



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΥΠΝΟΥ ΣΤΑ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ
ΔΙΚΤΥΑ ΤΥΠΟΥ ΧG-PON ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΚΟΥΖΟΥΓΛΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Παντελής Αγγελίδης, Αναπληρωτής
Καθηγητής

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Παναγιώτης Σαρηγιαννίδης, Π.Δ.
407/80

ΚΟΖΑΝΗ (ΜΑΡΤΙΟΣ, 2014)

Περίληψη

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη, το βιβλιογραφικό και το ερευνητικό μέρος. Στο βιβλιογραφικό μέρος παρουσιάζονται διάφορες τεχνολογίες οπτικών δικτύων, καθώς και λύσεις για τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται σε αυτά. Ειδικότερα, η εργασία επικεντρώνεται στα παθητικά οπτικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα στα 10 Gigabit Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (γνωστά και ως XG-PON). Στο ερευνητικό μέρος, η εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών σχημάτων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης περιόδου ύπνου των οπτικών μονάδων δικτύου (ONUs) στα δίκτυα τύπου XG-PON. Τα σχήματα αυτά χρησιμοποιούν με αποδοτικό τρόπο την αλληλουχία καταστάσεων ύπνωσης, πλήρους ή μερικής, και κανονικής, όταν υπάρχει έλλειψη δικτυακής κίνησης ή υπολειτουργία των συσκευών, προσπαθώντας να βρουν βέλτιστες περιόδους ύπνου, έτσι ώστε να μειώσουν όσο το δυνατόν περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας των οπτικών μονάδων δικτύου, χωρίς παράλληλα όμως να αυξηθεί η μέση καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο. Το περιβάλλον μελέτης αναπαριστάει ένα δίκτυο τύπου XG-PON με μεταβαλλόμενο αριθμό υποστηριζόμενων ONUs. Οι στόχοι της εργασίας αυτής συνοψίζονται στα εξής: i) Μελέτη της βιβλιογραφίας στο επιστημονικό πεδίο της μείωσης ενέργειας στα παθητικά οπτικά δίκτυα, ii) Ανάπτυξη νέων σχημάτων για τον καθορισμό της βέλτιστης διάρκειας ύπνου στα παθητικά οπτικά δίκτυα τύπου XG-PON, iii) Αποτίμηση των προτεινόμενων σχημάτων με προσομοίωση και iv) Συγκριτικά συμπεράσματα και προτάσεις.

Η αποτίμηση της αναλυτικής προσέγγισης επιτεύχθηκε μέσω ενός εργαλείου προσομοίωσης που κατασκευάστηκε από την αρχή σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού. Τα συγκριτικά συμπεράσματα προέκυψαν μέσα από γραφικές παραστάσεις απόδοσης με βάση τα αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης. Οι μετρήσεις απόδοσης περιλαμβάνουν μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs, μέση αναμονή πακέτου και ρυθμαπόδοση του δικτύου.

Τα περιεχόμενα της εργασίας αυτής είναι οργανωμένα ως εξής. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών και εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους οδηγούμαστε στην οπτική ίνα. Το δεύτερο κεφάλαιο κάνει μια γενική αναφορά στα οπτικά δίκτυα, εστιάζοντας στα οπτικά δίκτυα πρόσβασης. Το τρίτο κεφάλαιο κάνει αναφορά στις υπάρχουσες τεχνολογίες παθητικών οπτικών δικτύων πρόσβασης, ενώ το τέταρτο κεφάλαιο εμβαθύνει στα δίκτυα τύπου XG-PON. Το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζει κάποιες μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας στα οπτικά δίκτυα γενικά, καθώς και πιο ειδικά στα παθητικά οπτικά δίκτυα και στα XG-PON δίκτυα. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η ανάπτυξη και η αποτίμηση με προσομοίωση, καθώς και η μέτρηση της απόδοσης των προτεινόμενων σχημάτων για τον καθορισμό της βέλτιστης διάρκειας ύπνου στα δίκτυα XG-PON. Τέλος, το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συγκριτικά συμπεράσματα.

Determination of the Optimal Sleep Period in XG-PON Passive Optical Networks Using Stochastic Processes

Abstract

The present Thesis is divided into two parts; the literature and the research part. In the literature part various optical network technologies, as well as solutions are presented towards the reduction of the energy consumed. In particular, the work focuses on the passive optical networks and more specifically in 10 Gigabit capable Passive Optical Networks (also known as XG-PON). In the research part, the work presents the development of energy-efficient schemes for determining the optimal sleep period of optical network units (ONUs) in XG-PON networks. These schemes use in an efficient way the sequence of sleep states, full or partial, and normal, when there is a lack of network traffic or underactive of the devices, trying to find the optimal sleep period, in order to reduce as much as possible the energy consumption of the ONUs, without harmfully increasing the mean packet delay in the network. The network under study represents a XG-PON with variable number of supported ONUs. The objectives of this work are summarized as follows: i) Literature study of energy reduction schemes in passive optical networks, ii) Development of novel schemes for determining the optimal sleep period in XG-PON networks, iii) Evaluation of the proposed schemes by means of simulation and iv) Presentation of comparative remarks and suggestions.

In order to evaluate the studied network a simulation tool was implemented, which was designed from scratch in the MATLAB programming language, using event-driven programming. Multiple simulation results have been conducted in order to collect and plot the obtained evaluation results. The performance metrics include mean power consumption of ONUs, mean packet delay and network throughput.

The containment of this work is organized as follows. Chapter 1 makes an introduction to telecommunication networks and explains the reasons which lead to the optical fiber. Chapter 2 includes a general reference to optical networks, focusing on optical access networks. Chapter 3 presents an overview of existing passive optical network technologies, while Chapter 4 deepens in XG-PON networks. Chapter 5 presents an overview of some energy saving methods in optical networks in general and more specifically in passive optical networks and XG-PON networks. Chapter 6 describes the proposed schemes for determining the optimal sleep period in XG-PON networks and evaluates the performance of these in comparison with the use of fixed sleep periods with respect to several performance metrics. Finally, Chapter 7 includes the comparative conclusions.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς αλληλεπιδράσεων με διάφορα άτομα, καθένα από τα οποία έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξή της. Αξίζει λοιπόν να αφιερώσω την παρούσα σελίδα για να ευχαριστήσω ειλικρινά τα άτομα αυτά για τη βοήθεια που μου παρείχαν.

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και πιο συγκεκριμένα κυρίως τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Παντελή Αγγελίδη για τη βοήθεια και την εμπιστοσύνη του, καθώς επίσης και τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και που μου παρείχε όλα τα εφόδια και τη βοήθεια, ώστε να καταλάβω κάποια σημαντικά πράγματα σχετικά με το θέμα της διπλωματικής μου εργασίας και έτσι τελικώς να τη φέρω εις πέρας.

Επίσης, ευχαριστώ όλους τους συναδέλφους και φίλους, που με τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου με βοήθησαν να φτάσω στην ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας και γενικά στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ ανήκει στην οικογένεια μου, χωρίς την οικονομική και κυρίως ηθική υποστήριξη που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα δε θα κατάφερνα να φτάσω μέχρι αυτό το σημείο.

Π.Δ.Μ. ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
Αριθ. Εισαγ.: 3474
Ημερομηνία: 27-3-2014

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα.....	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών.....	11
1.1 Εισαγωγή	11
1.2 Δομικά στοιχεία δικτύου επικοινωνίας.....	13
1.3 Τοπολογίες δικτύου	14
1.4 Κατηγοριοποίηση δικτύων επικοινωνιών	15
1.4.1 Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τη γεωγραφική κάλυψη του δικτύου.....	15
1.4.2 Κατηγοριοποίηση ανάλογα με το φυσικό μέσο διασύνδεσης.....	16
Κεφάλαιο 2: Τηλεπικοινωνιακά οπτικά δίκτυα	23
2.1 Τομείς τηλεπικοινωνιακού οπτικού δικτύου.....	23
2.1.1 Δίκτυο κορμού	24
2.1.2 Μητροπολιτικό δίκτυο	25
2.1.3 Δίκτυο πρόσβασης.....	27
2.2 Κέντρα δεδομένων.....	28
2.3 Περιγραφή των τεχνολογιών FTTx.....	29
2.3.1 FTTC	29
2.3.2 FTTB	29
2.3.3 FTTH	30
2.4 Τοπολογίες FTTH δικτύων.....	31
2.4.1 Αρχιτεκτονική Home Run	31
2.4.2 Δίκτυο ενεργού αστέρα	33
2.4.3 Δίκτυο παθητικού αστέρα.....	34
Κεφάλαιο 3: Παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης.....	35
3.1 Αρχιτεκτονική και δομή του παθητικού οπτικού δικτύου (PON).....	35
3.2 Ιστορία των παθητικών οπτικών δικτύων.....	37
3.3 Τεχνολογίες διαμοιρασμού καναλιών στα PONs.....	38
3.3.1 TDMA τεχνολογία στα PONs	38
3.3.2 WDMA τεχνολογία στα PONs	40
3.3.3 OCDMA τεχνολογία στα PONs	41
3.4 Τεχνολογίες παθητικών οπτικών δικτύων	41

3.4.1 APON	41
3.4.2 EPON	45
3.4.3 GPON	47
3.5 Μετάβαση σε παθητικά οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς (NG-PON).....	48
3.5.1 Εισαγωγή.....	48
3.5.2 Πεδίο εφαρμογής της επόμενης γενιάς συστημάτων PON	48
3.5.3 Υποψήφια συστήματα και επιλογή	50
3.5.4 Απαιτήσεις, παλαιές και καινούριες	51
Κεφάλαιο 4: Παθητικά οπτικά δίκτυα τύπου XG-PON	52
4.1 Εισαγωγή	52
4.2 Φυσικό επίπεδο (PMD).....	53
4.2.1 Σχέδιο μήκους κύματος	53
4.2.2 Ρυθμοί γραμμής, κώδικες και συνύπαρξη	55
4.2.3 Προϋπολογισμοί της ενέργειας	56
4.3 Επίπεδο πρωτοκόλλου	58
4.3.1 Δομή επιπέδου XGTC.....	58
4.3.2 Διαχείριση ενός συστήματος XG-PON	62
4.3.3 Αρχιτεκτονική πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου.....	63
4.3.4 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο (Media Access Control ή MAC).....	66
4.3.5 Διαχωρισμός DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) στο PON.....	67
4.3.6 XGTC πλαισίωση downstream κίνησης	69
4.3.7 XGTC πλαισίωση upstream κίνησης.....	70
4.3.8 XGEM πλαισίωση	71
4.3.9 Υποεπίπεδο προσαρμογής PHY.....	73
4.3.10 Σχέσεις χρονισμού μεταξύ του OLT και της ONU	74
4.4 Επίπεδο διαχείρισης και υπηρεσιών	76
4.4.1 Γενική διεπαφή διαχείρισης και ελέγχου της ONU (OMCI).....	76
4.4.2 Broadband Forum TR-156/167	77
4.5 Συμπεράσματα	78
Κεφάλαιο 5: Τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας στα οπτικά δίκτυα	79
5.1 Εξοικονόμηση ενέργειας στα τηλεπικοινωνιακά οπτικά δίκτυα	79
5.1.1 Εισαγωγή.....	79
5.1.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο κορμού	82
5.1.3 Εξοικονόμηση ενέργειας στο μητροπολιτικό δίκτυο	88

5.1.4 Εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο πρόσβασης.....	88
5.1.5 Συμπεράσματα	91
5.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στα παθητικά οπτικά δίκτυα.....	92
5.2.1 Κατανάλωση ενέργειας στα PONs	92
5.2.2 Προσεγγίσεις για εξοικονόμηση ενέργειας στα PONs.....	93
5.2.3 Διαχείριση ενέργειας στα NG-PON.....	94
5.2.4 Τεχνικές ύπνου στα XG-PON.....	101
Κεφάλαιο 6: Προτεινόμενες τεχνικές καθορισμού βέλτιστης διάρκειας ύπνου για παθητικά οπτικά δίκτυα τύπου XG-PON	109
6.1 Εισαγωγή	109
6.2 Αριθμητικό παράδειγμα XG-PON	111
6.2.1 Γενικές πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του XG-PON.....	111
6.2.2 Αριθμητικό παράδειγμα.....	113
6.3 Ανάπτυξη σχημάτων καθορισμού βέλτιστης διάρκειας ύπνου.....	118
6.3.1 Περιγραφή εξεταζόμενων σχημάτων.....	118
6.3.2 Ανάπτυξη και βασικά σημεία του κώδικα της προσομοίωσης.....	125
6.4 Μετρήσεις απόδοσης και συγκριτικά αποτελέσματα	144
6.4.1 Πρώτο σενάριο – Μετρήσεις απόδοσης και συγκριτικά αποτελέσματα.....	146
6.4.2 Δεύτερο σενάριο – Μετρήσεις απόδοσης και συγκριτικά αποτελέσματα.....	151
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα	157
Βιβλιογραφία	161

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

Εισαγωγή στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών

1.1 Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό, διάφοροι τύποι δικτύων έχουν δημιουργηθεί και λειτουργήσει από τα παλιά χρόνια έως σήμερα. Τα δίκτυα αυτά έχουν ποικίλες εφαρμογές στην οικονομική και στην κοινωνική ζωή των λαών, όπως για παράδειγμα το ταχυδρομικό δίκτυο, το δίκτυο ύδρευσης, το δίκτυο ηλεκτρισμού, τα πάσης φύσεως δίκτυα μεταφοράς (οδικά, σιδηροδρομικά, ακτοπλοϊκά, αεροπορικά κτλ). Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η λέξη δίκτυο έχει μια πολύ γενικευμένη έννοια.

Τα δίκτυα επικοινωνίας ηλεκτρονικών υπολογιστών ανήκουν στη γενικότερη κατηγορία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων (telecommunication networks), δηλαδή σε εκείνα τα δίκτυα που επιτρέπουν στους χρήστες τους να μεταβιβάζουν ή να ανταλλάσσουν πληροφορίες, ενώ βρίσκονται σε απόσταση [1]. Πιο συγκεκριμένα, ο όρος «δίκτυο Η/Υ» απευθύνεται σε μία ομάδα από δυο ή περισσότερους υπολογιστές, συνδεδεμένους μεταξύ τους με ένα κοινό μέσο μεταφοράς δεδομένων, οι οποίοι κάνουν χρήση της ίδιας δικτυακής τεχνολογίας με στόχο να μεταφέρουν δεδομένα. Αν και αυτή είναι η πιο απλή μορφή δικτύου Η/Υ, στη πραγματικότητα, τα καθημερινά δίκτυα που συναντιούνται αποτελούνται από περισσότερους υπολογιστές καθώς και άλλες πολύπλοκες δικτυακές συσκευές, και εκτείνονται από αποστάσεις μερικών μέτρων μέχρι πολλά χιλιόμετρα. Το σύνολο των υπολογιστών, των δικτυακών συσκευών, καθώς και των μέσων μετάδοσης (χάλκινοι αγωγοί, οπτικές ίνες, αέρας) αποτελούν ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Τέτοιες δικτυακές συσκευές μπορεί να είναι διακομιστές (servers), δρομολογητές (routers), μεταγωγείς (switches), επαναληπτές (repeaters), πομποί (transmitters) και δέκτες (receivers), (υπάρχουν και οι πλήμνες (hubs) αλλά πλέον είναι ξεπερασμένες) [2].

Τα πλέον γνωστά εκτεταμένα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι το τηλεφωνικό δίκτυο και τα δίκτυα της τηλεόρασης. Να σημειωθεί ότι το κοινό χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι ότι έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την ικανοποίηση μιας συγκεκριμένης ανάγκης, δηλαδή για τη μετάδοση φωνής στη πρώτη περίπτωση και κινούμενης εικόνας και ήχου στη δεύτερη, με αποτέλεσμα να απαιτούν ειδικό τερματικό εξοπλισμό για τη λειτουργία τους, δηλαδή τις συσκευές τηλεφώνου και τηλεόρασης αντίστοιχα. Με την εισαγωγή της μικροηλεκτρονικής και την εφαρμογή των νέων τεχνικών ψηφιακής μετάδοσης και επεξεργασίας δεδομένων

άλλαξαν οι κλασικές μορφές επικοινωνίας, με αποτέλεσμα την κατάργηση στη πράξη ορισμένων γνωστών υπηρεσιών ή εφαρμογών, όπως είναι για παράδειγμα η τηλεγραφία.

Τα δίκτυα ηλεκτρονικών υπολογιστών λειτουργούν κυρίως με προγραμματιζόμενες συσκευές γενικού σκοπού. Για παράδειγμα, μια τερματική συσκευή δικτύου ηλεκτρονικών υπολογιστών μπορεί να είναι ένας προσωπικός υπολογιστής ή, γενικότερα, συσκευές που έχουν σχεδιαστεί για την εξυπηρέτηση πολλών διαφορετικών μορφών αναπαράστασης της πληροφορίας. Με αυτόν τον τρόπο τα δίκτυα ηλεκτρονικών υπολογιστών μπορούν να υποστηρίξουν μια μεγάλη και ολοένα αυξανόμενη ποικιλία εφαρμογών.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα προσφοράς τέτοιων υπηρεσιών μπορεί να αναζητήσει κανείς στο παγκόσμιο δίκτυο διασύνδεσης υπολογιστών, γνωστό και ως Διαδίκτυο (Internet), το οποίο συνδέει φυσικά πρόσωπα, εταιρίες, οργανισμούς κτλ. και παρέχει ένα πλήθος νέων δυναμικών. Η βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών του Διαδικτύου επιτυγχάνεται με όλο και ταχύτερους ρυθμούς, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη και ασφαλή μετάδοση διαφόρων τύπων δεδομένων. Με την εμφάνιση των ψηφιακών δικτύων ολοκληρωμένων υπηρεσιών (ISDN: Integrated Services Digital Networks) και των δικτύων ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς δεδομένων (ATM: Asynchronous Transfer Mode), τα οποία αναπτύσσονται με ταχύτατους ρυθμούς, προβλέπεται η σύγκλιση όλων των υπάρχοντων τηλεπικοινωνιακών δικτύων που χρησιμοποιεί στις καθημερινές δραστηριότητες ο άνθρωπος (τηλεφωνικά, τηλεοπτικά, ραδιοφωνικά κτλ.) προς ένα και μοναδικό δίκτυο, μέσα από το οποίο θα γίνεται η διαχείριση και η χρήση όλων αυτών των μορφών επικοινωνίας με μειωμένο το κόστος σύνδεσης και λειτουργίας [1], [2].

Πιο αναλυτικά, στα δίκτυα οικιών του μέλλοντος θεωρείται εφικτή η ενοποίηση όλων των μορφών επικοινωνίας κάτω από ένα και μόνο δίκτυο επικοινωνίας, μέσα από το οποίο ο άνθρωπος θα μπορεί να βλέπει τηλεόραση, να χρησιμοποιεί το τηλέφωνο, να αναζητεί στο Διαδίκτυο, να διαχειρίζεται τους τραπεζικούς του λογαριασμούς, να ελέγχει την ασφάλεια της κύριας ή εξοχικής κατοικίας του κτλ [1]. Πολλές τέτοιου είδους τεχνολογίες και υπηρεσίες έχουν κάνει την εμφάνισή τους [2], [3], [4].

Η επικοινωνία μεταξύ των ηλεκτρονικών υπολογιστών εκμεταλλεύτηκε σε μεγάλο βαθμό το ήδη υπάρχον τηλεφωνικό δίκτυο και τα δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης που υπάρχουν σε αφθονία στις προηγμένες χώρες, και τελευταία, με τη διάδοση της ψηφιακής τηλεόρασης και τις εκπομπές του ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος. Το ψηφιακό δίκτυο ολοκληρωμένων υπηρεσιών (ISDN) είναι μια προσπάθεια ενοποίησης όλων αυτών των δικτύων. Μέσα από αυτό υπάρχει η δυνατότητα επικοινωνίας και μεταφοράς δεδομένων ηλεκτρονικών υπολογιστών (φωνή, εικόνα, βίντεο) με μια απλή σύνδεση, με τρόπο ανάλογο με αυτόν που σήμερα επιτυγχάνεται με μια απλή τηλεφωνική σύνδεση.

1.2 Δομικά στοιχεία δικτύου επικοινωνίας

Σε ένα οποιοδήποτε δίκτυο είναι δυνατόν να διακρίνουμε του κόμβους που το αποτελούν, τις πληροφορίες που ανταλλάσσουν οι κόμβοι αυτοί, καθώς και το κανάλι επικοινωνίας μέσω του οποίου διακινούνται οι πληροφορίες. Για παράδειγμα, το οδικό δίκτυο συνδέει πόλεις, το κανάλι επικοινωνίας είναι οι δρόμοι και το υλικό που διακινείται μέσω αυτού είναι τα οχήματα και οι άνθρωποι. Σε αναλογία, ένα δίκτυο υπολογιστών συνδέει συστήματα υπολογιστών, αυτόνομους υπολογιστές και άλλες περιφερικές συσκευές και γενικώς κάθε είδους τερματικές διατάξεις που διαθέτουν επεξεργαστή. Το κανάλι επικοινωνίας μπορεί να είναι τα καλώδια, τα λέιζερ, τα μικροκύματα κτλ, μέσω των οποίων μεταφέρονται από έναν υπολογιστή στον άλλον διάφορες πληροφορίες [1].

Μερικές συσκευές δικτύου συνδεδεμένες μεταξύ τους δεν αποτελούν απαραίτητα ένα δίκτυο. Η λειτουργία του δικτύου είναι να μεταφέρει δεδομένα από ένα σημείο σε ένα άλλο. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η επικοινωνία, είναι απαραίτητο όλοι όσοι συμμετέχουν στο δίκτυο να «μιλούν την ίδια γλώσσα» [2]. Είναι απαραίτητο δηλαδή να υπάρχουν κάποιοι κοινοί κανόνες για όλους, οι οποίοι θα είναι υπεύθυνοι για την ποιότητα και την πιστοποίηση των πληροφοριών που μεταδίδονται στο κανάλι επικοινωνίας. Αυτοί οι κανόνες στη γλώσσα των υπολογιστών ονομάζονται πρωτόκολλα επικοινωνιών. Η αποτελεσματικότητα αυτών των κανόνων καθορίζει και την αποδοτικότητα του δικτύου. Το πλέον διαδεδομένο πρωτόκολλο είναι το TCP/IP, το οποίο σημαίνει Transfer Control Protocol/Internet Protocol (Πρωτόκολλο Ελέγχου Μεταφοράς/Πρωτόκολλο Διαδικτύου).

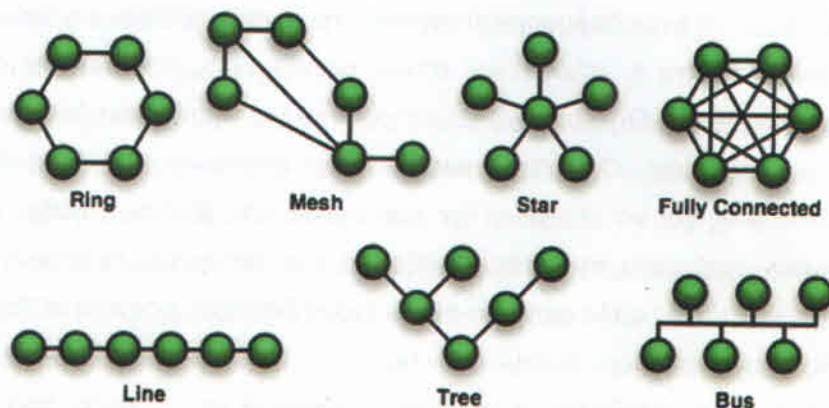
Πιο συγκεκριμένα τα δομικά στοιχεία ενός δικτύου υπολογιστών είναι τα ακόλουθα [1]:

- ✓ Οι κόμβοι επικοινωνίας (hosts). Γενικά, οι κόμβοι είναι ηλεκτρονικά συστήματα που διαθέτουν τουλάχιστον επεξεργαστή και μνήμη. Στη πράξη, ένας κόμβος μπορεί να είναι ένα σύστημα υπολογιστών, σταθμοί αναμετάδοσης ραδιοκυμάτων – μικροκυμάτων, επίγειοι δορυφορικοί σταθμοί που αναμεταδίδουν και αποκωδικοποιούν δορυφορικά σήματα ή, τέλος, ένας απλός ηλεκτρονικός υπολογιστής οποιουδήποτε είδους και μεγέθους. Οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση δύο ή περισσότερων γραμμών μετάδοσης. Ο ρόλος τους είναι να στέλνουν σωστά τα δεδομένα στο προορισμό τους και να ελέγχουν την κυκλοφορία στο δίκτυο. Επίσης, πολλές φορές διορθώνουν σφάλματα που παρουσιάζονται στα δεδομένα, ενισχύουν σήματα που εξασθενούν από την απόσταση την οποία έχουν διανύσει, ειδοποιούν τους αποστολείς για ενδεχόμενες απώλειες δεδομένων κτλ.
- ✓ Το φυσικό μέσο μετάδοσης ή σύνδεσμος (link). Είναι το μέσο από το οποίο θα περάσουν τα δεδομένα υπό μορφή σημάτων επικοινωνίας. Τέτοιου είδους μέσα μπορεί να είναι καλώδια διαφόρων τύπων, οπτικές ίνες, αέρας (για ασύρματες ζεύξεις), καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους, ομοαξονικό καλώδιο κτλ.

- ✓ Οι διατάξεις διασύνδεσης. Πρόκειται για μονάδες υλικού που εξασφαλίζουν τη διασύνδεση των συσκευών και τη μεταφορά των πληροφοριών ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου. Συνήθως οι διατάξεις αυτές παρεμβάλλονται ανάμεσα στον κόμβο και στο φυσικό μέσο μετάδοσης. Τυπικές λειτουργίες που εκτελούν τέτοιου είδους διατάξεις είναι η διαμόρφωση και η αποδιαμόρφωση, καθώς και ο έλεγχος ορθότητας των μεταφερόμενων δεδομένων.
- ✓ Το λογισμικό δικτύου. Πρόκειται για το σύνολο των προγραμμάτων που εξασφαλίζουν τη σύνδεση και ελέγχουν την επικοινωνία των υπολογιστών του δικτύου. Τυπικές λειτουργίες του λογισμικού είναι ο έλεγχος και η εκχώρηση του δικαιώματος πρόσβασης στους χρήστες του δικτύου.
- ✓ Το λογισμικό εφαρμογών δικτύου. Πρόκειται για προγράμματα εφαρμογών που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να εκμεταλλεύονται τις δυνατότητες που προσφέρει ένα δίκτυο υπολογιστών. Προγράμματα αυτής της μορφής είναι ενδεχόμενο να αποτελούν απλές ή σύνθετες επεκτάσεις δικτυακών εφαρμογών, που έχουν αναπτυχθεί για περιβάλλον αυτόνομων συστημάτων υπολογιστών.

1.3 Τοπολογίες δικτύου

Τοπολογία δικτύου ονομάζεται η μορφή της σύνδεσης μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου. Οι τοπολογίες είναι είτε φυσικές είτε λογικές. Τα κυριότερα είδη τοπολογιών, όπως φαίνονται στο Σχήμα 1.1, είναι η γραμμική τοπολογία (Line), η τοπολογία τύπου διαύλου (Bus), δακτυλίου (Ring), αστέρα (Star), πλέγματος (Mesh), δένδρου (Tree) και η πλήρως συνδεδεμένη (Fully Connected).



Σχήμα 1.1: Τοπολογίες δικτύου.

1.4 Κατηγοριοποίηση δικτύων επικοινωνιών

Τα δίκτυα φέρουν τους εξής χαρακτηρισμούς, που καθορίζουν και την κατηγορία τους:

- ✓ Ανάλογα με το φυσικό μέσο διασύνδεσής τους χαρακτηρίζονται ως ενσύρματα ή ασύρματα.
- ✓ Ανάλογα με τον τρόπο πρόσβασης σε αυτά χαρακτηρίζονται ως δημόσια ή ιδιωτικά.
- ✓ Ανάλογα με τη γεωγραφική κάλυψη του δικτύου χαρακτηρίζονται ως τοπικά (LAN και WLAN), μητροπολιτικά (MAN και WMAN), ευρείας κάλυψης (WAN και WWAN) και προσωπικά (PAN και WPAN).

Οι χαρακτηρισμοί με το πρόσθετο W ανταποκρίνονται στον ασύρματο (Wireless) τρόπο σύνδεσης.

1.4.1 Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τη γεωγραφική κάλυψη του δικτύου

1.4.1.1 Τοπικά δίκτυα

Τα τοπικά δίκτυα ή LAN (Local Area Networks) είναι δίκτυα που συνδέουν υπολογιστές σε κοντινές αποστάσεις, π.χ. από υπολογιστές που βρίσκονται σε ένα δωμάτιο μέχρι υπολογιστές που απέχουν μερικά χιλιόμετρα μεταξύ τους. Χρησιμοποιούνται συνήθως για να συνδέουν προσωπικούς υπολογιστές και σταθμούς εργασίας σε γραφεία εταιρειών, εργοστάσια, πανεπιστήμια κ.λπ.

1.4.1.2 Μητροπολιτικά δίκτυα

Ένα μητροπολιτικό δίκτυο ή MAN (Metropolitan Area Network) είναι μια μεγαλύτερη εκδοχή ενός τοπικού δικτύου καθώς καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις, π.χ. από μια ομάδα γειτονικών γραφείων μιας εταιρείας έως μια πόλη.

1.4.1.3 Δίκτυα ευρείας περιοχής

Τα δίκτυα ευρείας περιοχής ή WAN (Wide Area Network) καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, π.χ. από σύνδεση μεταξύ διαφορετικών πόλεων μέχρι μιας ολόκληρης ηπείρου και μπορούν να συνδέσουν ακόμη και περισσότερα από ένα τοπικά δίκτυα καθώς και ομάδες τοπικών δικτύων. Τα περισσότερα δίκτυα ευρείας περιοχής χρησιμοποιούν τηλεφωνικά δίκτυα ή τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους.

1.4.1.4 Διαδίκτυα

Τα διαδίκτυα είναι δίκτυα ευρείας περιοχής τα οποία καλύπτουν γεωγραφικές περιοχές μίας ή περισσότερων ηπείρων, διασυνδέοντας επιμέρους δίκτυα. Σε ένα διαδίκτυο μπορεί να συνυπάρχουν διασυνδεδεμένοι υπολογιστές και δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες και λειτουργικά συστήματα. Το Διαδίκτυο (Internet) είναι το μεγαλύτερο τέτοιου είδους δίκτυο.

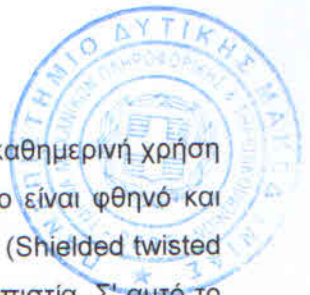
1.4.2 Κατηγοριοποίηση ανάλογα με το φυσικό μέσο διασύνδεσης

1.4.2.1 Ενσύρματα δίκτυα χάλκινης καλωδίωσης

Τα ενσύρματα δίκτυα υπολογιστών, εδώ και πολλά χρόνια, έχουν ίσως το μεγαλύτερο μερίδιο στην «πίτα» των δικτύων. Από το πρώτο μεγάλο δίκτυο -το τηλεφωνικό- μέχρι και στις μέρες μας, η σύνδεση υπολογιστών με χρήση καλωδίων είναι η πιο διαδεδομένη. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους οι μηχανικοί δικτύων χρησιμοποιούν τα ενσύρματα δίκτυα. Ο πιο σημαντικός λόγος είναι φυσικά το κόστος. Για μικρής και μεσαίας κλίμακας δίκτυα, το καλώδιο είναι η πιο ελκυστική λύση. Το κόστος κατασκευής, προμήθειας, εγκατάστασης και συντήρησης είναι πολύ μικρό, ενώ είναι αρκετά αξιόπιστο, γρήγορο και ασφαλές. Ενδεικτικά, αναφέρονται μερικοί τύποι καλωδίων που χρησιμοποιούνται [2]:

- Συνεστραμμένου ζεύγους (STP/UTP -- θωρακισμένο και μη, αντίστοιχα)
 - Category 1 (1MHz)
 - Category 2 (4MHz)
 - Category 3 (16MHz)
 - Category 4 (20MHz)
 - Category 5 (100MHz)
 - Category 6 (250MHz)
 - Category 7 (έως και 600MHz μέσα από καλώδιο 100Ohm)
- Ομοαξονικό καλώδιο
 - Hard Line
 - Tri axial
 - Twin axial
 - Bi axial
 - Semi rigid

Αρχικά, όταν ξεκίνησαν να αναπτύσσονται τα δίκτυα υπολογιστών και κυρίως για μικρές αποστάσεις, χρησιμοποιούταν αρκετά το ομοαξονικό καλώδιο. Γρήγορα όμως παρατήθηκε διότι δεν προσέφερε μεγάλες ταχύτητες και μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις. Πλέον



χρησιμοποιείται επί το πλείστον το καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους. Για καθημερινή χρήση (απλά δίκτυα) χρησιμοποιείται το UTP (Unshielded twisted pair), το οποίο είναι φθηνό και αρκετά αξιόπιστο, ενώ για μεγαλύτερες απαιτήσεις χρησιμοποιείται το STP (Shielded twisted pair), το οποίο είναι μεν αρκετά ακριβότερο, αλλά παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία. Σ' αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι η θωράκιση στην καλωδίωση είναι απαραίτητη προκειμένου να προστατευτούν τα δεδομένα που μεταφέρονται μέσα από το καλώδιο από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, είτε αυτές προέρχονται από το ίδιο το καλώδιο, είτε από το περιβάλλον (κρουστικός θόρυβος για παράδειγμα). Το γεγονός ότι τα καλώδια του UTP/STP είναι συνεστραμμένα, είναι ένα πρώτο βήμα για τη προστασία από ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (κάθε καλώδιο από κάθε ζεύγος δημιουργεί αντίστροφο μαγνητικό πεδίο από το ταίρι του, με σκοπό να ακυρώνει το ένα το πεδίο του άλλου), αλλά σε μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης (για παράδειγμα στο Cat5e ή στο Cat6), όπου οι ρυθμοί μετάδοσης είναι της τάξης των Gbps, αυτή η προστασία δεν είναι αρκετή.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για να υφίσταται ένα δίκτυο υπολογιστών, πρέπει όλοι οι συμμετέχοντες σε αυτό να χρησιμοποιούν κάποια κοινά πρωτόκολλα επικοινωνίας (πρακτικά, τα πρωτόκολλα επιβάλουν τα μέσα μετάδοσης και τις τοπολογίες δικτύων). Για τα ενσύρματα δίκτυα, έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορα πρωτόκολλα, παρακάτω αναφέρονται όμως τα πιο βασικά (της «οικογένειας» IEEE 802), τα οποία έχουν υλοποιηθεί από τον οργανισμό IEEE [2]:

- ✓ IEEE 802.2 (LLC)
- ✓ IEEE 802.3 (Ethernet με CSMA/CD)
- ✓ IEEE 802.4 (Token bus)
- ✓ IEEE 802.14 (Cable modems).

Από αυτά τα πρωτόκολλα, το 802.3, το γνωστό σε όλους Ethernet, είναι το πιο γνωστό και ευρέως διαδεδομένο.

1.4.2.2 Ασύρματα δίκτυα

Ασύρματο δίκτυο ονομάζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο το οποίο χρησιμοποιεί ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας [2]. Το ασύρματο δίκτυο σε αντίθεση με το ενσύρματο δίκτυο δε χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιο καλώδιο, αλλά επιτρέπει στις ηλεκτρονικές συσκευές να μεταφέρουν δεδομένα μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Σε κάθε ασύρματο δίκτυο υπάρχουν δύο μέρη: η ασύρματη κάρτα δικτύου η οποία επικοινωνεί είτε με άλλες συσκευές που έχουν ασύρματη κάρτα δικτύου, είτε με τον πομποδέκτη-κόμβο που αποτελεί το δεύτερο μέρος, που λειτουργεί και ως γέφυρα με το ενσύρματο δίκτυο. Η μορφολογία ενός ασύρματου δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Ασύρματο δίκτυο [2].

Πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων

Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρέχει ένα ασύρματο δίκτυο προέρχονται από τη φύση της ασύρματης τεχνολογίας, η οποία προσφέρει πολλές ευκολίες. Έτσι, τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτών των δικτύων είναι [3]:

- Οι χρήστες που συνδέονται ασύρματα σε ένα δίκτυο έχουν μια εύκολη, «διαφανή» δικτυακή εμπειρία παρόμοια με αυτή που έχουν οι χρήστες των (συνέχεια συνδεδεμένων) κινητών τηλεφώνων. Ένα καλά σχεδιασμένο δίκτυο επιτρέπει τη πρόσβαση με μια φορητή συσκευή ασχέτως από την τοποθεσία του χρήστη. Επιπλέον, οι τωρινές υλοποιήσεις των ασύρματων τεχνολογιών επιτρέπουν υψηλές ταχύτητες αλλά και τη συνύπαρξη πολλών τύπων δεδομένων, όπως «streaming voice over ip» και απλά δεδομένα δικτύου τα οποία συνυπάρχουν σε διαφορετικές ραδιοσυχνότητες.
- Ευκολία υλοποίησης. Το να υλοποιήσει κανείς ένα ασύρματο δίκτυο είναι πολύ πιο εύκολο και απλό από την παραδοσιακή υλοποίηση με καλωδιοποίηση. Για παράδειγμα μπορεί να διασυνδέσει κάποιος δύο κτίρια χωρίς το κόστος της εγκατάστασης οπτικών ινών μεταξύ των κτιρίων. Μια ασύρματη συσκευή σε έναν όροφο μπορεί να προσφέρει πρόσβαση στο δίκτυο σε όλο τον όροφο χωρίς την επιβάρυνση της διερεύνησης προβλημάτων στην (πολύπλοκη πολλές φορές) καλωδίωση.
- Χαμηλότερο κόστος επέκτασης. Τα ασύρματα δίκτυα επιτρέπουν τη γρήγορη, εύκολη και με μικρό κόστος επέκταση δικτύων σε περιοχές που είτε η καλωδίωση είναι πολύ δύσκολη να υλοποιηθεί, είτε η υπάρχουσα είναι πολύ δύσκολο να επεκταθεί.
- Γρήγορη εγκατάσταση / τοποθέτηση. Ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο γρήγορης εγκατάστασης για ένα υποκατάστημα μιας εταιρείας ή απομακρυσμένης περιοχής. Εάν οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης δεν είναι ιδιαίτερα

υψηλές μια ασύρματη συσκευή μπορεί να παρέχει δικτυακή διασύνδεση σε αρκετούς χρήστες, χωρίς το χρόνο και τα έξοδα που χρειάζεται η καλωδίωση για να παρέχει τα ίδια σε κάθε χρήστη. Με την ασύρματη τεχνολογία η πρόσβαση στο δίκτυο μιας απομακρυσμένης περιοχής μπορεί να υλοποιηθεί σε ώρες αντί για μέρες.

Τα παραπάνω σαφή πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων οδηγούν σε κάποια άλλα τα οποία είναι πιο σχετικά με την ακαδημαϊκή εκπαίδευση, όπως [3]:

- Η δικτύωση των φοιτητών και των υπαλλήλων του ιδρύματος με το ακαδημαϊκό δίκτυο και το διαδίκτυο σε αίθουσες διδασκαλίας, εργαστήρια, κοιτώνες και κοινόχρηστες περιοχές, ακόμα και σε εξωτερικούς χώρους.
- Η επέκταση του ακαδημαϊκού δικτύου με μικρό κόστος ακόμα και σε σημεία που πλέον η καλωδίωση είναι δύσκολη, αν όχι αδύνατη.
- Μεγαλύτερη ευελιξία – δεν υπάρχει πλέον η ανάγκη για τη μεταφορά των συνδέσεων του τοπικού δικτύου όταν διαμορφώνονται ξανά χώροι όπως γραφεία ή αίθουσες.
- Εύκολη εγκατάσταση δικτυακών συνδέσεων σε μέρη τα οποία χρησιμοποιούνται προσωρινά.
- Εύκολη πρόσβαση των φοιτητών και των υπαλλήλων σε δικτυακές συσκευές όπως εκτυπωτές, σαρωτές και εξυπηρετητές.

Μειονεκτήματα των ασύρματων δικτύων

Κάθε τεχνολογία έχει και τα μειονεκτήματά της και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα δεν αποτελούν εξαίρεση. Πολλές από τις ευκολίες που προσφέρουν έχουν σαν συνέπεια κάποιες αδυναμίες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι [3]:

- Το μέσο στην ασύρματη μετάδοση είναι κοινόχρηστο και half-duplex. Τα σημερινά ασύρματα τοπικά δίκτυα λειτουργούν παρόμοια με τα παλιά δίκτυα τεχνολογίας Ethernet. Μόνο ένας σταθμός εργασίας μπορεί να μεταδίδει κάθε στιγμή δεδομένα. Το γεγονός αυτό καθιστά το δίκτυο ευάλωτο σε ένα φαινόμενο γνωστό ως «slamming», δηλαδή την απασχόληση του δικτύου για πολλή ώρα από έναν μόνο σταθμό (εάν π.χ. αυτός ο σταθμός μεταφέρει ένα πολύ μεγάλο αρχείο). Τα ασύρματα δίκτυα τύπου Dual-Band περιορίζουν αυτό το πρόβλημα επιτρέποντας σε δεδομένα τύπου streaming και δεδομένα τύπου μεταφοράς αρχείων να διαχωρίζονται σε διαφορετικές συχνότητες.
- Ένα ασύρματο δίκτυο έχει σημαντικά χαμηλότερο εύρος ζώνης από τα σημερινά δίκτυα καλωδίων. Οι πιο πολλές εταιρείες και ακαδημαϊκά ιδρύματα έχουν εγκαταστήσει δίκτυα μεταγωγής ταχυτήτων 100Mbps στους σταθμούς εργασίας και 100Mbps ή 1000Mbps στον κορμό του δικτύου και στους εξυπηρετητές. Το να υπερφορτώσει κανείς τέτοια δίκτυα (ειδικά μόνο ένας υπολογιστής) είναι εξαιρετικά δύσκολο. Ένα ασύρματο δίκτυο τεχνολογίας 802.11b μπορεί να εξασφαλίσει ταχύτητα 11Mbps σε έναν μόνο σταθμό εργασίας κάθε φορά. Το αντίστοιχο σε ασύρματα δίκτυα τεχνολογίας

802.11a ή 802.11g είναι 54Mbps (σε έναν μόνο σταθμό εργασίας κάθε φορά). Επιπλέον, η επιβάρυνση του δικτύου από τα πρωτόκολλα ασύρματης διασύνδεσης, διαχείρισης και αποφυγής συγκρούσεων τυπικά μειώνει το χρήσιμο εύρος ζώνης στο 45-50%. Έτσι, το ωφέλιμο εύρος ζώνης στα δίκτυα 802.11b είναι περί τα 6Mbps ενώ στα 802.11a και 802.11g περί τα 25Mbps.

- Τα ασύρματα δίκτυα είναι ευάλωτα σε παρεμβολές. Εάν ένας ισχυρός αναμεταδότης, που λειτουργεί στην ίδια ραδιοσυχνότητα με ένα ασύρματο δίκτυο, βρίσκεται κοντά στο δίκτυο, τότε το δίκτυο μπορεί να καταστεί άχρηστο. Αυτό φυσικά μπορεί να γίνει και με κακόβουλη πρόθεση από κάποιον ο οποίος θέλει να εξαπολύσει μια επίθεση προς το δίκτυο.
- Τα ασύρματα δίκτυα είναι ευάλωτα σε επιθέσεις. Από τη στιγμή που το ασύρματο μέσο είναι κοινόχρηστο, όλοι οι ασύρματοι σταθμοί εργασίας μπορούν να «δουν» όλη την κίνηση που διασχίζει το μέσο, ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που ισχύει στους διασυνδεδεμένους με καλώδιο σε ένα hub σταθμούς εργασίας, σε ένα Ethernet δίκτυο. Εάν δε ληφθούν κάποια μέτρα για τη προστασία των δεδομένων που μεταδίδονται στο μέσο τότε αυτά μπορούν να διαβαστούν από εξωτερικούς ή εσωτερικούς κακόβουλους χρήστες. Μια πολιτική ασφαλείας είναι απαραίτητη σε κάθε εγκατάσταση ασύρματου δικτύου.
- Τα ασύρματα δίκτυα δεν είναι ασφαλή εξ' ορισμού. Πρέπει να ληφθεί υπόψη η ασφάλιση του δικτύου σε πολλά επίπεδα συμπεριλαμβανομένων του ποιος έχει πρόσβαση στο μέσο, καθώς και της παράνομης υποκλοπής δεδομένων. Τεχνολογίες όπως το WPA έχουν μειώσει σημαντικά τους κινδύνους τέτοιων δικτύων.

1.4.2.3 Οπτικά δίκτυα

Τα δίκτυα υπολογιστών, για την αναπαράσταση και μετάδοση των δυαδικών ψηφίων χρησιμοποιούν παλμούς από φως. Τα συγκεκριμένα δίκτυα είναι πολύ αξιόπιστα κι έχουν μεγαλύτερες χωρητικότητες από αυτά που χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς παλμούς. Τα οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούν οπτικές ίνες που επιτρέπουν τη μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερου εύρου ζώνης.

Οι οπτικές ίνες είναι γυάλινες ή πλαστικές ίνες, που μεταφέρουν το φως κατά μήκος τους. Υπάρχει ιδιαίτερος κλάδος της επιστήμης που ασχολείται με έρευνα για τις δυνατότητες και εφαρμογές των οπτικών ινών. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα επικοινωνιών και επιτρέπουν την ταχύτητα σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερου εύρους ζώνης από τον χαλκό. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων, διότι τα σήματα ταξιδεύουν μαζί τους με λιγότερη απώλεια και επίσης δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται επίσης

για φωτισμό όταν είναι σε μάτσα, επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά εικόνων, επιτρέποντας έτσι τη προβολή σε στενούς χώρους. Ειδικά σχεδιασμένες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για πολλές άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων λέιζερ.

Πλεονεκτήματα οπτικής ίνας

Οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, κάτι που κάνει τη χρήση τους στα δίκτυα νέας γενιάς ιδιαίτερα σημαντική. Αρχικά αξίζει να αναφερθεί ότι διαθέτουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων και επομένως μπορούν να υποστηρίξουν μετάδοση δεδομένων σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Συνήθεις ταχύτητες μετάδοσης είναι αυτές των 2 και 10 Gbps, ενώ έχουν επίσης αναπτυχθεί συστήματα των 20, 40 και 50 Gbps. Χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνολογίες οι ταχύτητες μπορούν να φτάσουν στα μερικά Tbps. Μερικά ακόμη από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των οπτικών ινών παρουσιάζονται παρακάτω [4]:

- Κάνουν δυνατή την ταυτόχρονη χρήση τηλεοπτικών καναλιών υψηλής ευκρίνειας, υπηρεσιών τηλεφωνίας, πολύ υψηλών προσβάσεων στο Internet, καθώς και καινοτόμων υπηρεσιών, όπως η τηλε-εκπαίδευση και η τηλε-ιατρική.
- Η εξασθένηση των σημάτων είναι μικρότερη από ότι στα χάλκινα και ομοαξονικά καλώδια, με αποτέλεσμα η ανάγκη για ύπαρξη ενισχυτών ή άλλων ενεργών στοιχείων να μειώνεται, αφού μπορεί το σήμα να μεταδίδεται χωρίς απώλειες από μερικές δεκάδες μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα (ανάλογα με τη τεχνική και το ρυθμό μετάδοσης). Έτσι, και οι ενεργειακές απαιτήσεις των οπτικών ινών είναι σημαντικά χαμηλές.
- Θεωρούνται πολύ ασφαλές μέσο μετάδοσης, καθώς εκ κατασκευής κάνουν δυσκολότερη την υποκλοπή ή την παρεμβολή τρίτων στο δίκτυο.
- Οι σύγχρονες μέθοδοι κατασκευής των καλωδίων οπτικών ινών οδηγούν στη σημαντική μείωση της πιθανότητας εξωτερικής ζημιάς.
- Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, με αποτέλεσμα να συνιστάται η χρήση τους σε βιομηχανικό περιβάλλον και σε χώρους με υψηλό θόρυβο.
- Είναι ιδιαίτερα ελαφριές και μικρές σε όγκο σε σχέση με άλλους αγωγούς που χρησιμοποιούνται, που τις κάνει πιο εύκολες και οικονομικές στην τοποθέτησή τους. Για παράδειγμα, σε σύγκριση με χάλκινο καλώδιο με 1000 ζεύγη και μήκος 500 μέτρων το οποίο ζυγίζει περίπου 4 τόνους, η οπτική ίνα του ίδιου μήκους, που περιέχει τον ίδιο αριθμό καναλιών, ζυγίζει μόλις 45 κιλά.
- Είναι ανθεκτικές σε υγρό περιβάλλον, όπου τα χάλκινα καλώδια μπορεί να δημιουργήσουν βραχυκυκλώματα.

- Καθώς η οπτική ίνα δε μεταφέρει ηλεκτρικό σήμα, μπορεί να χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου υπάρχει υψηλός κίνδυνος εκρήξεων από σπινθήρες (χώροι καυσίμων, βιομηχανικές ζώνες κλπ.).
- Υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης σκοτεινών οπτικών ινών (Dark Fibers). Αυτό σημαίνει ότι οι οπτικές ίνες οι οποίες είναι τοποθετημένες κανονικά μπορούν να παραμένουν αχρησιμοποίητες έως ότου να χρειαστούν. Έτσι οι εταιρίες που ελέγχουν την υποδομή μπορούν να εγκαταστήσουν περισσότερες οπτικές ίνες από τις υπολογιζόμενες ανάγκες για μελλοντική τους χρήση και τα επιπλέον καλώδια μπορούν να εκμισθωθούν σε άλλες εταιρίες ή και ιδιώτες για προσωπική χρήση.

Φυσικά τα παραπάνω τεχνολογικά χαρακτηριστικά των οπτικών ινών μπορούν να έχουν πολύ θετικό αντίκτυπο σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο εφόσον ενταχθούν στην αγορά των τηλεπικοινωνιών. Τα σημαντικότερα από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω [4]:

- Θα δημιουργηθούν νέες ευκαιρίες για την ενθάρρυνση της επιχειρηματικότητας στις ηλεκτρονικές υπηρεσίες υψηλής προστιθέμενης αξίας με δυνατότητες ανάπτυξης εξαγωγικών υπηρεσιών.
- Θα ενεργοποιηθούν μεγάλες ιδιωτικές επενδύσεις.
- Θα δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίας υψηλής εξειδίκευσης.
- Θα καλυφθεί το «ψηφιακό χάσμα» που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων στα πλαίσια του προγράμματος της Εθνικής Ψηφιακής Σύγκλισης.
- Θα αναβαθμιστεί η ανταγωνιστικότητα σε επίπεδο αγοράς των τηλεπικοινωνιών, με τη προσφορά νέων πακέτων υπερύψηλων συνδέσεων στο Διαδίκτυο σε ανταγωνιστικές τιμές και με αισθητή μείωση του κόστους των ήδη υπάρχουσών συνδέσεων (PSTN, ISDN, ADSL).
- Θα πραγματοποιηθούν και θα αξιοποιηθούν έργα δικτύων και υποδομών πρόσβασης επόμενης γενιάς.
- Η χρήση των οπτικών ινών για δίκτυα νέας γενιάς μπορεί να υποστηρίξει τις εθνικές δράσεις, όπως η ηλεκτρονική διακυβέρνηση, η προστασία του περιβάλλοντος (π.χ. περιορισμός των άσκοπων μετακινήσεων), αλλά και να ωθήσει τις νέες δράσεις όπως η μαζική εφαρμογή της τηλε-ιατρικής και της τηλε-εκπαίδευσης κλπ.

Μειονεκτήματα οπτικής ίνας

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθούν και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες [4].

- Έχουν αρκετά μεγάλο κόστος παρασκευής, καθώς και κόστος εγκατάστασης, επειδή αυτή είναι πιο δύσκολη σε σχέση με των χάλκινων καλωδίων. Η δυσκολία εγκατάστασης έγκειται στο ότι δε θα πρέπει να λυγίζουν πολύ και θα πρέπει να εγκαθίστανται με ελαφριά κλίση, για να μην υπάρχουν απώλειες στο σήμα.

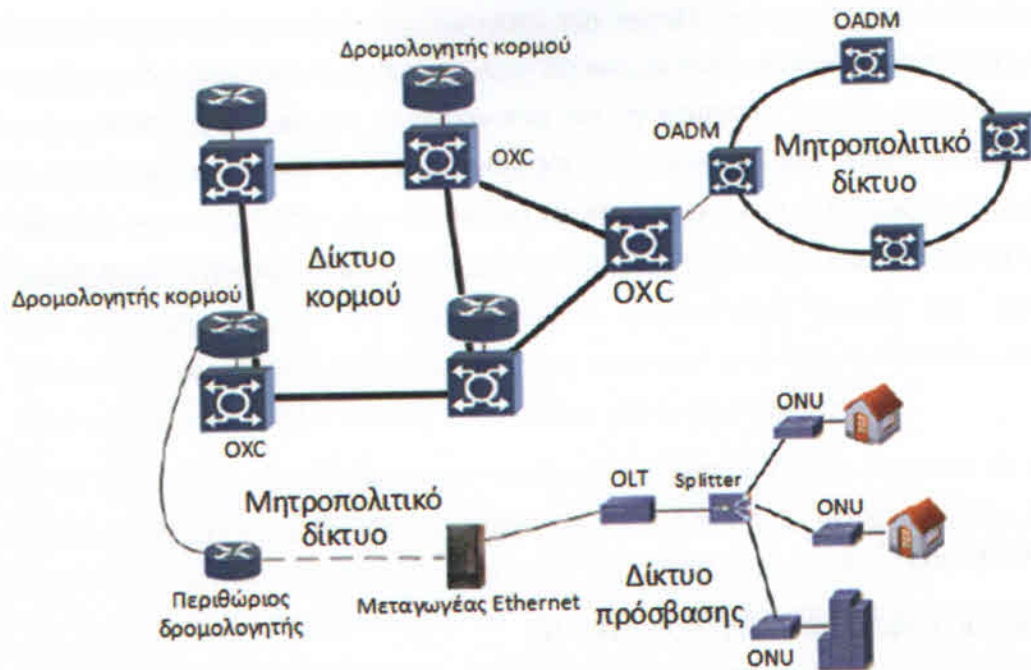
- Καθώς ο πυρήνας των οπτικών ινών είναι συνήθως γυάλινος, είναι πιο εύθραυστες.
- Η υλοποίηση των συνδέσεων των οπτικών ινών έχει μεγάλο βαθμό δυσκολίας, επειδή απαιτείται υψηλή προσαρμογή και ευθυγράμμιση της φωτεινής πηγής, για να μην υπάρχει διασπορά της δέσμης φωτός και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες. Ωστόσο αυτή η δυσκολία έχει αντιμετωπιστεί με επιτυχία, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση τους και για συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία με υψηλό όμως κόστος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Τηλεπικοινωνιακά οπτικά δίκτυα

2.1 Τομείς τηλεπικοινωνιακού οπτικού δικτύου

Τυπικά, ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρεις τομείς: το δίκτυο κορμού, το μητροπολιτικό δίκτυο και το δίκτυο πρόσβασης. Όπως δείχνεται στο Σχήμα 2.1, το δίκτυο κορμού είναι το κεντρικό τμήμα της τηλεπικοινωνιακής ιεραρχίας και παρέχει εμβέλεια σε εθνικό επίπεδο ή παγκόσμια. Οι συνδέσεις στο δίκτυο κορμού εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις - μια σύνδεση (που χρησιμοποιεί οπτικές ίνες) θα μπορούσε να είναι μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα σε μήκος, π.χ., συνδέσεις που παρέχουν επαφές μεταξύ των κύριων πόλεων των Ηνωμένων Πολιτειών. Συνήθως, τα δίκτυα κορμού βασίζονται σε τοπολογίες πλέγματος, που παρέχουν αυξημένη ευελιξία προστασίας και αποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων του δικτύου. Το μητροπολιτικό δίκτυο καλύπτει συνήθως μια μητροπολιτική περιοχή, που καλύπτει αποστάσεις από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα και κυρίως βασίζεται σε μια βαθιά ριζωμένη κληρονομιά των SONET (Synchronous Optical Networking) / SDH (Synchronous Digital Hierarchy) οπτικών δικτύων τοπολογίας δακτυλίου. Το δίκτυο πρόσβασης συνδέει τους τελικούς χρήστες με τον άμεσο πάροχο των υπηρεσιών τους. Το δίκτυο πρόσβασης επιτρέπει στους τελικούς χρήστες (επιχειρήσεις και οικιακούς πελάτες) να συνδεθούν με το υπόλοιπο της υποδομής του δικτύου και εκτείνεται σε μια απόσταση μερικών χιλιομέτρων. Τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης συνήθως βασίζονται σε τοπολογίες δέντρου.



Σχήμα 2.1: Ιεραρχία τηλεπικοινωνιακού οπτικού δικτύου.

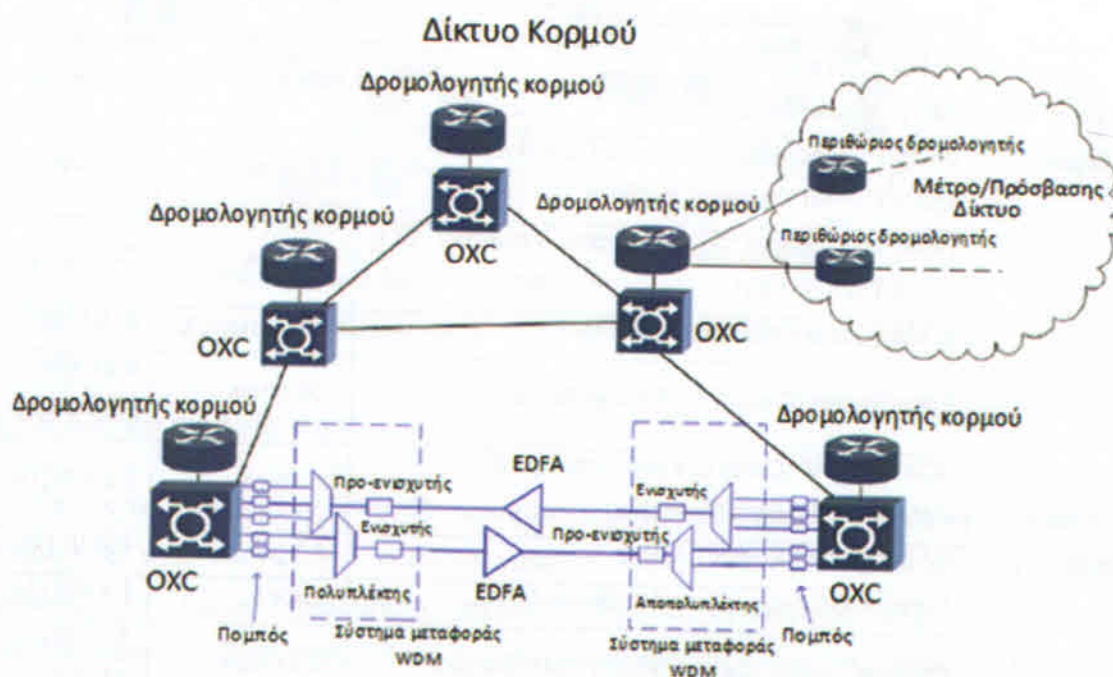
Οι οπτικές τεχνολογίες έχουν εφαρμοστεί σε όλους αυτούς τους τομείς του δικτύου, προκειμένου να υποστηρίξουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και πιο αποδοτική μεταφορά δεδομένων. Στην ενότητα αυτή, περιγράφονται οι τρεις τομείς του δικτύου και εισάγονται τα πιο σημαντικά στοιχεία του δικτύου του κάθε τομέα. Για καθένα από αυτά τα στοιχεία του δικτύου παρέχονται επίσης αντιπροσωπευτικά δεδομένα και αναφορές σχετικά με την ενεργειακή τους κατανάλωση.

2.1.1 Δίκτυο κορμού

Ο όρος «δίκτυο κορμού» συνήθως αναφέρεται στην υποδομή του κορμού του δικτύου τηλεπικοινωνιών, το οποίο διασυνδέει μεγάλες πόλεις (ως κόμβους του δικτύου) και εκτείνεται σε εθνικές, ηπειρωτικές, ακόμη και διηπειρωτικές αποστάσεις. Το δίκτυο κορμού συνήθως βασίζεται σε ένα μοτίβο διασύνδεσης πλέγματος και μεταφέρει τεράστια ποσά κυκλοφορίας, που συλλέγονται μέσω των περιφερειακών περιοχών του δικτύου. Έτσι, πρέπει να είναι εξοπλισμένα με κατάλληλες διεπαφές προς τα μητροπολιτικά δίκτυα και τα δίκτυα πρόσβασης, που είναι υπεύθυνα για τη συλλογή και τη διανομή της κυκλοφορίας, έτσι ώστε οι χρήστες που χωρίζονται από μεγάλες αποστάσεις να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του δικτύου κορμού (backbone).

Στο δίκτυο κορμού, οι οπτικές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται ευρέως για την υποστήριξη της βασικής φυσικής υποδομής και την επίτευξη υψηλής ταχύτητας, υψηλής χωρητικότητας, επεκτασιμότητας, κλπ. Για τον έξυπνο έλεγχο και τη διαχείριση του οπτικού δικτύου, αρκετά

υψηλού επιπέδου εξοπλισμός διαχείρισης και τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί. Για παράδειγμα, οι αρχιτεκτονικές δικτύου που βασίζονται σε IP (Internet Protocol) over SONET/SDH, IP over WDM (Wavelength-Division Multiplexing), ή IP over SONET/SDH over WDM έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών [5], [6]. Καθώς τα δίκτυα κορμού εμφανίζουν πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές δικτύου, η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου κορμού πρέπει να εξετάζεται και στα δύο από τα επίπεδα του δικτύου, δηλαδή το οπτικό επίπεδο και το ηλεκτρονικό επίπεδο. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού.



Σχήμα 2.2: Δίκτυο κορμού.

2.1.2 Μητροπολιτικό δίκτυο

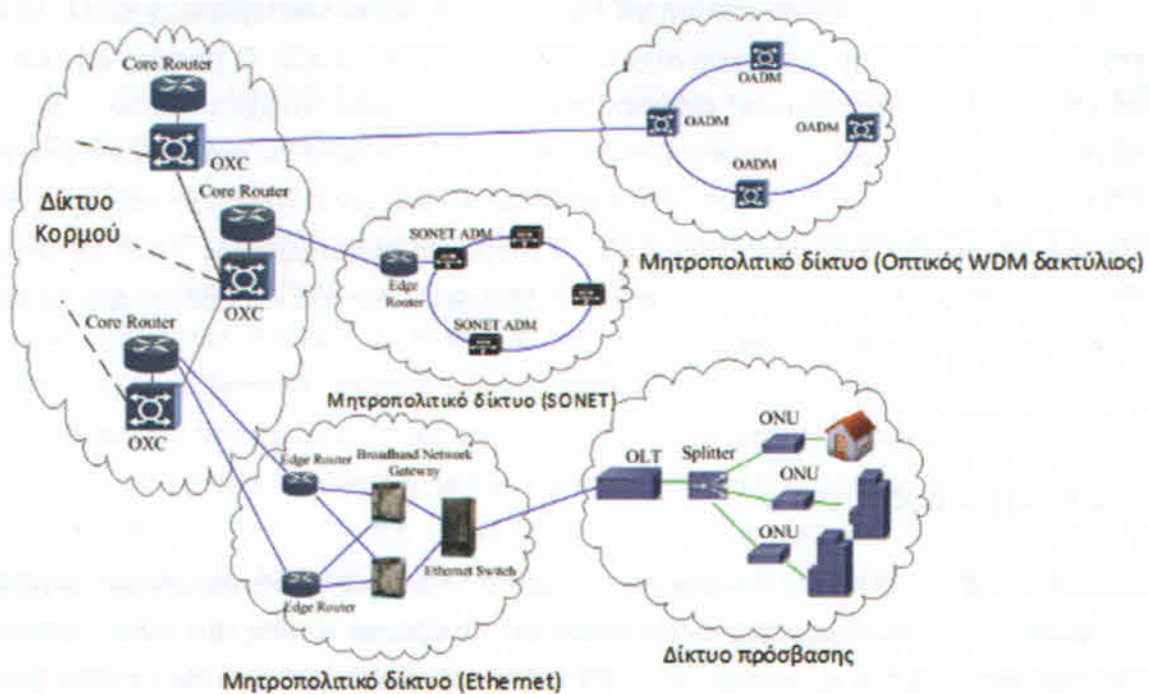
Το μητροπολιτικό δίκτυο είναι το μέρος ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου που καλύπτει συνήθως μητροπολιτικές περιοχές. Συνδέει τον εξοπλισμό για τη συγκέντρωση της κυκλοφορίας των οικιακών συνδρομητών (π.χ., παρέχει διεπαφές στο δίκτυο πρόσβασης, όπως διάφορες περιπτώσεις ψηφιακής συνδρομητικής γραμμής (xDSL) και Fiber-to-the-Home ή Fiber-to-the-x (FTTx) και παρέχει απευθείας συνδέσεις με το δίκτυο κορμού για σύνδεση στο Internet. Διαφορετικές τεχνολογίες δικτύωσης έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες περιοχές του μητροπολιτικού δικτύου σε όλο τον κόσμο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, το SONET, ο οπτικός WDM δακτύλιος και το Metro Ethernet είναι οι τρεις κυρίαρχες τεχνολογίες στα μητροπολιτικά δίκτυα. Για παράδειγμα, το Metro Ethernet είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη υποδομή μητροπολιτικού δικτύου που βασίζεται στο πρότυπο Ethernet

[7] – περιθωριακοί δρομολογητές, πύλες (gateways) ευρυζωνικών δικτύων, καθώς και μεταγωγείς Ethernet είναι τα βασικά συστατικά του. Τα στοιχεία για την κατανάλωση ενέργειας από κάποιο εξοπλισμό του Metro Ethernet φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές κατανάλωσης ισχύος των διαφόρων στοιχείων ενός δικτύου.

Τομέας δικτύου	Στοιχείο	Χωρητικότητα	Ενεργειακή κατανάλωση
Δίκτυο κορμού	Core Router (Cisco CRS-1 Multi-shelf System)	92 Tbps	1020 kW [8]
	Optoelectronic Switch (Alcatel-Lucent 1675 Lambda Unite Multi-Service Switch)	1.2 Tbps	2.5 kW [9]
	Optical Cross-Connect (MRV Optical Cross-Connect)	N/A	228 W [10]
	WDM Transport System (Ciena CoreStream Agility Optical Transport System)	3.2 Tbps	10.8 kW [11]
	WDM transponder (Alcatel-Lucent WaveStar OLS WDM Transponder)	40 Gbps	73 W [12]
	EDFA (Cisco ONS 15501 EDFA)	N/A	8 W [12]
Δίκτυο Metro	Edge Router (Cisco 12816 Edge Router)	160 Gbps	4.21 kW [13], [14]
	SONET ADM (Ciena CN 3600 Intelligent Optical Multiservice Switch)	95 Gbps	1.2 kW [15]
	OADM (Ciena Select OADM)	N/A	450 W [16]
	Network Gateway (Cisco 10008 Router)	8 Gbps	1.1 kW [14]
	Ethernet Switch (Cisco Catalyst 6513 Switch)	720 Gbps	3.21 kW [8], [14]
Δίκτυο πρόσβασης	OLT (NEC CM7700S OLT)	1 Gbps	100 W [17]
	ONU (Wave7 ONT-E1000i ONU)	1 Gbps	5 W [17]

Τα WDM (Wavelength-division Multiplexing) μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου έχουν επίσης προταθεί ώστε να λάβουν τα πλεονεκτήματα της οπτικής τεχνολογίας, όπως η υψηλότερη ταχύτητα και η μεγαλύτερη επεκτασιμότητα [18]. Στα WDM μητροπολιτικά δίκτυα τοπολογίας δακτυλίου, η κατανάλωση ενέργειας προέρχεται κυρίως από τους OADMs (Optical Add-Drop Multiplexers), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αύξηση και τη μείωση των οπτικών σημάτων. Οι αρχιτεκτονικές δακτυλίου SONET είναι επίσης ευρέως διαδεδομένες στα μητροπολιτικά δίκτυα, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιήσουν χαμηλού ρυθμού bits (bit-rate) κυκλοφορία των μητροπολιτικών δικτύων σε υψηλού εύρους ζώνης σωλήνες των δικτύων κορμού [6]. Ο SONET ADM (Add-Drop Multiplexer) χρησιμοποιείται για την αύξηση και τη μείωση της κίνησης του δικτύου. Η κατανάλωση της ενέργειας ενός SONET ADM παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1.



Σχήμα 2.3: Το μητροπολιτικό δίκτυο και το δίκτυο πρόσβασης.

2.1.3 Δίκτυο πρόσβασης

Το δίκτυο πρόσβασης είναι το «τελευταίο μίλι» ενός δικτύου τηλεπικοινωνιών, που συνδέει το τηλεπικοινωνιακό κεντρικό γραφείο (Central Office ή CO) με τους τελικούς χρήστες. Το δίκτυο πρόσβασης περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου τηλεπικοινωνιών. Είναι επίσης ένας μεγάλος καταναλωτής ενέργειας λόγω της παρουσίας ενός τεράστιου αριθμού ενεργών στοιχείων [19].

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες πρόσβασης που προτείνονται και αναπτύσσονται στην αγορά, όπως το xDSL (Digital Subscriber Line), το CM (Cable Modem), ασύρματα και κυψελοειδή δίκτυα, FTTx, WOBAN (ασύρματα-οπτικά ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης), κλπ. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν σε γενικές γραμμές να καταταχθούν σε δύο κατηγορίες: (α) ενσύρματες (όπως xDSL, CM, FTTx, κ.λπ.) και (β) ασύρματες.

Τα συστήματα ενισχυμένα με χαλκό ή xDSL καλύπτουν διάφορες τεχνολογίες, όπως το ADSL (Asymmetric DSL), το VDSL (Very-high-speed DSL) και το HDSL (High-bit-rate DSL). Οι τεχνολογίες xDSL χρησιμοποιούν την υφιστάμενη PSTN (Public Switched Telephone Network) υποδομή για την παροχή υπηρεσιών Internet. Η τεχνολογία του καλωδιακού μόντεμ χρησιμοποιεί ομοαξονικό καλώδιο για την παροχή υπηρεσιών Internet, μαζί με την ψηφιακή τηλεόραση. Το FTTx περιλαμβάνει διαφορετικές βασικές τεχνολογίες, όπως άμεση ίνα, κοινόχρηστη ίνα και την πιο κυρίαρχη, το PON (Passive Optical Network).

Το PON είναι η κορυφαία επιλογή για την ανάπτυξη δικτύου πρόσβασης οπτικών ινών, επειδή έχει μόνο παθητικά στοιχεία στην υποδομή ινών (Σχήμα 2.3). Ο πίνακας 2.1 εκθέτει στοιχεία για την κατανάλωση ενέργειας για τα δύο κύρια στοιχεία δικτύου σε μια αρχιτεκτονική PON: το OLT (Optical Line Terminal), που βρίσκεται σε ένα κεντρικό γραφείο (CO - Central Office) και την ONU (Optical Network Unit), που βρίσκεται στον (ή κοντά) τελικό πελάτη. Οι ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης περιλαμβάνουν Wi-Fi (Wireless Fidelity), WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) και Cellular data service (όπως το LTE - Long Term evolution, κλπ.).

2.2 Κέντρα δεδομένων

Στις μέρες μας τα κέντρα δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την υποστήριξη μεγάλου όγκου δεδομένων σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών. Το τεράστιο πλήθος των δεδομένων που διαχειρίζονται αυτές οι εφαρμογές έχουν θέσει ζητήματα κλιμάκωσης για τις υποδομές των κέντρων δεδομένων και οι οπτικές τεχνολογίες αποτελούν βασικό παράγοντα στα κέντρα δεδομένων για την υποστήριξη όλης αυτής της κίνησης.

Συγκεκριμένα, τα οπτικά δίκτυα παίζουν σημαντικό ρόλο και στα δύο κέντρα δεδομένων, διασυνδέσεων (inter-connections) και ενδοσυνδέσεων (intra-connections). Σε επίπεδο διασυνδέσεων, η κίνηση και η παράδοση της διαρκώς αυξανόμενης ποσότητας κίνησης που υποστηρίζεται από τα κέντρα δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας ευέλικτα οπτικά δίκτυα. Σημειώνεται ότι η ευελιξία του σχεδίου διασύνδεσης του δικτύου μεταφοράς κορμού θα είναι ένα σημαντικό μέσο για μεταφορά φόρτου δεδομένων μεταξύ διάφορων θέσεων.

Σε επίπεδο ενδοσυνδέσεων (connecting boards, chips και μνήμες των διακομιστών δεδομένων μέσα στο κέντρο δεδομένων), η οπτική τεχνολογία μπορεί επίσης να διαδραματίσει βασικό ρόλο για τη κλιμάκωση του κέντρου δεδομένων. Η οπτική που θα μπορούσε να λύσει πολλά φυσικά προβλήματα των ενδοσυνδέσεων, συμπεριλαμβάνει την ακρίβεια διανομής ρολογιού, το συγχρονισμό του συστήματος (επιτρέποντας μεγαλύτερες σύγχρονες ζώνες, τόσο μέσα στο ίδιο το τσιπ όσο και μεταξύ των τσιπ), το εύρος ζώνης και την πυκνότητα των μεγάλων διασυνδέσεων, καθώς και τη μείωση της απώλειας ισχύος. Η οπτική μπορεί να απαλείψει ένα ευρύ φάσμα των προβλημάτων σχεδιασμού, όπως τη συνακρόαση (crosstalk), την απομόνωση τάσης, την ανάκλαση κύματος, το ταίριασμα της αντίστασης και την επαγωγή των pins. Μπορεί να επιτρέψει συνεχή κλιμάκωση των υφιστάμενων αρχιτεκτονικών και ενεργοποίηση σε νέες υψηλά συνδεδεμένες ή υψηλού εύρους ζώνης αρχιτεκτονικές [20].

2.3 Περιγραφή των τεχνολογιών FTTx

Με τον όρο Fiber-to-the-x ή FTTx περιγράφεται κάθε αρχιτεκτονική δικτύου που χρησιμοποιεί ίνες σε αντικατάσταση όλου ή μέρους του χάλκινου τοπικού βρόχου που χρησιμοποιείται για την παροχή υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών. Η κατάληξη «x» αναφέρεται στο σημείο όπου καταλήγει η οπτική ίνα στον τελικό πελάτη. Το σημείο αυτό είναι η οπτικο-ηλεκτρονική διασύνδεση και συνήθως βρίσκεται μέσα σε κάποιο εξοπλισμό μετάδοσης, που ονομάζεται Οπτική Μονάδα Δικτύου (Optical Network Unit - ONU) ή Οπτικό Τερματικό Δικτύου (Optical Network Terminal – ONT = subscriber / συνδρομητής). Πιο συγκεκριμένα η ONU χρησιμοποιείται όταν η οπτική ίνα καταλήγει σε τηλεπικοινωνιακές καμπίνες (cabinets), ενώ το ONT όταν η ίνα φτάνει μέσα στο κτίριο του πελάτη. Για παράδειγμα, για την αρχιτεκτονική των FTTx δικτύων υπάρχει ONT στο άκρο της οπτικής ίνας του δικτύου. Το σημείο έναρξης για όλες τις αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων βρίσκεται μέσα στο Κεντρικό Γραφείο (CO), που επίσης ονομάζεται και σημείο παρουσίας του FTTx (POP). Παρακάτω περιγράφονται τα διαφορετικά είδη του όρου FTTx, που ορίζουν και το σημείο που καταλήγει η οπτική ίνα.

2.3.1 FTTC

FTTC (Fiber to the curb) – Οπτική ίνα μέχρι το ρείθρο: Η οπτική ίνα φτάνει σε μια καμπίνα στο δρόμο, συνήθως λιγότερο από 300 μέτρα από το κτίριο του τελικού χρήστη. Το υπόλοιπο κομμάτι της σύνδεσης μέχρι το χρήστη αποτελείται συνήθως από καλώδια χαλκού. Μια ακόμη παραλλαγή συνώνυμη με αυτή για το Fiber to the curb, είναι το FTTC (Fiber to the cabinet) – Οπτική ίνα μέχρι την καμπίνα (Σχήμα 2.4).

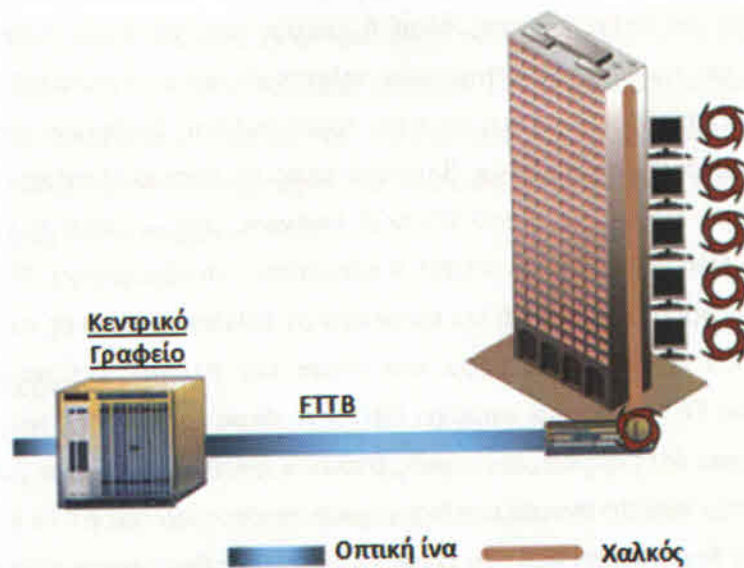


Σχήμα 2.4: Οπτική ίνα μέχρι την καμπίνα [4].

2.3.2 FTTB

FTTB (Fiber to the building) – Οπτική ίνα μέχρι το κτίριο: Η ίνα σε αυτή την περίπτωση φτάνει έως το κτίριο των χρηστών (για παράδειγμα μπορεί να τερματίζει στο υπόγειο μιας πολυκατοικίας) (Σχήμα 2.5). Η τελική σύνδεση των κατοικιών μέσα στο κτίριο γίνεται με

εναλλακτικές τεχνολογίες. Τέτοιες τεχνολογίες μπορεί να είναι το ομοαξονικό καλώδιο, συνεστραμμένα ζεύγη χαλκού ή ασύρματη ζεύξη.



Σχήμα 2.5: Οπτική ίνα μέχρι το κτίριο [4].

2.3.3 FTTH

FTTH (Fiber to the home) – Οπτική ίνα μέχρι το σπίτι: πρόκειται για εγκατάσταση και χρήση της οπτικής ίνας από το κεντρικό γραφείο μέχρι τον κάθε τελικό χρήστη (Σχήμα 2.6). Συνεπώς, με βάση αυτή την αρχιτεκτονική τα οπτικά καλώδια φτάνουν ως τις κατοικίες, τα διαμερίσματα πολυκατοικιών και τις επιχειρήσεις [21], [22].

FTTh – Οπτική ίνα μέχρι το Σπίτι



Σχήμα 2.6: Οπτική ίνα μέχρι το σπίτι [4].

2.4 Τοπολογίες FTTH δικτύων

Επικεντρώνοντας στα FTTH δίκτυα, στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι βασικές τοπολογίες τους. Επιπλέον, θα αναφερθούν τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Οι αρχιτεκτονικές στα FTTH δίκτυα μπορούν να χωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες: Την αρχιτεκτονική Home Run, όπου σε κάθε σπίτι φτάνει μια αφιερωμένη ίνα μέχρι το κεντρικό γραφείο και τις αρχιτεκτονικές αστέρα (star), όπου πολλά σπίτια μπορούν να μοιράζονται την ίδια οπτική ίνα τροφοδοσίας από το κεντρικό γραφείο μέχρι ένα σημείο – απομακρυσμένο κόμβο, στον οποίο γίνεται μεταγωγή, πολυπλεξία ή διαχωρισμός. Το σημείο αυτό βρίσκεται μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των σπιτιών των πελατών. Η αρχιτεκτονική αστέρα μπορεί να είναι είτε ενεργή (active), είτε παθητική (passive). Αυτό σημαίνει ότι ο απομακρυσμένος κόμβος μπορεί να τροφοδοτείται από ρεύμα (ενεργός) ή όχι (παθητικός). Επιπλέον, μπορούν να είναι είτε απλά συστήματα μήκους κύματος και επομένως όλα τα σπίτια θα συνδέονται στο ίδιο μήκος κύματος ή συστήματα με πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM).

Το Κεντρικό Γραφείο σε ένα οπτικό δίκτυο πρόσβασης περιλαμβάνει μία μονάδα τερματισμού οπτικών γραμμών (OLT) που παρέχει τη διεπαφή δικτύου (network interface) και συνδέεται με μια ή περισσότερες μονάδες οπτικών δικτύων (ONUs) στη πλευρά του χρήστη. Ανεξάρτητα από την αρχιτεκτονική, τα καλώδια τροφοδοσίας οπτικών ινών (feeder cables) τερματίζουν στο κεντρικό γραφείο σε μια τέτοια μονάδα OLT.

Στη πλευρά του χρήστη υπάρχει ο εξοπλισμός του κτιρίου του πελάτη (CPE), που περιλαμβάνει την Οπτική Μονάδα Δικτύου (ONU) ή το Οπτικό Τερματικό Δικτύου (ONT), όπως περιγράφεται παραπάνω. Τα καλώδια που φτάνουν μέχρι τις κατοικίες λέγονται τελικά καλώδια ή καλώδια πρόσβασης (drop cables), ενώ τα καλώδια που φτάνουν μέχρι ένα σημείο εκτός των σπιτιών και διανέμουν το δίκτυο λέγονται καλώδια διανομής (distribution cables) [21].

2.4.1 Αρχιτεκτονική Home Run

Η αρχιτεκτονική Home Run («από σημείο σε σημείο» αρχιτεκτονική – point to point – P2P ή single star αρχιτεκτονική) αποτελείται από οπτικές ίνες που είναι αποκλειστικές για τους συνδρομητές από το κεντρικό γραφείο μέχρι τις κατοικίες τους στα ONTs. Οι συνδρομητές μπορούν να βρίσκονται σε απόσταση μέχρι και 80 χιλιόμετρα από το κεντρικό γραφείο. Το επόμενο Σχήμα 2.7 εξηγεί σχηματικά την αρχιτεκτονική.



Σχήμα 2.7: Αρχιτεκτονική Point to Point [4].

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η αρχιτεκτονική σημείο προς σημείο συνοψίζονται στα παρακάτω [4]:

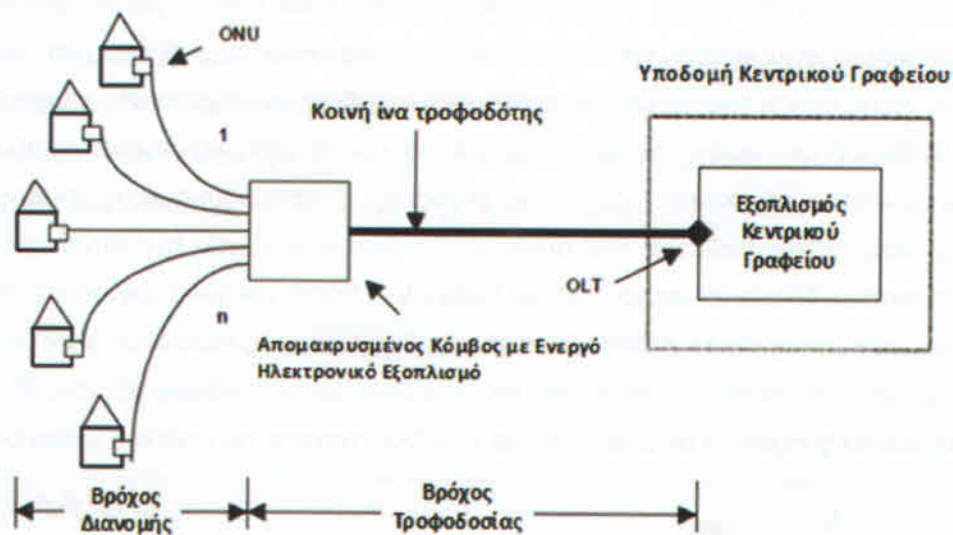
- ✓ Η οπτική ίνα είναι αφιερωμένη στο κάθε σπίτι και η διαθέσιμη χωρητικότητά της δε διαμοιράζεται με κανέναν άλλο χρήστη.
- ✓ Εφόσον η διαθέσιμη χωρητικότητα της οπτικής ίνας δε διαμοιράζεται, παρέχεται το μέγιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης για την καλύτερη δυνατή κάλυψη των αναγκών του χρήστη.
- ✓ Οι χρήστες μπορούν να βρίσκονται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από το κεντρικό γραφείο.
- ✓ Είναι ευκολότερη η διάκριση μεταξύ παρόχου υποδομής και παρόχου υπηρεσιών.
- ✓ Λόγω της μεμονωμένης οπτικής ίνας παρέχεται μεγαλύτερη ασφάλεια στον τελικό χρήστη.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής [4]:

- Η υλοποίηση της εν λόγω αρχιτεκτονικής είναι ιδιαίτερα ακριβή, καθώς απαιτεί σημαντικά περισσότερη οπτική ίνα και περισσότερο ενεργό εξοπλισμό – το OLT – στο κεντρικό γραφείο σε σχέση με τις διαμοιραζόμενες υποδομές.
- Περιέχει υψηλότερα κεφαλαιακά αρχικά (κόστη CAPEX) και λειτουργικά κόστη (κόστη OPEX) λόγω των πολλών ανεξάρτητων καλωδίων ινών, ανάγκης χώρου και ρεύματος (για τον ενεργό εξοπλισμό).
- Σε περίπτωση βλάβης κάποιου σημείου στο δίκτυο απαιτούνται εκτενέστερες επισκευαστικές εργασίες [21].

2.4.2 Δίκτυο ενεργού αστέρα

Η αρχιτεκτονική ενεργού αστέρα ή double star επιχειρεί στο να μειωθεί συνολικά το πλήθος των οπτικών ινών και ειδικότερα των καλωδίων τροφοδοσίας, που βρίσκονται κοντά στο κεντρικό γραφείο. Σε μια αρχιτεκτονική ενεργού αστέρα, ένας απομακρυσμένος κόμβος (remote node - RD) τοποθετείται μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των κατοικιών των πελατών. Κάθε θύρα OLT μαζί με τα καλώδια τροφοδοσίας (feeder) οπτικής ίνας μπορούν για παράδειγμα να μοιράζονται από 4 έως 1000 σπίτια μέσω αποκλειστικών καλωδίων διανομής από τους απομακρυσμένους κόμβους. Έτσι, επιτυγχάνεται σύνδεση σημείου προς πολλαπλά σημεία – point to multipoint.



Σχήμα 2.8: Αρχιτεκτονική ενεργού αστέρα [4].

Όταν ο απομακρυσμένος κόμβος περιέχει ενεργές συσκευές Ethernet / IP², όπως πολυπλέκτες, αποπολυπλέκτες ή μεταγωγείς, τότε η αρχιτεκτονική λέγεται ενεργού αστέρα (Active Star) και τα αντίστοιχα δίκτυα λέγονται ενεργά οπτικά δίκτυα (Active Optical Network - AON). Ο απομακρυσμένος κόμβος, εφόσον περιέχει τέτοιες συσκευές, απαιτεί τη συνεχή παροχή ρεύματος (Σχήμα 2.8).

Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής ενεργού αστέρα [4]:

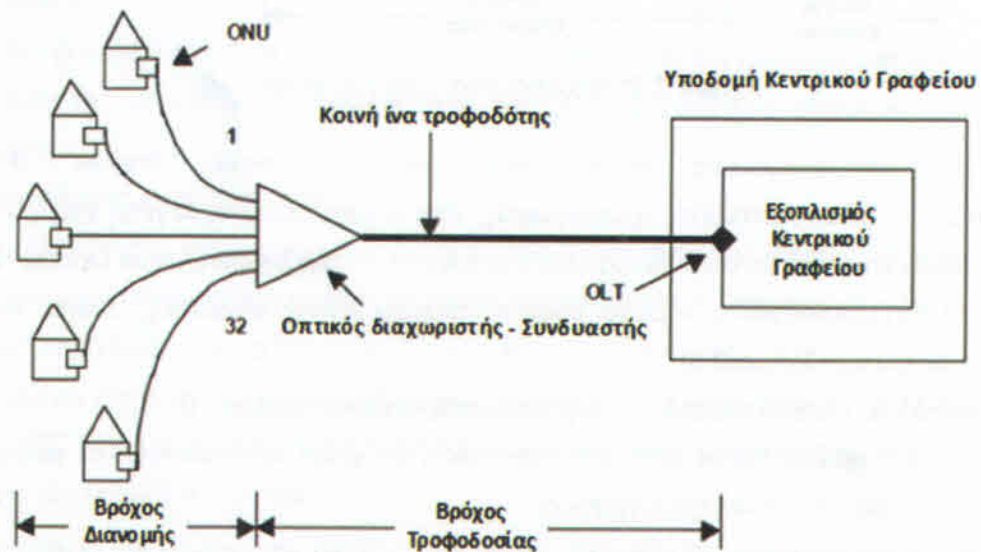
- ✓ Οι συνδρομητές και σε αυτή την περίπτωση μπορούν να βρίσκονται σε απόσταση 80 χιλιόμετρα από το κεντρικό γραφείο.
- ✓ Απαιτείται λιγότερος εξοπλισμός, αφού κάθε οπτική ίνα μπορεί να διαμοιράζεται σε πολλούς συνδρομητές.
- ✓ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τεχνολογία Ethernet και ενεργός εξοπλισμός, που υποστηρίζουν υψηλές ταχύτητες 100 Mbps και 1 Gbps.

Τα μειονεκτήματα της αρχιτεκτονικής δίνονται παρακάτω [4]:

- Αφού το εύρος ζώνης των καλωδίων τροφοδοσίας μοιράζεται μεταξύ πολλαπλών τελικών σημείων, η μέγιστη χωρητικότητα που θα είναι διαθέσιμη σε κάθε χρήστη – για αποστολή και λήψη δεδομένων – είναι σαφώς μικρότερη σε σχέση με τα δίκτυα Home Run.
- Απαιτείται πιο πολύπλοκη υποδομή καλωδίων.
- Υπάρχουν αυξημένες ενεργειακές ανάγκες σε τροφοδοσία ρεύματος λόγω του ενεργού εξοπλισμού [21].

2.4.3 Δίκτυο παθητικού αστέρα

Η αρχιτεκτονική παθητικού αστέρα (Passive Star) είναι επίσης μια τοπολογία σημείο προς πολλαπλά σημεία. Σε αυτήν δεν υπάρχουν καθόλου ενεργά στοιχεία μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των κατοικιών, παρά μόνο όσα βρίσκονται μέσα στο κεντρικό γραφείο (Σχήμα 2.9). Ως εκ τούτου, το εξωτερικό δίκτυο και οι απομακρυσμένοι κόμβοι του δε χρειάζονται κάποια εξωτερική τροφοδοσία ρεύματος. Ο απομακρυσμένος κόμβος περιέχει οπτικούς διαχωριστές (splitters) του σήματος. Τα δίκτυα με αυτήν την τοπολογία λέγονται παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Network - PON) και είναι δίκτυα με τη διάταξη καλωδίων ινών όπως και τα AONs, όπου γίνεται διαμοιρασμός καλωδίων ινών (κυρίως στο feeder κομμάτι του δικτύου). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνδρομητές στα PON δίκτυα δεν μπορούν να ξεπερνούν σε απόσταση τα 20 χιλιόμετρα από το κεντρικό γραφείο.



Σχήμα 2.9: Αρχιτεκτονική παθητικού αστέρα [4].

Εξετάζοντας τα πλεονεκτήματα του δικτύου παθητικού αστέρα παρατίθενται τα παρακάτω [4]:

- ✓ Δεν υπάρχει απαίτηση εξωτερικής ηλεκτρικής τροφοδοσίας στο εξωτερικό δίκτυο ή στους απομακρυσμένους κόμβους, παρά μόνο η κατάληξη της ίνας και στο κεντρικό γραφείο.
- ✓ Όπως και στην τοπολογία του AON, απαιτούνται λιγότερες οπτικές ίνες για να εξυπηρετηθεί μια δεδομένη περιοχή σε σχέση με την αντίστοιχη point-to-point αρχιτεκτονική.
- ✓ Το PON εξαλείφει ένα μεγάλο μέρος του κόστους εγκατάστασης, συντήρησης και διαχείρισης, το οποίο απαιτείται για τη διασύνδεση με τις εγκαταστάσεις πελατών.

Μειονεκτήματα του δικτύου παθητικού αστέρα [4]:

- Το ίδιο εύρος ζώνης πρέπει να διαιρεθεί μεταξύ διαφόρων χρηστών μετά τον οπτικό διαχωριστή.
- Όλες οι μονάδες (ONUs) παραλαμβάνουν το ίδιο οπτικό σήμα, γεγονός που μπορεί να χαρακτηριστεί προβληματικό για την ασφάλεια των δικτύων.
- Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για uploading είναι αρκετά χαμηλότερο σε σχέση με την περίπτωση ενός P2P δικτύου [21].



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

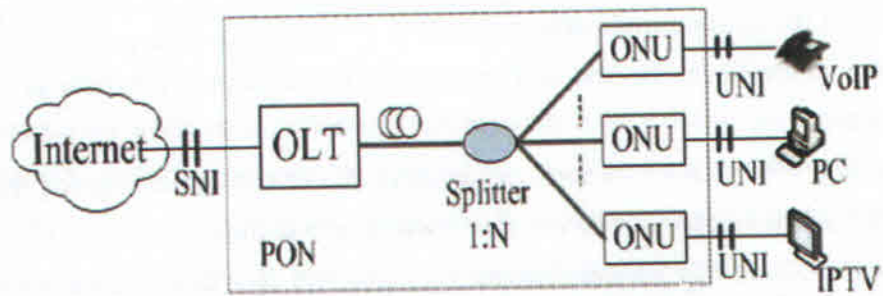
Παθητικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης

3.1 Αρχιτεκτονική και δομή του παθητικού οπτικού δικτύου (PON)

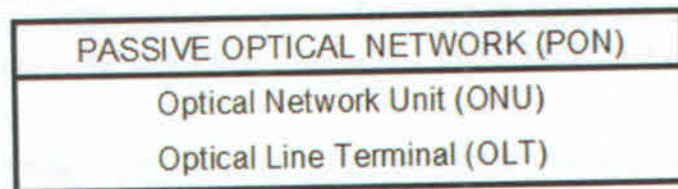
Η αρχιτεκτονική του PON αποτελείται από ένα οπτικό τερματικό γραμμής (Optical Line Terminal - OLT) που βρίσκεται στη πλευρά του παρόχου και τις οπτικές μονάδες δικτύου (Optical Network Unit - ONU) που βρίσκονται στη πλευρά του χρήστη (FTTH), ή σε μια περιοχή που βρίσκονται ένα σύνολο από χρήστες (FTTC, FTTB). Αυτές οι δύο βασικές διατάξεις μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα σε οπτικό και αντίστροφα και είναι υπεύθυνες για τη μετάδοση των δεδομένων (Σχήμα 3.1).

Η αρχιτεκτονική του Παθητικού Οπτικού Δικτύου (PON) επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ίνα και, αντίστοιχα, την ίδια θύρα OLT [23], [24]. Η συγκεκριμένη τεχνολογία βασίζεται σε παθητικούς οπτικούς διαιρέτες (splitters), οι οποίοι

χρησιμοποιούνται για να διαμοιράσουν το εύρος μετάδοσης δεδομένων σε μια ίνα μεταξύ των διαφορετικών χρηστών. Κάθε χρήστης συνδέεται με τη θύρα OLT με μια οπτική ίνα μέσω του παθητικού διαιρέτη. Κάθε οπτική ίνα έχει τουλάχιστον δύο διαφορετικά μήκη κύματος, ένα για την καθοδική κατεύθυνση (προς τον χρήστη) και το άλλο για την ανοδική κατεύθυνση (προς τον πάροχο). Επίσης, ένα τρίτο μήκος κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει μετάδοση βίντεο στην καθοδική κατεύθυνση (π.χ. σύνδεση καλωδιακής τηλεόρασης, «RF overlay»).



SNI: Service Network Interface, UNI: User Network Interface



Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική ενός τυπικού συστήματος PON.

Ανάλογα με την αρχιτεκτονική της συγκεκριμένης τεχνολογίας και την τοπολογία της προς κάλυψη περιοχής, διαμορφώνεται και ο λόγος καταμερισμού (π.χ. λόγος διαίρεσης 1:16, 1:32, κλπ). Οι διαιρέτες δεν περιλαμβάνουν κάποιο ενεργό στοιχείο, με αποτέλεσμα να έχουν πολύ μικρό κόστος συντήρησης. Σε κάθε OLT μπορούν να συνδεθούν 16 με 32 ONUs και σε κάθε ONU 20 με 30 συνδρομητές [25].

Ακόμη, το PON είναι ένα οπτικό δίκτυο σημείου προς πολλαπλά σημεία (Point-to-Multipoint ή PtMP) στην κατερχόμενη κατεύθυνση (downstream) και πολλαπλών σημείων προς σημείο (Multipoint-to-Point ή MPtP) στην ανερχόμενη κατεύθυνση (upstream). Αυτό το χαρακτηριστικό που διαθέτει επιτρέπει την ευρεία εκπομπή (broadcasting) βίντεο στην καθοδική κατεύθυνση του δικτύου. Στην ανοδική κατεύθυνση, ένα PON είναι ένα δίκτυο πολλαπλών σημείων προς σημείο: πολλαπλές ONUs μεταδίδουν όλες προς το OLT. Οι κατευθυντικές ιδιότητες του παθητικού διαιρέτη είναι τέτοιες, ώστε η μετάδοση μιας ONU να μην μπορεί να ανιχνευτεί από άλλες ONUs. Ωστόσο, οι ροές δεδομένων από διαφορετικές ONUs που μεταδίδονται ταυτόχρονα μπορεί ακόμα και να συγκρουστούν. Έτσι, στην ανερχόμενη κατεύθυνση, ένα PON θα πρέπει να εφαρμόσει κάποιο μηχανισμό διαχωρισμού

καναλιών για να αποφύγει τις συγκρούσεις δεδομένων και να διαμοιράσει δίκαια τη χωρητικότητα του καναλιού και τους πόρους της ζεύξης οπτικών ινών.

3.2 Ιστορία των παθητικών οπτικών δικτύων

Οι εξελίξεις στον τομέα των παθητικών οπτικών δικτύων (ειδικά σε θέματα καθιέρωσης προτύπων) κατευθύνονται από δύο ομάδες: το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) και τον τομέα Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Οργανισμού Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – Telecommunication ή ITU-T).

Η πρώτη σχετική πρόταση ήρθε το 1995 (πρότυπο G.983 του ITU-T) και αφορούσε το ATM-PON (Asynchronous Transfer Mode PON - APON) το οποίο προτάθηκε στα πλαίσια του Δικτύου Πρόσβασης Πλήρων Υπηρεσιών (Full Service Access Network - FSAN). Τα πολλά μειονεκτήματα της τεχνολογίας ATM, ωστόσο, δεν την καθιστούσαν κατάλληλη για την υλοποίηση PONs που μεταφέρουν κυρίως κίνηση IP και αυτό έγινε αμέσως εμφανές. Ως αποτέλεσμα, η πρόταση γρήγορα αντικαταστάθηκε από το Broadband PON – BPON και στη συνέχεια το Gigabit PON (GPON), το οποίο έχει καθιερωθεί ως πρότυπο ITU-T G.984. Από το 2010 έχει ξεκινήσει η προτυποποίηση της επόμενης γενιάς GPON, του 10G-PON ή XG-PON.

Παράλληλα με την ITU-T, η IEEE εξέδωσε το 2004 το πρότυπο 802.3ah για την εφαρμογή του Ethernet στο πρώτο μίλι (Ethernet in the First Mile – EFM) το οποίο περιγράφει το Ethernet Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (EPON). Όπως υποδηλώνει το όνομά του, βασίζεται στην ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία του Ethernet.

Οι διαφορές μεταξύ των προτύπων επικεντρώνονται κυρίως στον τρόπο με τον οποίο ενθυλακώνονται τα πακέτα σε πακέτα άλλων επιπέδων. Τα πρότυπα προσδιορίζουν τους ρυθμούς μετάδοσης, την κωδικοποίηση, τις μορφές και τα μεγέθη των πακέτων δεδομένων και ελέγχου και τα μηνύματα που μπορούν να ανταλλάσσουν οι ONUs με το OLT, αλλά δεν καθορίζουν αυστηρά τον τρόπο με τον οποίο ανατίθεται το εύρος ζώνης για μετάδοση. Για αυτόν τον λόγο, το πρόβλημα της δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA) αποτελεί μια ερευνητική περιοχή με μεγάλο ενδιαφέρον.

Σε ένα GPON, τα πακέτα ενθυλακώνονται με χρήση της μεθόδου ενθυλάκωσης Gigabit (Gigabit Encapsulation Method – GEM) και υπάρχει δυνατότητα κατάτμησης των πακέτων δεδομένων, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στην ικανοποίηση αυστηρών απαιτήσεων σε ποιότητα υπηρεσίας που θέτουν οι εφαρμογές. Ωστόσο, αυτό απαιτεί την επανένωση των κατατετμημένων πακέτων στο προορισμό τους, πράγμα που αυξάνει την πολυπλοκότητα. Στα EPONs δε γίνεται κατάτμηση και συνένωση πακέτων, συνεπώς το μέγεθος του πλαισίου

καναλιών για να αποφύγει τις συγκρούσεις δεδομένων και να διαμοιράσει δίκαια τη χωρητικότητα του καναλιού και τους πόρους της ζεύξης οπτικών ινών.

3.2 Ιστορία των παθητικών οπτικών δικτύων

Οι εξελίξεις στον τομέα των παθητικών οπτικών δικτύων (ειδικά σε θέματα καθιέρωσης προτύπων) κατευθύνονται από δύο ομάδες: το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) και τον τομέα Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Οργανισμού Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – Telecommunication ή ITU-T).

Η πρώτη σχετική πρόταση ήρθε το 1995 (πρότυπο G.983 του ITU-T) και αφορούσε το ATM-PON (Asynchronous Transfer Mode PON - APON) το οποίο προτάθηκε στα πλαίσια του Δικτύου Πρόσβασης Πλήρων Υπηρεσιών (Full Service Access Network - FSAN). Τα πολλά μειονεκτήματα της τεχνολογίας ATM, ωστόσο, δεν την καθιστούσαν κατάλληλη για την υλοποίηση PONs που μεταφέρουν κυρίως κίνηση IP και αυτό έγινε αμέσως εμφανές. Ως αποτέλεσμα, η πρόταση γρήγορα αντικαταστάθηκε από το Broadband PON – BPON και στη συνέχεια το Gigabit PON (GPON), το οποίο έχει καθιερωθεί ως πρότυπο ITU-T G.984. Από το 2010 έχει ξεκινήσει η προτυποποίηση της επόμενης γενιάς GPON, του 10G-PON ή XG-PON.

Παράλληλα με την ITU-T, η IEEE εξέδωσε το 2004 το πρότυπο 802.3ah για την εφαρμογή του Ethernet στο πρώτο μίλι (Ethernet in the First Mile – EFM) το οποίο περιγράφει το Ethernet Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (EPON). Όπως υποδηλώνει το όνομά του, βασίζεται στην ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία του Ethernet.

Οι διαφορές μεταξύ των προτύπων επικεντρώνονται κυρίως στον τρόπο με τον οποίο ενθυλακώνονται τα πακέτα σε πακέτα άλλων επιπέδων. Τα πρότυπα προσδιορίζουν τους ρυθμούς μετάδοσης, την κωδικοποίηση, τις μορφές και τα μεγέθη των πακέτων δεδομένων και ελέγχου και τα μηνύματα που μπορούν να ανταλλάσσουν οι ONUs με το OLT, αλλά δεν καθορίζουν αυστηρά τον τρόπο με τον οποίο ανατίθεται το εύρος ζώνης για μετάδοση. Για αυτόν τον λόγο, το πρόβλημα της δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA) αποτελεί μια ερευνητική περιοχή με μεγάλο ενδιαφέρον.

Σε ένα GPON, τα πακέτα ενθυλακώνονται με χρήση της μεθόδου ενθυλάκωσης Gigabit (Gigabit Encapsulation Method – GEM) και υπάρχει δυνατότητα κατάτμησης των πακέτων δεδομένων, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στην ικανοποίηση αυστηρών απαιτήσεων σε ποιότητα υπηρεσίας που θέτουν οι εφαρμογές. Ωστόσο, αυτό απαιτεί την επανένωση των κατατεμημένων πακέτων στο προορισμό τους, πράγμα που αυξάνει την πολυπλοκότητα. Στα EPONs δε γίνεται κατάτμηση και συνένωση πακέτων, συνεπώς το μέγεθος του πλαισίου

μετάδοσης δεν είναι σταθερό. Το γεγονός όμως ότι σε ένα EPON το μικρότερο μέγεθος πακέτου που υποστηρίζεται είναι 64 bytes (ελάχιστο πλαίσιο Ethernet), προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση στα μηνύματα ελέγχου. Το βασικό πλεονέκτημα των EPONs είναι η συμβατότητα με τον υπάρχοντα εξοπλισμό Ethernet.

3.3 Τεχνολογίες διαμοιρασμού καναλιών στα PONs

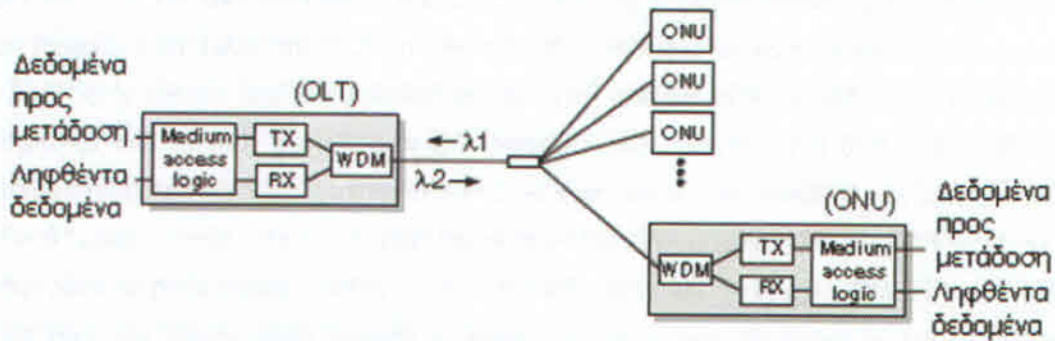
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην καθοδική κατεύθυνση (downstream) το PON είναι ένα δίκτυο ενός σημείου προς πολλαπλά σημεία. Σε αυτή την περίπτωση το OLT έχει στη διάθεση του ολόκληρο το εύρος ζώνης (downstream bandwidth). Αντίστοιχα, στην ανοδική κατεύθυνση (upstream) το PON είναι ένα δίκτυο πολλαπλών σημείων προς σημείο. Οι κατευθυντικές ιδιότητες του παθητικού διαιρέτη είναι τέτοιες, ώστε η μετάδοση μιας ONU να μην μπορεί να ανιχνευτεί από άλλες ONUs, όμως οι ροές δεδομένων από διαφορετικές ONUs που μεταδίδονται ταυτόχρονα μπορούν να συγκρουστούν. Αυτές οι συγκρούσεις οδηγούν σε αλλοιώσεις και απώλειες πακέτων. Για αυτόν τον λόγο στην ανερχόμενη κατεύθυνση θα πρέπει να εφαρμοστεί κάποιος μηχανισμός διαχωρισμού καναλιών, ώστε να μοιράσει δίκαια τη χωρητικότητα του καναλιού και τους πόρους της ζεύξης των οπτικών ινών.

3.3.1 TDMA τεχνολογία στα PONs

Η TDMA (Time Division Multiple Access) τεχνολογία βασίζεται στο διαμερισμό του καναλιού μετάδοσης σε χρονοθυρίδες (παράθυρα μετάδοσης - timeslots) [30]. Σε κάθε ONU ανατίθεται μια χρονοθυρίδα (timeslot). Με αυτόν τον τρόπο κάθε ONU μπορεί να χρησιμοποιεί το κανάλι μετάδοσης για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας TDMA είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης από τις ONUs του ίδιου καναλιού μετάδοσης και η μετάδοση δεδομένων στο ίδιο μήκος κύματος σε διαφορετικά παράθυρα μετάδοσης. Επίσης, σημαντική είναι και η δυνατότητα αλλαγής του εύρους ζώνης που έχει ανατεθεί σε κάθε ONU, με αλλαγή του μεγέθους της χρονοθυρίδας που της έχει ανατεθεί. Μπορεί μέχρι και να εφαρμόσει στατιστική πολυπλεξία για να αξιοποιήσει πλήρως τη χωρητικότητα καναλιού του PON. Τέλος, το χαμηλό κόστος εξοπλισμού των χρηστών, η εύκολη προσθήκη νέων χρηστών στο δίκτυο, καθώς και η σημαντική πρόοδος σχετικά με την τυποποίηση (standardization) και την εφαρμογή της τα τελευταία χρόνια, την καθιστούν ως μία από τις επικρατέστερες τεχνολογίες αυτή τη στιγμή [27].

Για εξοικονόμηση οπτικής ίνας και μείωση του κόστους επιδιόρθωσης και συντήρησης σε ένα PON, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία οπτική ίνα για μετάδοση δύο κατευθύνσεων. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται δύο μήκη κύματος (λ_1 για την ανοδική μετάδοση και

λ_2 για την καθοδική – Σχήμα 3.2). Με τη χρήση της τεχνολογίας καταμερισμού του χρόνου (time sharing) γίνεται δυνατή η διαίρεση της χωρητικότητας του καναλιού για κάθε ONU. Με αυτόν τον τρόπο οι πομποί και οι δέκτες των ONUs είναι συντονισμένοι σε μια συχνότητα λειτουργίας και τελικά χρειάζονται μόνο έναν πομποδέκτη στο OLT για να επικοινωνήσουν.



Σχήμα 3.2: PON που χρησιμοποιεί μια οπτική ίνα [27].

Οι τρεις επικρατέστερες κατηγορίες της τεχνολογίας TDMA για δίκτυα PON είναι οι εξής [27]:

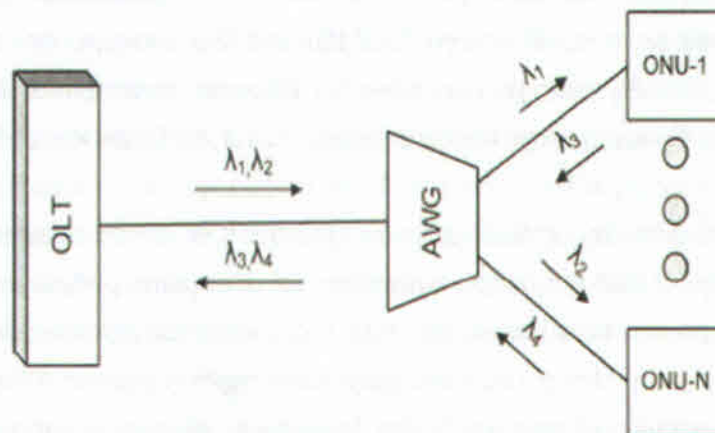
- APON, BPON: Είναι οι πρώτες κατηγορίες PON που εκδόθηκαν το 1995 και τυποποιήθηκαν από την ITU-T με τη προδιαγραφή G.983. Και οι δύο βασίζονται στον ασύγχρονο τρόπο μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode – ATM), ο ρυθμός μετάδοσης καθορίστηκε αρχικά συμμετρικός, με τιμή 155 Mbps για την ανερχόμενη και την κατερχόμενη κατεύθυνση. Αυτό τροποποιήθηκε αργότερα για να επιτρέψει ασύμμετρες, ανοδικές των 155 Mbps και καθοδικές των 622 Mbps μεταδόσεις, καθώς και συμμετρικές μεταδόσεις των 622 Mbps [28]. Το BPON έβρισκε μέχρι πρόσφατα εφαρμογή στα δίκτυα με ρυθμό 622 Mbps στην κατερχόμενη κατεύθυνση και 155 Mbps ή 622 Mbps στην ανερχόμενη και με 32-64 διαμέριση (way split).
- EPON: Αυτή η κατηγορία για τα δίκτυα PON οριστικοποιήθηκε το 2004 και τυποποιήθηκε με τη προδιαγραφή IEEE 802.3ah [29]. Διαφέρει από τις δύο παραπάνω κατηγορίες, επειδή χρησιμοποιεί μόνο το Ethernet σαν πρωτόκολλο του επιπέδου ζεύξης [30]. Επιτρέπει ταχύτητες της τάξης των 1.25 Gbps και φτάνει μέχρι τα 20km απόσταση.
- GPON: Είναι ο επίσημος διάδοχος των APON/BPON, οριστικοποιήθηκε το 2005, με τη προδιαγραφή G.984 και ακόμα αναπτύσσεται. Επιτρέπει ρυθμό μετάδοσης 2.5 Gbps στην κατερχόμενη κατεύθυνση και 1.25 Gbps στην ανερχόμενη. Ακόμη, υποστηρίζει 64-128 διαμέριση. Μπορεί να κάνει χρήση είτε της τεχνολογίας ATM είτε του Ethernet, σαν πρωτόκολλο του επιπέδου ζεύξης δεδομένων. Μπορεί να φτάσει μέχρι τα 60km σε απόσταση [31], [32].

3.3.2 WDMA τεχνολογία στα PONs

Η WDMA (Wavelength Division Multiple Access) τεχνολογία βασίζεται στη διαίρεση του καναλιού μετάδοσης με βάση το μήκος κύματος [26], [33]. Περιγράφεται από την ITU-T με το πρότυπο G.983. Πρακτικά σε αυτή την τεχνολογία βασίζεται η TDMA τεχνολογία, αφού σε μία οπτική ίνα μεταδίδονται σήματα με διαφορετικά μήκη κύματος, ένα για την ανερχόμενη και ένα για την κατερχόμενη κατεύθυνση. Ταυτόχρονα, η WDM αποτελεί την κυρίαρχη μορφή πολυπλεξίας στα δίκτυα κορμού και στα μητροπολιτικά δίκτυα, όπου υποστηρίζονται παραπάνω από 100 διαφορετικά μήκη κύματος. Για παράδειγμα, ένα EPON χρησιμοποιεί μήκος κύματος $\lambda_1=1490\text{nm}$ στην καθοδική και $\lambda_2=1310\text{nm}$ στην ανοδική κατεύθυνση [34].

Σε ένα PON η τεχνολογία WDMA αποτελεί ικανοποιητική λύση, αφού δίνεται η δυνατότητα σε κάθε χρήστη να εκμεταλλευτεί τη συνολική χωρητικότητα ενός μήκους κύματος. Κύριο μειονέκτημά της είναι το αυξημένο κόστος εξοπλισμού του χρήστη που παρουσιάζει, καθώς κάθε χρήστης πρέπει να τοποθετήσει πομπούς laser μεταβλητού μήκους κύματος για να μπορέσει να μεταδώσει σε όποιο μήκος κύματος υποστηρίζει το δίκτυο [33].

Αφού ο κάθε χρήστης έχει στη διάθεση του τη πλήρη χωρητικότητα ενός μήκους κύματος, το WDM-PON μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δίκτυο σημείου προς σημείο. Η αρχιτεκτονική αυτής της τεχνολογίας είναι αρκετά παρόμοια με της TDM τεχνολογίας [35], [34], [32], [31], [36]. Η διαφορά τους είναι ότι το WDM-PON παραχωρεί ένα μήκος κύματος σε κάθε χρήστη, ενώ το TDM-PON παραχωρεί μία χρονοθυρίδα. Επομένως, στο WDM-PON αντί για παθητικό διαιρέτη, έχουμε μια παθητική οπτική συσκευή (Arbitrary Waveform Generator - AWG) που επιτρέπει χωρική διανομή της οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται στο δίκτυο (Σχήμα 3.3) [37], [60].



Σχήμα 3.3: WDM-PON τεχνολογία [27].

3.3.3 OCDMA τεχνολογία στα PONs

Η OCDMA (Optical Code Division Multiple Access) βασίζεται στη διαίρεση του καναλιού μετάδοσης με βάση το διαφορετικό οπτικό κώδικα. Κατά τη μετάδοση, κάθε bit δεδομένων κωδικοποιείται στον πομπό (encoding) για να μεταδοθεί και αντίστοιχα στο δέκτη αποκωδικοποιείται (decoding) για να ανακτηθεί. Αυτές οι διαδικασίες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης συνθέτουν την οπτική κωδικοποίηση (optical coding) [37].

Η τεχνολογία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί από μεγάλο αριθμό χρηστών που μεταδίδουν περιοδικά, αφού η απόδοση αυτής της τεχνολογίας μειώνεται όταν οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα και δημιουργούν παρεμβολές. Επομένως, παρουσιάζεται το πλεονέκτημα της επίτευξης της στατιστικής πολυπλεξίας απευθείας στο φυσικό επίπεδο του δικτύου. Αν εκμεταλλευτεί κατάλληλα αυτή η πολυπλεξία μπορεί να επιτευχθεί και αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος [38]. Επίσης, η OCDMA προσφέρει μεγάλο αριθμό καναλιών και η υποστήριξη επιπρόσθετων χρηστών στο δίκτυο μπορεί να πραγματοποιηθεί με μικρό κόστος, χωρίς να επηρεάζεται το εύρος ζώνης των υπόλοιπων χρηστών.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της OCDMA τεχνολογίας είναι η δυνατότητα ασύγχρονης μετάδοσης που απλοποιεί τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο, σε αντίθεση με την TDMA η οποία απαιτεί αυστηρό συγχρονισμό. Ακόμη συγκριτικά με την TDMA και WDMA, η OCDMA προσφέρει υψηλά επίπεδα ασφαλείας [39].

Παράλληλα όμως παρουσιάζονται και αρκετά μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής που καταφέρνουν να περιορίσουν την εφαρμογή της. Τα σημαντικότερα είναι τα εξής: έχει υψηλό κόστος διατάξεων, η φασματική εξάπλωση μειώνει την απόδοση σε σχέση με την WDMA και η διασπορά λόγω του υψηλού κωδικοποιημένου ρυθμού μετάδοσης του σήματος περιορίζει την απόσταση των ONUs από το OLT.

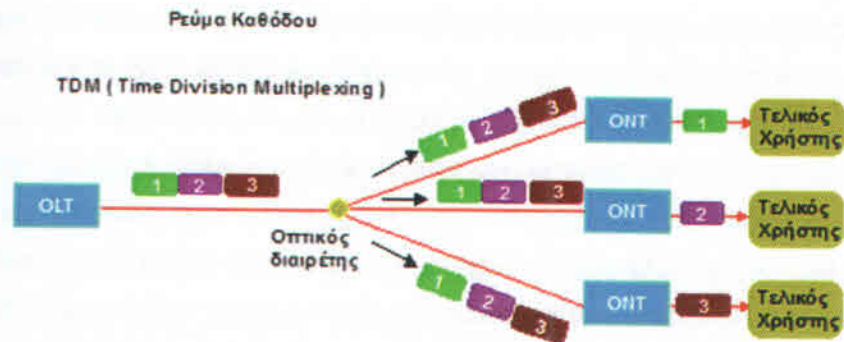
3.4 Τεχνολογίες παθητικών οπτικών δικτύων

3.4.1 APON

3.4.1.1 Χαρακτηριστικά και λειτουργία

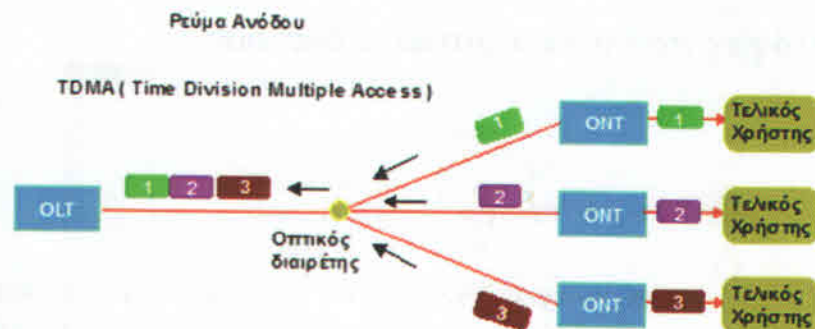
Ο συνδυασμός της τεχνολογίας PON με τον ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM) αναπτύχθηκε το 1995 από την FSAN, διότι θεωρήθηκε τότε ως η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε υπηρεσίες των διαφόρων χρηστών, οπότε δημιουργήθηκαν τα APON τα οποία υποστήριζαν διάφορες αρχιτεκτονικές, όπως τις FTTH, FTTB/C και FTTH/CAB. Η θεώρηση αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι εκείνη την εποχή οι λογικότερες και πιο συμφέρουσες επιλογές ήταν για το τρόπο μεταφοράς δεδομένων ο ATM

και για την τοπολογία των δικτύων πρόσβασης τα δίκτυα PON. Ο ATM θεωρείτο ο καταλληλότερος για να υποστηρίξει πολλαπλά πρωτόκολλα και τα PON η οικονομικότερη ευρυζωνική οπτική λύση. Η πρόταση της FSAN έγινε αποδεκτή ως πρότυπο από την ITU και περιγράφεται στο ITU-T Rec.G.983, όπου δίνονται οι προδιαγραφές για την αρχιτεκτονική, τον εξοπλισμό και τη διαστρωμάτωση του APON και συγκεκριμένα η περιγραφή του υποστρώματος σύγκλισης μετάδοσης δεδομένων και του φυσικού υποστρώματος [40].



Σχήμα 3.4(a): Ρεύμα καθόδου του δικτύου APON [40].

Στο APON με κριτήρια την απλότητα και το κόστος επιλέχθηκαν η τεχνική TDM για την κατερχόμενη ζεύξη και για την πολλαπλή προσπέλαση στο μέσο για την ανοδική ζεύξη η TDMA τεχνική. Στα Σχήματα 3.4(a) και 3.4(b) φαίνονται τα βασικά στοιχεία του δικτύου: το OLT, η ONU/ONT και ο παθητικός διαιρέτης. Στο APON μία οπτική ίνα διαιρείται παθητικά μέχρι και 64 φορές με αποτέλεσμα 64 ONU/ONT να μοιράζονται τη χωρητικότητά της. Η παθητική διαίρεση επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται το εύρος ζώνης και κατ' επέκταση το κόστος. Το κόστος μειώνεται ακόμα περισσότερο με την ελάττωση του αριθμού των οπτικο-ηλεκτρικών στοιχείων που απαιτούνται για το OLT, δεδομένου ότι μια διεπαφή μοιράζονται περισσότερες της μιας ONU/ONT.



Σχήμα 3.4(b): Ρεύμα ανόδου του δικτύου APON [40].

Το APON χρησιμοποιεί τοπολογία διπλού αστέρα. Ο πρώτος αστέρας βρίσκεται στο OLT, όπου η διεπαφή του δικτύου ευρείας ζώνης για τις υπηρεσίες διαιρείται λογικά και

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

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

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

Στο APON χρησιμοποιείται μία οπτική ίνα τόσο για το upstream όσο και για το downstream κανάλι, οπότε χρησιμοποιούνται δύο μήκη κύματος -1550 nm για το downstream κανάλι και 1310nm για το upstream κανάλι. Συμπληρωματικά αναφέρεται ότι θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα μήκος κύματος, η επιλογή όμως για δύο παρέχει καλύτερη οπτική απομόνωση για τους πομπούς και τους δέκτες laser και εξαλείφει την ανάγκη των ακριβών διαιρετών δέσμης φωτός.

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

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

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

3.4.1.2 Οφέλη των APON

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

Στα ATM-PON οι οπτικές διεπαφές βρίσκονται στα OLT, οπότε μία μόνο ίνα χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει μέχρι 64 τελικές τοποθεσίες χρηστών. Συνεπώς, υπάρχει μείωση των οπτικών διεπαφών από 64 σε 1 σε σχέση με τα σημείο προς σημείο (point-to-point) οπτικά συστήματα [40].

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

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

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

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

3.4.2 EPON

3.4.2.1 Χαρακτηριστικά και λειτουργία

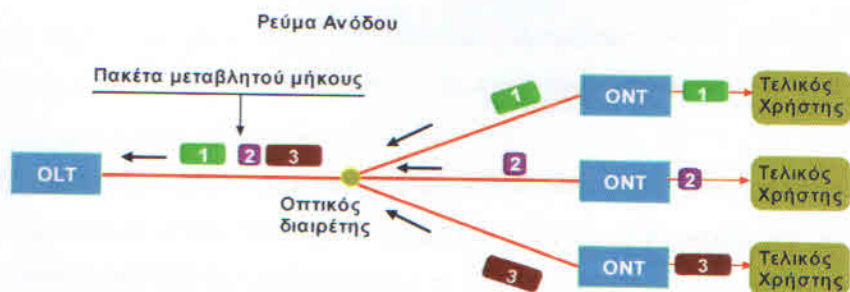
Με το πέρασμα του χρόνου το APON θεωρήθηκε ως ακατάλληλη λύση για τον τοπικό βρόχο εξαιτίας της αδυναμίας του να υποστηρίξει υπηρεσίες video, το ανεπαρκές του εύρος, την πολυπλοκότητά του και το κόστος του. Η ευρεία χρήση του Ethernet έδινε την εντύπωση ότι η χρήση των Ethernet-PON (EPON) θα εξάλειφε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

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

Στο EPON η διαδικασία εκπομπής δεδομένων στην καθοδική κατεύθυνση από το OLT στα ONU είναι διαφορετική από την αντίστοιχη στην ανοδική. Οι διαφορετικές αυτές διαδικασίες φαίνονται στα Σχήματα 3.5(a) και 3.5(b).



Σχήμα 3.5(a): Ρεύμα καθόδου του δικτύου EPON [40].



Σχήμα 3.5(b): Ρεύμα ανόδου του δικτύου EPON [40].

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.5(a) τα δεδομένα εκπέμπονται από το OLT προς τις-ONUs σε πακέτα μεταβλητού μήκους με μέγιστο μήκος 1518 bytes, σύμφωνα με το πρωτόκολλο της IEEE 802.3. Κάθε πακέτο φέρει μία επικεφαλίδα που καθορίζει την ONU στην οποία προορίζεται το πακέτο. Επιπλέον, κάποια πακέτα είναι δυνατό να προορίζονται για όλες τις ONUs (broadcast packets), ενώ άλλα για μία δεδομένη ομάδα ONUs (multicast packets). Στο δεδομένο σχήμα η κίνηση χωρίζεται στο διαιρέτη σε τρία διαφορετικά σήματα που κάθε ένα φέρει όλα τα πακέτα. Όταν τα πακέτα φτάσουν σε μια ONU τότε αυτή δέχεται μόνο τα πακέτα που προορίζονται για αυτήν, ενώ απορρίπτει όλα τα υπόλοιπα πακέτα.

3.4.2.2 Οφέλη των EPON

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

Επιπλέον, τα EPON οδηγούσαν σε μείωση των δαπανών μέσω της εξάλειψης των πολύπλοκων και ακριβών στοιχείων ATM και SONET και δραματική απλοποίηση της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Ακόμα, η εξάλειψη του κόστους συντήρησης των εξωτερικών εγκαταστάσεων, δεδομένου ότι δε χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά στοιχεία σε αυτές λόγω χρήσης των μεγάλης διάρκειας ζωής παθητικών εξαρτημάτων, οδηγούσε σε μείωση της συνολικής δαπάνης. Τέλος, οι διεπαφές Ethernet εξάλειψαν την ανάγκη για επιπλέον DSL ή cable modems, γεγονός που οδηγούσε σε περαιτέρω μείωση του κόστους [40].

Η τεχνολογία EPON δεδομένου ότι μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες, video και φωνής έδινε τη δυνατότητα στους παρόχους να προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών και κατ' επέκταση να αυξήσουν τα έσοδά τους. Συγκεκριμένα, εκτός από τις υπηρεσίες POTS, T1, 10/100BASE-T και DS3, τα EPON υποστηρίζουν και εξελιγμένες λειτουργίες, όπως

μεταγωγή και δρομολόγηση επιπέδου 2 και 3, voice over IP, IP multicast, VPN 802.1Q και κατανομή και μορφοποίηση του εύρους ζώνης. Συνοψίζοντας, τα EPON εξαιτίας της απλότητας τους, που προέρχεται από τη χρήση των τοπολογιών Ethernet, έδιναν τη δυνατότητα στους παρόχους να μπορούν εύκολα να αναπτύσσουν, να προβλέπουν και να διαχειρίζονται τις υπηρεσίες [40].

3.4.3 GPON

Το 2001 η FSAN ξεκίνησε μία προσπάθεια έτσι ώστε να αναγνωριστούν ως standard τα δίκτυα PON τα οποία λειτουργούσαν σε ταχύτητες μεγαλύτερες του 1Gbps. Εκτός από την ανάγκη να υποστηριχθούν υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων το συνολικό πρωτόκολλο θα έπρεπε να είναι ανοιχτό για επανεξέταση, έτσι ώστε η τελική μορφή που αυτό θα λάμβανε να είναι η βέλτιστη και η πιο αποδοτική όσον αφορά στην υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών και λειτουργιών διαχείρισης, συντήρησης και πρόβλεψης. Το αποτέλεσμα της προσπάθειας της FSAN ήταν μία νέα λύση στην αγορά οπτικών δικτύων πρόσβασης, τα GPON, που προσφέρουν πολύ υψηλά bit rates έως και 2.048 Gbps, ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζουν τη μεταφορά πολλαπλών υπηρεσιών, ιδιαίτερα δεδομένων και TDM, σε απλές διατάξεις και με μεγάλη αποδοτικότητα.

Πίνακας 3.1: Συνδυασμοί bit rates για upstream/downstream κανάλια στα GPON [40].

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

Το GPON διατηρεί, όπου αυτό είναι δυνατό, τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που χρονικά προηγήθηκαν αυτού και περιγράφονται στα ITU-T G.982 και τη σειρά G.983.x Recommendations, έτσι ώστε να είναι συμβατό με όλες τις τεχνολογίες PON που προηγήθηκαν. Τα GPON εξαιτίας του μεγάλου εύρους ζώνης που παρέχουν, υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών συμπεριλαμβανομένων υπηρεσιών φωνής, TDM, video, Ethernet, 10/100BASE-T, μισθωμένες γραμμές και επεκτάσεις χωρίς καλώδιο. Επίσης, είναι δυνατό να εξυπηρετήσουν αποστάσεις των 60 km μεταξύ ONT/ONU και OLT, η απόσταση όμως αυτή υπολογίζεται χωρίς να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί του φυσικού μέσου και

αποτελεί τη λογική απόσταση. Σε αντίθεση με την τιμή αυτή η μέγιστη φυσική απόσταση που είναι δυνατό να καλυφθεί είναι ίση με 20 km. Τα GPON υποστηρίζουν 7 διαφορετικά bit rates χρησιμοποιώντας για όλα το ίδιο πρωτόκολλο ([ITU1 03]). Οι δυνατοί συνδυασμοί για το upstream και το downstream κανάλι δίνονται στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 3.1).

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

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

3.5 Μετάβαση σε παθητικά οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς (NG-PON)

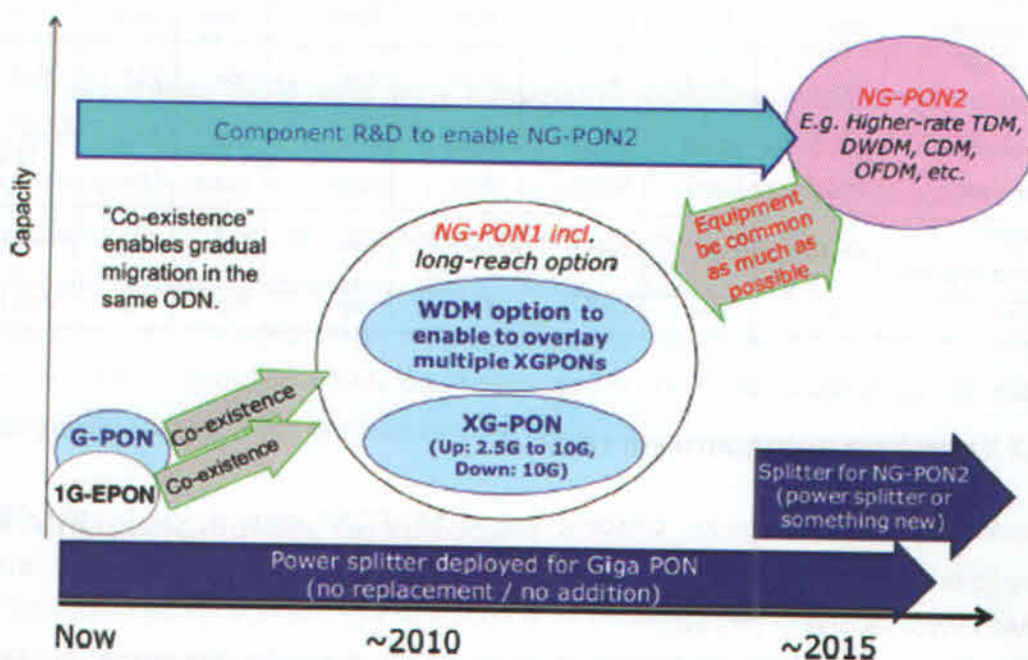
3.5.1 Εισαγωγή

Ξεκινώντας στα τέλη του 2006, η ομάδα FSAN άρχισε να εξετάζει το σύστημα που επρόκειτο να ακολουθήσει μετά το Gigabit PON (GPON). Αρχικά, το επίκεντρο αυτής της εργασίας ήταν η ανάπτυξη τυχόν πρόσθετων προδιαγραφών για το σύστημα GPON, που θα επέτρεπε μια ομαλότερη μετάβαση σε οποιοδήποτε σύστημα ερχόταν αργότερα. Το έργο αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη σύσταση G.984.5, που βελτίωσε το σχέδιο φάσματος για το GPON και όρισε τα φίλτρα παρεμπόδισης στις οπτικές μονάδες δικτύου (ONUs) του GPON, που εμποδίζουν την στιχομυθία (crosstalk) από μη-GPON μήκη κύματος (όπως αυτά που χρησιμοποιούνται από το XG-PON) [41]. Με αυτό το προκαταρκτικό έργο να έχει ολοκληρωθεί, ο τρόπος ήταν σαφής για την εξέταση της επόμενης γενιάς των PONs.

3.5.2 Πεδίο εφαρμογής της επόμενης γενιάς συστημάτων PON

Στα τέλη του 2007, το επίκεντρο μετακινήθηκε προς τον καθορισμό του νέου συστήματος αυτού καθαυτού. Στην αρχή, ένα πολύ ευρύ φάσμα αρχιτεκτονικών τέθηκαν ως πιθανοί υποψήφιοι, συμπεριλαμβανομένων των TDM-PONs, WDM-PONs, CDMA-PONs και άλλων. Αυτό δημιούργησε ένα πρόβλημα στο ότι πολλά από αυτά τα συστήματα είναι αρκετά διαφορετικά στην αρχιτεκτονική και το προφίλ υπηρεσίας, οπότε ήταν δύσκολο να

συγκριθούν με έναν λογικό και αντικειμενικό τρόπο. Η λύση σε αυτό ήταν η διαίρεση των προτάσεων συστήματος σε δύο ομάδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 [42]. Στη πρώτη ομάδα (NG-PON1) περιλαμβάνονται τα συστήματα που θα μπορούσαν να συνυπάρχουν με τα GPON, σχετικά με το ίδιο οπτικό δίκτυο διανομής (Optical Distribution Network – ODN). Στη δεύτερη ομάδα (NG-PON2) περιλαμβάνονται όλα τα άλλα συστήματα, που είτε απαιτούσαν ένα διαφορετικό ODN, είτε απαιτούσαν τεχνολογίες που δεν ήταν διαθέσιμες στον αναμενόμενο χρονικό ορίζοντα. Αυτή η βασική απόφαση σχετικά με το πεδίο εφαρμογής του NG-PON1 επέτρεψε τη σύγκριση ενός λογικού συνόλου των εναλλακτικών συστημάτων.



Σχήμα 3.6: Ορισμός του πεδίου εφαρμογής των NGA1 και NGA2 (γύρω στο 2007) [42].

Τα PONs μπορούν να ταξινομηθούν σε σημερινής γενιάς και σε επόμενης γενιάς PONs. Τα TDM-PONs, τα PONs με λειτουργία ασύγχρονης μεταφοράς (APON), τα ευρυζωνικά PONs (BPON), τα Gigabit capable PONs (GPON) και τα Ethernet PONs (EPON) θεωρούνται ως σημερινές γενιές τεχνολογιών PONs. Η επόμενη γενιά των PONs υπο-κατηγοριοποιείται σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη μελλοντική γενιά PONs: 10GE-PON, XG-PON1 και XG-PON2 είναι η βραχυπρόθεσμη μελλοντική γενιά των PONs, ενώ το WDM-PON και υβριδικά WDM/TDM-PONs είναι η μακροπρόθεσμη μελλοντική γενιά των PONs. Μια σύγκριση μεταξύ διαφορετικών PONs παρουσιάζεται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Σύγκριση διαφόρων PONs [43].

	TDM-PONs							Long term Future generation PON
	Current generation PONs				Short term future generation PONs			
	APON	BPON	EPON	GPON	10GE-PON	XG-PON1	XG-PON2	WDM-PON
Standard	ITU-G.983.1	ITU-G.983.x	IEEE 802.3ah	ITU-G.984.x	IEEE 802.3av	FSAN	FSAN	No Standard
Framing	ATM	ATM	Ethernet	GEM	Ethernet	GEM	GEM	Protocol Independent
Maximum Bandwidth	155 Mbps(↓)	622 Mbps	1.25 Gbps	2.5 Gbps	10 Gbps	10 Gbps	10 Gbps	1-10 Gbps channel
User per PON	16-32	16-32	16-32	32-64	≥64	≥64	≥64	16-32
Bandwidth per user	10-20 Mbps	20-40 Mbps	30-60 Mbps	40-80 Mbps	≥100 Mbps	≥100 Mbps	≥100 Mbps	1-10 Gbps
Power Consumption	Medium	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Very High
Cost	Low	Low	Low	Medium	High	High	High	Very High

3.5.3 Υποψήφια συστήματα και επιλογή

Η ομάδα FSAN συγκέντρωνε επιλογές για το NG-PON1 από τις αρχές του 2008. Οι υποψήφιοι τύποι συστημάτων εξηγούνται λεπτομερώς στο [44]. Εν συντομία, περιλαμβάνονται οι εξής επιλογές:

- Μείωση φυσικής διάσπασης: Αυτό είναι απλά η εφαρμογή του GPON με μικρότερη αναλογία διάσπασης, ώστε να αυξηθεί το εύρος ζώνης ανά πελάτη.
- Μείωση αμφίδρομης διάσπασης WDM: Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί τέσσερα μήκη κύματος στην κατερχόμενη και στην ανερχόμενη διαδρομή, δημιουργώντας 10 Gbps downstream και 5 Gbps upstream.
- Μείωση διάσπασης WDM μόνο στην κατερχόμενη διαδρομή: Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί τέσσερα μήκη κύματος στην κατερχόμενη διαδρομή και μόνο ένα στην ανερχόμενη διαδρομή, για εύρος ζώνης των 10/1.25 Gbps.
- XG-PON1: 10G down, 2.5G up: Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος σε κάθε κατεύθυνση, με το εύρος ζώνης όπως υποδηλώνει το όνομα.
- XG-PON2: 10G συμμετρικό: Αυτό το σύστημα είναι μια έκδοση του XG-PON με συμμετρικό 10 Gbps εύρος ζώνης.

- Προσεγγιστικές ενισχυμένες εκδόσεις των XG-PONs: Αυτό το σύστημα έχει στόχο υψηλότερες οπτικές δυνατότητες, μέσω της χρήσης πιο σφιχτά ελεγχόμενων οπτικών στην ONU.
- Υβριδικό DWDM/XG-PON: Αυτό το σύστημα έχει στόχο την πολυπλεξία πολλών XG-PONs σε μία μεμονωμένη ίνα τροφοδότη, μέσω της χρήσης διασποράς μήκους κύματος.

Όλα αυτά τα συστήματα κρίθηκαν με βάση τα προσόντα τους, με στόχο την επιλογή ενός συστήματος που θα μπορούσε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των περισσότερων, με το χαμηλότερο κόστος και το χαμηλότερο κίνδυνο.

Ορισμένα συστήματα θα μπορούσαν να εξαλειφθούν με βάση μη διατήρηση συμβατότητας με το υπάρχον ODN, όπως σύστημα μείωσης φυσικής διάσπασης και μείωσης διάσπασης WDM μόνο στην κατερχόμενη διαδρομή. Μερικά συστήματα έχουν εξαλειφθεί, επειδή ήταν πάρα πολύ προνοητικά και είχαν πάρα πολύ τεχνικό κίνδυνο, όπως τα XG-PONs μακρινής πρόσβασης και το υβριδικό DWDM/XG-PON. Μερικά συστήματα είχαν εξαλειφθεί επειδή δεν κοιτούσαν αρκετά μπροστά, όπως το σύστημα μείωσης αμφίδρομης διαίρεσης/διάσπασης WDM. Τέλος, μετά από κάποιο χρόνο ορισμένα συστήματα είχαν εξαλειφθεί λόγω ανησυχιών υψηλού κόστους, όπως είναι το XG-PON2 σύστημα. Τελικά, η ομάδα FSAN αποφάσισε ότι το XG-PON1 έμοιαζε με τον καλύτερο υποψήφιο για την ανάπτυξη τυποποίησης.

3.5.4 Απαιτήσεις, παλαιές και καινούριες

Παράλληλα με την εξέταση των υποψηφίων, οι φορείς FSAN θεώρησαν ποιες θα είναι οι απαιτήσεις του συστήματος για το XG-PON. Η βασική θέση είναι ότι το XG-PON θα κληρονομήσει όλες τις απαιτήσεις του GPON, με μερικές προσθήκες.

Φυσικά, η κύρια νέα απαίτηση για το XG-PON που δε βρίσκεται στο σύστημα GPON είναι ότι το XG-PON πρέπει να συνυπάρχει με το GPON σύστημα. Αυτή η βασική απαίτηση έχει εκτεταμένες συνέπειες για το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο πρωτόκολλου.

Ένα σημαντικό νέο χαρακτηριστικό είναι η συμπερίληψη μεγαλύτερης ασφάλειας. Στο αρχικό GPON, το μοντέλο απειλών υποθέτει ότι το ανερχόμενο κανάλι ήταν φυσικά ασφαλές και αυτό παρακινούσε σε μια σχετικά αδύναμη ρύθμιση ασφαλείας. (Αυτό αργότερα ενισχύθηκε σε προαιρετικές τροποποιήσεις στο GPON). Στο XG-PON, το σύστημα PON είναι υποχρεωμένο να στηρίξει την επιλογή της ισχυρής αμοιβαίας πιστοποίησης και να χρησιμοποιήσει την πιστοποίηση για τη προστασία της ακεραιότητας των μηνυμάτων διαχείρισης και των κλειδιών κρυπτογράφησης στο PON. Αυτές οι βελτιώσεις κάνουν αρκετά δύσκολο για έναν εισβολέα να μεταμφιέζεται είτε ως μια ONU, είτε ως ένα οπτικό τερματικό

γραμμής (OLT), ακόμη και αν αυτός έχει πρόσβαση στις ίνες του PON και ακόμα κι αν μπορεί να εναλλάσσει ακριβώς τις μεταδόσεις του με την ONU που έχει πέσει «θύμα».

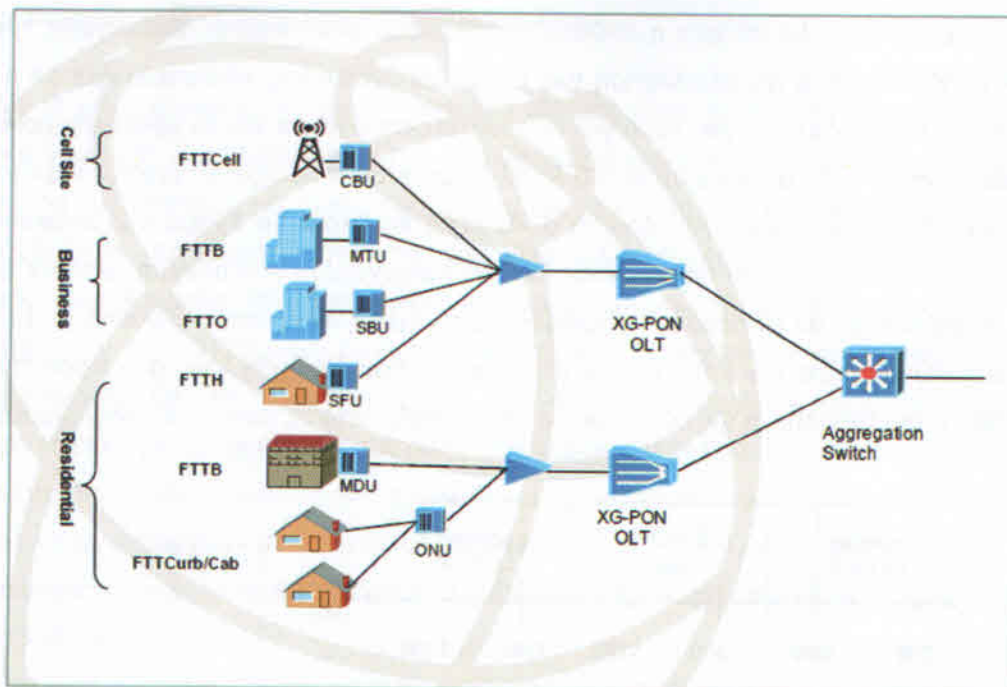
Ένα άλλο νέο χαρακτηριστικό είναι η υποστήριξη εξοπλισμού εξοικονόμησης ενέργειας. Ο πρωταρχικός στόχος της εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μείωση του φορτίου κατά τη διάρκεια διακοπής ρεύματος, έτσι ώστε ένα δεδομένο μέγεθος μπαταρίας να διαρκέσει περισσότερο. Ο δεύτερος στόχος είναι η μείωση της ισχύος ανά πάσα στιγμή, έτσι ώστε η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να μειώνεται στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Η πρώτη μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας είναι η απενεργοποίηση των διασυνδέσεων δικτύου χρήστη (User network interface ή UNI) που δε χρησιμοποιούνται ενεργά. Αυτό είναι αρκετά αποτελεσματικό. Εντούτοις, υπάρχουν ορισμένες φορές κάποιες δυσκολίες στο προσδιορισμό εάν μια UNI είναι πραγματικά αχρησιμοποίητη. Ο δεύτερος τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας επιτυγχάνεται με την απενεργοποίηση του πομπό για μεταδόσεις ρουτίνας στο PON, όταν ο χρήστης δεν έχει πραγματικά δεδομένα για αποστολή (σε αυτόν έχει δοθεί το όνομα «Dozing»). Το τρίτο επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας είναι όταν η ONU απενεργοποιεί τόσο τον πομπό όσο και το δέκτη της, όταν ο χρήστης δεν έχει καμία δραστηριότητα (αυτός ονομάζεται «Sleeping»). Η τελευταία αυτή μορφή, ενώ υπόσχεται να έχει τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, έχει το ζήτημα ότι η νέα δραστηριότητα από πλευράς δικτύου δεν μπορεί να επισημαίνεται στην ONU αμέσως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

Παθητικά οπτικά δίκτυα τύπου XG-PON

4.1 Εισαγωγή

Το 10 Gigabit σύστημα παθητικού οπτικού δικτύου (XG-PON) είναι το νεότερο μέλος της οικογένειας των ITU-T πρότυπων για τα παθητικά οπτικά δίκτυα. Το XG-PON είναι το αποτέλεσμα ενός τριετούς έργου που αφορά την ομάδα δικτύου πρόσβασης πλήρους υπηρεσίας (Full service access network ή FSAN) και την ομάδα μελέτης ITU-T 15 (SG15). Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η μορφή ενός συστήματος XG-PON, καθώς και οι αρχιτεκτονικές δικτύου που υποστηρίζει αυτό.



Σχήμα 4.1: Υποστηριζόμενες αρχιτεκτονικές με το XG-PON G.987.1 πρότυπο.

Για το Σχήμα 4.1 ισχύουν τα εξής → CBU: Cell-site Backhauling Unit, MTU: Multi-Tenant Unit, MDU: Multi-Dwelling Unit. Το πρότυπο του XG-PON υποστηρίζει ελάχιστο ποσοστό διαμορισμού 1:64. Η απόσταση ίνας μεταξύ μιας ONU και του OLT είναι τουλάχιστον 20 χιλιόμετρα, με μέγιστο μήκος ίνας τα 60 χιλιόμετρα και μέγιστη διαφορική απόσταση τα 40 χιλιόμετρα.

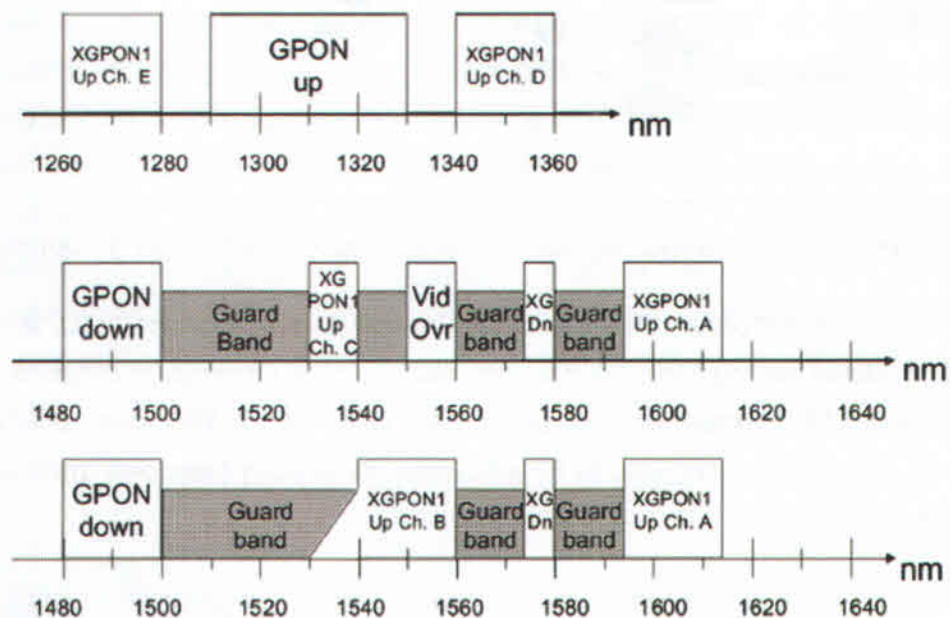
4.2 Φυσικό επίπεδο (PMD)

Το φυσικό επίπεδο, που επίσης συνήθως αναφέρεται ως επίπεδο PMD (Physical media dependent), ήταν ένα αντικείμενο σημαντικών συζητήσεων κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της προδιαγραφής του XG-PON. Ενώ αυτό μπορεί να φαίνεται εκ πρώτης όψεως ότι είναι ένα χαμηλού επιπέδου θέμα μηχανικής, στη πραγματικότητα είναι ένα χαρακτηριστικό του σχεδιασμού που έχει τεράστιες επιπτώσεις στα ορατά στο χειριστή χαρακτηριστικά, όπως η συμβατότητα με τα άλλα συστήματα και με διατάξεις ινών. Αυτή ήταν η κινητήρια δύναμη για την έντονη προσοχή του.

4.2.1 Σχέδιο μήκους κύματος

Το πρώτο θέμα της μεγάλης συζήτησης ήταν το σχέδιο μήκους κύματος. Η βασική κινητήρια δύναμη ήταν η συνύπαρξη με τα υπάρχοντα συστήματα (GPON και επικάλυψη

βίντεο). Πρώτα απ' όλα υπήρχε η επιλογή της μεθόδου συνύπαρξης. Θεωρήθηκε η χρήση TDMA ή WDMA. Μετά την αξιολόγηση των σεναρίων ανάπτυξης, αποφασίστηκε ότι η WDM συνύπαρξη θα χρησιμοποιηθεί τόσο για τα downstream όσο και για τα upstream μονοπάτια του συστήματος. Αυτό σήμαινε ότι το XG-PON θα απαιτούσε δύο ζώνες μήκους κύματος που ήταν αρκετά απομονωμένα από όλα τα άλλα μήκη κύματος. Το Σχήμα 4.2 απεικονίζει τις ζώνες μήκους κύματος που θεωρούνται. Για την κατερχόμενη κατεύθυνση, υπήρξε σχετικά μικρή αμφιβολία αν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια ζώνη 6 nm γύρω από τα 1578 nm. Αυτό συμφωνούσε με την επιλογή μήκους κύματος που έχει ήδη γίνει στο πρότυπο IEEE P802.3av (10G-EPON) και ως εκ τούτου θα επωφεληθεί από τις οικονομίες της κλίμακας.



Σχήμα 4.2: Επιλογές πλάνου μήκους κύματος [42].

Η ανερχόμενη κατεύθυνση, εντούτοις, δεν ήταν τόσο προφανής. Πέντε επιλογές καναλιών θεωρήθηκαν (με την ένδειξη A έως E στο Σχήμα 4.2) [45]. Για άλλη μια φορά, μια διαδικασία επιλογής διεξήχθη για να αποφασιστεί ποιο κανάλι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί. Το Κανάλι A (1595-1615 nm) απορρίφθηκε λόγω των φόβων ότι οι ίνες και τα παθητικά στοιχεία δεν ήταν επαρκώς καθορισμένα σε εκείνα τα μήκη κύματος. Το Κανάλι B (1540-1560 nm) είχε απορριφθεί γιατί είναι ασυμβίβαστο με την επικάλυψη βίντεο και πολλές σημαντικές αναπτύξεις του PON στον κόσμο που χρησιμοποιούν αυτή την επικάλυψη. Το Κανάλι C (1530-1540 nm) απορρίφθηκε επειδή οι ONUs θα είναι δαπανηρές και επειδή οι υπάρχοντες GPON ONUs μπορεί να μην έχουν επαρκή μόνωση κατά αυτό το μήκος κύματος. Το Κανάλι D (1340-1360 nm) δεν επιλέχθηκε επειδή το φίλτρο συνύπαρξης θα απαιτούνταν να είναι αρκετά δύσκολο για να γίνει με μικρή απώλεια. Έτσι, στο τέλος, το κανάλι E (1260-1280 nm) επιλέγεται ως το upstream μήκος κύματος για το XG-PON1 σύστημα.

4.2.2 Ρυθμοί γραμμής, κώδικες και συνύπαρξη

Με τα μήκη κύματος στο χέρι, η επόμενη εξέταση έγινε για την ακριβή ταχύτητα και τον κώδικα γραμμής. Για την κατερχόμενη κατεύθυνση θεωρήθηκαν δύο λύσεις, κυρίως επειδή είχαν ήδη τυποποιηθεί για άλλες εφαρμογές και ήταν ήδη στο εμπόριο. Η πρώτη ήταν ο 9.95328 Gb/s σύγχρονης ψηφιακής ιεραρχίας (SDH ή Synchronous Digital Hierarchy) ρυθμός, που θεωρείται ότι χρησιμοποιεί κωδικοποίηση μη επιστροφής στο μηδέν (NRZ). Η δεύτερη ήταν ο 10.3125 Gb/s Ethernet ρυθμός, που θεωρείται ότι χρησιμοποιεί το μπλοκ κωδικοποίησης 64b66b. Η επιλογή των δύο αυτών συστημάτων εγείρει ένα σημαντικό ζήτημα σχετικά με τη συνύπαρξη του XG-PON. Όπως καλύπτεται από τα παραπάνω, το XG-PON έπρεπε να είναι συμβατό με το GPON και τα συστήματα επικάλυψης βίντεο. Συμβαίνει επίσης να συνυπάρχουν με τα περισσότερα συστήματα 1G-EPON (λόγω της χρήσης WDM). Το ερώτημα λοιπόν έγινε: θα πρέπει το XG-PON επίσης να προσπαθήσει να συνυπάρξει με το 10G-EPON;

Εάν αυτή η κατάσταση πλήρους συνύπαρξης ήταν επιθυμητή, τότε η επιλογή του κώδικα γραμμής θα κατευθυνόταν πολύ απλά ώστε να χρησιμοποιεί τον Ethernet ρυθμό και κώδικα γραμμής. Ωστόσο, οι χειριστές πήραν μια μοιραία απόφαση ότι αυτό το είδος της ενδογενεακής συνύπαρξης δε θα χρειαζόταν. Θεωρήθηκε απίθανο ότι ένας χειριστής θα αναπτύξει τόσο το 10G-EPON όσο και το XG-PON στο ίδιο δίκτυο. Ως εκ τούτου, η κάπως πιο περίπλοκη δυνατότητα να χρησιμοποιούν το Ethernet σύστημα κωδικοποίησης γραμμής για τη μεταφορά της XG-PON κατερχόμενης κίνησης δε προχώρησε και επιλέχθηκε βασισμένος σε SDH ρυθμός και κώδικας.

Στην ανερχόμενη κατεύθυνση θεωρήθηκαν τρεις εναλλακτικές λύσεις. Η πρώτη ήταν να λειτουργήσει η γραμμή στα 3.125 Gb/s, το οποίο είναι 25% πιο γρήγορο από ό, τι το επιθυμητό ωφέλιμο φορτίο των 2.5 Gb/s. Αυτή η υπέρ-βαθμολογία θα πρέπει να χρησιμοποιείται για κωδικοποίηση κατάστασης γραμμής (9b10b) και για την εμπρόσθια διόρθωση λαθών (FEC). Η δεύτερη ήταν να χρησιμοποιηθεί ένας κώδικας γραμμής των 2.577 Gb/s (που είναι το 1/4 των 10.3125 Gb/s στο downstream). Η τρίτη ήταν να τρέχει η γραμμή στα 2.488 Gb/s (που είναι το 1/4 των 9.985 Gb/s στο downstream). Από αυτές τις επιλογές, η πρώτη απορρίφθηκε επειδή οι περισσότεροι από τους προμηθευτές σκέφτηκαν ότι θα ήταν πιο εύκολο να αποκτήσουν οπτικά που τρέχουν στον τυπικό 2.5 Gb/s ρυθμό, αν και αυτά θα χρειαστούν ειδική σχεδίαση τρόπου ριπής. Στη συνέχεια, δίνεται η επιλογή του downstream ρυθμού των 9.985 Gb/s, για τον οποίον ο 2.488 Gb/s upstream ρυθμός ήταν η φυσική επιλογή.

4.2.3 Προϋπολογισμοί της ενέργειας

Το επόμενο αντικείμενο για συζήτηση ήταν ο προϋπολογισμός της ενέργειας. Αυτό το θέμα θα έπρεπε να ήταν αρκετά άμεσο για επίλυση, επειδή το XG-PON υποτίθεται ότι μοιράζεται το ίδιο οπτικό δίκτυο διανομής, όπως το GPON και τα GPON πρότυπα ξεκάθαρα διευκρινίζουν ποια είναι τα χαρακτηριστικά του ODN (28 dB απώλειες στα παράθυρα 1260-1360 και από 1480 έως 1580 nm). Ωστόσο, υπήρχαν δύο αποτελέσματα που έκαναν αδύνατη την άμεση επαναχρησιμοποίηση των ίδιων προδιαγραφών.

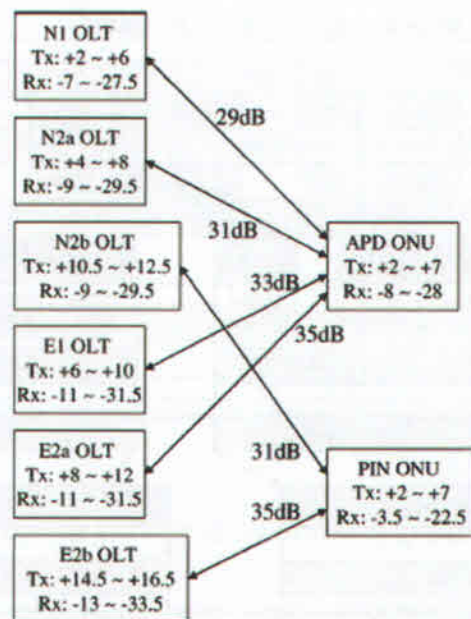
Το πρώτο είναι η εισαγωγή του λεγόμενου φίλτρου WDM1r. Αυτό το φίλτρο, το οποίο καθορίζεται στο G.984.5, είναι το σημείο διασύνδεσης του GPON OLT, του XG-PON OLT, και του ODN (Optical Distribution Network). Όπως και με κάθε πρακτικό WDM φίλτρο, αυτό έχει κάποια απώλεια και η απώλεια αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Τα συστήματα GPON έχουν ήδη αναπτυχθεί και έτσι πρέπει να γίνει κάθε προσπάθεια για την κατασκευή του WDM1r, έτσι ώστε η απώλεια του στο GPON μονοπάτι να ελαχιστοποιείται. Σε ορισμένες απόψεις, αυτό είναι ένα παιχνίδι μηδενικού αθροίσματος, έτσι ώστε αν η απώλεια είναι βελτιστοποιημένη για το GPON, τότε η απώλεια για το XG-PON να αυξηθεί. Εκτιμάται ότι η διαφορά απώλειας θα είναι περίπου 0.5 φορές περισσότερη για το XG-PON για το λόγο αυτό.

Το δεύτερο είναι ότι κάποιες πραγματικές αναπτύξεις στον κόσμο έχουν την τάση να αποκλίνουν από το πρότυπο. Ένας λόγος είναι ότι αναπτύχθηκαν εμπορικά ελκυστικά οπτικά που έχουν λίγο περισσότερο περιθώριο απωλειών από το απαιτούμενο πρότυπο. Προσδιορίστηκε ότι η κοινή τιμή που πράγματι είναι σε χρήση ήταν 29.5 dB. Ένας άλλος παράγοντας ήταν ότι οι επιχειρηματίες σχεδίαζαν τα ODNs τους χρησιμοποιώντας την τιμή 1310 nm της απώλειας ινών και όχι την τιμή 1260 nm της απώλειας ινών (όπως το πρότυπο θα υπαγορεύσει). Υπάρχει περίπου μια διαφορά απώλειας 0.05 dB/km μεταξύ αυτών των δύο μηκών κύματος. Έτσι, ένα PON 20km μπορεί να δει μια μεγαλύτερη απώλεια κατά 1 dB στα 1260 nm από ότι στα 1310 nm. Οι επιχειρηματίες ήταν πρόθυμοι να αποφευχθεί η αναδιοργάνωση των ODNs τους και έτσι επιπλέον περιθώριο απωλειών προστέθηκε στους προϋπολογισμούς του XG-PON.

Με αυτά τα δεδομένα, οι φορείς FSAN εντόπισαν δύο προϋπολογισμούς απωλειών που θεωρήθηκαν «ονομαστικοί» προϋπολογισμοί του PON. Ο λεγόμενος ονομαστικός 1 προϋπολογισμός είναι 29 dB και επιτρέπει το XG-PON να συνυπάρχει με τυποποιημένα GPON (και EPON) συστήματα. Ο ονομαστικός προϋπολογισμός 2 είναι 31 dB και επιτρέπει την συνύπαρξη με τα super-standard 29.5 dB GPON συστήματα.

Στην κορυφή αυτού του ερωτήματος του προϋπολογισμού συνδέσμου υπήρχε το θέμα του τύπου ανιχνευτή στην ONU. Η ONU είναι πολύ ευαίσθητη στο κόστος και κάθε δυνατότητα να μειωθεί το κόστος πρέπει να χρησιμοποιείται. Σε γενικές γραμμές, οι

φωτοανιχνευτές τύπου PIN είναι λιγότερο ακριβοί από τα είδη APD και αυτό τους καθιστά ελκυστικούς. Από την άλλη πλευρά, οι APDs είναι πολύ πιο ευαίσθητοι από τους PINs και αυτό απαιτεί έναν λιγότερο ισχυρό πομπό στο OLT (ένα όφελος για διάφορους πρακτικούς λόγους). Όπως αναπτύχθηκε, αυτή η επιλογή είχε υποστηρικτές και στις δύο πλευρές και ήταν αδύνατο να βγει ένα οριστικό συμπέρασμα. Το πρότυπο καθορίζει ως εκ τούτου τόσο την APD όσο και την PIN λύση για τον ονομαστικό προϋπολογισμό 2. Η προοπτική είναι ότι η βιομηχανία θα αποφασίσει αυτό το ζήτημα στην εμπορική αγορά κατά τα επόμενα χρόνια. Όταν ο νικητής γίνει σαφής, τότε το πρότυπο μπορεί να αναθεωρηθεί ώστε να αντικατοπτρίζει τη πραγματικότητα της εφαρμογής.



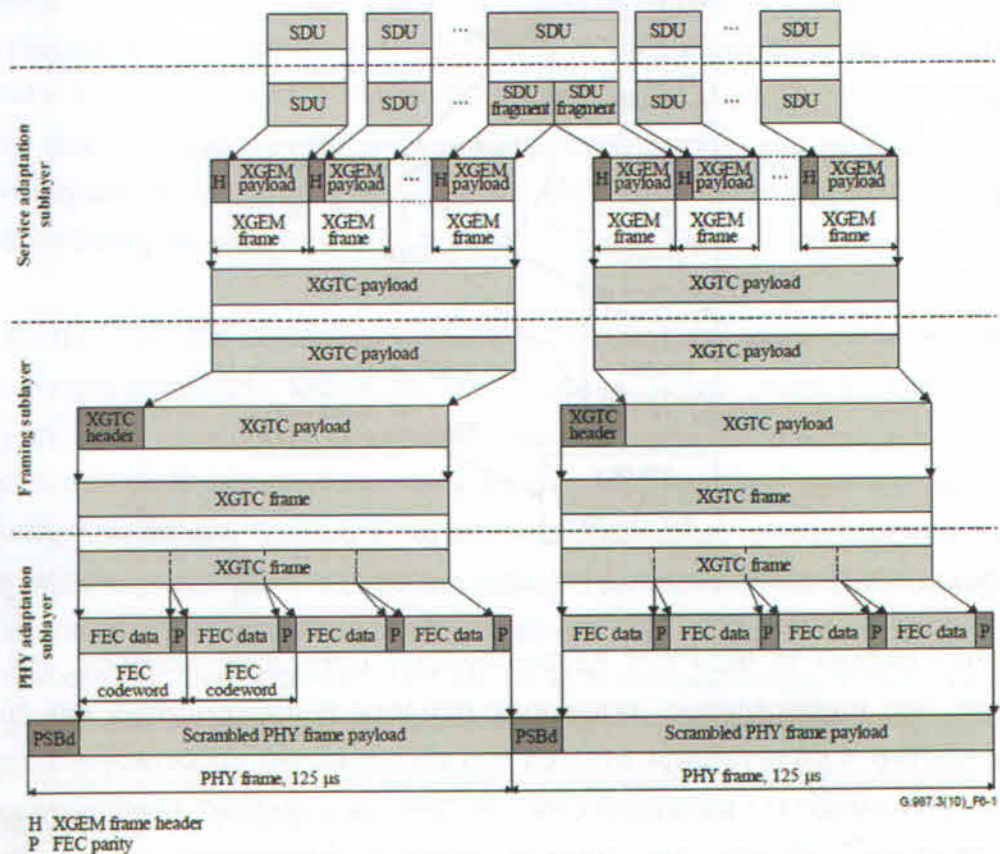
Σχήμα 4.3: Προϋπολογισμοί της ενέργειας στο XG-PON (όλες οι τιμές σε dBm) [42].

Τέλος, υπάρχει το θέμα των προϋπολογισμών εκτεταμένης απώλειας. Στο G-PON σύστημα ένας προϋπολογισμός εκτεταμένης απώλειας που αναπτύχθηκε είχε δύο κύρια χαρακτηριστικά: 4 dB μεγαλύτερη απώλεια από τον ονομαστικό προϋπολογισμό, καθώς και ότι δεν έχουν αλλάξει οι προδιαγραφές της ONU από τον ονομαστικό προϋπολογισμό. Μετά από προσεκτική εξέταση των τεχνικών θεμάτων διαπιστώθηκε ότι τα ίδια αυτά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν στο XG-PON. Δεδομένου ότι υπάρχουν δύο ονομαστικοί προϋπολογισμοί (29 και 31 dB) υπάρχουν επίσης δύο εκτεταμένοι προϋπολογισμοί (33 και 35 dB) και οι δύο παραλλαγές PIN και APD υποστηρίζονται. Το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο τεσσάρων προϋπολογισμών απώλειας που υλοποιούνται με δύο παραλλαγές της ONU και 6 παραλλαγές του OLT, όπως σκιαγραφείται στο Σχήμα 4.3.

4.3 Επίπεδο πρωτοκόλλου

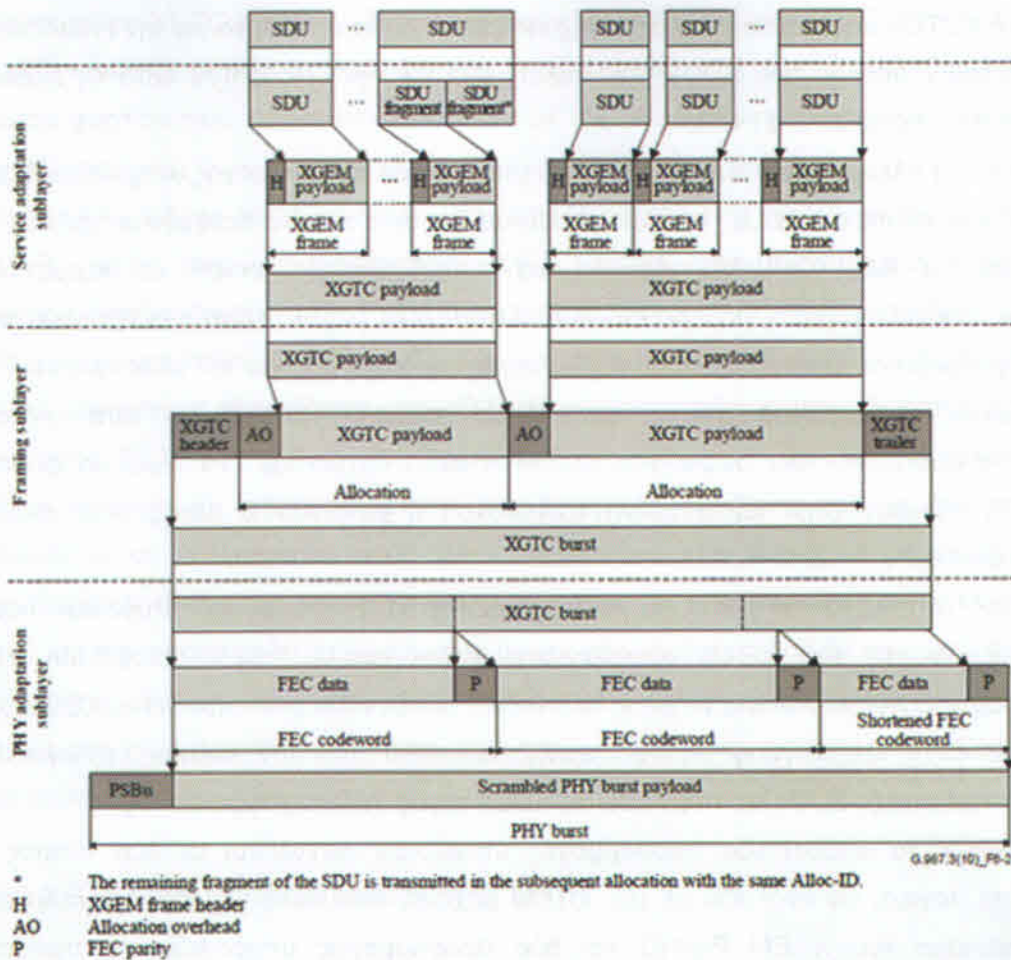
4.3.1 Δομή επιπέδου XGTC

Γενικά, σε ορολογία διασύνδεσης ανοικτών συστημάτων (OSI ή Open Systems Interconnection), μία μονάδα δεδομένων υπηρεσίας (SDU ή Service data unit) είναι μια μονάδα δεδομένων που έχει περάσει κάτω από ένα στρώμα OSI σε ένα κατώτερο στρώμα και που δεν έχει ακόμη ενθυλακωθεί σε μια μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου (PDU ή Protocol Data Unit) δια το κάτω στρώμα. Πρόκειται για ένα σύνολο δεδομένων που αποστέλλονται από ένα χρήστη των υπηρεσιών ενός δεδομένου στρώματος και μεταδίδεται σημασιολογικά αμετάβλητη σε ένα ισάξιο χρήστη υπηρεσιών.



Σχήμα 4.4: Χαρτογράφηση των SDUs στην κατερχόμενη κατεύθυνση [46].

Το επίπεδο XGTC (XG-PON Transmission Convergence) είναι ένα μέρος της στοίβας πρωτοκόλλων του XG-PON που καθορίζει τις μορφές και τις διαδικασίες της χαρτογράφησης μεταξύ των άνω επιπέδων SDUs (Μονάδες Υπηρεσιών Δεδομένων), από τη μία πλευρά και τις ροές των bits που είναι κατάλληλες για τη διαμόρφωση του οπτικού φορέως, από την άλλη πλευρά.



Σχήμα 4.5: Χαρτογράφηση των SDUs στην ανερχόμενη κατεύθυνση [46].

Το επίπεδο XGTC αποτελείται από τρία υποεπίπεδα: το XGTC υποεπίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών, το XGTC υποεπίπεδο πλαισίωσης και το XGTC υποεπίπεδο προσαρμογής PHY. Το επίπεδο XGTC είναι παρόν τόσο στη πλευρά του OLT όσο και στις ONUs ενός συστήματος XG-PON. Προς την κατερχόμενη κατεύθυνση, η διασύνδεση μεταξύ του επιπέδου XGTC και του επιπέδου PMD (Physical media dependent) αντιπροσωπεύεται από μια συνεχή ροή bits στον ονομαστικό ρυθμό διεπαφής, ο οποίος είναι χωρισμένος σε πλαίσια των 125 μs. Προς την ανερχόμενη κατεύθυνση, η διασύνδεση μεταξύ του επιπέδου XGTC και του επιπέδου PMD αντιπροσωπεύεται από μία ακολουθία από ακριβείς χρονισμένες ριπές. Τα βασικά στάδια που εμπλέκονται στη χαρτογράφηση μεταξύ των άνω επιπέδων SDUs και της ροής των bits του PHY για τις κατερχόμενη και ανερχόμενη κατευθύνσεις φαίνονται στα Σχήματα 4.4 και 4.5, αντίστοιχα.

4.3.1.1 XGTC υποεπίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών

Το XGTC υποεπίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών είναι υπεύθυνο για την ενθυλάκωση του ανώτερου επιπέδου των SDUs, την πολυπλεξία και την οριοθέτηση κατά τη διάρκεια της μετάδοσης πάνω σε ένα PON.

Από τη πλευρά του πομπού, το XGTC υποεπίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών δέχεται τις ανώτερου επιπέδου SDUs, που εκπροσωπούνται από πακέτα δεδομένων χρήστη και την κυκλοφορία OMCI (ONU Management and Control Interface), εκτελεί κατακερματισμό των SDUs αν είναι αναγκαίο, εκχωρεί ένα XGEM Port-ID σε μια SDU ή σε ένα θραύσμα της SDU και εφαρμόζει σε αυτό τη μέθοδο ενθυλάκωσης του XG-PON, για την ανάκτηση ενός XGEM πλαισίου. Το ωφέλιμο φορτίο του XGEM πλαισίου μπορεί να είναι προαιρετικά κρυπτογραφημένο. Μια σειρά από XGEM πλαίσια σχηματίζει ένα ωφέλιμο φορτίο ενός XGTC πλαισίου στην κατερχόμενη κατεύθυνση ή μιας XGTC ριπής στην ανερχόμενη κατεύθυνση.

Από τη πλευρά του δέκτη, το XGTC υποεπίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών δέχεται το ωφέλιμο φορτίο των XGTC πλαισίων και ριπών, εκτελεί XGEM οριοθέτηση πλαισίου, φιλτράρει τα XGEM πλαίσια με βάση το XGEM Port-ID, αποκρυπτογραφεί το XGEM ωφέλιμο φορτίο αν η κρυπτογράφηση έχει πραγματοποιηθεί από τον πομπό, επανασυνδέει τις αποσπασματικές SDUs και παραδίδει τις SDUs στους αντίστοιχους πελάτες.

Καθώς το υποεπίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών ασχολείται με δύο τύπους SDUs, μπορεί, λογικά, να αναλυθεί σε μια XGEM μηχανή, υπεύθυνη για την πολυπλεξία και το φιλτράρισμα του XGEM Port-ID και δύο προσαρμογείς υπηρεσιών: το προσαρμογέα δεδομένων του χρήστη και το προσαρμογέα OMCI. Ο προσαρμογέας δεδομένων χρήστη μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να φιλοξενήσει μια ποικιλία, άνω επιπέδου, διεπαφών μεταφοράς.

4.3.1.2 XGTC υποεπίπεδο πλαισίωσης

Το XGTC υποεπίπεδο πλαισίωσης είναι υπεύθυνο για την κατασκευή και την ανάλυση των υπεράνω πεδίων που υποστηρίζουν την απαραίτητη λειτουργικότητα διαχείρισης ενός PON. Οι μορφοποιήσεις των πλαισίων έχουν επινοηθεί έτσι ώστε τα πλαίσια και τα στοιχεία τους να έχουν 4-byte μέγεθος λέξεων, όποτε είναι δυνατόν.

Από τη πλευρά του πομπού, το XGTC υποεπίπεδο πλαισίωσης δέχεται πολλαπλές σειρές XGEM πλαισίων, τα οποία σχηματίζουν το XGTC ωφέλιμο φορτίο, από το XGTC υποεπίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών και κατασκευάζει το downstream XGTC πλαίσιο ή την upstream XGTC ριπή, παρέχοντας ενσωματωμένα OAM (Operation, Administration and Management) και PLOAM υπεράνω πεδία καναλιού μηνυμάτων. Το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του κάθε downstream XGTC πλαισίου λαμβάνεται αφαιρώντας το μεταβλητό μέγεθος του upstream εύρους ζώνης της υπεράνω διαχείρισης και το PLOAM (Physical Layer Operation, Administration and Management) φορτίο καναλιού από το σταθερό μέγεθος

του downstream XGTC πλαισίου. Στην ανερχόμενη κατεύθυνση, μια XGTC ριπή πολυπλέκει τα XGTC ωφέλιμα φορτία που συνδέονται με πολλαπλά Alloc-IDs, το μέγεθος του κάθε ωφέλιμου φορτίου που προσδιορίζεται με βάση την εισερχόμενη πληροφορία διαχείρισης εύρους ζώνης.

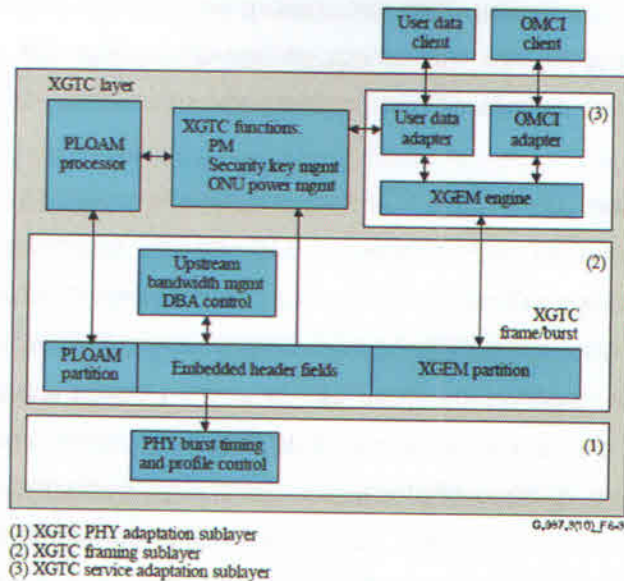
Από τη πλευρά του δέκτη, το XGTC υποεπίπεδο πλαισίωσης δέχεται τα XGTC πλαίσια ή τις XGTC ριπές, αναλύει τα υπεράνω XGTC πεδία, αποσπώντας την εισερχόμενη ενσωματωμένη διαχείριση και τις PLOAM ροές μηνυμάτων και παραδίδει τα XGTC ωφέλιμα φορτία στο υποεπίπεδο προσαρμογής των υπηρεσιών. Η εισερχόμενη ροή του PLOAM καναλιού μηνυμάτων παραδίδεται στην PLOAM μηχανή επεξεργασίας. Οι ενσωματωμένες πληροφορίες OAM στο βαθμό που σχετίζονται με διαχείριση upstream εύρους ζώνης (BWmap parsing) και η σηματοδότηση της δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης (DBA) υποβάλλονται σε επεξεργασία εντός του υποεπιπέδου πλαισίωσης, παρέχοντας μερικό έλεγχο στο υποεπίπεδο προσαρμογής PHY (χρονισμός της upstream PHY ριπής και έλεγχος προφίλ) και στο υποεπίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών (ένδειξη κλειδιού κρυπτογράφησης). Οι υπόλοιπες από τις ενσωματωμένες πληροφορίες OAM παραδίδονται στις οντότητες ελέγχου εκτός του υποεπιπέδου πλαισίωσης, όπως η διαχείριση ενέργειας στην ONU και το μπλοκ παρακολούθησης απόδοσης.

4.3.1.3 XGTC υποεπίπεδο προσαρμογής PHY

Το υποεπίπεδο προσαρμογής PHY περιλαμβάνει τις λειτουργίες που τροποποιούν την ροή των bits, διαμορφώνοντας τον οπτικό πομπό με στόχο να βελτιώσει τις ιδιότητες ανίχνευσης, υποδοχής και οριοθέτησης του σήματος που μεταδίδεται επί του οπτικού μέσου.

Από τη πλευρά του πομπού, το υποεπίπεδο προσαρμογής PHY αποδέχεται τα XGTC πλαίσια (στην κατερχόμενη κατεύθυνση) ή τις XGTC ριπές (στην ανερχόμενη κατεύθυνση) από το XGTC υποεπίπεδο πλαισίωσης, τα χωρίζει σε FEC (Forward Error Correction) μπλοκ δεδομένων, υπολογίζει και προσαρτεί το πεδίο ισοτιμίας FEC σε FEC μπλοκ δεδομένων, εκτελεί κρυπτογράφηση του FEC-προστατευμένου περιεχομένου, τοποθετεί μπροστά το μπλοκ φυσικού συγχρονισμού κατάλληλο για την downstream (PSBd) ή την upstream (PSBu) μετάδοση και παρέχει ευθυγραμμισμένο χρονοδιάγραμμα της προκύπτουσας ροής των bits.

Στη πλευρά του δέκτη, το υποεπίπεδο προσαρμογής PHY εκτελεί φυσικό συγχρονισμό και οριοθέτηση της εισερχόμενης ροής των bits, αποκωδικοποιεί το περιεχόμενο του PHY πλαισίου ή της ριπής, εκτελεί εμπρόσθια διόρθωση σφαλμάτων και εξάγει τα σύμβολα ισοτιμίας FEC, παραδίδοντας τα προκύπτοντα XGTC πλαίσια (στην κατερχόμενη κατεύθυνση) ή τις XGTC ριπές (στην ανερχόμενη κατεύθυνση) προς το XGTC υποεπίπεδο πλαισίωσης.



Σχήμα 4.6: Σκιαγράφιση της ροής πληροφοριών του XGTC [46].

Η χρήση του FEC βελτιώνει την αποτελεσματική ευαισθησία και τα χαρακτηριστικά υπερφόρτωσης του οπτικού δέκτη εισάγοντας πλεονασμό στη μεταδιδόμενη ροή των bits και αφήνοντας το δέκτη να λειτουργεί σε υψηλότερο επίπεδο BER (Bit Error Rate). Η κρυπτογράφηση της ροής bit τυχαίοποιεί τη μετάδοση και βοηθά στη βελτίωση της «ασυλίας» των συνεχόμενων ίδιων ψηφίων (CID).

Ένα άλλο θέμα που θα μπορούσε τυπικά να ανήκει στο πεδίο εφαρμογής του υποεπιπέδου προσαρμογής PHY είναι η κωδικοποίηση της γραμμής. Όπως αναφέρεται στο [ITU-T G.987.2] [47], ο κώδικας της κατερχόμενης και ανερχόμενης γραμμής που χρησιμοποιείται σε XG-PON1 είναι μη-επιστροφής στο μηδέν (non-return to zero ή NRZ), έχει τιμή μονάδας και δεν εξετάζεται περαιτέρω στη σύσταση [ITU-T G.987.3] [46].

4.3.2 Διαχείριση ενός συστήματος XG-PON

Οι πληροφορίες ελέγχου, λειτουργίας και διαχείρισης σε ένα σύστημα XG-PON μεταφέρονται πάνω σε τρία κανάλια: το ενσωματωμένο OAM, το PLOAM και το OMCI. Τα ενσωματωμένα κανάλια OAM και PLOAM διαχειρίζονται τις λειτουργίες των PMD και XGTC επιπέδων. Το OMCI παρέχει ένα ενιαίο σύστημα για τη διαχείριση των υψηλότερων (καθοριστικά υπηρεσιών) επιπέδων.

4.3.2.1 Ενσωματωμένο OAM

Το ενσωματωμένο OAM κανάλι παρέχεται από σαφώς καθορισμένα πεδία κεφαλίδας και ενσωματωμένες δομές του downstream XGTC πλαισίου και της upstream XGTC ριπής. Αυτό

το κανάλι προσφέρει ένα χαμηλά λανθασμένο μονοπάτι για τις επείγουσες πληροφορίες ελέγχου, επειδή κάθε κομμάτι πληροφοριών απεικονίζεται απευθείας σε ένα συγκεκριμένο πεδίο. Οι λειτουργίες που χρησιμοποιούν αυτό το κανάλι περιλαμβάνουν: χρονοδιάγραμμα ριπών PHY και έλεγχο προφίλ, κατανομή εύρους ζώνης, κρυπτογράφηση δεδομένων και επιλογή κλειδιού, δυναμική κατανομή εύρους ζώνης σηματοδότησης, εξαναγκασμένη «αφύπνιση» και την υπόδειξη του κενού «νεκροποίησης» για την ανερχόμενη κίνηση.

4.3.2.2 Κανάλι PLOAM

Το κανάλι PLOAM είναι βασισμένο σε μηνύματα και διεξάγεται σε ειδικό χώρο του downstream XGTC πλαισίου και της upstream XGTC ριπής. Αυτό το κανάλι χρησιμοποιείται για όλες τις PMD και XGTC πληροφορίες διαχείρισης που δεν έχουν σταλεί μέσω του ενσωματωμένου καναλιού OAM.

4.3.2.3 Διεπαφή διαχείρισης και ελέγχου της ONU (OMCI)

Το κανάλι (OMCC) διεπαφής διαχείρισης και ελέγχου της ONU (OMCI) χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των επιπέδων καθορισμού υπηρεσιών που βρίσκονται πάνω από το XGTC. Ωστόσο, το επίπεδο XGTC πρέπει να παρέχει μια βασισμένη σε XGEM διεπαφή μεταφοράς αυτής της διαχείρισης κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης των κατάλληλων αναγνωριστικών ροής για το πρωτόκολλο μεταφοράς (XGEM Port-ID). Η σύσταση [ITU-T G.987.3] [46] ορίζει ένα μηχανισμό μορφής και μεταφοράς για το κανάλι OMCI. Η λεπτομερής προδιαγραφή για το OMCI μπορεί να βρεθεί στο [ITU-T G.988] [48].

Ο προσαρμογέας του OMCI στην ONU είναι υπεύθυνος για το φιλτράρισμα και την απενθυλάκωση των OMCI μεταφερθέντων XGEM πλαισίων στην κατερχόμενη κατεύθυνση και την ενθυλάκωση των OMCI SDUs στην ανερχόμενη κατεύθυνση. Οι OMCI SDUs μεταβιβάζονται με τη λογική που εφαρμόζουν οι OMCI λειτουργίες.

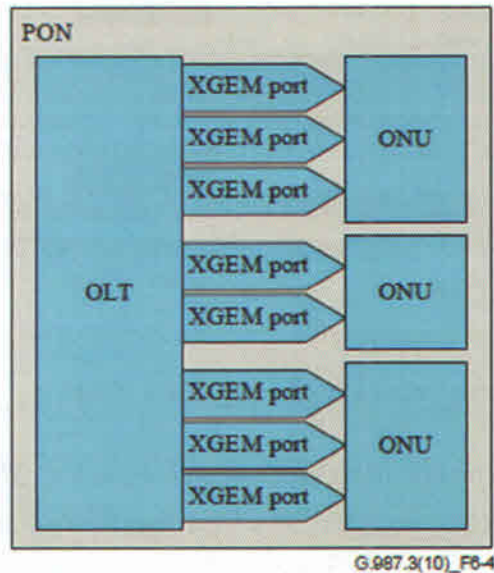
Ο προσαρμογέας OMCI στο OLT είναι υπεύθυνος για το φιλτράρισμα και την απενθυλάκωση των OMCI μεταφερθέντων XGEM πλαισίων στην upstream κατεύθυνση, και την ενθυλάκωση των OMCI SDUs από την OMCI λογική ελέγχου σε OMCI XGEM πλαίσια για μεταφορά προς στην ONU.

4.3.3 Αρχιτεκτονική πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου

4.3.3.1 Επισκόπηση

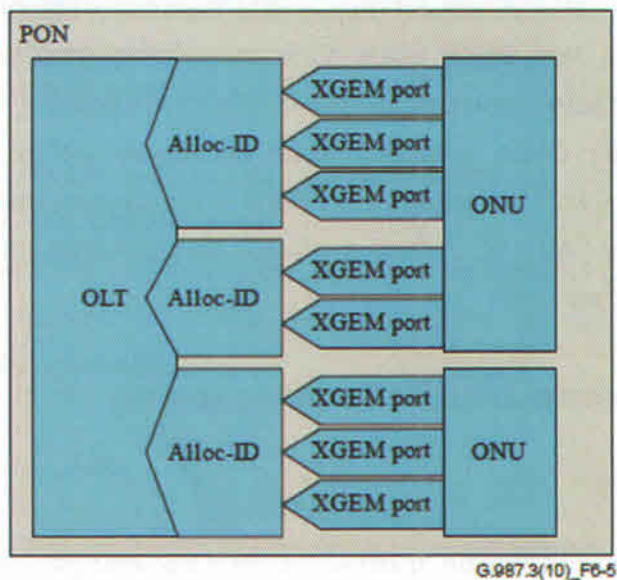
Στην κατερχόμενη κατεύθυνση, η λειτουργικότητα πολυπλεξίας κίνησης είναι κεντρική. Το OLT πολυπλέκει τα XGEM πλαίσια πάνω στο μέσο μετάδοσης χρησιμοποιώντας το XGEM

Port-ID ως κλειδί για τον εντοπισμό των XGEM πλαισίων που ανήκουν σε διαφορετικές λογικές κατερχόμενες συνδέσεις. Κάθε ONU φιλτράρει τα XGEM πλαίσια της κατερχόμενης κίνησης, βάση των XGEM Port-ID τους και επεξεργάζεται μόνο τα XGEM πλαίσια που ανήκουν σε αυτήν την ONU. Μια multicast XGEM θύρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά XGEM πλαισίων σε περισσότερες από μια ONU.



Σχήμα 4.7: Πολυπλεξία downstream κίνησης στο XG-PON [46].

Στην ανερχόμενη κατεύθυνση, η λειτουργικότητα πολύπλεξης κίνησης διανέμεται. Το OLT χορηγεί upstream ευκαιρίες μετάδοσης, ή upstream κατανομή εύρους ζώνης στις οντότητες που φέρουν κίνηση εντός της υποτείνουσας ONU.



Σχήμα 4.8: Πολυπλεξία upstream κίνησης στο XG-PON [46].

Οι οντότητες της ONU που φέρουν κίνηση οι οποίες είναι αποδέκτες της κατανομής εύρους ζώνης της ανερχόμενης κίνησης, προσδιορίζονται από τα αναγνωριστικά της κατανομή τους (Alloc-ID). Οι κατανομές εύρους ζώνης σε διαφορετικές ταυτότητες Alloc-IDs πολυπλέκονται στο χρόνο, όπως καθορίζεται από το OLT στους χάρτες εύρους ζώνης για τη μεταδιδόμενη κατερχόμενη κίνηση. Σε κάθε κατανομή εύρους ζώνης, η ONU χρησιμοποιεί το XGEM Port-ID ως κλειδί πολυπλεξίας για τον εντοπισμό των XGEM πλαισίων που ανήκουν σε διαφορετικές λογικές ανερχόμενες συνδέσεις.

4.3.3.2 Αναγνωριστικό της ONU (ONU-ID)

Το ONU-ID είναι ένα 10-bit αναγνωριστικό, που το OLT αναθέτει σε μια ONU κατά τη διάρκεια ενεργοποίησης της ONU, χρησιμοποιώντας το κανάλι μηνυμάτων PLOAM.

Το ONU-ID είναι μοναδικό σε ένα PON. Όταν μια ONU εισέρχεται στην αρχική κατάσταση (O1) της μηχανής καταστάσεων ενεργοποίησης της ONU, απορρίπτει τα προηγουμένως ανατεθέντα ONU-ID μαζί με όλες τις εξαρτώμενες εργασίες από το XGTC επίπεδο πλαισίωσης [46].

4.3.3.3 Αναγνωριστικό κατανομής (Alloc-ID)

Το αναγνωριστικό κατανομής (Alloc-ID) είναι ένας 14-bit αριθμός που αποδίδει το OLT σε μια ONU, ώστε να προσδιορίσει μια οντότητα (που φέρει κίνηση) που είναι αποδέκτης των κατανομών εύρους ζώνης της ανερχόμενης κίνησης, εντός της εν λόγω ONU. Μία τέτοια οντότητα που φέρει κίνηση μπορεί να αντιπροσωπευτεί είτε από ένα T-CONT (Transmission Container) ή από το upstream OMCC [46]. Γενικά, ένα T-CONT είναι μια οντότητα που αντιπροσωπεύει μια ομάδα από λογικές συνδέσεις που εμφανίζονται ως μια ενιαία οντότητα για το σκοπό της ανερχόμενης ανάθεσης εύρους ζώνης σε ένα σύστημα PON. Ενώ σε πολλές περιπτώσεις, η χαρτογράφηση μεταξύ των T-CONTs και των Alloc-IDs είναι ένα-προς-ένα, μιλώντας αυστηρά, είναι το Alloc-ID και όχι ένα T-CONT, το οποίο είναι ορατό στο επίπεδο TC του συστήματος.

Σε κάθε ONU ανατίθενται ένα ή περισσότερα Alloc-IDs συμπεριλαμβανομένου τουλάχιστον του προεπιλεγμένου Alloc-ID. Το προεπιλεγμένο Alloc-ID της ONU είναι αριθμητικά ίσο με το ONU-ID της και αποδίδεται έμμεσα, δυνάμει της ανάθεσης του ONU-ID. Το προεπιλεγμένο Alloc-ID φέρει την ανερχόμενη OMCC κίνηση και μπορεί να διακινήσει δεδομένα χρηστών. Το προεπιλεγμένο Alloc-ID χρησιμοποιείται επίσης για αποκλειστικά PLOAM κατανομές σε μια συγκεκριμένη ONU. Το προεπιλεγμένο Alloc-ID δεν μπορεί να αποχαρακτηριστεί από εκεί όπου έχει διατεθεί ή να αλλάξει.

Ένα Alloc-ID είναι μοναδικό για ένα δεδομένο PON και μπορεί να αποδοθεί σε πολύ μια ONU. Όταν μια ONU εισέρχεται στην αρχική κατάσταση (O1) της μηχανής ενεργοποίησης της ONU, απορρίπτει όλες τις αναθέσεις Alloc-ID, συμπεριλαμβανομένης και της ανάθεσης του προκαθορισμένου Alloc-ID [46].

4.3.3.4 Αναγνωριστικό XGEM θύρας

Το αναγνωριστικό XGEM θύρας, ή XGEM Port-ID, είναι ένας 16-bit αριθμός που εκχωρείται από το OLT σε μια ξεχωριστή λογική σύνδεση. Η ανάθεση XGEM Port-ID της OMCC λογικής σύνδεσης είναι έμμεση, δυνάμει της ανάθεσης ONU-ID για τη συγκεκριμένη ONU. Το OMCC Port-ID είναι αριθμητικά ίσο με το αντίστοιχο ONU-ID. Όλες οι άλλες XGEM Port-ID αναθέσεις για την ONU γίνονται μέσω του OMCC.

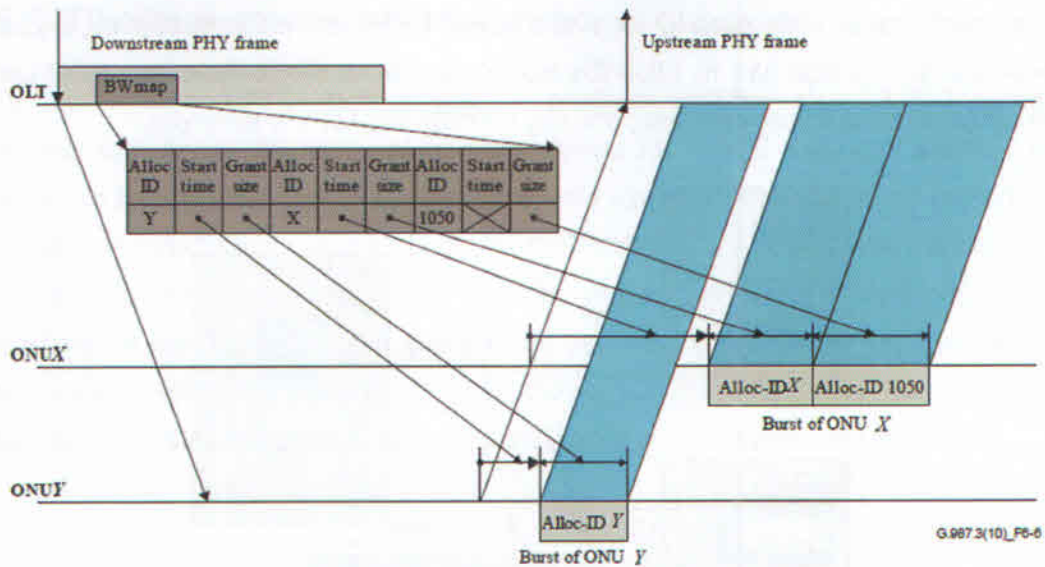
Όταν μια ONU εισέρχεται στην αρχική κατάσταση (O1) της μηχανής ενεργοποίησης της ONU, απορρίπτει τη προεπιλεγμένη XGEM Port-ID ανάθεση, αλλά διατηρεί το ήδη εκχωρηθέν, μη προεπιλεγμένο, XGEM Port-ID [46].

4.3.4 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο (Media Access Control ή MAC)

Σε ένα σύστημα XG-PON, το OLT παρέχει έλεγχο πρόσβασης στο μέσο για την ανερχόμενη κίνηση. Στη βασική έννοια, κάθε downstream PHY πλαίσιο περιέχει έναν χάρτη εύρους ζώνης (BWmap), που δείχνει τη θέση για upstream μεταδόσεις από διάφορες ONUs στο αντίστοιχο upstream PHY πλαίσιο. Η έννοια του ελέγχου πρόσβασης στο μέσο σε ένα σύστημα XG-PON απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9.

Το OLT μεταδίδει ένα downstream PHY πλαίσιο κάθε 125 μs. Λόγω της μεταβαλλόμενης απόστασης της ίνας, κάθε δεδομένο PHY πλαίσιο φτάνει σε διαφορετικές ONUs σε γενικά διαφορετικές χρονικές στιγμές. Με κάθε ληφθέν downstream PHY πλαίσιο, μια ONU συνδέεται με το αντίστοιχο upstream PHY πλαίσιο. Οι επιμέρους καθυστερήσεις εξισορρόπησης που καθορίζονται κατά τη διάρκεια αποστασιομέτρησης της ONU, χρησιμεύουν για την ευθυγράμμιση της άποψης της ONU κατά την έναρξη κάθε upstream PHY πλαισίου, κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι upstream μεταδόσεις από οποιοδήποτε δύο ONUs, που συμβαίνουν σε ένα σταθερό μετατοπισμένο διάστημα σε σχέση με την έναρξη του upstream PHY πλαισίου, να φθάσουν στο OLT ακριβώς την ίδια στιγμή.

Για κάθε PHY πλαίσιο, το OLT δημιουργεί και μεταδίδει έναν downstream BWmap που καθορίζει μια ακολουθία από μη-επικαλυπτόμενες upstream μεταδόσεις από διαφορετικές ONUs. Ένας BWmap περιέχει μια σειρά από δομές κατανομών, που κάθε δομή κατανομών απευθύνεται σε ένα συγκεκριμένο Alloc-ID μιας συγκεκριμένης ONU. Μία αλληλουχία από μία ή περισσότερες δομές κατανομών που απευθύνεται σε Alloc-IDs που ανήκουν στην ίδια



Σχήμα 4.9: Έννοια του XGTC ελέγχου πρόσβασης στο μέσο [46].

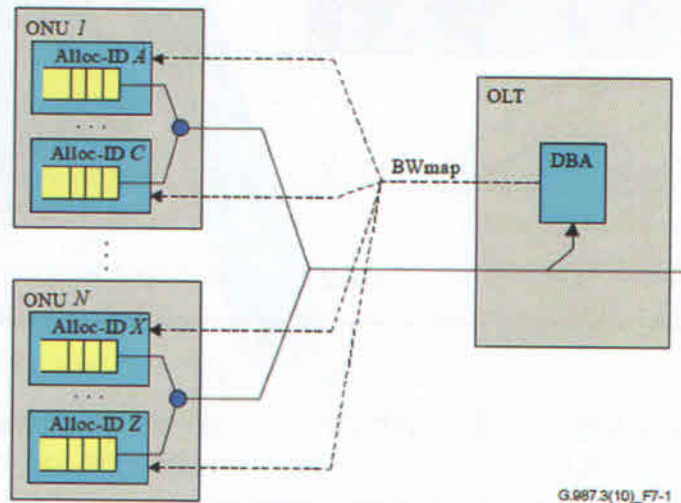
ONU σχηματίζει μια σειρά κατανομών ριπής. Κάθε σειρά κατανομών ριπής περιέχει ένα δείκτη εκκίνησης που υποδεικνύει την έναρξη της ριπής εντός του upstream πλαισίου PHY και μια αλληλουχία παρερχομένων μεγεθών που η ONU επιτρέπεται να μεταδώσει. Οι δείκτες εκκίνησης αναφέρονται σε αποκλίσεις (offsets) μέσα στο upstream PHY πλαίσιο (στο υποεπίπεδο προσαρμογής PHY), ενώ τα επιχορηγημένα μεγέθη αφορούν το ωφέλιμο φορτίο του XGTC πλαισίου (στο υποεπίπεδο πλαισίωσης). Οι δείκτες εκκίνησης και τα επιχορηγημένα μεγέθη εκφράζονται σε μονάδες λέξεων (μια λέξη ισούται με 4 bytes). Μια ενιαία λέξη κατανομής ανά PHY πλαίσιο αντιστοιχεί σε έναν στιγμιαίο ρυθμό δεδομένων των 256 Kbit/s. Το OLT μπορεί να χορηγήσει υψηλότερα ή χαμηλότερα αποτελεσματικούς ρυθμούς δεδομένων, ελέγχοντας το μέγεθος και τη συχνότητα των επιχορηγήσεων και μπορεί να κλιμακώσει τον ενεργό ρυθμό δεδομένων μέσω δυναμικού προγραμματισμού [46].

4.3.5 Διαχωρισμός DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) στο PON

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές [46], δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (DBA) στο XG-PON είναι η διαδικασία με την οποία το OLT διαθέτει ευκαιρίες μετάδοσης στην ανερχόμενη κατεύθυνση σε οντότητες που φέρουν κίνηση εντός των ONUs με βάση τη δυναμική ένδειξη της δραστηριότητάς τους και των ρυθμισμένων συμβάσεων κυκλοφορίας τους.

Στα XG-PON, η οντότητα αποδέκτης της upstream κατανομής εύρους ζώνης αντιπροσωπεύεται από ένα αναγνωριστικό κατανομής (Alloc-ID). Ανεξάρτητα από τον αριθμό των Alloc-IDs που έχουν εκχωρηθεί σε κάθε ONU, ο αριθμός των XGEM θυρών πολυπλέκεται επάνω σε κάθε Alloc-ID και η πραγματική φυσική και λογική δομή ουρών αναμονής που εφαρμόζεται από την ONU, τα OLT μοντέλα με τα οποία η συγκεντρωτική

κίνηση συνδέεται με κάθε Alloc-ID ως ενιαίο λογικό buffer και, για το σκοπό της εκχώρησης εύρους ζώνης, εξετάζει όλα τα Alloc-IDs που καθορίζονται για το δεδομένο PON ώστε να είναι ανεξάρτητες ομότιμες οντότητες στο ίδιο επίπεδο της λογικής ιεραρχίας.



Σχήμα 4.10: Διαχωρισμός DBA στο PON [46].

Για κάθε Alloc-ID λογικό buffer (ρυθμιστικό), η λειτουργική ενότητα DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) του OLT συνάγει το τι βρίσκεται στην κατοχή της, είτε από τη συλλογή εκθέσεων κατάστασης εσωτερικής ζώνης, είτε παρατηρώντας το μοτίβο αδράνειας της upstream κατεύθυνσης, ή και από τα δύο. Η λειτουργία DBA παρέχει στη συνέχεια είσοδο στη μονάδα χρονοπρογραμματισμού της upstream κίνησης του OLT, η οποία είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία των χαρτών εύρους ζώνης (BWmaps). Ο BWmap καθορίζει το μέγεθος και το χρονοδιάγραμμα των ευκαιριών upstream μετάδοσης για κάθε Alloc-ID και κοινοποιείται στις ONUs που βρίσκονται στην εσωτερική ζώνη με την κατερχόμενη κίνηση.

Ανάλογα με το μηχανισμό συμπερασμού πληρότητας του buffer της ONU, δύο μέθοδοι DBA μπορούν να διακριθούν:

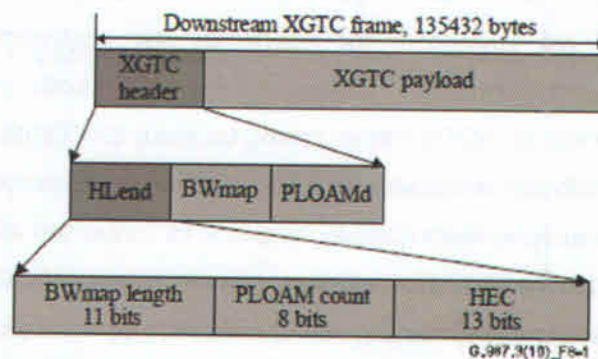
- DBA αναφοράς κατάστασης (status reporting ή SR), βασίζεται σε σαφείς αναφορές πληρότητας του buffer που έχουν ζητηθεί από το OLT και υποβλήθηκαν από τις ONUs σε απάντηση.
- DBA παρακολούθησης της κυκλοφορίας (traffic monitoring ή TM) βασίζεται στην παρατήρηση στο OLT, του μοτίβου των XGEM πλαισίων αδράνειας και στη σύγκρισή τους με τους αντίστοιχους χάρτες εύρους ζώνης.

Το OLT του XG-PON υποστηρίζει ένα συνδυασμό και των δύο TM και SR μεθόδων DBA και είναι σε θέση να εκτελέσει τις λειτουργίες DBA με αποτελεσματικό και δίκαιο τρόπο.

4.3.6 XGTC πλαισίωση downstream κίνησης

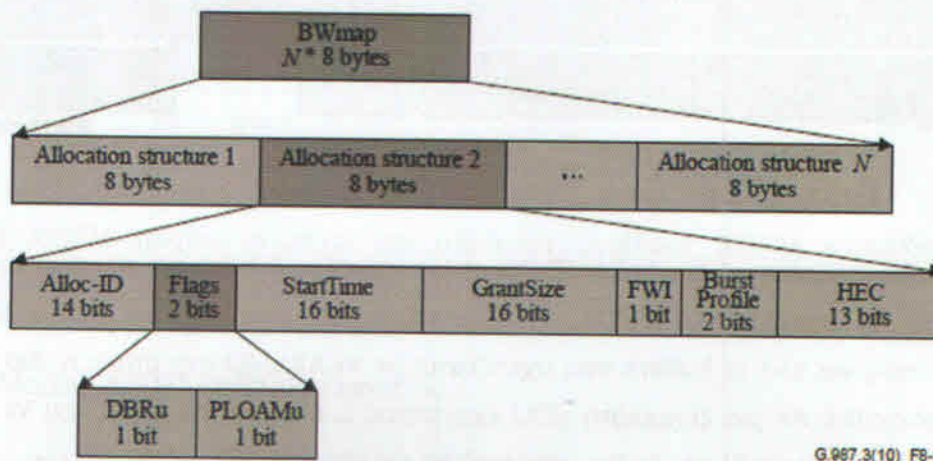
Το downstream XGTC πλαίσιο έχει το σταθερό μέγεθος των 135432 bytes και αποτελείται από την XGTC επικεφαλίδα και το τμήμα του XGTC ωφέλιμου φορτίου, όπως δείχνεται στο Σχήμα 4.11. Το XGTC ωφέλιμο φορτίο σχηματίζεται στη πλευρά εκπομπής και υφίσταται επεξεργασία στη πλευρά λήψης από το υποεπίπεδο προσαρμογής υπηρεσίας.

Η κεφαλίδα του downstream XGTC πλαισίου αποτελείται από μια σταθερού μεγέθους δομή HLen (4 bytes) και από δύο μεταβλητού μεγέθους κομμάτια: το κομμάτι του χάρτη εύρους ζώνης (BWmap) (μεγέθους $8 \times \text{Number_of_ONUs}$ bytes) και το κομμάτι του downstream PLOAM (PLOAMd) (μεγέθους $48 \times \text{Number_of_messages}$ bytes).



Σχήμα 4.11: Μορφή του downstream XGTC πλαισίου και τα πεδία κεφαλίδας [46].

Ο BWmap είναι μια σειρά από 8-byte δομές κατανομών. Ο αριθμός των δομών κατανομών στον BWmap δίνεται στο πεδίο BWmap μήκους της δομής HLen. Το πραγματικό μήκος του κομματιού BWmap είναι $8 \times N$ bytes (N: Αριθμός των ONUs στο δίκτυο).



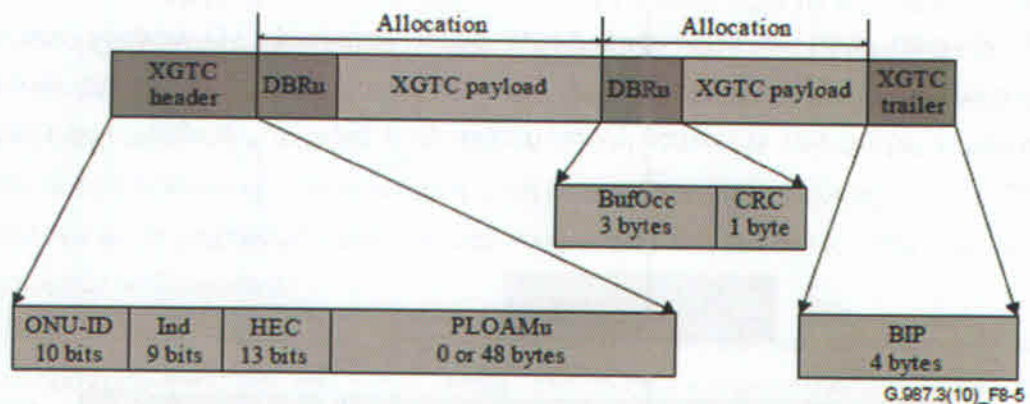
Σχήμα 4.12: Το πεδίο BWmap και η μορφή της δομής κατανομής [46].

Κάθε δομή κατανομής καθορίζει την κατανομή εύρους ζώνης σε ένα συγκεκριμένο Alloc-ID. Μία αλληλουχία από μία ή περισσότερες δομές κατανομών, οι οποίες σχετίζονται με τα Alloc-IDs που ανήκουν στην ίδια ONU και προορίζονται για συνεχόμενη upstream μετάδοση σχηματίζουν μια σειρά κατανομών ριπής. Οι μορφές του πεδίου BWmap και μια δομή κατανομής φαίνονται στο Σχήμα 4.12.

4.3.7 XGTC πλαισίωση upstream κίνησης

Στην ανερχόμενη κατεύθυνση, η διεπαφή μεταξύ του XGTC υποεπιπέδου πλαισίωσης και του XGTC υποεπιπέδου προσαρμογής PHY εκπροσωπείται από μια upstream XGTC ριπή. Η upstream XGTC ριπή που εκπέμπεται από μια δεδομένη ONU έχει ένα δυναμικά καθορισμένο μέγεθος και συνίσταται της κεφαλίδας της upstream XGTC ριπής, ένα ή περισσότερα διαστήματα κατανομής εύρους ζώνης, που κάθε ένα σχετίζεται με ένα συγκεκριμένο Alloc-ID και το XGTC trailer, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Το μέγεθος του κάθε διαστήματος κατανομής υπαγορεύεται από μια ειδική δομή κατανομής του BWmap.

Κάθε διάστημα κατανομής εύρους ζώνης περιέχει το τμήμα του XGTC ωφέλιμου φορτίου και μπορεί να περιέχει υπεράνω κατανομή, που προηγείται του XGTC ωφέλιμου φορτίου. Το XGTC ωφέλιμο φορτίο σχηματίζεται στη πλευρά εκπομπής και υφίσταται επεξεργασία στη πλευρά λήψεως από την αντίστοιχη οντότητα του υποεπιπέδου προσαρμογής υπηρεσίας.



Σχήμα 4.13: Μορφή upstream XGTC ριπής και υπεράνω πεδία [46].

Το πεδίο πληρότητας του buffer (BufOcc) έχει μέγεθος 3 bytes και περιέχει το συνολικό ποσό της κυκλοφορίας των SDUs, που εκφράζεται σε μονάδες των 4-byte λέξεων, με ομαδοποίηση για όλα τα buffers που σχετίζονται με το Alloc-ID στο οποίο η ίδια κατανομή έχει παρασχεθεί. Αν μια ξεχωριστή SDU έχει μήκος L bytes, η συμβολή του W προς την πληρότητα του αναφερθέντος buffer υπολογίζεται ως εξής:

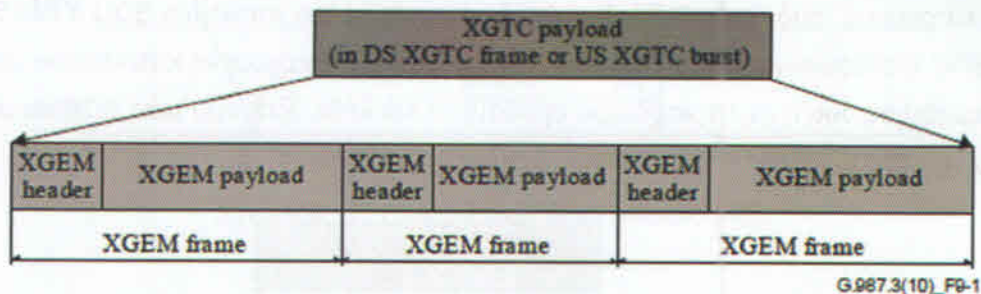
$$W = \begin{cases} \left\lceil \frac{L}{4} \right\rceil, & \text{για } L > 8 \\ 2, & \text{για } 0 < L \leq 8 \end{cases}$$

Η αναφερόμενη τιμή πρέπει να αντιπροσωπεύει την καλύτερη διαθέσιμη εκτίμηση που αντιστοιχεί στη στιγμή του χρόνου, όταν η αναφορά μεταδίδεται, δηλαδή, με την έναρξη του upstream διαστήματος κατανομής. Η αναφερόμενη τιμή πρέπει να είναι χωρίς αποκλεισμούς από οποιαδήποτε κίνηση που μπορεί να έχει προγραμματιστεί για ανερχόμενη μετάδοση σε αυτό το διάστημα κατανομής.

4.3.8 XGEM πλαισίωση

4.3.8.1 Δομή XGTC ωφέλιμου φορτίου

Το τμήμα ωφέλιμου XGTC φορτίου μεταφέρεται σε downstream XGTC πλαίσια και σε upstream XGTC ριπές, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.4 και 4.5. Το μέγεθος του ωφέλιμου XGTC φορτίου σε ένα δεδομένο downstream XGTC πλαίσιο είναι ίσο με το μέγεθος του XGTC πλαισίου (το οποίο είναι σταθερό και ίσο με 135432 bytes), μείον το μέγεθος της κεφαλίδας του δεδομένου XGTC πλαισίου. Το μέγεθος του κάθε τμήματος του XGTC ωφέλιμου φορτίου σε μια δεδομένη upstream ριπή είναι ίσο με το μέγεθος της αντίστοιχης κατανομής μείον την υπεράνω κατανομή. Το ωφέλιμο φορτίο XGTC περιέχει ένα ή περισσότερα XGEM πλαίσια (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Δομή του XGTC ωφέλιμου φορτίου [46].

Κάθε XGEM πλαίσιο περιέχει μια σταθερού μεγέθους XGEM κεφαλίδα και ένα μεταβλητού μεγέθους πεδίο XGEM ωφέλιμου φορτίου.

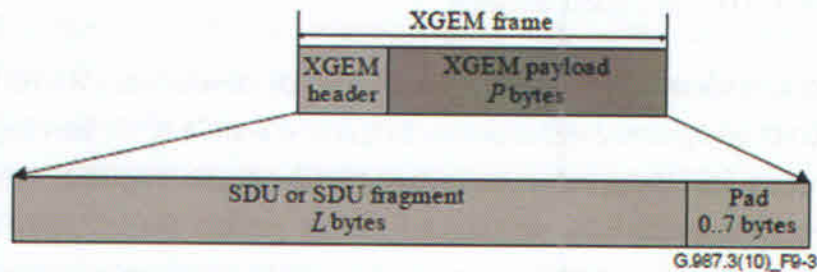
4.3.8.2 Μορφή XGTC ωφέλιμου φορτίου

Το XGEM ωφέλιμο φορτίο είναι ένα μεταβλητού μήκους πεδίο που ελέγχεται από το πεδίο PLI της XGEM κεφαλίδας. Για ένα μη-αδρανές XGEM πλαίσιο, το μήκος P του XGEM

φορτίου σε bytes, σχετίζεται με την τιμή L, που μεταδίδεται στο πεδίο PLI, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$P = \begin{cases} 4 * \left\lceil \frac{L}{4} \right\rceil & \text{για } L \geq 8 \\ 8, & \text{για } 0 < L < 8 \\ 0, & \text{για } L = 0 \end{cases}$$

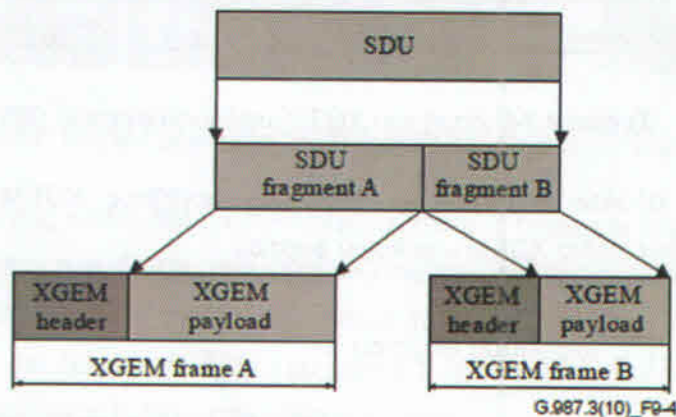
Το ωφέλιμο φορτίο XGEM μπορεί να περιέχει ένα μέχρι 7 bytes για να καλύψει τις λιγότερο σημαντικές θέσεις των bytes. Ο πομπός γεμίζει τους χαρακτήρες συμπλήρωσης με 0x55. Οι χαρακτήρες συμπλήρωσης απορρίπτονται από την XGEM μηχανή παραλαβής.



Σχήμα 4.15: Μορφή ωφέλιμου XGEM φορτίου [46].

4.3.8.3 Κατακερματισμός μιας SDU

Ο κατακερματισμός μιας SDU είναι μια διαδικασία με την οποία μια SDU ή ένα θραύσμα μιας SDU διαθέσιμο για μετάδοση στην κατερχόμενη ή ανερχόμενη κατεύθυνση μπορεί να καταναμηθεί σε δύο ή σε περισσότερα θραύσματα και κάθε θραύσμα μιας SDU να μεταδοθεί σε ένα ξεχωριστό XGEM πλαίσιο, όπως δείχνεται στο Σχήμα 4.16.



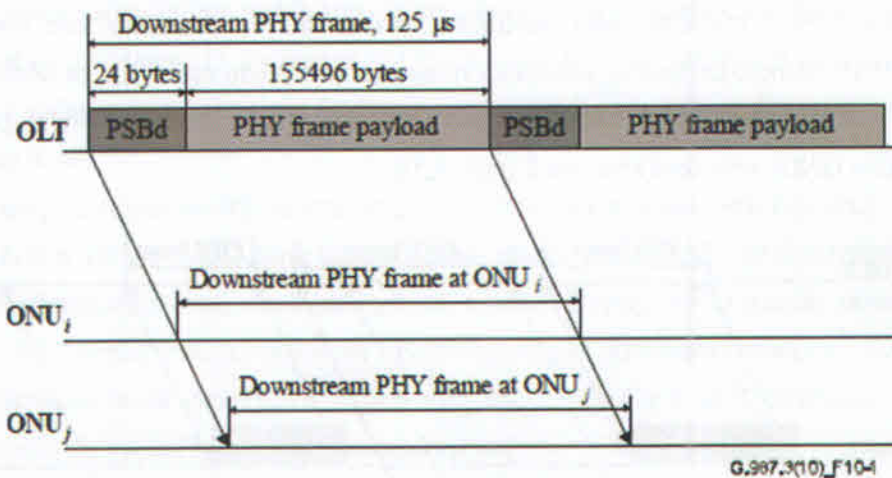
Σχήμα 4.16: Κατακερματισμός μιας SDU [46].

4.3.9 Υποεπίπεδο προσαρμογής PHY

4.3.9.1 Downstream PHY πλαίσιο

Το OLT συνεχώς μεταδίδει στην κατερχόμενη κατεύθυνση. Η μετάδοση του OLT είναι χωρισμένη σε σταθερού μεγέθους downstream PHY πλαίσια. Η διάρκεια ενός downstream PHY πλαισίου είναι 125 μ s, το οποίο στον downstream ρυθμό των 9.95328 Gbit/s αντιστοιχεί στο μέγεθος των 155520 bytes (38880 λέξεις). Ένα downstream PHY πλαίσιο αποτελείται από ένα 24-byte μπλοκ φυσικού συγχρονισμού (PSBd) και από ένα 155496-bytes PHY πλαίσιο ωφέλιμου φορτίου που εκπροσωπείται από το downstream XGTC πλαίσιο του οποίου το περιεχόμενο προστατεύεται από FEC και είναι κωδικοποιημένο.

Η έναρξη ενός συγκεκριμένου downstream PHY πλαισίου ορίζεται στο γενικό πλαίσιο του δεδομένου στοιχείου δικτύου και αντιστοιχεί σε μετάδοση (από το OLT) ή σε παραλαβή (από την ONU) του πρώτου bit του PSBd του. Ένα διάγραμμα του downstream PHY πλαισίου δείχνεται στο Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17: Downstream PHY πλαίσιο [46].

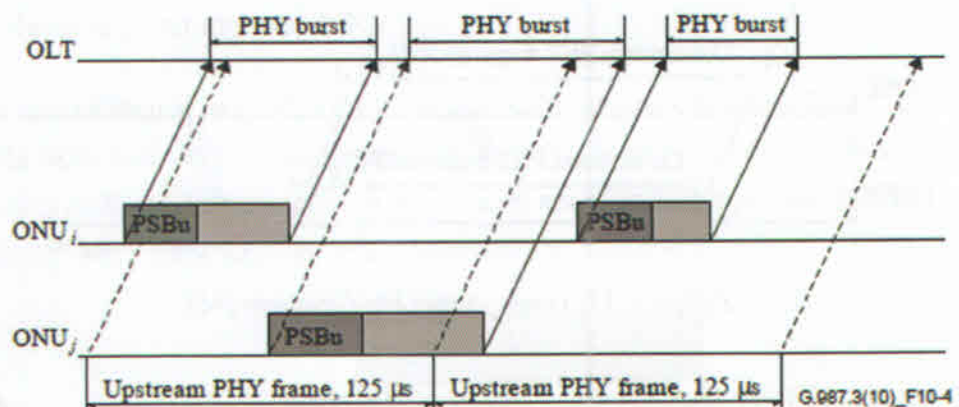
4.3.9.2 Upstream PHY πλαίσια και upstream PHY ριπές

Η διάρκεια ενός upstream PHY πλαισίου είναι 125 μ s, η οποία στον upstream ρυθμό των 2.48832 Gbit/s αντιστοιχεί στο μέγεθος των 38880 bytes (9720 λέξεις).

Όπως κατευθύνεται από το OLT, κάθε ONU προσδιορίζει το χρονικό σημείο που αντιστοιχεί στην έναρξη ενός συγκεκριμένου upstream PHY πλαισίου, αντισταθμίζοντας κατάλληλα το σημείο εκκίνησης του αντίστοιχου downstream PHY πλαισίου. Η ακολουθία των σημείων ορίου του upstream PHY πλαισίου παρέχει ένα κοινό σημείο αναφοράς χρονισμού που μοιράζεται από το OLT και από όλες τις ONUs στο PON, αλλά αυτά τα

σημεία δεν αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο γεγονός (σε αντίθεση με τα σημεία ορίου του downstream PHY πλαισίου, στα οποία αρχίζει η μετάδοση ή η παραλαβή ενός PSBd).

Στην ανερχόμενη κατεύθυνση, κάθε ONU μεταδίδει μία σειρά από σχετικά σύντομες PHY ριπές και παραμένει αδρανής σε-μεταξύ των ριπών. Μια upstream PHY ριπή αποτελείται από ένα μπλοκ φυσικού συγχρονισμού upstream (PSBu), με προτεινόμενο μέγεθος 24 bytes σύμφωνα με το παράρτημα III του πρότυπου [46] και ένα PHY ωφέλιμο φορτίο ριπής, που αντιπροσωπεύεται από την upstream XGTC ριπή, της οποίας το περιεχόμενο μπορεί να προστατεύεται από FEC και είναι κωδικοποιημένο. Το OLT χρησιμοποιεί τον BWmap για τον έλεγχο χρονισμού και της διάρκειας των upstream PHY ριπών, έτσι ώστε οι upstream μεταδόσεις από διαφορετικές ONU να είναι μη-επικαλυπτόμενες. Οι upstream PHY ριπές σε κάθε ONU αναφέρονται στην έναρξη του κατάλληλου upstream PHY πλαισίου. Μια upstream PHY ριπή ανήκει στο upstream PHY πλαίσιο N, εφ' όσον αυτή η ριπή έχει καθοριστεί στον BWmap που μεταδίδεται με το downstream PHY πλαίσιο N. Σε αυτή την περίπτωση, το πρώτο byte της κεφαλίδας της XGTC ριπής μεταδίδεται εντός των ορίων του PHY πλαισίου N. Το τμήμα PSBu μιας upstream PHY ριπής μπορεί να μεταδοθεί εντός των ορίων του προηγούμενου PHY πλαισίου. Μια upstream PHY ριπή που ανήκει σε ένα συγκεκριμένο upstream PHY πλαίσιο μπορεί να εκτείνεται πέραν του οπίσθιου ορίου του εν λόγω πλαισίου. Η σχέση μεταξύ των PHY ορίων πλαισίωσης και των upstream PHY ριπών των διαφορετικών ONUs απεικονίζεται στο Σχήμα 4.18.



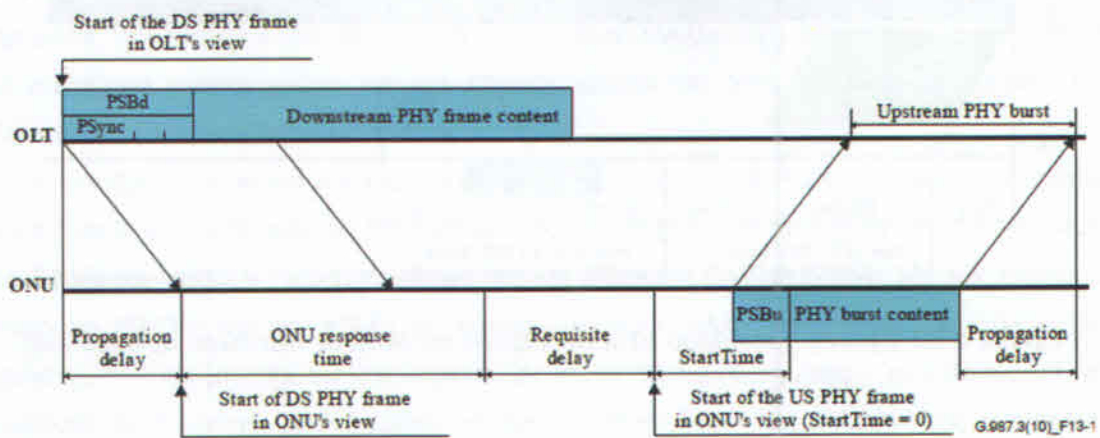
Σχήμα 4.18: Upstream PHY πλαίσιο και upstream PHY ριπές [46].

4.3.10 Σχέσεις χρονισμού μεταξύ του OLT και της ONU

4.3.10.1 Ο συγχρονισμός των upstream μεταδόσεων της ONU

Όλα τα γεγονότα μετάδοσης της ONU αναφέρονται στην αρχή του downstream PHY πλαισίου που φέρει τον BWmap που περιέχει την αντίστοιχη σειρά κατανομών ριπής. Σημειώστε, ειδικότερα, ότι ένα συμβάν μετάδοσης της ONU δεν αναφέρεται στην παραλαβή

της αντίστοιχης σειράς κατανομών ριπής καθαυτή, το οποίο μπορεί να συμβεί σε έναν μεταβλητό χρόνο εντός του downstream PHY πλαισίου.



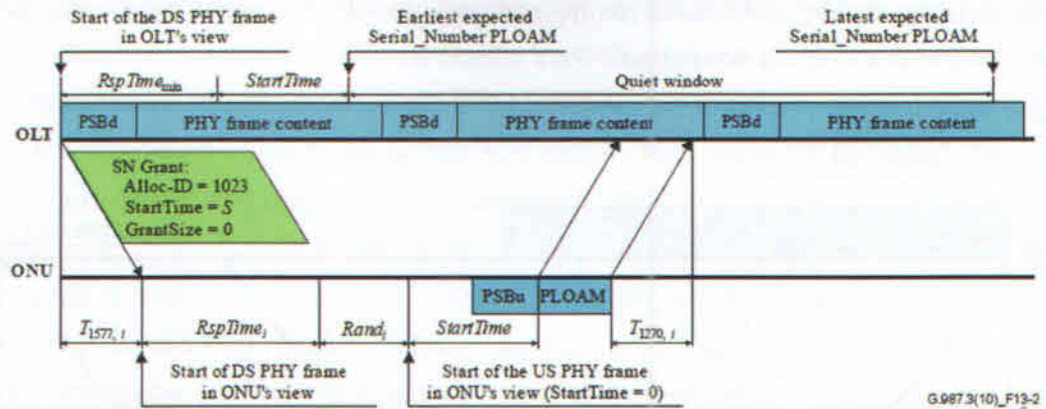
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα χρονισμού στην ONU - Γενική περίπτωση [46].

Ανά πάσα στιγμή, η ONU διατηρεί ένα τρεχούμενο ρολόι upstream PHY πλαισίου, που είναι συγχρονισμένο με το ρολόι του downstream PHY πλαισίου και διαφέρουν κατά μια συγκεκριμένη απόκλιση. Η ποσότητα της απόκλισης είναι το άθροισμα των επόμενων δύο τιμών: του χρόνου απόκρισης της ONU και της απαιτούμενης καθυστέρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19.

Το εύρος του χρόνου απόκρισης της ONU είναι μια κλίμακας-συστήματος παράμετρος που επιλέγεται για να δώσει στην ONU επαρκή χρόνο για να λάβει το downstream πλαίσιο, συμπεριλαμβανομένου του upstream χάρτη εύρους ζώνης, να εκτελέσει downstream και upstream FEC όπως απαιτείται και να προετοιμάσει μια upstream απόκριση. Όλες οι ONUs υποχρεούνται να διαθέτουν χρόνο απόκρισης ONU από $35 \pm 1 \mu\text{s}$. Περαιτέρω, η ONU είναι υποχρεωμένη να γνωρίζει το χρόνο απόκρισης της.

Ο γενικός όρος «αναγκαία καθυστέρηση» αναφέρεται στη συνολική επιπλέον καθυστέρηση που η ONU μπορεί να υποχρεωθεί να εφαρμόσει στην upstream μετάδοση πέρα από την κανονική διάρκεια απάντησής της. Ο σκοπός της απαιτούμενης καθυστέρησης είναι να αντισταθμίσει την καθυστέρηση διάδοσης και επεξεργασίας των επιμέρους ONUs και να αποφύγει ή να μειώσει την πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ των upstream μεταδόσεων. Η τιμή των απαιτούμενων αλλαγών καθυστέρησης ανάλογα με την κατάσταση της ONU περιγράφεται παρακάτω.

4.3.10.2 Σχέσεις χρονισμού και ήσυχου παράθυρο κατά τη διάρκεια απόκτησης σειριακού αριθμού



Σχήμα 4.20: Σχέσεις χρονισμού κατά τη διάρκεια απόκτησης σειριακού αριθμού [46].

4.4 Επίπεδο διαχείρισης και υπηρεσιών

Μία από τις μοναδικές δυνατότητες της οικογένειας ITU-T των συστημάτων PON είναι το ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης, καθώς και ο ορισμός των επιπέδων υπηρεσιών. Αυτό είναι που κάνει τα πρότυπα ITU-T οπτικής πρόσβασης πιο κατάλληλα για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών. Οι ακόλουθες ενότητες περιγράφουν την ανάπτυξη αυτών των χαρακτηριστικών της ITU και της Broadband Forum. Το XG-PON έχει παραταχθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε όλη η πρόοδος που έχει επιτευχθεί με το GPON να μπορεί άμεσα να κληρονομείται με λίγες τροποποιήσεις.

4.4.1 Γενική διεπαφή διαχείρισης και ελέγχου της ONU (OMCI)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο τελικός στόχος της τυποποίησης είναι η διαλειτουργικότητα, στη συνέχεια κάθε διασύνδεση με την ONU πρέπει να περιγράφεται λεπτομερώς. Στις προηγούμενες παραγράφους συζητήθηκε η φυσική διεπαφή και η διεπαφή πρωτοκόλλου, αλλά αυτό αφήνει απαραίτητο ένα πιο περίπλοκο περιβάλλον. Είναι το OMCI που περιέχει κατά πολύ τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα (μετρημένη σε συνολικά σημεία λειτουργίας, σε μεταβλητότητα και στην εξέλιξη με την πάροδο του χρόνου). Έτσι, με αυτήν την έννοια, ο ορισμός του OMCI είναι η πιο δύσκολη και χρονοβόρα εργασία σε όλη την τυποποίηση του PON.

Το έργο αυτό ξεκίνησε στο G.983.2, το οποίο περιγράφει το OMCI για το BPON. Αυτή η δουλειά αναπτύχθηκε με την πάροδο του χρόνου σε μια αρκετά μεγάλη συλλογή δυνατοτήτων διαχείρισης για σχεδόν κάθε χαρακτηριστικό που η βιομηχανία θα μπορούσε να βασιστεί σε μια ONU. Όταν ξεκίνησε το GPON, το OMCI του χρησιμοποίησε το G.983.2 ως βάση και μόνο προστέθηκε το G.984.4, το οποίο περιέγραψε τις μικρές αλλαγές που

χρειάζονται για να προσαρμόσουν το G.983.2 στα συστήματα GPON. Η κατάσταση κατά την οποία και τα δύο G.983.2 και G.984.4 αναπτύχθηκαν παράλληλα, συνεχίστηκε για ένα διάστημα, αλλά τελικά το G.984.4 αναθεωρήθηκε για να συμπεριλάβει όλα τα σχετικά τμήματα του G.983.2 και το GPON OMCI έγινε ανεξάρτητη σύσταση. Το GPON OMCI συνέχισε να αναπτύσσεται και να προσαρμόζεται σε όλες τις νέες υπηρεσίες και τις δυνατότητες που κέρδιζαν τα PONs.

Όταν ήρθε η ώρα για την περιγραφή του OMCI για τα XG-PON, η απόφαση λήφθηκε για να αποφευχθεί η επανάληψη της διαδικασίας μετάβασης από το BPON στο GPON. Μάλλον, το OMCI πρότυπο θα φτιαχτεί σε μια γενική σύσταση OMCI, G.988. Με τον τρόπο αυτό, τόσο το GPON και το XG-PON, καθώς και κάθε άλλη τεχνολογία που ήθελε να το χρησιμοποιήσει μπορεί να αναφέρεται σε αυτό το κοινό έγγραφο απευθείας. Η γενική σύσταση OMCI ποτέ δε θα πρέπει να αναθεωρηθεί λόγω της αλλαγής της τεχνολογίας ή άλλης φυσικής αλλαγής, δεδομένου ότι είναι ένα γενικό έγγραφο.

Από τότε που έγινε αυτή η οργανωτική στροφή, το ενδιαφέρον έχει βρεθεί στη χρήση OMCI για άλλα συστήματα. Τα point-to-point Gigabit Ethernet συστήματα που περιγράφονται στο G.986 χρησιμοποιούν OMCI για τις βασικές λειτουργίες διαχείρισης της ONU. Υπάρχει ακόμη κάποιο ενδιαφέρον για τη χρήση OMCI για ορισμένα τμήματα της IEEE EPON διαχείρισης, αν και γι' αυτό δεν έχει επιτευχθεί συναίνεση ακόμα. Παρ' όλα αυτά, η σύσταση OMCI συνεχίζει να αναπτύσσεται και είναι η πιο συμπαγής και πλήρης αναφορά για τη διαχείριση της ONU στον κόσμο.

4.4.2 Broadband Forum TR-156/167

Το υλικό που αναπτύχθηκε μέχρι σήμερα ασχολείται με τη συνεργασία του OLT με την ONU. Είναι εξίσου σημαντικό το σύστημα PON να συνεργαστεί με το δίκτυο στο σύνολό του. Η ομάδα που έχει κάνει την περισσότερη δουλειά σε αυτόν τον τομέα ήταν η Broadband Forum (BBF) και ιδίως η τεχνική έκθεσή τους 101 (TR-101) ήταν η κατευθυντήρια δύναμη πίσω από ένα μεγάλο μέρος της ανάπτυξης της ψηφιακής συνδρομητικής γραμμής (DSL).

Ξεκινώντας το 2008, το έργο άρχισε να επεκτείνει το TR-101 για την κάλυψη του GPON. Το αποτέλεσμα ήταν το TR-156 (και το TR-167 αργότερα). Τα έγγραφα αυτά παρέχουν πολύ λεπτομερείς προδιαγραφές για το πώς θα είναι μια πρακτική εφαρμογή της τεχνολογίας δικτύου GPON, συμπεριλαμβανομένων των πραγμάτων όπως η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών, η διάταξη των VLANs (Virtual LAN) και ακόμη και η ονοματολογία του διαθέσιμου χρόνου χρήσης του εξοπλισμού και των θυρών για τους σκοπούς της διαχείρισης. Τα έγγραφα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί για να επιταχυνθεί η δοκιμή της διαλειτουργικότητας των GPON και με μεγάλη επιτυχία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

Τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας στα οπτικά δίκτυα

5.1 Εξοικονόμηση ενέργειας στα τηλεπικοινωνιακά οπτικά δίκτυα

5.1.1 Εισαγωγή

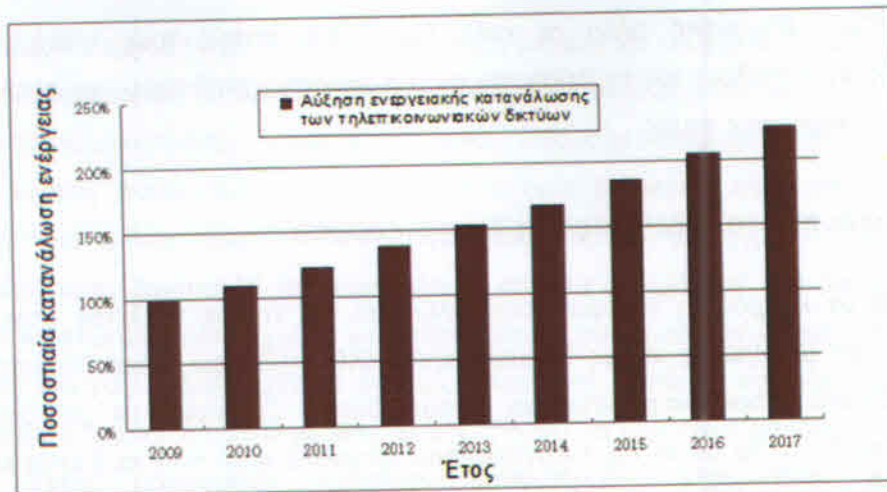
Η εξοικονόμηση της ενέργειας κερδίζει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον για την κοινωνία μας τα τελευταία χρόνια. Υπάρχει αυξανόμενη συναίνεση σχετικά με την ανάγκη να τεθεί η εξοικονόμηση της ενέργειας στην κορυφή της έρευνας, ως ένα από τα πιο δυνατά και κρίσιμα επίκαιρα θέματα της έρευνας. Σήμερα, παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως η ενέργεια υδρογονανθράκων, παρέχουν το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης ενέργειας, π.χ., το 85 τοις εκατό της πρωτογενούς ενέργειας του ηλεκτρισμού των ΗΠΑ [52], αλλά αυτό το είδος της ενέργειας δεν είναι ανανεώσιμο και αναμένεται να χρησιμοποιείται τελικά μέχρι στο όχι πολύ μακρινό μέλλον. Εκτός αυτού, η καύση των υδρογονανθράκων απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου (GHG), μια σημαντική αιτία της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Δύο ερευνητικές κατευθύνσεις διερευνώνται για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης. Πρώτον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αξιοποιούνται για να αντικαταστήσουν την παραδοσιακή ενέργεια υδρογονανθράκων. Αυτό δε δίνει μόνο τη δυνατότητα να μειωθεί το αποτύπωμα του διοξειδίου του άνθρακα, αλλά ανοίγει και το δρόμο προς μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον κοινωνική ανάπτυξη [53]. Δεύτερον, οι προσεγγίσεις ενεργειακής διατήρησης διερευνώνται σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας - χαμηλής ενέργειας εξοπλισμός και εξαρτήματα αναπτύσσονται, όχι μόνο για να μειωθεί το κόστος της ενέργειας, αλλά και για να βοηθήσουν στη σωτηρία του περιβάλλοντος. Σε όλους σχεδόν τους επιστημονικούς κλάδους, όπου η τεχνολογική ανάπτυξη μπορεί να επιτρέψει τη μείωση του ποσού της ενέργειας που απαιτείται για την υποστήριξη των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, οι ερευνητικές προσπάθειες βρίσκονται σε εξέλιξη για την εξεύρεση νέων λύσεων για την εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι Τεχνολογίες Πληροφορίας και Επικοινωνίας (Information and Communication Technology ή ITC) είναι ένας από τους πλέον υποσχόμενους τομείς για την επιδίωξη της διατήρησης της ενέργειας. Οι ITC χρησιμοποιούνται ευρέως στις περισσότερες πτυχές της κοινωνίας μας και έχουν παραδοσιακά μια φιλική εικόνα προς το περιβάλλον. Αυτή η καλή φήμη προέρχεται κυρίως από το γεγονός ότι τα παγκόσμια δίκτυα τηλεπικοινωνιών έχουν

μετατρέψει την κοινωνία μας και παρέχουν πρακτικά μέσα για τη μείωση των ανθρωπίνων επιπτώσεων στη φύση (για παράδειγμα, εφαρμογές τηλεπικοινωνιών για τηλεργασία, τηλεδιάσκεψη, ηλεκτρονικό εμπόριο). Υπάρχει, ωστόσο, ένα μειονέκτημα των ITC. Η πανταχού παρουσία των ITC στην καθημερινή ζωή (ιδιωτική και επαγγελματική) φέρνει ένα άλλο θέμα - η κατανάλωση της ενέργειας των ηλεκτρονικών υπολογιστών και του εξοπλισμού του δικτύου γίνεται ένα σημαντικό μέρος της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας [54], [55], [56]. Δεδομένου ότι η κάλυψη των ITC εξαπλώνεται ταχύτατα σε όλο τον κόσμο, η κατανάλωση ενέργειας των ITC επίσης αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς, δεδομένου ότι περισσότεροι εξοπλισμοί και εξαρτήματα για τα δίκτυα και τις επικοινωνίες έχουν αναπτυχθεί σε ετήσια βάση. Από τα στοιχεία του 2009, οι ITC καταναλώνουν περίπου το 8% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο [57]. Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, τα οποία αποτελούν ένα σημαντικό μέρος των ITC, διεισδύουν περισσότερο στην καθημερινή μας ζωή. Ο όγκος της κυκλοφορίας των ευρυζωνικών τηλεπικοινωνιακών δικτύων αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς και έτσι και η κατανάλωση της ενέργειας. Το Σχήμα 5.1 αναφέρει μια πρόβλεψη της αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας (κατά ποσοστό) των τηλεπικοινωνιακών δικτύων κατά τα επόμενα έτη [58], [19]. Λαμβάνοντας υπόψη τόσο την αύξηση των τιμών της ενέργειας (η οποία αναμένεται με τη μείωση της φτηνής διαθεσιμότητας των ορυκτών καυσίμων) και την αυξανόμενη ανησυχία για το φαινόμενο του θερμοκηπίου η οποία μεταφράζεται στην κυβερνητική πολιτική, η ενεργειακή κατανάλωση των ITC αυξάνει ήδη τις ερωτήσεις και είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών λύσεων τηλεπικοινωνιών. Πρέπει να σχεδιαστούν νέα πρότυπα δικτύωσης, έτσι ώστε οι ITC να διατηρήσουν το ίδιο επίπεδο λειτουργικότητας, ενώ καταναλώνουν μικρότερη ποσότητα ενέργειας στο μέλλον [54], [59].

Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών δικτύου, αυτή η εργασία, επικεντρώνεται κυρίως στην ενεργειακή απόδοση των οπτικών τεχνολογιών δικτύωσης (και πιο συγκεκριμένα με τα δίκτυα πρόσβασης τύπου XG-PON). Οι οπτικές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται ευρέως στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών και αυτή τη στιγμή αποτελούν τη βασική φυσική υποδομή δικτύου στα περισσότερα μέρη του κόσμου χάρη στην υψηλή ταχύτητα, τη μεγάλη χωρητικότητα και άλλες ελκυστικές ιδιότητες [33]. Οι οπτικές τεχνολογίες δικτύωσης έχουν επίσης βελτιωθεί σημαντικά κατά την τελευταία δεκαετία. Διαφορετικά χαρακτηριστικά των οπτικών δικτύων έχουν διερευνηθεί και πολλές προσεγγίσεις έχουν προταθεί για τη βελτίωση της απόδοσης των οπτικών δικτύων. Για παράδειγμα, στρατηγικές δρομολόγησης, ανάθεσης μήκους κύματος και «περιποίησης» της κυκλοφορίας έχουν προταθεί, για να κάνουν το οπτικό δίκτυο πιο αποδοτικό από πλευράς κόστους [61]. Η επιβιωσιμότητα των οπτικών δικτύων έχει επίσης διερευνηθεί διεξοδικά, διότι μια αποτυχία ενός οπτικού συνδέσμου ή κόμβου μπορεί να προκαλέσει σημαντική απώλεια λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης ενός οπτικού καναλιού επικοινωνίας [62].



Σχήμα 5.1: Πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων [19].

Παρ' όλα αυτά, το ενεργειακά αποδοτικό οπτικό δίκτυο είναι μια νέα ιδέα, η οποία αποτελεί αντικείμενο έρευνας τα τελευταία χρόνια. Περισσότερες ερευνητικές ομάδες έχουν αρχίσει να επικεντρώνονται σε αυτό, δεδομένου ότι τα ενεργειακά αποδοτικά οπτικά δίκτυα θα συμβάλουν στην εξοικονόμηση της ενέργειας που καταναλώνεται στον τομέα των ICT και στην περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας της κοινωνίας μας και στη προστασία του περιβάλλοντος.

Η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης των οπτικών δικτύων μπορεί γενικά να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερα επίπεδα: επίπεδο υλικού, μετάδοσης, δικτύου και εφαρμογής. Σε επίπεδο υλικού, εξαιρετικά ολοκληρωμένα, ολοκληρωτικά οπτικής επεξεργασίας υλικά, όπως οπτικά buffers, μεταγωγείς ινών και μετατροπείς μήκους κύματος αναπτύσσονται, τα οποία θα μειώσουν σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση. Η Οπτική Μεταγωγή Ινών (Optical Switching Fabric ή OSF) είναι ενεργειακά πιο αποδοτική από τις ηλεκτρονικές διασυνδέσεις [63], [64]. Σε επίπεδο μετάδοσης, χαμηλής εξασθένησης και χαμηλής διασποράς ίνες, ενεργειακά αποδοτικοί οπτικοί πομποί και δέκτες, οι οποίοι μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση της μετάδοσης επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ενεργειακά αποδοτικοί μηχανισμοί κατανομής των πόρων, πράσινη δρομολόγηση, μεγάλου μήκους οπτικά δίκτυα πρόσβασης [65], κλπ. διερευνώνται στο επίπεδο του δικτύου για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των οπτικών δικτύων. Σε επίπεδο εφαρμογής, μηχανισμοί για την ενεργειακά αποδοτική συνδεσιμότητα του δικτύου, όπως «Proxying» [66] και πράσινες προσεγγίσεις για cloud computing έχουν προταθεί για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Εδώ, στόχος είναι η έρευνα κατά κύριο λόγο προσεγγίσεων για ενεργειακή εξοικονόμηση σε επίπεδο δικτύου και ποιο συγκεκριμένα σε επίπεδο δικτύου πρόσβασης. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών τυπικά μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρεις τομείς: δίκτυο κορμού, metro και πρόσβασης. Οι οπτικές τεχνολογίες

διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε κάθε έναν από αυτούς τους τομείς και γίνονται ερευνητικές προσπάθειες για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των οπτικών λύσεων δικτύου και στους τρεις τομείς.

5.1.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο κορμού

Στα δίκτυα κορμού, η ενέργεια καταναλώνεται ως επί το πλείστον στον εξοπλισμό μετάδοσης και μεταγωγής, όπως δρομολογητές, OXCs (Optical Cross-Connects), EDFAs (Erbium Doped Fiber Amplifiers) και αναμεταδότες. Σύμφωνα με τα δεδομένα της παραγράφου 5.1.1, το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται από τα δίκτυα κορμού είναι τεράστιο. Ωστόσο, οι τρέχουσες αρχιτεκτονικές δικτύων και τα συστήματα λειτουργίας γενικά δε δίνουν μεγάλη προσοχή στην ενεργειακή απόδοση. Ως εκ τούτου, πολλές πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου κορμού. Οι προσεγγίσεις για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στα δίκτυα κορμού μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες: (i) επιλεκτική απενεργοποίηση στοιχείων του δικτύου, (ii) ενεργειακά αποδοτική σχεδίαση του δικτύου, (iii) ενεργειακά αποδοτική προώθηση IP πακέτων και (iv) πράσινη δρομολόγηση.

5.1.2.1 Επιλεκτική απενεργοποίηση στοιχείων του δικτύου

Μια σημαντική προσέγγιση για την εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο κορμού αποτελείται από την επιλεκτική απενεργοποίηση στοιχείων του δικτύου που βρίσκονται σε αναμονή, όταν το ωφέλιμο φορτίο μειώνεται (π.χ. τη νύχτα), ενώ εξακολουθούν να διατηρούνται οι ζωτικές λειτουργίες του δικτύου, προκειμένου να υποστηρίξει την υπόλοιπη κίνηση. Αν θεωρηθεί μια αναπαράσταση της ιεραρχίας του δικτύου όπως στο Σχήμα 2.1, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει συχνά αρκετός πλεονασμός στο δίκτυο, έτσι ώστε κάποιοι από τους κόμβους να μπορούν να κλείσουν εντελώς, όταν δε χρησιμοποιούνται ως πηγή ή προορισμοί της κυκλοφορίας και δεν είναι απαραίτητοι επίσης ως κόμβοι μεταφοράς. Σε αυτό το πλαίσιο, ένας κόμβος μπορεί να απενεργοποιηθεί: (i) μόνο όταν είναι εντελώς αχρησιμοποίητος, (ii) όταν η κίνηση βρίσκεται κάτω από ένα δεδομένο κατώτατο όριο (threshold), αφήνοντας την ευθύνη για αναδρομολόγηση της υπόλοιπης κίνησης στα ανώτερα επίπεδα και (iii) μετά τη προληπτική εκτροπή της κυκλοφορίας κατά μήκος των άλλων δρομολογητών, προκειμένου να αποφευχθεί η διακοπή της κυκλοφορίας. Αυτές οι τρεις προσεγγίσεις περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα βαρών όσον αφορά τον έλεγχο, τη διαχείριση και τη λειτουργία του δικτύου. Ενώ η πρώτη προσέγγιση δεν απαιτεί κανένα ή ελάχιστο πρόσθετο έλεγχο του δικτύου και η δεύτερη απαιτεί μόνο τη συγκέντρωση

πληροφοριών συμφόρησης, η τρίτη προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε ένα δίκτυο που έχει κάποια μορφή αυτόματης παροχής και/ή ανακατανομής πόρων να λαμβάνει χώρα.

Κατά παρόμοιο τρόπο, οι συνδέσεις (links) μπορούν να απενεργοποιούνται όταν δεν υπάρχει κίνηση πάνω τους, ή όταν η κυκλοφορία βρίσκεται κάτω από ένα δεδομένο κατώτατο όριο, ή όταν είναι δυνατόν να γίνει αναδρομολόγηση της κυκλοφορίας που ρέει κατά μήκος τους. Δυστυχώς, τα περισσότερα από τα στοιχεία σε ένα δίκτυο κορμού δεν μπορούν να κλείσουν μόνο, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση του δικτύου. Κλείνοντας ένα ενδιάμεσο κεντρικό κόμβο μπορεί να προκαλέσει τη σύνδεση να αναδρομολογηθεί επί μακρύτερη διαδρομή, η οποία μερικές φορές μπορεί να μην είναι αποδεκτή για διάφορους λόγους, όπως συμφόρηση, επιπλέον καθυστέρηση, κλπ. Έτσι, η δυνατότητα απενεργοποίησης κόμβων ή συνδέσεων πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά ως προς περιορισμούς συνδεσιμότητας και QoS (Quality-of-Service).

Το πρόβλημα αυτό έχει μοντελοποιηθεί στο [67] πάνω από μια περίπτωση μελέτης συγκεκριμένου δικτύου - προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η εξοικονόμηση ενέργειας, πρέπει κανείς να προσδιορίσει το μέγιστο αριθμό των κόμβων και των συνδέσεων σε αδράνεια, ενώ εξακολουθούν να υποστηρίζουν την εξέλιξη της κυκλοφορίας. Το πρόβλημα αυτό έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα NP-hard πρόβλημα και μπορεί να μορφοποιηθεί ως ένα MILP (Mixed Integer Linear Program). Δεδομένου ότι το πρόβλημα είναι υπολογιστικά δυσεπίλυτο, ιεραρχικά μοντέλα έχουν προταθεί στο [68]. Επιπλέον, το φορτίο της κυκλοφορίας κυμαίνεται σε διαφορετικές ώρες της ημέρας. Υποθέτοντας ότι η ζήτηση της κυκλοφορίας σε ώρες εκτός αιχμής είναι έως και 60% χαμηλότερη από ότι σε ώρες αιχμής, είναι δυνατόν να μειωθεί το ποσοστό των κινητών κόμβων στο 17% και των συνδέσεων στο 55% στις ώρες εκτός αιχμής, απενεργοποιώντας τους κόμβους και τις συνδέσεις σε αδράνεια, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι η χρησιμοποίηση των πόρων εξακολουθεί να βρίσκεται μέσα σε ένα ορισμένο όριο [69]. Στο [70] και [71], οι συγγραφείς συζητούν τη σχέση μεταξύ της ευρωστίας του δικτύου, την απόδοση και την κατανάλωση ενέργειας του Internet που βασίζεται σε στοιχεία που συλλέχθηκαν από πηγές στο διαδίκτυο.

Στο [72], οι συγγραφείς συνάγουν όριο ενεργειακής απόδοσης των προσαρμοστικών δικτύων. Αναπτύσσουν διάφορα μοντέλα κίνησης που βασίζονται σε πραγματικές παρατηρήσεις της κυκλοφορίας. Εάν τα δίκτυα μπορούν να ακολουθήσουν αυτά τα μοντέλα κυκλοφορίας κατά την κατανομή των πόρων, όπου οι πόροι θα διατεθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κυκλοφορίας, η ενεργειακή απόδοση των δικτύων αυτών μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά από τη τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας σε δίκτυα, όπου οι πόροι είναι πάντα ανεξάρτητοι από τις απαιτήσεις της κυκλοφορίας. Στο [73] ένα σύστημα προτείνεται, το οποίο κλείνει τις κάρτες γραμμής που βρίσκονται σε αδράνεια (και το αντίστοιχο οπτικό κύκλωμα ή οπτικό μονοπάτι φωτός), όταν το φορτίο είναι μικρό. Σε αυτό το σενάριο, η φυσική τοπολογία δεν έχει αλλάξει και η ενέργεια αποθηκεύεται αλλάζοντας μόνο την εικονική συνδεσιμότητα.

Ομοίως, στο [74], οι συγγραφείς έχουν προτείνει επίσης ένα σύστημα για την εξοικονόμηση ενέργειας κλείνοντας τις κάρτες γραμμής που βρίσκονται σε αδράνεια, αλλά και το σκελετό (σασί) των IP δρομολογητών στα IP-over-WDM δίκτυα, όταν το φορτίο είναι μικρό. Επιπλέον, το σύστημα αυτό ελαχιστοποιεί την πιθανή διακοπή της κυκλοφορίας, όταν οι κάρτες γραμμής και ο σκελετός κλείσουν.

5.1.2.2 Ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός του δικτύου

Ένας άλλος πιθανός τρόπος για να επιτευχθεί ενεργειακή απόδοση είναι να χρησιμοποιηθούν αρχιτεκτονικές εξοικονόμησης ενέργειας κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του δικτύου. Για παράδειγμα, στην [12], οι συγγραφείς θεωρούν μια σχεδιαστική προσέγγιση για ένα IP-over-WDM δίκτυο, όπου η κατανάλωση ενέργειας των IP δρομολογητών, των EDFAs και των αναμεταδοτών από κοινού ελαχιστοποιείται. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι διαφορετικά συστήματα «περιποίησης» της κυκλοφορίας (traffic grooming) έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ενεργειακά αποδοτική σχεδίαση [12]. Στην εργασία αυτή [12], ιεραρχικά μοντέλα έχουν επίσης προταθεί για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του εξοπλισμού του δικτύου. Οι συγγραφείς εξέτασαν δύο δυνατούς τρόπους για την εφαρμογή των IP-over-WDM δικτύων, δηλαδή, χρησιμοποιώντας οπτικά μονοπάτια φωτός (lightpaths) μη-παρακάμπτοντα (non-bypass) και παρακάμπτοντα (bypass). Σύμφωνα με τα non-bypass οπτικά μονοπάτια φωτός, όλα τα οπτικά μονοπάτια φωτός που προσπίπτουν σε έναν κόμβο πρέπει να τερματιστούν, δηλαδή όλα τα δεδομένα που μεταφέρονται μέσω των οπτικών μονοπατιών φωτός επεξεργάζονται και διαβιβάζονται από τους IP δρομολογητές. Αλλά η προσέγγιση των bypass οπτικών μονοπατιών φωτός επιτρέπει την IP κυκλοφορία αυτών των οποίων ο προορισμός δεν είναι κάποιος ενδιάμεσος κόμβος να παρακάμψει άμεσα τον ενδιάμεσο δρομολογητή, μέσω ενός τεμνόμενου οπτικού μονοπατιού φωτός. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με τα bypass οπτικά μονοπάτια φωτός μπορεί να γίνει εξοικονόμηση περισσότερης ενέργειας από ό, τι με τα non-bypass, που οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο αριθμός των IP δρομολογητών μπορεί να μειωθεί κατά τη χρήση συστήματος bypass οπτικών μονοπατιών φωτός, στο σχεδιασμό ενός ενεργειακά αποδοτικού δικτύου κορμού. Εκτός αυτού, οι συγγραφείς εκτίμησαν επίσης την κατανάλωση ενέργειας των δρομολογητών, των EDFAs και των αναμεταδοτών ξεχωριστά. Δείχτηκε ότι η συνολική ενεργειακή κατανάλωση των δρομολογητών είναι πολύ περισσότερη από ότι στους EDFAs και τους αναμεταδότες, σε IP-over-WDM δίκτυα.

Οι κάρτες γραμμής και ο σκελετός των δρομολογητών του κορμού καταναλώνουν πολύ μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας στα δίκτυα κορμού. Διαφορετικές διαμορφώσεις των καρτών γραμμής / σκελετού, δηλαδή διαφορετικά επίπεδα πλήρωσης του σκελετού, έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετική κατανάλωση ενέργειας. Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο

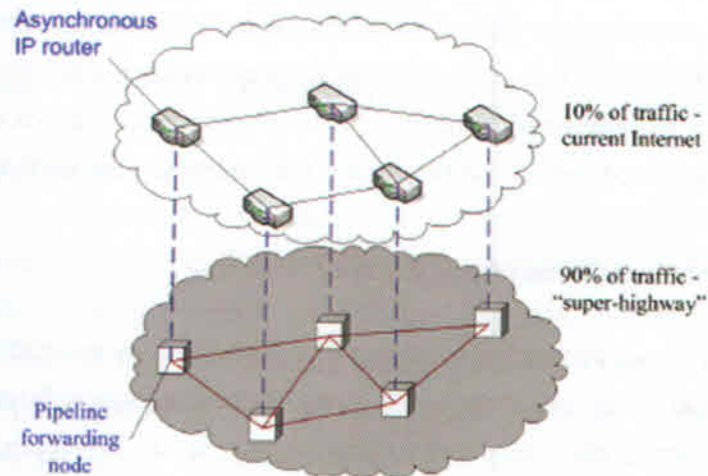
πλήρωσης, τόσο πιο ενεργειακά αποδοτικό θα είναι το δίκτυο [75]. Αυτό συμβαίνει επειδή ακόμη και ένας άδειος σκελετός χωρίς κάρτες γραμμής καταναλώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Ως εκ τούτου, ένα σασί με υψηλότερο επίπεδο πλήρωσης έχει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας ανά μεταφερόμενο bit από αυτά με τα χαμηλότερα επίπεδα πλήρωσης. Εκτός αυτού, ακόμη και αν οι δύο σκελετοί έχουν την ίδια απόδοση, ο σκελετός που υποστηρίζει υψηλότερης ταχύτητας κάρτες γραμμής τείνει να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια (ανά bit), από εκείνον που υποστηρίζει χαμηλότερης ταχύτητας κάρτες γραμμής [76]. Ως εκ τούτου, οι ενεργειακά αποδοτικές διαμορφώσεις των καρτών γραμμής / σκελετού μπορεί να είναι ένας νέος τρόπος για να μειωθεί η κατανάλωση της ενέργειας.

5.1.2.3 Ενεργειακά αποδοτική προώθηση IP πακέτων

Νέα συστήματα ενεργειακής προώθησης IP πακέτων έχουν προταθεί για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στο επίπεδο IP. Στο [76], οι συγγραφείς δείχνουν ότι το μέγεθος των IP πακέτων επηρεάζει την κατανάλωση της ενέργειας των δρομολογητών. Για ένα σενάριο σταθερού ρυθμού μετάδοσης bit (bit rate) της κυκλοφορίας, όσο μικρότερα είναι τα πακέτα IP που μεταφέρουν οι δρομολογητές, τόσο περισσότερη είναι η ενέργεια που καταναλώνουν. Έτσι, τα νέα συστήματα προώθησης IP πακέτων μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να είναι ενεργειακά αποδοτικά. Το μέγεθος των πακέτων IP μπορεί να βελτιστοποιηθεί για την εξοικονόμηση ενέργειας όταν πρόκειται να διαβιβασθούν μέσω δρομολογητών. Ωστόσο, υπάρχει μια εξισορρόπηση μεταξύ της καθυστέρησης μεταγωγής πακέτων και της ενεργειακά αποδοτικής προώθησης IP πακέτων.

Μια άλλη προσέγγιση για την ενεργειακά αποδοτική προώθηση των πακέτων IP είναι η προώθηση pipeline [77]. Είναι ένα σύστημα μεταγωγής πακέτων IP, με βάση το χρόνο (που αναφέρεται επίσης ως Time-Driven Switching) και παρέχει τη δυνατότητα να παρατείνει την ενεργειακή απόδοση, με βάση το χρόνο, μεταγωγής των πακέτων IP, σε όλη τη διαδρομή προς τα άκρα του δικτύου. Με βάση τη προώθηση pipeline, μια αρχιτεκτονική δικτύου η οποία περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητα παράλληλα υποδίκτυα εργασίας προτείνεται στην [78]. Τα δύο υποδίκτυα εργασίας είναι το τρέχον Internet και τα «super-highways», όπου η προώθηση pipeline πακέτων IP έχει αναπτυχθεί (Σχήμα 5.2). Εκτός από τη μεταφορά τυπικής κίνησης, όπως αλληλογραφίας, χαμηλής προτεραιότητας περιήγηση στο διαδίκτυο και μεταφορά αρχείων, ασύγχρονοι δρομολογητές IP χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του σήματος που απαιτείται για τη δημιουργία σύγχρονων εικονικών καναλιών στη προώθηση pipeline παράλληλου δικτύου, το οποίο μεταφέρει την κίνηση που απαιτεί η ντετερμινιστική υπηρεσία, όπως τηλεφωνικές κλήσεις, video on demand, τηλεδιάσκεψη και διανεμημένο gaming. Μεγάλο εύρος ζώνης απαιτείται από τη πλειονότητα των εν λόγω video-based υπηρεσιών, οι οποίες είναι αναμενόμενη περίπτωση για πάνω από το 90% της μελλοντικής

κίνησης του Internet. Η προώθηση pipeline παράλληλου δικτύου είναι ένα «super-highway», όπου μεταφέρει ένα μεγάλο μέρος της κυκλοφορίας με ντετερμινιστική απόδοση. Ένα παράδειγμα οπτικής εφαρμογής της Time-Driven μεταγωγής υπόσχεται ακόμη πιο σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας [79].



Σχήμα 5.2: Παράλληλα δίκτυα στην ίδια υποδομή οπτικών ινών [79].

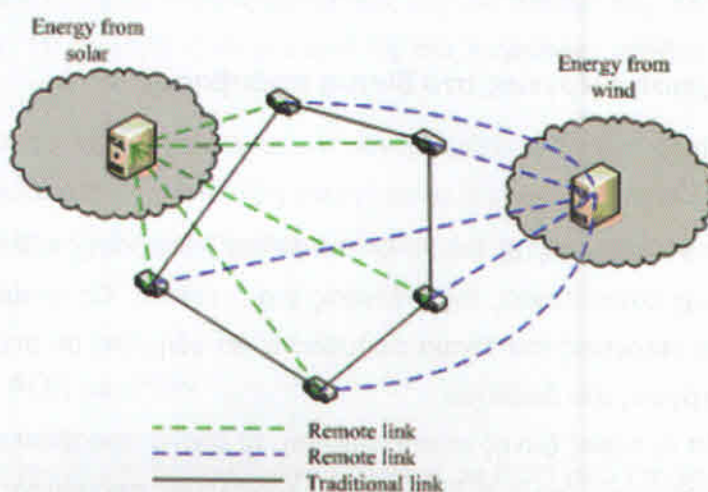
5.1.2.4 Πράσινη δρομολόγηση

Στα δίκτυα κορμού, η ενεργειακή δρομολόγηση προτείνεται ως ένα νέο σχήμα δρομολόγησης, το οποίο χρησιμοποιεί την κατανάλωση ενέργειας σε εξοπλισμό του δικτύου ως αντικείμενο προς βελτιστοποίηση. Οι συγγραφείς στην [17] προτείνουν ένα ενεργειακό σχήμα δρομολόγησης που θεωρεί την αναδιαμόρφωση των καρτών γραμμής / σκελετού σε δρομολογητές IP. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή συντομότερη διαδρομή ή τη μη ενεργειακού σχήματος δρομολόγηση, η ενεργειακή δρομολόγηση αναμένεται να εξοικονομήσει ένα μεγάλο ποσό ενέργειας. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κάρτες γραμμής και ο σκελετός, που είναι οι μεγάλοι καταναλωτές ενέργειας στο δίκτυο κορμού δεν έχουν ρυθμιστεί για χρήση με ενεργειακή αποδοτικότητα σε παραδοσιακά σχήματα δρομολόγησης. Σε αυτό το ενεργειακό σχήμα δρομολόγησης ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας από δρομολογητές IP σε δίκτυα κορμού. Επιπλέον, τα μελλοντικά ενεργειακά αποδοτικά σχήματα δρομολόγησης μπορεί να έχουν την τάση να είναι πιο δυναμικά, ώστε να μπορούν να αναδρομολογούν την κίνηση και να εξοικονομούν ενέργεια σύμφωνα με τη διακύμανση της κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας ή της περιόδου.

Ενώ η ενεργειακή απόδοση μπορεί να είναι μέρος της λύσης, πρόσφατη έρευνα [80], έθιξε επίσης την ανησυχία ότι, δεδομένου του ποσοστού αύξησης της ζήτησης για προϊόντα και υπηρεσίες ITC, η αύξηση της απόδοσης δε θα είναι επαρκής για να αντισταθμίσει την αύξηση της εν εξελίξει εγκατάστασης του νέου εξοπλισμού και υπηρεσιών. Όπως επίσης, η

τάση των χρηστών να αυξάνουν την κατανάλωση αγαθών (στην περίπτωση μας, της ενέργειας), όταν η τιμή των εν λόγω αγαθών μειωθεί, μπορεί να μετριάσουν τυχόν βελτίωση της αποτελεσματικότητας, δηλαδή έχει αποδειχθεί ότι παραδόξως η αύξηση της απόδοσης οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης. Έτσι, η εξάρτηση αποκλειστικά από την αύξηση της απόδοσης δεν μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τους υπολογιστές και τον εξοπλισμό του δικτύου.

Υπό το πρίσμα αυτό, δεδομένου ότι ο στόχος είναι ουσιαστικά η μείωση του αποτυπώματος του διοξειδίου του άνθρακα, μπορούν να αναπτυχθούν προσεγγίσεις για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, στοχεύοντας αμέσως στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, η οποία μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση της υπερθέρμανσης του πλανήτη και των σχετικών περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ως εκ τούτου, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν κερδίσει μεγαλύτερη προσοχή αυτές τις μέρες. Μια ιδέα για τη μείωση του αποτυπώματος του διοξειδίου του άνθρακα είναι η δημιουργία κεντρικών εξυπηρετητών (servers), μεταγωγών και κέντρων δεδομένων σε περιοχές όπου η ανανεώσιμη ενέργεια μπορεί να βρεθεί και στη συνέχεια για τη δρομολόγηση της κίνησης στις «πράσινες περιοχές» [81]. Δεδομένου ότι πολλά στοιχεία του δικτύου που καταναλώνουν ενέργεια θα πρέπει να αναπτυχθούν στις θέσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μηδενικό αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να πραγματοποιηθεί. Σε αυτή την περίπτωση, στοιχεία από άλλο τμήμα του δικτύου μπορεί να χρειαστούν να ζητήσουν από τον εξοπλισμό σε «πράσινες περιοχές» να μεταφέρει τη ζήτηση της κυκλοφορίας με απομακρυσμένο έλεγχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Η προσέγγιση αυτή θέτει μια σύνδεση μεταξύ του ενεργειακά αποδοτικού δικτύου και της αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η οποία θα πρέπει να αποκτήσει περισσότερο ενδιαφέρον για έρευνα στο εγγύς μέλλον.



Σχήμα 5.3: Πράσινη δρομολόγηση με διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [81].

5.1.3 Εξοικονόμηση ενέργειας στο μητροπολιτικό δίκτυο

Υπάρχει περιορισμένη έρευνα για την εξοικονόμηση ενέργειας στα μητροπολιτικά δίκτυα. Οι συγγραφείς στο [82] ασχολούνται με ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό αρχιτεκτονικών δικτύου για τα δίκτυα metro. Θεωρούν τρεις αρχιτεκτονικές για ένα μονής κατεύθυνσης WDM δίκτυο τοπολογίας δακτυλίου, δηλαδή πρώτης γενιάς (First Generation ή FG) οπτικό δίκτυο, SH (Single-Hop) δίκτυο και MH (Multi-Hop) δίκτυο. Σε ένα FG οπτικό δίκτυο κάθε κόμβος πρέπει να επεξεργαστεί ηλεκτρονικά όλες τις εισερχόμενες και εξερχόμενες κυκλοφορίες, συμπεριλαμβανομένης της κυκλοφορίας κατά τη μεταφορά. Σε ένα SH οπτικό δίκτυο κάθε κόμβος επεξεργάζεται ηλεκτρονικά μόνο την κίνηση που πηγαίνει εντός ή εκτός του δικτύου σε αυτόν τον κόμβο. Ένα δίκτυο MH βρίσκεται κάπου μεταξύ των δικτύων FG και SH.

Η αρχιτεκτονική MH κάνει χρήση πολυπλεξίας της κυκλοφορίας και των δύο, οπτικών μονοπατιών φωτός και ηλεκτρονικών, που εκτελούνται σε μερικούς επιλεγμένους ενδιάμεσους κόμβους. Ένα σχέδιο δικτύου εξοικονόμησης ενέργειας προτείνεται, με στόχο την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που απαιτείται από τα δύο οπτικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Η κατανάλωση της ενέργειας για τις τρεις αρχιτεκτονικές βελτιστοποιείται με χρήση σκευασμάτων ILP (Integer linear program). Οι συγγραφείς δείχνουν ότι όταν το WDM δίκτυο δακτυλίου μονής κατεύθυνσης έχει ομοιόμορφη κίνηση, η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου MH είναι χαμηλότερη από εκείνη του δικτύου FG, όχι μόνο όταν το φορτίο της κυκλοφορίας των οπτικών στοιχείων είναι χαμηλή, αλλά επίσης και όταν ο ρυθμός της σύνδεσης είναι κοντά στη χωρητικότητα του μήκους κύματος. Οι συγγραφείς δείχνουν επίσης ότι όταν το ποσοστό σύνδεσης είναι χαμηλό, το δίκτυο MH ξεπερνά το εξ' ολοκλήρου οπτικό δίκτυο SH, επειδή το δίκτυο MH έχει μεγαλύτερη ευελιξία για την εκτέλεση της πολυπλεξίας της κυκλοφορίας, με έναν ενεργειακά αποδοτικό τρόπο.

5.1.4 Εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο πρόσβασης

5.1.4.1 Εισαγωγή

Μια πρόσφατη εκτίμηση [19] δείχνει ότι τα δίκτυα πρόσβασης καλύπτουν περίπου το 70% της συνολικής κατανάλωσης της ενέργειας στο διαδίκτυο. Ως εκ τούτου, η μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας στα δίκτυα πρόσβασης θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο διαδίκτυο.

Δεδομένου ότι το εύρος ζώνης απαιτεί αύξηση, τα δίκτυα πρόσβασης αποκτούν όλο και πιο ετερογενή χαρακτήρα, όπως οι διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης που συνδυάζονται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, οι τρέχουσες εκδόσεις των xDSL χρησιμοποιούν ίνα ως backhaul και τα δίκτυα πρόσβασης CM χρησιμοποιούν HFC (Hybrid Fiber Coax) τεχνολογία

στην εγκατάσταση του δικτύου. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών πρόσβασης οπτικών ινών θα οδηγήσει σε μελλοντικά ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα πρόσβασης.

Πρόσφατα, έχει υπάρξει μια αναδυόμενη ανησυχία για χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος σε πολλούς τομείς και της οποίας ένα μέρος είναι τα δίκτυα επικοινωνιών [83]. Εξαιτίας της τεράστιας επέκτασης των εφαρμογών triple rollouts play (φωνή, βίντεο και δεδομένων) των τηλεπικοινωνιών (όπως video on demand, e-learning, διαδραστικά παιχνίδια, IPTV, τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας HDTV, κλπ.) θα χρειαστεί ένα εγγυημένο εύρος ζώνης άνω των 100 Mbps.

Ενώ οι κληρονομημένες τεχνολογίες πρόσβασης (όπως η ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (DSL) και το καλωδιακό μόντεμ (CM)) παρουσιάζουν περιορισμούς εύρους ζώνης για το μέλλον, οι βασισμένες σε οπτική ίνα τεχνολογίες (π.χ., Fiber-to-the-Home (FTTH), Fiber-to-the-Building (FTTB), Fiber-to-the-Curb (FTTC), κλπ.) δείχνουν υποσχέσεις για την υποστήριξη υψηλού εύρους ζώνης ψηφιακών υπηρεσιών. Η επόμενη γενιά των δικτύων πρόσβασης δείχνει συνέπεια στις τάσεις για εγκατάσταση οπτικών ινών σε όλη τη διαδρομή προς τις εγκαταστάσεις του πελάτη.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα δίκτυα FTTH μπορούν να ταξινομηθούν είτε σε PON (παθητικό οπτικό δίκτυο) είτε σε AON (ενεργό οπτικό δίκτυο), ανάλογα με τη χρήση παθητικών ή ενεργητικών διατάξεων. Ωστόσο, σύμφωνα με τοπολογικές δομές, τα δίκτυα FTTH μπορούν να καταταχθούν είτε ως Point to Point (P2P) ή ως Point to Multipoint δίκτυα [84].

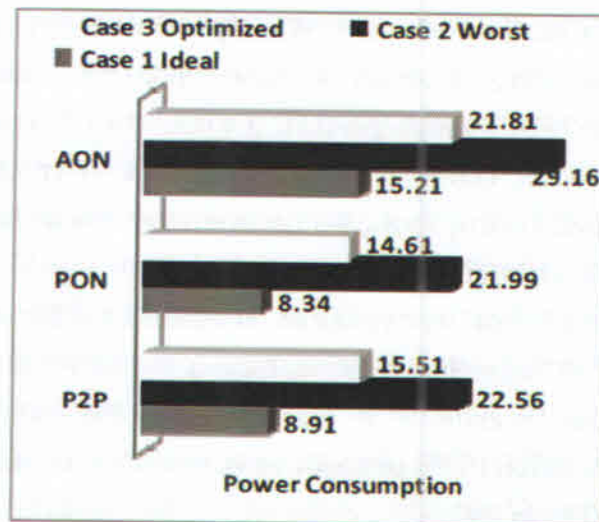
Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις επέτρεψαν τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων για την ανάπτυξη οπτικών δικτύων πρόσβασης, όπως το Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON) και τη βελτίωση της χωρητικότητας εύρους ζώνης του δικτύου πρόσβασης. Μια πρόσφατη μελέτη επίσης, προτείνει ότι το PON είναι μια από τις πιο ενεργειακά αποδοτικές λύσεις δικτύου πρόσβασης.

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται και συγκρίνονται τα οπτικά δίκτυα. Η παράγραφος αυτή επικεντρώνεται στην κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης και γίνεται σύγκριση μεταξύ χρήσης και όχι κάποιας λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτά τα δίκτυα.

5.1.4.2 P2P vs. AON vs. PON

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, το PON είναι ένα κοινό μέσο στο οποίο μία ίνα παθητικά χωρίζεται σε πολλές συνδέσεις τελικού χρήστη. Ο όρος «παθητικό» αναφέρεται μόνο στον οπτικό διαχωριστή, που λειτουργεί ανεξάρτητα από εξωτερική ηλεκτρική ενέργεια. Κάθε τελικός χρήστης έχει μια ONU (οπτική μονάδα δικτύου), ενώ η ίνα

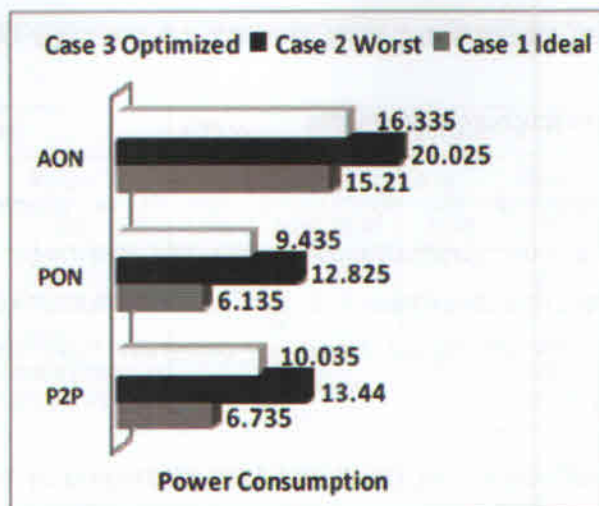
τερματίζει σε ένα κεντρικό γραφείο σε ένα OLT (οπτικό τερματικό γραμμής), το οποίο απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια. Μεταξύ του OLT και της ONU μπορούν να βρίσκονται ένα ή δύο στάδια παθητικών διαχωριστών, οι οποίοι χωρίζουν τη σύνδεση σε πολλαπλά τελικά σημεία. Το σήμα που παράγεται στο δίκτυο κορμού θα πρέπει να σταλεί προς τη ζητούσα ONU [43]. Στα P2P δίκτυα όλες οι ONUs συνδέονται άμεσα με τα OLTs, δηλαδή δεν υφίσταται απομακρυσμένος κόμβος μεταξύ τους. Για κάθε N χρήστες υπάρχουν N γραμμές οπτικής ίνας και 2N πομποδέκτες, οπότε το σύστημα αυτό είναι πολύ δαπανηρό [85]. Το AON απαιτεί μόνο μία ίνα, αλλά χρησιμοποιεί ηλεκτρικό εξοπλισμό σε απομακρυσμένο κόμβο, όπως μεταγωγέα ή δρομολογητή και έτσι καταναλώνει περισσότερη ενέργεια [85].



Σχήμα 5.4: Σύγκριση της καταναλισκόμενης ισχύος κάτω από διάφορες συνθήκες για τη λειτουργία αγνόησης της ενέργειας [86].

Στην [86], σε πρώτη φάση αναλύονται μέσω προσομοιώσεων οι παραπάνω τύποι οπτικών δικτύων (P2P, PON και AON), χωρίς τη χρησιμοποίηση λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας (Σχήμα 5.4). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν για καλύτερο δυνατό δίκτυο, κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας και τα δίκτυα αναλύονται ξανά ως προς την κατανάλωση ενέργειας (Σχήμα 5.5). Μετά από αυτό, γίνεται συγκριτική ανάλυση μεταξύ αγνόησης της λειτουργίας και με τη χρήση λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας. Η συγκριτική ανάλυση δείχνει ότι τα PONs καταναλώνουν 9.435W ισχύ με τη λειτουργία βελτιστοποίησης και ότι είναι τα λιγότερο δαπανηρά μεταξύ αυτών των τριών τύπων δικτύων.

Από προσομοιώσεις της λειτουργίας αγνόησης της ενέργειας, έχει παρατηρηθεί ότι το παθητικό οπτικό δίκτυο καταναλώνει πολύ λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τα άλλα δίκτυα και δηλώνεται ως πιο αποτελεσματικό [86]. Αυτό θα εξοικονομήσει μεγάλα ποσά ενέργειας



Σχήμα 5.5: Σύγκριση της καταναλισκόμενης ισχύος για τη λειτουργία εξοικονόμησης της ενέργειας [86].

σε μεγαλύτερου μεγέθους δίκτυα. Το PON καταναλώνει έτσι 9.435W ισχύ, σε σχέση με την αγνόηση της λειτουργίας εξοικονόμησης που καταναλώνει 14.61 W ισχύ. Έτσι, βελτιστοποιημένες μέθοδοι εφαρμόζονται σε αυτό το δίκτυο για καλύτερη απόδοση. Όμως, η συνέχεια εφαρμογής μηχανισμών εξοικονόμησης ενέργειας στα Point to Point δίκτυα και στα ενεργά οπτικά δίκτυα είναι εξίσου σημαντική, επειδή μπορεί να υπάρξουν καταστάσεις όπου το παθητικό οπτικό δίκτυο να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας, αντί της πρώτης λειτουργίας (αγνόησης της ενέργειας) που μπορεί.

5.1.5 Συμπεράσματα

Η ενεργειακή απόδοση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων είναι ένα πρόσφατο θέμα της έρευνας, αλλά κερδίζει ταχεία αναγνώριση από την ερευνητική κοινότητα, με κίνητρο την ανησυχία για την ολοένα και αυξανόμενη κατανάλωση της ενέργειας των ITC. Η έρευνα αυτή αξιολογεί πρωτόκολλα εξοικονόμησης της ενέργειας και ενεργειακά αποδοτικές αρχιτεκτονικές πάνω στους διάφορους τομείς των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, δηλαδή τον κορμό, το metro και τα δίκτυα πρόσβασης, με ιδιαίτερη έμφαση στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που χρησιμοποιούν οπτικές τεχνολογίες.

5.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στα παθητικά οπτικά δίκτυα

5.2.1 Κατανάλωση ενέργειας στα PONs

Η κατανάλωση ενέργειας του εξοπλισμού των PONs εξαρτάται κυρίως από τις ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξή τους. Η κατανάλωση ενέργειας είναι διαθέσιμη στο ερευνητικό άρθρο [87] και στα συστατικά φύλλα δεδομένων. Ο πίνακας 5.1 συνοψίζει την αποτίμηση διαφόρων στοιχείων ενός δέκτη μιας ONU για την κατανάλωση ενέργειάς τους.

Πίνακας 5.1: Κατανάλωση ισχύος (mW) από διακριτά στοιχεία σε front-end ONU δέκτη.

Front-End Component	GEPON		GPON		10GEPON		10GPON	
	Avg	Range	Avg	Range	Avg	Range	Avg	Range
APD	2.6	2-3.75	2.6	2-3.75	2.6	2-3.75	2.05	0.5-3.75
TIA	83.4	56-112	83.4	56-112	123	105-160	123	105-160
LA	121	89-140	126	100-165	145	110-165	154	125-180
CDR	545	540-580	520	260-790	356		356	
SERDES	550	530-660	560	530-660	NA		NA	
Total Front-End	1302		1292		NA		NA	

Ωστόσο, η τάση στο χώρο της ηλεκτρονικής (καθώς και σήμερα στην οπτική) είναι η ενσωμάτωση πολλών στοιχείων. Όπως φαίνεται στον πίνακα 5.2, η ενσωμάτωση επιτρέπει σε στοιχεία τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Πίνακας 5.2: Κατανάλωση ισχύος (mW) ολοκληρωμένων στοιχείων σε front-end ONU δέκτη.

Integration	GEPON	GPON	10GEPON	10GPON
	Power (mW)			
CDR	545	520	356	356
CDR+LA	410	410	350	NA
CDR+SERDES	910	790	NA	
CDR+LA+SERDES	610	610	NA	

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν επιβεβαιώνουν τα στοιχεία που έχουν ήδη υποβληθεί στη βιβλιογραφία [88] για τη συνολική κατανάλωση της ONU. Όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3, μεταξύ 60% - 70% της κατανάλωσης ισχύος της ONU οφείλεται στον πομποδέκτη του PON και στο back-end κύκλωμα [89].

Πίνακας 5.3: Κατανάλωση ισχύος (mW) πομποδέκτη και υπηρεσιών ONU σε διαφορετικά συστήματα PON.

Variables	GEPON		GPON		10GEPON		10GPON	
	Avg	Range	Avg	Range	Avg	Range	Avg	Range
Transceiver	1350	1100-2500	1500	1040-2250	1600	1300-2300	1800	1800-1800
Back-End Circuit	2700		3150		5850		6750	
Whole ONU (Services)	6000 (Ethernet Data Port+IPTV)		7000 (Triple Play+Multicast Video)		13000 (prediction)		15000 (PoE on Gigabit Ethernet Port)	

5.2.2 Προσεγγίσεις για εξοικονόμηση ενέργειας στα PONs

Αυτή η παράγραφος παρέχει μια ταξινόμηση των προσεγγίσεων που έχουν προταθεί μέχρι στιγμής και τονίζει τα χαρακτηριστικά τους.

5.2.2.1 Προσέγγιση φυσικού επιπέδου

Οι προσεγγίσεις φυσικού επιπέδου περιλαμβάνουν λύσεις με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα PONs, επικεντρωμένες στην αρχιτεκτονική του φυσικού επιπέδου του πρωτοκόλλου IEEE 802.3 (Physical Medium Dependent (PMD) sublayer, Physical Medium Attachment (PMA) sublayer, Physical coding sublayer (PCS)). Αυτές μπορούν περαιτέρω να διαιρεθούν σε: προσανατολισμένες προσεγγίσεις συσκευής και υπηρεσίας [89].

Οι προσανατολισμένες προσεγγίσεις συσκευής στοχεύουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών, ενεργοποιώντας υπηρεσίες που παρέχονται από κάθε υποεπίπεδο. Επιπλέον περιλαμβάνουν εξοπλισμό πομποδεκτών με προσαρμοσμένο ρυθμό συνδέσμου (δηλαδή, Adaptive Link Rate (ALR), όπως χαλκό σε Ethernet [90], συσκευή βελτιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης [91], χρήση νέων μορφών διαμόρφωσης για μετάδοση δεδομένων που είναι πιο ενεργειακά αποδοτικοί [92], [93].

Οι προσανατολισμένες προσεγγίσεις υπηρεσίας στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης της υπηρεσίας που παρέχεται από ένα υποεπίπεδο (π.χ., ανάκτηση του ρολογιού στο υποεπίπεδο PMA) για την ενεργοποίηση λύσεων ανώτερου επιπέδου (π.χ., λειτουργία αναμονής / ύπνου) [94].

5.2.2.2 Προσέγγιση Data Link

Οι προσεγγίσεις επιπέδου Data Link στοχεύουν στην αρχιτεκτονική του επιπέδου Data Link του πρωτοκόλλου IEEE 802.3 (επίπεδο MAC) και βασίζονται στη δυνατότητα μεταγωγής στοιχείων του δικτύου σε λειτουργία χαμηλής ισχύος. Μολονότι η διαθεσιμότητα της λειτουργίας χαμηλής ισχύος πρέπει να παρέχεται από το φυσικό επίπεδο, οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να ταξινομηθούν ως προσεγγίσεις Data Link, επειδή βασίζονται σε επεκτάσεις του πρωτοκόλλου MPCP (Multi Point Control Protocol) και σε τροποποίηση των αλγορίθμων DBA (Dynamic Bandwidth Allocation). Οι προσεγγίσεις αυτές δεν απαιτούν τροποποιήσεις στο φυσικό επίπεδο, αλλά υποστήριξη λειτουργίας χαμηλής ισχύος στις συσκευές. Η ITU-T.G.sup.45 [95] προτείνει τρεις τύπους προτύπων εξοικονόμησης ενέργειας: power shedding, dozing και sleeping.

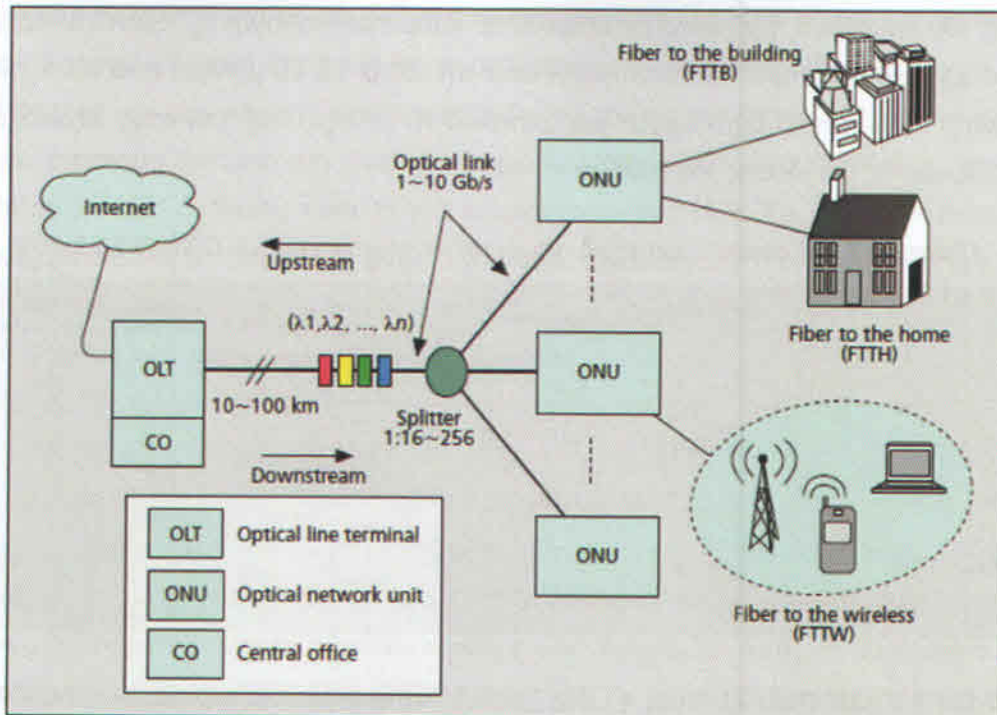
5.2.2.3 Κοινή προσέγγιση

Οι κοινές προσεγγίσεις είναι οι μόνες που συνδυάζουν προσεγγίσεις φυσικού και data link επιπέδου για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Σε γενικές γραμμές, οι προσεγγίσεις έχουν ταξινομηθεί ως κοινές (joint) όταν δεν μπορούν να εφαρμοστούν χωριστά. Περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, επεκτάσεις του πρωτοκόλλου MPCP για την ενεργοποίηση της λειτουργίας του «ύπνου» με τις προσεγγίσεις φυσικού επιπέδου για ελεγχόμενη τροφοδοσία των ONUs [96]. Άλλες μελέτες θεωρούν το συνδυασμό της λειτουργίας του «ύπνου» και του ρυθμού προσαρμογής συνδέσμου για τη βελτιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται, ενώ προσαρμόζονται στις πραγματικές ανάγκες της κίνησης [97]. Τέλος, μερικές μελέτες προτείνουν το συνδυασμό των τροποποιημένων αρχιτεκτονικών ONU με δυναμική λειτουργία αναμονής/ύπνου για τη βελτίωση της ανάκτησης του ρολογιού μετά από «ξύπνημα» της μονάδας ONU [83]. Με τον τρόπο αυτό η υπερφόρτωση χρόνου ελαχιστοποιείται και επιτυγχάνεται αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

5.2.3 Διαχείριση ενέργειας στα NG-PON

5.2.3.1 Αναπτυσσόμενα οικολογικά παθητικά οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς

Κατά τα τελευταία χρόνια τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (NG-PON) επόμενης γενιάς έχουν θεωρηθεί ως τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες ευρυζωνικής πρόσβασης. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6, τα NG-PON έχουν μαζικά εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια [42]. Η ιδέα τους γεννήθηκε για να υποστηρίξει όχι μόνο υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων (έως 10 Gb/s), αλλά και να φθάσει να καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις (έως 100 χιλιόμετρα) και πολύ μεγάλο λόγο διαχωρισμού (μέχρι 1:256), εξυπηρετώντας έτσι περισσότερους χρήστες στις ευρύτερες περιοχές [98].



Σχήμα 5.6: Εξέλιξη της NG-PON Point to Multipoint (P2MP) αρχιτεκτονικής: υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, μεγαλύτεροι λόγοι διαχωρισμού, περισσότερες ONUs, μεγαλύτερη κάλυψη, πολλαπλά μήκη κύματος.

5.2.3.2 Τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας στα NG-PON

Οι τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας στα NG-PON μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτές που βασίζονται στο hardware (υλικό) και σε αυτές που βασίζονται στο software (λογισμικό). Αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε τεχνολογία NG-PON εκτός αν ορίζεται διαφορετικά [98].

Οι τεχνικές που βασίζονται στο **hardware** έχουν να κάνουν είτε με νέες αρχιτεκτονικές ONU, είτε με επαναχρησιμοποίηση οπτικού θορύβου.

α) Νέες αρχιτεκτονικές ONU – Η κληρονομιά της IEEE, το 802.3ah πρότυπο για τις ONUs (STD-ONUs), δεν υποστηρίζει τη λειτουργία του ύπνου. Για την αντιμετώπιση αυτής της ανεπάρκειας προτάθηκαν νέες αρχιτεκτονικές ONU [99]. Ο πίνακας 5.4 εμφανίζει αυτές τις ONUs και αναδεικνύει τη διαφορά μεταξύ των χαρακτηριστικών της κάθε αρχιτεκτονικής σε σχέση με την STD-ONU η οποία πάντα καταναλώνει τη μέγιστη ενέργεια. Οι αρχιτεκτονικές αυτές περιγράφονται εν συντομία ως ακολούθως:

Green ONU-1 (GR-ONU-1): Περιλαμβάνει βασικά την ίδια αρχιτεκτονική όπως η STD-ONU, με επιπλέον τη δυνατότητα λειτουργικότητας ύπνου (με τη χρήση ενός ενσωματωμένου χρονομέτρου). Τα πλεονεκτήματα της GR-ONU-1 είναι ότι δεν απαιτεί καμιά νέα κατασκευή ONU, μπορεί να εξοικονομήσει μέγιστη ενέργεια με απενεργοποίηση του μεγαλύτερου

μέρους του hardware της όταν μεταβαίνει σε κατάσταση αναμονής. Ωστόσο, το μεγάλο σχετικά χρονικό διάστημα που δαπανάται από την ONU για να μεταβεί από την κατάσταση αναμονής σε ενεργή, δημιουργεί μια ανταλλαγή μεταξύ της μέγιστης εξοικονόμησης ενέργειας και της απόδοσης του δικτύου.

Πίνακας 5.4: Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών αρχιτεκτονικών ONU [99,95,100].

ONU architecture	Laser turn-on time	Clock recovery time	Sync. time	Total overhead	Active power consumption	Sleep power consumption	Doze power consumption
STD-ONU	600 ns	N/A	N/A	600 ns	3.85 W	N/A	N/A
GR-ONU-1/A	600 ns	2 ms (aggressive)	0.125 ms	2.125 ms	3.85 W	0.75 W	1.7 W
GR-ONU-1/C		5 ms (conservative)	0.125 ms	5.125 ms			
GR-ONU-2	600 ns	10 – 50 ns	0.125 ms	0.125 ms	3.85 W	1.08 W	1.7 W
GR-ONU-3	600 ns	0 ms	0.125 ms	0.125 ms	3.85 W	1.28 W	1.7 W

Green ONU-2 (GR-ONU-2): Αυτή η ONU βασικά διατηρεί κάποια μέρη από το hardware της ενεργά, έτσι ώστε να απαιτείται πολύ σύντομο χρονικό διάστημα σε βάρος της ελαφρώς μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας, ενώ βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής.

Green ONU-3 (GR-ONU-3): Αυτή η αρχιτεκτονική κυρίως εστιάζει στην εξάλειψη του χρόνου γενικά, απενεργοποιώντας το ελάχιστο κατά το δυνατόν hardware που απαιτείται για να μεταβεί η ONU στην κατάσταση αναμονής. Ωστόσο, όπως αναμένεται, η κατανάλωση ενέργειας στην κατάσταση αναμονής θα είναι υψηλότερη.

β) Επαναχρησιμοποίηση οπτικού θορύβου – Η επέκταση της προσέγγισης του δικτύου στα NG-PON (π.χ. στα LRPON, NG-PON1 και NG-PON2) μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές απώλειες του οπτικού σήματος. Επιπλέον, οι πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ των μηκών κύματος υπόκεινται στις συνέπειες της σκέδασης Rayleigh που μπορεί να προκαλέσει διαταραχή στην ίνα που τροφοδοτεί το διαχωριστή ισχύος, οδηγώντας σε υποβάθμιση της απόδοσης. Ο εξοπλισμός της ONU με έναν οπτικό ενισχυτή ημιαγωγού (SOA) είναι η λύση στο πρόβλημα αυτό μέχρι τώρα. Ωστόσο, ο SOA αυξάνει σημαντικά την κατανάλωση ισχύος. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος προτάθηκε μια νέα τεχνική [101] που κυρίως επαναχρησιμοποιεί τον οπτικό θόρυβο του ενισχυτή ως άντληση ενέργειας για όλους τους κόμβους του δικτύου. Αυτό επιτρέπει τελικά για περισσότερους ταυτόχρονα τροφοδοτούμενους χρήστες και χαμηλότερα ή ίσα ενεργειακά κόστη [98].

Οι τεχνικές με βάση το **software** μπορούν να εφαρμοστούν μέσω των ακόλουθων πέντε μεθόδων:

ONU Power Shedding – Με την περικοπή ισχύος [95], η ONU απενεργοποιεί μερικές από τις διατάξεις της και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, συμμετέχοντας σε ένα διαφορετικό τρόπο υπηρεσιών και λειτουργιών, αφήνοντας την οπτική σύνδεση σε πλήρη λειτουργία. Ως

εκ τούτου η περικοπή ισχύος μπορεί να επιτύχει μόνο την ελάχιστη εξοικονόμηση ενέργειας, αν και η καλύτερη δυνατή απόδοση του συστήματος μπορεί να εξασφαλιστεί.

ONU Dozing – Η τεχνική αυτή απενεργοποιεί μόνο τον πομπό στην ONU για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα (τυπικά στη διάρκεια περιόδων όπου δεν είναι διαθέσιμη απερχόμενη κυκλοφορία), ενώ ο δέκτης είναι πάντα ενεργοποιημένος [95]. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι δεν αξιοποιεί τη δυνατότητα απενεργοποίησης του δέκτη όταν δεν υπάρχει εισερχόμενη κίνηση.

ONU Sleep – Η τεχνική αυτή αντανακλά την κατάσταση όπου τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης είναι απενεργοποιημένοι για μεγάλο χρονικό διάστημα [95]. Περαιτέρω κατηγοριοποιείται ως εξής:

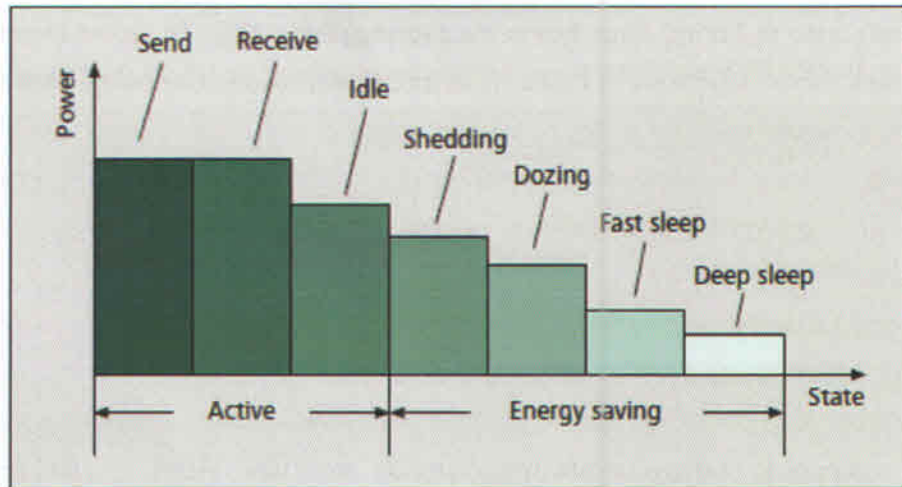
Deep Sleep: Σε αυτήν τη λειτουργία ο πομπός και ο δέκτης της ONU απενεργοποιούνται, όταν δεν υπάρχει απερχόμενη και εισερχόμενη κίνηση. Αν και μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη μείωση ισχύος θα μπορούσε να προκαλέσει υποβάθμιση των επιδόσεων, εξαιτίας της πιθανής απόρριψης εισερχόμενων/απερχόμενων πακέτων. Αυτή η λειτουργία μπορεί ιδιαίτερα να χρησιμοποιηθεί όταν η ONU δεν είναι σε χρήση ή όταν η απώλεια πακέτων μπορεί να είναι σε ανεκτά επίπεδα.

Fast/Cyclic Sleep: Κάτω από αυτήν τη λειτουργία η κατάσταση της ONU εναλλάσσεται ανάμεσα στην κατάσταση ύπνου (όταν ο πομποδέκτης είναι εντελώς απενεργοποιημένος) και στην ενεργή κατάσταση (όταν ο πομποδέκτης είναι ενεργοποιημένος). Η ενεργή περίοδος και η περίοδος ύπνου που την ακολουθεί συνθέτουν τον κύκλο του ύπνου. Η απόδοση του συστήματος σε αυτή την τεχνική εξαρτάται κυρίως στην εκχωρημένη περίοδο ύπνου και στο δυναμικά κατανομημένο εύρος ζώνης (DBA) που χρησιμοποιείται στην ενεργή περίοδο.

Οι τρεις παραπάνω τεχνικές επιτρέπουν στην ONU να μεταβαίνει σε νέες καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας της ONU κάτω από διαφορετικές ενεργείες και καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας φαίνεται στο Σχήμα 5.7.

Σαφώς σε λειτουργία ύπνου η ONU μπορεί να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια από όλες τις άλλες τεχνικές. Θεωρείται επίσης η πλέον υποσχόμενη στρατηγική εξοικονόμησης ενέργειας στα NG-PONs δίκτυα [102] και έχει εκτενώς μελετηθεί και διερευνηθεί σύμφωνα με τις τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες. Στην αναφορά [103] προτείνεται ένας νέος τρόπος διαχείρισης ενέργειας μέσω του πρωτοκόλλου MAC, που εκτελεί θυριδωτή καθορισμένη κατανομή εύρους ζώνης (FBA) για απερχόμενη και εισερχόμενη κίνηση, όταν το σύστημα λειτουργεί με χαμηλά φορτία. Το OLT παρακολουθεί συνεχώς τη διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος και μετάγει το σύστημα σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας, όταν η κυκλοφοριακή κίνηση είναι κάτω από ένα καθορισμένο όριο. Δεδομένου ότι η ONU ενεργοποιείται και απενεργοποιείται με μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο για τα δεδομένα εκπομπής/λήψης, το σύστημα δεν μπορεί να διαχειριστεί τυχόν περιορισμούς QoS (π.χ. μια απαίτηση μέγιστης καθυστέρησης). Επιπλέον υποθέτει μια άπειρη σε χωρητικότητα

προσωρινή μνήμη στην ONU, η οποία μπορεί να φιλοξενήσει όλη την εισερχόμενη κίνηση κατά τη διάρκεια της περιόδου ύπνου και η οποία μπορεί να εισάγει σημαντική καθυστέρηση πακέτων.



Σχήμα 5.7: Κατανάλωση ενέργειας της ONU κάτω από διαφορετικές καταστάσεις πλήρους ενέργειας και εξοικονόμησης ενέργειας.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 5.4 ο χρόνος ανάκαμψης του ρολογιού της ONU αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα από το συνολικότερο χρόνο γενικά. Για να αμβλυθούν οι επιπτώσεις από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα αποκατάστασης [104], σχεδιάστηκε ένα γρήγορο ρολόι και ένα κύκλωμα ανάκτησης δεδομένων (στις GR-ONU-2 και GR-ONU-3) και προτάθηκε ένας άμεσος μηχανισμός ελέγχου που μπορεί να κάνει την ONU ικανή να μεταβεί γρηγορότερα από την κατάσταση ύπνου στην κατάσταση ενεργοποίησης.

Οι συγγραφείς της αναφοράς [105] πρότειναν ένα δυναμικό μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας για ONU, με τον οποίο η ONU δυναμικά μετάζεται ανάμεσα στο διακοπτόμενο και το συνεχόμενο τρόπο λειτουργίας. Η ONU απενεργοποιεί το κύκλωμα του δέκτη κατά τη διάρκεια της περιόδου εξοικονόμησης ενέργειας και μπορεί να είναι γρήγορα έτοιμη για εκπομπή/λήψη ανακτώντας το ρολόι του OLT, χρησιμοποιώντας ένα δέκτη διακοπτόμενης λειτουργίας. Σε αντίθεση, η συνεχής λειτουργία διατηρεί το κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού ενεργό, το οποίο απαιτεί μόνο απλές διαδρομές του κυκλώματος ελέγχου. Σαφώς ο διακοπτόμενος τρόπος λειτουργίας ύπνου μπορεί να επιτύχει καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και λιγότερο χρόνο συνολικά από το συνεχόμενο τρόπο λειτουργίας ύπνου σε βάρος των περισσότερων πολύπλοκων κυκλωμάτων ελέγχου (παρόμοιων με GR-ONU-3).

Οι συγγραφείς της αναφοράς [106] προτείνουν δύο σενάρια λειτουργίας ύπνου για ONUs. Η μελέτη υποθέτει την ύπαρξη πολλαπλών επιπέδων ισχύος στις ONUs όπου το κάθε επίπεδο ή κατάσταση αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας. Στο πρώτο σενάριο, η ONU είναι σε κατάσταση ύπνου για περισσότερο από έναν κύκλο

δυναμικά κατανεμημένου εύρους ζώνης (DBA). Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας ένα κατώφλι αδρανείας, για να περιορίσει τον μέγιστο χρόνο στον οποίο η ONU παραμένει σε αδράνεια πριν μεταβεί σε κατάσταση ύπνου. Στο δεύτερο σενάριο, η ONU μεταβαίνει σε λειτουργία αναμονής βασισμένη σε ένα κατώτατο όριο που υπολογίζεται μέσω των προφίλ της εισερχόμενης κίνησης όλων των ONUs.

Συνοψίζοντας οι τεχνικές που βασίζονται στο software υπόσχονται λύσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας στα NG-PONs δίκτυα, καθώς μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας με χαμηλό κόστος. Ωστόσο, αποτελεσματικοί μηχανισμοί απαιτούνται για τη δραστηριότητα των υπαρχόντων και των νέων αρχιτεκτονικών των ONU, προκειμένου να οικοδομηθεί ένα πράσινο NG-PON δίκτυο χωρίς διακοπές στις απαιτήσεις των υπηρεσιών των χρηστών [98].

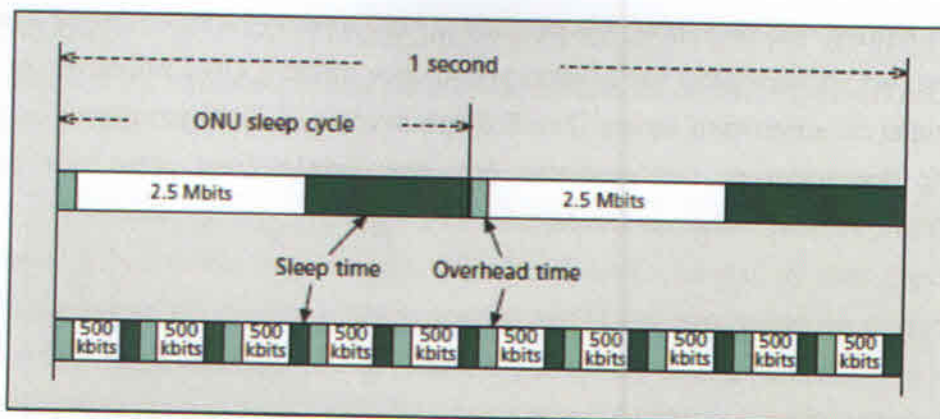
5.2.3.3 Πράσινη κατανομή εύρους ζώνης (GBA)

Προτείνεται ένα νέο πλαίσιο εργασίας, η πράσινη κατανομή εύρους ζώνης (Green Bandwidth Allocation - GBA), η οποία διαθέτει τις ακόλουθες τεχνικές:

- Hydric cyclic/deep sleep ενεργοποιημένη στις ONUs.
- Batch-mode μετάδοση στο OLT και στις ONUs.
- UCS με βάση το DBA.

Με το προτεινόμενο GBA η ONU μεταβαίνει σε κατάσταση αναμονής για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα πριν ενεργοποιηθεί και στείλει/λάβει μια παρτίδα της προσωρινά αποθηκευμένης απερχόμενης/εισερχόμενης κίνησης. Ο κύριος σκοπός αυτής της στρατηγικής είναι να παρατείνει την κατάσταση αναμονής της ONU όσο το δυνατόν περισσότερο, για να μειωθεί ο συνολικός υπερκείμενος χρόνος που συσσωρεύεται λόγω των συχνών εναλλαγών της ONU ανάμεσα στην κατάσταση αναμονής και ενεργοποίησης. Το Σχήμα 5.8 απεικονίζει τη διαφορά μεταξύ της προτεινόμενης στρατηγικής GBA (άνω διάγραμμα) και της παραδοσιακής στρατηγικής εκπομπής (κάτω διάγραμμα).

Αν και ο συνολικός ενεργός χρόνος είναι ο ίδιος για τη μετάδοση δεδομένων (π.χ. 5Mb), η προτεινόμενη GBA μπορεί να επιτύχει μια μεγαλύτερη επιπλέον περίοδο αναμονής της ONU στο σύνολο, λόγω του πολύ μικρότερου υπερκείμενου χρόνου (overhead time), εξοικονομώντας έτσι περισσότερη ενέργεια. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την παραδοσιακή στρατηγική, αυτή έχει ως αποτέλεσμα συνολική επιβάρυνση $10 \times 5.125 = 51.25$ ms, με την αρχιτεκτονική της GR-ONU-1/C. Από την άλλη πλευρά με τη προτεινόμενη στρατηγική GBA, η συνολική επιβάρυνση μειώνεται σε $2 \times 5.125 = 10.25$ ms. Η επόμενη πρόκληση θα ήταν να προσδιοριστεί ο χρόνος αναμονής της ONU ο οποίος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να εξοικονομείται ενδεχομένως το μέγιστο της ενέργειας, αλλά και



Σχήμα 5.8: Μεταφορά 5 Mb/s κίνησης χρησιμοποιώντας τη στρατηγική GBA (άνω διάγραμμα) και την παραδοσιακή στρατηγική εκπομπής (κάτω διάγραμμα).

αρκετά μικρός για να διατηρηθούν οι απαιτήσεις QoS όλων των τύπων κίνησης, ειδικά για εφαρμογές που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε καθυστερήσεις. Η έκφραση του χρόνου αναμονής θα πρέπει να εξαρτάται από το εμπλεκόμενο σχήμα DBA, καθώς και από το πρωτόκολλο σηματοδότησης αναμονής ανάμεσα στο OLT και τις ONUs. Προτείνεται η χρησιμοποίηση ενός UCS με βάση το σχήμα DBA, επειδή, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, μπορεί να εξασφαλιστεί η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας στις ONUs. Με αυτές τις τεχνικές το προτεινόμενο πλαίσιο εργασίας υλοποιεί μια υβριδική βαθειά/κυκλική λειτουργία αναμονής στις ONUs [103].

5.2.3.4 Συμπεράσματα

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε IP δίκτυα τηλεπικοινωνιών έχει κερδίσει το μαζικό ενδιαφέρον τόσο της βιομηχανίας όσο και της ακαδημαϊκής κοινότητας. Στο άρθρο [98] γίνεται πρώτα μια αναφορά στις προηγούμενες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας που είχαν αναφερθεί στο παρελθόν και στις ερευνητικές προσπάθειες που στοχεύουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα NG-PONs δίκτυα. Εισάγεται στη συνέχεια ένα οικολογικό (green) πλαίσιο κατανομής εύρους ζώνης, το οποίο χαρακτηρίζεται από ένα νέο μηχανισμό μετάδοσης κατά παρτίδες (batch-mode), ο οποίος μπορεί να ενσωματωθεί σε οποιοδήποτε σχήμα υπολογισμού του χρόνου αναμονής των ONUs. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το προτεινόμενο πλαίσιο εργασίας μπορεί να έχει το πλεονέκτημα της λειτουργικότητας της κατάστασης αναμονής (sleep mode) στις ONUs, να επιτύχει μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας διατηρώντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις των χρηστών. Λόγω της αβεβαιότητας της διαδικτυακής κίνησης η σίγουρη ανάλυση του χρόνου αναμονής για τις ONUs είναι κρίσιμη για την ώθηση της πρότασης αυτής σε πρακτική εφαρμογή. Μια ακολουθία κλειστού τύπου εκφράσεων μπορούν να διαμορφωθούν για τον καθορισμό των ανώτερων και κατώτερων ορίων του πιθανού χρόνου αναμονής της ONU και ταυτόχρονα να πληρούν στατιστικά τις

απαιτήσεις των χρηστών. Τέτοια όρια μπορούν να παρέχουν μια κατευθυντήρια γραμμή σχεδιασμού για την επιλογή του χρόνου αναμονής της ONU, προκειμένου να αποκτηθεί πλεονέκτημα από τις εξελίξεις των αρχιτεκτονικών ONU και να διερευνηθεί η ανοχή σε QoS των χρηστών επιτυγχάνοντας παράλληλα τη μεγαλύτερη απόδοση ισχύος [98].

5.2.4 Τεχνικές ύπνου στα XG-PON

Για διάφορους λόγους, είναι επιθυμητή η μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται από μια ONU, όσο το δυνατόν περισσότερο:

- Με την πάροδο του χρόνου, η φυσική εξέλιξη της τεχνολογίας τείνει προς πιο αποτελεσματικές υλοποιήσεις των γνωστών λειτουργιών, μια τάση που είναι αποκλίνουσα, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό, αυξάνοντας τα επίπεδα της λειτουργικότητας και της ταχύτητας.
- Εάν υπάρχει ένας τρόπος για την ONU να καθορίσει ότι μια συνδρομητική διεπαφή είναι αδρανής, δεν είναι επιθυμητό για την ONU να σβήνει το κύκλωμα που συνδέεται με την εν λόγω διεπαφή ενώ διατηρεί την ικανότητα να ανιχνεύει δραστηριότητα συνδρομητή στην εν λόγω διεπαφή. Οι λεπτομέρειες διαφέρουν ως μια συνάρτηση του τύπου διεπαφής.
- Η έκταση της εφικτής μείωσης της ενέργειας εξαρτάται από την αποδεκτή επίδραση στην υπηρεσία. Οι μέγιστες δυνατές εξοικονομήσεις συμβαίνουν όταν ένας συνδρομητής κλείνει σκόπιμα μια ONU, για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή κατά τη διάρκεια διακοπών.
- Κατά τη διάρκεια των αποτυχιών του εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος, κάποια υποβάθμιση της υπηρεσίας είναι γενικά αποδεκτή. Για τη διατήρηση αντιγράφων ασφαλείας διάρκειας ζωής της μπαταρίας, είναι επιθυμητό για την ONU να μην τροφοδοτεί το κύκλωμα που σχετίζεται με όλες τις διασυνδέσεις, εκτός από εκείνες που θεωρούνται για την παροχή βασικών υπηρεσιών. Διαφορετικοί χειριστές και πελάτες μπορεί να έχουν διαφορετικούς ορισμούς των βασικών υπηρεσιών και μπορεί να επιθυμούν να θέσουν ως προτεραιότητα τη στιγμή που οι διεπαφές δε τροφοδοτούνται. Αυτό το χαρακτηριστικό, το οποίο είναι γνωστό σαν απόπτωση ισχύος περιγράφεται στο [ITU-T G.988] [48].

Οι προηγούμενες τεχνικές για τη διαχείριση της ενέργειας είναι ένα θέμα σχεδιασμού της ONU και του συνδρομητή και της πρακτικής εκμετάλλευσης. Η παράγραφος αυτή εξετάζει δύο επιπλέον μέσα για τη διαχείριση ενέργειας, τα οποία απαιτούν υποστήριξη TC επιπέδου. Το ένα ονομάζεται λειτουργία μερικού ύπνου (doze mode). Το άλλο αναφέρεται ως λειτουργία κυκλικού ύπνου (cyclic sleep mode). Και τα δύο, στατικά τροφοδοτούνται μέσω του OMCI, και είτε ο καθένας ξεχωριστά ή και οι δυο από αυτούς τους τελευταίους τρόπους,

μπορούν να συνδυάζονται με οποιαδήποτε ή με όλες τις άλλες τεχνικές μείωσης ενέργειας. Όλες οι συμβατές με το ITU-T G.987.3 εφαρμογές αναμένεται να υποστηρίζουν τη λειτουργία του μερικού ύπνου. Η υποστήριξη της λειτουργίας κυκλικού ύπνου είναι προαιρετική τόσο για το OLT όσο και για την ONU.

5.2.4.1 Διαμόρφωση συστήματος διαχείρισης ισχύος και σηματοδότηση

Το OLT χρησιμοποιεί το OMCI για να ανακαλύψει τις δυνατότητες διαχείρισης ενέργειας της ONU και να ρυθμίσει τα δικά του χαρακτηριστικά διαχείρισης ενέργειας και λειτουργίες. Για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της διαχείρισης ενέργειας μιας δεδομένης ONU η ONU και το OLT διατηρούν ένα ζεύγος μηχανών καταστάσεων διαχείρισης ενέργειας. Η μηχανή καταστάσεων της ONU και η αντίστοιχη μηχανή καταστάσεων του OLT λειτουργούν σε μερική ευθυγράμμιση καταστάσεων. Ο πρωταρχικός μηχανισμός σηματοδότησης που χρησιμοποιείται για το συντονισμό των μηχανών καταστάσεων της ONU και του OLT βασίζεται στα μηνύματα PLOAM. Τα PLOAM μηνύματα εξόδου παράγονται και μπαίνουν στην ουρά για μετάδοση κατά τη στιγμή των μεταβάσεων κατάστασης. Οι καταστάσεις και των δύο μηχανών καταστάσεων της ONU και του OLT μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο αλληλοαποκλειόμενα υποσύνολα: τις καταστάσεις πλήρους ισχύος και τις καταστάσεις χαμηλής ενέργειας. Μόνο οι μεταβάσεις κατάστασης μεταξύ των υποσυνόλων καταστάσεων της πλήρους ισχύος και της χαμηλής ισχύος δημιουργούν ένα PLOAM μήνυμα εξόδου. Εάν η παραμονή στην κατάσταση στόχο της μετάβασης ελέγχεται από ένα χρονόμετρο, το χρονόμετρο δεν αρχίζει μέχρι τη πραγματική μετάδοση του μηνύματος. Ως δευτερεύον μηχανισμός σηματοδότησης που χρησιμοποιείται για να επιταχύνει ή να ξυπνήσει μια ONU σε κατάσταση ύπνου, η ένδειξη bit αναγκαστικής αφύπνισης γίνεται μέσα σε μια δομή κατανομής του BWmap [46].

5.2.4.2 Ορισμοί των παραμέτρων διαχείρισης ενέργειας

Παρακάτω καθορίζονται τα βασικά διαστήματα, χρονόμετρα και μετρητές. Οι παράμετροι που είναι γνωστοί τόσο στην ONU όσο και στο OLT, ανταλλάσσονται μέσω του OMCI [ITU-T G.988] [48]. Οι παράμετροι που βρίσκονται τοπικά στην ONU ή στο OLT καθορίζονται μόνο για χρήση, στην κατωτέρω περιγραφή [46].

Isleep – Το Isleep είναι το μέγιστο χρονικό διάστημα που η ONU ξοδεύει στις καταστάσεις Asleep ή Listen, ως μια καταμέτρηση των 125 μικροδευτερολέπτων πλαισίων. Τοπικές ενδείξεις αφύπνισης (LWIs) και στις δύο Asleep και Listen καταστάσεις ή απομακρυσμένα γεγονότα στην κατάσταση Listen μπορούν να περικόψουν την παραμονή της ONU στις καταστάσεις αυτές. Ορίζεται από το OLT και είναι γνωστό και στο OLT και στην ONU.

Tsleep – Τοπικό χρονόμετρο στην ONU. Μετά την είσοδο στην κατάσταση Asleep, η ONU προετοιμάζει το Tsleep σε μια τιμή ίση ή μικρότερη από το Isleep. Δευτερεύοντα εσωτερικά χρονόμετρα μπορεί να χρειάζονται για να εγγυηθεί ότι η ONU θα είναι πλήρως λειτουργική όταν εισέρχεται στην κατάσταση Aware (επίγνωσης) μετά από ένα διάστημα που δε πρέπει να υπερβαίνει το Isleep. Ορίζεται από την ONU και είναι γνωστό μόνο στην ONU.

laware – Το laware είναι το ελάχιστο χρονικό διάστημα που η ONU ξοδεύει στην κατάσταση Aware πριν από τη μετάβαση σε μια κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (Asleep ή Listen), ως μια καταμέτρηση των 125 μικροδευτερολέπτων πλαισίων. Κατά τη διάρκεια του διαστήματος laware, τοπικά ή απομακρυσμένα γεγονότα μπορούν ανεξάρτητα να προκαλέσουν την ONU να εισέλθει στην κατάσταση ActiveHeld, αντί να επιστρέψει σε μια κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Ορίζεται από το OLT και είναι γνωστό και στο OLT και στην ONU.

Taware – Τοπικό χρονόμετρο στην ONU, αρχικοποιείται σε μια τιμή ίση ή μεγαλύτερη από ό,τι το laware, μόλις επιτυγχάνεται downstream συγχρονισμός κατά την είσοδο σε κατάσταση Aware. Το Taware ελέγχει το χρόνο παραμονής σε κατάσταση Aware πριν η ONU να εισέρθει εκ νέου σε μια από τις καταστάσεις χαμηλής ενέργειας. Ορίζεται από την ONU και είναι γνωστό μόνο στην ONU.

ltransinit – Πλήρης χρόνος προετοιμασίας πομποδέκτη: Ο χρόνος που απαιτείται για την ONU να αποκτήσει πλήρη λειτουργικότητα κατά την έξοδο από την κατάσταση Asleep (δηλαδή, με την ενεργοποίηση τόσο πομπού και δέκτη), ο οποίος μετράται σε μονάδες των 125 μs PHY πλαισίων και είναι γνωστός από το σχεδιασμό. Η τιμή μηδέν δείχνει ότι η ONU σε ύπνο μπορεί να ανταποκριθεί σε μια επιχορήγηση εύρους ζώνης χωρίς καθυστέρηση. Ορίζεται από την ONU και είναι γνωστός και στο OLT και στην ONU.

ltxinit – Χρόνος προετοιμασίας πομπού: ο χρόνος που απαιτείται για την ONU να αποκτήσει πλήρη λειτουργικότητα κατά την έξοδο από την κατάσταση Listen (δηλαδή, με την ενεργοποίηση του πομπού, ενώ ο δέκτης έχει παραμείνει ενεργός), ο οποίος μετράται σε μονάδες των 125 μs πλαισίων PHY. Η τιμή μηδέν δείχνει ότι η ONU σε μερικό ύπνο μπορεί να ανταποκριθεί σε μια επιχορήγηση εύρους ζώνης χωρίς καθυστέρηση. Ορίζεται από την ONU και είναι γνωστός και στο OLT και στην ONU.

Talerted – Τοπικό χρονόμετρο για να δεσμεύει το χρόνο που η μηχανή καταστάσεων του OLT παραμένει σε κατάσταση εγρήγορσης πριν από την είσοδο στην κατάσταση AwakeForced. Εάν η ONU που το OLT προσπαθεί να ξυπνήσει πέσει σε ύπνο, το Talerted θα πρέπει να αρχικοποιηθεί σε τουλάχιστον Isleep + ltransinit + μετ' επιστροφής καθυστέρηση + ανοχές για το συγχρονισμό του Rx, παρατυπίες επιχορήγησης εύρους ζώνης και του χρόνου επεξεργασίας. Εάν η ONU που το OLT προσπαθεί να ξυπνήσει έχει πέσει σε μερικό ύπνο, το Talerted θα πρέπει να αρχικοποιηθεί σε τουλάχιστον ltxinit + μετ'

επιστροφής καθυστέρηση + ανοχές για τις παρατυπίες επιχορήγησης εύρους ζώνης και του χρόνου επεξεργασίας. Ορίζεται από το OLT και είναι γνωστό μόνο στο OLT.

Clob_i – Μετρητής των χαμένων upstream ριπών στην κατάσταση AwakeForced(i) του OLT για την απώλεια του ελαττώματος σήματος για την ONU i. Αν ο Clob_i λήξει, το OLT δηλώνει LOB_i κατά την ONU i. Ορίζεται από το OLT και είναι γνωστός μόνο στο OLT.

Ter_i – Τοπικό χρονόμετρο χειραψίας στο OLT που καθορίζει την τελευταία στιγμή κατά την οποία η upstream ριπή αναμένεται από την ONU σε ύπνο ή μερικό ύπνο. Το OLT επαναρχικοποιείται και αρχίζει αυτό το χρονόμετρο όταν η μηχανή καταστάσεων του OLT για τη συγκεκριμένη ONU μεταβαίνει στην κατάσταση χαμηλής ισχύος (LowPower) και κάθε φορά που μια upstream ριπή λαμβάνεται από την ONU, ενώ βρίσκεται σε αυτήν την κατάσταση. Αν το Ter_i λήξει, το OLT δηλώνει παραβίαση χειραψίας και προσπαθεί να αναγκάσει την ONU να ξυπνήσει. Για να προσδιοριστεί η αρχική τιμή του Ter_i, το OLT είναι υπεύθυνο να εξετάσει το προβλεπόμενο διάστημα του Isleep και τις πιθανές επιπτώσεις στην αρχικοποίηση του πομποδέκτη, το συγχρονισμό και τις παρατυπίες στον κύκλο επιχορήγησης εύρους ζώνης. Ορίζεται από το OLT και είναι γνωστό μόνο στο OLT.

Ihold – Ελάχιστη παραμονή στην κατάσταση ActiveHeld. Ορίζεται από το OLT και είναι γνωστή και στο OLT και στην ONU.

Thold – Τοπικό χρονόμετρο στην ONU που αρχικοποιείται στο Ihold κατά τη μετάδοση του SR(Awake) μηνύματος μετά την είσοδο στην κατάσταση ActiveHeld και αυτό ενισχύει την ελάχιστη παραμονή στην κατάσταση ActiveHeld. Ορίζεται από την ONU και είναι γνωστή μόνο στην ONU.

5.2.4.3 Μηχανή καταστάσεων της ONU

Παρακάτω, παρατίθενται οι καταστάσεις διαχείρισης ενέργειας της ONU μαζί με την αντίστοιχη περιγραφή της σημασιολογίας τους [46]:

ActiveHeld – Η ONU ανταποκρίνεται πλήρως, διαβιβάζοντας κατερχόμενη κυκλοφορία και ανταποκρίνοντας σε όλες τις κατανομές εύρους ζώνης. Οι μεταβάσεις σε κατάσταση διαχείρισης ενέργειας δεν εμφανίζονται. Η ελάχιστη παραμονή σε αυτήν την κατάσταση επιβάλλεται από το χρονόμετρο Thold. Κατά την είσοδο σε αυτήν την κατάσταση, η ONU στέλνει ένα Sleep_Request(Awake) PLOAM μήνυμα. Από τα διαγράμματα καταστάσεων, η συντομογραφία αυτού είναι SR (Awake).

ActiveFree – Η ONU ανταποκρίνεται πλήρως, διαβιβάζοντας κατερχόμενη κυκλοφορία και ανταποκρίνοντας σε όλες τις κατανομές εύρους ζώνης. Οι μεταβάσεις σε κατάσταση διαχείρισης ενέργειας είναι μια τοπική απόφαση.

Asleep – Η ONU κλείνει το δέκτη και τον πομπός της, διατηρώντας τη δυνατότητα να ξυπνήσει σε τοπικό ερέθισμα. Αυτή η κατάσταση επιμένει για μια καθορισμένη διάρκεια

Isleep αν δεν έχει αλλάξει από την άφιξη ενός τοπικού ερεθίσματος LWI. Πριν από την έξοδο από αυτήν την κατάσταση η ONU εξασφαλίζει ότι τροφοδοτείται πλήρως, συγχρονίζεται και είναι ικανή να ανταποκριθεί τόσο σε ανερχόμενες όσο και σε κατερχόμενες κυκλοφορίες και έλεγχο.

Listen – Ο δέκτης της ONU είναι ενεργός, ενώ ο πομπός είναι απενεργοποιημένος. Η ONU ακούει στο κατερχόμενο σήμα και προωθεί κατερχόμενη κίνηση, ενώ διατηρεί την ικανότητα να επανενεργοποιήσει τον πομπό σε τοπικό ερέθισμα ή σε παραλαβή SA(OFF) (Sleep_Allow) από το OLT. Αυτή η κατάσταση επιμένει για μια καθορισμένη διάρκεια Isleep, αν δεν αλλάξει από την άφιξη ενός τοπικού ερεθίσματος LWI ή την παραλαβή SA(OFF) ή FWI από το OLT. Πριν από την έξοδο από αυτήν την κατάσταση η ONU εξασφαλίζει ότι τροφοδοτείται πλήρως και είναι ικανή να ανταποκριθεί τόσο σε ανερχόμενες όσο και σε κατερχόμενες κυκλοφορίες και έλεγχο.

DozeAware & SleepAware – Τόσο ο δέκτης όσο και ο πομπός της ONU παραμένουν ενεργοί. Αυτή η κατάσταση επιμένει για μια καθορισμένη διάρκεια Iaware αν δεν αλλάξει από την άφιξη ενός τοπικού ερεθίσματος LWI ή την παραλαβή SA(OFF) από το OLT. Η ONU προωθεί κατερχόμενη κίνηση και ανταποκρίνεται σε όλες τις επιχορηγήσεις κατανομών. Είναι ευθύνη του OLT η μετάδοση κατανομών εύρους ζώνης που περιέχουν τη σημαία PLOAMu με επαρκή συχνότητα, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι μια εν γνώση ONU βλέπει τουλάχιστον μια.

Παρακάτω δίνονται οι είσοδοι μιας μηχανής καταστάσεων της ONU [46]:

Γεγονότα PLOAM:

- a) Sleep_Allow (ON) – Το OLT παραχωρεί άδεια στην ONU να ασκήσει οποιαδήποτε λειτουργία διαχείρισης ενέργειας και αφήνει την επιλογή της λειτουργίας μερικού ύπνου (doze) ή κυκλικού ύπνου (cyclic sleep) στη διακριτική ευχέρεια της ONU.
- b) Sleep_Allow (OFF) – Το OLT αρνείται την έγκριση να ασκήσει μια λειτουργία διαχείρισης ενέργειας.

Γεγονός ένδειξης bit:

Ένδειξη αναγκαστικής αφύπνισης (Forced wake-up indication ή FWI) – Μεταδίδοντας την FWI ως σημαία της δομής κατανομής, το OLT απαιτεί άμεση αφύπνιση και μετάβαση σε μια κατάσταση πλήρους ισχύος.

Γεγονότα χρονομέτρων:

- a) Λήξη του Thold – Το γεγονός αφορά την κατάσταση ActiveHeld, ελέγχοντας την ελάχιστη παραμονή στην κατάσταση αυτή.
- b) Λήξη του Taware – Το γεγονός αφορά τις καταστάσεις DozeAware και SleepAware, ελέγχοντας την ελάχιστη παραμονή στις καταστάσεις αυτές.

c) Λήξη του Tsleep – Το γεγονός αφορά τις καταστάσεις Asleep και Listen, ελέγχοντας την ελάχιστη παραμονή στις καταστάσεις αυτές.

Τοπικά γεγονότα:

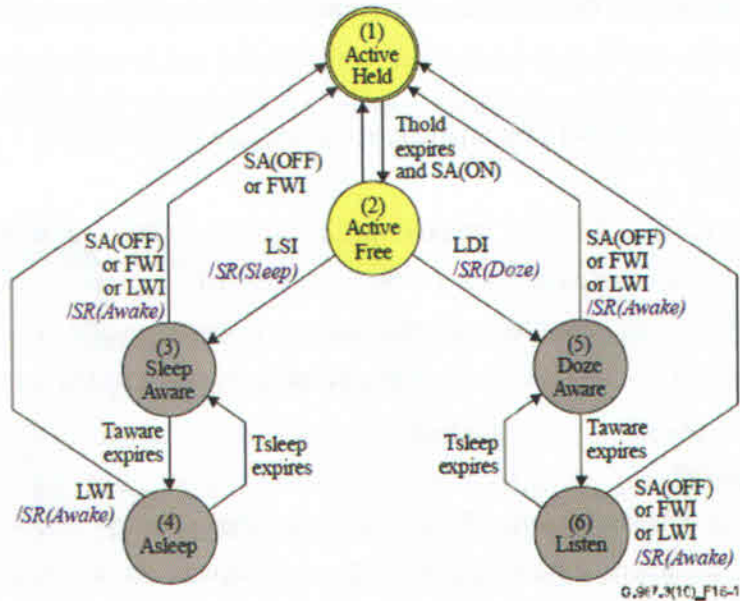
a) Ένδειξη τοπικού ύπνου (Local sleep indication ή LSI) – Η ONU δεν έχει κανέναν τοπικό λόγο να παραμείνει σε πλήρη ισχύ και είναι πρόθυμη να ασκήσει τη λειτουργία διαχείρισης ενέργειας του κυκλικού ύπνου.

b) Ένδειξη τοπικού μερικού ύπνου (LDI) – Η ONU δεν έχει κανέναν τοπικό λόγο να παραμείνει σε πλήρη ισχύ και είναι πρόθυμη να ασκήσει τη λειτουργία διαχείρισης ενέργειας του μερικού ύπνου.

c) Ένδειξη τοπικής αφύπνισης (LWI) – Ένα τοπικό ερέθισμα εμποδίζει την ONU από την άσκηση κάθε λειτουργίας διαχείρισης ενέργειας.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ – Τα γεγονότα LSI, LDI και LWI εννοιολογικά προέρχονται από το τριαδικό επίπεδο της κατάστασης τόνωσης της ONU (Awake/Sleep/Doze) και αντιστοιχούν στα γεγονότα αλλαγής επιπέδου ή, σε περίπτωση κατάστασης ActiveFree, στην τιμή δειγματοληψίας κατά τη στιγμή της μετάβασης.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.9 φαίνεται το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων μιας ONU.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων (αρχική κατάσταση σε διπλό κύκλο) της ONU [46].

5.2.4.4 Μηχανή καταστάσεων του OLT

Παρακάτω, αναφέρονται οι καταστάσεις διαχείρισης ενέργειας του OLT μαζί με την αντίστοιχη σημασιολογική περιγραφή τους [46]:

AwakeForced – Το OLT παρέχει κανονικές κατανομές στην ONU i , προωθεί κατερχόμενη κίνηση και αναμένει μια απάντηση σε κάθε επιχορήγηση εύρους ζώνης. Το OLT δηλώνει ελάττωμα του LOB_i στην ανίχνευση των $Clob_i$ χαμένων κατανομών. Με τη μετάβαση σε αυτήν την κατάσταση το OLT στέλνει ένα `Sleep_Allow(OFF)` PLOAM μήνυμα, έτσι ανακαλεί άδεια στην ONU να εισέλθει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

AwakeFree – Το OLT παρέχει κανονικές κατανομές στην ONU, προωθεί κατερχόμενη κίνηση και είναι έτοιμο να δεχτεί ένδειξη μετάβασης διαχείρισης ενέργειας από την ONU. Με τη μετάβαση σε αυτήν την κατάσταση, το OLT στέλνει ένα `Sleep_Allow(ON)` PLOAM μήνυμα, δίνοντας κατά συνέπεια στην ONU άδεια για να εισέλθει σε μια κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διακριτική της ευχέρεια. Το OLT αναμένει μια απάντηση σε κάθε επιχορήγηση εύρους ζώνης και σε περίπτωση χαμένων μεταβάσεων κατανομής στην κατάσταση `AwakeForced`, όπου η κατάσταση του LOB_i μπορεί τελικά να δηλωθεί. Υπάρχουν δύο σταθεροί συνδυασμοί που αφορούν την κατάσταση `AwakeFree` της μηχανής καταστάσεων του OLT: η μηχανή καταστάσεων της ONU μπορεί να είναι είτε στην κατάσταση `ActiveFree` ή στην κατάσταση `ActiveHeld`.

LowPowerDoze & LowPowerSleep – Το OLT υποστηρίζει την ONU σε μια κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Το OLT παρέχει κανονικές κατανομές στην ONU, αλλά αναμένει μόνο διαλείπουσες απαντήσεις από την ONU για επιχορηγήσεις εύρους ζώνης, όπως ορίζεται από διάφορα χρονόμετρα. Στην κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας μερικού ύπνου το OLT προωθεί κατερχόμενη κίνηση: στην κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ύπνου, το OLT μπορεί να αμβλυνθεί (*buffer*) κατερχόμενη κίνηση. Εάν το χρονόμετρο T_{er_i} λήξει πριν το OLT να λάβει μια ριπή από την ONU i , το OLT αναγνωρίζει παραβίαση χειραψίας και πηγαίνει στην κατάσταση `AwakeForced`.

AlertedDoze & AlertedSleep – Το OLT προσπαθεί να ξυπνήσει την ONU. Μετά την αποστολή `Sleep_Allow(OFF)` μηνύματος για τη μετάβαση στην κατάσταση, το OLT θέτει το bit `FWI` σε κάθε κατανομή στην ONU μαζί με τη σημαία `PLOAMu`. Το OLT προωθεί, απορρίπτει ή ρυθμίζει την κατερχόμενη κίνηση για την ONU, όπως ακριβώς έπραξε και κατά την αμέσως προηγούμενη κατάσταση `LowPowerDoze` ή `LowPowerSleep`. Το OLT πηγαίνει στην κατάσταση `AwakeForced` αν λάβει μια ριπή από την ONU που περιλαμβάνει ένα `Sleep_Request(Awake)` PLOAM μήνυμα ή αν το χρονόμετρο $T_{alerted}$ λήξει.

Παρακάτω δίνονται οι είσοδοι της μηχανής καταστάσεων του OLT [46]:

Γεγονότα PLOAM:

`Sleep_Request (Doze)` – Η ONU ενημερώνει το OLT τη πρόθεσή της να ασκήσει τη λειτουργία διαχείρισης ενέργειας του μερικού ύπνου (*doze*).

`Sleep_Request (Sleep)` – Η ONU ενημερώνει το OLT τη πρόθεσή της να ασκήσει τη λειτουργία διαχείρισης ενέργειας του κυκλικού ύπνου (*cyclic sleep*).

Sleep_Request (Awake) – Η ONU ενημερώνει το OLT τη πρόθεσή της να παραμείνει σε πλήρη ισχύ.

Γεγονότα χρονομέτρων:

Λήξη του T_{er_i} – Το γεγονός λαμβάνει χώρα μόνο στις καταστάσεις LowPowerDoze και LowPowerSleep, δείχνοντας παραβίαση από την ONU των προβλεπόμενων παραμέτρων χρονισμού χαμηλής ενέργειας.

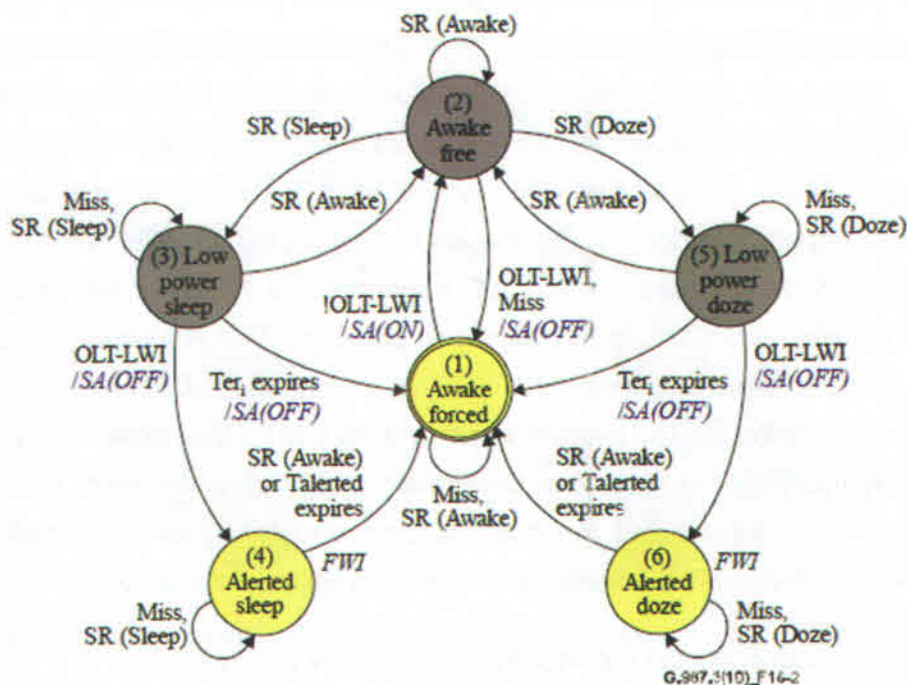
Λήξη του T_{alrtd} – Το γεγονός λαμβάνει χώρα μόνο στις καταστάσεις AlteredDoze και AlteredSleep δείχνοντας την αποτυχία της ONU να ξυπνήσει μετά την απαίτηση του OLT.

Τοπικά γεγονότα:

Ένδειξη τοπικής αφύπνισης, OLT-LWI – Η ένδειξη τοπικής αφύπνισης και το αντίστροφό του δείχνουν, αντίστοιχα, την παρουσία και την απουσία ενός τοπικού ερεθίσματος να διατηρήσει την ONU σε πλήρη ισχύ.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ - Το γεγονός OLT-LWI και το αντίστροφό του εννοιολογικά προέρχονται από το επίπεδο κατάστασης δυαδικών ερεθισμάτων του OLT και αντιστοιχούν στη μεταβολή του επιπέδου ερεθισμάτων.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.10 φαίνεται το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων του OLT.



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων (αρχική κατάσταση σε διπλό κύκλο) του OLT [46].

5.2.4.5 Συναλλαγές διαχείρισης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας

Η ONU μπορεί να λαμβάνει και να ενεργεί στη διαχείριση της κατερχόμενης κυκλοφορίας σε οποιοδήποτε από τα τρία κανάλια που περιγράφονται στην παράγραφο 4.3.2, εκτός αν είναι σε κατάσταση Asleep. Το OLT είναι υπεύθυνο για την κατανόηση, όταν η ONU μπορεί να αναμένεται ότι θα λάβει διαχείριση κατερχόμενης κυκλοφορίας, ή να ασχοληθεί με το ενδεχόμενο ότι η ONU δε λαμβάνει τέτοιου είδους κίνηση [46].

Εάν η ONU λαμβάνει ενσωματωμένες OAM εντολές όπως DBRu ή PLOAMu όταν δεν μπορεί να ανταποκριθεί αμέσως, δηλαδή όταν είναι στις καταστάσεις ύπνου (sleep) ή ακοής (listen), αγνοεί τις εντολές. Είναι ευθύνη του OLT να επιτρέψει για επιπλέον καθυστερήσεις απάντησης αν στέλνει PLOAM ή OMCI εντολές σε μια ONU που μπορεί να είναι ανίκανη να ανταποκριθεί εντός του κανονικού χρόνου. Στο πλαίσιο του κυκλικού ύπνου ιδιαίτερα, το OLT μπορεί να επιλέξει να αναγκάσει την ONU να ξυπνήσει πριν από τη διεξαγωγή των συναλλαγών διαχείρισης [46].

Το OLT επιτρέπεται να στείλει μονής κατεύθυνσης μεταδόσεις διαχείρισης ανά πάσα στιγμή, συμπεριλαμβανομένων των PLOAM μηνυμάτων Profile, Deactivate_ONU-ID, Disable_Serial_Number και Sleep_Allow. Το OLT πρέπει να είναι προετοιμασμένο για το ενδεχόμενο ότι μια ONU σε κατάσταση ύπνου δε λαμβάνει τη μετάδοση [46].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

Προτεινόμενες τεχνικές καθορισμού βέλτιστης διάρκειας ύπνου για παθητικά οπτικά δίκτυα τύπου XG-PON

6.1 Εισαγωγή

Όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.4 και πιο αναλυτικά στο πρότυπο ITU-T G.987.3 [46], για το δίκτυο τύπου XG-PON υπάρχουν δυο κύριες λειτουργίες για την εξοικονόμηση ενέργειας που καταναλώνουν οι οπτικές μονάδες δικτύου (ONUs). Η πρώτη είναι η λειτουργία του μερικού ύπνου (doze mode) και η δεύτερη είναι η λειτουργία του κυκλικού ύπνου (cyclic sleep mode). Για το ποια λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας

χρησιμοποιείται κάθε φορά από μια ONU και αν χρησιμοποιείται, εξαρτάται καθαρά από το φόρτο κίνησης του δικτύου, τόσο στο downstream κανάλι, όσο και στο upstream κανάλι δεδομένων. Γενικά, το μοντέλο για την εξοικονόμηση ενέργειας στα XG-PON, που περιγράφεται αναλυτικά στο αντίστοιχο πρότυπο της ITU [46], χρησιμοποιεί με αποδοτικό τρόπο την αλληλουχία καταστάσεων ύπνωσης, πλήρους ή μερικής, και κανονικής, ώστε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας των οπτικών μονάδων δικτύου (Optical Network Units), όταν υπάρχει έλλειψη δικτυακής κίνησης ή υπολειτουργία των συσκευών, θεωρώντας όμως σταθερή και ίση περίοδο ύπνου τόσο για την κατάσταση Listen, κατά την οποία απενεργοποιείται μόνο ο πομπός της ONU, όσο και για την κατάσταση Asleep, κατά την οποία απενεργοποιείται και ο πομπός και ο δέκτης της ONU. Αυτό να μεν μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, κυρίως αν έχουμε μεγάλη περίοδο ύπνου, αλλά από την άλλη πλευρά αυξάνει την καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο. Οπότε, είναι καλό να βρεθεί ένας μηχανισμός ο οποίος να βρίσκει τις κατάλληλες περιόδους ύπνου, τόσο για την κατάσταση Listen, όσο και για την κατάσταση Asleep, ώστε να μειώσει όσο το δυνατόν περισσότερο τη μέση κατανάλωση ενέργειας των ONUs, χωρίς παράλληλα όμως να αυξάνεται η μέση καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο. Στη διπλωματική αυτή εργασία εξετάζονται και συγκρίνονται δυο τέτοιοι μηχανισμοί, οι οποίοι εμπνεύστηκαν από τον τομέα έρευνας των Learning Automata (LA).

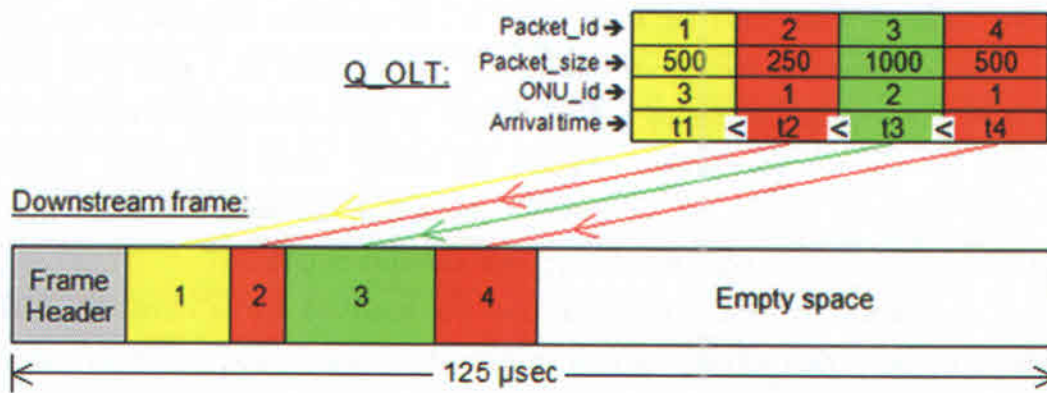
Το περιβάλλον μελέτης των δυο αυτών σχημάτων είναι ένα δίκτυο XG-PON με ένα OLT και μεταβαλλόμενο αριθμό υποστηριζόμενων ONUs. Η αποτίμηση της αναλυτικής προσέγγισης επιτεύχθηκε μέσω ενός εργαλείου προσομοίωσης που κατασκευάστηκε από την αρχή σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού. Τα συγκριτικά συμπεράσματα προκύπτουν μέσα από γραφικές παραστάσεις απόδοσης με βάση τα αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης. Οι μετρήσεις απόδοσης περιλαμβάνουν μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (σε Watts), μέση αναμονή πακέτου και ρυθμ απόδοση δικτύου τόσο για το upstream κανάλι, όσο και για το downstream κανάλι δεδομένων.

Στο κεφάλαιο αυτό, για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του, παρουσιάζεται αρχικά ένα αριθμητικό παράδειγμα για ένα XG-PON δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί τον τυπικό μηχανισμό της ITU [46] εξοικονόμησης ενέργειας (σταθερή και ίση περίοδος ύπνου σε κατάσταση Listen και Asleep). Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή και η ανάπτυξη των σχημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της βέλτιστης διάρκειας ύπνου. Τέλος, ακολουθούν τα πειραματικά αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης, από τα οποία προκύπτουν τα συγκριτικά συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση του δικτύου όταν γίνεται χρήση των εξεταζόμενων σχημάτων, σε σχέση με την απόδοση του δικτύου όταν γίνεται χρήση σταθερών και ίσων περιόδων ύπνου για τις καταστάσεις Listen και Asleep.

βρίσκονται συνδεδεμένοι στην αντίστοιχη ONU): BufOcc → 3 bytes, CRC → 1 byte, XGTC trailer (βρίσκεται στο τέλος της κάθε ριπής, μετά τα τυχόν δεδομένα χρηστών): BIP → 4 bytes. Συνεχίζοντας, το μέγεθος μιας ριπής δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα 125 μsec (σε χρόνο μετάδοσης), δηλαδή τα 38880 bytes. Οπότε συνοπτικά έχουμε:

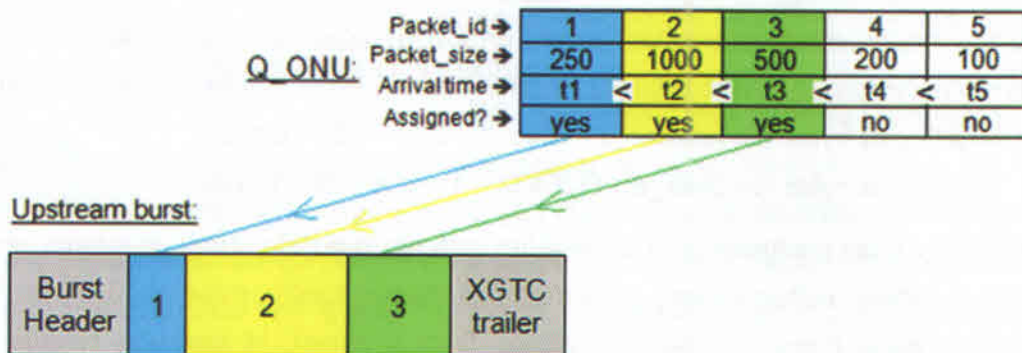
- Μέγεθος σε bytes του **Header_u** = (24 + 4 + (0 ή 48) + 3 + 1) bytes.
- Μέγεθος σε bytes του **Data_u** ≤ (38880 – Header_u – 4) bytes.

Ο τρόπος με τον οποίο τοποθετούνται τα πακέτα από την ουρά του OLT πάνω στο επόμενο downstream πλαίσιο, για να σταλθούν στις αντίστοιχες ONUs, φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 6.1 και χρησιμοποιείται πολιτική ουράς FIFO (First In First Out):



Σχήμα 6.1: Τοποθέτηση πακέτων δεδομένων στο downstream πλαίσιο.

Ο τρόπος με τον οποίο τοποθετούνται τα ανατεθέντα (από το OLT) bytes δεδομένων (πακέτα) από την ουρά μιας ONU πάνω σε μια upstream ριπή, για να σταλθούν στο OLT, φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 6.2 και χρησιμοποιείται πολιτική ουράς FIFO:



Σχήμα 6.2: Τοποθέτηση πακέτων δεδομένων στην upstream ριπή.

6.2.2 Αριθμητικό παράδειγμα

Το εξής αριθμητικό παράδειγμα βασίζεται στη λειτουργία ενός δικτύου XG-PON, το οποίο χρησιμοποιεί τον τυπικό μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας, όπως ορίζεται στο πρότυπο της ITU για τα XG-PON δίκτυα [46]. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το περιβάλλον υλοποίησης είναι ένα ασύμμετρο (10Gbps downstream, 2.5 Gbps upstream) XG-PON δίκτυο, που αποτελείται από μια ONU συνδεδεμένη σε ένα OLT. Γενικά, ο τρόπος των μεταβάσεων μεταξύ των καταστάσεων μιας ONU, για τον τυπικό μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας, φαίνεται συνοπτικά στο Σχήμα 6.3. Σε ότι αφορά την απόσταση της ONU από το OLT, το χρόνο μετάβασης και επιστροφής (RTT) (σε μsec) που προκύπτει από την αντίστοιχη απόσταση, καθώς και τον αριθμό των χρηστών που βρίσκονται συνδεδεμένοι σε αυτή την ONU ισχύουν τα παρακάτω δεδομένα:

ONUs	Απόσταση από το OLT (σε km)	Χρόνος μετάβασης και επιστροφής (RTT) (σε μsec)	Αριθμός χρηστών στην ONU
ONU1	21	140	1

Για τις αφίξεις των πακέτων στην ουρά του OLT, που απευθύνονται στην ONU1, έχουμε:

Χρονική στιγμή άφιξης (σε μsec):	300	550	800
Μέγεθος πακέτου (σε bytes):	1000	400	200

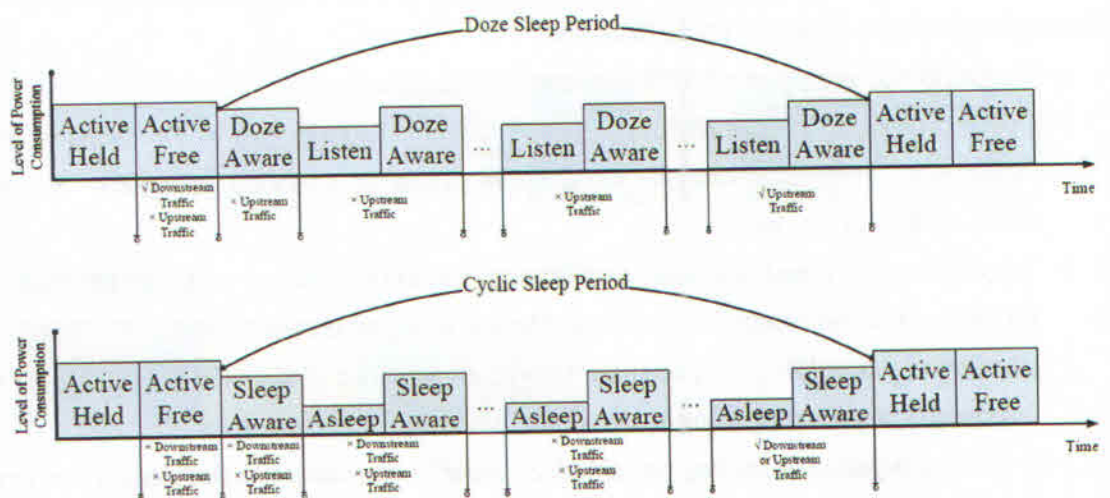
Για τις αφίξεις των πακέτων στην ουρά της ONU, που απευθύνονται στο OLT, έχουμε:

Χρονική στιγμή άφιξης (σε μsec):	460
Μέγεθος πακέτου (σε bytes):	900

Επίσης λαμβάνονται υπόψη τα εξής δεδομένα:

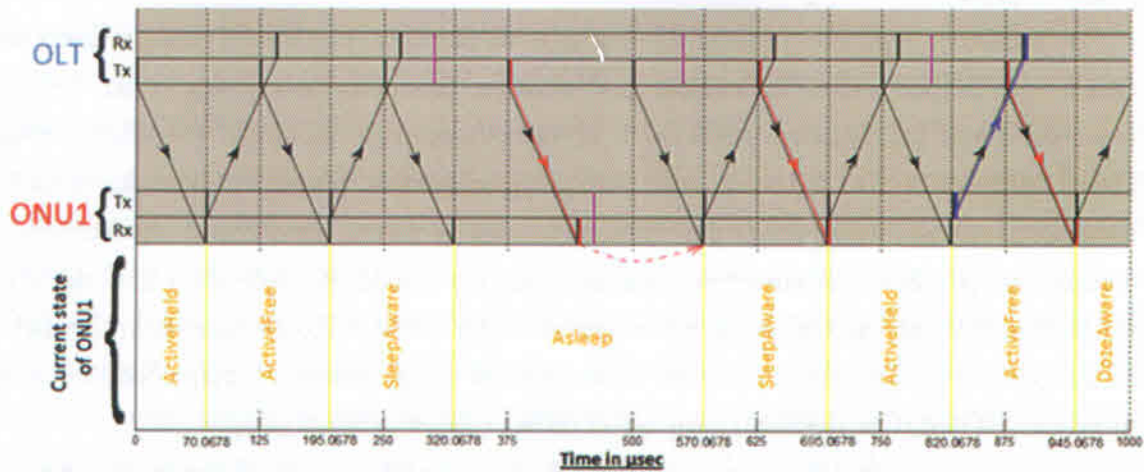
- Ταχύτητα του φωτός: $c = 300000 \text{ km/sec} = 0.3 \text{ km}/\mu\text{sec}$.
- Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ρεύματος ανόδου (uplink): $R_u = 2.5 \text{ Gbps} = 312.5 \text{ bytes}/\mu\text{sec}$. Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ρεύματος καθόδου (downlink): $R_d = 10 \text{ Gbps} = 1250 \text{ bytes}/\mu\text{sec}$.
- Το μέγεθος της κεφαλίδας ενός downstream πλαισίου είναι ίσο με $(24+4+8*1+48*1) = 84 \text{ bytes}$, που αντιστοιχεί σε χρόνο μετάδοσης στο downstream ίσο με $0.0672 \mu\text{sec}$. Το μέγεθος της κεφαλίδας μιας upstream ριπής είναι ίσο με $(24+4+48+4) = 80 \text{ bytes}$, που αντιστοιχεί σε χρόνο μετάδοσης στο upstream ίσο με $0.256 \mu\text{sec}$.
- Η μέση κατανάλωση ισχύος της ONU σε κάθε κατάσταση του μοντέλου είναι ίση με 4.69W για τις καταστάσεις ActiveHeld και ActiveFree, 2.78W για τις καταστάσεις DozeAware και SleepAware, 1.7W για την κατάσταση Listen και 0.9W για την κατάσταση Asleep.

- Η απόφαση για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί η ONU στην επόμενη φάση παίρνεται τη χρονική στιγμή που η ONU λαμβάνει εξ' ολοκλήρου την κεφαλίδα ενός downstream πλαισίου σταλμένο από το OLT, γνωρίζοντας έτσι η ONU αν υπάρχουν πακέτα που να απευθύνονται σε αυτήν, μέσα σε αυτό το downstream πλαίσιο (δηλαδή ελέγχει την ύπαρξη downstream κίνησης προς αυτήν). Αφού γίνει αυτό, η ONU με τη σειρά της ελέγχει την ουρά της για το αν υπάρχουν ή όχι πακέτα, και αναλόγως γίνεται και η αντίστοιχη μετάβαση.
- Η περίοδος παραμονής της ONU σε κάθε κατάσταση του μοντέλου θα πρέπει να είναι πολλαπλάσια των 125 μsec, πέρα από την αρχική περίοδο ActiveHeld, στο τέλος της οποίας έχουμε την εξ' ολοκλήρου λήψη της κεφαλίδας του πρώτου downstream πλαισίου που στέλνει το OLT στην ONU. Έτσι, θεωρούμε ότι η περίοδος παραμονής της ONU στις καταστάσεις ActiveHeld, ActiveFree, DozeAware και SleepAware είναι 125 μsec, ενώ στις καταστάσεις Asleep και Listen είναι 250 μsec.
- Μια ONU σε κατάσταση Listen μπορεί να λαμβάνει downstream πακέτα δεδομένων που απευθύνονται σε αυτήν, αλλά ακόμα και αν το OLT τη πληροφορήσει μέσω κάποιου πλαισίου ότι μπορεί να στείλει ριπή, αυτή δε θα στείλει. Μια ONU σε κατάσταση Asleep δεν μπορεί να λαμβάνει αμέσως downstream πακέτα δεδομένων που απευθύνονται σε αυτήν, τα τοποθετεί πρώτα σε μια προσωρινή ουρά και τα λαμβάνει όλα μαζί με το που βγει από αυτή την κατάσταση, αλλά ούτε στέλνει ριπές, ακόμα και αν το OLT τη πληροφορήσει μέσω κάποιου πλαισίου ότι μπορεί να στείλει.
- Η χρονική διάρκεια του παραδείγματος είναι 1000 μsec.
- Το γενικό μοντέλο εναλλαγής καταστάσεων που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Εναλλαγή καταστάσεων για το τυπικό μοντέλο διαχείρισης ενέργειας στα δίκτυα τύπου XG-PON.

Επίλυση του παραδείγματος:



Σχήμα 6.4: Σχηματική απεικόνιση παραδείγματος XG-PON με ένα OLT και μια ONU.

Τη χρονική στιγμή 0 µsec το OLT αρχίζει να μεταδίδει ένα downstream πλαίσιο στις ONUs του δικτύου. Αυτό το πλαίσιο δεν περιέχει δεδομένα/πακέτα για καμιά ONU. Η κεφαλίδα αυτού του πλαισίου λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την ONU1 τη χρονική στιγμή $0+0.0672+RTT1/2 = 70.0672$ µsec. Μέσω της κεφαλίδας αυτού του πλαισίου η ONU1 πληροφορείται ότι δεν υπάρχει downstream κίνηση γι' αυτήν και από την αρχική κατάσταση ActiveHeld μεταβαίνει σε κατάσταση ActiveFree. Επίσης, μέσω του πεδίου BWmap της κεφαλίδας του πλαισίου αυτού η ONU1 πληροφορείται ότι μπορεί να στείλει ριπή τη χρονική στιγμή 70.0672 µsec και ότι της ανατίθενται 0 bytes δεδομένων για αποστολή. Η ONU1 τη χρονική στιγμή 70.0672 µsec αρχίζει να μεταδίδει ριπή η οποία δε φέρει δεδομένα χρηστών. Μέσω του πεδίου BufOcc της κεφαλίδας αυτής της ριπής, η οποία λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από το OLT τη χρονική στιγμή $70.0672+0.256+RTT1/2 = 140.3232$ µsec, η ONU1 δηλώνει στο OLT 0 bytes για την επόμενη φορά.

Τη χρονική στιγμή 125 µsec το OLT αρχίζει να μεταδίδει ένα downstream πλαίσιο στις ONUs του δικτύου. Αυτό το πλαίσιο δεν περιέχει δεδομένα/πακέτα για καμιά ONU. Η κεφαλίδα αυτού του πλαισίου λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την ONU1 τη χρονική στιγμή $125+0.0672+RTT1/2 = 195.0672$ µsec. Μέσω της κεφαλίδας αυτού του πλαισίου η ONU1 πληροφορείται ότι δεν υπάρχει downstream κίνηση γι' αυτήν, οπότε από την κατάσταση ActiveFree μεταβαίνει σε κατάσταση SleepAware, αφού και η ουρά της είναι άδεια. Επίσης, μέσω του πεδίου BWmap της κεφαλίδας του πλαισίου αυτού η ONU1 πληροφορείται ότι μπορεί να στείλει ριπή τη χρονική στιγμή 195.0672 µsec και ότι της ανατίθενται 0 bytes δεδομένων για αποστολή. Η ONU1 τη χρονική στιγμή 195.0672 µsec αρχίζει να μεταδίδει ριπή η οποία δε φέρει δεδομένα χρηστών. Μέσω του πεδίου BufOcc της κεφαλίδας αυτής της ριπής, η οποία λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από το OLT τη χρονική στιγμή

$195.0672+0.256+RTT1/2 = 265.3232$ μsec , η ONU1 δηλώνει στο OLT 0 bytes για την επόμενη φορά.

Τη χρονική στιγμή 250 μsec το OLT αρχίζει να μεταδίδει ένα downstream πλαίσιο στις ONUs του δικτύου. Αυτό το πλαίσιο δεν περιέχει δεδομένα/πακέτα για καμιά ONU. Η κεφαλίδα αυτού του πλαισίου λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την ONU1 τη χρονική στιγμή $250+0.0672+RTT1/2 = 320.0672$ μsec . Μέσω της κεφαλίδας αυτού του πλαισίου η ONU1 πληροφορείται ότι δεν υπάρχει downstream κίνηση γι' αυτήν, οπότε από την κατάσταση SleepAware μεταβαίνει σε κατάσταση Asleep, αφού και η ουρά της είναι άδεια. Επίσης, μέσω του πεδίου BWmap της κεφαλίδας του πλαισίου αυτού η ONU1 πληροφορείται ότι μπορεί να στείλει ριπή τη χρονική στιγμή 320.0672 μsec και ότι της ανατίθενται 0 bytes δεδομένων για αποστολή. Η ONU1 δε μεταδίδει ριπή, αφού μπήκε σε κατάσταση Asleep.

Τη χρονική στιγμή 375 μsec το OLT αρχίζει να μεταδίδει ένα downstream πλαίσιο στις ONUs του δικτύου. Αυτό το πλαίσιο περιέχει ένα πακέτο δεδομένων μεγέθους 1000 bytes για την ONU1. Η κεφαλίδα αυτού του πλαισίου λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την ONU1 τη χρονική στιγμή $375+0.0672+RTT1/2 = 445.0672$ μsec . Μέσω της κεφαλίδας αυτού του πλαισίου η ONU1 πληροφορείται ότι υπάρχει downstream κίνηση γι' αυτήν, αλλά επειδή η ONU1 συνεχίζει να βρίσκεται σε κατάσταση Asleep το πακέτο (1000 bytes) που φτάνει εξ' ολοκλήρου σε αυτή την χρονική στιγμή $375+0.0672+1000/Rd+RTT1/2 = 445.8672$ μsec , το τοποθετεί σε μια προσωρινή ουρά. Επίσης, μέσω του πεδίου BWmap της κεφαλίδας του πλαισίου αυτού η ONU1 πληροφορείται ότι μπορεί να στείλει ριπή τη χρονική στιγμή 445.0672 μsec και ότι της ανατίθενται 0 bytes δεδομένων για αποστολή. Η ONU1 δε μεταδίδει ριπή, αφού βρίσκεται ακόμα σε κατάσταση Asleep.

Τη χρονική στιγμή 500 μsec το OLT αρχίζει να μεταδίδει ένα downstream πλαίσιο στις ONUs του δικτύου. Αυτό το πλαίσιο δεν περιέχει δεδομένα/πακέτα για καμιά ONU. Η κεφαλίδα αυτού του πλαισίου λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την ONU1 τη χρονική στιγμή $500+0.0672+RTT1/2 = 570.0672$ μsec . Τότε, γίνεται μετάβαση από την κατάσταση Asleep σε κατάσταση SleepAware και έχουμε επιτυχημένη λήψη από την ONU1 των bytes δεδομένων που της είχε στείλει το OLT, όσο αυτή βρισκόταν σε κατάσταση Asleep (σύνολο 1000 bytes). Μέσω της κεφαλίδας αυτού του πλαισίου η ONU1 πληροφορείται ότι δεν υπάρχει downstream κίνηση γι' αυτήν. Επίσης, μέσω του πεδίου BWmap της κεφαλίδας του πλαισίου αυτού η ONU1 πληροφορείται ότι μπορεί να στείλει ριπή τη χρονική στιγμή 570.0672 μsec και ότι της ανατίθενται 0 bytes δεδομένων για αποστολή. Η ONU1 τη χρονική στιγμή 570.0672 μsec αρχίζει να μεταδίδει ριπή η οποία δε φέρει δεδομένα χρηστών. Μέσω του πεδίου BufOcc της κεφαλίδας αυτής της ριπής, η οποία λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από το OLT τη χρονική στιγμή $570.0672+0.256+RTT1/2 = 640.3232$ μsec , η ONU1 δηλώνει στο OLT 900 bytes για την επόμενη φορά.

Τη χρονική στιγμή 625 μsec το OLT αρχίζει να μεταδίδει ένα downstream πλαίσιο στις ONUs του δικτύου. Αυτό το πλαίσιο περιέχει ένα πακέτο δεδομένων μεγέθους 400 bytes για την ONU1. Η κεφαλίδα αυτού του πλαισίου λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την ONU1 τη χρονική στιγμή $625+0.0672+RTT1/2 = 695.0672 \mu\text{sec}$. Μέσω της κεφαλίδας αυτού του πλαισίου η ONU1 πληροφορείται ότι υπάρχει downstream κίνηση γι' αυτήν, οπότε από την κατάσταση SleepAware μεταβαίνει σε κατάσταση ActiveHeld, αφού και η ουρά της δεν είναι άδεια. Το πακέτο δεδομένων (400 bytes) λαμβάνεται επιτυχώς από την ONU1 τη χρονική στιγμή $625+0.0672+400/Rd+RTT1/2 = 695.3872 \mu\text{sec}$, αφού αυτή την χρονική στιγμή η ONU1 δε βρίσκεται σε κατάσταση Asleep. Επίσης, μέσω του πεδίου BWmap της κεφαλίδας του πλαισίου αυτού η ONU1 πληροφορείται ότι μπορεί να στείλει ριπή τη χρονική στιγμή 695.0672 μsec και ότι της ανατίθενται 0 bytes δεδομένων για αποστολή. Η ONU1 τη χρονική στιγμή 695.0672 μsec αρχίζει να μεταδίδει ριπή η οποία δε φέρει δεδομένα χρηστών. Μέσω του πεδίου BufOcc της κεφαλίδας αυτής της ριπής, η οποία λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από το OLT τη χρονική στιγμή $695.0672+0.256+RTT1/2 = 765.3232 \mu\text{sec}$, η ONU1 δηλώνει στο OLT 0 bytes για την επόμενη φορά.

Τη χρονική στιγμή 750 μsec το OLT αρχίζει να μεταδίδει ένα downstream πλαίσιο στις ONUs του δικτύου. Αυτό το πλαίσιο δεν περιέχει δεδομένα/πακέτα για καμιά ONU. Η κεφαλίδα αυτού του πλαισίου λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την ONU1 τη χρονική στιγμή $750+0.0672+RTT1/2 = 820.0672 \mu\text{sec}$. Μέσω της κεφαλίδας αυτού του πλαισίου η ONU1 πληροφορείται ότι δεν υπάρχει downstream κίνηση γι' αυτήν και από την κατάσταση ActiveHeld μεταβαίνει σε κατάσταση ActiveFree. Επίσης, μέσω του πεδίου BWmap της κεφαλίδας του πλαισίου αυτού η ONU1 πληροφορείται ότι μπορεί να στείλει ριπή τη χρονική στιγμή 820.0672 μsec και ότι της ανατίθενται 900 bytes δεδομένων για αποστολή. Η ONU1 τη χρονική στιγμή 820.0672 μsec αρχίζει να μεταδίδει ριπή η οποία φέρει 900 bytes δεδομένων από τον χρήστη 1. Το πακέτο αυτό (900 bytes) λαμβάνεται επιτυχώς από το OLT τη χρονική στιγμή $820.0672+0.256+900/Ru+RTT1/2 = 893.2032 \mu\text{sec}$. Μέσω του πεδίου BufOcc της κεφαλίδας αυτής της ριπής, η οποία λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από το OLT τη χρονική στιγμή $820.0672+0.256+RTT1/2 = 890.3232 \mu\text{sec}$, η ONU1 δηλώνει στο OLT 0 bytes για την επόμενη φορά.

Τη χρονική στιγμή 875 μsec το OLT αρχίζει να μεταδίδει ένα downstream πλαίσιο στις ONUs του δικτύου. Αυτό το πλαίσιο περιέχει ένα πακέτο δεδομένων μεγέθους 200 bytes για την ONU1. Η κεφαλίδα αυτού του πλαισίου λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την ONU1 τη χρονική στιγμή $875+0.0672+RTT1/2 = 945.0672 \mu\text{sec}$. Μέσω της κεφαλίδας αυτού του πλαισίου η ONU1 πληροφορείται ότι υπάρχει downstream κίνηση γι' αυτήν, οπότε από την κατάσταση ActiveFree μεταβαίνει σε κατάσταση DozeAware, αφού η ουρά της είναι άδεια. Το πακέτο δεδομένων (200 bytes) λαμβάνεται επιτυχώς από την ONU1 τη χρονική στιγμή $875+0.0672+200/Rd+RTT1/2 = 945.2272 \mu\text{sec}$, αφού αυτή την χρονική στιγμή η ONU1 δε

βρίσκεται σε κατάσταση Asleep. Επίσης, μέσω του πεδίου BWmap της κεφαλίδας του πλαισίου αυτού η ONU1 πληροφορείται ότι μπορεί να στείλει ριπή τη χρονική στιγμή 945.0672 msec και ότι της ανατίθενται 0 bytes δεδομένων για αποστολή. Η ONU1 τη χρονική στιγμή 945.0672 msec αρχίζει να μεταδίδει ριπή η οποία δε φέρει δεδομένα χρηστών. Μέσω του πεδίου BufOcc της κεφαλίδας αυτής της ριπής, η οποία λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από το OLT τη χρονική στιγμή $945.0672 + 0.256 + RTT/2 = 1015.3232$ msec (εκτός των χρονικών ορίων του παραδείγματος), η ONU1 δηλώνει στο OLT 0 bytes για την επόμενη φορά.

Υπολογισμός αποτελεσμάτων του παραδείγματος:

Μέση καθυστέρηση πακέτου στο downstream κανάλι δεδομένων:

$$\text{Mean delay down} = (570.0672 - 300 + 695.3872 - 550 + 945.2272 - 800) / 3 = 186.8939 \text{ msec.}$$

Ρυθμαπόδοση στο downstream κανάλι δεδομένων:

$$\text{Throughput down} = ((1000 + 400 + 200) * 8) / (1000 * 10^{-6}) = 12800000 \text{ bps.}$$

Μέση καθυστέρηση πακέτου στο upstream κανάλι δεδομένων:

$$\text{Mean delay up} = (893.2032 - 460) / 1 = 433.2032 \text{ msec.}$$

Ρυθμαπόδοση στο upstream κανάλι δεδομένων:

$$\text{Throughput up} = (900 * 8) / (1000 * 10^{-6}) = 7200000 \text{ bps.}$$

Μέση καταναλισκόμενη ισχύς των ONUs:

$$\text{Mean power consumption} = (70.0672 * 4.69 + 1 * 125 * 4.69 + 2 * 125 * 4.69 + 2 * 125 * 2.78 + 1 * 250 * 0.9 + (1000 - 945.0672) * 2.78) / (1 * 1000) = 3.1601 \text{ Watts.}$$

Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μια ONU βρισκόταν σε κατάσταση Listen:

$$\text{Average Listen Time} = 0 \text{ \%}$$

Ποσοστό του συνολικού χρόνου που μια ONU βρισκόταν σε κατάσταση Asleep:

$$\text{Average Asleep Time} = (250 * 100) / 1000 = 25 \text{ \%}$$

6.3 Ανάπτυξη σχημάτων καθορισμού βέλτιστης διάρκειας ύπνου

6.3.1 Περιγραφή εξεταζόμενων σχημάτων

Οι εξεταζόμενοι μηχανισμοί για τον καθορισμό της βέλτιστης περιόδου ύπνου εμπνεύστηκαν από τον τομέα έρευνας των Learning Automata. Ο όρος Learning Automata (LA) αναφέρεται σε ένα αυτό-λειτουργικό μοντέλο μάθησης, όπου η μάθηση αναφέρεται στη διαδικασία απόκτησης γνώσης κατά την εκτέλεση μιας απλής μηχανής/κώδικα (αυτόματο), και χρησιμοποιώντας τις αποκτηθείσες γνώσεις για την απόφαση σχετικά με τις δράσεις που πρόκειται να ληφθούν στο μέλλον [107].

Γενικώς, ένα αυτόματο μάθησης (Learning Automaton) είναι μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων που αλληλεπιδρά με ένα стоχαστικό περιβάλλον, προσπαθώντας να μάθει τη βέλτιστη δράση που προσφέρει το περιβάλλον μέσα από μια διαδικασία μάθησης (learning process) [108]. Τις χρονικές στιγμές $t = 1, 2, \dots$, ένα αυτόματο επιλέγει μια από τις πολλές, πεπερασμένου αριθμού, διαθέσιμες δράσεις, σύμφωνα με τις πιθανότητες δράσης που καθορίζονται από τη τρέχουσα κατάσταση [109]. Το περιβάλλον παρέχει μία τυχαία απόκριση για τη δράση που επιλέγεται. Ανάλογα με την απόκριση του περιβάλλοντος, το αυτόματο αλλάζει κατάσταση. Όταν οι πιθανότητες επιλογής της κάθε δράσης παραμένουν χρονικά αναλλοίωτες, έχουμε ένα στοχαστικό αυτόματο σταθερής δομής (Fixed-structure Stochastic Automaton ή FSSA). Όταν οι πιθανότητες αλλάζουν με το χρόνο, έχουμε ένα στοχαστικό αυτόματο μεταβλητής δομής (Variable-structure Stochastic Automaton ή VSSA) [109]. Γενικώς, τα VSSA αυτόματα φαίνεται να είναι πιο προσαρμοστικά από τα FSSA αυτόματα, αν και απαιτούν περισσότερη υπολογιστική ισχύ ανά χρονικό βήμα [109]. Ιστορικά, η θεωρία των αυτομάτων εκμάθησης ξεκίνησε με τη μελέτη των FSSA. Αργότερα, το ενδιαφέρον μετατοπίστηκε στη μελέτη των VSSA, που φάνηκαν να είναι πιο προσαρμοστικά. Ενώ τα VSSA έχουν προσελκύσει πολλή προσοχή, τα FSSA είναι ευκολότερο να εφαρμοστούν και απαιτούν λιγότερη υπολογιστική ισχύ ανά χρονικό βήμα [109]. Στη διπλωματική αυτή εργασία εξετάζονται δυο αυτόματα, ένα μεταβλητής δομής (το Learning Automata) και ένα σταθερής δομής (το 4R-STAR).

Στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας το περιβάλλον στο οποίο δρα το αυτόματο εκπροσωπείται από την ιδανική/βέλτιστη περίοδο ύπνου μιας ONU σε κατάσταση Listen και Asleep αντίστοιχα, ενώ το εύρος δράσεων εκφράζεται από το σύνολο όλων των πιθανών τιμών περιόδου ύπνου μιας ONU σε κατάσταση Listen και Asleep, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτού του συνόλου πιθανών περιόδων ύπνου, στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα πρέπει να είναι όλες ακέραια πολλαπλάσια των 125 μsec (π.χ. 125 μsec , 250 μsec , 375 μsec κ.ο.κ). Έτσι, και οι εκτιμώμενες τιμές περιόδου ύπνου που επιλέγονται από το αυτόματο είναι πολλαπλάσιες των 125 μsec . Επίσης, ο υπολογισμός των βέλτιστων και εκτιμώμενων περιόδων σε κατάσταση Listen γίνεται ξεχωριστά από αυτόν για τις βέλτιστες και εκτιμώμενες περιόδους ύπνου σε κατάσταση Asleep, δηλαδή, αν και το πεπερασμένο σύνολο πιθανών δράσεων που μπορούν να ληφθούν από το αυτόματο παραμένει το ίδιο και για τις δυο καταστάσεις, υπάρχουν δυο διαφορετικοί πίνακες πιθανοτήτων επιλογής κάθε δράσης, ένας για την κατάσταση Listen (έστω P_{listen}) και ένας για την κατάσταση Asleep (έστω P_{asleep}). Αυτό συμβαίνει γιατί μια περίοδος ύπνου μπορεί να είναι ιδανική για να χρησιμοποιηθεί ως περίοδος ύπνου σε κατάσταση Listen, αλλά ως περίοδος ύπνου σε κατάσταση Asleep να μην είναι, και το αντίστροφο. Για παράδειγμα, αν έχουμε μεγάλη downstream κίνηση πακέτων και παράλληλα μικρή upstream κίνηση πακέτων, μια μεγάλη τιμή περιόδου ύπνου

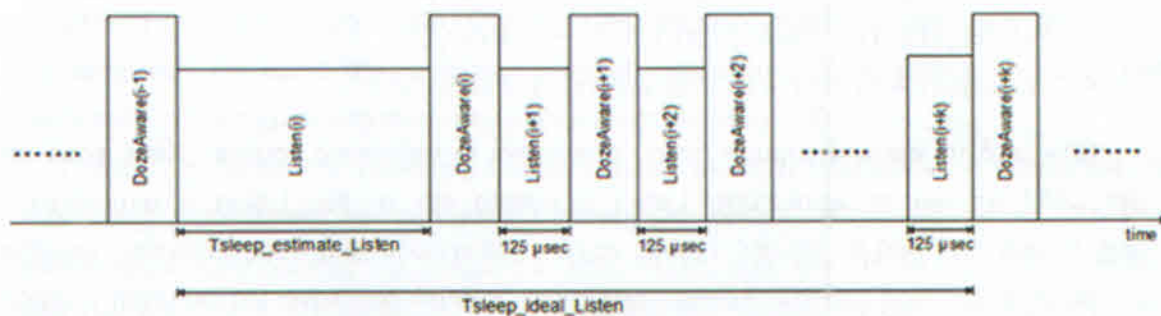
μπορεί να είναι πιο ιδανική για κατάσταση Listen, σε σχέση με το αν χρησιμοποιηθεί η ίδια τιμή για περίοδο ύπνου σε κατάσταση Asleep.

Για την εύρεση και την εκμάθηση των βέλτιστων περιόδων ύπνου σε κατάσταση Listen και σε κατάσταση Asleep, αντίστοιχα, η κάθε ONU διατηρεί δυο flags, ένα flag_Listen και ένα flag_Asleep, τα οποία παίρνουν τιμή 0 ή 1 και δείχνουν αντίστοιχα αν η ONU βρίσκεται κατά τη διάρκεια υπολογισμού μιας νέας τιμής βέλτιστης περιόδου ύπνου, ή όχι (0->Όχι, 1->Ναι), σε κατάσταση Listen ή σε κατάσταση Asleep, αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογισμός μιας νέας βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen αρχίζει με το που μπαίνει η ONU σε κατάσταση Listen και το flag_Listen έχει τιμή 0 και τελειώνει με την άφιξη του αμέσως επόμενου πακέτου στην ουρά της ONU (έχουμε δηλαδή ύπαρξη upstream κίνησης). Αυτή η βέλτιστη τιμή περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen λαμβάνεται κάθε φορά από το αυτόματο και ενημερώνει το learning κομμάτι του αλγορίθμου για τις ιδανικές περιόδους Listen. Αντίστοιχα, ο υπολογισμός μιας νέας βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep αρχίζει με το που μπαίνει η ONU σε κατάσταση Asleep και το flag_Asleep έχει τιμή 0, και τελειώνει με την άφιξη του αμέσως επόμενου πακέτου στην ουρά της ONU (έχουμε δηλαδή ύπαρξη upstream κίνησης) ή την εξ' ολοκλήρου άφιξη στην ONU της κεφαλίδας ενός downstream πλαισίου σταλμένο από το OLT, που να πληροφορεί την ONU ότι υπάρχει downstream κίνηση πακέτων γι' αυτήν, μέσω του τρέχοντος πλαισίου. Αυτή η βέλτιστη τιμή περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep λαμβάνεται κάθε φορά από το αυτόματο και ενημερώνει το learning κομμάτι του αλγορίθμου για τις ιδανικές περιόδους Asleep. Επιπλέον, με το που τελειώνει ο υπολογισμός μιας βέλτιστης περιόδου ύπνου, ανεξαρτήτως καταστάσεως Listen ή Asleep, σαν βέλτιστη τιμή περιόδου ύπνου δε θεωρείται αυτή η τιμή, αλλά η αμέσως επόμενη τιμή απ' αυτήν, η οποία είναι πολλαπλάσια των 125 msec. Για παράδειγμα, αν προκύψει μια βέλτιστη περίοδος ύπνου 1019 msec σε κατάσταση Listen δε θα κρατηθεί αυτή ως βέλτιστη τιμή περιόδου σε κατάσταση Listen, αλλά η τιμή 1125 msec. Ομοίως, αν προκύψει μια βέλτιστη περίοδος ύπνου 173 msec σε κατάσταση Asleep δε θα κρατηθεί αυτή ως βέλτιστη τιμή περιόδου σε κατάσταση Asleep, αλλά η τιμή 250 msec.

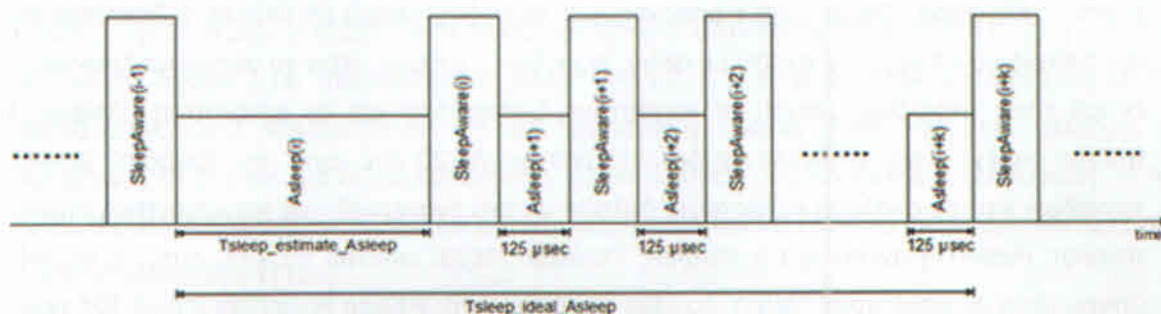
Ο αλγόριθμος όμως έχει και το estimating κομμάτι το οποίο προηγείται πάντα από το learning κομμάτι. Το κομμάτι αυτό στην ουσία, βάσει πιθανοτήτων και σε συνδυασμό με τις πληροφορίες που παίρνει από το learning κομμάτι, μέσα από ένα σύνολο πιθανών τιμών (το εύρος των τιμών των περιόδων ύπνου των ONUs), αποδίδει κάθε φορά την εκτιμώμενη τιμή για την περίοδο ύπνου, τόσο σε κατάσταση Listen, όσο και σε κατάσταση Asleep αντίστοιχα. Επειδή το estimating κομμάτι προηγείται από το learning κομμάτι υπάρχει μία απόκλιση της πραγματικής τιμής της χρονικής περιόδου ύπνου από την εκτιμώμενη, που αρχικά και μέχρι το σύστημα να ισορροπήσει είναι μεγαλύτερη και σταδιακά τείνει να εξισορροπηθεί. Η απόκλιση αυτή αποτελεί το ρυθμό σφάλματος του μοντέλου, ο οποίος υπολογίζεται κάθε φορά και είναι ίσος με την απόλυτη τιμή της διαφοράς της πραγματικής από την εκτιμώμενη

τιμή, διά του συνόλου των δράσεων (πιθανών περιόδων ύπνου) που μπορούν ληφθούν μείων ένα. Οι τιμές του μέσου σφάλματος θα πρέπει να βρίσκονται στο διάστημα μεταξύ του 0 και του 1. Όσο ο ρυθμός σφάλματος είναι πιο κοντά στο μηδέν τόσο πιο αξιόπιστο είναι το σύστημα. Όπως εξηγήθηκε και πιο πριν, το γενικό σφάλμα για τις περιόδους Listen είναι διαφορετικό από αυτό για τις περιόδους Asleep.

Συνοψίζοντας λοιπόν, με το που εισέρχεται μια ONU σε κατάσταση Listen ή Asleep, το αυτόματο εκτιμά και αποδίδει στο σύστημα μια εκτιμώμενη τιμή περιόδου ύπνου για κατάσταση Listen, ή για Asleep αντίστοιχα, για αυτήν την ONU και αμέσως ξεκινά τον υπολογισμό της αντίστοιχης βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen, ή σε Asleep αντίστοιχα. Σε περίπτωση που η βέλτιστη τιμή περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen προκύψει αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη εκτιμώμενη τιμή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.5, η ONU υπάρχει πιθανότητα να εισέλθει και άλλες φορές σε κατάσταση Listen, μέχρι να ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της αντίστοιχης βέλτιστης τιμής περιόδου Listen. Σε αυτή την περίπτωση αυτές οι ενδιάμεσες περιόδους Listen δε συμβάλλουν στον υπολογισμό του γενικού σφάλματος και η περιόδός τους θεωρείται εδώ ίση με 125 μ sec, που είναι η μικρότερη δυνατή περίοδος ύπνου. Ομοίως, μπορεί να συμβεί κατά τον υπολογισμό βέλτιστων περιόδων ύπνου σε κατάσταση Asleep (Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.5: Περίπτωση που η ιδανική περίοδος ύπνου σε κατάσταση Listen προκύπτει αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη εκτιμώμενη περίοδο ύπνου.



Σχήμα 6.6: Περίπτωση που η ιδανική περίοδος ύπνου σε κατάσταση Asleep προκύπτει αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη εκτιμώμενη περίοδο ύπνου.

Ο πρώτος εξεταζόμενος μηχανισμός αποτελεί ένα στοχαστικό αυτόματο μεταβλητής δομής, στα σχήματα που ακολουθούν στην παράγραφο 6.4 αναφέρεται ως **Μανθάνοντα Αυτόματα (Learning Automata)** και η λειτουργία του περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικά, γίνεται η αρχικοποίηση του πίνακα επιλογής κάθε δράσης (περιόδου ύπνου) τόσο για κατάσταση Listen (πίνακας P_{listen}), όσο για κατάσταση Asleep (πίνακας P_{asleep}), έτσι ώστε οι πιθανότητες επιλογής της κάθε δράσης να είναι ίσες αρχικά, για κάθε ONU ξεχωριστά. Με τη διαδικασία που περιγράφηκε πιο πάνω, όταν μια ONU ολοκληρώνει τον υπολογισμό μιας ιδανικής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen ή Asleep, πηγαίνει στον δικό της πίνακα P_{listen} ή αντίστοιχα P_{asleep} και ανανεώνει τις πιθανότητες επιλογής της κάθε δράσης/περιόδου ύπνου. Πιο συγκεκριμένα, όταν γίνεται υπολογισμός μιας βέλτιστης περιόδου ύπνου i για κατάσταση Listen για μια ONU, πηγαίνουμε στον αντίστοιχο πίνακα P_{listen} και αυξάνουμε την πιθανότητα επιλογής αυτής της δράσης/περιόδου ύπνου, η οποία αύξηση εξαρτάται από έναν σταθερό παράγοντα L και αντίστοιχα έχουμε ανάλογη μείωση των πιθανοτήτων επιλογής των υπόλοιπων δράσεων/περιόδων ύπνου, σύμφωνα με τους εξής τύπους:

- $P_{listen_i}(t+1) = P_{listen_i}(t) + L \cdot (1 - P_{listen_i}(t))$
- $P_{listen_j}(t+1) = (1 - L) \cdot P_{listen_j}(t)$, για κάθε $j \neq i$

Αντίστοιχα, ισχύει και για το learning κομμάτι του αλγορίθμου για τις περιόδους Asleep:

- $P_{asleep_i}(t+1) = P_{asleep_i}(t) + L \cdot (1 - P_{asleep_i}(t))$
- $P_{asleep_j}(t+1) = (1 - L) \cdot P_{asleep_j}(t)$, για κάθε $j \neq i$

Πριν από το learning κομμάτι όμως, προηγείται το estimating κομμάτι. Κάθε φορά που μια ONU μπαίνει σε κατάσταση Listen ή Asleep και το $flag_Listen$ ή αντίστοιχα το $flag_Asleep$ έχει τιμή 0, δηλαδή έχουμε αρχή υπολογισμού μιας νέας βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen ή Asleep, αντίστοιχα, το αυτόματο κάνει μια εκτίμηση περιόδου ύπνου Listen ή αντίστοιχα Asleep και η ONU παραμένει για τόσο διάστημα στη συνέχεια σε κατάσταση Listen ή Asleep, αντίστοιχα. Αυτή την εκτίμηση την κάνει πηγαίνοντας στον πίνακα P_{listen} ή αντίστοιχα στον πίνακα P_{asleep} και επιλέγοντας μια δράση/περίοδο ύπνου τυχαία κάθε φορά. Όπως είναι προφανές, μια περίοδος ύπνου με μεγάλη πιθανότητα είναι πιο πιθανό να επιλεγεί σε σχέση με άλλες περιόδους. Επίσης, πριν το αυτόματο ξεκινήσει να εκτιμά τόσο περιόδους ύπνου σε κατάσταση Listen, όσο και σε κατάσταση Asleep, θα πρέπει να έχει γίνει ο υπολογισμός τουλάχιστον $W=20$ (σε αυτή την εργασία) ιδανικών περιόδων για την ανάλογη κατάσταση, δηλαδή να έχει ενημερωθεί σε ικανοποιητικό σημείο ο πίνακας P_{listen} ή αντίστοιχα ο πίνακας P_{asleep} . Μέχρι ωστόσο να γίνει αυτό, η περίοδος ύπνου τόσο σε κατάσταση Listen, όσο και σε κατάσταση Asleep θεωρείται ίση με 125 μsec .

Ο δεύτερος εξεταζόμενος μηχανισμός αποτελεί ένα στοχαστικό αυτόματο σταθερής δομής, στα σχήματα που ακολουθούν στην παράγραφο 6.4 αναφέρεται ως **4R-STAR** και η λειτουργία του περιγράφεται παρακάτω.

Το αυτόματο 4R-STAR^(D), το οποίο χρησιμοποιείται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, είναι μια υποκατηγορία του αυτόματου MR-STAR^(D) (Multiple Response – STAR^(D)), το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο έγγραφο [109]. Αυτό το αυτόματο είναι ένας συνδυασμός του αυτόματου MRLA [110] (Multiple Response Learning Automaton) και του αυτόματου STAR^(D) [111]. Το διάγραμμα καταστάσεων αυτού του αυτόματου μάθησης έχει μορφή αστέρα. Κάθε κλάδος του αστέρα αποτελείται από D καταστάσεις, ο οποίος κλάδος είναι «δεσμευμένος» σε μία από τις διαθέσιμες προς το αυτόματο δράσεις (περιόδους ύπνου). Σε κάθε κλάδο οι μεταβάσεις από κατάσταση σε κατάσταση εξαρτώνται από το κατά πόσο «καλή» ή «κακή» είναι η απόκριση του περιβάλλοντος για την αντίστοιχη δράση [109].

Στο αυτόματο 4R-STAR^(D) έχουμε τέσσερις πιθανές αποκρίσεις του περιβάλλοντος, ανάλογα με το σφάλμα που προκύπτει όταν επιλέγεται μια συγκεκριμένη δράση/περίοδος ύπνου από το αυτόματο. Αυτή η απόκριση μπορεί να είναι «very good», «good», «bad» ή «very bad». Όταν η απόκριση του περιβάλλοντος προς την επιλεγμένη δράση είναι «very good», το αυτόματο πηγαίνει στο άκρο του κλάδου που σχετίζεται με αυτή τη δράση. Όταν η απόκριση είναι «good», το αυτόματο πηγαίνει σε μια κατάσταση πιο μέσα από τη τρέχουσα κατάσταση στον αντίστοιχο κλάδο. Όταν η απόκριση είναι «bad», το αυτόματο πηγαίνει σε μια κατάσταση πιο κοντά στην ουδέτερη (neutral) κατάσταση. Τέλος, όταν η απόκριση είναι «very bad», το αυτόματο πηγαίνει στην ουδέτερη κατάσταση [109].

Γενικώς, η διαδικασία μάθησης λαμβάνει χώρα με επαναλαμβανόμενη εφαρμογή της ακόλουθης διαδικασίας: το αυτόματο επιλέγει μια δράση, σύμφωνα με το διάνυσμα πιθανοτήτων κάθε δράσης της τρέχουσας κατάστασής του, από το πεπερασμένο σύνολο δράσεων $a = \{1, 2, \dots, r\}$. Ανάλογα με την απόκριση του περιβάλλοντος, το αυτόματο κινείται σε μια νέα κατάσταση και επιλέγει μια νέα δράση, σύμφωνα με το διάνυσμα πιθανοτήτων κάθε δράσης της νέας κατάστασης [109]. Στο εξεταζόμενο σχήμα 4R-STAR^(D), το αυτόματο μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε από τις $(D * r + 1)$ καταστάσεις, $\{(0,0), (1,1), (1,2), \dots, (1,D), \dots, (r,1), (r,2), \dots, (r,D)\}$. Όταν το αυτόματο είναι στην κατάσταση $(i, 1)$ ή $(i, 2)$ ή ... (i, D) , εκτελεί τη δράση i με πιθανότητα 1, όπου $i = 1, 2, \dots, r$. Έτσι, κάθε μία από αυτές τις καταστάσεις είναι «δεσμευμένη» σε μια αντίστοιχη δράση. Από την άλλη πλευρά, η κατάσταση $(0,0)$ είναι μια ειδική κατάσταση, αποκαλούμενη ως «ουδέτερη» κατάσταση. Όταν το αυτόματο βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση, το αυτόματο διαλέγει οποιαδήποτε από τις δράσεις r ισοπίθανα [109].

Κάθε μία από τις τέσσερις αποκρίσεις του περιβάλλοντος προκαλούν ντετερμινιστικές μεταβάσεις, σύμφωνα με τους ακόλουθους κανόνες [109]:

1. Όταν το αυτόματο βρίσκεται στην κατάσταση $(0,0)$, επιλέγει μια δράση i με πιθανότητα $1/r$.
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «very good», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση (i, D) ,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «good», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση $(i, 1)$,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «bad», το αυτόματο παραμένει στην κατάσταση $(0, 0)$,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «very bad», το αυτόματο παραμένει στην κατάσταση $(0, 0)$.
2. Όταν το αυτόματο βρίσκεται στην κατάσταση $(i, 1)$, όπου $i = 1, 2, \dots, r$, επιλέγει τη δράση i με πιθανότητα 1.
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «very good», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση (i, D) ,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «good», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση $(i, 2)$,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «bad», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση $(0, 0)$,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «very bad», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση $(0, 0)$.
3. Όταν το αυτόματο βρίσκεται στην κατάσταση (i, d) , όπου $i = 1, 2, \dots, r$ και $d = 2, \dots, D-1$, επιλέγει τη δράση i με πιθανότητα 1.
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «very good», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση (i, D) ,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «good», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση $(i, d+1)$,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «bad», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση $(i, d-1)$,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «very bad», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση $(0, 0)$.
4. Όταν το αυτόματο βρίσκεται στην κατάσταση (i, D) , όπου $i = 1, 2, \dots, r$, επιλέγει τη δράση i με πιθανότητα 1.
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «very good», το αυτόματο παραμένει στην κατάσταση (i, D) ,
 - Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «good», το αυτόματο παραμένει στην κατάσταση (i, D) ,

- Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «bad», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση (i, D-1),
- Αν η απόκριση του περιβάλλοντος είναι «very bad», το αυτόματο πηγαίνει στην κατάσταση (0, 0).

Και σε αυτή την περίπτωση ισχύει ότι το αυτόματο λειτουργεί ξεχωριστά για τις περιόδους της κατάστασης Listen, από αυτές της κατάστασης Asleep, αλλά και για κάθε ONU ξεχωριστά. Κάθε φορά που μπαίνει η ONU σε κατάσταση Listen ή Asleep και παράλληλα αρχίζει ο υπολογισμός μιας νέας ιδανικής τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen ή Asleep, αντίστοιχα, το αυτόματο κάνει εκτίμηση για την περίοδο που θα τεθεί η ONU σε ύπνο, ανάλογα με τη τρέχουσα κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αυτόματο. Με το που γίνεται ο υπολογισμός της αντίστοιχης ιδανικής περιόδου ύπνου και υπολογίζεται το αντίστοιχο σφάλμα περιόδου, το περιβάλλον αποκρίνεται προς το αυτόματο, η οποία απόκριση εξαρτάται από το πόσο μεγάλο ή μικρό είναι το σφάλμα.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θεωρήθηκε ότι το σύνολο των πιθανών δράσεων που μπορεί να εκτελέσει οποιοδήποτε από τα παραπάνω δυο αυτόματα είναι 80, δηλαδή το σύνολο των πιθανών περιόδων ύπνου είναι το $SP = \{125, 250, 375, \dots, 9875, 10000\}$. Επίσης, για τις αποκρίσεις του περιβάλλοντος όσον αφορά το δεύτερο αυτόματο θεωρήθηκαν τα εξής:

- Σφάλμα μικρότερο από 0.015 αντιστοιχεί σε απόκριση περιβάλλοντος «very good».
- Σφάλμα μικρότερο από 0.03 αντιστοιχεί σε απόκριση περιβάλλοντος «good».
- Σφάλμα μικρότερο από 0.045 αντιστοιχεί σε απόκριση περιβάλλοντος «bad».
- Σφάλμα μεγαλύτερο από 0.045 αντιστοιχεί σε απόκριση περιβάλλοντος «very bad».

6.3.2 Ανάπτυξη και βασικά σημεία του κώδικα της προσομοίωσης

Η υλοποίηση του εργαλείου της προσομοίωσης έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab, με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού (event-driven programming). Το περιβάλλον μελέτης στο οποίο βασίστηκε η υλοποίηση είναι ένα μονο-καναλικό XG-PON (10G-PON) με μεταβαλλόμενο αριθμό ONUs, το οποίο κάνει χρήση του βασικού μηχανισμού εξοικονόμησης ενέργειας (σταθερή περίοδος ύπνου σε κατάσταση Listen και Asleep) και πάνω στον οποίο, στη συνέχεια, προσαρμόστηκαν ξεχωριστά δυο μηχανισμοί καθορισμού βέλτιστης περιόδου ύπνου (ξεχωριστά για τις περιόδους σε κατάσταση Listen και Asleep), ο Learning Automata και ο 4R-STAR.

Ο κώδικας της προσομοίωσης αναπτύσσεται σε δεκατρία γεγονότα. Ξεκινά με την αρχικοποίηση όλων των μεταβλητών και των πινάκων (Εικόνες 6.1-6.6 και Εικόνα 6.8), του πίνακα γεγονότων (Εικόνα 6.7) και των μεταβλητών του μοντέλου LA (Εικόνα 6.9) ή

αντίστοιχα των μεταβλητών του μοντέλου 4R-STAR (Εικόνα 6.10), ανάλογα με το ποιος μηχανισμός καθορισμού βέλτιστης περιόδου ύπνου χρησιμοποιείται κάθε φορά.

```

%ST: Διάρκεια προσαρμοσίωσης σε msec
%N: Αριθμός οπτικών μονάδων δικτύου (ONUs)
N=round(N);
%ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ
Mean_delay_up = 0; %Μέση καθυστέρηση αποστολής πακέτου στο upstream (σε msec)
Mean_delay_down = 0; %Μέση καθυστέρηση αποστολής πακέτου στο downstream (σε msec)
Throughput_up = 0; %Ρυθμολόγηση στο upstream (σε bps)
Throughput_down = 0; %Ρυθμολόγηση στο downstream (σε bps)
Mean_power_consumption = 0; %Μέση καταναλισκόμενη ισχύς (σε Watts) των ONUs
Average_listen_time = 0; %Ποσοστό συνολικού χρόνου που η ONU βρίσκεται σε κατάσταση Listen
Average_asleep_time = 0; %Ποσοστό συνολικού χρόνου που η ONU βρίσκεται σε κατάσταση Asleep

```

Εικόνα 6.1: Αρχικοποίηση μεταβλητών εξόδου της συνάρτησης.

```

%Αρχικοποίησης μεταβλητών για το Upstream κανάλι:
total_delay_up=0; %Συνολική καθυστέρηση όλων των πακέτων στο upstream, μέχρι αυτά να ληφθούν πλήρως από το OLT.
sent_packets_up=0; %Επιτυχημένα πακέτα (πακέτα που μεταδόθηκαν από τις ONUs και λήφθηκαν επιτυχώς από το OLT).
sent_bytes_up=0; %Επιτυχημένα bytes (bytes που μεταδόθηκαν επιτυχώς από τις ONUs και λήφθηκαν επιτυχώς από το OLT).
dropped_packets_up=0; %Αριθμός πακέτων που απορρίφθηκαν από τις ουρές των ONUs.
dropped_bytes_up=0; %Πλήθος bytes δεδομένων που απορρίφθηκαν από τις ουρές των ONUs.
%Αρχικοποίησης μεταβλητών για το Downstream κανάλι:
total_delay_down=0; %Συνολική καθυστέρηση όλων των πακέτων στο downstream, μέχρι αυτά να ληφθούν πλήρως από τις αντίστοιχες ONUs.
sent_packets_down=0; %Επιτυχημένα πακέτα (πακέτα που μεταδόθηκαν από το OLT και λήφθηκαν επιτυχώς από τις αντίστοιχες ONUs).
sent_bytes_down=0; %Επιτυχημένα bytes (bytes που μεταδόθηκαν από το OLT και λήφθηκαν επιτυχώς από τις αντίστοιχες ONUs).
dropped_packets_down=0; %Αριθμός πακέτων που απορρίφθηκαν από την ουρά του OLT.
dropped_bytes_down=0; %Πλήθος bytes δεδομένων που απορρίφθηκαν από την ουρά του OLT.
%Περίοδος παραμονής των ONUs σε κάθε κατάσταση (σε msec):
Thold = 125; %Περίοδος παραμονής των ONUs σε κατάσταση ActiveHold.
Tfree = 125; %Περίοδος παραμονής των ONUs σε κατάσταση ActiveFree.
Taware = 125; %Περίοδος παραμονής των ONUs στις καταστάσεις DozeAware και SleepAware.
%Αρχικοποίησης περιόδων παραμονής των ONUs στις καταστάσεις Listen και Asleep:
Tsleep_listen(1,1:N)=125;
Tsleep_asleep(1,1:N)=125;
%Μέση κατανάλωση ισχύος μιας ONU σε κάθε κατάσταση (σε Watts):
P_activeHold = 4.69; %Μέση κατανάλωση ισχύος σε κατάσταση ActiveHold.
P_activeFree = 4.69; %Μέση κατανάλωση ισχύος σε κατάσταση ActiveFree.
P_dozeAware = 2.76; %Μέση κατανάλωση ισχύος σε κατάσταση DozeAware.
P_sleepAware = 2.78; %Μέση κατανάλωση ισχύος σε κατάσταση SleepAware.
P_listen = 1.7; %Μέση κατανάλωση ισχύος σε κατάσταση Listen.
P_asleep = 0.9; %Μέση κατανάλωση ισχύος σε κατάσταση Asleep.
%ΚΕΙΜΕΝΑ ΔΙΑΔΟΧΗΣ
c = 0.3; %Ταχύτητα του φωτός (σε km/msec).
Q_size = 10^6; %Μέγιστη χωρητικότητα (σε bytes) των ουρών αναμονής της κάθε ONU και αυτής του OLT.
guard_time = 1; %Μόνοδος φύλαξης μεταξύ upstream μεταδόσεων ριπών από διαφορετικές ONUs, που επέρχεται
    ένα συμβάν σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ τους (σε msec).
downlink_dr = 1244.2; %Θυγατρικός ρυθμός μεταφοράς δεδομένων του ρεύματος καθόδου (downstream) σε bytes/msec (αντίστοιχεί σε 9.95328 Gbps)
uplink_dr = 311.04; %Θυγατρικός ρυθμός μεταφοράς δεδομένων του ρεύματος ανόδου (upstream) σε bytes/msec (αντίστοιχεί σε 2.46832 Gbps)
%downlink_dr = 1350; %Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων του ρεύματος καθόδου (downstream) σε bytes/msec (αντίστοιχεί σε 10 Gbps)
%uplink_dr = 312.5; %Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων του ρεύματος ανόδου (upstream) σε bytes/msec (αντίστοιχεί σε 2.5 Gbps)

```

Εικόνα 6.2: Αρχικοποίηση εσωτερικών μεταβλητών συνάρτησης και σταθερών δεδομένων.

```

%ΠΕΔΙΑ ΠΡΟΑΓΙΔΑΣ ΕΝΟΣ DOWNSTREAM ΠΛΑΙΣΙΟΥ:
%PSBd->24 bytes, XGTC: HLen->4 bytes, SWMap->8*N bytes, FLOAMd->48*P bytes
%Το P1 δηλώνει τον αριθμό των μηνυμάτων που κουβαλάει μαζί τον το downstream
    πλαίσιο. Αυτόν τον αριθμό τον υπολογίζουμε τυχαία και ξεχωριστά για κάθε
    %downstream πλαίσιο που στέλνεται και παίρνει τιμές στο διάστημα [0,N].
%(Μπορεί να στέλνεται μήνυμα σε όλες τις ONUs (P1=N), σε καμία (P1=0), σε μία (P1=1) κ.ο.κ.).
%Έτσι, θεωρούμε ότι όλα τα downstream πλαίσια περιέχουν από N μηνύματα το καθένα:
P1 = N; %round(N*rand);
XGTC_frame_header = 4 + 8*N + 48*P1; %Μέγεθος XGTC κεφαλίδας ενός downstream πλαισίου (σε bytes)
Header_of_frame = 24 + XGTC_frame_header; %Μέγεθος κεφαλίδας ενός downstream πλαισίου (σε bytes)
max_frame_payload = 135432 - XGTC_frame_header; %Μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου ενός downstream πλαισίου (σε bytes)
%ΠΕΔΙΑ ΠΡΟΑΓΙΔΑΣ ΜΙΑΣ UPSTREAM ΡΙΠΗΣ:
%PSBu->24 bytes, XGTC: (ONU_ID+Ind+HEC)->4 bytes, FLOAMu->(0 ή 48) bytes,
%DRBu: BufOcc->3 bytes, CRC-> 1 byte, XGTC trailer: SIP->4 bytes
%Αντίστοιχα με πιο πριν, το P2 δηλώνει τον αριθμό των μηνυμάτων που κουβαλάει μαζί
    %της μια upstream ριπή και παίρνει τιμή 0 ή 1 κάθε φορά. Έτσι, P2=1 μόνιμα:
P2 = 1; %round(rand);
XGTC_burst_header = 4 + 48*P2 + 4; %Μέγεθος XGTC κεφαλίδας μιας upstream ριπής (σε bytes)
Header_of_burst = 24 + XGTC_burst_header; %Μέγεθος κεφαλίδας μιας upstream ριπής (σε bytes)
max_burst_payload = 38880 - Header_of_burst - 4; %Μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου μιας upstream ριπής (σε bytes)

```

Εικόνα 6.3: Αρχικοποίηση κεφαλίδας των downstream πλαισίων και των upstream ριπών.

```

%Οι αποστάσεις των οπτικών μονάδων δικτύου (ONUs) από το οπτικό τερματικό γραμμής (OLT) είναι ομοιόμορφα
%κατανεμημένες στο διάστημα [20,60] χιλιόμετρα και υπολογίζονται τυχαία στην αρχή του προγράμματος.
%Σύμφωνα με τις αποστάσεις αυτές, στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός (μονοκατευθυντικών και όχι
%μετ' επιστροφής) χρόνων διάδοσης για την κάθε ONU (σε msec).
Distances=[]; RTT_half=[]; RTT_half_sorted=[];
Thold_init=[]; %Αρχική περίοδος παραμονής σε κατάσταση ActiveHeld (υπολογίζεται για κάθε ONU ξεχωριστά).
for ONU_id=1:N
    %Σταθερές τιμές αποστάσεων:
    if ONU_id==1, Distances(1,ONU_id)=21;
    elseif ONU_id==2, Distances(1,ONU_id)=25.5;
    elseif ONU_id==3, Distances(1,ONU_id)=30;
    elseif ONU_id==4, Distances(1,ONU_id)=34.5;
    elseif ONU_id==5, Distances(1,ONU_id)=39;
    elseif ONU_id==6, Distances(1,ONU_id)=43.5;
    elseif ONU_id==7, Distances(1,ONU_id)=48;
    elseif ONU_id==8, Distances(1,ONU_id)=52.5;
    elseif ONU_id==9, Distances(1,ONU_id)=57;
    elseif ONU_id==10,Distances(1,ONU_id)=60;
    else Distances(1,ONU_id)=58.5;
    end
    %Distances(1,ONU_id)=round((60-20)*rand+20); %Αποστάσεις σε χιλιόμετρα (km)
    RTT_half(1,ONU_id) = ONU_id; %ID της ONU
    RTT_half(2,ONU_id) = round(Distances(1,ONU_id)/c); %Μονοκατευθυντική καθυστέρηση (σε msec)
    %Αρχική περίοδος παραμονής σε κατάσταση ActiveHeld για κάθε ONU ξεχωριστά (σε msec):
    Thold_init(1,ONU_id) = Header_o/_frame/downlink_dr + RTT_half(2,ONU_id);
end
%Εισαγωγή του RTT_half ως προς τη μονοκατευθυντική καθυστέρηση των ONUs:
tempd=[]; tempd=sortrows(RTT_half',2); RTT_half_sorted=tempd';

```

Εικόνα 6.4: Αρχικοποίηση αποστάσεων μεταξύ της κάθε ONU και του OLT.

```

%ΟΥΡΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΤΟΥ OLT: ΠΙΝΑΚΕΙ-> Q_OLI + current_downstream_frame.
%Τα πακέτα που φτάνουν στο OLT προς αποστολή στις ONUs, μπαίνουν όλα στον πίνακα Q_OLI.
%1η γραμμή: Packet_id
%2η γραμμή: Packet size (μέγεθος πακέτου σε bytes)
%3η γραμμή: Created_time (χρονική στιγμή άφιξης πακέτου στην ουρά του OLT)
%4η γραμμή: ONU_id (δηλώνει σε ποια ONU απευθύνεται το πακέτο)
Q_OLI=[]; %Η πολιτική της ουράς του OLT είναι FIFO.
packet_id = 1; %Αόζων αριθμός πακέτου στην ουρά του OLT
%Ο current_downstream_frame περιέχει τα δεδομένα (πακέτα) του τρέχοντος downstream πλαισίου (αν υπάρχουν).
%1η Γραμμή: ONU_ID
%2η Γραμμή: Packet size
%3η Γραμμή: Created time
%4η Γραμμή: Χρόνος ολικής αποχώρησης (μετάδοσης) πακέτου από την ουρά του OLT
current_downstream_frame=[];
%ΟΥΡΕΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΤΩΝ ONUs: ΠΙΝΑΚΕΙ-> (Q_ONU,Q_ONU_created_time) + (stated_packets,stated_created_time).
%Όσο θεωρούμε πακέτα Ethernet, δηλαδή το μέγεθός τους παίρνει τιμές στο διάστημα [64,1518] bytes.
%Όσο 64 το ελάχιστο μέγεθος πακέτου (το πολύ max_Q_length πακέτα θα χωρέσουν να μπουν στην ουρά οποιασδήποτε ONU):
max_Q_length = floor(Q_size/64); Q_ONU=[]; Q_ONU_created_time=[];
Q_ONU = zeros(N,max_Q_length); %Κάθε γραμμή του πίνακα Q_ONU αντιστοιχεί σε ουρά αναμονής μιας ONU. Το μηδέν
%στον πίνακα Q_ONU υποδηλώνει ότι υπάρχει ελεύθερη θέση στην ουρά της αντίστοιχης ONU ώστε να έρθει και άλλο
%πακέτο, με τη προϋπόθεση πάντα ότι το συνολικό μέγεθος των πακέτων που βρίσκονται στην ουρά δεν ξεπερνά το
%Q_size. Την ουρά (γραμμή του Q_ONU) τη γεμίζουμε από τα αριστερά προς τα δεξιά, με το μέγεθος των πακέτων.
Q_ONU_created_time = zeros(N,max_Q_length); %Ο πίνακας αυτός δηλώνει τη χρονική στιγμή που έφτασε στην ουρά
%το κάθε πακέτο. Σε συνδυασμό με τον πίνακα Q_ONU δηλαδή, έχουμε για κάθε πακέτο που δημιουργείται: 1)το
%μέγεθος του κάθε πακέτου στην ουρά της ONU και 1)τη χρονική στιγμή που έφτασε στην ουρά της ONU το πακέτο.
%Τα πακέτα που έχουν δελαθεί μπαίνουν σε αυτόν τον πίνακα (μεταφέρονται από τον Q_ONU στον stated_packets):
stated_packets=[]; stated_created_time=[];
stated_packets=zeros(N,max_Q_length); stated_created_time=zeros(N,max_Q_length);
%Τα πακέτα που στέλνει το OLT στις ONUs και τα οποία η ONU δεν τα λαμβάνει απευθείας επειδή βρίσκεται σε κατάσταση Asleep
%πηγαίνουν σε αυτή την ουρά (κάθε γραμμή του πίνακα waiting_Q_ONU αντιπροσωπεύει μια ουρά για κάθε διαφορετική ONU):
waiting_Q_ONU=[]; waiting_Q_ONU_ct=[];
waiting_Q_ONU = zeros(N,max_Q_length); waiting_Q_ONU_ct = zeros(N,max_Q_length);
%Αρχικοποίηση του πεδίου BMap της κεφαλίδας του downstream πλαισίου. Οπου -1 στη δεύτερη στήλη σημαίνει ότι
%δεν έχει οριστεί ακόμα χρονική στιγμή για την αποστολή των αναστεθέντων bytes για την αντίστοιχη ONU.
BMap=[]; BMap=zeros(N,3);
for ONU_id=1:N
    BMap(ONU_id,1)=ONU_id; %1η στήλη: ID της ONU
    BMap(ONU_id,2)=-1; %2η στήλη: Η χρονική στιγμή που έχει δικαίωμα να μεταδώσει ριπή η ONU
    BMap(ONU_id,3)=0; %3η στήλη: Τα bytes δεδομένων που ανατείνονται στην ONU για αποστολή
end
%Αρχικοποίηση του πεδίου BufOcc της κεφαλίδας της upstream ριπής, που
%περιέχει τον αριθμό των bytes δεδομένων που δηλώνει μια ONU στο OLT:
BufOcc=[]; BufOcc=zeros(1,N);

```

Εικόνα 6.5: Αρχικοποίηση κύριων πινάκων της συνάρτησης.

```

Interarrival_times_upstream=[]; Interarrival_times_downstream=[];
Interarrival_times_upstream = [1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000 10000];
Interarrival_times_downstream = [100 100 100 100 100 100 100 100 100 100];
%Interarrival_times_downstream = [1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000 10000];
%Μετρητής που δείχνει πόσες φορές έχει αλλάξει ο ρυθμός άφιξης των
arrival_rate_change_time=0; %πακέτων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
%Ανανέωση του διαστήματος μεταξύ των αφίξεων διαδοχικών πακέτων στο upstream:
interarrival_time_up=Interarrival_times_upstream(1,arrival_rate_change_time+1);
%Ανανέωση του διαστήματος μεταξύ των αφίξεων διαδοχικών πακέτων στο downstream:
interarrival_time_down=Interarrival_times_downstream(1,arrival_rate_change_time+1);

```

Εικόνα 6.6: Αρχικοποίηση του σταθερού χρονικού διαστήματος μεταξύ αφίξεων διαδοχικών πακέτων στο upstream και στο downstream, αντίστοιχα.

```

%ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ
%1η Γραμμή: Τύπος Γεγονότος
%2η Γραμμή: Χρόνος πραγματοποίησης του γεγονότος
%3η Γραμμή: Id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός
%4η και 5η Γραμμή: Εξαρτώνται από τον τύπο του γεγονότος
Event_List=[]; Event_List=zeros(5,3*N+3); %Αρχικοποίηση του Event_List.
%Ορισμός ενός αρχικού γεγονότος παραγωγής πακέτων στην ουρά της κάθε ONU:
Event_List(1,1:N)=1;
for counter_ONUs=1:N
    Event_List(2,counter_ONUs)=round(interarrival_time_up);
    Event_List(3,counter_ONUs)=counter_ONUs; %ID της ONU
end
Event_List(4,1:N)=0; Event_List(5,1:N)=0;
%Ορισμός ενός αρχικού γεγονότος παραγωγής πακέτων, για κάθε ONU, στην ουρά του GLT:
Event_List(1,(N+1):(2*N))=2;
for counter_ONUs=1:N
    Event_List(2,N+counter_ONUs)=round(interarrival_time_down);
    Event_List(3,N+counter_ONUs)=counter_ONUs; %ID της ONU
end
Event_List(4,(N+1):(2*N))=0; Event_List(5,(N+1):(2*N))=0;
%Αρχικά για τα πρώτα Thold_init msec όλες οι ONUs βρίσκονται σε κατάσταση Initial ActiveHeld:
%ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Το Thold_init είναι διαφορετικό για κάθε ONU και εξιστάται από την απόσταση της ONU από το GLT.
for counter_ONUs=1:N
    Event_List(1,2*N+counter_ONUs)=6; %Η κάθε ONU θα εξέλθει σε ποια κατάσταση θα μεταβεί αμέσως μετά, αφού περάσει
    Event_List(2,2*N+counter_ONUs)=round(Thold_init(1,counter_ONUs)*(10^-6))/(10^-6); %χρόνος ίσος με Thold_init αρχικά.
    Event_List(3,2*N+counter_ONUs)=counter_ONUs; %ID της ONU
    Event_List(4,2*N+counter_ONUs)=0; Event_List(5,2*N+counter_ONUs)=0;
end
%Αλλαγή χρόνου αρίξης των πακέτων κάθε (Simulation_time/10) msec:
Event_List(1,3*N+1)=0;
Event_List(2,3*N+1)=round(ST/10);
Event_List(3,3*N+1)=0; %δεν αναφέρεται σε κάποια συγκεκριμένη ONU.
Event_List(4,3*N+1)=0; Event_List(5,3*N+1)=0;
%Σχηματισμός του πρώτου downstream κλασίου τη χρονική στιγμή μηδέν:
Event_List(1,3*N+2)=3;
Event_List(2,3*N+2)=0;
Event_List(3,3*N+2)=0; %δεν αναφέρεται σε κάποια συγκεκριμένη ONU.
Event_List(4,3*N+2)=0; Event_List(5,3*N+2)=0;
%Ορισμός γεγονότος τερματισμού της προσομοίωσης:
Event_List(1,3*N+3)=-1;
Event_List(2,3*N+3)=ST;
Event_List(3,3*N+3)=0; %δεν αναφέρεται σε κάποια συγκεκριμένη ONU.
Event_List(4,3*N+3)=0; Event_List(5,3*N+3)=0;
%Γίνεται σαρτάρισμα του Event_List ως προς τον τύπο του γεγονότος αρχικά και στη συνέχεια γίνεται σαρτάρισμα ως προς το χρόνο:
temp=[]; temp=sortrows(Event_List',1); Event_List=temp'; temp=[]; temp=sortrows(Event_List',2); Event_List=temp';

```

Εικόνα 6.7: Δημιουργία και αρχικοποίηση του πίνακα γεγονότων.

```

%Πρωτοί για τον αν υπάρχει, downstream h/w; upstream κίνηση στις ONU(0->δεν υπάρχει κίνηση, 1->Υπάρχει κίνηση);
flag_downstream=[]; flag_upstream=[]; fd=[]; fd = zeros(1,N);
flag_upstream = zeros(1,N); %Αρχικά δεν υπάρχει upstream κίνηση για καμία ONU.
flag_downstream = zeros(1,N); %Αρχικά δεν υπάρχει downstream κίνηση για καμία ONU.
%Επίχουσα κατάσταση της κάθε ONU (Αρχική κατάσταση για όλες τις ONUs η Initial ActiveHeld):
%0-> Initial ActiveHeld, 1-> ActiveHeld, 2-> ActiveFree, 3-> DozeAware, 4-> SleepAware, 5-> Listen, 6-> Asleep.
current_state=[]; current_state(1,1:N)=0;
%Μετρητές συνολικού χρόνου παραμονής της κάθε ONU σε κάθε κατάσταση του μοντέλου διαχείρισης ενέργειας:
Initial_ActiveHeld_time=[]; ActiveHeld_time=[]; ActiveFree_time=[]; DozeAware_time=[]; SleepWake_time=[]; Listen_time=[]; Asleep_time=[];
Initial_ActiveHeld_time(1,1:N)=0; %Συνολικός χρόνος (για κάθε ONU ξεχωριστά) παραμονής σε κατάσταση Initial ActiveHeld.
ActiveHeld_time(1,1:N)=0; %Συνολικός χρόνος (για κάθε ONU ξεχωριστά) παραμονής σε κατάσταση ActiveHeld.
ActiveFree_time(1,1:N)=0; %Συνολικός χρόνος (για κάθε ONU ξεχωριστά) παραμονής σε κατάσταση ActiveFree.
DozeAware_time(1,1:N)=0; %Συνολικός χρόνος (για κάθε ONU ξεχωριστά) παραμονής σε κατάσταση DozeAware.
SleepWake_time(1,1:N)=0; %Συνολικός χρόνος (για κάθε ONU ξεχωριστά) παραμονής σε κατάσταση SleepAware.
Listen_time(1,1:N)=0; %Συνολικός χρόνος (για κάθε ONU ξεχωριστά) παραμονής σε κατάσταση Listen.
Asleep_time(1,1:N)=0; %Συνολικός χρόνος (για κάθε ONU ξεχωριστά) παραμονής σε κατάσταση Asleep.
%Η τελευταία χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κάθε κατάσταση:
Time_on_InitialActiveHeld=[]; Time_on_InitialActiveHeld(1,1:N)=0; %Χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση Initial ActiveHeld.
Time_on_ActiveHeld=[]; Time_on_ActiveHeld(1,1:N)=0; %Η τελευταία χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση ActiveHeld.
Time_on_ActiveFree=[]; Time_on_ActiveFree(1,1:N)=0; %Η τελευταία χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση ActiveFree.
Time_on_DozeAware=[]; Time_on_DozeAware(1,1:N)=0; %Η τελευταία χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση DozeAware.
Time_on_SleepAware=[]; Time_on_SleepAware(1,1:N)=0; %Η τελευταία χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση SleepAware.
Time_on_Listen=[]; Time_on_Listen(1,1:N)=0; %Η τελευταία χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση Listen.
Time_on_Asleep=[]; Time_on_Asleep(1,1:N)=0; %Η τελευταία χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση Asleep.

```

Εικόνα 6.8: Αρχικοποίηση μεταβλητών σχετικών με το τυπικό μοντέλο διαχείρισης ενέργειας.

```

%ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΎΠΝΟΥ (Learning Automata)
flag_Asleep=[]; flag_Listen=[]; T_ideal_Listen=[]; T_ideal_Asleep=[]; a_Listen=[];
a_Asleep=[]; T_estimate_Listen=[]; T_estimate_Asleep=[]; e_Listen=[]; e_Asleep=[];
L=0.1; %Συντελεστής L του Learning Automata.
%Εδώ θεωρείται ότι ο συνολικός αριθμός πιθανών δράσεων του μοντέλου LA (πριόδων
%ύπνου) είναι 80, δηλαδή όλα τα πολλαπλάσια του 125 από τα 125 μέχρι τα 10000 msec.
actions=80;
%Ο πίνακας με τις πιθανότητες να επιλεγεί κάθε δράση για κάθε ONU ξεχωριστά:
Plisten=[]; Plisten(1:N,1:actions)=1/actions; %Αρχικά έχουμε ίσες πιθανότητες
Pasleep=[]; Pasleep(1:N,1:actions)=1/actions; %να επιλεγεί η κάθε δράση.
%Τιμές ιδονικών περιόδων ύπνου που θα πρέπει συμπληρώσουν οι πίνακες T_ideal, ώστε
N=20; %να αρχίσει να γίνεται υπολογισμός εκτιμώμενων τιμών από το αυτόματο.
mtdv=10000; %Μέγιστος αριθμός τιμών μέσω σφάλματος για επάνδωση σε γραφημα.
%Πρωτοί που δείχνουν αν έχει ξεκινήσει υπολογισμός μιας νέας ιδονικής
%περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen ή αντίστοιχα σε κατάσταση Asleep:
flag_Listen=zeros(1,N); flag_Asleep=zeros(1,N);
%Ιδονικές περίοδοι ύπνου σε κατάσταση Listen και Asleep για κάθε ONU:
T_ideal_Listen=(-1)*ones(N,W*mtdv); T_ideal_Asleep=(-1)*ones(N,W*mtdv);
%Οι περίοδοι ύπνου σε μορφή αναγνωριστικού δράσης (π.χ. Περίοδος ύπνου
%125 msec->Δράση 1, 250 msec->Δράση 2, 375 msec->Δράση 3 κ.τ.λ.):
a_Listen=(-1)*ones(N,W*mtdv); a_Asleep=(-1)*ones(N,W*mtdv);
%Πίνακας με τις εκτιμώμενες τιμές χρόνου ύπνου στις καταστάσεις Listen και Asleep:
T_estimate_Listen=(-1)*ones(N,mtdv); T_estimate_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv);
%Εκτιμώμενες τιμές περιόδου ύπνου σε μορφή αναγνωριστικού δράσης:
e_Listen=(-1)*ones(N,mtdv); e_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv);
%Αρχικοποίηση ποσοστού λάθους και μέσου ποσοστού λάθους περιόδου για κατάσταση Asleep:
error_rate_Asleep=[]; mean_error_rate_Asleep=[]; sum_error_rate_Asleep=[];
error_rate_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv); mean_error_rate_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv);
sum_error_rate_Asleep=zeros(1,N);
Mean_model_error_Asleep = 0; counter_error_values_Asleep = 0; %Γενικό μέσο σφάλμα του μοντέλου LA για τις περιόδους Asleep.
%Η τελευταία χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση Listen ή Asleep και παράλληλα άρχισε
%ο υπολογισμός μιας νέας ιδονικής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen ή Asleep, αντίστοιχα:
Time_on_Listenl=[]; Time_on_Listenl(1,1:N)=0; %Χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση Listen.
Time_on_Asleepl=[]; Time_on_Asleepl(1,1:N)=0; %Χρονική στιγμή που μπήκε η κάθε ONU σε κατάσταση Asleep.
%Αρχικοποίηση διανυσμάτων που περιέχουν τα τελικά αποτελέσματα:
step=0; M_n_e_Listen=[]; M_n_e_Asleep=[]; cost_function=[]; M_d_u=[]; M_d_d=[]; M_p_c=[]; Tht_u=[];Tht_d=[];

```

Εικόνα 6.9: Αρχικοποίηση μεταβλητών σχετικών με το μηχανισμό καθορισμού βέλτιστης περιόδου ύπνου Learning Automata.

```

%ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΎΠΝΟΥ (4R-STAR)
flag_Asleep=[]; flag_Listen=[]; T_ideal_Listen=[]; T_ideal_Asleep=[]; a_Listen=[];
a_Asleep=[]; T_estimate_Listen=[]; T_estimate_Asleep=[]; e_Listen=[]; e_Asleep=[];
%Εξά θωρείται ότι ο συνολικός αριθμός πιθανών δράσεων του μοντέλου 4R-STAR (περιόδου
ύπνου) είναι 80, δηλαδή όλα τα πολλαπλάσια των 125 από τα 125 μέχρι τα 10000 msec.
actions=80;
D=5; %Αριθμός καταστάσεων του μοντέλου 4R-STAR.
%Αποκρίσεις του μοντέλου 4R-STAR: 1->"very bad", 2->"bad", 3->"good" και 4->"very good";
very_good = 1*0.015; good = 2*0.015; bad = 3*0.015;
%Ο πίνακας με τα ισοπίθανα ενδεχόμενα να επιλεγεί η κάθε δράση/περίοδος ύπνου
%(είτε σε κατάσταση Listen ή σε Asleep) όταν η ONU βρίσκεται στην κατάσταση (0,0) του
μοντέλου 4R-STAR, όπου η κατάσταση (0,0) είναι η ουδέτερη (neutral) κατάσταση:
Probabilities=[]; Probabilities(1,1:actions)=1/actions;
%Ο παρακάτω πίνακας δείχνουν σε τι κατάσταση του μοντέλου 4R-STAR βρίσκεται η κάθε
%ONU τη τρέχουσα χρονική στιγμή, για τις καταστάσεις Listen και Asleep, αντίστοιχα:
State_Listen=[]; State_Asleep=[]; State_Listen(1,1:N)=0; State_Asleep(1,1:N)=0;
%Η τιμή της περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen, και Asleep αντίστοιχα, που επιλέγεται κάθε φορά από το μοντέλο, για κάθε ONU:
selected_period_Listen=[]; selected_period_Asleep=[]; selected_period_Listen(1,1:N)=0; selected_period_Asleep(1,1:N)=0;
mtdv=10000; %Μέγιστος αριθμός τιμών μέσου σφάλματος για τρέφηση σε γράφημα.
%Πηροίρες που δείχνουν αν έχει ξεκινήσει υπολογισμός μιας νέας (δανικής
)περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen ή αντίστοιχα σε κατάσταση Asleep:
flag_Listen=zeros(1,N); flag_Asleep=zeros(1,N);
%Ιδανικές περίοδοι ύπνου σε κατάσταση Listen και Asleep για κάθε ONU:
T_ideal_Listen=(-1)*ones(N,mtdv); T_ideal_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv);
%Οι περίοδοι ύπνου σε μορφή αναγνωριστικού δράσης π.χ. Περίοδος ύπνου
%125 msec->δράση 1, 250 msec->δράση 2, 375 msec->δράση 3 κ.τ.λ.):
a_Listen=(-1)*ones(N,mtdv); a_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv);
%Πίνακας με τις εκτιμώμενες τιμές χρόνων ύπνου στις καταστάσεις Listen και Asleep:
T_estimate_Listen=(-1)*ones(N,mtdv); T_estimate_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv);
%Εκτιμώμενες τιμές περιόδου ύπνου σε μορφή αναγνωριστικού δράσης:
e_Listen=(-1)*ones(N,mtdv); e_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv);
%Αρχικοποίηση ποσοστού λάθους και μέσου ποσοστού λάθους περιόδου για κατάσταση Listen:
error_rate_Listen=[]; mean_error_rate_Listen=[]; sum_error_rate_Listen=[];
error_rate_Listen=(-1)*ones(N,mtdv); mean_error_rate_Listen=(-1)*ones(N,mtdv);
sum_error_rate_Listen=zeros(1,N);
Mean_model_error_Listen = 0; counter_error_values_Listen = 0; %Γενικό μέσο σφάλμα του μοντέλου 4R-STAR για τις περιόδους Listen.
%Αρχικοποίηση ποσοστού λάθους και μέσου ποσοστού λάθους περιόδου για κατάσταση Asleep:
error_rate_Asleep=[]; mean_error_rate_Asleep=[]; sum_error_rate_Asleep=[];
error_rate_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv); mean_error_rate_Asleep=(-1)*ones(N,mtdv);
sum_error_rate_Asleep=zeros(1,N);
Mean_model_error_Asleep = 0; counter_error_values_Asleep = 0; %Γενικό μέσο σφάλμα του μοντέλου 4R-STAR για τις περιόδους Asleep.
%Η τελευταία χρονική στιγμή που υπήκxε η κάθε ONU σε κατάσταση Listen ή Asleep και παράλληλα άρχισε
%το υπολογισμό μιας νέας (δανικής) περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen ή Asleep, αντίστοιχα:
Time_on_Listen1=[]; Time_on_Listen1(1,1:N)=0; %Χρονική στιγμή που μπαίνει η κάθε ONU σε κατάσταση Listen.
Time_on_Asleep1=[]; Time_on_Asleep1(1,1:N)=0; %Χρονική στιγμή που μπαίνει η κάθε ONU σε κατάσταση Asleep.
%Αρχικοποίηση διανυσμάτων που περιέχουν τα τελικά αποτελέσματα:
step=0; M_m_e_Listen=[]; M_m_e_Asleep=[]; cost_function=[]; M_d_u=[]; M_d_d=[]; M_p_o=[]; Tht_u=[];Tht_d=[];

```

Εικόνα 6.10: Αρχικοποίηση μεταβλητών σχετικών με το μηχανισμό καθορισμού βέλτιστης περιόδου ύπνου 4R-STAR.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα flag το οποίο σηματοδοτεί την έναρξη της προσομοίωσης, η αρχικοποίηση του χρόνου της προσομοίωσης, καθώς και η βασική ρουτίνα (while) που αποτελεί και το κύριο μέρος του κώδικα. Στη ρουτίνα αυτή γίνεται αρχικά η επιλογή του γεγονότος χρονικά. Επίσης, έχει σημασία και η σειρά εκτέλεσης των γεγονότων διαφορετικού τύπου.

Στο γεγονός 0 (Εικόνα 6.11), το οποίο επαναλαμβάνεται κάθε (Simulation_time/10) msec, γίνεται ανανέωση/αλλαγή του σταθερού διαστήματος μεταξύ των αφίξεων διαδοχικών πακέτων, τόσο στο upstream, όσο και στο downstream, σύμφωνα με τα διανύσματα Interarrival_times_upstream και Interarrival_times_downstream αντίστοιχα, και γίνεται υπολογισμός μετρικών απόδοσης σε εκείνο το σημείο.

Στο γεγονός 1 λαμβάνει χώρα η διαδικασία παραγωγής κίνησης πακέτων στις ουρές των ONUs (Εικόνα 6.12). Στο γεγονός 2, που φαίνεται στην Εικόνα 6.13, λαμβάνει χώρα η παραγωγή κίνησης πακέτων (για κάθε διαφορετική ONU) στην ουρά του OLT.

```

%ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΠΡΟΚΑΘΟΡΙΣΗΣ
Time=0; %Αρχικοποίηση τρέχοντος χρόνου προσομοίωσης (σε msec).
flag=true; %Αρχικοποίηση σημαίας για να ξεκινήσει η προσομοίωση.
while (flag)
    %Εμφάνιση(όμοιας ή πολλαπλής) του Event_List σε κάθε βήμα:
    event = Event_List(1,1);

    %Τρέχονος 0 - Αλλαγή του χρόνου άφιξης των πακέτων κάθε (Simulation_Time/10) msec.
    if event==0
        Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου

        %Αλλαγή των Interarrival times και για τα πακέτα στο upstream και για τα πακέτα στο downstream, αντίστοιχα:
        arrival_rate_change_time=arrival_rate_change_time+1;
        %Interarrival time up=Interarrival_times_upstream(1,arrival_rate_change_time+1);
        interarrival_time_down=Interarrival_times_downstream(1,arrival_rate_change_time+1);

        extra_time=[]; extra_time(2,1:N)=0; sum_extra_power=0; sum_extra_time=0;
        extra_InitialActiveHeld_time=[]; extra_ActiveHeld_time=[]; extra_ActiveFree_time=[];
        extra_DozeAware_time=[]; extra_SleepAware_time=[]; extra_Listen_time=[]; extra_Asleep_time=[];
        %Υπολογισμός επιπλέον χρόνων που αφορά η κάθε ONU στην τελεσίδικη κατάσταση στην οποία βρίσκεται:
        extra_InitialActiveHeld_time(1,1:N)=0; extra_ActiveHeld_time(1,1:N)=0; extra_DozeAware_time(1,1:N)=0;
        extra_SleepAware_time(1,1:N)=0; extra_ActiveFree_time(1,1:N)=0; extra_Listen_time(1,1:N)=0; extra_Asleep_time(1,1:N)=0;
        for ONU_id=1:N
            if current_state(1,ONU_id)==0
                extra_time(1,ONU_id)=current_state(1,ONU_id);
                extra_time(2,ONU_id)=Time-Time_on_InitialActiveHeld(1,ONU_id);
                sum_extra_power = sum_extra_power + (extra_time(2,ONU_id)*P_ActiveHeld);
                sum_extra_time = sum_extra_time + extra_time(2,ONU_id);
            elseif current_state(1,ONU_id)==1
                extra_time(1,ONU_id)=current_state(1,ONU_id);
                extra_time(2,ONU_id)=Time-Time_on_ActiveHeld(1,ONU_id);
                sum_extra_power = sum_extra_power + (extra_time(2,ONU_id)*P_ActiveHeld);
                sum_extra_time = sum_extra_time + extra_time(2,ONU_id);
            elseif current_state(1,ONU_id)==2
                extra_time(1,ONU_id)=current_state(1,ONU_id);
                extra_time(2,ONU_id)=Time-Time_on_ActiveFree(1,ONU_id);
                sum_extra_power = sum_extra_power + (extra_time(2,ONU_id)*P_ActiveFree);
                sum_extra_time = sum_extra_time + extra_time(2,ONU_id);
            elseif current_state(1,ONU_id)==3
                extra_time(1,ONU_id)=current_state(1,ONU_id);
                extra_time(2,ONU_id)=Time-Time_on_DozeAware(1,ONU_id);
                sum_extra_power = sum_extra_power + (extra_time(2,ONU_id)*P_DozeAware);
                sum_extra_time = sum_extra_time + extra_time(2,ONU_id);
            elseif current_state(1,ONU_id)==4
                extra_time(1,ONU_id)=current_state(1,ONU_id);
                extra_time(2,ONU_id)=Time-Time_on_SleepAware(1,ONU_id);
                sum_extra_power = sum_extra_power + (extra_time(2,ONU_id)*P_SleepAware);
                sum_extra_time = sum_extra_time + extra_time(2,ONU_id);
            elseif current_state(1,ONU_id)==5
                extra_time(1,ONU_id)=current_state(1,ONU_id);
                extra_time(2,ONU_id)=Time-Time_on_Listen(1,ONU_id);
                sum_extra_power = sum_extra_power + (extra_time(2,ONU_id)*P_Listen);
                sum_extra_time = sum_extra_time + extra_time(2,ONU_id);
            elseif current_state(1,ONU_id)==6
                extra_time(1,ONU_id)=current_state(1,ONU_id);
                extra_time(2,ONU_id)=Time-Time_on_Asleep(1,ONU_id);
                sum_extra_power = sum_extra_power + (extra_time(2,ONU_id)*P_Asleep);
                sum_extra_time = sum_extra_time + extra_time(2,ONU_id);
            end
        end
        sum_Initial_ActiveHeld = sum(Initial_ActiveHeld_time);
        sum_ActiveHeld = sum(ActiveHeld_time); sum_ActiveFree = sum(ActiveFree_time);
        sum_DozeAware = sum(DozeAware_time); sum_SleepAware = sum(SleepAware_time);
        sum_Listen = sum(Listen_time); sum_Asleep = sum(Asleep_time);

        %Υπολογισμός μέσης καθυστέρησης και επιβάρυνσης στο upstream και στο downstream αντίστοιχα:
        Mean_delay_up = total_delay_up/sent_packets_up; %Εξ msec
        Throughput_up = (sent_bytes_up*8)/(Time*(10^(-6))); %Εξ bps
        if sent_packets_up==0, Mean_delay_up=0; Throughput_up=0; end
        Mean_delay_down = total_delay_down/sent_packets_down; %Εξ msec
        Throughput_down = (sent_bytes_down*8)/(Time*(10^(-6))); %Εξ bps
        if sent_packets_down==0, Mean_delay_down=0; Throughput_down=0; end
        %Υπολογισμός μέσης καταναλωόμενης ισχύος σε Watts:
        Mean_power_consumption = (sum_Initial_ActiveHeld*P_ActiveHeld + sum_ActiveHeld*P_ActiveHeld + sum_ActiveFree*P_ActiveFree + ...

        step=step+1; %Ανοδίνευση μετρήσεων:
        %Υπολογισμός γενικού μέσου σφάλματος του χρησιμοποιούμενου σχήματος για τις επιδόσεις Listen και Asleep αντίστοιχα:
        M_m_e_Listen(1,step) = Mean_model_error_Listen/counter_error_values_Listen; if counter_error_values_Listen==0, M_m_e_Listen(1,step)=0; end
        M_m_e_Asleep(1,step) = Mean_model_error_Asleep/counter_error_values_Asleep; if counter_error_values_Asleep==0, M_m_e_Asleep(1,step)=0; end
        cost_function(1,step) = Mean_power_consumption*(Mean_delay_up+Mean_delay_down)/2;
        M_d_u(1,step) = Mean_delay_up;
        M_d_d(1,step) = Mean_delay_down;
        Th_u(1,step) = Throughput_up;
        Th_d(1,step) = Throughput_down;
        M_p_c(1,step) = Mean_power_consumption;

        %Ανανέωση κάθε (Simulation_Time/10) msec:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=0;
        Event_List(2,s(2)+1)=round(Time + (ST/10));
        Event_List(3,s(2)+1)=0;
        Event_List(4,s(2)+1)=0; Event_List(5,s(2)+1)=0;

```

Εικόνα 6.11: Γεγονός 0 – Αλλαγή σταθερού χρόνου μεταξύ των αφίξεων διαδοχικών πακέτων στο upstream και αντίστοιχα στο downstream και υπολογισμός μετρικών απόδοσης.


```

%Γεγονός 1ο - Παραγωγή αφίξεων πακέτων στην ουρά της κάθε ONU.
elseif event==1
    Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου
    packet_size = round((1518-64)*rand+64); %Μέγεθος δημιουργηθέντος πακέτου.
    occupied_size1=[]; occupied_size2=[];
    occupied_size1 = sum(Q_ONU,2); occupied_size2 = sum(stated_packets,2);
    %Βρίσκουμε τον κατειλημμένο χώρο (σε bytes) στην ουρά της αντίστοιχης ONU:
    ONU_Q_size = occupied_size1(Event_List(3,1),1);
    %Βρίσκουμε τον κατειλημμένο χώρο (σε bytes) στον πίνακα των δηλωμένων bytes της αντίστοιχης ONU:
    ONU_stated_packets_size = occupied_size2(Event_List(3,1),1);
    %Αν δε χωράει να μπει το πακέτο στην ουρά της ONU, το απορρίπτουμε:
    if ((ONU_Q_size + ONU_stated_packets_size + packet_size)>Q_size)
        dropped_packets_up = dropped_packets_up + 1; dropped_bytes_up = dropped_bytes_up + packet_size;
    else %Αλλιώς το προσθέτουμε στην ουρά της ONU:
        temp1=[]; temp1 = find(Q_ONU(Event_List(3,1),:)==0,1); %Βρίσκουμε κενή θέση στην ουρά της ONU για το πακέτο.
        Q_ONU(Event_List(3,1),temp1) = packet_size; %Προσθέτουμε το πακέτο στην ουρά της ONU και αντιστοιχά
        Q_ONU_created_time(Event_List(3,1),temp1) = Time; %τη χρονική στιγμή που δημιουργήθηκε.
    end
    %Δημιουργούμε ένα γεγονός τύπου 1, ώστε να προχωρήσει στη δημιουργία του επόμενου πακέτου:
    s=size(Event_List);
    Event_List(1,s(2)+1)=1;
    Event_List(2,s(2)+1)=round(Time + interarrival_time_up);
    Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1); %Βάζουμε το id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός.
    Event_List(4,s(2)+1)=0; Event_List(5,s(2)+1)=0;

```

Εικόνα 6.12: Γεγονός 1 – Παραγωγή αφίξεων πακέτων στην ουρά της κάθε ONU.

```

%Γεγονός 2ο - Παραγωγή αφίξεων πακέτων (που απευθύνονται σε κάθε ONU ξεχωριστά) στην ουρά του OLT.
elseif event==2
    Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου
    packet_size = round((1518-64)*rand+64); %Μέγεθος δημιουργηθέντος πακέτου.
    s1=size(Q_OLT); %Βρίσκουμε τον κατειλημμένο χώρο (σε bytes) στην ουρά του OLT:
    if s1(2)>0 %Αν υπάρχουν πακέτα στην ουρά:
        occupied_size=[]; occupied_size = sum(Q_OLT,2); OLT_Q_size = occupied_size(2,1);
    else %Αν δεν υπάρχουν πακέτα στην ουρά:
        OLT_Q_size = 0;
    end
    %Βρίσκουμε τον κατειλημμένο χώρο (σε bytes) των πακέτων που βρίσκονται μέσα στο τρέχον downstream πλαίσιο που μεταδίδεται:
    scdf=size(current_downstream_frame);
    if scdf(2)>0 %Αν υπάρχουν πακέτα στο πλαίσιο αυτό:
        o_s=[]; o_s = sum(current_downstream_frame,2); c_d_f_size = o_s(2,1);
    else %Αν δεν υπάρχουν πακέτα στο πλαίσιο αυτό:
        c_d_f_size = 0;
    end
    %Αν δε χωράει να μπει το πακέτο στην ουρά του OLT το απορρίπτουμε:
    if ((OLT_Q_size + c_d_f_size + packet_size)>Q_size)
        dropped_packets_down = dropped_packets_down + 1; dropped_bytes_down = dropped_bytes_down + packet_size;
    else %Αλλιώς το προσθέτουμε στην ουρά του OLT:
        Q_OLT(1,end+1) = packet_id; %ID του πακέτου.
        Q_OLT(2,end) = packet_size; %Προσθέτουμε το πακέτο στην ουρά και αντιστοιχά
        Q_OLT(3,end) = Time; %τη χρονική στιγμή που δημιουργήθηκε.
        Q_OLT(4,end) = Event_List(3,1); %ID της ONU στην οποία απευθύνεται το πακέτο.
        temp_OLT=sortrows(Q_OLT',3); %Σορτάρισμα του Q_OLT ως προς
        Q_OLT=temp_OLT'; temp_OLT=[]; %το χρόνο άφιξης των πακέτων.
        packet_id = packet_id + 1;
    end
    %Δημιουργούμε ένα γεγονός τύπου 2, ώστε να προχωρήσει στη δημιουργία του επόμενου πακέτου:
    s=size(Event_List);
    Event_List(1,s(2)+1)=2;
    Event_List(2,s(2)+1)=round(Time + interarrival_time_down);
    Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1); %Βάζουμε το id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός.
    Event_List(4,s(2)+1)=0; Event_List(5,s(2)+1)=0;

```

Εικόνα 6.13: Γεγονός 2 – Παραγωγή κίνησης πακέτων στην ουρά του OLT.

Στο γεγονός 3 γίνεται ο σχηματισμός του καθενός downstream πλαισίου που στέλνει το OLT στις ONUs. Αρχικά, έχουμε το σχηματισμό του πεδίου BWmap της κεφαλίδας του downstream πλαισίου (Εικόνα 6.14), τη δημιουργία γεγονότων λήψης της κεφαλίδας του πλαισίου αυτού από κάθε ONU (Εικόνα 6.16), καθώς και τη δημιουργία γεγονότων πληροφόρησης της κάθε ONU για το πότε μπορεί να στείλει ριπή με το που λάβει τη κεφαλίδα, σύμφωνα με το πεδίο BWmap αυτής της κεφαλίδας (Εικόνα 6.16).

```

Γεγονός 3ο - Σχηματισμός ενός downstream πλαισίου κάθε 125 μsec.
elseif event==3
    Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου

%Το OLT πληροφορεί όλη τις ONU, μέσω του καθενός downstream πλαισίου, για το πότε μπορούν να μεταδώσουν ριπή απ το πον λάβουν την κεφαλίδα
κάποιου downstream πλαισίου. Η κάθε ONU μπορεί να μεταδώσει upstream ριπή, έ και να μη μεταδώσει, άμα βρίσκεται σε κατάσταση Awake ή Listen.
%Αντιστοίχως τον πεδίο Bwmap της κεφαλίδας του downstream πλαισίου:
RTT_half_size=size(RTT_half_sorted);
for i=1:RTT_half_size(2) %Για κάθε ONU:
    if i==1
        Bwmap(RTT_half_sorted(1,1),2) = Time + Header_of_frame/downlink_dr + RTT_half_sorted(2,i);
    else
        if (RTT_half_sorted(2,i)<(RTT_half_sorted(2,i-1) + Header_of_burst/uplink_dr + (Bwmap(RTT_half_sorted(1,1-1),3)/uplink_dr) + guard_time))
            Bwmap(RTT_half_sorted(1,1),2) = Bwmap(RTT_half_sorted(1,1-1),2) + Header_of_burst/uplink_dr + ...
                (Bwmap(RTT_half_sorted(1,1-1),3)/uplink_dr) + guard_time;
        else
            Bwmap(RTT_half_sorted(1,1),2) = Time + Header_of_frame/downlink_dr + RTT_half_sorted(2,i);
        end
    end
end
end
end

```

Εικόνα 6.14: Γεγονός 3 – Σχηματισμός πεδίου Bwmap κεφαλίδας downstream πλαισίου.

```

current_downstream_frame=[]; %Καθαρισμός αφέλιμου φορτίου του τρέχοντος downstream πλαισίου.
%Δημιουργία αφέλιμου φορτίου του τρέχοντος downstream πλαισίου:
flagl=true; Q_OLT_size=size(Q_OLT); %Αριθμός πακέτων στην ουρά του OLT.
%Όσο υπάρχουν πακέτα στην ουρά του OLT προς μετάδοση:
while (Q_OLT_size(2)>0) && (flagl==true)
    %Εύρεση κομμάτιλημένου χώρου δεδομένων σε bytes στο τρέχον downstream πλαίσιο:
    cdf_size=size(current_downstream_frame);
    if cdf_size(2)>0 %Έχουν μπει πακέτα στο πλαίσιο.
        suml=sum(current_downstream_frame,2); sum_cdf_size=suml(2,1); suml=[];
    else
        sum_cdf_size=0; %Δεν έχουν μπει ακόμα πακέτα στο πλαίσιο.
    end
    %Όσο δεν ξεπερνάμε τον μέγιστο αριθμό bytes δεδομένων που μπορούμε να μεταδώσουμε:
    if (sum_cdf_size + Q_OLT(2,1))<=max_frame_payload
        if sum_cdf_size==0 %Για το πρώτο πακέτο που βάζουμε στο downstream πλαίσιο (αρχή):
            current_downstream_frame(1,end+1) = Q_OLT(4,1); %ONU ID
            current_downstream_frame(2,end) = Q_OLT(2,1); %Packet size
            current_downstream_frame(3,end) = Q_OLT(3,1); %Created time
            current_downstream_frame(4,end) = Time + Header_of_frame/downlink_dr + Q_OLT(2,1)/downlink_dr;
        else %Για τα υπόλοιπα πακέτα που βάζουμε στο downstream πλαίσιο (αρχή):
            current_downstream_frame(1,end+1) = Q_OLT(4,1); %ONU ID
            current_downstream_frame(2,end) = Q_OLT(2,1); %Packet size
            current_downstream_frame(3,end) = Q_OLT(3,1); %Created time
            current_downstream_frame(4,end) = current_downstream_frame(4,end-1) + Q_OLT(2,1)/downlink_dr;
        end
        %Έλεγχος για το σε ποια ONU απευθύνεται. Εξομάλισμα, μέσω του τρέχοντος downstream πλαισίου:
        fd(1,Q_OLT(4,1))=1;
        %Αλλαγική του πακέτου από τον πίνακα Q_OLT:
        Q_OLT(:,1)=[];
        Q_OLT_size=size(Q_OLT);
    else
        flagl=false;
    end
end
end

```

Εικόνα 6.15: Γεγονός 3 – Σχηματισμός αφέλιμου φορτίου του downstream πλαισίου.

```

%Κάθε φορά που το Bwmap, προχωράει στη δημιουργία γεγονότων αρχής λήψης της κεφαλίδας του downstream πλαισίου που στέλνεται το OLT,
%από τις αντίστοιχες ONUs. Επίσης, δημιουργούμε γεγονότα αρχής αποστολής ριπής από την κάθε ONU, έτσι άμα έχει οριστεί από τον Bwmap:
for ONU_id=1:N
    %Δημιουργούμε ένα γεγονός τύπου 3, ετ'ολοκληρώσει λήψη κεφαλίδας τρέχοντος downstream πλαισίου
    s=size(Event_List); %από κάθε ONU, στο χρόνο που επρόκειτο να λάβει την κεφαλίδα η κάθε ONU.
    Event_List(1,s(2)+1)=5;
    Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Header_of_frame/downlink_dr + RTT_half(2,ONU_id))*(10^6))/(10^6);
    Event_List(3,s(2)+1)=ONU_id; %Βάζουμε το id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός.
    Event_List(4,s(2)+1)=fd(1,ONU_id); %Σημείο που δείχνει αν υπάρχει downstream κίνηση προς την αντίστοιχη ONU.
    Event_List(5,s(2)+1)=0;
    %Δημιουργούμε ένα γεγονός τύπου 3 για αρχή αποστολής ριπής από την αντίστοιχη ONU, στο
    s=size(Event_List); %χρόνο που επρόκειτο να αρχίσει να μεταδίδει ριπή η αντίστοιχη ONU.
    Event_List(1,s(2)+1)=8;
    Event_List(2,s(2)+1)=round(Bwmap(ONU_id,2)*(10^6))/(10^6);
    Event_List(3,s(2)+1)=ONU_id; %Βάζουμε το id της ONU στην οποία απευθύνεται το γεγονός.
    Event_List(4,s(2)+1)=Bwmap(ONU_id,3); %Βάζουμε το πόσα bytes ανατίθεται στην ONU προς αποστολή.
    Event_List(5,s(2)+1)=0;
    %Αρχικοποίηση του πεδίου Bwmap για αυτές τις ONUs:
    Bwmap(ONU_id,2)=-1;
    Bwmap(ONU_id,3)=0;
    %Αρχικοποίηση σημαίας για κατερίσμενη κίνηση προς την αντίστοιχη ONU:
    fd(1,ONU_id)=0;
end

```

Εικόνα 6.16: Γεγονός 3 – Δημιουργία γεγονότων λήψης κεφαλίδας του τρέχοντος downstream πλαισίου από τις ONUs και γεγονότων αρχής αποστολής ριπής από αυτές.

Στη συνέχεια εκτέλεσης του γεγονότος 3 δημιουργείται το ωφέλιμο φορτίο του πλαισίου αυτού (Εικόνα 6.15), δηλαδή επιλέγονται τα πακέτα που θα μεταδοθούν μέσω του πλαισίου αυτού από το OLT προς τις αντίστοιχες ONUs, καθώς και γεγονότα ολοκληρωτικής μετάδοσης/αποχώρησης των πακέτων αυτών από την ουρά του OLT (Εικόνα 6.17). Το γεγονός 3 καλεί τον εαυτό του κάθε 125 μsec, για να προχωρήσει το OLT στη δημιουργία του επόμενου downstream πλαισίου.

```

%Δημιουργία γεγονότων ολοκληρωτικής αποστολής/μετάδοσης πακέτων από την ουρά του OLT προς τις αντίστοιχες ONUs:
cdf_size=size(current_downstream_frame);
if cdf_size(2)>0 %Αν το πλαίσιο περιέχει πακέτα δεδομένων:
    for i=1:cdf_size(2) %Εξ'ολοκλήρου μετάδοση των πακέτων αυτών:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=4;
        Event_List(2,s(2)+1)=round(current_downstream_frame(4,i)*(10^6))/(10^6); %Χρόνος ολικής μετάδοσης πακέτου από το OLT.
        Event_List(3,s(2)+1)=current_downstream_frame(1,1); %ID της ONU στην οποία απευθύνεται το πακέτο.
        Event_List(4,s(2)+1)=current_downstream_frame(2,1); %Μέγεθος αποσταλμένου πακέτου.
        Event_List(5,s(2)+1)=current_downstream_frame(3,1); %Χρόνος άφιξης στην ουρά του OLT.
    end
end

%Επανάληψη κάθε 125 μsec για δημιουργία του επόμενου downstream πλαισίου:
s=size(Event_List);
Event_List(1,s(2)+1)=3;
Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + 125)*(10^6))/(10^6);
Event_List(3,s(2)+1)=0;
Event_List(4,s(2)+1)=0;
Event_List(5,s(2)+1)=0;

```

Εικόνα 6.17: Γεγονός 3 – Δημιουργία γεγονότων ολοκληρωτικής αποχώρησης των πακέτων που μπήκαν στο τρέχον πλαίσιο για να σταλούν στις ONUs, από την ουρά του OLT.

```

%Γεγονός 4a - Χρονική στιγμή ολικής αποχώρησης/μετάδοσης ενός πακέτου από την ουρά του OLT.
elseif event==4
    Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου

    %Δημιουργία γεγονότος άφιξης πακέτου στην αντίστοιχη ONU:
    s=size(Event_List);
    Event_List(1,s(2)+1)=7;
    Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + RTT_half(2,Event_List(3,1)))*(10^6))/(10^6);
    Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1); %ONU_ID
    Event_List(4,s(2)+1)=Event_List(4,1); %Packet size
    Event_List(5,s(2)+1)=Event_List(5,1); %Created time

    %Διαγραφή του πακέτου από την ουρά του OLT:
    current_downstream_frame(:,1)=[];

```

Εικόνα 6.18: Γεγονός 4 – Ολοκληρωτική αποχώρηση πακέτων από την ουρά του OLT.

Το γεγονός 4 αναφέρεται στη χρονική στιγμή ολικής μετάδοσης/αποχώρησης ενός πακέτου από την ουρά του OLT και στη δημιουργία γεγονότος ολοκληρωτικής λήψης αυτού του πακέτου από την αντίστοιχη ONU στην οποία αναφέρεται (Εικόνα 6.18).

Στο γεγονός 5 γίνεται αρχικά ο έλεγχος ύπαρξης upstream και downstream κίνησης σε μια ONU (Εικόνα 6.19) και στη συνέχεια γίνεται ο έλεγχος για το αν πρόκειται να τελειώσει ο υπολογισμός μιας βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen, ή αντίστοιχα σε κατάσταση Asleep για αυτή την ONU. Οι Εικόνες 6.20 και 6.21 αναφέρονται στο σχήμα Learning Automata, ενώ οι Εικόνες 6.22 και 6.23 αναφέρονται στο σχήμα 4R-STAR.

```

%Έλεγχος για τυχόν ολοκλήρωση υπολογισμού βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen ή Asleep;
if (flag_upstream(1,Event_List(3,1))==1)&&(flag_listen(1,Event_List(3,1))==1) %Ολοκλήρωση υπολογισμού βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση LISTEN;
    flag_listen(1,Event_List(3,1))=0;
    tempi=[]; tempi = find(T_ideal_listen(Event_List(3,1),:)==-1,1); st=size(tempi); if st(2)==0, tempi=(ntdv+1); end
    T_ideal_listen(Event_List(3,1),tempi)=round((Time-Time_on_listen(1,Event_List(3,1)))*(10^6)/(10^6));
    a_listen(Event_List(3,1),tempi)=T_ideal_listen(Event_List(3,1),tempi)/125;
    if a_listen(Event_List(3,1),tempi)>actions,
        T_ideal_listen(Event_List(3,1),tempi)=actions*125; a_listen(Event_List(3,1),tempi)=actions;
    end
    %Υπολογισμός σφάλματος περιόδου ύπνου για κατάσταση Listen;
    error_rate_listen(Event_List(3,1),tempi)=(abs(a_listen(Event_List(3,1),tempi)-e_listen(Event_List(3,1),tempi)))/(actions-1);
    sum_error_rate_listen(1,Event_List(3,1))=sum_error_rate_listen(2,Event_List(3,1))+error_rate_listen(Event_List(3,1),tempi);
    mean_error_rate_listen(Event_List(3,1),tempi)=sum_error_rate_listen(1,Event_List(3,1))/tempi;
    Mean_model_error_listen = Mean_model_error_listen + error_rate_listen(Event_List(3,1),tempi);
    counter_error_values_listen = counter_error_values_listen + 1;

    if error_rate_listen(Event_List(3,1),tempi)<=very_good %Response = "very good".
        State_listen(1,Event_List(3,1))=D;
    elseif error_rate_listen(Event_List(3,1),tempi)<=good %Response = "good".
        if (State_listen(1,Event_List(3,1))==D)
            State_listen(1,Event_List(3,1))=D;
        else
            State_listen(1,Event_List(3,1))=State_listen(1,Event_List(3,1))+1;
        end
    elseif error_rate_listen(Event_List(3,1),tempi)<=bad %Response = "bad".
        if (State_listen(1,Event_List(3,1))==0)
            State_listen(1,Event_List(3,1))=0;
        else
            State_listen(1,Event_List(3,1))=State_listen(1,Event_List(3,1))-1;
        end
    else %Response = "very bad".
        State_listen(1,Event_List(3,1)) = 0;
    end %Την ετήγχο μεταβάσης κατάστασης στο μοντέλο 4R-STAR.
end

```

Εικόνα 6.22: Γεγονός 5 – Ολοκλήρωση υπολογισμού βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen, για το σχήμα 4R-STAR.

```

%Ολοκλήρωση υπολογισμού βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση ASLEEP;
elseif ((flag_downstream(1,Event_List(3,1))==1)||((flag_upstream(1,Event_List(3,1))==1)&&(flag_asleep(1,Event_List(3,1))==1)
    flag_asleep(1,Event_List(3,1))=0;
    tempi=[]; tempi = find(T_ideal_asleep(Event_List(3,1),:)==-1,1); st=size(tempi); if st(2)==0, tempi=(ntdv+1); end
    T_ideal_asleep(Event_List(3,1),tempi)=round((Time-Time_on_asleep(1,Event_List(3,1)))*(10^6)/(10^6));
    a_asleep(Event_List(3,1),tempi)=T_ideal_asleep(Event_List(3,1),tempi)/125;
    if a_asleep(Event_List(3,1),tempi)>actions,
        T_ideal_asleep(Event_List(3,1),tempi)=actions*125; a_asleep(Event_List(3,1),tempi)=actions;
    end
    %Υπολογισμός σφάλματος περιόδου ύπνου για κατάσταση Asleep;
    error_rate_asleep(Event_List(3,1),tempi)=(abs(a_asleep(Event_List(3,1),tempi)-e_asleep(Event_List(3,1),tempi)))/(actions-1);
    sum_error_rate_asleep(1,Event_List(3,1))=sum_error_rate_asleep(1,Event_List(3,1))+error_rate_asleep(Event_List(3,1),tempi);
    mean_error_rate_asleep(Event_List(3,1),tempi)=sum_error_rate_asleep(1,Event_List(3,1))/tempi;
    Mean_model_error_asleep = Mean_model_error_asleep + error_rate_asleep(Event_List(3,1),tempi);
    counter_error_values_asleep = counter_error_values_asleep + 1;

    if error_rate_asleep(Event_List(3,1),tempi)<=very_good %Response = "very good".
        State_asleep(1,Event_List(3,1))=D;
    elseif error_rate_asleep(Event_List(3,1),tempi)<=good %Response = "good".
        if (State_asleep(1,Event_List(3,1))==D)
            State_asleep(1,Event_List(3,1))=D;
        else
            State_asleep(1,Event_List(3,1))=State_asleep(1,Event_List(3,1))+1;
        end
    elseif error_rate_asleep(Event_List(3,1),tempi)<=bad %Response = "bad".
        if (State_asleep(1,Event_List(3,1))==0)
            State_asleep(1,Event_List(3,1))=0;
        else
            State_asleep(1,Event_List(3,1))=State_asleep(1,Event_List(3,1))-1;
        end
    else %Response = "very bad".
        State_asleep(1,Event_List(3,1))=0;
    end %Την ετήγχο μεταβάσης κατάστασης στο μοντέλο 4R-STAR.
end

```

Εικόνα 6.23: Γεγονός 5 – Ολοκλήρωση υπολογισμού βέλτιστης περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep, για το σχήμα 4R-STAR.

Στο γεγονός 6, ανάλογα με την ύπαρξη ή την απουσία upstream ή/και downstream κίνησης σε μια ΟΝΥ, γίνεται η απόφαση για το σε ποια κατάσταση του μοντέλου διαχείρισης της ενέργειας θα μεταβεί στη συνέχεια η ΟΝΥ, από τη τρέχουσα κατάσταση στην οποία βρισκόταν (Εικόνες 6.24-6.34).

```

%Γεγονός 6 - Έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί η αντίστοιχη ONU για την επόμενη περίοδο.
elseif event==6
    Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου

    %Έλεγχος μετάβασης κατάστασης της ONU για το μοντέλο εξοικονόμησης ενέργειας:
    if current_state(1,Event_List(3,1))==0 %Άλλος τρέχουσας κατάστασης Initial ActiveHeld:
        %Αύξηση χρόνου παραμονής σε κατάσταση Initial ActiveHeld:
        Initial_ActiveHeld_time(1,Event_List(3,1)) = Initial_ActiveHeld_time(1,Event_List(3,1)) + Thold_init(1,Event_List(3,1));
        current_state(1,Event_List(3,1))=2; %Μετάβαση σε κατάσταση ActiveFree.
        Time_on_ActiveFree(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);
        %Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=6;
        Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Tfree)*(10^6))/(10^6);
        Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
        Event_List(4,s(2)+1)=0;
        Event_List(5,s(2)+1)=0;

```

Εικόνα 6.24: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση Initial ActiveHeld σε κατάσταση ActiveFree.

```

elseif current_state(1,Event_List(3,1))==1 %Άλλος τρέχουσας κατάστασης ActiveHeld:
    %Αύξηση χρόνου παραμονής σε κατάσταση ActiveHeld:
    ActiveHeld_time(1,Event_List(3,1)) = ActiveHeld_time(1,Event_List(3,1)) + Thold;
    current_state(1,Event_List(3,1))=2; %Μετάβαση σε κατάσταση ActiveFree.
    Time_on_ActiveFree(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);
    %Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
    s=size(Event_List);
    Event_List(1,s(2)+1)=6;
    Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Tfree)*(10^6))/(10^6);
    Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
    Event_List(4,s(2)+1)=0;
    Event_List(5,s(2)+1)=0;

```

Εικόνα 6.25: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση ActiveHeld σε κατάσταση ActiveFree.

```

elseif current_state(1,Event_List(3,1))==2 %Άλλος τρέχουσας κατάστασης ActiveFree:
    %Αύξηση χρόνου παραμονής σε κατάσταση ActiveFree:
    ActiveFree_time(1,Event_List(3,1)) = ActiveFree_time(1,Event_List(3,1)) + Tfree;
    %Αν υπάρχει downstream και όχι upstream κίνηση:
    if (flag_downstream(1,Event_List(3,1))==1 && (flag_upstream(1,Event_List(3,1))==0)
        current_state(1,Event_List(3,1))=3; %Μετάβαση σε κατάσταση DozeAware.
        Time_on_DozeAware(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);
        %Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=6;
        Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Taware)*(10^6))/(10^6);
        Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
        Event_List(4,s(2)+1)=0;
        Event_List(5,s(2)+1)=0;
    %Αν δεν υπάρχει ούτε downstream ούτε upstream κίνηση:
    elseif (flag_downstream(1,Event_List(3,1))==0 && (flag_upstream(1,Event_List(3,1))==0)
        current_state(1,Event_List(3,1))=4; %Μετάβαση σε κατάσταση SleepAware.
        Time_on_SleepAware(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);
        %Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=6;
        Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Taware)*(10^6))/(10^6);
        Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
        Event_List(4,s(2)+1)=0;
        Event_List(5,s(2)+1)=0;
    else %Αν υπάρχει γενικό upstream κίνηση:
        current_state(1,Event_List(3,1))=1; %Μετάβαση σε κατάσταση ActiveHeld.
        Time_on_ActiveHeld(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);
        %Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=6;
        Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Thold)*(10^6))/(10^6);
        Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
        Event_List(4,s(2)+1)=0;
        Event_List(5,s(2)+1)=0;
    end

```

Εικόνα 6.26: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση ActiveFree σε κατάσταση ActiveHeld, DozeAware ή SleepAware, αναλόγως.

```

elseif current_state(1,Event_List(3,1))==3 %Γέλος τρέχουσας κατάστασης DozeAware:
%Αόληση χρόνου παραμονής σε κατάσταση DozeAware:
DozeAware_time(1,Event_List(3,1)) = DozeAware_time(1,Event_List(3,1)) + Taware:

if (flag_upstream(1,Event_List(3,1))==0) %Αν δεν υπάρχει upstream κίνηση:
current_state(1,Event_List(3,1))=5: %Μετάβαση σε κατάσταση Listen.
Time_on_Listen(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6):

%Έλεγχος αν θα παύσει να παίζει: ο υπολογισμός μιας νέας τιμής ιδανικής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen:
if (flag_Listen(1,Event_List(3,1))==0)
%Αρχή υπολογισμού μιας νέας ιδανικής τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen:
flag_Listen(1,Event_List(3,1))=1: Time_on_Listen(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6):

%Αν έχει αναληφθεί ο υπολογισμός W τιμών ιδανικών περιόδων ύπνου σε κατάσταση Listen:
if a_Listen(Event_List(3,1),W)==(-1)
%Υπολογισμός μιας νέας εκτιμώμενης τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen:
s=0: column_of_P = 1: Random_estimation = rand:
while (Random_estimation>=i(column_of_P<=actions))
s = s + Flisten(Event_List(3,1),column_of_P):
estimate_value = column_of_P:
column_of_P = column_of_P + 1:
end
%Αναμέτρηση περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen:
Tsleep_Listen(1,Event_List(3,1))=estimate_value*125:
%Αποθήκευση αυτής της εκτιμώμενης τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen:
templ=[]: templ = find(T_estimate_Listen(Event_List(3,1),:)==-1,1): st=size(templ):if st(2)==0,templ=(stdv+1);end
T_estimate_Listen(Event_List(3,1),templ) = Tsleep_Listen(1,Event_List(3,1)):
e_Listen(Event_List(3,1),templ) = estimate_value:
end
else %Άλλωθ, η ONU μπαίνει σε κατάσταση Listen για 125 msec:
Tsleep_Listen(1,Event_List(3,1))=125:
end

%Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
s=size(Event_List):
Event_List(1,s(2)+1)=6:
Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Tsleep_Listen(1,Event_List(3,1)))*(10^6))/(10^6):
Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1):
Event_List(4,s(2)+1)=0:
Event_List(5,s(2)+1)=0:

```

Εικόνα 6.27: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση DozeAware σε κατάσταση Listen, για το σχήμα Learning Automata.

```

elseif current_state(1,Event_List(3,1))==3 %Γέλος τρέχουσας κατάστασης DozeAware:
%Αόληση χρόνου παραμονής σε κατάσταση DozeAware:
DozeAware_time(1,Event_List(3,1)) = DozeAware_time(1,Event_List(3,1)) + Taware:

if (flag_upstream(1,Event_List(3,1))==0) %Αν δεν υπάρχει upstream κίνηση:
current_state(1,Event_List(3,1))=5: %Μετάβαση σε κατάσταση Listen.
Time_on_Listen(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6):

%Έλεγχος αν θα παύσει να παίζει: ο υπολογισμός μιας νέας τιμής ιδανικής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen:
if (flag_Listen(1,Event_List(3,1))==0)
%Αρχή υπολογισμού μιας νέας ιδανικής τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen:
flag_Listen(1,Event_List(3,1))=1: Time_on_Listen(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6):
%Μόνο στην κατάσταση (0,0) γίνεται εύρεση νέας τιμής περιόδου ύπνου. Είτε κατάσταση
% (i,1) και (i,2), με i=[1,...,actions], χρησιμοποιείται η τρέχουσα τιμή περιόδου 1.
if State_Listen(1,Event_List(3,1))==0
s=0: column_of_P = 1: Random_estimation = rand:
while (Random_estimation>=i(column_of_P<=actions))
s = s + Probabilities(1,column_of_P):
estimate_value = column_of_P:
column_of_P = column_of_P + 1:
end
selected_period_Listen(1,Event_List(3,1)) = estimate_value:
end
%Αναμέτρηση περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen:
Tsleep_Listen(1,Event_List(3,1))=selected_period_Listen(1,Event_List(3,1))*125:
%Αποθήκευση αυτής της εκτιμώμενης τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Listen:
templ=[]: templ = find(T_estimate_Listen(Event_List(3,1),:)==-1,1): st=size(templ):if st(2)==0,templ=(stdv+1);end
T_estimate_Listen(Event_List(3,1),templ) = Tsleep_Listen(1,Event_List(3,1)):
e_Listen(Event_List(3,1),templ) = selected_period_Listen(1,Event_List(3,1)):
else %Άλλωθ, η ONU μπαίνει σε κατάσταση Listen για 125 msec:
Tsleep_Listen(1,Event_List(3,1))=125:
end

%Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
s=size(Event_List):
Event_List(1,s(2)+1)=6:
Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Tsleep_Listen(1,Event_List(3,1)))*(10^6))/(10^6):
Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1):
Event_List(4,s(2)+1)=0:
Event_List(5,s(2)+1)=0:

```

Εικόνα 6.28: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση DozeAware σε κατάσταση Listen, για το σχήμα 4R-STAR.

```

else %Αν υπάρχει upstream κίνηση:
    current_state(1,Event_List(3,1))=1; %Μετάβαση σε κατάσταση ActiveHeld.
    Time_on_ActiveHeld(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);
    %Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
    s=size(Event_List);
    Event_List(1,s(2)+1)=6;
    Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Thold)*(10^6))/(10^6);
    Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
    Event_List(4,s(2)+1)=0;
    Event_List(5,s(2)+1)=0;
end

```

Εικόνα 6.29: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση DozeAware σε κατάσταση ActiveHeld.

```

elseif current_state(1,Event_List(3,1))==4 %Γίος τρέχουσας κατάστασης SleepAware:
    %Αύξηση χρόνου παραμονής σε κατάσταση SleepAware:
    SleepAware_time(1,Event_List(3,1)) = SleepAware_time(1,Event_List(3,1)) + Taware;

    %Αν δεν υπάρχει ούτε downstream ούτε upstream κίνηση:
    if (flag_downstream(1,Event_List(3,1))==0)&&(flag_upstream(1,Event_List(3,1))==0)
        current_state(1,Event_List(3,1))=6; %Μετάβαση σε κατάσταση Asleep.
        Time_on_Asleap(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);

        %Έλεγχος αν θα πρέπει να αρχίσει ο υπολογισμός μιας νέας τιμής ιδανικής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep:
        if flag_Asleap(1,Event_List(3,1))==0
            %Αρχή υπολογισμού μιας νέας ιδανικής τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep:
            flag_Asleap(1,Event_List(3,1))=1; Time_on_Asleap1(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);

            %Αν έχει συμπληρωθεί ο υπολογισμός W τιμών ιδανικών περιόδων ύπνου σε κατάσταση Asleep:
            if a_Asleap(Event_List(3,1))==(1)
                %Υπολογισμός μιας νέας εκτιμώμενης τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep:
                s=0; column_of_P = 1; Random_estimation = rand;
                while (Random_estimation>s)&&(column_of_P<=actions)
                    s = s + Fasleep(Event_List(3,1),column_of_P);
                    estimate_value = column_of_P;
                    column_of_P = column_of_P + 1;
                end
                %Αντίθεση περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep:
                Tsleep_Asleap(1,Event_List(3,1))=estimate_value*125;
                %Αποθήκευση αυτής της εκτιμώμενης τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep:
                tempi=[]; tempi = find(T_estimate_Asleap(Event_List(3,1),:)==-1,1); st=size(tempi);if st(2)==0,tempi=(mtdv+1);end
                T_estimate_Asleap(Event_List(3,1),tempi) = Tsleep_Asleap(1,Event_List(3,1));
                e_Asleap(Event_List(3,1),tempi) = estimate_value;
            end
        else %Αλλιώς, η ONU μπαίνει σε κατάσταση Asleep για 125 msec:
            Tsleep_Asleap(1,Event_List(3,1))=125;
        end

        %Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=6;
        Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Tsleep_Asleap(1,Event_List(3,1)))*(10^6))/(10^6);
        Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
        Event_List(4,s(2)+1)=0;
        Event_List(5,s(2)+1)=0;
    end

```

Εικόνα 6.30: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση SleepAware σε κατάσταση Asleep, για το σχήμα Learning Automata.

```

elseif current_state(1,Event_List(3,1))==4 %Τέλος τρέχουσας κατάστασης SleepAware:
%Αύξηση χρόνου παραμονής σε κατάσταση SleepAware:
SleepAware_time(1,Event_List(3,1)) = SleepAware_time(1,Event_List(3,1)) + Taware;

%Αν δεν υπάρχει ούτε downstream ούτε upstream κίνηση:
if (flag_downstream(1,Event_List(3,1))==0 && flag_upstream(1,Event_List(3,1))==0)
current_state(1,Event_List(3,1))=6; %Μετάβαση σε κατάσταση Asleep.
Time_on_Asleep(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);

%Έλεγχος αν θα πρέπει να αρχίσει ο υπολογισμός μιας νέας τιμής (δανικής) περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep:
if (flag_Asleep(1,Event_List(3,1))==0)
%Αρχή υπολογισμού μιας νέας (δανικής) τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep:
flag_Asleep(1,Event_List(3,1))=1; Time_on_Asleep(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);

%Μόνο στην κατάσταση (0,0) γίνεται εύρεση νέας τιμής περιόδου ύπνου. Στις καταστάσεις
%(1,1) και (1,2) με i=[1,...,actions], χρησιμοποιείται η τρέχουσα τιμή περιόδου i.
if State_Asleep(1,Event_List(3,1))==0
s=0; column_of_P = 1; Random_estimation = rand;
while (Random_estimation>s) && (column_of_P<actions)
s = s + Probabilities(1,column_of_P);
estimate_value = column_of_P;
column_of_P = column_of_P + 1;
end
selected_period_Asleep(1,Event_List(3,1)) = estimate_value;
end
%Ανανέωση περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep:
Tsleep_Asleep(1,Event_List(3,1))=selected_period_Asleep(1,Event_List(3,1))*125;
%Αποθήκευση αυτής της εκτιμώμενης τιμής περιόδου ύπνου σε κατάσταση Asleep:
tempi=[]; tempi = find(T_estimate_Asleep(Event_List(3,1),:)==-1,1); st=size(tempi);if st(2)==0,tempi=(mtdv+1);end
T_estimate_Asleep(Event_List(3,1),tempi) = Tsleep_Asleep(1,Event_List(3,1));
s_Asleep(Event_List(3,1),tempi) = selected_period_Asleep(1,Event_List(3,1));
else %Αλλιώς, η ONU μπαίνει σε κατάσταση Asleep για 125 msec:
Tsleep_Asleep(1,Event_List(3,1))=125;
end

%Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
s=size(Event_List);
Event_List(1,s(2)+1)=6;
Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Tsleep_Asleep(1,Event_List(3,1)))*(10^6))/(10^6);
Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
Event_List(4,s(2)+1)=0;
Event_List(5,s(2)+1)=0;
end

```

Εικόνα 6.31: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση SleepAware σε κατάσταση Asleep, για το σχήμα 4R-STAR.

```

else %Αν υπάρχει γενικά είτε downstream είτε upstream κίνηση:
current_state(1,Event_List(3,1))=1; %Μετάβαση σε κατάσταση ActiveHeld.
Time_on_ActiveHeld(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);
%Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
s=size(Event_List);
Event_List(1,s(2)+1)=6;
Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Thold)*(10^6))/(10^6);
Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
Event_List(4,s(2)+1)=0;
Event_List(5,s(2)+1)=0;
end

```

Εικόνα 6.32: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση SleepAware σε κατάσταση ActiveHeld.

```

elseif current_state(1,Event_List(3,1))==5 %Τέλος τρέχουσας κατάστασης Listen:
%Αύξηση χρόνου παραμονής σε κατάσταση Listen:
Listen_time(1,Event_List(3,1)) = Listen_time(1,Event_List(3,1)) + Tsleep_Listen(1,Event_List(3,1));
current_state(1,Event_List(3,1))=3; %Μετάβαση σε κατάσταση DozeAware.
Time_on_DozeAware(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);
%Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
s=size(Event_List);
Event_List(1,s(2)+1)=6;
Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Taware)*(10^6))/(10^6);
Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
Event_List(4,s(2)+1)=0;
Event_List(5,s(2)+1)=0;
end

```

Εικόνα 6.33: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση Listen σε κατάσταση DozeAware.


```

elseif current_state(1,Event_List(3,1))==6 %Τέλος τρέχουσας κατάστασης Asleep:
%Λήψη χρόνου παραμονής σε κατάσταση Asleep:
Asleep_time(1,Event_List(3,1)) = Asleep_time(1,Event_List(3,1)) + Tsleep_Asleep(1,Event_List(3,1));
current_state(1,Event_List(3,1))=4; %Μετάβαση σε κατάσταση SleepAware.
Time_on_SleepAware(1,Event_List(3,1))=round(Time*(10^6))/(10^6);
%Ελέγχουμε αν υπάρχουν downstream πακέτα που ήρθαν από το OLT αλλά δε λήφθηκαν
%ακόμα από την αντίστοιχη ONU, επειδή βρισκόταν σε κατάσταση Asleep:
w=1; %Έχουμε επιτυχημένη λήψη πακέτων από την ONU:
while (waiting_Q_ONU(Event_List(3,1),w)~=0)
total_delay_down = total_delay_down + Time - waiting_Q_ONU_ct(Event_List(3,1),w);
sent_packets_down = sent_packets_down + 1;
sent_bytes_down = sent_bytes_down + waiting_Q_ONU(Event_List(3,1),w);
waiting_Q_ONU(Event_List(3,1),w)=0;
waiting_Q_ONU_ct(Event_List(3,1),w)=0;
w=w+1;
end
%Για να συνεχιστεί ο έλεγχος για το σε ποια κατάσταση θα μεταβεί στη συνέχεια η ONU:
s=size(Event_List);
Event_List(1,s(2)+1)=6;
Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Taware)*(10^6))/(10^6);
Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
Event_List(4,s(2)+1)=0;
Event_List(5,s(2)+1)=0;
end

```

Εικόνα 6.34: Γεγονός 6 – Μετάβαση της ONU από κατάσταση Asleep σε κατάσταση SleepAware.

Το γεγονός 7 αναφέρεται στην ολοκληρωτική λήψη ενός πακέτου που στέλνει το OLT, από την ONU στην οποία αναφέρεται αυτό το πακέτο (Εικόνα 6.35).

```

%Γεγονός 7ο - Λήψη πακέτου (που στέλνει το OLT) από κάποια ONU, στην οποία απευθύνεται.
elseif event==7
Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου

%Αν η ONU στην οποία στέλνει (downstream) πακέτο το OLT βρίσκεται σε κατάσταση Asleep:
if current_state(1,Event_List(3,1))==6
%Βρίσκουμε κενή θέση στον πίνακα waiting_Q_ONU για το πακέτο:
temp0=[]; temp0 = find(waiting_Q_ONU(Event_List(3,1),:)==0,1);
%Προσθέτουμε το μέγεθος του πακέτου στον πίνακα waiting_Q_ONU και
%αντίστοιχα τη χρονική στιγμή που είχε φτάσει στην ουρά του OLT:
waiting_Q_ONU(Event_List(3,1),temp0) = Event_List(4,1);
waiting_Q_ONU_ct(Event_List(3,1),temp0) = Event_List(5,1);
else %Άλλως έχουμε επιτυχημένη παραλαβή πακέτου από την αντίστοιχη ONU:
total_delay_down = total_delay_down + Time - Event_List(5,1);
sent_packets_down = sent_packets_down + 1;
sent_bytes_down = sent_bytes_down + Event_List(4,1);
end

```

Εικόνα 6.35: Γεγονός 7 – Λήψη πακέτου (που στέλνει το OLT) από μια ONU.

Στο γεγονός 8 έχουμε το σχηματισμό των upstream ριπών που στέλνουν οι ONUs στο OLT. Αρχικά, γίνεται η δημιουργία του πεδίου BufOcc της κεφαλίδας της ριπής, καθώς και η δημιουργία γεγονότων άφιξης της κεφαλίδας αυτής της ριπής από το OLT (Εικόνα 6.36). Στη συνέχεια εκτέλεσης του γεγονότος 8 δημιουργείται το ωφέλιμο φορτίο της ριπής αυτής, δηλαδή επιλέγονται τα πακέτα που θα μεταδοθούν μέσω της ριπής αυτής, από την αντίστοιχη ONU προς το OLT, καθώς και γεγονότα ολοκληρωτικής μετάδοσης/αποχώρησης των πακέτων αυτών από την ουρά της ONU (Εικόνα 6.37).

```

%Γεγονός 8 - Αποστολή ριπής από κάποια ONU.
elseif event==8
    Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανώνυμος του χρόνου

    %Μόνο αν η ONU δε βρίσκεται σε κατάσταση Listen ή Asleep θα στείλει ριπή, αφού λάβει πρώτα την κεφαλίδα ενός downstream πλαισίου:
    if (current_state(1,Event_List(3,1))~=3)&&(current_state(1,Event_List(3,1))~=6)
        flag2=true; %Ελέγχεται αν υπάρχουν πακέτα (bytes) τα οποία πρέπει να δηλωθούν από την ONU στο OLT:
        while (Q_ONU(Event_List(3,1),1)~=0)&&(flag2==true) %Όσο βρίσκεται πακέτα στην ουρά της ONU:
            %Αν δεν υποβιβάζουμε τον μέγιστο αριθμό bytes που μπορούμε να δηλώσουμε:
            if ((BufOcc(1,Event_List(3,1))+Q_ONU(Event_List(3,1),1))<=max_burst_payload)
                BufOcc(1,Event_List(3,1)) = BufOcc(1,Event_List(3,1)) + Q_ONU(Event_List(3,1),1);
                %Βρίσκουμε κενή θέση στη γραμμή του πίνακα stated_packets της ONU για το πακέτο:
                temp2=[]; temp2 = find(stated_packets(Event_List(3,1),:)==0,1);
                stated_packets(Event_List(3,1),temp2) = Q_ONU(Event_List(3,1),1);
                stated_created_time(Event_List(3,1),temp2) = Q_ONU_created_time(Event_List(3,1),1);
                for j=1:(max_Q_length-1) %Κάνουμε αλιόθηση προς τα αριστερά των πακέτων στην ουρά Q_ONU.
                    Q_ONU(Event_List(3,1),j)=Q_ONU(Event_List(3,1),j+1);
                    Q_ONU_created_time(Event_List(3,1),j)=Q_ONU_created_time(Event_List(3,1),j+1);
                end
                Q_ONU(Event_List(3,1),max_Q_length)=0;
                Q_ONU_created_time(Event_List(3,1),max_Q_length)=0;
            else %Αλλιώς:
                flag2=false;
            end
        end
        %Αποστολή κεφαλίδας τρέχουσας upstream ριπής στο OLT, με τη νέα τιμή BufOcc:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=10; %Αρμόζον(τα) γεγονότος λήψης κεφαλίδας από το OLT.
        Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Header_of_burst/uplink_dr + RTT_half(2,Event_List(3,1)))*(10^6))/(10^6);
        Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1);
        Event_List(4,s(2)+1)=BufOcc(1,Event_List(3,1));
        Event_List(5,s(2)+1)=0;
        BufOcc(1,Event_List(3,1))=0; %Αρχικοποίηση πάλι BufOcc για την αντίστοιχη ONU.
    end
end

```

Εικόνα 6.36: Γεγονός 8 – Δημιουργία πεδίου BufOcc της κεφαλίδας μιας upstream ριπής.

```

sending_times=[]; %Χρονική στιγμή εξ' ολοκλήρου αποχώρησης πακέτων από την ουρά της ONU.
assigned_bytes = Event_List(4,1); %Η ONU πληροφoρείται για το πόση bytes δεδομένων ανατίθενται σε αυτήν για αποστολή.
k=1; sum_transmission_bytes = 0; %Το δηλωμένο ανατεθέντα bytes αρχίζουν να μεταδίδονται:
while (stated_packets(Event_List(3,1),k)~=0)&&(sum_transmission_bytes<assigned_bytes)
    if k==1 %Για το πρώτο πακέτο στη σειρά μέσω στη ριπή έχουμε:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=9; %Δημιουργία γεγονότος εξ' ολοκλήρου μετάδοσης πακέτου από την ONU προς το OLT.
        Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + Header_of_burst/uplink_dr + stated_packets(Event_List(3,1),k)/uplink_dr)*(10^6))/(10^6);
        Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1); %ID της ONU από την οποία προέρχεται το πακέτο.
        Event_List(4,s(2)+1)=stated_packets(Event_List(3,1),k); %Μήνθος αποσταλμένου πακέτου.
        Event_List(5,s(2)+1)=stated_created_time(Event_List(3,1),k); %Χρόνος άφιξης στην ουρά της ONU.
        sending_times(1,k) = Time + Header_of_burst/uplink_dr + stated_packets(Event_List(3,1),k)/uplink_dr;
    else %Για το υπόλοιπα πακέτα μέσω στη ριπή έχουμε:
        s=size(Event_List);
        Event_List(1,s(2)+1)=9; %Δημιουργία γεγονότος εξ' ολοκλήρου μετάδοσης πακέτου από την ONU προς το OLT.
        Event_List(2,s(2)+1)=round((sending_times(1,k-1) + stated_packets(Event_List(3,1),k)/uplink_dr)*(10^6))/(10^6);
        Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1); %ID της ONU από την οποία προέρχεται το πακέτο.
        Event_List(4,s(2)+1)=stated_packets(Event_List(3,1),k); %Μήνθος αποσταλμένου πακέτου.
        Event_List(5,s(2)+1)=stated_created_time(Event_List(3,1),k); %Χρόνος άφιξης στην ουρά της ONU.
        sending_times(1,k) = sending_times(1,k-1) + stated_packets(Event_List(3,1),k)/uplink_dr;
    end
    sum_transmission_bytes = sum_transmission_bytes + stated_packets(Event_List(3,1),k);
    k=k+1;
end
end %Του ελέγχου για το αν είναι η ONU σε κατάσταση Listen ή Asleep.

```

Εικόνα 6.37: Γεγονός 8 – Δημιουργία γεγονότων εξ' ολοκλήρου αποχώρησης πακέτων από την ουρά της ONU.

Το γεγονός 9 αναφέρεται στη χρονική στιγμή ολικής μετάδοσης/αποχώρησης ενός πακέτου από την ουρά μιας ONU και στη δημιουργία γεγονότος ολοκληρωτικής λήψης αυτού του πακέτου από το OLT (Εικόνα 6.38).

Το γεγονός 10 αναφέρεται στην ολοκληρωτική λήψη της κεφαλίδας μιας upstream ριπής, που στέλνει μια ONU, από το OLT (Εικόνα 6.39), ενώ το γεγονός 11 στην ολοκληρωτική λήψη ενός πακέτου, που στέλνει μια ONU, από το OLT (Εικόνα 6.40). Το γεγονός (-1) σηματοδοτεί το τερματισμό της προσομοίωσης (Εικόνα 6.41).

```

%Γεγονός 9ο - Εξ' ολοκλήρου αποχώρηση/μετάδοση ενός πακέτου από την ουρά μιας ONU.
elseif event==9
    Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου

    %Δημιουργία γεγονότος λήψης του πακέτου από το OLT:
    s=size(Event_List);
    Event_List(1,s(2)+1)=11;
    Event_List(2,s(2)+1)=round((Time + RTT_half(2,Event_List(3,1)))*(10^6))/(10^6);
    Event_List(3,s(2)+1)=Event_List(3,1); %ID της ONU.
    Event_List(4,s(2)+1)=Event_List(4,1); %Μέγεθος πακέτου.
    Event_List(5,s(2)+1)=Event_List(5,1); %Χρόνος άφιξης πακέτου στην ουρά της ONU.
    %Διαγράφουμε το πακέτο από τον πίνακα stated_packets και έτσι δηλαδή γενικώς από την ουρά της ONU:
    for j=1:(max_Q_length-1) %Κάνουμε ολίσθηση προς τα αριστερά των πακέτων στον πίνακα stated_frames.
        stated_packets(Event_List(3,1),j)=stated_packets(Event_List(3,1),j+1);
        stated_created_time(Event_List(3,1),j)=stated_created_time(Event_List(3,1),j+1);
    end
    stated_packets(Event_List(3,1),max_Q_length)=0;
    stated_created_time(Event_List(3,1),max_Q_length)=0;

```

Εικόνα 6.38: Γεγονός 9 – Χρονική στιγμή εξ' ολοκλήρου αποχώρησης πακέτων από την ουρά της ONU και δημιουργία γεγονότων λήψης αυτών από το OLT.

```

%Γεγονός 10ο - Εξ' ολοκλήρου λήψη κεφαλίδας μιας upstream ριπής από το OLT (με τη νέα τιμή Buf000).
elseif event==10
    Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου

    %Ανανεώνουμε την τιμή των ανατεθέντων bytes του πύλου BMap για την
    %αντίστοιχη ONU, σύμφωνα με την τιμή του Buf000 που έχει δηλώσει αυτή η ONU:
    BMap(Event_List(3,1),3)=Event_List(4,1);

```

Εικόνα 6.39: Γεγονός 10 – Λήψη κεφαλίδας μιας upstream ριπής από το OLT.

```

%Γεγονός 11ο - Λήψη πακέτου από το OLT, σταλμένο από κάποια ONU.
elseif event==11
    Time=round(Event_List(2,1)*(10^6))/(10^6); %Ανανέωση του χρόνου

    %Επιτυχημένη παραλαβή πακέτου (που στέλνει κάποια ONU) από το OLT:
    total_delay_up = total_delay_up + Time - Event_List(5,1);
    sent_packets_up = sent_packets_up + 1;
    sent_bytes_up = sent_bytes_up + Event_List(4,1);

```

Εικόνα 6.40: Γεγονός 11 – Λήψη πακέτου από το OLT, το οποίο έστειλε μια ONU.

```

%Γεγονός (-1) - Τερματισμός προσομοίωσης.
elseif event==(-1)
    Time = Event_List(2,1); %Ανανέωση του χρόνου
    disp('Simulation End') %Εμφάνιση μηνύματος
    flag=false; %Για να τερματίσει το while της προσομοίωσης
    end %του if των events

    Event_List(:,1)=[]; %Διαγραφή του γεγονότος που μόλις συναίρει από τη λίστα γεγονότων.
    %Γίνεται σورتάρισμα του Event_List ως προς τον τύπο του γεγονότος
    %αρχικά και στη συνέχεια γίνεται σورتάρισμα ως προς το χρόνο:
    temp=[]; temp=sortrows(Event_List',1); Event_List=temp';
    temp=[]; temp=sortrows(Event_List',2); Event_List=temp';

end %του while της προσομοίωσης
%ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

```

Εικόνα 6.41: Γεγονός (-1) – Τερματισμός προσομοίωσης.

Με το που τελειώνει η προσομοίωση, παίρνονται οι τελευταίες μετρικές απόδοσης (ομοίως με το τρόπο που παίρνονται στο γεγονός 0) και γίνεται η εμφάνιση όλων των μετρικών που έχουν παρθεί σε μορφή πινάκων και γραφημάτων. Επιπλέον, ο υπολογισμός

του ποσοστού του συνολικού χρόνου που μια ONU βρισκόταν σε κατάσταση Listen και αντίστοιχα σε κατάσταση Asleep, φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 6.42.

```
%Υπολογισμός ποσοστίου χρόνου που η ONU βρίσκεται σε κατάσταση Listen και Asleep, αντίστοιχα:
av_Listen=[]; av_Asleep=[]; av_Listen(1,1:N)=0; av_Asleep(1,1:N)=0;
for ONU_id=1:N
    av_Listen(1,ONU_id)=(Listen_time(1,ONU_id) + extra_Listen_time(1,ONU_id))/ST;
    av_Asleep(1,ONU_id)=(Asleep_time(1,ONU_id) + extra_Asleep_time(1,ONU_id))/ST;
end
sum_av_Listen_time=sum(av_Listen); sum_av_Asleep_time=sum(av_Asleep);
Average_Listen_time=(sum_av_Listen_time*100)/N; % επί τις εκατό ποσοστό.
Average_Asleep_time=(sum_av_Asleep_time*100)/N; % επί τις εκατό ποσοστό.
```

Εικόνα 6.42: Υπολογισμός του ποσοστού του συνολικού χρόνου που μια ONU βρισκόταν σε κατάσταση Listen και αντίστοιχα σε κατάσταση Asleep.

Συνοψίζοντας, οι κύριες μετρήσεις που μπορούν να παρθούν στο τέλος της προσομοίωσης είναι οι εξής:

- Μέση καθυστέρηση των πακέτων στο upstream κανάλι δεδομένων (σε msec).
- Μέση καθυστέρηση των πακέτων στο downstream κανάλι δεδομένων (σε msec).
- Ρυθμαπόδοση στο upstream κανάλι δεδομένων (σε bps).
- Ρυθμαπόδοση στο downstream κανάλι δεδομένων (σε bps).
- Μέση καταναλισκόμενη ισχύς των ONUs (σε Watt).
- Ποσοστό συνολικού χρόνου που μια ONU βρισκόταν σε κατάσταση Listen.
- Ποσοστό συνολικού χρόνου που μια ONU βρισκόταν σε κατάσταση Asleep.
- Γενικό μέσο σφάλμα του χρησιμοποιούμενου σχήματος για τον καθορισμό των βέλτιστων περιόδων ύπνου σε κατάσταση Listen.
- Γενικό μέσο σφάλμα του χρησιμοποιούμενου σχήματος για τον καθορισμό των βέλτιστων περιόδων ύπνου σε κατάσταση Asleep.

6.4 Μετρήσεις απόδοσης και συγκριτικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα περιέχονται τα πειραματικά αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης, τα οποία είναι ενδεικτικά της απόδοσης των προτεινόμενων σχημάτων. Τα σχήματα αυτά (Learning Automata και 4R-STAR) εφαρμόστηκαν και αξιολογήθηκαν επάνω στον τυπικό μηχανισμό εξοικονόμησης για τα δίκτυα τύπου XG-PON, για τον καθορισμό των βέλτιστων περιόδων ύπνου των ONUs, τόσο σε κατάσταση Listen, όπου μια ONU απενεργοποιεί μόνο τον πομπό της, όσο και σε κατάσταση Asleep, όπου μια ONU απενεργοποιεί και πομπό και δέκτη. Εξετάζονται δύο βασικά σεναρία προσομοίωσης με βάση διαφορετικούς συνδυασμούς φόρτου κίνησης στα upstream και downstream κανάλια

δεδομένων του δικτύου. Γενικώς, οι αφίξεις πακέτων και στα δυο σενάρια, τόσο στην ουρά του OLT, όσο και στην ουρά της κάθε ONU, λαμβάνουν χώρα ανά σταθερό χρονικό διάστημα, δηλαδή το interarrival time μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων είναι σταθερό.

Στο πρώτο σενάριο το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων στο downstream παραμένει σταθερό σε μια μικρή τιμή, ενώ αντίστοιχα, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων στο upstream μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, κάθε ένα δέκατο του συνολικού χρόνου της προσομοίωσης. Σε αυτό το σενάριο γίνεται εξέταση ως προς την απόδοση των προτεινόμενων σχημάτων στο να βρίσκουν βέλτιστες περιόδους ύπνου σε κατάσταση Listen, καθώς και ως προς τη προσαρμογή αυτών, καθώς αλλάζει ο φόρτος κίνησης στο upstream, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στο δεύτερο σενάριο το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων τόσο στο downstream, όσο και στο upstream, μεταβάλλεται εξίσου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, κάθε ένα δέκατο του συνολικού χρόνου της προσομοίωσης. Σε αυτό το σενάριο γίνεται εξέταση ως προς την απόδοση των προτεινόμενων σχημάτων στο να βρίσκουν βέλτιστες περιόδους ύπνου σε κατάσταση Asleep, καθώς και ως προς τη προσαρμογή αυτών, καθώς αλλάζει ο φόρτος κίνησης τόσο στο downstream, όσο και στο upstream, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Η υιοθετηθείσα αρχιτεκτονική XG-PON για τα παραπάνω σενάρια αποτελείται από ένα OLT και μεταβαλλόμενο αριθμό ONUs. Η τοποθέτηση των ONUs γίνεται σε συγκεκριμένες αποστάσεις από 20 χιλιόμετρα έως 60 χιλιόμετρα μακριά από το OLT. Με βάση αυτές υπολογίζονται και οι χρόνοι μετ' επιστροφής (Round Trip Time) σε ένα εύρος από 133.333 ως 400 μsec . Ο ρυθμός μετάδοσης είναι 10Gbps για το ρεύμα καθόδου (downstream) και 2.5Gbps για το ρεύμα ανόδου (upstream). Οι ONUs και το OLT διαθέτουν μια μονάδα προσωρινής αποθήκευσης (buffer), για τη προσωρινή αποθήκευση της κίνησης που παράγεται. Κάθε buffer θεωρείται στα συγκεκριμένα σενάρια ότι έχει χωρητικότητα 10^6 bytes. Επίσης, θεωρούνται πακέτα Ethernet, δηλαδή μεγέθους μεταξύ 64 και 1518 bytes. Ακόμα, θεωρήθηκε για θέμα απλότητας ότι ένας μόνο χρήστης βρίσκεται συνδεδεμένος σε κάθε ONU. Ως προς τις περιόδους παραμονής της κάθε ONU στις καταστάσεις ActiveHeld, ActiveFree, DozeAware και SleepAware θεωρήθηκαν εδώ ίσες με 125 μsec , μόνιμα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το guard time (χρόνος φύλαξης) μεταξύ της αποστολής δυο διαδοχικών upstream ριπών έχει οριστεί στο 1 μsec .

Επιπλέον με τα παραπάνω, για όλες τις παρακάτω μετρήσεις (Σενάρια 1 και 2) λήφθηκαν υπόψη επίσης και τα εξής δεδομένα:

- Χρόνος προσομοίωσης (Simulation time) ίσος με 200 sec.
- Αριθμός ONUs στο δίκτυο ίσος με 5.

- Μέση κατανάλωση ισχύος της κάθε ONU στις καταστάσεις ActiveHeld και ActiveFree ίση με 4.69 Watt.
- Μέση κατανάλωση ισχύος της κάθε ONU στις καταστάσεις DozeAware και SleepAware ίση με 2.78 Watt.
- Μέση κατανάλωση ισχύος της κάθε ONU σε κατάσταση Listen ίση με 1.7 Watt.
- Μέση κατανάλωση ισχύος της κάθε ONU σε κατάσταση Asleep ίση με 0.9 Watt.
- Μεταβλητή L για το σχήμα Learning Automata ίση με 0.1
- Αριθμός καταστάσεων D για το σχήμα 4R-STAR ίσος με 5.

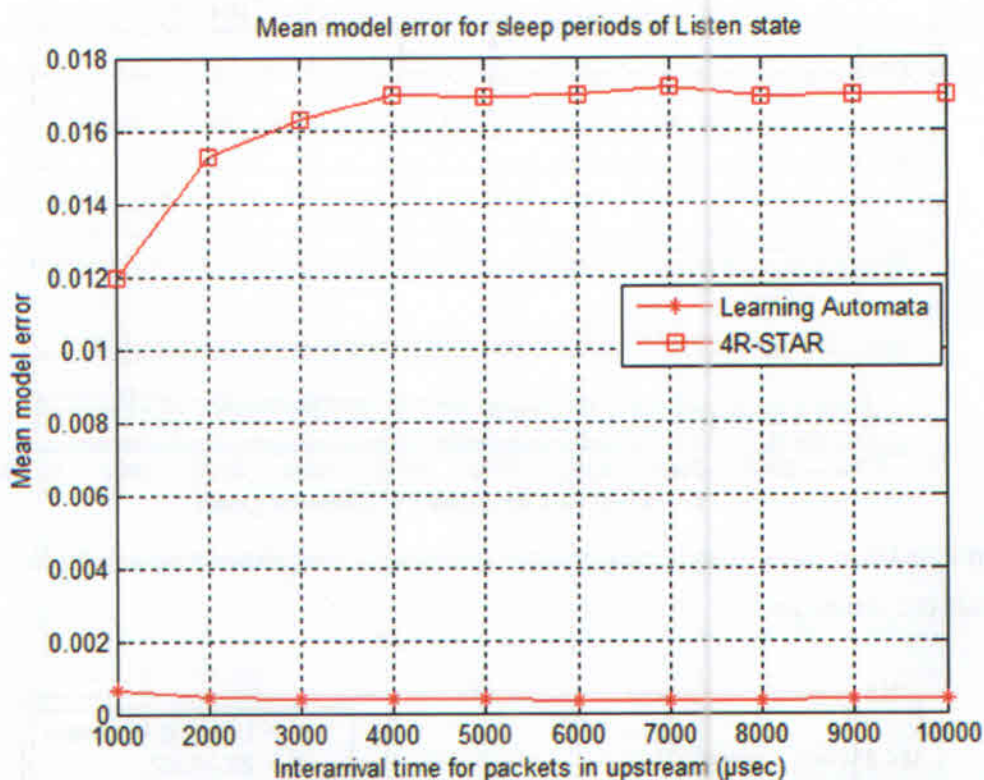
6.4.1 Πρώτο σενάριο – Μετρήσεις απόδοσης και συγκριτικά αποτελέσματα

Στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων (interarrival time) στο downstream, παραμένει σταθερό και ίσο με 100 msec. Δηλαδή, ανά 100 msec, σταθερά, έχουμε άφιξη πακέτου στην ουρά του OLT, για κάθε ONU ξεχωριστά. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων (interarrival time) στο upstream μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, κάθε ένα δέκατο του συνολικού χρόνου της προσομοίωσης, σύμφωνα με ένα σταθερό διάλυσμα $Interarrival_times_upstream = [1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000]$ msec. Για παράδειγμα, στην περίπτωση αυτή που ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης είναι 200 msec ισχύουν τα παρακάτω:

- Για τα πρώτα $200/10 = 20$ δευτερόλεπτα (0 sec - 20 sec), έχουμε άφιξη πακέτου στην ουρά κάθε διαφορετικής ONU ανά σταθερό χρονικό διάστημα ίσο με 1000 msec.
- Για τα επόμενα 20 δευτερόλεπτα (20 sec - 40 sec), έχουμε άφιξη πακέτου στην ουρά κάθε διαφορετικής ONU ανά σταθερό χρονικό διάστημα ίσο με 2000 msec.
- ⋮
- Για τα τελευταία 20 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης (180 sec - 200 sec), έχουμε άφιξη πακέτου στην ουρά κάθε διαφορετικής ONU ανά σταθερό χρονικό διάστημα ίσο με 10000 msec.

Τα παραπάνω δεδομένα (μεγάλη downstream κίνηση πακέτων σε συνδυασμό με μικρή upstream κίνηση πακέτων) έχουν ως αποτέλεσμα οι ONUs να μπαίνουν αποκλειστικά σε κατάσταση Listen και όχι σε κατάσταση Asleep. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η απόδοση των προτεινόμενων σχημάτων (Learning Automata και 4R-STAR) ως προς τον καθορισμό των βέλτιστων περιόδων ύπνου σε κατάσταση Listen. Οι μετρήσεις απόδοσης για το συγκεκριμένο σενάριο περιλαμβάνουν μέση καθυστέρηση πακέτου στο upstream (Mean packet delay in upstream), μέση καθυστέρηση πακέτου στο downstream (Mean packet delay in downstream), ρυθμαπόδοση δικτύου για το upstream κανάλι (Throughput in upstream), μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (Mean ONU power consumption) και τέλος μια

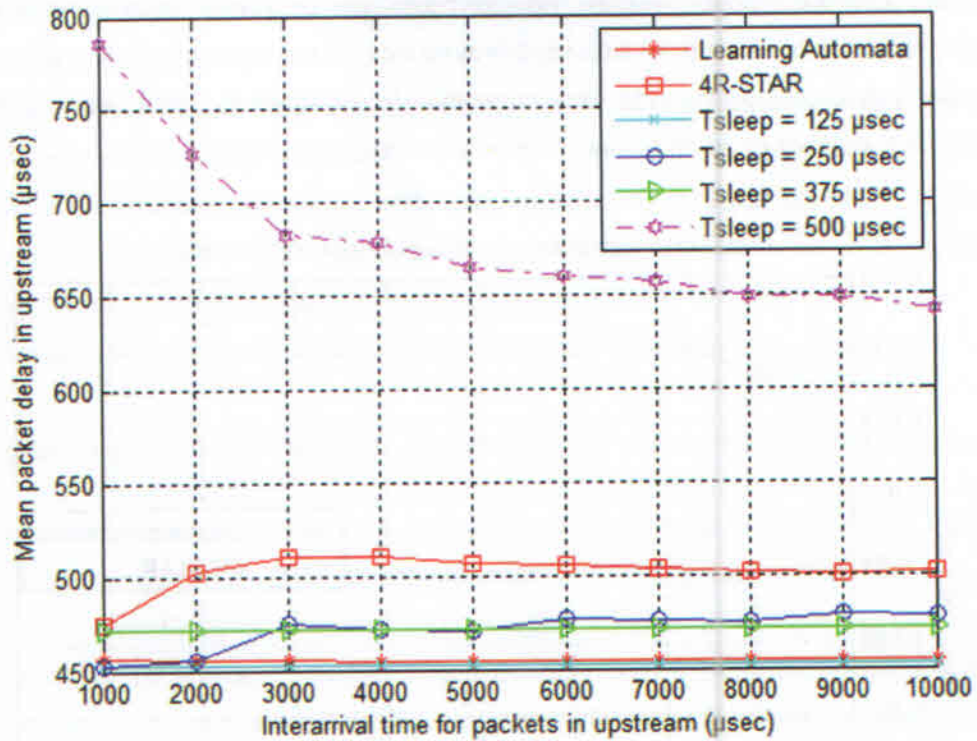
συνάρτηση κόστους (Cost function) που αποτυπώνει τη γενική εικόνα σχετικά με την απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, περιλαμβάνονται αρχικά και οι μετρήσεις του γενικού μέσου σφάλματος μοντέλου (Mean model error) που σχετίζονται με τα σχήματα Learning Automata και 4R-STAR, σχετικά με τις περιόδους ύπνου σε κατάσταση Listen.



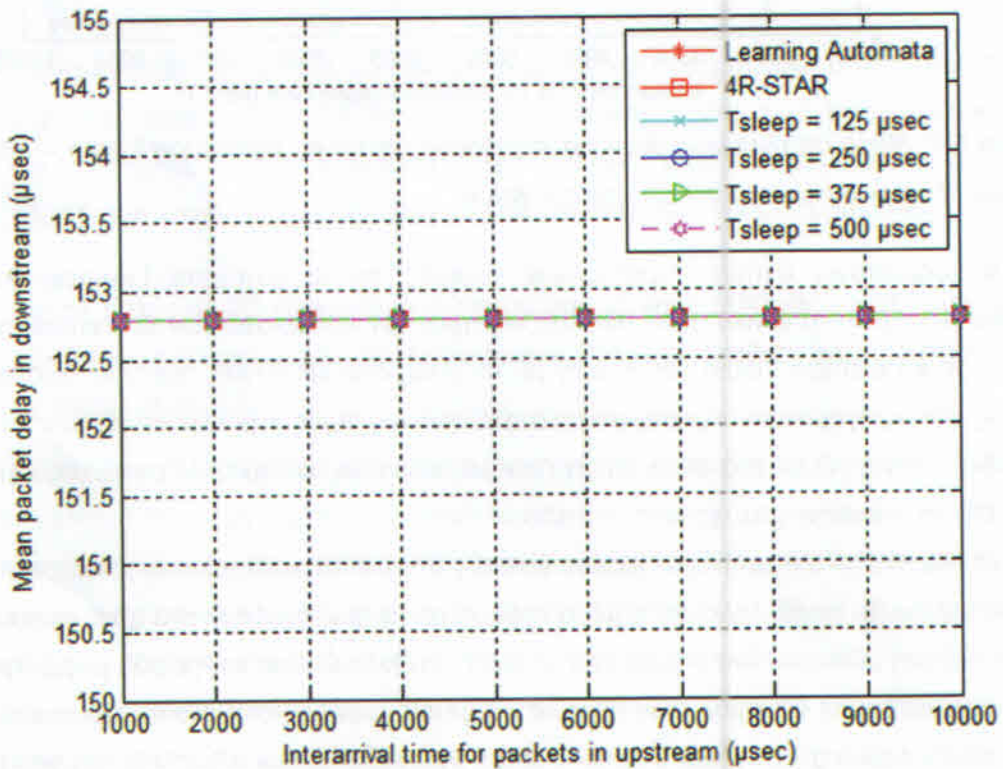
Σχήμα 6.7: Μέσο σφάλμα μοντέλων για περιόδους ύπνου σε κατάσταση Listen – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε γενικώς ότι το αυτόματο Learning Automata πετυχαίνει μικρότερο γενικό μέσο σφάλμα ως προς τον καθορισμό των βέλτιστων περιόδων ύπνου σε κατάσταση Listen, σε σχέση με το αυτόματο 4R-STAR, πράγμα που οφείλεται κυρίως στη γρηγορότερη προσαρμοστικότητα του ως προς την εκμάθηση των βέλτιστων περιόδων ύπνου. Παρ' όλα αυτά, παρατηρούμε ότι και το σφάλμα του αυτόματου 4R-STAR βρίσκεται σε ικανοποιητικά χαμηλό επίπεδο.

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε γενικώς ότι όσο περισσότερο αυξάνεται η περίοδος ύπνου αυξάνεται παράλληλα και η μέση καθυστέρηση των πακέτων στο upstream κανάλι, η οποία αύξηση μετά από ένα σημείο (για σταθερή περίοδο ύπνου ίση με 500 µsec) προκύπτει αρκετά μεγαλύτερη. Ως προς τους μηχανισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, παρατηρούμε ότι ο μηχανισμός Learning Automata έκανε καλύτερη δουλειά από τον 4R-STAR, για το λόγο που εξηγήθηκε πιο πριν, πετυχαίνοντας σχεδόν τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση για τα πακέτα στο upstream (όσο δηλαδή πετυχαίνει και η μικρότερη δυνατή περίοδος ύπνου 125 µsec).

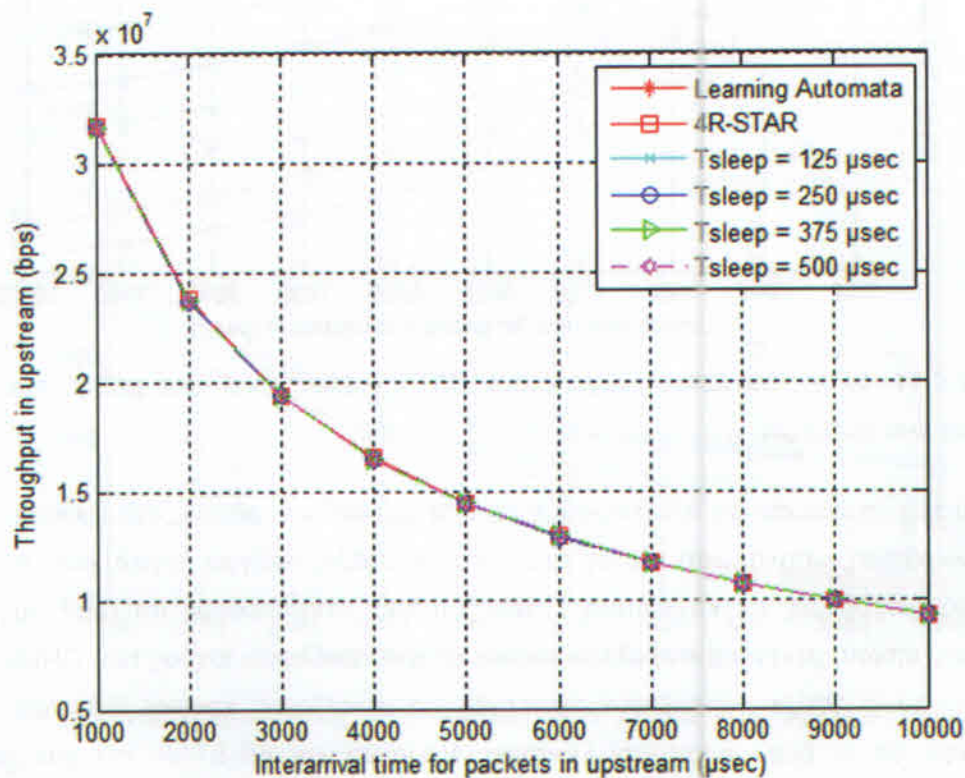


Σχήμα 6.8: Μέση καθυστέρηση πακέτου στο upstream – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream.



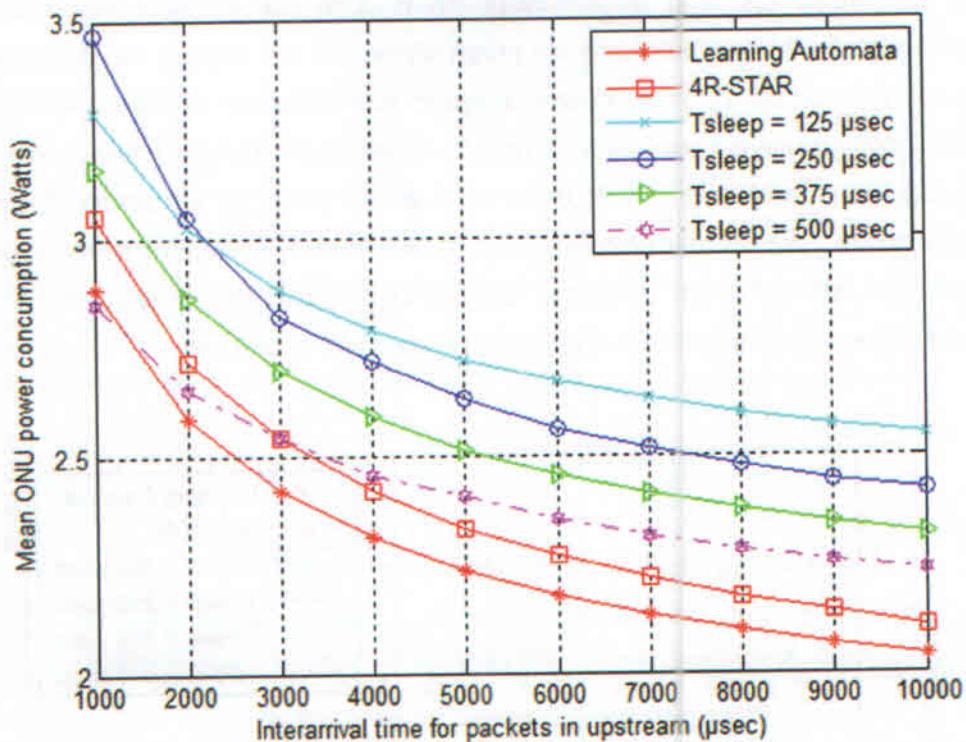
Σχήμα 6.9: Μέση καθυστέρηση πακέτου στο downstream – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream.

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι η μέση καθυστέρηση των πακέτων στο downstream σε αυτή την περίπτωση δεν επηρεάζεται από την αύξηση της περιόδου ύπνου, καθώς και ότι παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως των αλλαγών του φόρτου κίνησης στο upstream, πράγμα λογικό γιατί έχουμε μεγάλη downstream κίνηση πακέτων σε αυτή την περίπτωση, με αποτέλεσμα οι ONUs να εισέρχονται μόνο σε κατάσταση Listen, όπου απενεργοποιούν μόνο τον πομπό τους και όχι σε κατάσταση Asleep, όπου απενεργοποιούν και πομπό και δέκτη. Τα ίδια πράγματα ισχύουν επίσης και όταν χρησιμοποιούνται οι δυο μηχανισμοί Learning Automata και 4R-STAR, για αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 6.10: Ρυθμαπόδοση στο upstream – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι με τη μείωση της κίνησης στο upstream κανάλι του δικτύου η ρυθμαπόδοση στο upstream κανάλι μειώνεται αντίστοιχα, και αυτό είναι λογικό γιατί στο δίκτυο δημιουργείται μικρότερος όγκος δεδομένων για αποστολή από τις ONU, που αυτό σημαίνει και λιγότερα απεσταλμένα bytes κάθε φορά από τις ONUs προς το OLT. Επίσης, παρατηρούμε ότι η περίοδος ύπνου δεν επηρεάζει τη ρυθμαπόδοση στο upstream κανάλι και αυτό είναι λογικό με την έννοια ότι δε μεταβάλλει το χρονικό διάστημα που χρειάζονται οι ONUs για να μεταδώσουν τα δηλωμένα bytes τους στο OLT και συνεπώς τον αριθμό των συνολικών bytes που θα μεταδοθούν, αλλά έχει άμεση σχέση μόνο με το χρονικό διάστημα που αυτές είναι ανενεργές, δηλαδή δεν θα έχουν δηλωμένα bytes για μετάδοση.



Σχήμα 6.11: Μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται ο φόρτος στο upstream κανάλι, τόσο μικρότερη κατανάλωση ισχύος έχουν και οι ONUs, πράγμα λογικό γιατί εισέρχονται περισσότερες φορές σε κατάσταση Listen. Επίσης, παρατηρούμε ότι όταν αυξάνεται η περίοδος ύπνου, μειώνεται παράλληλα και η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs, πράγμα λογικό γιατί οι ONUs παραμένουν ανενεργές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επίσης, βλέπουμε ότι οι δυο μηχανισμοί Learning Automata και 4R-STAR πέτυχαν μικρότερη κατανάλωση ισχύος απ' ό,τι πέτυχαν οι σταθερές περίοδοι ύπνου 125, 250, 375 και 500 µsec.

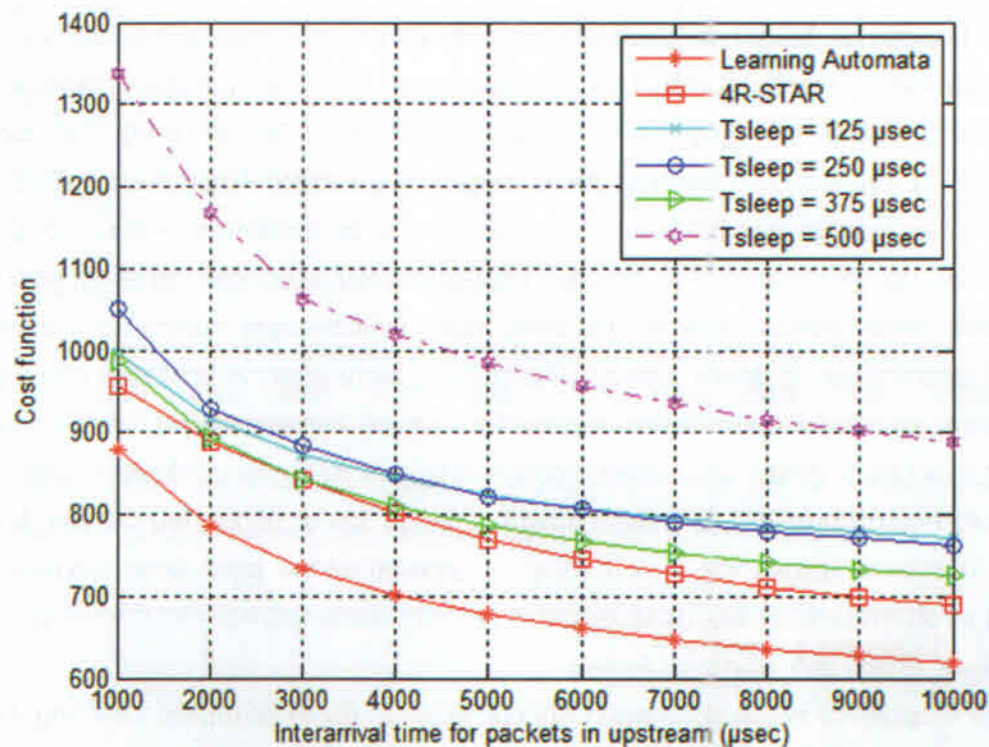
Για την καλύτερη κατανόηση για το πόσο αποδοτικά είναι τα δυο προτεινόμενα σχήματα σε σχέση με τη χρήση σταθερών περιόδων ύπνου, χρησιμοποιήθηκε επιπλέον μια συνάρτηση κόστους, η οποία όσο πιο μικρή τιμή έχει, τόσο πιο αποδοτικό σημαίνει ότι είναι το δίκτυο. Αυτή η συνάρτηση κόστους, που χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο αξιολόγησης της γενικής εικόνας της απόδοσης του δικτύου, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Συνάρτηση κόστους} = \text{Μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs} \cdot \{(\text{Μέση καθυστέρηση πακέτου στο upstream} + \text{Μέση καθυστέρηση πακέτου στο downstream}) / 2\}$$

, ενώ το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 6.12.

Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι με τους δυο προτεινόμενους μηχανισμούς Learning Automata και 4R-STAR πετύχαμε καλύτερα αποτελέσματα απόδοσης (και κυρίως με τον

Learning Automata) σε σχέση με την απόδοση που πέτυχαν οι σταθερές περιόδους ύπνου. Αυτό συμβαίνει επειδή εντοπίζουν βέλτιστες περιόδους ύπνου και συνεπώς έτσι, πετυχαίνουν μικρότερη κατανάλωση ισχύος για τις ONUs, χωρίς παράλληλα να αυξάνεται (ή να αυξάνεται λίγο) η καθυστέρηση των πακέτων σε οποιοδήποτε από τα κανάλια δεδομένων upstream και downstream, σε σχέση με τις καθυστερήσεις που προκύπτουν όταν γίνεται χρήση της μικρότερης δυνατής περιόδου ύπνου ($T_{\text{sleep}} = 125 \mu\text{sec}$).



Σχήμα 6.12: Συνάρτηση κόστους – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream.

6.4.2 Δεύτερο σενάριο – Μετρήσεις απόδοσης και συγκριτικά αποτελέσματα

Στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων (interarrival time) τόσο στο downstream, όσο και στο upstream, μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, κάθε ένα δέκατο του συνολικού χρόνου της προσομοίωσης, σύμφωνα με ένα σταθερό διάνυσμα $\text{Interarrival_times} = [1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000] \mu\text{sec}$. Για παράδειγμα, στην περίπτωση αυτή που ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης είναι 200 μsec ισχύουν τα παρακάτω:

- Για τα πρώτα $200/10 = 20$ δευτερόλεπτα (0 sec - 20 sec), έχουμε άφιξη πακέτου στην ουρά κάθε διαφορετικής ONU, αλλά και στην ουρά του OLT (για κάθε διαφορετική ONU), ανά σταθερό χρονικό διάστημα ίσο με 1000 μsec.

- Για τα επόμενα 20 δευτερόλεπτα (20 sec - 40 sec), έχουμε άφιξη πακέτου στην ουρά κάθε διαφορετικής ONU, αλλά και στην ουρά του OLT (για κάθε διαφορετική ONU), ανά σταθερό χρονικό διάστημα ίσο με 2000 msec.

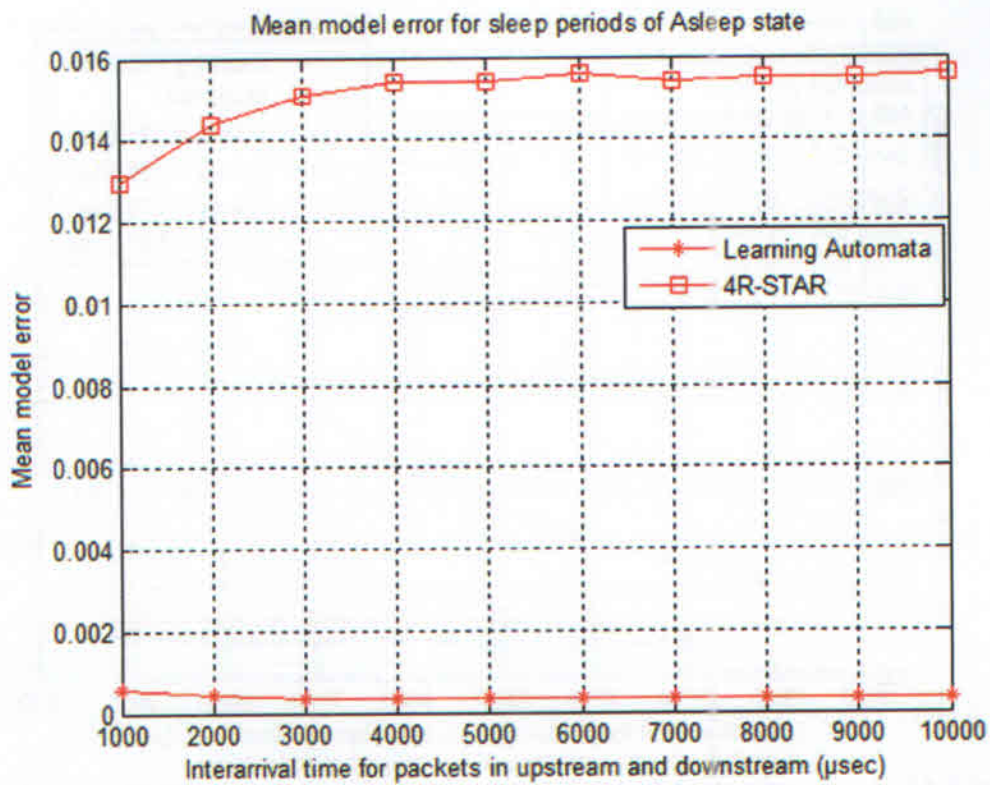
⋮

- Για τα τελευταία 20 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης (180 sec - 200 sec), έχουμε άφιξη πακέτου στην ουρά κάθε διαφορετικής ONU, αλλά και στην ουρά του OLT (για κάθε διαφορετική ONU), ανά σταθερό χρονικό διάστημα ίσο με 10000 msec.

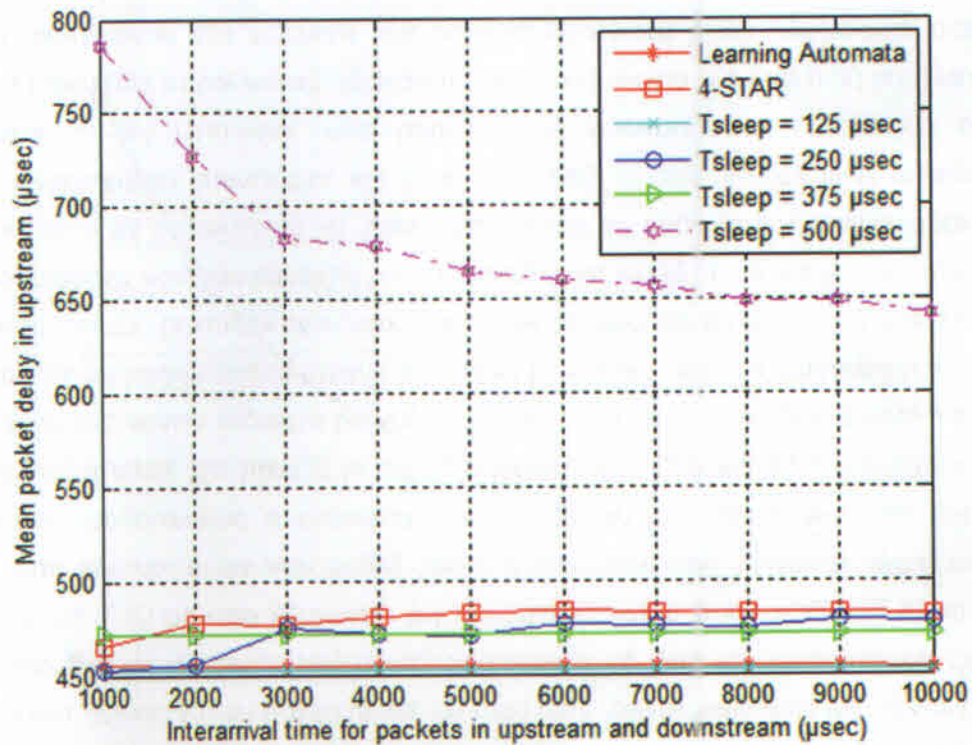
Τα παραπάνω δεδομένα (μικρή downstream κίνηση πακέτων σε συνδυασμό με μικρή upstream κίνηση πακέτων) έχουν ως αποτέλεσμα οι ONUs να μπαίνουν περισσότερο σε κατάσταση Asleep και ελάχιστα σε κατάσταση Listen. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η απόδοση των προτεινόμενων σχημάτων (Learning Automata και 4R-STAR) ως προς τον καθορισμό των βέλτιστων περιόδων ύπνου σε κατάσταση Asleep. Οι μετρήσεις απόδοσης για το συγκεκριμένο σενάριο περιλαμβάνουν μέση καθυστέρηση πακέτου στο upstream (Mean packet delay in upstream), μέση καθυστέρηση πακέτου στο downstream (Mean packet delay in downstream), ρυθμαπόδοση δικτύου για το upstream (Throughput in upstream) και για το downstream κανάλι (Throughput in downstream), μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (Mean ONU power consumption) και τέλος μια συνάρτηση κόστους (Cost function) που αποτυπώνει τη γενική εικόνα σχετικά με την απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, περιλαμβάνονται αρχικά και οι μετρήσεις του γενικού μέσου σφάλματος μοντέλου (Mean model error) που σχετίζονται με τα σχήματα Learning Automata και 4R-STAR, σχετικά με τις περιόδους ύπνου σε κατάσταση Asleep.

Στο παρακάτω Σχήμα 6.13 παρατηρούμε γενικώς ότι το αυτόματο Learning Automata πετυχαίνει μικρότερο γενικό μέσο σφάλμα ως προς τον καθορισμό των βέλτιστων περιόδων ύπνου σε κατάσταση Asleep σε σχέση με το αυτόματο 4R-STAR, πράγμα που οφείλεται, όπως ειπώθηκε και πιο πριν, κυρίως στη γρηγορότερη προσαρμοστικότητα του ως προς την εκμάθηση των βέλτιστων περιόδων ύπνου. Παρ' όλα αυτά, παρατηρούμε ότι και το σφάλμα του αυτόματου 4R-STAR βρίσκεται σε ικανοποιητικά χαμηλό επίπεδο.

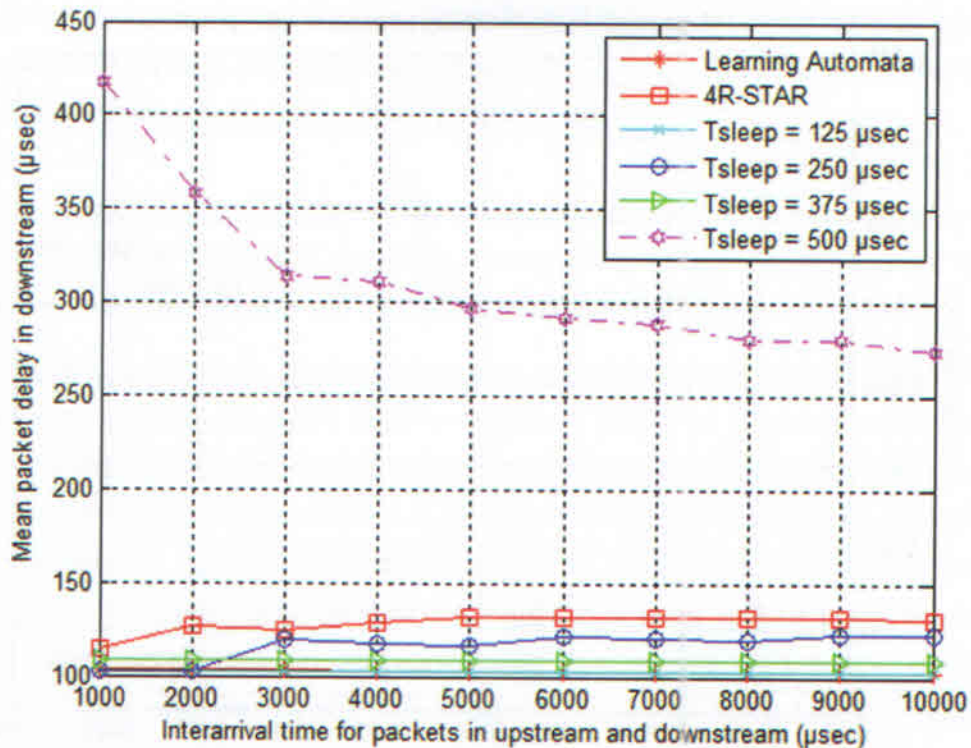
Στο παρακάτω Σχήμα 6.14 παρατηρούμε γενικώς ότι όσο περισσότερο αυξάνεται η περίοδος ύπνου αυξάνεται παράλληλα και η μέση καθυστέρηση των πακέτων στο upstream κανάλι, η οποία αύξηση μετά από ένα σημείο (για σταθερή περίοδο ύπνου ίση με 500 msec) προκύπτει αρκετά μεγαλύτερη. Ως προς τους μηχανισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, παρατηρούμε ότι ο μηχανισμός Learning Automata έκανε καλύτερη δουλειά από τον 4R-STAR, πετυχαίνοντας και πάλι σχεδόν τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση για τα πακέτα στο upstream (όσο δηλαδή πετυχαίνει και η μικρότερη δυνατή περίοδος ύπνου 125 msec).



Σχήμα 6.13: Μέσο σφάλμα μοντέλων για περιόδους ύπνου σε κατάσταση Asleep – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream και στο downstream.



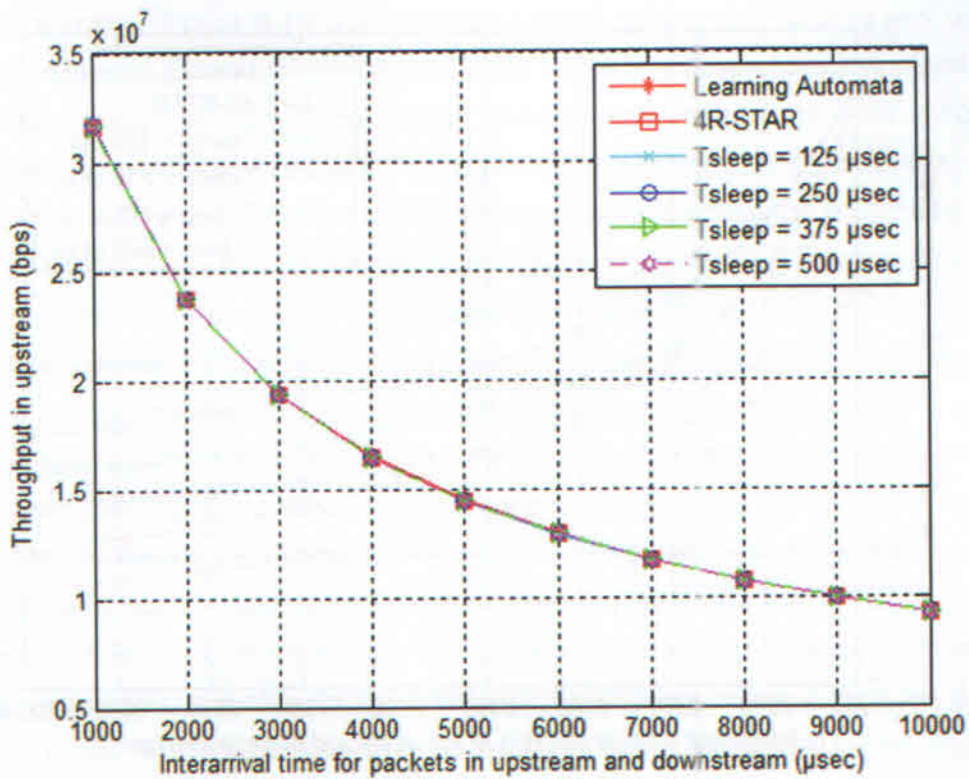
Σχήμα 6.14: Μέση καθυστέρηση πακέτου στο upstream – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream και στο downstream.



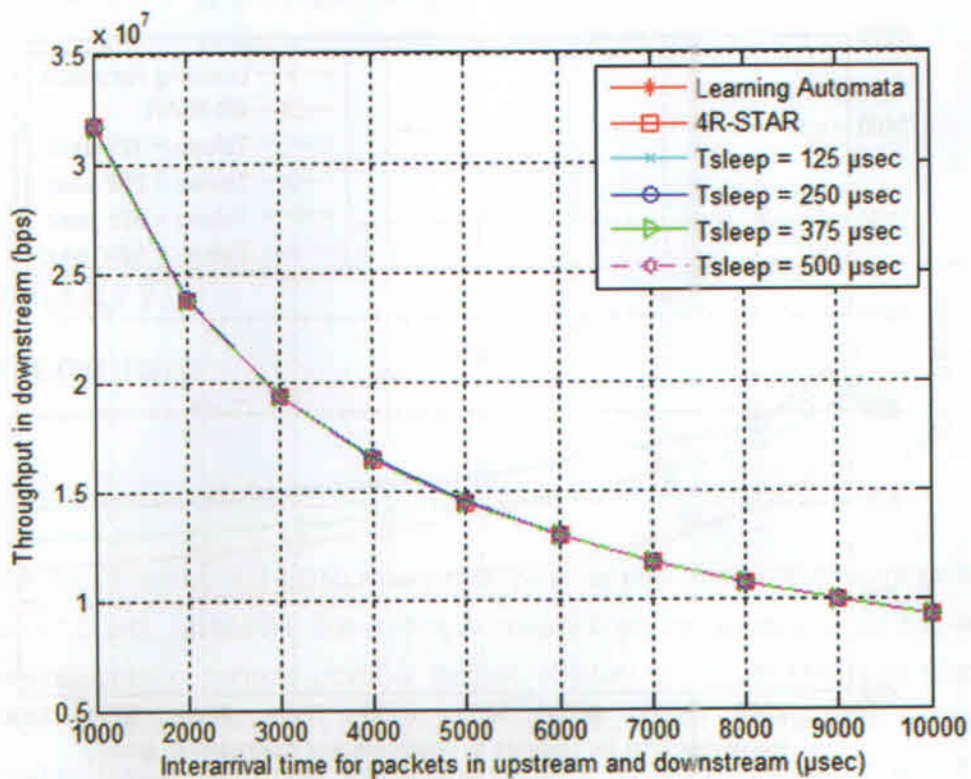
Σχήμα 6.15: Μέση καθυστέρηση πακέτων στο downstream – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream και στο downstream.

Στο Σχήμα 6.16 παρατηρούμε γενικώς ότι όσο περισσότερο αυξάνεται η περίοδος ύπνου αυξάνεται παράλληλα και η μέση καθυστέρηση των πακέτων στο downstream κανάλι, η οποία αύξηση μετά από ένα σημείο (για σταθερή περίοδο ύπνου ίση με 500 μsec) προκύπτει αρκετά μεγαλύτερη. Η παραπάνω καθυστέρηση που προκύπτει για τα πακέτα στο downstream είναι λογική, γιατί οι ONUs σε αυτή την περίπτωση εισέρχονται κυρίως σε κατάσταση Asleep και όχι τόσο σε κατάσταση Listen, με αποτέλεσμα να απενεργοποιούν πέρα από τον πομπό, και το δέκτη τους. Ως προς τους μηχανισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, παρατηρούμε ότι ο μηχανισμός Learning Automata έκανε λίγο καλύτερη δουλειά από τον 4R-STAR, πετυχαίνοντας και πάλι σχεδόν τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση για τα πακέτα στο upstream (όσο δηλαδή πετυχαίνει και η μικρότερη δυνατή περίοδος ύπνου 125 μsec).

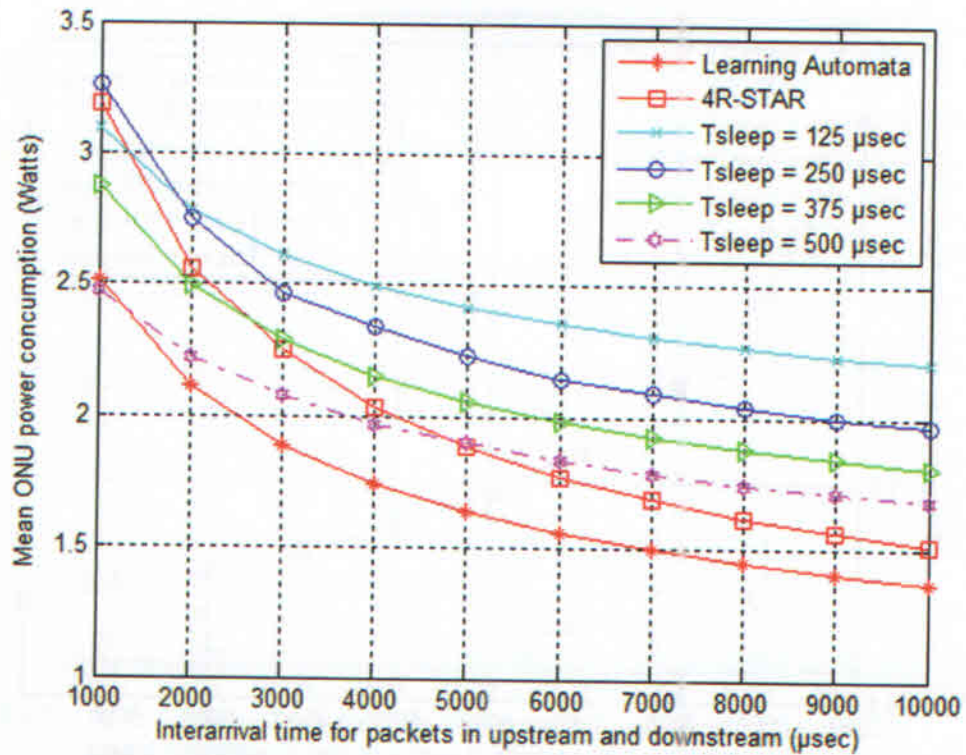
Στα Σχήματα 6.16 και 6.17 παρατηρούμε ότι με τη μείωση της κίνησης στο upstream αλλά και στο downstream κανάλι του δικτύου, μειώνεται η ρυθμαπόδοση και στα δυο κανάλια, πράγμα λογικό, γιατί μειώνεται ο όγκος δεδομένων για αποστολή από τις ONU προς το OLT, καθώς και ο όγκος δεδομένων για αποστολή από το OLT προς τις ONU. Επίσης, παρατηρούμε και πάλι ότι η περίοδος ύπνου δεν επηρεάζει τη ρυθμαπόδοση σε κανένα κανάλι και αυτό είναι λογικό, γιατί δεν έχει άμεση σχέση με τον αριθμό των bytes που θα σταλούν συνολικά από και προς τις ONUs, αλλά με το χρονικό διάστημα που αυτές θα είναι ανενεργές, δηλαδή δε θα υπάρχει καθόλου κίνηση από και προς αυτές.



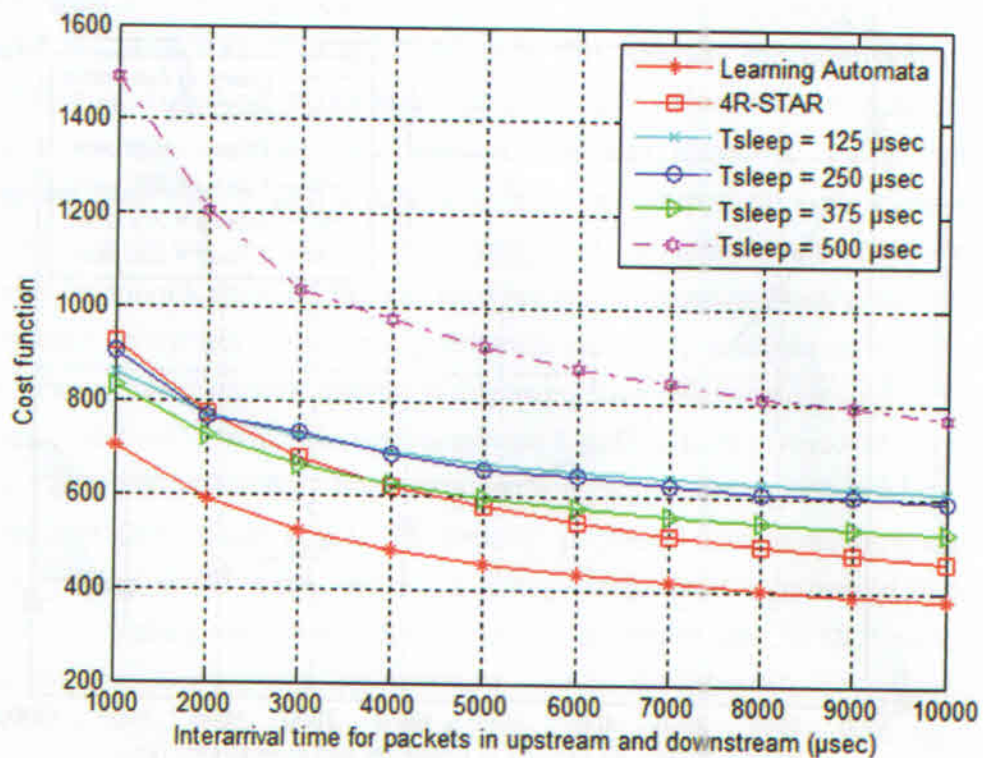
Σχήμα 6.16: Ρυθμαπόδοση στο upstream – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream και στο downstream.



Σχήμα 6.17: Ρυθμαπόδοση στο downstream – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream και στο downstream.



Σχήμα 6.18: Μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream και στο downstream.



Σχήμα 6.19: Συνάρτηση κόστους – Interarrival time μεταξύ των αφίξεων πακέτων στο upstream και στο downstream.

Στο παραπάνω Σχήμα 6.18 παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται ο φόρτος στο upstream κανάλι, τόσο μικρότερη κατανάλωση ισχύος έχουν οι ONUs, πράγμα λογικό γιατί εισέρχονται περισσότερες φορές σε κατάσταση Asleep. Επίσης, παρατηρούμε ότι όταν αυξάνεται η περίοδος ύπνου, μειώνεται παράλληλα και η μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs, πράγμα λογικό γιατί οι ONUs παραμένουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε κατάσταση Asleep. Επίσης, βλέπουμε ότι οι δυο μηχανισμοί Learning Automata και 4R-STAR πέτυχαν τελικώς μικρότερη κατανάλωση ισχύος απ' ό τι πέτυχαν οι σταθερές περίοδοι ύπνου 125, 250, 375 και 500 μsec , αν και ο μηχανισμός 4R-STAR άργησε λίγο περισσότερο να συγκλίνει σε μια μικρότερη τιμή, με τη πτώση του φόρτου κίνησης στα δύο κανάλια δεδομένων.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 6.19 και σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιήθηκε και στο προηγούμενο σενάριο προσομοίωσης, η οποία είναι ενδεικτική της απόδοσης του δικτύου. Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε και πάλι ότι με τους δυο προτεινόμενους μηχανισμούς Learning Automata και 4R-STAR πετύχαμε καλύτερα αποτελέσματα απόδοσης (και κυρίως με τον LA) σε σχέση με την απόδοση που πέτυχαν οι σταθερές περίοδοι ύπνου. Βλέπουμε δηλαδή ότι επειδή εντοπίζουν βέλτιστες περιόδους ύπνου, πετυχαίνουν μικρότερη κατανάλωση ισχύος για τις ONUs, ενώ παράλληλα δεν αυξάνεται (ή αυξάνεται λίγο) η καθυστέρηση των πακέτων σε οποιοδήποτε από τα κανάλια δεδομένων upstream και downstream, σε σχέση με την καθυστέρηση που προκύπτει όταν γίνεται χρήση της μικρότερης δυνατής περιόδου ύπνου ($T_{\text{sleep}} = 125 \mu\text{sec}$).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

Συμπεράσματα

Για τα δίκτυα τύπου XG-PON, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο αντίστοιχο πρότυπο ITU-T G.987.3 [46], υπάρχουν δυο κύριες λειτουργίες για την εξοικονόμηση της ενέργειας που καταναλώνουν οι οπτικές μονάδες δικτύου (ONUs). Η πρώτη είναι η λειτουργία του μερικού ύπνου (doze mode) και η δεύτερη είναι η λειτουργία του κυκλικού ύπνου (cyclic sleep mode). Γενικά, το τυπικό μοντέλο για την εξοικονόμηση ενέργειας στα XG-PON, χρησιμοποιεί με αποδοτικό τρόπο την αλληλουχία καταστάσεων ύπνωσης, πλήρους ή μερικής, και κανονικής, ώστε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας των οπτικών μονάδων

δικτύου (Optical Network Units), όταν υπάρχει έλλειψη δικτυακής κίνησης ή υπολειτουργία των συσκευών, θεωρώντας όμως σταθερή και ίση περίοδο ύπνου τόσο για την κατάσταση Listen, κατά την οποία απενεργοποιείται μόνο ο πομπός της ONU, όσο και για την κατάσταση Asleep, κατά την οποία απενεργοποιείται και ο πομπός και ο δέκτης της ONU. Αυτό οδηγεί όμως στα εξής θέματα. Για μικρές περιόδους ύπνου, η μέση καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο, τόσο στο upstream, όσο και στο downstream, καθώς και η μέση κατανάλωση ενέργειας παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, παρ' όλο που θα μπορούσε όμως να επιτευχθεί ακόμα μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Αντίστοιχα, με τη χρήση μεγάλων περιόδων ύπνου μπορεί να πετυχαίνεται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, αλλά έχει ως αντίκτυπο τη μεγάλη αύξηση της μέσης καθυστέρησης των πακέτων στο δίκτυο, τόσο στο upstream, όσο και στο downstream (σε περίπτωση που οι ONUs μπαίνουν συχνά σε κατάσταση Asleep).

Για το σκοπό αυτό στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν δυο μηχανισμοί οι οποίοι προσπαθούν να βρουν τις κατάλληλες περιόδους ύπνου, τόσο για την κατάσταση Listen, όσο και για την κατάσταση Asleep, ώστε να μειώσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη μέση κατανάλωση ενέργειας των ONUs, χωρίς παράλληλα όμως να αυξάνεται η μέση καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο. Οι μηχανισμοί αυτοί εμπνεύστηκαν από τον τομέα έρευνας των Learning Automata. Η αποτίμηση της αναλυτικής προσέγγισης επιτεύχθηκε μέσω ενός εργαλείου προσομοίωσης που κατασκευάστηκε από την αρχή σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού. Τα συγκριτικά συμπεράσματα προκύπτουν μέσα από γραφικές παραστάσεις απόδοσης με βάση τα αποτελέσματα δυο συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης. Οι μετρήσεις απόδοσης περιλαμβάνουν μέση κατανάλωση ισχύος των ONUs (σε Watts), μέση αναμονή πακέτου και ρυθμαπόδοση δικτύου τόσο για το upstream κανάλι, όσο και για το downstream κανάλι δεδομένων, καθώς και μια συνάρτηση κόστους, ενδεικτική της απόδοσης του δικτύου.

Συνοψίζοντας από τα αποτελέσματα της ενότητας 6.4, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα προτεινόμενα σχήματα καθορισμού βέλτιστης διάρκειας ύπνου, βάσει των δύο σεναρίων προσομοίωσης και της σύγκρισής τους με τη χρήση σταθερών περιόδων ύπνου, τόσο για κατάσταση Listen, όσο και για κατάσταση Asleep, παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε ότι έχει να κάνει με τη μείωση της μέσης κατανάλωσης ισχύος των ONUs και συνεπώς και στην εξοικονόμηση της ενέργειας, επιτυγχάνοντας πολύ ικανοποιητική απόδοση. Στα πλεονεκτήματα των σχημάτων αυτών συμπεριλαμβάνεται το ότι επιβαρύνουν ελάχιστα (το 4R-STAR) έως και καθόλου (το Learning Automata) τη μέση καθυστέρηση των πακέτων, τόσο για το upstream, όσο και για το downstream, αλλά και το ότι δεν επιβαρύνουν καθόλου τη ρυθμαπόδοση του δικτύου και στα δυο κανάλια δεδομένων. Συνεπώς, καλύπτουν τους στόχους και τις απαιτήσεις που τέθηκαν για την υλοποίησή τους, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή τους σε σχέση με την κίνηση που αυτά εξυπηρετούν. Γενικώς όμως,

παρατηρήθηκε ότι ο μηχανισμός Learning Automata (Μαθάνοντα Αυτόματα) προσέφερε καλύτερη απόδοση από το μηχανισμό 4R-STAR.

Βιβλιογραφία

- [1] http://www.e-yliko.gr/htmls/diktya/senario1/theory/files/4_1_diktia_tee.pdf.
- [2] <https://dsepwiki.wikispaces.com/Δίκτυα+υπολογιστών+-+τηλεπικοινωνιακά+δίκτυα>.
- [3] Κωνσταντίνος Γεωργακόπουλος, Τ.Ε.Ι. Καβάλας, "Τεχνολογίες Σύγχρονων Ασυρμάτων Δικτύων Δεδομένων," http://de.teikav.edu.gr/telematics/pdf/3o_Meros_Asymmata_thlem_atikh.pdf, Δεκ. 2007.
- [4] Ειρήνη Μιχοπάνου, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, "Fiber to the Home Technology: Στρατηγικές ανάπτυξης για την Ελλάδα," <http://digilib.lib.unipi.gr/dspace/bitstream/unipi/5168/1/Michopanou.pdf>, Δεκ. 2012.
- [5] N. Ghani, S. Dixit, and T. S. Wang, "On IP-over-WDM integration," *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, no. 3, pp. 72–84, Mar. 2000.
- [6] J. Manchester, J. Anderson, B. Doshi, and S. Dravida, "IP over SONET," *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 5, pp. 136–142, May 1998.
- [7] Metro Ethernet Forum, "Metro ethernet services – a technical overview," http://metro.ethernetforum.org/Assets/White_Papers/Metro-Ethernet-Services.pdf.
- [8] R. S. Tucker, "Energy footprint of the network," *OFC/NFOEC'09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, CA, Mar. 2009.
- [9] "Alcatel-Lucent 1675 Lambda Unite MSS datasheet," http://lightspeedt.com/wp-content/uploads/2011/06/1675_LambdaUnite-DataSheet.pdf.
- [10] "MRV Optical Cross Connect datasheet," http://www.mrv.com/datasheets/MCC/PDF/300/MRV-MCC-OCC_A4_HI.pdf.
- [11] "Ciena white paper - Optical Transport System – CoreStream Agility," http://www.ciena.com/files/Optical_Transport_System_PB.pdf.
- [12] G. Shen and R. S. Tucker, "Energy-minimized design for IP over WDM networks," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 1, no. 1, pp. 176–186, Jun. 2009.
- [13] J. Baliga, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Energy consumption of the Internet," *COIN - ACOFT'07*, Melbourne, Australia, Jun. 2007.
- [14] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, W. V. Sorin, and R. S. Tucker, "Energy consumption in optical IP networks," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology (JLT)*, vol. 27, no. 13, pp. 2391–2403, Jul. 2009.
- [15] "Ciena 3600 datasheet," http://media.ciena.com/documents/CN_3600_A4_DS.pdf.
- [16] "Ciena Select OADM datasheet," http://media.ciena.com/documents/Select_OADM_DS_A4.pdf.
- [17] J. Baliga, R. Ayre, W. V. Sorin, K. Hinton, and R. S. Tucker, "Energy consumption in access networks," *OFC/NFOEC'08*, San Diego, CA, Feb. 2008.

- [18] P. P. Iannone, K. C. Reichmann, M. Birk, N. J. Frigo, R. M. Derosier, D. Barbier, C. Cassagnettes, T. Garret, A. Verlucco, S. Perrier, and J. Philipsen, "A 160-km transparent metro WDM ring network featuring cascaded erbium-doped waveguide amplifiers," *OFC/NFOEC'01*, Mar. 2001.
- [19] C. Lange and A. Gladisch, "Energy consumption of telecommunication networks - a network operator's view," *OFC/NFOEC'09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, CA, Mar. 2009.
- [20] D. A. B. Miller, "Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips," *Proc. IEEE*, vol. 88, no. 6, pp. 728–749, Jun. 2000.
- [21] Ιωάννης Σπυρώνης, Πανεπιστήμιο Πατρών, "Μοντέλο για τεχνοοικονομική ανάλυση δικτύων οπτικών ινών," http://ru6.cti.gr/bouras/ergasies/diplwmatikes/114_TelikoKeimenoErgasias.doc, 2011.
- [22] Χ.Ι Μπούρας, "Βέλτιστες πρακτικές για δίκτυα οπτικών ινών", broadband.cti.gr/el/download/XIBouras_Thessaloniki-8-10-2008.ppt, Οκτ. 8, 2008.
- [23] B. Lung, "PON architecture 'futureproofs' FTTH", *Lightwave*, vol. 16, no. 10, pp.104–107, Sep. 1999.
- [24] G. Pesavento and M. Kelsey, "PONs for the broadband local loop", *Lightwave*, vol.16, no. 10, pp. 68–74, Sep. 1999.
- [25] B. Mukherjee, "Optical Communication Networks", McGraw-Hill, 1997.
- [26] Andrew S. Tanenbaum, "Δίκτυα Υπολογιστών", Κλειδάριθμος, 2008.
- [27] Αντωνία Κόκιου, Πανεπιστήμιο Πατρών, "Ανάλυση και αποτίμηση της απόδοσης παθητικών οπτικών δικτύων Ethernet για πολυδιάστατη κίνηση," [http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/6027/1/Nimertis_Kokiou\(ele\).pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/6027/1/Nimertis_Kokiou(ele).pdf), Φεβ. 2013.
- [28] H. Ueda, K. Okada, B. Ford, G. Mahony, S. Hornung, D. Faulkner, J. Abiven, S. Durel, R. Ballart, and J. Erickson, "Deployment status and common technical specifications for a B-PON system", *IEEE Communication Magazine*, vol. 39, no. 12, pp. 134–141, Dec. 2001.
- [29] IEEE 802.3ah Ethernet in the First Mile Task Force, <http://www.ieee802.org/3/efm/index.html>.
- [30] S. Clavenna, "Metro optical Ethernet", *Lightreading (www.lightreading.com)*, Nov. 2000.
- [31] ITU-T G.7041, "Generic Framing Procedure", in *Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks*, Dec. 2003.
- [32] F. Effenberger, D. Cleary, O. Haran, G. Kramer, R. Ding Li, M. Oron, T. Pfeiffer, "An Introduction to PON Technologies", *IEEE Communications Magazine*, pp. 17–25, Mar. 2007.
- [33] B. Mukherjee, "Optical WDM Networks", Springer, 2006.
- [34] C. Lin, "Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home", Wiley, 2006.

- [35] T. Koonen, "Fiber to the Home/Fiber to the Premises: What, Where, and When?" *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 5, pp. 911-934, May 2006.
- [36] J. Kani, K. Iwatsuki, and T. Imai, "Optical Multiplexing Technologies for Access-Area Applications", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, no. 4, pp.661-668, Jul./Aug. 2006.
- [37] C.-J. Chae, E. Wong, and R. S. Tucker, "Optical CSMA/CD Media Access Scheme for Ethernet Over Passive Optical Network", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.14, no. 5, pp. 711-713, May 2002.
- [38] Z. ChongFu, Q. Kun, and X. Bo, "Passive optical networks based on optical CDMA: Design and system analysis", *Chinese Science Bulletin*, vol. 52, no. 1, pp. 118-126, Jan. 2007.
- [39] A. E. Willner, P. Saghari, and V. R. Arbab, "Advanced Techniques to Increase the Number of Users and Bit Rate in OCDMA Networks", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 13, no. 5, pp. 1403-1414, Sep./Oct. 2007.
- [40] Γεώργιος Μαυρογονάτος και Νικόλαος Χατζής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Ελλάδος, "Σχεδιασμός και Υλοποίηση Πρωτοκόλλου MAC για Παθητικά Οπτικά Δίκτυα GPON", http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2004-0111/DT2004-0111.doc, Ιούλιος 2004.
- [41] ITU-T G.984.5, "Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G-PON): Enhancement Band 2007," 2007.
- [42] J.-I. Kani, F. Bourgart, A. Cui, A. Rafel, M. Campbell, R. Davey, and S. Rodrigues, "Next-generation PON part I – Technology roadmap and general requirements," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 43-49, Nov. 2009.
- [43] Deepti Punjabi, Vikram Mehta and Dr. Neena Gupta, "Power Saving Analysis of Different Optical Access Networks," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (www.ijetae.com)*, vol. 2, no. 3, Mar. 2012.
- [44] F. J. Effenberger, H. Mukai, S. Park, and T. Pfeiffer, "Next-generation PON part II – Candidate systems for next generation PON," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 50-57, Nov. 2009.
- [45] F. J. Effenberger, H. Mukai, J.-I. Kani, and M. Rasztoivts-Wiech, "Next-generation PON part III – System specifications for XG-PON," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 58-64, Nov. 2009.
- [46] ITU-T G.987.3, "10-Gigabit-Capable Passive Optical Network (XG-PON) Systems: Transmission Convergence Layer Specification," 2010.
- [47] ITU-T G.987.2, "10-Gigabit-Capable Passive Optical Networks (XG-PON): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification," 2009.
- [48] ITU-T G.988, "ONU Management and Control Interface Specification (OMCI)," 2010.

- [49] ITU-T G.987, "10-Gigabit-Capable Passive Optical Network (XG-PON) Systems: Definitions, Abbreviations, and Acronyms," 2009.
- [50] ITU-T G.987.1, "Gigabit-Capable Passive Optical Networks (XG-PON): General Requirements," 2009.
- [51] S. Jain, F. Effenberger, A. Szabo, Z. Feng, A. Forcucci, W. Guo, Y. Luo, R. Mapes, Y. Zhang, and V. O'Byrne, "World's First XG-PON Field Trial," in *Proc. OFC/NFOEC*, pp. 1–3, May 2010.
- [52] Energy Information Administration Brochures, "Greenhouse gases, climate change, and energy," <http://www.eia.gov/oiaf/1605/ggccebro/chapter1.html>, May 2008.
- [53] IUCN, "Report of the IUCN renowned thinkers meeting, the future of sustainability: Rethinking environment and development in the twenty-first century," http://cmsdata.iucn.org/downloads/iucn_future_of_sustainability.pdf, Jan. 2006.
- [54] W. Vereecken, L. Deboosere, D. Colle, B. Vermeulen, M. Pickavet, B. Dhoedt, and P. Demeester, "Energy efficiency in telecommunication networks," *European Conference on Networks and Optical Communications & Optical Cabling and Infrastructure (NOC'08)*, Jul. 2008.
- [55] M. Pickavet, W. Vereecken, S. Demeyer, P. Audenaert, D. Colle, C. Devellder, and P. Demeester, "Contribution and role of network architectures in the footprint reduction of ICT," *NOC/OC&I'09*, Valladolid, Spain, Jun. 2009.
- [56] M. Pickavet, W. Vereecken, S. Demeyer, P. Audenaert, B. Vermeulen, C. Devellder, D. Colle, B. Dhoedt, and P. Demeester, "Worldwide energy needs for ICT: the rise of power-aware networking," *IEEE International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS'08)*, Bombay, India, Dec. 2008.
- [57] P. Leisching and M. Pickavet, "Energy footprint of ICT: Forecasts and network solutions," *OFC/NFOEC'09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, CA, Mar. 2009.
- [58] C. Lange, D. Kosiankowski, C. Gerlach, F.-J. Westphal and A. Gladisch, "Energy consumption of telecommunication networks," *European Conference on Optical Communication (ECOC'09)*, Vienna, Austria, Sept. 2009.
- [59] B. Nordman, "ICT, networks, and energy: The energy perspective," *OFC/NFOEC'09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, CA, Mar. 2009.
- [60] Amitabha Banerjee *et al.*, "Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access", *Journal of Optical Networking*, vol. 4, no. 11, Nov. 2005.
- [61] K. Zhu and B. Mukherjee, "Traffic grooming in optical WDM mesh networks," *IEEE Journal in Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 1, pp. 122–133, Jan. 2002.

- [62] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Survivable WDM mesh networks. Part I-protection," *IEEE INFOCOM'99*, New York, NY, pp. 744–751, Mar. 1999.
- [63] E. Bonetto, D. Cuda, G. A. Castillo, and F. Neri, "The role of arrayed waveguide gratings in energy-efficient optical switching architectures," *OFC/NFOEC'10*, San Diego, CA, Mar. 2010.
- [64] E. Bonetto, L. Chiaraviglio, D. Cuda, G. A. Castillo, and F. Neri, "Optical technologies can improve the energy efficiency of networks," *ECOC'09*, Vienna, Austria, Sep. 2009.
- [65] H. Song, "Long-Reach Passive Optical Networks", PhD Dissertation, University of California, Davis, 2009.
- [66] M. Jimeno, K. Christensen, and B. Nordman, "A network connection proxy to enable hosts to sleep and save energy," *IEEE International Performance Computing and Communications Conference*, pp. 101–110, Dec. 2008.
- [67] L. Chiaraviglio, M. Mellia, and F. Neri, "Energy-aware networks: Reducing power consumption by switching off network elements," *Gruppo nazionale Telecomunicazioni e Teoria dell'Informazione (GTTI'08)*, Rome, Italy, May 2008.
- [68] L. Chiaraviglio, M. Mellia, and F. Neri, "Reducing power consumption in backbone networks," *IEEE ICC'09*, Dresden, Germany, Jun. 2009.
- [69] L. Chiaraviglio, M. Mellia, and F. Neri, "Energy-aware backbone networks: a case study," *IEEE International Workshop on Green Communications (GreenComm'09)*, Dresden, Germany, Jun. 2009.
- [70] B. Sanso and H. Mellah, "On reliability, performance and Internet power consumption," *IEEE DRCN'09*, Washington, DC, Oct. 2009.
- [71] H. Mellah and B. Sanso, "Review of facts, data and proposals for a greener Internet," *BroadNets'09*, Madrid, Spain, Sept. 2009.
- [72] C. Lange and A. Gladisch, "Energy efficiency limits of load adaptive networks," *OFC/NFOEC'10*, San Diego, CA, Mar. 2010.
- [73] F. Idzikowski, S. Orlowski, C. Raack, H. Woesner, and A. Wolisz, "Saving energy in IP-over-WDM networks by switching off line cards in low-demand scenarios," *Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM'10)*, Kyoto, Japan, Feb. 2010.
- [74] Y. Zhang, M. Tornatore, P. Chowdhury, and B. Mukherjee, "Timeaware energy conservation in IP-over-WDM networks," *Photonics in Switching'10*, Monterey, CA, Jul. 2010.
- [75] L. Ceuppens, "Planning for energy efficiency: Networking in numbers," *OFC/NFOEC'09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, CA, Mar. 2009.

- [76] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsiang, and S. Wright, "Power awareness in network design and routing," *IEEE INFOCOM'08*, Phoenix, AZ, pp. 1130–1138, 2008.
- [77] S. Sarkar, P. Chowdhury, S. Dixit, and B. Mukherjee, "Hybrid Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN)", in *Broadband Access Networks: Technologies and Deployment*, Springer, 2009.
- [78] Y. Zhang, P. Chowdhury, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Energy efficiency in telecom optical networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 12, no. 4, pp. 441–458, Oct. 2010.
- [79] P. Chowdhury, B. Mukherjee, S. Sarkar, G. Kramer, and S. Dixit, "Hybrid wireless-optical broadband access network (WOBAN): prototype development and research challenges," *IEEE Network*, vol. 23, no. 3, pp. 41–48, May 2009.
- [80] S. Figuerola, M. Lemay, V. Reijs, M. Savoie, and B. St. Arnaud, "Converged optical network infrastructures in support of future internet and grid services using IaaS to reduce GHG emissions," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology (JLT)*, vol. 27, no. 12, pp. 1941–1946, Jun. 2009.
- [81] B. St. Arnaud, "CANARIE: Research networks to help reduce global warming," *OFC/NFOEC'09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, CA, Mar. 2009.
- [82] I. Cerutti, L. Valcarenghi, and P. Castoldi, "Power saving architectures for unidirectional WDM rings," *OFC/NFOEC'09*, San Diego, CA, March 2009.
- [83] S. Wong, L. Valcarenghi, S. Yen, D. Campelo, S. Yamashita, and L. Kazovsky, "Sleep mode for Energy Saving PONs: Advantages and Drawbacks", *Globalcom second International workshop on Green communication*, Nov. 2009.
- [84] Md. Shamim Ashan, Man Seop Lee, Shah Newaz, "Migration to the next generation optical access networks using hybrid WDM/TDM PON", *Journal of networks*, vol. 6, no. 1, Jan. 2011.
- [85] C. Lange and A. Gladisch, "Energy consumption of FTTH access networks," *OFC conference*, no. 1, pp. 22–26 Mar. 2009.
- [86] S. Goyal, Manjit Singh, "Performance Analysis of Optical Networks and their Improvement using Power Saving Method," *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, vol. 25, no. 6, Jul. 2011.
- [87] S. Aleksic, "Energy efficiency of electronic and optical network elements," *IEEE JSTQE*, vol. 17, no. 2, pp. 296–308, Mar.-Apr. 2011.
- [88] E. Trojer and P. Eriksson, "Power Saving Modes for GPON and VDSL," in *Proc. of 13th Euro. Conf. Netw. & Optical Commun. (NOC)*, Austria, Jun. 30 - Jul. 3, 2008.

- [89] L. Valcarenghi, D. Pham Van, P. Castoldi, "How to Save Energy in Passive Optical Networks," in *Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp.1–5, Jun. 2011.
- [90] *IEEE STD 802.3az-2010 (Amendment to IEEE STD 802.3-2008)*, pp. 1-302, Oct. 27, 2010.
- [91] She-Hwa Yen, *et al.*, "Photonic components for future fiber access networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 6, Aug. 2010.
- [92] R. S. Tucker, "Green Optical communications – Part II: Energy limitations in networks," *IEEE JSTQE*, vol. 17, no. 2, pp. 261–274, Mar.-Apr. 2011.
- [93] D. C. Kilper *et al.*, "Fundamental limits on energy use in optical networks," in *Proc. of ECOC*, pp. 1-6, Sept. 19-23, 2010.
- [94] L. Valcarenghi *et al.*, "Impact of modulation formats on ONU energy saving," in *Proc. of ECOC*, pp. 1-3, Sept. 19-23, 2010.
- [95] "GPON Power Conservation", *ITU-T G-series Recommendations – Supplement 45 (G.sup45)*, Mar. 2009.
- [96] W. Freude *et al.*, "Optically powered fiber networks," *Optics Express*, vol. 16, no. 26, pp. 21821–21834, Dec. 22, 2008.
- [97] R. Kubo *et al.*, "Study and demonstration of sleep and adaptive link rate control mechanisms for energy efficient 10G-EPON," *IEEE/OSA JOCN*, vol. 2, no. 9, pp.716–729, Sep. 2010.
- [98] Ahmad R. Dhaini, Pin-Han Ho, Gangxiang Shen, "Toward Green Next-Generation Passive Optical Networks," *IEEE Communications Magazine*, Nov. 2011.
- [99] S. Wong *et al.*, "Sleep Mode for Energy Saving PONs: Advantages and Drawbacks," in *Proc. IEEE GLOBECOM '09*, HI, Dec. 2009.
- [100] J. Mandin, "EPON Power Saving via Sleep Mode," http://www.ieee802.org/3/av/public/2008_09/3av_0809_mandin_4.pdf.
- [101] B. Schrenk *et al.*, "Energy-Efficient Optical Access Networks Supported by a Noise-Powered Extender Box," *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Elect.*, Aug. 2010.
- [102] B. Skubic and D. Hood, "Evaluation of ONU Power Saving Modes for Gigabit-Capable Passive Optical Networks," *IEEE Network*, vol. 25, no. 2, pp. 20–24, Mar/Apr. 2011.
- [103] S. S. W. Lee and A. Chen, "Design and Analysis of a Novel Energy Efficient Ethernet Passive Optical Network," *Proc. ICN '10*, French Alps, France, Apr. 2010.
- [104] S.-W. Wong *et al.*, "Demonstration of Energy Conserving TDM-PON with Sleep Mode ONU Using Fast Clock Recovery Circuit," in *Proc. OFC/NFOEC '10*, ser. OthW7, San Diego, CA, Mar. 2010.
- [105] L. Valcarenghi *et al.*, "Energy Efficiency in Optical Access Networks," *Italian Networking Wksp*, Cavalese, Italy, Jan. 2011.

- [106] J. Zhang and N. Ansari, "Toward Energy-Efficient 1GEPON and 10G-EPON with Sleep-Aware MAC Control and Scheduling," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 2, pp. S33–S38, Feb. 2011.
- [107] P. Venkata Krishna, K. Kalaiselvan, V. Saritha and Mohammad S. Obaidat, "Learning Automata-Based QoS Framework for Cloud IaaS," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, Jan. 2013.
- [108] M.S. Obaidat, G.I. Papadimitriou, A.S. Pomportsis, "Efficient fast learning automata," *Information Sciences* 157, pp. 121–133, 2003.
- [109] A.A. Economides : "Real-time traffic allocation using learning automata," in *Proceedings 1997 International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 4, pp. 3307-3312, Oct. 1997.
- [110] A.A. Economides, "Multiple response learning automata," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 26, no. 1, pp. 153-156, Febr. 1996.
- [111] A.A. Economides and Ath. Kehagias, "The STAR automaton: expediency and optimality properties," *submitted*.