



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη σχήματος μείωσης κατανάλωσης
ενέργειας για παθητικά οπτικά δίκτυα τύπου
XG-PON**

Development of Energy-Efficient Scheme
for XG-PON Passive Optical Networks

Γκαλιούρης Αθανάσιος

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Επικ. Καθηγήτρια, Μαλαματή Λούτα,
Λέκτορας βάσει Π.Δ. 407, Παναγιώτης Σαρηγιαννίδης

Κοζάνη, Οκτώβριος 2013

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	2
Κατάλογος εικόνων	5
Κατάλογος πινάκων.....	8
Πίνακας Συνοτομογραφιών	9
Πρόλογος.....	10
Περίληψη	11
Λέξεις κλειδιά	12
Abstract.....	13
Keywords	14
Ευχαριστίες.....	15
Διάρθρωση κειμένου	16
Κεφάλαιο 1: Οπτικές ίνες & οπτικά δίκτυα.....	18
1.1 Δομή οπτικής ίνας	19
1.2 Δείκτης Διάθλασης.....	19
1.3 Εκπομπή και μετάδοση σε οπτικές ίνες.....	19
1.3.1 Πολύτροπες ίνες	20
1.3.2 Μονότροπες ίνες.....	20
1.3.3 Οπτικές ίνες ειδικού σκοπού.....	20
1.4 Τρόπος λειτουργίας οπτικής ίνας.....	21
1.5 Αριθμητικό άνοιγμα οπτικής ίνας	22
1.6 Εφαρμογές οπτικών ινών.....	22
1.6.1 Οπτικές ίνες στις τηλεπικοινωνίες	22
1.6.2 Οπτικές ίνες σε δίκτυα αισθητήρων	22
1.6.3 Άλλες εφαρμογές οπτικών ινών	23
1.7 Πλεονεκτήματα οπτικών ινών.....	24
1.8 Μειονεκτήματα οπτικών ινών.....	25
1.9 Οπτικά δίκτυα	26
1.10 Στοιχεία οπτικού δικτύου.....	26
1.10.1 Πομπός οπτικού σήματος.....	26
1.10.2 Δέκτης οπτικού σήματος.....	28
1.10.3 Σύνδεσμοι SC.....	29
1.10.4 Σύνδεσμοι ST	29
1.10.5 Μόνιμοι σύνδεσμοι (splices)	29
1.10.6 Προσωρινοί σύνδεσμοι (connectors).....	30

1.11	Πολύπλεξη διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) σε οπτικά δίκτυα	30
1.12	Αρχιτεκτονική οπτικού δικτύου	31
1.13	Οπτικά δίκτυα διανομής.....	32
1.13.1	Διαμοιραζόμενης ίνας.....	32
1.13.2	Άμεσης ίνας.....	32
1.14	Αρχιτεκτονική δικτύων FTTx	32
1.15	Οπτικά δίκτυα πρόσβασης	34
1.15.1	Ενεργό Οπτικό Δίκτυο (AON).....	34
1.15.2	Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON)	36
Κεφάλαιο 2:	Παθητικό οπτικό δίκτυο τύπου XG-PON	38
2.1	Αρχιτεκτονική δικτύου XG-PON	39
2.2	Κατανομή μηκών κύματος σε δίκτυα XG-PON	39
2.3	Λόγος διακλάδωσης	41
2.4	Δομή επιπέδων του XG-PON	42
2.5	Απόσταση οπτικής ίνας	43
2.6	Αναγνωριστικό κατανομής.....	43
2.7	Δομή επιπέδου XGTC	44
2.7.1	Υπο-επίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών XGTC	45
2.7.2	Υπο-επίπεδο πλαισίωσης XGTC	46
2.7.3	Υπο-επίπεδο προσαρμογής φυσικού μέσου XGTC	46
2.8	Αρχιτεκτονική πολύπλεξης με διαίρεση χρόνου	46
2.9	Δομή ωφέλιμου πλαισίου XGTC	48
2.10	Δομή φυσικού πλαισίου downstream (PHY frame)	49
2.11	Δομή upstream PHY πλαισίου και upstream PHY ριπής	50
2.12	Διαχείριση ενέργειας σε μια ONU.....	50
Κεφάλαιο 3:	Εισαγωγή στο OPNET Modeler	57
3.1	Παράθυρο διαχείρισης εργασιών (Project management)	58
3.2	Παράθυρο προτιμήσεων του Modeler (Modeler preferences)	60
3.3	Επεξεργαστές του OPNET	61
3.3.1	Επεξεργαστής εργασιών (Project Editor)	62
3.3.2	Επεξεργαστής Κόμβων (Node Editor)	63
3.3.3	Επεξεργαστής διεργασιών (Process Editor)	64
3.3.4	Επεξεργαστής ζεύξεων (Link Editor).....	66
3.3.5	Επεξεργαστής μορφής πακέτων (Packet Format Editor)	67
3.3.6	Επεξεργαστής ICI (ICI editor)	68
3.3.7	Επεξεργαστής PDF (PDF editor).....	68
3.3.8	Επεξεργαστής Probe (Probe Editor)	69

3.4	Περιγητής αποτελεσμάτων (Simulation Results Browser).....	71
3.5	Περιγητής κινούμενης εικόνας (Animation viewer)	72
3.6	Διεπαφή προγραμματισμού OPNET	73
3.7	Κατηγοριοποίηση OPNET API	73
3.8	APIs πυρήνα/ Διαδικασίες πυρήνα (KPs).....	74
3.9	Συναρτήσεις κατανομών.....	74
3.10	Δομές πακέτων	75
3.11	Διαχείριση ουράς και δευτερεύουσας ουράς.....	75
3.12	Εξαγωγή στατιστικών	76
3.13	Προδιαγραφές Proto-C.....	77
Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη σχήματος μείωσης κατανάλωσης ενέργειας σε XG-PON δίκτυα.....		78
4.1	Μορφή ζεύξεων επικοινωνίας	79
4.2	Μορφή υποστηριζόμενων πακέτων	79
4.3	Δομή μοντέλου OLT	81
4.4	Δομή μοντέλου Splitter	87
4.5	Δομή μοντέλου ONU	89
4.5.1	Απλούστερο μοντέλο ONU	92
4.5.2	Μοντέλο Εξοικονόμησης ενέργειας.....	95
4.5.3	Εξοικονόμηση ενέργειας με πρόβλεψη επόμενης τιμής.....	100
4.5.4	Μοντέλο εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση Double Exponential Smoothing	101
4.5.5	Μοντέλο εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση Triple Exponential Smoothing	105
4.6	Ανάλυση δικτύου και σεναρίων προσομοίωσης	110
4.6.1	Δίκτυο δύο συνδεδεμένων ONUs	110
4.6.2	Δίκτυο οκτώ συνδεδεμένων ONUs	113
Κεφάλαιο 5: Αποτίμηση – Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις.....		117
5.1	Αποτίμηση	118
5.2	Συμπεράσματα.....	127
5.3	Μελλοντικές επεκτάσεις	128
Βιβλιογραφία		130

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. 1: Δομή οπτικής ίνας	19
Εικόνα 1. 2: Διάδοση σε πολύτροπη ίνα.....	20
Εικόνα 1. 3: Διάδοση σε μονότροπη ίνα.....	20
Εικόνα 1. 4: Ολική ανάκλαση στον πυρήνα	21
Εικόνα 1. 5: Αναπαράσταση ενός frisbee με οπτική ίνα	24
Εικόνα 1. 6: Οπτικοί πομποί LED.....	27
Εικόνα 1. 7: Οπτικός πομπός Laser	28
Εικόνα 1. 8: Μορφή συνδέσμων SC και ST.....	29
Εικόνα 1. 9: Διαφορετικά μήκη κύματος στην ίδια οπτική ίνα	30
Εικόνα 1. 10: Διαφορές στις τεχνολογίες FTTx.....	33
Εικόνα 1. 11: Τοπολογία ενεργού οπτικού δικτύου (AON).....	35
Εικόνα 1. 12: Τοπολογία παθητικού οπτικού δικτύου (PON).....	36
Εικόνα 2. 13: Διάφορες αρχιτεκτονικές XG-PON δικτύων	40
Εικόνα 2. 14: Κατανομή μηκών κύματος	41
Εικόνα 2. 15: Μεγαλύτερη διακλάδωση στο υψηλότερο επίπεδο του δικτύου πρόσβασης	41
Εικόνα 2. 16: Μεγαλύτερη διακλάδωση στο χαμηλότερο επίπεδο του δικτύου πρόσβασης.....	42
Εικόνα 2. 17: Downstream SDU mapping	44
Εικόνα 2. 18: Upstream SDU mapping	45
Εικόνα 2. 19: Downstream πολύπλεξη σε XG- PON	47
Εικόνα 2. 20: Upstream πολύπλεξη σε XG-PON	48
Εικόνα 2. 21: Δομή XGTC ωφέλιμου πλαισίου.....	49
Εικόνα 2. 22: Downstream PHY πλαίσιο.....	49
Εικόνα 2. 23: Δομή upstream PHY οπτικής ριπής	50
Εικόνα 2. 24: Διάγραμμα καταστάσεων ONU και μεταβάσεων	53
Εικόνα 2. 25: Εναλλαγή ενεργών καταστάσεων - καταστάσεων ύπνωσης	54
Εικόνα 3. 26: Αρχική οθόνη OPNET Modeler	57
Εικόνα 3. 27: Παράθυρο επιβεβαίωσης καταλόγου μοντέλου	58
Εικόνα 3. 28: Άνοιγμα υπάρχοντος project.....	59
Εικόνα 3. 29: Επεξεργαστής προτιμήσεων	60
Εικόνα 3. 30: Άποψη του επεξεργαστή εργασιών	63
Εικόνα 3. 31: Άποψη του επεξεργαστή κόμβων	64
Εικόνα 3. 32: Άποψη του επεξεργαστή διεργασιών	65
Εικόνα 3. 33: Άποψη του επεξεργαστή ζεύξεων.....	66
Εικόνα 3. 34: Άποψη του επεξεργαστή μορφής πακέτου	67
Εικόνα 3. 35: Άποψη του επεξεργαστή ICI	68
Εικόνα 3. 36: Άποψη επεξεργαστή PDF	69

Εικόνα 3. 37: Άποψη του probe editor.....	70
Εικόνα 3. 38: Άποψη του simulation results browser.....	71
Εικόνα 3. 39: Άποψη του animation viewer	72
Εικόνα 3. 40: Κώδικας εξαγωγής στατιστικών στον επεξεργαστή διεργασιών	76
Εικόνα 4. 41: Μορφή του downstream XG_PON_OLT_Frame	80
Εικόνα 4. 42: Μορφή ONU_Frame	80
Εικόνα 4. 43: Δομή μοντέλου OLT.....	81
Εικόνα 4. 44: Ιδιότητες μονάδας Source.....	82
Εικόνα 4. 45: Δομή πακέτου δεδομένων OLT.....	82
Εικόνα 4. 46: Διάγραμμα καταστάσεων OLT_Process	83
Εικόνα 4. 47: Κώδικας κατάστασης From_OLT.....	84
Εικόνα 4. 48: Κώδικας κατάστασης Send_Frame.....	85
Εικόνα 4. 49: Κώδικας κατάστασης Send_Frame.....	86
Εικόνα 4. 50: Κώδικας κατάστασης From_ONU	86
Εικόνα 4. 51: Δομή μοντέλου κόμβου Splitter.....	87
Εικόνα 4. 52: Δομή επεξεργαστή Splitter	88
Εικόνα 4. 53: Κώδικας κατάστασης From_OLT.....	89
Εικόνα 4. 54: Μοντέλο κόμβων ONU.....	90
Εικόνα 4. 55: Ιδιότητες γεννήτριας πακέτων Source.....	91
Εικόνα 4. 56: Διάγραμμα καταστάσεων απλής ONU	92
Εικόνα 4. 57: Κώδικας κατάστασης From_ONU	93
Εικόνα 4. 58: Τμήμα κώδικα κατάστασης From_OLT #1.....	94
Εικόνα 4. 59: Τμήμα κώδικα κατάστασης From_OLT #2.....	95
Εικόνα 4. 60: Διάγραμμα καταστάσεων ONU με εξοικονόμηση ενέργειας	96
Εικόνα 4. 61: Τμήμα κώδικα εξόδου από την κατάσταση Active Free.....	97
Εικόνα 4. 62: Τμήμα κώδικα Asleep επεξεργασίας downstream φόρτου	99
Εικόνα 4. 63: Χρήση του Double Exponential Smoothing	102
Εικόνα 4. 64: Γράφημα πραγματικής - εκτιμώμενης τιμής της μεθόδου DES.....	103
Εικόνα 4. 65: Διάγραμμα σφάλματος εκτιμώμενης τιμής Double Exponential Smoothing	104
Εικόνα 4. 66: Γραμμή κώδικα προγραμματισμού χρονικού διαστήματος παραμονής	105
Εικόνα 4. 67: Σημείο εισαγωγής αλγορίθμου TES για την Listen λειτουργία.....	107
Εικόνα 4. 68: Γράφημα πραγματικής – εκτιμώμενης TES τιμής Listen λειτουργίας.....	108
Εικόνα 4. 69: Διάγραμμα σφάλματος εκτιμώμενης τιμής Triple Exponential Smoothing.....	109
Εικόνα 4. 70: Άποψη δικτύου με δύο οπτικές μονάδες.....	110
Εικόνα 4. 71: Άποψη δικτύου με οκτώ οπτικές μονάδες.....	113
Εικόνα 4. 72: Άποψη Splitter με 8 ONUs	114
Εικόνα 4. 73: Δομή downstream πλαισίου για 8 ONUs	115

Εικόνα 5. 74: Κατανάλωση ενέργειας για 2 ONUs	118
Εικόνα 5. 75: Διάγραμμα μέσης καθυστέρησης πακέτου ONU #2	120
Εικόνα 5. 76: Διάγραμμα αριθμού εισόδων στην κατάσταση Asleep ONU #1.....	122
Εικόνα 5. 77: Συνολική κατανάλωση δικτύου με οκτώ ONUs	123
Εικόνα 5. 78: Συνολική μέση καθυστέρηση δικτύου οκτώ ONUs	124
Εικόνα 5. 79: Ευκαιρίες εισόδου Asleep σε μεταβαλλόμενο φόρτο	125
Εικόνα 5. 80: Αριθμός εισόδου σε Asleep για κάθε σενάριο	126

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. 1: Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα χρήσης οπτικών ινών	25
Πίνακας 1. 2: Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα ONU	37
Πίνακας 2. 3: Στοιβα επιπέδων και πρωτοκόλλων XG-PON	43
Πίνακας 2. 4: Συγκεντρωτικός πίνακας timers ONU	55
Πίνακας 2. 5: Συγκεντρωτικός πίνακας καταστάσεων ONU	56
Πίνακας 4. 6: Κατανάλωση ενέργειας ONU σε Watt ανά κατάσταση	92
Πίνακας 4. 7: Interarrival χρόνοι upstream δεδομένων.....	112
Πίνακας 4. 7: Χαρακτηρηστικά – παραδοχές δικτύου με 2 ONU	112
Πίνακας 4. 7: Χαρακτηρηστικά – παραδοχές δικτύου με 8 ONU	116

Πίνακας Συντομογραφιών

Συντομογραφία	Σημασιολογία
AON	Active Optical Network
APD	Avalanche Photo Diode
API	Application Programming Interface
ATM	Asynchronous Transfer Mode
Bps	Bits per second
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DES	Double Exponential Smoothing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EMA	Effective Medium Approximations
FDM	Frequency Division Multiplexing
FTTx	Fiber to the x
HeNe	Helium Neon
ICI	Interface Control Information
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LASER	Light Amplification by stimulated Emission off Radiation
LED	Light emitting Diode
NA	Numerical Aperture
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Terminal
OMCI	ONT Management and Control Interface
ONU	Optical Network Unit
PDF	Probability Density Function
PIN	Positive Intrinsic Negative
PON	Passive Optical Network
QoS	Quality of Service
RR	Round Robin
SDU	Service Data Unit
TDM	Time Division Multiplexing
TES	Triple Exponential Smoothing
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XG-PON	Gigabit Passive Optical Network

Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση και αποτίμηση με μεθόδους προσομοίωσης ενός παθητικού οπτικού δικτύου τύπου XG-PON. Το περιβάλλον προσομοίωσης στο οποίο υλοποιήθηκε το δίκτυο είναι το OPNET Modeler 14.5A. Το δίκτυο, καθώς και όλα τα σενάρια προσομοίωσης αναπτύχθηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει το πρότυπο G.987 της ITU.

Εμπνευστής και υπεύθυνος του θέματος ήταν ο Δρ. Παναγιώτης Σαρηγιαννίδης, ενώ η υλοποίηση ανατέθηκε στον Γκαλιούρη Αθανάσιο.

Περίληψη

Στην σημερινή εποχή, όπου με την ραγδαία αύξηση της χρήσης του διαδικτύου και με τις απαιτήσεις των χρηστών σε εύρος ζώνης να έχουν αυξηθεί δραματικά, δημιουργήθηκε η ανάγκη αναζήτησης νέων τεχνολογιών ευρυζωνικής επικοινωνίας. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα, και πιο συγκεκριμένα τα δίκτυα τύπου XG-PON υπόσχονται να καλύψουν τις ανάγκες αυτές στο τμήμα του δικτύου πρόσβασης στον χρήστη (τελευταίο μίλι). Ωστόσο, η ενεργειακή συμπεριφορά του δικτύου XG-PON δεν καθόριζε δυναμικά στοιχεία ρυθμίσεων, όπως τον χρόνο ύπνου των οπτικών μονάδων δικτύου, με αποτέλεσμα η ανάγκη για εξεύρεση νέων τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας να γίνει απαραίτητη για την αποδοτική και αποτελεσματική λειτουργία του.

Ένα XG-PON δίκτυο αποτελείται από ένα οπτικό τερματικό γραμμής (OLT), έναν παθητικό διακλαδωτή (Splitter) και από μια ή περισσότερες οπτικές μονάδες δικτύου (ONUs). Το ενδιαφέρον σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας εστιάζεται στις ONUs, οι οποίες μπορούν σε περιόδους που υπάρχει απουσία φόρτου κίνησης δεδομένων να απενεργοποιούν κάποια δομικά τους στοιχεία που καταναλώνουν περιττή ενέργεια. Έτσι λοιπόν, έπειτα από προσομοίωση ενός δικτύου XG-PON με διαφορετικά σενάρια φόρτου κίνησης και πολλαπλές ONUs προτείνεται μια αποδοτική εναλλαγή των καταστάσεων ύπνωσης, πλήρους ή μερικής. Το ιδανικό χρονικό διάστημα ύπνωσης μιας επερχόμενης κατάστασης Ύπνωσης προβλέπεται, από τους αλγόριθμους *Double Exponential Smoothing* και *Triple Exponential Smoothing*.

Λέξεις κλειδιά

Παθητικά οπτικά δίκτυα, XG-PON, πλήρης λειτουργία ύπνωσης, μερική λειτουργία ύπνωσης, προσομοίωση, OPNET Modeler, αλγόριθμοι πρόβλεψης επόμενων τιμών, Double Exponential Smoothing, Triple Exponential Smoothing

Abstract

Nowadays, the need of huge bandwidth provisioning in the final user has been dramatically increased due to where the rapidly increasing use of the Internet and the hungry-bandwidth services. and with the requirements of users in bandwidth have increased dramatically, the need to seek new technologies of broadband communication is been created. Passive optical networks, and more specifically the XG-PON system, promise to meet these needs on the part of the user access network (last mile). However, even though the standard defines the operation of the suggested energy efficient (sleep) techniques, there is no specific recommendation towards the sleep time determination. Hence, the need of novel energy saving techniques becomes crucial.

An XG-PON network consists of an optical line terminal (OLT), a passive switch (Splitter) and multiple optical network units (ONUs). The majority of the proposed energy efficient technique focus on the ONU, which is able to be set in sleep mode, by turning off one or more components, in order to reduce unnecessary power consumption. In this Thesis an XG-PON network is modeled and assesses via simulation methods employing different traffic loads scenarios and multiple ONUs, where an efficient sleep mechanism between active and sleep states, Listen and Asleep, is proposed. The ideal sleep period of an upcoming Listen or Asleep state, is forecasted adopting the Double Exponential Smoothing Triple Exponential Smoothing algorithms.

Keywords

Passive optical networks, XG-PON networks, cyclic sleep mode, doze mode, simulating, OPNET Modeler, Smoothing Algorithms, Double Exponential Smoothing, Triple Exponential Smoothing

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη, για την εμπιστοσύνη στο πρόσωπο μου, με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την συμβουλή και την καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για τις θυσίες τους και την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Διάρθρωση κειμένου

Στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφονται γενικές και εισαγωγικές έννοιες σχετικά με τις οπτικές ίνες και τα οπτικά δίκτυα καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνολογιών αυτών. Αναλύονται επίσης οι διάφοροι τύποι και οι αρχιτεκτονικές των οπτικών δικτύων καθώς και η τεχνική πολύπλεξης WDM.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται εκτενέστερα το δίκτυο XG-PON καθώς και η αρχιτεκτονική του, οι βασικές απαιτήσεις του προτύπου και η δομή επιπέδων που χρησιμοποιείται. Έπειτα γίνεται αναφορά στην διαχείριση της ενέργειας της ONU και οι ενεργειακές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί μια ONU.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το περιβάλλον προσομοίωσης OPNET Modeler, που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας. Παρουσιάζονται διάφοροι παρεχόμενοι editors, οι συναρτήσεις κατανομών, οι δομές των πακέτων και των ουρών καθώς και η γλώσσα προγραμματισμού Proto-C.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύεται η αρχιτεκτονική των δικτύων που προσομοιώθηκαν, τα σενάρια και παράμετροι που επιλέχθηκαν. Παρουσιάζεται επίσης και η δομή των μεταδιδόμενων πακέτων, των ζεύξεων επικοινωνίας, του οπτικού τερματικού γραμμής, του παθητικού διακλαδωτή και των οπτικών μονάδων δικτύου.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα παραγόμενα γραφήματα και οι μετρικές που υπολογίσθηκαν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων, εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων καθώς και αναφορά στις μελλοντικές επεκτάσεις που μπορούν να προστεθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 1: Οπτικές ίνες & οπτικά δίκτυα

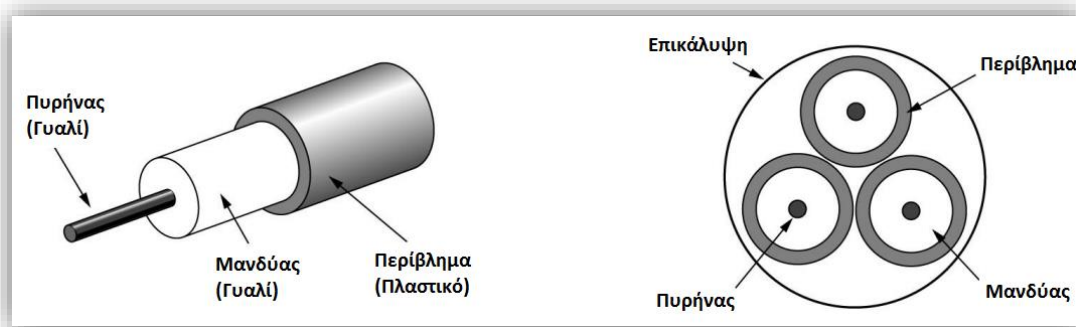
Tο 1966 διαπιστώθηκε ότι οι οπτικές ίνες από γυαλί ήταν κατάλληλοι κυματοδηγοί φωτεινής ακτινοβολίας. Το 1970 παρήχθη οπτική ίνα για πρακτικές εφαρμογές. Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτοί κυλινδρικοί γυάλινοι διηλεκτρικοί κυματοδηγοί με διάμετρο μικρότερη των 8μm. Είναι διαφανείς και εύκαμπτες και κατασκευάζονται από εξαιρετικά καθαρό γυαλί, με τρόπο ώστε να αντανakλούν το φως προς τον άξονά τους προκειμένου να το παγιδεύουν στο εσωτερικό της ίνας. Με τις ακτίνες λέιζερ, ένα σήμα μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου οπτικών ινών σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 χλμ. χωρίς ενδιάμεση ενίσχυση. Αυτό σημαίνει ότι οι οπτικές ίνες είναι πιο αποτελεσματικές από τα χάλκινα καλώδια, έτσι με ένα μόνο ζεύγος οπτικών ινών μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα εκατοντάδες τηλεφωνικές συνδιαλέξεις.

Η κατασκευή πρακτικών επικοινωνιακών συστημάτων οπτικής ίνας αποτέλεσε μία από τις μεγαλύτερες προόδους στον τομέα την μετάδοσης δεδομένων. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που οδήγησαν στην χρησιμοποίηση

των οπτικών δικτύων είναι η δραματική αύξηση των αναγκών για χωρητικότητα μετάδοσης, η εξάντληση της χωρητικότητας των ήδη εγκατεστημένων παραδοσιακών δικτύων, καθώς και η ωρίμανση της σχετικής οπτικής τεχνολογίας και συγκεκριμένα η κατασκευή LASER ρυθμιζόμενου μήκους κύματος, πολυπλεκτών/αποπολυπλεκτών, οπτικών ενισχυτών οπτικών διασυνδέσεων (optical cross connects - OXCs).

1.1 Δομή οπτικής ίνας

Η οπτική ίνα αποτελείται από ένα πολύ λεπτό γυάλινο κύλινδρο που αποτελεί τον πυρήνα (core) της ίνας, μέσω του οποίου μεταφέρεται το φως. Ο πυρήνας περικλείεται από ένα ομόκεντρο επίπεδο γυαλιού, τον μανδύα (cladding), ο οποίος προστατεύεται από ένα λεπτό πλαστικό περίβλημα (jacket) (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1. 1: Δομή οπτικής ίνας

1.2 Δείκτης Διάθλασης

Ο δείκτης διάθλασης είναι ένας τρόπος μέτρησης της διαπερατότητας ενός υλικού από το φως. Το φως ταξιδεύει ταχύτερα στο κενό συγκριτικά με οποιοδήποτε άλλο μέσο διάδοσης. Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι 300.000 km/sec. Ο δείκτης διάθλασης ενός μέσου διάδοσης υπολογίζεται διαιρώντας την ταχύτητα του φωτός στο κενό με την ταχύτητα του φωτός στο συγκεκριμένο μέσο διάδοσης. Ως εκ τούτου, επειδή ο δείκτης διάθλασης προκύπτει από τον λόγο δύο ταχυτήτων είναι αδιάστατος αριθμός, με τον δείκτη διάθλασης του κενού να ισούται με 1 εξ' ορισμού. Μια τυπική τιμή του δείκτη διάθλασης του μανδύα μια ίνας είναι 1.52, και του πυρήνα 1.62. Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης διάθλασης ενός μέσου διάδοσης τόσο πιο αργά διαδίδεται το φως στο συγκεκριμένο μέσο. Έτσι λοιπόν ένα σήμα για να ταξιδέψει 1000 χιλιόμετρα σε μια ίνα χρειάζονται μόλις 5 msec.

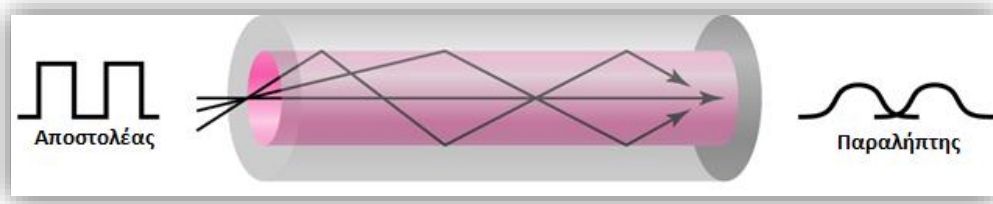
1.3 Εκπομπή και μετάδοση σε οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες διαφοροποιούνται, από τον τρόπο μετάδοσης του σήματος σε αυτές. Η βασική διάκριση είναι μεταξύ των πολύτροπων και μονότροπων

οπτικών ινών, υπάρχουν βέβαια και κάποιες οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται για ειδικούς σκοπούς.

1.3.1 Πολύτροπες ίνες

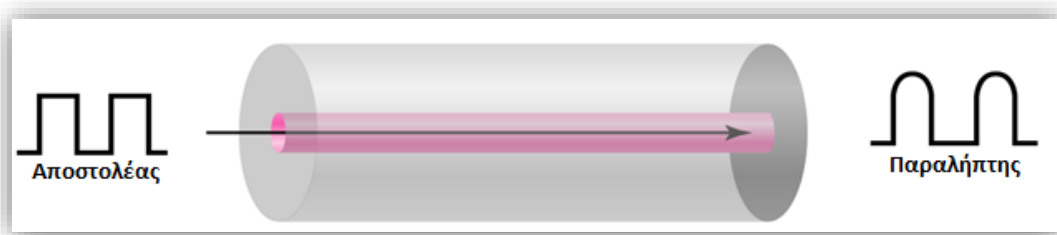
Μια πολύτροπη ίνα επιτρέπει ταυτόχρονη μετάδοση πολλών ακτινών φωτός μέσα στον πυρήνα της ίνας. Οι πολύτροπες ίνες ήταν οι πρώτες που βρήκαν εμπορική χρήση. Συνήθως χρησιμοποιούνται για κοντινές αποστάσεις, σε περιοχές αυξημένης ζήτησης επειδή μπορούν να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα πολλαπλούς χρήστες.



Εικόνα 1. 2: Διάδοση σε πολύτροπη ίνα

1.3.2 Μονότροπες ίνες

Μια μονότροπη ίνα επιτρέπει τη μετάδοση μόνο μιας ακτίνας φωτός στον πυρήνα της οπτικής ίνας. Οι μονότροπες ίνες έχουν μικρότερο πυρήνα από τις πολύτροπες και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα καθώς και να μεταδίδουν ευθύγραμμα το οπτικό σήμα αλλά και σε μεγαλύτερες αποστάσεις (περισσότερο από 600 χιλιόμετρα).



Εικόνα 1. 3: Διάδοση σε μονότροπη ίνα

1.3.3 Οπτικές ίνες ειδικού σκοπού

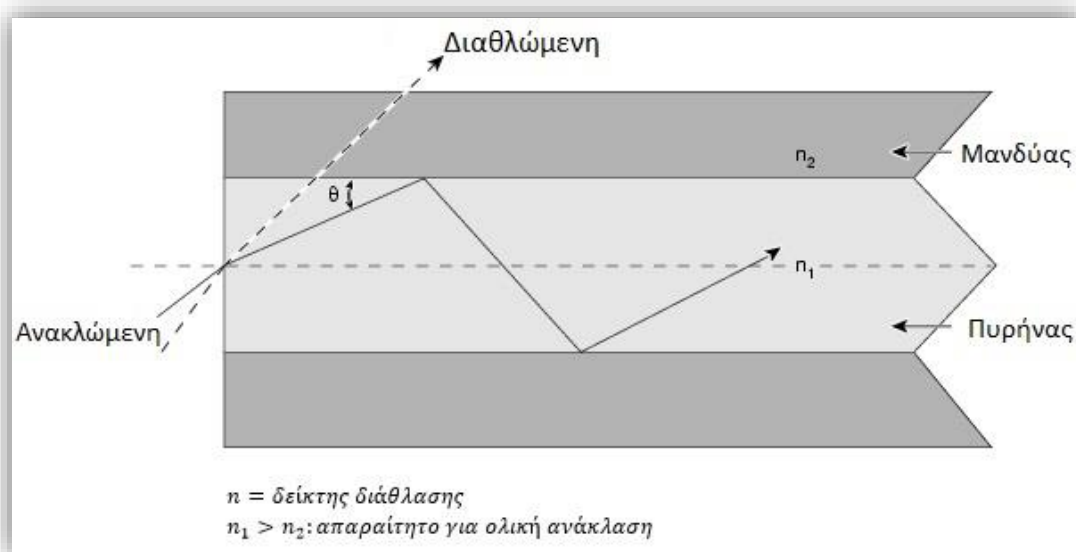
Κατασκευάζονται και κάποιες οπτικές ίνες ειδικού σκοπού με μη-κυλινδρικό πυρήνα με ή χωρίς μανδύα επικάλυψης, συνήθως με ελλειπτική ή ορθογώνια διατομή. Τέτοιες ίνες είναι οι ίνες διατήρησης πόλωσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε οπτικούς αισθητήρες λόγω της ιδιότητας να διατηρούν την πόλωση του φωτός. Επίσης κατασκευάζονται και ίνες φωτονίου – κρυστάλλων οι οποίες χρησιμοποιώντας τον δείκτη διακύμανσης εκμεταλλεύονται και τις

επιδράσεις της περίθλασης, πέραν από την ολική ανάκλαση, για να περιοριστεί το φως στον πυρήνα της ίνας.

1.4 Τρόπος λειτουργίας οπτικής ίνας

Η μετάδοση του σήματος μέσα σε μια οπτική ίνα επιτυγχάνεται λόγω του φαινομένου της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Ο πυρήνας χαρακτηρίζεται από ένα μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης σε σχέση με τον μανδύα. Ο λόγος των δύο αυτών δεικτών διάθλασης καθορίζει την κρίσιμη γωνία θ_c . Όταν μια ακτίνα φωτός εισερχόμενη στον πυρήνα πλησιάσει στην επιφάνεια μεταξύ του πυρήνα και του μανδύα με γωνία μεγαλύτερη από την θ_c , η ακτίνα φωτός ανακλάται ολικά μέσα στον πυρήνα (Εικόνα 1.4). Εφόσον κάθε ακτίνα φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια μεταξύ του πυρήνα και του μανδύα με γωνία μεγαλύτερη από θ_c ανακλάται εσωτερικά, πολλές διαφορετικές ακτίνες φωτός στον πυρήνα θα ανακλώνται με διαφορετικές γωνίες.

Υπάρχει μια μέγιστη γωνία από τον άξονα του πυρήνα της ίνας με την οποία η ακτίνα φωτός πρέπει να εισέλθει στην ίνα προκειμένου να παγιδευτεί και να διαδοθεί μέσα στην ίνα. Το ημίτονο της μέγιστης γωνίας ονομάζεται αριθμητικό άνοιγμα της ίνας (NA).



Εικόνα 1. 4: Ολική ανάκλαση στον πυρήνα

1.5 Αριθμητικό άνοιγμα οπτικής ίνας

Το αριθμητικό άνοιγμα μιας οπτικής ίνας είναι ένας αδιάστατος αριθμός, που προσδιορίζει το εύρος των αποδεκτών γωνιών εισαγωγής του φωτός στον πυρήνα της ίνας. Αποδεκτές γωνίες είναι αυτές κατά τις οποίες επιτυγχάνεται ολική εσωτερική ανάκλαση και κατά συνέπεια διάδοση του σήματος στο εσωτερικό της ίνας. Η παρακάτω εξίσωση υπολογίζει το αριθμητικό άνοιγμα μιας οπτικής ίνας:

$$NA = n_0 \sin \theta_i = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2},$$

όπου θ_i η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας στο πυρήνα της ίνας, n_{core} ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα της ίνας, και n_{clad} ο δείκτης διάθλασης του μανδύα.

1.6 Εφαρμογές οπτικών ινών

1.6.1 Οπτικές ίνες στις τηλεπικοινωνίες

Οι οπτικές ίνες είναι ιδιαίτερα επωφελείς για τις υπεραστικές επικοινωνίες, επειδή το φως διαδίδεται μέσω της ίνας με μικρή εξασθένηση σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά καλώδια. Αυτό επιτρέπει κάλυψη μεγάλων αποστάσεων με λίγους επαναλήπτες. Επιπλέον, το σήμα φωτός ανά κανάλι στην ίνα με κατάλληλη διαμόρφωση μπορεί να διαδοθεί μέχρι και με 111 Gbps (σύμφωνα με την Nippon Telegraph and Telephone Corporation), αν και στα ανεπτυγμένα συστήματα σήμερα επιτυγχάνονται από 10 μέχρι 40 Gbps. Κάθε ίνα μπορεί να μεταφέρει πολλά ανεξάρτητα κανάλια, κάθε ένα χρησιμοποιώντας διαφορετικό μήκος κύματος φωτός, ππολύπλεξη διαίρεσης μήκους κύματος (WDM).

Το 2011 επιτεύχθηκε εύρος ζώνης σε ένα ενιαίο πυρήνα 101 Tbps (370 κανάλια στα 273 Gbps το κάθε ένα). Το εύρος για μια ίνα πολλαπλών πυρήνων τον Ιανουάριο του 2013 ήταν 1.05 petabits ανά δευτερόλεπτο.

Για εφαρμογές μικρών αποστάσεων, όπως ένα δίκτυο σε ένα κτίριο γραφείων, η καλωδίωση οπτικών ινών μπορεί να εξοικονομήσει χώρο στους αγωγούς καλωδίων. Αυτό επιτυγχάνεται επειδή μια ενιαία ίνα μπορεί να μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από ότι τα ηλεκτρικά καλώδια, όπως καλώδια Ethernet κατηγορίας 5 που συνήθως “τρέχουν” με 100 Mbit/s ή 1 Gbit/s ταχύτητες.

1.6.2 Οπτικές ίνες σε δίκτυα αισθητήρων

Οι ίνες έχουν πολλές εφαρμογές για ασύρματη αίσθηση. Ανάλογα με την εφαρμογή, μια ίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί λόγω του μικρού μεγέθους, ή επειδή δεν απαιτεί ηλεκτρική τροφοδοσία, συνήθως σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, ή επειδή πολλαπλοί αισθητήρες μπορούν να στείλουν δεδομένα κατά μήκος μιας ίνας χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος για κάθε αισθητήρα.

Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες για να μετρηθεί η τάση, η θερμοκρασία, η πίεση και άλλες ποσότητες, τροποποιώντας μια ίνα με κατάλληλο τρόπο μπορεί επίσης να μετρηθεί και η ένταση, η φάση, η πόλωση, το μήκος κύματος ή ο χρόνος διέλευσης του φωτός στην ίνα. Οι αισθητήρες για την ένταση του φωτός είναι οι απλούστεροι, εφόσον απαιτούνται μόνο μια απλή πηγή και ένας ανιχνευτής. Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο χαρακτηριστικό γνώρισμα των εν λόγω αισθητήρων είναι ότι μπορούν, αν κριθεί απαραίτητο, να παρέχουν κατανομημένη αίσθηση σε αποστάσεις μέχρι ενός μέτρου.

Κάποιες χρήσεις οπτικών ινών αισθητήρων περιλαμβάνουν εφαρμογές σε προηγμένα συστήματα ασφαλείας και ανίχνευσης κίνησης. Το φως μεταδίδεται κατά μήκος ενός καλωδίου οπτικών ινών αισθητήρων που τοποθετείται σε συγκεκριμένα σημεία παρακολούθησης. Το επιστρεφόμενο οπτικό σήμα μετατρέπεται και υφίσταται ψηφιακή επεξεργασία για να ανιχνευτούν τυχόν διαταραχές και να ενεργοποιηθεί κάποιος συναγερμός, σε περίπτωση εισβολής.

1.6.3 Άλλες εφαρμογές οπτικών ινών

Οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές φωτισμού, χρησιμοποιούνται ως οδηγοί φωτός σε ιατρικές και άλλες εφαρμογές όπου χρειάζεται έντονη ρίψη φωτός σε συγκεκριμένες επιφάνειες. Οπτικές ίνες επίσης χρησιμοποιούνται και για διακοσμητικές εφαρμογές, πιο συγκεκριμένα σε επιγραφές, στην τέχνη, σε παιχνίδια και σε τεχνητά χριστουγεννιάτικα δέντρα. Διάσημοι οίκοι κοσμημάτων χρησιμοποιούν οπτικές ίνες για να φωτίζουν τα διαμάντια από πολλές διαφορετικές οπτικές γωνίες.

Οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται επίσης και στην οπτική απεικόνιση. Μια συνεκτική δέσμη ίνας χρησιμοποιείται, μερικές φορές μαζί με φακούς, σε μια λεπτή συσκευή απεικόνισης που ονομάζεται *ενδοσκοπείο*, για προβολή αντικείμενων μέσω μιας μικρής οπής. Κάποιες από τις κύριες εφαρμογές ενδοσκοπίων είναι:

- *Ιατρικά ενδοσκόπια* χρησιμοποιούνται για μικρές εξερευνητικές διεισδύσεις ή χειρουργικές επεμβάσεις.
- *Βιομηχανικά ενδοσκόπια (fiberscope ή borescope)* χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση οτιδήποτε είναι δύσκολο να προσεγγιστεί, όπως ένας κινητήρας εσωτερικού χώρου κάποιου αεροσκάφους.
- Πολλά *μικροσκόπια* χρησιμοποιούν πηγές φωτός οπτικών ινών για να παρέχουν πιο έντονο φωτισμό των δειγμάτων που μελετούνται.

Στα Φασματοσκοπία, δέσμες οπτικών ινών μεταδίδουν φως από ένα μετρητή φάσματος σε μια ουσία που δεν μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στον μετρητή φάσματος, προκειμένου να αναλυθεί η σύνθεση της.

Μια ενισχυμένη οπτική ίνα με ορισμένες σπάνιες γαίες όπως το έρβιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο κέρδους για ένα λέιζερ ή για έναν οπτικό ενισχυτή. Τέτοιου είδους οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενίσχυση σημάτων.



Εικόνα 1. 5: Αναπαράσταση ενός frisbee με οπτική ίνα

1.7 Πλεονεκτήματα οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες φαίνεται να είναι σήμερα η καλύτερη λύση στα μέσα μετάδοσης και αυτό γιατί τα πλεονεκτήματα, που παρουσιάζουν, σε σχέση με τα άλλα μέσα είναι ιδιαίτερα σημαντικά.

- Το χαμηλό κοστολόγιο κατασκευής ενός καλωδίου οπτικής ίνας την καθιστά πιο ελκυστική λύση από ότι ένα χάλκινο καλώδιο, έτσι με μικρότερο κόστος επιτυγχάνεται παροχή ποιοτικότερων υπηρεσιών.
- Οι οπτικές ίνες διαθέτουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες μετάδοσης (της τάξης των Gbps). Συνήθεις ταχύτητες μετάδοσης είναι αυτές των 2 και 10 Gbps, ενώ έχουν επίσης αναπτυχθεί συστήματα των 20, 40 και 50 Gbps. Σε περίπτωση πολύπλεξης με διαίρεση μήκους κύματος, οι ταχύτητες φθάνουν στα μερικά Tbps.
- Επειδή δεν μεταφέρεται ηλεκτρικό σήμα, οι οπτικές ίνες δεν επηρεάζονται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, με αποτέλεσμα να συνιστάται η χρήση τους σε χώρους με υψηλό θόρυβο και σε περιοχές υψηλού κινδύνου (βιομηχανικό περιβάλλον, χώροι καυσίμων, εύφλεκτων αερίων κλπ.).
- Η υποκλοπή ή η παρεμβολή (cross-talk) πληροφορίας είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν, με αποτέλεσμα οι οπτικές ίνες να συνιστούν ένα πολύ ασφαλές μέσο μετάδοσης.

- Η εξασθένηση των σημάτων είναι μικρότερη από ότι στα χάλκινα και ομοαξονικά καλώδια, με αποτέλεσμα οι αποστάσεις μεταξύ ενισχυτών ή άλλων ενεργών στοιχείων να κυμαίνονται από μερικά μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα, ανάλογα με τη τεχνική και το ρυθμό μετάδοσης.
- Επίσης, το βάρος και ο όγκος τους είναι σημαντικά μικρότερος από τα αντίστοιχα μεγέθη των άλλων αγωγών. Αξίζει να αναφέρουμε, σαν παράδειγμα, ότι χάλκινο καλώδιο με 1000 ζεύγη και μήκος 500 μέτρων ζυγίζει περίπου 4000 κιλά, ενώ οπτική ίνα του ίδιου μήκους, που περιέχει τον ίδιο αριθμό καναλιών, ζυγίζει μόνο 45 κιλά.

1.8 Μειονεκτήματα οπτικών ινών

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα, που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, είναι η δυσκολία υλοποίησης συνδέσεων, επειδή απαιτείται υψηλή προσαρμογή και ευθυγράμμιση της φωτεινής πηγής, για να μην υπάρχει διασπορά και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Όμως, η πρόοδος της τεχνολογίας, που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην περιοχή των οπτικών ινών, αντιμετώπισε με επιτυχία την παραπάνω δυσκολία, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση τους και για συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία. Παρόλα αυτά, η χρήση τους σε τέτοιες συνδέσεις δεν έχει ακόμη ευρέως εξαπλωθεί, ιδιαίτερα λόγω του αυξημένου κόστους, που παρουσιάζουν τέτοια συστήματα. Στον παρακάτω πίνακα 1.1 αναφέρονται συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης των οπτικών ινών.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μεγάλη χωρητικότητα της τάξης των Gbps	Δυσκολία διασύνδεσης πολλών χρηστών πάνω σε ένα καλώδιο
Με νέες τεχνικές πολύπλεξης με διαίρεση μήκους κύματος (WDM) επιτυγχάνονται ταχύτητες των Tbps	Δυσκολία στη σύνδεση, με συνέπεια την ανάγκη ύπαρξης επιδέξιων εγκαταστατών
Μικρό μέγεθος και βάρος	Ακριβές για μικρές αποστάσεις
Χαμηλή εξασθένηση	-
Απρόσβλητη σε περιβαλλοντολογικές παρεμβολές	-
Υψηλή ασφάλεια- δυσκολία στις υποκλοπές	-
Μεγάλες εγκαταστάσεις μειώνουν το κόστος	-

Πίνακας 1. 1: Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα χρήσης οπτικών ινών

1.9 Οπτικά δίκτυα

Τα οπτικά δίκτυα είναι ταχύτερα από τα παραδοσιακά δίκτυα, γιατί σε αντίθεση με την μεταφορά ηλεκτρονίων στα καλώδια χαλκού, στις οπτικές ίνες έχουμε μεταφορά φωτονίων. Τα φωτόνια είναι ελαφρύτερα από τα ηλεκτρόνια και επιπλέον τα φωτόνια δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους επειδή δεν έχουν φορτίο. Επίσης, δεν επηρεάζονται από φωτόνια εκτός ίνας. Το φως χαρακτηρίζεται από υψηλότερες συχνότητες και συνεπώς από χαμηλότερα μήκη κύματος, με αποτέλεσμα περισσότερα “bits” πληροφορίας να μπορούν να μεταφερθούν μέσω της οπτικής ίνας έναντι του καλωδίου χαλκού. Έτσι λοιπόν, μέσα σε μια οπτική ίνα τα δεδομένα “ταξιδεύουν” με την ταχύτητα του φωτός (300.000 km/sec). Η χρήση καλωδίων οπτικών ινών είναι ιδιαίτερα ευεργετική για τις παρακάτω τέσσερις περιπτώσεις δικτύων:

- *Κεντρικούς διαύλους μεγάλου μήκους (Long haul trunks):* Οι δίαυλοι αυτοί έχουν μέσο μήκος 1500 χιλιόμετρα και μεταφέρουν 20 έως 60 χιλιάδες κανάλια φωνής.
- *Κεντρικούς διαύλους αστικής περιοχής (Metropolitan trunks):* Οι δίαυλοι αυτοί έχουν μέσο μήκος 12.5 χιλιόμετρα και μεταφέρουν έως 100 χιλιάδες κανάλια φωνής.
- *Κεντρικούς διαύλους επαρχιών (Rural exchange trunks):* Οι δίαυλοι αυτοί έχουν μήκος από 40 έως 160 χιλιόμετρα και μεταφέρουν έως 5 χιλιάδες κανάλια φωνής, χρησιμοποιούνται δε στην σύνδεση επαρχιακών πόλεων και χωριών.
- *Τοπικούς βρόγχους (Local loops):* Τοπικός βρόγχος είναι η σύνδεση από το κέντρο στον συνδρομητή. Η χρήση οπτικών ινών σε αυτές τις συνδέσεις επιτρέπει την μεταφορά προς τον συνδρομητή όχι μόνο φωνής και δεδομένων αλλά και εικόνας, βίντεο πραγματικού χρόνου.

1.10 Στοιχεία οπτικού δικτύου

1.10.1 Πομπός οπτικού σήματος

Ο σκοπός του πομπού είναι η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος στο απαραίτητο ηλεκτρικό ρεύμα έτσι ώστε να λειτουργήσει μια πηγή φωτός. Τα ηλεκτρικά σήματα είναι είτε αναλογικά είτε ψηφιακά. Εάν το σήμα είναι ήδη ψηφιακό, ο πομπός πρέπει να αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο το οποίο να παρέχει ταχύτερη εναλλαγή παλμικής κωδικοποίησης. Εάν το σήμα είναι αναλογικό, ο πομπός θα πρέπει να παρέχει ρεύμα σε μια πηγή φωτός έτσι ώστε να γίνει η εκπομπή των εναλλαγών του σήματος.

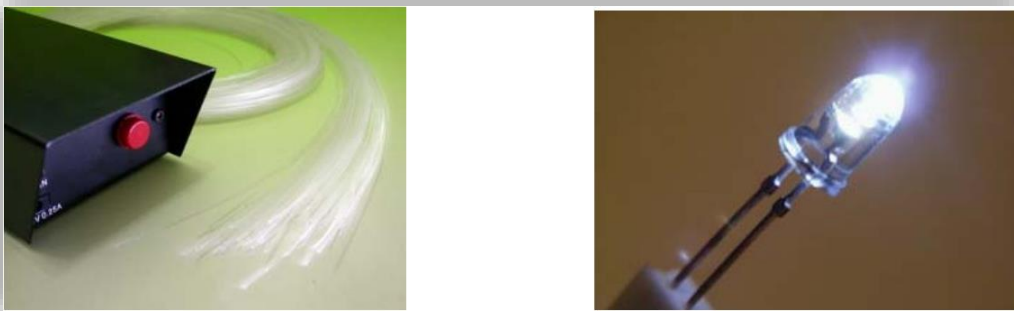
Δύο είναι οι τύποι των πηγών φωτός που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες, έχουν διαφορετικά επίπεδα ενέργειας, χαρακτηριστικά εκπομπής φωτός και διάρκεια ζωής. Οι πηγές φωτός που χρησιμοποιούνται σε ένα οπτικό δίκτυο μπορεί να είναι είτε δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) είτε λέιζερ ημιαγωγού (semiconductor LASERS).

Ανάμεσα στις απαιτήσεις ενός οπτικού πομπού συναντάμε:

- Να λειτουργεί σε ένα από τα “παράθυρα” ελάχιστης εξασθένισης, δηλαδή τα 850, 1310 ή 1550 nm.
- Το εκπεμπόμενο οπτικό σήμα να είναι κατά το δυνατόν μονοχρωματικό, δηλαδή το εύρος εκπομπής $\Delta\lambda$ γύρω από το κεντρικό μήκος κύματος λειτουργίας να είναι κάτω από 50 nm.
- Η ισχύς εξόδου του πομπού να είναι της τάξης του 1 mW.
- Ο λόγος σβέσης να είναι υψηλός (>8 dB).

Πηγή φωτός με LED

Τα LED έχουν ένα μη γραμμικό χαρακτήρα. Το φως που εκπέμπουν είναι ασυνεχές και έχει φάσμα πλάτους της τάξης των 60nm. Χρησιμοποιούν επαφές p-n για να εισάγουν ηλεκτρόνια και οπές στην ίδια περιοχή ενός ημιαγωγού προκειμένου να ενωθούν και να παράγουν φως μέσω του φαινομένου της αυθόρμητης εκπομπής. Η χρήση τους περιορίζεται στις πολύτροπες ίνες, με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης για μικρές αποστάσεις διάδοσης.



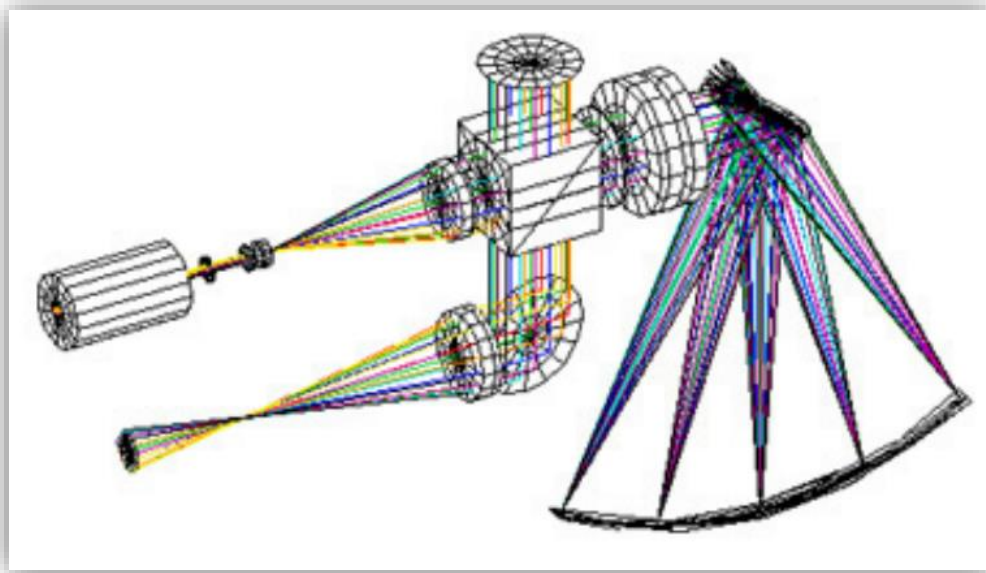
Εικόνα 1. 6: Οπτικοί πομποί LED

Πηγή φωτός με LASER

Τα LASER είναι δίοδοι ημιαγωγών που εκπέμπουν μια συνεχή δέσμη φωτός με φάσμα πλάτους μικρότερο από 10nm. Τα LASER ημιαγωγού είναι κατάλληλα για εφαρμογές μονότροπης ίνας λόγω μικρού μεγέθους, χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων, περιορισμένου εύρους φάσματος, ακρίβειας μήκους κύματος, ικανοποιητικής ισχύος εξόδου και της μαζικής κατασκευής τους.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των LASER είναι:

- Το εύρος του φάσματος του φωτός (εύρος γραμμής) που παράγεται από το λέιζερ και επηρεάζει τις αποστάσεις μεταξύ των καναλιών και τη διασπορά.
- Το εύρος συντονισμού, πρόκειται για την περιοχή μηκών κύματος που μπορεί το λέιζερ να ενισχύσει.
- Το πλήθος διαμήκων τρόπων διάδοσης, ο αριθμός των μηκών κύματος που μπορεί το λέιζερ να ενισχύσει.
- Χρόνος συντονισμού, ο χρόνος που απαιτεί το λέιζερ για να συντονιστεί από ένα μήκος κύματος σε ένα άλλο.



Εικόνα 1. 7: Οπτικός πομπός Laser

1.10.2 Δέκτης οπτικού σήματος

Οι δέκτες λαμβάνουν το σήμα από την οπτική ίνα και το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ενός φωτοανιχνευτή. Οι φωτοανιχνευτές κατασκευάζονται από υλικά όπως το γερμάνιο, το πυρίτιο, το αρσενιούχο γάλλιο και το ίνδιο αρσενικό γάλλιο.

Ένας οπτικός δέκτης πρέπει απαιτεί:

- Συγκεκριμένη ευαισθησία.
- Γρήγορη απόκριση.
- Χαμηλό θόρυβο.
- Αντίστοιχο μέγεθος με οπτικές ίνες.

- Χαμηλό κόστος.
- Μεγάλη αξιοπιστία

Σήμερα χρησιμοποιούνται δύο τύποι φωτοδιόδων ως ανιχνευτές για τη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικού. Οι δίοδοι PIN, οι οποίοι είναι λιγότεροι ευαίσθητοι στο φως αποτελούνται από θετικά, αρνητικά και ουδέτερα υλικά τα οποία βρίσκονται σε στερεά κατάσταση. Επίσης χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος και αξιοπιστία. Οι δίοδοι χιονοστιβάδας, ή αλλιώς APD είναι ακριβότεροι από τους PIN επειδή παρέχουν μεγαλύτερη ευαισθησία και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ικανότητα ανίχνευσης, ακρίβεια, μεγάλο κόστος, υψηλές απαιτήσεις ρεύματος και επηρεάζονται από τη θερμοκρασία.

1.10.3 Σύνδεσμοι SC

Οι σύνδεσμοι SC αναπτύχθηκαν από την εταιρία NTT . Σήμερα οι σύνδεσμοι αυτοί χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τόσο στις επικοινωνίες (για μεταφορά πληροφοριών αλλά και φωνής) όσο και στην καλωδιακή τηλεόραση. Οι σύνδεσμοι SC χρησιμοποιούνται ως επί των πλείστο σε single-mode οπτικές ίνες. Στην εικόνα 1.8 φαίνεται ένα οπτικό καλώδιο με συνδέσμους SC.

1.10.4 Σύνδεσμοι ST

Οι σύνδεσμοι ST αναπτύχθηκαν από την αμερικάνικη εταιρία τηλεπικοινωνιών AT&T. Χρησιμοποιούνται ως επί των πλείστο σε τοπικά δίκτυα υπολογιστών (LANs) και τους συναντούμε ποιο πολύ σε multi-mode οπτικές ίνες αν και οι αμερικάνικες, Bell Operating Companies τον χρησιμοποιούν και σε single-mode.

1.10.5 Μόνιμοι σύνδεσμοι (splices)

Οι μόνιμοι σύνδεσμοι (splices) στην ουσία κάνουν την ίδια δουλειά με τους connectors, μόνο που χρησιμοποιούνται για μόνιμες συνδέσεις μεταξύ οπτικών ινών. Επειδή προορίζονται για μόνιμες συνδέσεις, είναι έτσι κατασκευασμένοι ώστε να εισάγουν πολύ μικρή εξασθένηση, της τάξης του 0,1 dB.



Εικόνα 1. 8: Μορφή συνδέσμων SC και ST

1.10.6 Προσωρινοί σύνδεσμοι (connectors)

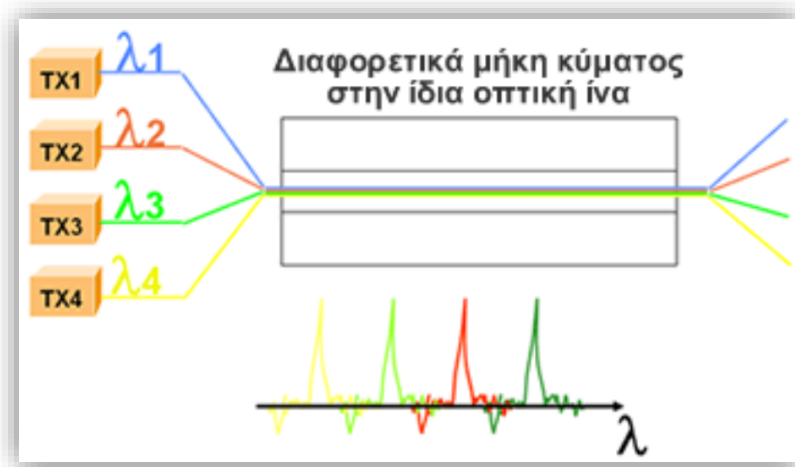
Με τον όρο connectors εννοούμε τους συνδέσμους που επιτυγχάνουν προσωρινή σύνδεση μεταξύ δύο οπτικών καλωδίων ή μεταξύ του καλωδίου και του πομπού ή του δέκτη. Ο connector συνδέει όλο το καλώδιο και όχι μόνο την ίνα.

Οι οπτικές ίνες είναι πολύ ευαίσθητες στις συνδέσεις τους καθώς η παραμικρή μετατόπιση της μιας έναντι της άλλης προξενεί σημαντική εξασθένηση του σήματος, ίσως και διακοπή της μετάδοσης. Γι' αυτό πρέπει οι κεντρικές ίνες να εφάπτονται ακριβώς η μία με την άλλη στο σημείο σύνδεσης. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των connectors είναι η εξασθένηση. Κάθε φορά που ένα σήμα περνάει μέσα από ένα σύνδεσμο χάνει ένα μέρος της ισχύος του. Σήμερα η τεχνολογία μπορεί να προσφέρει connectors με εξασθένηση της τάξης του 1db.

1.11 Πολύπλεξη διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) σε οπτικά δίκτυα

Για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των οπτικών ινών και την μεγιστοποίηση του μεταφερόμενου όγκου δεδομένων μέσα από μια ίνα, έχει εφαρμοσθεί τα τελευταία χρόνια μια νέα τεχνολογία, η τεχνολογία WDM.

Η τεχνολογία αυτή συνίσταται στην πολύπλεξη οπτικών σημάτων με διαφορετικά μήκη κύματος και την μετάδοσή τους μέσα από μια μόνο οπτική ίνα. Η βασική ιδέα πάνω στην οποία στηρίχτηκε η νέα τεχνολογία ήταν η εξής: σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη φέρουσα συχνότητα. Είναι δυνατόν από την ίδια ίνα να περάσουν περισσότερα του ενός διαφορετικά σήματα διαφορετικής συχνότητας ή αλλιώς διαφορετικού μήκους κύματος μιας και μιλάμε για οπτικά σήματα, που το καθένα να μεταφέρει διαφορετικά δεδομένα.



Εικόνα 1. 9: Διαφορετικά μήκη κύματος στην ίδια οπτική ίνα

Έτσι, σε ένα σύστημα WDM, ένα πλήθος διαφορετικών σημάτων μεταφέρονται υπό τη μορφή διακριτών μηκών κύματος ή καναλιών μέσω της οπτικής ίνας και αποπολυπλέκονται στο σημείο λήψης. Όπως και με τη μέθοδο TDM, που χρησιμοποιείται από την τεχνολογία SONET/SDH, η ολική χωρητικότητα του μέσου είναι το άθροισμα της χωρητικότητας των εισερχόμενων σημάτων, με τη διαφορά ότι καθένα από τα σήματα αυτά μεταφέρεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι κάθε κανάλι έχει το δικό του, αποκλειστικό, εύρος ζώνης. Το προφανέστερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας WDM εντοπίζεται στη δυνατότητά της να παρέχει τεράστια αύξηση (πρακτικά απεριόριστη) της χωρητικότητας μετάδοσης. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα της WDM συνοψίζονται στα παρακάτω:

- *Διαφάνεια (Transparency)*: Δεδομένου ότι η WDM αποτελεί μια αρχιτεκτονική στο φυσικό επίπεδο, είναι δυνατή η διαφανής υποστήριξη τόσο της TDM τεχνολογίας όσο και δεδομένων τυποποιήσεων όπως ATM, Gigabit Ethernet, Enterprise Systems Connection και Fibre Channel, επιτυγχάνοντας τη διασύνδεση διαφόρων υπηρεσιών μέσω του κοινού φυσικού μέσου.
- *Κλιμάκωση Μεγέθους (Scalability)*: Επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της οπτικής ίνας, ειδικότερα σε επίπεδο, μητροπολιτικών και επιχειρησιακών δικτύων.
- *Δυναμική Παροχή Εύρους Ζώνης (Dynamic Provisioning)*: Η ταχύτατη, απλή και με δυναμικό τρόπο παροχή των δικτυακών συνδέσεων, δίνουν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων για ικανοποίηση αναγκών των χρηστών μέσα σε διάστημα ολίγων ημερών παρά μηνών.

1.12 Αρχιτεκτονική οπτικού δικτύου

Προς το παρόν οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση ευρυζωνικού δικτύου κορμού και διανομής, καθώς είναι ουσιαστικά η μόνη τεχνολογία που μπορεί να υποστηρίξει τη συγκέντρωση ευρυζωνικών συνδέσεων πρόσβασης. Επίσης μπορεί να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες δεδομένων με υψηλό ρυθμό που απαιτεί η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών από κεντρικά σημεία διανομής προς τους συνδρομητές. Για το λόγο αυτό είναι συχνή η περίπτωση του συνδυασμού υποδομών οπτικών ινών με άλλες ευρυζωνικές τεχνολογίες, όπου η υποδομή οπτικών ινών δημιουργείται και φτάνει μέχρι τις γειτονιές ή τα κτίρια των συνδρομητών. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται άλλες τεχνολογίες ευρυζωνικής πρόσβασης για να δημιουργηθεί το δίκτυο πρόσβασης που φτάνει μέχρι το χώρο του χρήστη.

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική ενός δικτύου οπτικών ινών, σημειώνεται ότι αποτελείται από τρεις βασικές λογικές μονάδες: το δίκτυο κορμού, το δίκτυο διανομής και το δίκτυο πρόσβασης.

- Το δίκτυο κορμού αποτελείται από έναν αριθμό κόμβων οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ των κύριων κόμβων οι οποίοι βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους.
- Το δίκτυο διανομής, παρέχει συνδέσεις σημείου-πολλαπλών σημείων μεταξύ των κυρίων κόμβων και των κόμβων πρόσβασης. Στους κόμβους διανομής μπορεί να τοποθετηθεί ενεργός ή παθητικός εξοπλισμός για το διαχωρισμό του σήματος, οπότε λέμε ότι χρησιμοποιούμε Ενεργό Οπτικό Δίκτυο (AON) ή Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON) αντίστοιχα.
- Το δίκτυο πρόσβασης, που καταλήγει στις Οπτικές Μονάδες Δικτύου (ONU), αποτελεί τον οπτικό τερματισμό του σήματος. Από εκεί κι έπειτα το σήμα γίνεται ηλεκτρικό και μεταφέρεται μέσω χάλκινου καλωδίου στον συνδρομητή.

1.13 Οπτικά δίκτυα διανομής

1.13.1 Διαμοιραζόμενης ίνας

Κάθε ίνα από τον OLT κατευθύνεται προς πολλαπλούς πελάτες, οι οποίοι και την διαμοιράζονται για την επικοινωνία τους. Σε κάποιο σημείο κοντά στα οπτικά τερματικά των πελάτων μια κεντρική ίνα διασπάται σε επιμέρους ίνες οι οποίες κατευθύνονται προς τον κάθε πελάτη ξεχωριστά.

1.13.2 Άμεσης ίνας

Αποτελεί την απλούστερη υλοποίηση ενός δικτύου διανομής, κάθε ίνα συνδέεται απευθείας από τον OLT στο οπτικό τερματικό του κάθε πελάτη. Μια τέτοια υλοποίηση παρέχει εξαιρετικό bandwidth με υψηλές ταχύτητες αλλά είναι περίπου 10% πιο ακριβό από ένα δίκτυο διαμοιραζόμενης ίνας.

1.14 Αρχιτεκτονική δικτύων FTTx

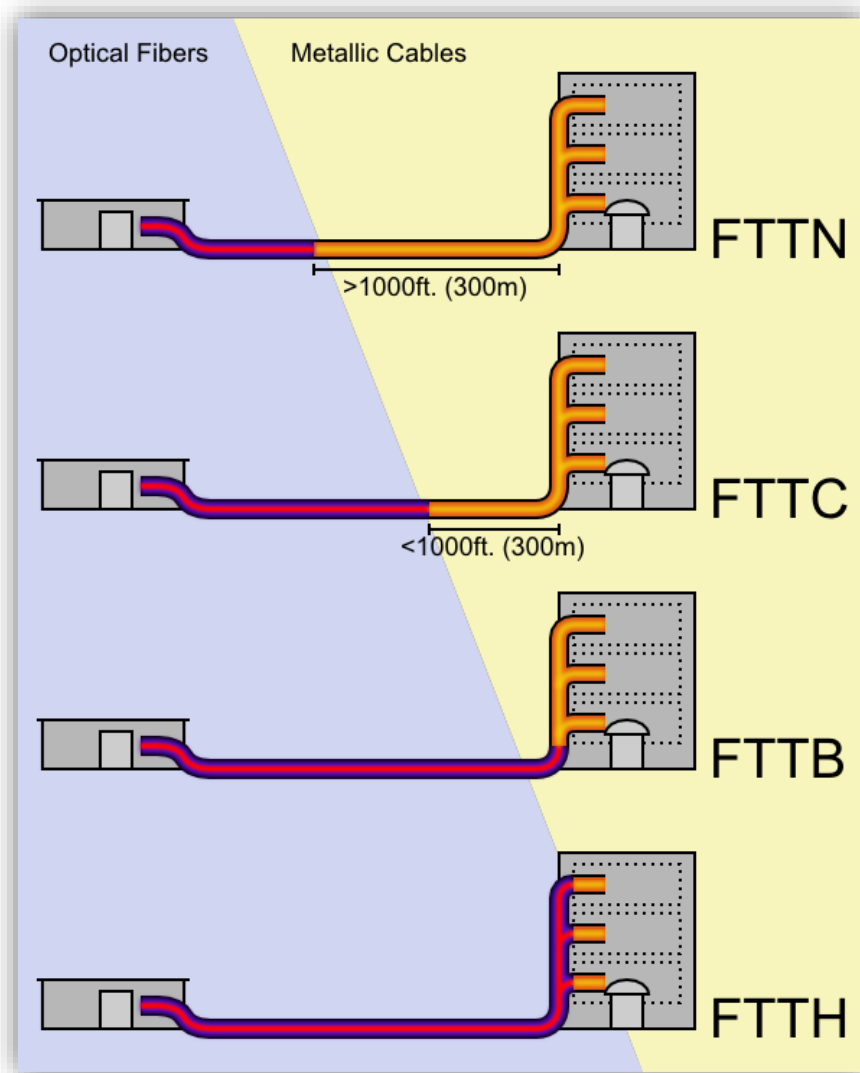
Ο γενικός όρος FTTx περιγράφει κάθε αρχιτεκτονική δικτύου που χρησιμοποιεί οπτικές ίνες για να αντικαταστήσει ολόκληρο ή μέρος του τοπικού βρόχου που χρησιμοποιείται για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Οι τέσσερις τεχνολογίες που ανήκουν στην οικογένεια FTTx είναι οι εξής:

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

- Fiber to the Home (FTTH)
- Fiber to the Premises (FTTP)

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για FTTx δίκτυα είναι: το VDSL/VDSL2 (χρησιμοποιείται στο FTTN, το FTTC και σε μερικές υλοποιήσεις του FTTB), το PON (χρησιμοποιείται στο FTTH και σε υλοποιήσεις του FTTB) και το Active Ethernet.

Στο FTTN/C/P/B η οπτική ίνα δεν τερματίζεται σε τερματικό εξοπλισμό του τελικού χρήστη αλλά σε συσκευή συνήθως DSLAM με VDSL όπου στη συνέχεια με χάλκινο ζεύγος μεταφέρεται μέχρι τον τερματικό εξοπλισμό του χρήστη με τεχνολογία VDSL2.



Εικόνα 1. 10: Διαφορές στις τεχνολογίες FTTx

Το FTTB (Οπτική ίνα μέχρι το Κτίριο) είναι μια FTTx τεχνολογία, στην οποία η οπτική ίνα φτάνει μέχρι το κτίριο (συνήθως μέχρι τον καταναλωτή) στο οποίο βρίσκεται ο χώρος του τελικού χρήστη, αλλά δε φτάνει μέχρι το χώρο του.

Στο FTTH η οπτική ίνα τερματίζεται σε τερματικό του χρήστη. Με τη μείωση του κόστους ή την υποχρεωτική προσθήκη οπτικών ινών στα νεόχτιστα σπίτια, επειδή το κόστος της ίνας είναι πολύ μικρό, το FTTH θα επικρατήσει έναντι των άλλων τεχνολογιών.

Το FTTH, λόγω του ότι χρησιμοποιεί 100% οπτικές ίνες, μπορεί να πετύχει πάρα πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πιλοτική υπηρεσία που διέθεσε η France Telecom στη Γαλλία στα μέσα του 2006, και η οποία παρείχε πρόσβαση στο Internet με ταχύτητα 2,5/1,2 Gbps.

Το FTTH έρχεται έτσι σε αντίθεση με μεθόδους όπως, οι Fiber to the Building (FTTB), Fiber to the Node (FTTN), Fiber to the Curb (FTTC), ή Hybrid Fibre-Coaxial (HFC), στις οποίες χρησιμοποιείται κάποιο παραδοσιακό φυσικό μέσο (όπως χάλκινα ή ομοαξονικά καλώδια) για το Τελευταίο Μίλι. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, το FTTB μπορεί να προσφέρει πολύ υψηλότερες ταχύτητες από το FTTN και το FTTC, καθώς περιορίζει στο ελάχιστο την χρήση παραδοσιακού καλωδίου, με κόστος σημαντικά χαμηλότερο από αυτό του FTTH.

Σήμερα πέραν του Active Ethernet με δύο ή μία οπτική ίνα (όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικά μήκη κύματος για την εκπομπή και λήψη) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες όπως το GPON με 2.5 Gbps downstream (από το κέντρο προς τον συνδρομητή) όπου μπορούν να εξυπηρετηθούν 64 μέχρι και 128 χρήστες και 1,244 Gbps upstream, το WDM-PON και το GPON 10 G.

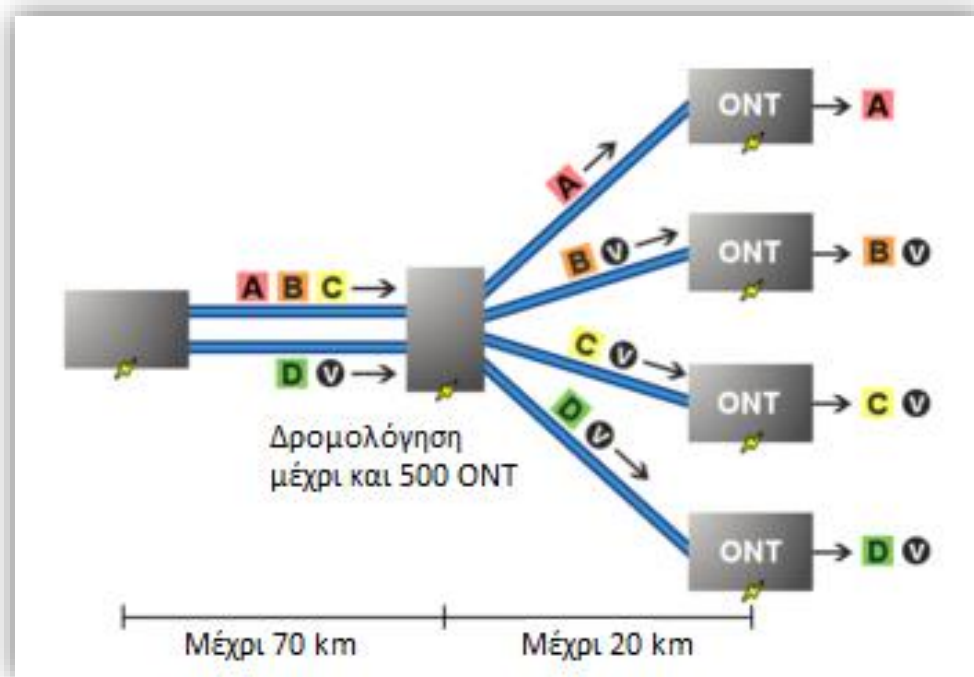
1.15 Οπτικά δίκτυα πρόσβασης

1.15.1 Ενεργό Οπτικό Δίκτυο (AON)

Η τεχνολογία AON χρησιμοποιεί διατάξεις ενεργού εξοπλισμού στους κόμβους διανομής. Στην τεχνολογία AON στο σημείο όπου τερματίζει το δίκτυο διανομής και από την οποία ξεκινούν οι υψηλού εύρους ζώνης συνδέσεις αποτελείται από ενεργό εξοπλισμό, δηλ. εξοπλισμό που απαιτεί ηλεκτρική τροφοδοσία και εκτελεί έξυπνες εργασίες δρομολόγησης δεδομένων. Ο εξοπλισμός αυτός μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και ξανά σε οπτικό με αποτέλεσμα, μέσα από την αναγέννηση, εξαλείφεται η εξασθένηση του οπτικού σήματος.

Επίσης η τεχνολογία AON επιτρέπει τη δημιουργία οπτικών δακτυλίων όπου παρέχεται η δυνατότητα προστασίας του δικτύου μέσω της μετάδοσης του σήματος σε δύο διαδρομές (η προστασία συνίσταται στην εξασφάλιση της δυνατότητας μετάδοσης δεδομένων ακόμη και αν εμφανιστεί βλάβη στη μια διαδρομή). Φυσικά απαιτείται από την πλευρά του χρήστη ο κατάλληλος εξοπλισμός τερματισμού των οπτικών ινών (ONU) που παρέχει τη θύρα πρόσβασης στο οπτικό δίκτυο.

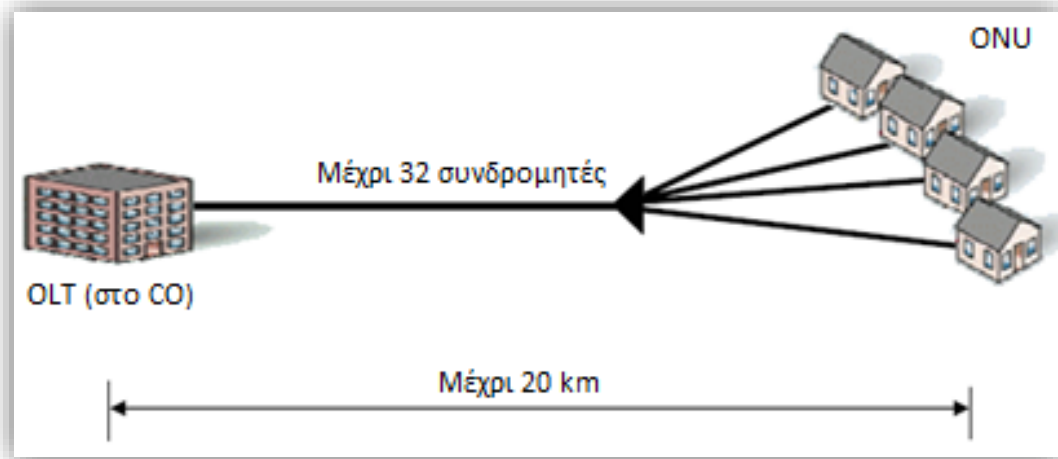
Τα ενεργά Οπτικά Δίκτυα, είναι μια προσέγγιση, που δεν είναι πολύ διαδεδομένη για το σχεδιασμό των κόμβων διανομής. Οι συνδέσεις point-to-point μεταξύ των κύριων κατανομητών και των συνδρομητών, χρησιμοποιούν κατεξοχήν την τεχνολογία IEEE 802.3ah EFM (Ethernet in the First Mile) για την πρόσβαση στο ευζωνικό περιεχόμενο. Οι συνδέσεις P2P δίνουν στους χρήστες μεγαλύτερο αποκλειστικό εύρος ζώνης, σε σχέση με τα διαμοιραζόμενα συστήματα και τη δυνατότητα πρόσβασης σε περισσότερο υλικό μελλοντικά. Η αναβάθμισή τους γίνεται εύκολα και επηρεάζει ένα χρήστη κάθε φορά και δεν απαιτούνται αλλαγές σε κεντρικές εγκαταστάσεις.



Εικόνα 1. 11: Τοπολογία ενεργού οπτικού δικτύου (AON)

1.15.2 Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON)

Στο παθητικό οπτικό δίκτυο (PON) υπάρχει η δυνατότητα συνδέσεων point-to-multipoint, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 1.12.



Εικόνα 1. 12: Τοπολογία παθητικού οπτικού δικτύου (PON)

Ένα PON αποτελείται από την καλωδίωση οπτικών ινών, από παθητικούς διαχωριστές (splitters) και συνδετήρες (couplers) που κατανέμουν ένα οπτικό σήμα μέσω μιας διακλαδωμένης τοπολογίας «δέντρων» στους συνδετήρες που τερματίζουν κάθε τμήμα ινών. Κάποια βασικά πλεονεκτήματα ενός PON είναι:

- Η αρχιτεκτονική point-to-multipoint απαιτεί λιγότερες οπτικές ίνες για να καλύψει μια δεδομένη περιοχή σε σχέση με την αντίστοιχη point-to-point που χρησιμοποιεί διαφορετικές ίνες σε κάθε πελάτη (η πολυπλοκότητα ινών για αρχιτεκτονικές WDM ή CWDM PON είναι συγκρίσιμη).
- Ο εξοπλισμός στο CO απαιτεί χαμηλότερο κόστος καθώς μια οπτική διεπαφή εξυπηρετεί ένα ολόκληρο δίκτυο αντί να είναι αφιερωμένη σε ένα χρήστη.
- Η προσέγγιση PON, με την έλλειψη ενεργών συσκευών κατά μήκος της διαδρομής ινών, σημαίνει ότι απαιτείται ισχύς μόνο στην κατάληξη της ίνας (οικιακός χρήστης και CO).

Επίσης, αναπτύσσονται υβριδικά οπτικά δίκτυα τα οποία αποτελούν ένα συνδυασμό ενός ενεργού κόμβου και μιας αρχιτεκτονικής PON με αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης κάλυψης.

Στον παρακάτω πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός παθητικού οπτικού δικτύου.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Δεν είναι ενεργός κανένας απομακρυσμένος κόμβος	Το ίδιο εύρος ζώνης πρέπει να διαιρεθεί μεταξύ διάφορων χρηστών
Πλήρως παθητικό δίκτυο	Η οπτική ισχύς μεταξύ των θυρών εξόδου (output ports), περιορίζει την μέγιστη απόσταση
Επιτρέπει την εύκολη μετάδοση βίντεο και δεδομένων	Το ίδιο οπτικό σήμα παραλαμβάνεται από όλες τις μονάδες (ONUs), εγείροντας ανησυχίες για την ασφάλεια δικτύων
Υλοποίηση με το λιγότερο δυνατό αριθμό πομποδεκτών	Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για uploading δεν είναι broadcast (λιγότερο εύρος ζώνης από πλήρες P2P)
Χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής	Απαιτήση για έναν αυστηρό αλγόριθμο για την σύλληψη upstream κυκλοφορίας (καταμερισμός χρόνου για την upstream σύνδεση)
Ελάχιστη ίνα	Πιο σύνθετοι πομποδέκτες (οπτική ισχύς, δυνατότητα burst mode)

Πίνακας 1. 2: Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα ONU

Κεφάλαιο 2: Παθητικό οπτικό δίκτυο τύπου XG-PON

Το παθητικό οπτικό δίκτυο τύπου XG-PON (γνωστό και ως 10G-PON) είναι ένα πρότυπο διασύνδεσης υπολογιστών, το οποίο αναπτύχθηκε το 2010 και σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 10 Gbps. Αποτελεί το πρότυπο το οποίο διαδέχθηκε το πρότυπο G-PON στην ιεραρχία της ITU. Αυτά τα 10 Gbps διαμοιράζονται από όλους τους χρήστες που είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο PON, με διάφορες τεχνικές πολύπλεξης που χρησιμοποιούνται να αποτρέπουν φαινόμενα παρεμβολών μεταξύ των διαφορετικών οπτικών σημάτων.

Σε κάθε ONU αλλά και στον OLT υπάρχουν συσκευές δικτύου οι οποίες μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό προκειμένου να υποστεί την ανάλογη επεξεργασία. Το πρότυπο XG-PON αποτελεί την επόμενη γενιά του G-PON προτύπου επιτυγχάνοντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, βασιζόμενο στο ήδη υπάρχων δίκτυο G-PON.

ITU-T G.987, είναι η ονομασία του προτύπου XG-PON σύμφωνα με την ITU. Το πρότυπο διατίθεται σε δύο επιλογές από άποψη διαχείρισης εύρους ζώνης, την ασύμμετρη και την συμμετρική. Στην ασύμμετρη (XG-PON1), προβλέπονται 10 Gbps για την downstream κίνηση και 2.5 Gbps για την upstream κίνηση (για την ακρίβεια 9,95328 Gbps και 2,48832 Gbps αντίστοιχα). Στην συμμετρική (XG-PON2), το εύρος ζώνης για το upstream και το downstream είναι ίδιο και ίσο με 10 Gbps, αλλά απαιτούνται διαφορετικού τύπου πομποί laser στις ONU οι οποίοι, έχουν μεγαλύτερο κόστος από αυτούς που απαιτούνται για ασύμμετρη μετάδοση.

Η πλαisiώση είναι παρόμοια με αυτή του G-PON, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος από ότι στο G-PON (βάσει της WDM πολύπλεξης) για να μπορούν οι συνδρομητές ενός G-PON να “αναβαθμιστούν” σε XG-PON συνδρομητές απλά και εύκολα.

Η οικογένεια G.987 της ITU που περιέχει τις προδιαγραφές του XG-PON διαιρείται σε 4 συστάσεις:

- *G.987*: Ορισμοί, συντομογραφίες και ακρωνύμια του XG-PON
- *G.987.1*: Γενικές απαιτήσεις του προτύπου XG-PON
- *G.987.2*: Προδιαγραφές εξαρτήσεων από το φυσικό μέσο (PMD)
- *G.987.3*: Προδιαγραφές σύγκλισης μετάδοσης (TC)

2.1 Αρχιτεκτονική δικτύου XG-PON

Το οπτικό μέρος ενός τοπικού δικτύου πρόσβασης μπορεί να είναι είτε ενεργό είτε παθητικό και η αρχιτεκτονική μπορεί να είναι είτε point-to-point είτε point-to-multipoint.

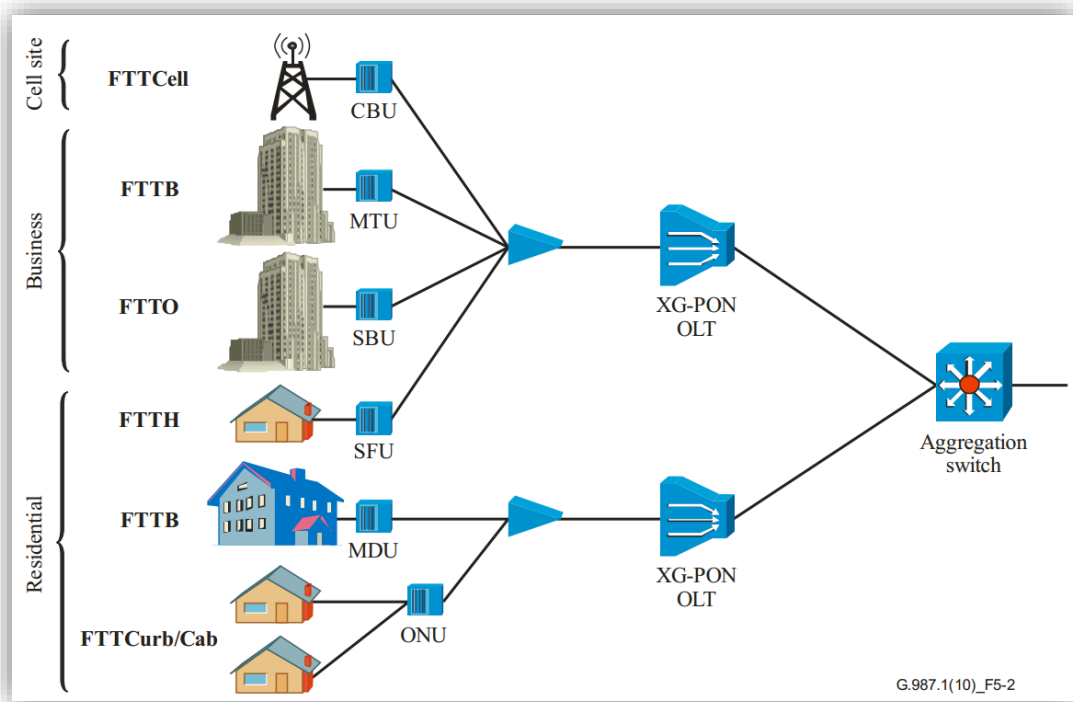
Η παρακάτω εικόνα 2.13 δείχνει τις εν λόγω αρχιτεκτονικές υλοποίησης ενός XG-PON, οι οποίες μπορεί να είναι FTTH, FTTB/C, (FTTCab), fiber to the office (FTTO), fiber to the cell site (FTTCell), κ.α.

Στο σενάριο FTTCell, η ONU λειτουργεί σαν μια κυψελωτή μονάδα σύνδεσης (CBU) μεταξύ του οπτικού δικτύου και ενός ασύρματου σταθμού βάσης. Έπειτα από τον σταθμό βάσης το σήμα μπορεί να διαδίδεται μέσω οποιαδήποτε ασύρματης τεχνολογίας η οποία είναι συμβατή με την τεχνολογία XG-PON.

2.2 Κατανομή μηκών κύματος σε δίκτυα XG-PON

Το εύρος μηκών κύματος ενός downstream καναλιού XG-PON σε ένα σύστημα απλής ίνας είναι από 1575 μέχρι 1580 nm και ονομάζεται “1577 nm” (με μελλοντική επέκταση 1575 έως 1581 nm). Για το upstream κανάλι προσφέρονται μήκη κύματος μεταξύ των 1260 και των 1280 nm γνωστά και ως “O-Band”. Αυτό προσδιορίζει το καθορισμένο εύρος μηκών κύματος και προσδιορίζει την ανοχή

σε παρεμβολές σημάτων από διαφορετικές ONU, επίσης ενεργοποιεί την συνύπαρξη του XG-PON δικτύου και άλλων επιπρόσθετων υπηρεσιών όπως συμβατότητα με δίκτυα G-PON και υπηρεσίες video.



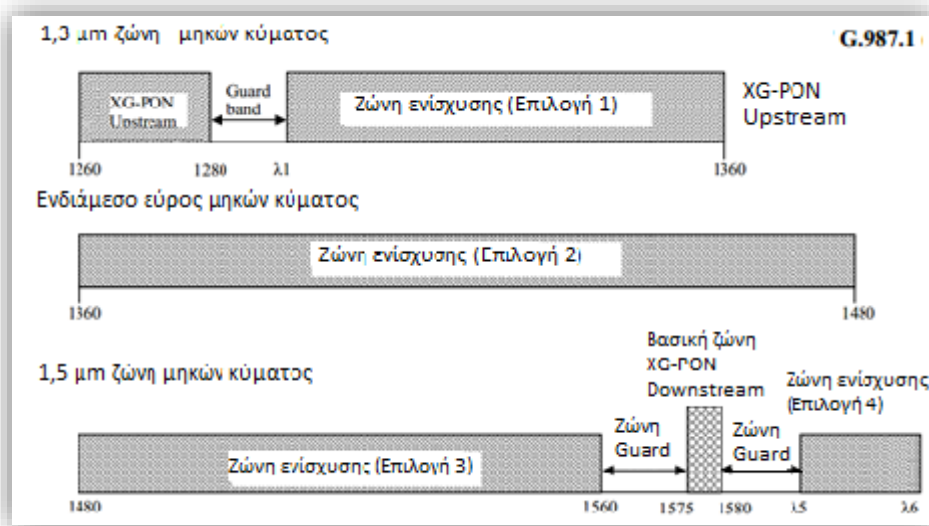
Εικόνα 2. 13: Διάφορες αρχιτεκτονικές XG-PON δικτύων

Η παρακάτω εικόνα 2.14 ορίζει το σχέδιο κατανομής των μηκών κύματος και τις δεσμευμένες ζώνες μηκών κύματος για επιπλέον υπηρεσίες. Το εύρος μηκών κύματος του downstream καναλιού σηματοδοσίας αναφέρεται σαν “basic band”. Οι δεσμευμένες ζώνες αναφέρονται ως “enhancement band”. Στις εφαρμογές αυτών των δεσμευμένων ζωνών μπορεί να συμπεριλαμβάνονται υπηρεσίες G-PON ή/και υπηρεσίες video. Το εύρος μηκών κύματος για υπηρεσίες video παραμένει το ίδιο όπως ορίζεται στο ITU-T G.983.3.

Μια ζώνη προστασίας (guard band) διαχωρίζει το upstream και το downstream κανάλι με την enhancement ζώνη. Οι παρεμβολές μεταξύ των σημάτων σε αυτές τις δύο ζώνες προκαλούν υποβάθμιση του σήματος, γι’ αυτό πρέπει να μειωθεί στο ελάχιστο δυνατό. Χρησιμοποιούνται φίλτρα μπλοκαρίσματος μηκών κύματος (WBFs) για να επιτευχθεί απομόνωση εκτός της ζώνης προστασίας.

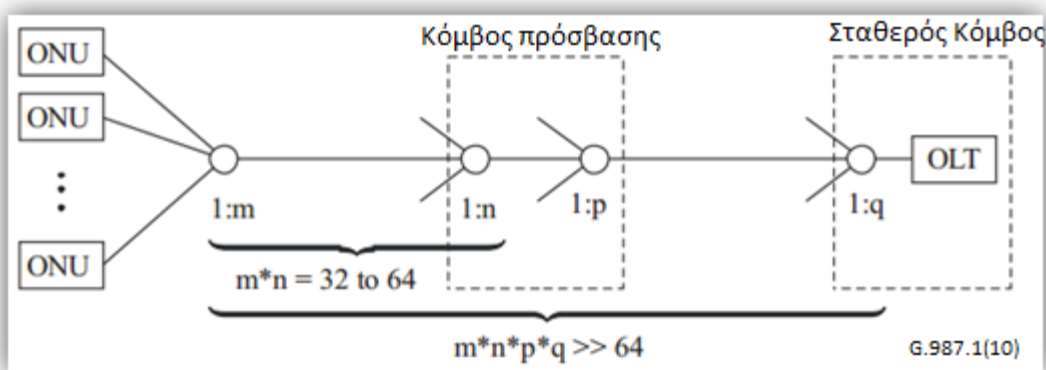
2.3 Λόγος διακλάδωσης

Παρόλο που οι περισσότεροι κατασκευαστές οπτικών δικτύων έχουν κατασκευάσει την δομή του οπτικού δικτύου διανομής με λόγο διακλάδωσης 1:32 ή 1:64 για τα Gigabit PONs, στα XG-PON ο ελάχιστος επιτρεπτός λόγος διακλάδωσης είναι 1:64 όπως αναφέρεται από την ITU. Στην παρακάτω εικόνα 2.14 φαίνεται μια άποψη των λόγων διακλάδωσης.



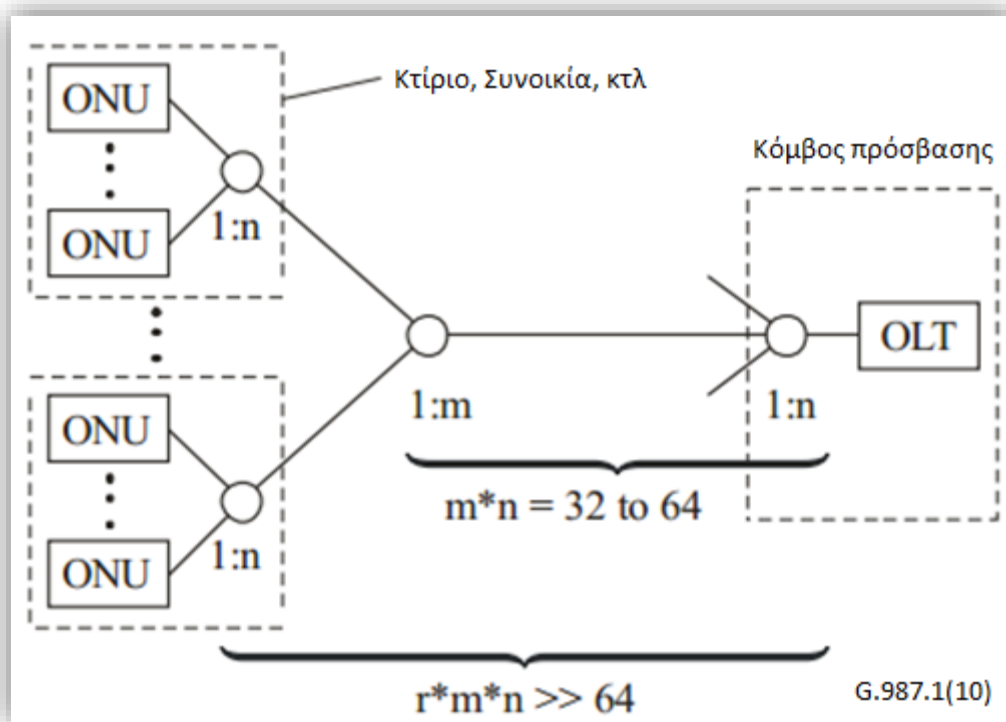
Εικόνα 2. 14: Κατανομή μηκών κύματος

Σε αυτό το μοντέλο, η απλής-διακλάδωσης αρχιτεκτονική είναι ειδική περίπτωση, στην οποία $m=64$ και $n=1$ και δεν χρειάζεται διακλαδωτής στο δίκτυο πρόσβασης. Κάποιοι κατασκευαστές δικτύων ενδιαφέρονται για κα περαιτέρω επέκταση του λόγου διακλάδωσης (1:128 ή 1:256) για βελτιωθεί περισσότερο η απόδοση του XG-PON συγκριτικά με το G-PON. Αυτός ο υψηλός δείκτης διακλάδωσης είναι πολύ ελκυστικός ειδικά για κάποιες συγκεκριμένες περιπτώσεις.



Εικόνα 2. 15: Μεγαλύτερη διακλάδωση στο υψηλότερο επίπεδο του δικτύου πρόσβασης

Ο υψηλός λόγος διακλάδωσης επιτρέπει την επέκταση του PON στο δίκτυο πρόσβασης προς τον OLT όπως φαίνεται στην εικόνα 16 ή και στην επέκταση του δικτύου πρόσβασης στους χρήστες όπως φαίνεται στην εικόνα 17 για να παρέχει ευέλικτες διαμορφώσεις στον διακλαδωτή και αποδοτική υποστήριξη σε διάφορες περιπτώσεις. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτές τις επιλογές, η λειτουργία ελέγχου TDMA σε ένα XG-PON πρέπει να υποστηρίζει λόγο διακλάδωσης τουλάχιστον 1:256. Ο φυσικός διαχωρισμός στο οπτικό επίπεδο πρέπει να είναι προσεκτικά επιλεγμένος να λαμβάνει υπόψιν την κατάσταση, το κόστος και την αποτελεσματικότητα των οπτικών συσκευών.



Εικόνα 2. 16: Μεγαλύτερη διακλάδωση στο χαμηλότερο επίπεδο του δικτύου πρόσβασης

2.4 Δομή επιπέδων του XG-PON

Το μοντέλο αναφοράς διαιρείται στο φυσικό επίπεδο, επίπεδο σύγκλισης μετάδοσης (TC) και στα επίπεδα οδήγησης, path layers, (εξηγούνται εκτενέστερα στο ITU-T G.902 και στο ITU-T G.984.x). Ένα παράδειγμα αυτής της δομής δίνεται στο παρακάτω πίνακα 2.3. Σε ένα XG-PON δίκτυο, το επίπεδο οδήγησης ανταποκρίνεται στο επίπεδο ενθυλάκωσης X-GEM.

Path layer			
Transmission Medium layer (Note)	XTC layer	Adaptation PON transmission	X-GEM encapsulation DBA X-GEM port bandwidth allocation QoS handling & T-CONT management Privacy & security Frame alignment Ranging Burst synchronization Bit/byte synchronization
		Physical medium layer	E/O adaptation Wavelength division multiplexing Fibre connection
Note – Το επίπεδο μετάδοσης πρέπει να παρέχει τις σχετιζόμενες OAM λειτουργίες			

Πίνακας 2. 3: Στοιβά επιπέδων και πρωτοκόλλων XG-PON

Το επίπεδο XTC διαιρείται στο υπο-επίπεδο μετάδοσης PON και στο υπο-επίπεδο προσαρμογής, το οποίο αντιστοιχεί στο υπο-επίπεδο σύγκλισης της X-GEM μετάδοσης διαφόρων τύπων δεδομένων. Το υπο-επίπεδο μετάδοσης PON τερματίζει τις απαιτούμενες λειτουργίες μετάδοσης στο ODN. Οι λειτουργίες που είναι ορισμένες στο PON τερματίζονται από το υπο-επίπεδο μετάδοσης του PON και δεν γίνονται αντιληπτά από το υπο-επίπεδο προσαρμογής.

2.5 Απόσταση οπτικής ίνας

Το πρότυπο XG-PON1 πρέπει να υποστηρίζει τουλάχιστον 20 km απόσταση από μια άκρη του δικτύου έως την άλλη. Επιπλέον, η μέγιστη απόσταση είναι μέχρι 60 km χωρίς ενδιάμεση ενίσχυση του σήματος.

Το XG-PON1 εισάγει επίσης και την έννοια της μέγιστης διαφοράς αποστάσεων μεταξύ των οντοτήτων. Η μέγιστη διαφορά που υποστηρίζεται είναι μέχρι τα 40 km, σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις είναι αναγκαίο να περιοριστεί ακόμη περισσότερο στα 20 km.

2.6 Αναγνωριστικό κατανομής

Το αναγνωριστικό κατανομής (Alloc-ID) είναι ένας 14-bit αριθμός ο οποίος αποδίδεται από τον OLT σε μια ONU για να προσδιορίσει μια συγκεκριμένη ροή upstream κίνησης. Ένα Alloc-ID μπορεί να συνδέεται είτε με συγκεκριμένες ONUs είτε με συγκεκριμένα T-CONT.

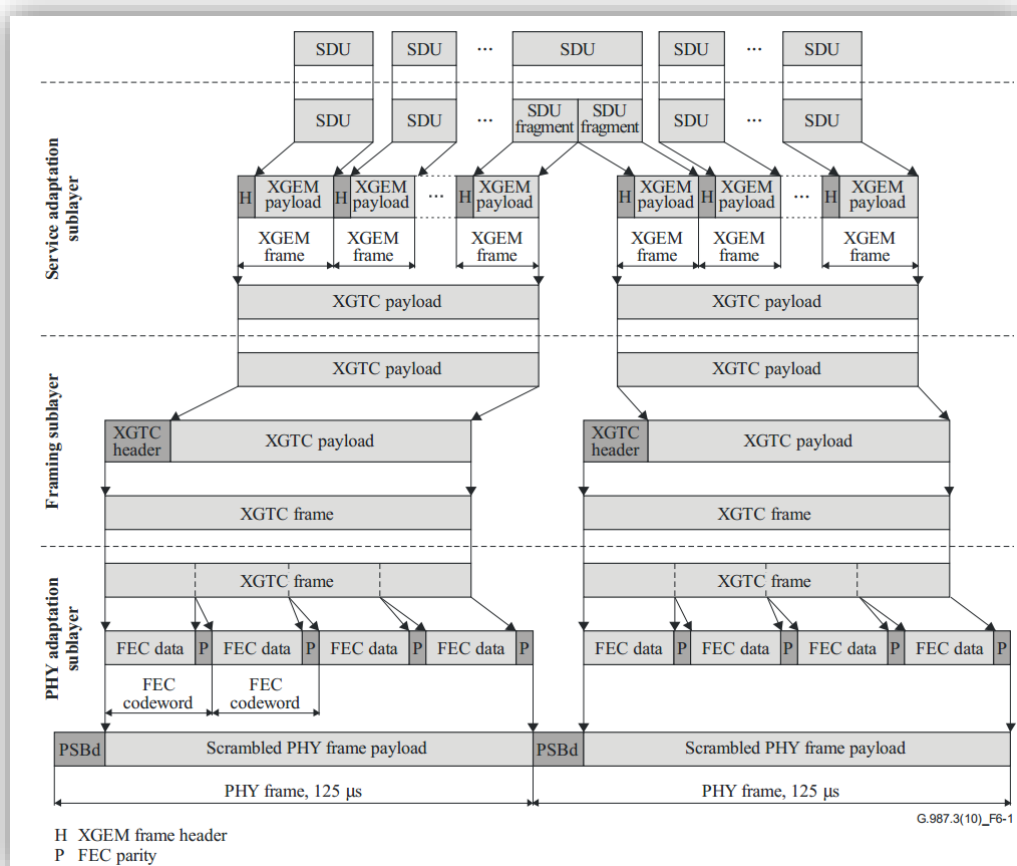
Transmission CONTainer (T-CONT) είναι μια οντότητα που αναπαριστά μια ομάδα λογικών συνδέσεων, η οποία εμφανίζεται σαν μια απλή μονάδα για τις ανάγκες της ανάθεσης upstream εύρους ζώνης σε ένα σύστημα PON. Παρόλο που σε κάποιες περιπτώσεις η διαδικασία χαρτογράφησης μεταξύ του T-CONT και

του Alloc-ID είναι αυστηρά ένα-προς-ένα, το Alloc-ID, και όχι το T-CONT είναι αυτό που είναι ορατό στο επίπεδο σύγκλισης μετάδοσης ενός δικτύου.

2.7 Δομή επιπέδου XGTC

Το επίπεδο XGTC προσδιορίζει την διαμόρφωση και τις διαδικασίες της χαρτογράφησης (mapping) ανάμεσα στα SDU υψηλότερων επιπέδων, καθώς επίσης και τις αρμόδιες ροές δεδομένων για διαμόρφωση σε ένα οπτικό φέρων σήμα.

Το XGTC επίπεδο διακρίνεται σε 3 υπο-επίπεδα: Το υπο-επίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών XGTC, το υπο-επίπεδο πλαισίωσης XGTC και το υπο-επίπεδο PHY προσαρμογής. Το XGTC επίπεδο εμφανίζεται τόσο στην δομή επιπέδων του OLT όσο και σε αυτήν μιας ONU, σε ένα XG-PON δίκτυο. Στην downstream μετάδοση έχουμε εκπομπή ενός πλαισίου κάθε 12 μsec, ενώ στην upstream μετάδοση η επικοινωνία αυτή αναπαρίσταται από οπτικές ριπές καθορισμένου χρόνου. Οι διαδικασίες ενθυλάκωσης των πληροφοριών κατά το mapping για την downstream και για την upstream μετάδοση φαίνονται στις εικόνες (2.17 και 2.18).



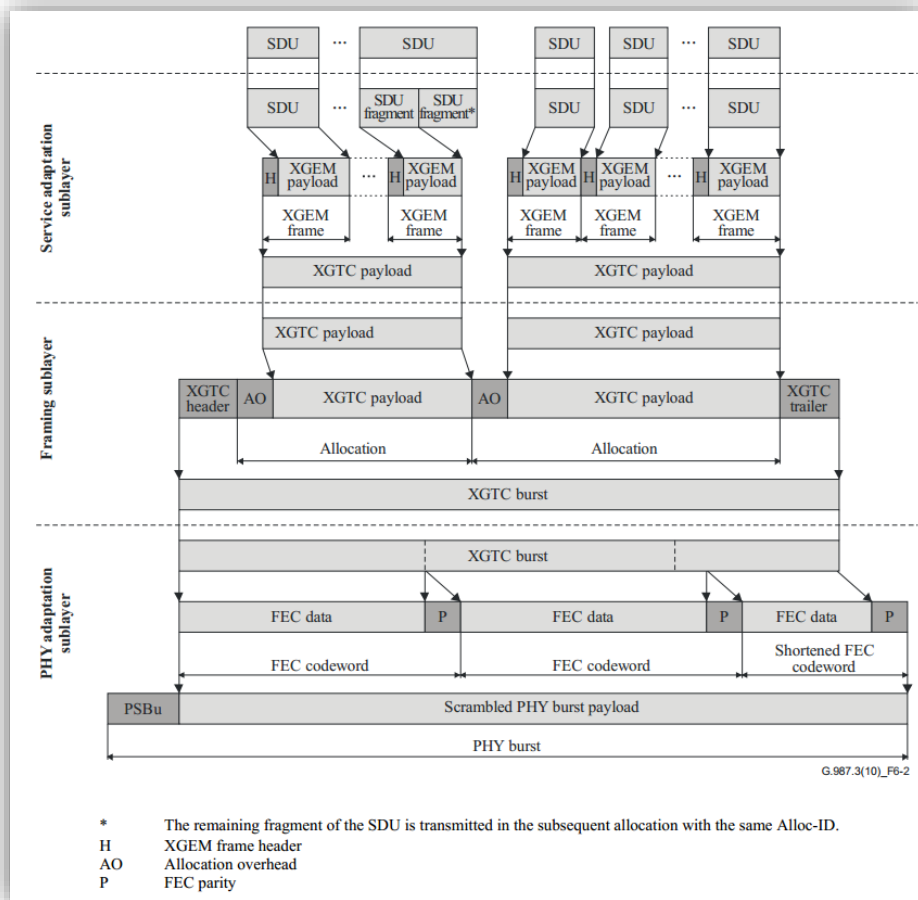
Εικόνα 2. 17: Downstream SDU mapping

2.7.1 Υπο-επίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών XGTC

Το υπο-επίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών XGTC ευθύνεται για την ενθυλάκωση του SDU του ανώτερου επιπέδου, την πολύπλεξη και την οριοθέτηση κατά τη διάρκεια της μετάδοσης πέρα από PON.

Από την πλευρά του αποστολέα, το υπο-επίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών XGTC, εκτελεί κατακερματισμό του SDU ανάλογα με τις ανάγκες, εκχωρεί ένα Port-ID XGEM σε κάθε SDU ή σε κάθε τμήμα SDU, και εφαρμόζει την μέθοδο ενθυλάκωσης για την απόκτηση ενός XGEM πλαισίου. Μια σειρά από XGEM πλαίσια συγκροτούν το ωφέλιμο τμήμα ενός XGTC πλαισίου στο downstream ρεύμα ή μια οπτική ριπή XGTC στο upstream ρεύμα

Από την πλευρά του δέκτη, το υπο-επίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών XGTC δέχεται το ωφέλιμο τμήμα του XGTC πλαισίου και της οπτικής ριπής, εκτελεί οριοθέτηση πλαισίου, φιλτράρει τα XGEM πλαίσια με βάση το Port-ID, επανασυνδέει τα κατακερματισμένα SDUs και τα παραδίδει στους αντίστοιχους παραλήπτες.



Εικόνα 2. 18: Upstream SDU mapping

2.7.2 Υπο-επίπεδο πλαισίωσης XGTC

Το υπο-επίπεδο πλαισίωσης είναι υπεύθυνο για τη κατασκευή και την ανάλυση των overhead πεδίων που υποστηρίζουν την κατάλληλη λειτουργία διαχείρισης του PON.

Από την πλευρά του αποστολέα, το υπο-επίπεδο πλαισίωσης XGTC δέχεται τις πολλαπλές σειρές των XGEM πλαισίων που αποτελούν το ωφέλιμο τμήμα του XGTC πλαισίου από το υπο-επίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών XGTC, και κατασκευάζει το downstream XGTC πλαίσιο ή την upstream XGTC ριπή παρέχοντας ενσωματωμένα OAM και PLOAM overhead πεδία επικοινωνίας. Στην upstream κατεύθυνση ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι μια XGTC ριπή πολυπλέκει XGTC ωφέλιμα φορτία σε συνεργασία με πολλαπλά Alloc-IDs, το μέγεθος των οποίων προσδιορίζεται βάσει πληροφοριών διαχείρισης.

Από την πλευρά του δέκτη, το υπο-επίπεδο πλαισίωσης XGTC δέχεται τα XGTC πλαίσια ή τις XGTC ριπές, αναλύει τα overhead πεδία XGTC, εξάγει τα εισερχόμενα μηνύματα ενσωματωμένης διαχείρισης και τα PLOAM και παραδίδει τα XGTC ωφέλιμα στο υπο-επίπεδο προσαρμογής υπηρεσιών.

2.7.3 Υπο-επίπεδο προσαρμογής φυσικού μέσου XGTC

Το υπο-επίπεδο προσαρμογής φυσικού μέσου περιλαμβάνει τις λειτουργίες που τροποποιούν την διαμόρφωση της ροής δεδομένων του οπτικού πομπού με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων ανίχνευσης, υποδοχής και οριοθέτησης του μεταδιδόμενου σήματος μέσω του οπτικού μέσου.

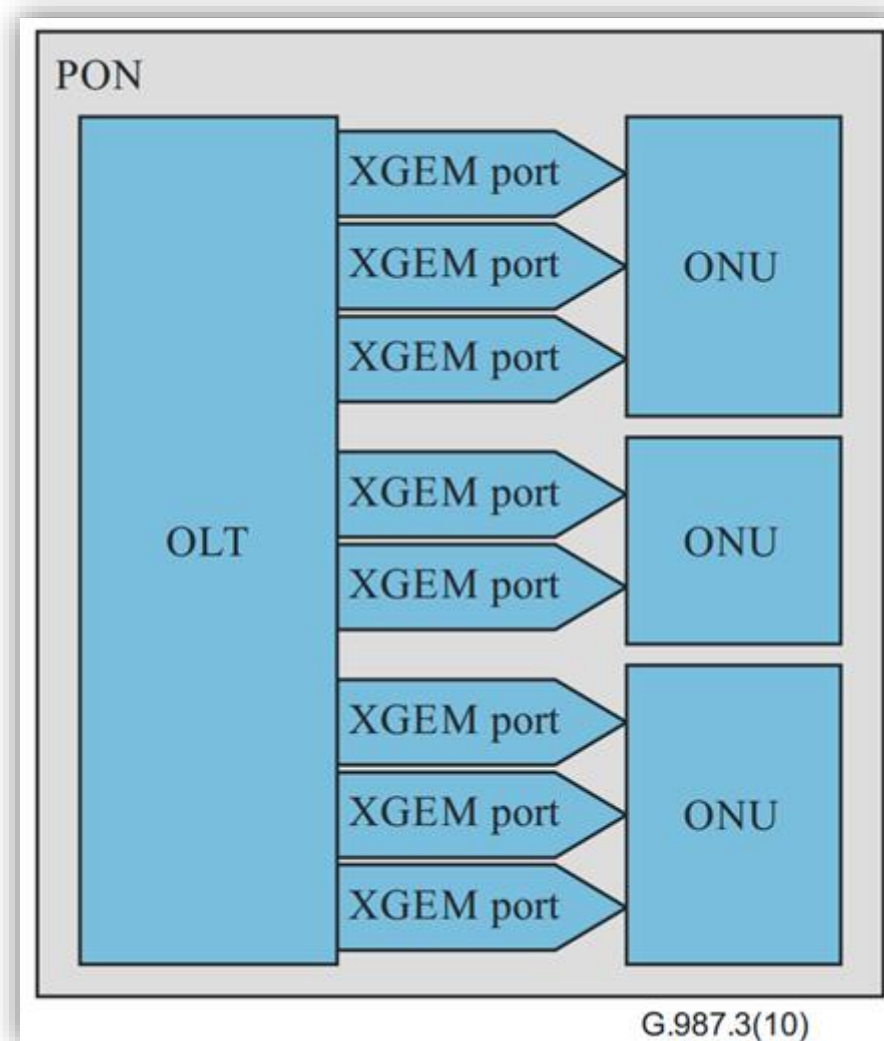
Από την πλευρά του αποστολέα, διαχωρίζει τα XGTC πλαίσια σε μπλοκ δεδομένων FEC, υπολογίζει και προσθέτει το πεδίο ισοτιμίας FEC σε κάθε μπλοκ δεδομένων FEC, ενισχύει το περιεχόμενο με το FEC, τοποθετεί αυτό το μπλοκ κατάλληλα για την upstream (PSBd) ή για την downstream μετάδοση (PSBu).

Από την πλευρά του δέκτη, το υπο-επίπεδο προσαρμογής φυσικού μέσου εκτελεί συγχρονισμό και οριοθέτηση των εισερχόμενων ροών bit, διορθώνει το περιεχόμενο του φυσικού πλαισίου ή της ριπής εκτελώντας FEC και παραδίδει το τελικό XGTC πλαίσιο ή την ριπή στο υπο-επίπεδο πλαισίωσης.

2.8 Αρχιτεκτονική πολύπλεξης με διαίρεση χρόνου

Στην downstream μετάδοση η λειτουργία πολύπλεξης κίνησης είναι κεντρική. Ο OLT πολυπλέκει XGEM πλαίσια στο μέσο μετάδοσης χρησιμοποιώντας XGEM Port-ID ως κλειδί για τον εντοπισμό XGEM πλαισίων τα οποία ανήκουν σε διαφορετικές downstream λογικές συνδέσεις.

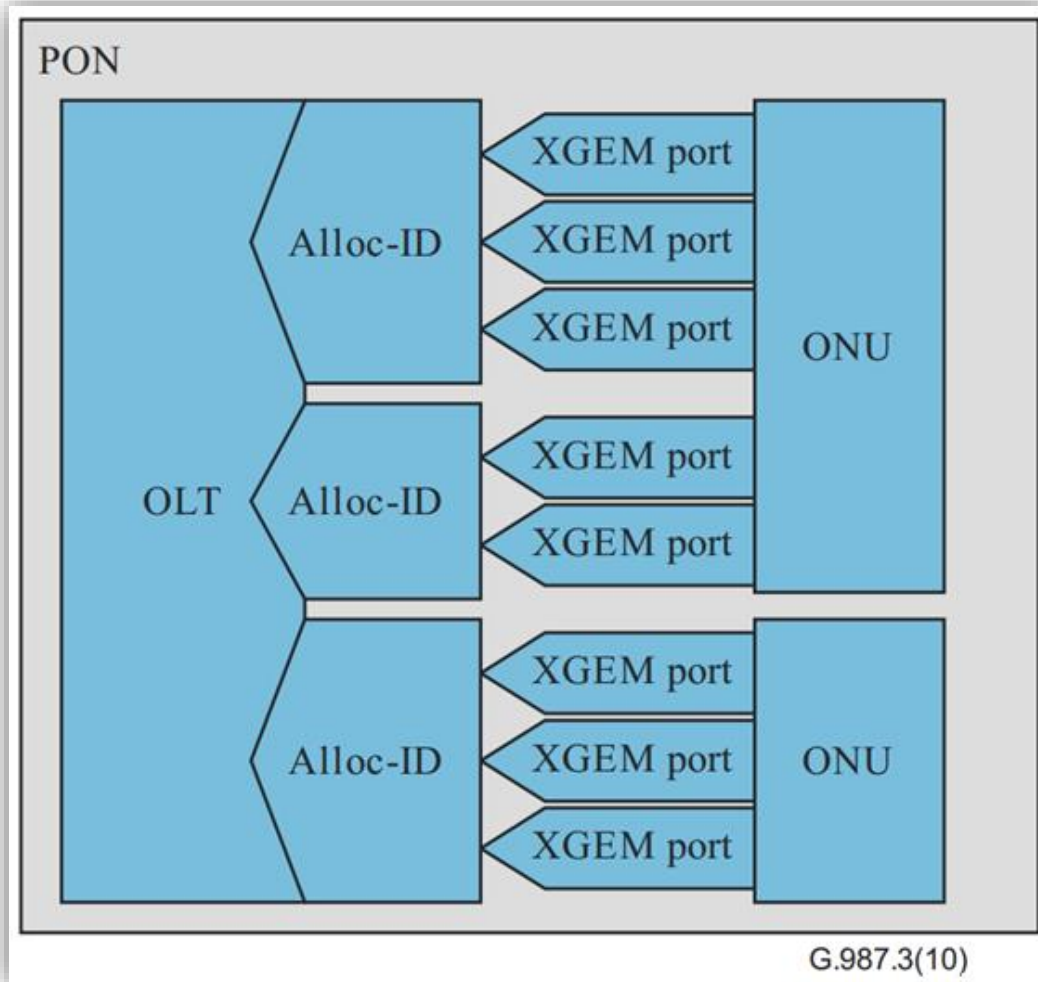
Κάθε ONU φιλτράρει τα downstream XGEM πλαίσια βάσει των XGEM Port-IDs και επεξεργάζεται μόνο τα XGEM πλαίσια που ανήκουν σε αυτήν. Multicast XGEM θύρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μεταφερθούν XGEM πλαίσια σε περισσότερες από μια ONU. Στην εικόνα 2.19 φαίνεται η downstream επικοινωνία.



Εικόνα 2. 19: Downstream πολύπλεξη σε XG- PON

Στην upstream μετάδοση η λειτουργία πολύπλεξης κίνησης είναι κατανομημένη. Ο OLT δημοπρατεί ευκαιρίες upstream μετάδοσης, ή εκχώρησης downstream εύρους ζώνης, ανάμεσα στις οντότητες που έχουν δεδομένα προς αποστολή. Οι ONUs που φέρουν δεδομένα κίνησης και είναι αποδέκτες των upstream “πιστώσεων” εύρους ζώνης που προσδιορίζονται από τα Alloc-IDs. Εκχωρήσεις εύρους ζώνης για διαφορετικά Alloc-IDs πολυπλέκονται στο χρόνο όπως ορίζεται από τις πληροφορίες χαρτογράφησης του OLT για την downstream μετάδοση.

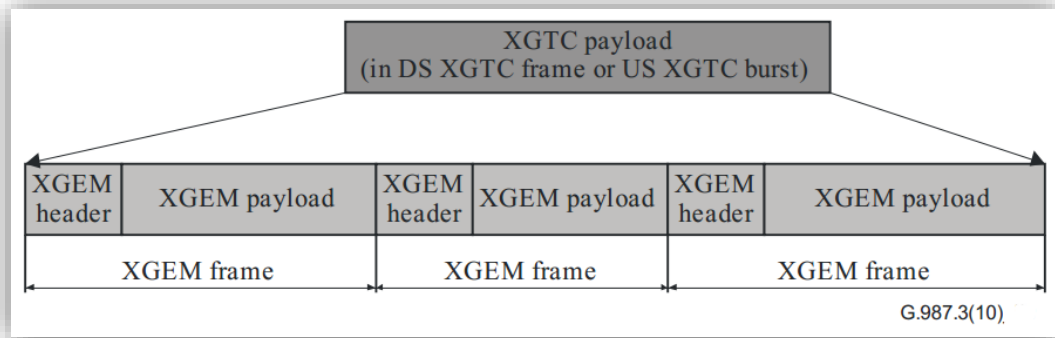
Εντός της κάθε εκχώρησης εύρους ζώνης, η ONU χρησιμοποιεί το XGEM Port-ID σαν ένα κλειδί πολύπλεξης για να προσδιορίσει τα XGEM πλαίσια που ανήκουν σε διαφορετικές upstream λογικές συνδέσεις. Στην εικόνα 2.20 φαίνεται η upstream επικοινωνία.



Εικόνα 2. 20: Upstream πολύπλεξη σε XG-PON

2.9 Δομή ωφέλιμου πλαισίου XGTC

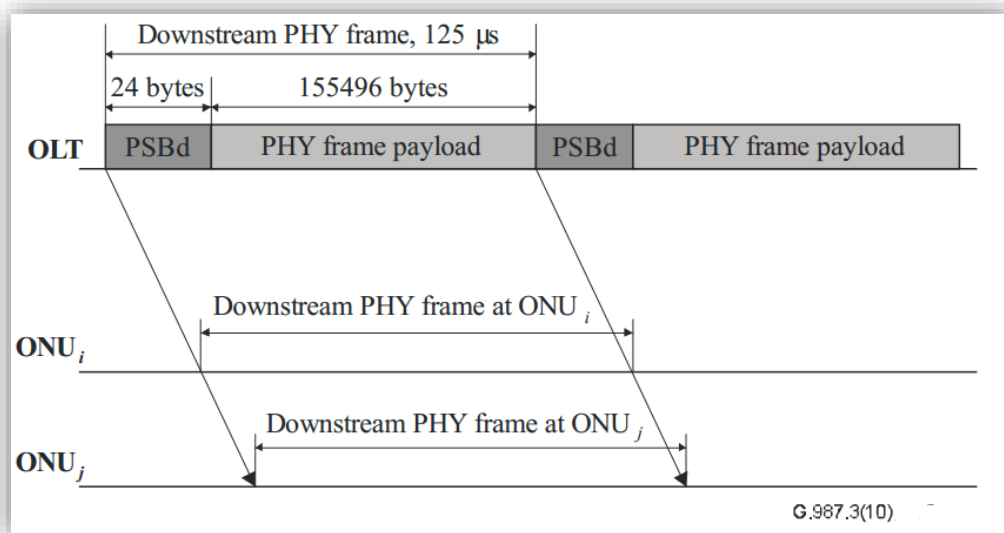
Το ωφέλιμο τμήμα του XGTC μεταφέρεται μέσα από στο downstream XGTC πλαίσιο και μέσα στην upstream οπτική ριπή πλαισίων. Το μέγεθος του ωφέλιμου downstream XGTC πλαισίου είναι σταθερό και ίσο με 135432 bytes. Σε αυτό προστίθεται και τα bytes της κεφαλίδας και προωθείται στο κατώτερο επίπεδο. Το μέγεθος του ωφέλιμου upstream XGTC πλαισίου είναι ίσο με το μέγεθος της αντίστοιχης εκχώρησης. Σε αυτό προστίθεται και τα bytes της κεφαλίδας και προωθείται στο κατώτερο επίπεδο.



Εικόνα 2. 21: Δομή XGTC ωφέλιμου πλαισίου

2.10 Δομή φυσικού πλαισίου downstream (PHY frame)

Ο OLT εκπέμπει συνεχώς πλαίσια προς την downstream κατεύθυνση. Η μετάδοση του OLT είναι χωρισμένη σε προκαθορισμένου μεγέθους downstream PHY πλαίσια. Η διάρκεια του downstream PHY πλαισίου είναι 125μsec, που με downstream ρυθμό μετάδοσης 9,95328 Gbit/s αντιστοιχούν σε μέγεθος 155520 bytes (38880 λέξεις). Ένα downstream PHY πλαίσιο αποτελείται από ένα 24-byte μπλοκ συγχρονισμού (PSBd) και από ένα 155496-byte πεδίο ωφέλιμου PHY πλαισίου που περιέχει το downstream XGTC πλαίσιο. Στην εικόνα 2.22 φαίνεται η δομή ενός downstream PHY πλαισίου.



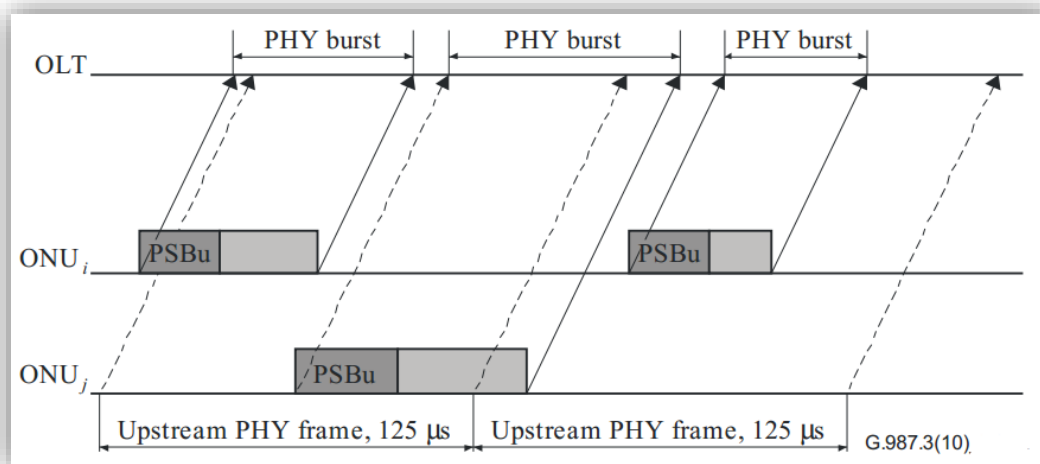
Εικόνα 2. 22: Downstream PHY πλαίσιο

2.11 Δομή upstream PHY πλαισίου και upstream PHY ριπής

Η διάρκεια ενός upstream PHY πλαισίου είναι 125 μsec , που με upstream ρυθμό μετάδοσης 2,48832 Gbit/s αντιστοιχεί σε μέγεθος 38880 bytes (9720 λέξεις).

Όπως προσδιορίζεται από τον OLT στην κάθε ONU προσδιορίζεται ο χρόνος στον οποίο πρέπει να ξεκινήσει την μετάδοση της που έχει υπολογιστεί βάσει του χρόνου που γίνεται διαθέσιμο το upstream κανάλι. Στην πραγματικότητα όμως κάθε ONU μεταδίδει μια οπτική ριπή πολλαπλών πλαισίων.

Η κάθε ONU που της έχει εκχωρηθεί εύρος ζώνης για μετάδοση μεταδίδει μια οπτική ριπή από πλαίσια αρχίζοντας στον χρόνο που έχει δηλωθεί, πριν και μετά την μετάδοση αυτήν είναι αδρανής. Μια upstream PHY ριπή αποτελείται από ένα μπλοκ συγχρονισμού (PSBu), και ένα PHY ωφέλιμο τμήμα που περιέχει την upstream XGTC ριπή. Ο OLT χρησιμοποιεί το BWmap για να ελέγξει τον χρόνο και την διάρκεια της upstream οπτικής ριπής για να μην υπάρξουν επικαλύψεις πλαισίων. Στην εικόνα 2.23 φαίνονται 3 παραδείγματα οπτικών ριπών που αποστέλλονται από δύο οπτικές μονάδες δικτύου.



Εικόνα 2. 23: Δομή upstream PHY οπτικής ριπής

2.12 Διαχείριση ενέργειας σε μια ONU

Για διάφορους λόγους, κρίνεται σκόπιμη η μείωση της ενέργειας που καταναλώνει μια ONU όσο το δυνατόν περισσότερο:

- Στην πάροδο του χρόνου, η φυσική εξέλιξη της τεχνολογίας τείνει προς πιο αποτελεσματικές υλοποιήσεις των υφιστάμενων λειτουργιών, μια τάση που αντισταθμίζεται, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό, από την αύξηση των επιπέδων της λειτουργικότητας και της ταχύτητας.

- Αν υπάρχει ένας τρόπος για την ONU να καθορίσει ότι μια διεπαφή συνδρομητή είναι αδρανής, τότε είναι θεμιτό για την ONU να απενεργοποιεί το κύκλωμα που συνδέονται με αυτήν την διεπαφή, διατηρώντας την ικανότητα να εντοπίζει ενδεχόμενη δραστηριότητα του συνδρομητή σε αυτή τη διεπαφή. Τα στοιχεία ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της διεπαφής.
- Το ποσοστό της εφικτής μείωσης της ενέργειας εξαρτάται από την αποδεκτή επίδραση της υπηρεσίας. Η μέγιστη πιθανή εξοικονόμηση προκύπτει όταν ο συνδρομητής απενεργοποιεί σκόπιμα μια ONU, για παράδειγμα, κατά την διάρκεια της νύχτας ή σε περίοδο διακοπών.
- Κατά τη διάρκεια πτώσεων τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος, κάποια υποβάθμιση της υπηρεσίας είναι εν γένει αποδεκτή. Για τη διατήρηση μεγαλύτερης διάρκειας ζωής της μπαταρίας, είναι επιθυμητό για την ONU να απενεργοποιεί το κύκλωμα που συνδέεται με όλες τις διεπαφές, εκτός από εκείνες που απαιτούνται για την παροχή βασικών υπηρεσιών. Διάφορες επιχειρήσεις και πελάτες μπορεί να έχουν διαφορετικούς ορισμούς των παρεχόμενων βασικών υπηρεσιών, και μπορεί να θέλετε να δώσετε προτεραιότητα το χρόνο που οι διεπαφές είναι απενεργοποιημένες. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα, που είναι γνωστό ως power shedding, περιγράφεται στο πρότυπο G.988 της ITU-T.

Οι Τεχνολογίες δικτύωσης οπτικής πρόσβασης όχι μόνο φέρουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στο εύρος ζώνης του χρήστη, αλλά επίσης φαίνονται αρκετά ελπιδοφόρες και στο πλαίσιο της ενεργειακής απόδοσης. Το επόμενης γενιάς παθητικό οπτικό δίκτυο (NG-PON), ο πιο δημοφιλής υποψήφιος των νέων οπτικών δικτύων, έχει θεωρηθεί ως ένα από τα πιο στοχευμένα δίκτυα από άποψη κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ όλων των τεχνολογιών των δικτύων πρόσβασης. Ωστόσο, στην διάδοση των τεχνολογιών NG-PON, εμπλέκονται προοδευτικά αυξανόμενος αριθμός τερματικών συνδρομητή, οπτικών συσκευών, και πομποδεκτών, έτσι, η σχετική κατανάλωση ισχύος αναμένεται να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό. Για το λόγο αυτό, μια πληθώρα ερευνητικών προσπαθειών έχει επικεντρωθεί στην αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης.

Πρόσφατα, η ομάδα πρόσβασης δικτύου ολοκληρωμένων υπηρεσιών (FSAN) αναγνώρισε το 10-gigat παθητικό οπτικό δίκτυο (XG-PON) ως τον καλύτερο υποψήφιο για την ανάπτυξη προτυποποίησης σχετικά με αυτό το θέμα. Ένα από τα τελευταία χαρακτηριστικά που ενισχύθηκε στο σύστημα XG-PON είναι αυτό της υποστήριξης εξοικονόμησης ενέργειας για αποδοτική διαχείριση. Συγκεκριμένα, χαμηλής ισχύος λειτουργίες των στοιχείων του δικτύου ενσωματώθηκαν σε αυτό το πρότυπο, εναλλάσσοντας συγκεκριμένα στοιχεία του δικτύου πρόσβασης σε καταστάσεις ύπνωσης και ενεργές καταστάσεις ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Το κύριο κριτήριο για την επιλογή του χρόνου και του τρόπου που μια συσκευή δικτύου, πρέπει να μεταβεί σε

κατάσταση ύπνωσης σχετίζεται με τον φόρτο που μια συσκευή είναι υπεύθυνη να μεταβιβάσει.

Λαμβάνοντας υπόψη τη γενική τοπολογία δέντρου μιας PON αρχιτεκτονικής, ο OLT, βρίσκεται στο central office (CO), το οποίο αποτελεί την 'ρίζα' του δέντρου παρέχοντας πρόσβαση σε πολλαπλές ONUs. Ευκαιρίες μετάβασης σε καταστάσεις ύπνωσης μπορεί να εμφανιστούν και στην upstream και στην downstream κατεύθυνση, καθώς οι ONUs μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας τους, όταν το ρεύμα καθόδου δεν προορίζεται για κάποια από αυτές. Έτσι μπορούν δυνητικά να απενεργοποιούν τους πομπούς τους όταν βεβαίως υπάρχει και απουσία upstream κίνησης.

Σε ένα XG-PON προσδιορίζονται δύο πρόσθετα μέσα διαχείρισης ενέργειας, που υποστηρίζονται από το TC επίπεδο. Το ένα ονομάζεται doze mode, και το άλλο ορίζεται σαν cyclic sleep mode. Μια ONU μπορεί να μεταβεί σε μια από αυτές τις καταστάσεις μετά από απόφαση ενός μηχανισμού διαχείρισης ενέργειας. Στην ουσία, μια ONU ενδέχεται να βρεθεί σε τρεις τύπους λειτουργιών: στην κανονική λειτουργία, στην οποία το ONU είναι πλήρως ενεργή, στην λειτουργία doze, στην οποία η ONU απενεργοποιεί την μονάδα του πομπού, και στην κυκλική λειτουργία, κατά την οποία η ONU απενεργοποιεί και τον πομπό και τον δέκτη.

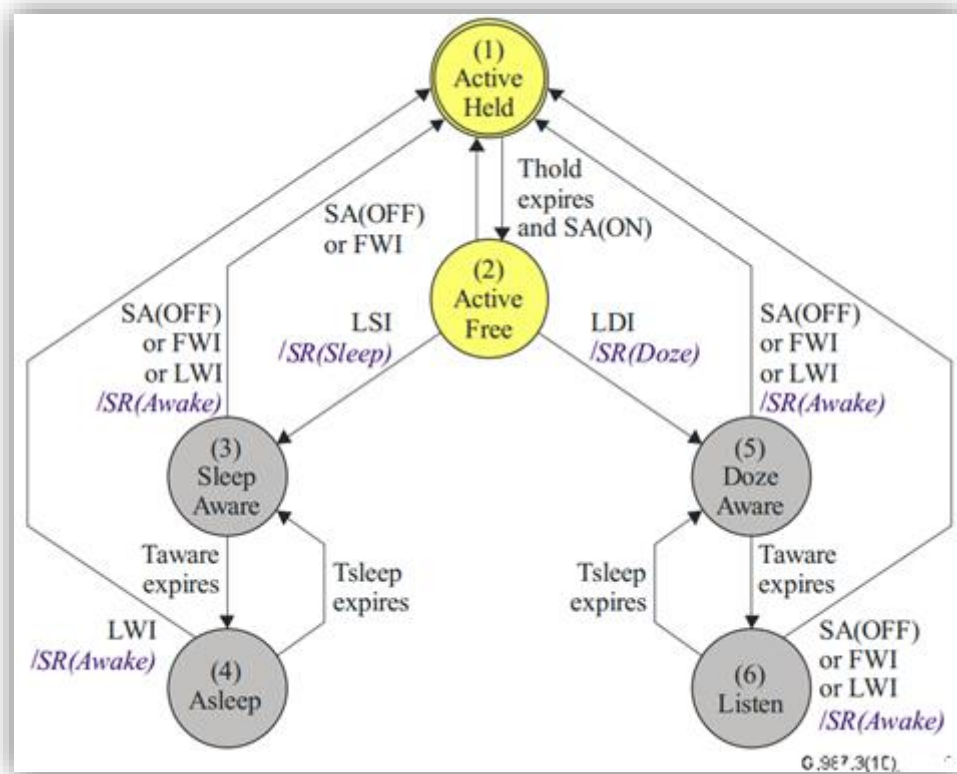
Η διεπαφή διαχείρισης και ελέγχου της ONU (OMCI) αποτελεί τον πυρήνα του μηχανισμού σηματοδότησης μεταξύ της ONU και του OLT. Ο μηχανισμός αυτός διαχειρίζεται κυρίως από τον OLT προκειμένου να οργανώσει τις ONUs που συνδέονται στο σύστημα XG-PON. Μέσω της OMCI, ο OLT είναι σε θέση να διαχειριστεί τις συνδέσεις μεταξύ των ONUs, να ζητήσει πληροφορίες για τις επιδόσεις και να ελέγξει την δικτυακή διεπαφή χρήστη (UNI). Το UNI είναι το σημείο σύνδεσης της ONU και των χρηστών που συνδέονται με την ONU. Ο OLT χρησιμοποιεί την OMCI για να ανακαλύψει τις δυνατότητες διαχείρισης ενέργειας των ONUs και να ρυθμίσει τα χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες της διαχείρισης ενέργειας.

Η διαχείριση ενέργειας σε ένα XG-PON διαρθρώνεται σε μηχανισμούς ενεργειακών καταστάσεων. Μια κατάσταση ορίζεται ως μια συγκεκριμένη λειτουργία, με την οποία μια ONU λειτουργεί για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Οι καταστάσεις είναι αλληλένδετες, σχηματίζοντας δύο αλληλοαναιρούμενα υποσύνολα: τις καταστάσεις, ActiveHeld και ActiveFree. Κατά τη διάρκεια της κατάστασης ActiveFree, την ONU παρακολουθεί το ρεύμα ανόδου που φτάνει στο UNI και το ρεύμα καθόδου, από την διεπαφή υπηρεσιών του κόμβου (SNI) που ορίζεται στον OLT, και συλλέγει τον φόρτο κίνησης για να αποφασίσει το αν μια ONU πρέπει να μεταβεί σε κατάσταση ύπνωσης. Η ONU σε ActiveHeld και σε

ActiveFree κατάσταση καταναλώνει πλήρη ισχύ, λειτουργώντας κανονικά, χωρίς την εφαρμογή καμίας κατάστασης ύπνωσης.

Το υποσύνολο χαμηλής ισχύος πραγματοποιείται από δύο λειτουργίες χαμηλής ισχύος που αναφέρονται ως doze και ως cyclic sleep mode. Κατά την κατάσταση cyclic sleep ο πομπός και ο δέκτης είναι απενεργοποιημένοι, ενώ σε κατάσταση doze ο δέκτης παραμένει ενεργοποιημένος και ο πομπός είναι απενεργοποιημένος. Προφανώς, η ONU σε κατάσταση doze είναι σε θέση να λαμβάνει και διαβιβάζει downstream κίνηση δεδομένων. Η διαχείριση ενέργειας του XG-PON ορίζει ένα ζευγάρι καταστάσεων για κάθε κατάσταση ύπνωσης.

Ειδικότερα, η DozeAware και η Listen αποτελούν τις καταστάσεις doze ύπνωσης, ενώ η SleepAware και η Asleep καθορίζουν την cyclic κατάσταση ύπνωσης. Οι DozeAware και SleepAware καταστάσεις είναι, στην ουσία, καταστάσεις προετοιμασίας κατά τις οποίες μια απόφαση λαμβάνεται σχετικά για την μετάβαση ή μη σε κατάσταση Listen και Asleep ελέγχοντας, την upstream και την downstream κίνηση για μετάβαση σε Asleep, και την upstream για μετάβαση σε Listen. Ακόμα κι αν η ONU διατηρεί και πομπό και δέκτη ενεργοποιημένους κατά τη διάρκεια των AwareStates, η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται ελαφρά επειδή η ONU λειτουργεί εν μέρει.

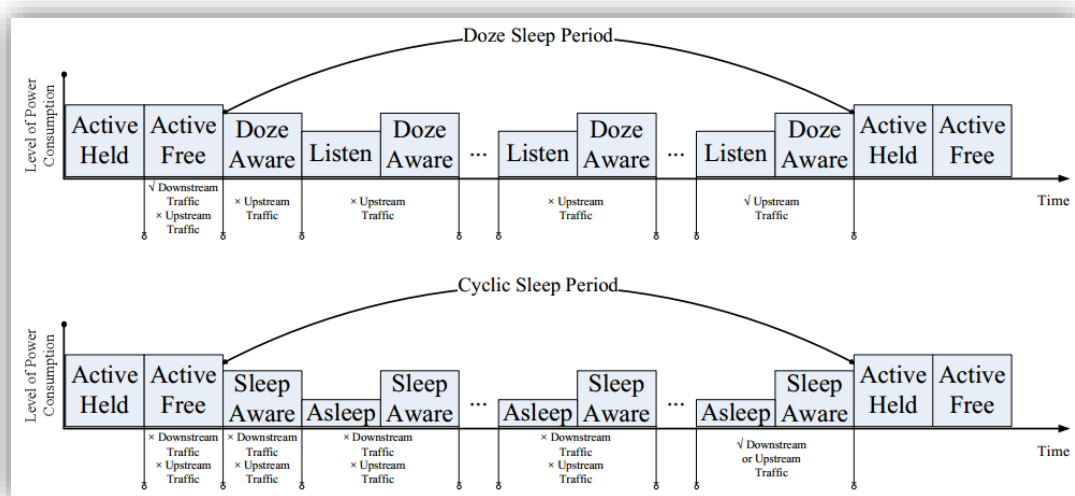


Εικόνα 2. 24: Διάγραμμα καταστάσεων ONU και μεταβάσεων

Μετά την είσοδο σε ActiveFree κατάσταση, η ONU αρχίζει να παρακολουθεί την κίνηση που φτάνει. Σε περίπτωση που ανιχνεύεται, στο UNI, upstream κυκλοφορία η ONU παραμένει σε λειτουργία πλήρης ισχύος, έτσι η κατάσταση ActiveHeld είναι αυτή που θα ακολουθήσει. Αντίθετα, πλήρης απουσία κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια της ActiveFree περιόδου, σηματοδοτεί μια πιθανή περίοδο cyclic ύπνωσης, μεταβαίνοντας στην SleepAware κατάσταση.

Αν η απουσία κυκλοφορίας συνεχίζεται κατά τη διάρκεια της περιόδου SleepAware, η ONU μεταβαίνει σε λειτουργία cyclic ύπνωσης. Μέχρι την άφιξη ροών δεδομένων είτε upstream είτε downstream, η ONU μεταβαίνει σε μια ακολουθία εναλλασσόμενων καταστάσεων SleepAware και Asleep, κατά τη διάρκεια της κατάστασης SleepAware, η ONU παρακολουθεί την προηγούμενη κατάσταση Asleep και την τωρινή κατάσταση για την παρουσία κίνησης. Κάθε είδους άφιξης οδηγεί την ONU εκτός της cyclic λειτουργίας ύπνωσης επιστρέφοντας στην ActiveHeld κατάσταση, σε πλήρη λειτουργία. Στην 24 που ακολουθεί φαίνεται το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων μιας ONU όπως αυτό ορίζεται από το πρότυπο της ITU.

Από την άλλη πλευρά, μια χρονική περίοδο ύπνωσης doze είναι ξεκινά σε περίπτωση που η ONU βιώνει downstream κίνηση αλλά απουσιάζει η upstream κίνηση. Με παρόμοιο τρόπο με την cyclic κατάσταση ύπνωσης, η κατάσταση DozeAware ακολουθεί την ActiveFree και καθιερώνεται μια εναλλασσόμενη ακολουθία DozeAware και Listen καταστάσεων όταν δεν συμβαίνουν καθόλου αφίξεις upstream. Και πάλι, η ONU εισέρχεται σε ActiveHeld κατάσταση όταν ληφθεί upstream κίνηση στο UNI. Η εικόνα 2.24 απεικονίζει τις αντίστοιχες καταστάσεις των δύο τύπων λειτουργιών ύπνωσης μιας ONU.



Εικόνα 2. 25: Εναλλαγή ενεργών καταστάσεων - καταστάσεων ύπνωσης

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθούμε στο ότι υπάρχουν δύο τύποι καταστάσεων Aware, η αρχική κατάσταση Aware και η ενδιάμεσες καταστάσεις Aware. Στην αρχική Aware αποφασίζεται η μετάβαση σε κατάσταση πλήρης ύπνωσης βάσει της κίνησης που παρακολουθήθηκε κατά την χρονική περίοδο της τρέχουσας κατάστασης Aware, αντιθέτως με τις ενδιάμεσες καταστάσεις Aware στις οποίες έχουμε παρατηρήσεις κατά την διάρκεια μιας ακολουθίας πλήρης ύπνωσης.

Αναφερόμενοι στις ενδιάμεσες καταστάσεις Aware εννοούμε αυτές οι οποίες ακολουθούν μια κατάσταση Listen ή μια κατάσταση Asleep, όταν η συνέχιση της ακολουθίας πλήρης ύπνωσης βασίζεται στα δεδομένα κίνησης των καταστάσεων ύπνωσης αλλά και στα δεδομένα της τρέχουσας κατάστασης Aware. Έτσι, η ενδιάμεση κατάσταση SleepAware είναι αρμόδια για την παρακολούθηση της upstream και της downstream κίνησης κατά την τελευταία κατάσταση Asleep αλλά και κατά την τρέχουσα SleepAware κατάσταση προκειμένου να αποφασίσει την συνέχιση της ακολουθίας πλήρης ύπνωσης, όταν η αρχική κατάσταση SleepAware φθάνει σε μια απόφαση σχετικά την μετάβαση σε πλήρη ύπνωση βάσει την κυκλοφορία που παρακολουθείται κατά τη διάρκεια του τρέχοντος χρονικού διαστήματος. Το ίδιο σκεπτικό ισχύει και για τις καταστάσεις αρχική DozeAware - ενδιάμεση DozeAware.

Η διάρκεια της κάθε κατάστασης, εκφράζεται σαν πολλαπλάσια του χρονικού διαστήματος διάρκειας 125 μsec (που μετριέται σύμφωνα με τα 125 μsec διάρκειας των πλαισίων). Η ONU διατηρεί τη δυνατότητα να ξυπνήσει είτε με τοπικά ερεθίσματα που απορρέουν από διαδικασίες του φυσικού επιπέδου, είτε από μηνύματα του OLT διαχείρισης ή συντήρησης που είναι γνωστά ως PLAOM μηνύματα.

Στον πίνακα 2.4 εξηγούνται αναλυτικά οι διάφοροι timers οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τον χρόνο παραμονής της ONU στις διάφορες καταστάσεις και κατ' επέκταση για το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας σε μια ONU.

Γεγονότα Timer	Σημασιολογία
<i>Λήξη Thold</i>	Το γεγονός αυτό υλοποιείται στην ActiveHeld, ελέγχοντας τον χρόνο παραμονής σε αυτήν την κατάσταση.
<i>Λήξη Taware</i>	Το γεγονός αυτό υλοποιείται στην DozeAware και στην SleepAware, ελέγχοντας τον χρόνο παραμονής σε αυτήν την κατάσταση.
<i>Λήξη Tsleep</i>	Το γεγονός αυτό υλοποιείται στην Asleep και στην Listen, ελέγχοντας τον χρόνο παραμονής σε αυτήν την κατάσταση.

Πίνακας 2. 4: Συγκεντρωτικός πίνακας timers ONU

Οι καταστάσεις της διαχείρισης ισχύος της ONU μαζί με τους αντίστοιχη σημασιολογική περιγραφή παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα 2.5.

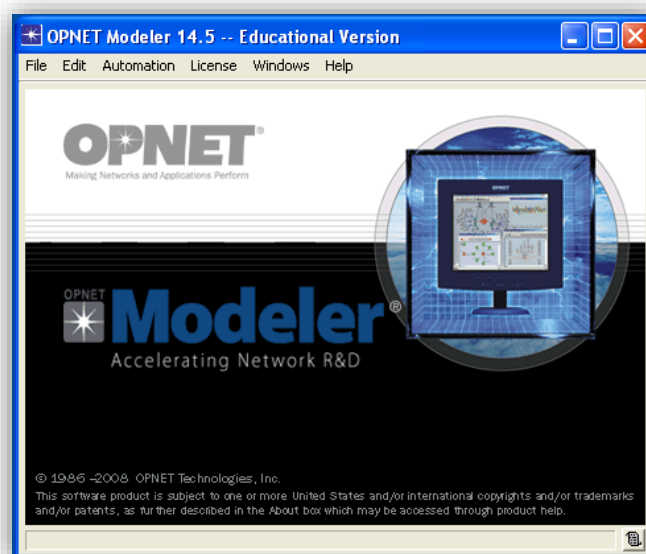
Καταστάσεις	Σημασιολογία
<i>ActiveHeld</i>	Η ONU ανταποκρίνεται πλήρως, διαβιβάζει downstream και upstream δεδομένα. Μεταβάσεις σε καταστάσεις διαχείρισης ενέργειας δεν επιτρέπονται. Ελάχιστη παραμονή σε αυτή την κατάσταση για Thold. Μετάβαση προς την ActiveFree κατάσταση.
<i>ActiveFree</i>	Η ONU ανταποκρίνεται πλήρως, διαβιβάζει downstream και upstream δεδομένα. Οι Μεταβάσεις σε καταστάσεις διαχείρισης ενέργειας είναι τοπική απόφαση. Μεταβάσεις επιτρέπονται προς την ActiveHeld, την DozeAware και την SleepAware.
<i>Asleep</i>	Διακόπτεται η λειτουργία του δέκτη και του πομπού. Αυτή η κατάσταση εξακολουθεί να υφίσταται για καθορισμένη διάρκεια Tsleep. Πριν από έξοδο από αυτήν την κατάσταση, η ONU πρέπει να είναι πλήρως ικανή να ανταποκριθεί σε upstream και σε downstream μετάδοση. Μετάβαση επιτρέπεται μόνο προς την SleepAware κατάσταση.
<i>Listen</i>	Ο δέκτης της ONU είναι ενεργοποιημένος ενώ ο πομπός είναι απενεργοποιημένος. Η ONU “ακούει” το downstream κανάλι και προωθεί τα downstream πακέτα. Αυτή η κατάσταση εξακολουθεί να υφίσταται για καθορισμένη διάρκεια Tsleep. Πριν από την έξοδο από αυτήν την κατάσταση, η ONU εξασφαλίζει ότι είναι πλήρως ενεργοποιημένη, συγχρονισμένη, και ικανή να ανταποκριθεί τόσο στην upstream όσο και στην downstream μετάδοση. Μετάβαση επιτρέπεται μόνο προς την DozeAware κατάσταση.
<i>DozeAware SleepAware</i>	Και ο πομπός αλλά και ο δέκτης είναι ενεργοποιημένοι. Αυτή η κατάσταση εξακολουθεί να υφίσταται για καθορισμένη διάρκεια Taware. Η ONU ανταποκρίνεται πλήρως, διαβιβάζει τα downstream δεδομένα και απαντά σε όλες τις χορηγήσεις εύρους ζώνης. Μεταβάσεις επιτρέπονται και από τις δύο καταστάσεις προς την ActiveHeld κατάσταση. Από την DozeAware μεταβαίνει και σε Listen και από την SleepAware μεταβαίνει κα σε Asleep.

Πίνακας 2. 5: Συγκεντρωτικός πίνακας καταστάσεων ONU

Κεφάλαιο 3: Εισαγωγή στο OPNET Modeler

Tο παρόν κεφάλαιο ξεναγεί τον χρήστη στο γραφικό περιβάλλον και στις διεπαφές του OPNET Modeler για να βοηθήσει στην εξοικείωση του αναγνώστη με τις βασικές λειτουργίες του Modeler.

Οι διεπαφές του χρήστη που περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνουν: το παράθυρο διαχείρισης εργασιών, το παράθυρο προτιμήσεων του Modeler, τους editors του OPNET, ένα μηχανισμό ανάλυσης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και το documentation του OPNET Modeler.

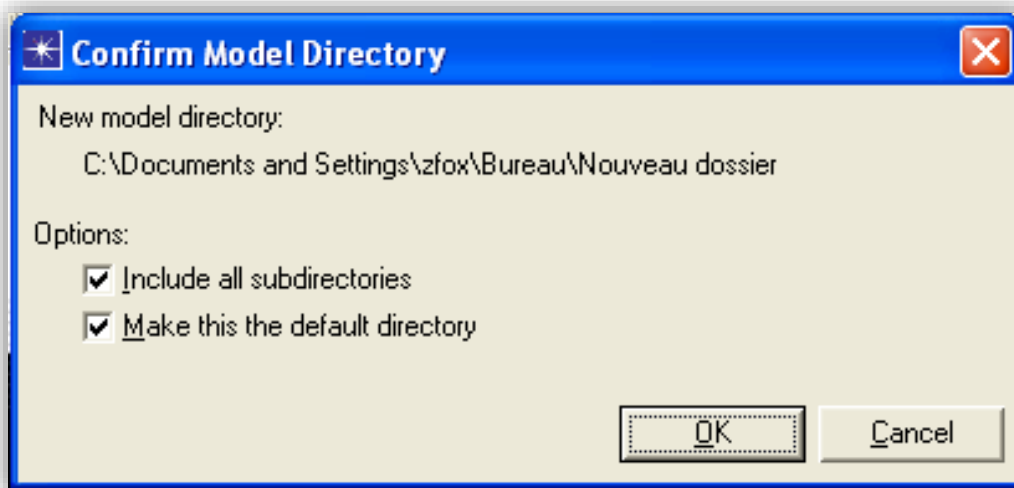


Εικόνα 3. 26: Αρχική οθόνη OPNET Modeler

3.1 Παράθυρο διαχείρισης εργασιών (Project management)

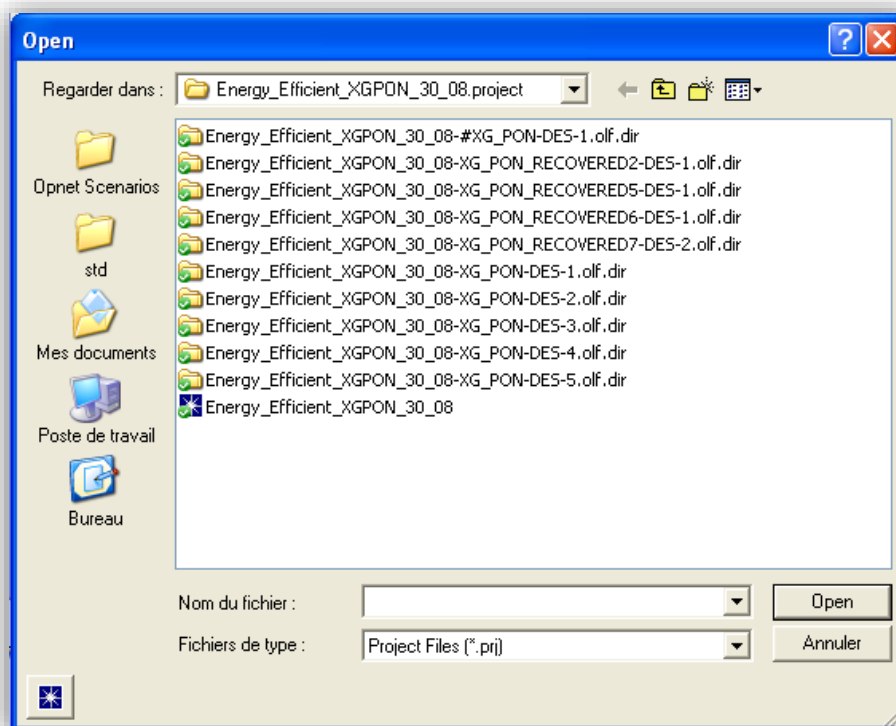
Οι εργασίες στην απλή έκδοση του OPNET μπορούν να διαχειριστούν εύκολα και στο OPNET Modeler. Στο μενού "Αρχείο", ένας χρήστης μπορεί να επιλέξει να δημιουργήσει μια νέα εργασία, να ανοίξει μια υπάρχουσα εργασία, να διαγράψει μια εργασία, ή να προσθέσει ένα πρότυπο από κάποιο εξωτερικό κατάλογο, κλπ. Για να δημιουργήσετε και να ανοίξετε μια προσαρμοσμένη εργασία μέσα σε έναν κατάλογο, μπορείτε να ακολουθήσετε τα παρακάτω βήματα:

- Αρχικά με την δημιουργία ενός καταλόγου όπου θέλετε να αποθηκευτούν τα αρχεία της εργασίας από το OPNET. Για διάφορα project, μπορείτε να δημιουργήσετε επιμέρους καταλόγους.
- Από OPNET Modeler, και την επιλογή μενού " Αρχείο – διαχείριση αρχείων μοντέλου ", και έπειτα "*Προσθήκη καταλόγου μοντέλου*" γίνεται πρόσθεση του καταλόγου που δημιουργήθηκε πρόσφατα. Στη συνέχεια θα ζητηθεί να επιβεβαιωθεί ο κατάλογος του μοντέλου όπως φαίνεται στην εικόνα 3.27. Εδώ εμφανίζονται δύο επιλογές: "*να περιλαμβάνονται όλοι οι υπο-κατάλογοι*" και "*να γίνει αυτός ο κατάλογος προεπιλεγμένος*". Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή "*να γίνει αυτός ο κατάλογος προεπιλεγμένος*" θα αναγκάσει αρχεία από άλλες νέες εργασίες να αποθηκευτούν σε αυτόν τον κατάλογο. Ως εκ τούτου, είναι ενδεδειγμένο να επιλέγεται πάντα αυτή η επιλογή για μια νέα εργασία για να αποθηκεύει τα αρχεία της νέας εργασίας σε ένα ξεχωριστό κατάλογο.



Εικόνα 3. 27: Παράθυρο επιβεβαίωσης καταλόγου μοντέλου

- Από το OPNET Modeler, και το μενού " *Αρχείο – διαχείριση αρχείων μοντέλου*", με την επιλογή " *Ανανέωση καταλόγων μοντέλου*" επιτυγχάνεται η ενημέρωση του νέου καταλόγου του μοντέλου που μόλις προστέθηκε. Αυτή η λειτουργία ανανέωσης θα επιτρέψει στο OPNET Modeler να φορτώσει το νέο κατάλογο του μοντέλου και να τον εμφανίσει στο παράθυρο των εργασιών.
- Από το OPNET Modeler, και την επιλογή μενού " *Αρχείο*", " *Νέο...*", δημιουργείτε μία νέα εργασία. Θα ζητηθεί " *Εισαγωγή ονόματος εργασίας*" όπου εισάγονται το όνομα της εργασίας καθώς και το πρώτο σενάριο της εργασίας. Για δημιουργία μιας νέας εργασίας, χρησιμοποιώντας τον " *οδηγό*", στο παράθυρο διαλόγου " *Εισαγωγή ονόματος εργασίας* ", χρησιμοποιούμε την επιλογή " *Χρήση οδηγού έναρξης*" κατά τη δημιουργία νέων σεναρίων. Για μη αυτόματη δημιουργία μιας νέας εργασίας, στο παράθυρο διαλόγου " *Εισαγωγή ονόματος εργασίας* ", επιλέγεται κατάργηση της " *Χρήση οδηγού κατά τη δημιουργία νέων σεναρίων*" και πατώντας " *ΟΚ*" εκτελείται μετάβαση απευθείας στον project editor. Στον project editor, υπάρχει η δυνατότητα μη αυτόματου τρόπου δημιουργίας σεναρίων εργασίας.
- Μετά την δημιουργία του νέου project και του νέου σεναρίου, στον project editor, με το κουμπί " *Αποθήκευση*" αποθηκεύονται τα αρχεία του project. Όλα τα αρχεία του project μπορούν να αποθηκευτούν στον πρόσφατα δημιουργημένο κατάλογο.

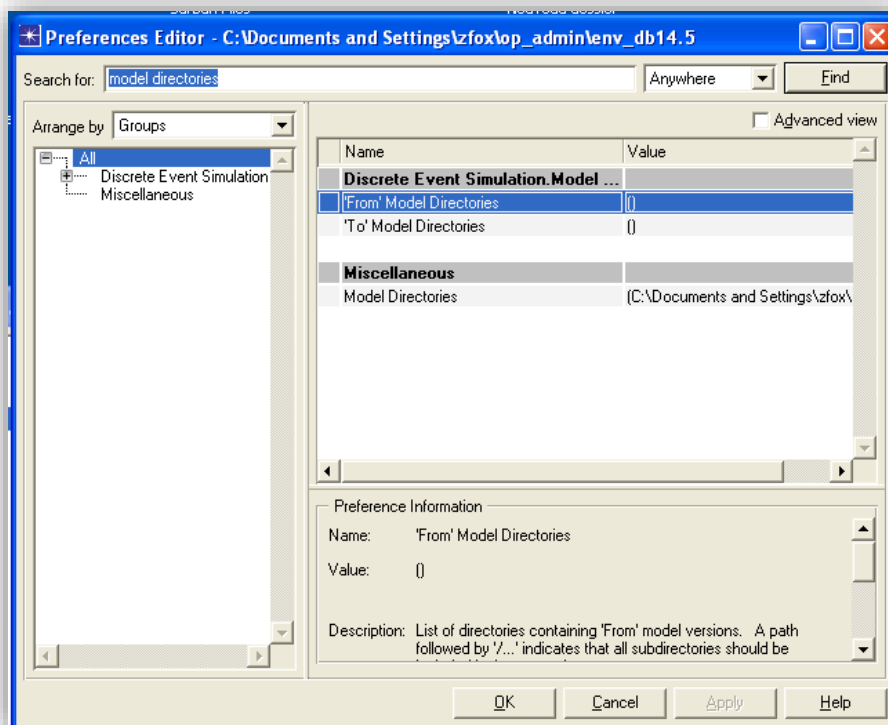


Εικόνα 3. 28: Άνοιγμα υπάρχοντος project

- Για άνοιγμα ενός υπάρχοντος project, από το OPNET Modeler, και το μενού "Αρχείο", και την επιλογή "Άνοιγμα" εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου του project όπως αυτό στην εικόνα 3.28. Από το παράθυρο διαλόγου, μπορείτε να επιλέξετε τον κατάλογο, όπου βρίσκεται το project σας από την αριστερή στήλη του παραθύρου, στη συνέχεια επιλέξτε το συγκεκριμένο σχέδιο που θέλετε να ανοίξετε από την δεξιά στήλη του παραθύρου εργασιών του OPNET.

3.2 Παράθυρο προτιμήσεων του Modeler (Modeler preferences)

Το OPNET Modeler και η προσομοίωση μπορούν να προσαρμοστούν μέσω του editor των προτιμήσεων του OPNET. Αυτός ο editor επιτρέπει στο χρήστη να αλλάξει τις διαμορφώσεις για την διεπαφή χρήστη (UI) του modeler, τις επιλογές προσομοίωσης, την επίλυση προβλημάτων, την διαχείριση μνήμης, την χορήγηση αδειών, κλπ. Από το OPNET Modeler, και το μενού "Επεξεργασία", με την επιλογή "Προτιμήσεις" ανοίγει ο editor των προτιμήσεων του OPNET. Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές προτιμήσεις στο παράθυρο διαλόγου, δίδεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης του πλαισίου της "αναζήτησης" για την εύρεση κάποιας συγκεκριμένης προτίμησης. Παρακάτω παρατίθενται μερικά παραδείγματα προτιμήσεων που μπορεί να επιλέξει ένας χρήστης του OPNET Modeler. Η εικόνα 3.29 δείχνει τις διαθέσιμες προτιμήσεις που υπάρχουν στον preferences editor.



Εικόνα 3. 29: Επεξεργαστής προτιμήσεων

Για πρόσθεση, αφαίρεση, αναδιάταξη των αποθηκευμένων καταλόγων των μοντέλων στο OPNET Modeler, στον editor των προτιμήσεων γίνεται αναζήτηση για τους “καταλόγους των μοντέλων”.

Από το OPNET Modeler 14.5 και στις έπειτα εκδόσεις υποστηρίζεται αυτόματη αποθήκευση αντιγράφων ασφαλείας. Ως εκ τούτου, αν ένας χρήστης ανοίξει ένα έργο OPNET και αφήσει, τα αρχεία του project θα αποθηκευτούν αυτόματα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Αυτή η δυνατότητα είναι χρήσιμη για να αποφευχθεί η απώλεια δεδομένων κάτω από μερικές απρόσμενες περιστάσεις, όπως η διακοπή ρεύματος, αποτυχία του προγράμματος, και ούτω καθεξής. Η προεπιλεγμένη τιμή του εφεδρικού διαστήματος είναι 60 λεπτά. Μπορεί βέβαια να αλλάξει αυτή η τιμή ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, εάν υπάρχουν ενδείξεις σφαλμάτων ή ενδείξεις επιβεβαίωσης, το OPNET Modeler ειδοποιεί τον χρήστη μέσα από ηχητικό θόρυβο. Δεδομένου ότι αυτό το ηχητικό σήμα προέρχεται από το εσωτερικό ηχείο του υπολογιστή αντί για την κάρτα ήχου, ρύθμιση του ήχου δεν θα το επηρεάσει. Αν η εργασία σας είναι σε αρχικό στάδιο εντοπισμού σφαλμάτων, ίσως να υπάρχουν πολλά λάθη, γι’ αυτό κάθε φορά που εκτελείτε την προσομοίωση σας, αυτό θα συνεχίζει να χτυπάει. Για να σταματήσει να χτυπάει, στον επεξεργαστή προτιμήσεων μπορείτε να αναζητήσετε την επιλογή “beep” και να την διαμορφώσετε ανάλογα με τις προτιμήσεις σας.

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, πολλοί χρήστες απαιτούν συχνά εξαγωγή των δεδομένων της προσομοίωσης σε ένα πρόγραμμα spreadsheet για ανάλυση. Στο OPNET Modeler, τα δεδομένα προσομοίωσης μπορούν να εξαχθούν απευθείας σε ένα προεπιλεγμένο πρόγραμμα spreadsheet. Ο κάθε χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα τέτοιο πρόγραμμα spreadsheet. Στη συνέχεια όταν εξαχθούν τα δεδομένα στον spreadsheet browser των δεδομένων προσομοίωσης, αυτά τα δεδομένα θα φορτωθούν στο προκαθορισμένο πρόγραμμα spreadsheet. Υπάρχουν πολλές άλλες επιλογές σύμφωνα με τις οποίες μπορείτε να προσαρμόσετε τα δεδομένα των μοντέλων και της προσομοίωσης.

3.3 Επεξεργαστές του OPNET

Στο OPNET Modeler, υπάρχουν πολλοί επεξεργαστές που διευκολύνουν και απλοποιούν τις εργασίες μοντελοποίησης και προσομοίωσης με μια εύκολη στη χρήση γραφική διεπαφή χρήστη. Εδώ, θα παρουσιάσουμε μερικούς από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους επεξεργαστές μερικοί από τους οποίους είναι: ο επεξεργαστής εργασιών, ο επεξεργαστής κόμβων, ο επεξεργαστής διεργασιών, ο επεξεργαστής ζεύξεων, ο επεξεργαστής μορφής πακέτων, ο ICI επεξεργαστής, ο PDF επεξεργαστής και ο Probe επεξεργαστής. Σαφώς υπάρχουν και πολλοί άλλοι editors οι οποίοι δεν είναι και τόσο δημοφιλής σε όλους τους προγραμματιστές.

3.3.1 Επεξεργαστής εργασιών (Project Editor)

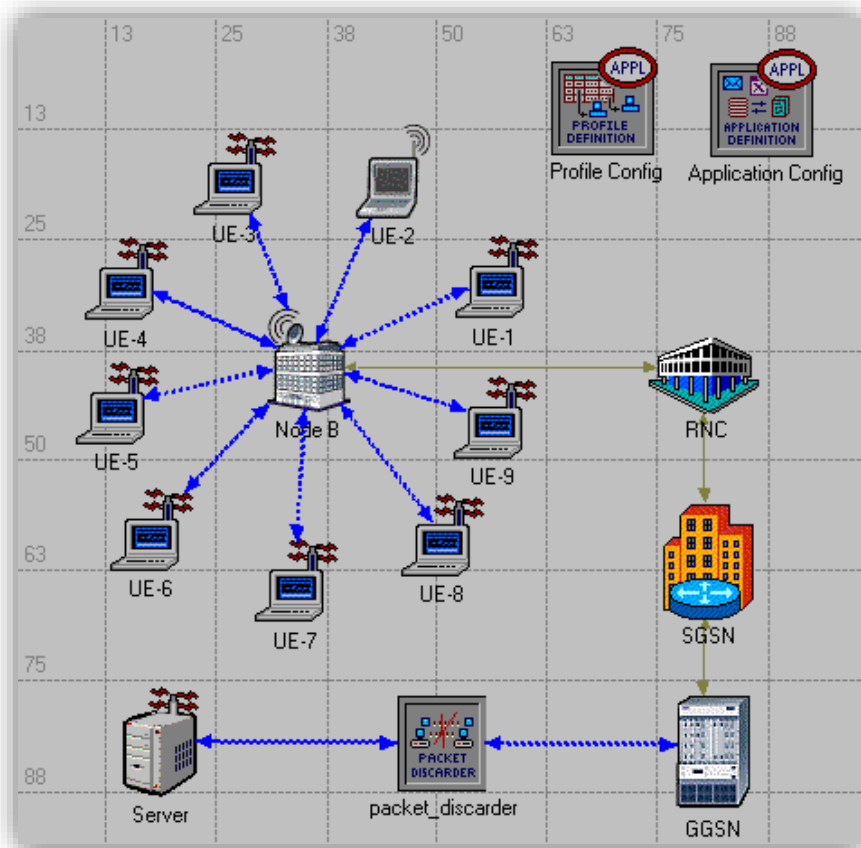
Ο project editor είναι αυτός χρησιμοποιείται για κάθε εργασία προσομοίωσης. Τα προγράμματα προσομοίωσης και τα σενάρια διαχειρίζονται από τον project editor. Ο χρήστης μπορεί να ανοίξει ένα project editor δημιουργώντας μια νέα εργασία, ή να ανοίξει μια υπάρχουσα εργασία. Από OPNET Modeler, με την επιλογή "Αρχείο" - "νέα..."-"εργασία" δημιουργείται μια νέα εργασία, ή με την επιλογή "Αρχείο"- "άνοιγμα..."-"εργασία" ανακτάται μια ήδη υπάρχουσα εργασία. Στην εικόνα 3.30 παρουσιάζεται ο επεξεργαστή εργασιών με ένα φορτωμένο σενάριο προσομοίωσης.

Ο project editor επιτρέπει την:

- Δημιουργία και επεξεργασία μοντέλων δικτύου
- Δημιουργία και διαχείριση σεναρίων εργασιών
- Επεξεργασία και εισαγωγή τοπολογίας δικτύου
- Επεξεργασία και εισαγωγή φόρτου δικτύου
- Προσαρμογή του περιβάλλοντος δικτύου
- Επιβεβαίωση της συνδεσιμότητας των ζεύξεων
- Εγγραφή της ροής των πακέτων σε animation και την κινητικότητα των κόμβων για όλο το υποδίκτυο
- Επεξεργασία και την εκτέλεση προσομοιώσεων για τα σενάρια της εργασίας.

Τα παραπάνω μπορούν να επιτευχθούν με την αντίστοιχη επιλογή από το μενού στοιχείων ή κάνοντας κλικ στα κουμπιά συντόμευσης στον project editor. Τα μοντέλα του OPNET έχουν μια δομή τριών επιπέδων: το μοντέλο δικτύου, το μοντέλο κόμβων και το μοντέλο διεργασιών.

Τα μοντέλα δικτύου δημιουργούνται μέσα από τον project editor. Μπορείτε να σύρετε και αφήσετε τα αντικείμενα δικτύου όπως υποδίκτυα, συσκευές δικτύου/κόμβους και ζεύξεις από την παλέτα αντικειμένων στον project editor, και να τα συνδέσετε μεταξύ τους, σε ένα δίκτυο. Τα μοντέλα κόμβων και τα μοντέλα διεργασιών δημιουργούνται από τον node editor και τον process editor αντίστοιχα.



Εικόνα 3. 30: Άποψη του επεξεργαστή εργασιών

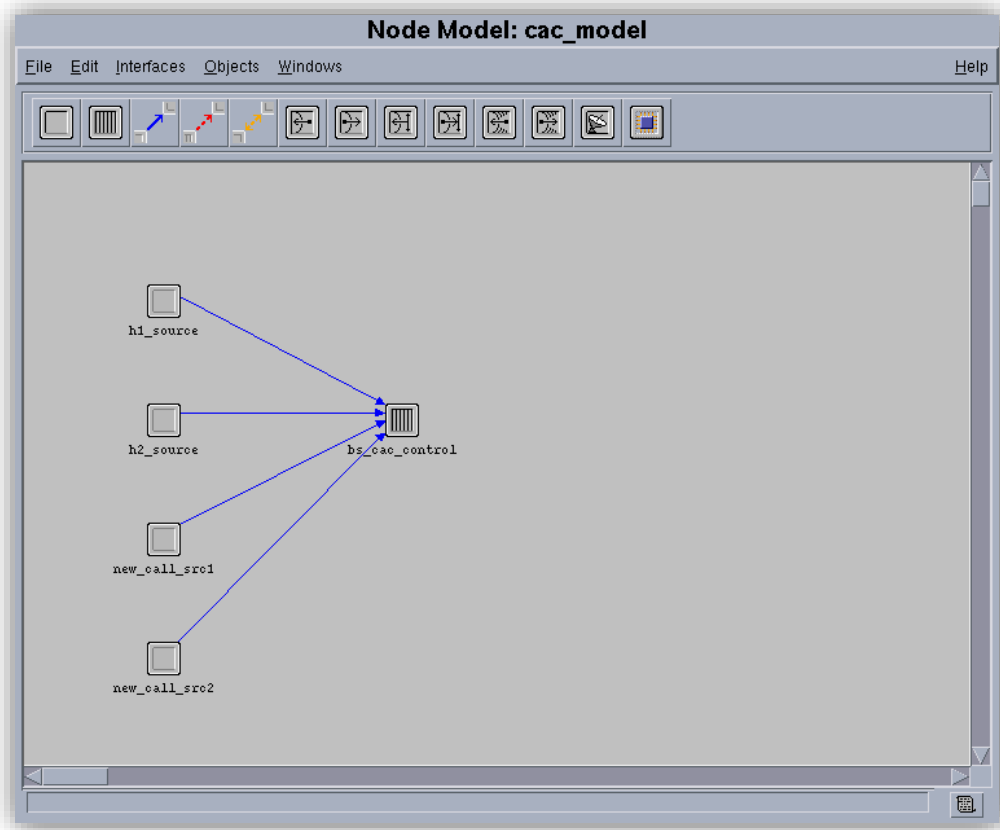
3.3.2 Επεξεργαστής Κόμβων (Node Editor)

Ο επεξεργαστή κόμβων είναι το εργαλείο, με το οποίο ένας χρήστης μπορεί να δημιουργήσει και να επεξεργαστεί την εσωτερική δομή μιας συσκευής ή ενός κόμβου. Ένας κόμβος μπορεί να αντιπροσωπεύει έναν υπολογιστή, ένα router, ένα διακόπτη, μια δομή cloud computing ή οποιοδήποτε άλλο στοιχείο δικτύου. Ένας κόμβος αποτελείται από διάφορα επιμέρους στοιχεία, τα στοιχεία αυτά γενικά χωρίζονται από λογικές λειτουργίες και είναι σε θέση να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ροών πακέτων και στατιστικής ροής.

Τα πακέτα ρέουν μέσα από αυτά τα στοιχεία μέσω των ροών πακέτων. Κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη λειτουργία του κόμβου. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μεταδώσουν πακέτα, να λάβουν πακέτα, να επεξεργαστούν δεδομένα, να αποθηκεύσουν δεδομένα, να δρομολογήσουν πακέτα, κτλ.

Στο OPNET Modeler, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός κενού στοιχείου στον επεξεργαστή κόμβων επιλέγοντας από το μενού "Αρχείο" - "νέο..." και έπειτα την επιλογή "Μοντέλο κόμβων". Ο επεξεργαστής κόμβου ανοίγει επίσης και

κάνοντας διπλό κλικ σε μια συσκευή ή σε έναν κόμβο στον project editor. Η εικόνα 3.31 δείχνει ένα τυπικό μοντέλο κόμβου όπως απεικονίζεται στον επεξεργαστή κόμβων.



Εικόνα 3. 31: Άποψη του επεξεργαστή κόμβων

Ο node editor σας επιτρέπει να δημιουργήσετε και να επεξεργαστείτε τα στοιχεία αυτά στο μοντέλο του κόμβου. Αυτά τα στοιχεία περιέχουν τον επεξεργαστή, την ουρά, τους πομποδέκτες, τις κεραίες και την μονάδα του εξωτερικού συστήματος. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να συνδεθούν με ροές πακέτων και ροές στατιστικών.

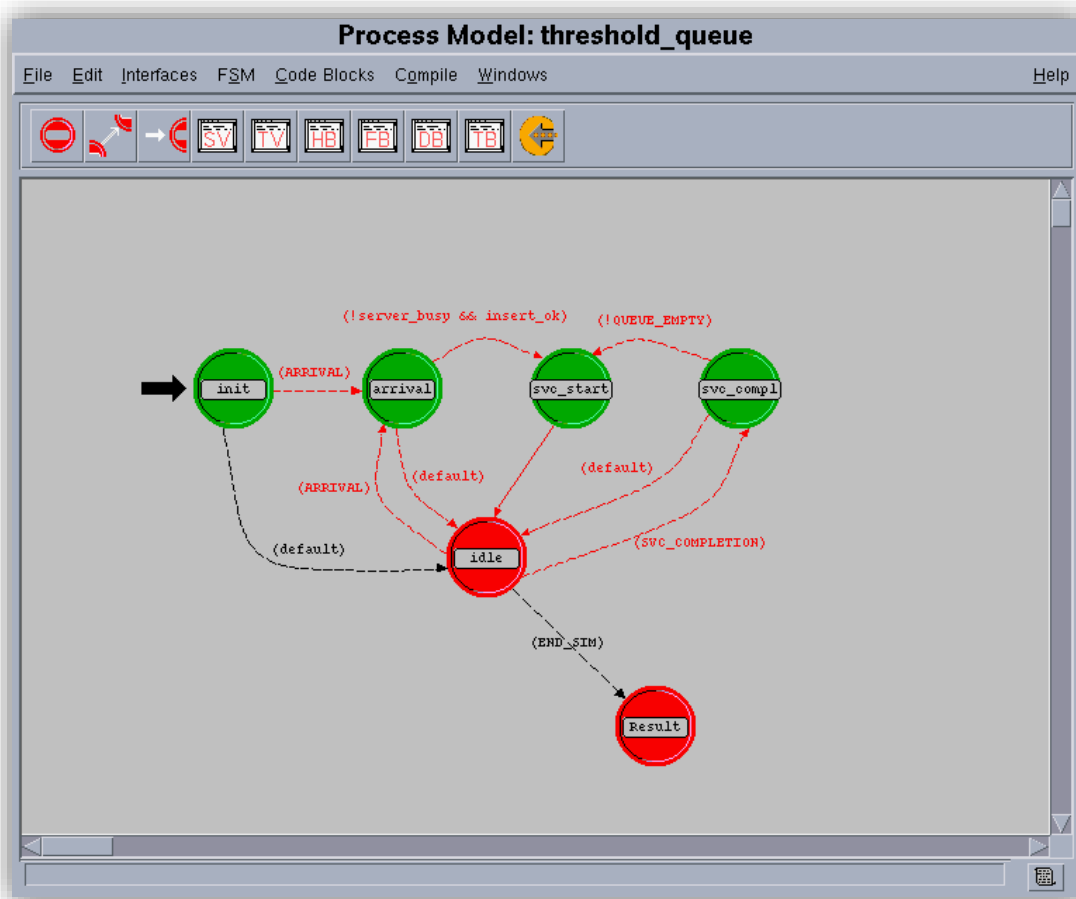
3.3.3 Επεξεργαστής διεργασιών (Process Editor)

Ο επεξεργαστής διεργασιών είναι ο χώρος όπου επιτρέπεται η εισαγωγή κώδικα για την εφαρμογή των αλγόριθμων και πρωτοκόλλων. Το μοντέλο διεργασιών δημιουργείται και επεξεργάζεται στον επεξεργαστή διεργασιών.

Ένα μοντέλο κόμβων μπορεί να περιέχει αρκετά στοιχεία, καθένα από τα οποία έχει μια συγκεκριμένη λειτουργία. Ένα τέτοιο στοιχείο πρέπει να περιέχει ένα μοντέλο διεργασιών που υλοποιεί την λειτουργία ή τη λογική που αντιπροσωπεύει αυτό το στοιχείο.

Για την δημιουργία ενός κενού επεξεργαστή διεργασιών από το μενού "Αρχείο", επιλέγουμε "Νέο...", έπειτα "Μοντέλο διεργασιών". Ο επεξεργαστής ανοίγει επίσης και διπλό κλικ σε μια λειτουργική μονάδα του επεξεργαστή κόμβων. Ο επεξεργαστής διεργασιών παρέχει τη δυνατότητα της οπτικής απεικόνισης της λογικής διαδικασίας μέσω διαγραμμάτων μεταβαλλόμενων καταστάσεων (STDs). Σε ένα STD, ένα λογικό στοιχείο αποτελείται από πολλαπλές καταστάσεις, οι καταστάσεις αυτές εναλλάσσονται, εάν ενεργοποιηθούν ορισμένες προϋποθέσεις. Σε αυτές τις καταστάσεις παρέχεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης κώδικα C/C++ για την εκτέλεση διαφόρων διεργασιών. Στην εικόνα 3.32 φαίνεται ένα παράδειγμα των μεταβαλλόμενων καταστάσεων ενός μοντέλου διεργασιών μέσα στον επεξεργαστή διεργασιών.

Ο επεξεργαστής διεργασιών επιτρέπει την υλοποίηση πραγματικών λειτουργιών του κάθε στοιχείου του μοντέλου κόμβων μέσω κώδικα C/C++.

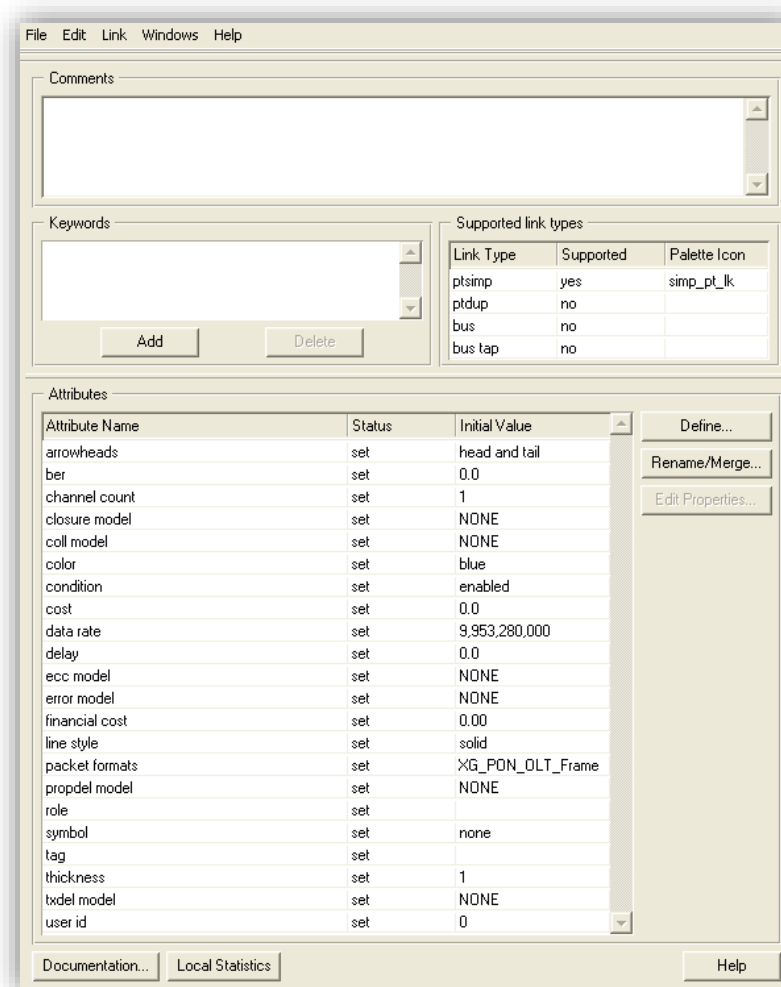


Εικόνα 3. 32: Άποψη του επεξεργαστή διεργασιών

3.3.4 Επεξεργαστής ζεύξεων (Link Editor)

Ο link editor επιτρέπει την δημιουργία και τον προσδιορισμό ενός μοντέλου ζεύξης, δηλαδή μια φυσική σύνδεση μεταξύ κόμβων. Στον επεξεργαστή κόμβων, προσδιορίζεται ο ρυθμός μετάδοσης, το bit error rate, η καταμέτρηση των καναλιών, η καθυστέρηση διάδοσης, η καθυστέρηση μετάδοσης, το μοντέλο σφάλματος, η μέθοδος διόρθωσης σφάλματων, οι υποστηριζόμενες μορφές πακέτων, κλπ. Για την δημιουργία ενός νέου μοντέλου ζεύξης επιλέγεται από το μενού "Αρχείο", η επιλογή "Νέο...", και έπειτα "μοντέλο ζεύξεων". Η εικόνα 3.32 δείχνει ένα τυπικό μοντέλο ζεύξεων όπως απεικονίζεται στον επεξεργαστή ζεύξεων.

Ο επεξεργαστής ζεύξεων υποστηρίζει τους παρακάτω τύπους συνδέσεων: τον μονόδρομο, τον αμφίδρομο, τον bus, ή τον bus tap. Αυτό μπορεί να προσδιοριστεί στο πεδίο "Τύποι σύνδεσης που υποστηρίζονται" στο link editor όπως φαίνεται στην εικόνα 3.32.



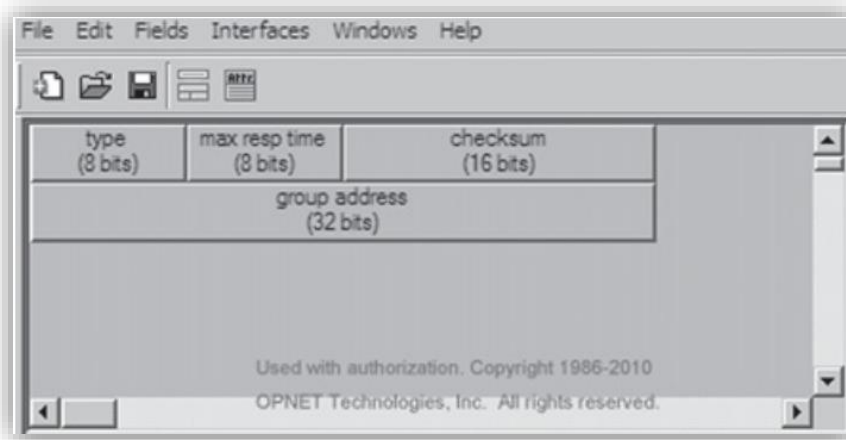
Εικόνα 3. 33: Άποψη του επεξεργαστή ζεύξεων

3.3.5 Επεξεργαστής μορφής πακέτων (Packet Format Editor)

Το OPNET Modeler επιτρέπει την μοντελοποίηση πακέτων μετάδοσης, τόσο χωρίς αρχική μορφή όσο και με εκ των προτέρων προσδιορισμένη μορφή. Για τα πακέτα χωρίς μορφοποίηση, απαιτείται η δημιουργία των αντικειμένων του πακέτου σε κώδικα με την επίκληση των μη μορφοποιημένων πακέτων APIs. Για την επεξεργασία των μορφοποιημένων πακέτων, απαιτείται η δημιουργία και η διαμόρφωση μέσω του επεξεργαστή μορφής πακέτων, και στη συνέχεια, η δημιουργία του μορφοποιημένου αντικειμένου του πακέτου σε κώδικα με την επίκληση των APIs. Ένα μορφοποιημένο πακέτο αποτελείται από διάφορα πεδία. Στον επεξεργαστή μορφής πακέτων, ορίζεται ο τύπος και το μέγεθος του κάθε πεδίου. Για την δημιουργία ενός νέου πακέτου επιλέγεται από το μενού "Αρχείο", "Νέο...", η επιλογή "Μορφή πακέτου". Η εικόνα 3.34 παρουσιάζει ένα τυπικό μοντέλο μορφοποίησης πακέτων όπως απεικονίζεται στον επεξεργαστή μορφής πακέτου.

Νέα πεδία μπορούν να προστεθούν στον επεξεργαστή μορφής πακέτων, χρησιμοποιώντας το κουμπί "Δημιουργία νέου πεδίου". Ένας χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τα χαρακτηριστικά του πεδίου όπως τον τύπο, την κωδικοποίηση, το μέγεθος, το χρώμα, κλπ. Ο τύπος του πεδίου μπορεί να είναι: ακέραιος, κινητής υποδιαστολής, δομή, πακέτο, πληροφορία, αναγνωριστικό πακέτου ή αναγνωριστικό αντικειμένου.

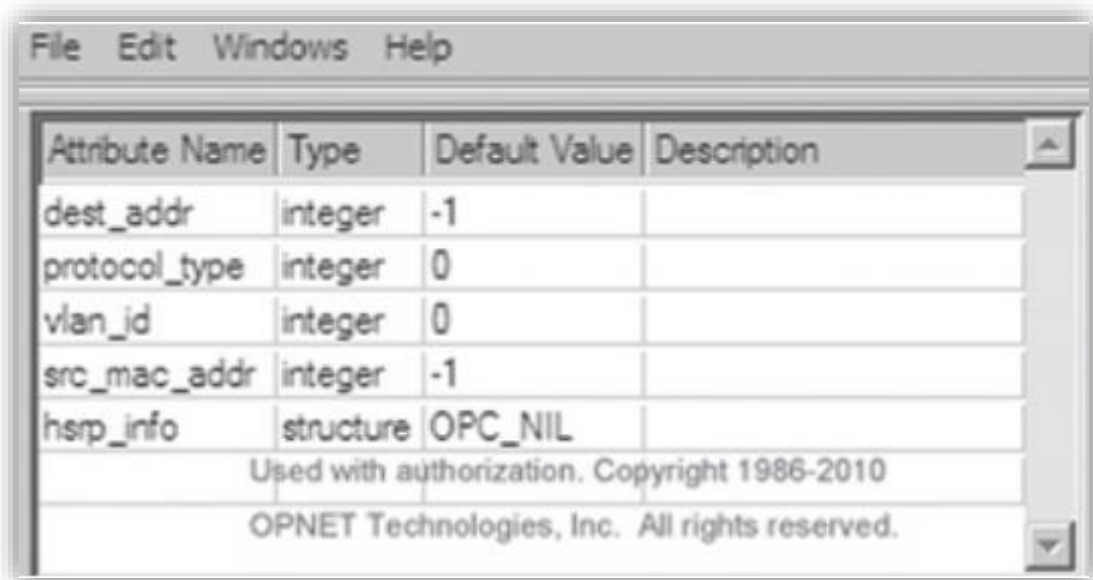
Οι υποστηριζόμενοι τύποι πεδίου επιτρέπουν στο πακέτο να μεταφέρει κάθε δυνατή πληροφορία, που μπορεί ή δεν μπορεί να έχει μια πραγματική οντότητα. Η κωδικοποίηση μπορεί να είναι big-endian ή little-endian στο endianness μοντέλο. Για επεξεργασία των ιδιοτήτων του πεδίου, επιλέγεται με χρήση δεξιού κλικ η επιλογή "επεξεργασία ιδιοτήτων" στο πεδίο του πακέτου.



Εικόνα 3. 34: Άποψη του επεξεργαστή μορφής πακέτου

3.3.6 Επεξεργαστής ICI (ICI editor)

Η ICI είναι μια εσωτερική δομή του OPNET που είναι σε θέση να μεταφέρει πληροφορίες και να διευκολύνει τις δια-διεργασιακές επικοινωνίες βασισμένες στις διακοπές. Μια διαδικασία μπορεί να έχει πρόσβαση στα ICI αντικείμενα που συνδέονται με τις διακοπές για να επικοινωνήσει με άλλες διεργασίες. Ο ICI επεξεργαστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γραφική επεξεργασία της μορφής της ICI. Ανοίγοντας τον ICI editor και από το μενού "Αρχείο", «Νέο...», και έπειτα επιλογή "Μορφής ICI" δημιουργείται μια νέα μορφή ICI. Η εικόνα 3.35 δείχνει κάποιες τυπικές ιδιότητες που έχουν προσδιοριστεί όπως απεικονίζονται στον επεξεργαστή ICI.

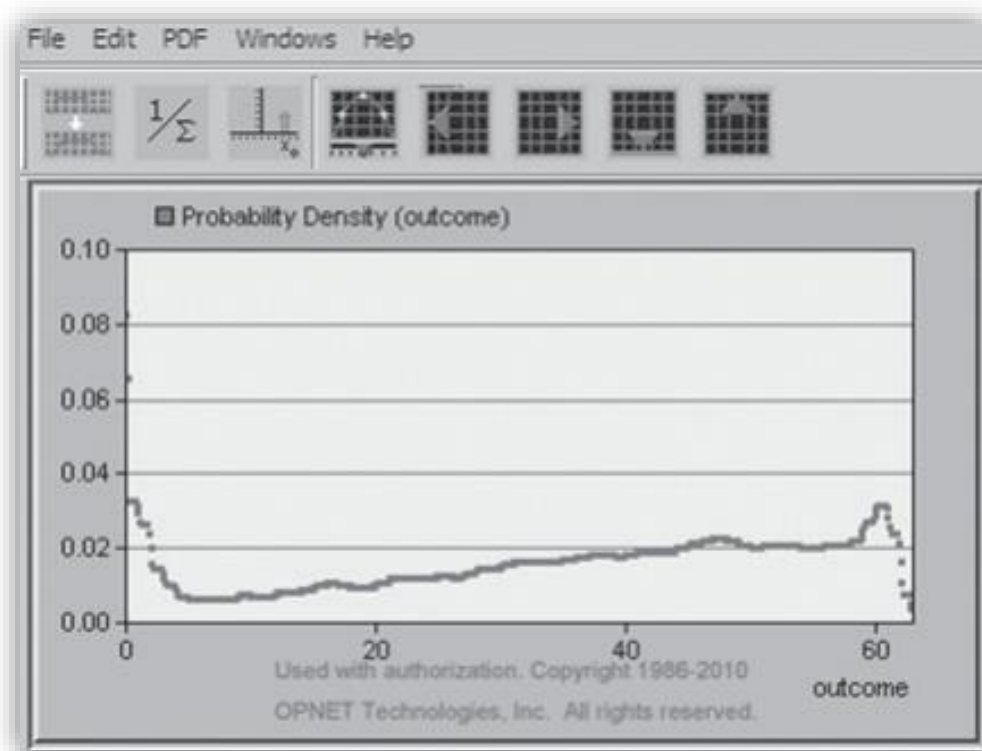


Εικόνα 3. 35: Άποψη του επεξεργαστή ICI

3.3.7 Επεξεργαστής PDF (PDF editor)

Ο PDF editor επιτρέπει την δημιουργία, την επεξεργασία και την προβολή συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας (PDF) από μια ακολουθία δεδομένων. Το OPNET Modeler επιτρέπει την φόρτωση μιας σειράς δεδομένων στον επεξεργαστή PDF για να την προβολή και την επεξεργασία τους. Τα στατιστικά αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να εξαχθούν στον επεξεργαστή PDF για ανάλυση. Το πρόγραμμα επεξεργασίας PDF ανοίγει από το μενού "Αρχείο", "Νέο...", "Πρότυπο PDF". Στην εικόνα 3.36 παρουσιάζεται ο επεξεργαστής PDF με μια ακολουθία δεδομένων που εκτελούνται. Υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης ενός υπάρχοντος PDF μοντέλου που βασίζεται σε μια σειρά δεδομένων, ή φυσικά η δημιουργία ενός νέου μοντέλου PDF.

Το πρότυπο PDF μπορεί να υποστεί γραφική επεξεργασία στον επεξεργαστή PDF μέσα από μια σειρά λειτουργιών όπως "Προσθήκη ώθησης", "Κανονικοποίηση", "Ορισμός τετμημένης και συντεταγμένων των ορίων", "Ορισμός ανάλυσης δειγματοληψίας", και "Smooth". Το διαμορφωμένο ή το πρόσφατα δημιουργημένο πρότυπο PDF μπορεί να φορτωθεί στον κώδικα χρησιμοποιώντας τις APIs διανομής του OPNET στο μοντέλο διεργασιών για να μοντελοποιηθούν οι στοχαστικές διαδικασίες όπως η αποτυχία του συστήματος, το μέγεθος πακέτων, οι interarrival χρόνοι, κλπ.



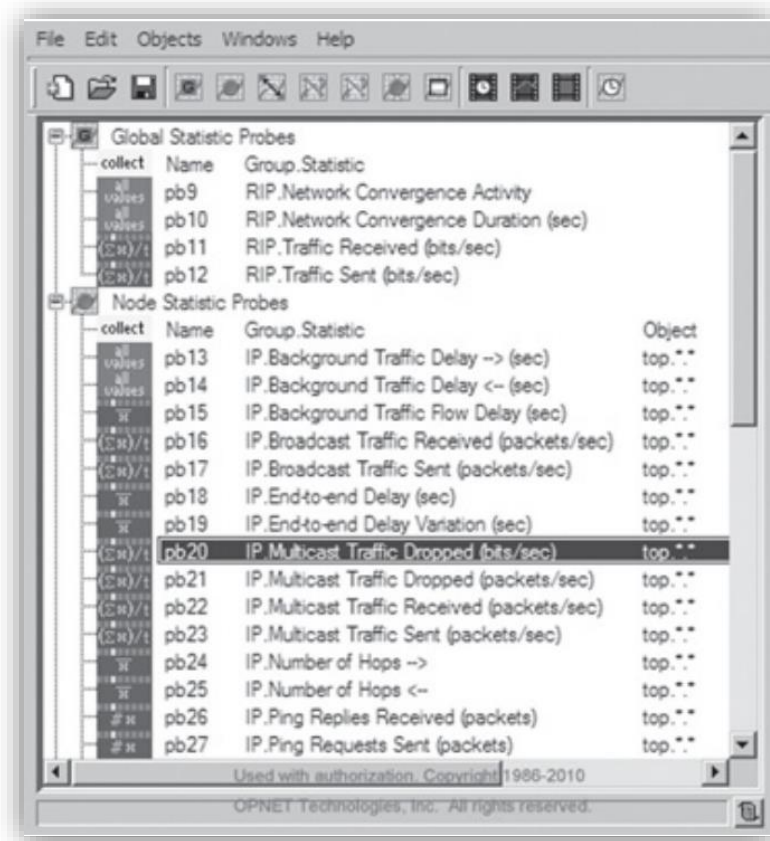
Εικόνα 3. 36: Άποψη επεξεργαστή PDF

3.3.8 Επεξεργαστής Probe (Probe Editor)

Στην προσομοίωση του OPNET, υπάρχουν πολλοί τύποι διαθέσιμων στατιστικών, τα συνολικά στατιστικά στοιχεία, οι στατιστικές κόμβων, οι στατιστικές συνδέσεων, οι στατιστικές διαδρομών, κλπ. Ο επεξεργαστής Probe, παρέχει την επιλογή και την προσαρμογή των στατιστικών στοιχείων για προβολή μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Το πρόγραμμα επεξεργασίας Probe ανοίγει από το μενού "Αρχείο", "Νέο...", επιλέγοντας "Μοντέλο Probe". Στην εικόνα 3.37 φαίνεται ο επεξεργαστής probe φορτωμένος με κάποια στατιστικά στοιχεία που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι στατιστικών που μπορούν να ανιχνευτούν, όπως "Γενικές στατιστικές" "Στατιστικές κόμβων" "Στατιστικές ζεύξεων", και "Στατιστικές διαδρομών". Ένα νέο είδος probe στατιστικών μπορεί να δημιουργηθεί πατώντας το αντίστοιχο κουμπί-εργαλείο στον probe editor. Για παράδειγμα, για δημιουργία μια probe στατιστικής κόμβου, επιλέγεται η "Δημιουργία Probe στατιστικής κόμβου" όπως φαίνεται στην εικόνα 3.36. Κάνοντας δεξί κλικ το νεοσύστατο κόμβο, και επιλέγοντας από το μενού "Επιλογή αντικειμένου Probe" επιλέγονται τα αντικείμενα του κόμβου προς προβολή. Σημειώνεται ότι οι στατιστικές μπορούν να συγκεντρωθούν με διαφορετικούς τρόπους. Η προεπιλογή είναι η συνολική συλλογή "Όλες τις τιμές". Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, καταγράφονται όλα τα σημεία στατιστικής.

Η επιλογή κάποιας άλλης διαφορετικής μεθόδου συλλογής στατιστικών στοιχείων επιτυγχάνεται κάνοντας δεξί κλικ στις ενδιαφέρουσες στατιστικές, και έπειτα επιλογή από το μενού του προτιμώμενου τρόπου για την συλλογή των στατιστικών. Για παράδειγμα, με την επιλογή «Collect time average over default buckets», η στατιστική θα καταγραφεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αντί για στατιστική των συνολικών τιμών.

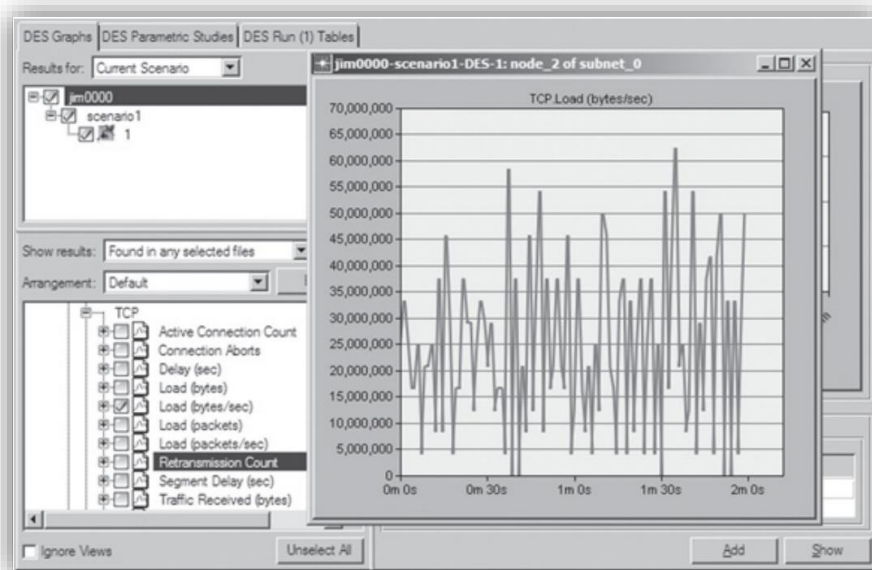


Εικόνα 3. 37: Άποψη του probe editor

3.4 Περιηγητής αποτελεσμάτων (Simulation Results Browser)

Στο OPNET Modeler, για ένα μοντέλο προσομοίωσης, παρέχει την δυνατότητα πολλαπλών σεναρίων για προσομοίωση. Αυτά τα σενάρια, μπορεί να βασίζονται σε διαφορετικές τοπολογίες, δρομολογήσεις, κίνηση, παραμέτρους φόρτου, κλπ. Περαιτέρω, σε κάθε σενάριο μπορεί να διαθέτει πολλαπλές στατιστικές προς προβολή. Στο OPNET Modeler, το πρόγραμμα περιήγησης αποτελεσμάτων προσομοίωσης επιτρέπει την προβολή και την σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για όλα τα σενάρια μιας εργασίας σε ένα ενοποιημένο περιβάλλον εργασίας. Το πρόγραμμα περιήγησης αποτελεσμάτων προσομοίωσης μπορεί να ανοίξει από το μενού "*Discrete Event Simulation*", με την επιλογή "*Αποτελέσματα*", και έπειτα "*Προβολή αποτελεσμάτων...*". Εάν τελειώσει η προσομοίωση και το μοντέλο διαθέτει στατιστικά στοιχεία για προβολή, αυτά προβάλλονται μέσα από το πρόγραμμα επεξεργασίας αποτελεσμάτων για να μέσω γραφημάτων. Το πρόγραμμα περιήγησης αποτελεσμάτων προσομοίωσης παρέχει πολλά στατιστικά εργαλεία, τα οποία επιτρέπουν την προβολή και την σύγκριση των στατιστικών αποτελεσμάτων σε διαφορετικές κλίμακες όπως λογαριθμική, reciprocal, time average και άθροισμα δειγμάτων.

Μπορούν επίσης να δημιουργηθούν κατανομές από τα αποτελέσματα, ή να εξαχθούν τα αποτελέσματα σε ένα spreadsheet πρόγραμμα για περαιτέρω επεξεργασία. Η εικόνα 3.38 δείχνει τον simulation results browser. Για να εμφανιστούν τα διάφορα στατιστικά στοιχεία σε ένα πάνελ για σύγκριση, πρέπει απλά να γίνει κλικ στα αντίστοιχα πλαίσια των στατιστικών αυτών.

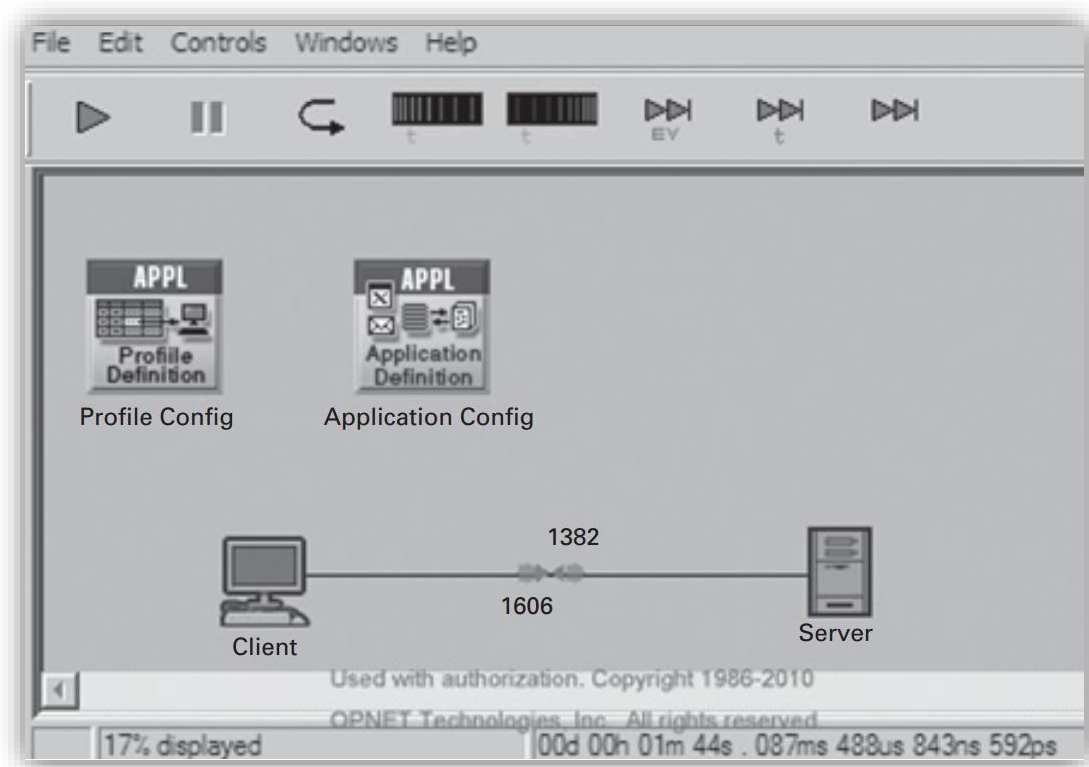


Εικόνα 3. 38: Άποψη του simulation results browser

3.5 Περιηγητής κινούμενης εικόνας (Animation viewer)

Το OPNET modeler δίνει τη δυνατότητα της καταγραφής και της απεικόνισης κινούμενων εικόνων για τις ροές των πακέτων, για την κίνηση των κόμβων και για την μεταβολή των τιμών των στατιστικών. Μπορείτε να δείτε το καταγραφόμενο animation κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο), ή μετά από το πέρας της προσομοίωσης. Η κινούμενη εικόνα φορτώνεται και αναπαράγεται στον animation viewer. Το animation μπορεί να ελεγχθεί στον animation viewer, μέσω κουμπιών λειτουργίας όπως play, pause, stop, restart, speed up, slow down και skip to next. Για άνοιγμα του animation viewer: στον project editor, από το μενού "*Discrete Event Simulation*" επιλέγεται η "*Αναπαραγωγή 2D Animation*". Αν υπάρχει κίνηση που καταγράφηκε σε αυτό το σενάριο, ο animation viewer θα ξεκινήσει και θα παίξει το animation που καταγράφηκε αυτόματα.

Ένα screenshot του Animation viewer παρουσιάζεται στην εικόνα 3. 38. Με τα κουμπιά επιλογών προβολή μπορεί κάποιος να ελέγξει την ροή αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3. 39: Άποψη του animation viewer

3.6 Διεπαφή προγραμματισμού OPNET

Η γλώσσα προγραμματισμού για την συγγραφή των μοντέλων του OPNET ονομάζεται Proto-c. Δεν υπάρχουν πολλές διαφορές στην σύνταξη μεταξύ του προγραμματισμού σε C και σε Proto-C, δεδομένου ότι η Proto-C διατηρεί την γενικότητα, ενσωματώνοντας όλες τις δυνατότητες των γλωσσών προγραμματισμού C και C++. Η σημαντικότερη διαφορά που υιοθετεί η Proto-C είναι η μεθοδολογία προσέγγισης των μοντέλων.

Σε αντίθεση με τον προγραμματισμό αυτόνομων εφαρμογών σε C/C++, η Proto-C είναι σχεδιασμένη να χειρίζεται προορισμένους από OPNET τύπους δεδομένων μέσω μιας υπάρχουσας μηχανής προσομοίωσης, που μπορεί να θεωρηθεί ως μια μισό-έτοιμη εφαρμογή, σε μια αυτόνομη εφαρμογή C/C++. Αυτή η μηχανή προσομοίωσης πρέπει να ενσωματώσει τον κώδικα Proto-C για τη δημιουργία τελικής αυτόνομης εκτελέσιμης εφαρμογής προσομοίωσης.

Ο μηχανισμός προσομοίωσης θεωρείται ως προγεγραμμένος στον πυρήνα σε κάθε εφαρμογής προσομοίωσης. Το προσαρμοσμένο τμήμα κώδικα είναι το μοντέλο του κάθε χρήστη. Αυτά τα αρχεία θα γίνουν compile και θα συνδεθούν σε μια κανονική εφαρμογή C/C++. Η προσομοίωση αρχίζει μόνο όταν αυτή η εφαρμογή είναι φορτωμένη στο λειτουργικό σύστημα.

3.7 Κατηγοριοποίηση OPNET API

Αυτή η ενότητα κατηγοριοποιεί τις διάφορες OPNET APIs και εξηγεί τις διαφορές μεταξύ αυτών των κατηγοριών, σχετικά με το πώς θα επιλέγει και θα χρησιμοποιηθεί η κάθε OPNET API.

Οι διεπαφές OPNET APIs μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικά πακέτα σύμφωνα με τις διαφορετικές λειτουργίες: Πρόσβαση εφαρμογών, δομές δεδομένων και αλγόριθμοι, προσομοίωση διακριτών συμβάντων, γενικό σύστημα χρόνου εκτέλεσης, πρόσβαση αρχείων μοντέλου, χρόνος εκτέλεσης OPNET, απεικόνιση OPNET και έλεγχος προσομοίωσης. Αυτά τα πακέτα μπορεί να ξεκινούν με προθέματα όπως "op_", "prg_", "Ema_", "Ets_", "Oma_", "Osys_", "Onis_" και "Esa_". Κάθε ένα από αυτά τα πακέτα API μπορεί να περιέχει μερικά υποπακέτα. Μερικά από τα πακέτα αυτά μπορεί να παρέχουν παρόμοιες λειτουργίες.

Ωστόσο, βάσει τις υπηρεσίες τους, μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Η μία είναι για την εγγραφή Discrete Event Simulation μοντέλων και την παροχή των υπηρεσιών του πυρήνα για την OPNET Modeler. Οι APIs σε αυτήν την κατηγορία καλύπτουν διαφορετικά πακέτα όπως δομές δεδομένων και αλγόριθμοι, προσομοίωση διακριτών συμβάντων, γενικό σύστημα χρόνου εκτέλεσης, πρόσβαση αρχείων μοντέλου, χρόνος εκτέλεσης OPNET, απεικόνιση OPNET και έλεγχος προσομοίωσης. Οι API σε αυτήν την κατηγορία έχουν προθέματα τύπου "op_", "prg_", "Ema_" και "Esa_", κλπ.

Η άλλη κατηγορία είναι για την παροχή εκτεταμένων υπηρεσιών, όπως είναι η εκτεταμένες διεπαφές και λειτουργίες του OPNET, η παροχή εφέ ευέλικτης οπτικοποίησης και την παροχή επιπλέον υποστήριξης. Οι διεπαφές APIs σε αυτήν κατηγορία περιλαμβάνουν: πακέτα πρόσβασης εφαρμογών, πακέτα σχεδιασμού και ανάλυσης, πακέτα πρόσβασης αρχείων μοντέλου, πακέτα παροχής εφέ ευέλικτης οπτικοποίησης και πακέτα παροχής επιπλέον υποστήριξης. Σε αυτή την κατηγορία, τα API προθέματα μπορεί να είναι : "Ets_", "Ace_", "Html_", "Imex_", "Oma_", "Hcon_", "nrac_", "Optim_", "Osys_" και "Ovis_", κλπ.

3.8 APIs πυρήνα/ Διαδικασίες πυρήνα (KPs)

Σε αυτήν την ενότητα, πρόκειται να εξηγηθεί και να διευκρινιστεί ένας αριθμός APIs που είναι δύσχρηστες ή είναι ανεπαρκώς τεκμηριωμένες. Οι APIs που συζητούνται εδώ καλύπτουν πακέτα των διαδικασιών του πυρήνα, δηλαδή, APIs για εγγραφή discrete event simulation μοντέλων και παροχή υπηρεσιών πυρήνα από το OPNET Modeler. Ανάμεσα στις APIs που εμπλέκονται περιλαμβάνονται οι APIs πυρήνα ή διαδικασίες πυρήνα (KPs) που ξεκινούν με "op_" και οι APIs υποστήριξης προγραμματισμού που αρχίζουν με "prg_". Για την σύνταξη αποδοτικών discrete event simulation μοντέλων, οι προγραμματιστές πρέπει να είναι εξοικειωμένοι με τα APIs.

Με τη χρήση ολοκληρωμένων αυτόνομων μπλοκ κώδικα, προσφέρεται στους χρήστες η δυνατότητα της αναφοράς και της αντιγραφής των διαδικασιών αυτών απευθείας στα δικά τους μοντέλα. Αρκετές APIs μπορεί να συνυπάρχουν στο ίδιο μπλοκ κώδικα. Οι επεξηγήσεις αυτών των APIs μπορεί να περιλαμβάνουν ζητήματα ασφάλειας Multi-Threading, το οποίο είναι ένα σημαντικό θέμα στις παράλληλες προσομοιώσεις του OPNET. Η παράλληλη προσομοίωση χρησιμοποιείται για να βοηθήσει να επιταχυνθεί η προσομοίωση, χρησιμοποιώντας πολλαπλούς επεξεργαστές CPU. Οι APIs που χαρακτηρίζονται ως "thread-safe", εσωτερικά υποστηρίζουν συγχρονισμό για παράλληλες εκτελέσεις, ενώ αυτές που χαρακτηρίζονται ως " thread-unsafe " πρέπει να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία από τους χρήστες για να παρέχουν προστασία στον συγχρονισμό multi-threading.

3.9 Συναρτήσεις κατανομών

Οι συναρτήσεις του πακέτου κατανομών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν τυχαία δεδομένα με προ-ορισμένα μοντέλα κατανομής ή με μοντέλα κατανομής ορισμένα από τον χρήστη. Τα προ-ορισμένα μοντέλα κατανομής μπορούν να φορτωθούν μέσω των API κατανομών απλά καθορίζοντας το όνομα του μοντέλου κατανομής.

Για να είναι σε θέση να φορτώσει μοντέλα ορισμένα από τον χρήστη ή EMA μοντέλα, θα πρέπει πρώτα να εξασφαλίζεται ότι αυτά είναι αποθηκευμένα στον

κατάλογο μοντέλων του Modeler. Εάν είναι στον κατάλογο αυτόν, μπορούν να φορτώνονται μέσω των APIs κατανομών με τον ίδιο τρόπο όπως και την κλήση των προ-ορισμένων κατανομών, δηλαδή, παρέχοντας το προσαρμοσμένο όνομα του μοντέλου, χωρίς επίθεμα εισόδου. Για παράδειγμα σε ένα προσαρμοσμένο πρότυπο PDF με το αρχείο μοντέλου που ονομάζεται "myrpdf.pd.s": όταν αυτό το πρότυπο PDF είναι φορτωμένο μέσω κατανομής API, μόνο το "myrpdf" είναι αυτό που πρέπει να παρέχεται στο API ως παράμετρος.

3.10 Δομές πακέτων

Οι συγκεκριμένες λειτουργίες χρησιμοποιούνται για την δημιουργία, την αποστολή, την λήψη και την καταστροφή πακέτων, και για τον ορισμό ή την ανάκτηση του περιεχομένου των πακέτων. Το πακέτο μπορεί διαμορφωθεί για να μεταφέρει διάφορες πληροφορίες και τύπους δεδομένων, από απλούς τύπους δεδομένων όπως int, double, char, μέχρι προ-ορισμένους τύπους και δομές όπως Objid, OpT_Packet_Id, Packet, Ici, Vvec_Vector, και άλλες δομές ορισμένες από τον χρήστη.

Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο για τον προσδιορισμό των πακέτων δεδομένων, αλλά και για την δημιουργία ενός πίνακα δρομολόγησης, ενός κόμβου πληροφορίας, ενός πρωτοκόλλου, για πληροφορίες του αλγορίθμου, και ακόμη και άλλες πληροφορίες προσομοίωσης που δεν έχει υλοποιηθεί σε πακέτα πραγματικού κόσμου.

3.11 Διαχείριση ουράς και δευτερεύουσας ουράς

Στο OPNET, ένα αντικείμενο ουράς μπορεί να περιέχει μία ή περισσότερες δευτερεύουσες ουρές. Οι συναρτήσεις διαχείρισης ουράς χρησιμοποιούνται για πρόσβαση στην ουρά σαν ένα σύνολο, ενώ οι συναρτήσεις δευτερεύουσας ουράς χρησιμοποιούνται για την πρόσβαση σε μια μεμονωμένη δευτερεύουσα ουρά στο αντικείμενο της κύριας ουράς. Σε αντίθεση με την ουρά σε ένα γενικό αλγόριθμο, η κύρια και η δευτερεύουσα ουρά εδώ περιέχουν μόνο αντικείμενα-πακέτα του OPNET. Το μόνο σημείο που αξίζει να δοθεί έμφαση είναι ότι οι λειτουργίες σε δευτερεύουσα ουρά υποστηρίζουν δείκτη θέσεως δευτερεύουσας ουράς και δείκτη θέσεως του πακέτου εντός της δευτερεύουσας ουράς.

Σε αντίθεση με αριθμητικό δείκτη, αυτός ο δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόσβαση σε μια δευτερεύουσα ουρά ή σε ένα πακέτο εντός μιας δευτερεύουσας ουράς με έναν συγκεκριμένο τρόπο. Για παράδειγμα, για να βρεθεί μια δευτερεύουσα ουρά με το μέγιστο αριθμό των πακέτων, ο χρήστης μπορεί να γράψει κώδικα ο οποίος θα ανατρέχει σε όλες τις δευτερεύουσες ουρές για να βρει την μια με τα περισσότερα πακέτα χρησιμοποιώντας την συνάρτηση "op_subq_stat" σε κάθε δευτερεύουσα ουρά.

Εναλλακτικά, η `op_subq_index_map(OPC_QSEL_MAX_IN_PKSIZE)` μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί ο αριθμητικός δείκτης της δευτερεύουσας ουράς με τα περισσότερα πακέτα. Το όρισμα `OPC_QSEL_MAX_IN_PKSIZE` της συνάρτησης `op_subq_index_map` είναι ο δείκτης που αναφέρεται σε μια δευτερεύουσα ουρά με το μέγιστο αριθμό των πακέτων.

3.12 Εξαγωγή στατιστικών

Ο τομέας στατιστικής δίνει τη δυνατότητα της ανάγνωσης και εγγραφής προσαρμοσμένων στατιστικών στοιχείων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, οι στατιστικές αυτές μπορούν να αναλυθούν στον περιηγητή αποτελεσμάτων. Η εικόνα 3.40 δείχνει πώς καταχωρείται μια τοπική στατιστική και πώς γίνεται η εγγραφή δεδομένων για την τρέχουσα ώρα προσομοίωσης στη συγκεκριμένη στατιστική.

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, μπορείτε να προβάλετε αυτά τα στατιστικά στοιχεία από το παράθυρο διαλόγου "Αποτελέσματα". Σε αυτό το παράδειγμα φαίνεται το τρέχον μέγεθος πακέτου σε bit. Ένα τοπικό στατιστικό στοιχείο προσδιορίζεται από τη μακρο-εντολή `OPC_STAT_LOCAL`. Μπορείτε επίσης να εγγράψετε συνολικά στατιστικά στοιχεία με την ένδειξη `OPC_STAT_GLOBAL`.

Η διαφορά μεταξύ μιας τοπικής στατιστικής και μιας συνολικής στατιστικής είναι ότι το πρώτο εξ αυτών επιτρέπει μόνο στην τρέχουσα διεργασία πρόσβαση στην στατιστική, ενώ το τελευταίο επιτρέπει σε όλες τις διεργασίες πρόσβαση σε μια συγκεκριμένη στατιστική.

```
// Declare statistics handle as state variable
Stathandle sample_stat_handle;

// Register local statistic and return the handle of
// this statistic
sample_stat_handle = op_stat_reg ("sample_statistic", \
    OPC_STAT_INDEX_NONE, OPC_STAT_LOCAL);

// Write data at current simulation time to statistic
op_stat_write (sample_stat_handle, \
    op_pk_total_size_get(pktptr));
```

Εικόνα 3. 40: Κώδικας εξαγωγής στατιστικών στον επεξεργαστή διεργασιών

3.13 Προδιαγραφές Proto-C

Η Proto-C βασίζεται στην γενική γλώσσα προγραμματισμού C. Υποστηρίζει τις προδιαγραφές της C και, κατά συνέπεια, μπορεί να προγραμματιστεί με τον ίδιο τρόπο όπως και η C. Με την Proto-C, ο χρήστης μπορεί να επικαλεστεί τις υπάρχουσες συναρτήσεις από την βιβλιοθήκη της C. Ωστόσο, η Proto-C έχει τους δικούς της προ-ορισμένους τύπους δεδομένων και συναρτήσεις διεπαφής (APIs) που δεν υπάρχουν στην γενική γλώσσα C. Από αυτή την άποψη, η Proto-C μπορεί να θεωρηθεί ως μια υπο-κατηγορία της γενικής γλώσσας C και είναι σχεδιασμένη συγκεκριμένα για τον προγραμματισμό μοντέλων προσομοίωσης. Επίσης, η δομή της Proto-C υποστηρίζει και προγραμματισμό σε C++, ως εκ τούτου, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την καθορισμένη βιβλιοθήκη πρότυπων (STL) και τις Boost βιβλιοθήκες στα μοντέλα διαδικασιών σας. Σε όλες, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από μια ποικιλία από συναρτήσεις API, όπως: OPNET APIs, συναρτήσεις προσδιορισμένες για τα τυποποιημένα μοντέλα OPNET, προσαρμοσμένες συναρτήσεις wrapper API, καθώς και συναρτήσεις C/C++ τρίτων όπως η βιβλιοθήκη της C, STL, Boost, κλπ.

Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη σχήματος μείωσης κατανάλωσης ενέργειας σε XG-PON δίκτυα

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη λύσεων σε μορφή σχημάτων χρονοπρογραμματισμού για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε παθητικά οπτικά δίκτυα τύπου XG-PON. Το σχήμα που προτείνεται 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. Το περιβάλλον μελέτης είναι ένα μονο-καναλικό XG-PON με μεταβαλλόμενο αριθμό υποστηριζόμενων ONUs. Οι στόχοι της εργασίας συνοψίζονται στα εξής:

- Μελέτη της βιβλιογραφίας στο επιστημονικό πεδίο της μείωσης ενέργειας στα παθητικά οπτικά δίκτυα.
- Ανάπτυξη ενός νέου σχήματος μείωσης ενέργειας στα δίκτυα XG-PON.
- Αποτίμηση του προτεινόμενου σχήματος με προσομοίωση.

- Συγκριτικά συμπεράσματα και προτάσεις.

Η αποτίμηση της αναλυτικής προσέγγισης επιτεύχθηκε μέσω του προσομοιωτή OPNET Modeler. Στον συγκεκριμένο εργαλείο προσομοίωσης αναπτύχθηκε δίκτυο τύπου XG-PON το οποίο ακολουθεί πλήρως τα αντίστοιχα πρότυπα και προδιαγραφές όπως αυτά ορίζονται από τον οργανισμό που έχει προτείνει το συγκεκριμένο πρότυπο, την ITU. Η ομάδα εργασίας στην οποία προσδιορίζεται η προτυποποίηση του XG-PON προτύπου είναι η G.987.

4.1 Μορφή ζεύξεων επικοινωνίας

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 σύμφωνα με τις προδιαγραφές του G.987 προτύπου υποστηρίζονται δύο ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων για upstream μετάδοση σε ένα XG-PON δίκτυο. Σε αυτήν την διπλωματική εργασία ακολουθήθηκε το πρότυπο το οποίο υποστηρίζει 9,95328 Gbps (εμπορικά 10 Gbps) για την downstream και 2,48832 (εμπορικά 2,5 Gbps) για την upstream μετάδοση. Έτσι λοιπόν, δημιουργήθηκαν νέες ζεύξεις με αυτά τα χαρακτηριστικά, στον link editor που διαθέτει το περιβάλλον προσομοίωσης. Για την downstream μετάδοση δημιουργήθηκε η ζεύξη Downstream_Wavelength_XG_PON η οποία εκτός από τον ρυθμό μετάδοσης που αναφέρθηκε υποστηρίζει, αποστολή πακέτων τύπου XG_PON_OLT_Frame. Στην upstream μετάδοση από την άλλη πλευρά έχει δημιουργηθεί η ζεύξη Upstream_Wavelength_XG_PON, η οποία υποστηρίζει μετάδοση ONU_Frame πακέτων.

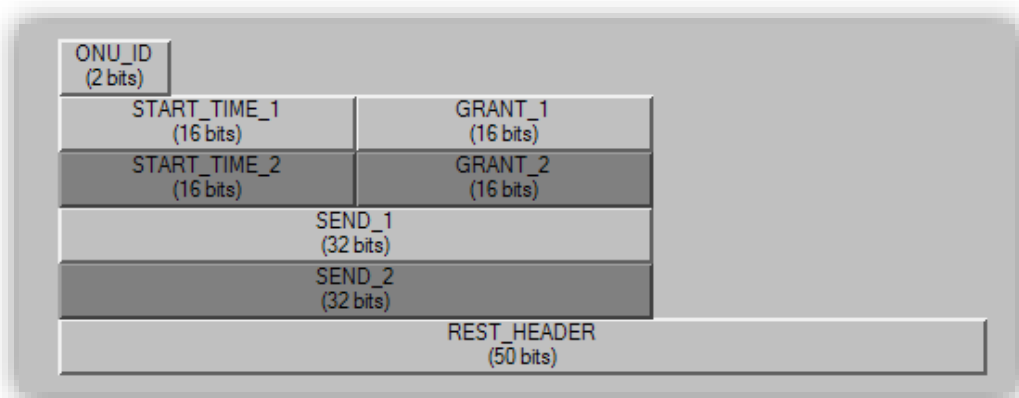
4.2 Μορφή υποστηριζόμενων πακέτων

Τα XG_PON_OLT_Frame πακέτα δημιουργούνται από τον OLT, κάθε 125 μsec με προορισμό την κάθε ONU. Τα πακέτα αυτά έχουν καθορισμένο μέγεθος από την ITU το οποίο είναι αυστηρά ορισμένο στα 1244160 bits. Από αυτά τα bits, τα 180 δεσμεύονται για την κεφαλίδα του πακέτο που περιέχει απαραίτητες πληροφορίες για μια επιτυχημένη επικοινωνία.

Το πακέτο που φαίνεται στην εικόνα 4.41 και υποστηρίζει μέχρι δύο ONUs χωρίζεται σε 8 πεδία, αρχικά το πρώτο πεδίο ONU_ID έχει μέγεθος 2 bits και αποτελείται από έναν αριθμό οποίος αναπαριστά ένα μοναδικό αναγνωριστικό για κάθε ONU. Τα πεδία START_TIME έχουν μέγεθος 16 bits και είναι αυτά στα οποία δηλώνεται ο χρόνος στον οποίο πρέπει να ξεκινήσει την upstream μετάδοση της η κάθε ONU. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται από τον OLT λαμβάνοντας υπόψη την χρονική στιγμή κατά την οποία γίνεται διαθέσιμο το κανάλι, τον χρόνο μετάδοσης, τον χρόνο διάδοσης, καθώς και ένα προκαθορισμένο χρόνο που κάνει η ONU να αντιδράσει (σύμφωνα με την ITU).

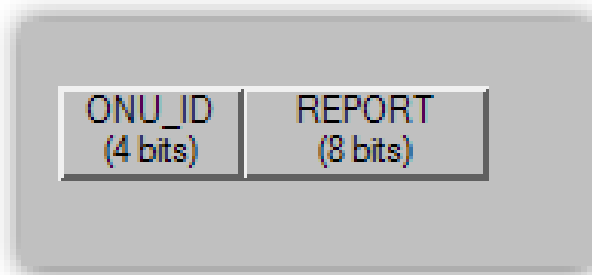
Στα πεδία GRANT προσδιορίζεται το εύρος ζώνης το οποίο εκχωρείται στην κάθε ONU για upstream μετάδοση, το οποίο υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη δήλωση της εκάστοτε ONU.

Στο πεδίο SEND αποστέλλονται τα downstream δεδομένα που δημιουργούνται από τον OLT και είναι αποθηκευμένα προσωρινά σε μια ουρά αναμονής. Το πεδίο rest υπάρχει αναγκαστικά για να καλυφθούν τα δεσμευμένα bits, για την κεφαλίδα, από τις προδιαγραφές του προτύπου. Η συγκεκριμένη σχεδίαση του downstream πακέτου, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί εξυπηρετήσει μέχρι δύο ONUs.



Εικόνα 4. 41: Μορφή του downstream XG_PON_OLT_Frame

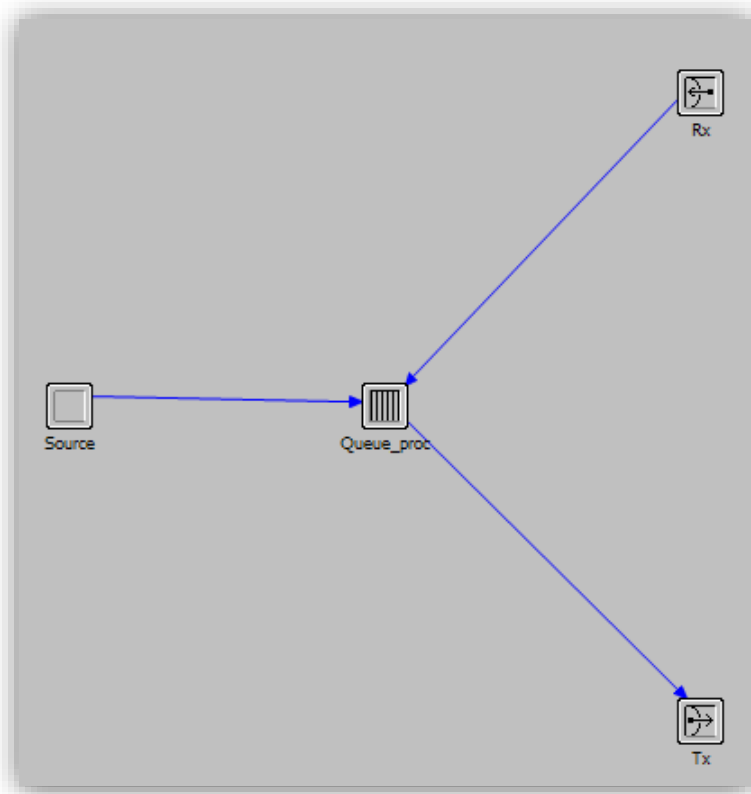
Το upstream πακέτο σε αντίθεση με το downstream δεν έχει σταθερό μέγεθος αλλά μεταβαλλόμενο σύμφωνα με τα δεδομένα που επιθυμεί να στείλει η κάθε ONU στον OLT. Η κεφαλίδα αυτού του upstream πακέτου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.42. Η κεφαλίδα του πακέτου αποτελείται από δύο πεδία, το ONU_ID το οποίο φέρει το μοναδικό αναγνωριστικό της κάθε ONU και το πεδίο REPORT στο οποίο δηλώνεται ο όγκος των δεδομένων που επιθυμεί να στείλει η ONU. Σε αυτήν την κεφαλίδα προστίθενται και τα upstream δεδομένα, αν υπάρχουν, και το συνολικό πλαίσιο αποστέλλεται μέσω του upstream καναλιού, μέσω του Splitter, στον OLT.



Εικόνα 4. 42: Μορφή ONU_Frame

4.3 Δομή μοντέλου OLT

Το μοντέλο κόμβου του OLT αποτελείται από ένα στοιχείο επεξεργαστή, ένα στοιχείο ουράς, ένα πομπό και ένα δέκτη όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.43. Το στοιχείο πομπού Tx είναι υπεύθυνο για την μετάδοση των downstream πακέτων *XG_PON_OLT_Frame* και είναι συνδεδεμένο με το *Queue_proc* από το οποίο λαμβάνει κάθε 125 μsec ένα πακέτο *XG_PON_OLT_Frame* και το προωθεί στην αντίστοιχη διεπαφή δέκτη του splitter. Το στοιχείο Rx είναι υπεύθυνο για την παραλαβή των upstream πακέτων από την κάθε ONU μέσω του splitter. Ο δέκτης Rx δέχεται μόνο τα πακέτα τύπου *ONU_Frame*, εάν ληφθεί οποιοσδήποτε άλλος τύπος πακέτου δεν πρόκειται να εξυπηρετηθεί από το συγκεκριμένο στοιχείο. Αμέσως μετά την άφιξη κάποιου πακέτου το προωθεί προς το στοιχείο *Queue_proc* όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.43.



Εικόνα 4. 43: Δομή μοντέλου OLT

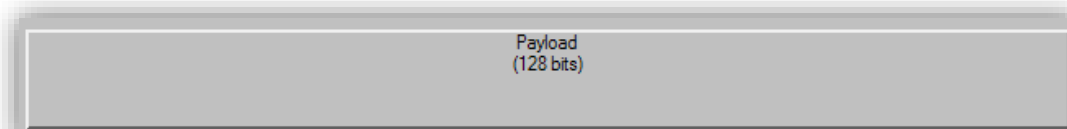
Το στοιχείο επεξεργαστή *Source* παράγει πακέτα downstream δεδομένων που ενσωματώνονται στο *XG_PON_OLT_Frame* τα οποία μεταβιβάζονται από τον OLT προς τον splitter και έπειτα στην κάθε ONU. Οι ιδιότητες της πηγής πακέτων *Source* φαίνονται στην εικόνα 4.44, στο πεδίο *process model* επιλέγεται η τιμή *simple source*. Από το μοντέλο διεργασιών *simple source* παράγονται πακέτα δεδομένων τύπου *OLT_Data* τα οποία έχουν την μορφή του πακέτου της εικόνας 4.45.

Attribute	Value
name	Source
process model	simple_source
icon name	processor
Packet Format	OLT_Data
Packet Interarrival Time	pareto (1, 0.5)
Packet Size	uniform_int (60, 1500)
Start Time	0.0
Stop Time	Infinity

Εικόνα 4. 44: Ιδιότητες μονάδας Source

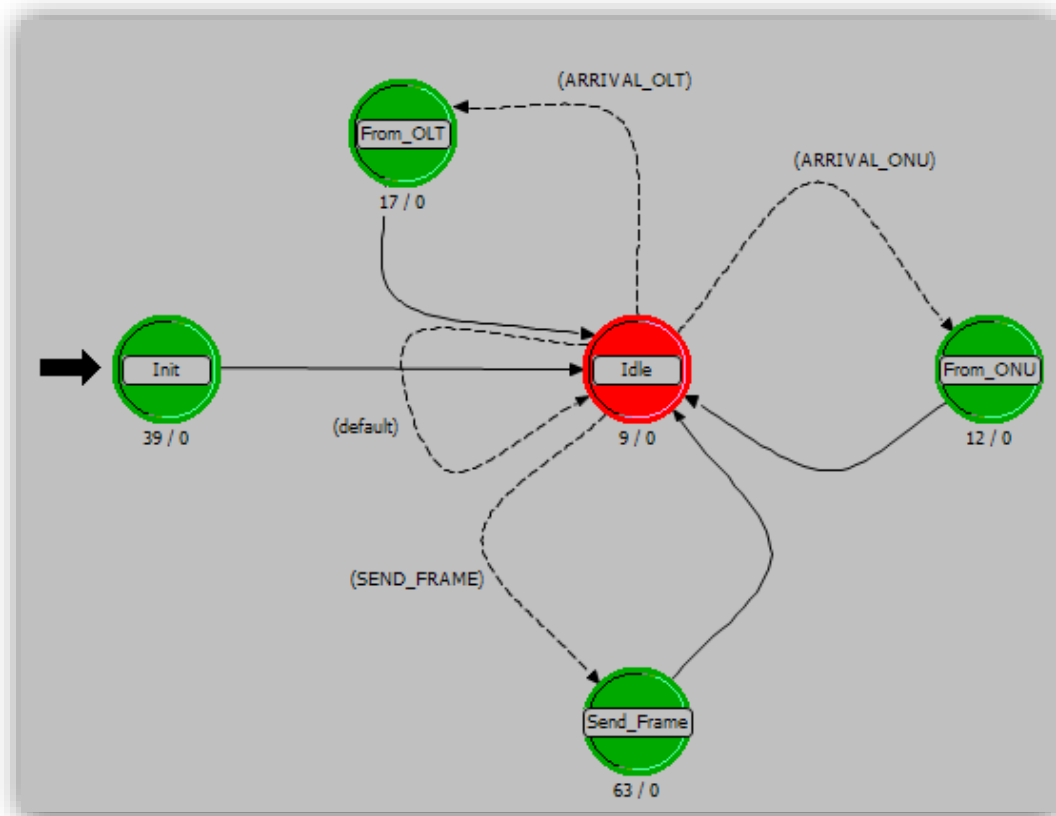
Για το παράδειγμα της εικόνας 4.44 τα πακέτα OLT_Data έχουν μέγεθος το οποίο ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή που δίνει ακέραιες τιμές ανάμεσα στα 60 και στα 1500 bits. Ο interarrival χρόνος άφιξης πακέτων ορίζεται μέσα από μια pareto κατανομή με location 1 και shape 0.5.

Το πακέτο ONU_Data το οποίο παράγει το Source έχει μόνο ένα πεδίο το οποίο αναπαριστά το ωφέλιμο τμήμα, μήκους 128 bits, αφού το πακέτο περιέχει μόνο δεδομένα τα οποία μεταβιβάζονται για ενθυλάκωση στο downstream πακέτο στο στοιχείο Queue_proc.



Εικόνα 4. 45: Δομή πακέτου δεδομένων OLT

Στο Queue_proc εκτελείται το μοντέλο OLT_Process το οποίο απεικονίζεται παρακάτω (εικόνα 4.46). Εκτελώντας για πρώτη φορά το OLT_Process εισερχόμαστε στην κατάσταση init, αυτή με την ειδική σήμανση με το βέλος στα αριστερά. Σε αυτήν την κατάσταση αρχικοποιούμε τις απαραίτητες μεταβλητές και τους απαραίτητους πίνακες για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Εδώ επίσης δηλώνονται και οι επιθυμητές στατιστικές. Μετά την αρχικοποίηση μεταβαίνουμε στην κατάσταση idle. Από την κατάσταση idle μπορούμε να μεταβούμε σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις με τρεις διαφορετικούς τρόπους, αλλά σε κάθε περίπτωση έπειτα από κάθε μετάβαση επιστρέφουμε πάντα στην κατάσταση idle.



Εικόνα 4. 46: Διάγραμμα καταστάσεων OLT_Process

Αρχικά με την ενεργοποίηση της συνθήκης ARRIVAL_OLT, η οποία οφείλεται στην άφιξη ενός πακέτου από το στοιχείο source του OLT, μεταβαίνουμε στην κατάσταση From_OLT στην οποία εκτελείται ο κώδικας στον οποίο λαμβάνεται η απόφαση σε ποια ONU προορίζεται το κάθε downstream πακέτο που δημιουργείται.

Η απόφαση για την επιλογή της ONU λαμβάνεται βάσει της μεθόδου χρονοπρογραμματισμού round robin (RR). Στην μέθοδο αυτήν, το 1^ο πακέτο που καταφθάνει σε μια ουρά προωθείται στην διεπαφή του 1^{ου} καταχωρημένου προορισμού, στην συνέχεια τα επόμενα πακέτα προωθούνται βάσει σειράς από την 2^ο μέχρι την τελευταία διεπαφή και έπειτα ξανά στον πρώτο από την αρχή.

Έπειτα το συγκεκριμένο πακέτο αποθηκεύεται στην αντίστοιχη υπο-ουρά του OLT που είναι δεσμευμένη για την κάθε ONU. Το OPNET παρέχει την δυνατότητα διαίρεσης μιας κύριας ουράς ενός στοιχείου σε περισσότερες υπο-ουρές προκειμένου να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα πολλαπλοί προορισμοί. Ο κώδικας της κατάστασης From_OLT που εκτελείται κάθε φορά που παραλαμβάνεται ένα πακέτο στο interface του Queue_proc από την πηγή Source φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.47.

```
OLT_Data=op_pk_get (op_intrpt_strm());
OLT_Data_Size=op_pk_total_size_get(OLT_Data);

if (Queue_count==ONUs-1)
    Queue_count=0;
else
    Queue_count++;

//Check whether the packet fits in queue
if (OLT_Data_Size+op_subq_stat(Queue_count,OPC_QSTAT_BITSIZE)>Queue_Size)
    op_pk_destroy(OLT_Data);
else
    op_subq_pk_insert(Queue_count,OLT_Data,OPC_QPOS_TAIL);
```

Εικόνα 4. 47: Κώδικας κατάστασης From_OLT

Στην κατάσταση init ανάμεσα στις δηλώσεις των μεταβλητών και των πινάκων ενεργοποιείται και μια διακοπή τύπου self η οποία εκτελείται κάθε 125 msec και αποστέλλει ένα πακέτο που ζητάει από την κάθε ONU να δηλώσει πόσο εύρος επιθυμεί να της καταχωρηθεί στην επόμενη μετάδοση. Αυτή η επαναλαμβανόμενη διακοπή ενεργοποιεί την μετάβαση SEND_FRAME και μεταβαίνουμε στην κατάσταση Send_Frame.

Σε αυτήν την κατάσταση εκτελείται το κύριο μέρος των λειτουργιών του OLT που είναι ο αποδοτικός χρονοπρογραμματισμός των μεταδόσεων των ONUs ώστε να μην υπάρχουν επικαλύψεις που οδηγούν σε αλλοιώσεις πακέτων. Κάποιες από τις πρώτες ενέργειες που εκτελεί ο OLT εισερχόμενος σε αυτήν την κατάσταση φαίνονται στον κώδικα της εικόνας 4.48.

Στην πρώτη γραμμή δημιουργείται το πακέτο που ακολουθεί την μορφή XG_PON_OLT_Frame, έπειτα υπολογίζεται το πεδίο Grant το οποίο αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης που δηλώνει η κάθε ONU. Το εύρος ζώνης μπορεί να είναι είτε η επιθυμητή δήλωση της κάθε ONU *Report*, είτε το Grant_Max στη περίπτωση που το report της ONU είναι υπερβολικά μεγάλο, είτε μηδενικό στην περίπτωση που δεν δηλώνεται τίποτα. Στο επόμενο τμήμα κώδικα υλοποιείται πρόσβαση στην κάθε υπο-ουρά του OLT για τον υπολογισμό του μεγέθους των δεδομένων που υπάρχουν για downstream μετάδοση. Στην συνέχεια αυτά εκχωρούνται στο πεδίο SEND_X, όπου X το μοναδικό αναγνωριστικό της εκάστοτε ONU.

```

OLT_Frame=op_pk_create_fmt("XG_PON_OLT_Frame");
op_pk_nfd_set(OLT_Frame,"ONU_ID",0);//initial value;
//Grant & Report calculations
for (Counter1=1;Counter1<=ONUS;Counter1++)
{
    if (Report[Counter1-1]>Grant_Max[Counter1-1])
        Grant[Counter1-1]=Grant_Max[Counter1-1];
    else if (Report[Counter1-1]==0)
        Grant[Counter1-1]=0;
    else
        Grant[Counter1-1]=Report[Counter1-1];

    sprintf(Grant_String,"%s%d","GRANT_",Counter1);
    op_pk_nfd_set(OLT_Frame,Grant_String,Grant[Counter1-1]);

    //Sending Downstream Data
    Sent_Bits=0;
    if (op_subq_stat(Counter1-1,OPC_QSTAT_BITSIZE)>0)
    {
        pkptr=op_subq_pk_access(Counter1-1,OPC_QPOS_HEAD);
        while (Sent_Bits+op_pk_total_size_get(pkptr)<=4294967296)
        {
            Sent_Bits=Sent_Bits+op_pk_total_size_get(pkptr);
            pkptr=op_subq_pk_remove(Counter1-1,OPC_QPOS_HEAD);
            if (op_subq_stat(Counter1-1,OPC_QSTAT_PKSIZE)==0)
                break;
            else
                pkptr=op_subq_pk_access(Counter1-1,OPC_QPOS_HEAD);
        }
    }

    sprintf(Send_String,"%s%d","SEND_",Counter1);
    op_pk_nfd_set(OLT_Frame,Send_String,Sent_Bits);
}

```

Εικόνα 4. 48: Κώδικας κατάστασης Send_Frame

Υπολογίζοντας τον χρόνο διάδοσης χρησιμοποιούμε τον πίνακα Distance ο οποίος είναι ένας πίνακας στον οποίο δηλώνονται οι αποστάσεις που έχει η κάθε ONU από τον OLT, σε μέτρα. Στο εν λόγω παράδειγμα με τις δύο ONUs, η πρώτη τοποθετείται σε απόσταση 6 km από τον OLT ενώ η δεύτερη απέχει 12 km από τον OLT.

Στην εικόνα 4,49 φαίνεται επίσης και το τμήμα κώδικα που υλοποιεί τον υπολογισμό της τιμής του πεδίου START_TIME. Αυτός ο χρόνος START_TIME, είναι ο χρόνος έναρξης της upstream μετάδοσης της κάθε ONU και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο μετάδοσης, τον χρόνο διάδοσης, τον χρόνο που χρειάζεται η ONU να απαντήσει αλλά και την χρονική στιγμή που γίνεται διαθέσιμο το upstream κανάλι (CAT). Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω χρόνους αλλά και ένα χρόνο guard ο οποίος εμπλέκεται για να μην υπάρξουν παρεμβολές ανάμεσα στα πακέτα διαφορετικών ONU.

Στην συνέχεια προστίθεται το μέγεθος του σώματος του πακέτου σε μορφή payload, με την κλήση της συνάρτησης op_pk_bulk_size_set. Τέλος αποστέλλεται το OLT_Frame και προγραμματίζεται η επόμενη διακοπή σε 125 msec για αποστολή του επόμενου downstream πακέτου XG_PON_OLT_Frame.

```
Tra_Delay=(double)Header/Upstream_Rate;//Time For Upstream Transimission
Pro_Delay=(double)Distance[Counter1-1]/300000000;

if (op_sim_time()+ (double)OLT_Frame_Length/Downstream_Rate
+Pro_Delay+Response_Time[Counter1-1]+Tra_Delay+Pro_Delay>CAT)
{
    Delay=0;
    CAT=op_sim_time()+ (double)OLT_Frame_Length/Downstream_Rate
+Pro_Delay+Response_Time[Counter1-1]+Tra_Delay+Pro_Delay+Guard;
}
else
{
    Delay=CAT-(op_sim_time()+ (double)OLT_Frame_Length/Downstream_Rate
+Pro_Delay+Response_Time[Counter1-1]);
    CAT=Delay+Tra_Delay+Pro_Delay+Guard;
}
sprintf(Delay_String,"%s%d", "START_TIME_",Counter1);
op_pk_nfd_set(OLT_Frame,Delay_String,Delay);
}

op_pk_bulk_size_set(OLT_Frame,1243980);
op_pk_send(OLT_Frame,0);

Down_Packets_gen++;
op_intrpt_schedule_self(op_sim_time()+0.000125,1);
```

Εικόνα 4. 49: Κώδικας κατάστασης Send_Frame

Η άλλη δυνατή μετάβαση από την κατάσταση idle είναι προς την κατάσταση From_ONU με την ικανοποίηση της συνθήκης της μετάβασης ARRIVAL_ONU.

Μετάβαση στην κατάσταση From_ONU επιτυγχάνεται με την άφιξη ενός πακέτου ONU_Frame από μια ONU. Το block του κώδικα που υλοποιεί τις λειτουργίες της κατάστασης From_ONU παρουσιάζεται στην εικόνα 4.50. Αρχικά γίνεται ανάκτηση των πληροφοριών του νέο-αφιχθέντος πακέτου, όπως το αναγνωριστικό και το δηλωμένο report και τέλος υπολογίζεται η καθυστέρηση του πακέτου και διαγράφεται το πακέτο ONU_Frame για να μην σπαταλούμε πολύτιμες θέσεις μνήμης.

```
ONU_Frame=op_pk_get(op_intrpt_strm());
op_pk_fd_get(ONU_Frame,0,&ONU_ID);
op_pk_fd_get(ONU_Frame,1,&Report[ONU_ID-1]);

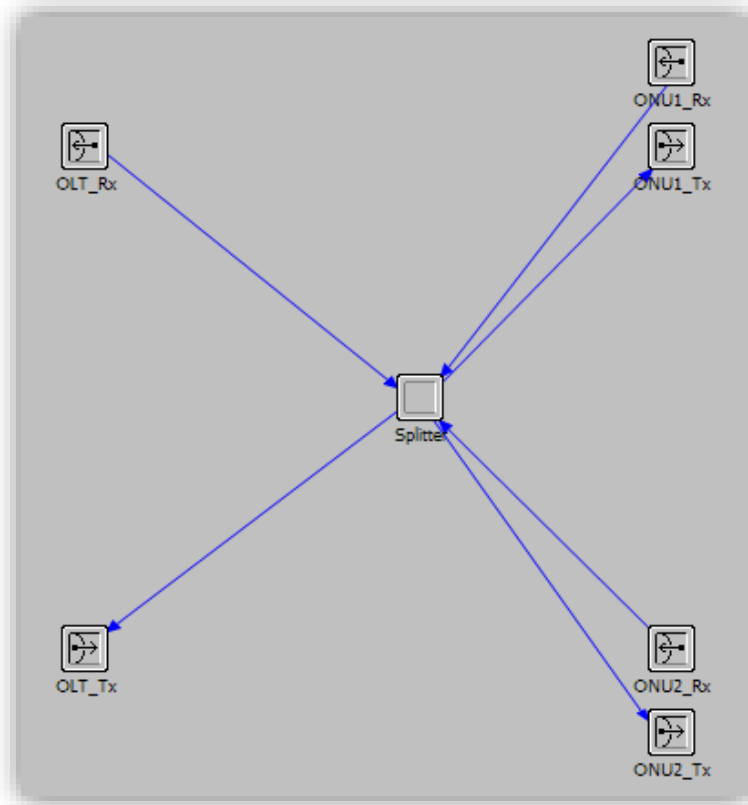
Up_Packets_arv[ONU_ID-1]++;

Up_Delay[ONU_ID-1]+=op_sim_time()-op_pk_creation_time_get(ONU_Frame);
op_pk_destroy(ONU_Frame);
```

Εικόνα 4. 50: Κώδικας κατάστασης From_ONU

4.4 Δομή μοντέλου Splitter

Όλα τα downstream πακέτα από τον πομπό Tx του OLT προωθούνται μέσω της downstream ζεύξης στην αντίστοιχη διεπαφή δέκτη του Splitter, το διάγραμμα κόμβου του οποίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.51.



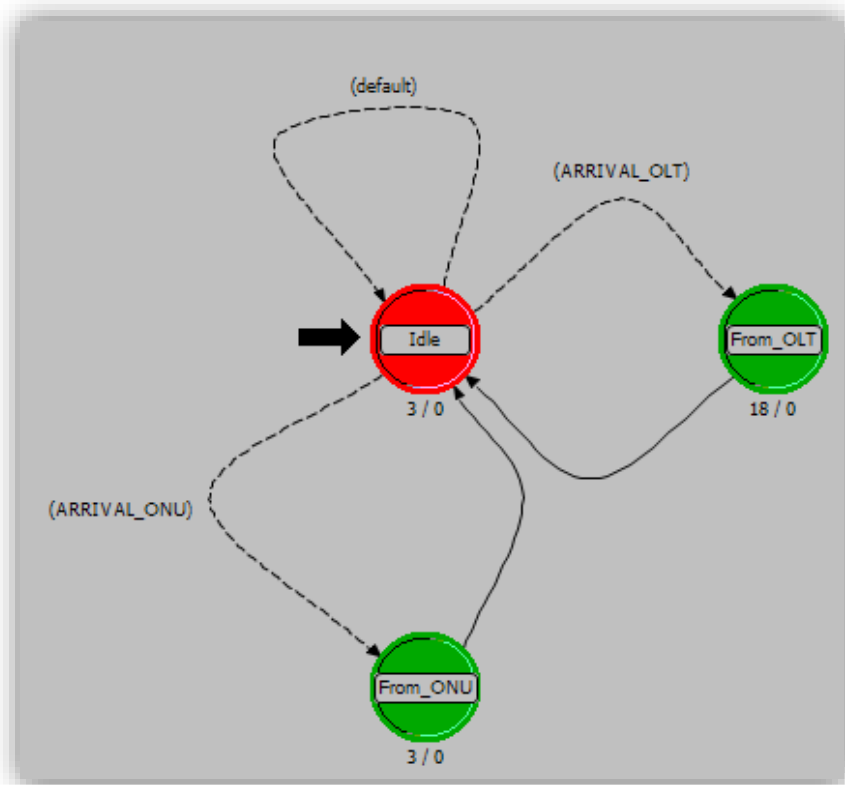
Εικόνα 4. 51: Δομή μοντέλου κόμβου Splitter

Τα downstream πακέτα καταφθάνουν στο στοιχείο OLT_Rx από όπου και προωθούνται αυτόματα προς το στοιχείο επεξεργαστή του Splitter μέσω της μπλε γραμμής μεταφοράς. Έπειτα πακέτα αυτά αντιγράφονται από το στοιχείο επεξεργασίας Splitter και προωθούνται στους αντίστοιχους πομπούς με προορισμό την κάθε ONU (ONU1_Tx και ONU2_Tx). Παρόμοια η λειτουργία και για το upstream κανάλι, όπου λαμβάνεται ένα πακέτο από μια ONU είτε στον δέκτη ONU1_Rx είτε στον δέκτη ONU2_Rx. Έπειτα προωθείται στο στοιχείο Splitter αντιγράφεται και μέσω του πομπού OLT_Tx, αποστέλλεται στον OLT.

Σε όλα τα στοιχεία του downstream καναλιού (OLT_Rx , ONU1_Tx, ONU2_Tx) ο ρυθμός μετάδοσης είναι ορισμένος στα 10 Gbps και μεταδίδονται μόνο πακέτα της μορφής XG_PON_OLT_Frame. Ενώ τα στοιχεία που εμπλέκονται στο upstream κανάλι ONU1_Rx, ONU2_Rx, OLT_Tx μεταδίδουν ή δέχονται πακέτα με ρυθμό μετάδοσης 2.5 Gbps. Τα στοιχεία της downstream επικοινωνίας υποστηρίζουν

μετάδοση μόνο XG_PON_OLT_Frame ενώ αυτές του upstream καναλιού μόνο ONU_Frame.

Στο στοιχείο επεξεργασίας του splitter εκτελείται το μοντέλο διεργασιών “Splitter_Process”. Το διάγραμμα καταστάσεων του στοιχείου αυτού απεικονίζεται στην εικόνα 4.52. Η αρχική κατάσταση εκκίνησης είναι η κατάσταση idle από την οποία ξεκινούν και καταλήγουν όλες οι μεταβάσεις.



Εικόνα 4. 52: Δομή επεξεργαστή Splitter

Όταν αφιχθεί ένα upstream πακέτο τύπου ONU_Frame ενεργοποιείται η μετάβαση ARRIVAL_ONU και η προσομοίωση μεταβαίνει στην κατάσταση From_ONU στην οποία γίνεται ανάκτηση του κάθε πακέτου, αντιγραφή και εκ νέου αποστολή του προς την διεπαφή δέκτη του OLT.

Η προσομοίωση μεταβαίνει στην κατάσταση From_OLT κάθε 125 μsec με την άφιξη ενός downstream πακέτου από τον OLT. Στην περίπτωση μιας downstream άφιξης πακέτου, η προσομοίωση μεταβαίνει στην κατάσταση From_OLT η οποία είναι και αυτή που παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον στον splitter.

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 4.53 αρχικά δηλώνεται ο πίνακας με τις αποστάσεις της κάθε ONU (6 km 12 km), έπειτα γίνεται ανάκτηση του πακέτου μέσω της συνάρτησης *op_pk_get*. Μέσα στο τμήμα κώδικα της δομής επανάληψης *for* αντιγράφεται το πακέτο που στάλθηκε από τον OLT μια φορά για κάθε ONU. Σε αυτά τα νέα πακέτα εκχωρείται το μοναδικό ONU_ID της κάθε ONU, και υπολογίζεται ο χρόνος μετάδοσης και ο χρόνος διάδοσης για κάθε πακέτο. Τέλος ο splitter προωθεί τον αντίγραφο καθυστερώντας το κατά ένα χρονικό διάστημα *Tra_Delay+Pro_Delay* που υπολογίστηκε βάσει του χρόνου μετάδοσης και διάδοσης, προς την αντίστοιχη μονάδα πομπού που ορίζεται από το ONU_ID με προορισμό την εκάστοτε ONU.

```
Distance[0]=6000;
Distance[1]=12000;

pkptr=op_pk_get (op_intrpt_strm());

for (Counter1=1;Counter1<=ONUs;Counter1++)
{
    pkptr_copy=op_pk_copy(pkptr);
    op_pk_nfd_set(pkptr_copy,"ONU_ID",Counter1);
    pkptr_size=op_pk_total_size_get(pkptr);
    Tra_Delay=(float)pkptr_size/9953280000;
    Pro_Delay=(float)Distance[Counter1-1]/3000000000;
    op_pk_send_delayed(pkptr_copy,Counter1,Tra_Delay+Pro_Delay);
}

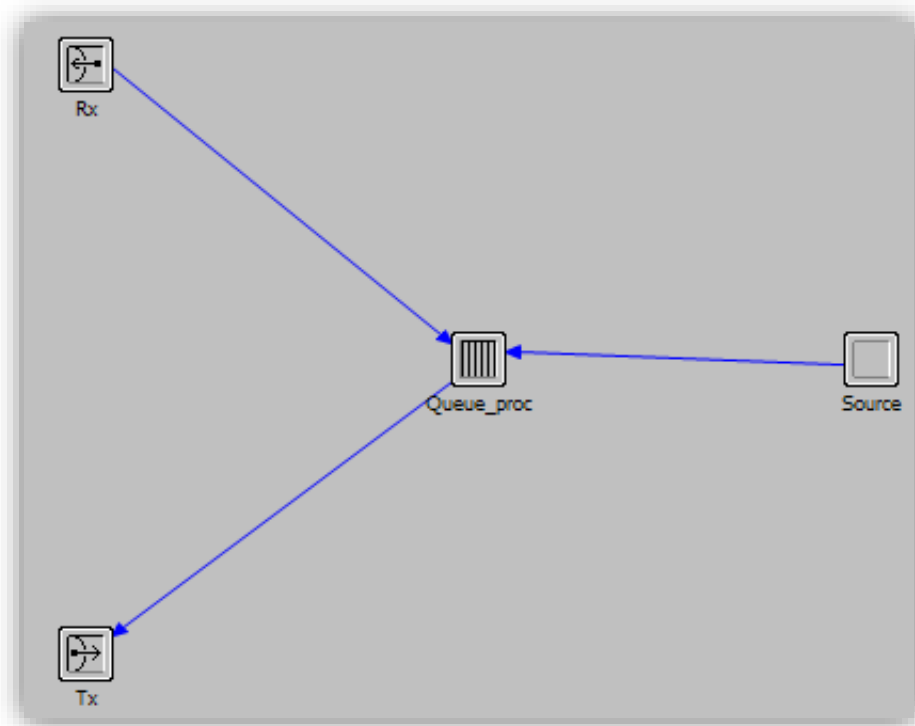
op_pk_destroy(pkptr);
```

Εικόνα 4. 53: Κώδικας κατάστασης From_OLT

4.5 Δομή μοντέλου ONU

Το μοντέλο της ONU είναι αυτό στο οποίο παρουσιάζεται η δυνατότητα εισαγωγής μηχανισμών εξοικονόμησης ενέργειας. Στο μοντέλο της ONU επίσης υλοποιείται το κύριο τμήμα αυτής της εργασίας, ο αλγόριθμος απόφασης για αποδοτική εναλλαγή των καταστάσεων Active, Listen, Asleep με στόχο την μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς εισαγωγή μεγάλης καθυστέρησης στους χρόνους μετάδοσης των πακέτων.

Στο μοντέλο αυτό επίσης συμπεριλαμβάνεται και ο κώδικας που υλοποιεί τον αλγόριθμο πρόβλεψης μελλοντικών τιμών. Σκοπός αυτού του αλγόριθμου είναι να προβλέψει της ιδανικής διάρκειας των επερχόμενων χρονικών διαστημάτων παραμονής σε καταστάσεις ύπνωσης. Όλες οι οπτικές μονάδες δικτύου χρησιμοποιούν το μοντέλο κόμβου της εικόνας 4.54.



Εικόνα 4. 54: Μοντέλο κόμβων ONU

Αυτό το μοντέλο, βέβαια, προσαρμόζεται στις παραμέτρους και στις απαιτήσεις της κάθε ONU μέσω ενός δυναμικού αλγόριθμου ο οποίος διατηρεί διαφορετικά δεδομένα για την κάθε ONU. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται η λειτουργία των μοντέλων ONU για δίκτυο με δύο συνδεδεμένες ONU. Φυσικά προσαρμόζοντας κάποιες παραμέτρους το παρών μοντέλο εφαρμόζεται και σε δίκτυα με περισσότερες ONUs.

Το μοντέλο κόμβου μιας ONU περιλαμβάνει μια πηγή πακέτων δεδομένων upstream, έναν πομπό για τις ανάγκες της upstream μετάδοσης καθώς και έναν δέκτη downstream πακέτων, συνδεδεμένο με την αντίστοιχη διεπαφή πομπού του splitter. Επίσης περιλαμβάνει και το στοιχείο ουράς Queue_process, στο οποίο εκτελείται η επεξεργασία των πακέτων αλλά και το κύριο τμήμα του κώδικα της εργασίας, ο αλγόριθμος εξοικονόμησης ενέργειας. Σε αυτό το στοιχείο επίσης λαμβάνονται και οι αποφάσεις για τις μεταβάσεις στις καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας.

Το στοιχείο δέκτη Rx είναι αυτό που δέχεται τα downstream πακέτα από τον πομπό του splitter και τα προωθεί για επεξεργασία στο στοιχείο Queue_process. Ο δέκτης Rx όπως και κάθε άλλο στοιχείο του downstream καναλιού, υποστηρίζει μόνο πακέτα τύπου XG_PON_OLT_Frame σε ρυθμό μετάδοσης 10 Gbps. Το στοιχείο πομπού Tx προωθεί τα πακέτα που δημιουργούνται στον δέκτη του

splitter. Όπως κάθε στοιχείο του upstream καναλιού υποστηρίζει μετάδοση μόνο ONU_Frame σε ρυθμούς μετάδοσης 2.5 Gbps.

Στο στοιχείο παραγωγής πακέτων Source εκτελείται το μοντέλο διεργασιών simple_source, το οποίο είναι μια γεννήτρια πακέτων ONU_Data. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.55 στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχει επιλεχθεί να παράγονται πακέτα μεγέθους που παράγεται από ομοιόμορφη κατανομή με όρια 64, 1518 bits. Οι χρόνοι γέννησης των πακέτων από την πηγή ακολουθούν εκθετική κατανομή με μέσο όρο ένα πακέτο κάθε ένα δευτερόλεπτο. Βέβαια σε διαφορετικά σενάρια αυτοί οι παράμετροι αλλάζουν και είναι αυτοί που επηρεάζουν τον φόρτο του δικτύου και κατ' επέκταση την απόδοσή του.

Attribute	Value
name	Source
process model	simple_source
icon name	processor
Packet Format	ONU_Data
Packet Interarrival Time	exponential (1.0)
Packet Size	uniform (64, 1518)
Start Time	0.0
Stop Time	Infinity

Εικόνα 4. 55: Ιδιότητες γεννήτριας πακέτων Source

Το εναπομείναν στοιχείο του διαγράμματος κόμβου της ONU είναι το στοιχείο που φαίνεται στην εικόνα 4.54 με την ονομασία Queue_proc. Σε αυτό το στοιχείο υλοποιούνται οι διαδικασίες καταχώρησης ενός upstream πακέτου στην ουρά, οι διαδικασίες απάντησης σε ένα downstream πακέτο του OLT. Επίσης ορίζονται οι καταστάσεις μειωμένης κατανάλωσης, και λαμβάνεται η απόφαση για τις μεταβάσεις σε αυτές τις καταστάσεις. Στις ενότητες που ακολουθούν αναφέρονται τα διαφορετικά μοντέλα των ONU που υλοποιήθηκαν και συμμετείχαν στα σενάρια προσομοίωσης του δικτύου

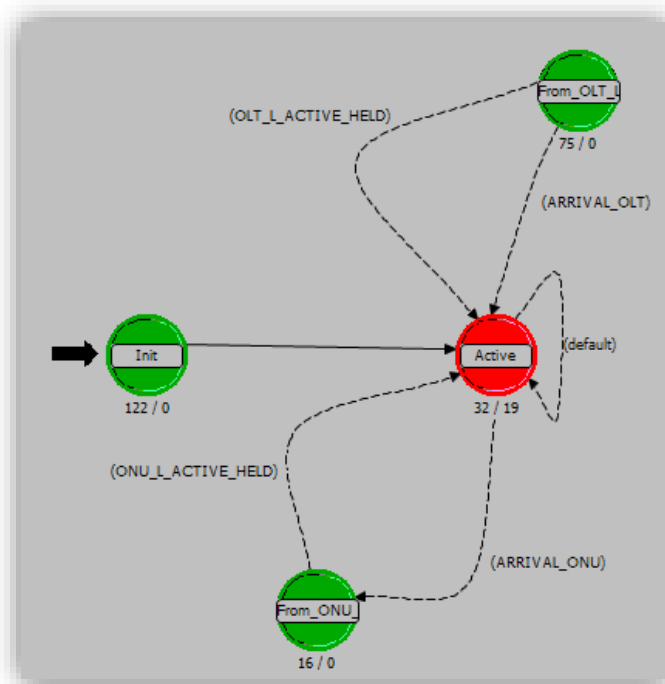
Στις προδιαγραφές του προτύπου G.987 από την ITU, πιο συγκεκριμένα στο G.987.3 που περιγράφει τις λειτουργίες του επιπέδου σύγκλισης μετάδοσης (TC), ορίζεται η κατανάλωση ενέργειας της ONU σε καθεμιά από τις δυνατές καταστάσεις της. Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται οι καταναλώσεις ενέργειας σε Watt/δευτερόλεπτο για την κάθε κατάσταση. Οι δύο καταστάσεις ύπνου Asleep και Listen είναι αυτές στις οποίες καταναλώνεται η λιγότερη ενέργεια.

Συμβολισμός	Περιγραφή	Τιμή
P_{ah}	Ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση Active Held	4.69 W
P_{af}	Ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση Active Free	4.69 W
P_{da}	Ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση Doze Aware	2.78 W
P_{ls}	Ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση Listen	1.7 W
P_{sa}	Ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση Sleep Aware	2.78 W
P_{as}	Ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση Sleep Aware	0.9 W

Πίνακας 4. 6: Κατανάλωση ενέργειας ONU σε Watt ανά κατάσταση

4.5.1 Απλούστερο μοντέλο ONU

Στην πιο απλή της περίπτωση, μια οπτική μονάδα δικτύου υλοποιεί τις δύο βασικές λειτουργίες. Αυτές είναι η εξυπηρέτηση των διακοπών από αφίξεις πακέτων downstream και η δημιουργία πακέτων upstream. Στην παρακάτω εικόνα 4.56 παρουσιάζεται το βασικό διάγραμμα καταστάσεων της απλούστερης δομής της ONU. Πάνω σε αυτό βασίζονται όλα τα υπόλοιπα διαγράμματα τα οποία υλοποιούν μια πιο αποδοτική ενεργειακά προσέγγιση αυτών των λειτουργιών της ONU.



Εικόνα 4. 56: Διάγραμμα καταστάσεων απλής ONU

Αρχικά εκτελούνται ο κώδικας του header block όπου δηλώνονται οι μεταβλητές και οι πίνακες που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και οι τύποι τους (int, float, double). Στο header block επίσης δηλώνονται και οι συνθήκες μετάβασης ανάμεσα στις καταστάσεις.

Αρχικά η προσομοίωση ξεκινά από την κατάσταση init η οποία είναι η κατάσταση όπου αρχικοποιούνται οι τιμές από όλες τις μεταβλητές και τους πίνακες που είναι δηλωμένοι στο header block. Η αρχική κατάσταση init διακρίνεται και από το χαρακτηριστικό βέλος.

Μετά την εκτέλεση των εντολών της κατάστασης init η προσομοίωση μεταβαίνει αυτόματα στην κατάσταση Active. Στην κατάσταση Active, η ONU ανταποκρίνεται πλήρως σε όλες τις λειτουργίες της. Με κάθε είσοδο στην κατάσταση Active υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα 4.6. Επειδή η κατανάλωση ενέργειας σε πλήρη λειτουργία είναι 4,69 Watt το δευτερόλεπτο όλα τα σενάρια του δικτύου που υλοποιούν αυτό το μοντέλο ONU δεν εξοικονομούν καθόλου ενέργεια.

Όταν ένα πακέτο αφιχθεί από την γεννήτρια πακέτων της κάθε ONU στο στοιχείο Queue_proc ενεργοποιείται η μετάβαση ARRIVAL_ONU και η προσομοίωση μεταβαίνει στην κατάσταση From_ONU. Στην κατάσταση From_ONU, αρχικά γίνεται ανάκτηση των πληροφοριών του πακέτου (π.χ. μοναδικό αναγνωριστικό, χρόνος δημιουργίας κ.α.) και στη συνέχεια καταχωρείται στην ουρά. Σε περίπτωση που η ουρά είναι πλήρης γίνεται απόρριψη του πακέτου, το οποίο και καταστρέφεται. Ο κώδικας αυτής της κατάστασης φαίνεται στην εικόνα 4.57. Εξερχόμενη από την κατάσταση αυτή, η προσομοίωση επιστρέφει πίσω στην κατάσταση Active.

```
//Get self info
own_id=op_id_self();
parent_id=op_topo_parent(own_id);
ONU_Data=op_pk_get (op_intrpt_strm());
ONU_Data_Size=op_pk_total_size_get(ONU_Data);
//Check whether the packet fits in queue
if (ONU_Data_Size+op_subq_stat(parent_id-3,OPC_QSTAT_BITSIZE)>Queue_Size)
    op_pk_destroy(ONU_Data);
else
{
    op_subq_pk_insert(parent_id-3,ONU_Data,OPC_QPOS_TAIL);
    up_counter[parent_id-3]++;
}
```

Εικόνα 4. 57: Κώδικας κατάστασης From_ONU

Επόμενη μετάβαση από την κατάσταση Active είναι η ARRIVAL_OLT η οποία ενεργοποιείται με την άφιξη ενός downstream πακέτου από τον OLT. Μετάβαση στην κατάσταση From_OLT εκτελείτε με την ικανοποίηση της συνθήκης ARRIVAL_OLT. Με την είσοδο στην κατάσταση From_OLT εκτελείται ο κώδικας στον οποίο αρχικά λαμβάνονται πληροφορίες από το downstream πακέτο, όπως ο χρόνος έναρξης της upstream μετάδοσης, το εύρος ζώνης το οποίο είναι καταχωρημένο αλλά και τυχόν downstream δεδομένα από τον OLT. Σε αυτήν την κατάσταση επίσης δημιουργείται και το upstream πακέτο το οποίο αποστέλλεται σαν απάντηση προς τον OLT.

Στην παρακάτω εικόνα 4.58 βλέπουμε το τμήμα του κώδικα που εκτελεί την ανάκτηση των πληροφοριών από το downstream πακέτο. Έπειτα βάσει των Grant_Bits αναζητούνται τα δηλωμένα πακέτα στην ουρά και καταγράφονται στην μεταβλητή Sent_Bits για να ενσωματωθούν στην συνέχεια στο upstream ONU_Frame πακέτο.

```
//Get self Info --> id,
own_id=op_id_self();
parent_id=op_topo_parent(own_id);

//Get OLT's frame info
OLT_Frame=op_pk_get (op_intrpt_strm());
op_pk_fd_get(OLT_Frame,0,&ONU_ID);
op_pk_fd_get(OLT_Frame,2*ONU_ID-1,&t_time);
op_pk_fd_get(OLT_Frame,2*ONU_ID,&Grant_Bits);
op_pk_fd_get(OLT_Frame,ONU_ID+4,&Down_Bits);

Down_Packets_arv[ONU_ID-1]++;

Down_Delay[ONU_ID-1]+=(op_sim_time()-op_pk_creation_time_get(OLT_Frame));

//Keep previous Grant and Report values
Grant_Bits_Temp=Grant_Bits;
if (Down_Bits>0)
    Down_Counter[parent_id-3]++;

Grant_Packet_Counter=0;
if (t_time>=0)
{
    Sent_Bits=0;
    if (op_subq_stat(ONU_ID-1,OPC_QSTAT_BITSIZE)>0)
    {
        pkptr=op_subq_pk_access(ONU_ID-1,OPC_QPOS_HEAD);
        while (Grant_Bits-op_pk_total_size_get(pkptr)>=0)
        {
            Grant_Packet_Counter++;
            Sent_Bits+=op_pk_total_size_get(pkptr);
            Grant_Bits-=op_pk_total_size_get(pkptr);
            pkptr=op_subq_pk_remove(ONU_ID-1,OPC_QPOS_HEAD);
            if (op_subq_stat(ONU_ID-1,OPC_QSTAT_PKSIZE)==0)
                break;
            else
                pkptr=op_subq_pk_access(ONU_ID-1,OPC_QPOS_HEAD);
        }
    }
}
```

Εικόνα 4. 58: Τμήμα κώδικα κατάσταση From_OLT #1

Στην συνέχεια δημιουργείται το upstream πακέτο ONU_Frame στο οποίο προστίθεται το αναγνωριστικό ONU_ID, δηλώνεται στο τμήμα REPORT η ύπαρξη ή όχι upstream δεδομένων για μελλοντική αποστολή. Τέλος καταχωρείται στην τιμή της μεταβλητής Sent_Bits το μέγεθος του payload του πακέτου ONU_Frame για επεξεργασία στον OLT. Η τιμή της μεταβλητής Sent_Bits επηρεάζει και το συνολικό μέγεθος του πακέτου. Υπολογίζονται οι χρόνοι μετάδοσης και διάδοσης και αποστέλλεται το πακέτο την χρονική στιγμή που έχει υποδείξει ο OLT (τιμή του πεδίου START_TIME). Αυτές οι λειτουργίες φαίνονται στην εικόνα 4.59.

```
ONU_Frame=op_pk_create_fmt("ONU_Frame");
op_pk_nfd_set(ONU_Frame,"ONU_ID",parent_id-2);
Report=op_subq_stat(parent_id-3,OPC_QSTAT_BITSIZE);//in bits
if (Previous_Report[parent_id-3]==Report)
    Report=0;
if (Report>0)
{
    Report_count[parent_id-3]+=Report;
    Report_num[parent_id-3]++;
    Previous_Report[parent_id-3]=Report;
}
op_pk_nfd_set(ONU_Frame,"REPORT",Report);
op_pk_bulk_size_set(ONU_Frame,Sent_Bits);
Tra_Delay=(double)op_pk_total_size_get(ONU_Frame)/Upstream_Rate;
Pro_Delay=(double)Distance[parent_id-3]/300000000;
op_pk_send_delayed(ONU_Frame,0,t_time+Tra_Delay+Pro_Delay);
Up_Packets_gen[parent_id-3]++;
```

Εικόνα 4. 59: Τμήμα κώδικα κατάστασης From_OLT #2

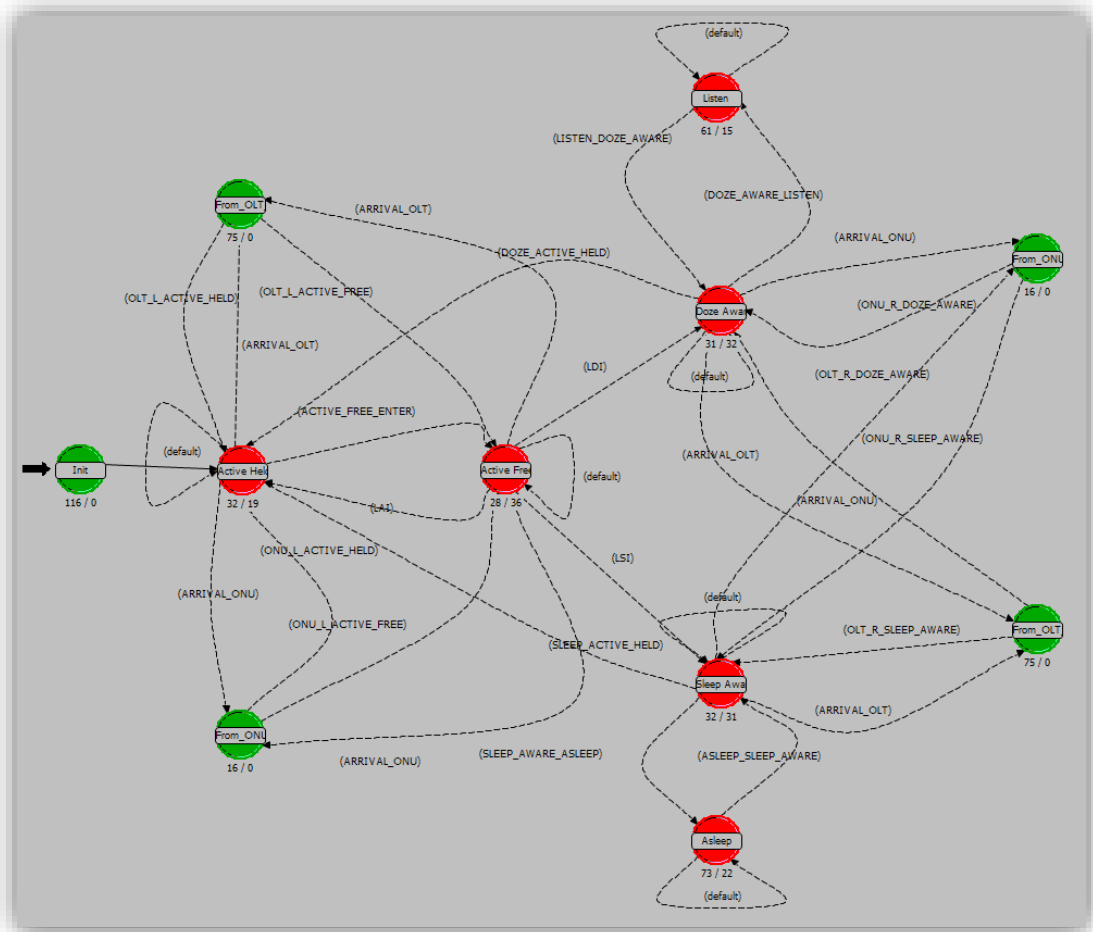
Μετά την αποστολή του πακέτου προς τον OLT η προσομοίωση επιστρέφει στην κατάσταση Active στην οποία καταγράφεται η κατανάλωση ενέργειας. Η προσομοίωση παραμένει στην κατάσταση active μέχρι να αφιχθεί ένα πακέτο upstream ή ένα πακέτο downstream. Αυτή η αλληλουχία καταστάσεων συνεχίζεται μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

4.5.2 Μοντέλο Εξοικονόμησης ενέργειας

Σε αυτό το μοντέλο ONU εισάγεται για πρώτη φορά ένας μηχανισμός για εξοικονόμηση ενέργειας. Σε αυτό το μοντέλο επίσης ορίζονται για πρώτη φορά οι καταστάσεις *Doze Aware*, *Listen*, *Sleep Aware*, *Asleep* που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η παραμονή της προσομοίωσης σε κάθε μια από αυτές τις καταστάσεις είναι για 0.5 δευτερόλεπτα. Το διάγραμμα καταστάσεων της εικόνας 4.60 παραθέτει τις καταστάσεις και τις μεταβάσεις αυτού του μοντέλου.

Εδώ όπως και στο προηγούμενο μοντέλο η προσομοίωση ξεκινά από την κατάσταση init αρχικοποιώντας τις μεταβλητές και τους πίνακες που είναι ορισμένοι στο header block. Επόμενη κατάσταση είναι η Active Held η οποία

βρίσκει την ONU σε πλήρη λειτουργία, να απαντά και να ανταποκρίνεται σε κάθε εισερχόμενο πακέτο. Με την είσοδο σε αυτήν την κατάσταση προγραμματίζεται μια διακοπή μετά από 0.5 δευτερόλεπτα η οποία θα ενεργοποιήσει την συνθήκη ACTIVE_FREE_ENTER εκτελώντας μετάβαση στην κατάσταση Active Free. Επίσης με την είσοδο σε αυτήν την κατάσταση υπολογίζεται και η ενέργεια που θα καταναλωθεί για τα 0.5 δευτερόλεπτα παραμονής σε αυτήν την κατάσταση.



Εικόνα 4. 60: Διάγραμμα καταστάσεων ONU με εξοικονόμηση ενέργειας

Η κατάσταση *Active Free* είναι ίσως η πιο σημαντική κατάσταση του διαγράμματος γιατί εδώ λαμβάνεται η απόφαση για την μετάβαση ή όχι σε μια από τις καταστάσεις *Aware* και στην συνέχεια μια ενδεχομένη έναρξη περιόδου ύπνωσης. Αρχικά όπως και σε κάθε άλλη κατάσταση γίνεται καταγραφή της ενέργειας που πρόκειται να καταναλωθεί στα επόμενα 0,5 δευτερόλεπτα παραμονής. Από την στιγμή που εισέρχεται η προσομοίωση στην κατάσταση *Active Free* ελέγχεται η upstream και η downstream κίνηση παρακολουθώντας τις μεταβάσεις στις καταστάσεις *From_ONU* και *From_OLT* αντίστοιχα.

Έτσι λοιπόν κάθε φορά που έχουμε μετάβαση στην κατάσταση From_ONU και επιτυχημένη καταχώρηση πακέτου στην ουρά αυξάνεται ο Up_Counter για να δηλώσει παρουσία upstream κίνησης. Αντίστοιχα, μεταβαίνοντας στην κατάσταση From_OLT, γίνεται έλεγχος ύπαρξης downstream δεδομένων στο πεδίο SEND_BITS του πακέτου XG_PON_OLT_Frame. Σε περίπτωση που υπάρχουν, καταγράφεται μια επιτυχημένη λήψη και αυξάνεται ο Down_Counter.

Μετά από 0.5 δευτερόλεπτα εκτελείται το block κώδικα “exit code” αμέσως πριν την μετάβαση στην επόμενη κατάσταση. Σε αυτό το σημείο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.61, βάσει της τιμής των δύο Counters που αναφέρθηκαν πριν λαμβάνεται η απόφαση για την επιλογή της επόμενης κατάστασης.

```
if (Up_Counter[parent_id-3]==0 && Down_Counter[parent_id-3]==0)
    lsi[parent_id-3]=1;
else if (Up_Counter[parent_id-3]==0)
    ldi[parent_id-3]=1;
else
    {
    lai[parent_id-3]=1;
    Up_Counter[parent_id-3]=0;
    Down_Counter[parent_id-3]=0
    }
```

Εικόνα 4. 61: Τμήμα κώδικα εξόδου από την κατάσταση Active Free

Σε περίπτωση που είναι μηδενικοί και οι δύο Counters, δηλαδή δεν έχει καταγραφεί καθόλου κίνηση σε όλη την διάρκεια της κατάστασης Active Free επιλέγεται μετάβαση στην κατάσταση Sleep Aware, ενεργοποιώντας την συνθήκη LSI. Αν ο Down_Counter έχει αυξηθεί κάποια στιγμή μέσα στο διάστημα των τελευταίων 0.5 δευτερολέπτων, ενώ ο Up_Counter παρέμεινε μηδενικός ενεργοποιείται η συνθήκη LDI και επιλέγοντας μετάβαση στην κατάσταση Doze Aware με προοπτική ενδεχόμενης εισόδου σε Doze ύπνωση.

Στην τρίτη περίπτωση όπου και οι δύο Counters είναι μη μηδενικοί έχουμε επιστροφή στην προηγούμενη κατάσταση Active Held και εκ νέου προγραμματισμό της επόμενης περιόδου ελέγχου. Στην περίπτωση επιστροφής στην Active_Held μηδενίζονται και ο Up_Counter αλλά και ο Down_Counter για να μην επηρεάσουν την λήψη της απόφασης στην επόμενη προγραμματισμένη περίοδο ελέγχου.

Με είσοδο στην κατάσταση Sleep Aware, αρχικά προγραμματίζεται μια διακοπή μετά από 0.5 δευτερόλεπτα και έπειτα καταγράφονται τα 0,5*2,78 Watt ενέργειας που θα καταναλωθούν στην διάρκεια της κατάστασης Sleep Aware. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στην περίπτωση εισόδου στην κατάσταση Doze Aware, όπου καταναλώνεται το ίδιο ποσοστό ενέργειας για τα 0.5 δευτερόλεπτα παραμονής στην κατάσταση αυτή.

Ωστόσο το ενδιαφέρον τόσο στην κατάσταση Sleep Aware όσο και στην κατάσταση Doze Aware εστιάζεται στο block του κώδικα εξόδου από την κατάσταση αυτή. Στο block εξόδου της Sleep Aware ελέγχονται όπως και σε αυτό της Active Free κατάστασης οι τιμές του Up_Counter και του Down_Counter. Σε περίπτωση που είναι μηδενική μια από αυτές, η προσομοίωση μεταβαίνει από την κατάσταση Sleep Aware στην ενεργειακά αποδοτικότερη κατάσταση Asleep.

Παρόμοια και από την κατάσταση Doze Aware με ενδεχόμενη απουσία upstream κίνησης -μηδενικός Up_Counter- γίνεται μετάβαση στην ενεργειακά “φιλική” κατάσταση Listen. Σε κάθε άλλη περίπτωση μη μηδενικών τιμών των counters δρομολογείται επιστροφή της προσομοίωσης στην κατάσταση Active Held, όπου προγραμματίζεται ένας νέος κύκλος ελέγχου.

Στην κατάσταση Asleep επιτυγχάνουμε την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας 0.5*0.9 Watt, τα οποία καταγράφονται με την είσοδο της προσομοίωσης σε αυτήν την κατάσταση. Μαζί με την κατανάλωση ενέργειας καταγράφεται και ο χρόνος για το οποίο θα παραμείνει η ONU σε αυτήν την κατάσταση καθώς και ο αριθμός των εισόδων. Αμέσως μετά προγραμματίζεται μια διακοπή που θα επιστρέψει την προσομοίωση από την κατάσταση Asleep στην κατάσταση Sleep Aware σε 0.5 δευτερόλεπτα.

Επειδή η κατάσταση Asleep δεν επικοινωνεί με κάποια από τις καταστάσεις From_OLT ή From_ONU το τμήμα κώδικα εξυπηρέτησης downstream και upstream πακέτων υλοποιείται μέσα στο block του κώδικα εισόδου. Όταν φτάσει μια διακοπή λόγω άφιξης upstream πακέτου δεδομένων γίνεται αποθήκευση του πακέτου στην ουρά της εκάστοτε ONU και αυξάνεται ο Up_Counter.

Στην περίπτωση άφιξης ενός downstream πακέτου που έχει και δεδομένα, η ONU δεν μπορεί να εξυπηρετήσει αυτό το πακέτο άμεσα, παρά μόνο όταν βγει από την κατάσταση Asleep. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το delay στο downstream κανάλι, λόγω των απενεργοποιημένων απαιτούμενων στοιχείων.

Το τμήμα του κώδικα που υλοποιεί αυτές τις λειτουργίες φαίνεται στην εικόνα 4.62. Αρχικά ανακτώνται το αναγνωριστικό της ONU και το μέγεθος των downstream δεδομένων του OLT_Frame. Μέσα στην δομή “if” καταχωρείτε σε ένα πίνακα ο χρόνος δημιουργίας του πακέτου, με την κλήση της συνάρτησης `op_pk_creation_time_get`, και αυξάνεται ο Down_Counter.

Όταν ένα downstream πακέτο περιέχει και δεδομένα τότε αυτό θα “εξυπηρετηθεί” μετά το πέρας την κατάστασης Asleep. Έτσι το delay υπολογίζεται ως η διαφορά της χρόνου εξόδου με τον χρόνο δημιουργίας του πακέτου. Αν το πακέτο δεν περιέχει δεδομένα δεν εξυπηρετείται σε μια κατάσταση Asleep, καταγράφοντας ως delay την διαφορά της χρονικής στιγμής αφίξεως με τον χρόνο δημιουργίας του πακέτου.

```
if (Down_Bits>0)
{
    Down_Delay[parent_id-3]+=exit_time[parent_id-3][exit_point[parent_id-3]]
                                -op_pk_creation_time_get(OLT_Frame);
    Down_Counter[parent_id-3]++;
    asleep_end[parent_id-3]++;
    Actual_Asleep[parent_id-3][asleep_end[parent_id-3]]=op_sim_time()
                                -Tsleep_a_matrix[parent_id-3][Tsleep_a_pointer[parent_id-3]];

    op_stat_write (Actual_asleep_stathandle,
                  Actual_Asleep[parent_id-3][asleep_end[parent_id-3]]);
}
else
    Down_Delay[parent_id-3]+=op_sim_time()-op_pk_creation_time_get(OLT_Frame);
```

Εικόνα 4. 62: Τμήμα κώδικα Asleep επεξεργασίας downstream φόρτου

Παρόμοια η ONU, μπαίνοντας σε κατάσταση Listen καταγράφει τον χρόνο για τον οποίο θα παραμείνει σε κατάσταση Listen, καθώς και τον αριθμό εισόδων σε αυτή την κατάσταση και προγραμματίζει μια διακοπή εξόδου μετά από 0.5 δευτερόλεπτα. Στην κατάσταση Listen τα downstream πακέτα δεν συμμετέχουν στην απόφαση για τη επιλογή εξόδου ή όχι από την doze λειτουργία. Οπότε στην κατάσταση Listen ο Down_Counter αγνοείται.

Στην περίπτωση μιας upstream άφιξης δεδομένων όμως, μετά από μια επιτυχημένη καταχώρηση του πακέτου στην ουρά αυξάνεται ο Up_Counter για να δηλώσει παρουσία upstream κίνησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στην κατάσταση Sleep Aware να αποφευχθεί εκ νέου μετάβαση στην κατάσταση Listen.

Έτσι λοιπόν, έπειτα από 0.5 δευτερόλεπτα παραμονής σε μια από τις καταστάσεις ύπνωσης η προσομοίωση επιστρέφει σε μια από τις Sleep Aware ή Doze Aware αντίστοιχα.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί κάτι που αναφέρθηκε προηγουμένως σχετικά με τις καταστάσεις Doze Aware και Sleep Aware. Έπειτα από την 2^η είσοδο σε μια από τις καταστάσεις ύπνωσης, οι καταστάσεις Aware παρακολουθούν την κίνηση του δικτύου για διπλάσιο χρονικό διάστημα σε σχέση με αυτό που παρακολουθεί η 1^η κατάσταση Aware. Αυτό συμβαίνει διότι μετά την 2^η είσοδο παρακολουθείται και το διάστημα παραμονής σε κατάσταση Listen ή Asleep.

4.5.3 Εξοικονόμηση ενέργειας με πρόβλεψη επόμενης τιμής

Η μέθοδος *exponential smoothing*, είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται σε μια αριθμητική σειρά δεδομένων, είτε για να παράγει εξομαλυμένα δεδομένα, είτε για να προβλέψει κάποια επόμενη τιμή. Το φαινόμενο που παρατηρείται μπορεί να είναι μια εντελώς τυχαία ακολουθία τιμών ή μπορεί να είναι μια ομαλή ακολουθία με τυχών διαταραχές. Σε αυτήν την μέθοδο δίδεται βαρύτητα στις πιο πρόσφατες παρατηρήσεις, δηλαδή στις πιο πρόσφατες τιμές της ακολουθίας. Αυτό επιτυγχάνεται αναθέτοντας βάρη σε όλες τις τιμές τα οποία μειώνονται εκθετικά με την πάροδο του χρόνου.

Η μέθοδος *exponential smoothing* εφαρμόζεται κατά κόρον στην οικονομική επιστήμη και σε οικονομικά δεδομένα. Συχνά εφαρμόζεται και σε μια ακολουθία επαναλαμβανόμενων διακριτών τιμών. Η ακολουθία εισόδου αναπαρίσταται με x_t και η μέθοδος ορίζει σαν S_t την καλύτερη εκτίμηση της επόμενης τιμής του x . Οι παρατηρήσεις ξεκινούν από την χρονική στιγμή $t = 0$. Η απλούστερη μέθοδος εξομάλυνσης ορίζει σαν αρχική τιμή $S_0 = x_0$ με την επόμενη τιμή του S να δίνεται από την εξίσωση:

$$S_t = a * x_{t-1} + (1 - a) * S_{t-1}, t > 0$$

όπου a ορίζεται ο παράγοντας εξομάλυνσης με $0 < a < 1$.

Το μοντέλο της ενότητας 4,5,2, όπως θα φανεί και αργότερα στα αποτελέσματα, δεν είναι όσο αποδοτικό θα θέλαμε από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας. Γι' αυτόν τον λόγο αναζητήθηκε μια διαφορετική τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας. Η μέθοδος *exponential smoothing* είναι η κατάλληλη μέθοδος για το συγκεκριμένο πρόβλημα, η οποία παρατηρώντας τις προηγούμενες αφίξεις των πακέτων προσπαθεί να προβλέψει τις επόμενες.

Για παράδειγμα, στο προηγούμενο μοντέλο έχουμε ορίσει το χρονικό διάστημα παραμονής σε κατάσταση Listen και Asleep σταθερό και ίσο με 0.5 δευτερόλεπτα, αυτό όμως δεν είναι πάντα το βέλτιστο διάστημα παραμονής. Αν ένα πακέτο αφιχθεί 0.3 δευτερόλεπτα μετά την είσοδο της προσομοίωσης σε μια από αυτές τις καταστάσεις τότε το διάστημα των 0.5 δευτερολέπτων είναι λανθασμένα μεγαλύτερο από ότι θα έπρεπε. Ενώ αντίστοιχα αν δεν υπάρξει κάποια διακοπή στο διάστημα των 0.5 δευτερολέπτων και το επόμενο πακέτο αφιχθεί στα 0.7 δευτερόλεπτα τότε το 0.5 είναι επίσης εσφαλμένη επιλογή, γιατί θα μπορούσε να παραταθεί η διάρκεια παραμονής για 0.2 δευτερόλεπτα ακόμη.

Έτσι στην πρώτη περίπτωση η επιλογή των 0.5 δευτερολέπτων εισάγει περιττό delay, ενώ στην δεύτερη περίπτωση λόγω της πρόωρης εξόδου από μια κατάσταση ύπνωσης χάνουμε πολύτιμο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας.

4.5.4 Μοντέλο εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση Double Exponential Smoothing

Σε αυτό το σενάριο χρησιμοποιούμε ένα μοντέλο ONU που εκτός από τις μεταβάσεις σε καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας, υλοποιεί και έναν αλγόριθμο πρόβλεψης επόμενης τιμής ακολουθώντας την μέθοδο Double Exponential Smoothing. Η μέθοδος Double Exponential Smoothing (DES) είναι μια εξέλιξη της απλής μεθόδου Exponential Smoothing, όπου πέραν των προηγούμενων τιμών λαμβάνεται υπόψη και η τάση που δείχνουν να έχουν εκτιμώμενες τιμές, με σκοπό την βελτίωση της αποτελεσματικότητας της.

Έπειτα από κάποιες παρατηρήσεις εισόδου η μέθοδος DES είναι σε θέση να υπολογίσει, με ένα ανεκτό ποσοστό σφάλματος, την επόμενη τιμή σε μια ακολουθία αριθμών. Έστω ότι, x_t αναπαριστά την τιμή της ακολουθίας την χρονική στιγμή t , με το t να ξεκινά από την τιμή 0. Χρησιμοποιούμε την ακολουθία S_t η οποία αναπαριστά την εξομαλυμένη τιμή την χρονική στιγμή t με το b_t να είναι η καλύτερη εκτίμηση της τάσης των εκτιμώμενων τιμών μέχρι την χρονική στιγμή t .

Σύμφωνα με την μέθοδο Double Exponential Smoothing ορίζονται οι παρακάτω εξισώσεις από τις οποίες προβλέπεται μια μελλοντική τιμή της ακολουθίας εισόδου. Οι παρακάτω εξισώσεις ισχύουν για $t > 1$:

$$S_t = a * x_t + (1 - a) * (S_{t-1} + b_{t-1})$$

$$b_t = \beta * (S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta) * b_{t-1}$$

όπου a είναι ο παράγοντας εξομάλυνσης, με $0 < a < 1$,

όπου β , είναι ο παράγοντας τάσης των εξομαλυμένων τιμών, με $0 < \beta < 1$.

Οι αρχικές τιμές των παραπάνω εξισώσεων δίνονται από τις σχέσεις:

$$S_1 = x_1$$

$$b_1 = x_1 - x_0$$

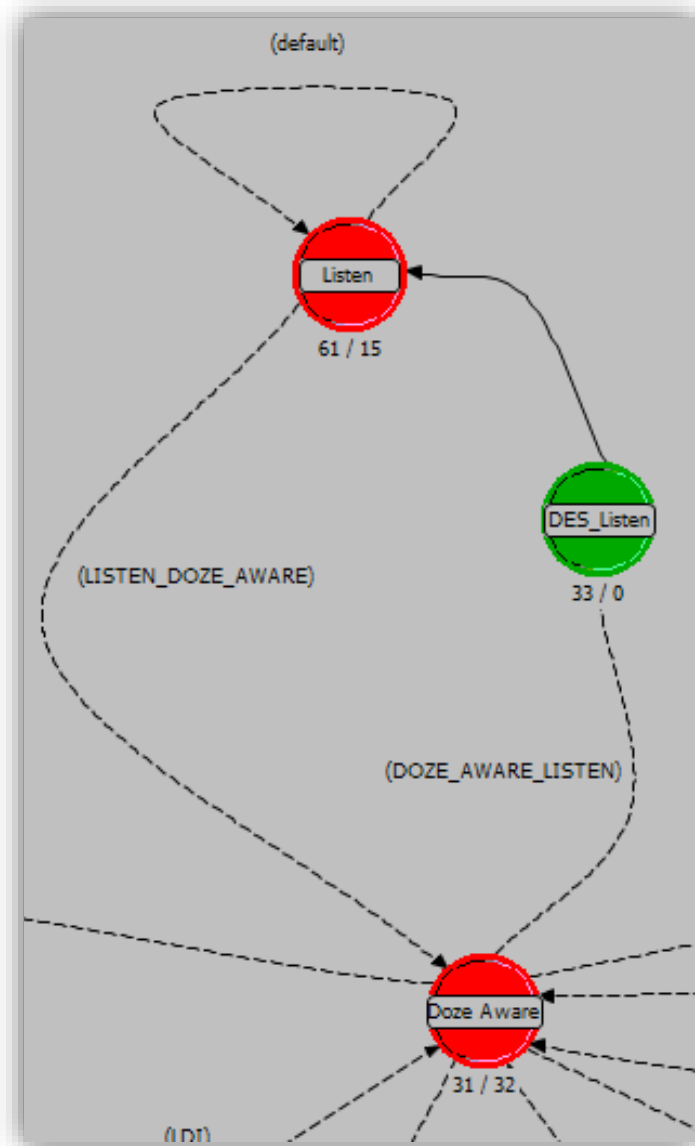
Έτσι λοιπόν μια πρόβλεψη μετά από m χρονικές στιγμές, με $m \in \mathbb{Z}$ και $m > 0$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{t+m} = S_t + m * b_t$$

όπου m σταθερός μη – μηδενικός ακέραιος.

Στην μέθοδο DES προφανώς η πρόβλεψη F για $t = 0$ δεν ορίζεται γιατί ο αλγόριθμος απαιτεί ύπαρξη τουλάχιστον μιας τιμής για να είναι σε θέση να εκτιμήσει τις επόμενες.

Στο σενάριο αυτό εκτελούμε τον αλγόριθμο DES κάθε φορά πριν από την είσοδο σε μία από τις δύο πιθανές καταστάσεις ύπνωσης, προκειμένου να προβλέψει κάθε φορά το ιδανικό χρονικό διάστημα παραμονής στην επερχόμενη κατάσταση ύπνωσης. Στην παρακάτω εικόνα 4.63 φαίνεται η προσθήκη του Double Exponential Smoothing, πριν από την μετάβαση στην κατάσταση Listen.

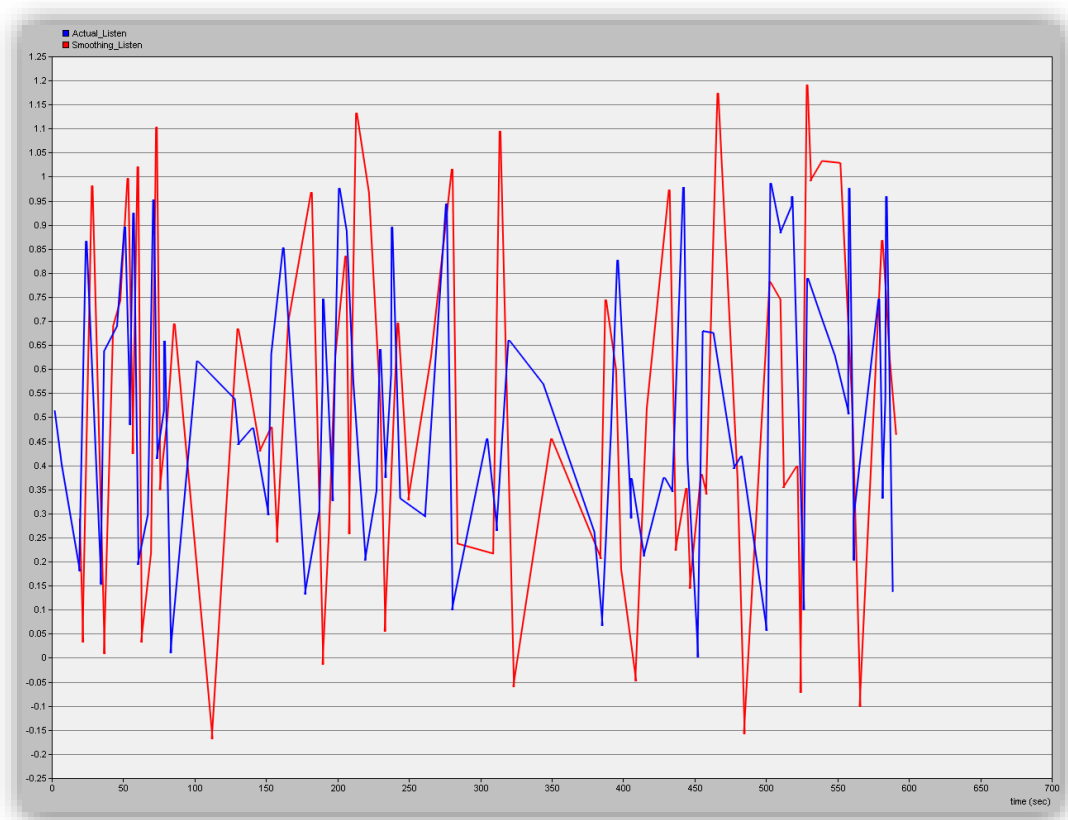


Εικόνα 4. 63: Χρήση του Double Exponential Smoothing

Στις καταστάσεις Listen και Asleep προσθέτουμε ένα τμήμα κώδικα ο οποίος καταγράφει σε έναν πίνακα Actual, τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες έχουμε μια άφιξη πακέτου σε σχέση με την τρέχουσα τιμή της μεταβλητής Tsleep που αναπαριστά το χρόνο παραμονής σε μια κατάσταση ύπνωσης.

Στο γράφημα της εικόνας 4.64 παρατηρούμε τις εκτιμήσεις του αλγορίθμου DES για το ιδανικό χρονικό διάστημα ύπνωσης συγκριτικά με το ιδανικό διάστημα που καταγράφηκε. Η κόκκινη καμπύλη απεικονίζει τις εκτιμώμενες τιμές του DES αλγορίθμου ενώ η μπλε καμπύλη αντιπροσωπεύει τις πραγματικές τιμές που καταγράφηκαν. Όπως παρατηρούμε ο αλγόριθμος DES προβλέπει με κάποια ακρίβεια τις επόμενες τιμές αλλά με μια σχετική καθυστέρηση.

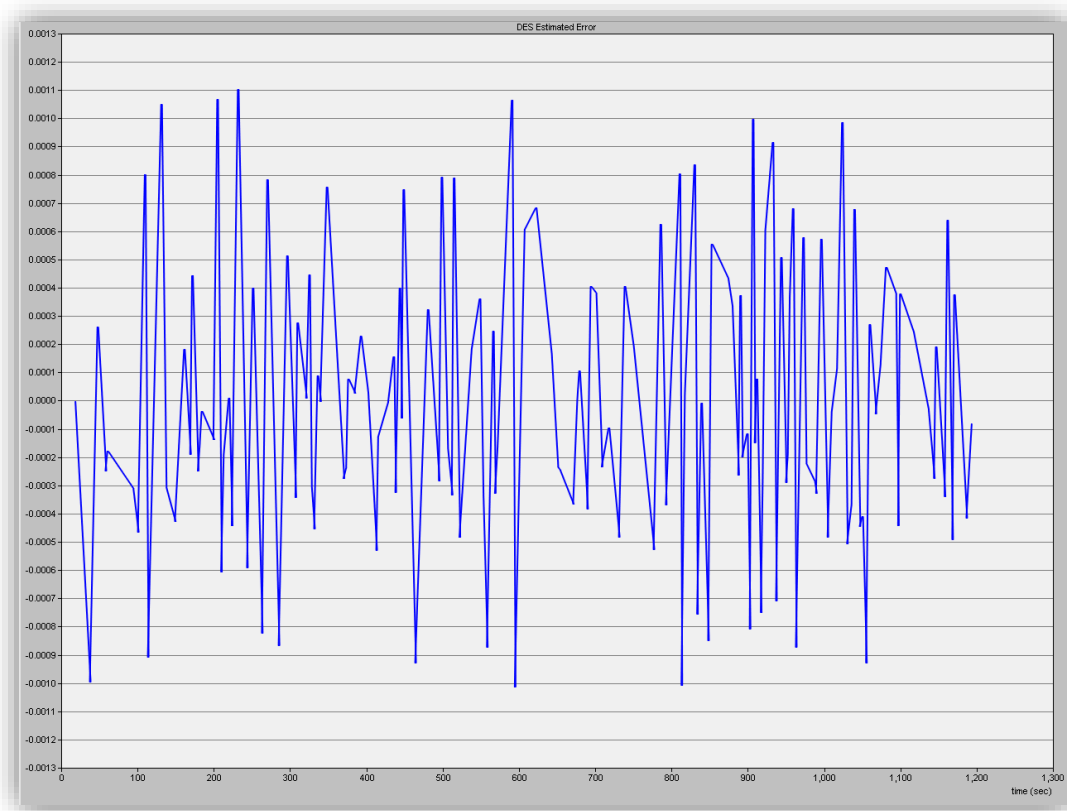
Η χρήση της Double Exponential Smoothing μεθόδου επιλέγεται λόγω της μορφής της μπλε καμπύλης των πραγματικών χρονικών διαστημάτων που καταγράφηκαν, η οποία ακολουθεί μια πριονωτή τάση όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.64.



Εικόνα 4. 64: Γράφημα πραγματικής - εκτιμώμενης τιμής της μεθόδου DES

Το γράφημα της εικόνας 4.64 απεικονίζει την εκτιμώμενη διάρκεια των διαστημάτων ύπνωσης συγκριτικά με τα πραγματικά της κατάστασης Asleep για 10 λεπτά χρόνου προσομοίωσης. Το εν λόγω γράφημα εξήχθει από την προσομοίωση με downstream φόρτο κίνησης 0.001 δευτερόλεπτα interarrival χρόνο και upstream φόρτο κίνησης που παράγεται από εκθετική κατανομή με μέσο όρο 1.6 δευτερόλεπτα ανάμεσα σε δύο αφίξεις πακέτων. Έπειτα από αρκετές πειραματικές προσομοιώσεις αποφασίστηκε οι τιμές των παραμέτρων α και β να είναι 0.99897 και 0.31577 αντίστοιχα.

Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τον χρόνο προσομοίωσης ενώ στον κάθετο άξονα, απεικονίζονται τα χρονικά διαστήματα ύπνωσης. Η διάρκεια των οποίων κυμαίνεται από 0 μέχρι 1 δευτερόλεπτο. Το παραπάνω γράφημα υπολογίστηκε με μέσο όρο τιμών τα 0.5 δευτερόλεπτα διάρκειας του προορισμένου χρονικού διαστήματος ύπνωσης.



Εικόνα 4. 65: Διάγραμμα σφάλματος εκτιμώμενης τιμής Double Exponential Smoothing

Στο γράφημα της εικόνας 4.65 παρατηρούμε το σφάλμα της εκτιμώμενης τιμής από τον αλγόριθμο DES. Το γράφημα παρουσιάζει την διαφορά της εκτιμώμενης τιμής με αυτήν της πραγματικής που καταγράφηκε. Όσο αυτή η διαφορά προσεγγίζει το μηδέν τόσο η πρόβλεψη του DES προσέγγισε την ιδανική διάρκεια του χρονικού διαστήματος ύπνωσης. Όταν η εκτιμωμένη διάρκεια ήταν αρκετά κοντά στην πραγματική διάρκεια του επόμενου χρόνου ύπνωσης η καμπύλη του γραφήματος της εικόνας 4.65 τείνει στο μηδέν.

Αντίστοιχα όταν καταγράφεται μεγάλη απόκλιση της εκτιμώμενης από την πραγματική διάρκεια ενός διαστήματος ύπνωσης η καμπύλη του γραφήματος απομακρύνεται από το μηδέν. Μια πρόωρη διακοπή ενός διαστήματος ύπνωσης οδηγεί σε απομάκρυνση της καμπύλης προς τους αρνητικούς αριθμούς. Αντίστοιχα μια αύξηση της τιμής της καμπύλης συνεπάγεται πρόβλεψη μεγαλύτερου διάρκειας διαστήματος από αυτό που καταγράφηκε.

Σε αυτό το σημείο επεμβαίνει ο αλγόριθμος DES ο οποίος, με αρχική τιμή την πρώτη χρονική στιγμή άφιξης πακέτου κατά την διάρκεια ύπνωσης, υπολογίζει την χρονική στιγμή που ενδεχομένως να αφιχθεί το επόμενο πακέτο. Αυτήν την τιμή την εκχωρεί στην μεταβλητή προσδιορισμού της διάρκειας των διαστημάτων ύπνωσης. Ως εκ τούτου, μεταβάλλεται η διάρκεια του επόμενου διαστήματος ύπνωσης σύμφωνα με την εκτίμηση του αλγορίθμου DES. Όπως φαίνεται και στο γράφημα της εικόνας 4.65 επιτυγχάνεται μια καλύτερη προσέγγιση του ιδανικού διαστήματος με την χρήση του αλγορίθμου DES συγκριτικά με την επιλογή χρονικών διαστημάτων σταθερής διάρκειας του μοντέλου της ενότητας 4.5.2.

Το παρακάτω τμήμα κώδικα της εικόνας 4.66 παραθέτει τις εντολές με τις οποίες παράγεται η εκτιμώμενη τιμή και στην συνέχεια μεταβάλλεται η διάρκεια του επόμενου χρονικού διαστήματος ύπνωσης Asleep.

```
F_a[parent_id-3][t_a[parent_id-3]+m]=s_a[parent_id-3][t_a[parent_id-3]]
+m*b_a[parent_id-3][t_a[parent_id-3]];
t_sleep_a[parent_id-3]=F_a[parent_id-3][t_a[parent_id-3]];
```

Εικόνα 4. 66: Γραμμή κώδικα προγραμματισμού χρονικού διαστήματος παραμονής

4.5.5 Μοντέλο εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση Triple Exponential Smoothing

Μια εξέλιξη του Double Exponential Smoothing είναι η μέθοδος Triple Exponential Smoothing. Σε αυτήν την μέθοδο εκτός από τις προηγούμενες τιμές και την τάση των προβλεπόμενων τιμών, λαμβάνεται υπόψη και η παράμετρος της περιοδικής αλλαγής των τιμών μιας δεδομένη ακολουθία εισόδου.

Έτσι λοιπόν εκτός από τον παράγοντα b που εισάγει την τάση που δείχνουν να έχουν οι τιμές, ορίζεται και ένας παράγοντας c ο οποίος αναφέρεται στις περιοδικές αλλαγές των τιμών της ακολουθίας. Η μέθοδος αυτή πρώτη φορά προτάθηκε από τους Charles Holt και Peter Winters το 1960, και γι' αυτόν τον λόγο ονομάζεται επίσης και μέθοδος των Holt Winters.

Η μέθοδος Triple Exponential Smoothing απαιτεί σαν είσοδο μια μεγαλύτερη ακολουθία αριθμών συγκριτικά με αυτήν της εισόδου της μεθόδου Double Exponential Smoothing. Αυτό είναι απαραίτητο για την αρχικοποίηση της τιμής του παράγοντα περιοδικότητας c . Πέραν από την τάση των τιμών υπολογίζονται και οι δείκτες της περιόδου, οι οποίοι δίνουν διαφορετική βαρύτητα στις μελλοντικές τιμές της κάθε περιόδου.

Θεωρούμε ξανά ότι έχουμε μια ακολουθία εισόδου x_t , η οποία ξεκινά την χρονική στιγμή $t = 0$ και ότι κάθε L χρονικές στιγμές παρατηρείται περιοδική αλλαγή στις τιμές της. Ως S_t ορίζουμε πάλι την εξομαλυμένη τιμή ενός συγκεκριμένου χρόνου t και ως b_t την καλύτερη εκτίμηση της τάσης των τιμών

που επηρεάζεται πλέον και από τις περιοδικές αλλαγές. Επίσης, c_t ορίζεται η ακολουθία των περιοδικών παραγόντων διόρθωσης. Έτσι c_t ορίζεται σαν η αναμενόμενη αναλογία της τάσης των προβλεπόμενων τιμών, την στιγμή $t \bmod L$ της περιόδου την οποία παρατηρούμε.

Η μέθοδος Triple Exponential Smoothing ορίζει τις παρακάτω εξισώσεις από τις οποίες μπορεί να προβλέψει μια μελλοντική τιμή, F_{t+m} , της ακολουθίας x_t την χρονική στιγμή $t + m$.

Για $x=0$ έχουμε τις αρχικές τιμές των εξισώσεων:

$$S_0 = x_0$$

$$b_0 = \frac{1}{L} \left(\frac{x_{L+1} - x_1}{L} + \frac{x_{L+2} - x_2}{L} + \dots + \frac{x_{L+L} - x_L}{L} \right)$$

$$c_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{x_{L(j-1)+i}}{A_j} \quad \forall i = 1, 2, \dots, L$$

$$\text{όπου } A_j = \frac{\sum_{i=1}^L x_{L(j-1)+i}}{L} \quad \forall j = 1, 2, \dots, N$$

με το A_j να είναι η μέση τιμή του x στην j περίοδο των τιμών της ακολουθίας.

Έτσι λοιπόν, με τις παραπάνω αρχικές τιμές των εξισώσεων αρχικά υπολογίζεται η εξομαλυμένη τιμή, έπειτα λαμβάνεται υπόψη η τάση και ο παράγοντας περιοδικότητας και τέλος παράγεται η πρόβλεψη από την μέθοδο Triple Exponential Smoothing (TES) με τον εξής τρόπο:

$$S_t = a \frac{x_t}{c_{t-L}} + (1 - a) * (S_{t-1} + b_{t-1})$$

$$b_t = \beta * (S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta) * b_{t-1}$$

$$c_t = \gamma * \frac{x_t}{S_t} + (1 - \gamma) * c_{t-L}$$

$$F_{t+m} = (S_t + m * b_t) * c_{t-L+m}$$

όπου α ο παράγοντας εξομάλυνσης, με $0 < \alpha < 1$,

όπου β ο παράγοντας της τάσης των εξομαλυμένων τιμών, με $0 < \beta < 1$,

όπου γ ο παράγοντας εξομάλυνσης των περιοδικών αλλαγών, με $0 < \gamma < 1$,

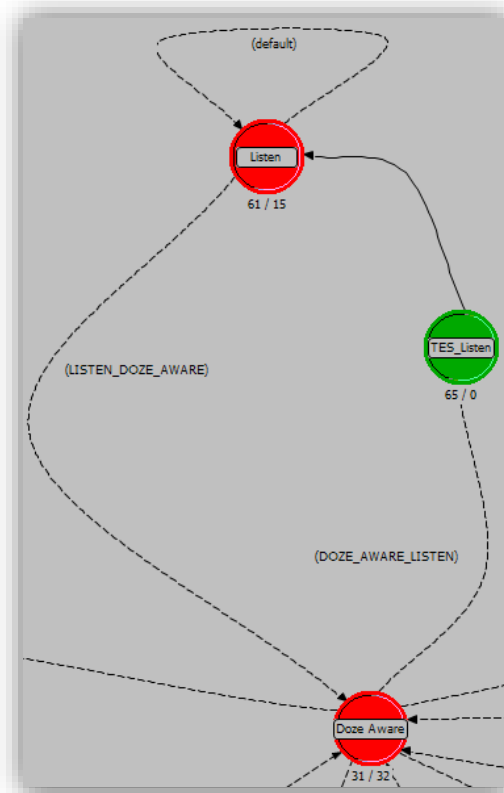
όπου m σταθερός μη – μηδενικός ακέραιος.

Όπως και στην περίπτωση του Double Exponential Smoothing έτσι και σε αυτήν την μέθοδο η τιμή του F για $t = 0$ δεν ορίζεται. Για την αρχικοποίηση των

τιμών του παράγοντα c απαιτούνται τουλάχιστον $2 * L$ παρατηρήσεις για να επιτευχθεί μια ικανοποιητική προσέγγιση των επόμενων τιμών.

Λόγω του περιορισμού των $2 * L$ παρατηρήσεων της μεθόδου TES ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται σε αυτό το σενάριο δεν αρχίζει τις προβλέψεις του άμεσα. Αυτό όμως επιτυγχάνεται έπειτα από ένα σύντομο χρονικό διάστημα εκμάθησης το οποίο απαιτεί την καταγραφή των 10 πρώτων χρονικών στιγμών αφίξεως πακέτου για κάθε κατάσταση ύπνωσης. Αυτό σημαίνει ότι για να ξεκινήσει να προβλέπει, τιμές για την κατάσταση Listen πρέπει γίνει είσοδος και καταγραφή των πραγματικών τιμών αφίξεων των πακέτων στην κατάσταση Listen τουλάχιστον 10 φορές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αργεί λίγο να δράσει ο αλγόριθμος με αποτέλεσμα στην αρχή να έχουμε σπατάλη πολύτιμης ενέργειας.

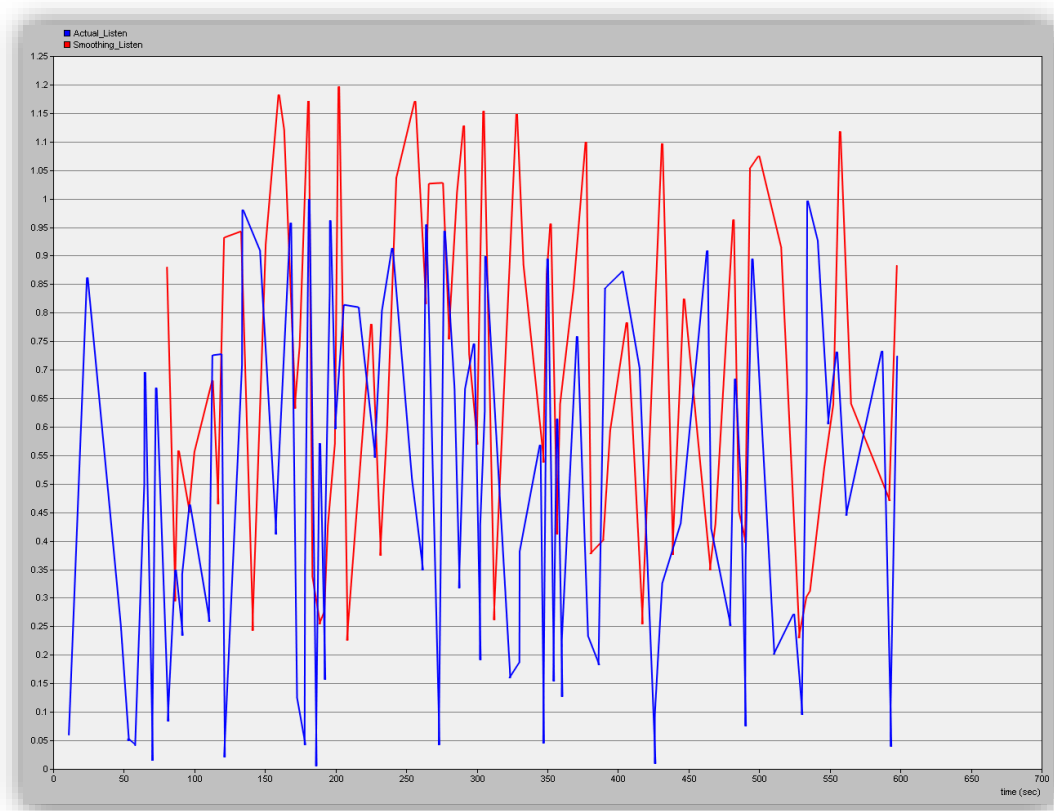
Ο αλγόριθμος TES εκτελείται πριν από κάθε είσοδο σε μια εκ των καταστάσεων ύπνωσης. Η προσομοίωση εισέρχεται στην κατάσταση TES_Listen πριν από κάθε είσοδο στην κατάσταση Listen, επειδή όμως απαιτούνται 10 παρατηρήσεις για την πρώτη πρόβλεψη του TES, παρόλο που η προσομοίωση εισέρχεται κάθε φορά στην κατάσταση TES_Listen, ο αλγόριθμος αρχίζει να εκτελείται έπειτα από 10 καταγεγραμμένες παρατηρήσεις. Μέχρι τότε στην κατάσταση TES_Listen δεν εκτελείται καμία λειτουργία.



Εικόνα 4. 67: Σημείο εισαγωγής αλγορίθμου TES για την Listen λειτουργία

Στην παραπάνω εικόνα 4.67 παρατίθεται το σημείο εισαγωγής του αλγόριθμου TES για την λειτουργία Listen. Παρόμοια εκτελείται ο TES και στην cyclic sleep λειτουργία.

Η ακολουθία των χρονικών διαστημάτων που εισάγονται στον TES παράγεται από την παρατήρηση των αφίξεων των downstream πακέτων σε σχέση με τη διάρκεια παραμονής σε μια κατάσταση ύπνωσης. Αυτές οι τιμές καταγράφονται στον πίνακα Actual, και κυμαίνονται μεταξύ 0 και $2 * T_{sleep}$ δευτερολέπτων. Στην αρχική περίπτωση όπου δεν έχει υποστεί αλλαγή η μεταβλητή του χρόνου παραμονής σε καταστάσεις ύπνωσης, ο πίνακας Actual παίρνει τιμές μεταξύ 0 – 1 δευτερολέπτου.



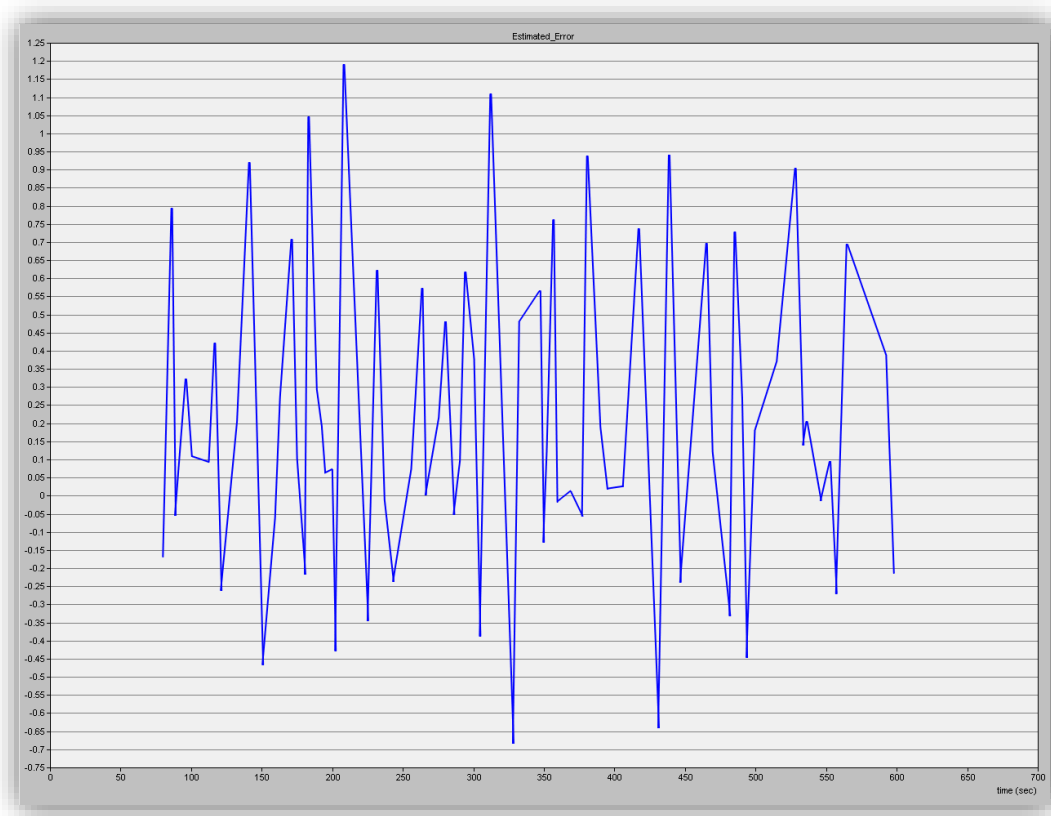
Εικόνα 4. 68: Γράφημα πραγματικής – εκτιμώμενης TES τιμής Listen λειτουργίας

Στο γράφημα 4.68, η μπλε καμπύλη αναπαριστά τις πραγματικές τιμές του χρονικού διαστήματος ύπνωσης, ενώ η κόκκινη καμπύλη αντιπροσωπεύει τις εκτιμήσεις της μεθόδου Triple Exponential Smoothing.

Στην προσομοίωση από την οποία εξήχθει το παραπάνω γράφημα, μια εκθετική κατανομή με μέσο όρο ένα πακέτο κάθε 0.01 δευτερόλεπτα παράγει πακέτα για το downstream κανάλι και μία εκθετική κατανομή με 1.6 interarrival χρόνο για το upstream. Το δίκτυο του γραφήματος της εικόνα 4.69 προσομοιώθηκε για χρόνο 10 λεπτών.

Στο γράφημα της εικόνας 4.69 παρατηρούμε το σφάλμα της εκτιμώμενης τιμής από τον αλγόριθμο TES. Το γράφημα παρουσιάζει την διαφορά της εκτιμώμενης τιμής με αυτήν της πραγματικής που καταγράφηκε. Όσο αυτή η διαφορά προσεγγίζει το μηδέν τόσο η πρόβλεψη του TES προσέγγισε την ιδανική διάρκεια του χρονικού διαστήματος ύπνωσης. Όταν η εκτιμωμένη διάρκεια ήταν αρκετά κοντά στην πραγματική διάρκεια του επόμενου χρόνου ύπνωσης η καμπύλη του γραφήματος της εικόνας 4.69 τείνει στο μηδέν.

Παρατηρώντας το γράφημα σφάλματος του TES αντιλαμβανόμαστε ότι δεν παρουσιάζει μεγάλη συσπείρωση γύρω από την μηδενική τιμή. Παρόλα αυτά οι εκτιμήσεις του TES αλγορίθμου φαίνονται να είναι καλύτερες από αυτές του DES. Σε κάποιες περιπτώσεις δεν προβλέπεται η ιδανική διάρκεια της περιόδου ύπνωσης με αποτέλεσμα είτε να εισάγεται περιττό delay είτε να υστερούμε σε εξοικονόμηση ενέργειας συγκριτικά με τις αποφάσεις του DES.



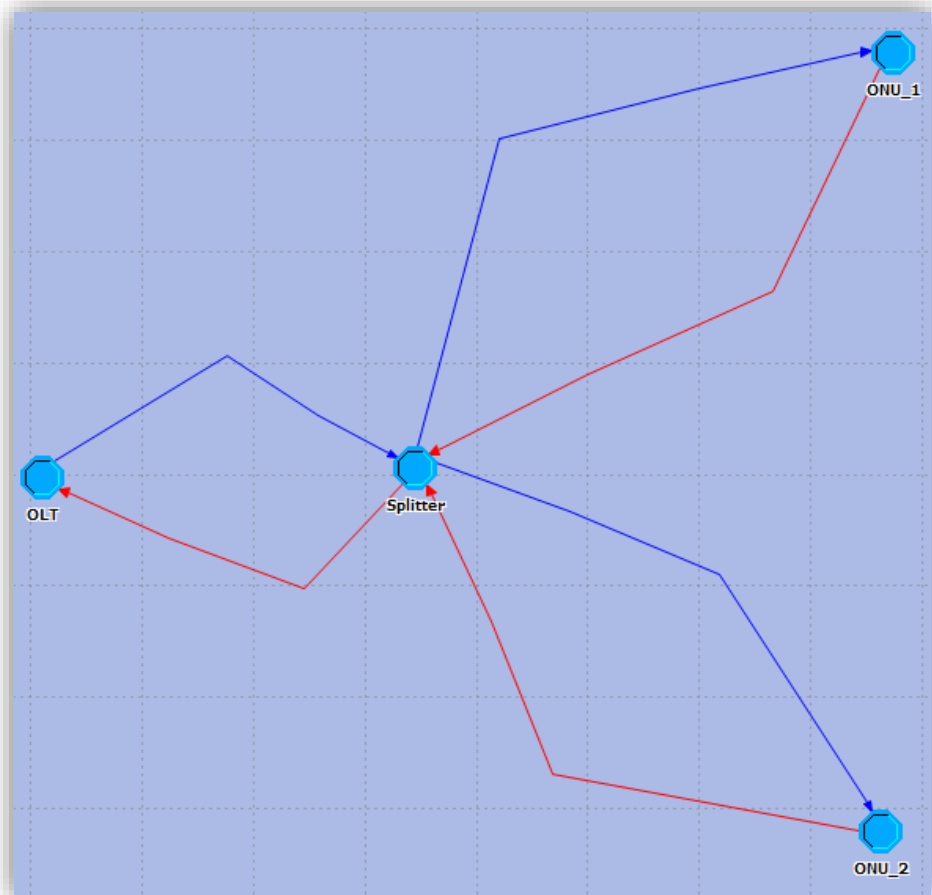
Εικόνα 4. 69: Διάγραμμα σφάλματος εκτιμώμενης τιμής Triple Exponential Smoothing

Ο Triple Exponential Smoothing σε κάποιες περιπτώσεις δεν είναι και τόσο ακριβής με αποτέλεσμα η διαφορά εκτιμώμενης με πραγματικής τιμής να αγγίζει τα 1,2 δευτερόλεπτα. Ωστόσο, ανταποκρίνεται πιο αποδοτικά σχετικά με τα υπόλοιπα σενάρια.

4.6 Ανάλυση δικτύου και σεναρίων προσομοίωσης

4.6.1 Δίκτυο δύο συνδεδεμένων ONUs

Αρχικά κατασκευάστηκε ένα δίκτυο τύπου XG-PON στο οποίο πέραν του OLT και ενός splitter αποτελείται και από 2 οπτικές μονάδες δικτύου. Η παρακάτω εικόνα 4.70 παρουσιάζει την δομή του δικτύου αυτού.



Εικόνα 4. 70: Αποψη δικτύου με δύο οπτικές μονάδες

Φυσικός διάυλος επικοινωνίας υφίσταται μόνο από τον splitter προς τα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου. Ο OLT δηλαδή, επικοινωνεί μέσω λογικών συνδέσεων με την κάθε ONU. Αμφότεροι και ο OLT και οι δύο ONUs, επικοινωνούν με τον Splitter με δύο τύπους συνδέσεων, μια για το upstream κανάλι και μια για το downstream κανάλι.

Για την upstream μετάδοση χρησιμοποιήθηκε η μονόδρομη ζεύξη τύπου Upstream_Wavelength_XG_PON που περιγράφηκε στην ενότητα 4.1. Οι ζεύξεις αυτές απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα στην εικόνα 4.70 και μεταδίδουν πακέτα από την κάθε ONU προς τον splitter και ο splitter τα προωθεί μέσω μιας ιδίου τύπου ζεύξης προς τον OLT.

Οι ζεύξεις με το μπλε χρώμα που διακρίνονται αποτελούν τις ζεύξεις του downstream καναλιού μέσω των οποίων ο OLT στέλνει πακέτα στις ONUs. Οι μπλε ζεύξεις της εικόνας 4.70 είναι μονόδρομες ζεύξεις καθόδου από τον OLT προς τον splitter και από τον splitter προς την κάθε ONU του δικτύου.

Σε αυτό το project δημιουργήθηκαν 4 διαφορετικά σενάρια του δικτύου της εικόνας 4.70, που υλοποιούν τα μοντέλα της ONU που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.5 και προσομοιώθηκαν για χρόνο 20 λεπτών.

Το πρώτο σενάριο με τον ονομασία “Simple” υλοποιεί το απλούστερο μοντέλο της ONU χωρίς υλοποίηση κάποιου μηχανισμού εξοικονόμησης ενέργειας. Λειτουργεί μόνιμα σε ενεργή κατάσταση και εξάγει μετρήσεις και γραφήματα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας και την μέση καθυστέρηση των πακέτων.

Στο δεύτερο σενάριο “Fixed” εφαρμόζεται το απλό μοντέλο εξοικονόμησης ενέργειας με μεταβάσεις προς τις καταστάσεις Asleep και Listen με τον τρόπο που αναλύθηκε στην ενότητα 4.5.2. Το χρονικό διάστημα παραμονής σε κάθε μια από τις παραπάνω καταστάσεις είναι σταθερό και ίσο με 0.5 δευτερόλεπτα.

Στο τρίτο σενάριο “DES” εισάγεται για πρώτη φορά η έννοια της πρόβλεψης επόμενων τιμών με την χρήση της μεθόδου Double Exponential Smoothing να προσπαθεί να εκτιμήσει την ιδανική διάρκεια του χρόνου παραμονής στις λειτουργίες ύπνωσης. Το τμήμα κώδικα που υλοποιεί αυτήν την μέθοδο εκτελείται πριν την είσοδο σε αυτές τις καταστάσεις. Η εκτίμηση που παράγεται εκχωρείται στην τιμή μιας μεταβλητής η οποία καθορίζει το χρόνο παραμονής στην επερχόμενη κατάσταση ύπνωσης.

Το τελευταίο σενάριο “TES” ακολουθεί την μέθοδο Triple Exponential Smoothing σύμφωνα με την οποία λαμβάνεται υπόψη και ένας παράγοντας περιοδικής αλλαγής με σκοπό την βελτιστοποίησης της πρόβλεψης. Παρόμοια με το προηγούμενο σενάριο το τμήμα κώδικα εκτελείται πριν από την είσοδο σε μια κατάσταση ύπνωσης προβλέπει την διάρκεια του επερχόμενου διαστήματος και ενημερώνει την μεταβλητή παραμονής για την διάρκεια του χρονικού διαστήματος.

Τα παραπάνω τέσσερα σενάρια προσομοιώθηκαν με διαφορετικό φόρτο κίνησης για πιο αποτελεσματική ανάλυση των εξαγόμενων γραφημάτων και κατ' επέκταση της απόδοσης του δικτύου. Δημιουργήθηκαν 13 υπο-σενάρια με μη-μεταβλητό downstream φόρτο και με μεταβλητό upstream. Ο ρυθμός παραγωγής downstream δεδομένων ορίστηκε στο 1 πακέτο κάθε 2 δευτερόλεπτα. Στην upstream μετάδοση ο ρυθμός γέννησης των πακέτων δεδομένων είναι μεταβαλλόμενος ακολουθώντας εκθετική κατανομή με μεταβλητό χρόνο interarrival με μέσο όρο 1 πακέτο κάθε 2, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1, 0.8, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3,

0.2, 0.1 δευτερόλεπτα. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συγκεντρωτικά οι interarrival χρόνοι άφιξης πακέτων δικτύου.

Σενάρια ONUs	Interarrival χρόνοι αφίξεων πακέτων												
	Simple	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
Fixed													
DES													
TES													

Πίνακας 4. 7: Interarrival χρόνοι upstream δεδομένων

Τα σενάρια, που υλοποιούν εξοικονόμηση ενέργειας προσομοιώθηκαν ώστε να υπολογίζονται και να εμφανίζονται γραφήματα, μέσης κατανάλωσης ενέργειας συνολικά του δικτύου σε Watts/sec. Επιπλέον εξάγονται γραφήματα ξεχωριστά για την κάθε ONU που αναπαριστούν τον αριθμό εισόδων σε καταστάσεις ύπνωσης και την μέση καθυστέρηση πακέτου για το κατερχόμενο κανάλι επικοινωνίας. Υπάρχει επίσης και η επιλογή προβολής των δύο τύπων γραφημάτων που σχολιάστηκαν σε προηγούμενες ενότητες, αυτόν της απεικόνισης των πραγματικών χρονικών διαστημάτων συγκριτικά με τα εκτιμώμενα καθώς και αυτόν του σφάλματος της εκτιμώμενης τιμής.

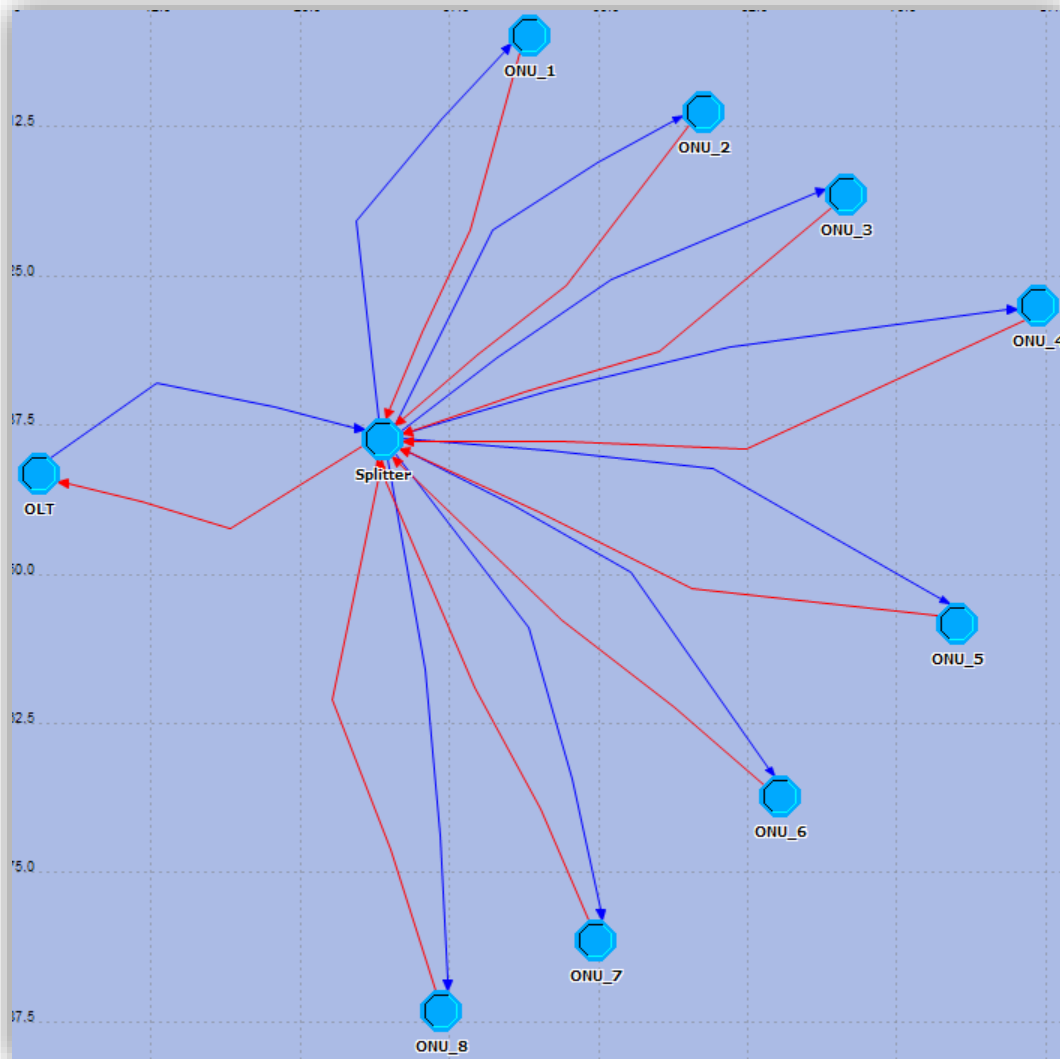
Η κάθε οπτική μονάδα δικτύου καθώς και ο OLT διατηρούν από μια ουρά αναμονής πακέτων μεγέθους ενός Mbyte το οποίο έχει επιλεγεί ώστε να είναι επαρκές για κάθε σενάριο φόρτου κίνησης. Τόσο τα πακέτα δεδομένων ONU_Data που παράγονται στην πηγή της ONU, όσο και τα πακέτα OLT_Data του OLT έχουν μέγεθος που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή με όρια (64, 1518). Επίσης οι αποστάσεις των δύο οπτικών μονάδων δικτύου από τον OLT είναι 6 και 12 km. Στον πίνακα 4.8 παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία και παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της προσομοίωσης.

Στοιχεία Δικτύου	Μέγεθος ουράς	Τύπος παραγόμενων πακέτων	Μέγεθος πακέτων	Αποστάσεις από OLT
OLT	1 Mbyte	OLT_Data XG_PON_OLT_Frame	Uniform [64,1518]	0 km
Splitter	1 Mbyte	-	-	0 km
ONU#1	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	6 km
ONU#2	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	12 km

Πίνακας 4. 8: Χαρακτηριστικά – παραδοχές δικτύου με 2 ONU

4.6.2 Δίκτυο οκτώ συνδεδεμένων ONUs

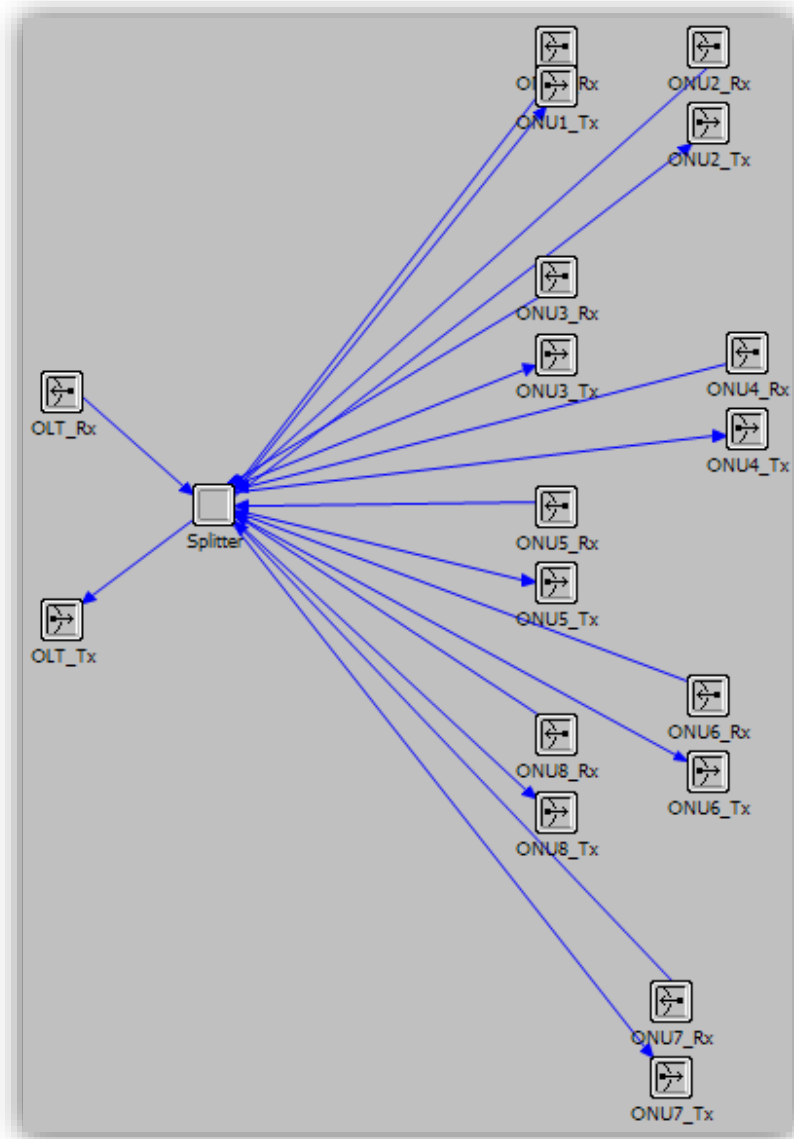
Προσομοιώθηκε επίσης και ένα μεγαλύτερο δίκτυο που αποτελείται 8 ONUs και φυσικά από έναν OLT και έναν παθητικό διακλαδωτή. Οι οντότητες του δικτύου διατάχθηκαν στο χώρο προσομοίωσης του OPNET όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 4.71.



Εικόνα 4. 71: Άποψη δικτύου με οκτώ οπτικές μονάδες

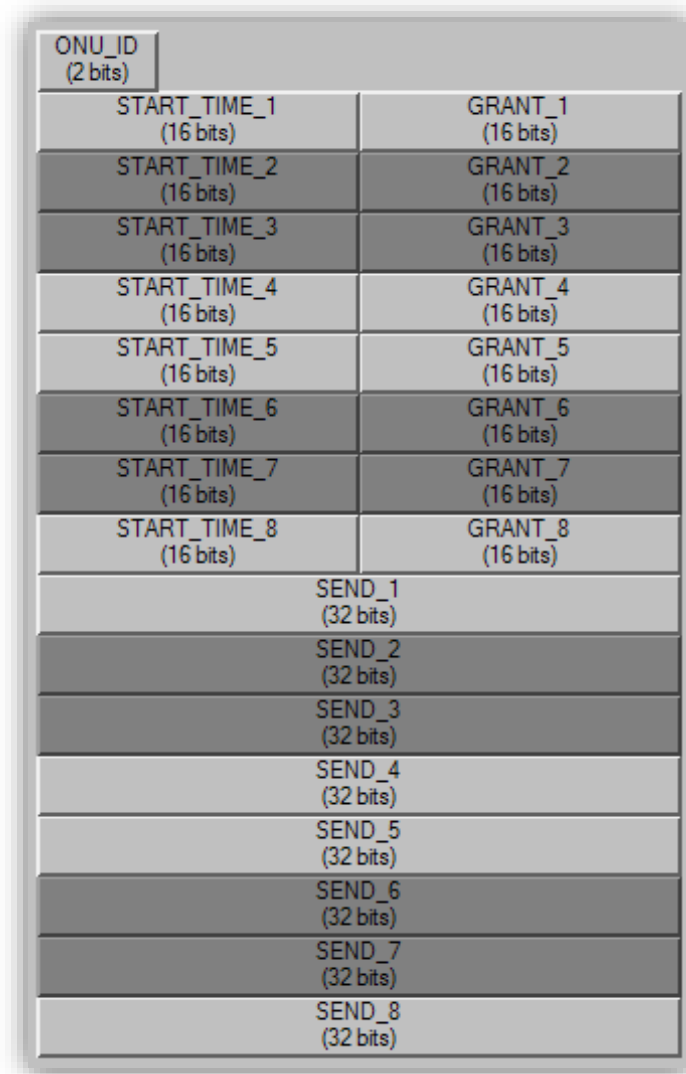
Το δίκτυο αυτό ακολουθεί τα πρότυπα του προηγούμενου με μέγεθος ουράς ενός Mbyte σε κάθε ONU αλλά και σε αυτήν του OLT. Οι μπλε downstream ζεύξεις υλοποιούν το μοντέλο Downstream_Wavelength_XG_PON και τοποθετούνται στο τμήμα από τον OLT προς τον splitter και από τον splitter προς τις ONUs. Οι κόκκινες upstream ζεύξεις είναι τύπου Upstream_Wavelength_XG_PON συνδεδεμένες από τις ONU προς τον splitter και από τον splitter προς τον OLT.

Για τις ανάγκες της υλοποίησης του δικτύου με 8 ONUs έπρεπε να προσαρμοστούν κάποια στοιχεία και κάποιες δομές του δικτύου σε αυτό το δίκτυο των περισσότερων ONUs. Γι' αυτόν τον λόγο λοιπόν το μοντέλο κόμβου του διακλαδωτή προσαρμόστηκε με 8 Tx για μετάδοση προς τις ONUs και 8 Rx για λήψη των upstream πακέτων. Στην εικόνα 4.72 φαίνονται να νέα στοιχεία του παθητικού διακλαδωτή.



Εικόνα 4. 72: Άποψη Splitter με 8 ONUs

Προσαρμογή στα δεδομένα του δικτύου με οκτώ ONUs χρειάστηκε να γίνει και στην μορφή του downstream πακέτου XG_PON_OLT_Frame. Όπως ήταν ορισμένα τα πεδία του πακέτου υποστήριζαν επικοινωνία μέχρι 2 ONUs. Στην εικόνα 4.73 διακρίνονται οι προσθήκες που έγιναν στην μορφή του πακέτου για να υποστηρίξει δίκτυο μέχρι και οκτώ ONU.



Εικόνα 4. 73: Δομή downstream πλαισίου για 8 ONUs

Το δίκτυο αυτό επίσης προσομοιώθηκε για διάφορα σενάρια μεταβλητού φόρτου κίνησης και διαφορετικών μοντέλων ONU. Αρχικά δημιουργήθηκαν τέσσερα κύρια σενάρια που το καθένα υλοποιεί ένα από τα τέσσερα διαφορετικά μοντέλα διεργασιών της ONU. Αυτά τα τέσσερα κύρια σενάρια προσομοιώθηκαν σε υπο-σενάρια μεταβλητού φόρτου όπως και στο δίκτυο με δύο ONUs.

Έτσι λοιπόν δημιουργήθηκαν και προσομοιώθηκαν συνολικά 52 επιμέρους σενάρια. Ο ρυθμός downstream δεδομένων για όλα τα σενάρια ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέσο όρο ένα πακέτο κάθε 2 δευτερόλεπτα. Ο ρυθμός γέννησης των upstream πακέτων δεδομένων δίδεται από εκθετική κατανομή μεταβάλλοντας τον μέσο όρο σε κάθε σενάριο από 2 μέχρι 0.6 με βήμα 0.2 δευτερόλεπτα και από 0.6 μέχρι 0.1 με βήμα 0.1, δευτερόλεπτα ανά άφιξη πακέτου. Όλα τα σενάρια προσομοιώθηκαν για χρόνο προσομοίωσης 20 λεπτών.

Στον παρακάτω πίνακα 4.9 παραθέτονται κάποια χαρακτηριστικά και κάποιες παραδοχές της συγκεκριμένης προσομοίωσης.

Στοιχεία Δικτύου	Μέγεθος ουράς	Τύπος παραγόμενων πακέτων	Μέγεθος πακέτων	Αποστάσεις από OLT
<i>OLT</i>	1 Mbyte	OLT_Data XG_PON_OLT_Frame	Uniform [64,1518]	0 km
<i>Splitter</i>	1 Mbyte	-	-	0 km
<i>ONU#1</i>	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	6 km
<i>ONU#2</i>	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	12 km
<i>ONU#3</i>	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	18 km
<i>ONU#4</i>	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	24 km
<i>ONU#5</i>	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	5 km
<i>ONU#6</i>	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	10 km
<i>ONU#7</i>	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	15 km
<i>ONU#8</i>	1 Mbyte	ONU_Data ONU_Frame	Uniform [64,1518]	20 km

Πίνακας 4. 9: Χαρακτηριστικά – παραδοχές δικτύου με 8 ONU

Κεφάλαιο 5: Αποτίμηση – Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα γραφήματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του δικτύου για όλα τα διαφορετικά σενάρια.

Αρχικά, προσομοιώνοντας τα σενάρια που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.6 προέκυψαν γραφήματα που το ενδιαφέρον εστιάζεται στην μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας με την ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση πακέτου. Έτσι λοιπόν θα εξετάσουμε πως συμπεριφέρθηκε, το μοντέλο με τις σταθερές μεταβάσεις καθώς και τα μοντέλα που υλοποιούν τους smoothing αλγόριθμους κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

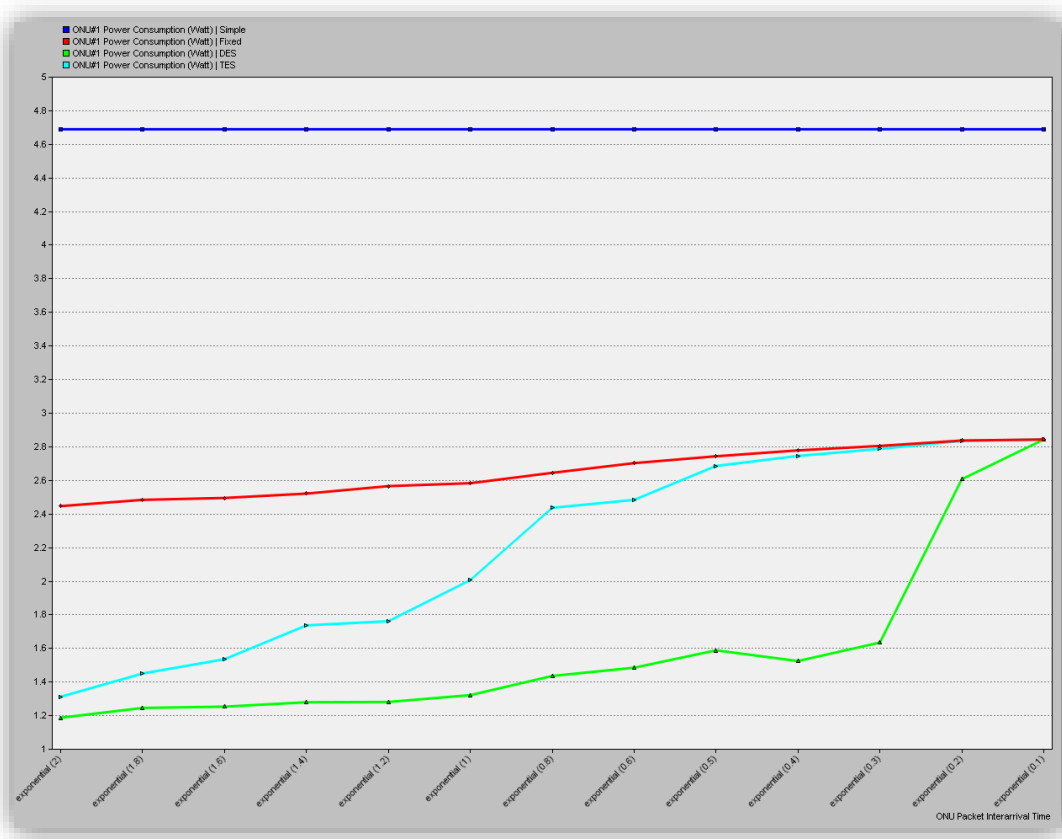
Αρχικά παρουσιάζονται τα γραφήματα για το πρώτο δίκτυο με τις δύο ONU, έπειτα σχολιάζεται το κάθε γράφημα. Στην συνέχεια ακολουθεί η ίδια διαδικασία και για το δίκτυο με τις 8 συνδεδεμένες ONUs.

5.1 Αποτίμηση

5.1.1 Αποτίμηση δικτύου δύο συνδεδεμένων ONU

Το πρώτο γράφημα και το πιο ενδιαφέρον είναι αυτό της κατανάλωσης ενέργειας ολόκληρου του δικτύου. Το γράφημα αυτό αναπαριστά την κατανάλωση που καταγράφεται στην ONU 1.

Στο γράφημα της εικόνας 5.74 φαίνονται τέσσερις διαφορετικές καμπύλες, μια για καθένα από τα κύρια σενάρια αυτού του μοντέλου του δικτύου. Το πρώτο σενάριο που δεν παρέχει μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας αναπαρίσταται με την μπλε καμπύλη. Επειδή σε αυτό το σενάριο υφίσταται μόνο η ενεργή κατάσταση της ONU το δίκτυο έχει σταθερή κατανάλωση 4,69 Watt κάθε δευτερόλεπτο της προσομοίωσης. Αυτός είναι και ο λόγος που σε αυτό το σενάριο έχουμε μέγιστη κατανάλωση.



Εικόνα 5. 74: Κατανάλωση ενέργειας για 2 ONUs

Με την πρώτη ενεργειακά φιλική προσέγγιση, αυτή του δεύτερου σεναρίου παρατηρείται μια αισθητή μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας. Το δεύτερο σενάριο αναπαρίσταται με κόκκινο χρώμα. Το μοντέλο αυτό των εναλλαγών των καταστάσεων Asleep και Listen και παραμονή σε αυτές σταθερά για 0.5 δευτερόλεπτα επιτυγχάνει μείωση ενέργειας σχεδόν στο 48.5%.

Η καλή ενεργειακή προσέγγιση του δεύτερου σεναρίου μπορεί να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια μεταβάλλοντας τον χρόνο παραμονής ανάλογα με τις αφίξεις των εκάστοτε πακέτων. Δηλαδή αν γνωρίζαμε εκ των προτέρων πότε θα υπάρξει άφιξη πακέτου upstream ή downstream και να προγραμματίζαμε την ONU να αφυπνιστεί λίγο πριν ή και ακριβώς εκείνη τη χρονική στιγμή. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να επιτευχθεί με την πρόβλεψη της επόμενης τιμής από τον Triple Exponential Smoothing.

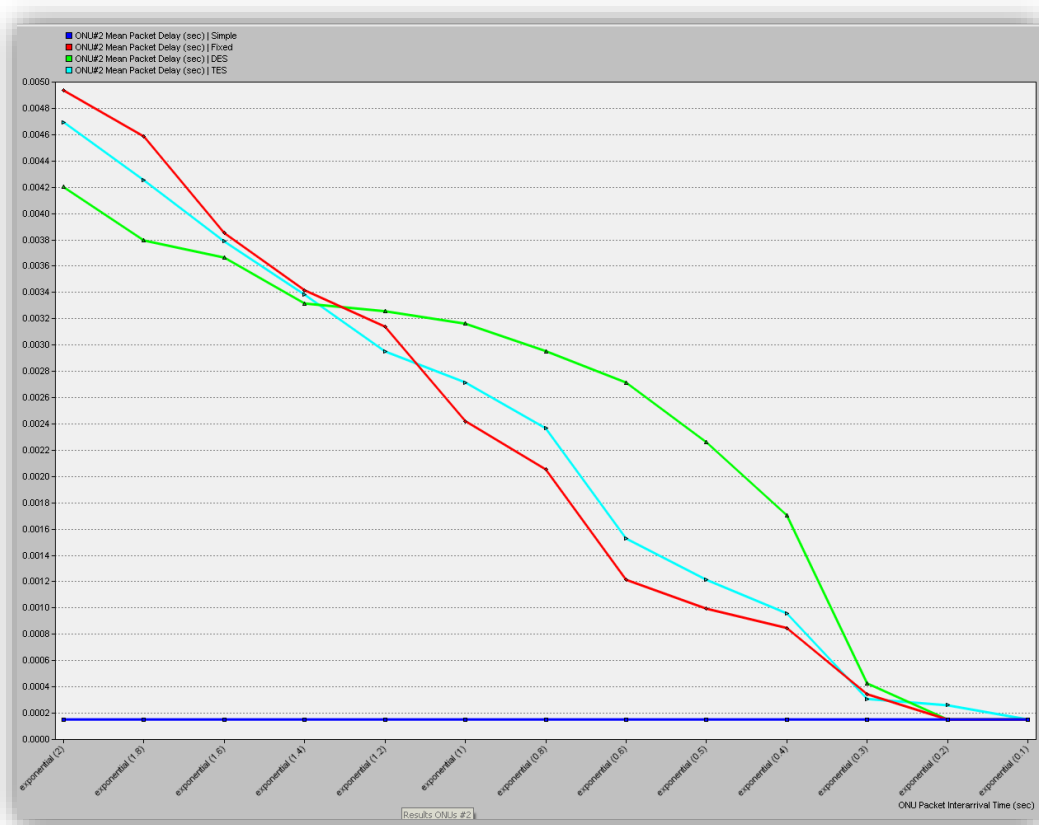
Ο Triple Exponential Smoothing επιτυγχάνει εξοικονόμηση μέχρι και 72,1%. Με την πάροδο των υπο-σεναρίων και την αύξηση του φόρτου κίνησης του ανερχόμενου καναλιού παρατηρούμε ότι το τρίτο σενάριο χάνει τα εξαιρετικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας που διαθέτει σε περιβάλλοντα μειωμένου φόρτου. Έτσι με μια σταδιακά αυξανόμενη καμπύλη προσεγγίζει την επίδοση του απλού μηχανισμού εξοικονόμησης για υψηλό φόρτο δεδομένων. Από το σενάριο με μέσο όρο packet interarrival 0,4 δευτερόλεπτα και μέχρι και το σενάριο με 0,1 η επίδοση του Triple Exponential Smoothing είναι εφάμιλλή με αυτήν του απλού μοντέλου εξοικονόμησης ενέργειας. Στην εικόνα 5.74 με γαλάζιο χρώμα φαίνεται η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνει ο TES.

Η καλύτερη προσέγγιση από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας επιτυγχάνεται στο τρίτο σενάριο με την χρήση του αλγορίθμου Double Exponential Smoothing. Ο αλγόριθμος αυτός λόγω των μεγαλύτερων διαστημάτων ύπνωσης που επιλέγει επιτυγχάνει καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Ο Double Exponential Smoothing καταφέρνει να μειώσει την ήδη καλή επίδοση του Triple Exponential Smoothing άλλα 2,75%, έτσι στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης μεταβλητού φόρτου φτάνει την κατανάλωση 1,18 Watt το δευτερόλεπτο. Η επίδοση αυτή εξοικονομεί 27,85% περισσότερη ενέργεια από αυτήν του δεύτερου σεναρίου, ενώ επιτυγχάνει ποσοστό συνολικής μείωσης ενέργειας 74.85% σε δίκτυο αραιού φόρτου.

Επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό του σεναρίου αυτού είναι ότι η επίδοση του αλγορίθμου έχει και διάρκεια. Ενώ στο τέταρτο σενάριο ο Triple Exponential Smoothing επιτυγχάνει παρόμοια ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας σε αραιό φόρτου δεδομένων, ο Double Exponential Smoothing συνεχίζει να εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια και σε δίκτυα πιο υψηλού φόρτου όπου αυτό είναι εφικτό. Στο τελευταίο σενάριο για παράδειγμα όπου υπάρχει αυξημένη κίνηση αγγίζει τις επιδόσεις των δύο προηγούμενων σεναρίων.

Η περίπτωση του σεναρίου με την χρήση του Double Exponential Smoothing είναι καλύτερη επιλογή από τα τέσσερα σενάρια που προσομοιώθηκαν όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Επόμενο γράφημα που χρήζει ανάλυσης είναι αυτό της μέσης καθυστέρησης πακέτου. Με την είσοδο μιας ONU σε μια κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας απενεργοποιούνται κάποια δομικά της στοιχεία όπως είναι ο πομπός και ο δέκτης με αποτέλεσμα να μην μπορεί η ONU να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του δικτύου. Έτσι λοιπόν όλα τα πακέτα που καταφθάνουν στην ONU όταν αυτή βρίσκεται στην κατάσταση Asleep θα εξυπηρετηθούν αφότου ολοκληρωθεί η προγραμματισμένη τρέχουσα περίοδος ύπνωσης, Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να καθυστερεί το πακέτο να εξυπηρετηθεί λόγω της αναμονής μέχρι την έξοδο από την περίοδο ύπνωσης. Στο επόμενο γράφημα φαίνεται η μέση καθυστέρηση πακέτου για το καθένα από τα τέσσερα σενάρια προσομοίωσης του δικτύου.



Εικόνα 5. 75: Διάγραμμα μέσης καθυστέρησης πακέτου ONU #2

Σε αυτήν την μετρική καλύτερη επίδοση έχει η απλούστερη δομή της ONU η οποία λόγω του ότι είναι μόνιμα ενεργή εξυπηρετεί το κάθε πακέτο κατά την άφιξη του. Έτσι λοιπόν η μπλε καμπύλη έχει σταθερή τιμή και ίση με 142 μ sec για όλα τα σενάρια φόρτου κίνησης. Η καθυστέρηση αυτή εισάγεται λόγω του χρόνου μετάδοσης και του χρόνου διάδοσης που απαιτούνται με μια επικοινωνία.

Στο δεύτερο σενάριο όπου έχουμε σταθερές περιόδους ύπνωσης 0.5 δευτερολέπτων, η καθυστέρηση που εισάγεται είναι αρκετά σημαντική. Η κόκκινη καμπύλη του γραφήματος της εικόνας 5.70 αναπαριστά την επίδοση του δεύτερου σεναρίου. Όπως αναμέναμε για αραιό φόρτο κίνησης όπου η προσομοίωση μεταβαίνει συχνά στην κατάσταση Asleep παρατηρείται αυξημένο delay το οποίο φτάνει μέχρι και 43.8 msec στο σενάριο με τον αραιότερο φόρτο κίνησης. Αυτό το μοντέλο ναί μεν είναι αποδοτικό από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας αλλά από άποψη καθυστέρησης είναι αρκετά απογοητευτικό.

Αυτό που παρατηρούμε μελετώντας την πράσινη καμπύλη είναι ότι έχει επιτευχθεί σε ένα μεγάλο βαθμό η μείωση της καθυστέρησης από τον Double Exponential Smoothing στα σενάρια με την πιο αραιή κίνηση. Έτσι λοιπόν το τρίτο σενάριο δείχνει μια πιο ικανοποιητική λύση συγκριτικά με το δεύτερο, διότι ναί μεν ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας αλλά σε κάποιες περιπτώσεις και η μέση καθυστέρηση.

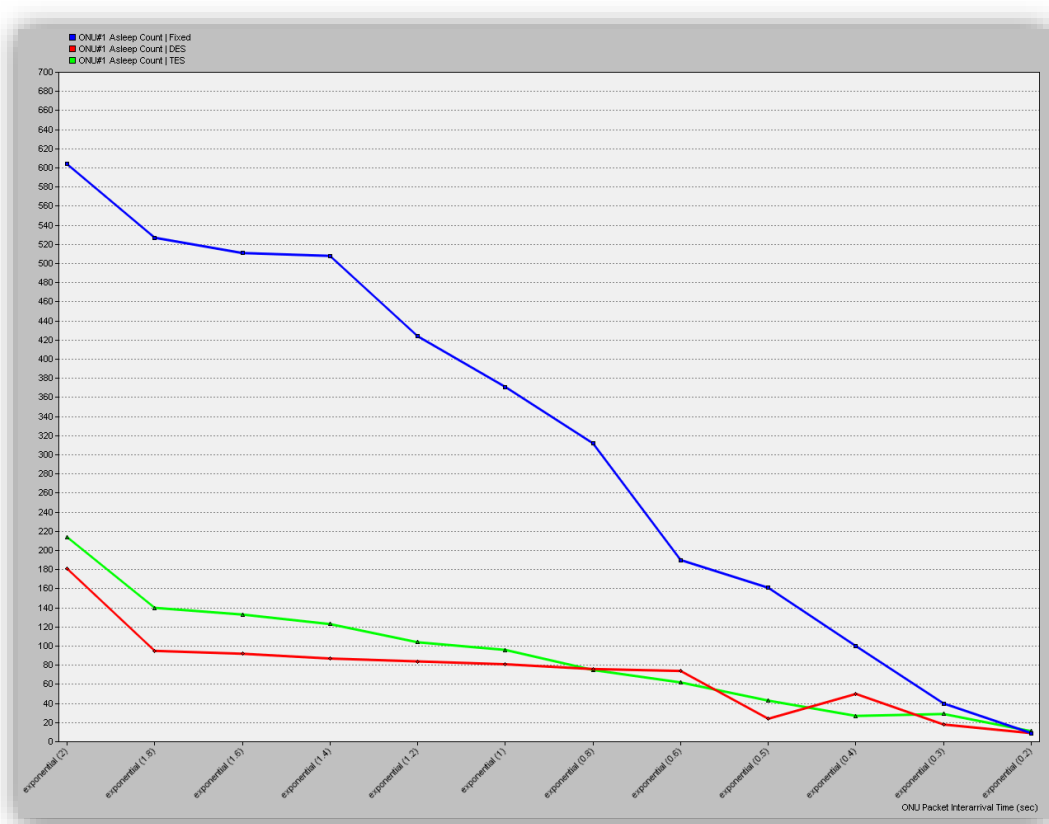
Για την πιο αραιή περίπτωση φόρτου κίνησης λαμβάνουμε καθυστέρηση 4.2 msec ωστόσο από το επόμενο κιάλας σενάριο, αυτό με 1.8 δευτερόλεπτα interarrival time η καθυστέρηση μειώνεται ακόμη περισσότερο στα 3.8 msec. Με την πάροδο των σεναρίων προσομοίωσης και την αύξηση του φόρτου κίνησης μειώνεται αισθητά το delay, όπως αναμενόταν γιατί όπως θα εξετάσουμε και σε επόμενο γράφημα δεν υπάρχουν πολλές ευκαιρίες για είσοδο στην κατάσταση Asleep.

Ίσως πιο αποδοτική στην μετρική της μέσης καθυστέρησης εμφανίζεται η προσέγγιση του αλγορίθμου TES. Στο τέταρτο σενάριο παρατηρούμε ότι για το υπο-σενάριο με τον πιο αραιό φόρτο κίνησης επιτυγχάνει το χειρότερο delay της γαλάζιας καμπύλης το οποίο είναι 5 msec χειρότερο από το αντίστοιχο του δεύτερου σεναρίου. Λόγω των υψηλών διαστημάτων ύπνωσης αυξάνεται και η μέση καθυστέρηση ωστόσο η χειρότερη επίδοση του Triple Exponential Smoothing είναι 4.7 msec.

Όσο αυξάνει ο φόρτος κίνησης οι ευκαιρίες εισαγωγής σε κατάσταση Asleep μειώνονται. Αυτό μπορεί να φανεί και στο γράφημα της μέσης καθυστέρησης όπου όσο αυξάνει ο φόρτος κίνησης μειώνεται η καθυστέρηση. Με την αύξηση του φόρτου οι καμπύλες των σεναρίων εξοικονόμησης ενέργειας τείνουν να αγγίζουν την τιμή της καμπύλης του δεύτερου σεναρίου. Με αποτέλεσμα όλα τα σενάρια για φόρτο 1 πακέτο κάθε 0.1 δευτερόλεπτα να έχουν την καλύτερη καθυστέρηση επειδή είναι σχεδόν μόνιμα σε ενεργή κατάσταση.

Η καλύτερη προσέγγιση στο γράφημα της μέσης καθυστέρησης επιτυγχάνεται από το σενάριο που χρησιμοποιεί την απλή δομή της ONU, ωστόσο η εξοικονόμηση ενέργειας είναι μηδενική. Έτσι λοιπόν λαμβάνοντας υπόψη και την εξοικονόμηση ενέργειας επιλέγουμε τον Triple Exponential Smoothing. Αυτή η επιλογή ισχύει και για τις δύο ONUs.

Το επόμενο γράφημα αναπαριστά τον αριθμό των εισόδων της κάθε ONU στην κατάσταση Asleep. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα δύο γραφήματα σε αυτό έχουμε αποτελέσματα για τα τρία τελευταία σενάρια διότι το πρώτο δεν υλοποιεί καθόλου την κατάσταση Asleep.



Εικόνα 5. 76: Διάγραμμα αριθμού εισόδων στην κατάσταση Asleep ONU #1

Στην εικόνα 5.76 βλέπουμε τη συμπεριφορά της ONU 1 σε όλα τα σενάρια που υλοποιείται η Asleep λειτουργία. Το δεύτερο σενάριο με την προσέγγιση των σταθερών χρονικών διαστημάτων ύπνωσης πραγματοποιεί είσοδο αρκετές φορές στην κατάσταση Asleep συγκριτικά με τα άλλα δύο. Αυτό συμβαίνει επειδή η προσέγγιση των αλγορίθμων των δύο τελευταίων σεναρίων προσαρμόζουν τα χρονικά διαστήματα παραμονής με βέλτιστο τρόπο. Έτσι όσες φορές χρειάζεται παρατείνεται το διάστημα παραμονής στην Asleep κατάσταση χωρίς να εκτελείται άσκοπη μετάβαση στην κατάσταση Sleep Aware και έπειτα εκ νέου μετάβαση στην Asleep. Η μπλε καμπύλη αντιπροσωπεύει τον αριθμό εισόδων για

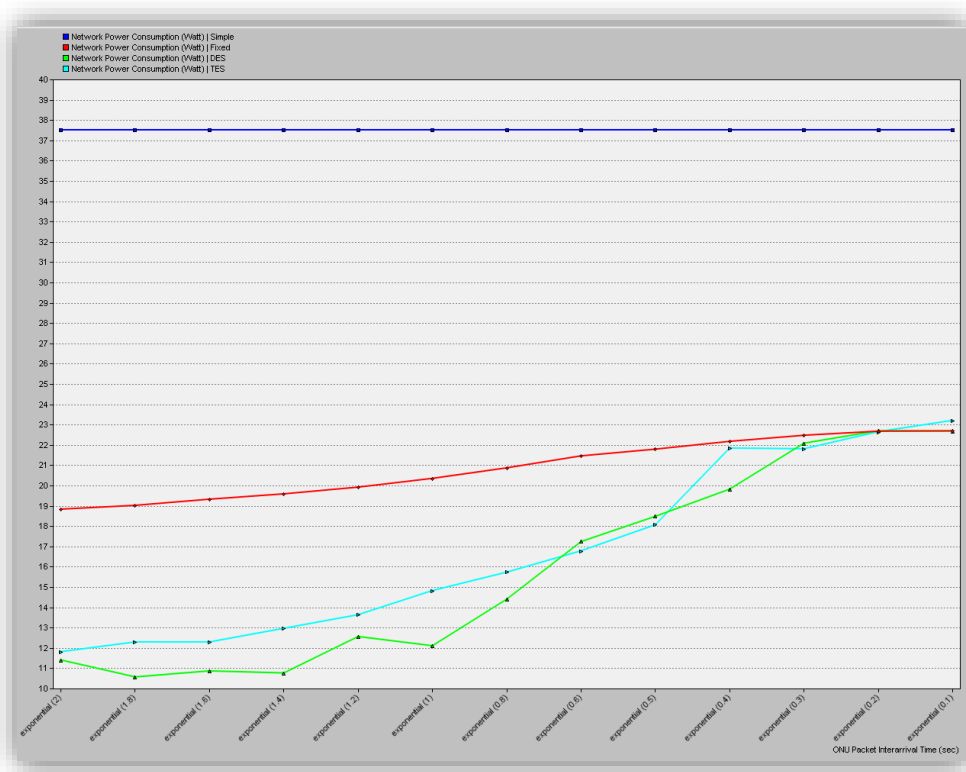
το δεύτερο σενάριο, η κόκκινη για το τρίτο και η πράσινη για το τέταρτο. Στο πρώτο σενάριο όπως σχολιάστηκε δεν υλοποιείται Asleep λειτουργία.

Άλλο ένα σημαντικό στοιχείο που παρατηρούμε στο γράφημα είναι ότι όλες οι καμπύλες παίρνουν 12 τιμές για μέσο όρο από 2-0.2 δευτερόλεπτα. Στο υπο-σενάριο με φόρτο κίνησης 0.1 δευτερόλεπτα δεν υπάρχουν μετρήσεις για κανένα από τα κύρια σενάρια γιατί δεν δίνεται η ευκαιρία εισόδου ούτε μια φορά. Έτσι απουσιάζει από το γράφημα Asleep count, η τιμή για 0,1 interarrival time.

Σε αυτό το γράφημα ο αλγόριθμος DES είναι η βέλτιστη επιλογή γιατί είναι αυτός με τις λιγότερες μεταβάσεις. Έτσι εκτός από εξοικονόμηση ενέργειας είναι και πιο λειτουργικό το τρίτο σενάριο γιατί δεν αναγκάζει την ONU να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί πομπό και δέκτη χωρίς λόγο.

5.1.2 Αποτίμηση δικτύου οκτώ συνδεδεμένων ONU

Στο επόμενο δίκτυο όπου είναι συνδεδεμένες περισσότερες οπτικές μονάδες δικτύου έχουμε παρόμοια αποτελέσματα για την κάθε ONU με αποτέλεσμα τα συνολικά ολόκληρου του δικτύου να είναι ικανοποιητικά.



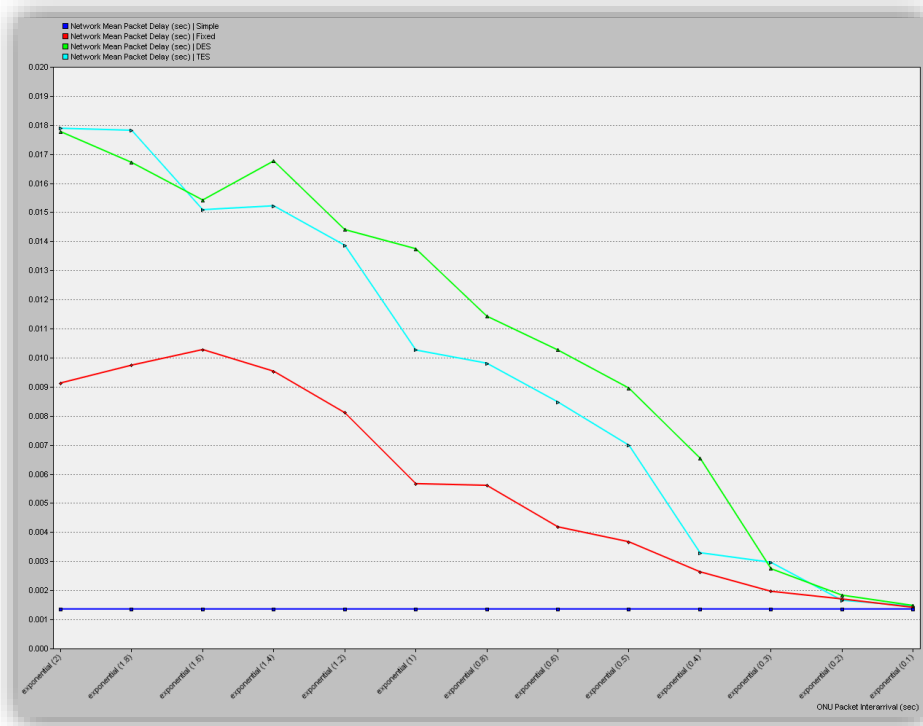
Εικόνα 5. 77: Συνολική κατανάλωση δικτύου με οκτώ ONUs

Το γράφημα της εικόνας 5.77 είναι αυτό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου με οκτώ οπτικές μονάδες δικτύου. Το πρώτο σενάριο που δεν υλοποιεί μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας να έχει το μεγαλύτερο ποσοστό

σταθερά 37.52 Watt. Το δεύτερο σενάριο επιτυγχάνει μείωση της τάξεως του 50% για το υπο-σενάριο με τον αραιότερο φόρτο, από τα 37.52 Watt στα 18.8 Watt. Καλύτερη επίδοση από αυτή είναι του τέταρτου σεναρίου με την χρήση του αλγορίθμου TES να επιτυγχάνεται περεταίρω μείωση στα 11.8 Watt. Ο DES βρίσκει περισσότερες ευκαιρίες εισόδου σε καταστάσεις ύπνωσης από κάθε άλλο αλγόριθμο και καταφέρνει να μειώσει την κατανάλωση 11.4 Watt το κάθε δευτερόλεπτο.

Το ποσοστό μείωσης του αλγορίθμου DES αγγίζει στην καλύτερη περίπτωση το 71,83% σε αυτό το δίκτυο με οκτώ συνδεδεμένες ONU. Όσο αυξάνει ο φόρτος δεδομένων τόσες λιγότερες ευκαιρίες δίνονται στην κάθε ONU για μια πιθανή είσοδο σε κατάσταση ύπνωσης. Αυτό απορρέει από το παραπάνω γράφημα στις τελευταίες τιμές των καμπυλών του τρίτου και του τέταρτου σεναρίου οι οποίες προσεγγίζουν την εξοικονόμηση του απλούστερου μηχανισμού του δεύτερου σεναρίου.

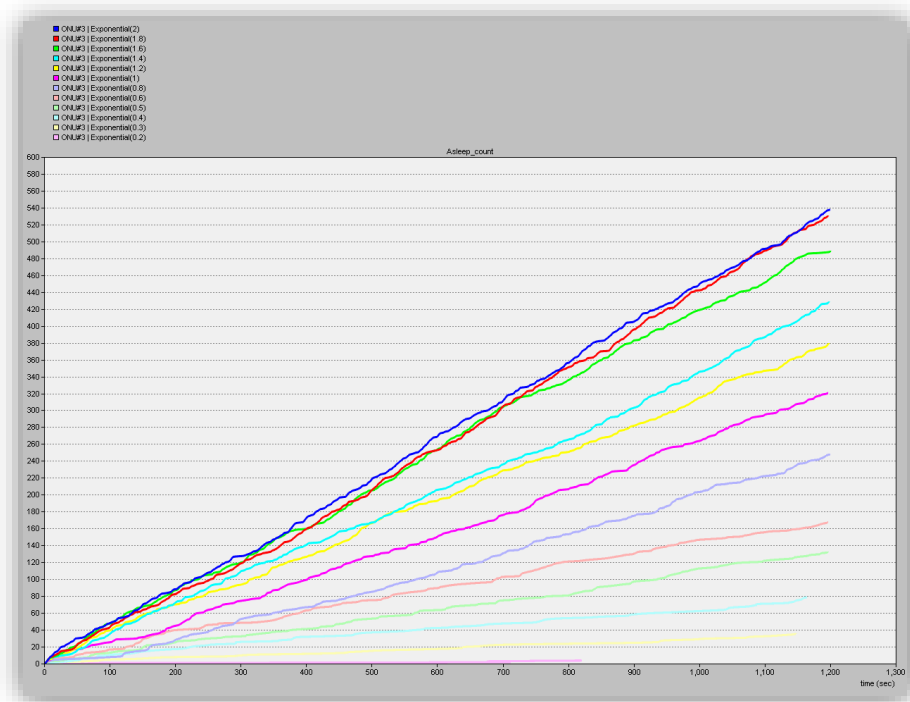
Το γράφημα της εικόνας 5.78 αντιπροσωπεύει την μέση καθυστέρηση πακέτου όπως αυτή καταγράφηκε στα διαφορετικά σενάρια που προσομοιώθηκαν. Όπως και στο δίκτυο με τις δύο ONUs έτσι και εδώ το πρώτο σενάριο είναι αυτό που δεν εισάγει καθόλου καθυστέρηση. Έτσι επιτυγχάνεται παραλαβή κάθε πακέτου λαμβάνοντας υπόψη μόνο ο χρόνος μετάδοσης και ο χρόνος διάδοσης. Η ιδανική συνολική καθυστέρηση του δικτύου είναι 1.35 msec.



Εικόνα 5. 78: Συνολική μέση καθυστέρηση δικτύου οκτώ ONUs

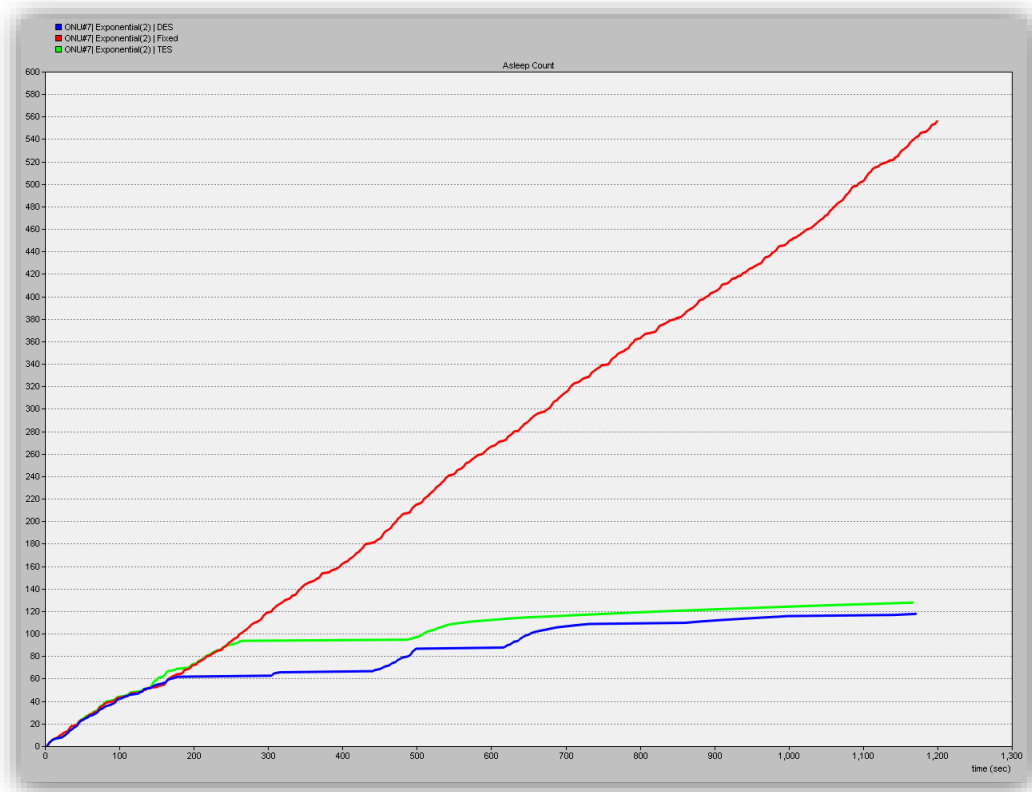
Όλες οι υλοποιήσεις με μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας εισάγουν ένα βαθμό καθυστέρησης στο δίκτυο. Έτσι λοιπόν το σενάριο με τα σταθερά διαστήματα είναι αυτό που παρουσιάζει την μικρότερη καθυστέρηση συγκριτικά με τα τρία σενάρια που εξοικονομούν ενέργεια. Αυτό συμβαίνει επειδή οι αλγόριθμοι πρόβλεψης μεταβάλλουν την διάρκεια του διαστήματος ύπνωσης και κάποιες φορές αυξάνοντας την λανθασμένα με αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης καθυστέρησης. Την καλύτερη προσέγγιση της μέσης καθυστέρησης την επιτυγχάνει ο TES αλγόριθμος όπως φαίνεται και στο γράφημα από την μπλε καμπύλη που είναι σταθερά χαμηλότερα από την πράσινη του τρίτου σεναρίου. Όπως αναμενόταν όσο αυξάνεται ο ρυθμός γεννήσεως των πακέτων μειώνεται αισθητά η μέση καθυστέρηση που τείνει να αγγίζει την ιδανική καθυστέρηση του πρώτου σεναρίου. Με αποτέλεσμα για το υπο-σενάριο με τον μέγιστο φόρτο του δικτύου να μην έχουμε καμία είσοδο σε κατάστασεις ύπνωσης.

Σύμφωνα με την γραφική παράσταση της μέσης κατανάλωσης του γραφήματος 5.78 όσο αυξάνει ο φόρτος πραγματοποιούνται λιγότερες μεταβάσεις σε καταστάσεις ύπνωσης. Στο γράφημα 5.79 παρατηρούμε τις ευκαιρίες που εκμεταλλεύεται η ONU 3 για είσοδο στην κατάσταση Asleep. Οι διαφορετικές καμπύλες αντιπροσωπεύουν τα 12 διαφορετικά υπο-σενάρια φόρτου κίνησης. Για το υπο-σενάριο φόρτου με μέσο όρο interarrival 0.1 δευτερόλεπτα δεν υπάρχουν μετρήσεις γιατί δεν δόθηκε καμία ευκαιρία εισόδου στην ONU 3.



Εικόνα 5. 79: Ευκαιρίες εισόδου Asleep σε μεταβαλλόμενο φόρτο

Τα σενάρια που υλοποιούν αλγόριθμους πρόβλεψης επόμενων τιμών ελαχιστοποιούν τον αριθμό των μεταβάσεων σε καταστάσεις ύπνωσης μεταβάλλοντας την διάρκεια τους. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται ο αριθμός των εισόδων που πραγματοποιούνται σε κάθε σενάριο προσομοίωσης. Το δεύτερο σενάριο με την επιλογή των σταθερών διαστημάτων ύπνωσης επιβαρύνει το δίκτυο με περιττές εισόδους και εξόδους, που θα μπορούσαν να αποφευχθούν. Αυτό επιτυγχάνουν οι αλγόριθμοι πρόβλεψης επόμενης τιμής που μεταβάλλοντας την διάρκεια του διαστήματος ύπνωσης περιορίζουν τις μεταβάσεις αυτές. Ενδεικτικά ο αλγόριθμος DES και ο αλγόριθμος TES μειώνουν τις 557 μεταβάσεις του δεύτερου σεναρίου στις 118 και στις 128 αντίστοιχα. Η μπλε καμπύλη αντιπροσωπεύει την επίδοση του τρίτου σεναρίου, η κόκκινη τον αριθμό εισόδων του δεύτερου σεναρίου και η πράσινη του τέταρτου.



Εικόνα 5. 80: Αριθμός εισόδου σε Asleep για κάθε σενάριο

5.2 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι με την υλοποίηση μεταβάσεων σε καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας όταν δίνονται ευκαιρίες επιτυγχάνεται μια ικανοποιητική εξοικονόμηση ενέργειας.

Το δεύτερο σενάριο επιτυγχάνει εξοικονόμηση ενέργειας 48,5% αλλά λόγω των σταθερών διαστημάτων παραμονής σε καταστάσεις ύπνωσης δεν είναι τόσο αποδοτικό. Παρόλα αυτά αποτελεί μια καλή προσέγγιση όσο αφορά και την μέση καθυστέρηση διότι δεν είναι αρκετά υψηλή. Για την ίδιο λόγο η προσομοίωση εισέρχεται σε καταστάσεις ύπνωσης περίπου 5 φορές στις 10 ενώ στα υπόλοιπα σενάρια σχεδόν 1 φορά στις 10. Αυτές οι άσκοπες έξοδοι και εκ νέου είσοδοι στις καταστάσεις ύπνωσης μας οδηγούν στην αποφυγή της επιλογής αυτού του μοντέλου.

Το τρίτο σενάριο με την χρήση του Double Exponential Smoothing επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση. Το σενάριο αυτό εξοικονομεί ποσοστό 71,83% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο με τις οκτώ συνδεδεμένες ONU's. Αυτή η επίδοση είναι μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση όμως πρέπει αναλογιστούμε και την μέση καθυστέρηση που εισάγει το μοντέλο αυτό. Μπορούμε να πούμε ότι το σενάριο αυτό με την χρήση του Double Exponential Smoothing ενισχύει σημαντικά την απόδοση του σε δίκτυα με χαμηλό φόρτο κίνησης. Σε τέτοιου είδους δίκτυα επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση σε συνδυασμό με όχι πολύ υψηλές καθυστερήσεις. Σε δίκτυα με υψηλό φόρτο όμως παρουσιάζει μια απότομη αύξηση της μέσης καθυστέρησης οδηγώντας στην αποφυγή χρησιμοποίησης του σε δίκτυα υψηλού φόρτου.

Στο τέταρτο σενάριο με την χρήση του Triple Exponential Smoothing επιτυγχάνεται μείωση της κατανάλωσης του δεύτερου σενάριο στα 11.8 Watt για κάθε δευτερόλεπτο της προσομοίωσης. Αυτή η επίδοση είναι χειρότερης από αυτήν του DES αλλά δεν παύει να είναι ικανοποιητική. Αρκετά ικανοποιητική είναι η επίδραση του σεναρίου και στην μέση καθυστέρηση πακέτου κυρίως σε δίκτυα πιο αυξημένου φόρτου συγκριτικά με αυτήν του τρίτου σεναρίου. Στην χειρότερη περίπτωση του ο TES εισάγει 1,78 msec καθυστέρηση. Επίσης διαχειρίζεται αποδοτικά τις μεταβάσεις στις καταστάσεις Asleep και Listen μειώνοντας τον αριθμό των άσκοπων εισόδων σε αυτές. Όσο αυξάνει ο φόρτος μειώνεται η απόδοση του δικτύου όμως ο αλγόριθμος TES φαίνεται να βρίσκει μια χρυσή τομή ανάμεσα στην ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και στον περιορισμό της καθυστέρησης περιορίζοντας επίσης και τον αριθμό των άσκοπων εισόδων στις καταστάσεις ύπνωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω γραφήματα και τις μετρικές που παρατηρήθηκαν θα προτιμούσαμε την εφαρμογή του αλγορίθμου DES σε δίκτυα με υψηλό φόρτο ανεξαρτήτως του αριθμού των οπτικών μονάδων και τον

αλγόριθμο TES σε δίκτυα υψηλότερου φόρτου κίνησης όπου φαίνεται πιο αποδοτικός. Παρόλα αυτά σε κάθε περίπτωση και σε κάθε αλγόριθμο υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης με σκοπό να επιτευχθούν καλύτερες επιδόσεις.

5.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Σαν μελλοντικές επεκτάσεις αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσαν να υλοποιηθούν σενάρια με περισσότερες οπτικές μονάδες δικτύου για την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόδοση των αλγορίθμων πρόβλεψης σε δίκτυα μεγαλύτερων απαιτήσεων.

Θα μπορούσε επίσης να υλοποιηθεί και ένας αλγόριθμος για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων α , β , γ που απαιτούνται για πρόβλεψη από τους smoothing αλγορίθμους. Αυτός ο αλγόριθμος θα εκτελείται για κάθε διαφορετικό σενάριο δικτύου βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους βάσει της ακολουθίας εισόδου. Σε όλα τα παραπάνω σενάρια οι παράμετροι α , β , γ υπολογίστηκαν έπειτα από αρκετές πειραματικές προσομοιώσεις ώστε να δίνουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα που μπορούσε να προσεγγιστεί. Μια μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιστοποιήσει τις τιμές των α , β , γ είναι η μέθοδος least squares.

Βιβλιογραφία

- [1] Y. Huang, J. Heritage, and B. Mukherjee: "Connection Provisioning with Transmission Impairment Consideration in Optical WDM Networks with High-Speed Channels", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 3, pp 982-993, March 2005.
- [2] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, W.V. Sorin, R.S. Tucker, "Energy Consumption in Optical IP Networks," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 13, pp. 2391-2403, July 2009.
- [3] J. Lakoumentas: "Routing and Wavelength Assignment in WDM Optical Networks", Master Thesis, University of Patras, 2006.
- [4] G. P. Agawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 3rd edition, Wiley - Interscience, 2002.
- [5] T-REC-G.987.2 ITU T-REC-G.987.1-General requirements, https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.987.1-201001-I!!PDF-E&type=items, Sept 2013.
- [6] T-REC-G.987.2 Physical media dependent (PMD) layer specification https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.987.2-201010-I!!PDF-E&type=items, Sep 2013
- [7] T-REC-G.987.3 - Transmission convergence (TC) layer specification, https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.987.3-201010-I!!PDF-E&type=items, Sept 2013.
- [8] Panagiotis Sarigiannidis, Malamati Louta, Georgios Papadimitriou and Michael Theologou "Analyzing the ONU Power Consumption in the XG-PON Systems", July 2013.
- [9] Determination of Sleep Period for Cyclic Sleep Mode in XG-PON Power Management, Hakjeon Bang, Jongdeog Kim, Sang-Soo Lee, Chang-Soo Park , Sept 2013.
- [10] Analysis of ONT Buffer and Power Management Performances for XG-PON Cyclic Sleep Mode, Hakjeon Bang, Jongdeog Kim, Youngjun Shin, Chang-Soo Park, Sept 2013.
- [11] Unlocking the Power of OPNET Modeler, Zheng Lu Hongji Yang, Sept 2013.
- [12] Smoothing algorithms, <http://www.xyzhang.info/implement-exponential-smooth-in-r/>, Sept 2013.

- [13] Hakjeon Bang, Gwangju, Jongdeog Kim, Youngjun Shin, Chang-Soo Park “Analysis of ONT buffer and power management performances for XG-PON cyclic sleep mode”, Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE, 3-7 Dec. 2012.
- [14] Kantarci, B, Mouftah, H.T. “Energy versus delay trade-offs in metro-access convergence”, High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 2012 9th International Conference, 12-14 Dec. 2012
- [15] M. Bokhari, P. Saengudomlert, “Integrated sleep mode for improving energy efficiency of NG-PONs”, Optical Communications and Networks (ICOON), 2012 11th International Conference, 28-30 Nov. 2012.
- [16] S. Lambert, J. Montalvo, J.A. Torrijos, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet, “Energy efficiency analysis of next-generation passive optical network (NG-PON) technologies in a major city network”, Transparent Optical Networks (ICTON), 2013 15th International Conference, 23-27 June 2013.
- [17] S. Dahlfort, “Comparison of 10 Gbit/s PON vs WDM-PON”, Optical Communication, 2009. ECOC '09. 35th European Conference, 20-24 Sept. 2009
- [18] M. De Groote, K. Manousakis, K. Kokkinos, D. Colle, M. Pickavet, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, P. Demeester, “Cost comparison for different Translucent Optical Network Architectures”, Conference of Telecommunication, Media and Internet (CTTE), 2010.
- [19] K. Manousakis, P. Kokkinos, E. Varvarigos, “Performance Evaluation of Node Architectures with Color and Direction Constraints in WDM Networks”, in Proc. GLOBECOM, 2010.
- [20] C. Lange, “Energy-related Aspects in Backbone Networks”, in Proc. ECOC 2009, Vienna, Austria, Sep. 2009.
- [21] R.S. Tucker et al., “Evolution of WDM Optical IP Networks: A Cost and Energy Perspective”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 243-252, Feb. 2009.
- [22] S. Ricciardi, [et al.], “Energy-oriented models for WDM networks” in “7th International ICST Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems”. Atenas: 2010, p. 1-4.
- [23] W. Vereecken, [et al], “Optical Networks: How Much Power Do They Consume and How Can We Optimize This?”, Optical Communication (ECOC), 2010 36th European Conference and Exhibition.

- [24] B. Puype, W. Vereecken, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester, "Power reduction techniques in multilayer traffic engineering", In Transparent Optical Networks, 2009. ICTON '09, 11th International Conference on pages 1–4, July 2009.
- [25] W. Van Heddeghem, M. De Groote, W. Vereecken, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester, "Energy-efficiency in telecommunications networks: Linkby-link versus end-to-end grooming", in Optical Network Design and Modeling, 2010, 14th Conference in Tokyo, Japan, February 2010.
- [26] F.J. Effenberger, "The XG-PON System: Cost Effective 10 Gb/s Access," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.29, no.4, pp.403-409, Feb.15, 2011.
- [27] A. Valenti, F. Matera, G.T. Belevfi, "Power consumption measurements of access networks in a wide geographical area test bed and economic perspectives", Future Network & Mobile Summit (Future Netw), 4-6 July 2012.
- [28] B. Skubic, E.I. De Betou, T. Ayhan, S. Dahlfort, "Energy-efficient next-generation optical access networks", Communications Magazine, IEEE (Volume: 50, Issue: 1), January 2012.
- [29] N. Iiyama, H. Kimura, H. Hadama, "A Novel WDM-based Optical Access Network with High Energy Efficiency Using Elastic OLT", 2010
- [30] A.R. Dhaini, P. H. Ho, G. Shen, "Toward Green Next-Generation Passive Optical Networks", 2011