

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή στα Πληροφοριακά Συστήματα



**Αρχιτεκτονικές και Προσομοίωση Δικτύων Ενσύρματης Πρόσβασης
για την Υποστήριξη Κυψελωτών Δικτύων 4ης Γενιάς**

Δημήτρης Μέγας

**Επιβλέπων Καθηγητής
Κυριάκος Βλάχος**

Αύγουστος 2012

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Αρχιτεκτονικές και Προσομοίωση Δικτύων Ενσύρματης Πρόσβασης
για την Υποστήριξη Κυψελωτών Δικτύων 4ης Γενιάς**

Δημήτρης Μέγας

**Επιβλέπων Καθηγητής
Κυριάκος Βλάχος**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Πληροφοριακά Συστήματα

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Αύγουστος 2012

Περίληψη

Οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες των τελικών χρηστών για παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών έχουν στρέψει το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας αλλά και της αγοράς στο ζήτημα των δικτύων πρόσβασης. Βασικό πρόβλημα παραμένει το πρόβλημα First (ή Last ανάλογα με την οπτική) Mile, το ζήτημα δηλαδή της συμφόρησης που προκαλείται στα δίκτυα που συνδέουν τους τελικούς χρήστες με τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.

Οι υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύων πρόσβασης έχουν φτάσει σε κορεσμό. Η επόμενη γενιά δικτύων ευρυζωνικής πρόσβασης αναμένεται να έχει ετερογενή σύσταση, κάνοντας χρήση ενσύρματων – οπτικών και ασύρματων τεχνολογιών, συνδυάζοντας χαμηλό κόστος εγκατάστασης, υψηλές ταχύτητες πρόσβασης και καθολική παρουσία. Στα πλαίσια αυτής της τάσης βασικός σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η διερεύνηση της λειτουργίας ενοποιημένων ετερογενών (ενσύρματων – ασύρματων) δικτυακών υποδομών ευρυζωνικής πρόσβασης και πιο συγκεκριμένα ενός υβριδικού δικτύου που συνδυάζει ένα παθητικό οπτικό δίκτυο με ένα ασύρματο δίκτυο 4ης γενιάς Long Term Evolution (LTE).

Παρουσιάζονται οι βασικότερες τεχνολογίες δικτύων πρόσβασης που φιλοδοξούν να αντικαταστήσουν τις υπάρχουσες υποδομές, με έμφαση στα υβριδικά δίκτυα, και γίνεται λεπτομερής ανάλυση των τεχνολογιών οπτικών δικτύων και δικτύων LTE. Για τη διερεύνηση της λειτουργίας ενός τέτοιου δικτύου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της μοντελοποίησης και εξομοίωσης διακριτού συμβάντος, με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού εξομοίωσης δικτύων, του Network Simulator 3.

Το μοντέλο που παρουσιάζεται εξομοιώνει τα βασικά δικτυακά τερματικά ενός υβριδικού δικτύου και προσφέρει μία γενική εικόνα της βασικής λειτουργίας του. Επιτρέπει την κατανόηση των διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση ενός υβριδικού δικτύου, ενώ παρέχει τη δυνατότητα υποστήριξης μελλοντικών επεκτάσεων των εργαλείων εξομοίωσης.

Περιεχόμενα

1 Δίκτυα Πρόσβασης Και Τεχνολογίες Υλοποίησης.....	1
1.1 Δίκτυα Πρόσβασης.....	1
1.1.1 Αιτίες Ανάπτυξης Δικτύων Πρόσβασης.....	1
1.1.2 Τεχνολογίες Υλοποίησης Δικτύων Πρόσβασης	2
1.2 Υβριδικά Δίκτυα Πρόσβασης PON-LTE.....	10
2 Μοντελοποίηση Και Εξομοίωση Δικτύων	13
2.1 Εξομοίωση Δικτύων.....	13
2.2 Συστατικά εξομοίωσης διακριτού συμβάντος.....	15
2.3 Network Simulator 3 – Ns-3	18
2.3.1 Μοντέλα εξομοίωσης	18
2.3.2 Στόχοι Σχεδίασης του Ns-3	19
2.3.3 Βασικά Αντικείμενα ενός Προγράμματος Εξομοίωσης στο Ns-3	21
2.3.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Εξομοιώσεων στο Ns-3.....	26
3 Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PON).....	28
3.1 Θεμελιώδη Τμήματα ενός PON	28
3.1.1 Τερματικό Οπτικής Γραμμής (Optical Line Terminal – OLT)	30
3.1.2 Οπτικές Δικτυακές Μονάδες (Optical Network Units - ONUs)	30
3.1.3 Οπτικό Δίκτυο Διανομής (Optical Distribution Network - ODN)	31
3.2 Τεχνολογίες Δικτύων PON.....	31
3.2.1 Δίκτυα G-PON.....	31
3.2.2 Δίκτυα E-PON.....	35
3.3 Μοντελοποίηση ενός PON στον εξομοιωτή Ns-3.....	37
4 Ασύρματα Δίκτυα LTE	40
4.1 Το Πρότυπο LTE.....	40
4.1.1 Βασικά Συστατικά Μέρη ενός Δικτύου LTE.....	40
4.1.2 Ποιότητα Υπηρεσιών και Φορείς EPS	45
4.2 Βασικές Διεπαφές και Πρωτόκολα Επικοινωνίας.....	49
4.2.1 Πρωτόκολο GTP-U	51
4.2.2 Πρωτόκολο RRC.....	51
4.2.3 Πρωτόκολο PDCCP	52

4.2.4 Πρωτόκολλο RLC	53
4.2.5 Πρωτόκολλο MAC.....	54
4.3 Υλοποίηση Προτύπου LTE στον Network Simulator 3	55
4.3.1 Βασικές Αρχές Σχεδίασης	56
4.3.2 Μοντελοποίηση Βασικών Πρωτοκόλλων	59
5 Μοντελοποίηση και Αξιολόγηση Του Υβριδικού Δικτύου Στο Ns-3.....	61
5.1 Σχεδίαση του Δικτύου.....	61
5.1.1 Εξωτερικό Δίκτυο Πακέτων Δεδομένων.....	62
5.1.2 Οπτικό τμήμα.....	63
5.1.3 Ασύρματο τμήμα.....	65
5.1.4 Λοιπά στοιχεία.....	69
5.2 Μεθοδολογία Αξιολόγησης	70
5.2.1 Οργάνωση Αξιολόγησης	70
5.3 Αξιολόγηση της Λειτουργίας του Υβριδικού Δικτύου.....	71
5.4 Τελικά Συμπεράσματα Αξιολόγησης.....	90
Βιβλιογραφία.....	94
Παράρτημα Α	A-1

Κεφάλαιο 1

Δίκτυα Πρόσβασης Και Τεχνολογίες Υλοποίησης

1.1 Δίκτυα Πρόσβασης

Με τον όρο δίκτυο πρόσβασης (access network) περιγράφεται το τμήμα εκείνο ενός δικτύου τηλεπικοινωνιών το οποίο συνδέει τους συνδρομητές – χρήστες τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών με τον άμεσο πάροχό τους [28]. Με τη ραγδαία ανάπτυξη του Διαδικτύου και των εφαρμογών ιστού καθώς και με την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για ευρυζωνικές υπηρεσίες, έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια σημαντική αύξηση του ενδιαφέροντος και κατ'επέκταση των επενδύσεων στα δίκτυα πρόσβασης. Αυτό το γεγονός έχει οδηγήσει σε μία άνευ προηγουμένων εγκατάσταση δικτυακών υποδομών με στόχο την εξάλειψη του σημείου συμφόρησης (bottleneck) μεταξύ τελικών χρηστών και δικτυακού πυρήνα, που μέχρι τώρα οφειλόταν στα δίκτυα πρόσβασης.

1.1.1 Αιτίες Ανάπτυξης Δικτύων Πρόσβασης

Οι απαιτήσεις από τους χρήστες για πρόσβαση σε συγκλίνουσες υπηρεσίες βασισμένες στο πρωτόκολο IP έχουν οδηγήσει σε κορεσμό τις υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύων πρόσβασης. Οι ανάγκες για ταυτόχρονη παροχή υπηρεσιών Internet υψηλής ταχύτητας, υπηρεσιών φωνής μέσω IP (VoIP) και υπηρεσιών βίντεο μέσω IP που περιλαμβάνουν και την παροχή τηλεοπτικών υπηρεσιών (IPTV) ή υπηρεσιών βίντεο κατά παραγγελία (Video on Demand) είναι δύσκολο να καλυφθούν από ταχύτητες πρόσβασης της τάξης των 24-30 Mbps. Ειδικά με την παροχή υπηρεσιών βίντεο υψηλής ευκρίνειας (High Definition) και την πιθανή ταυτόχρονη παρακολούθηση διαφορετικών τηλεοπτικών καναλιών στο χώρο ενός τελικού

χρήστη, οι ταχύτητες αυτές φαντάζουν ανεπαρκείς. Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει τις απαιτήσεις σε εύρος για κάποιες από τις πιο τυπικές εφαρμογές IP.

Υπηρεσία IP	Κανονική Ποιότητα	Υψηλή Ποιότητα
Ροή βίντεο H.264	1 – 1,5 Mbps	7 – 8 Mbps (1080p)
Ροή βίντεο MPEG-2 (IPTV ή VoD)	3,5 Mbps	18 – 20 Mbps
Ροή βίντεο MPEG-4 (IPTV ή VoD)	1,5 Mbps	9 Mbps
Τηλεφωνία IP	128 Kbps	
Διαμοιρασμός αρχείων P2P	Όσο επιτρέπεται από τον πάροχο υπηρεσιών	

Πίνακας 1.1: Απαιτήσεις σε εύρος των πιο τυπικών σύγχρονων εφαρμογών IP [28]

1.1.2 Τεχνολογίες Υλοποίησης Δικτύων Πρόσβασης

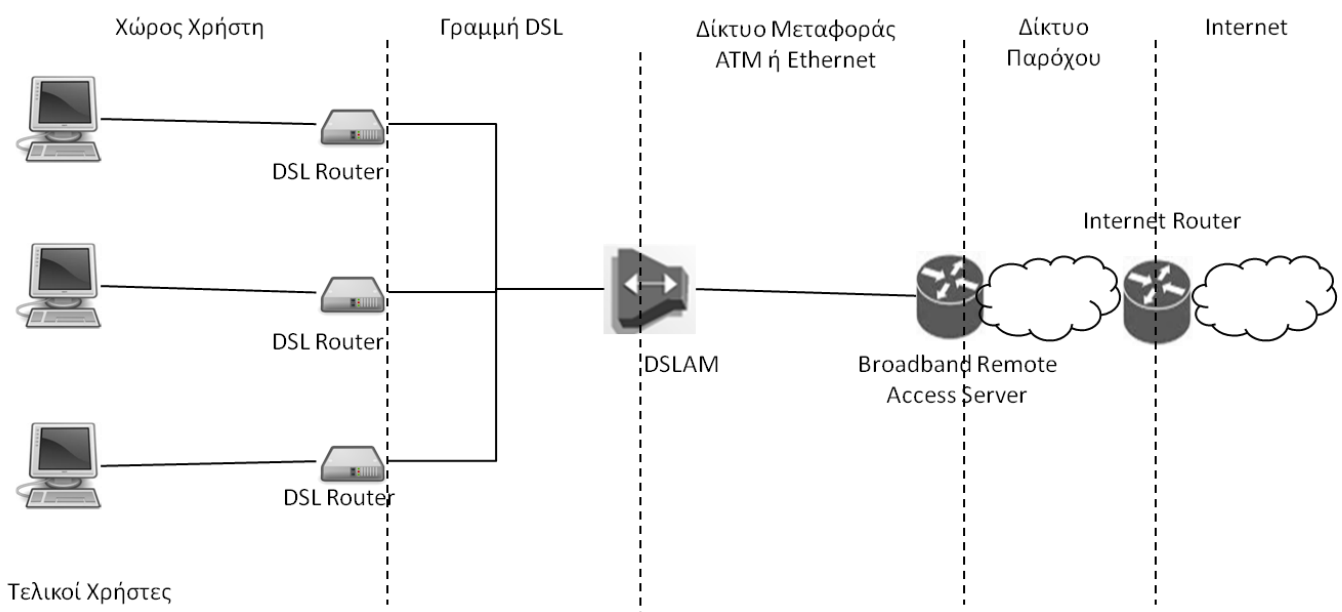
Μέχρι σήμερα διάφορες τεχνολογίες έχουν χρησιμοποιηθεί ή έχουν προταθεί για τη δημιουργία δικτύων πρόσβασης:

- ✧ Δίκτυα πρόσβασης χαλκού – τεχνολογία ADSL2+/VDSL2
- ✧ Οπτικά Δίκτυα Πρόσβασης – τεχνολογία Fiber-To-The-Home
- ✧ Υβριδικά Δίκτυα Πρόσβασης – συνδυασμός ενσύρματων και ασύρματων τεχνολογιών

Δίκτυα πρόσβασης χαλκού – ADSL2+/VDSL2

Οι τεχνολογίες DSL (Digital Subscriber Line) έχουν καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια ως κυρίαρχες για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης. Για την παροχή των υπηρεσιών DSL χρησιμοποιούνται τα ήδη υπάρχοντα καλώδια χαλκού που καταλήγουν στους τελικούς χρήστες και για την παροχή τηλεφωνικών υπηρεσιών. Η προσφερόμενη ταχύτητα πρόσβασης από ένα δίκτυο DSL εξαρτάται από το μήκος της σύνδεσης χαλκού μέχρι τον τελικό χρήστη. Τυπικά αναμένεται η ταχύτητα να φτάνει τα 24 έως 30 Mbps για ένα μήκος σύνδεσης 1 έως 1,5 χιλιομέτρων [28].

Όπως αναφέρθηκε οι τεχνολογίες DSL κάνουν χρήση του ήδη υπάρχοντος τηλεφωνικού δικτύου. Αυτό είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους που έχει οδηγήσει στην υιοθέτησή τους από πολυάριθμους δικτυακούς παρόχους ανά τον κόσμο. Όπως είναι κατανοητό το κόστος εγκατάστασης νέων συνδέσεων προς έναν μεγάλο αριθμό συνδρομητών είναι ιδιαίτερα υψηλό, και η τεχνολογία DSL δίνει τη δυνατότητα στους παρόχους να επαναχρησιμοποιήσουν το δίκτυο που ήδη διαθέτουν, βελτιώνοντας την απόσβεση της επένδυσής τους και επιτρέποντάς τους να προσφέρουν ελκυστικές τιμές στους συνδρομητές τους [9]. Το Σχήμα 1.2 παρουσιάζει την τυπική τοπολογία ενός δικτύου πρόσβασης DSL.



Σχήμα 1.2: Τοπολογία Δικτύου Πρόσβασης DSL

Παρόλα αυτά, με την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για εύρος πρόσβασης η τεχνολογία DSL αρχίζει να φτάνει τα όριά της οδηγώντας τους παρόχους σε αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων.

Οπτικά Δίκτυα Πρόσβασης – Fiber-To-The-Home

Τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης βασίζονται σε συνδέσεις μέσω οπτικής ίνας του κεντρικού γραφείου του παρόχου με τους τελικούς συνδρομητές. Στα δίκτυα οπτικής ίνας το φυσικό μέσο δεν αποτελεί στη ουσία περιορισμό για το εύρος (την ταχύτητα) της πρόσβασης. Το

ζήτημα έγκειται στο ιδιαίτερα μεγάλο κόστος που απαιτείται για τη σύνδεση των δύο άκρων (παρόχου και συνδρομητών) με νέα δίκτυα. Το ύψος του κόστους που αποφασίζει να επωμιστεί ο πάροχος, είναι στην ουσία αυτό που θα καθορίσει και την τελική προσφερόμενη ταχύτητα σύνδεσης [28].

Οι κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακού υλικού έχουν αναπτύξει διαφορετικούς τύπους ηλεκτρο-οπτικού εξοπλισμού, οδηγώντας στην ανάπτυξη διαφορετικών αρχιτεκτονικών δικτύων πρόσβασης FTTH που έχουν ήδη αρχίσει να εγκαθίστανται σε διάφορες χώρες του κόσμου. Οι τρεις βασικές αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων πρόσβασης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι εξής:

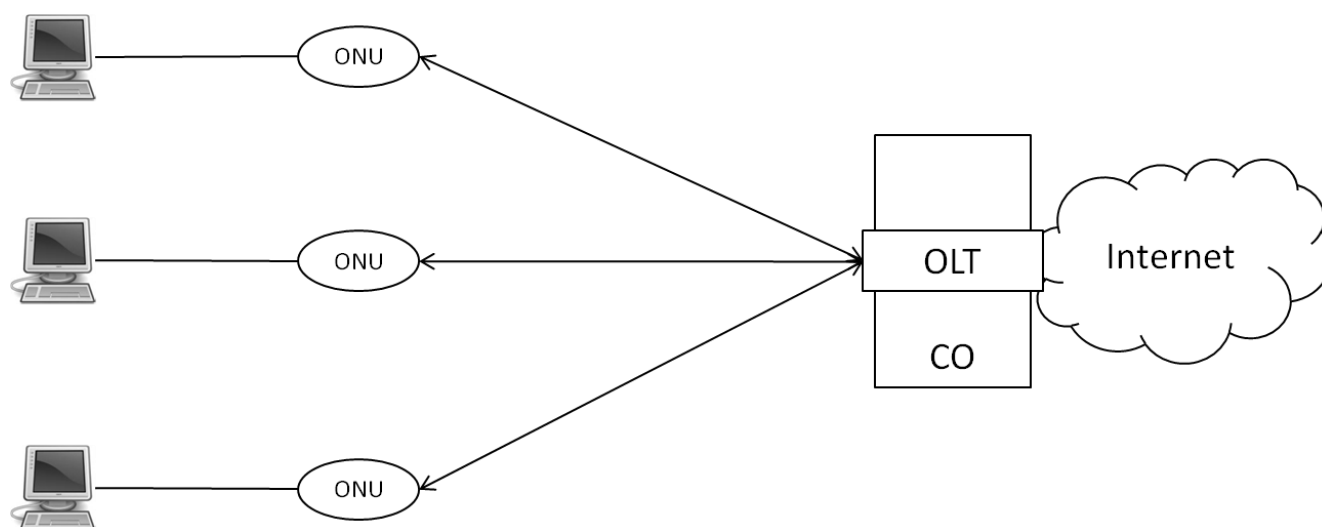
- ✧ Ethernet FTTH
- ✧ Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (Passive Optical Network – PON FTTH)
- ✧ Παθητικό Οπτικό Δίκτυο με Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM PON)

Ethernet FTTH

Η αρχιτεκτονική αυτή βασίζεται στην παροχή πρόσβασης μέσω μίας αποκλειστικής σύνδεσης της τοποθεσίας του χρήστη με τα κεντρικά γραφεία του τηλεπικοινωνιακού παρόχου [13]. Η σύνδεση είναι συμμετρική παρέχοντας ίσες ταχύτητες στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη που φτάνουν το 1Gbps ενώ αναμένεται με την εξέλιξη της τεχνολογίας να φτάσουν ακόμη και τα 10Gbps [28].

Σε ορισμένες περιοχές του κόσμου όπου έχει εγκατασταθεί αυτή η τεχνολογία, η σύνδεση ανήκει στον χρήστη και επιδοτείται από την κοινότητα για τον διαμοιρασμό του κόστους εγκατάστασης που όπως είναι κατανοητό είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Μάλιστα, είναι μεγαλύτερο από άλλες αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων, καθώς στην αρχιτεκτονική αυτή δε γίνεται καμία χρήση διαχωριστών για το συνδυασμό πολλών συνδέσεων συνδρομητών σε μία σε κάποιο τμήμα του δικτύου. Αντίθετα, ο κάθε χρήστης έχει τη δική του οπτική ίνα σε όλη την πορεία από το κεντρικό γραφείο του παρόχου μέχρι το κτίριό του [14]. Το Σχήμα 1.3

παρουσιάζει μία αναπαράσταση ενός δικτύου Ethernet FTTH.

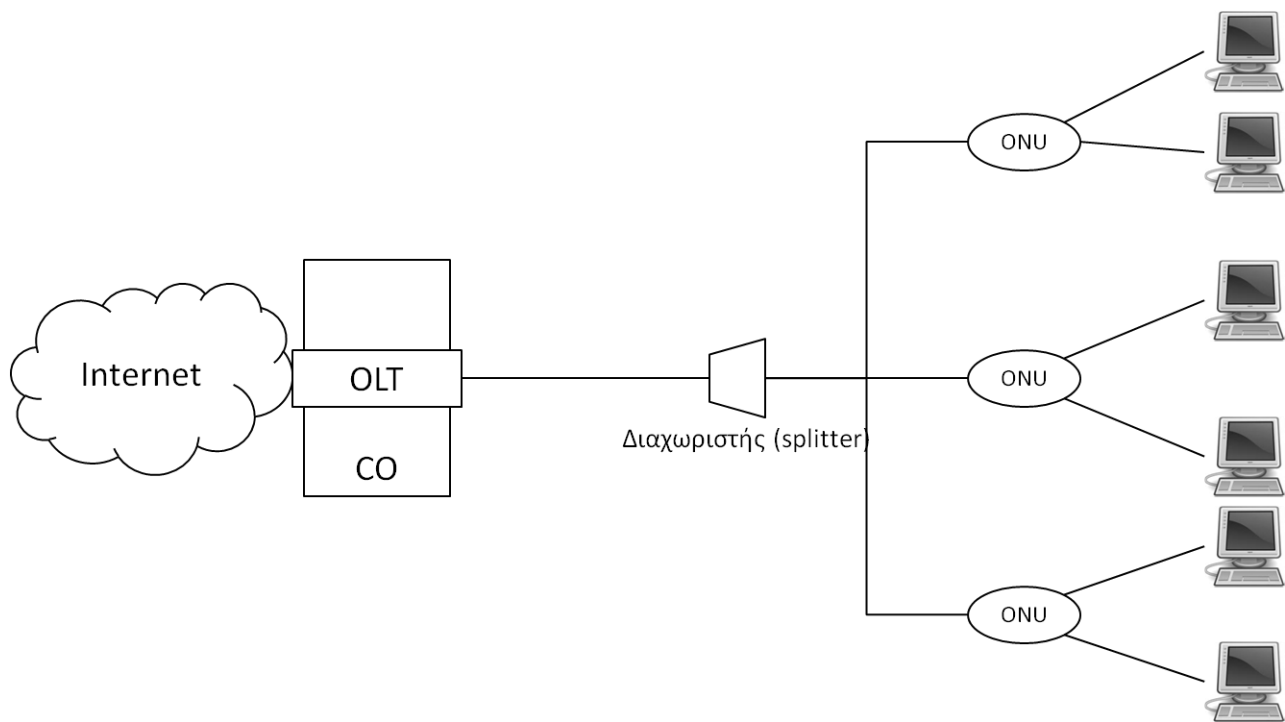


Σχήμα 1.3: Ethernet FTTH

Παθητικό Οπτικό Δίκτυο

Στην αρχιτεκτονική παθητικού οπτικού δικτύου χρησιμοποιούνται παθητικοί διαχωριστές (splitters) για να επιτραπεί σε περισσότερους από έναν χρήστες ο διαμερισμός μίας οπτικής ίνας (Σχήμα 1.4). Συνήθως οι χρήστες που διαμοιράζονται μία ίνα είναι 4, 8, 16 ή 32 και η οπτική ίνα είναι ικανή για τη μεταφορά δεδομένων με ταχύτητες που φτάνουν τα 2,5Gbps. Ως αποτέλεσμα αυτού, το παθητικό οπτικό δίκτυο χρησιμοποιεί αισθητά λιγότερες οπτικές ίνες από τα οπτικά δίκτυα Ethernet με αντίστοιχη επίδραση και στο κόστος εγκατάστασης [12].

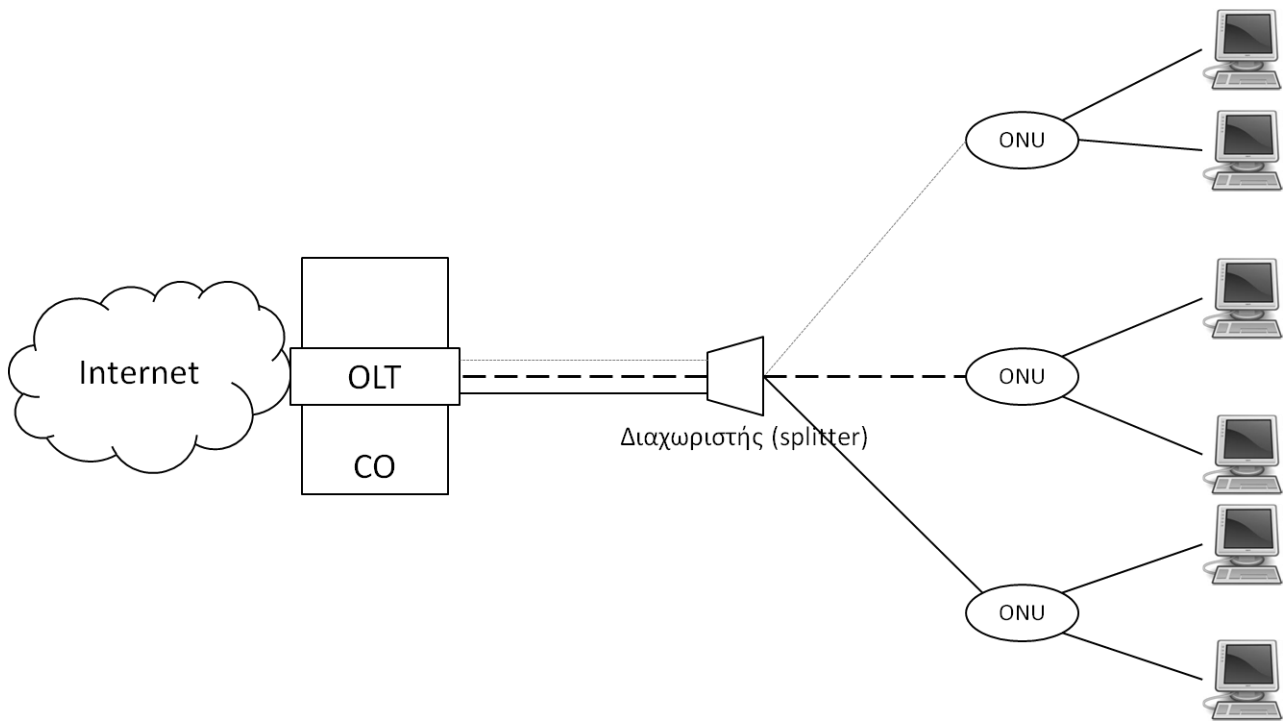
Ένα δίκτυο PON χρησιμοποιεί τουλάχιστον δύο μήκη κύματος, ένα για την κατερχόμενη ζεύξη και ένα για την ανερχόμενη. Η τυπική απόσταση ενός συνδρομητή που μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα δίκτυο PON είναι τα 20 χιλιόμετρα. Το τυπικό προσφερόμενο εύρος πρόσβασης που μπορεί να προσφερθεί από ένα δίκτυο PON των 2,5 Gbps που εξυπηρετεί 32 συνδρομητές είναι 80 Mbps στην κατερχόμενη ζεύξη και 40 Mbps στην ανερχόμενη [28].



Σχήμα 1.4: Τοπολογία Δικτύου PON

Παθητικό Οπτικό Δίκτυο με Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος

Τα δίκτυα PON με Πολυπλεξία Διαίρεσης Μήκους Κύματος χρησιμοποιούν όμοια αρχιτεκτονική με αυτή του παθητικού οπτικού δικτύου με χρήση παθητικών διαχωριστών. Η διαφορά μεταξύ τους έγκειται ότι στο WDM-PON γίνεται χρήση πολλαπλών μηκών κύματος, ενός για κάθε συνδρομητή [3, 16]. Η τυπική προσφερόμενη ταχύτητα πρόσβασης από ένα WDM-PON είναι 100 Mbps για κάθε μήκος κύματος, όμως υπάρχουν ήδη εφαρμογές που φτάνουν και το 1Gbps ενώ τα μελλοντικά δίκτυα αναμένεται να φτάσουν και τα 10 Gbps για κάθε μήκος κύματος (Σχήμα 1.5)[28].



Σχήμα 1.5: WDM – PON με διαφορετικά μήκη κύματος για κάθε τελικό χρήστη

Υβριδικά Δίκτυα Πρόσβασης

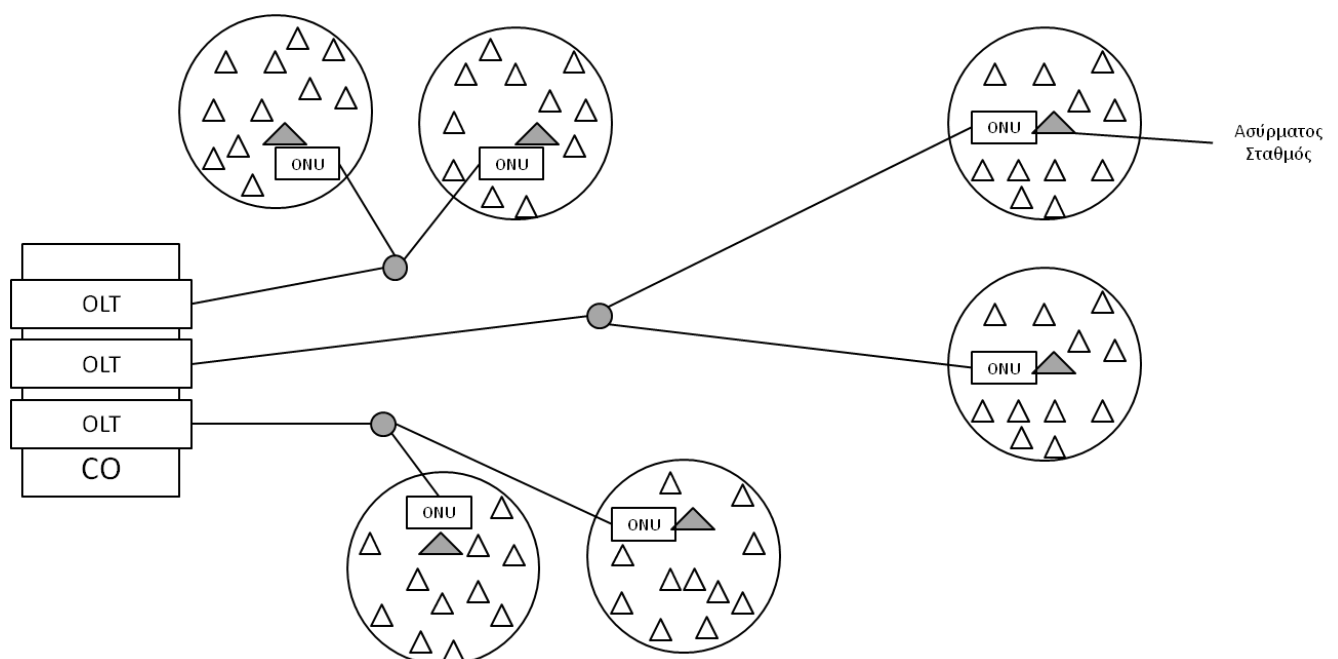
Τα υβριδικά οπτικά – ασύρματα δίκτυα πρόσβασης (Wireless Optical Broadband Access Networks – WOBAN) αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη αρχιτεκτονική για τα μελλοντικά δίκτυα πρόσβασης [23]. Επιδιώκουν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα δύο διακριτών τεχνολογιών, ενός ενσύρματου οπτικού δικτύου στην πλευρά του παρόχου και ενός ασύρματου δικτύου στην πλευρά του τελικού χρήστη, εξαλείφοντας παράλληλα τα όποια μειονεκτήματα εμφανίζουν αυτές οι τεχνολογίες από μόνες τους. Σε σχέση με τα παραδοσιακά οπτικά δίκτυα πρόσβασης εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερο κόστος υλοποίησης καθώς δεν υπάρχει η ανάγκη να εκτείνονται οι οπτικές ίνες μέχρι τον τελικό χρήστη. Από την άλλη προσφέρουν ανεμπόδιση ευελιξία στους τελικούς χρήστες λόγω του ασύρματου χαρακτήρα τους, με αυξημένο εύρος πρόσβασης σε σχέση με απλά ασύρματα δίκτυα λόγω του οπτικού δικτύου που τα υποστηρίζει [24].

Η αρχιτεκτονική υβριδικών δικτύων πρόσβασης (Σχήμα 1.6) βασίζεται στον αποδοτικό συνδυασμό ενός οπτικού δικτύου στην πλευρά του παρόχου και ασύρματης πρόσβασης στο εμπρόσθιο άκρο, δηλαδή στον τελικό χρήστη. Το οπτικό δίκτυο μπορεί να βασίζεται σε

οποιαδήποτε από τις υπάρχουσες τεχνολογίες οπτικών δικτύων όπως παθητικά οπτικά δίκτυα απλά ή με πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος. Το ασύρματο μέρος μπορεί να είναι ένα δίκτυο Wi-fi ή WiMax, ή ακόμα και ένα κυψελωτό δίκτυο κινητών επικοινωνιών όπως 3G ή 4G – LTE (Long Term Evolution) [23]. Τα δίκτυα WOBAN σχεδιάζονται έτσι ώστε να βελτιστοποιούν το κόστος που χρειάζεται για την εγκατάστασή τους και να μεγιστοποιούν την αξιοποίηση και την απόδοση του δικτύου πρόσβασης. Η βελτιστοποίηση του κόστους πραγματοποιείται με τη μείωση του κόστους υποδομών που απαιτείται για την τοποθέτηση οπτικών ινών προς τον κάθε χρήστη ενώ η υποστήριξη μεγαλύτερων ταχυτήτων πρόσβασης (σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα) οφείλεται στην ικανότητα μεγάλης συγκέντρωσης κίνησης που προσφέρουν τα υψηλής χωρητικότητας δίκτυα PON που το υποστηρίζουν στο πίσω μέρος της ζεύξης. Η αξιοπιστία και η αντοχή της οπτικής ζεύξης και η ευελιξία και μείωση του κόστους των ασύρματων τεχνολογιών ολοκληρώνονται στα δίκτυα WOBAN.

Πλεονεκτήματα λύσεων WOBAN

Τα πλεονεκτήματα των λύσεων WOBAN που αναφέρθηκαν περιληπτικά και τα οποία καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική την έρευνα και ανάπτυξη τέτοιων δικτύων για λύσεις πρόσβασης μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω στα ακόλουθα χαρακτηριστικά [28]:



Σχήμα 1.6: Παράδειγμα Δικτύου WOBAN

Μείωση Κόστους: Όπως αναφέρθηκε, ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα ενός δικτύου WOBAN είναι το δραστικά μειωμένο κόστος εγκατάστασης. Ένα δίκτυο WOBAN μπορεί να απαιτήσει σημαντικά χαμηλότερο κόστος για την αναπτυξή του σε σχέση με ένα πλήρως ενσύρματο δίκτυο. Όπως συνεπάγεται από την αρχιτεκτονική ενός δικτύου WOBAN, δεν απαιτείται η ύπαρξη σύνδεσης FTTH προς κάθε συνδρομητή, καθώς η εγκατάσταση και συντήρηση οπτικών ινών σε όλη τη διαδρομή μέχρι τον τελικό χρήστη είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα. Αντίθετα, ο χρήστης συνδέεται ασύρματα στο γειτονικό του ONU, πολλές φορές μάλιστα, αν το επιτρέπει και η χρησιμοποιούμενη ασύρματη τεχνολογία, η σύνδεση αυτή πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών ασύρματων κόμβων.

Ευελιξία - Κινητικότητα: Το ασύρματο τμήμα της αρχιτεκτονικής δικτύων WOBAN επιτρέπει στους χρήστες εντός του χώρου κάλυψης να διασυνδέονται απρόσκοπτα. Έτσι, το δίκτυο αποδεικνύεται πιο ευέλικτο σε σχέση με παραδοσιακά ενσύρματα οπτικά δίκτυα, ενώ επίσης απαλλάσσει τα δίκτυα πυρήνα από την επιπλέον επιβάρυνση από τέτοιου είδους κίνηση. Ακόμη, υποστηρίζεται η κινητικότητα των χρηστών εντός του χώρου κάλυψης, καθώς και η μετακίνηση μεταξύ χώρων κάλυψης χωρίς απώλεια της συνδεσιμότητας.

Ανθεκτικότητα: Ένα δίκτυο WOBAN είναι πιο ανθεκτικό σε σύγκριση με ένα παραδοσιακό δίκτυο οπτικών ινών. Σε ένα παραδοσιακό παθητικό οπτικό δίκτυο PON εάν η οπτική ίνα που συνδέει τον παθητικό διαχωριστή με έναν κόμβο ONU υποστεί κάποια ζημιά, ο κόμβος ONU χάνει κάθε συνδεσιμότητα. Ακόμη χειρότερα, εάν καταστραφεί ο κορμός οπτικών ινών που προέρχεται από τον κόμβο OLT, όλα τα ONU που εξυπηρετούνται από το συγκεκριμένο OLT αποσυνδέονται και μαζί του και όλοι οι χρήστες που εξυπηρετούν. Αντιθέτως σε ένα δίκτυο WOBAN οι χρήστες που συνδέονται ασύρματα μπορούν να δημιουργήσουν μεταξύ τους μία ασύρματη τοπολογία πλέγματος, η οποία μπορεί να αναπροσαρμόσει τον εαυτό της και να επιδιώξει να ανιχνεύσει κάποιο άλλο ONU το οποίο να είναι ενεργό. Έτσι, οι χρήστες μπορούν να επικοινωνήσουν μέσω αυτού του ενεργού ONU, το οποίο με τη σειρά του θα επικοινωνεί με ένα άλλο OLT στα κεντρικά γραφεία του παρόχου.

Χωρητικότητα: Λόγω της υψηλής χωρητικότητας του κορμού οπτικών ινών που προϋποθέτει η αρχιτεκτονική WOBAN στο πίσω μέρος της ζεύξης, η χωρητικότητα και η

ταχύτητα πρόσβασης που μπορεί να προσφέρει ένα τέτοιο δίκτυο είναι πολύ υψηλότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη ενός παραδοσιακού ασύρματου δικτύου.

Αξιοπιστία: Το δίκτυο WOBAN μπορεί να αποδειχτεί πιο αξιόπιστο σε σχέση με ένα ασύρματο δίκτυο, εμφανίζοντας σημαντικά λιγότερα περιστατικά απώλειας δεδομένων και συμφόρησης. Η ικανότητα που προσφέρεται στους χρήστες να δημιουργούν ασύρματα πλέγματα και να επιλέγουν διαφορετικά γειτονικά ONU για τη σύνδεσή τους στο δίκτυο πρόσβασης, σε περίπτωση που το πρωτεύον ONU απενεργοποιηθεί ή εμφανίζει συμφόρηση, προσφέρει στα δίκτυα WOBAN βελτιωμένες ικανότητες εξισορρόπησης φορτίου.

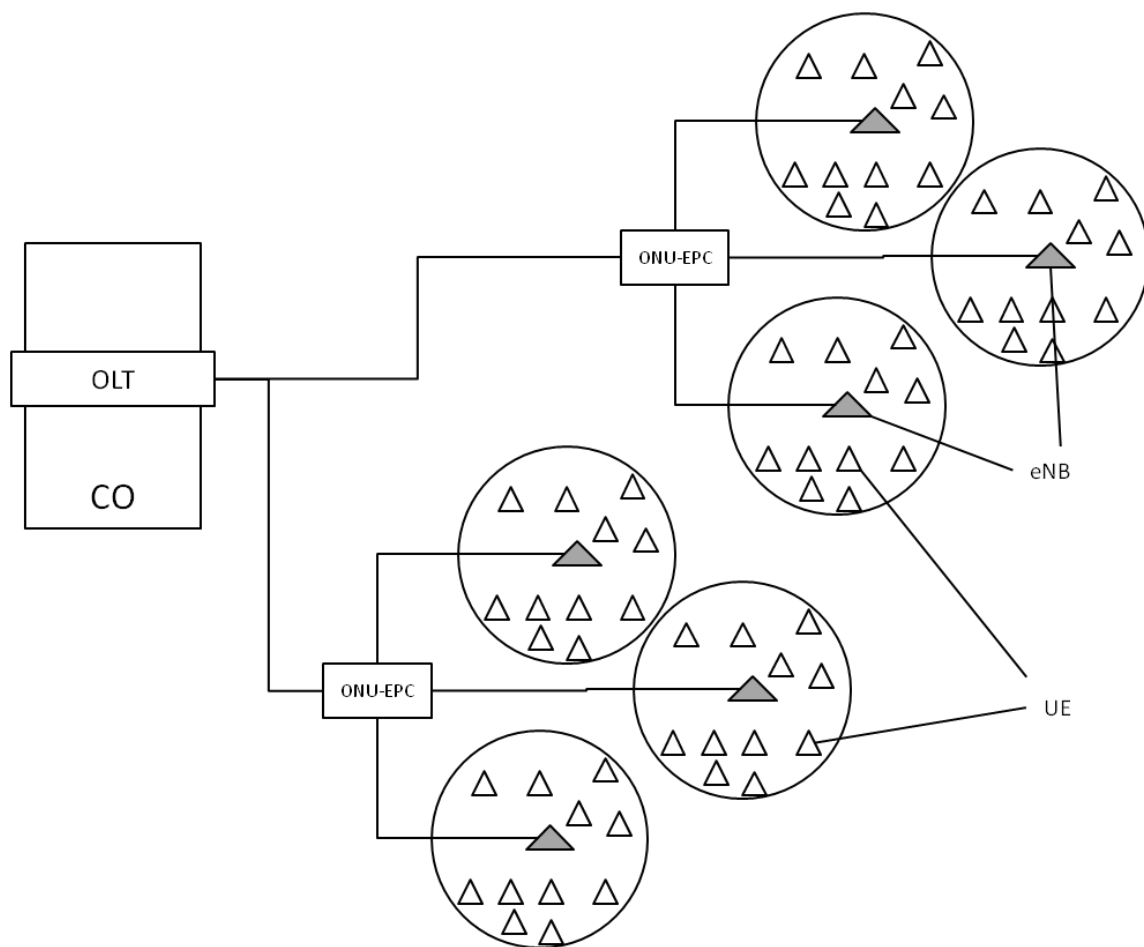
Αυτο-οργάνωση: Ένα δίκτυο WOBAN εμφανίζει ικανότητες αυτο-οργάνωσης, τόσο λόγω της ικανότητάς του να αντιμετωπίζει περιπτώσεις αστοχίας υλικού που προαναφέρθηκαν, όσο και λόγω της ενισχυμένης ανθεκτικότητας που επιδεικνύει όσον αφορά περιπτώσεις συνδεσιμότητας και εξισορρόπησης φορτίου.

1.2 Υβριδικά Δίκτυα Πρόσβασης PON-LTE

Τα υβριδικά δίκτυα πρόσβασης PON-LTE είναι ένας ειδικός τύπος υβριδικού δικτύου πρόσβασης στο οποίο το όπισθεν μέρος του δικτύου καλύπτεται από ένα παθητικό οπτικό δίκτυο, ενώ το ασύρματο μέρος του δικτύου υλοποιείται από ένα δίκτυο Long Term Evolution (LTE). Η μελέτη ενός τέτοιου δικτύου αποτελεί και το βασικό θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Όπως και οι γενικές περιπτώσεις υβριδικών δικτύων πρόσβασης που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, έτσι και ένα υβριδικό δίκτυο PON-LTE συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του ενσύρματου και του ασύρματου μέσου, εξαλείφοντας παράλληλα τα όποια μειονεκτήματα του καθενός. Επιπρόσθετα, σε σχέση με ένα υβριδικό δίκτυο που χρησιμοποιεί κάποια άλλη ασύρματη τεχνολογία (Wifi ή WiMax) ένα δίκτυο PON-LTE εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι πέρα από πρόσβαση σε συγκλίνουσες υπηρεσίες IP σε υψηλές ταχύτητες συνδυάζει και τη δυνατότητα τηλεφωνικών κλήσεων κινητής τηλεφωνίας από τους τελικούς χρήστες. Σε σχέση με ένα υβριδικό δίκτυο με κυψελωτό ασύρματο τμήμα τρίτης γενιάς (3G) το PON-LTE μπορεί να προσφέρει πολλαπλάσιες ταχύτητες πρόσβασης IP.

Ο τρόπος σχεδίασης ενός υβριδικού δικτύου πρόσβασης PON-LTE ακολουθεί καταρχάς την αρχιτεκτονική ενός κλασικού δικτύου PON όπως αυτό περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Υπάρχει ένας κόμβος OLT στο κεντρικό γραφείο του τηλεπικοινωνιακού παρόχου ο οποίος προσφέρει τη συνδεσιμότητα προς το δίκτυο πυρήνα και ο οποίος συνδέεται, ακολουθώντας μία τοπολογία δέντρου, μέσω ενός δικτύου οπτικών ινών διαχωρισμένων από παθητικούς διαχωριστές, με έναν αριθμό ONU. Τα ONU αποτελούν και το σημείο σύνδεσης του οπτικού ενσύρματου με το ασύρματο τμήμα LTE του υβριδικού δικτύου.



Σχήμα 1.7: Σχηματική αναπαράσταση υβριδικού δικτύου πρόσβασης PON-LTE

Το LTE δίκτυο αποτελείται από δύο βασικά τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι ο πυρήνας του δικτύου με την ονομασία Evolved Packet Core (EPC) το οποίο διαχειρίζεται μία σειρά από κόμβους - κεραίες που ονομάζονται eNodeB. Σε αυτές τις κεραίες συνδέονται οι συσκευές των τελικών χρηστών User Equipment (UE). Αναλυτική παρουσίαση των τεχνολογιών PON και

LTE που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του υβριδικού δικτύου γίνεται σε επόμενα κεφάλαια.

Όπως αναφέρθηκε, η σύνδεση του ασύρματου με το ενσύρματο τμήμα του δικτύου πραγματοποιείται στους κόμβους ONU του οπτικού δικτύου PON. Αυτοί συνδέονται απευθείας με τους κόμβους EPC του δικτύου LTE οι οποίοι διαχειρίζονται τις κεραιές eNodeB στις οποίες συνδέονται οι τελικοί χρήστες. Το Σχήμα 1.7 δίνει τη σχηματική αναπαράσταση του υβριδικού δικτύου PON-LTE όπως αυτό υλοποιήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Κεφάλαιο 2

Μοντελοποίηση Και Εξομοίωση Δικτύων

Για τη μελέτη του υβριδικού δικτύου PON-LTE θα ακολουθηθεί η διαδικασία της εξομοίωσης. Το υβριδικό δίκτυο θα μοντελοποιηθεί και θα εξομοιωθεί σύμφωνα με τις αρχές της εξομοίωσης διακριτού συμβάντος με τη χρήση κατάλληλου δικτυακού εξομοιωτή και συγκεκριμένα του εξομοιωτή Network Simulator 3 ή Ns-3.

2.1 Εξομοίωση Δικτύων

Ένα μεγάλο τμήμα της έρευνας στην επιστήμη της πληροφορικής διεξάγεται στους τομείς των κατανεμημένων συστημάτων και των δικτύων υπολογιστών. Τα κύρια θέματα που ερευνώνται αφορούν την ανάπτυξη νέων και βελτιωμένων πρωτοκόλων επικοινωνιών, δικτυακών εφαρμογών, αρχιτεκτονικών, τεχνικών ασφάλειας και ποιότητας υπηρεσίας. Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάπτυξη ειδικά πρωτοκόλων, αρχιτεκτονικών ή αλγορίθμων είναι η εκτίμηση της απόδοσής τους και η κατανόηση και οπτικοποίηση της συμπεριφοράς τόσο του συνολικού συστήματος όσο και των επιμέρους τμημάτων. Συνήθως αυτό μπορεί να επιτευχθεί με έναν από τρεις τρόπους:

- ⤴ διεξαγωγή πειραμάτων με πραγματικά συστήματα και πρωτότυπα
- ⤴ μαθηματική ανάλυση
- ⤴ εξομοίωση

Στην έρευνα και ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας οι δύο τελευταίες μεθοδολογίες είναι οι πιο σημαντικές κατά το στάδιο του λογικού σχεδιασμού τέτοιων συστημάτων λόγω της ύπαρξης οικονομικών άλλα και τεχνικών περιορισμών. Η εξομοίωση, ειδικά, χρησιμοποιείται για συστήματα που είναι ιδιαίτερα δυναμικά και των οποίων οι ιδιότητες είναι δύσκολο να συλληφθούν με μαθηματικό τρόπο. Συχνά, οι αναλυτικές μαθηματικές μέθοδοι δείχνουν τη συμπεριφορά ενός συστήματος σε οριακές συνθήκες και παρέχουν άνω και κάτω φράγματα για την απάντηση συγκεκριμένων ερευνητικών ερωτημάτων. Όμως, μια πιο λεπτομερής ανάλυση πολλές φορές οδηγεί σε μη αποδεκτή πολυπλοκότητα του αναλυτικού μοντέλου. Σε αντίθεση με τη μαθηματική ανάλυση, η εξομοίωση παρέχει στους ερευνητές ένα ελεγχόμενο περιβάλλον. Διάφορες ομάδες παραμέτρων και εναλλακτικά σενάρια μπορούν να αναλυθούν με συγκριτικά μικρή προσπάθεια. Έτσι, η εξομοίωση καθίσταται μία ισχυρή και ευέλικτη μεθοδολογία για την ανάλυση της συμπεριφοράς και απόδοσης επικοινωνιακών συστημάτων και δικτύων [29].

Όταν η εξομοίωση εξετάζεται ως μεθοδολογία για την ανάλυση ενός επικοινωνιακού συστήματος (το οποίο μπορεί να μην υπάρχει ακόμη), ένας παράγοντας δεν πρέπει να παραβλέπεται: όλες οι εξομοιώσεις λαμβάνουν χώρα σε ένα μοντέλο του υπό εξέταση συστήματος και όχι στο ίδιο το σύστημα. Όλα τα μοντέλα πρέπει να έχουν σχεδιαστεί εκ των προτέρων και καθώς η ανάλυση του συστήματος χωρίς προηγούμενη μοντελοποίησή του είναι αδύνατη, η διαδικασία της μοντελοποίησης καθίσταται ιδιαίτερα κρίσιμη για τη συνολική διαδικασία αξιολόγησης βάσει εξομοίωσης.

Μία βασική αρχή για την εξομοίωση επικοινωνιακών συστημάτων είναι ότι όλες οι ενέργειες, τα συμβάντα και οι ιδιότητες πρέπει να μοντελοποιηθούν με όσο περισσότερη ακρίβεια και λεπτομέρεια είναι δυνατόν. Από την άλλη πλευρά όμως, η ακρίβεια και η λεπτομέρεια πρέπει να φτάνουν στο επίπεδο που πραγματικά χρειάζεται και απαιτείται για την εξαγωγή των επιδιωκόμενων συμπερασμάτων, χωρίς να επιβαρύνουν την εξομοίωση με περιττή πολυπλοκότητα.

Σε μία εξομοίωση μία διαδικασία του πραγματικού κόσμου εξομοιώνεται στην πορεία του χρόνου. Καθώς η εξομοίωση με χρήση υπολογιστών έχει επεκταθεί σε διάφορα πεδία της επιστήμης έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη εξομοιώσεων:

- ✧ εξομοίωση διακριτού συμβάντος
- ✧ συνεχής εξομοίωση
- ✧ εξομοίωση τύπου Monte Carlo

Στον τομέα της εξομοίωσης δικτύων υπολογιστών η εξομοίωση διακριτού συμβάντος έχει κυριαρχήσει. Το βασικό χαρακτηριστικό της εξομοίωσης διακριτού συμβάντος είναι ότι η κατάσταση του μοντέλου εξομοίωσης μπορεί να μεταβάλεται μόνο σε διακριτά σημεία στο χρόνο τα οποία αναφέρονται ως συμβάντα [15].

Μέχρις στιγμής η εξομοίωση διακριτού συμβάντος έχει χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή έρευνας σε όλα τα επίπεδα των υπολογιστικών δικτύων. Καλύπτει από θέματα επεξεργασίας σήματος στο φυσικό επίπεδο και θέματα πρόσβασης μέσου στο επίπεδο ζεύξης μέχρι ερωτήματα δρομολογήσεων στο επίπεδο δικτύου και θέματα πρωτοκόλων στο επίπεδο μεταφοράς αλλά και ερωτήματα σχεδίασης στο επίπεδο εφαρμογών. Η επιτυχία της εξομοίωσης διακριτού συμβάντος οφείλεται από τη μία στο ότι το υπόδειγμα εξομοίωσης που προτείνει ταιριάζει πολύ καλά με τα υπο εξέταση συστήματα και από την άλλη είναι αρκετά εύκολο και εύχρηστο να εφαρμοστεί. Προφέρει επομένως, έναν απλό και ευέλικτο τρόπο για την εκτίμηση των ερευνητικών προσεγγίσεων και τη μελέτη της συμπεριφοράς υπό διαφορετικές συνθήκες. Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό της εξομοίωσης μέσω υπολογιστή είναι η επαναληψιμότητα, η δυνατότητα δηλαδή για διαφορετικά συστήματα να αξιολογηθούν υπό τις ίδιες (τυχαίες) συνθήκες.

2.2 Συστατικά εξομοίωσης διακριτού συμβάντος

Κάποια συστατικά που είναι κοινά σε όλα τα συστήματα εξομοίωσης διακριτού συμβάντος είναι:

- ✧ η οντότητα

✧ το σύστημα

✧ το διακριτό σύστημα

Η οντότητα είναι μία αφαιρετική έννοια ενός συγκεκριμένου αντικειμένου. Μία οντότητα περιγράφεται από τα χαρακτηριστικά-ιδιότητές του για παράδειγμα η οντότητα πακέτο μπορεί να έχει χαρακτηριστικά όπως μήκος, διεύθυνση πηγής και διεύθυνση προορισμού. Συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος αντικείμενο για να περιγράψει μία οντότητα.

Ένα σύστημα ορίζεται από ένα σύνολο οντοτήτων και τις σχέσεις μεταξύ τους. Το σύνολο των οντοτήτων και οι μεταξύ τους σχέσεις πρέπει να επιτελούν ένα συγκεκριμένο σκοπό. Για παράδειγμα ένα σύστημα με την ονομασία δίκτυο μπορεί να αποτελείται από τις οντότητες hosts – κόμβοι, δρομολογητές και σύνδεσμοι ενώ ο σκοπός που επιτελεί μπορεί να είναι η παροχή από άκρο σε άκρο συνδεσιμότητας.

Ένα διακριτό σύστημα είναι ένα σύστημα, του οποίου η κατάσταση, ως άθροισμα των καταστάσεων όλων των οντοτήτων που ανήκουν σε αυτό, μεταβάλλεται μόνο σε διακριτά σημεία στο χρόνο. Η αλλαγή της κατάστασης προκαλείται από την εμφάνιση ενός συμβάντος. Το τι μπορεί να είναι αυτό το συμβάν, εξαρτάται κυρίως από το σύστημα και τους στόχους της έρευνας. Παραδείγματα συμβάντων είναι η αποστολή ενός πακέτου, η λήψη ενός πακέτου ή η επιλογή ενός συνδέσμου υπερκειμένου σε μία ιστοσελίδα [4].

Στις περισσότερες περιπτώσεις το υπό μελέτη σύστημα είναι αρκετά πολύπλοκο. Για να καταστεί εφικτή η εκτίμηση της απόδοσής του μέσω εξομοίωσης με υπολογιστή κατασκευάζεται ένα μοντέλο. Το μοντέλο αποτελεί μία αφαίρεση του συστήματος, με αποτέλεσμα να αποτελείται από έναν αριθμό επιλεγμένων οντοτήτων του συστήματος και σχέσεων μεταξύ τους. Σε μία εξομοίωση το μοντέλο αυτό είναι που εξετάζεται, και όχι το ίδιο το σύστημα, κυρίως για τη μείωση της πολυπλοκότητας και του σχετικού κόστους σε υπολογιστικούς πόρους [15].

Η βασική αρχή ενός εξομοιωτή διακριτού συμβάντος είναι η μετάβαση από το ένα συμβάν στο επόμενο, όπου η εμφάνιση ενός συμβάντος μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος καθώς και τη δημιουργία νέων συμβάντων για το μέλλον, των

λεγόμενων ειδοποιήσεων συμβάντων. Τα συμβάντα καταγράφονται σαν ειδοποιήσεις συμβάντων σε μία λίστα μελλοντικών συμβάντων (Future Event List – FEL), η οποία είναι μία κατάλληλη δομή δεδομένων ώστε να διαχειρίζεται όλα τα συμβάντα στα πλαίσια της εξομοίωσης. Μία ειδοποίηση συμβάντος αποτελείται από τουλάχιστον δύο δεδομένα (χρόνος, τύπος συμβάντος) όπου ο χρόνος καθορίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία θα εμφανιστεί το συμβάν και ο τύπος καθορίζει το είδος του συμβάντος. Η λίστα μελλοντικών συμβάντων πρέπει να ενσωματώνει αποδοτικές συναρτήσεις για την εισαγωγή, εύρεση και αφαίρεση ειδοποιήσεων συμβάντων.

Για την εύρυθμη λειτουργία του ένας εξομοιωτής διακριτού συμβάντος πρέπει να υλοποιεί τα παρακάτω στοιχεία [29]:

- ✧ Κατάσταση συστήματος: Ένα σύνολο μεταβλητών που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος. Ένα στιγμιότυπο της κατάστασης του συστήματος δημιουργείται και αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή σε κάθε χρονική στιγμή όπου εμφανίζεται ένα συμβάν.
- ✧ Ρολόι: Η δομή αυτή δίνει την τρέχουσα χρονική στιγμή εξομοίωσης κατά την εκτέλεσή της.
- ✧ Λίστα Μελλοντικών Συμβάντων: Όπως αναφέρθηκε η λίστα μελλοντικών συμβάντων είναι μία κατάλληλα σχεδιασμένη δομή δεδομένων για τη διαχείριση των συμβάντων.
- ✧ Στατιστικοί μετρητές: Πρόκειται για ένα σύνολο μεταβλητών που αποθηκεύουν στατιστικές πληροφορίες για την απόδοση του συστήματος.
- ✧ Ρουτίνα Αρχικοποίησης: Μία ρουτίνα που αρχικοποιεί το μοντέλο της εξομοίωσης και θέτει το χρόνο εξομοίωσης στο 0
- ✧ Ρουτίνα Χρονισμού: Μία ρουτίνα που ανακαλεί το επόμενο συμβάν από τη λίστα μελλοντικών συμβάντων και προωθεί την ένδειξη του ρολογιού στη χρονική στιγμή που αυτό συμβαίνει.

- ✧ Ρουτίνα Συμβάντων: Η ρουτίνα που καλείται όταν ένα συγκεκριμένο συμβάν εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης. Υπάρχει, συνήθως μία ξεχωριστή ρουτίνα συμβάντος για κάθε τύπο συμβάντος στη λίστα μελλοντικών συμβάντων.

Για τη σχεδίαση και αξιολόγηση της λειτουργίας του υπό μελέτη υβριδικού δικτύου θα ακολουθηθεί η μέθοδος της εξομοίωσης διακριτού συμβάντος, χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο εξομοιωτή διακριτού συμβάντος.

2.3 Network Simulator 3 – Ns-3

Ο Network Simulator 3 ή Ns-3 είναι ένας εξομοιωτής δικτύων τύπου διακριτού συμβάντος. Ο Ns-3 σχεδιάστηκε για να εξυπηρετεί τόσο ερευνητικές όσο και εκπαιδευτικές ανάγκες εξομοίωσης δικτύων. Πρόκειται για λογισμικό ανοιχτού κώδικα (open source) που διατίθεται ελεύθερα για σκοπούς έρευνας αλλά και ανάπτυξης νέων δικτυακών τεχνολογιών.

Βασική επιδίωξη της σχεδίασης του Ns-3 είναι η ανάπτυξη του επικρατέστερου ανοικτού περιβάλλοντος εξομοίωσης για δικτυακή έρευνα. Θα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο με τις πιο πρόσφατες ανάγκες της δικτυακής έρευνας, να ενθαρρύνει τη συμμετοχή της κοινότητας χρηστών του και να επιτρέπει την επαλήθευση του λογισμικού του [22].

2.3.1 Μοντέλα εξομοίωσης

Η ανάπτυξη του εξομοιωτή Ns-3 εστιάζει στην ανάπτυξη ενός συμπαγούς πυρήνα εξομοίωσης, ο οποίος είναι καλά τεκμηριωμένος, εύκολος στη χρήση και στην αποσφαλμάτωση και που υποστηρίζει όλα τα στάδια της εξομοίωσης, από τη σχεδίαση της εξομοίωσης μέχρι τη συλλογή δεδομένων και την ανάλυσή τους. Επιπλέον, τα διαθέσιμα εργαλεία που προσφέρει το Ns-3 επιτρέπουν την ανάπτυξη μοντέλων εξομοίωσης που είναι αρκούντως ρεαλιστικά ώστε να επιτρέπουν τη χρήση του Ns-3 σε διασύνδεση με πραγματικές δικτυακές εφαρμογές και υπάρχουσες υλοποιήσεις δικτυακών πρωτοκόλων.

Ο πυρήνας εξομοίωσης του Ns-3 υποστηρίζει την έρευνα τόσο σε δίκτυα που βασίζονται στο

IP όσο και σε άλλου τύπου δίκτυα. Πάντως, η πλειοψηφία των χρηστών του Ns-3 εστιάζει σε ασύρματες / IP εξομοιώσεις που περιλαμβάνουν μοντέλα για τα πρότυπα Wi-Fi, WiMAX ή LTE όσον αφορά τα επίπεδα 1 και 2 του μοντέλου OSI, και μία πληθώρα στατικών και δυναμικών πρωτοκόλων δρομολόγησης όπως OLSR και AODV για εφαρμογές που βασίζονται στο IP πρωτόκολλο [10].

Το Ns-3 υποστηρίζει επίσης έναν χρονοπρογραμματιστή (scheduler) πραγματικού χρόνου που επιτρέπει την αλληλεπίδραση με πραγματικά συστήματα. Έτσι, οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιούν το Ns-3 για να αποστέλουν ή να δέχονται πακέτα σε ή από πραγματικές δικτυακές συσκευές.

Τέλος, έμφαση δόθηκε και στην επαναχρησιμοποίηση πραγματικών εφαρμογών. Υπάρχουν εργαλεία που βρίσκονται σε στάδιο αξιολόγησης, για την εκτέλεση, χωρίς αλλαγές, πλήρων εφαρμογών της δικτυακής στοίβας του πυρήνα του συστήματος Linux [33].

2.3.2 Στόχοι Σχεδίασης του Ns-3

Σε σύγκριση με άλλους δικτυακούς εξομοιωτές η σχεδίαση του Ns-3 διαφέρει στους βασικούς στόχους της [11].

Έμφαση στις γλώσσες C++ και Python

Πολλοί δικτυακοί εξομοιωτές χρησιμοποιούν μία παράλληλα αναπτυσσόμενη γλώσσα μοντελοποίησης για την περιγραφή των μοντέλων και τον καθορισμό της ροής των προγραμμάτων μοντελοποίησης. Το Ns-3 χρησιμοποιεί τις γλώσσες C++ και Python, επιτρέποντας στους χρήστες να εκμεταλλευτούν την πλήρη υποστήριξη και τεκμηρίωση που προσφέρουν οι συγκεκριμένες γλώσσες.

Χρήση συμβάντων με επανάκληση (Callback)

Τα συμβάντα εξομοίωσης στο Ns-3 αποτελούν απλές κλήσεις συναρτήσεων που είναι χρονοπρογραμματισμένες να εκτελεστούν σε προκαθορισμένο χρόνο εξομοίωσης. Κάθε συνάρτηση μπορεί να μετατραπεί σε ένα συμβάν και να χρονοπρογραμματιστεί η εκτέλεσή της, με την προγραμματιστική μέθοδο των επανακλήσεων (callbacks). Αυτό αφαιρεί την ανάγκη για ύπαρξη ειδικευμένων συναρτήσεων “χειριστών” που ελέγχουν κεντρικά την επεξεργασία των συμβάντων σε όλα τα αντικείμενα της εξομοίωσης. Η επανάκληση χρησιμοποιείται επίσης για τη δραστική μείωση των αλληλεξαρτήσεων κατά τη μεταγλώττιση μεταξύ των αντικειμένων της εξομοίωσης [31].

Ευέλικτος πυρήνας με επιπλέον επίπεδο βοηθητικών αντικειμένων

Το Ns-3 προσφέρει ένα πολύ δυνατό και ευέλικτο προγραμματιστικό περιβάλλον χαμηλού επιπέδου που παρέχει σε έμπειρους χρήστες την ευελιξία να διαμορφώσουν τις εξομοιώσεις τους με διάφορους τρόπους. Επιπλέον αυτού του χαμηλού επιπέδου, βρίσκεται ένα επίπεδο αντικειμένων – βοηθών (helpers) που παρέχουν εύκολες στη χρήση συναρτήσεις με σχετικά προκαθορισμένη συμπεριφορά. Οι χρήστες του Ns-3 μπορούν να συνδυάσουν τη χρήση τόσο χαρακτηριστικών των πιο απλών helper όσο και του πολύ ισχυρού πυρήνα για την υλοποίηση των εξομοιώσεών τους.

Έμφαση στην εξομοίωση

Η σχεδίαση της εξομοίωσης στο Ns-3 είναι προσανατολισμένη σε περιπτώσεις που επιτρέπουν στον εξομοιωτή την αλληλεπίδραση με τον πραγματικό κόσμο. Τα αντικείμενα πακέτων δεδομένων του Ns-3 αποθηκεύονται εσωτερικά με τρόπο αντίστοιχο της αποθήκευσης πακέτων σε πραγματικά λειτουργικά συστήματα, με αποτέλεσμα να είναι έτοιμα να αποσταλούν σε μία πραγματική δικτυακή διεπαφή.

Ευθυγράμμιση με διεπαφές του πραγματικού κόσμου

Οι σχεδίαση των αντικειμένων κόμβων του Ns-3 έχει βασιστεί στην αρχιτεκτονική δικτύου του λειτουργικού συστήματος Linux. Έτσι, οι σημαντικές διεπαφές και αντικείμενα (sockets, δικτυακές συσκευές) είναι ευθυγραμμισμένες με αυτές ενός υπολογιστή Linux. Αυτό το γεγονός διευκολύνει την επαναχρησιμοποίηση υπάρχοντος κώδικα και βελτιώνει τη ρεαλιστικότητα των μοντέλων, κάνοντας τη ροή των εξομοιώσεων ευκολότερα συγκρίσιμη με πραγματικά συστήματα.

Διαχείριση Διαμόρφωσης

Ο εξομοιωτής Ns-3 περιλαμβάνει ένα ενοποιημένο σύστημα ιδιοτήτων για τη διαχείριση των παραμέτρων της εξομοίωσης. Όλες οι διαχειρίσιμες επιλογές ελέγχονται από αυτό το σύστημα, με δυνατότητα επεξεργασίας ορισμάτων από τη γραμμή εντολών, τεκμηρίωση με τη χρήση του εργαλείου Doxygen και ύπαρξη υποσυστήματος διαμόρφωσης βασισμένου στη γλώσσα XML.

Απουσία περιβάλλοντος ανάπτυξης

Μέχρι στιγμής δεν έχει αναπτυχθεί ένα ενοποιημένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development Environment – IDE) για τη διαμόρφωση, αποσφαλμάτωση, εκτέλεση και οπτικοποίηση των εξομοιώσεων σε ένα παράθυρο εφαρμογής, όπως συμβαίνει σε κάποιους άλλους εξομοιωτές. Αντιθέτως, η τυπική διαδικασία ανάπτυξης πραγματοποιείται με τη χρήση της γραμμής εντολών και στη συνέχεια ενσωματώνονται ανάλογα με τις ανάγκες εργαλεία διαμόρφωσης ή οπτικοποίησης.

2.3.3 Βασικά Αντικείμενα ενός Προγράμματος Εξομοίωσης στο Ns-3

Για τη δημιουργία μίας εξομοίωσης στον Ns-3 απαιτείται η συγγραφή ενός προγράμματος σε γλώσσα C++ (script) το οποίο θα κάνει χρήση των βιβλιοθηκών του Ns-3 για την υλοποίηση των τμημάτων της υλοποίησης. Τα βασικά αντικείμενα που διευκολύνουν τη δημιουργία του

προγράμματος εξομοίωσης στο Ns-3 είναι [32]:

- ✧ Οι κόμβοι (Nodes)
- ✧ Οι εφαρμογές (Applications)
- ✧ Τα κανάλια επικοινωνίας (Channels)
- ✧ Οι δικτυακές συσκευές (Net Devices)
- ✧ Οι βοηθοί τοπολογίας (Topology Helpers)

Κόμβοι (Nodes)

Στη γλώσσα του Internet οι υπολογιστικές συσκευές που συνδέονται σε ένα δίκτυο καλούνται hosts ή κάποιες φορές end systems. Επειδή, το Ns-3 είναι ένας δικτυακός εξομοιωτής, και όχι απλά ένας εξομοιωτής Internet, προτιμήθηκε να μη χρησιμοποιηθεί ο όρος host καθώς είναι στενά συνδεδεμένος με το Internet και τα σχετικά πρωτόκολα. Αντίθετα, χρησιμοποιείται ο προερχόμενος από τη Θεωρία Γράφων όρος “κόμβος”.

Στο Ns-3 η βασική έννοια της υπολογιστικής συσκευής καλείται κόμβος. Στη γλώσσα υλοποίησης C++ η έννοια αυτή υλοποιείται από την κλάση Node. Η κλάση αυτή παρέχει τις απαραίτητες μεθόδους για τη διαχείριση των αναπαραστάσεων υπολογιστικών συσκευών σε μία εξομοίωση. Ένα αντικείμενο της κλάσης Node μπορεί να θεωρηθεί ως ένας υπολογιστής στον οποίο ο χρήστης μπορεί να προσθέσει διάφορες λειτουργίες. Έτσι, ένας κόμβος Node μπορεί να διαθέτει εφαρμογές, στοίβες πρωτοκόλων και περιφερειακές κάρτες σύνδεσης που επιτρέπουν στον υπολογιστή να επιτελέσει χρήσιμες για την εξομοίωση λειτουργίες.

Εφαρμογές (Applications)

Συνήθως το λογισμικό κατατάσσεται σε δύο κατηγορίες, το λογισμικό συστήματος και τις εφαρμογές. Το λογισμικό συστήματος αναλαμβάνει την οργάνωση των πόρων του συστήματος όπως η μνήμη, ο επεξεργαστής, οι συσκευές αποθήκευσης και τα δίκτυα. Συνήθως το λογισμικό συστήματος δε χρησιμοποιεί τους πόρους αυτούς για την ολοκλήρωση εργασιών που απαιτεί ο χρήστης. Η δεύτερη κατηγορία λογισμικού, οι εφαρμογές, είναι αυτή που πρέπει να χρησιμοποιήσει ο χρήστης για να ελέγξει και να χρησιμοποιήσει τους πόρους που ελέγχονται από το λογισμικό συστήματος για την επίτευξη κάποιου στόχου.

Στο Ns-3 δεν υπάρχει η έννοια του λειτουργικού συστήματος ή των κλήσεων συστήματος. Αντιθέτως, υπάρχει και χρησιμοποιείται η έννοια της εφαρμογής. Όπως μία εφαρμογή εκτελείται σε έναν υπολογιστή για να επιτελέσει κάποια εργασία στον πραγματικό κόσμο, έτσι και εφαρμογές Ns-3 εκτελούνται σε κάποιον κόμβο Node για να επιτελέσουν εργασίες στον εξομοιωμένο κόσμο.

Στο Ns-3 η βασική αφαιρετική έννοια που περιγράφει ένα πρόγραμμα χρήστη το οποίο δημιουργεί κάποια δραστηριότητα που πρέπει να εξομοιωθεί είναι η εφαρμογή. Αναπαρίσταται στη γλώσσα C++ από την κλάση `Application`. Η κλάση αυτή παρέχει τις μεθόδους για τη διαχείριση των αναπαραστάσεων των εφαρμογών χρήστη στο Ns-3. Οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να δημιουργούν εξειδικεύσεις, με την έννοια του όρου στον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό, και να δημιουργούν νέες εφαρμογές για τις εξομοιώσεις τους. Κάποιες εξειδικεύσεις παρέχονται από το ίδιο το Ns-3 όπως είναι οι κλάσεις `UdpEchoClientApplication` και `UdpEchoServerApplication`, που δημιουργούν εφαρμογές αποστολής και επανάληψης πακέτων μέσω του πρωτοκόλλου UDP.

Κανάλια Επικοινωνίας (Channels)

Στην πραγματικότητα ένας υπολογιστής μπορεί να συνδεθεί σε ένα δίκτυο. Το μέσο στο οποίο πραγματοποιείται η ροή των δεδομένων σε αυτό το δίκτυο ονομάζεται και κανάλι επικοινωνίας. Στην εξομοίωση της πραγματικότητας που λαμβάνει χώρα στο Ns-3, για τη σύνδεση ενός υπολογιστή σε ένα δίκτυο πρέπει να γίνει η σύνδεση ενός αντικειμένου κλάσης Node σε ένα αντικείμενο που αναπαριστά ένα κανάλι επικοινωνίας. Η κλάση που αναπαριστά αφαιρετικά ένα κανάλι επικοινωνίας στο Ns-3, πάντα σε γλώσσα C++, είναι η κλάση Channel.

Η κλάση Channel παρέχει μεθόδους για τη διαχείριση υποδικτυακών αντικειμένων επικοινωνίας και τη σύνδεση κόμβων – υπολογιστών σε αυτά. Παρέχεται και εδώ η δυνατότητα εξειδικεύσεων της κλάσης με αποτέλεσμα να υπάρχουν εξειδικεύσεις που μοντελοποιούν κανάλια επικοινωνίας τόσο απλά όσο ένα καλώδιο ή τόσο σύνθετα όπως μεγάλοι διακόπτες Ethernet ή ένας τρισδιάστατος χώρος γεμάτος εμπόδια στην περίπτωση ασύρματων δικτύων.

Κάποιες ήδη υπάρχουσες εξειδικεύσεις στο Ns-3 είναι οι CsmChannel (για την υλοποίηση ενός καναλιού όμοιου με το Ethernet), η PointToPointChannel (για απλές υλοποιήσεις καναλιών καλωδίου) και η WifiChannel για την υλοποίηση του ασύρματου μέσου σε δίκτυα τύπου WiFi.

Δικτυακές Συσκευές (Net Devices)

Οι πραγματικοί υπολογιστές για τη σύνδεση σε ένα δίκτυο επικοινωνιών χρειάζονται την ύπαρξη μίας περιφερειακής κάρτας, η οποία εγκαθίσταται στον υπολογιστή και υποστηρίζει τη διασύνδεση με ένα δίκτυο. Για τη λειτουργία της απαιτείται η ύπαρξη λογισμικού οδηγού (software driver) που ελέγχει το υλικό. Στα συστήματα UNIX και Linux οι περιφερειακές κάρτες ονομάζονται συσκευές (devices) και το λογισμικό ελέγχου οδηγός συσκευής (device driver). Δικτυακή Συσκευή (Net Device) ονομάζεται ο συνδυασμός μίας δικτυακής περιφερειακής κάρτας με τον οδηγό συσκευής.

Η ίδια έννοια χρησιμοποιείται και στο Ns-3, όπου η αφηρημένη έννοια Δικτυακή Συσκευή (Net Device) καλύπτει τόσο το λογισμικό οδηγό όσο και το εξομοιωμένο υλικό και υλοποιείται από την κλάση Net Device στη γλώσσα C++. Ένα αντικείμενο Net Device “εγκαθίσταται” σε ένα αντικείμενο Node ώστε να του επιτρέψει την επικοινωνία με άλλα αντικείμενα Nodes στην εξομοίωση μέσω μίας σύνδεση με αντικείμενα κλάσης Channel. Όπως και στην πραγματικότητα, ένα αντικείμενο Node μπορεί να συνδέεται με περισσότερα αντικείμενα Channel μέσω πολλαπλών αντικειμένων NetDevice.

Εξειδικεύσεις της αφηρημένης κλάσης NetDevice όπως οι CsmaNetDevice, PointToPointNetDevice και WifiNetDevice προσφέρουν δυνατότητες σύνδεσης σε διαφορετικά κανάλια επικοινωνίας όπως κανάλια τύπου Ethernet, Σημείου-προς-σημείο ή ασύρματα. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα ανάπτυξης νέων εξειδικεύσεων από τους χρήστες για την υποστήριξη διαφορετικών καναλιών.

Βοηθοί Τοπολογίας (Topology Helpers)

Σε ένα πραγματικό δίκτυο, υπάρχουν υπολογιστές με εγκατεστημένες περιφερειακές κάρτες δικτύου. Στο Ns-3 υπάρχουν αντικείμενα Nodes με εγκατεστημένα αντικείμενα NetDevice. Σε περιπτώσεις εξομοίωσης ιδιαίτερα μεγάλων δικτύων χρειάζεται να δημιουργηθεί μεγάλος αριθμός συνδέσεων μεταξύ αντικειμένων Node, NetDevice και Channels.

Επειδή διαδικασίες όπως η σύνδεση αντικειμένων NetDevice σε Nodes, σύνδεση NetDevices σε Channels, ανάθεση IP διευθύνσεων είναι κοινές σε όλες τις υλοποιήσεις εξομοιώσεων το Ns-3 προσφέρει ειδικά αντικείμενα που καλούνται topology helpers (βοηθοί τοπολογίας) για τη διευκόλυνση των διαδικασιών αυτών. Για παράδειγμα απαιτούνται ξεχωριστές διαδικασίες του πυρήνα του Ns-3 για τη δημιουργία μίας NetDevice, την ανάθεση μίας διεύθυνσης MAC, την εγκατάσταση της δικτυακής συσκευής σε ένα αντικείμενο Node, τη διαμόρφωση της στοίβας πρωτοκόλων και στη συνέχεια της σύνδεσης του αντικειμένου NetDevice σε ένα αντικείμενο Channel. Ακόμη περισσότερες ξεχωριστές διαδικασίες απαιτούνται στη περίπτωση σύνδεσης πολλαπλών συσκευών σε κανάλια επικοινωνίας πολλών σημείων και σύνδεσης ανεξάρτητων δικτύων σε διαδίκτυα. Τα αντικείμενα helpers

συνδυάζουν όλες αυτές τις ξεχωριστές διαδικασίες σε εύκολα στη χρήση τους μοντέλα.

2.3.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Εξομοιώσεων στο Ns-3

Για την ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μίας εξομοίωσης το Ns-3 προσφέρει μία πλήρη σειρά εργαλείων και εφαρμογών.

Η πρώτη λειτουργία που παρέχει το Ns-3 είναι η λειτουργία συλλογής πακέτων. Υπάρχει η δυνατότητα συλλογής πακέτων για κάθε ροή δεδομένων, για κάθε κόμβο του δικτύου, αλλά και για κάθε διεπαφή του κάθε κόμβου [31]. Η συλλογή πακέτων έγκειται στην αποθήκευση αρχείων τύπου .pcap κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης. Τα αρχεία αυτά παρέχουν ένα πλήθος πληροφοριών για τα πακέτα που έχουν συλλεχθεί. Μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται:

- ✧ Ο χρόνος αποστολή του κάθε πακέτου
- ✧ Οι διευθύνσεις πηγής και προορισμού για το κάθε πακέτο
- ✧ Τα πρωτόκολλα κάθε πακέτου (για παράδειγμα UDP, TCP, IP κλπ)
- ✧ Το μέγεθος του κάθε πακέτου, καθώς και το μέγεθος του κάθε υποπλαισίου

Η επεξεργασία των αρχείων αυτών γίνεται στη συνέχεια με ειδικό λογισμικό για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και στατιστικών.

Η δεύτερη δυνατότητα που παρέχει το Ns-3 είναι η λειτουργία παρακολούθησης ροών που προσφέρεται μέσω της ενότητας flowmonitor. Με την ενεργοποίηση της λειτουργίας του flowmonitor στο πρόγραμμα της εξομοίωσης καταγράφονται οι από άκρο σε άκρο ροές των δεδομένων και συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο τα ακόλουθα στοιχεία για κάθε ροή [5]:

- ✧ Χρόνος αποστολής για το πρώτο και το τελευταίο πακέτο

- ✧ Χρόνος λήψης για το πρώτο και το τελευταίο πακέτο
- ✧ Συνολικός αριθμός πακέτων που εστάλησαν
- ✧ Συνολικός αριθμός πακέτων που ελήφθησαν
- ✧ Συνολικός αριθμός bytes αποστολής
- ✧ Συνολικός αριθμός bytes λήψης

Τα στοιχεία αυτά είναι άμεσα διαθέσιμα με τη λήξη της εξομοίωσης και μπορούν να τυπωθούν στην οθόνη. Με μικρή επεξεργασία (μαθηματικές πράξεις) μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες όπως καθυστέρηση (delay), απόδοση (throughput) και άλλες. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μη εγγραφή δεδομένων στο σκληρό δίσκο, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται ουσιαστικά ο χρόνος εξομοίωσης.

Τρίτη και μεγαλύτερη ενότητα που παρέχεται για την αξιολόγηση μίας εξομοίωσης είναι η ενότητα καταγραφών (logging module). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ενεργοποιήσει διάφορα επίπεδα καταγραφών, τα οποία προσφέρουν κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης πληροφορίες για τη λειτουργία όλων των τμημάτων που χρησιμοποιούνται, τυπώνοντάς τες στην οθόνη του τερματικού [31].

Η πλήρης τεκμηρίωση, η πλούσια συλλογή βιβλιοθηκών, οι δυνατότητες συλλογής και αξιολόγησης αποτελεσμάτων αλλά και η ενσωματωμένη εγγενής υποστήριξη του προτύπου LTE για ασύρματα δίκτυα, και μάλιστα η υποστήριξη του πολύ σημαντικού πυρήνα του LTE, του Evolved Packet Core καθιστούν το Ns-3 μία πολύ αξιόλογη επιλογή για τη μοντελοποίηση και εξομοίωση του υβριδικού δικτύου PON-LTE στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Κεφάλαιο 3

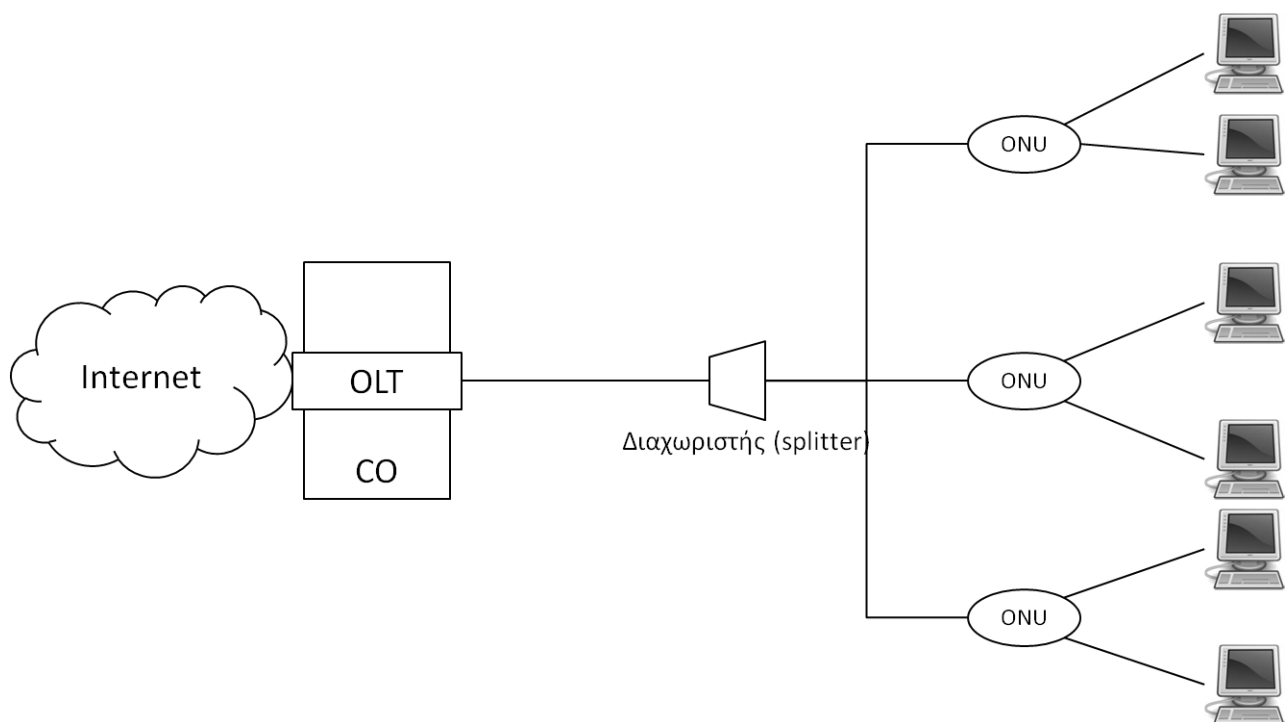
Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PON)

Με τον όρο Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks ή PON) περιγράφεται μία αρχιτεκτονική δικτύων πρόσβασης βασισμένη σε καλώδια οπτικών ινών. Ο όρος δίκτυο πρόσβασης αναφέρεται στο τμήμα εκείνο ενός δικτύου τηλεπικοινωνιών που καταλήγει και συνδέεται απευθείας στα τερματικά των τελικών χρηστών. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ένα δίκτυο PON χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του οπτικού τμήματος του υβριδικού δικτύου το οποίο στα σημεία παρουσίας συνδέεται με ένα ασύρματο δίκτυο τύπου LTE.

3.1 Θεμελιώδη Τμήματα ενός PON

Ένα δίκτυο PON είναι ένα δίκτυο σημείου-προς-πολλά σημεία (point-to-multipoint), στο οποίο παθητικοί (χωρίς κατανάλωση ενέργειας) διαχωριστές (splitters) χρησιμοποιούνται για να επιτρέψουν σε μία οπτική ίνα να εξυπηρετεί περισσότερους από έναν (συνήθως 16-128) κόμβους. Ένα δίκτυο PON αποτελείται από έναν κόμβο με την ονομασία Τερματικό Οπτικής Γραμμής (Optical Line Terminal – OLT) που βρίσκεται στο κεντρικό γραφείο (Central Office – CO) του παρόχου, και έναν αριθμό από Οπτικές Δικτυακές Μονάδες (Optical Network Units – ONU) που βρίσκονται κοντά στους τελικούς χρήστες. Ο κόμβος OLT συνδέεται με τα ONU μέσω ενός Οπτικού Δικτύου Διανομής (Optical Distribution Network – ODN). Στο επίπεδο της διάταξης τα δίκτυα PON βασίζονται στην τοπολογία δέντρου. Ο κύριος λόγος για την επιλογή αυτής της τοπολογίας είναι η ίδια η διαμόρφωση του δικτύου όπου το κεντρικό γραφείο CO του παρόχου συνδέεται με πολλαπλούς τελικούς χρήστες οι οποίοι είναι μεν διασκορπισμένοι γεωγραφικά αλλά παραμένουν ομαδοποιημένοι σε συγκεκριμένες περιοχές.

Αυτό συνεπάγεται ότι η σχέση μεταξύ του κεντρικού γραφείου και των τελικών χρηστών μπορεί να περιγραφεί ως μία σχέση ενός-προς-πολλά. Αυτή η σχέση όταν εφαρμοστεί στο οπτικό δίκτυο δίνει ως πιο εφαρμοστή τοπολογία την τοπολογία δέντρου, όπου υπάρχει μία μοναδική ρίζα και πολλαπλά φύλλα που συνδέονται μέσω κλάδων. Μεταφράζοντας αυτήν την τοπολογία σε όρους δικτύων PON τα δύο κύρια στοιχεία της τοπολογίας είναι ο κόμβος OLT που βρίσκεται στη ρίζα του δέντρου και οι κόμβοι ONU που συνδέονται στα φύλλα του δέντρου [12].



Σχήμα 3.1: Τοπολογία δέντρου ενός παθητικού οπτικού δικτύου

Το σχήμα 3.1 παρουσιάζει μία γενική σχηματική αναπαράσταση ενός δικτύου PON. Πολλαπλοί τελικοί χρήστες συνδέονται σε έναν μοναδικό κόμβο που βρίσκεται στο κεντρικό γραφείο του παρόχου διαμέσου ενός δέντρου οπτικών ινών, και έτσι σχηματίζεται το παθητικό δίκτυο. Στους τελικούς χρήστες βρίσκονται οι κόμβοι ONU, ενώ στο κεντρικό γραφείο υπάρχει ο κόμβος OLT. Το OLT είναι συνδεδεμένο από τη μία πλευρά με τα ONU και από την άλλη πλευρά με το δίκτυο πυρήνα (core network). Από την άλλη, οι κόμβοι ONU είναι συνδεδεμένοι με το OLT από τη μία πλευρά και από την άλλη συνδέονται με τους τελικούς

χρήστες.

Η σύνδεση του OLT με τα πολλαπλά ONU μέσω του δέντρου οπτικών ινών γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε μία οπτική ίνα να κατευθύνεται προς τα ONU. Το σήμα από την εξερχόμενη αυτή ίνα διαχωρίζεται (σε ισχύ) από έναν οπτικό διαχωριστή. Πολλαπλές ίνες πηγάζουν από το διαχωριστή, κάθε μία από τις οποίες μεταφέρει το σήμα από το OLT και κατευθύνεται προς ένα ONU. Σε ορισμένες περιπτώσεις κάποιες από αυτές τις ίνες διαχωρίζονται περαιτέρω. Στην αντίθετη κατεύθυνση από τα ONU προς το OLT τα ξεχωριστά σήματα από κάθε ONU αθροίζονται στον οπτικό διαχωριστή και κατευθύνονται σαν ένα σήμα στο OLT [21].

3.1.1 Τερματικό Οπτικής Γραμμής (Optical Line Terminal – OLT)

Το OLT αποτελεί το σημείο σύνδεσης του παθητικού οπτικού δικτύου με το δίκτυο κορμού. Συνήθως, βρίσκεται εγκατεστημένο στα κεντρικά γραφεία CO του τηλεπικοινωνιακού παρόχου. Το OLT κατέχει τον έλεγχο ολόκληρου του οπτικού δικτύου και είναι υπεύθυνο για το συγχρονισμό και έλεγχο των ONU, και τη γενική διαχείριση του δικτύου [21]. Στην κατερχόμενη ζεύξη (από OLT σε ONU) το OLT μεταδίδει ένα συνεχές σήμα το οποίο μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου, συγχρονισμού και διαχείρισης καθώς και τα δεδομένα που απευθύνονται στα ONU. Το OLT υπολογίζει συνεχώς και για το άμεσο μέλλον, συνήθως 1 ή 2 milisecond, την κατανομή της χωρητικότητας της ανερχόμενης ζεύξης στα ONU, βασίζοντας την απόφαση αυτή σε πληροφορίες κίνησης που λαμβάνει από τα ONU καθώς και σε επίπεδα υπηρεσίας που έχουν προκαθοριστεί, και στη συνέχεια αποστέλλει αυτόν το “χάρτη” χωρητικότητας στα ONU. Παράλληλα, ανά τακτά προκαθορισμένα διαστήματα, το OLT εκπέμπει ειδικά σήματα “ανακάλυψης”, που επιτρέπουν σε ανενεργά ONU του δικτύου να αποστείλουν τα στοιχεία τους και να ενεργοποιηθούν [12].

3.1.2 Οπτικές Δικτυακές Μονάδες (Optical Network Units - ONUs)

Οι Οπτικές Δικτυακές Μονάδες ONU αποτελούν τα σημεία παρουσίας του παθητικού οπτικού

δικτύου κοντά στους τελικούς χρήστες των υπηρεσιών που παρέχει. Βασική λειτουργία του ONU είναι η παροχή υπηρεσιών Internet, τηλεφωνίας και video στον τελικό χρήστη, μέσω της μετατροπής εισερχομένων οπτικών σημάτων σε ηλεκτρικά και αντίστροφα, καθώς και της μετατροπής πακέτων των πρωτοκόλων των εφαρμογών του χρήστη σε πακέτα πρωτοκόλου PON.

3.1.3 Οπτικό Δίκτυο Διανομής (Optical Distribution Network - ODN)

Το Οπτικό Δίκτυο Διανομής ODN ουσιαστικά αποτελείται από τα καλώδια οπτικών ινών που συνδέουν το OLT με τα ONU και από τους παθητικούς οπτικούς διαχωριστές (passive optical splitters) που διαχωρίζουν μία οπτική ίνα σε περισσότερες. Τα δίκτυα PON χρησιμοποιούν μονότροπες οπτικές ίνες (single-mode optical fiber) οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικά μήκη κύματος για την κατερχόμενη και την ανερχόμενη ζεύξη. Επίσης, χρησιμοποιούν παθητικούς διαχωριστές οι οποίοι δεν χρειάζονται ηλεκτρικό ρεύμα για να λειτουργήσουν. Οι διαχωριστές αυτοί διανέμουν ένα μοναδικό εισερχόμενο σήμα (από το OLT) εξίσου σε περισσότερες εξερχόμενες γραμμές στην κατερχόμενη ζεύξη, ενώ στην ανερχόμενη συνδυάζουν πολλαπλά εισερχόμενα οπτικά σήματα από τα ONU σε μία γραμμή προς το OLT [1].

3.2 Τεχνολογίες Δικτύων PON

Η έρευνα και ανάπτυξη στα παθητικά οπτικά δίκτυα τα τελευταία χρόνια έχει ακολουθήσει δύο διαφορετικές κατευθύνσεις και έχει οδηγήσει στην προτυποποίηση δύο διακριτών τεχνολογιών για υλοποίηση δικτύων PON. Τα δύο πρότυπα που έχουν αναδειχθεί ως κυρίαρχα είναι τα πρότυπα Gigabit-PON (G-PON) και Ethernet-PON (E-PON).

3.2.1 Δίκτυα G-PON

Η τεχνολογία παθητικών οπτικών δικτύων G-PON έχει προτυποποιηθεί από τον οργανισμό International Telecommunication Union (ITU) με το πρότυπο ITU-T G.984.

Το πρότυπο λειτουργίας G-PON ορίζει τους ακόλουθους ρυθμούς δεδομένων για την κατερχόμενη και την ανερχόμενη ζεύξη [14]:

✧ Κατερχόμενη ζεύξη: 1.244,16Mbps / 2.488.32 Mbps

✧ Ανερχόμενη ζεύξη: 155,52 Mbps / 622,08 Mbps / 1.244,16Mbps / 2.488,32Mbps

Σε σχέση με το μοντέλο OSI, ένα δίκτυο G-PON λειτουργεί κατά μεγάλο βαθμό στο επίπεδο 1 (φυσικό επίπεδο – physical layer). Σημαντική όμως για τη λειτουργία του είναι και η σχεδίαση του επιπέδου σύνδεσης δεδομένων (επίπεδο 2 στο μοντέλο OSI – data link layer), ενώ ένα μέρος των λειτουργιών του αγγίζει το επίπεδο 3 (επίπεδο δικτύου).

Λειτουργία δικτύων PON στο φυσικό επίπεδο

Η κύρια λειτουργία του δικτύου PON είναι η λειτουργία του στο υποεπίπεδο σύγκλισης εκπομπής (G-PON transmission convergence layer – GTC) και έγκειται στην παροχή πολυπλεξίας μεταξύ του OLT και των συνδεδεμένων με αυτό ONU [12].

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ένα δίκτυο PON είναι ένα δίκτυο μονής οπτικής ίνας με τοπολογία δέντρου. Το OLT βρίσκεται στη ρίζα του δέντρου και τα ONU στα φύλλα. Στην κατερχόμενη ζεύξη η οπτική ισχύς διαχωρίζεται εξίσου στις διακλαδώσεις του δέντρου. Το σήμα της κατερχόμενης ζεύξης είναι συνεχές και παράλληλα με τα δεδομένα χρηστών μεταφέρει πληροφορίες συγχρονισμού, ελέγχου και διαχείρισης. Αντίθετα, τα σήματα από τα ONU εκπέμπονται κατά ριπάς και βασίζονται στους “χάρτες κατανομής εύρους” (bandwidth maps) που αποστέλλονται κάθε 1 ή 2 ms από το OLT. Ένα ONU επιτρέπεται να εκπέμψει μόνο

όταν έχει ρητή άδεια από τον χάρτη κατανομής εύρους. Κατά τη διάρκεια εκπομπής του αποστέλλει μία ριπή δεδομένων χρηστή και πληροφοριών ελέγχου.

Ένα βασικό ζήτημα που τίθεται από την ίδια τη δομή ενός δικτύου PON είναι το πρόβλημα της ταυτόχρονης άφιξης στο OLT εκπομπών από δύο ή περισσότερα ONU. Για να επιτευχθεί η εναλλασσόμενη άφιξη των εκπομπών στο OLT με ακρίβεια και στα κατάλληλα διαστήματα, κάθε ONU πρέπει να διαμορφώνει κατάλληλα τον επιτρεπόμενο χρόνο αποστολής που λαμβάνει από το OLT βάσει του χρόνου round-trip, δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για το σήμα να φτάσει από το OLT στο ONU και να επιστρέψει, συν το χρόνο που απαιτείται για την επεξεργασία στο ONU. Ο κόμβος OLT μετράει το χρόνο round-trip για το κάθε ONU κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησής του και το προγραμματίζει λαμβάνοντας υπόψη του αυτόν τον χρόνο round-trip.

Μία άλλη απαίτηση για το φυσικό επίπεδο λειτουργίας του PON είναι η ανακάλυψη νέων ONU, είτε πρόκειται για νέους κόμβους ONU είτε για υπάρχοντες κόμβους που βρίσκονταν εκτός λειτουργίας για διάφορους λόγους, όπως βλάβες στην οπτική ίνα ή απώλεια ισχύος. Για την κάλυψη της απαίτησης αυτής το OLT εκπέμπει περιοδικά ένα σήμα που εξουσιοδοτεί όσα ONU δεν έχουν ενεργοποιηθεί στο PON να αποστείλουν την ταυτότητά τους. Καθώς ο χρόνος round-trip των νέων ONU είναι ακόμη άγνωστος, το OLT ανοίγει ένα “παράθυρο ανακάλυψης” δηλαδή ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο μόνο μη ενεργοποιημένα ONU επιτρέπεται να εκπέμψουν.

Είναι πιθανόν περισσότερα από ένα μη ενεργοποιημένα ONU να επιδιώξουν να ενεργοποιηθούν την ίδια στιγμή. Εάν οι εκπομπές τους συμπέσουν κανένα δεν θα τα καταφέρει. Για αυτό το λόγο το πρωτόκολλο ορίζει ότι κάθε ONU εισάγει μία τυχαία καθυστέρηση πριν απαντήσει στην πρόσκληση του OLT για ενεργοποίηση. Έτσι, ακόμη κι αν οι εκπομπές από δύο ONU συγκρουστούν κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ανακάλυψης, κάποια στιγμή θα αποστείλουν ξεχωριστά αιτήματα ανακάλυψης.

Άλλες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται και οφείλονται τόσο στην ιδιαίτερη τοπολογία δέντρου και τη σημείο-προς-πολλά-σημεία φύση των δικτύων PON αλλά και στις

γενικές απαιτήσεις ενός δικτύου πρόσβασης είναι και οι ακόλουθες [12]:

- ✧ καθορισμός μίας δομής πλαισίου για αποδοτική χρήση ακόμη κι αν τα πλαίσια δεδομένων της ανερχόμενης ζεύξης δεν ταιριάζουν με ακρίβεια με το μέγεθος μίας ριπής από κάποιο ONU
- ✧ Προστασία του PON από ONU που μπορεί να επιδιώξουν να υποκλέψουν υπηρεσίες ή να πλήξουν την εμπιστευτικότητα της κίνησης συνδρομητών
- ✧ Διάρθρωση των φορτίων που επιτρέπει την εύκολη αναγνώριση ανεξάρτητων ροών και την κατηγοριοποίηση των ροών σε ξεχωριστά διαχειρίσιμες κλάσεις κίνησης
- ✧ Εξασφάλιση της σύνδεσης OLT και ONU από παρακολουθήσεις, αλλοιώσεις και υποκλοπή υπηρεσιών
- ✧ Μέτρηση της ποιότητας της σύνδεσης τόσο σε οπτικούς όρους όσο και σε όρους ρυθμού λαθών
- ✧ Βελτίωση της εσωτερικής ποιότητας της οπτικής σύνδεσης
- ✧ Παροχή καναλιών σηματοδότησης και ελέγχου για το ίδιο το PON
- ✧ Λήψη μέτρων για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε περιόδους χαμηλής δικτυακής κίνησης, χωρίς υποχώρηση του επιπέδου υπηρεσίας

Λειτουργία δικτύων PON στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε, ένα δίκτυο πρόσβασης λειτουργεί σε ένα βαθμό και στο επίπεδο 2 του μοντέλου OSI. Για ένα δίκτυο βασισμένο σε τεχνολογίες Ethernet, όπως είναι στην ουσία του ένα δίκτυο PON, μία από τις πιο σημαντικές έννοιες που διέπουν τη λειτουργία του είναι η έννοια των εικονικών τοπικών δικτύων (Virtual Local Area Network – VLAN). Ένα σημαντικό τμήμα του υλικού, του λογισμικού και της διαχείρισης ενός PON αναλώνεται στην ταξινόμηση της κίνησης σε διαφορετικά VLAN και βάσει αυτού στη δρομολόγησή της στο κατάλληλο σημείο του δικτύου με το κατάλληλο επίπεδο υπηρεσίας.

Πλαίσια πρωτοκόλου GTC

Τα πλαίσια που χρησιμοποιεί το πρωτόκολο GTC προσφέρουν δυνατότητες πολυπλεξίας και δυναμικής ανάθεσης χωρητικότητας. Ορίζονται δύο τύποι πλαισίων GTC, ένα για την κατερχόμενη και ένα για την ανερχόμενη ζεύξη.

Στην κατερχόμενη ζεύξη κάθε πλαίσιο GTC έχει μήκος 125μs. Περιλαμβάνει ένα τμήμα με την ονομασία Physical Control Block (PCBd) και ένα τμήμα με το φορτίο δεδομένων. Το PCBd περιέχει πληροφορίες πρόσβασης στο μέσο και καθορίζει το χρονικό διάστημα στο οποίο μπορεί να αποστείλει δεδομένα το κάθε ONU στην ανερχόμενη ζεύξη.

Η ανερχόμενη ζεύξη αποτελείται από εικονικά πλαίσια GTC μήκους επίσης 125μs. Τα εικονικά αυτά πλαίσια αποτελούνται από ριπές εκπομπών από διαφορετικά ONU. Κάθε ριπή ξεκινά με ένα τμήμα που ονομάζεται Physical Layer Overhead upstream (PLOu). Κάθε PLOu ξεκινάει με ένα σήμα που διευκολύνει το δέκτη του OLT να συγχρονιστεί με τον πομπό του συγκεκριμένου ONU. Το PLOu περιέχει επίσης πληροφορίες κατάστασης για το ONU. Ένα άλλο σήμα που ακολουθεί υποδηλώνει την έναρξη της ριπής δεδομένων [14].

3.2.2 Δίκτυα E-PON

Τα δίκτυα E-PON αποτελούν μία νέα προσθήκη στην οικογένεια των πρωτοκόλων Ethernet. Το πρωτόκολο E-PON αποτελεί ένα πρότυπο του οργανισμού Institute of Electrical and

Electronic Engineers και περιλαμβάνεται στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.3.

Τα δίκτυα E-PON εξυπηρετούν αντίστοιχες τοπολογίες δέντρου τύπου σημείο-προς-πολλά-σημεία με τα δίκτυα G-PON και λειτουργούν με ρυθμούς δεδομένων της τάξης του 1Gbps και στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη ενώ υπάρχουν υλοποιήσεις που φτάνουν αυτούς τους ρυθμούς μέχρι και τα 10Gbps. Τα πρωτόκολλα Ethernet λειτουργούν στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων του μοντέλου OSI [14].

Η στοίβα πρωτοκόλων του E-PON είναι αντίστοιχη της στοίβας του κλασικού Ethernet σημείου-προς-σημείο. Το E-PON ορίζει επιπλέον τα υποεπίπεδα Gigabit Media-Independent interface (GMII) για τη διασύνδεση του φυσικού με το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων και το Multipoint Media Access Control (MPMC) για το συντονισμό της πρόσβασης των ONU του E-PON στο κοινό οπτικό μέσο του δικτύου.

Το πρωτόκολλο MPMC επιτελεί τη λειτουργία της ανακάλυψης και του καθορισμού της απόστασης των ONU, ενώ επίσης παρέχει και έναν μηχανισμό διαιτησίας για τον έλεγχο της πρόσβασης στο μέσο πολλαπλών ONU στην ανερχόμενη ζεύξη. Η διαδικασία του υπολογισμού της απόστασης, υπολογίζει τον χρόνο Round-Trip-Time για κάποιο ONU μέσω της αποστολής ειδικών πλαισίων του πρωτοκόλου MPMC, για την αποφυγή συγκρούσεων στην ανερχόμενη ζεύξη. Για την ανακάλυψη νέων ONU ειδικά πακέτα MPMC εκπέμπονται περιοδικά από το OLT, τα οποία λαμβάνονται από τα ONU, που όπως και στα δίκτυα G-PON αποστέλλουν αιτήμα σύνδεσης αφού εισάγουν μία τυχαία καθυστέρηση στην απάντησή τους [14].

Για την εξυπηρέτηση της κατά ριπάς κίνησης στην ανερχόμενη ζεύξη και στο E-PON ο συγχρονισμός των ONU πραγματοποιείται από το OLT. Το σήμα στην κατερχόμενη ζεύξη είναι συνεχές και εξυπηρετεί το συγχρονισμό, καθώς τα ONU αντλούν τις πληροφορίες για την κατά ριπάς εκπομπή τους από τα πλαίσια MPMC που περιέχονται σε αυτό.

Τα πακέτα που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία στο δίκτυο E-PON μεταφέρονται με

κλασικά πλαίσια τύπου Ethernet. Τόσο τα πακέτα δεδομένων, όσο και αυτά πρωτοκόλων ελέγχου και διαχείρισης όπως το MPMC περικλείονται σε πλαίσια Ethernet.

3.3 Μοντελοποίηση ενός PON στον εξομοιωτή Ns-3

Ο δικτυακός εξομοιωτής Ns-3 δεν περιλαμβάνει κάποια ξεχωριστή ενότητα για τη μοντελοποίηση ενός πρωτοκόλου παθητικού δικτύου είτε τύπου G-PON είτε E-PON. Για τη μοντελοποίηση του παθητικού οπτικού τμήματος του υβριδικού δικτύου που αποτελεί το βασικό αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής θα χρησιμοποιηθούν τα βασικά εργαλεία που προσφέρουν οι βιβλιοθήκες του Ns-3, με κάποιες αναγκαίες τροποποιήσεις.

Όπως έχει αναδειχθεί, ένα παθητικό οπτικό δίκτυο βασίζεται σε μία τοπολογία δέντρου τύπου σημείο-προς-πολλά-σημεία. Το Ns-3 δε διαθέτει κάποιο αντικείμενο που να προσομοιάζει σε τέτοιες συνδέσεις, εκτός βέβαια από τα αντικείμενα εξομοίωσης ασύρματων συνδέσεων που δεν είναι δόκιμα για την υπό εξέταση περίπτωση. Για την απλοποίηση της μοντελοποίησης, όμως, οι συνδέσεις σημείου-προς-πολλά σημεία μπορούν να αναλυθούν σε πολλαπλές συνδέσεις σημείου-προς-σημείο, χωρίς ιδιαίτερη αποδυνάμωση του μοντέλου. Για τη μοντελοποίηση τέτοιων συνδέσεων το Ns-3 διαθέτει ένα κατάλληλο αντικείμενο-βοηθό, το αντικείμενο `PointToPointHelper` [32]. Αυτό το αντικείμενο θα αποτελέσει τη βάση της εξομοίωσης του PON δικτύου στο Ns-3.

Τα αντικείμενα `PointToPointHelper` χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση μίας σύνδεσης σημείου-προς-σημείο μεταξύ δύο κόμβων. Με τη χρήση τους, εγκαθιστούν από μία δικτυακή συσκευή σημείου-προς-σημείο σε κάθε έναν από τους δύο κόμβους. Επίσης, εγκαθιδρύουν ένα κανάλι σημείου-προς-σημείο μεταξύ των δύο συσκευών. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τα χαρακτηριστικά των δικτυακών συσκευών ώστε να προσομοιάζουν στη σύνδεση που θέλει να εξομοιώσει [32]. Τα βασικά χαρακτηριστικά που μπορούν να καθοριστούν είναι:

♣ Το μέγιστο μέγεθος της μονάδας αποστολής του επιπέδου MAC (Maximum

Transmission Unit – Mtu) σε bytes

- ✧ Το ρυθμό μετάδοσης της συσκευής σε bps
- ✧ ένα μοντέλο λαθών το οποίο χρησιμοποιείται για την εξομοίωση απωλειών πακέτων

Επίσης, μπορούν να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά του καναλιού, το βασικό από τα οποία είναι ο χρόνος καθυστέρησης μεταξύ των δύο κόμβων.

Για τη μοντελοποίηση επομένως ενός γενικού παθητικού οπτικού δικτύου, θα δημιουργηθεί ένας κόμβος ο οποίος θα ενέχει το ρόλο του OLT και δύο κόμβοι που θα αναλάβουν τους ρόλους των ONU. Μεταξύ του κόμβου OLT και καθενός από τα ONU θα εγκατασταθεί από μία σύνδεση PointToPoint, τα χαρακτηριστικά της οποίας θα τεθούν ως ακολούθως:

- ✧ Mtu: 65000 bytes
- ✧ Ρυθμός μετάδοσης: 1Gbps και στις δύο κατευθύνσεις (όπως σε ένα δίκτυο E-PON)
- ✧ Καθυστέρηση: 5ms, που είναι ο αναμενόμενος ρυθμός διάδοσης σε μία οπτική ίνα μήκους ενός χιλιομέτρου, που θα είναι και η απόσταση κάθε ONU από το OLT.

Όπως προκύπτει, η μοντελοποίηση που επιλέχθηκε αφαιρεί την ανάγκη για τη μοντελοποίηση οπτικών διαχωριστών. Επίσης αφαιρεί την ανάγκη για την υλοποίηση κάποιου μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης και αποφυγής συγκρούσεων, καθώς πλέον δεν υπάρχει κοινά διαμοιραζόμενο μέσο. Έτσι, δεν υπάρχει μοντελοποίηση κάποιου πρωτοκόλου όπως το GTC του πρωτοκόλου G-PON ή το MPMC του πρωτοκόλου E-PON καθώς κάτι τέτοιο θα απαιτούσε τη δημιουργία νέας βιβλιοθήκης Ns-3, κάτι που θεωρήθηκε ότι βρίσκεται εκτός των στόχων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Συνοψίζοντας, το μοντέλο που επιλέχθηκε για την προσομοίωση του παθητικού οπτικού τμήματος του υπό εξέταση υβριδικού δικτύου πρόσβασης σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εξομοιώνει τις ταχύτητες μετάδοσης και διάδοσης ενός τυπικού δικτύου PON, χωρίς την πολυπλοκότητα ενός δικτύου με κοινό μέσο.

Κεφάλαιο 4

Ασύρματα Δίκτυα LTE

Με τον όρο Long Term Evolution (LTE) περιγράφεται ένα πρότυπο ασύρματων επικοινωνιών για υψηλής ταχύτητας μεταφορά δεδομένων σε συσκευές κινητής τηλεφωνίας και άλλα τερματικά. Το πρότυπο αυτό χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής για τη δημιουργία του ασύρματου τμήματος του υβριδικού δικτύου πρόσβασης.

4.1 Το Πρότυπο LTE

Το πρότυπο LTE αποτελεί εξέλιξη των παλαιότερων προτύπων επικοινωνιών GSM/EDGE (Global System for Mobile Communications/Enhanced Data rates for GSM Evolution) και UMTS/HSPA (Universal Mobile Telecommunications System/High Speed Packet Access) [7]. Μία ουσιαστική διαφορά στην ανάπτυξη του LTE αποτελεί το γεγονός ότι σχεδιάστηκε από την αρχή με στόχο την εξέλιξη της ασύρματης τεχνολογίας ώστε να υποστηρίζει αποκλειστικά υπηρεσίες βασισμένες στη μεταγωγή πακέτου, σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρότυπα που αναφέρθηκαν και που βασιζόνταν στη μεταγωγή κυκλώματος [25]. Βασική επιδίωξη της σχεδίασης του LTE είναι η παροχή συνδεσιμότητας IP μεταξύ των τερματικών συσκευών και ενός δικτύου πακέτων δεδομένων (για παράδειγμα το Internet) με έμφαση στην κινητικότητα των τερματικών συσκευών χωρίς διακοπές στις εφαρμογές τελικού χρήστη [6].

4.1.1 Βασικά Συστατικά Μέρη ενός Δικτύου LTE

Ο όρος LTE περιλαμβάνει την εξέλιξη του ασύρματου μέσου μέσω του προτύπου Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) που περιλαμβάνει το δίκτυο πρόσβασης Access Stratum (AS). Συνοδεύεται, όμως, από την ανάπτυξη μη ασύρματων τμημάτων υπό τον

όρο System Architecture Evolution (SAE) που περιλαμβάνει το δίκτυο πυρήνα που ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC) [17].

Από κοινού το LTE και το SAE αποτελούν το πρότυπο Evolved Packet System (EPS).

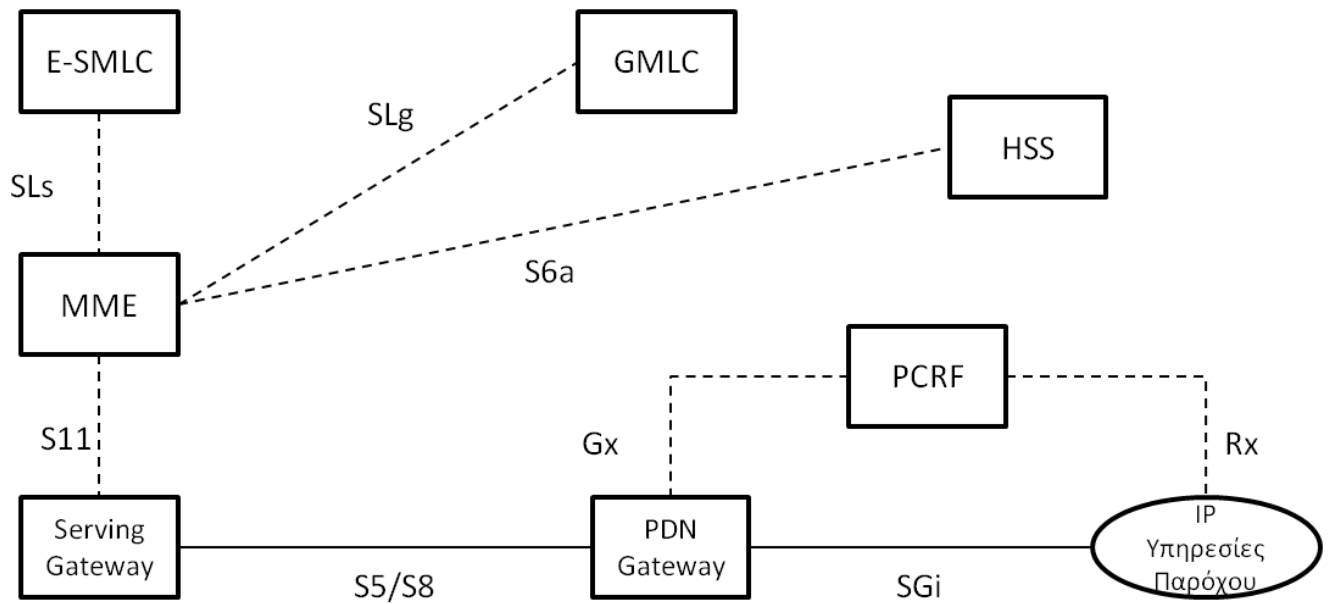
Το δίκτυο πυρήνα EPC αποτελείται από τους εξής βασικούς λογικούς κόμβους [8]:

- ✧ την πύλη προς το εξωτερικό δίκτυο Packet Data Network (PDN) Gateway (P-GW)
- ✧ τον κόμβο εξυπηρέτησης Service Gateway (S-GW)
- ✧ τον κόμβο Mobile Management Entity (MME)
- ✧ τη μονάδα Evolved Serving Mobile Location Centre (E-SMLC)

Η σχεδίαση του EPC περιλαμβάνει και άλλους λογικούς κόμβους με βοηθητικές λειτουργίες [27]:

- ✧ τον κόμβο Policy Control and Charging Rules Function (PCRF), που επιβάλλει την εφαρμογή πολιτικών σύμφωνα με το προφίλ του κάθε συνδρομητή
- ✧ τον κόμβο Home Subscriber Server (HSS) όπου αποθηκεύονται δεδομένα συνδρομής του κάθε χρήστη, όπως για παράδειγμα τα δίκτυα πακέτων στα οποία δικαιούται να έχει πρόσβαση
- ✧ τον κόμβο Gateway Mobile Location Center (GMLC) που παρέχει υποστήριξη για υπηρεσίες εντοπισμού (Location Services – LCS)

Για την επικοινωνία μεταξύ των τμημάτων του EPC το πρότυπο LTE ορίζει ανεξάρτητα πρότυπα επικοινωνίας. Τα βασικά και δευτερεύοντα τμήματα του EPC καθώς και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ των τμημάτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.1 [27].



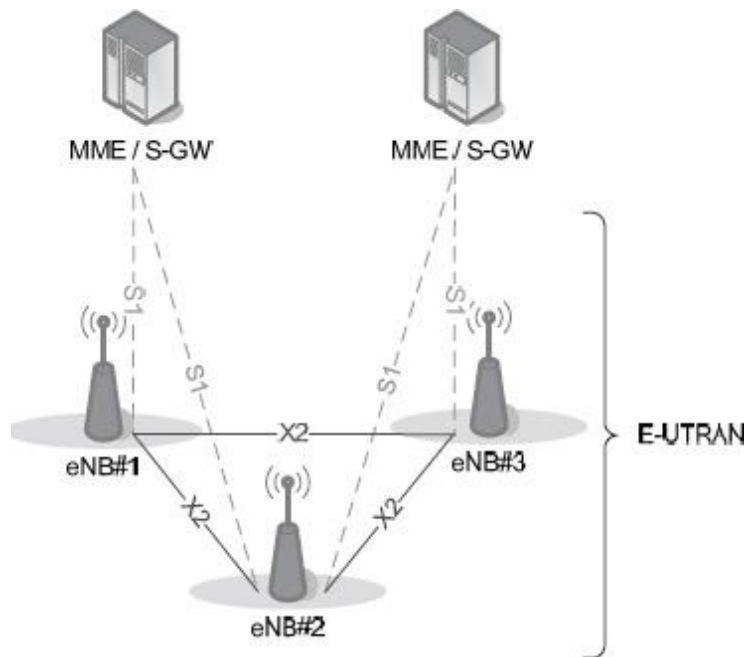
Εικόνα 4.1: Βασικοί κόμβοι δικτύου EPC και πρωτόκολα επικοινωνίας μεταξύ τους

Το δίκτυο πρόσβασης AS αποτελείται από δύο βασικά μέρη:

- ♣ τους κόμβους enhanced Node B (eNB)
- ♣ τις τερματικές συσκευές χρήστη User Equipment (UE)

Τα τμήματα του δικτύου πρόσβασης καθώς και τα πρότυπα διασύνδεσής τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.2 [27].

Η λειτουργία του EPS βασίζεται στην έννοια του φορέα EPS (EPS bearer) για τη δρομολόγηση κίνησης IP από ένα εξωτερικό δίκτυο προς έναν κόμβο UE και αντίστροφα. Στην ουσία ο φορέας EPS είναι μία ροή πακέτων IP με συγκεκριμένη ένδειξη ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS).



Εικόνα 4.2: Δίκτυο AS και πρωτόκολα διασύνδεσης

Από κοινού το πρωτόκολο E-UTRAN και το EPC εγκαθιδρύουν και απελευθερώνουν φορείς EPS ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών του τελικού χρήστη. Είναι δυνατόν να εκκινηθούν πολλαπλοί φορείς για έναν χρήστη ώστε να προσφέρονται ροές πακέτων με διαφορετικό QoS ή συνδέσεις με διαφορετικά δίκτυα. Για παράδειγμα ένας χρήστης μπορεί ταυτόχρονα να εμπλέκεται σε μία κλήση τηλεφωνίας (VoIP) και παράλληλα να περιηγείται στον παγκόσμιο ιστό μέσω του πρωτοκόλου HTTP, όπου κάθε μία εφαρμογή εξυπηρετείται από διαφορετικούς φορείς EPS, πιθανότατα με διαφορετικές ενδείξεις ποιότητας υπηρεσίας [27].

Οι βασικές λειτουργίες των μερών του EPC και του E-UTRAN έχουν ως εξής [25]:

- PDN Gateway: Ο κόμβος P-GW είναι υπεύθυνος για την IP διευθυνσιοδότηση των συσκευών UE, καθώς και για την επιβολή των κανόνων QoS. Επίσης, αναλαμβάνει την κατανομή των IP πακέτων στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) στους διάφορους φορείς EPS με τη χρήση των Traffic Flow Templates (TFTs).
- Service Gateway: Όλα τα IP πακέτα δρομολογούνται μέσω του κόμβου S-GW προς τις τερματικές συσκευές. Ο κόμβος αυτός επίσης λειτουργεί ως κόμβος κινητικότητας για

τους φορείς EPS, όταν η συσκευή UE μετακινείται μεταξύ διαφορετικών κόμβων eNB.

- ✧ Mobile Management Entity: Λειτουργεί ως κόμβος ελέγχου για τη σηματοδότηση μεταξύ των UE και του δικτύου πυρήνα. Συγκεκριμένα, αναλαμβάνει:
 - τη διαχείριση των φορέων EPS δηλαδή την εγκαθίδρυση, τη διατήρηση και την απελευθέρωση φορέων,
 - τη διαχείριση της σύνδεσης που περιλαμβάνει τη δημιουργία της σύνδεσης καθώς και την ασφάλεια μεταξύ δικτύου και UE, και
 - τη διαχείριση της συνδεσιμότητας με δίκτυα παλαιού τύπου, όπως την παράδοση (handover) τηλεφωνικών κλήσεων σε άλλα κυψελωτά δίκτυα
- ✧ Evolved Serving Mobile Location Centre: Ο κόμβος E-SMLC αναλαμβάνει το συντονισμό και τον προγραμματισμό των πόρων που είναι απαραίτητοι για τον εντοπισμό μίας UE συνδεδεμένης στο E-UTRAN. Επίσης, υπολογίζει την τελική θέση της UE καθώς και την εκτιμώμενη ταχύτητά της.
- ✧ Enhanced Node B: οι κόμβοι eNB είναι υπεύθυνοι για όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με το ασύρματο μέσο. Πιο συγκεκριμένα είναι επιφορτισμένοι με:
 - τη διαχείριση των ασύρματων συχνοτήτων, τον προγραμματισμό τους και τη δυναμική κατανομή τους στις UE συσκευές
 - τη συμπίεση των επικεφαλίδων IP των προς αποστολή πακέτων
 - την ασφάλεια του μέσου με κρυπτογράφηση όλων των δεδομένων
 - τον εντοπισμό των συσκευών UE
 - τη διασύνδεση με το EPC, με την επικοινωνία με το MME και τις πληροφορίες της

4.1.2 Ποιότητα Υπηρεσιών και Φορείς EPS

Όπως αναφέρθηκε, σε μία τυπική περίπτωση χρήσης σε ένα δίκτυο LTE, σε μία συσκευή UE μπορούν να εκτελούνται διάφορες εφαρμογές, η κάθε μία με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service – QoS). Για παράδειγμα μπορεί να πραγματοποιείται μία κλήση τηλεφωνίας μέσω IP την ίδια στιγμή με την περιήγηση στον παγκόσμιο ιστό και με τη μεταφορά ενός αρχείου μέσω του πρωτοκόλλου FTP. Η τηλεφωνική κλήση έχει πιο αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά την καθυστέρηση και τη διακύμανση της καθυστέρησης (delay jitter) σε σχέση με την εφαρμογή περιήγησης και την FTP εφαρμογή, ενώ για το FTP απαιτούνται πολύ χαμηλότεροι ρυθμοί απώλειας πακέτων. Για να εξυπηρετηθούν αυτές τις διαφορετικές απαιτήσεις στο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών, εγκαθιδρύονται διαφορετικοί φορείς στο EPS, που ο καθένας συσχετίζεται με διαφορετικό QoS [27].

Σε γενικές γραμμές, οι φορείς μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες βάσει της φύσης της ποιότητας υπηρεσίας που υποστηρίζουν:

Φορείς Ελάχιστου Εγγυημένου Ρυθμού Μετάδοσης (Minimum Guaranteed Bit Rate (GBR) bearers): Οι φορείς αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές όπως η τηλεφωνία VoIP. Συσχετίζονται με μία τιμή εγγυημένου ρυθμού μετάδοσης (GBR) για την οποία κατανέμονται μόνιμοι και αποκλειστικοί πόροι (από μία λειτουργία του eNodeB) κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης του φορέα. Ρυθμοί μετάδοσης μεγαλύτεροι του ελάχιστου GBR μπορεί να επιτραπούν και να επιτευχθούν, εάν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι. Σε τέτοιες περιπτώσεις μία παράμετρος Μέγιστου Ρυθμού Μετάδοσης (Maximum Bit Rate – MBR), θέτει ένα άνω όριο στο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να αναμένεται από έναν φορέα GBR.

Μη GBR φορείς (Non-GBR bearers): Αυτοί οι φορείς δεν εγγυόνται κανένα συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές όπως περιηγητές ιστού, ή μεταφορές FTP. Για αυτούς τους φορείς δεν γίνεται καμία ανάθεση μόνιμων πόρων κατά τη διάρκεια αρχικοποίησής τους.

Στο δίκτυο πρόσβασης, αποτελεί ευθύνη του eNodeB να εξασφαλίζει ότι προσφέρεται το

απαιτούμενο QoS επίπεδο για έναν φορέα. Κάθε φορέας χαρακτηρίζεται από έναν δείκτη QoS Class Identifier (QCI) και από μία ένδειξη προτεραιότητας ανάθεσης και διακράτησης ARP (Allocation and Retention Priority).

Κάθε κλάση QCI χαρακτηρίζεται από μία ένδειξη προτεραιότητας, μία τιμή καθυστέρησης πακέτου και από έναν αποδεκτό ρυθμό απώλειας πακέτων. Έχουν προτυποποιηθεί εννέα τέτοιες κλάσεις QCI έτσι ώστε οι κατασκευαστές υλικού και λογισμικού δικτύων LTE να γνωρίζουν τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών και να προσφέρουν την αντίστοιχη συμπεριφορά. Έτσι, ο χρήστης και ο πάροχος υπηρεσιών LTE μπορούν να αναμένουν ομοιόμορφη συμπεριφορά διαχείρισης κίνησης ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή του εξοπλισμού του κόμβου eNodeB. Ο Πίνακας 4.3 συνοψίζει τις προτυποποιημένες κλάσεις QCI [18].

QCI	Τύπος Φορέα	Προτεραιότητα	Καθυστέρηση Πακέτου (ms)	Ρυθμός Απώλειας Πακέτων	Παραδείγματα Υπηρεσιών
1	GBR	2	100	10^{-2}	Φωνή σε επίπεδο συζήτησης
2	GBR	4	150	10^{-3}	Φωνή σε επίπεδο συζήτησης (live streaming)
3	GBR	5	300	10^{-6}	Βίντεο (buffered streaming)
4	GBR	3	50	10^{-3}	Παιχνίδια πραγματικού χρόνου
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Φωνή, Βίντεο (live streaming)
6	Non-GBR	7	100	10^{-3}	Βίντεο (buffered streaming)
7	Non-GBR	6	300	10^{-6}	Βίντεο (buffered streaming)
8	Non-GBR	8	300	10^{-6}	Εφαρμογές TCP (WWW, e-mail, FTP, p2p)
9	Non-GBR	9	300	10^{-6}	διαμοιρασμός αρχείων)

Πίνακας 4.3: Προτυποποιημένες κλάσεις QCI

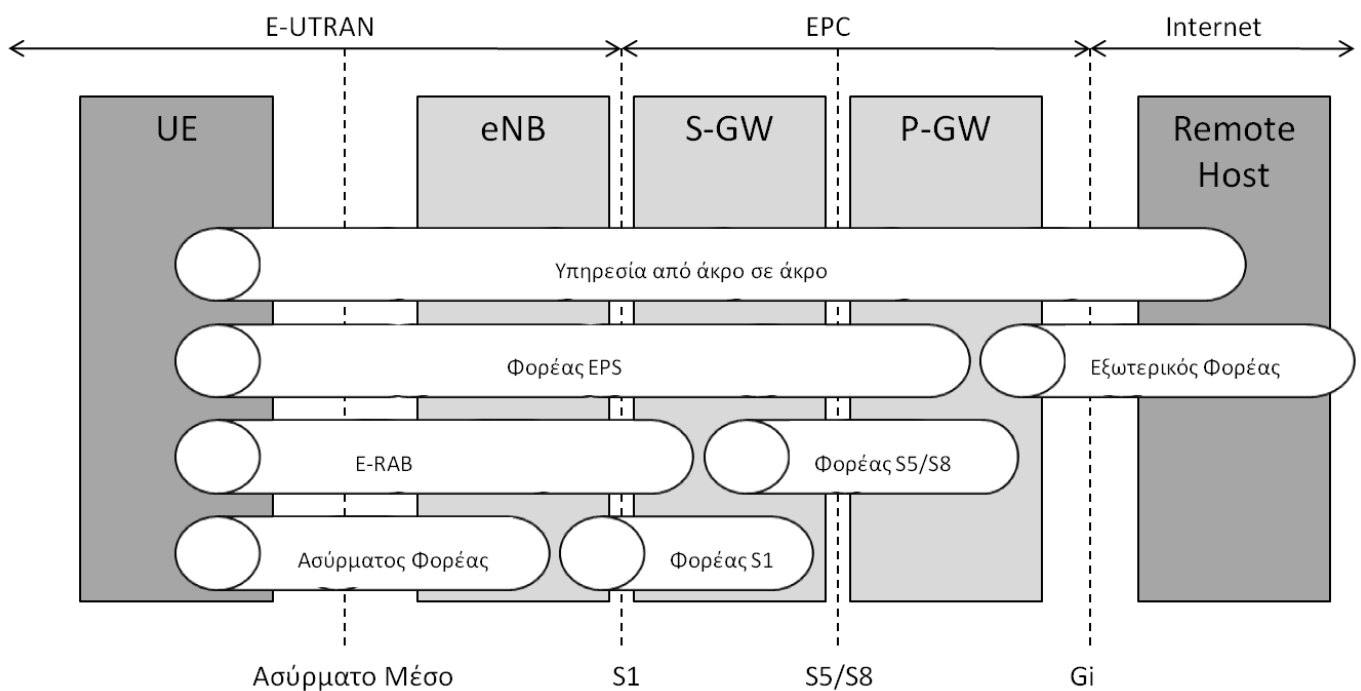
Η προτεραιότητα και η τιμή καθυστέρησης πακέτου καθορίζουν την κατάσταση στην οποία

τίθεται το πρωτόκολλο RLC, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, καθώς και το πως ο χρονοδρομολογητής του επιπέδου MAC διαχειρίζεται τα πακέτα που αποστέλλονται μέσω του φορέα (π.χ όσον αφορά πολιτικές χρονοδρομολόγησης, πολιτικές διαχείρισης ουράς και πολιτικές διαμόρφωσης ρυθμού μετάδοσης). Για παράδειγμα ένα πακέτο με υψηλότερη προτεραιότητα αναμένεται να χρονοδρομολογηθεί νωρίτερα από ένα πακέτο με χαμηλή προτεραιότητα. Για φορείς με χαμηλό επιτρεπτό ρυθμό απώλειας πακέτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κατάσταση με επιβεβαίωση (AM mode) για την εξασφάλιση της επιτυχούς παράδοσης του πακέτου μέσω του ασύρματου μέσου.

Η ένδειξη ARP ενός φορέα χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια εγκαθίδρυσης ενός φορέα, για την απόφαση εάν ο ζητούμενος φορέας πρέπει να εγκατασταθεί σε περίπτωση συμφόρησης του ασύρματου μέσου. Μετά την επιτυχή του εγκατάσταση, το ARP ενός φορέα δεν έχει καμία επίδραση στον τρόπο χειρισμού των πακέτων του φορέα. Αυτός επηρεάζεται αποκλειστικά από τις άλλες παραμέτρους QoS όπως τα QCI, GBR και MBR.

Ένας φορέας EPS διασχίζει διαφορετικά πρωτόκολλα διεπαφών κατά την πορεία από ή προς τις συσκευές UE. Διασχίζει τη διεπαφή S5/S8 από τον κόμβο P-GW προς τον κόμβο S-GW, τη διεπαφή S1 από το S-GW προς τον κόμβο eNodeB και το ασύρματο μέσο (τη διεπαφή LTE-Uu) από τον κόμβο eNodeB προς τις UE συσκευές. Στην κάθε διεπαφή που διατρέχει ο φορέας EPS, αντιστοιχείται σε έναν φορέα χαμηλότερου επιπέδου, που έχει τη δική του ταυτότητα φορέα. Κάθε κόμβος πρέπει να καταγράφει τις σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών ταυτοτήτων φορέων στις διαφορετικές διεπαφές με τις οποίες συνδέεται.

Ένας φορέας S5/S8 μεταφέρει τα πακέτα ενός φορέα EPS μεταξύ P-GW και S-GW. Ο κόμβος S-GW αποθηκεύει το συσχετισμό ένα-προς-ένα μεταξύ ενός S1 φορέα και του S5/S8 φορέα. Ο φορέας S1 μεταφέρει τα πακέτα του EPS φορέα από το S-GW προς έναν κόμβο eNodeB. Ένας φορέας ασύρματου μέσου E-UTRAN (E-UTRAN Radio Access Bearer – E-RAB) αποτελεί τη συνένωση του S1 φορέα με τον αντίστοιχο ασύρματο φορέα. Ο κόμβος eNodeB αποθηκεύει την ένα-προς-ένα σχέση μεταξύ του ασύρματου φορέα και του S1 φορέα. Η αρχιτεκτονική της υπηρεσίας του συνολικού φορέα EPS παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4 [27].



Εικόνα 4.4: Συνολική Αρχιτεκτονική Φορέα EPS

Τα πακέτα IP που συνδέονται με τον ίδιο φορέα EPS λαμβάνουν την ίδια αντιμετώπιση όσον αφορά την προώθησή τους (χρονοδρομολόγηση, διαχείριση ουράς, καθορισμός ρυθμού μετάδοσης, διαμόρφωση επιπέδου RLC). Αυτό σημαίνει, ότι για την παροχή διαφορετικών επιπέδων QoS απαιτείται η εγκαθίδρυση διαφορετικών EPS φορέων για κάθε ροή, και τα IP πακέτα πρέπει να φιλτράρονται προς τον κατάλληλο φορέα.

Το φιλτράρισμα των πακέτων IP στους κατάλληλους φορείς EPS πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικών δομών ροής κίνησης, των Traffic Flow Templates (TFT). Τα TFT χρησιμοποιούν πληροφορίες που αντλούν από τις επικεφαλίδες των πακέτων IP όπως διευθύνσεις IP προορισμού και πηγής και αριθμός θύρας πρωτοκόλλου TCP για να διαχωρίσουν πακέτα διαφορετικών ροών όπως VoIP κίνηση από FTP κίνηση, έτσι ώστε κάθε πακέτο να αποσταλλεί μέσω του EPS φορέα με το κατάλληλο επίπεδο QoS. Ένα TFT ανερχόμενης ζεύξης (Uplink TFT – UL TFT) στις συσκευές UE φιλτράρει τα IP πακέτα στην κατεύθυνση της ανερχόμενης ζεύξης. Αντίστοιχα, ένα TFT κατερχόμενης ζεύξης (Downlink TFT – DL TFT) στον κόμβο P-GW επιτελεί την ίδια λειτουργία στην κατερχόμενη ζεύξη.

Κατά τη διαδικασία πρόσδεσης μίας συσκευής UE στο δίκτυο, ανατίθεται στην UE μία

διεύθυνση IP από τον κόμβο P-GW και εγκαθιδρύεται ένας φορέας EPS, που ονομάζεται φορέας προεπιλογής (default bearer) και παραμένει καθ'όλη τη διάρκεια της σύνδεσης με το εξωτερικό δίκτυο πακέτων δεδομένων έτσι ώστε να προσφέρει συνεχή σύνδεση IP με το δίκτυο αυτό. Οι τιμές των παραμέτρων QoS του αρχικού αυτού φορέα καθορίζονται από τον κόμβο MME, σύμφωνα με πληροφορίες συνδρομής που λαμβάνονται από τον κόμβο HSS. Ο κόμβος P-GW μπορεί να επηρεάσει τις τιμές αυτές σε συνεργασία με τον κόμβο PCRF. Επιπλέον φορείς, που ονομάζονται αποκλειστικοί φορείς (dedicated bearers) μπορούν επίσης να εγκαθιδρυθούν σε οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια ή μετά την ολοκλήρωση της πρόσδεσης της συσκευής UE στο δίκτυο. Ένας αποκλειστικός φορέας μπορεί να είναι είτε τύπου GBR είτε τύπου non-GBR, ενώ ο φορέας προεπιλογής είναι πάντα τύπου non-GBR καθώς είναι μόνιμος. Η διαφοροποίηση μεταξύ του φορέα προεπιλογής και των αποκλειστικών φορέων πρέπει να είναι ευδιάκριτη στο ασύρματο μέσο. Κάθε φορέας έχει το δικό του επίπεδο QoS, και εάν περισσότεροι από έναν φορέα έχουν εγκαθιδρυθεί για μία συσκευή UE πρέπει να συσχετιστούν με κατάλληλα TFT. Οι αποκλειστικοί φορείς μπορούν να εγκαθιδρυθούν από το δίκτυο ή να απαιτηθούν από τη συσκευή UE. Οι αποκλειστικοί φορείς για μία συσκευή μπορεί να παρέχονται από έναν ή περισσότερους κόμβους P-GW στους οποίους μπορεί να είναι συνδεδεμένη η συσκευή UE.

Οι παράμετροι QoS των αποκλειστικών φορέων λαμβάνονται στον κόμβο P-GW από τον κόμβο PCRF και προωθούνται στον κόμβο S-GW. Ο κόμβος MME αναλαμβάνει τη διάφανη προώθηση των τιμών που λαμβάνει από τον S-GW μέσω της διεπαφής S1 προς το ασύρματο μέσο E-UTRAN.

4.2 Βασικές Διεπαφές και Πρωτόκολα Επικοινωνίας

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο τμήμα, το πρότυπο LTE ορίζει μία σειρά από διεπαφές για την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών κόμβων, καθένα από τα οποία έχει τη δική του στοίβα πρωτοκόλων.

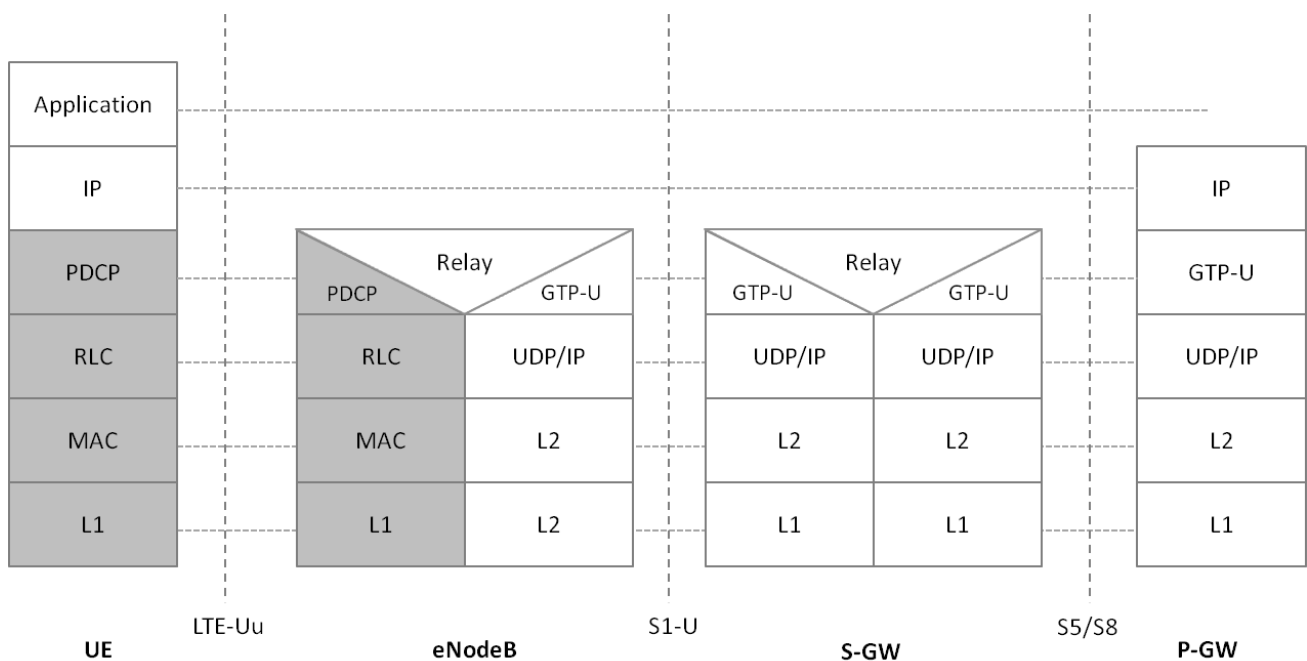
Οι βασικότερες διεπαφές που ορίζονται είναι οι:

- ✎ S5/S8 για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων P-GW και S-GW του EPC

- ✧ S1 για την επικοινωνία μεταξύ του S-GW και των κόμβων eNodeB. Διακρίνεται σε S1 Control Plane για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου και S1 User Plane για τη μεταφορά δεδομένων χρήστη
- ✧ LTE-Uu για την επικοινωνία των κόμβων eNodeB με τις συσκευές UE

Τα βασικά πρωτόκολλα στα οποία βασίζονται οι διεπαφές επικοινωνίας που ορίζονται από το LTE είναι τα:

- ✧ GPRS Tunnelling Protocol (GTP)
- ✧ Radio Resource Control (RRC)
- ✧ Packet Data Convergence Protocol (PDCP)
- ✧ Radio Link Control (RLC)
- ✧ Medium Access Control (MAC)



Εικόνα 4.5: Στοιβες Πρωτοκόλων για τις βασικές διεπαφές επικοινωνίας του LTE

Οι στοιβες πρωτοκόλων για τις βασικές διεπαφές που ορίζει το LTE στο επίπεδο δεδομένων χρήστη παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5[27].

Η λειτουργία των βασικών πρωτοκόλων που χρησιμοποιούνται στο LTE παρουσιάζονται στη συνέχεια.

4.2.1 Πρωτόκολο GTP-U

Ένα πακέτο IP που κατευθύνεται προς μία συσκευή UE ενθυλακώνεται σε ένα πακέτο του πρωτοκόλου GTP-U και στη συνέχεια μέσω των πρωτοκόλων UDP/IP δρομολογείται μέσω tunnelling στη διεπαφή S5/S8 μεταξύ των κόμβων P-GW – S-GW και στη διεπαφή S1-U μεταξύ του S-GW και του eNodeB όπου είναι προσκολλημένη η συσκευή UE. Ο φορέας EPS στον οποίο ανήκει το πακέτο IP του χρήστη εξυπηρετείται από κατώτερους φορείς S5/S8 για τη μεταφορά από P-GW σε S-GW και S1 για τη μεταφορά από S-GW σε eNodeB. Οι φορείς αυτοί αναγνωρίζονται από το συνδυασμό των αναγνωριστικών τελικού σημείου GTP (Tunnelling End ID - TEID) και των διευθύνσεων IP πηγής και προορισμού [27].

4.2.2 Πρωτόκολο RRC

Το πρωτόκολο RRC λειτουργεί στο επίπεδο ελέγχου και διαχειρίζεται τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου μεταξύ eNodeB και UE. Οι βασικές διαδικασίες που προσφέρονται από το πρωτόκολο είναι η αποστολή πληροφοριών ελέγχου είτε κοινών που απευθύνονται σε όλες τις UE είτε και αποκλειστικών που απευθύνονται σε μία συγκεκριμένη συσκευή UE καθώς και η ειδοποίηση των UE για την ύπαρξη εισερχόμενης ροής [27].

Οι διαδικασίες του πρωτοκόλου RRC βασίζονται στην κατάσταση RRC στην οποία βρίσκεται η UE συσκευή. Υπάρχουν δύο καταστάσεις RRC:

- ♣ Η κατάσταση RRC_IDLE στην οποία η UE εκτελεί επιλογή και επανεπιλογή κυψέλης, δηλαδή επιλέγει σε ποια διαθέσιμη κυψέλη θα συνδεθεί

- ✧ Η κατάσταση RRC_CONNECTED στην οποία διατίθενται ασύρματοι πόροι στη UE συσκευή για να διευκολυνθεί η μεταφορά δεδομένων

Οι λειτουργικές περιοχές που καλύπτονται από το RRC είναι:

- ✧ Αποστολή Πληροφοριών Συστήματος (System Information) κοινών προς όλες τις UE συσκευές
- ✧ Έλεγχος Σύνδεσης, που περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες εγκαθίδρυσης, μετατροπής και απελευθέρωσης μίας σύνδεσης RRC. Καλύπτει τις λειτουργίες ειδοποίησης εισερχομένων, ενεργοποίηση φορέων δεδομένων ελέγχου και δεδομένων χρήστη, λειτουργίες παράδοσης εντός LTE και διαμόρφωσης των κατώτερων πρωτοκόλων
- ✧ Παράδοση σε ασύρματα δίκτυα παλαιότερης τεχνολογίας (όπως GSM ή και UMTS)
- ✧ Διαμόρφωση και αναφορά μετρήσεων για υποστήριξη κινητικότητας συσκευών UE
- ✧ Υποστηρικτικές λειτουργίες όπως αποστολή αποκλειστικών πληροφοριών ελέγχου και πληροφοριών ικανότητας του ασύρματου μέσου

4.2.3 Πρωτόκολο PDCP

Το επίπεδο PDCP παρέχει τις ακόλουθες υπηρεσίες:

- ✧ Συμπίεση και αποσυμπίεση επικεφαλίδων πακέτων δεδομένων
- ✧ Υπηρεσίες ασφαλείας τόσο στο επίπεδο ελέγχου (Control Plane) όσο και στο επίπεδο δεδομένων χρήστη (User Plane).
 - κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση και για τα δύο επίπεδα
 - προστασία ακεραιότητας πακέτων και επιβεβαίωση για το επίπεδο ελέγχου

- ✧ Υπηρεσίες υποστήριξης παράδοσης κατά την κίνηση μίας UE από έναν eNodeB σε κάποιον άλλο
- ✧ Απόρριψη πακέτων στο User Plane λόγω λήξης της διάρκειάς τους (timeout)

Όπως είναι εμφανές από τις προσφερόμενες υπηρεσίες του, το επίπεδο PDCP διαχειρίζεται ροές δεδομένων τόσο στο control plane όσο και στο user plane επικοινωνώντας αντίστοιχα με τα επίπεδα RRC και IP.

4.2.4 Πρωτόκολο RLC

Το πρωτόκολο RLC βρίσκεται μεταξύ του “ανώτερου” πρωτοκόλου PDCP και του “κατώτερου” MAC. Το RLC λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις [27]:

- ✧ Διαφανής κατάσταση (Transparent Mode). Σε αυτήν την κατάσταση το RLC δεν επεμβαίνει στα πακέτα που λαμβάνει από το PDCP. Χρησιμοποιείται μόνο για τη μετάδοση κάποιων πακέτων του πρωτοκόλου RRC.
- ✧ Κατάσταση χωρίς επιβεβαίωση (Unacknowledged Mode). Στην κατάσταση αυτή το RLC προσφέρει τις εξής υπηρεσίες:
 - Τεμαχισμός των PDCP πακέτων για να ταιριάζουν με τις προδιαγραφές που θέτει το MAC επίπεδο
 - Ταξινόμηση στη σωστή σειρά των πακέτων που λαμβάνονται από το MAC επίπεδο και επανένωσή τους για τη δημιουργία PDCP πακέτων
 - Εντοπισμός διπλότυπων πακέτων RLC

Η κατάσταση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως από εφαρμογές πραγματικού χρόνου, ευαίσθητες σε καθυστερήσεις, με ανοχή σε λάθη (real time, delay-sensitive, error tolerant applications) όπως η τηλεφωνία μέσω IP (VoIP).

- ✧ Κατάσταση με επιβεβαίωση (Acknowledged Mode). Επιπρόσθετα των υπηρεσιών που παρέχει η κατάσταση χωρίς επιβεβαίωση, στην κατάσταση με επιβεβαίωση παρέχεται η υπηρεσία επαναποστολής πακέτων που δεν ελήφθησαν σωστά. Γι'αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την υποστήριξη εφαρμογών όπως περιήγηση ιστού και μεταφορά αρχείων.

4.2.5 Πρωτόκολο MAC

Το πρωτόκολο MAC είναι το χαμηλότερο υποεπίπεδο του επιπέδου Data Link (βάσει του μοντέλου OSI) της αρχιτεκτονικής LTE. Το πρωτόκολο αυτό επικοινωνεί με το χαμηλότερο επίπεδο του φυσικού μέσου με κανάλια μεταφοράς και με το ανώτερο πρωτόκολο RLC με λογικά κανάλια. Έτσι, το MAC πολυπλέκει και αποπολυπλέκει κανάλια μεταφοράς με λογικά κανάλια, χρησιμοποιώντας πακέτα MAC που ονομάζονται Transport Blocks (TBs) [27].

Οι βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλου είναι:

- ✧ Χρονοδρομολόγηση (Scheduling)

Ο χρονοδρομολογητής του πρωτοκόλου MAC κατανέμει τους διαθέσιμους ασύρματους πόρους σε μία κυψέλη στις υπάρχουσες συσκευές UE αλλά και στους υπάρχοντες ασύρματους φορείς που κάθε UE χρησιμοποιεί

- ✧ Μεταφορά Πληροφοριών Χρονοδρομολόγησης

Επειδή ο χρονοδρομολογητής βρίσκεται στους κόμβους eNodeB, πρέπει να υπάρχει ενημέρωση από τις συσκευές UE για την ποσότητα δεδομένων που υπάρχουν προς αποστολή. Οι αναφορές κατάστασης του buffer (Buffer Status Reports – BSR) αποστέλλονται από τις συσκευές UE στον eNodeB για να βοηθήσουν τον χρονοδρομολογητή στην κατανομή των πόρων στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink).

- ✧ Διαδικασία Τυχαίας Πρόσβασης (Random Access Procedure)

Η διαδικασία τυχαίας πρόσβασης χρησιμοποιείται όταν μία συσκευή UE στην οποία δεν έχουν κατανεμηθεί ασύρματοι πόροι διαθέτει δεδομένα προς αποστολή.

✧ Εναρμόνιση Συγχρονισμού Ανερχόμενης Ζεύξης (Uplink Timing Alignment)

Η διαδικασία αυτή είναι πολύ χρήσιμη για την αποφυγή επικάλυψης της αποστολής ανερχόμενης ζεύξης μίας συσκευής UE με αυτές άλλων συσκευών που διαθέτουν δεδομένα προς αποστολή.

✧ Διακεκομμένη Λήψη (Discontinuous Reception – DRX)

Η λειτουργία DRX μπορεί να διαμορφωθεί για μία UE συσκευή που βρίσκεται σε κατάσταση RRC_CONNECTED ώστε αυτή να μην παρακολουθεί συνεχώς τα κανάλια κατερχόμενης ζεύξης (downlink). Η παραμετροποίηση της λειτουργίας DRX χρησιμοποιείται για τη διατήρηση μίας ισορροπίας μεταξύ της απαίτησης για διάρκεια ζωής της μπαταρίας στην UE συσκευή και μικρής καθυστέρησης στη μετάδοση δεδομένων. Για την αντιμετώπιση αυτών των δύο αντικρουόμενων απαιτήσεων υπάρχουν δύο DRX διάρκειες, ένας σύντομος κύκλος DRX και ένας μακρύς κύκλος DRX. Η μετάβαση από τον έναν κύκλο στον άλλο, ή στην κατάσταση συνεχούς λήψης, πραγματοποιείται είτε με τη χρήση ενός χρονομέτρου είτε μέσω ρητών εντολών από τον eNodeB.

✧ Πολυπλεξία και Ιεράρχηση Λογικών Καναλιών

Στην κατερχόμενη ζεύξη η πολυπλεξία και ιεράρχηση των λογικών καναλιών πραγματοποιείται εξ'ολοκλήρου από το επίπεδο MAC του κόμβου eNodeB. Στην ανερχόμενη ζεύξη αυτή η λειτουργία πρέπει να εξασφαλίζει ότι η UE συσκευή ικανοποιεί τις QoS απαιτήσεις που έχουν τεθεί για κάθε ασύρματο φορέα.

4.3 Υλοποίηση Προτύπου LTE στον Network Simulator 3

Η βασική έκδοση του Ns-3 περιλαμβάνει μία ενότητα για τη βασική εξομοίωση ενός δικτύου LTE. Δίνεται η δυνατότητα για την εξομοίωση κόμβων eNodeB και UE χωρίς όμως τη δυνατότητα εξομοίωσης του EPC τμήματος. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε η χρήση μίας διακλάδωσης στην ανάπτυξη του Ns-3 και συγκεκριμένα της έκδοσης LTE-EPC Network Simulator (LENA). Πάντως στην τελευταία επίσημη σταθερή έκδοση του Ns-3 (ns-3.14.1 με ημερομηνία έκδοσης 5 Ιουνίου 2012) αποφασίστηκε να συνενωθούν η επίσημη έκδοση με την έκδοση LENA.

4.3.1 Βασικές Αρχές Σχεδίασης

Παρόλο που η υλοποίηση του LTE στην έκδοση LENA παρέχει αρκετά μεγαλύτερη λειτουργικότητα από τη βασική έκδοση, λόγω της πολυπλοκότητας της εξομοίωσης ελήφθησαν κάποιες αποφάσεις κατά το σχεδιασμό που οδήγησαν σε αναπόφευκτες απλοποιήσεις.

Οι βασικές αρχές κατά τη σχεδίαση του LENA διακρίνονται σε δύο τμήματα, στις βασικές αρχές σχεδίασης των πρωτοκόλων του ασύρματου μέσου που ενυπάρχουν εξολοκλήρου στους κόμβους eNodeB και τις συσκευές UE, και τις αρχές σχεδίασης του EPC [30].

Αρχές Σχεδίασης Ασύρματου Μέσου

1. Στο επίπεδο του ασύρματου μέσου, το επίπεδο της λεπτομέρειας της εξομοίωσης θα πρέπει να φτάνει τουλάχιστον μέχρι το επίπεδο του Resource Block (RB) που είναι και η βασική μονάδα που χρησιμοποιείται για την κατανομή ασύρματων πόρων. Δίχως αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας δεν είναι εφικτό να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια η χρονοδρομολόγηση των πακέτων και παρεμβολές μεταξύ κελιών. Κι αυτό γιατί η χρονοδρομολόγηση πακέτων γίνεται ανά Resource Block και ένα eNodeB μπορεί να εκπέμπει σε ένα υποσύνολο των διαθέσιμων RB και έτσι να παρεμβληθεί με άλλα eNB μόνο στα RB στα οποία εκπέμπει [2].
2. Ο εξομοιωτής θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει μοντέλα που περιέχουν δεκάδες κόμβους eNB και εκατοντάδες συσκευές UE. Αυτό αποκλείει τη χρήση ενός εξομοιωτή του επιπέδου σύνδεσης (link level), ενός εξομοιωτή δηλαδή του οποίου το ασύρματο μέσο μοντελοποιείται με λεπτομέρεια που φτάνει το επίπεδο συμβόλων. Αυτό θα συνεπαγόταν μία ανάγκη για μοντελοποίηση του φυσικού επιπέδου με όλες τις επεξεργασίες σημάτων, κάτι που θα επέβαλε τεράστιες υπολογιστικές απαιτήσεις και πολυπλοκότητα που θα περιορίζε σημαντικά τις δυνατότητες του εξομοιωτή. Τέτοιοι εξομοιωτές όπου έχουν υλοποιηθεί περιορίζονται ουσιαστικά στη μοντελοποίηση δικτύων με ένα eNB και ένα ή λίγα UE [2].

3. Ο εξομοιωτής θα πρέπει να επιτρέπει τη διαμόρφωση διαφορετικών κελιών έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες παρόχων. Οι συχνότητες και το εύρος που χρησιμοποιούνται από τα διαφορετικά κελιά πρέπει να μπορούν να επικαλύπτονται έτσι ώστε να επιτρέπεται να υποστηρίζονται λύσεις δυναμικής αδειοδότησης ραδιοφάσματος. Ο υπολογισμός των παρεμβολών πρέπει να διαχειρίζεται κατάλληλα τέτοιες περιπτώσεις.
4. Για να είναι το μοντέλο εξομοίωσης όσο πιο αντιπροσωπευτικό του πρωτοκόλλου LTE γίνεται, αλλά και για να προσεγγίζει εφαρμογές του πρωτοκόλλου σε συστήματα του πραγματικού κόσμου, ο εξομοιωτής πρέπει να υποστηρίζει την υλοποίηση του χρονοδρομολογητή του επιπέδου MAC που έχει δημοσιεύσει από τον οργανισμό FemtoForum. Αυτή η διεπαφή αναμένεται να χρησιμοποιείται από κατασκευαστές εξοπλισμού LTE για την υλοποίηση αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης και διαχείρισης του ασύρματου μέσου. Εισάγοντας την υποστήριξη για αυτή τη διεπαφή, καθίσταται δυνατή η χρήση του εξομοιωτή από κατασκευαστές και παρόχους για εξομοίωση σε ένα δοκιμαστικό περιβάλλον ακριβώς των ίδιων αλγορίθμων που θα αναπτυχθούν σε ένα πραγματικό σύστημα [20].
5. Η μονάδα εξομοίωσης LTE του εξομοιωτή θα πρέπει να περιλαμβάνει τη δική της υλοποίηση της διεπαφής που έχει δημοσιευθεί από το FemtoForum. Δεν προαπαιτείται καμία συμβατότητα, ούτε στο επίπεδο αρχείων συστήματος ούτε στο επίπεδο δομών δεδομένων, με εμπορικές υλοποιήσεις της ίδιας διεπαφής. Έτσι, οποτεδήποτε κάποια εμπορική υλοποίηση του MAC χρονοδρομολογητή χρησιμοποιείται με τον εξομοιωτή, θα πρέπει να παρεμβάλεται ένα επίπεδο συμβατότητας. Αυτή η απαίτηση κρίθηκε απαραίτητη για να επιτρέψει στον εξομοιωτή να παραμένει ανεξάρτητος από εμπορικές λύσεις. Εξάλλου, η διεπαφή που ορίζεται από το FemtoForum, αποτελεί μόνο μία λογική προδιαγραφή, και αφήνεται στους κατασκευαστές ο τρόπος με τον οποίο θα υλοποιηθεί σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού.

Αρχές Σχεδίασης EPC

1. Υποστηρίζεται μόνο η σύνδεση με δίκτυα πακέτων δεδομένων IPv4 (σε αντίθεση με το

πρότυπο LTE που υποστηρίζει και IPv6 δίκτυα)

2. Οι λογικοί κόμβοι S-GW και P-GW ενσωματώνονται σε έναν κόμβο S-GW/P-GW με αποτέλεσμα να μην υπάρχει υλοποίηση της διεπαφής S5/S8
3. Η υλοποίηση δεν υποστηρίζει σενάρια κινητικότητας μεταξύ δύο ή περισσότερων S-GW
4. Ένας από τους βασικούς στόχους της έκδοσης LENA είναι η ακριβής εξομοίωση της απόδοσης από άκρο σε άκρο ρεαλιστικών εφαρμογών. Για αυτό είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε εφαρμογή που ορίζεται στη βασική έκδοση του ns-3 και χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα TCP ή UDP
5. Για την ακριβή εξομοίωση σεναρίων με την παρουσία πολλαπλών κόμβων eNB μοντελοποιήθηκαν με ακρίβεια τα πρωτόκολλα επικοινωνίας δεδομένων χρήστη μεταξύ eNB και S-GW/P-GW
6. Μία συσκευή UE θα πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιεί διάφορες εφαρμογές με διαφορετικό επίπεδο QoS. Έτσι η υλοποίηση επιτρέπει την υποστήριξη πολλαπλών EPS φορέων ανά συσκευή, και είναι εφικτή η κατηγοριοποίηση κίνησης TCP/UDP είτε στην UE κατά την ανερχόμενη ζεύξη είτε στον P-GW στην κατερχόμενη ζεύξη
7. Το EPC μοντέλο του εξομοιωτή εστιάζει κυρίως στο επίπεδο δεδομένων χρήστη. Έτσι η ακριβής μοντελοποίηση του επιπέδου ελέγχου δεν αποτελεί απαίτηση του συστήματος και οι απαραίτητες συναλλαγές αυτού του επιπέδου εξομοιώνονται με απλουστευμένο τρόπο με άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ των αντικειμένων-κόμβων του μοντέλου.
8. Κύριο αντικείμενο του εξομοιωτή είναι η μοντελοποίηση ενεργών χρηστών σε κατάσταση ECM_CONNECTED. Γι'αυτό το λόγο οι λειτουργίες που έχουν να κάνουν με την κατάσταση ECM_IDLE (όπως ανίχνευση και ειδοποίηση μίας UE συσκευής) δε μοντελοποιούνται καθόλου.

9. Στο συγκεκριμένο στάδιο του εξομοιωτή η μοντελοποίηση της παράδοσης κατά τη μετακίνηση από eNodeB σε eNodeB δεν αποτελεί απαίτηση της σχεδίασης. Επειδή όμως αποτελεί μελλοντικό στόχο, η διαχείριση των φορέων EPS από τους κόμβους eNB και S-GW/P-GW έχει υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί όταν προστεθεί και η υποστήριξη παράδοσης.

4.3.2 Μοντελοποίηση Βασικών Πρωτοκόλων

Οι βασικές αρχές σχεδίασης έχουν επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο μοντελοποιούνται τα βασικά πρωτόκολα που ορίζονται από το πρότυπο LTE [19].

Πρωτόκολο RRC

Όπως προκύπτει από τις βασικές αρχές σχεδίασης, δεν υπάρχει υλοποίηση του επιπέδου ελέγχου του προτύπου LTE. Έτσι, καθώς δεν υποστηρίζεται η αποστολή RRC μηνυμάτων μέσω του ασύρματου μέσου, η αντίστοιχη επικοινωνία στοιχείων ελέγχου γίνεται με άμεση κλήση συναρτήσεων μεταξύ των αντικειμένων που υλοποιούν τις οντότητες eNB και UE. Οι συναρτήσεις αυτές αναλαμβάνουν τη διαχείριση της σύνδεσης eNB και UE, καθώς και την εγκατάσταση και απελευθέρωση ασύρματων φορέων.

Πρωτόκολο PDCP

Η υλοποίηση του πρωτοκόλου PDCP στον Ns-3 υποστηρίζει μόνο τη μεταφορά δεδομένων τόσο στο επίπεδο ελέγχου όσο και στο επίπεδο δεδομένων χρήστη. Έτσι δεν υποστηρίζονται οι ακόλουθες λειτουργίες:

- ✧ συμπίεση και αποσυμπίεση επικεφαλίδων IP
- ✧ κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση δεδομένων ελέγχου και δεδομένων χρήστη
- ✧ προστασία και επαλήθευση ακεραιότητας δεδομένων ελέγχου
- ✧ απόρριψη διπλότυπων και απόρριψη βάσει χρονομέτρου

Πρωτόκολο RLC

Μία βασική απλοποίηση του πρωτοκόλου RLC όπως αυτό υλοποιείται στο ns-3 έγκειται στο ότι από τις τρεις καταστάσεις λειτουργίας που ορίζονται στο πρότυπο LTE (διαφανής, χωρίς επιβεβαίωση, με επιβεβαίωση) υλοποιούνται μόνο οι καταστάσεις με επιβεβαίωση (Acknowledge Mode – AM) και χωρίς επιβεβαίωση (Unacknowledge Mode – UM).

Πρωτόκολο MAC

Στα πλαίσια της υλοποίησης του πρωτοκόλου MAC στον Ns-3 υλοποιείται μία διεπαφή χρονοδρομολογητή (MAC Scheduler Interface) καθώς και δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης [20]. Ο πρώτος αλγόριθμος είναι ο Round Robin, ένας από τους πιο απλούς αλγορίθμους κατανομής πόρων, ενώ ο δεύτερος είναι ο αλγόριθμος Proportional Fair Scheduler. Επίσης, υπάρχει μοντελοποίηση της λειτουργίας μεταφοράς πληροφοριών χρονοδρομολόγησης μέσω των Buffer Status Reports που αποστέλλουν οι συσκευές UE [30].

Κεφάλαιο 5

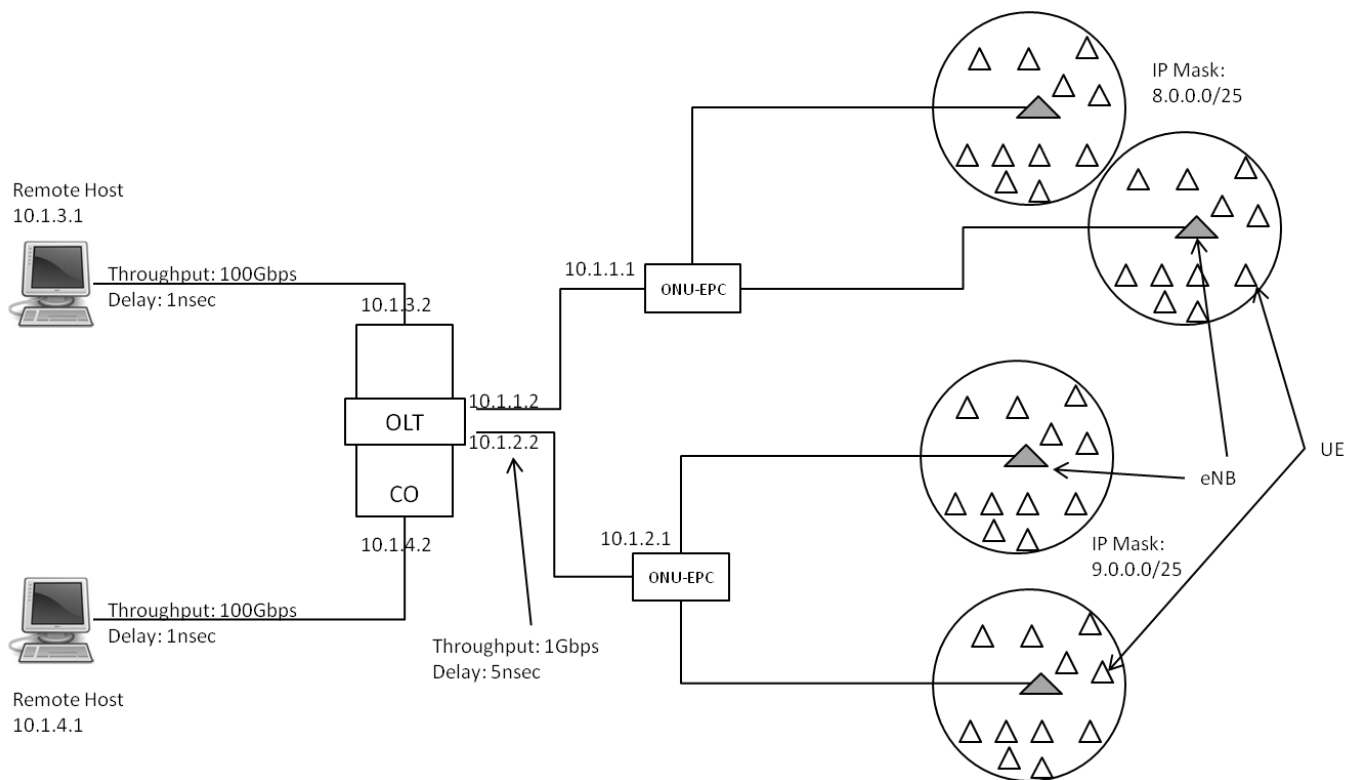
Μοντελοποίηση και Αξιολόγηση Του Υβριδικού Δικτύου Στο Ns-3

Το υβριδικό δίκτυο προβασης σχεδιάστηκε ως ένα δίκτυο που συνδυάζει τις τεχνολογίες παθητικών οπτικών δικτύων και ασύρματων δικτύων LTE.

5.1 Σχεδίαση του Δικτύου

Η υλοποίηση του υβριδικού δικτύου στον εξομοιωτή Ns-3 χωρίζεται σε τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα αναφέρεται στην εξομοίωση ενός εξωτερικού δικτύου πακέτων δεδομένων στο οποίο παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης το υβριδικό δίκτυο πρόσβασης. Συνεπώς, το τμήμα αυτό δεν αποτελεί μέρος του υβριδικού δικτύου, η ύπαρξή του όμως είναι απαραίτητη για να υπάρξουν οι απαραίτητες ροές δεδομένων προς τις τερματικές συσκευές που θα επιτρέψουν την αξιολόγηση της απόδοσής του. Το δεύτερο τμήμα είναι το οπτικό τμήμα του δικτύου που εξομοιώνει ένα παθητικό οπτικό δίκτυο. Τέλος, το τρίτο τμήμα αφορά την υλοποίηση του ασύρματου τμήματος του υβριδικού δικτύου, δηλαδή του δικτύου LTE. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το υβριδικό δίκτυο όπως μοντελοποιήθηκε στο Ns-3 και συγκεκριμένα:

- ✧ οι κόμβοι του δικτύου
- ✧ οι τύποι διασύνδεσης των κόμβων, και τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών όπως ρυθμός δεδομένων και καθυστέρηση διάδοσης
- ✧ οι IP διευθύνσεις των διαφορετικών τμημάτων του δικτύου



Σχήμα 5.1: Αναπαράσταση της υλοποίησης του υβριδικού δικτύου στο Ns-3

5.1.1 Εξωτερικό Δίκτυο Πακέτων Δεδομένων

Η ακριβής εξομίωση του εξωτερικού δικτύου πακέτων δεδομένων δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Δύο είναι οι βασικές απαιτήσεις κατά τη σχεδίαση και μοντελοποίηση του εξωτερικού δικτύου:

- ✧ σκοπός του εξωτερικού πακέτου δεδομένων είναι η δημιουργία τερματικών σημείων για τη δημιουργία ροών δεδομένων προς τις τερματικές συσκευές του υβριδικού δικτύου (UE) που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της απόδοσής του
- ✧ τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης με το υβριδικό δίκτυο δε θα πρέπει να επηρεάζουν την αξιολόγηση της απόδοσής του. Για παράδειγμα η καθυστέρηση μετάδοσης στο εξωτερικό δίκτυο δε θα πρέπει να επηρεάζει τη λειτουργία επαναποστολής χαμένων πακέτων κατά την κατάσταση λειτουργίας με επιβεβαίωση στο RLC επίπεδο του ασύρματου τμήματος του υβριδικού δικτύου.

Το εξωτερικό δίκτυο πακέτων δεδομένων μοντελοποιεί στην ουσία το Διαδίκτυο στο οποίο θα παρέχει πρόσβαση το υβριδικό δίκτυο. Αποτελείται από έναν αριθμό απομακρυσμένων κόμβων οι οποίοι είναι απευθείας συνδεδεμένοι με το υβριδικό δίκτυο. Στους κόμβους αυτούς εγκαθίστανται εφαρμογές οι οποίες επικοινωνούν με τις τερματικές συσκευές του υβριδικού δικτύου δημιουργώντας ροές δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της απόδοσης του υβριδικού δικτύου. Οι εφαρμογές αυτές είναι γεννήτριες κίνησης για τη δημιουργία ροών στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) προς τις τερματικές συσκευές των τελικών χρηστών.

Το σημείο σύνδεσης των απομακρυσμένων κόμβων με το υβριδικό δίκτυο πρόσβασης είναι ο κόμβος OLT του οπτικού τμήματος. Η σύνδεση γίνεται με τη χρήση απευθείας συνδέσεων σημείου-προς-σημείο του κάθε απομακρυσμένου κόμβου με τον κόμβο OLT [32]. Οι συνδέσεις σημείου-προς-σημείο στο Ns-3 χαρακτηρίζονται από τρεις βασικές ιδιότητες:

- ✧ το ρυθμό δεδομένων (data rate)
- ✧ την καθυστέρηση διάδοσης (delay)
- ✧ τη μέγιστη μονάδα μετάδοσης (maximum transmission unit – Mtu)

Για την αποφυγή δημιουργίας συμφόρησης στον κόμβο OLT οι συνδέσεις αυτές λαμβάνουν χαρακτηριστικά που χωρίς να είναι ρεαλιστικά ικανοποιούν τη δεύτερη απαίτηση σχεδίασης του υβριδικού δικτύου. Έτσι, ο ρυθμός δεδομένων τίθεται στα 100 Gigabit / sec, η καθυστέρηση διάδοσης τίθεται στο 1 nanosec και η μέγιστη μονάδα μετάδοσης τίθεται στα 60.000 bytes, ώστε να επιτραπεί η εστίαση της μέτρησης της απόδοσης στο δίκτυο πρόσβασης και μόνο.

Δημιουργούνται δύο εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων, που το κάθε ένα εξυπηρετεί το αντίστοιχο υποδίκτυο LTE. Ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε σεναρίου εξομοίωσης, υπάρχουν ένας ή περισσότεροι απομακρυσμένοι κόμβοι στα δύο αυτά εξωτερικά δίκτυα. Στα εξωτερικά δίκτυα ανατίθενται IP διευθύνσεις από το εύρος 10.1.3.0 / 24 και 10.1.4.0 / 24 αντίστοιχα.

5.1.2 Οπτικό τμήμα

Η υλοποίηση του οπτικού τμήματος του υβριδικού δικτύου πρόσβασης είναι απλοποιημένη λόγω της απουσίας συγκεκριμένου μοντέλου για την εξομοίωση παθητικών οπτικών δικτύων στο Ns-3.

Το οπτικό τμήμα αποτελείται από έναν κόμβο OLT και δύο κόμβους ONU, καθώς υπάρχουν δύο διακλαδώσεις για την υποστήριξη των δύο δικτύων LTE. Οι κόμβοι OLT και ONU υλοποιούνται με τη χρήση απλών αντικειμένων κόμβων του Ns-3 εξοπλισμένων με πλήρεις στοίβες πρωτοκόλων internet. Ο κόμβος OLT τοποθετείται στη θέση με συντεταγμένες $x = 0$, $y = 0$. Οι δύο κόμβοι ONU τοποθετούνται στις θέσεις με συντεταγμένες $x = 1000$, $y = 0$ και $x = 0$, $y = 1000$ αντίστοιχα. Συνεπώς, η απόσταση του κάθε ONU από το OLT ορίζεται στα 1000 μέτρα.

Οι συνδέσεις των OLT με το ONU υλοποιούνται με τη χρήση απευθείας συνδέσεων σημείου-προς-σημείο οι οποίες προσομοιώνουν τις συνδέσεις οπτικής ίνας ενός παθητικού οπτικού δικτύου. Σε ένα ρεαλιστικό παθητικό οπτικό δίκτυο η σύνδεση του OLT με τα ONU είναι σύνδεση σημείου-προς-πολλά σημεία (point-to-multipoint) με τη χρήση οπτικών διαχωριστών (optical splitters) που επιτρέπουν τη χρήση μίας οπτικής ίνας για εξυπηρέτηση πολλών τελικών σημείων ONU. Αυτή η σύνδεση στην ουσία μπορεί να αναλυθεί σε πολλές, συγκεκριμένα για το υπό μοντελοποίηση δίκτυο σε δύο, συνδέσεις σημείου-προς-σημείο. Οι συνδέσεις αυτές λαμβάνουν τα τυπικά χαρακτηριστικά μίας σύνδεσης οπτικής ίνας και συγκεκριμένα:

✦ ρυθμός μετάδοσης 1 Gigabit / sec

✦ καθυστέρηση μετάδοσης 5 nsec

Η καθυστέρηση μετάδοσης υπολογίζεται βάσει της ταχύτητας του φωτός στο κενό (299.792.458 meters/second) και του δείκτη διάθλασης των πιο συνηθισμένων καλωδίων οπτικών ινών (1.5), που δίνει μία καθυστέρηση της τάξης των 4.9 nsec για κάθε χίλια μέτρα. Συνυπολογίζοντας την επίδραση διασυνδέσεων και συνδέσεων μέχρι το επίπεδο του ONU η καθυστέρηση αυτή προσαυξάνεται στα 5 nsec. Καθώς η απόσταση του κάθε ONU από το OLT είναι χίλια μέτρα, η καθυστέρηση μετάδοσης της μεταξύ τους σύνδεσης τίθεται στο επίπεδο

των 5 nsec.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα ο κόμβος OLT συνδέεται επιπλέον με απευθείας συνδέσεις σημείου-προς-σημείο με τους απομακρυσμένους κόμβους του εξωτερικού δικτύου πακέτων δεδομένων.

Στον κόμβο ONU της πρώτης διακλάδωσης ανατίθεται η IP διεύθυνση 10.1.1.2 ενώ στον κόμβο ONU της δεύτερης διακλάδωσης η διεύθυνση 10.1.2.2. Στις αντίστοιχες διεπαφές σύνδεσης του κόμβου OLT με τα ONU ανατίθενται οι IP διευθύνσεις 10.1.1.1 και 10.1.2.1.

Στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) η δρομολόγηση του κάθε πακέτου στις δύο διακλαδώσεις πραγματοποιείται από το πρωτόκολο IP, και δεν υπάρχει broadcast αποστολή προς όλους τους κόμβους ONU και αντίστοιχη απόρριψη των μη σχετικών πακέτων από τα ONU όπως θα γινόταν σε ένα πραγματικό παθητικό οπτικό δίκτυο.

Στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink) λόγω της ύπαρξης ξεχωριστών συνδέσεων σημείου-προς-σημείο μεταξύ OLT και ONU, δεν υπάρχει εξομοίωση ενός πρωτοκόλου πολλαπλής πρόσβασης μέσου (multiple access) για την πολυπλεξία των δύο ανερχόμενων ζεύξεων σε μία, ούτε η ανάθεση εύρους ζώνης από το OLT στα ONU. Κάτι τέτοιο θα ήταν απαραίτητο στην περίπτωση ύπαρξης κοινής ζεύξης μεταξύ του OLT και των ONU, που όμως δεν μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα με τις υπάρχουσες δυνατότητες που προσφέρει το Ns-3.

5.1.3 Ασύρματο τμήμα

Το ασύρματο τμήμα του υβριδικού δικτύου είναι το τμήμα που υλοποιείται με τη μεγαλύτερη ακρίβεια στο Ns-3, χάρις στην ύπαρξη ειδικής ενότητας που υποστηρίζει τη μοντελοποίηση δικτύων LTE.

Υλοποιούνται όλοι οι βασικοί κόμβοι που ορίζει το πρότυπο LTE, και πιο συγκεκριμένα:

- ✧ το δίκτυο πυρήνα EPC
- ✧ οι κόμβοι eNodeB

- ✧ οι τερματικές συσκευές χρήστη User Equipment

Δίκτυο πυρήνα EPC

Η ενότητα LTE του Ns-3 προβλέπει για τη μοντελοποίηση του δικτύου πυρήνα την ύπαρξη ενός δικτυακού κόμβου στον οποίο ενσωματώνονται οι λογικοί κόμβοι του δικτύου πυρήνα που προβλέπονται από το πρότυπο LTE.

Οι δύο βασικοί λογικοί κόμβοι του δικτύου πυρήνα EPC που υλοποιούνται στο Ns-3 είναι οι κόμβοι S-GW και P-GW. Η συνύπαρξη των δύο λογικών κόμβων στον ίδιο δικτυακό κόμβο είναι απαραίτητη καθώς η σχεδίαση του Ns-3 δεν προβλέπει την εξομοίωση των πρωτοκόλων σύνδεσης S5 ή S8 που ορίζονται από το πρότυπο LTE για τη σύνδεση S-GW και P-GW.

Το πρωτόκολλο LTE ορίζει δύο ακόμη βασικούς λογικούς κόμβους για το δίκτυο πυρήνα, τους κόμβους MME και E-SMLC. Οι κόμβοι αυτοί λειτουργούν αποκλειστικά στο επίπεδο ελέγχου και όχι στο επίπεδο δεδομένων χρήστη. Λόγω της απουσίας υποστήριξης για το επίπεδο ελέγχου στο Ns-3, οι λειτουργίες των κόμβων αυτών εξυπηρετείται από την ύπαρξη αντικειμένων-βοηθών (epc helpers) που προσφέρει ο εξομοιωτής [30]. Οι συναρτήσεις που προσφέρουν οι helpers χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη λειτουργιών όπως:

- ✧ εγκαθίδρυση σύνδεσης S1 μεταξύ EPC και eNB
- ✧ εγκαθίδρυση και ενεργοποίηση φορέων EPS
- ✧ υπολογισμός θέσης και ταχύτητας συσκευής UE

Οι βοηθητικοί λογικοί κόμβοι που ορίζονται στο πρότυπο LTE δεν υποστηρίζονται από το Ns-3. Έτσι, δεν υπάρχει μοντελοποίηση των κόμβων PCRF, HSS και GMLC. Εξάλλου, οι λειτουργίες που προσφέρουν αυτοί οι κόμβοι, όπως η αποθήκευση δεδομένων συνδρομής του κάθε χρήστη και η εφαρμογή πολιτικών που οι συνδρομές αυτές επιβάλουν, βρίσκονται εκτός των σκοπών της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Στο υπό εξέταση δίκτυο το ασύρματο LTE τμήμα συνδέεται με το παθητικό οπτικό δίκτυο. Για την υλοποίηση της σύνδεσης αυτής ο κόμβος EPC ενσωματώνεται στον, προϋπάρχοντα από το οπτικό τμήμα κόμβο ONU. Υπάρχουν δύο κόμβοι ONU, επομένως, δημιουργούνται δύο κόμβοι EPC σε αυτούς. Η υλοποίηση των κόμβων EPC στους κόμβους ONU επιτρέπει την άμεση σύνδεση του ασύρματου με το οπτικό τμήμα του δικτύου και αφαιρεί την ανάγκη για την υλοποίηση ξεχωριστής διεπαφής επικοινωνίας μεταξύ τους. Για την IP επικοινωνία εκτός του ασύρματου δικτύου επομένως, οι δύο κόμβοι EPC χρησιμοποιούν αντίστοιχα τις IP διευθύνσεις 10.1.1.2 και 10.1.2.2 που έχουν ανατεθεί στους ONU κόμβους κατά τη σχεδίαση του οπτικού δικτύου.

Με τη χρήση των erc helpers του Ns-3 καθορίζονται και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία του ασύρματου δικτύου, όπως:

- ✧ η μέγιστη μονάδα μετάδοσης (Maximum Transmission Unit – Mtu) της σύνδεσης S1 μεταξύ EPC και eNodeB
- ✧ η κατάσταση λειτουργίας του πρωτοκόλου RLC με τις επιλογές που ενδιαφέρουν να είναι η κατάσταση χωρίς επιβεβαίωση (Unacknowledged Mode - UM) και η κατάσταση με επιβεβαίωση (Acknowledged Mode – AM)
- ✧ ο τύπος του αλγόριθμου χρονοδρομολόγησης για την κατανομή των διαθέσιμων ασύρματων πόρων από το επίπεδο MAC του LTE, με την υποστήριξη των δύο αλγορίθμων Round Robin και Proportional Fair

eNodeB

Οι κόμβοι eNB υλοποιούνται σε ξεχωριστά αντικείμενα-κόμβους του Ns-3. Ανάλογα με το υπό εξέταση κάθε φορά σενάριο λειτουργίας δημιουργούνται από ένας έως τέσσερις κόμβοι eNB για κάθε έναν κόμβο ONU-EPC. Οι κόμβοι αυτοί τοποθετούνται τυχαία γύρω από τους ONU-EPC κόμβους. Η τοποθέτηση γίνεται σε μία κυκλική επιφάνεια γύρω από το EPC με ακτίνα όχι μεγαλύτερη από 150 μέτρα, και ακολουθεί μία κανονική κατανομή.

Με κλήση των σχετικών συναρτήσεων που προσφέρουν οι helpers του Ns-3 πραγματοποιείται η εγκατάσταση δικτυακών συσκευών eNB στους κόμβους. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται εκτός χρόνου εξομοίωσης και οδηγεί:

- ✧ στην εγκατάσταση μία πλήρους στοίβας πρωτοκόλων Internet στους κόμβους eNB,
- ✧ στη διασύνδεση των κόμβων eNB με τον κόμβο S-GW μέσω του πρωτοκόλου S1, με τα χαρακτηριστικά που έχουν τεθεί κατά τη δημιουργία του EPC, με τη δημιουργία ενός φορέα S1, και
- ✧ στην ανάθεση μίας IP διεύθυνσης για την επικοινωνία με το EPC

Καθώς η S1 σύνδεση του κάθε κόμβου eNb με το S-GW είναι σύνδεση σημείου-προς-σημείο η IP διεύθυνση για την επικοινωνία με το EPC δίνεται από το υποδίκτυο 10.0.0.0/30 που προσφέρει ακριβώς δύο IP διευθύνσεις, μία για το S-GW και μία για το eNb (η μηδενική και η broadcast διεύθυνση δεν χρησιμοποιούνται).

User Equipment

Οι User Equipment συσκευές είναι οι τερματικές συσκευές χρήστη στις οποίες στοχεύει να προσφέρει υπηρεσίες IP σύνδεσης το υβριδικό δίκτυο πρόσβασης που εξετάζεται. Δημιουργούνται ξεχωριστοί κόμβοι UE οι οποίοι τοποθετούνται γύρω από τους κόμβους eNb. Ανάλογα με το σενάριο που υλοποιούμε κάθε φορά, τοποθετούνται από 1 έως 12 συσκευές γύρω από κάθε κόμβο eNodeB. Οι συσκευές τοποθετούνται τυχαία σε μία κυκλική επιφάνεια γύρω από τους κόμβους eNB, με ακτίνα όχι μεγαλύτερη από 50 μέτρα. Η τυχαία αυτή τοποθέτηση ακολουθεί κανονική κατανομή.

Με χρήση των lte και epc helpers, πριν από την έναρξη της προσομοίωσης εκτελούνται οι παρακάτω ενέργειες:

- ✧ ανάθεση και σύνδεσης της UE συσκευής σε έναν κόμβο eNB
- ✧ ανάθεση IP διεύθυνσης στη UE συσκευή

- ✧ ορισμός της IP διεύθυνσης του αντίστοιχου EPC ως εξ'ορισμού πύλης για την επικοινωνία με εξωτερικά δίκτυα

Εξ'ορισμού από το LTE μοντέλο του Ns-3, στους κόμβους UE ανατίθενται αυτόματα IP διευθύνσεις από το εύρος 7.0.0.0/25 [30]. Λόγω της χρήσης δύο υποδικτύων LTE στο υπό εξέταση μοντέλο, κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε συγκρούσεις διευθύνσεων. Για την αποφυγή τους, στις UE συσκευές του πρώτου τμήματος ανατίθενται IP διευθύνσεις από το εύρος 8.0.0.0/25 και στο δεύτερο από το εύρος 9.0.0.0/25.

Η σχεδίαση των UE κόμβων ολοκληρώνεται με την εγκατάσταση σε αυτούς εφαρμογών τελικού χρήστη. Οι εφαρμογές αυτές επικοινωνούν με τις εφαρμογές που έχουν εγκατασταθεί στους απομακρυσμένους κόμβους που εξομοιώνουν το Διαδίκτυο, και προσφέρουν τις ροές δεδομένων που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του ολοκληρωμένου υβριδικού δικτύου.

5.1.4 Λοιπά στοιχεία

Πέρα από τα βασικά τμήματα του υβριδικού δικτύου που αναλύθηκαν στις παραπάνω ενότητες, η υλοποίηση του μοντέλου στο Ns-3 απαιτεί και τον καθορισμό και τη σχεδίαση δευτερευόντων τμημάτων στο πρόγραμμα υλοποίησης [31].

Αυτά τα τμήματα περιλαμβάνουν:

- ✧ τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των πρωτοκόλων που θα χρησιμοποιούν οι εφαρμογές τελικού χρήστη
- ✧ τη δημιουργία στατικών εγγραφών δρομολόγησης για την επικοινωνία των απομακρυσμένων κόμβων με τις τερματικές συσκευές UE και τη δρομολόγηση πακέτων μεταξύ ONU και UE
- ✧ τη δημιουργία των εφαρμογών που θα χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης

Αυτά τα τμήματα καθορίζονται στο πρόγραμμα εξομοίωσης εκτός του χρόνου εξομοίωσης.

5.2 Μεθοδολογία Αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας του υβριδικού δικτύου PON-LTE θα χρησιμοποιηθούν οι εγγενείς δυνατότητες που παρέχει το Ns-3 για την διενέργεια μετρήσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων από τις εξομοιώσεις.

Βασικό εργαλείο αξιολόγησης αποτελεί η λειτουργία συλλογής πακέτων. Συλλέγονται πακέτα για κάθε ροή δεδομένων σε διαφορετικούς κόμβους – σημεία του δικτύου. Τα πακέτα αυτά αποθηκεύονται σε αρχεία τύπου .pcap τα οποία στη συνέχεια επεξεργάζονται με ειδικό λογισμικό για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και στατιστικών. Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Wireshark για τη μελέτη των αρχείων .pcap που αποθηκεύονται από το Ns-3. Το Wireshark πέρα από την παρουσίαση των πακέτων που έχουν συλλεχθεί παρέχει τη δυνατότητα γρήγορου υπολογισμού διάφορων στατιστικών στοιχείων όπως η απόδοση (throughput), ο συνολικός αριθμός των πακέτων ή το μέσο μέγεθος των πακέτων [34].

Το μειονέκτημα της αποθήκευσης αρχείων .pcap για περαιτέρω ανάλυση έγκειται στο ότι τα αρχεία .pcap, καθώς περιέχουν πραγματικές πληροφορίες πακέτων χαρακτηρίζονται από το μεγάλο μέγεθος τους, ενώ η πρόσβαση σε αυτά είναι δυνατή μετά το πέρας της εξομοίωσης. Για την περαιτέρω επεξήγηση των αποτελεσμάτων αλλά και για την αποσφαλμάτωση των εξομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε επικουρικά και η δυνατότητα καταγραφής (logging) που προσφέρεται από το Ns-3.

5.2.1 Οργάνωση Αξιολόγησης

Για την οργάνωση της αξιολόγησης της λειτουργίας του υβριδικού δικτύου επιλέχθηκαν τέσσερις παράμετροι της εξομοίωσης που θα διαφοροποιούνται από σενάριο σε σενάριο:

- ✧ Ο αριθμός των eNodeB ανά υποδίκτυο LTE που θα λαμβάνει τις τιμές 1, 2, και 4
- ✧ Ο αριθμός των συσκευών UE ανά eNodeB που θα λαμβάνει τις τιμές 1, 2, 4, 8 και 12
- ✧ Ο αλγόριθμος του χρονοδρομολογητή του επιπέδου MAC του προτύπου LTE. Θα χρησιμοποιηθούν οι δύο εναλλακτικές που προσφέρει το Ns-3, δηλαδή οι αλγόριθμοι Round Robin και Proportional Fair
- ✧ Η κατάσταση λειτουργία του επιπέδου RLC του προτύπου LTE. Θα μελετηθούν σενάρια με τις καταστάσεις με και χωρίς επιβεβαίωση (Acknowledge Mode, Unacknowledge Mode).

Για κάθε σενάριο λειτουργίας συλλέγονται αρχεία .pcap για τους κόμβους OLT, ONU και UE ώστε να αξιολογηθεί η λειτουργία του δικτύου σε κάθε μία από τις διακλαδώσεις OLT-ONU αλλά και από άκρο σε άκρο του υβριδικού δικτύου (OLT-UE).

Για τη δημιουργία της κίνησης στο δίκτυο θα χρησιμοποιηθούν γεννήτριες κίνησης πρωτοκόλου UDP στην κατερχόμενη ζεύξη. Δημιουργούνται δύο απομακρυσμένοι κόμβοι (ένας για κάθε υποδίκτυο LTE) και για κάθε συσκευή UE εγκαθίσταται μία εφαρμογή – γεννήτρια κίνησης στους κόμβους αυτούς. Η κάθε εφαρμογή θα αποστέλει πακέτα μεγέθους 4096 bytes με ρυθμό 50Mbps σε μία από τις συσκευές UE για διάστημα 5 δευτερολέπτων. Στις συσκευές UE εγκαθίστανται αντίστοιχες εφαρμογές για την υποδοχή της κίνησης (packet sinks) από τις εφαρμογές – γεννήτριες.

Για την εξομοίωση των σεναρίων χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη σταθερή έκδοση του εξομοιωτή Ns-3, η έκδοση ns-3.14.1, που ενσωματώνει την ενότητα εξομοίωσης δικτύων LTE, LENA.

5.3 Αξιολόγηση της Λειτουργίας του Υβριδικού Δικτύου

Η βασική ομάδα σεναρίων αξιολόγησης αφορά τη λειτουργία του υβριδικού δικτύου με το επίπεδο RLC να τίθεται σε κατάσταση χωρίς επιβεβαίωση, δηλαδή χωρίς επαναποστολή από

το ασύρματο μέσο των πακέτων που δεν εστάλησαν σωστά αρχικά. Ο αλγόριθμος του χρονοδρομολογητή του επιπέδου MAC του LTE δικτύου είναι ο αλγόριθμος Round Robin. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα περιλαμβάνονται σενάρια με 1, 2 και 4 κόμβους eNB ανά LTE υποδίκτυο, καθώς και 1, 2, 4, 8 και 12 συσκευές UE ανά κόμβο eNB.

Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης Round Robin είναι από τους πιο απλούς αλγορίθμους για την κατανομή των ασύρματων πόρων μεταξύ eNB και UE. Η υλοποίησή του στο Ns-3 έγκειται στην κατανομή των διαθέσιμων πόρων εξίσου στις ενεργές ροές δεδομένων. Η προεπιλογή στο Ns-3 προβλέπει την ύπαρξη 25 διαθέσιμων Resource Blocks (RB) για κάθε χρονικό διάστημα 1 ms. Τα Resource Blocks ομαδοποιούνται ανά δύο σε 12 ομάδες Resource Block Groups (RBG) που στη συνέχεια κατανέμονται στις ροές, ενώ το 25ο Block μένει αδιάθετο. Εάν ο αριθμός των ροών είναι μικρότερος των διαθέσιμων RBG τότε όλες οι ροές λαμβάνουν πόρους σε κάθε χρονικό διάστημα. Σε αντίθετη περίπτωση δεν κατανέμονται RBG σε κάθε ροή και η ανάθεση στο επόμενο χρονικό διάστημα ξεκινάει από τις ροές που δεν έχουν εξυπηρετηθεί [30]. Σημαντικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου είναι ότι η κατανομή των RBG πρέπει να είναι η ίδια για κάθε ροή που εξυπηρετείται σε ένα διάστημα και δίνεται από τον τύπο

$$L = \left\lceil \frac{B}{NG} \right\rceil$$

όπου L είναι ο αριθμός των RBG που κατανέμεται σε κάθε ροή, B οι διαθέσιμοι πόροι, N ο αριθμός των ροών και G το μέγεθος κάθε RBG [30].

Για έναν κόμβο eNodeB ανά υποδίκτυο LTE και για μία συσκευή UE ανά eNodeB, τα αρχεία .pcap που συλλέγονται δίνουν τα στατιστικά που παρουσιάζει ο Πίνακας 5.3(α) για κάθε μία από τις δύο διακλαδώσεις OLT-ONU

Όπως είναι εμφανές, οι δύο διακλαδώσεις εμφανίζουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά. Ο αριθμός των πακέτων είναι 7.629, ενώ το μέγεθος του κάθε πακέτου είναι 4.126 bytes, καθώς στα 4.096 bytes που αποστέλλει η κάθε εφαρμογή προστίθενται 8 bytes από το πρωτόκολλο UDP, 20 bytes από το πρωτόκολλο IP και 2 bytes από το πρωτόκολλο Point-to-Point.

1 eNb ανά LTE / 1 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	7.629,00	7.629,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	1.526,79	1.526,79
Απόδοση (Mbps)	50,37	50,37

Πίνακας 5.3: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 1 eNB, 1 UE

Εξετάζοντας τα αρχεία .pcap από τις συσκευές UE τα στοιχεία του πίνακα μεταβάλλονται, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 5.3(β).

1 eNb ανά LTE / 1 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	3.159,00	3.159,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	5,954	5,954
Πακέτα/sec	530,57	530,57
Απόδοση (Mbps)	17,50	17,50

Πίνακας 5.3: (β) Μετρήσεις ανά UE – 1 eNB, 1 UE

Βασικό συμπέρασμα που εξάγεται, είναι ότι λόγω της λειτουργίας του RLC επιπέδου σε κατάσταση χωρίς επιβεβαίωση αλλά και λόγω του πρωτοκόλλου UDP που επίσης δεν παρέχει εγγυημένη μεταφορά, ο αριθμός των πακέτων που φτάνουν σε κάθε συσκευή UE έχει πέσει στα 3.159 πακέτα. Η απόδοση φτάνει τα 17,50 Mbps. Αυτή είναι και η μέγιστη απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί με την προκαθορισμένη διαμόρφωση του MAC επιπέδου προτύπου LTE και με τους 25 διαθέσιμους πόρους RB. Άλλη χαρακτηριστική μεταβολή είναι η μείωση του μεγέθους του κάθε πακέτου κατά 2 bytes λόγω της απουσίας του πρωτοκόλλου Point-to-Point.

Στο σενάριο με δύο συσκευές UE για κάθε κόμβο eNodeB, για κάθε μία από τις διακλαδώσεις OLT-ONU όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5.4(α) ο αριθμός των πακέτων έχει διπλασιαστεί στα 15.258. Όπως ήταν αναμενόμενο το μέσο μέγεθος πακέτου έχει παραμείνει αναλλοίωτο στα 4.126 bytes, όμως ο ρυθμός μετάδοσης έχει διπλασιαστεί στα 100,75 Mbps.

1 eNb ανά LTE / 2 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	15.258,00	15.258,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	3.052,14	3.052,14
Απόδοση (Mbps)	100,75	100,75

Πίνακας 5.4: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 1 eNB, 2 UE

1 eNb ανά LTE / 2 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	1.829,00	1.829,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	6,913	6,913
Πακέτα/sec	264,57	264,57
Απόδοση (Mbps)	8,73	8,73

Πίνακας 5.4: (β) Μετρήσεις ανά UE – 1 eNB, 2 UE

Από τον Πίνακα 5.4(β) που συνοψίζει τα αποτελέσματα ανά UE συσκευή, προκύπτει ότι έχει μειωθεί ο αριθμός των πακέτων στα 1.829 ενώ έχει αυξηθεί και ο χρόνος για την αποστολή των πακέτων. Επίσης η απόδοση πλέον είναι στα 8,73 Mbps καθώς οι διαθέσιμοι ασύρματοι πόροι διαμοιράζονται σε δύο συσκευές UE ανά κόμβο eNb.

Τα αποτελέσματα για 4 συσκευές UE ανά κόμβο eNodeB εμφανίζουν αντίστοιχη τάση, όπως προκύπτει από τους Πίνακες 5.5 (α) και (β). Στους κλάδους OLT-ONU έχουν αυξηθεί τα σταλθέντα πακέτα σε 30.516 και ο ρυθμός μετάδοσης στα 201,49 Mbps.

1 eNb ανά LTE / 4 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	30.516,00	30.516,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	6.104,20	6.104,20

Απόδοση (Mbps)	201,49	201,49
----------------	--------	--------

Πίνακας 5.5: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 1 eNB, 4 UE

Αντιστοίχως, για κάθε UE συσκευή ο αριθμός των πακέτων μειώνεται περαιτέρω στα 1.169 με την απόδοση να υποβαθμίζεται επίσης στα επίπεδα των 4,37 Mbps. Γίνεται εμφανές, ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των συσκευών UE ανά κόμβο eNodeB τόσο μειώνονται οι περιορισμένοι ασύρματοι πόροι που ανατίθενται σε κάθε συσκευή με αποτέλεσμα να μειώνεται ο αριθμός των πακέτων για κάθε UE.

1 eNB ανά LTE / 4 UE ανά eNB	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	1.169,00	1.169,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	8,823	8,823
Πακέτα/sec	132,50	132,50
Απόδοση (Mbps)	4,37	4,37

Πίνακας 5.5: (β) Μετρήσεις ανά UE – 1 eNB, 4 UE

Οι Πίνακες 5.6 και 5.7 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για 8 και 12 συσκευές UE ανά κόμβο eNB. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι για 12 συσκευές UE εμφανίζεται καλύτερη απόδοση ανά συσκευή σε σχέση με τη λειτουργία με 8 συσκευές UE. Αυτή είναι μία περίπτωση όπου αναδεικνύονται οι αδυναμίες του αλγορίθμου Round Robin. Από την εξίσωση

$$L = \left\lfloor \frac{B}{NG} \right\rfloor$$

για B=25, N=8 και G=2 λαμβάνουμε την τιμή L=1. Επομένως για κάθε μία από τις 8 συσκευές UE ανατίθεται ένα RBG. Τα υπόλοιπα 4 (12-8=4) RBG δεν κατανέμονται καθόλου [30]. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η αντιληπτή ποιότητα της σύνδεσης, καθώς στο Ns-3 η ποιότητα της σύνδεσης υπολογίζεται για ολόκληρη τη χρονική στιγμή (για όλα τα RB κάθε χρονικής στιγμής). Έτσι, λόγω αυτής της μειωμένης ποιότητας το επίπεδο MAC αναπροσαρμόζει το μέγεθος των MAC Transport Blocks με αποτέλεσμα να περιορίζεται και η

απόδοση της σύνδεσης [30].

1 eNb ανά LTE / 8 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	61.032,00	61.032,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	12.208,07	12.208,07
Απόδοση (Mbps)	402,96	402,96

Πίνακας 5.6: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 1 eNB, 8 UE

1 eNb ανά LTE / 8 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	356,00	356,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	48,848	48,848
Πακέτα/sec	7,29	7,29
Απόδοση (Mbps)	0,24	0,24

Πίνακας 5.6: (β) Μετρήσεις ανά UE – 1 eNB, 8 UE

1 eNb ανά LTE / 12 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	91.548,00	91.548,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	18.311,62	18.311,62
Απόδοση (Mbps)	604,43	604,43

Πίνακας 5.7: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 1 eNB, 12 UE

1 eNb ανά LTE / 12 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	729,00	729,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00

Διάρκεια Αποστολής (sec)	16,440	16,440
Πακέτα/sec	44,34	44,34
Απόδοση (Mbps)	1,46	1,46

Πίνακας 5.7: (β) Μετρήσεις ανά UE – 1 eNB, 12 UE

Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων με τον Round Robin, το Ns-3 υλοποιεί έναν ακόμη αλγόριθμο, τον Proportional Fair.

Η λειτουργία του αλγορίθμου Proportional Fair βασίζεται στην κατανομή ασύρματων πόρων σε μία UE συσκευή, όταν η στιγμιαία ποιότητα του καναλιού της είναι υψηλή σε σύγκριση με τη μέση ποιότητα του καναλιού της στο χρόνο. Ο Proportional Fair κατανέμει όλους τους διαθέσιμους πόρους σε κάθε χρονικό διάστημα [26].

Ο Πίνακας 5.8 περιλαμβάνει τις μετρήσεις για 1 κόμβο eNB ανά υποδίκτυο και 8 συσκευές UE ανά eNB.

1 eNb ανά LTE / 8 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	61.032,00	61.032,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	12.208,07	12,208,07
Απόδοση (Mbps)	402,96	402,96

Πίνακας 5.8: (α) Proportional Fair, Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 1 eNB, 8 UE

1 eNb ανά LTE / 8 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	839	839
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	12,633	12,633
Πακέτα/sec	66,45	66,45
Απόδοση (Mbps)	2,19	2,19

Πίνακας 5.8: (β) Proportional Fair, Μετρήσεις ανά UE – 1 eNB, 8 UE

Όπως είναι αναμενόμενο το ενσύρματο οπτικό δίκτυο δεν επηρεάζεται από τη λειτουργία του αλγορίθμου επομένως τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.8 (α) είναι αντίστοιχα με αυτά του Πίνακα 5.6 (α).

Εκεί που γίνεται εμφανής η λειτουργία του Proportional Fair είναι στην απόδοση στο ασύρματο τμήμα του δικτύου. Συγκρίνοντας τους Πίνακες 5.6 (β) και 5.8 (β), η απόδοση του δικτύου έχει υπερδιπλασιαστεί. Ο αριθμός των πακέτων ανά UE έχει φτάσει τα 839 από 356, ενώ ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταφορά τους έχει μειωθεί στα 12,6 sec από 48,8 με τον αλγόριθμο Round Robin. Ως αποτέλεσμα η απόδοση ανά UE έχει σχεδόν δεκαπλασιαστεί από τα 0,24Mbps στα 2,19Mbps. Ο Πίνακας 5.9 συνοψίζει αυτές τις διαφορές.

1 eNb ανά LTE / 8 UE ανά eNb	Round Robin	Proportional Fair
Συνολικός Αριθμός Πακέτων στο Υποδίκτυο LTE	2.848	6.712
Συνολικός Χρόνος	48,848 sec	12,633 sec
Αριθμός Πακέτων ανά UE	356	839
Συνολική Απόδοση Υποδικτύου LTE	1,92 Mbps	17,52 Mbps
Απόδοση ανά UE	0,24 Mbps	2,19 Mbps

Πίνακας 5.9: Διαφορές αλγορίθμων Round Robin και Proportional Fair

Οι πίνακες 5.10 έως 5.19 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για 2 και 4 κόμβους eNb ανά διακλάδωση LTE.

2 eNb ανά LTE / 1 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	15.258,00	15.258,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	3.052,14	3.052,14
Απόδοση (Mbps)	100,75	100,75

Πίνακας 5.10: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 2 eNB, 1 UE

2 eNb ανά LTE / 1 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	1.786,50	1.147,50
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	6,948	8,729
Πακέτα/sec	257,12	131,46
Απόδοση (Mbps)	8,48	4,34

Πίνακας 5.10: (β) Μετρήσεις ανά UE – 2 eNB, 1 UE

2 eNb ανά LTE / 2 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	30.516,00	30.516,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	6.104,20	6.104,20
Απόδοση (Mbps)	201,49	201,49

Πίνακας 5.11: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 2 eNB, 2 UE

2 eNb ανά LTE / 2 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	1.309,00	1.362,25
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	8,438	8,204
Πακέτα/sec	155,13	165,95
Απόδοση (Mbps)	5,12	5,48

Πίνακας 5.11: (β) Μετρήσεις ανά UE – 2 eNB, 2 UE

2 eNb ανά LTE / 4 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	61.032,00	61.032,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00

Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	12.208,07	12.208,07
Απόδοση (Mbps)	402,96	402,96

Πίνακας 5.12: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 2 eNB, 4 UE

2 eNb ανά LTE / 4 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	879,00	681,25
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	12,237	15,589
Πακέτα/sec	71,83	43,70
Απόδοση (Mbps)	2,37	1,44

Πίνακας 5.12: (β) Μετρήσεις ανά UE – 2 eNB, 4 UE

2 eNb ανά LTE / 8 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	122.064,00	122.064,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	5,000	5,000
Πακέτα/sec	24.414,85	24.414,85
Απόδοση (Mbps)	805,89	805,89

Πίνακας 5.13: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 2 eNB, 8 UE

2 eNb ανά LTE / 8 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	355,63	355,94
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	48,859	48,859
Πακέτα/sec	7,28	7,29
Απόδοση (Mbps)	0,24	0,24

Πίνακας 5.13: (β) Μετρήσεις ανά UE – 2 eNB, 8 UE

2 eNb ανά LTE / 12 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	151.556,00	151.556,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	5,002	5,002
Πακέτα/sec	30.296,80	30.296,80
Απόδοση (Mbps)	1.000,04	1000,04

Πίνακας 5.14: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 2 eNB, 12 UE

2 eNb ανά LTE / 12 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	383,92	400,50
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	48,951	48,946
Πακέτα/sec	7,84	8,18
Απόδοση (Mbps)	0,26	0,27

Πίνακας 5.14: (β) Μετρήσεις ανά UE – 2 eNB, 12 UE

4 eNb ανά LTE / 1 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	30.516,00	30.516,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	6.104,20	6.104,20
Απόδοση (Mbps)	201,49	201,49

Πίνακας 5.15: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 4 eNB, 1 UE

4 eNb ανά LTE / 1 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	1.707,25	1.333,50
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	8,191	10,188
Πακέτα/sec	208,43	130,89

Απόδοση (Mbps)	6,88	4,32
----------------	------	------

Πίνακας 5.15: (β) Μετρήσεις ανά UE – 4 eNB, 1 UE

4 eNb ανά LTE / 2 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	61.032,00	61.032,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	12.208,07	12.208,07
Απόδοση (Mbps)	402,96	402,96

Πίνακας 5.16: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 4 eNB, 2 UE

4 eNb ανά LTE / 2 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	955,63	657,38
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	13,995	16,653
Πακέτα/sec	68,28	39,47
Απόδοση (Mbps)	2,25	1,27

Πίνακας 5.16: (β) Μετρήσεις ανά UE – 4 eNB, 2 UE

4 eNb ανά LTE / 4UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	122.064,00	122.064,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	5,000	5,000
Πακέτα/sec	24.414,85	24.414,85
Απόδοση (Mbps)	805,89	805,89

Πίνακας 5.17: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 4 eNB, 4 UE

4 eNb ανά LTE / 4 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------

Αριθμός Πακέτων	612,63	943,56
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	25,360	14,073
Πακέτα/sec	24,16	67,05
Απόδοση (Mbps)	0,80	2,21

Πίνακας 5.17: (β) Μετρήσεις ανά UE – 4 eNB, 4 UE

4 eNb ανά LTE / 8UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	151.556,00	151,556,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	5,002	5,002
Πακέτα/sec	30.296,80	30.296,80
Απόδοση (Mbps)	1.000,04	1.000,04

Πίνακας 5.18: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 4 eNB, 8 UE

4 eNb ανά LTE / 8 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	232,38	186,13
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	48,859	48,848
Πακέτα/sec	4,76	3,81
Απόδοση (Mbps)	0,16	0,13

Πίνακας 5.18: (β) Μετρήσεις ανά UE – 4 eNB, 8 UE

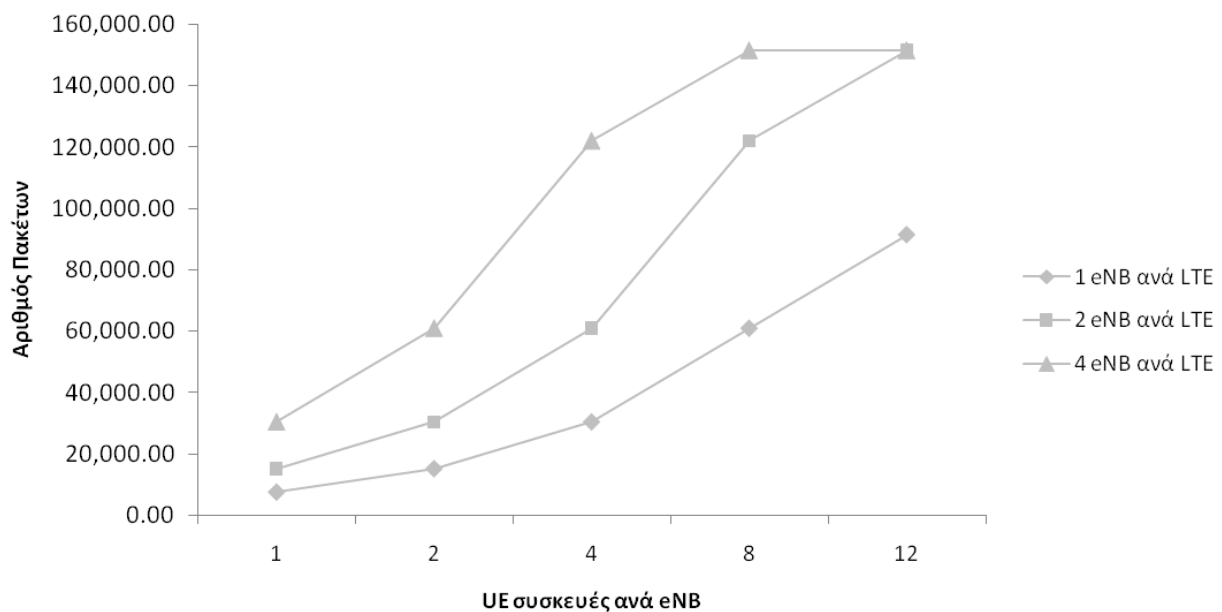
4 eNb ανά LTE / 12 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	151.556,00	151,556,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	5,002	5,002
Πακέτα/sec	30.296,80	30.296,80
Απόδοση (Mbps)	1.000,04	1.000,04

Πίνακας 5.19: (α) Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 4 eNB, 12 UE

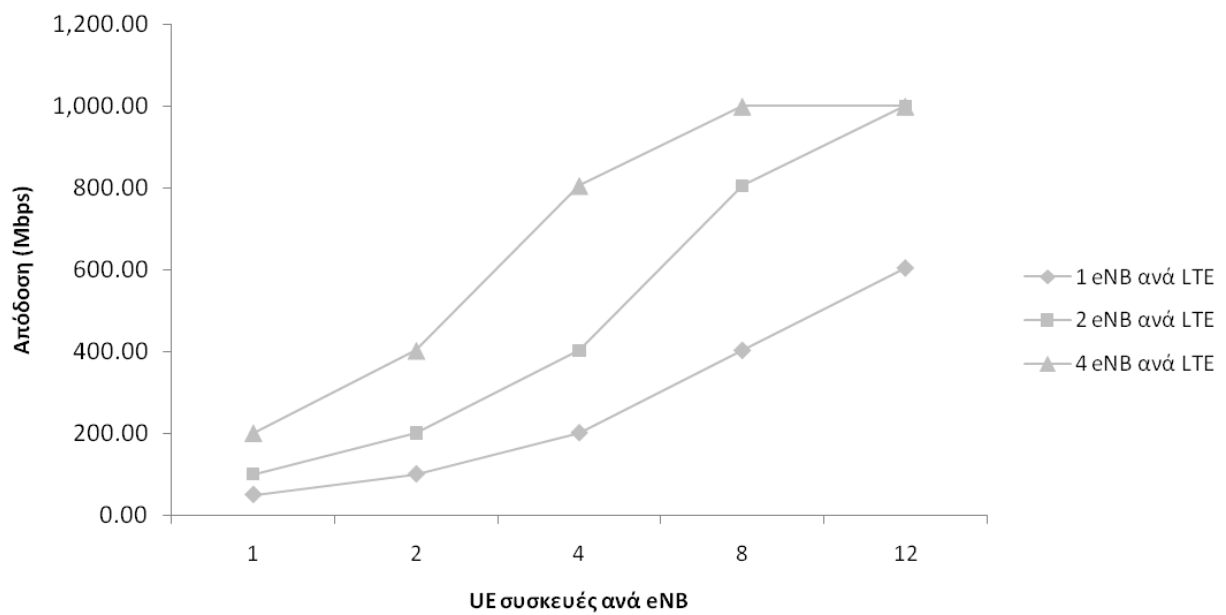
4 eNb ανά LTE / 12 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	195,23	96,42
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	48,931	48,949
Πακέτα/sec	3,99	1,97
Απόδοση (Mbps)	0,13	0,06

Πίνακας 5.19: (β) Μετρήσεις ανά UE – 4 eNB, 12 UE

Τα Σχήματα 5.20 και 5.21 συνοψίζουν τις μετρήσεις αριθμού πακέτων και απόδοσης για το τμήμα του ενσύρματου οπτικού δικτύου. Παρατηρείται ότι η απόδοση του δικτύου αυξάνεται αναλογικά με τον αριθμό των ροών / UE που εξυπηρετούνται. Η αύξηση αυτή κορυφώνεται μέχρι την τιμή του 1Gbps, που είναι και ο περιορισμός που τίθεται από τα χαρακτηριστικά των οπτικών συνδέσεων που μοντελοποιήθηκαν.

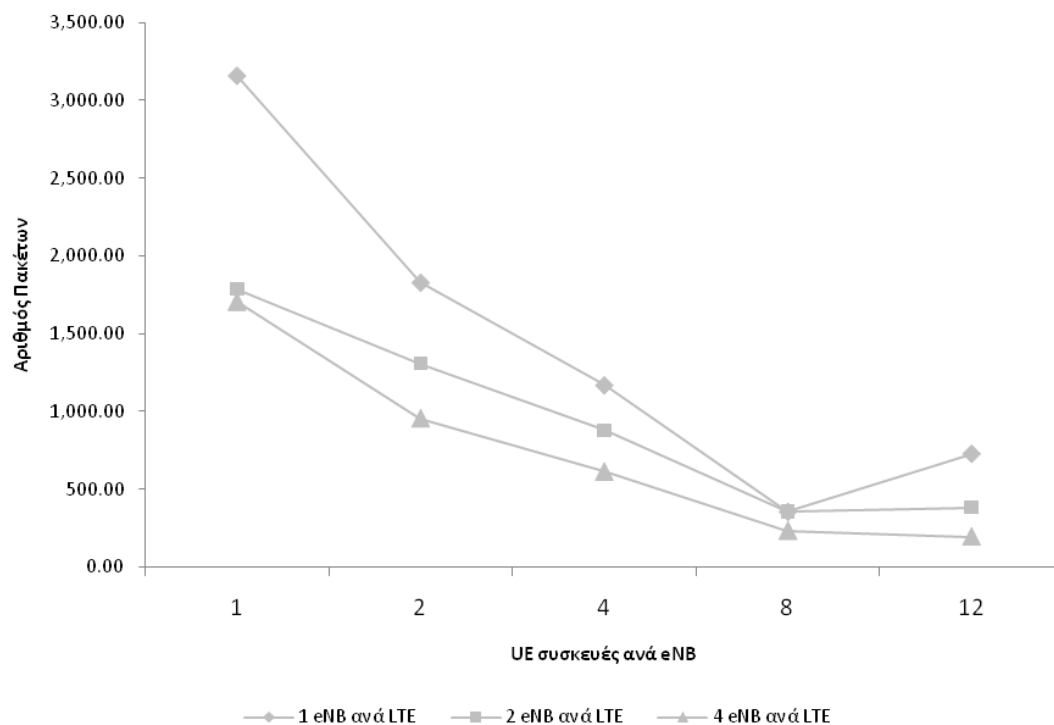


Σχήμα 5.20: Αριθμός Πακέτων σε κάθε Υποδίκτυο OLT-ONU

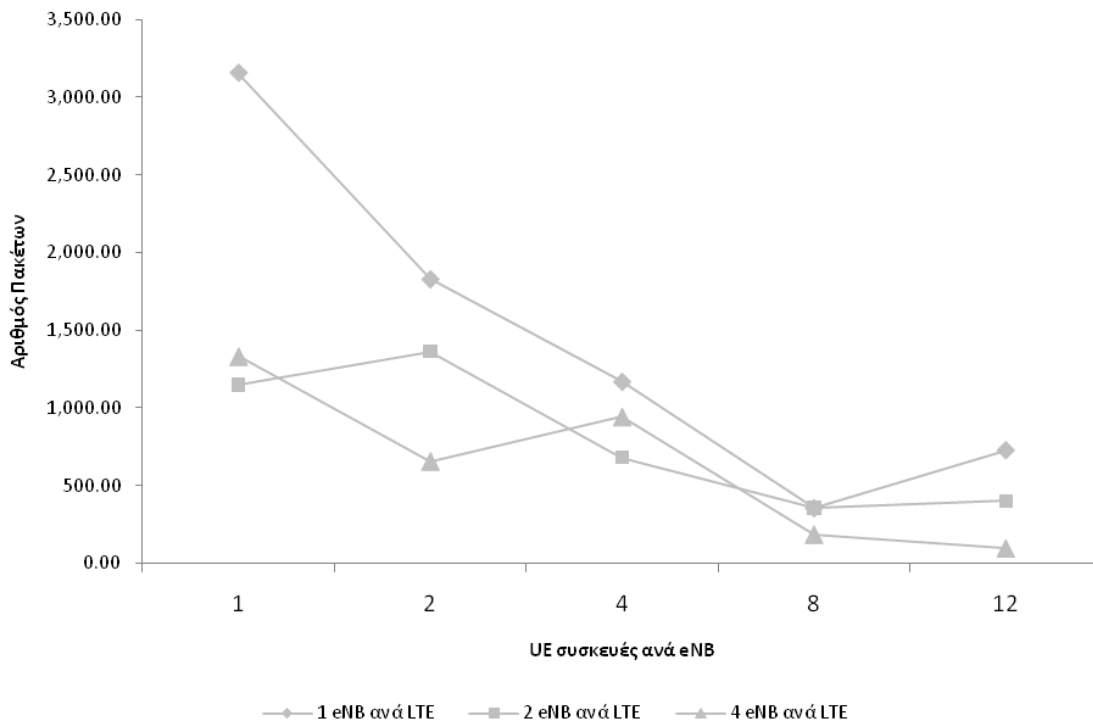


Σχήμα 5.21: Απόδοση σε Mbps σε κάθε Υποδίκτυο OLT-ONU

Τα Σχήματα 5.22 έως 5.25 παρουσιάζουν τις μετρήσεις ανά UE, σε αριθμό πακέτων και απόδοση, για κάθε υποδίκτυο LTE.



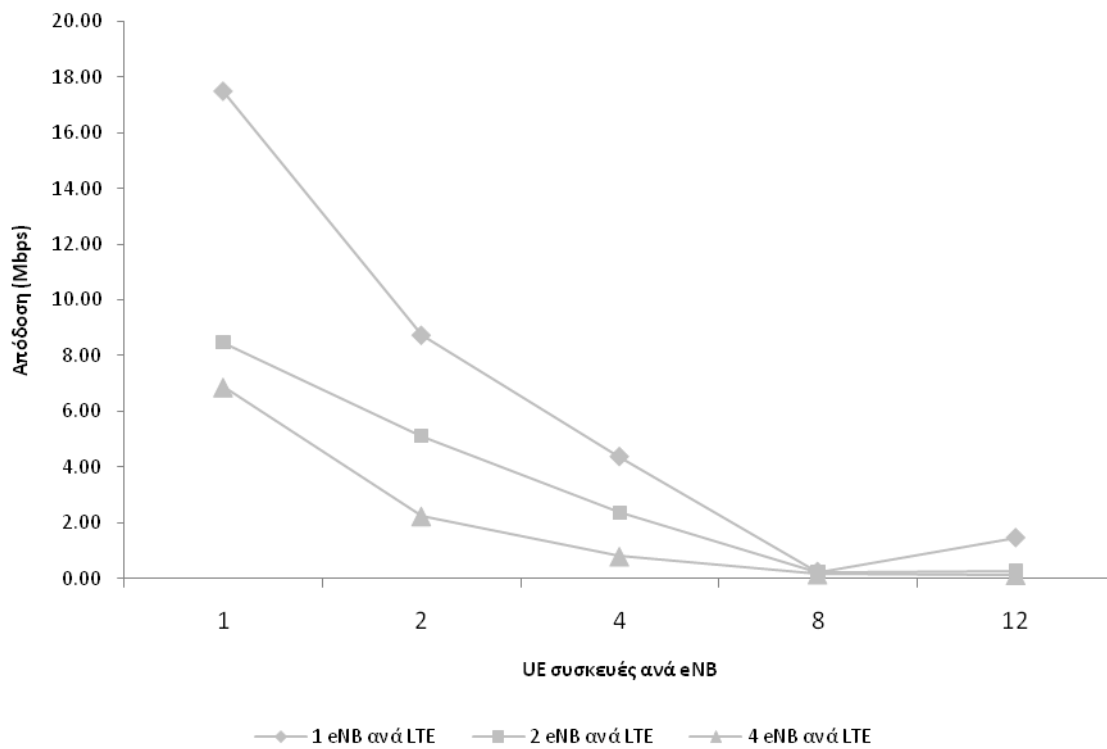
Σχήμα 5.22: Αριθμός Πακέτων ανά UE – 1ο Υποδίκτυο



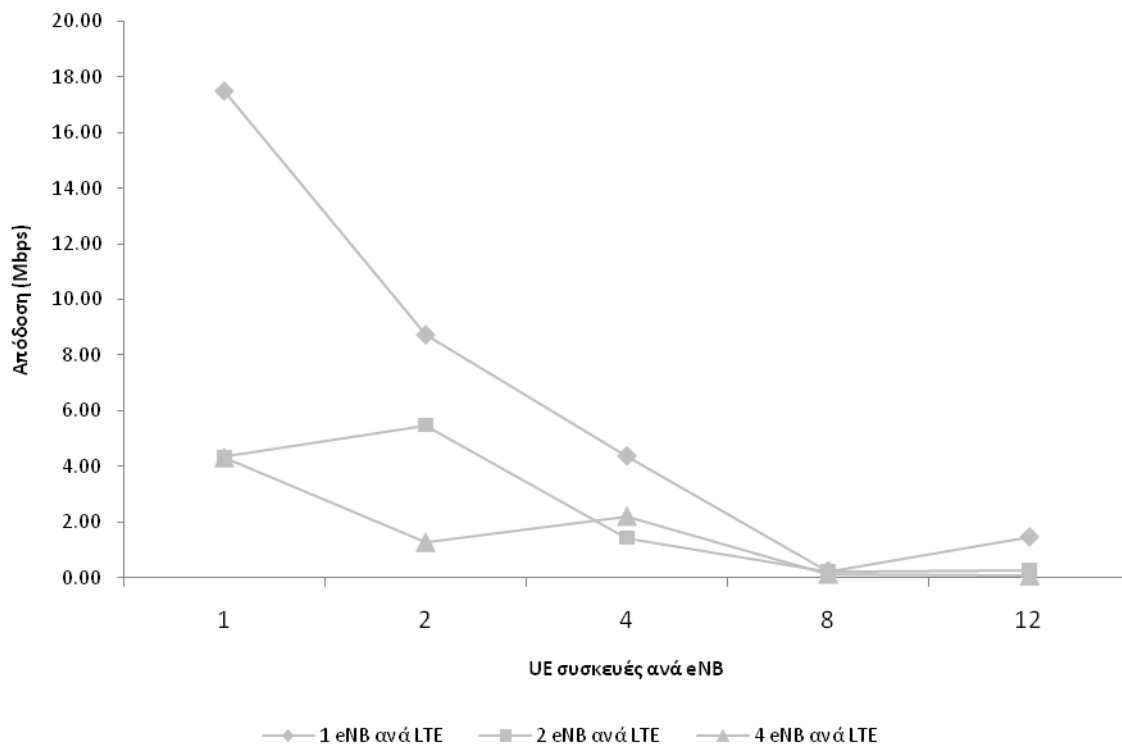
Σχήμα 5.23: Αριθμός Πακέτων ανά UE – 2ο Υποδίκτυο

Συγκρίνοντας τα δύο υποδίκτυα LTE, τόσο στον αριθμό πακέτων όσο και στην απόδοση, προκύπτει ότι για 1 κόμβο eNB ανά υποδίκτυο εμφανίζουν ίδια απόδοση. Η εικόνα διαφοροποιείται στις περιπτώσεις ύπαρξης 2 και 4 κόμβων. Η διαφοροποίηση αυτή εξηγείται από την ύπαρξη παρεμβολών σε κάθε υποδίκτυο από τους ξεχωριστούς κόμβους eNB. Λόγω της τυχαίας κατανομής των UE συσκευών γύρω από τα eNB, οι αποστάσεις της κάθε συσκευής από το eNB που την εξυπηρετεί είναι διαφορετικές σε κάθε υποδίκτυο, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται και η επίδραση των παρεμβολών και κατά συνέπεια και η απόδοση στα δύο υποδίκτυα.

Επίσης, γίνεται εμφανής η προβληματική λειτουργία του αλγορίθμου Round Robin στην περίπτωση ύπαρξης 8 συσκευών UE ανά κόμβο eNB. Η απόδοση του δικτύου είναι μικρότερη με 8 συσκευές σε σχέση με τις 12 συσκευές ανά eNB, πρόβλημα που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αντιμετωπίζεται από τον αλγόριθμο Proportional Fair.



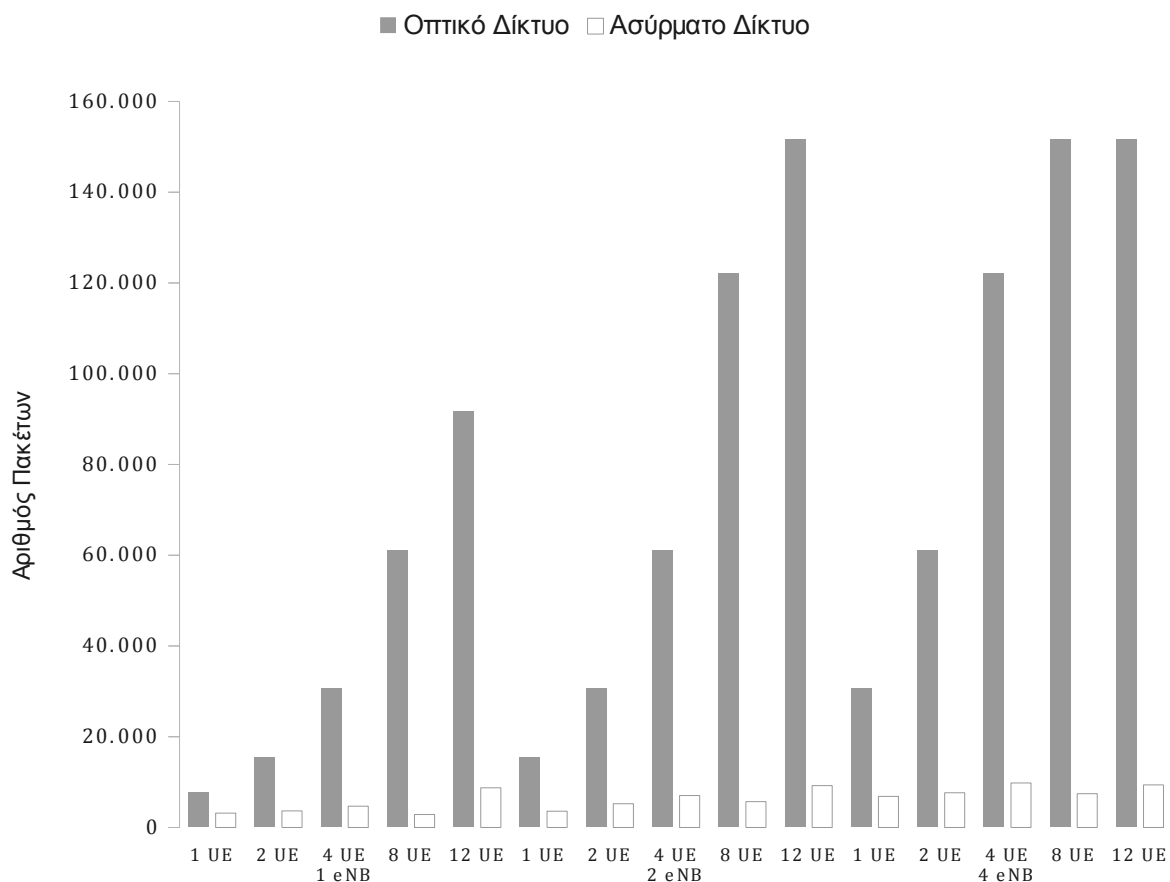
Σχήμα 5.24: Απόδοση ανά UE – 1ο Υποδίκτυο



Σχήμα 5.25: Απόδοση ανά UE – 2ο Υποδίκτυο

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως λόγω της λειτουργίας του επιπέδου RLC σε κατάσταση χωρίς επιβεβαίωση υπάρχει απώλεια πακέτων στο υβριδικό δίκτυο. Το Σχήμα 5.26 παρουσιάζει τα δεδομένα αυτά. Για κάθε σενάριο εμφανίζεται ο αριθμός των πακέτων που περνάει από το οπτικό δίκτυο και ο αριθμός των πακέτων που τελικά φτάνουν στις UE συσκευές μέσω του ασύρματου δικτύου LTE.

Οι απώλειες αυτές οφείλονται τόσο στην μέγιστη απόδοση που επιτρέπει η προκαθορισμένη διαμόρφωση του Ns-3 για το ασύρματο μέσο (που προβλέπει τη διάθεση 25 Resource Blocks για κάθε χρονικό διάστημα 1ms) όσο και στις απώλειες του ασύρματου μέσου. Το προκαθορισμένο μοντέλο διάδοσης για το ασύρματο μέσο στο Ns-3 είναι το μοντέλο Friis, ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της ισχύος που λαμβάνει μία κεραία βάσει της ισχύος του σήματος εκπομπής, της απόστασης από τον πομπό και του μήκους κύματος του σήματος.



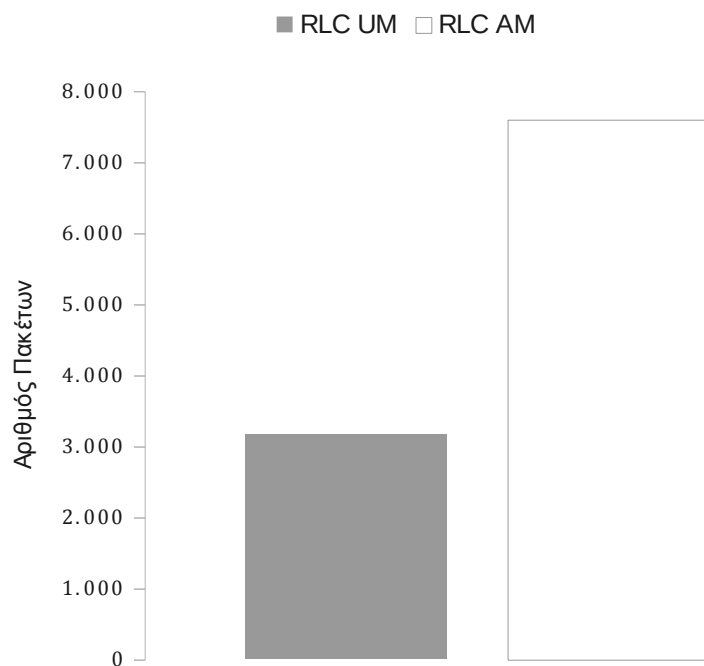
Σχήμα 5.26: Απώλειες πακέτων από το οπτικό στο ασύρματο δίκτυο

1 eNb ανά LTE / 1 UE ανά eNb	1η Διακλάδωση	2 Διακλάδωση
Αριθμός Πακέτων	7.629,00	7.629,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.126,00	4.126,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	4,999	4,999
Πακέτα/sec	1526,79	1.526,79
Απόδοση (Mbps)	50,37	50,37

Πίνακας 5.27: (α) RLC Acknowledge Mode - Μετρήσεις ανά διακλάδωση – 1 eNB, 1 UE

1 eNb ανά LTE / 1 UE ανά eNb	1ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE	2ο Υποδίκτυο LTE Μέσος Όρος ανά UE
Αριθμός Πακέτων	7.600,00	7.600,00
Μέσο Μέγεθος Πακέτου (bytes)	4.124,00	4.124,00
Διάρκεια Αποστολής (sec)	15,138	15,138
Πακέτα/sec	502,05	502,05
Απόδοση (Mbps)	16,56	16,56

Πίνακας 5.27: (β) RLC Acknowledge Mode - Μετρήσεις ανά UE – 1 eNB, 1 UE



Σχήμα 5.28: Σύγκριση Λειτουργία επιπέδου RLC - Μετρήσεις ανά UE – 1 eNB, 1 UE

Η αντιμετώπιση του προβλήματος των απωλειών μπορεί να γίνει με αλλαγή της λειτουργίας του επιπέδου RLC σε κατάσταση με επιβεβαίωση [30].

Οι Πίνακες 5.27 (α) και (β) παρουσιάζουν τις μετρήσεις για τη λειτουργία του ασύρματου υποδικτύου σε κατάσταση RLC με επιβεβαίωση, για 1 eNB ανά υποδίκτυο και 1 συσκευή UE ανά eNB.

Συγκρίνοντας στο Σχήμα 5.28 τα αποτελέσματα αυτά με τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.3 (β), είναι εμφανής η βελτίωση στον αριθμό των πακέτων που φτάνουν μέχρι τις συσκευές UE.

5.4 Τελικά Συμπεράσματα Αξιολόγησης

Βασικός σκοπός της εξομοίωσης ήταν η διερεύνηση της βασικής λειτουργίας του μοντέλου του υβριδικού δικτύου πρόσβασης. Τα σενάρια που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα επέτρεψαν την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των τμημάτων του δικτύου και τον τρόπο με τον οποίο αυτά επηρεάζουν την απόδοσή του.

Βασικό χαρακτηριστικό που επηρεάζει τη λειτουργία ενός υβριδικού δικτύου είναι η ίδια η φύση του ασύρματου μέσου. Όπως έγινε εμφανές κατά την εκτέλεση σεναρίων με το RLC επίπεδο του πρωτοκόλου LTE να τίθεται σε κατάσταση χωρίς επιβεβαίωση, κατά τη σχεδίαση ενός υβριδικού δικτύου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά της φύσης του ασύρματου μέσου. Η εκτέλεση σεναρίων με το RLC επίπεδο σε κατάσταση με επιβεβαίωση οδήγησε σε ελαχιστοποίηση των απωλειών πακέτων χωρίς μεγάλη πτώση της απόδοσης.

Αναδείχτηκε επίσης, ο ρόλος που διαδραματίζει και η επίδραση που έχει ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης που χρησιμοποιείται στο επίπεδο MAC του πρωτοκόλου LTE. Όπως προέκυψε, ο αλγόριθμος Round Robin έχει συγκεκριμένους περιορισμούς και αδυναμίες, οι οποίες αναδεικνύονται σε συγκεκριμένα σενάρια εξομοίωσης. Οι αδυναμίες αυτές οδηγούν σε

αναποτελεσματική κατανομή ασύρματων πόρων, υπό ορισμένες συνθήκες, οδηγώντας σε πτώση της απόδοσης του συνολικού δικτύου. Αντιθέτως, ο αλγόριθμος Proportional Fair επέδειξε σημαντικά βελτιωμένη λειτουργία στα αντίστοιχα σενάρια, οδηγώντας σε πλήρη αξιοποίηση των πόρων του ασύρματου μέσου και σε συνεπή αποτελέσματα απόδοσης.

Βασική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση στο επίπεδο του τελικού χρήστη είναι και ο αριθμός των τερματικών συσκευών UE που εξυπηρετούνται από κάθε κόμβο eNB. Οι ασύρματοι πόροι που διαθέτει κάθε eNB είναι περιορισμένοι και ο διαμοιρασμός τους σε μεγαλύτερο αριθμό ροών πακέτων, οδηγεί σε μειωμένες τιμές απόδοσης. Οι μέγιστοι ρυθμοί απόδοσης που επιτεύχθηκαν ανά τελικό χρήστη έφτασαν το ύψος των 17 Mbps. Τέτοιες τιμές, φυσικά, δεν ενισχύουν το επιχείρημα για αντικατάσταση των υπαρχόντων τεχνολογιών δικτύων πρόσβασης, που παρέχουν ταχύτητες πρόσβασης της τάξης των 24-30 Mbps. Εξάλλου, η υποστήριξη αυτού του επιχειρήματος δεν αποτελεί αντικειμενικό στόχο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Το πρότυπο LTE προβλέπει ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης με διαφορετική διαμόρφωση του επιπέδου MAC και τη χρήση μέχρι και 100 Resource Blocks για κάθε χρονικό διάστημα. Επίσης, με χρήση πολλαπλών κεραιών στους κόμβους eNB η αναμενόμενη τιμή του ρυθμού μετάδοσης φτάνει και τα 300Mbps ανά συσκευή UE. Αν και τέτοιες τιμές δεν κατέστη δυνατό να παρατηρηθούν κατά τη διάρκεια των εξομοιώσεων, εντούτοις έγινε αντιληπτή η επίδραση του αριθμού συσκευών που συνδέονται σε κάθε κόμβο eNB.

Ο αριθμός των κόμβων eNB, είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό που αποδείχτηκε ότι επηρεάζει την απόδοση του δικτύου. Η ύπαρξη περισσότερων κόμβων στα ασύρματα υποδίκτυα LTE, οδηγεί σε παρεμβολές και συγκρούσεις εκπομπών που επηρεάζουν την απόδοση. Αναδείχτηκε έτσι η σημασία που έχει η κατάλληλη σχεδίαση της τοποθέτησης των κεραιών eNB στην ελαχιστοποίηση αυτών των παρεμβολών.

Όπως αναφέρθηκε κατά την περιγραφή της σχεδίασης του μοντέλου εξομοίωσης, αρκετά στοιχεία του υβριδικού δικτύου μοντελοποιήθηκαν με αρκετά απλοποιημένο τρόπο. Ιδιαίτερα όσον αφορά στο παθητικό οπτικό δίκτυο, η ανυπαρξία αποκλειστικού μοντέλου εξομοίωσης από τον εξομοιωτή Ns-3, δεν επέτρεψε τη μοντελοποίηση του με την απαιτούμενη λεπτομέρεια. Όπως αναδείχτηκε από τα αποτελέσματα των σεναρίων που υλοποιήθηκαν, το ενσύρματο τμήμα του υποδικτύου δεν επηρέασε ουσιαστικά τη

λειτουργία και την απόδοση του ολοκληρωμένου δικτύου, έχοντας ως ουσιαστικό ρόλο τη μεταφορά των πακέτων από τους απομακρυσμένους κόμβους μέχρι το ασύρματο δίκτυο. Η ύπαρξη ολοκληρωμένου μοντέλου παθητικών οπτικών δικτύων από το Ns-3 θα επέτρεπε την εκτέλεση σεναρίων για τη μελέτη της ικανότητας εξισορρόπησης φορτίου του δικτύου, με λειτουργία του δικτύου με διαφορετικά φορτία κίνησης στο κάθε υποδίκτυο και την εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατανομή του κοινού οπτικού μέσου μεταξύ των ONU του δικτύου.

Όσον αφορά το ασύρματο υποδίκτυο LTE, η απουσία μοντέλου για την εξομοίωση του επιπέδου ελέγχου από το Ns-3 – LENA, δεν επέτρεψε την εκτέλεση εξομοιώσεων για την επίδειξη των ικανοτήτων αυτοοργάνωσης του δικτύου. Καθώς η πρόσδεση μίας συσκευής UE σε έναν κόμβο eNB πραγματοποιείται με απευθείας κλήση συναρτήσεων εκτός του χρόνου εξομοίωσης, δεν κατέστη δυνατόν να μελετηθούν περιπτώσεις αποσύνδεσης κόμβων του δικτύου και αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων επανασύνδεσης των τερματικών συσκευών. Επίσης, δεν μελετήθηκαν περιπτώσεις στις οποίες οι τερματικές συσκευές επιλέγουν τον καλύτερο κόμβο eNB για να συνδεθούν, βάσει της αντιλαμβανόμενης ποιότητας της πιθανής σύνδεσης με τους διαθέσιμους κόμβους. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της μοντελοποίησης δικτύων LTE στο Ns-3 που περιόρισε τα εφικτά σενάρια αξιολόγησης είναι η ανυπαρξία διαφοροποίησης στην αντιμετώπιση των φορέων EPS, βάσει του επιπέδου QoS. Αν και το Ns-3 επιτρέπει τον χαρακτηρισμό των φορέων EPS βάσει επιπέδου QoS, εντούτοις ο σχεδιασμός του επιπέδου RLC δεν επιτρέπει τη διαφορετική αντιμετώπισή τους κατά την κατανομή των διαθέσιμων ασύρματων πόρων.

Παρά τις ελλείψεις του μοντέλου που αναφέρθηκαν, το βασικό πρόγραμμα εξομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να αποτελέσει κατάλληλη βάση για την περαιτέρω αξιολόγηση υβριδικών τεχνολογιών δικτύων πρόσβασης. Μπορεί εύκολα να υποστηρίξει πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις του εξομοιωτή Ns-3 όπως εξομοίωση του επιπέδου ελέγχου του προτύπου LTE ή ολοκληρωμένη εξομοίωση δικτύων PON. Επίσης αποτελεί καλή επιλογή για την αξιολόγηση μελλοντικών υλοποιήσεων καινούριων αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης του επιπέδου MAC του LTE, που σχεδιάζονται τόσο από την ομάδα ανάπτυξης του Ns-3, όσο και από κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακού υλικού. Η καλύτερη εξομοίωση του φυσικού μέσου και των προτεινόμενων διαμορφώσεων των κόμβων eNB με τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών θα έδινε τη δυνατότητα στο προτεινόμενο μοντέλο να παράγει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα στο επίπεδο της απόδοσης ανά τερματική συσκευή, και σε αυτό των

απωλειών του φυσικού μέσου. Τέλος, μπορεί άμεσα να υποστηρίξει σενάρια αξιολόγησης αλγορίθμων βελτιστοποίησης της τοποθέτησης κόμβων eNB για την καλύτερη εξυπηρέτηση των τελικών χρηστών και την ελαχιστοποίηση παρεμβολών και απωλειών.

Βιβλιογραφία

- [1] G. Agrawal. “Fiber-Optic Communication Systems”. 2002
- [2] N. Baldo, M. Miozzo. “Spectrum-aware Channel and PHY layer modeling for ns3”. Proceedings of ICST NSTools, 2009
- [3] A. Banerjee, Y. Park, F. Clarke, H. Song, S. Yang, G. Kramer, K. Kim, B. Mukherjee. “Wavelength-Division-Multiplexed Passive Optical Network (WDM-PON) Technologies for Broadband Access: A Review “. Journal of Optical Networking, Τόμος 4, Τεύχος 11, 737-758, 2005
- [4] J. Banks, J. Carson, B. Nelson, D. Nicol. “Discrete-Event System Simulation”. 2005
- [5] G. Carneiro, P. Fortuna, M. Ricardo. “FlowMonitor – A Network Monitor Framework for the Network Simulator 3 (NS-3). NSTOOLS 2009 Conference, 2009
- [6] C. Cox. “An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications”. 2012
- [7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. “4G: LTE/LTE – Advanced for Mobile Broadband”. 2011
- [8] A. Ghosh, J. Zhang, J.G Andrews, R. Muhamed. “Fundamentals of LTE”. 2010
- [9] A. Gumaste, T. Antony. “First Mile Access Network and Enabling Technologies”. 2004
- [10] T. R. Henderson, M. Lacage, G. F. Riley. “Network Simulations with the Ns-3 Simulator”. ACM SIGCOMM, 2008
- [11] T. R. Henderson, S. Roy, S. Floyd, G. F. Riley. “Ns-3 Project Goals”, WNS2 '06 Workshop on ns-2: the IP Network Simulator, 2006

- [12] D. Hood, E. Trojer. "Gigabit-capable Passive Optical Networks". 2012
- [13] G. Kramer, B. Mukherjee, G. Pesavento. "Ethernet PON (ePON): design and analysis of an optical access network". Photonic Network Communications, Τόμος 3, Τεύχος 3, 307-319, 2001
- [14] C.F. Lam. "Passive Optical Networks". 2007
- [15] A.M. Law. "Simulation Modeling and Analysis". 2007
- [16] B. Mukherjee. "Optical WDM Networks". 2006
- [17] M. Olsson, S. Rommer, S. Sultana, L. Frid, C. Mulligan. "SAE and the Evolved Packet Core". 2009
- [18] J.T.J. Penttinen. "The LTE/SAE Deployment Handbook". 2012
- [19] G. Piro, N. Baldo, M. Miozzo. "An LTE Module for the Ns-3 Network Simulator". Wns3, 2011
- [20] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, P. Camarda. "A Two-Level Scheduling Algorithm for QoS Support in the Downlink of LTE Cellular Networks". European Wireless, 2010
- [21] R. Ramaswami, K. Sivarajan, G. Sasaki. "Optical Networks, 3rd Edition". 2009
- [22] G. F. Riley. "Ns-3, The Network Simulator: WNS2 Tutorial". WNS2 '08 Workshop on ns-2: the IP Network Simulator, 2008
- [23] S. Sarkar, S. Dixit, B. Mukherjee. "Hybrid Wireless-Optical-Broadband-Access Network (WOBAN): A Review of Relevant Challenges". Journal of LightWave Technology, Τόμος 25, Τεύχος 11, 3329-3340, 2007
- [24] S. Sarkar, H. Yen, S. Dixit, B. Mukherjee. "Hybrid Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN): Network Planning and Setup". Journal on Selected Areas in Communications, Τόμος 26, Τεύχος 6, 12-21, 2008

- [25] M. Sauter. "Beyond 3G – Bringing Networks, Terminals and the Web Together: LTE, WiMax, IMS, 4G Devices and the Mobile Web 2.0". 2009
- [26] H. Seo, B. G. Lee. "A Proportional-Fair Power Allocation Scheme for Fair and Efficient Multiuser OFDM Systems". IEEE GLOBECOM, 2004
- [27] S. Sesia, I. Toufik. "LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice, Second Edition". 2011
- [28] A. Shami, M. Maier, C. Assi. "Broadband Access Network – Technologies and Deployments". 2009
- [29] K. Wehrle, M. Gunes, J. Gross. "Modeling and Tools for Network Simulation". 2010
- [30] Network Simulator 3 [Internet]. "LTE Simulator Documentation Release M4". <http://iptechwiki.cttc.es>. 2011
- [31] Network Simulator 3 [Internet]. "ns-3 Manual Release ns-3.14". <http://www.nsnam.org>. 2012
- [32] Network Simulator 3 [Internet]. "ns-3 Tutorial Release ns-3.14". <http://www.nsnam.org>. 2012
- [33] Network Simulator 3 [Internet]. "Overview of the Ns-3 Network Simulator". <http://www.nsnam.org>. 2011
- [34] Wireshark [Internet]. "Wireshark User's Guide for Wireshark 1.9". <http://www.wireshark.org>. 2012

Παράρτημα Α

Στο παράρτημα Α συμπεριλαμβάνεται ο κώδικας του βασικού προγράμματος εξομοίωσης. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε, με παραμετροποίηση, για την εκτέλεση όλων των σεναρίων εξομοίωσης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5.

```
/* -*- Mode:C++; c-file-style:"gnu"; indent-tabs-mode:nil; -*- */

#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/lte-module.h"
#include "ns3/lte-helper.h"
#include "ns3/epc-helper.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include <iostream>
#include "ns3/config-store-module.h"
#include "ns3/onoff-application.h"
#include "ns3/bulk-send-helper.h"
#include "ns3/flow-monitor-helper.h"
#include "ns3/ipv4-flow-classifier.h"

using namespace ns3;

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("Script");

int main (int argc, char *argv[])
{

    CommandLine cmd;
    cmd.Parse (argc, argv);

    /* ***** GLOBAL VARIABLES *****
     *
     * *****/

    GlobalValue::Bind ("ChecksumEnabled", BooleanValue (true));

    /* Variables affecting the topology of the network */
    uint32_t neNBs = 1; // Number of eNB nodes per ONU/EPC, Values 1, 2, 4
    uint32_t nUEs = 1; // Number of UE nodes per eNB, Values 1, 2, 4, 8, 12

    /* IP Addressing & Routing Variables */
    Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;
    Ipv4AddressHelper p2paddress;
```

```

Ipv4AddressHelper epcAddress;
Ipv4AddressHelper epcAddress2;

InternetStackHelper internet;
internet.SetRoutingHelper (ipv4RoutingHelper);

MobilityHelper mobility;

/* ***** GLOBAL VARIABLES *****
*      END      *
* ***** */

/* Create the OLT node */

NodeContainer nodesOLT;
nodesOLT.Create (1);

// Assign OLT to a position
Ptr<ListPositionAllocator> positionAllocOLT = CreateObject<ListPositionAllocator>();
positionAllocOLT->Add (Vector (0, 0, 0));
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.SetPositionAllocator (positionAllocOLT);
mobility.Install (nodesOLT.Get(0));

internet.Install (nodesOLT.Get(0));

/* ***** CREATE THE FIRST OLT-ONU BRANCH ***** */

// Create the Node Container to include the ONU nodes
NodeContainer nodesONU;

Ptr<LteHelper> lteHelper_first = CreateObject<LteHelper> ();
Ptr<EpcHelper> epcHelper_first = CreateObject<EpcHelper> ();

// Lte and Epc Helpers Attributes
epcHelper_first->SetAttribute ("S1uLinkMtu", UintegerValue (65000));
lteHelper_first->SetAttribute ("EpsBearerToRlcMapping", EnumValue(LteHelper::RLC_UM_ALWAYS)); // Change
to AM for RLC Acknowledge mode
lteHelper_first->SetSchedulerType("ns3::RrFfMacScheduler"); // Change to PfFfMacScheduler for Proportional
Fair Algorithm

lteHelper_first->SetEpcHelper (epcHelper_first);

Ptr<Node> pgw = epcHelper_first->GetPgwNode (); // Get a pointer to the EPC
epcAddress.SetBase ("8.0.0.0", "255.0.0.0");
Ipv4InterfaceContainer epcInterfaces_first;
NetDeviceContainer tundevice;
tundevice.Add (pgw->GetDevice (0));
tundevice.Add (pgw->GetDevice (1));

// Assign different IP Address network instead of the default 7.0.0.0
epcInterfaces_first = epcAddress.Assign (tundevice);

// Add the EPC to the ONU node container
nodesONU.Add (pgw);

```

```

/* Create the point-to-point helper to model the optical link between
 * ONU and OLT*/

PointToPointHelper p2pOLTtoONU;
p2pOLTtoONU.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("1000Mbps"));
p2pOLTtoONU.SetDeviceAttribute ("Mtu", IntegerValue (65500));
p2pOLTtoONU.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue ("0.005ms"));

// Install p2p on the first pair of OLT-ONU nodes and assign IP address
NetDeviceContainer opticaldevices_first = p2pOLTtoONU.Install (nodesOLT.Get (0), nodesONU.Get (0));
p2paddress.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer p2pInterface_first;
p2pInterface_first = p2paddress.Assign ( opticaldevices_first);

// Create the eNB and UE nodes
NodeContainer enbNodes_first;
enbNodes_first.Create (neNBs);

NodeContainer ueNodes_first;
ueNodes_first.Create (neNBs*nUEs);

/* ***** CREATE TOPOLOGY ***** */

// Position allocator for EPC-ONU nodes

Ptr<ListPositionAllocator> positionAllocONU_first = CreateObject<ListPositionAllocator>();

// Assign the ONU to a position
positionAllocONU_first->Add (Vector (1000, 0, 0));

mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.SetPositionAllocator (positionAllocONU_first);
mobility.Install (nodesONU.Get(0));

// Assign each eNB node around the ONU randomly
mobility.SetPositionAllocator ("ns3::RandomDiscPositionAllocator", "X", StringValue ("1000.0"), "Y", StringValue
("0.0"), "Rho", StringValue ("Uniform:0:150"));
mobility.Install (enbNodes_first);

Vector enbposition;
std::ostringstream strsx;
std::ostringstream strsy;
std::string stringx;
std::string stringy;

for (uint32_t i = 0; i < neNBs; i++)
{
    for (uint32_t j = 0; j < nUEs; j++)
    {
        enbposition = enbNodes_first.Get (i)->GetObject<MobilityModel>()->GetPosition();
        strsx << enbposition.x;
        stringx = strsx.str();
        strsy << enbposition.y;
        stringy = strsy.str();

        // Assign each UE around the respective eNodeB randomly
        mobility.SetPositionAllocator ("ns3::RandomDiscPositionAllocator", "X", StringValue (stringx), "Y",

```



```

StringValue (stringy), "Rho", StringValue ("Uniform:0:50"));
    mobility.Install (ueNodes_first.Get(nUEs*i+));
    strsx.clear();
    strsx.str("");
    strsy.clear();
    strsy.str("");
}
}

/* ***** END TOPOLOGY ***** */

// Create Lte Net Devices on the eNB and UE nodes and assign UE nodes to an eNB

NetDeviceContainer enbLteDevs_first = lteHelper_first->InstallEnbDevice (enbNodes_first);
Ipv4InterfaceContainer enbInterfaces_first;

for (uint32_t i = 0; i < neNBs; i++)
{
    enbNodes_first.Get(i)->GetObject<Ipv4>()->AddAddress(1, Ipv4InterfaceAddress
(epcAddress.NewAddress(), Ipv4Mask ("255.0.0.0")));
}

NetDeviceContainer ueLteDevs_first = lteHelper_first->InstallUeDevice (ueNodes_first);
for (uint32_t i = 0; i < neNBs; i++)
{
    for (uint32_t j = 0; j < nUEs; j++)
    {
        lteHelper_first->Attach (ueLteDevs_first.Get(nUEs*i+j), enbLteDevs_first.Get(i));
    }
}

/* ***** INSTALL INTERNET STACKS ON THE NODES ***** */
/* ***** CREATE ROUTING ENTRIES ***** */

//The OLT has already an internet stack installed
internet.Install (ueNodes_first);

Ipv4InterfaceContainer ueIplfice_first;
ueIplfice_first = epcAddress.Assign (ueLteDevs_first);

for (uint32_t u = 0; u < ueNodes_first.GetN (); ++u)
{
    Ptr<Node> ueNode = ueNodes_first.Get(u);
    Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting_first = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (ueNode-
>GetObject<Ipv4> ());
    ueStaticRouting_first->SetDefaultRoute (epcHelper_first->GetUeDefaultGatewayAddress (), 1);
}

Ptr<Ipv4StaticRouting> oltRouting_first = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (nodesOLT.Get(0)-
>GetObject<Ipv4> ());
oltRouting_first->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("8.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), nodesOLT.Get(0)-
>GetObject<Ipv4>()->GetInterfaceForDevice (opticaldevices_first.Get(0)));

lteHelper_first->ActivateEpsBearer (ueLteDevs_first, EpsBearer (EpsBearer::NGBR_VIDEO_TCP_DEFAULT),
EpcTft::Default ());

```

```

Ipv4AddressGenerator::Reset();

/* ***** END OF THE FIRST OLT-ONU BRANCH ***** */

/* ***** CREATE THE SECOND OLT-ONU BRANCH ***** */

Ptr<LteHelper> lteHelper_second = CreateObject<LteHelper> ();
Ptr<EpcHelper> epcHelper_second = CreateObject<EpcHelper> ();

// Lte and Epc Helpers Attributes
epcHelper_second->SetAttribute ("S1uLinkMtu", UIntegerValue (65000));
lteHelper_second->SetAttribute ("EpsBearerToRlcMapping", EnumValue(LteHelper::RLC_UM_ALWAYS)); //
Change to AM for RLC Acknowledge Mode
lteHelper_second->SetSchedulerType("ns3::RrFfMacScheduler"); // Change to PffFMacScheduler for Proportional
Fair Algorithm

lteHelper_second->SetEpcHelper (epcHelper_second);

Ptr<Node> pgw2= epcHelper_second->GetPgwNode (); // Get a pointer to the EPC
epcAddress2.SetBase ("9.0.0.0", "255.0.0.0");
Ipv4InterfaceContainer epcInterfaces_second;
NetDeviceContainer tundevice_second;
tundevice_second.Add (pgw2->GetDevice (0));
tundevice_second.Add (pgw2->GetDevice (1));

// Assign different IP Address network instead of the default 7.0.0.0
epcInterfaces_second = epcAddress2.Assign (tundevice_second);

// Add the EPC to the ONU node container
nodesONU.Add (pgw2);

// Install point-to-point devices on the second pair of OLT-ONU nodes
NetDeviceContainer opticaldevices_second = p2pOLTtoONU.Install (nodesOLT.Get (0), nodesONU.Get (1));
p2paddress.SetBase ("10.1.2.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer p2pInterface_second;
p2pInterface_second = p2paddress.Assign ( opticaldevices_second);

// Create the eNB and UE nodes
NodeContainer enbNodes_second;
enbNodes_second.Create (neNBs);

NodeContainer ueNodes_second;
ueNodes_second.Create (neNBs*nUEs);

/* ***** CREATE TOPOLOGY ***** */

// Position allocator for EPC-ONU nodes

Ptr<ListPositionAllocator> positionAllocONU_second = CreateObject<ListPositionAllocator>();
// Assign the ONU to a position
positionAllocONU_second->Add (Vector (0, 1000, 0));

```

```

mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.SetPositionAllocator (positionAllocONU_second);
mobility.Install (nodesONU.Get(1));

// Assign each eNB node around the ONU randomly
mobility.SetPositionAllocator ("ns3::RandomDiscPositionAllocator", "X", StringValue ("0.0"), "Y", StringValue
("1000.0"), "Rho", StringValue ("Uniform:0:150"));
mobility.Install (enbNodes_second);

for (uint32_t i = 0; i < neNBs; i++)
{
    for (uint32_t j = 0; j < nUEs; j++)
    {
        enbposition = enbNodes_second.Get (i)->GetObject<MobilityModel>()->GetPosition();
        strsx << enbposition.x;
        stringx = strsx.str();
        strsy << enbposition.y;
        stringy = strsy.str();

        // Assign each UE around the respective eNodeB randomly
        mobility.SetPositionAllocator ("ns3::RandomDiscPositionAllocator", "X", StringValue (stringx), "Y",
StringValue (stringy), "Rho", StringValue ("Uniform:0:50"));
        mobility.Install (ueNodes_second.Get(nUEs*i+j));
        strsx.clear();
        strsx.str("");
        strsy.clear();
        strsy.str("");
    }
}

/* ***** END TOPOLOGY ***** */

// Create Lte Net Devices on the eNB and UE nodes and assign UE nodes to an eNB

NetDeviceContainer enbLteDevs_second = lteHelper_second->InstallEnbDevice (enbNodes_second);
Ipv4InterfaceContainer enbInterfaces_second;

for (uint32_t i = 0; i < neNBs; i++)
{
    enbNodes_second.Get(i)->GetObject<Ipv4>()->AddAddress(1, Ipv4InterfaceAddress
(epcAddress2.NewAddress(), Ipv4Mask ("255.0.0.0")));
}

NetDeviceContainer ueLteDevs_second = lteHelper_second->InstallUeDevice (ueNodes_second);
for (uint32_t i = 0; i < neNBs; i++)
{
    for (uint32_t j = 0; j < nUEs; j++)
    {
        lteHelper_second->Attach (ueLteDevs_second.Get(nUEs*i+j), enbLteDevs_second.Get(i));
    }
}

/* ***** INSTALL INTERNET STACKS ON THE NODES ***** */
/* ***** CREATE ROUTING ENTRIES ***** */

```

```

//The OLT has already an internet stack installed
internet.Install (ueNodes_second);

Ipv4InterfaceContainer ueIface_second;
ueIface_second = epcAddress2.Assign (ueLteDevs_second);

for (uint32_t u = 0; u < ueNodes_second.GetN (); ++u)
{
    Ptr<Node> ueNode = ueNodes_second.Get(u);
    Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting_second = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (ueNode-
>GetObject<Ipv4> ());
    ueStaticRouting_second->SetDefaultRoute (epcHelper_second->GetUeDefaultGatewayAddress (), 1);
}

oltRouting_first->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("9.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), 2);

lteHelper_second->ActivateEpsBearer (ueLteDevs_second, EpsBearer (EpsBearer::NGBR_VIDEO_TCP_DEFAULT),
EpcTft::Default ());

Ipv4AddressGenerator::Reset();

/* ***** END OF THE SECOND OLT-ONU BRANCH ***** */

/* ***** CREATE THE "INTERNET" ***** */

// "internet" point-to-point helper
PointToPointHelper p2p_internet;
p2p_internet.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue (DataRate ("100Gb/s")));
p2p_internet.SetDeviceAttribute ("Mtu", UIntegerValue (65500));
p2p_internet.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (Seconds (0.001)));

// One "internet" remote node per LTE subnetworkd
NodeContainer internetnodes_first, internetnodes_second;
internetnodes_first.Create (1);
internet.Install (internetnodes_first);
internetnodes_second.Create (1);
internet.Install (internetnodes_second);
NetDeviceContainer internetDevices_first, internetDevices_second;

internetDevices_first=p2p_internet.Install(internetnodes_first.Get(0), nodesOLT.Get(0));
internetDevices_second=p2p_internet.Install(internetnodes_second.Get(0), nodesOLT.Get(0));

Ipv4AddressHelper addressinternetIP;
addressinternetIP.SetBase ("10.1.3.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer internetInterface;
internetInterface = addressinternetIP.Assign (internetDevices_first);
addressinternetIP.SetBase("10.1.4.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer internetInterface2;
internetInterface2 = addressinternetIP.Assign (internetDevices_second);

// Routing

Ptr<Ipv4StaticRouting> internetHostRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (internetnodes_first.Get(0)-
>GetObject<Ipv4> ());
internetHostRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("8.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), Ipv4Address
("10.1.3.2"), 1);

internetHostRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("9.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), Ipv4Address

```

```

("10.1.3.2"), 1);

Ptr<Ipv4StaticRouting> internetHostRouting2 = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting
(internetNodes_second.Get(0)->GetObject<Ipv4>());
internetHostRouting2->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("8.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), Ipv4Address
("10.1.4.2"), 1);

internetHostRouting2->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("9.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), Ipv4Address
("10.1.4.2"), 1);

Ptr<Ipv4StaticRouting> opticalRouting_first = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (nodesONU.Get(0)-
>GetObject<Ipv4>());
opticalRouting_first->AddHostRouteTo (Ipv4Address ("10.1.3.1"), Ipv4Address ("10.1.1.1"), nodesONU.Get(0)-
>GetObject<Ipv4>()->GetInterfaceForDevice (opticalDevices_first.Get(1)));
opticalRouting_first->AddHostRouteTo (Ipv4Address ("10.1.4.1"), Ipv4Address ("10.1.1.1"), nodesONU.Get(0)-
>GetObject<Ipv4>()->GetInterfaceForDevice (opticalDevices_first.Get(1)));

Ptr<Ipv4StaticRouting> opticalRouting_second = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (nodesONU.Get(1)-
>GetObject<Ipv4>());
opticalRouting_second->AddHostRouteTo (Ipv4Address ("10.1.3.1"), Ipv4Address ("10.1.2.1"), 2);
opticalRouting_second->AddHostRouteTo (Ipv4Address ("10.1.4.1"), Ipv4Address ("10.1.2.1"), 2);

/* ***** END OF THE "INTERNET" ***** */

/* ***** INSTALL APPLICATIONS ***** */

// ON OFF APPLICATION
uint16_t port = 40000;
Address sinkLocalAddress (InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny(), port));
PacketSinkHelper sink ("ns3::UdpSocketFactory", sinkLocalAddress);
ApplicationContainer serverApps;
serverApps = sink.Install(ueNodes_first);
serverApps.Add (sink.Install(ueNodes_second));
serverApps.Start (Seconds (1.0));
serverApps.Stop (Seconds (50.0));

OnOffHelper onoff ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress ("10.1.3.1", port));
onoff.SetAttribute ("OnTime", StringValue ("Constant:1.0"));
onoff.SetAttribute ("OffTime", StringValue ("Constant:0.0"));
onoff.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue(4096));
onoff.SetAttribute ("DataRate", DataRateValue(50000000));

ApplicationContainer clientApps;
for (uint32_t i=0; i < ueNodes_first.GetN(); i++)
{
    clientApps.Add(onoff.Install(internetNodes_first.Get(0)));
    clientApps.Get(i)->SetAttribute ("Remote",AddressValue( InetSocketAddress
(ueInterface_first.GetAddress(i), port)));
}

ApplicationContainer clientApps2;
for (uint32_t i=0; i < ueNodes_second.GetN(); i++)
{
    clientApps2.Add(onoff.Install(internetNodes_second.Get(0)));
    clientApps2.Get(i)->SetAttribute ("Remote",AddressValue( InetSocketAddress

```

```

(ueIface_second.GetAddress(i), port));
}

clientApps.Start (Seconds (1.0));
clientApps.Stop (Seconds (6.0));
clientApps2.Start (Seconds (1.0));
clientApps2.Stop (Seconds (6.0));

/* ***** END OF APPLICATIONS ***** */

/* ***** TRACING ***** */

p2pOLTtoONU.EnablePcap ("OLT-Traces-", nodesOLT);
p2pOLTtoONU.EnablePcap ("ONU-Traces-", nodesONU);
internet.EnablePcapIpv4 ("UE-First-Traces-", ueNodes_first);
internet.EnablePcapIpv4 ("UE-Second-Traces-", ueNodes_second);

/* ***** FLOWMONITOR ***** */
/* Uncomment to allow flowmonitor operation
FlowMonitorHelper flowmon;
Ptr<FlowMonitor> monitor;
monitor = flowmon.Install(internetnodes_first);
monitor = flowmon.Install(internetnodes_second);
monitor = flowmon.Install(ueNodes_first);
monitor = flowmon.Install(ueNodes_second);
*/

/* ***** SIMULATION ***** */

Simulator::Stop (Seconds (50.0));
// PDCP, RLC and MAC level tracing
lteHelper_first->EnableTraces();
lteHelper_second->EnableTraces();

Simulator::Run ();

// Configure Flowmonitor output, uncomment to enable
/*monitor->CheckForLostPackets();
Ptr<Ipv4FlowClassifier> classifier = DynamicCast<Ipv4FlowClassifier> (flowmon.GetClassifier());
std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats> stats = monitor->GetFlowStats();
for (std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats>::const_iterator iter = stats.begin(); iter != stats.end();
++iter)
{
Ipv4FlowClassifier::FiveTuple t = classifier->FindFlow (iter->first);
NS_LOG_UNCOND ("Flow ID: " << iter->first << " Src Addr " << t.sourceAddress << " Dst Addr " <<
t.destinationAddress);
NS_LOG_UNCOND ("Tx Packets = " << iter->second.txPackets);
NS_LOG_UNCOND ("Tx Bytes = " << iter->second.txBytes);
NS_LOG_UNCOND ("Rx Packets = " << iter->second.rxPackets);
NS_LOG_UNCOND ("Rx Bytes = " << iter->second.rxBytes);
NS_LOG_UNCOND ("Rx Start = " << iter->second.timeFirstRxPacket);
NS_LOG_UNCOND ("Rx Finish = " << iter->second.timeLastRxPacket);
NS_LOG_UNCOND ("Throughput: " << iter->second.txBytes * 8.0 / (iter-

```

```

>second.timeLastTxPacket.GetSeconds()-iter->second.timeFirstTxPacket.GetSeconds()) / 1024 << "Kbps");
    NS_LOG_UNCOND ("Throughput UE: " << iter->second.rxBytes * 8.0 / (iter-
>second.timeLastRxPacket.GetSeconds()-iter->second.timeFirstRxPacket.GetSeconds()) / 1024 << "Kbps");
    }
*/

    Simulator::Destroy ();
    return 0;

    /* ***** END OF SIMULATION ***** */

}

```