατί η χρησιμοποίηση ευρύτερου εύρους ζώνης προσθέτει περισσότερο θόρυβο στο δέκτη. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω της χρωματικής διασποράς, η οποία αυξάνεται ανάλογα με τους ρυθμούς μετάδοσης, και επηρεάζει αρνητικά την ισχύ του οπτικού σήματος. Έτσι, με την χρησιμοποίηση της FEC επιτυγχάνεται η διατήρηση 3 έως 6 dB παραπάνω ισχύος.

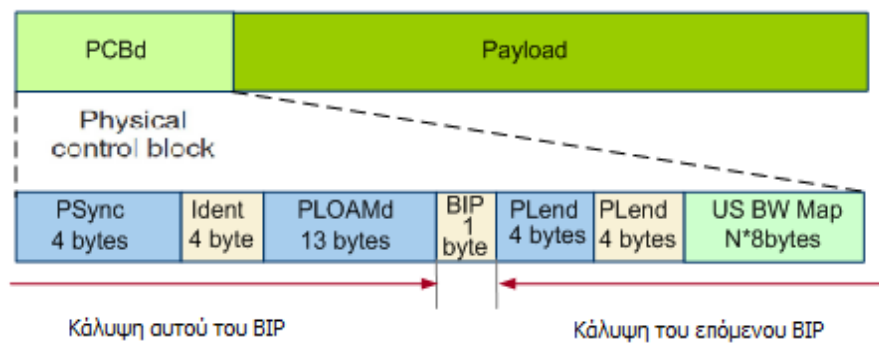
Η FEC είναι μια τεχνική μαθηματικής επεξεργασίας σήματος που κωδικοποιεί τα δεδομένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να εντοπίζει και να διορθώνει λάθη στη μετάδοση. Αυτό που συμβαίνει με την χρησιμοποίηση της FEC είναι ότι μεταδίδονται επιπλέον πληροφορίες παράλληλα με τα προς μετάδοση δεδομένα. Αν κάποια από αυτά τα δεδομένα χαθούν στην πορεία, ή φθάσουν με λάθη στον προορισμό τους, οι επιπρόσθετες πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να διορθωθούν τα δεδομένα που

μεταδόθηκαν. Συνήθως το μέγεθος των επιπλέον πληροφοριών είναι μικρό, οπότε η χρήση FEC κωδικών δε δεσμεύει μεγάλο μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

2.7.4 Επίπεδο Σύγκλισης Μετάδοσης G.984.3

Η σύσταση G.984.3 της ITU-T περιγράφει το επίπεδο σύγκλισης μετάδοσης του GPON (GPON Transmission Convergence layer - GTC layer), το οποίο ισοδυναμεί με το επίπεδο 2 δηλαδή του επίπεδο ζεύξης δεδομένων του μοντέλου αναφοράς OSI. Προσδιορίζει την δομή του πλαισίου ενός GPON δικτύου, το πρωτόκολλο MAC (Media Access Control), το μηχανισμό ranging, τις λειτουργίες διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου, και τη μέθοδο κρυπτογράφησης των πληροφοριών, που μεταδίδονται.

Για να μπορούν στο πλαίσιο μεταφοράς ενός GPON δικτύου να φιλοξενοούνται, με αποδοτικό τρόπο, όλοι οι τύποι υπηρεσιών (π.χ. ATM, TDM, Ethernet), είναι απαραίτητη η χρήση της μεθόδου ενθυλάκωσης **GPON Encapsulation Method (GEM)**. Στην Εικόνα 10 απεικονίζεται η δομή ενός πλαισίου GPON, το οποίο έχει σταθερή διάρκεια 125μs. Το πλαίσιο αποτελείται από ένα πεδίο **PCB (Physical Control Block)** και ένα πεδίο ωφέλιμο φορτίο (payload) (ITU-T Recommendation G.984.3, 2010).



Εικόνα 10: Πλαίσιο GPON Κατεύθυνσης Καθόδου (ITU-T Recommendation G.984.3, 2010).

Το πεδίο PCB μεταφέρει πληροφορίες επικεφαλίδας φυσικού επιπέδου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την διαχείριση του δικτύου (ITU-T Recommendation G.984.3, 2010).

Για τη κατεύθυνση καθόδου, το πεδίο PCB περιέχει τις ακόλουθες πληροφορίες:
Πεδίο **συγχρονισμού πλαισίου (Psync)**, μήκους 4 bytes.

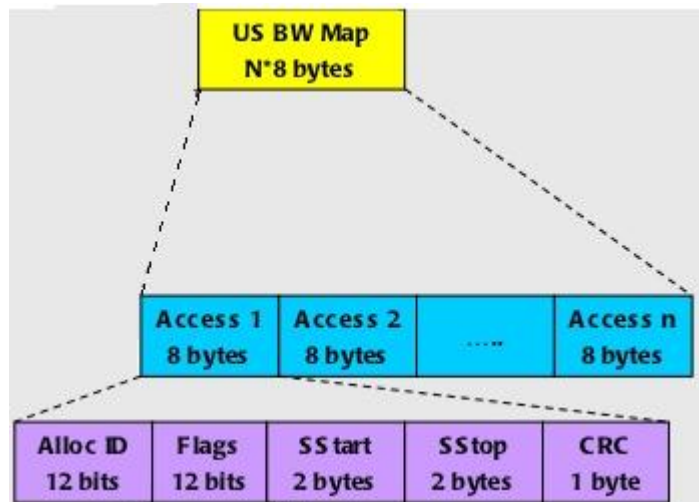
Πεδίο **Ident**, μήκους 4 bytes, το οποίο περιέχει έναν μετρητή των 8 KHz, ένα bit

- κατάστασης της FEC για την κατεύθυνση καθόδου, ένα bit μετάβασης του κλειδιού κρυπτογράφησης, και 8 bits κατάστασης δεσμευμένα για μελλοντική χρήση.
- Πεδίο με ονομασία **Physical Layer OAM (PLOAM)**, μήκους 13 bytes, το οποίο χειρίζεται λειτουργίες όπως ειδοποιήσεις σχετικές με OAM.
- Πεδίο **Bit Interleaved Parity (BIP)**, μήκους 1 byte, το οποίο περιέχει την ισοτιμία των διαστρωμένων bits όλων των bytes που έχουν μεταδοθεί από την στιγμή που μεταδόθηκε το προηγούμενο πεδίο BIP, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η ισοτιμία του πεδίου FEC αν υπάρχει.
- Πεδίο με ονομασία **Payload Length Indicator (PLend)**, μήκους 4 bytes, το οποίο περιέχει το μήκος του πεδίου χαρτογράφησης εύρους ζώνης της κατεύθυνσης ανόδου και το μήκος του τμήματος ATM. Το περιεχόμενο του πεδίου αυτού αποστέλλεται δύο φορές, για εφεδρεία. Η ONU επιλέγει και διατηρεί την εκπομπή με τα λιγότερα σφάλματα.
- Πεδίο **χαρτογράφησης εύρους ζώνης της κατεύθυνσης ανόδου (US BW map)**, μήκους $N \times 8$ -byte, που χρησιμοποιείται για την ανάθεση N χρονοθυρίδων εκπομπής προς τις ONUs.

Το πεδίο US BW map περιέχει N οντότητες, συνυφασμένες με N χρονοθυρίδες, που προορίζονται για τις ONUs. Κάθε 8-byte πεδίο αποτελείται από τα εξής υποπεδία:

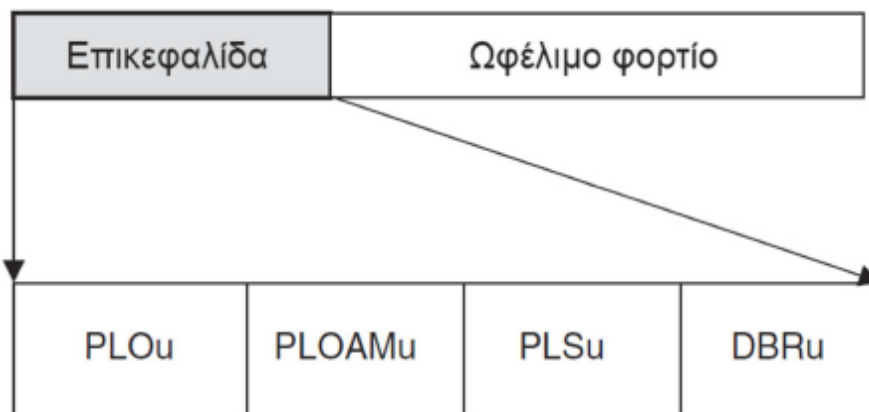
- Πεδίο 12-bit, με ονομασία **Allocation Identifier (AllocID)**, το οποίο ανατίθεται σε κάθε ONU.
- Σημείες 12 bits, που επιτρέπουν την μετάδοση διαφόρων μπλοκ επικεφαλίδας φυσικού επιπέδου στην κατεύθυνση ανόδου, για κάποια καθορισμένη ONU.
- Πεδίο **Start Pointer (SStart)**, μήκους 2 byte, το οποίο καθορίζει τον χρόνο έναρξης του παραθύρου μέσα στο οποίο επιτρέπεται η μετάδοση στην κατεύθυνση ανόδου. Ο χρόνος αυτός μετράται σε bytes.
- Πεδίο **Stop Pointer (SStop)**, μήκους 2 byte, το οποίο δηλώνει τη χρονική στιγμή που κλείνει το παράθυρο, μέσα στο οποίο επιτρέπεται η μετάδοση στην κατεύθυνση ανόδου.

- Πεδίο **CRC** του ενός byte, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα για εντοπισμό μέχρι 2 bits λάθους στο US BW Map, καθώς επίσης και τη διόρθωση ενός bit λάθους.



Εικόνα 11: Δομή υποπεδίου US BW Map

Η κίνηση της κατεύθυνσης ανόδου ενός δικτύου GPON αφορά στη συνεχόμενη μετάδοση πληροφοριών από μια ή περισσότερες ONUs. Η σειρά με την οποία τα πλαίσια φτάνουν στον OLT βασίζεται στην κατανομή χρονοθυρίδων όπως αυτή έχει απονεμηθεί από τον OLT. Για να είναι επιτυχής η λήψη πλαισίων ριπής, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μια επικεφαλίδας, συγκεκριμένου μεγέθους, στην αρχή της κάθε ριπής. Η δομή ενός πλαισίου της κατεύθυνσης ανόδου, το οποίο αποτελείται από έναν έως τέσσερις τύπους πεδίων επικεφαλίδας και ένα μεταβλητού μεγέθους πεδίο ωφέλιμου φορτίου, το οποίο περιέχει τη ριπή.



Εικόνα 12: Πλαίσιο GPON κατεύθυνσης ανόδου

Η επικεφαλίδα του πλαισίου αποτελείται από τα εξής πεδία:

- Το πεδίο **Physical Layer Overhead (PLO)** στην έναρξη της ριπής, περιέχει το προοίμιο, το οποίο διασφαλίζει την σωστή λειτουργία του φυσικού στρώματος.
- Το πεδίο **Physical Layer Operation, Administration, and Management (PLOAM)** είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση μηχανισμών όπως η μέτρηση απόστασης, η ενεργοποίηση των ONUs, και οι ειδοποιήσεις OAM. Αυτό το μήκους 13 bytes πεδίο περιέχει τα μηνύματα PLOAM, όπως αυτά περιγράφονται στη σύσταση G.983.1, και προστατεύεται από λάθη σε bits μέσω ενός ελέγχου CRC.
- Το πεδίο **Power Leveling Sequenc (PLS)** περιέχει πληροφορίες για την ισχύ των laser των ONUs όπως αυτό το αντιλαμβάνεται ο OLT.
- Το πεδίο **Dynamic Bandwidth Report (DBR)** ενημερώνει τον OLT για το μήκος των ουρών αναμονής του κάθε AllocID σε μια ONU. Αυτό επιτρέπει στον OLT να κατανέμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης με τον καλύτερο τρόπο. Το DBR πεδίο προστατεύεται από λάθη σε bits με τη χρήση ενός ελέγχου CRC.

2.8 XG-PON

Το 2010, η ITU-T, μέσω της σειράς συστάσεων G.987, πρότεινε τη δημιουργία ενός εξελιγμένου δικτύου GPON, το οποίο μπορεί να λειτουργεί σε ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 10 Gbps. Το δίκτυο αυτό φέρει την ονομασία 10G-PON. Πιο συγκεκριμένα, για την ασύμμετρη μετάδοση, το δίκτυο είχε την ειδική ονομασία XG-PON1 και λειτουργούσε σε ρυθμούς 10 Gbps για την κατεύθυνση καθόδου και 2.5 Gbps για την κατεύθυνση ανόδου. Παρόμοια, για την συμμετρική μετάδοση, το δίκτυο είχε την ειδική ονομασία XG-PON2 και λειτουργούσε σε ρυθμό 10 Gbps και στις δύο κατευθύνσεις. Στην περίπτωση της συμμετρικής μετάδοσης ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί ότι οι ONUs εξοπλίζονται με πιο ακριβά lasers μετάδοσης ριπής, ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης της κατεύθυνσης ανόδου. Σε σχέση με τα απλά GPON δίκτυα που εκπέμπουν στα 1490nm για την κατεύθυνση καθόδου, και 1310nm για την κατεύθυνση ανόδου, τα 10G-PONs χρησιμοποιούν την περιοχή των 1260-1280nm για την κατεύθυνση καθόδου, και την περιοχή των 1575nm -1580nm για την κατεύθυνση ανόδου (ITU-T G.987, 2012).

Τα 10G-PONs αποτελούν εξέλιξη των GPONs και ο λόγος δημιουργίας τους είναι η μέσο-μακροπρόθεσμη αντικατάσταση των GPONs με σκοπό να ανταποκρίνονται στις αυξημένες ανάγκες των δικτύων πρόσβασης, όπως αυτές ορίζονται από τις απαιτήσεις των χρηστών σε όγκο δεδομένων. Καθώς η ζήτηση για διαδικτυακή ταχύτητα συνεχίζει να αυξάνεται, τόσο νέες και ταχύτερες τεχνολογίες εμφανίζονται στο προσκήνιο, βασιζόμενες σε ήδη υπάρχοντα πρότυπα.

2.9 NG-PON

Το 2011, το FSAN, με την υποστήριξη της ITU, εισήγαγε τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα Νέας Γενιάς (New Generation Passive Optical Network – NG-PON). Η ανάγκη για την εξέλιξη αυτή, προήλθε από τις ακόλουθες προκλήσεις (Y.Luo, 2013):

Η συνεχής αύξηση της κίνησης στο Διαδίκτυο: Η πρόβλεψη διαφόρων οργανισμών και τηλεπικοινωνιακών παρόχων για το 2020 είναι ότι η συνολική κίνηση θα αγγίξει τα 2.3 Zettabyte (10^{21} byte) ανά έτος, ή 194 Exabyte (10^{18} byte) ανά μήνα, σχεδόν διπλάσια από αυτή που καταγράφηκε το 2017. Η πανδημία του κορωνοϊού το 2020 έχει διαψεύσει αυτή την πρόβλεψη.

Η ανάπτυξη δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς: Τα τελευταία τρία τουλάχιστον χρόνια, οι κατασκευαστές αναπτύσσουν εξοπλισμό για τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, έχουν κυκλοφορήσει οι πρώτες συσκευές που τα υποστηρίζουν, ενώ αρκετοί πάροχοι σε μια πλειάδα χωρών έχουν ξεκινήσει πιλοτικά προγράμματα. Η πλήρης ανάπτυξη των δικτύων αυτών είναι προ των πυλών. Αναμένεται να παρέχει συνδεσιμότητα σε δισεκατομμύρια συσκευές, με μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης και ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης της επικοινωνίας. Ωστόσο, η υποδομή των σημερινών δικτύων δεν είναι επαρκής για τη συνδεσιμότητα των κεραιών και άλλων στοιχείων του δικτύου. Το NG-PON είναι μια καλή υποψηφιότητα για να βελτιώσει αυτήν την υποδομή, ειδικά η δυνατότητά του για υλοποίηση συμμετρικών ζεύξεων με ρυθμούς 40 Gbps και στις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης.

Η ανεπάρκεια του XG-PON1: Το XG-PON1, που αποτέλεσε την 1^η βελτιωμένη γενιά των PON, αφενός δεν προσφέρει τόσο μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης 10 Gbps στην κάθοδο, 2,5 Gbps στην άνοδο, ώστε να καθίσταται μακροπρόθεσμα επαρκές, αφετέρου δε μπορεί να συνυπάρξει με προηγούμενες υλοποιήσεις των PON,

γεγονός που καθιστά την ανάπτυξή του ιδιαίτερα ακριβή, για όποιον πάροχο θα το επέλεγε.

Το NG-PON, με στόχο ρυθμό μετάδοσης 40 Gbps θα μπορεί να εξυπηρετήσει οικιακούς και εταιρικούς πελάτες, τη μεταφορά κίνησης από σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας και άλλες εφαρμογές. Έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ικανό να καλύψει κάθε ανάγκη, σε μεγάλο εύρος δικτύων και εφαρμογών και σε διαφορετικές μεταξύ τους αγορές, με τον πλέον αποδοτικό τρόπο. Στη σύσταση καθορίζονται λεπτομέρειες για την ανάπτυξή του, απαιτήσεις από το σύστημα για τη δημιουργία ενός εύρωστου και ευέλικτου οπτικού δικτύου πρόσβασης και σενάρια ομαλής μετάβασης από υφιστάμενα παραδοσιακά PON με κάποιο διάστημα συνύπαρξης. Διατηρεί στο μέγιστο εφικτό βαθμό χαρακτηριστικά παραδοσιακών συστημάτων PON σύμφωνα με τις συστάσεις G.982, G.983, G.984 και G.987 για να διασφαλιστεί η προς τα πίσω συμβατότητά του με τα υφιστάμενα Οπτικά Δίκτυα Διανομής (Optical Distribution Networks – ODN), που ακολουθούν τις συστάσεις αυτές και η επαναχρησιμοποίηση των υποδομών τους, στο μέγιστο βαθμό, ώστε να μειωθεί το κόστος ανάπτυξής τους (Υ.Λuo, 2013).

3 Πρωτόκολλα Επιπέδου Πρόσβασης

3.1 Εισαγωγή

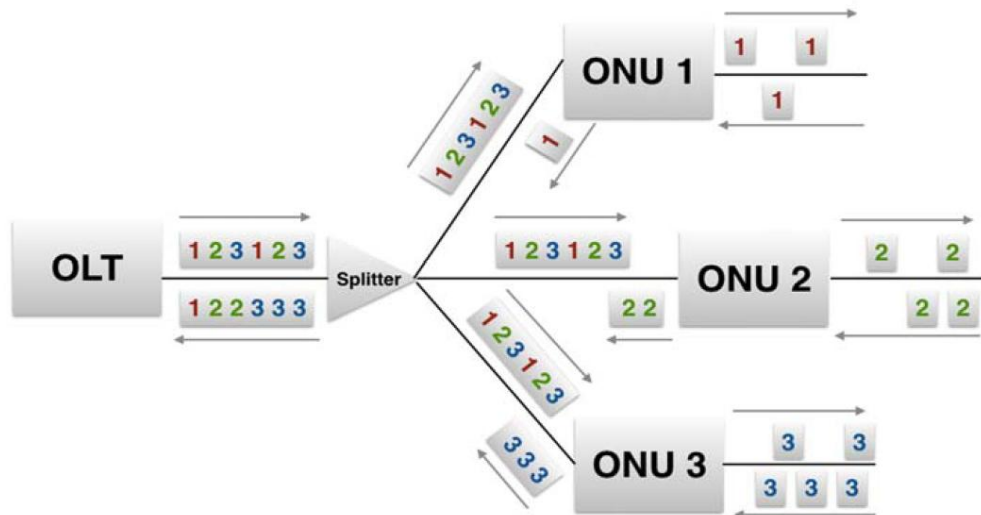
Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, οι ανάγκες αύξησης του ρυθμού μετάδοσης για υποστήριξη καινοτόμων υπηρεσιών, έδωσαν το έναυσμα ώστε στα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του '10 να ξεκινήσει έρευνα και ανάπτυξη τεχνικών, που θα αναβάθμιζαν τις δυνατότητες των παθητικών οπτικών δικτύων πρόσβασης. Εξετάστηκαν πολλά σενάρια, με έμφαση στην βελτίωση δυνατοτήτων αλλά και στη δυνατότητα συνύπαρξης με υφιστάμενες τεχνολογίες και σταδιακή αντικατάσταση αυτών με τη νεότερη γενιά.

Στις παραγράφους του κεφαλαίου αυτού, αναλύονται και τίθενται σε σύγκριση τεχνολογίες για βελτίωση των ρυθμών μετάδοσης στην πρόσβαση, τεχνικές συνύπαρξης με τις παλιότερες τεχνολογίες και σχέδιο μετάβασης και αναβάθμισης των πελατών, σταδιακά, χωρίς να προκληθεί διακοπή στις υπηρεσίες των πελατών ή επιτακτική ανάγκη για άμεση επένδυση στην αναβάθμιση εκ μέρους των παρόχων.

3.2 Τεχνικές Υλοποίησης

Κατά την αναζήτηση τεχνικών λύσεων για την ανάπτυξή του, διερευνήθηκαν σε βάθος τρεις πιθανές αρχιτεκτονικές, δύο που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε οπτικά δίκτυα και μία νέα πρόταση:

1. **Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM).** Είναι γνωστή και χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες, με πιο πρόσφατο παράδειγμα τη χρήση της στα υφιστάμενα συστήματα PON. Χρησιμοποιείται ένα μόνο μήκος κύματος για την κατεύθυνση καθόδου και άλλο ένα για την κατεύθυνση ανόδου. Απαιτεί την ύπαρξη παθητικού διαχωριστή ισχύος, που διαιρεί το εισερχόμενο σήμα από το OLT σε πολλά, όσα και οι ONU που εξυπηρετούνται από το OLT αυτό (M. Silenko, 2016).



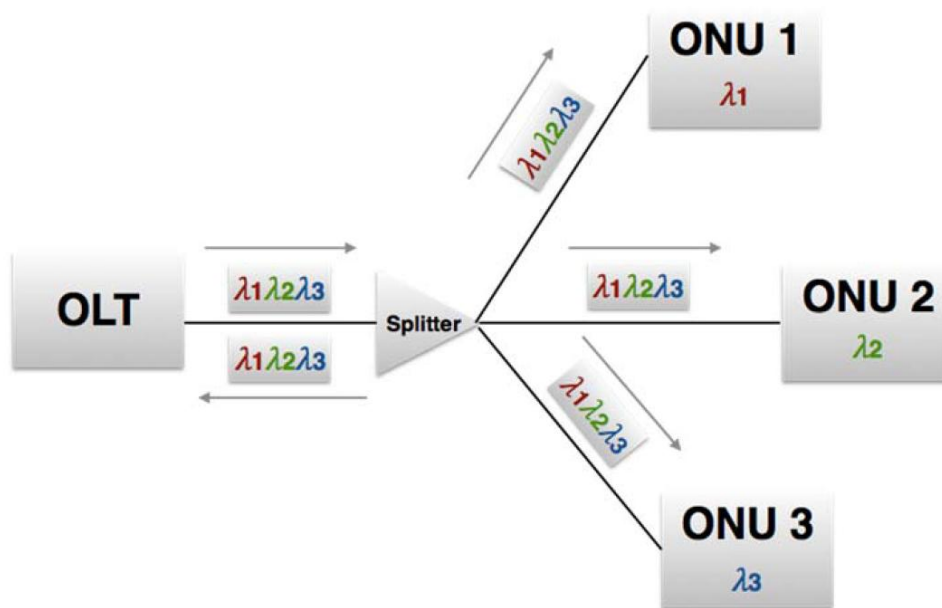
Εικόνα 13: PON με χρήση TDM (M. Silenko, 2016).

Στην κατεύθυνση καθόδου, το σήμα από το OLT διαιρείται σε χρονοθυρίδες, με τρεις χρονοθυρίδες στο παράδειγμα της Εικόνας 13, και μεταδίδεται προς τις ONU, κάθε μία εκ των οποίων λαμβάνει μόνο τα δικά της δεδομένα, μέσω της διεύθυνσης που είναι ενσωματωμένη στο σήμα. Στην κατεύθυνση ανόδου, πρέπει να εφαρμοστεί ένας μηχανισμός για αποφυγή συγκρούσεων των σημάτων.

Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί ως προς την απλότητα και το κόστος, ωστόσο απορρίφθηκε η αξιοποίησή της στα οπτικά δίκτυα νέας γενιάς, επειδή δεν παρέχει ικανοποιητικό εύρος ζώνης.

2. **Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM).** Υπάρχουν πολλές προτάσεις για την υλοποίηση παθητικών οπτικών δικτύων με WDM, όπως τα εξωτερικά οδηγούμενα, τα πολύ πυκνής, ομόδυνης πολυπλεξίας, τα ρυθμίσιμα WDM-PON και άλλες. Ωστόσο, η βασική ιδέα είναι η χρήση διαφορετικών μηκών κύματος για μετάδοση, τρία μήκη κύματος στο παράδειγμα της Εικόνας 14. Τα σήματα προς τις ONU μεταδίδονται σε ανεξάρτητα μήκη κύματος και πολυπλέκονται σε μια κοινή ίνα. Για να εξασφαλιστεί ότι κάθε ONU θα λάβει μόνο το μήκος κύματος που προορίζεται για αυτήν, απαιτείται η χρήση ενός ρυθμίσιμου φίλτρου στην ONU. Η προσέγγιση αυτή παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από την TDM, αλλά βασίζεται σε συσκευές υψηλότερου κόστους και έχει τον επιπρόσθετο περιορισμό του πεπερασμένου αριθμού μηκών κύματος που μπορούν να

χρησιμοποιηθούν. Εν κατακλείδι, παρόλη τη δυνατότητά του να παρέχει επαρκές εύρος ζώνης, λόγω της σημαντικής οικονομικής επιβάρυνσης που θα επισύρει η επένδυση σε αυτό, δε φαίνεται να προκρίνεται για χρήση στα δίκτυα επόμενης γενιάς (M. Silenko, 2016).



Εικόνα 14: PON με χρήση WDM (M. Silenko, 2016).

3. Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου και μήκους κύματος (Time and Wavelength Division Multiplexing - TWDM). Όπως φαίνεται και από τον τίτλο της, η τεχνική αυτή είναι ένα υβρίδιο των δύο προηγούμενων και προβλέπει τη διέλευση μιας ομάδας από μήκη κύματος και τη μετάδοσή τους σε όλους τους χρήστες με χρήση διαχωριστή ισχύος, εφαρμόζοντας επιπλέον, μέσω του επιπέδου MAC, στο κάθε λ τη χρήση χρονοθυρίδων (M. Silenko, 2016). Απαιτούνται ρυθμίσιμοι, ως προς το μήκος κύματος, πομποί και δέκτες, ώστε οι ONU να μην είναι εξαρτώμενες από το μήκος κύματος (colorless ONU). Για τη βελτίωση του προϋπολογισμού ισχύος σε σχέση με το XG-PON, τοποθετούνται οπτικοί ενισχυτές μετά τα OLT, για να ενισχύσουν το σήμα κατεύθυνσης καθόδου εν τη γενέσει του (boosting) και να προενισχύσουν το σήμα κατεύθυνσης ανόδου, ακριβώς πριν ληφθεί από το OLT. Το δίκτυο παραμένει παθητικό, εφόσον ο ενισχυτής και ο πολυπλέκτης/αποπολυπλέκτης βρίσκονται στο άκρο του OLT.

Τα TWDM-PON μπορούν να υποστηρίξουν οκτώ ζεύγη μηκών κύματος, ωστόσο αυτός ο αριθμός αναμένεται να αυξηθεί στο προσεχές μέλλον. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμο σε περιπτώσεις διαμοιρασμού της υποδομής που αναπτύσσει ένας πάροχος, μεταξύ πολλών άλλων παρόχων. Το σύστημα TWDM-PON μπορεί να αναπτυχθεί αρχικά με λίγα μήκη κύματος, ακόμα και ένα ζεύγος και να αναβαθμίζεται σταδιακά με επιπλέον ζεύγη μηκών κύματος, μεγαλώνοντας έτσι τη χωρητικότητα του συστήματος. Έτσι, η επένδυση του παρόχου μπορεί να επεκταθεί σε βάθος χρόνου, εμπλουτίζοντας και αναβαθμίζοντας όταν υπάρχει ανάγκη και όχι εξ αρχής (pay as you grow) (M. Silenko, 2016).

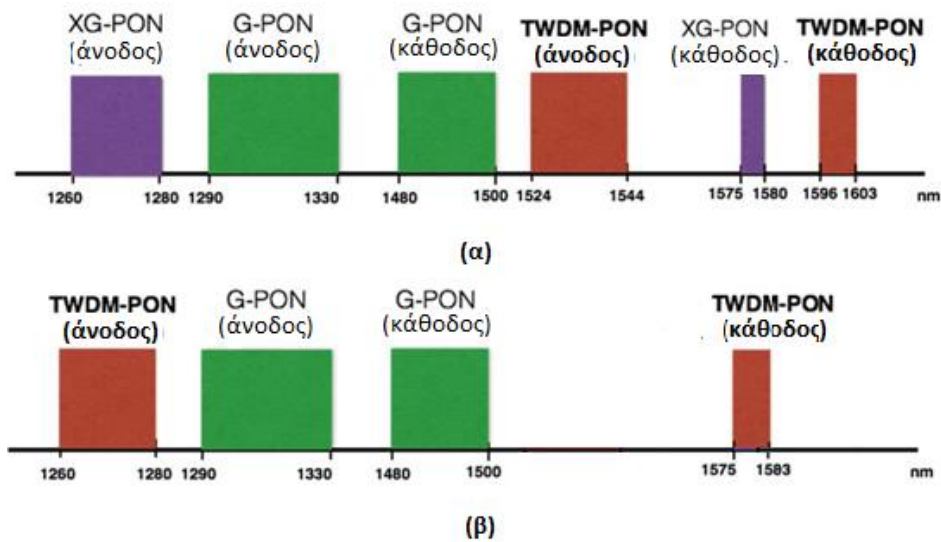
Τον Απρίλιο του 2012, το FSAN επέλεγε την 3^η αρχιτεκτονική (TWDM-PON) για το παθητικό οπτικό δίκτυο νέας γενιάς.

3.3 Σημαντικές επιλογές του TWDM-PON

Ρυθμός μετάδοσης: Η βασική ιδέα πίσω από το TWDM-PON είναι η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης συσσωρεύοντας πολλά XG-PON μέσω των πολλών ζευγών μηκών κυμάτων. Εφόσον το σύστημα XG-PON μπορεί να πετύχει ρυθμούς 10 Gbps στην κάθοδο και 2.5 Gbps στην άνοδο, ένα δίκτυο TWDM-PON με τέσσερα ζεύγη μηκών κύματος, μπορεί να επιτύχει 40 Gbps. και 10 Gbps σε κατεύθυνση καθόδου και ανόδου, αντίστοιχα, με την κάθε ONU να απολαμβάνει ρυθμό μετάδοσης ίσο με το συνολικό ενός δικτύου XG-PON.

Κατανομή μηκών κύματος: Η κατανομή για το TWDM-PON έχει καθοριστεί με το βέλτιστο συμβιβαστικό τρόπο για τη συνύπαρξη με συστήματα G-PON και XG-PON1. Τα μήκη κύματος για την κατεύθυνση ανόδου του TWDM-PON προτείνεται να είναι στη ζώνη C (1524nm – 1544nm), για την οποία υπάρχει πληθώρα προϊόντων και δεν αναμένεται να προσθέσει σημαντικά στο κόστος των ONU. Για τη ζεύξη καθόδου, μια και πρόκειται να χρειαστούν λιγότεροι πομποδέκτες, το κόστος των οποίων θα μοιράζεται μεταξύ πολλών συνδρομητών, έχει προτιμηθεί η ζώνη L (1596nm – 1603nm). Η επιτρεπόμενη απώλεια ισχύος σε αυτή τη ζώνη υπολογίζεται στα 38 dB. Στην Εικόνα 15 απεικονίζεται αφενός αυτή η προτιμώμενη κατανομή (**α**), αφετέρου μια εναλλακτική, που μπορεί να υλοποιηθεί αν η συνύπαρξη με σύστημα XG-PON1 δεν

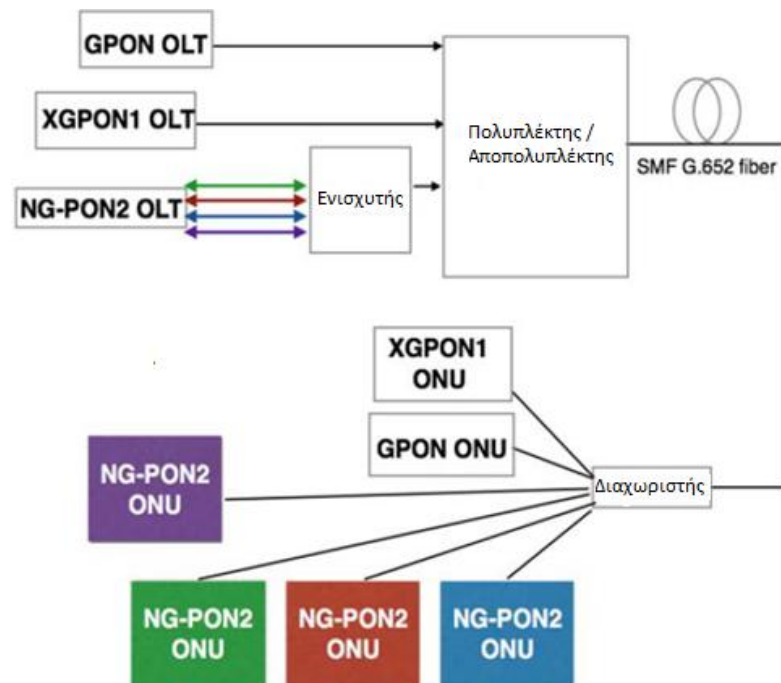
είναι απαραίτητη, στην περίπτωση δηλαδή που στο δίκτυο δεν είχε προλάβει να εγκατασταθεί υποδομή XG-PON1 και η μετάβαση γίνεται κατευθείαν στο TWDM-PON (β). Σύμφωνα και με τις προδιαγραφές του XG-PON1, σε αυτήν την περίπτωση είναι ανεκτή μία απώλεια ισχύος της τάξης των 33 dB. Και οι δύο τιμές έχουν ενσωματώσει το κέρδος που θα δώσει στην ισχύ του σήματος ο οπτικός ενισχυτής, που όπως αναφέραμε παραπάνω, βρίσκεται στο άκρο του OLT και ενισχύει το σήμα και στις δύο κατευθύνσεις.



Εικόνα 15: Κατανομή μηκών κύματος για TWDM-PON και συνύπαρξη (α) με GPON και XG-PON, (β) μόνο με GPON (H.Yang, 2013).

Συνύπαρξη: Όπως είδαμε στην αμέσως προηγούμενη παράγραφο, το σχέδιο κατανομής των μηκών κύματος επιτρέπει τη συνύπαρξη στην ίδια οπτική ίνα των TWDM-PON με παλαιότερες τεχνολογίες. Στην Εικόνα 16 βλέπουμε πώς αυτά τα τρία δίκτυα θα χρησιμοποιούν μία ίνα για μετάδοση των σημάτων τους. Βλέπουμε τις ONU, το οπτικό δίκτυο και το OLT της κάθε γενιάς. Για να είναι εγγυημένη η συνύπαρξη των τεχνολογιών, πρέπει να εισαχθεί ένα στοιχείο που να επιτρέπει τη συνύπαρξη στο οπτικό δίκτυο. Το ρόλο αυτό τον επιτελεί μια συσκευή πολυπλεξίας/αποπολυπλεξίας μηκών κύματος, που αναγκαστικά θα γίνεται για να μην έχουμε συμπτώσεις σε χρησιμοποιούμενα μήκη. Η ομαλή μετάβαση από τη μία τεχνολογία PON σε άλλη, πάνω από το ίδιο οπτικό δίκτυο, έχει σα στόχο την ελάχιστη ή μηδενική διακοπή

υπηρεσία του πελάτη. Η συνύπαρξη καθιστά εφικτή την ομαλή μετάβαση από παλαιότερα PON σε NG-PON2. Αν δεν υπήρχε, οι πελάτες σίγουρα θα αντιμετώπιζαν διακοπή υπηρεσίας, η οποία πιθανότατα θα διαρκούσε αρκετά, μια και ο πάροχος θα αντιμετώπιζε μεγάλο όγκο μεταγωγών, αλλαγών εξοπλισμού και ρυθμίσεων του, στις οποίες δύσκολα θα μπορούσε να ανταποκριθεί σε εύλογο χρονικό διάστημα, έχοντας παράπονα από οικιακούς πελάτες και καταβολή ρητρών αποζημιώσεων σε εταιρικούς. Για τη μέγιστη ευελιξία, τα συστήματα NG-PON2 πρέπει να επιτρέπουν συνύπαρξη με κάθε πιθανή τεχνολογία PON προηγούμενης γενιάς, για να διευκολυνθεί η ομαλότερη μετάβαση στο NG-PON2, όπως θα αναλύσουμε σε επόμενη παράγραφο.



Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική Δικτύου με συνύπαρξη όλων των τεχνολογιών

Ρυθμίσιμοι ως προς το μήκος κύματος πομποί και δέκτες: Κάθε ONU θα πρέπει να έχει έναν πομπό που να μπορεί να προσαρμόσει την εκπομπή του στο μήκος κύματος που θα ανατεθεί στην ONU και ένα δέκτη που θα μπορεί να συντονίσει τη λήψη του σε όποιο μήκος κύματος θα πρέπει να λάβει από το OLT. Για το δέκτη της ONU, αυτή η λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί με τεχνολογίες, όπως θερμικά ή γωνιακά συντονιζόμενο φίλτρο Fabry–Perot, ταλαντωτής δακτυλίου πυριτίου, συντονιζόμενος

με πρόσμειξη, συντονιζόμενο φίλτρο υγρών κρυστάλλων και θερμικά συντονιζόμενος ανιχνευτής Fabry-Perot.

Ο πομπός μπορεί να υλοποιήσει αυτήν την απαίτηση με laser κατανεμημένης ανάδρασης (Distributed Feedback – DFB) με έλεγχο θερμότητας, laser κατανεμημένων ανακλαστήρων Bragg με μερικό έλεγχο θερμοκρασίας ή χωρίς ψύξη, laser εξωτερικής κοιλότητας με μηχανικό έλεγχο, χωρίς ψύξη επίσης και laser εξωτερικής κοιλότητας με θερμικό, ηλεκτρικό, πιεστικό, μαγνητικό, οπτικό έλεγχο, χωρίς ψύξη.

Με τη σωστή λειτουργία της ρύθμισης του πομποδέκτη, η λειτουργία της ONU δεν εξαρτάται από συγκεκριμένο μήκος κύματος και μπορεί να λειτουργήσει σε κάθε ένα, εντός του εύρους που θα έχει αποδοθεί στο σύστημα (colorless ONU). Η ευελιξία του συστήματος αλλά και η συγκράτηση του κόστους, εξυπηρετούνται στο μέγιστο βαθμό από αυτήν τη λειτουργία.

3.4 Τεχνικές Παράμετροι ζεύξης για TWDM-PON

Τα δίκτυα NG-PON2 χρειάζονται ευελιξία για την επίτευξη των καλύτερων ισορροπιών μεταξύ απαιτήσεων για ταχύτητα, απόσταση και λόγο διαχωρισμού, με γνώμονα το πεδίο εφαρμογής ενός συγκεκριμένου δικτύου. Οι συνδυασμοί παραμέτρων που έχουν τυποποιηθεί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανά περίπτωση, σύμφωνα με την σύσταση της ITU-T G989.1 (ITU-T Recommendation G989.1, 2013), παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 5:

α/α	Ρυθμός	Κατεύθυνση	Απόσταση	Λόγος Διαχωρισμού
1	40/10 Gbps	Καθόδου/Ανόδου	20 km	1:64
2	10/2,5 Gbps	Καθόδου/Ανόδου	20 km	1:64
3	2,5/2,5 Gbps	Καθόδου/Ανόδου	40 km	1:32
4	10/10 Gbps	Καθόδου/Ανόδου	20 km	1:32

Πίνακας 5: Προδιαγραφές NG-PON2, σύμφωνα με την σύσταση ITU-T G989.1

Μπορούν να επιτευχθούν ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις με μικρότερο λόγο διαχωρισμού.

Από αυτή τη γρήγορη παράθεση των παραμέτρων, φαίνεται ότι τα συστήματα NG-PON2 θα μπορούν να προσφέρουν σημαντικά μεγαλύτερη χωρητικότητα σε κάθε

πελάτη σε σχέση με τα παλαιότερα συστήματα GPON και XG-PON1. Ξεκινώντας από την ελάχιστη απαίτηση συνολικής χωρητικότητας 40 Gbps και 10 Gbps ανά ίνα, στην κατεύθυνση καθόδου και ανόδου αντίστοιχα, έχει τεθεί ως στόχος η επίτευξη χωρητικότητας 160 Gbps και 80 Gbps σε κάθοδο και άνοδο αντίστοιχα. Κατά κανόνα, κάθε ONU του NG-PON2 θα μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps, ενώ η πραγματική χωρητικότητα ανά ONU θα εξαρτηθεί από σχεδιαστικές επιλογές, όπως ο λόγος διαχωρισμού και η χρήση της κάθε ONU στο δίκτυο (π.χ. FTTH, FTTB, ζεύξη σταθμών βάσης κινητής προς το δίκτυο κορμού κτλ). Τα συστήματα NG-PON2 θα μπορούν να υποστηρίξουν ONU με συμμετρικό ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps. Θα μπορούν επίσης να παρέχονται συνδυασμοί υπηρεσιών, που θα μοιράζονται την κοινή υποδομή. Το σύστημα θα πρέπει να παρέχει αποδοτικό διαμοιρασμό κίνησης μεταξύ οικιακών, εταιρικών και άλλων πελατών και δυνατότητα αναβάθμισης σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, χωρίς δημιουργία προβλέψιμων σημείων συμφόρησης (ITU-T Recommendation G989.1, 2013).

3.5 Λοιπές Τεχνικές Απαιτήσεις

3.5.1 ONU χωρίς εξάρτηση από το μήκος κύματος

Για την επίτευξη ευελιξίας και τη μείωση του λειτουργικού κόστους, του κόστους διατήρησης και διαχείρισης αποθέματος διαφορετικών τύπων συσκευών, οι ONU πρέπει να διακρίνονται από «αχρωματοψία», δηλαδή να μην είναι σχεδιασμένες για λειτουργία σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Τέτοιες ONU μας απαλλάσσουν από τη διαχείριση πολλών τύπων συσκευών, που όσο θα αυξάνεται ο αριθμός τους και ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων μηκών κύματος θα προκαλούσε σημαντική επιβάρυνση στην ανάπτυξη, διαχείριση, συντήρηση και εντοπισμό/αποκατάσταση βλαβών από τον πάροχο. Η χρήση των ONU που λειτουργούν ανεξάρτητα από το μήκος κύματος, μειώνει επίσης το χρόνο που χρειάζονται όλες οι παραπάνω ενέργειες, πέρα από το κόστος για τον πάροχο.

3.5.2 Ευελιξία φάσματος

Μία αποδοτική προσέγγιση για την υποστήριξη πολλών σεναρίων ανάπτυξης, αλλά και δικτυακών εφαρμογών, είναι η εισαγωγή ενός βαθμού ευελιξίας στη χρήση

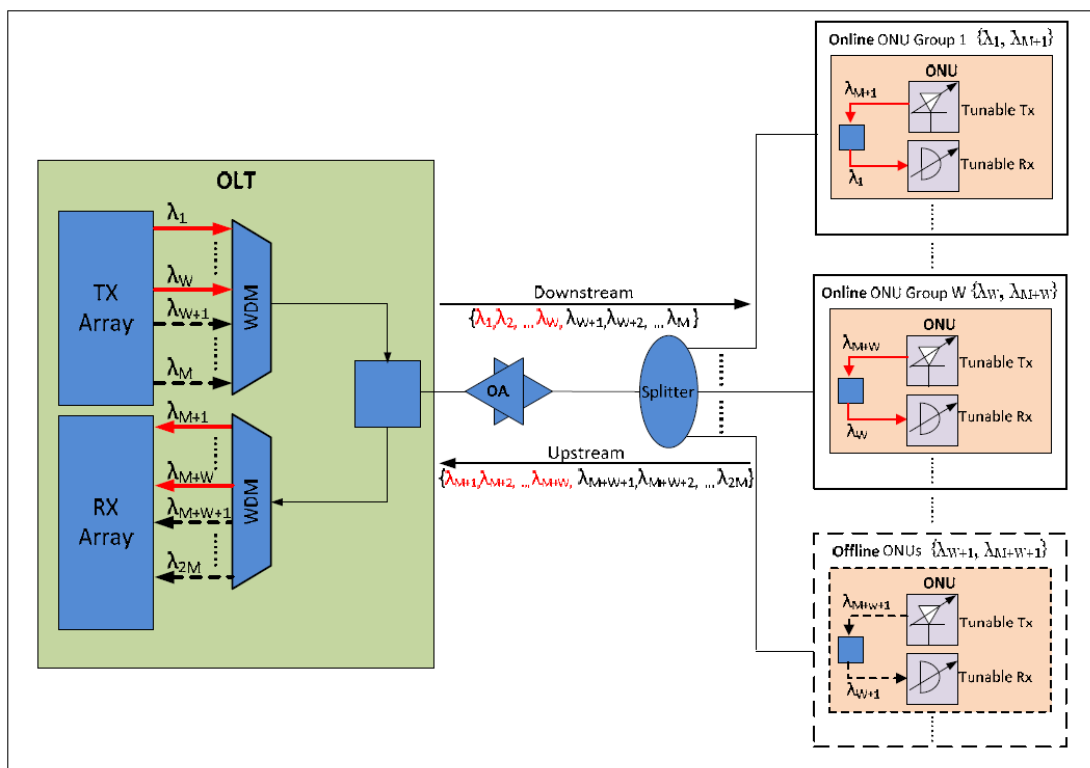
του φάσματος από συστήματα NG-PON2. Αυτή η ευελιξία μπορεί να επιτρέψει την υποστήριξη διαφορετικών κατηγοριών πελατών και συστημάτων PON, πάνω από την ίδια υποδομή, με τον πλέον ευέλικτο τρόπο. Υπάρχουν εφαρμογές που απαιτούν ένα εύρος σταθερών ή μέγιστων ρυθμών μετάδοσης, μέγιστες ανεκτές τιμές για την καθυστέρηση ή τη διακύμανσή της και διαφορετικές αναλογίες ρυθμού ανόδου και καθόδου. Σε αυτά, πρέπει να προσθέσουμε και πιθανές διαφορετικές απαιτήσεις σε ισχύ εκπομπής και ευαισθησία λήψης. Επιπροσθέτως, μέσω της ευελιξίας στη χρήση του φάσματος, τα συστήματα NG-PON2 θα μπορούν να επιτύχουν προοδευτικές ή τμηματικές αναβαθμίσεις στη χωρητικότητα, για να ακολουθείται η αύξηση της ζήτησης. Η όχι απαραίτητα ισομερής κατανομή των καναλιών μεταξύ των ONU είναι το κλειδί για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, ενώ δεν πρέπει να ξεχνάμε την πιθανότητα συνύπαρξης με παλαιότερες τεχνολογίες, που χρήζει προσοχής για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των συστημάτων και τη δυνατότητα χρήσης του φάσματός τους, όταν αυτές τελικά καταργηθούν.

Το σύστημα NG-PON2 πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα πρόσβασης πολλών μεμονωμένων, ομαδοποιημένων ή ζωνών μηκών κύματος, τα οποία μπορούν να χωρίζονται φυσικά ή λογικά και να κατανέμονται μεταξύ των θυρών ενός OLT ή μεταξύ διαφορετικών OLT. Και όλο αυτό θα πρέπει να γίνεται χωρίς να αυξάνεται η πολυπλοκότητα συστημάτων με πιο χαλαρές απαιτήσεις σε φάσμα.

3.5.3 Μεταγωγή ONU σε διαφορετικά μήκη κύματος

Συνήθως, ένα τέτοιο σύστημα υποστηρίζει πολλά ζεύγη μηκών κύματος. (για παράδειγμα, τα ζεύγη $\{\lambda_1, \lambda_{M+1}\}$, $\{\lambda_2, \lambda_{M+2}\}$...) για μετάδοση στις δύο κατευθύνσεις και κάθε ζεύγος μπορεί να υποστηρίζει ένα υποσύνολο των ONU που πρέπει να εξυπηρετηθούν. Καθώς οι ONU που εξυπηρετούνται από ένα συγκεκριμένο ζεύγος ενδέχεται να συνδέονται και αποσυνδέονται στο δίκτυο, ο αριθμός των ενεργών ONU σε αυτό το ζεύγος μεταβάλλεται δυναμικά. Όταν αυτός ο αριθμός είναι μικρός (έστω το ζεύγος $\{\lambda_{W+1}, \lambda_{M+W+1}\}$) υπάρχουν αρκετές ελεύθερες χρονοθυρίδες σε άλλα ζεύγη (έστω στο ζεύγος $\{\lambda_W, \lambda_{M+W}\}$), θα ήταν λογικό να μεταχθούν οι ONU του ζεύγους $\{\lambda_{W+1}, \lambda_{M+W+1}\}$ στο $\{\lambda_W, \lambda_{M+W}\}$ (H.Yang, 2013). Συνεπώς, η θύρα, ή και μια ολόκληρη κάρτα, αν αυτή η τεχνική επεκταθεί και σε άλλα ζεύγη, του OLT που σχετίζεται με το ζεύγος $\{\lambda_{W+1}, \lambda_{M+W}$

+1} μπορεί να απενεργοποιηθεί, ή να μπει σε κατάσταση μειωμένης λειτουργίας, για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Η Εικόνα 17 δείχνει την αρχιτεκτονική της μεταγωγής των ONU σε ένα τέτοιο δυναμικό σύστημα TWDM-PON. Με M συμβολίζεται το πλήθος των συνολικών ζευγών μηκών κύματος ενώ με W το πλήθος των ενεργών. Η βελτιστοποίηση αυτής της τεχνικής μπορεί να ελαττώσει αρκετά την κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας το σύστημα PON ακόμα πιο ενεργειακά αποδοτικό, από όσο ήδη είναι, σε σχέση με άλλες αρχιτεκτονικές δικτύου, που απαιτούν περισσότερες ενεργές δικτυακές συσκευές (H.Yang, 2013).



Εικόνα 17: Δυναμικό σύστημα TWDM-PON (H.Yang, 2013).

3.5.4 Ανίχνευση και μείωση επίδρασης αυθαίρετων ONU

Τα συστήματα NG-PON2 πρέπει να μπορούν να παρακολουθούν τις εκπομπές του OLT και των ONU, για να προφυλάσσουν το σύστημα από ONU (ή ακόμα και OLT), που παρουσιάζουν αυθαίρετη συμπεριφορά, όπως η εκπομπή από μια ONU σε χρονοθυρίδα ή μήκος κύματος που ανήκει σε άλλη ONU ή η εκπομπή ενός OLT σε ζώνη μηκών κύματος άλλου OLT. Η αποτροπή, εντοπισμός, απομόνωση και άρση της

δυσλειτουργίας των ONU, καθορίζονται από την ITU-T στο συμπλήρωμα 49 της σύστασης, και πρέπει να ακολουθούνται πιστά για τη διατήρηση της εύρυθμης λειτουργίας του δικτύου. Ενδέχεται να απαιτούνται επιπλέον μέτρα για τις αντίστοιχες ενέργειες σε OLT.

3.5.5 Απαιτήσεις ανθεκτικότητας και εφεδρείας

Η ανθεκτικότητα του PON σε βλάβες είναι σημαντική, όπως κάθε δικτύου, που καλείται να υποστηρίξει επιχειρηματικές εφαρμογές και υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας προς τους πελάτες, όπως IPTV, ειδικά στο σενάριο της ενοποίησης κόμβων. Αυτή θα έχει ως συνέπεια την εξυπηρέτηση ενός μεγάλου αριθμού συνδρομητικών γραμμών σε έναν κεντρικό κόμβο. Απαιτείται ένας μηχανισμός εφεδρείας για την αποφυγή διακοπής υπηρεσίας σε μεγάλο πλήθος συνδρομητών σε περίπτωση φυσικής βλάβης της ίνας ή του OLT και άλλου, κομβικού ρόλου, εξοπλισμού. Εκτός από τις συνήθειες απαιτήσεις εφεδρείας εξοπλισμού στο OLT ή στον εξοπλισμό του κορμού του δικτύου, που θα εξυπηρετεί αρκετά OLT, τα δίκτυα χρειάζονται εφεδρεία σε οπτικές ίνες και σε πομπούς, πολυπλέκτες, ενισχυτές, ενώ για εταιρικούς πελάτες συνίσταται η εφεδρεία από άκρο σε άκρο του συστήματος, πιθανότατα με εγκατάσταση πλεοναζόντων ONT και ONU.

3.5.6 Απαιτήσεις επέκτασης εμβέλειας

Τα συστήματα NG-PON2 πρέπει να δύνανται να φτάσουν εμβέλεια 60 km με χρήση επαναληπτών, αν αυτό απαιτείται. Κατά προτίμηση αυτό πρέπει να επιτυγχάνεται διατηρώντας παθητικό εξοπλισμό εκτός του σημείου παρουσίας του παρόχου, ωστόσο παρουσιάζει πολλές τεχνικές προκλήσεις και για αυτό προβλέπεται η χρήση ενδιάμεσων επαναληπτών, όταν ο προϋπολογισμός ισχύος δε μπορεί να επιτευχθεί αλλιώς. Η χρήση τους δεν πρέπει να οδηγεί σε ανάγκη διαφοροποίησης ή τροποποίησης του OLT ή της ONU. Συνεπώς, τα συστήματα NG-PON2 πρέπει να παρέχουν επίπεδα εξαρτώμενα από το φυσικό μέσο (Physical Medium Dependent – PMD) και σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence – TC), ικανά να λειτουργούν με διαφανή τρόπο με και χωρίς επαναλήπτη. Αυτοί θα πρέπει να είναι απομακρυσμένα διαχειρίσιμοι από το OLT, ώστε οι ρυθμίσεις και η εποπτεία τους, για συντήρηση και εντοπισμό βλαβών να γίνεται από κεντρικό σημείο. Επιπλέον, πρέπει να

είναι συμβατοί με κάθε σενάριο συνύπαρξης με παλαιότερες τεχνολογίες και με τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας και εφεδρείας. Τέλος, δεδομένης της τοποθέτησής τους σε εξωτερικό χώρο, πρέπει να έχουν μικρές απαιτήσεις ισχύος και να μπορούν να λειτουργούν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, μη ελεγχόμενο, όπως είναι σε έναν κόμβο του παρόχου.

3.5.7 Μείωση κατανάλωσης ενέργειας

Η εξοικονόμηση ενέργειας στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έχει καταστεί ιδιαίτερα σημαντική, τόσο από τη σκοπιά της μείωσης των λειτουργικών εξόδων, όσο και από αυτήν της μείωσης της συνεισφοράς των δικτύων στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Τα συστήματα NG-PON2 πρέπει να είναι σχεδιασμένα για βέλτιστη ενεργειακή απόδοση. Αυτή η απαίτηση αφορά τόσο το OLT και τις λοιπές συσκευές στο σημείο συγκέντρωσης της κίνησης και ακόμα περισσότερο τις ONU, μια και ο αριθμός τους είναι μεγάλος και η κατανάλωση ενέργειάς τους βαρύνει εξ ολοκλήρου τον πάροχο, εκτός από περιπτώσεις FTTB/H. Τα συστήματα NG-PON2 πρέπει να στοχεύουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα υπηρεσίας που απολαμβάνει ο συνδρομητής. Εξετάζοντας τώρα το σενάριο διακοπής τροφοδοσίας του εξοπλισμού, λόγω βλάβης του δικτύου ηλεκτρισμού, σε κάποιες περιπτώσεις, ο κύριος στόχος της λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας στα δίκτυα πρόσβασης είναι η διατήρηση των πλέον κρίσιμων υπηρεσιών, όπως η τηλεφωνία, όσο περισσότερο γίνεται, με χρήση μπαταριών. Προβλέπεται η διατήρηση της λειτουργίας της υπηρεσίας αυτής για τουλάχιστον 8 ώρες, χωρίς παροχή ρεύματος από το δίκτυο, ενώ συνίσταται η υποστήριξη τηλεφωνικής συνομιλίας για τέσσερις ώρες, όσο η ONU βρίσκεται σε κατάσταση μειωμένης λειτουργίας, στην οποία κατάσταση θα πρέπει να μπορεί να παραμένει, χωρίς να απενεργοποιείται, για αρκετές ημέρες. Η ενεργειακή αποδοτικότητα των συστημάτων NG-PON2 βασίζεται στους μηχανισμούς των συστάσεων [b-ITU-T G-Sup.45] (ITU-T G. Sup45, 2009) και [ITU-T G.987] (ITU-T G.987, 2012), ενώ δεν αποκλείεται και η χρήση επιπλέον μηχανισμών, ανάλογα με την τεχνολογία και τις εξελίξεις στις προδιαγραφές.

3.6 Μετάβαση

Είναι αναμενόμενο ότι, μετά το όποιο διάστημα συνύπαρξης του TWDM-PON με τις παλαιότερες τεχνολογίες, οι πάροχοι θα προβούν στην πλήρη μετάβαση στο νέο δίκτυο και στην κατάργηση και αποξήλωση των παλαιών. Υπάρχουν αρκετά σενάρια για τη μετάβαση αυτή, με το καθένα να καλύπτει διαφορετικές ανάγκες και συνθήκες, που μπορεί να επικρατούν σε κάθε δίκτυο. Η σύσταση G.989 της ITU προβλέπει και περιγράφει δύο βασικά σενάρια (ITU-T Recommendation G989.1, 2013):

Σενάριο υφιστάμενης υποδομής PON (brownfield): στη σύσταση γίνεται αναφορά στο σενάριο που υπάρχει ήδη ανεπτυγμένο παλαιότερο δίκτυο PON και πρέπει να αξιοποιήσουμε την οπτική υποδομή για την παροχή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, αναβαθμίζοντας σε NG-PON2. Αρκετοί συνδρομητές θα χρειαστούν αναβάθμιση για να υποστηρίξουν τους υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, εάν τους χρειάζονται και είναι πρόθυμοι για τέτοια αναβάθμιση και μετάβαση στο NG-PON2, ενώ άλλοι συνδρομητές, με μικρότερες απαιτήσεις μπορούν να παραμείνουν για ένα χρονικό διάστημα στο παλιό δίκτυο PON. Όταν ο πάροχος κρίνει ότι πρέπει να απαξιώσει την παλιά υποδομή, μπορεί να ξεκινήσει τη σταδιακή μετάβαση στο νέο δίκτυο και των λιγότερο απαιτητικών και πρόθυμων πελατών και να αποσύρει σταδιακά τον εξοπλισμό προηγούμενης γενιάς, πριν φτάσει στην οριστική απενεργοποίηση και απόσυρσή του. Το χρονικό πλαίσιο δε μπορεί να προκαθοριστεί, γενικά όμως δεν πρέπει η διαδικασία αυτή να είναι αέναη. Οι πάροχοι διαθέτουν εμπειρία από τέτοιες καταστάσεις, καθώς βρίσκονται διαρκώς σε διαδικασίες αναβάθμισης, μεταγωγής πελατών και απόσυρσης παλαιών τεχνολογιών (π.χ. ADSL → VDSL, ATM → Ethernet & IP και άλλες τέτοιες περιπτώσεις).

Οι γενικές απαιτήσεις για την υλοποίηση του σεναρίου αυτού είναι οι ακόλουθες:

- Η συνύπαρξη μεταξύ παραδοσιακών τεχνολογιών και NG-PON2 στην ίδια ίνα πρέπει να εξασφαλιστεί, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι διαθέσιμες ίνες δεν είναι απαραίτητα εν αφθονία.
- Η διακοπή υπηρεσίας για τους πελάτες που δε θα αναβαθμιστούν σε πρώτο χρόνο πρέπει να είναι από ανύπαρκτη έως ελάχιστη.

- Τα συστήματα NG-PON2 πρέπει να υποστηρίζουν και να εξομοιώνουν όλες τις απλές υπηρεσίες μέσω PON, όταν ο πάροχος θα προβεί σε πλήρη μετάβαση του συστήματος.
- Στα παραδοσιακά συστήματα PON που πρέπει να υποστηριχθούν κατά τη μετάβαση περιλαμβάνονται το GPON, το XG-PON1, το GPON και το 10G-EPON. Κατά κανόνα, στο δίκτυο κανενός παρόχου δε θα προϋπάρχουν όλα αυτά τα συστήματα μαζί, ωστόσο η υποστήριξη πρέπει να τα καλύπτει όλα και μετά, κατά περίπτωση, θα εφαρμόζονται οι κατάλληλες τεχνικές συνύπαρξης και τελικά μετάβασης.

Σενάριο μη υφιστάμενης υποδομής PON (greenfield): η αναβάθμιση του δικτύου πρόσβασης σε υποδομή FTTx αποτελεί μια σημαντική επένδυση για κάθε πάροχο και φυσικά δεν υλοποιείται πλήρως από τη μία στιγμή στην άλλη. Εμπεριέχει θέματα τεχνικά, οικονομικά, ρυθμιστικά και κατά κανόνα χρειάζεται αρκετό χρόνο. Όταν η τεχνολογία NG-PON2 καταστεί διαθέσιμη θα επιταχύνει τη μετάβαση από το δίκτυο πρόσβασης με βάση το χαλκό, για όποιους παρόχους δεν έχουν προλάβει να αναπτύξουν οπτικό δίκτυο πρόσβασης με κάποια παλιότερη τεχνολογία PON. Εξετάζουμε λοιπόν την απευθείας μετάβαση σε δίκτυο NG-PON2, που θα επιφέρει ένα τεράστιο άλμα στις προσφερόμενες ταχύτητες και υπηρεσίες προς τους συνδρομητές. Τέτοια δίκτυα, χωρίς προϋπάρχουσα υποδομή PON, εμπίπτουν στην κατηγορία greenfield. Αυτό το σενάριο μπορεί να αποδειχθεί οικονομικότερο για τους παρόχους, καθώς δε θα έχουν επωμιστεί το κόστος της εγκατάστασης παλαιότερης υποδομής PON, την οποία λίγα χρόνια μετά θα αναγκαστούν να απαξιώσουν, αναβαθμίζοντάς την σε NG-PON2, ενώ γλυτώνουν και το κόστος συνύπαρξης διαφορετικών γενεών δικτύων και εξοπλισμού, την αυστηρή κατανομή ζωνών μήκους κύματος.

Περαιτέρω, διακρίνονται τρεις περιπτώσεις για την ταχύτητα της μετάβασης, που αφορά το σενάριο brownfield, πάντα με γνώμονα την ελάχιστη διακοπή υπηρεσίας των πελατών και την τελική μετάβασή τους στο δίκτυο NG-PON2.

Άμεση μετάβαση: Προβλέπει ένα άμεσο τρόπο μετάβασης, από την παλαιότερη γενιά στη νεότερη, δηλαδή από GPON σε XG-PON1 και κατόπιν, αφού αποξηλωθεί ο εξοπλισμός GPON και απελευθερωθούν τα μήκη κύματος που δεσμεύει, μετάβαση σε NG-PON2, με κάποιο σύντομο κατά προτίμηση διάστημα συνύπαρξης NG-PON2 με το

παλαιότερο XG-PON1. Το όνομά της οφείλεται στη μικρή ανοχή στη συνύπαρξη και των τριών τεχνολογιών και το στόχο για την ταχύτερη δυνατή μετάβαση από τεχνολογία σε τεχνολογία.

Ευέλικτη μετάβαση: Προβλέπει τη μετάβαση από GPON απευθείας στο NG-PON2, χωρίς το ενδιάμεσο στάδιο του XG-PON1, όπως σε περίπτωση που συζητήσαμε σε προηγούμενη παράγραφο, όπου δεν υπάρχει δηλαδή ενεργό δίκτυο XG-PON1. Η συνύπαρξη δύο τεχνολογιών αντί τριών, δίνει την απαραίτητη ευελιξία στον προγραμματισμό των σταδίων μετάβασης των πελατών, με κριτήρια γεωγραφικά, διαχωρισμού πελατών σε οικιακούς και εταιρικούς.

Μετάβαση με συνύπαρξη όλων των τεχνολογιών: Παρέχει την υψηλότερη ευελιξία, καθώς περιλαμβάνει τη συνύπαρξη και των τριών βασικών τεχνολογιών, GPON, XG-PON1 και NG-PON2. Παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τεχνικές προκλήσεις, λόγω της ανάγκης σωστής κατανομής των περιοχών μηκών κύματος που θα χρησιμοποιούνται για κάθε τεχνολογία καθώς και το μεγαλύτερο κόστος, λόγω ανάγκης ταυτόχρονης λειτουργίας και συντήρησης εξοπλισμού τριών γενεών. Η ικανότητα των συστημάτων NG-PON2 να συνυπάρχουν με το GPON και το XG-PON1 παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία για τη βραχυπρόθεσμη αναβάθμιση σε XG-PON1 και την πιο μακροπρόθεσμη μετάβαση στο NG-PON2 ή και απευθείας από GPON σε NG-PON2. Η τελευταία είναι η πλέον επιθυμητή. Οι επεμβάσεις κατά τη διάρκεια συνύπαρξης όπως το φιλτράρισμα μηκών κύματος για προστασία των παλαιών ONU πρέπει να γίνονται στο άκρο του OLT, αφενός για αριθμητικούς λόγους καθώς υπάρχει ένα OLT για 10άδες ή 100άδες ONU και αφετέρου προσβασιμότητας αφού βρίσκεται κατά κανόνα σε χώρο του παρόχου και όχι στους πελάτες. Η αντικατάσταση των ONU των πελατών θα γίνει στη διάρκεια της τελικής μετάβασής τους στο NG-PON2, με ελάχιστο χρόνο διακοπής της υπηρεσίας, κατά προτίμηση εκτός ωρών αιχμής

4 Απτικό Διαδίκτυο – Δυναμική Κατανομή Εύρους Ζώνης

4.1 Εισαγωγή

Οι προηγούμενοι σχεδιασμοί του διαδικτύου συμπεριλαμβάνουν το σταθερό, κινητό και πιο πρόσφατα το διαδίκτυο των αντικειμένων (Internet of Things – IoT). Κάθε τεχνολογική γενιά εικαζόταν ότι άγγιζε την τελειότητα και συνεπώς θα ήταν η τελευταία. Όμως, υπήρξε μια συνεχής εξέλιξη και διεύρυνση των δραστηριοτήτων, συσκευών και μορφών επικοινωνίας που εντασσόντουσαν στο διαδίκτυο. Ως φυσική εξέλιξη αυτών, αναδύεται η έννοια του Απτικού Διαδικτύου (Tactile Internet – TI), που θα επιτρέπει τη μετάδοση αφής και κίνησης, σε πραγματικό χρόνο. Η μετάδοση φωνής, βίντεο και δεδομένων οδηγούν το σχεδιασμό των σημερινών δικτύων, ωστόσο το Απτικό Διαδίκτυο, που ακόμα βέβαια βρίσκεται σε βρεφικό στάδιο, θα επιτρέψει απτικές επικοινωνίες, που με τη σειρά τους θα επιτρέψουν για πρώτη φορά την ψηφιακή παράδοση υπηρεσιών χειρωνακτικής εργασίας και δεξιοτήτων σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ θα επανορίσει τη μεταφορά εμπειριών μεταξύ χρηστών του διαδικτύου, ξεπερνώντας κατά πολύ τα επιτεύγματα της επικοινωνίας μέσω φωνής και βίντεο. Κάποιες εφαρμογές που προβλέπεται να καταστούν εφικτές είναι η απομακρυσμένη χειρουργική, ο απομακρυσμένος έλεγχος εξωσκελετών που θα εκτελούν εργασίες σε επικίνδυνες για ανθρώπους συνθήκες, η απομακρυσμένη οδήγηση οχημάτων, η απομακρυσμένη επισκευή μηχανημάτων και συσκευών και άλλες πολλές. Λόγω της απαιτητικής φύσης αυτών των εφαρμογών, το Απτικό Διαδίκτυο θα πρέπει να είναι υπεραξιόπιστο, να ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση μετάδοσης και να έχει επαρκή χωρητικότητα για τη διέλευση των απαιτούμενων δεδομένων. Θα διασυνδεθεί με το σταθερό και κινητό διαδίκτυο καθώς και με το IoT, αξιοποιώντας τις υποδομές τους και οδηγώντας τη δραστική τους βελτίωση και εκσυγχρονισμό. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλύσουμε τις σημαντικότερες σχεδιαστικές προκλήσεις, ενώ θα σκιαγραφήσουμε τις προτεινόμενες λύσεις και μεθόδους, που θα δώσουν το έναυσμα στη μετάβαση στο Απτικό Διαδίκτυο (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.2 Γενική Περιγραφή

Το συμβατικό διαδίκτυο επιτρέπει τη μετάδοση φωνής, βίντεο και δεδομένων, καθιστώντας δυνατή την επικοινωνία με αυτά τα μέσα, μεταξύ χρηστών οπουδήποτε στον κόσμο. Αυτή η δυνατότητα συνιστά μια τεράστια εξέλιξη σε σχέση με τις τηλεπικοινωνίες προηγούμενων δεκαετιών, ωστόσο το επόμενο στάδιο, το Απτικό Διαδίκτυο, αναμένεται να αποτελέσει ένα ακόμα σημαντικότερο εξελικτικό στάδιο. Θα προσδώσει δυνατότητες απτικής επικοινωνίας ως κύρια εφαρμογή και θα παρέχει το μέσο για μεταφορά αφής και κίνησης σε πραγματικό χρόνο, σε συνδυασμό με όλες τις άλλες μορφές επικοινωνίας.

Η απτική πληροφορία απαρτίζεται από δύο διαφορετικά είδη ανάδρασης: την **κιναισθητική ανάδραση**, που παρέχει πληροφορίες για τη δύναμη, ροπή, θέση και ταχύτητα και την **απτική ανάδραση**, που παρέχει πληροφορίες για την υφή επιφανειών, την τριβή και άλλες τέτοιες παραμέτρους. Η πρώτη γίνεται αντιληπτή από τους μύες, τις κλειδώσεις και τους τένοντες του σώματος, ενώ η δεύτερη μέσω των αισθητήρων του δέρματός μας (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016), (Eckehard Steinbach, Sandra Hirche, Marc Ernst, Fernanda Brandi, Rahul Chaudhari, Julius Kammerl, Iason Vittorias, 2011).

Η ανταλλαγή κιναισθητικών πληροφοριών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον απομακρυσμένο έλεγχο συσκευών, που με τη σειρά τους θα μεταφέρουν την ανάδραση στον άνθρωπο-χειριστή, δημιουργώντας έτσι ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου με αυστηρούς περιορισμούς στην καθυστέρηση μετάδοσης. Η ανταλλαγή απτικών εντυπώσεων δε διέπεται από τόσο ανελαστικούς περιορισμούς και δεν εμπεριέχει την έννοια του ελέγχου κλειστού βρόχου όπως και οι συμβατικές οπτικοακουστικές επικοινωνίες. Επιπροσθέτως, θα γίνει εφικτή η δημιουργία Δικτυωμένων Συστημάτων Ελέγχου (Networked Control Systems - NCS), στα οποία αισθητήρες, διακόπτες, ενεργοποιητές θα συνδέονται και θα ανταλλάσσουν δεδομένα ελέγχου και ανάδρασης, απτικά και μη, υπό τη μορφή πακέτων, επιτρέποντας τον έλεγχο, κλειστού βρόχου κατά κανόνα, δυναμικών διαδικασιών (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016), (Eckehard Steinbach, Sandra Hirche, Marc Ernst, Fernanda Brandi, Rahul Chaudhari, Julius Kammerl, Iason Vittorias, 2011).

Η απτική επικοινωνία εγκαθιστά μια ζεύξη μεταξύ ανθρώπων και αγνώστου περιβάλλοντος, με παρόμοιο τρόπο με αυτόν των οπτικοακουστικών ζεύξεων. Η εγγενής διαφορά είναι ότι η επικοινωνία της αίσθησης της αφής πρέπει να είναι αμφίδρομη. Η αφή γίνεται αισθητή ασκώντας μια κίνηση στο απομακρυσμένο περιβάλλον και νιώθοντας το περιβάλλον αυτό μέσω μιας ανάδρασης ή δύναμης αντίδρασης. Πρόκειται λοιπόν για μια επιπλέον διάσταση σε σχέση με την οπτικοακουστική επικοινωνία, που θα επιτρέψει τον έλεγχο και την κίνηση σε κάποιο απομακρυσμένο περιβάλλον (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

Στον πυρήνα του σχεδιασμού του Απτικού Διαδικτύου, κείται η πρόκληση του 1 ms, δηλαδή η απαίτηση επίτευξης συνολικής καθυστέρησης από άκρο σε άκρο μικρότερης ή ίσης με 1 ms και διακοπής επικοινωνίας όχι πάνω από 1 ms ανά ημέρα. Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο συντίθεται από, α) τη διεπαφή του χρήστη περίπου 300 μs, β) την ασύρματη διεπαφή περίπου 200 μs και γ) την καθυστέρηση μεταξύ του σταθμού βάσης ή σημείου πρόσβασης και του εξυπηρετητή ελέγχου και κίνησης περίπου 500 μs. Η επίτευξη της πρόκλησης του 1 ms (ITU-T Technology Watch Report, 2014) θα υλοποιήσει κινητές εφαρμογές, ικανές να ελέγξουν και να κινήσουν πραγματικά και εικονικά αντικείμενα με τέλεια απτική ανάδραση. Δεδομένης της καθυστέρησης της τάξης των 20 μs, που επιτυγχάνουν τα σημερινά κινητά δίκτυα 4^{ης} γενιάς, αντιλαμβανόμαστε ότι η επόμενη γενιά θα πρέπει να επιτύχει καθυστέρηση μιας τάξης μεγέθους μικρότερη (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.3 Κοινωνικές Επιδράσεις

Η εισαγωγή του Απτικού Διαδικτύου θα βελτιώσει τον τρόπο επικοινωνίας μας και θα οδηγήσει σε πιο ρεαλιστική και συναρπαστική κοινωνική αλληλεπίδραση σε ιδιωτικό και επαγγελματικό περιβάλλον. Θα ανοίξει επίσης το δρόμο για καινοτόμες εφαρμογές, που θα συμβάλλουν στην εύρεση λύσεων στις σύνθετες προκλήσεις, που αντιμετωπίζουν οι κοινωνίες μας, όπως οι δημογραφικές αλλαγές, με την αύξηση του προσδόκιμου ζωής, την αυξημένη απαίτηση για κινητικότητα και τη μετάβαση σε καθαρές, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Εκπαίδευση και διά βίου μάθηση: Οι σύγχρονες μέθοδοι διδασκαλίας, όπως η απομακρυσμένη μάθηση, τα μαθήματα μέσω διαδικτύου και οι εφαρμογές εξομοίωσης κίνησης και ενεργειών, θα ενισχυθούν σοβαρά με την εισαγωγή του Απτικού Διαδικτύου και της διαδραστικής εμπειρίας που αυτό θα προσφέρει. Ο εκμηδενισμός των χρόνων αντίδρασης μεταξύ των μερών που συμμετέχουν θα επιτρέψει βελτίωση της εμπειρίας και του αποτελέσματος, ενώ η απτική διάδραση μεταξύ εκπαιδευτή και εκπαιδευόμενων θα προσδώσει νέες δυνατότητες, αδιανόητες με την παρούσα τεχνολογία, στην απόκτηση δεξιοτήτων και γνώσεων μέσω διαδικτύου (ITU-T Technology Watch Report, 2014).

Υγεία και περίθαλψη: Η ποιότητα των υπηρεσιών υγείας και περίθαλψης θα βελτιωθεί από την αξιοποίηση της εμπειρίας του ιατρικού και παραϊατρικού προσωπικού, που συνδεδεμένοι στο Απτικό Διαδίκτυο θα μπορούν να παρέχουν απομακρυσμένη διάγνωση και θεραπεία, ακόμα και εγχειρίσεις εξ αποστάσεως με ακρίβεια, με τον έλεγχο ρομποτικών βραχιόνων. Επιπρόσθετα, η υποστήριξη και βοήθεια σε ανθρώπους με αναπηρίες μέσω εξωσκελετικών τεχνητών άκρων και ενισχυτών, θα βελτιώσει την κινητικότητα και την αυτάρκειά τους (ITU-T Technology Watch Report, 2014).

Ζώνες προσωπικής ασφάλειας: Το Απτικό Διαδίκτυο θα επιτρέψει τη δημιουργία χωρικών ζωνών προσωπικής ασφάλειας, μεταφορικά λεγόμενες και «φουσαλίδες», που θα αλληλεπιδρούν με κοντινά αντικείμενα, επίσης συνδεδεμένα στο Απτικό Διαδίκτυο, με εφαρμογές στην οδική κυκλοφορία, για την προστασία οδηγών, επιβατών και πεζών, στη βιομηχανική παραγωγή, προστατεύοντας τους εργάτες από επικείμενους κινδύνους και στην προστασία ανθρώπων, κατοικιών και εγκαταστάσεων από κακόβουλες ενέργειες (ITU-T Technology Watch Report, 2014).

Κυκλοφορία σε μια Έξυπνη Πόλη: Η συνδεσιμότητα των οχημάτων στο Απτικό Διαδίκτυο θα επιτρέψει συνεργατικούς τρόπους κυκλοφορίας, όπου η ροή της κίνησης θα βελτιστοποιείται, με έμφαση στους κανόνες ασφαλείας αλλά και παραμέτρους όπως η πυκνότητα της κυκλοφορίας ανά περιοχές. Σε επόμενη φάση, θα διευκολυνθεί η εξάπλωση της αυτόνομης οδήγησης, με ασφάλεια και ενεργειακή απόδοση των οχημάτων σε σχέση με σήμερα, χωρίς ανθρώπινη καθοδήγηση (ITU-T Technology Watch Report, 2014).

Ενέργεια: Στα αποκεντρωμένα δίκτυα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, το Απτικό Διαδίκτυο θα διευκολύνει τη δυναμική ενεργοποίηση και απενεργοποίηση τοπικής παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, εκτιμώντας ακόμα και τη φάση του εναλλασσόμενου ρεύματος, μειώνοντας έτσι την παραγωγή μη αξιοποιήσιμης άεργου ισχύος και βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση και ευστάθεια των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας (ITU-T Technology Watch Report, 2014).

4.4 Αρχιτεκτονική Απτικού Διαδικτύου

Η εγγενής λειτουργία της αίσθησης της αφής, την περιορίζει σε μικρή απόσταση μεταξύ του ανθρώπου και του αντικειμένου που θα έρθουν σε επαφή. Συνεπώς, η σκέψη για απομακρυσμένη απτική αλληλεπίδραση μοιάζει αντιφατική. Ωστόσο, με τις πρόσφατες εξελίξεις στην έρευνα απτικών τεχνολογιών και συσκευών, καθίσταται εφικτό για έναν άνθρωπο να συμμετέχει φυσικά σε ενέργειες και να λαμβάνει την απτική ανάδραση. Αυτή η διαδικασία έχει γίνει γνωστή με τον όρο «τεχνολογία απτικής τηλεπαρουσίας» (Eckehard Steinbach, Sandra Hirche, Marc Ernst, Fernanda Brandi, Rahul Chaudhari, Julius Kammerl, Iason Vittorias., 2011).

Η απτική τηλεπαρουσία επιτρέπει σε έναν άνθρωπο να διαχειριστεί αντικείμενα σε απομακρυσμένο περιβάλλον και να δρα σα να ήταν φυσικά παρών. Με απώτερο στόχο την πλήρη ενσωμάτωσή του στο απομακρυσμένο περιβάλλον, το σύστημα τηλεπαρουσίας ενισχύεται με διάφορους τρόπους πολυτροπικής αίσθησης και λήψης πληροφοριών οπτικοακουστικών και απτικών. Το εύρος εφαρμογών είναι τεράστιο και περιλαμβάνει υποβρύχιο και διαστημικό τηλεχειρισμό, εργασία σε επικίνδυνο και δύσκολα προσβάσιμο περιβάλλον, απομακρυσμένη χειρουργική και τηλεχειρισμό εργαλείων ακριβείας. Ένα τυπικό σύστημα τηλεπαρουσίας περιλαμβάνει την διεπαφή ανθρώπου – συστήματος (Human System Interface - HSI), όπως ένα ρομπότ με ικανότητα απτικής αλληλεπίδρασης με τον άνθρωπο που το ελέγχει και έναν τηλεκτελεστή, όπως το απομακρυσμένο ρομπότ, που εκτελεί τις ενέργειες, με την καθοδήγηση του ανθρώπου. Αμφότερα συνδέονται με μια αμφίδρομη τηλεπικοινωνιακή ζεύξη, έτσι ώστε ο τηλεκτελεστής να εκτελεί τις κινήσεις που κάνει ο άνθρωπος με το HSI, να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον που βρίσκεται και να στέλνει τα ερεθίσματα που λαμβάνει από αυτό το περιβάλλον, εκτελώντας τις κινήσεις, πίσω

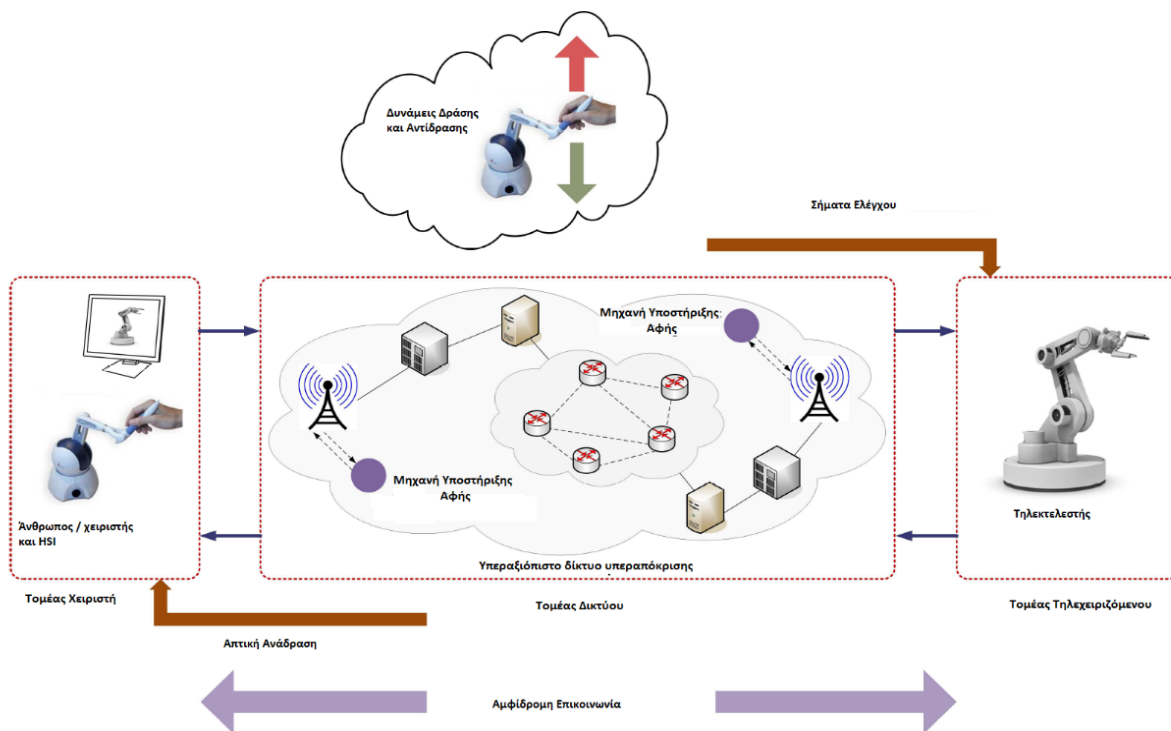
στο HSI, για να γίνουν αισθητά από τον άνθρωπο (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016). Η αρχιτεκτονική του Απτικού Διαδικτύου χωρίζεται σε τρεις διακριτούς τομείς: **τον τομέα του χειριστή (master domain), τον τομέα του δικτύου και τον τομέα του τηλεχειριζόμενου (slave domain).**

Ο **τομέας χειριστή** αποτελείται από τον άνθρωπο και το HSI και που όπως υποδηλώνει και το όνομά της, θα ελέγχει τη λειτουργία του τομέα τηλεχειριζόμενου εκτελεστή (ITU-T Technology Watch Report, 2014), (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

Ο **τομέας δικτύου** παρέχει τη ζεύξη για αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των δύο οντοτήτων και έτσι συνδέει κιναισθητικά τον άνθρωπο με το απομακρυσμένο περιβάλλον. Ιδανικά, ο άνθρωπος πρέπει να ενσωματωθεί πλήρως στο περιβάλλον αυτό (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

Ο **τομέας τηλεχειριζόμενου** αποτελείται από έναν τηλεκτελεστή, το τηλεχειριζόμενο ρομπότ στο απομακρυσμένο περιβάλλον δηλαδή, που βρίσκεται υπό τον άμεσο έλεγχο του ανθρώπου-χειριστή, μέσω μηνυμάτων ελέγχου και αλληλεπιδρά με διάφορα αντικείμενα στο απομακρυσμένο περιβάλλον, για το οποίο ενδέχεται να μην υπάρχει εκ των προτέρων γνώση και αντίληψη. Μέσω μηνυμάτων ελέγχου και ανάδρασης, ανταλλάσσεται πληροφορία μεταξύ των δύο οντοτήτων, υλοποιώντας το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου. Η ταχύτητα και η αξιοπιστία μετάδοσης αυτής της πληροφορίας είναι ανελαστική απαίτηση για την ορθή λειτουργία των απτικών επικοινωνιών (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

Οι μηχανές υποστήριξης αφής βρίσκονται κοντά στα άκρα του δικτύου, παρέχοντας δυνατότητες τεχνητής ευφυΐας, που παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ευστάθεια του συστήματος, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο. Είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε μεταξύ του Απτικού Διαδικτύου και των απτικών επικοινωνιών. Παρόμοια με γνωστές επικοινωνίες πολυμέσων που τρέχουν πάνω από το ενσύρματο ή ασύρματο διαδίκτυο, η κύρια εφαρμογή που τρέχει πάνω από το Απτικό Διαδίκτυο είναι οι απτικές επικοινωνίες, δημιουργώντας μια σχέση υπηρεσίας με υποδομή/μέσο, όπως η σχέση μεταξύ IPTV και του διαδικτύου. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται σχηματικά αυτή η αρχιτεκτονική, σε λειτουργικό επίπεδο, με όλα τα στοιχεία που περιγράψαμε.



Εικόνα 18: Αρχιτεκτονική Απτικού Διαδικτύου (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.4.1 Απτικές Συσκευές

Οι συσκευές αυτές επιτρέπουν στον άνθρωπο να αγγίζει, αισθάνεται και χειρίζεται αντικείμενα σε πραγματικά και εικονικά περιβάλλοντα. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία τους αποτελούν σημαντική πρόκληση για την υλοποίηση απτικών επικοινωνιών και τηλεπαρουσίας. Παρόλο που η μέτρηση απτικών σημάτων έχει τυποποιηθεί αρκετά με υφιστάμενες τεχνολογίες αίσθησης όπως κωδικοποιητές θέσης, αισθητήρες δύναμης και πίεσης και άλλων, η απεικόνισή τους παραμένει πρόκληση τόσο σε επίπεδο απτικής, όσο και κιναισθητικής ανάδρασης. Οι συσκευές απτικής ανάδρασης συμπεριφέρονται σαν μικρά ρομπότ, που ανταλλάσσουν μηχανική ενέργεια με ένα χρήστη. Η ανάδραση μπορεί να λάβει χώρα με οποιοδήποτε μέρος του σώματος του χειριστή, αλλά είθισται να χρησιμοποιούνται διεπαφές με τα χέρια, που είναι τα πλέον ευαίσθητα στο ανθρώπινο σώμα, από πλευράς αφής. Τέτοιες συσκευές είναι εμπορικά διαθέσιμες, παρέχοντας μέχρι 6 βαθμούς ελευθερίας. Το

δημοφιλέστερο σχέδιο είναι ένα σύστημα σύνδεσης ρομποτικού βραχίονα με πενάκι. Ο βραχίονας ανιχνεύει τη θέση της πέννας και μπορεί να ασκήσει δύναμη στην άκρη της.

Φυσικά χρειάζεται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη των συσκευών αυτών, ώστε να εκμεταλλευτούμε όλη τη δυναμική του Απτικού Διαδικτύου. Χρειάζεται αύξηση των βαθμών ελευθερίας και ενσωμάτωση της δικτυακής διεπαφής, για άμεση ή έμμεση επικοινωνία της συσκευής με το δίκτυο. Όταν εισέλθουν σε μαζική παραγωγή, αναμένεται να μειωθεί το κόστους τους, το οποίο προς το παρόν είναι μάλλον δυσβάσταχτο για να επιτρέψει τη μαζική διείσδυσή τους στην αγορά. Τέλος, οι περισσότερες τέτοιες συσκευές παρέχουν ακόμα μόνο κιναισθητικό έλεγχο, ενώ πρέπει σίγουρα να ενσωματώσουν και λειτουργία απτικής ανάδρασης για να αυξηθεί η ευελιξία στη χρήση τους και να μην αποκλείεται καμία επιλογή λειτουργίας (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.4.2 Κωδικοποίηση / αποκωδικοποίηση

Έχουν εμφανιστεί πολλές μελέτες και δημοσιεύσεις για τη μετάδοση απτικών πληροφοριών σε συστήματα τηλεπαρουσίας. Για την ψηφιοποίηση τους, χρησιμοποιείται συνήθως ρυθμός δειγματοληψίας 1 kHz, που οδηγεί στον αρκετά υψηλό ρυθμό δημιουργίας 1000 πακέτων ανά δευτερόλεπτο. Έχουν διερευνηθεί διάφορες τεχνικές για τη συμπίεση των δεδομένων που παράγονται, αναλογιζόμενοι ότι σε κάποιες περιπτώσεις τα κανάλια που θα χρησιμοποιηθούν δε θα έχουν άπειρη χωρητικότητα. Οι τεχνικές αυτές εκμεταλλεύονται την πεπερασμένη αίσθηση αφής του ανθρώπου, όπως οι αντίστοιχες τεχνικές συμπίεσης ήχου και βίντεο εκμεταλλεύονται τους περιορισμούς στην όραση και ακοή μας. Ωστόσο, χρειάζεται περαιτέρω έρευνα και τυποποίηση, για να φτάσουμε σε πρότυπα codecs όπως το H.264 για τον ήχο και το MPEG-4 για το βίντεο (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

Με την ενσωμάτωση τόσο κιναισθητικής όσο και απτικής πληροφορίας, ένας τέτοιος codec θα επιτρέψει την επεκτασιμότητα και την καθολική αποδοχή της τεχνολογίας. Με προσέγγιση αρχιτεκτονικής σε επίπεδα, θα αποκτήσει την απαραίτητη ευελιξία για χρήση σε κάθε είδους δίκτυο, ενσύρματο ή ασύρματο.

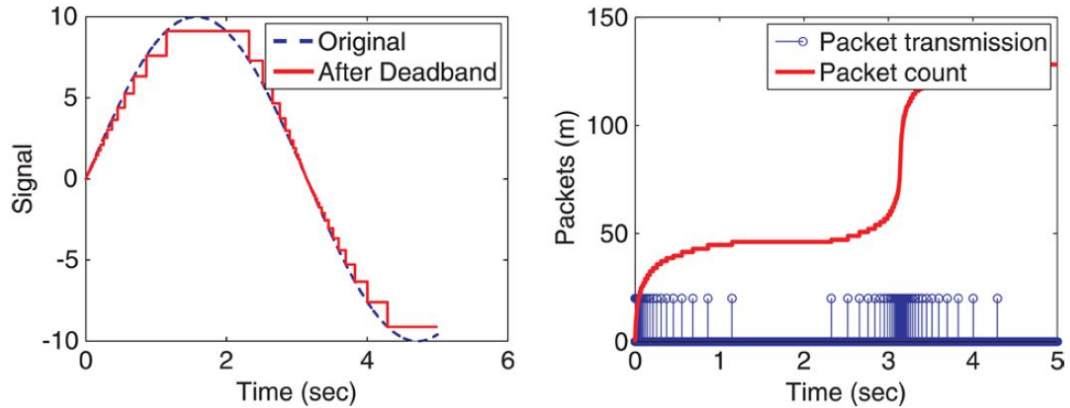
Στη δημοσίευση του Otanez (P.G.Otanez, 2002) προτάθηκε μια τεχνική μείωσης των δεδομένων, βασιζόμενη στη νεκρή ζώνη, με σκοπό τη μείωση του ρυθμού πακέτων για έλεγχο μέσω δικτύου. Γίνεται σύγκριση των μετρήσεων του αισθητήρα με το πιο πρόσφατο δείγμα που μεταδόθηκε και αν η αλλαγή είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, το δείγμα δε μεταδίδεται. Παρόλο που επιτυγχάνει την επιθυμητή μείωση του ρυθμού πακέτων, δεν εμβαθύνει στους περιορισμούς της ανθρώπινης αντίληψης. Οι Hinterseer et al. (P.Hinterseer, 2007) πρότειναν μια τεχνική αντιληπτικής κωδικοποίησης για τα απτικά δεδομένα. Ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο πρόβλεψης, που εκτιμά τα εισερχόμενα δείγματα αφής, με βάση προηγούμενες απτικές πληροφορίες που μεταδόθηκαν. Για να διατηρηθεί το σφάλμα ανασύστασης σε μη αντιληπτά επίπεδα, προέβησαν στη δημιουργία μαθηματικού μοντέλου της αντίληψης απτικών σημάτων από τον άνθρωπο. Επιτρέπει την προσαρμοστική αξιολόγηση της ποιότητας του αλγορίθμου πρόβλεψης, υπολογίζοντας τη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων απτικών δειγμάτων. Όσο αυτή παραμένει εντός των ορίων αντίληψης, τα σήματα δε μεταδίδονται, ενώ αν τα όρια ξεπεραστούν, γίνεται μετάδοση. Για ένα βαθμό ελευθερίας, αυτό εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$|x(t') - x(t)| \leq k \cdot |x(t')|$$

Αν η ανίσωση ισχύει, δε γίνεται μετάδοση, αλλιώς η νέα τιμή μεταδίδεται. Όπου $x(t)$ είναι το τωρινό απτικό σήμα, t' είναι ο χρόνος στον οποίο συνέβη η πιο πρόσφατη μετάδοση και k η παράμετρος κατωφλίου αντίληψης. Η νεκρή ζώνη, που αφορά τα σήματα με μη αντιληπτές αλλαγές, προσαρμόζεται για κάθε σήμα, ανάλογα με το πλάτος του. Η παράμετρος k έχει προσδιοριστεί σε ψυχοσωματικές μελέτες (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

Για παράδειγμα, ένα ημιτονοειδές σήμα διάρκειας 5 δευτερολέπτων, που δειγματοληπτήθηκε με ρυθμό 1 kHz, και με παράμετρο ίση με 20%, θα παράξει 128 πακέτα προς μετάδοση, εν αντιθέσει με τα 5000 που θα απαιτούντο αν δεν είχε εφαρμοσθεί ο αλγόριθμος. Η μείωση αγγίζει το 97%, ενώ τα όποια σφάλματα

προκύπτουν, διορθώνονται με προηγμένες τεχνικές ανασύστασης (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).



Εικόνα 19: Εφαρμογή του αλγόριθμου πρόβλεψης για περιορισμό των δεδομένων (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.4.3 Πολυτροπική πληροφορία αισθήσεων

Πέρα από την απτική ανάδραση, το Απτικό Διαδίκτυο πρέπει να μεριμνήσει για την παροχή οπτικής και ακουστικής ανάδρασης, κυρίως στον τομέα χειριστή. Αυτό, διότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος συνδυάζει διαφορετικά ερεθίσματα, που έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένη αντίληψη. Μια βασική πρόκληση λοιπόν, είναι ο πολυτροπικός αποσυγχρονισμός, που προκύπτει λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων των σημάτων διαφόρων αισθήσεων, σε όρους δειγματοληψίας, μετάδοσης, καθυστέρησης κτλ. Συνεπώς, χρειάζεται μια τεχνική πολυπλεξίας, που να μπορεί να εκμεταλλεύεται τις προτεραιότητες καθώς και το χρονικό συνδυασμό των διαφόρων σημάτων. Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές, όπως ένας προσαρμοστικός πολυπλέκτης, γνωστός ως Admux, που συνδυάζει την πολυτροπικότητα των αισθήσεων σε έναν, στατιστικά βέλτιστο, τρόπο. Ωστόσο, οι επιδόσεις του Admux υπό δυναμικά μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα, όπως το ασύρματο και κυρίως η ανοχή σε απώλεια πακέτων, δεν έχει εξεταστεί επαρκώς. Έχει προταθεί επίσης ένα οπτικοαπτικό σχήμα πολυπλεξίας, που όμως λειτουργεί πάνω από κανάλια σταθερού ρυθμού μετάδοσης. Συνεπώς, χρειάζεται επιπλέον ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα, για την πλήρη υλοποίηση του Απτικού Διαδικτύου (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.4.4 Ευστάθεια του απτικού ελέγχου

Είδαμε ότι, σε σύστημα απτικών επικοινωνιών, έχουμε ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του HSI και του τηλεκτελεστή μέσω σημάτων εντολών και ανάδρασης, δημιουργώντας σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, που περιλαμβάνει τον άνθρωπο, το δίκτυο και το απομακρυσμένο περιβάλλον. Έτσι, η ευστάθεια είναι μια προφανής πρόκληση για την ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου. Τα σφάλματα και η καθυστέρηση μετάδοσης μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ευστάθεια αυτή, οδηγώντας σε υποβάθμιση τη λειτουργία του συστήματος και την ενσωμάτωση του ανθρώπου στο απομακρυσμένο περιβάλλον. Έχουν προταθεί αρκετές αρχιτεκτονικές ελέγχου για τη σταθεροποίηση του συστήματος υπό σταθερές καθυστερήσεις, όχι όμως υπό μεταβλητές, οι οποίες είναι μάλλον ο κανόνας και όχι η εξαίρεση. Υπάρχει λοιπόν πεδίο, που απαιτεί εξελιγμένες λύσεις και κοινή σχεδίαση πρωτοκόλλων επικοινωνιών και αρχιτεκτονικών ελέγχου, για να επιλυθεί οριστικά το ζήτημα της ευστάθειας του συστήματος ελέγχου (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.4.5 Υπεραξιοπιστία

Η αξιοπιστία αναφέρεται στη διαθεσιμότητα και την παροχή ενός συγκεκριμένου επιπέδου υπηρεσίας επικοινωνίας για σχεδόν το 100% του χρόνου. Στα κυβελωτά δίκτυα, η αξιοπιστία μειώνεται λόγω παραγόντων όπως η ανεξέλεγκτη παρεμβολή, η μειωμένη ισχύς του χρήσιμου σήματος, η εξάντληση των πόρων, οι βλάβες στον εξοπλισμό, οι καιρικές συνθήκες κτλ. Το Απτικό Διαδίκτυο, που προορίζεται να εξυπηρετήσει σημαντικούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, απαιτεί υπεραξιόπιστη δικτυακή συνδεσιμότητα. Για να ποσοτικοποιήσουμε τον, εν πολλοίς αφηρημένο ορισμό της υπεραξιοπιστίας, θα θεωρήσουμε αξιοπιστία αντίστοιχη των ενσύρματων γραμμών πρόσβασης, δηλαδή πιθανότητα διακοπής 10^{-7} , που αντιστοιχεί σε ms διακοπής ανά ημέρα. Σε ανεξέλεγκτα περιβάλλοντα όμως, που προκαλούν απώλεια ή αλλοίωση πληροφορίας, οι απτικές επικοινωνίες είναι ευάλωτες σε διάφορους τύπους σφαλμάτων, που μπορούν να προκαλέσουν άσκηση ιδιαίτερα μεγάλης δύναμης, λανθασμένης αίσθησης της υφής μιας επιφάνειας και άλλες

ανεπιθύμητες παρενέργειες στη δραστηριότητα του χειριστή (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

Για τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, έχει προταθεί μια κατάσταση υπεραξιόπιστης επικοινωνίας (Ultra-Reliable Communication - URC), που εδράζεται στην ομαλή υποβάθμιση της ποιότητας επικοινωνίας υπό δυσμενείς συνθήκες, παρά στην απόλυτη διαθεσιμότητα ή μη. Με αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο παρέχει ένα βαθμό λειτουργικότητας για την υπηρεσία, ακόμα και όταν δε δύναται να επιτύχει πλήρη λειτουργικότητα. Ενώ οι εφαρμογές βίντεο και ήχου επιτρέπουν εύκολα αυτήν την ομαλή υποβάθμιση, ρυθμίζοντας αντίστοιχα την ποιότητα και την ανάλυση του οπτικοακουστικού σήματος, ενδέχεται στις απτικές εφαρμογές αυτό να μην είναι εφικτό, λόγω του κινδύνου αποσταθεροποίησης του συστήματος από καθυστερημένη άφιξη ή απώλεια κρίσιμων απτικών δεδομένων. Επομένως, η αξιοπιστία επιπέδου σταθερού δικτύου για τη μεταφορά απτικών δεδομένων πάνω από ασύρματα δίκτυα παραμένει μια σοβαρή πρόκληση για την υλοποίηση του Απτικού Διαδικτύου (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

Οι τόσο αυστηρές απαιτήσεις αξιοπιστίας απαιτούν επανεξέταση της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής της στοίβας πρωτοκόλλων. Στο 2^ο επίπεδο και συγκεκριμένα στο υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control – MAC), η αξιοπιστία αυτή δε μπορεί να επιτευχθεί με μηχανισμούς αίτησης επανεκπομπής (Automatic Repeat reQuest – ARQ), γιατί θα έτσι θα αυξανόταν σημαντικά η καθυστέρηση. Στο επίπεδο 4, η χρήση του TCP θα ήταν επιθυμητή, λόγω εγγενών μηχανισμών αξιοπιστίας, ωστόσο η επιβάρυνση που προκαλούν οι αυστηρές διαδικασίες του TCP, η συνεπαγόμενη καθυστέρηση και οι μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησής του, μάλλον υποσκάπτουν τη λειτουργία των απτικών επικοινωνιών. Το UDP παρέχει την απαιτούμενη ταχύτητα και απλότητα, εις βάρος της αξιοπιστίας.

Ένα άλλο σοβαρό θέμα, από την οπτική γωνία της στοίβας πρωτοκόλλων είναι ο μικρός λόγος μεγέθους πληροφορίας προς μέγεθος επικεφαλίδας. Τα απτικά δεδομένα συνήθως παράγουν πακέτα με ωφέλιμη πληροφορία 16 bit ανά βαθμό ελευθερίας. Έτσι τα δεδομένα μιας ροής συστήματος με τρεις βαθμούς ελευθερίας θα ήταν μόλις 6 byte. Λαμβάνοντας υπόψη τη σταδιακή μετάβαση στο IPv6, το πακέτο του οποίου έχει διπλάσια επικεφαλίδα από του IPv4 (40 έναντι 20 byte), αυτό αποτελεί σημαντική

πρόκληση για το δίκτυο, μια και η αποδοτικότητα της επικοινωνίας πέφτει στο 13%. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες τεχνικές συμπίεσης επικεφαλίδας, τόσο για ενσύρματη όσο και για ασύρματη επικοινωνία RFC 3096 και RFC 3545 της Τακτική Δύναμη Μηχανικών Internet (Internet Engineering Task Force – IETF), που μπορούν να μειώσουν το μέγεθός της από 40 bytes σε μόλις 2 (IETF, 2001), (IETF, 2003). Έχουν όμως σχεδιαστεί για συγκεκριμένα πρωτόκολλα, όπως το RTP και το TCP και ενδέχεται να μην αποδώσουν επαρκώς σε αναξιόπιστες ασύρματες ζεύξεις, ενώ δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η συμπίεση και αποσυμπίεση εισάγει ανεπιθύμητες καθυστερήσεις. Χρειάζεται λοιπόν σοβαρή επανεξέταση των τεχνικών, που θα είναι κατάλληλες για απτικές επικοινωνίες (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.4.6 Υπεραποκρισιμότητα

Η διατήρηση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο κάτω από 1 ms είναι ένα titάνιο έργο, σε σχέση με τα επιτεύγματα των υφιστάμενων τεχνολογιών. Από πλευράς φυσικού επιπέδου, κάθε πακέτο δεν πρέπει να διαρκεί πάνω από 33 μs για να γίνει εφικτή η μονόδρομη μετάδοση στο φυσικό επίπεδο εντός 100 μs. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιεί το LTE ωστόσο, δεν είναι κατάλληλη για τέτοια χρήση, γιατί κάθε σύμβολο OFDM διαρκεί περίπου 70 μs. Απαιτείται επίσης συντομότερο διάστημα μεταξύ μεταδόσεων (Transmission Time Interval – TTI), που με τη σειρά του απαιτεί περισσότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Το φυσικό επίπεδο της 5^{ης} γενιάς πρέπει να σχεδιαστεί με γνώμονα αυτές τις κρίσιμες απαιτήσεις. Κάθε παράγοντας που συμβάλλει στην καθυστέρηση από άκρο σε άκρο πρέπει να βελτιστοποιηθεί για να επιτευχθεί ο στόχος στην τιμή της καθυστέρησης για το Απτικό Διαδίκτυο. Το δίκτυο κορμού και η εκεί καθυστέρηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις επιλογές του παρόχου, ενώ η καθυστέρηση στο διαδίκτυο είναι μεταβλητή και εξαρτάται από πολιτικές δρομολόγησης και από καθυστέρηση στην ουρά εισόδου κάθε δρομολογητή. Ακόμα και αν συνυπολογίσουμε τις σημαντικότερες εξελίξεις στην τεχνολογία υλικού, στα πρωτόκολλα και την αρχιτεκτονική, δεν πρέπει να παραγνωρίζουμε έναν ανυπέρβλητο φυσικό περιορισμό, την ταχύτητα του φωτός δηλαδή, που θέτει ένα άνω

φράγμα στην απόσταση μεταξύ των άκρων μιας απτικής επικοινωνίας (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.4.7 Συνεργατικές, πολυχρηστικές απτικές επικοινωνίες

Όπως υπονοείται από το όνομά τους, πολλοί χρήστες αλληλεπιδρούν σε ένα κοινό απομακρυσμένο περιβάλλον, συνεργαζόμενοι, προσδίδοντας στην επικοινωνία απεριόριστες και επαναστατικές δυνατότητες.

Από δικτυακή σκοπιά, θα απαιτήσει σίγουρα τη δημιουργία ενός υπερκείμενου ομότιμου δικτύου (peer-to-peer) για να συντονίζει τη συμμετοχή πολλών χρηστών και να επιβλέπει άλλες λειτουργίες και εργασίες. Η ύπαρξη αυτής της ανάγκης δημιουργεί επιπλέον προκλήσεις στο θέμα της καθυστέρησης, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων δρομολόγησης, που ενδέχεται να είναι ασύμβατες με τον περιορισμό της καθυστέρησης. Επίσης, ο βαθμός της αποκέντρωσης και η αρχιτεκτονική του συστήματος θα παίξουν σοβαρό ρόλο στην επίτευξη ή μη των στόχων (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

4.4.8 Ασφάλεια

Το διαδίκτυο αποτελεί ήδη μια κρίσιμη υποδομή για κάθε σχεδόν δραστηριότητά μας. Έχουμε ήδη υψηλές απαιτήσεις από αυτό, σε όρους διαθεσιμότητας, αξιοπιστίας, προστασίας από εξωτερικές επιθέσεις και δυσλειτουργίες. Οι τεχνικές απαιτήσεις του Απτικού Διαδικτύου, ειδικά η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης, επιφέρουν μεγάλες προκλήσεις στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που θα τις υποστηρίξουν.

Στις έως τώρα υλοποιήσεις, η ασφάλεια της επικοινωνίας βασίζεται στο διαχωρισμό της κρυπτογράφησης από τη μετάδοση. Οι κλασικές μέθοδοι παρέχουν ασφάλεια από υποκλοπές μόνο όταν οι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης είναι αρκετά πολύπλοκοι και οι επίδοξοι υποκλοπείς έχουν πεπερασμένη υπολογιστική ισχύ. Εφόσον οι μηχανισμοί ασφαλείας υλοποιούνται σε υψηλά επίπεδα, προκαλούν μη αμελητέες καθυστερήσεις, αφήνοντας την αύξηση των ρυθμών δεδομένων στην τεχνολογία μετάδοσης.

Για το Απτικό Διαδίκτυο, η διασφάλιση των δεδομένων χωρίς αύξηση της καθυστέρησης απαιτεί την ενσωμάτωση των μηχανισμών ασφαλείας στη φυσική μετάδοση, χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές κωδικοποίησης, για τη διασφάλιση της λήψης και της κατανόησης των μηνυμάτων μόνο από νόμιμους παραλήπτες. Σημαντικά κριτήρια αξιολόγησης των επιδόσεων των συστημάτων αυτών είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης απόλυτα ασφαλών μηνυμάτων και ο μέγιστος ρυθμός δημιουργίας και μετάδοσης ασφαλών κλειδιών. Αυτή η προσέγγιση είναι ανώτερη από τις κλασικές μεθόδους ασφαλείας και επιτρέπουν σωστή διαστασιοποίηση και βελτιστοποίηση του δικτύου.

Δε μπορούμε επίσης να παραλείψουμε την ανάγκη ταυτοποίησης των χρηστών ή τερματικών συσκευών, η οποία πάλι δε μπορεί να διαχωριστεί από τη μετάδοση, όπως γίνεται στις κλασικές τεχνικές. Η αξιοποίηση χαρακτηριστικών, σχετιζόμενων με το υλικό των συσκευών μπορεί να δώσει τη λύση (A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh, 2016).

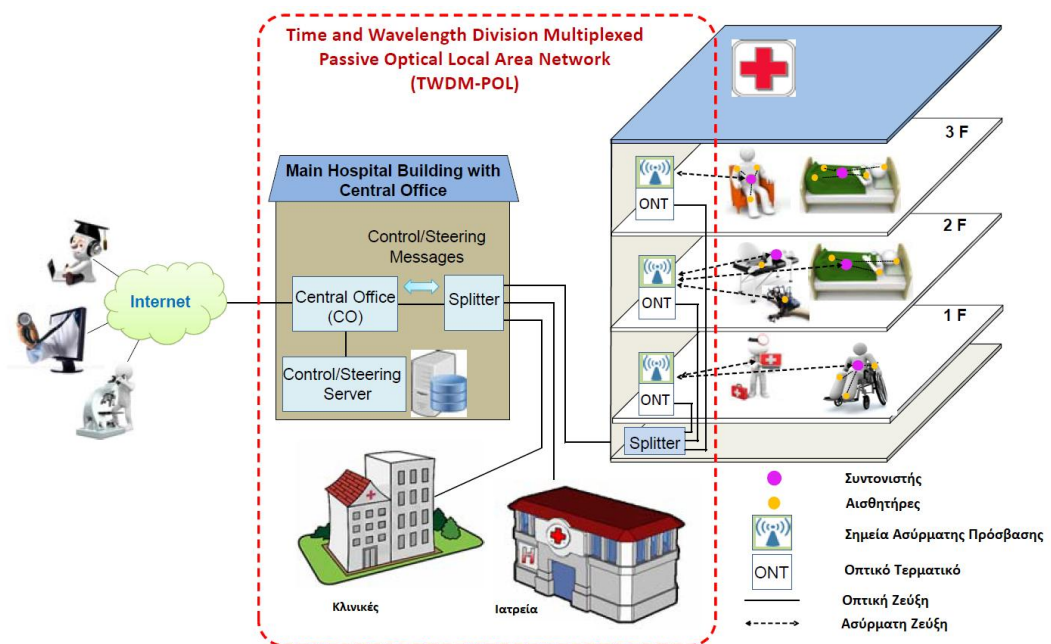
4.5 TI-DWBA

Μια σημαντική και αξιοσημείωτη προσέγγιση για τη μείωση της καθυστέρησης είναι η τοποθέτηση εξυπηρετητών ελέγχου και κίνησης σε μικρή απόσταση, τάξης λίγων χιλιομέτρων, από το κάθε άκρο απτικής επικοινωνίας. Παράλληλα λοιπόν με τις προκλήσεις και την έρευνα επ' αυτών, του ασύρματου δικτύου πρόσβασης, ανακύπτει η ανάγκη έρευνας και ανάπτυξης στο τμήμα του τοπικού δικτύου, που θα υποστηρίξει το όραμα του Απτικού Διαδικτύου. Θα εξετάσουμε μία πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την εξυπηρέτηση από κοινή υποδομή τοπικού δικτύου, της μετάδοσης των κοινών δεδομένων μαζί με τα ευαίσθητα δεδομένα του Απτικού Διαδικτύου. Η λύση που θα εξετάσουμε συνδυάζει την πολυπλεξία χρόνου και μήκους κύματος σε παθητικό οπτικό LAN με έναν αλγόριθμο πρόβλεψης κατανομής πόρων, που συναντάται υπό τον όρο TI-DWBA (Tactile Internet – Dynamic Wavelength & Bandwidth Allocation). Έχει σχεδιαστεί αφενός για να εκτιμά το μέσο εύρος ζώνης για εξυπηρέτηση της κίνησης του Απτικού Διαδικτύου και της απλής κίνησης σε κάθε οπτικό τερματικό/ασύρματο σημείο πρόσβασης, αφετέρου αξιοποιεί και αξιοποιεί μηχανισμούς πρόβλεψης της κίνησης στο OLT, για να καταναίμει μετά μήκη κύματος, άρα εύρος ζώνης σε κάθε

ONT/WAP, ενώ μεταβάλλει δυναμικά τον αριθμό των ενεργών μηκών κύματος για να αποφευχθεί πιθανή συμφόρηση και αύξηση της καθυστέρησης (E.Wong, 2016).

Για την επίτευξη του στόχου για καθυστέρηση 500 μs μεταξύ του εξυπηρετητή ελέγχου και κίνησης και του σημείου ασύρματης πρόσβασης, η οπτική ίνα ίσως είναι η πιο κατάλληλη λύση, συνυπολογίζοντας κάθε παράγοντα αύξησης της καθυστέρησης, όπως η επεξεργασία σήματος, η μεταγωγή και η διαχείριση των πρωτοκόλλων. Με αυτές τις καθυστερήσεις και τον ανυπέβλητο περιορισμό της ταχύτητας του φωτός, η απόσταση μεταξύ του εξυπηρετητή και του άκρου οπτικής επικοινωνίας πρέπει να είναι λίγα χιλιόμετρα (E.Wong, 2016)

. Έτσι, θα εξετάσουμε σε αυτό το κεφάλαιο τεχνολογίες δικτυακής υποδομής, που υπόκεινται σε αυτόν τον περιορισμό και θα συμπληρώνουν την ασύρματη πρόσβαση των τελικών οπτικών σημείων.



Εικόνα 20: Νοσοκομειακή εγκατάσταση με υπηρεσία ΤΙ. Το TWDM-POL συνδέει όλα τα σημεία ενδιαφέροντος με αισθητήρες BAN (Body Area Network) μεταξύ τους και με το διαδίκτυο (E.Wong, 2016).

Για τις ανάγκες οπτικής επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο και υψηλής χωρητικότητας γενικών επικοινωνιών του κάθε οργανισμού, όπως συχνά συμβαίνει σε εγκαταστάσεις υγείας, προτείνεται ανασχεδιασμός της υποδομής σε TWDM-POL, το

οποίο διατηρεί την παθητική υποδομή οπτικού δικτύου, εμπλουτίζοντάς την με πολυπλεξία/αποπολυπλεξία χρόνου και μήκους κύματος στο OLT στις κεντρικές εγκαταστάσεις και στα κατανεμημένα ONT/WAP. Η οπτική υποδομή θα παραμείνει αξιοποιήσιμη σε βάθος δεκαετιών, χωρίς ανάγκη σοβαρών αναβαθμίσεων και με την προσθήκη ενός εξυπηρετητή, ή συστάδας εξυπηρετητών στην κεντρική εγκατάσταση, θα προσδώσουμε στο σύστημά μας δυνατότητες προσωρινής αποθήκευσης (caching) με πρόβλεψη αναγκαίων δεδομένων, πρόβλεψη κατανομής πόρων για τα πακέτα του Απτικού Διαδικτύου και πρόβλεψη ανθρωπίνων ενεργειών. Ο συνδυασμός των αλγορίθμων πρόβλεψης και της εκτέλεσης σε πραγματικό χρόνο των απτικών εφαρμογών καθίσταται εφικτός λόγω της εγγύτητας του εξυπηρετητή στο απτικό άκρο. Σημειώνεται ότι η απ' άκρο σ' άκρο καθυστέρηση της κίνησης TI που διασχίζει το δίκτυο είναι το άθροισμα των χρόνων της λήψης ενός πακέτου του αισθητήρα από το ONT, της διάδοσης του πακέτου αυτού μέσω του LAN, της επεξεργασίας του πακέτου από τον εξυπηρετητή και τη δημιουργία μιας ανάδρασης στην πληροφορία του πακέτου, που θα μεταδοθεί στην αντίθετη κατεύθυνση για την εκτέλεση κάποιας ενέργειας (E.Wong, 2016).

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα με βάση το χαλκό και/ή την πολύτροπη ίνα, στα οποία οι πόροι είναι σταθεροί και μόνιμα κατανεμημένοι σε σημεία του δικτύου, στα TWDM-POL μπορεί να αποφευχθεί η συμφόρηση μέσω πρόβλεψης του φόρτου της κίνησης, δυναμικής κατανομής μηκών κύματος και δίνοντας προτεραιότητα σε επείγουσες μεταδόσεις. Η τεχνική αξιοποιεί εκτίμηση Bayes και εκτίμηση ακολουθίας μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Sequence Estimation – MLSE) για να εκτιμήσει και προβλέψει το μέσο εύρος ζώνης TI από το ONT προς το OLT και μηχανισμούς πρόβλεψης στο OLT για να προβλέψει και καταλείπει εύρος ζώνης, μέσω μηκών κύματος, προς κάθε ONT. Τέλος, μεταβάλλει δυναμικά τον αριθμό των ενεργών μηκών κύματος στο δίκτυο, ώστε να καταστεί λιγότερο πιθανή η συμφόρηση. Η τεχνική είναι σε πραγματικό χρόνο από τη φύση της, υπό την έννοια ότι ένα πακέτο που φτάνει στο ONT/WAP για μετάδοση προς το OLT, λαμβάνει εύρος ζώνης από το OLT στον ίδιο κύκλο μετάδοσης, ο οποίος ορίζεται ως η διάρκεια του χρόνου μεταξύ διαδοχικών μεταδόσεων από το ONT/WAP. Το OLT χρησιμοποιεί πληροφορίες που έχει συλλέξει από προηγούμενους κύκλους, όπως οι χρόνοι μεταξύ

αφίξεων των πακέτων TI, που ακολουθούν την κατανομή Poisson, ή παραμέτρους θέσης της κίνησης σε ριπές, ώστε να προβλέψει την κίνηση πακέτων που θα συγκεντρωθεί, άρα το απαραίτητο εύρος ζώνης σε αυτόν τον κύκλο. Το πακέτο περιμένει κατά μέσο όρο μισό κύκλο μετάδοσης, πριν του αποδοθεί το εύρος ζώνης που χρειάζεται, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο ταχύτατη (E.Wong, 2016).

5 Μοντελοποίηση EPON

5.1 Εισαγωγή

Ο πειραματισμός στα δίκτυα, είναι ο πιο ρεαλιστικός τρόπος προσέγγιση αλλά επίσης και ο πιο απαγορευτικός λόγω χρόνου και κόστους καθώς οι ερευνητές δεν μπορούν να δοκιμάσουν το δίκτυο με πραγματικές συσκευές και να αλλάξουν το σχεδιασμό του με στόχο την βελτιστοποίηση. Τα εργαλεία μοντελοποίησης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή βοηθάνε στη σχεδίαση του οπτικού δικτύου για δοκιμή και βελτιστοποίηση πριν από την εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο. Η μοντελοποίηση είναι μια σημαντική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της ορθότητας ενός δικτύου κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του, παρέχοντας τις απαραίτητες εγγυήσεις για την ορθότητά του αλλά και μειώνοντας το κόστος της έρευνας. Δεδομένου ενός μοντέλου δικτύου και μια ιδιότητα που το σύστημα πρέπει να ικανοποιεί σε κάποια χρονική στιγμή, το μοντέλο ελέγχου ρωτά αν το δίκτυο ικανοποιεί τη συγκεκριμένη ιδιότητα. Η εξερεύνηση του χώρου καταστάσεων του μοντέλου δίνει στους ερευνητές το πλεονέκτημα της επαλήθευσης των λύσεων που προτείνουν κάτω από μια ποικιλία παραμέτρων πολύ νωρίτερα από την προσομοίωση ή τον πειραματισμό.

Το PRISM λαμβάνει ως εισαγωγή μια περιγραφή ενός συστήματος, κατασκευάζει πρώτα το μοντέλο από αυτήν την περιγραφή και υπολογίζει το σύνολο καταστάσεων. Στη συνέχεια, το εργαλείο εκτελεί τον έλεγχο του μοντέλου για τον προσδιορισμό των καταστάσεων του συστήματος που ικανοποιούν κάθε προδιαγραφή.

Το μοντέλο το οποίο μελετάτε στην παρούσα διπλωματική, είναι ένα παθητικό οπτικό δίκτυο Ethernet (EPON), αποτελούμενο από ένα τερματικό OLT με τέσσερις ONUs το οποίο βασίζεται στο μοντέλο ενός OLT με ένα ONU των (S. Petridou, 2017).

Επιλέχθηκε η μοντελοποίηση του EPON γιατί είναι η πιο ελκυστική τεχνολογία μεταξύ των PON τεχνολογιών λόγω της οικειότητας με το Ethernet, αφού το EPON είναι η υλοποίηση του Ethernet στο οπτικό παθητικό δίκτυο και όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2.6, οι διαχειριστές του δικτύου μπορούν να εκμεταλλευτούν τα υπάρχοντα,

και γνώριμα σε αυτούς, εργαλεία διαχείρισης και ανάλυσης του δικτύου, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για την παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός απλού δικτύου Ethernet.

Για την ONU υπάρχουν τρεις καταστάσεις λειτουργίας: η ενεργή κατάσταση (active mode) με κατανάλωση ενέργειας 3,85W, η κατάσταση ακρόασης (listen mode) με κατανάλωση ενέργειας 1,28W και η κατάσταση ύπνου (sleep mode) με κατανάλωση ενέργειας 0,75W. Όταν μία ONU λαμβάνει δεδομένα από το OLT είναι σε active mode, όταν δεν λαμβάνει δεδομένα, μπαίνει listen mode για χρονικό διάστημα x και μετά μεταβαίνει σε sleep mode για χρονικό διάστημα y . Στην περίπτωση μετάδοσης δεδομένων προς την ONU όσο αυτή είναι σε listen mode δηλαδή κατά το διάστημα x , αυτή μπορεί να διακόψει επιστρέφοντας στην active mode. Αν όμως η μετάδοση γίνει όταν είναι σε sleep mode τότε θα πρέπει να αναμένει όσο διαρκεί το διάστημα y , στην φάση αυτή, τα πακέτα προς μετάδοση, αποθηκεύονται προσωρινά στην OLT που στο μοντέλο μας είναι 9 MB. Μία ONU μπορεί να είναι μόνο σε ένα από τις παραπάνω καταστάσεις. Μεγάλη διάρκεια sleep mode, επιτυγχάνει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας με επιπτώσεις όμως στην ποιότητα υπηρεσιών λόγω της μεγαλύτερης καθυστέρησης (S. Petridou, 2017).

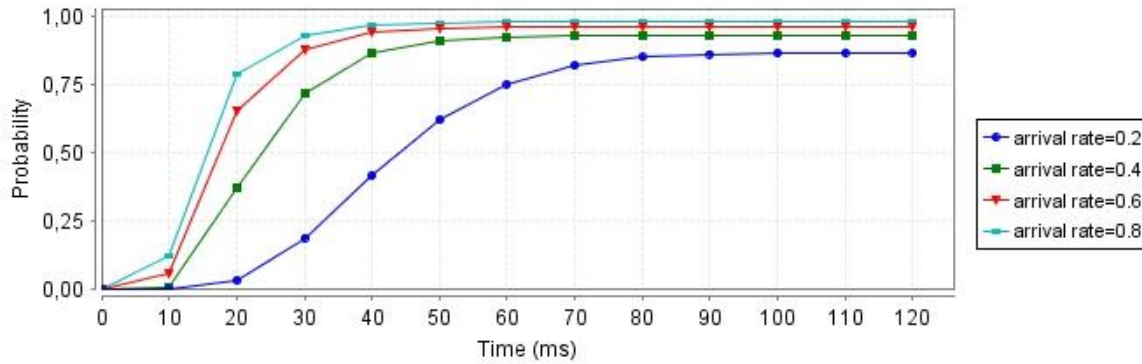
5.2 Ερωτήματα

Το μοντέλο αρχικά, κάνει μετάδοση πακέτων από την OLT προς μία ONU, για να απαντήσει στο ερώτημα ποια είναι η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς: 1000 πακέτα, με ρυθμό άφιξης από $\lambda=0,2 \cdot 10^2$ πακέτα έως και $\lambda=0,8 \cdot 10^2$ πακέτα με βήμα 0,2. Ο χώρος καταστάσεων του παραπάνω ερωτήματος παρουσιάζεται στον πίνακα 6.

ΧΩΡΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	
Αριθμός Πακέτων	1000
Καταστάσεις	215
Αρχική κατάσταση	1
Μεταβάσεις	399

Πίνακας 6: Χώρος καταστάσεων μοντέλου με μία ONU.

Τα αποτελέσματα του ερωτήματος που τέθηκε εμφανίζονται στον γράφο της εικόνα 21.



Εικόνα 21: Η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς σε 1 ONU 1000 πακέτα με διαφορετικούς ρυθμούς άφιξης.

Η πιθανότητα τα 1000 πακέτα να μεταδοθούν επιτυχώς με μία ONU όπως φαίνεται και στον πίνακα 7, παρουσιάζει διαφορές ιδίως για τον πολύ μικρό ρυθμό μετάδοσης απόλυτα λογικό και αναμενόμενο γιατί μικρός ρυθμός άφιξης σημαίνει και μετάδοση λιγότερων πακέτων προς την μία ONU μειώνοντας έτσι και την πιθανότητα επιτυχίας. Αντίθετα μεγάλος ρυθμός άφιξης σημαίνει μετάδοση περισσότερων πακέτων με αποτέλεσμα και μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης των 1000 πακέτων.

1 ONU		
λ	Πιθανότητα	Χρόνος
0,2*10 ² πακέτα	0,86	110 ms
0,4*10 ² πακέτα	0,93	70 ms
0,6*10 ² πακέτα	0,96	60 ms
0,8*10 ² πακέτα	0,98	60 ms

Πίνακας 7: Πίνακας τιμών για το ερώτημα ποια η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς σε 1 ONU 1000 πακέτα με μεταβαλλόμενο ρυθμό άφιξης.

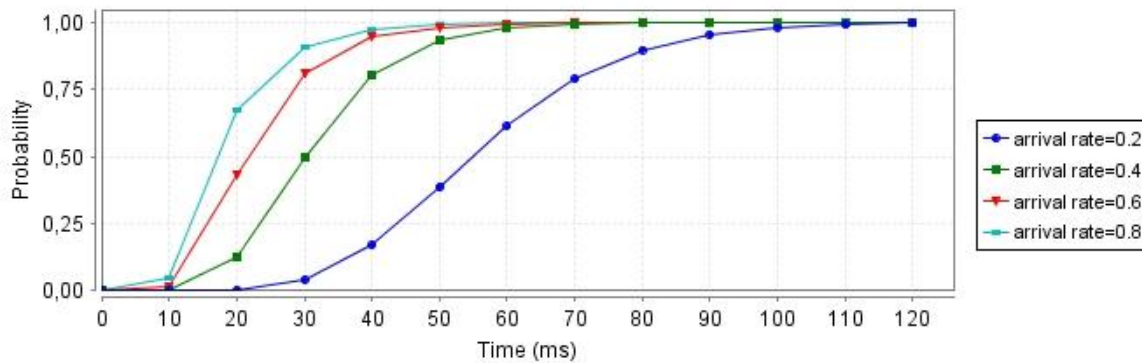
Στην συνέχεια το μοντέλο κάνει μετάδοση πακέτων από την OLT προς τέσσερις ONUs, για να απαντήσει στο ερώτημα ποια είναι η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς: 1000 πακέτα με ρυθμό άφιξης από $\lambda=0,2 \cdot 10^2$ πακέτα έως και $\lambda=0,8 \cdot 10^2$ πακέτα με βήμα 0,2. Ο χώρος καταστάσεων του παραπάνω ερωτήματος παρουσιάζεται στον πίνακα 8 και είναι φανερό ότι υπάρχει μεγάλη αύξηση στον χώρο των

καταστάσεων αλλά και της πολυπλοκότητας του μοντέλου συγκριτικά με το προηγούμενο μοντέλο.

ΧΩΡΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	
Αριθμός Πακέτων	1000
Καταστάσεις	39.745
Αρχική κατάσταση	1
Μεταβάσεις	178.300

Πίνακας 8: Χώρος καταστάσεων μοντέλου με τέσσερις ONUs.

Τα αποτελέσματα του ερωτήματος εμφανίζονται στον γράφο της εικόνα 22.



Εικόνα 22: Η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς σε 4 ONUs 1000 πακέτα με μεταβαλλόμενο ρυθμό άφιξη.

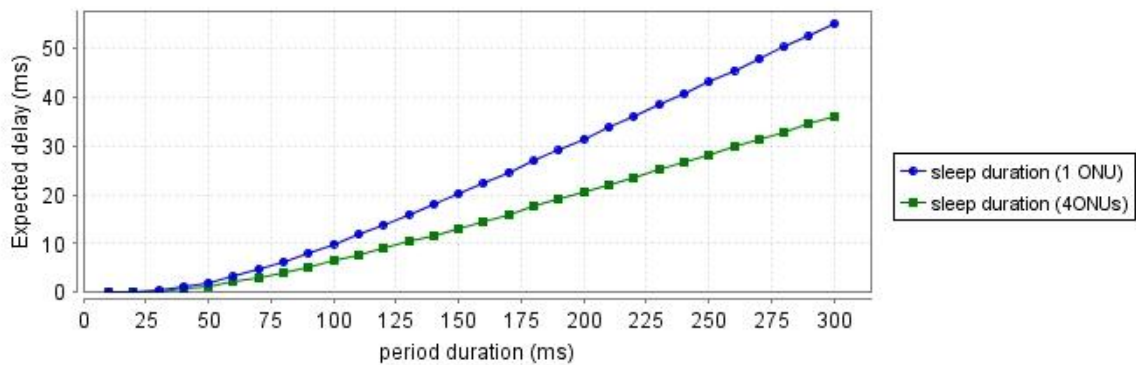
Σε αυτή την περίπτωση η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης του ίδιου αριθμού πακέτων με πριν είναι 0,99 για όλους τους ρυθμούς άφιξης όπως φαίνεται και στον πίνακα 9.

4 ONUs		
λ	Πιθανότητα	Χρόνος
0,2*10 ² πακέτα	0.99	110 ms
0,4*10 ² πακέτα	0.99	70 ms
0,6*10 ² πακέτα	0.99	60 ms
0,8*10 ² πακέτα	0.99	50 ms

Πίνακας 9: Πίνακας τιμών για το ερώτημα ποια η πιθανότητα η OLT να μεταδώσει επιτυχώς σε 4 ONU 1000 πακέτα με μεταβαλλόμενο ρυθμό άφιξης.

Αποτέλεσμα λογικό καθώς το μοντέλο έχει πολύ μεγάλες πιθανότητες να μεταδώσει με επιτυχία τα πακέτα, αφού οι τέσσερις ONUs, είναι σε active mode περισσότερο.

Σημαντικός παράγοντας για το μοντέλο που εξετάζουμε είναι το κατά πόσο, η διάρκεια του sleep mode, επηρεάζει την καθυστέρηση (delay). Στο ερώτημα ποιά η αναμενόμενη καθυστέρηση σε σχέση με την διάρκεια του sleep mode για μοντέλο με μία αλλά και τέσσερις ONU που μεταδίδει 1000 πακέτα με ρυθμό άφιξης $\lambda=0.8 \cdot 10^2$ πακέτα και διάρκεια sleep mode από 0 έως και 300 ms τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον γράφο της εικόνας 23.



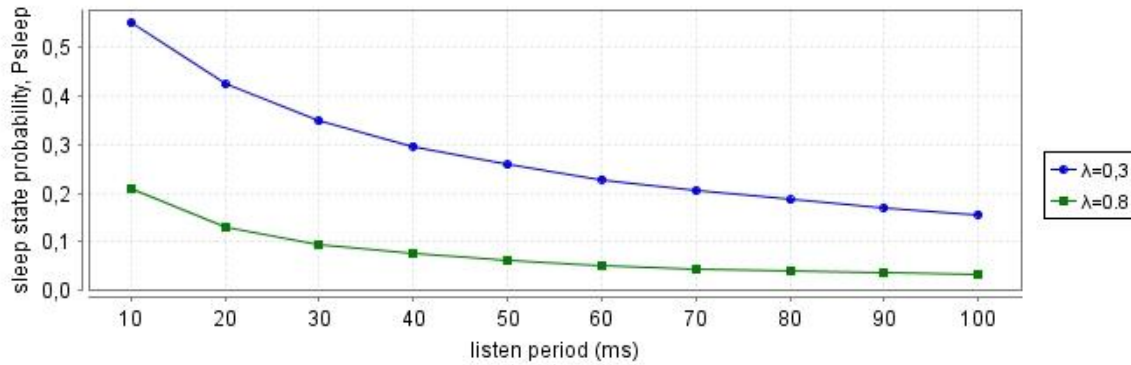
Εικόνα 23: Η αναμενόμενη καθυστέρηση σε σχέση με την διάρκεια του sleep mode.

Βλέποντας τον πίνακα 10, διαπιστώνουμε πως το μοντέλο με τις 4 ONUs για την ίδια περίοδο που διαρκεί η sleep mode, έχει μικρότερο delay συγκριτικά με αυτό με την μία ONU. Αναμενόμενο γιατί στο δεύτερο μοντέλο οι ONUs είναι περισσότερες και λαμβάνουν γρηγορότερα τα πακέτα σε αντίθεση με το μοντέλο με την μια ONU.

Διάρκεια sleep mode	Αναμενόμενη καθυστέρηση 1 ONU	Αναμενόμενη καθυστέρηση 4 ONUs
10 ms	0 ms	0 ms
60 ms	3,2 ms	2,1 ms
120 ms	13,9 ms	9,0 ms
180 ms	26,9 ms	17,5 ms
240 ms	40,7 ms	26,6 ms
300 ms	55,0 ms	36,0 ms

Πίνακας 10: Η αναμενόμενη καθυστέρηση για μοντέλο με μία και τέσσερις ONU.

Στην εικόνα 24, βλέπουμε ποια είναι η πιθανότητα του μοντέλου με τέσσερις ONUs να βρεθεί σε sleep mode, όσο αυτό είναι σε listen mode, με μεταβαλλόμενη την διάρκεια του listen mode από 10 ms έως και 100 ms, με δύο διαφορετικούς ρυθμούς άφιξης $\lambda=0.3 \cdot 10^2$ πακέτα και $\lambda=0.8 \cdot 10^2$ πακέτα.



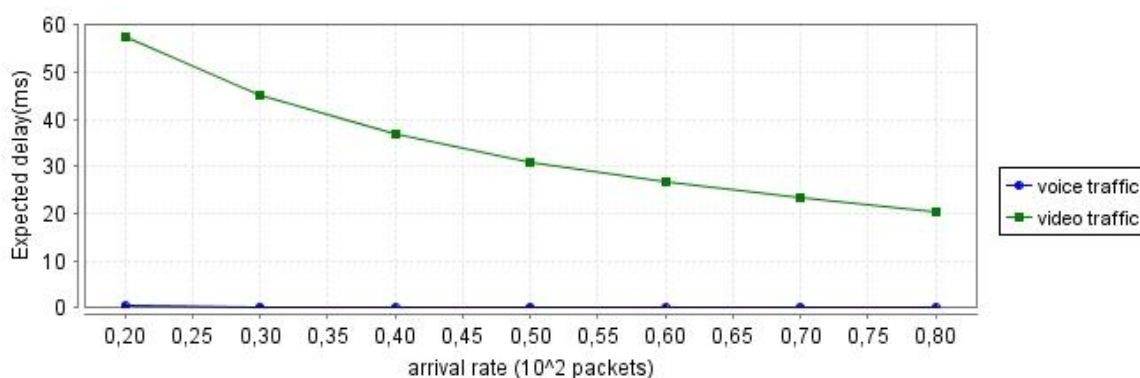
Εικόνα 24: Η πιθανότητα μία ONU να βρεθεί σε sleep mode όσο είναι σε listen mode.

Τα αποτελέσματα του πίνακα 11 δείχνουν ότι για μεγάλους ρυθμούς άφιξης, η πιθανότητα μίας ONU να βρεθεί σε sleep mode είναι μικρή, γιατί μεγάλος ρυθμός άφιξης σημαίνει μεγάλος αριθμός πακέτων που λαμβάνει οι ONUs με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο χρόνο σε active mode. Αντίθετα για μικρό ρυθμό άφιξης, η πιθανότητα να βρεθούν οι ONUs σε sleep mode είναι μεγάλη αφού μικρός ρυθμός άφιξης συνεπάγεται και μικρός αριθμός πακέτων που λαμβάνει μια ONU με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο χρόνο σε active mode και περισσότερο χρόνο σε sleep mode.

Διάρκεια listen mode	πιθανότητα για $\lambda=0,3 \cdot 10^2$ packets	πιθανότητα για $\lambda=0,8 \cdot 10^2$ packets
10 ms	0,54	0,20
50 ms	0,25	0,06
100 ms	0,15	0,03
150 ms	0,11	0,02
200 ms	0,08	0,01
250 ms	0,07	0,01
300 ms	0,06	0,01

Πίνακας 11: Η πιθανότητα μία ONU να βρεθεί σε sleep mode όσο είναι σε listen mode σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Όπως γνωρίζουμε, τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON) μπορούν να υποστηρίξουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως, υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο. Αυτό επιτυγχάνεται κατηγοριοποιώντας τα πακέτα ανάλογα με τον τύπο τους π.χ. φωνής, δεδομένων, βιντεοκλήσεων, βίντεο, διαμοιρασμού εγγράφων, σε κατηγορίες με στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση δίνοντάς σε αυτά διαφορετική προτεραιότητα. Τα πακέτα φωνής τυγχάνουν άμεσης προτεραιότητας σύμφωνα με την κατηγορία εξυπηρέτησης (CoS - Class of Service) και το αποδεκτό delay είναι στα 10 ms, με αντίστοιχο χρόνο για την κίνηση βίντεο στα 100 ms (L. Chiaraviglio, 2015), (R. K. Mok, 2011). Στην εικόνα 25, είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πακέτων φωνής και βίντεο που δείχνου κατά πόσο μπορεί να ικανοποιηθεί το CoS.



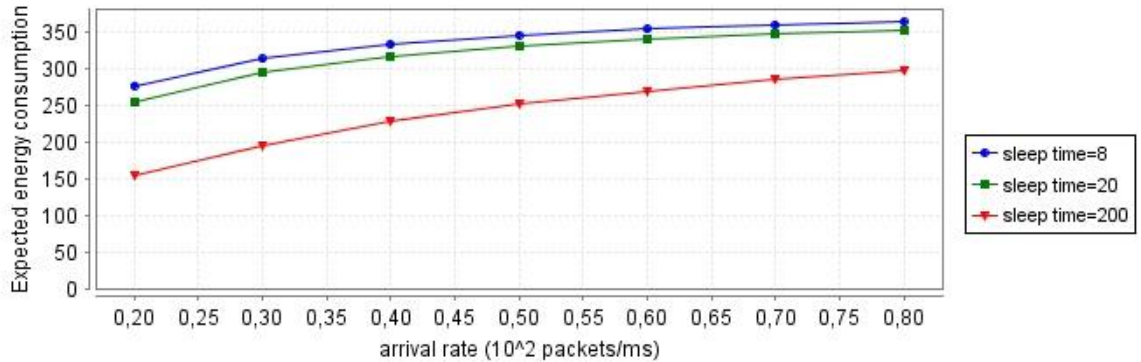
Εικόνα 25: Η αποδεκτή καθυστέρηση και το class of Service.

Τα παρακάτω αποτελέσματα στον πίνακα 12, δείχνουν ότι μπορεί να γίνει μετάδοση των πακέτων φωνής και βίντεο με αποδεκτό delay, ικανοποιώντας το CoS.

Ρυθμός άφιξης (10 ² packets)	Καθυστέρηση Voice traffic	Καθυστέρηση Video traffic
0.2	0.38 ms	57.4 ms
0.3	0.15 ms	45.0 ms
0.4	0.08 ms	36.8 ms
0.4	0.06 ms	31.0 ms
0.6	0.04 ms	26.7 ms
0.7	0.03 ms	23.2 ms
0.8	0.02 ms	20.5 ms

Πίνακας 12: Αναμενόμενη καθυστέρηση στην μετάδοση πακέτων φωνής και βίντεο.

Στο ερώτημα για την αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας του μοντέλου με τέσσερις ONUs, για μετάδοση 1000 πακέτων με ρυθμό άφιξης λ από $0.2 \cdot 10^2$ πακέτα έως και $0.8 \cdot 10^2$ πακέτα και για sleep mode: 8ms ,20ms ,200ms τα αποτελέσματα του γράφου της εικόνας 26 εμφανίζονται στον πίνακα 13.



Εικόνα 26: Η αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τον ρυθμό άφιξης και το sleep mode.

Ρυθμός άφιξης (10^2 packets)	Διάρκεια sleep mode 8 ms	Διάρκεια sleep mode 20 ms	Διάρκεια sleep mode 200 ms
0,2	278 mw	255 mw	156 mw
0,3	314 mw	295 mw	197 mw
0,4	334 mw	317 mw	228 mw
0,5	346 mw	331 mw	252 mw
0,6	355 mw	341 mw	270 mw
0,7	360 mw	348 mw	285 mw
0,8	365 mw	353 mw	297 mw

Πίνακας 13: Αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας

Μικρό sleep mode ισοδυναμεί με αυξημένη κατανάλωση ενέργεια γιατί οι ONUs βρίσκονται περισσότερο χρόνο σε λειτουργία, ενώ μεγάλο sleep mode ισοδυναμεί με μειωμένη κατανάλωση ενέργεια.

6 Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες

6.1 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία, παρουσιάστηκαν διάφορες αρχιτεκτονικές παθητικών οπτικών δικτύων αλλά και τύποι οπτικών ινών, αφού η ανάγκη για περισσότερο εύρος καθιστά αναγκαία την αντικατάσταση των δικτύων χαλκού από αυτό των οπτικών ινών.

Έγινε η υλοποίηση ενός μοντέλου EPON τεχνολογίας πιο οικείας στους διαχειριστές λόγω της ομοιότητας του με το Ethernet, με την χρήση του ελεύθερου λογισμικού Prism Model Checker, πακέτα από ένα OLT μεταδίδονται προς τέσσερεις ONUs. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η πιθανότητα επιτυχούς αποστολής πακέτων από την OLT είναι μεγάλη. Η μεγάλη διάρκεια sleep mode βελτιώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας αλλά αυξάνει την καθυστέρηση (delay). Ο μεγάλος ρυθμός άφιξης μειώνει την πιθανότητα να πέσει σε sleep mode η ONU καθώς αυτή είναι συνεχώς σε λειτουργία. Το μοντέλο έχει καθυστέρηση η οποία ικανοποιεί το Class of Service και κατά συνέπεια το Quality of Service.

6.2 Μελλοντικές εργασίες

Μία πρόταση για μελλοντική μελέτη είναι η υλοποίηση του μοντέλου NG-PON2 με το Prism Model Checker, λαμβάνοντας υπόψη περισσότερες παραμέτρους.

Βιβλιογραφία

- Nikos Anerousis et al. (2013). *Smarter Networks with Passive Optical LANs : Innovating Enterprise Infrastructure and Lowering TCO*. IBM.
- A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos and M.Frodigh. (2016). *Realizing the Tactile Internet: Haptic Communications over Next Generation 5G Cellular Networks*. IEEE Wireless Communications.
- D. P. Van, L. V. (2014). Experimental evaluation of a sleep-aware dynamic bandwidth allocation in a multi ONU 10G-EPON testbed. *Optical Switching and Networking, vol. 14* .
- E.Wong, M. D. (2016). *Predictive Resource Allocation for Tactile Internet Capable Passive Optical LANs*.
- Eckehard Steinbach, Sandra Hirche, Marc Ernst, Fernanda Brandi, Rahul Chaudhari, Julius Kammerl, Iason Vittorias. (2011). *Haptic Communications*. IEEE.
- Fiammengo, M. (2011). *Sleep mode scheduling technique for energy saving in TDM-PONs*. M.S. thesis, KTH, School of Information and Communication.
- G.P.Agrawal. (2010). *Fiber Optic Communication Systems*.
- H.Yang, W. W. (2013). *ONU migration in dynamic Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON)*.
- IEEE 802.3. (2018). *IEEE Standard for Ethernet 802.3*. IEEE 802.3.
- IETF . (2001). *Requirements for robust IP/UDP/RTP header compression*. IETF.
- IETF. (2003). *Enhanced Compressed RTP (CRTP) for Links with High Delay, Packet Loss and Reordering*. Packet Loss and Reordering.
- ITU-T G. Sup45. (2009). *GPON power conservation*. ITU-T.
- ITU-T. (2016). *G.7041 : Generic framing procedure*. ITU-T.
- ITU-T G.983.1. (2005). *Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)*. ITU-T G.983.1.
- ITU-T G.987. (2012). *G.987 : 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms*. ITU-T.
- ITU-T Recommendation G.652. (2016). *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. ITU-T Recommendation G.652.

- ITU-T Recommendation G.984.1. (2008). *Gigabit-capable passive optical networks (GPON) : General characteristics*. ITU-T Recommendation G.984.1.
- ITU-T Recommendation G.984.2. (2003). *Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification*. ITU-T Recommendation G.984.2.
- ITU-T Recommendation G.984.3. (2010). *Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Transmission convergence layer specification*. ITU-T Recommendation G.984.3.
- ITU-T Recommendation G989.1. (2013). *40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*. ITU-T Recommendation G989.1.
- ITU-T Technology Watch Report. (2014). *The Tactile Internet*. ITU-T.
- L. Chiaraviglio, P. W. (2015). *Is green networking beneficial in terms of device lifetime?*. IEEE.
- Loni Le Van-Etter. (2017). *Design and Installation, Challenges and Solutions for Passive Optical LANs*. 3M Communication Markets Division.
- M. Silenko, A. M. (2016). *THE CREATION OF THE TIME AND WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXED (TWDM) MODEL FOR THE NEXT GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORK (NG-PON2)*.
- Mukherjee, B. (2006). *Optical WDM Networks*.
- Nokia. (2016). *Passive optical LAN explained : Understanding the technology for a more advanced enterprise network*. Nokia.
- P. G. Otanez, J. R. (2002). Using deadbands to reduce communication in networked control systems. *Proc. of the American Control Conference , vol. 4*.
- P. Hinterseer, J. K. (2007). *A Novel Signal Reconstruction Algorithm for Perception Based Data Reduction in Haptic Signal Communication*.
- R. K. Mok, E. W. (2011). *Measuring the quality of experience of HTTP video streaming*. IFIP/IEEE.
- S. Petridou, S. B. (2017). *Formal Methods for Energy-Efficient EPONs*. IEEE.
- Sean McCloud. (2017). *Passive Optical LAN Solutions (POLS) : Theory, Design, and Installation Considerations*. Leviton Network Solutions.
- TIA-568-C.0. (2009). *Generic Telecommunications Cabling for Customer Premises*. TIA-568-C.0.
- TIA-568-C.3. (2008). *Optical Fiber Cabling Components Standard*. TIA-568-C.3.

TIA-569-C. (2012). *Telecommunications Pathways and Spaces*. TIA-569-C.

Tucker, R. S. (2011). *Green optical communications Part II: Energy limitations in networks*. IEEE.

Y.Luo, X. F. (2013). Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2). *Journal of Lightwave Technology* (Vol. 31).