



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΠΙΔΟΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

BPL- WiMAX

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία Α. Κόνδη

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΠΙΔΟΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

BPL- WiMAX

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία Α. Κόνδη

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Π. Κωττής

.....
Χ. Καμάρλης

.....
Α. Παναγόπουλος

Αθήνα, Μάρτιος 2009

.....
Γεωργία Α. Κόνδη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεωργία Κόνδη, 2009.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδοσης υβριδικού δικτύου BPL- WiMAX. Σε αυτά τα πλαίσια θα προσομοιωθούν 3 διαφορετικές τοπολογίες του υβριδικού δικτύου και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μεταξύ τους προς ανάδειξη της τοπολογίας που παρουσιάζει την καλύτερη επίδοση.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας περιγράφονται οι δυο τεχνολογίες από τις οποίες αποτελείται το υβριδικό δίκτυο. Αυτό το μέρος περιλαμβάνει περιγραφή της λειτουργίας τους και αναφορά στις τεχνικές λεπτομέρειες των προτύπων τους. Επίσης, αναλύεται η έννοια του «Δικτύου Επόμενης Γενιάς» και παρουσιάζονται οι τοπολογίες στις οποίες βασίστηκαν οι προσομοιώσεις.

Στο δεύτερο μέρος περιγράφεται η διαδικασία της προμοίωσης που έγινε με το πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων OPNET. Παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα για τρεις τύπους καναλιού BPL και σχολιάζονται. Στη συνέχεια, διεξάγονται τα συμπεράσματα από τη σύγκριση των τριών τοπολογιών που μελετήθηκαν και προτείνεται αυτή που παρουσίασε την καλύτερη επίδοση. Στο τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία της προσομοίωσης ενός υπάρχοντος υβριδικού δικτύου και τα αποτελέσματα αυτής και σχολιάζονται.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: WiMAX, BPL, Δίκτυο επόμενης γενιάς, υβριδικό δίκτυο, φυσικό στρώμα, στρώμα ζεύξης, πρότυπο 802.16, πρότυπο p1901, OPNET, προσομοίωση

ABSTRACT

The aim of this dissertation is to study the performance of BPL- WiMAX hybrid-network. Within these frameworks 3 different topologies of the hybrid network are simulated and the results of the simulations are then compared and contrasted to find the topology that presents the best performance.

In the first part of the dissertation the two technologies which constitute the hybrid network are described. This part includes a description of their operation and a presentation of the technical details of their standards. Moreover, the concept of “Next Generation Network” is analyzed and the topologies which were used as the bases of the simulations are presented.

In the second part of the dissertation the simulation process which was done through the OPNET network simulation program is described. A comparative analysis and a commentary of the results are presented. Then, conclusions are drawn from comparing the three topologies which were studied and the one which shows the best performance is proposed. At the end, the simulation of an existing hybrid network is described and its results are presented and commented.

KEY WORDS: WiMAX, BPL, Next Generation Networks, Hybrid network, physical layer, MAC, 802.16 standard, p1901, OPNET, simulation

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, κατ' αρχάς, τον καθηγητή μου κ.Παναγιώτη Γ. Κωττή που με εμπιστεύθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και ήταν πάντα πρόθυμος να με καθοδηγήσει όταν το χρειαζόμουν.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια Διδάκτορα Αγγελική Σαράφη για την ουσιαστική συμβολή και την πολύτιμη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Ευχαριστώ και για την ηθική υποστήριξη πέραν της επιστημονικής καθοδήγησης.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω στους γονείς μου, Βιβή και Ανδρέα, που με στηρίζουν πάντα και μου έδωσαν την ευκαιρία να φθάσω ως εδώ. Σε αυτούς χρωστάω ό,τι έχω καταφέρει ως σήμερα και τους ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	6
Ευχαριστίες.....	8
Πίνακας σχημάτων-πινάκων.....	12
Εισαγωγή.....	14
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: BROADBAND OVER POWERLINE</u>	16
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ	16
1.2 ΤΟ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	17
1.3 ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ	18
1.3.1 ΠΡΟΧΕΙΡΟ ΠΡΟΤΥΠΟ p1901	18
1.3.1.1. ΤΥΠΟΙ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ BPL	18
1.3.1.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ.....	19
1.3.1.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ(PHY) ΚΑΙ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΖΕΥΞΗΣ(MAC).....	21
1.3.2 HOME PLUG AV	23
1.3.2.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	23
1.3.2.2 ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ	24
1.3.2.3 ΣΤΡΩΜΑ ΖΕΥΞΗΣ.....	26
1.3.2.3 ΑΣΦΑΛΕΙΑ.....	30
1.3.2.4 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΜΕ BPL.....	30
1.3.2.5 ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	31
1.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	31
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: WiMAX</u>	32
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	32
2.2 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ	36
2.2.1 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	36
2.2.2 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....	39
2.3 ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΖΕΥΞΗΣ	40
2.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ WiMAX	41
2.5 Η ΘΕΣΗ ΤΟΥ WiMAX ΣΤΙΣ ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	43
2.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	44
2.7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ OFDM	45
2.7.1 Η ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ OFDM.....	46
1.2 ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΦΥΛΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ.....	48
2.7.3 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ	50
2.7.4 ΤΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ OFDM ΣΤΟ WiMAX	52

2.7.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ OFDM ΣΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ HP 1.0 ΚΑΙ HP AV	53
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ BPL- WiMAX</u>	53
3.1 ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	54
3.1.1 Ορισμός.....	54
3.1.2 Χαρακτηριστικά NGN	55
3.1.3 ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΤΩΝ NGN	56
3.2 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ BPL-WiMAX ΩΣ NGN	58
3.2.1 Το WiMAX ως backhaul για δίκτυο BPL.....	59
3.2.2 Το WiMAX ως συγκεντρωτής κίνησης για ομάδες BPL.....	60
3.2.3 Το WiMAX ως διασύνδεση μεταξύ ομάδων BPL.....	61
3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ	62
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ</u>	62
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΟΡΝΕΤ	63
4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ	67
4.2.1 Σχεδιασμός τοπολογιών	68
4.2.1.1 Τοπολογία 1: Το WiMAX ως backhaul για δίκτυο BPL.....	70
4.2.1.2 Τοπολογία 2: Το WiMAX ως συγκεντρωτής κίνησης για ομάδες BPL.....	71
4.2.1.3 Τοπολογία 3: Το WiMAX ως διασύνδεση μεταξύ ομάδων BPL	72
4.2.2 Εφαρμογή κίνησης.....	72
4.2.3 Επιλογή στατιστικών	74
4.2.4 ΤΕΛΙΚΕΣ ΕΠΙΛΟΓΕΣ	75
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</u>	76
5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ	77
5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΛΟ ΚΑΝΑΛΙ	84
5.2.1 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΚΙΝΟΥΜΕΝΗ ΚΙΝΗΣΗ IP	84
5.2.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ TCP	86
5.2.3 ΜΕΓΕΘΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ.....	88
5.2.4 ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΣΤΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΟ ΜΕΣΟ	91
5.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΕΝΩΠΟΥ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΡΙΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ	92
5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
5.4.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΑΝΑΛΙΟΥ.....	93
5.4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ.....	94
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ</u>	95
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΛΑΡΙΣΑΣ	96
6.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΛΑΡΙΣΑΣ	97
6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	99
6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	102

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα 1.1: Παράδειγμα δικτύου BPL.....	16
Σχήμα 1.3.2.1: Η διαστρωμάτωση στην αρχιτεκτονική του HPAV.....	23
Σχήμα 1.3.2.2.1: Αστερισμός του σχήματος διαμόρφωσης 16- QAM, όπου μεταφέρονται 4 bits πληροφορίας ανά φέρον ανά σύμβολο.....	25
Σχήμα 1.3.2.2:Block διάγραμμα των HPAV πομπού(TX) και δέκτη(RX) για το φυσικό στρώμα.....	26
Σχήμα 1.3.2.2.α:Η δομή της περιόδου Beacon.....	28
Σχήμα 2.1.1: Τύποι πρόσβασης που προσφέρει η τεχνολογία WiMAX.....	34
Πίνακας 2.1.1: Τύποι πρόσβασης του WiMAX και οι απαιτήσεις τους.....	36
Σχήμα 2.2.1.2: Αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας (FDD) και με διαίρεση χρόνου (TDD).....	38
Πίνακας 2.2.1: Συγκεντρωτικά στοιχεία των προτύπων 802.16-2004 και 802.16-2005.....	40
Σχήμα 2.4.1 : Τεχνολογία WiMAX προσφέρει σημείο προς πολλαπλά σημεία δίκτυο κορμού για σταθερά/νομαδικά δίκτυα 802.11 και τοπικά δίκτυα.....	42
Σχήμα 2.4.2: Σταθμός βάσης «κινητού WiMAX» σε άμεση σύνδεση με τελικούς χρήστες σε κίνηση.....	43
Σχήμα 2.5.1: Οι τεχνολογίες του IMT-2000 και οι τύποι πολλαπλής προσπέλασης που χρησιμοποιούν.....	44
Σχήμα 2.7.1: Φάσμα OFDM τριών υποφερόντων.Οι μηδενισμοί αντιστοιχούν σε κορυφές γειτονικών υποφερόντων.....	48
Σχήμα2.7.2:Καθυστερημένες εκδοχές συμβόλου λόγω ανακλάσεων και η σημασία του διαστήματος φύλαξης.....	49
Σχήμα 2.7.3: Σύστημα μετάδοσης OFDM.....	50
Σχήμα2.7.4: Παράδειγμα ανάδευσης.....	51
Σχήμα2.7.5: Εξασθένηση σε κανάλι επιλεκτικό ως προς τη συχνότητα.....	53
Σχήμα 3.1.1: Οριζόντια ενσωμάτωση τεχνολογιών πρόσβασης.....	55
Σχήμα 3.1.1: Η ανεξαρτησία του επιπέδου μεταφοράς από το επίπεδο εφαρμογών..	56
Σχήμα 3.2.1.1: Δίκτυο BPL με WiMAX να λειτουργεί ως backhaul.....	60
Σχήμα 3.2.2.1: Δίκτυο BPL με το WiMAX να δρα ως συσσωρευτής κίνησης.....	61
Σχήμα 3.2.3.1: Δίκτυο BPL χωρισμένο σε ομάδες οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κόμβων WiMAX.....	62

Σχήμα 4.1.1: Ένα δείγμα δικτύου στην επιφάνεια εργασίας και η αντίστοιχη παλέτα	64
Σχήμα 4.1.2: Node Editor ενός αντικειμένου	65
Σχήμα 4.1.3: Process Editor.....	66
Σχήμα 4.1.4: Δείγμα κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού C που περιγράφει μια διαδικασία.....	67
Σχήμα 4.2.1: Μοντέλο δρομολογητή με 8 ενσύρματες διεπαφές.....	69
Σχήμα 4.2.1.1: Προσομοίωση τοπολογίας «BPL με WiMAX backhaul» στο OPNET	70
Σχήμα 4.2.1.2: Προσομοίωση τοπολογίας «BPL με WiMAX συγκεντρωτή» στο OPNET	71
Σχήμα 4.2.1.3.1: Προσομοίωση τοπολογίας «BPL με WiMAX διασύνδεση» στο OPNET	72
Σχήμα 4.2.2 Παράθυρο επιλογών του προφίλ κίνησης που εφαρμόστηκε στις προσομοιώσεις	73
Πίνακας 4.2.2: Η αντιστοιχία μεταξύ υπηρεσιών που προσφέρονται από το δίκτυο και των εφαρμογών που παρέχει το OPNET.....	74
Πίνακας 5.1.1: Αντιστοίχιση διαύλων BPL με πιθανότητα λάθους και χρώμα με το οποίο αναπαρίστανται στα διαγράμματα.....	77
Σχήμα 5.1.1: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul»	78
Σχήμα 5.1.2: Η κίνηση που έλαβε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul»	78
Σχήμα 5.1.3: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή».....	79
Σχήμα 5.1.4: Η κίνηση που έλαβε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή».....	79
Σχήμα 5.1.5: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση»	80
Σχήμα 5.1.6: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση»	80
Σχήμα 5.1.7: Η καθυστέρηση που εισάγει το ενσύρματο μέσο στην τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul».....	82
Σχήμα 5.1.8: Η καθυστέρηση που εισάγει το ενσύρματο μέσο στην τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή»	82
Σχήμα 5.1.9: Η καθυστέρηση που εισάγει το ενσύρματο μέσο στην τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση»	83

Πίνακας 5.2: Αντιστοίχιση τοπολογιών με το χρώμα καμπύλης που τους αναλογεί	84
Σχήμα 5.2.1.1: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για τις τρεις τοπολογίες.....	84
Σχήμα 5.2.1.2: Η κίνηση που έλαβε ο εξυπηρετητής για τις τρεις τοπολογίες.....	85
Σχήμα 5.2.1.3: Η κίνηση που χάθηκε για τις τοπολογίες.....	86
Σχήμα 5.2.2.1: Η συνολική καθυστέρηση TCP για τις τοπολογίες «BPL με WiMAX backhaul» (μπλε), «BPL με WiMAX συσσωρευτή» (κόκκινο) και «BPL με WiMAX διασύνδεση» (πράσινο).....	87
Σχήμα 5.2.2.2: Ο αριθμός επαναμεταδόσεων TCP για τις τοπολογίες.....	88
Σχήμα 5.2.3.1: Η ρυθμοαπόδοση στο ασύρματο μέσο για τις τρεις τοπολογίες.....	89
Σχήμα 5.2.3.2: Τα χαμένα δεδομένα για το ασύρματο μέσο για τις τρεις τοπολογίες	89
Σχήμα 5.2.3.3: Η καθυστέρηση στο ασύρματο μέσο για τις τρεις τοπολογίες.....	90
Σχήμα 5.2.4: Η καθυστέρηση στο ενσύρματο μέσο για τις τρεις τοπολογίες.....	92
Σχήμα 5.3.1: : Η ρυθμοαπόδοση στο ασύρματο μέσο για τις τοπολογίες.....	93
Σχήμα 5.3.2: : Η κίνηση που έλαβε ο εξυπηρετητής για τις τρεις τοπολογίες.....	93
Σχήμα 5.3.3: Η συνολική καθυστέρηση TCP για τις τρεις τοπολογίες.....	94
Σχήμα 6.1: Μέρος του εγκατεστημένου δικτύου BPL- Wi-fi στη Λάρισα.....	97
Σχήμα 4.3.2: Μέρος της τοπολογίας του δικτύου της Λάρισας όπως προσομοιώθηκε στο OPNET.....	97
Πίνακας 4.3.2: Αποστάσεις μεταξύ μονάδων BPL.....	98
Σχήμα 6.3.1: Κίνηση IP που λήφθηκε (μπλε), που στάλθηκε (κόκκινο)και που χάθηκε (πράσινο)	99
Σχήμα 6.3.2: Φορτίο(μπλε), ρυθμοαπόδοση (κόκκινο) και χαμένα δεδομένα(πράσινο) στο ασύρματο μέσο	100
Σχήμα 6.3.3: Καθυστέρηση TCP	101
Σχήμα 6.3.4: Αριθμός αναμεταδόσεων TCP	101
Σχήμα 6.3.5: Καθυστέρηση στο ενσύρματο (μπλε) και στο ασύρματο μέσο (κόκκινο)	102

Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η προσομοίωση υβριδικών δικτύων BPL- WiMAX που παρουσιάζουν διαφορετικές τοπολογίες ή διαφορετική ποιότητα καναλιού. Σκοπός είναι να διεξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη βέλτιστη τοπολογία ως προς την επίδοση και να μελετηθεί πόσο επηρεάζεται η επίδοση του υβριδικού δικτύου από την ποιότητα του καναλιού.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι αρχές που διέπουν την τεχνολογία BPL. Δεδομένου ότι επίσημο πρότυπο για την τεχνολογία BPL δεν υπάρχει ακόμα, αναφέρονται οι απαιτήσεις που καλείται αυτό να έχει. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τεχνικές λεπτομέρειες που περιέχει το ανεπίσημο πρότυπο p1901 για το φυσικό στρώμα και το στρώμα ζεύξης.

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην τεχνολογία WiMAX. Περιγράφεται η λειτουργία της ασύρματης αυτής τεχνολογίας και δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος και του στρώματος ζεύξης που περιέχονται στην οικογένεια προτύπων 802.16. Στο τέλος του κεφαλαίου, κρίνεται απαραίτητη η αναφορά στη διαμόρφωση που χρησιμοποιούν οι δυο τεχνολογίες που περιγράφονται στα δυο πρώτα κεφάλαια. Έτσι, το κεφάλαιο κλείνει ένα παράρτημα με τις αρχές λειτουργίας της διαμόρφωσης OFDM και τα οφέλη που αυτή προσφέρει.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αφού έχει γίνει η περιγραφή των τεχνολογιών BPL- WiMAX ξεχωριστά, ακολουθεί η περιγραφή του υβριδικού δικτύου που αυτές δημιουργούν. Αρχικά, αναλύεται η έννοια του δικτύου επόμενης γενιάς και στη συνέχεια περιγράφονται οι τρεις τοπολογίες υβριδικών δικτύων BPL- WiMAX που χρησιμοποιούνται ως βάση στην προσομοίωση.

Τα τρία πρώτα κεφάλαια ασχολούνταν με τη θεωρία πίσω από το υβριδικό δίκτυο. Τα επόμενα κεφάλαια αφορούν στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων OPNET. Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στο περιβάλλον του OPNET και, στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία της προσομοίωσης, οι κόμβοι που χρησιμοποιήθηκαν και οι επιλογές που έγιναν για να είναι δυνατή η διεξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Την περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης ακολουθούν τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν σε μορφή καμπυλών. Αυτά συγκρίνονται μεταξύ τους και σχολιάζονται. Βγαίνουν τα συμπεράσματα ότι όσο χειρότερη είναι η ποιότητα του καναλιού τόσο χειροτερεύει η επίδοση των τριών τοπολογιών και ότι η Τρίτη τοπολογία που χρησιμοποιείται παρουσιάζει τη βέλτιστη επίδοση.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η προσομοίωση ενός υπάρχοντος υβριδικού δικτύου παρόμοιου με όσα αναφέρονται παραπάνω. Την περιγραφή των χαρακτηριστικών του δικτύου ακολουθεί η αναφορά στη διεξαγωγή της προσομοίωσης και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτής. Τα αποτελέσματα, τελικά, σχολιάζονται ώστε να βγει ένα συμπέρασμα για την επίδοση που μπορεί να προσφέρει ένα υβριδικό δίκτυο σε πραγματικές συνθήκες.

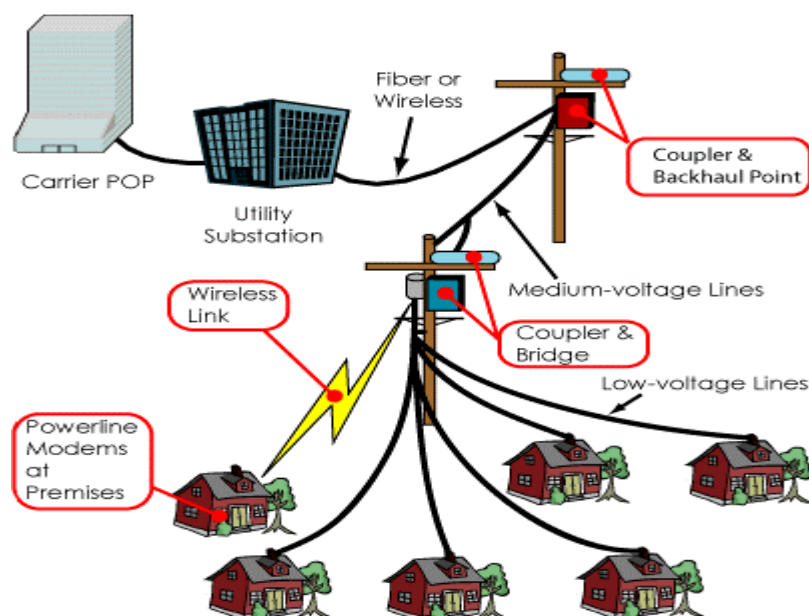
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: BROADBAND

OVER POWER LINES (BPL)

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Ο όρος BPL αναφέρεται στην τεχνολογία που δίνει τη δυνατότητα της μετάδοσης ευρυζωνικών τηλεπικοινωνιακών σημάτων μέσω του ηλεκτρικού δικτύου διανομής. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από το δίκτυο υψηλής τάσης, διανέμεται από το δίκτυο μέσης τάσης και φθάνει στους τελικούς χρήστες μέσω του δικτύου χαμηλής τάσης. Η τεχνολογία BPL μπορεί να εφαρμοστεί στα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης, προσφέροντας ευρυζωνικές υπηρεσίες καθώς και δυνατότητα διαχείρισης του ίδιου του δικτύου.

Η ιδέα της χρήσης του ηλεκτρικού δικτύου διανομής για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς ξεκίνησε από την τεχνολογία PLC (Power Line Communication), η οποία προσφέρει υπηρεσίες αυτοματισμών για το «Έξυπνο Σπίτι» και είναι ήδη ευρέως διαδεδομένη στην αγορά. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας BPL κατέστη δυνατή χάρη στις σύγχρονες τεχνικές διαμόρφωσης (OFDM, GMSK) οι οποίες επιτρέπουν μετάδοση δεδομένων σε ταχύτητες μεγαλύτερες ακόμα και των 200 Mbps.



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα δικτύου BPL

1.2 ΤΟ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Με την απελευθέρωση της τηλεπικοινωνιακής αγοράς, οι πάροχοι αναζητούν νέες ανταγωνιστικές τεχνολογίες. Ένα από τα ελκυστικότερα πλεονεκτήματα του BPL, που το καθιστά ανταγωνιστικό, είναι το μέσο μετάδοσης που χρησιμοποιεί. Το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής είναι ήδη εγκατεστημένο και φθάνει σε κάθε σημείο της Ελλάδας. Έτσι, οι πάροχοι δεν είναι αναγκασμένοι να δημιουργήσουν δίκτυο από την αρχή (π.χ. δίκτυο οπτικών ινών), διαδικασία δαπανηρή και χρονοβόρα. Επιπλέον, γίνεται δυνατή η προσφορά ευρυζωνικών υπηρεσιών σε απομακρυσμένες ή δύσβατες περιοχές που δεν έχουν τη δυνατότητα πρόσβασης στο Internet με άλλο τρόπο.

Το φυσικό μέσο μετάδοσης του BPL εκτός από το μεγαλύτερο πλεονέκτημά του αποτελεί και σοβαρό του μειονέκτημα. Το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε συχνότητες 50-60 Hz. Η χρήση του μέσου αυτού για μετάδοση σημάτων σε υψηλότερες συχνότητες δημιουργεί σοβαρά προβλήματα. Επιπλέον, το δίκτυο διανομής αποτελείται από διάφορα είδη αγωγών, συνδεδεμένων μεταξύ τους κατά τυχαίο τρόπο, που τερματίζουν σε φορτία διαφορετικής κάθε φορά εμπέδησης. Στα σημεία διασύνδεσης αγωγών απαιτείται προσαρμογή για να μην υπάρχουν απώλειες ενέργειας λόγω ανακλάσεων στις ασυνέχειες. Ένα τέτοιο δίκτυο παρουσιάζει απόκριση πλάτους και φάσης που εξαρτάται από τη συχνότητα. Δηλαδή κάποιες συχνότητες μπορεί να εμφανίζουν μικρή εξασθένηση ενώ σε άλλες η εξασθένηση να είναι τόσο ισχυρή ώστε το σήμα να υποβιβάζεται κάτω από το επιτρεπόμενο κατώφλι σήματος προς θόρυβο. Τα χαρακτηριστικά του διαύλου μπορεί επίσης να μεταβάλλονται με το χρόνο καθώς τα φορτία μεταβάλλονται με το χρόνο.

Όταν μεταδίδουν τηλεπικοινωνιακά σήματα, τα ηλεκτρικά καλώδια αντιμετωπίζουν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας καθώς δρουν ως κεραίες δημιουργώντας παρεμβολές σε γειτονικά ασύρματ συστήματα που λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες. Αυτό περιορίζει τα επίπεδα ισχύος που μπορούν να εγχυθούν σε μια γραμμή μεταφοράς. Εφ'όσον το πρόβλημα της εξασθένησης δεν μπορεί να λυθεί με αύξηση της εγχυόμενης ισχύος, χρησιμοποιούνται αναμεταδότες συνήθως ανά 500 μέτρα. Τέλος, κάποιες συχνότητες μπορεί να είναι ακατάλληλες για μετάδοση λόγω παρεμβολών από ερασιτεχνικές ραδιομεταδόσεις.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου διανομής αποτελούν προκλήσεις από τις οποίες άλλες έχουν αντιμετωπιστεί με διάφορα μέτρα ενώ άλλες

πρέπει να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά από τα επερχόμενα πρότυπα για το BPL. Το βέβαιο είναι ότι τα εμπόδια που παρουσιάζονται είναι πολύ μικρά σε σχέση με τις δυνατότητες που προσφέρει το BPL. Ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης που φθάνει τα 200 Mbps καθώς και το ήδη εγκατεστημένο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί έχουν κεντρίσει ήδη το ενδιαφέρον των παρόχων για την τεχνολογία BPL ως εναλλακτικού ή συμπληρωματικού τρόπου ευρυζωνικής πρόσβασης κυρίως σε αγροτικές ή και αραιοκατοικημένες περιοχές.

1.3 ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

Η προτυποποίηση της τεχνολογίας BPL έχει ήδη αρχίσει και βρίσκεται σε εξέλιξη. Υπάρχουν ήδη τα πρότυπα Home Plug 1.0 και Home Plug AV τα οποία ορίστηκαν από την HomePlug Powerline Alliance, μια ομάδα 65 εταιρειών μελών. Το επίσημο πρότυπο της IEEE βρίσκεται ακόμη υπό σχεδιασμό, ενώ δημοσιεύθηκε ένα πρόχειρο πρότυπο (draft) από την υπεύθυνη ομάδα εργασίας για το BPL το p1901 που περιέχει τις προδιαγραφές για το φυσικό στρώμα (PHY) και το στρώμα ζεύξης (MAC).

1.3.1 ΠΡΟΣΩΡΙΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ p1901

1.3.1.1. ΤΥΠΟΙ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ BPL

Η τεχνολογία BPL χρησιμοποιεί τα δίκτυα μέσης τάσης (Μ.Τ.) και χαμηλής τάσης (Χ.Τ.), ξεχωριστά το καθένα είτε συνδυασμό τους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες τοπολογίες προσφέροντας διαφορετικές υπηρεσίες. Στο πρότυπο p1901 ορίζονται τρεις κύριοι τύποι δικτύων πρόσβασης BPL :

A. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές με πολλές πολυκατοικημένες μονάδες (multi-dwelling units-MDUs), τα δίκτυα πρόσβασης BPL μπορούν να λειτουργήσουν ώστε να μοιράζονται μια κοινή σύνδεση κορμού (backbone) μεταξύ πολλών MDUs τροφοδοτούμενη από το ίδιο ηλεκτρικό δίκτυο ΧΤ. Σε αυτήν την τοπολογία, τα δίκτυα πρόσβασης BPL μπορούν να παρουσιάσουν μια πολύτιμη εναλλακτική λύση έναντι ενός τοπικού βρόχου DSL. Αυτά τα δίκτυα πρόσβασης BPL μπορούν να είναι είτε δίκτυα ΧΤ είτε συνδυασμός δικτύων ΧΤ και ΜΤ.

B. Σε αραιοκατοικημένες περιοχές όπου δεν είναι διαθέσιμη κανενός είδους ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο λόγω τεχνικών περιορισμών που θέτουν οι διάφορες τεχνολογίες (xDSL κ.ά.), τα δίκτυα πρόσβασης BPL μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για να προσφέρουν εύκολα γρήγορη σύνδεση στο διαδίκτυο στο χώρο του τελικού χρήστη. Αυτά τα δίκτυα πρόσβασης BPL μπορούν να είναι είτε δίκτυα XT είτε συνδυασμός δικτύων XT και MT.

Γ. Σε μοναδικές πολυκατοικημένες MDUs, τα δίκτυα πρόσβασης BPL μπορούν να προσφέρουν μια γρήγορη σύνδεση, κοινή για ένα αριθμό χρηστών μέσα σε κάθε MDU. Σε αυτήν την τοπολογία, τα δίκτυα πρόσβασης BPL αποτελούν μια οικονομική εναλλακτική λύση έναντι άλλων ενσύρματων λύσεων και μια αξιόπιστη και αποτελεσματική εναλλακτική έναντι των ασύρματων δικτύων. Αυτά τα δίκτυα πρόσβασης BPL μπορούν να είναι μόνο δίκτυα XT.

1.3.1.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

Το πρότυπο p1901 θέτει ορισμένες κατηγορίες γενικών απαιτήσεων που θα πρέπει να ικανοποιεί το δίκτυο πρόσβασης BPL που παρουσιάζονται ακολούθως συνοπτικά.[2]

- Υπηρεσίες για τελικούς χρήστες: Το δίκτυο πρόσβασης BPL πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παρέχει υψηλής ποιότητας πρόσβαση στο Internet υποστηρίζοντας τουλάχιστον εφαρμογές φυλλομέτρησης, downloading και uploading μεγάλων αρχείων συμπεριλαμβανομένων ταινιών, εικόνων υψηλής ανάλυσης ή οποιωνδήποτε συνημμένων αρχείων σε e-mail. Επίσης, πρέπει να υποστηρίζει προαιρετικές υπηρεσίες που να εγγυώνται σύνδεση με μικρή καθυστέρηση (π.χ. για εφαρμογές παιχνιδιών) ή με δεδομένο εύρος ζώνης. Λόγω των αναγκών που εγείρει η σύγκλιση σταθερής με κινητή τηλεφωνία, κρίνεται απαραίτητη η υποστήριξη μιας τουλάχιστον γραμμής VoIP ανά συνδρομητή με ποιότητα επικοινωνιών ανάλογη αυτής που προσφέρουν οι υπόλοιπες τεχνολογίες (καλώδιο, xDSL). Επιπλέον, το δίκτυο πρόσβασης BPL πρέπει να προσφέρει τη δυνατότητα μετάδοσης υψηλής ποιότητας ήχου και εικόνας για εφαρμογές όπως βίντεο-σύσκεψη, επιτήρηση με κάμερες, IP τηλεόραση και video κατ'απαίτηση. Τέλος, σημαντική κρίνεται η υποστήριξη υπηρεσιών για απομακρυσμένο έλεγχο όπως αυτοματισμοί, ασφάλεια στο σπίτι και ιατρική φροντίδα.
- Υπηρεσίες για δήμους: Το δίκτυο πρόσβασης BPL πρέπει να έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει σημεία πληροφοριών/πωλήσεων, επιτήρηση με κάμερες, συνδεσιμότητα με hot spots, παρακολούθηση και έλεγχο των φωτεινών σηματοδοτών και έλεγχο του δημοτικού φωτισμού.

Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες άλλες γενικές απαιτήσεις που ορίζει το πρότυπο p1901 για το δίκτυο πρόσβασης BPL:

- να επιτρέπει γρήγορη επανεκκίνηση των CPEs
- να υποστηρίζει τις απαιτούμενες εφαρμογές με ικανοποιητική κάλυψη των ηλεκτρικών υποδοχών μέσα στο χώρο του χρήστη
- να υποστηρίζει τις απαιτούμενες εφαρμογές υπό την παρουσία άλλων δικτύων BPL που λειτουργούν ανεξάρτητα από το χειριστή πρόσβασης BPL
- να εγγυάται υπηρεσία χωρίς διακοπές ανεξάρτητα από τις χρονικές αυξομειώσεις της ποιότητας του καναλιού
- σε περίπτωση βλάβης ενός επαναλήπτη XT να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας γειτονικός επαναλήπτης XT ως εναλλακτική λύση
- να παρέχει γρήγορη επανεκκίνηση του δικτύου πρόσβασης μετά από διακοπή λειτουργίας ή ρευματοδότησης
- να βελτιστοποιεί τη χρήση των διαθέσιμων πόρων(χρόνος,συχνότητα)
- να εγγυάται τη διασφάλιση των προσωπικών δεδομένων κατά την επικοινωνία
- να εγγυάται την πραγματοποίηση ενός ανοικτού μοντέλου προς πώληση και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων από διαφορετικούς κατασκευαστές
- να επιτρέπει σε περισσότερους από ένα χειριστές κορμού να συνδέονται στο ίδιο δίκτυο πρόσβασης BPL
- να επιτρέπει εύκολη ενσωμάτωση στην ήδη υπάρχουσα υποδομή τηλεπικοινωνιών
- η πολυπλοκότητα των μόντεμ και των μονάδων υποδομής να είναι μικρή
- να βασίζεται σε διαλειτουργικούς επαναλήπτες XT παρεχόμενους από διαφορετικούς κατασκευαστές
- να ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας στις μονάδες BPL

- να ελαχιστοποιούν τον αριθμό των μονάδων υποδομής
- να εγκαθίστανται εύκολα στο δίκτυο
- να είναι εύκολα στη χρήση
- να υπακούει στους κανονισμούς για ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC)
- να ελαχιστοποιεί την ακτινοβολία EMC όταν δε μεταφέρεται κίνηση δεδομένων

1.3.1.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ(PHY) ΚΑΙ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΖΕΥΞΗΣ(MAC)

Στο πρότυπο p1901 παρουσιάζονται διεξοδικά οι απαιτήσεις που τίθενται όσον αφορά στο φυσικό στρώμα και στρώμα ζεύξης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι προαναφερθείσες απαιτήσεις χωρισμένες σε κατηγορίες σύμφωνα με τις λειτουργίες στις οποίες συμβάλλουν.

1.3.1.3.A Απαιτήσειςγια ομοιόμορφη ενοποίηση σε υποδομή τηλεπικοινωνιών

Το στρώμα ζεύξης καλείται να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις για να είναι επιτυχής η ομοιόμορφη ενοποίηση του BPL στις τηλεπικοινωνιακές υποδομές:

- να υποστηρίζει επανάληψη αποστολής πακέτου
- να έχει την ικανότητα να μεταφέρει με διαφανή τρόπο πλαίσια Ethernet και εκτεταμένα πλαίσια Ethernet 802.1q
- να επιτρέπει την ομοιόμορφη ενοποίηση με δίκτυα (LANs ή MANs) που προσφέρουν ποιότητα υπηρεσιών (QoS)
- να έχει τη δυνατότητα να έχει περισσότερες από μία συνδέσεις κορμού
- να μπορεί να διαχωρίζει κίνηση που προέρχεται από διαφορετικούς χειριστές υπηρεσιών

1.3.1.3.B Απαιτήσεις για κάλυψη και ευρωστία

Οι απαιτήσεις για κάλυψη και ευρωστία του συστήματος αφορούν στο φυσικό στρώμα και είναι οι ακόλουθες:

- ο BPL δέκτης πρέπει να έχει υψηλή ευαισθησία, να μπορεί να λειτουργεί με χαμηλό σηματοθορυβικό λόγο
- να είναι εύρωστο ως προς τις χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες του διαύλου
- να είναι εύρωστο ως προς τις χρονικές διασπορές που παρατηρούνται στα δίκτυα MT και XT

1.3.1.3.Γ Απαιτήσεις ασφάλειας

Σημαντικό ρόλο σε κάθε σύστημα τηλεπικοινωνιών παίζει η ασφάλεια. Το υπεύθυνο στρώμα για την ασφάλεια είναι το στρώμα ζεύξης και οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί είναι:

- να αποτρέπει την πρόσβαση χωρίς άδεια σε κάθε μονάδα BPL
- να δίνει τη δυνατότητα στο χειριστή να αδειοδοτεί από απόσταση οποιαδήποτε μονάδα BPL
- να εξασφαλίζει ότι η κίνηση που προορίζεται για κάποιο χρήστη δεν λαμβάνεται από κανένα άλλο χρήστη
- να παρέχει μηχανισμούς που ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο της κλοπής ταυτότητας
- να υποστηρίζει κρυπτογράφηση
- να προσφέρει καταχώρηση των δραστηριοτήτων του χρήστη

1.3.1.3.Δ Απαιτήσεις για ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC)

Μείζονα ρόλο στις επικοινωνίες μέσω του δικτύου ηλεκτρικής διανομής παίζει η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Οι απαιτήσεις που ορίστηκαν πάνω σε αυτή για ένα σύστημα BPL είναι οι ακόλουθες:

- να υπακούει στους ήδη ισχύοντες ρυθμιστικούς κανονισμούς
- να παρέχει ένα αποτελεσματικό μηχανισμό για αποκοπή συγκεκριμένων συχνοτήτων, ικανό να προγραμματίζεται από απόσταση

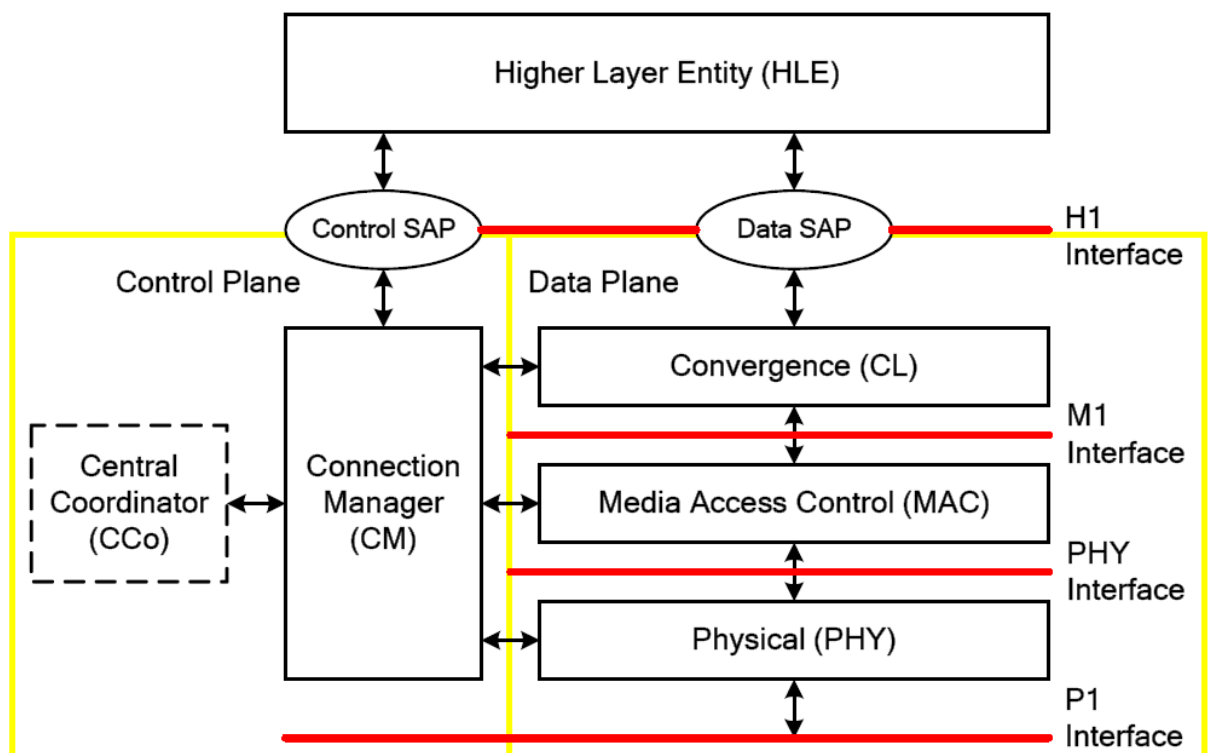
- να επιτρέπει τον απομακρυσμένο προγραμματισμό του επιπέδου ισχύος ώστε να ικανοποιούνται διαφορετικοί κανονισμοί EMC με τον ίδιο εξοπλισμό
- να ελαχιστοποιεί τις εκπομπές EMC όταν δεν μεταφέρονται δεδομένα

1.3.2 HOME PLUG AV

Το πλέον πρόσφατο πρότυπο που έχει δημοσιευθεί σε τελική μορφή για την τεχνολογία BPL είναι το Home Plug AV, το οποίο αποτελεί εξελιγμένη μορφή του πρώτου προτύπου, Home Plug 1.0. και στοχεύει να εξυπηρετήσει συνδέσεις σε κατοικίες. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου, η τεχνολογία BPL προσφέρει ρυθμό μετάδοσης έως και 200 Mbps για ήχο, εικόνα και δεδομένα.

1.3.2.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η αρχιτεκτονική του συστήματος που περιγράφεται στο πρότυπο HPAV φαίνεται στο σχήμα 1.3.2.1.



Σχήμα 1.3.2.1: Η διαστρωμάτωση στην αρχιτεκτονική του HPAV.

Οι Οντότητες Υψηλότερου Στρώματος (HLE) που βρίσκονται πάνω από τη διεπαφή του host H1 μπορεί να είναι γέφυρες, εφαρμογές ή servers. Το Σημείο Πρόσβασης

Υπηρεσιών για δεδομένα (Data SAP) δέχεται πακέτα Ethernet, ώστε όλα τα πρωτόκολλα που βασίζονται στο IP να είναι εύκολα διαχειρίσιμα.

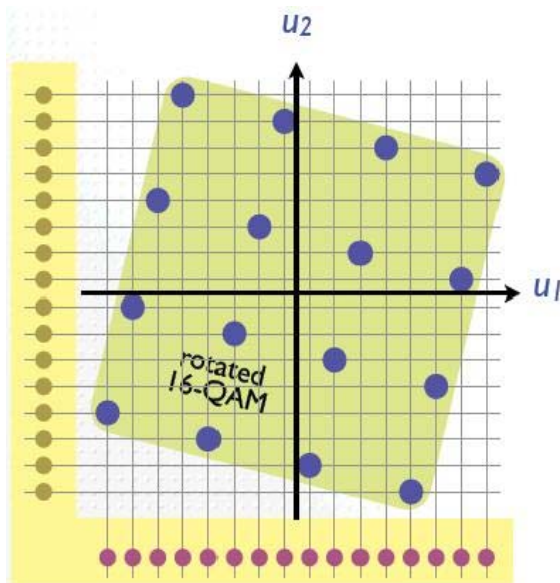
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της αρχιτεκτονικής υπάρχουν δύο επίπεδα. Το επίπεδο δεδομένων παρουσιάζει την κλασική διαστρωματωμένη λογική: τη διεπαφή M1 μεταξύ του στρώματος σύγκλισης (CL) και του στρώματος ζεύξης και τη διεπαφή PHY μεταξύ του στρώματος ζεύξης και του φυσικού στρώματος. Το επίπεδο ελέγχου αποτελείται μόνο από στρώμα ζεύξης δεδομένων για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην επεξεργασία και μεγαλύτερη ευελιξία σε μελλοντικές αλλαγές. Ο Κεντρικός Συντονιστής (Central Coordinator, CCo) αποτελεί μέρος του επιπέδου ελέγχου αλλά είναι ενεργός μόνο σε ένα σταθμό ανά δίκτυο HPAV.

1.3.2.2 ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Το φυσικό στρώμα λειτουργεί στο εύρος συχνοτήτων 2-28 MHz και παρέχει ρυθμό διαύλου φυσικού στρώματος 200 Mbps και ρυθμό πληροφορίας 150 Mbps. Κάνει χρήση διαμόρφωσης OFDM με παράθυρο και για κωδικοποίηση χρησιμοποιεί ένα δυνατό Turbo συνελκτικό κώδικα, που προσφέρει εύρωστη επίδοση του συστήματος στα όρια του 0.5 dB από τη χωρητικότητα Shannon. Η τεχνική διαμόρφωσης OFDM με παράθυρο εξασφαλίζει τις απαιτήσεις του p1901 για κάλυψη και ευρωστία του συστήματος. Τα OFDM σύμβολα είναι μεγάλης χρονικής διάρκειας και περιλαμβάνουν 917 χρήσιμα υποφέροντα και την κυκλική επέκταση. Η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται ποικίλλει από BPSK (με την οποία μεταφέρεται 1 bit πληροφορίας ανά φέρον ανά σύμβολο) μέχρι 1024 QAM (που μεταφέρονται 10 bits πληροφορίας ανά φέρον ανά σύμβολο). Η επιλογή του κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης γίνεται για κάθε υποφέρον ξεχωριστά βάσει των χαρακτηριστικών του διαύλου.

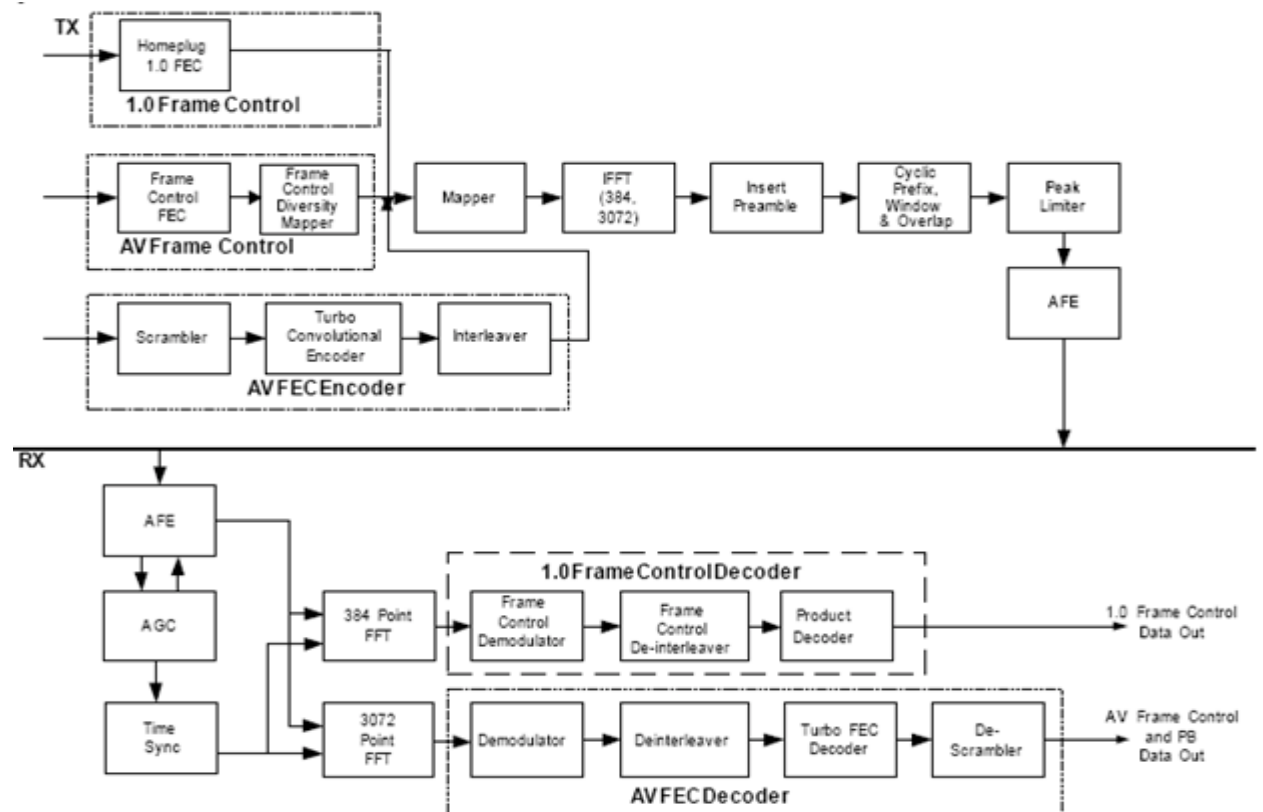
Κατά τη διαμόρφωση BPSK η φάση του φέροντος εναλλάσσεται μεταξύ δύο τιμών που απέχουν κατά 180° σε αντιστοίχιση με το είδος του ψηφίου που μεταδίδεται. Συνεπώς ένα σύμβολο μπορεί να μεταφέρει ένα bit πληροφορίας μόνο. Κατά τη διαμόρφωση QAM μεταβάλλεται το πλάτος δυο φερόντων που διαφέρουν κατά 90° σε φάση για να αναπαρασταθεί το σήμα. Το πλήθος των ορθογώνιων φερόντων μπορεί να διαφέρει από τον αριθμό 2. Ανάλογα με το πόσα ορθογώνια φέροντα χρησιμοποιούνται μεταβάλλεται και ο αριθμός bits που μεταφέρονται ανά σύμβολο.

Συγκεκριμένα, η M-QAM (όπου $M=2^v$) κάνει χρήση M ορθογώνιων φερόντων και μεταφέρει v bits πληροφορίας ανά φέρον ανά σύμβολο. M-QAM (όπου $M=2^v$).



Σχήμα 1.3.2.2.1: Αστερισμός του σχήματος διαμόρφωσης 16-QAM, όπου μεταφέρονται 4 bits πληροφορίας ανά φέρον ανά σύμβολο.

Στην πλευρά του πομπού, το φυσικό στρώμα δέχεται τις εισόδους του από το στρώμα μεταφοράς. Υπάρχουν ξεχωριστές εισοδοί για τα δεδομένα HPAV, τις πληροφορίες ελέγχου του HPAV και τις πληροφορίες ελέγχου του HomePlug 1.0 (το τελευταίο για να υποστηρίξει συμβατότητα με το προγενέστερο πρότυπο HomePlug 1.0). Οι πληροφορίες ελέγχου HPAV επεξεργάζονται από τη βαθμίδα Κωδικοποιητή Πλαισίου Ελέγχου (Frame Control Encoder) που περιέχει μια βαθμίδα εκ των προτέρων πρόβλεψης λαθών (Forward Error Correction, FEC) και μια βαθμίδα Diversity Interleaver. Η είσοδος των δεδομένων HPAV οδηγείται σε μια αλληλουχία βαθμίδων που συνίσταται από ένα Scrambler, ένα Turbo FEC Κωδικοποιητή και ένα αναδευτή (Interleaver). Οι 3 έξοδοι οδηγούνται σε ένα συνηθισμένο διαμορφωτή OFDM που αποτελείται από ένα Mapper, ένα IFFT επεξεργαστή, μια βαθμίδα εισαγωγής προενίσχυσης (Preamble), μια βαθμίδα εισαγωγής κυκλικού προθέματος και ένα περιοριστή πλάτους. Τελικά, το σήμα φθάνει στη βαθμίδα Analog Front End(AFE) που το συνδέει με το μέσο μετάδοσης.



Σχήμα 1.3.2.2: Block διάγραμμα των HPAV πομπού (TX) και δέκτη (RX) για το φυσικό στρώμα.

Στην πλευρά του δέκτη, μια βαθμίδα AFE λειτουργεί σε συνδυασμό με μια μονάδα Αυτόματου Ελέγχου Κέρδους (Automatic Gain Controller, AGC) και μια βαθμίδα χρονικού συγχρονισμού που τροφοδοτούν ξεχωριστά κυκλώματα για πληροφορίες δεδομένων και ανάκτηση δεδομένων. Το πλαίσιο ελέγχου HPAV ανακτάται με επεξεργασία του λαμβανόμενου ρεύματος HPAV μέσα από ένα FFT 3072 σημείων, ένα αποδιαμορφωτή και ένα αποκωδικοποιητή για το πλαίσιο ελέγχου. Αν υπάρχει πλαίσιο ελέγχου HomePlug 1.0, αυτό ανακτάται από ένα FFT 384 σημείων. Παράλληλα, το ρεύμα δεδομένων επεξεργάζεται από ένα FFT 3072 σημείων για HPAV, ένα αποδιαμορφωτή με εκτίμηση του σηματοθορυβικού λόγου, ένα Demapper, ένα αποαναδευτή (De-interleaver), ένα Turbo FEC αποκωδικοποιητή και ένα De-scrambler.

1.3.2.3 ΣΤΡΩΜΑ ΖΕΥΞΗΣ

Το πρότυπο HPAV προσφέρει υπηρεσία προσανατολισμένη στη σύνδεση που δεν υπόκειται σε ανταγωνισμό για να υποστηρίξει την ποιότητα υπηρεσιών (εγγυημένο εύρος ζώνης, καθυστέρηση) των απαιτητικών εφαρμογών εικόνας-ήχου και

διαδικτύου. Η υπηρεσία που δεν υπόκειται σε ανταγωνισμό βασίζεται σε περιοδικές αναθέσεις χρονοσχισμών Πολλαπλής Προσπέλασης με Διαίρεση Χρόνου (TDMA) επαρκούς διάρκειας, για να υποστηρίξει τις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσιών μιας σύνδεσης.

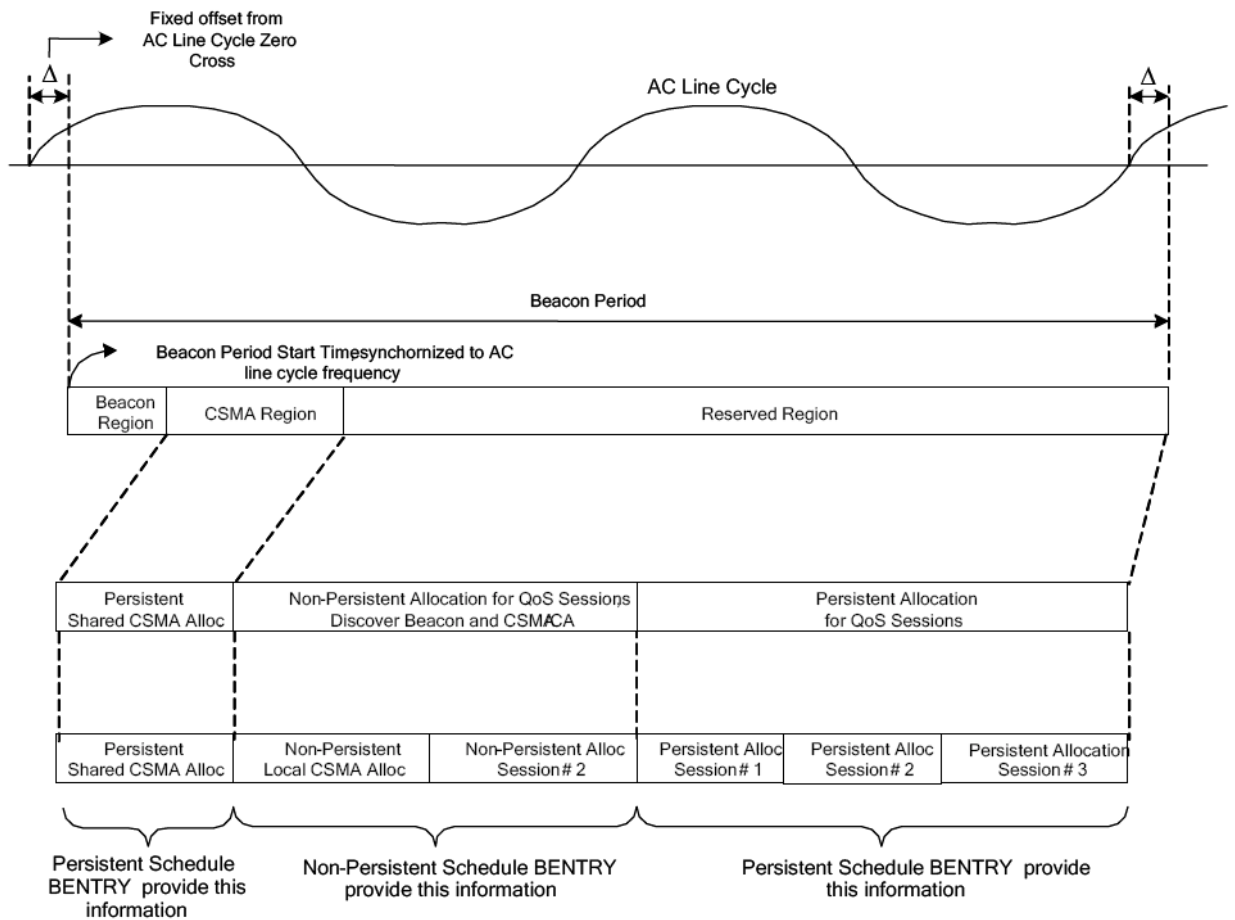
Το πρότυπο HPAV παρέχει επίσης υπηρεσίες χωρίς εγκατάσταση σύνδεσης που υπόκεινται σε ανταγωνισμό με προτεραιότητα ώστε να υποστηρίξει τόσο εφαρμογές βέλτιστης προσπάθειας όσο και εφαρμογές που απαιτούν ποιότητα υπηρεσιών με προτεραιότητα. Αυτές οι υπηρεσίες βασίζονται στην τεχνολογία Πολλαπλής Πρόσβασης Ανίχνευσης Συγκρούσεων/με αποφυγή συγκρούσεων (Collision Sense Multiple Access/Collision Avoidance, CSMA/CA) η οποία εφαρμόζεται μόνο στην κίνηση με την υψηλότερη προτεραιότητα σε αναμονή, αφού η κίνηση με χαμηλότερη προτεραιότητα σε αναμονή έχει εξαλειφθεί κατά τη διάρκεια μιας σύντομης φάσης Ανάλυσης Προτεραιότητας.

Για να παρέχει ικανοποιητικά και τα δυο είδη υπηρεσιών, το HPAV εφαρμόζει μια ευέλικτη, κεντρικά χειριζόμενη αρχιτεκτονική. Ο κεντρικός συντονιστής λέγεται Central Coordinator (CCo) και καθιερώνει μια περίοδο Beacon και ένα πρόγραμμα που συμβιβάζει τις αναθέσεις χρονοσχισμών που δεν υπόκεινται σε ανταγωνισμό με το χρόνο που ανατίθεται σε κίνηση που υπόκειται σε ανταγωνισμό. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 1.3.2.2.α, η περίοδος Beacon χωρίζεται σε τρεις περιοχές :

-περιοχή Beacon

-περιοχή CSMA

-περιοχή που δεν υπόκειται σε ανταγωνισμό



Σχήμα 1.3.2.2.α: Η δομή της περιόδου Beacon

Ο CCo μεταδίδει ένα μήνυμα που καλείται beacon, στην αρχή κάθε περιόδου Beacon. Χρησιμοποιεί αυτό το μήνυμα για να διαβιβάσει το πρόγραμμα της περιόδου Beacon. Τα μηνύματα beacon είναι εξαιρετικά εύρωστα και αξιόπιστα. Τα προγράμματα που διαβιβάζονται στην περίοδο Beacon είναι διαρκή, δηλαδή ο CCo δεσμεύεται να μην αλλάξει το πρόγραμμα για ένα αριθμό περιόδων Beacon. Η διάρκεια διαβιβάζεται και αυτή μέσα από το μήνυμα beacon έτσι ώστε ένας σταθμός που επιθυμεί να μεταδώσει για μια σύνδεση να μπορεί να μεταδώσει με σιγουριά στη διάρκεια της χρονοσχισμής του, ακόμα και αν έχει χάσει αρκετά μηνύματα beacon. Αυτό παρέχει, επιπλέον, συνέχεια ακόμα και αν μερικά μηνύματα beacon έχουν χαθεί. Οι περιόδοι CSMA είναι και αυτές διαρκείς, έτσι ώστε οι σταθμοί που επιθυμούν να στείλουν κίνηση που υπόκειται σε ανταγωνισμό να μπορούν να το κάνουν ακόμα και αν έχουν χάσει κάποια μηνύματα beacon.

Το στρώμα ζεύξης παρέχει υπηρεσίες που υπόκεινται σε ανταγωνισμό (CSMA) ή όχι (CF) στις αντίστοιχες περιοχές της περιόδου Beacon. Η διαρκής περιοχή που

υπόκειται σε ανταγωνισμό (PCF) και τη διαχειρίζεται ο CCo επιτρέπει στο HPAV να παρέχει αυστηρή εγγύηση στις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσιών των οντοτήτων υψηλότερων στρωμάτων (Higher Layer Entity, HLE). Μια οντότητα υψηλότερου στρώματος χρησιμοποιεί την προδιαγραφή της σύνδεσης (Connection Specification, CSPEC) για να καθορίσει τις απαιτήσεις της για ποιότητα υπηρεσιών. Ο χειριστής της σύνδεσης στο σταθμό αξιολογεί τη CSPEC και αν είναι κριθεί κατάλληλη αποστέλλει τις σχετικές απαιτήσεις στο CCo για κατάλληλη εκχώρηση χρονοσχισμών που δεν υπόκειται σε ανταγωνισμό. Τα χαρακτηριστικά της ποιότητας υπηρεσιών που καθορίζονται στη CSPEC περιλαμβάνουν:

-Εγγυημένο εύρος ζώνης

-υπηρεσία εγγύησης ελαχίστων λαθών (Quasi-error free)

-Σταθερή καθυστέρηση

-Έλεγχο του jitter

Αν ο CCo μπορεί να ικανοποιήσει την αίτηση της σύνδεσης, θα ζητήσει από τους σταθμούς να ανιχνεύσουν το δίαυλο. Αυτό επιτρέπει στους σταθμούς να κάνουν μια αρχική εκτίμηση του διαύλου (μπορούν δηλαδή να καθορίσουν την καλύτερη διαμόρφωση για κάθε υποφέρον OFDM). Η απόφαση αποστέλλεται από το δέκτη στον πομπό καθώς και στο CCo για να το βοηθήσει να αποφασίσει πόσο χρόνο χρειάζεται να αναθέσει σε αυτή τη σύνδεση. Βασιζόμενος στη CSPEC και στην κατάσταση του καναλιού, ο CCo εκχωρεί μία ή περισσότερες χρονοσχισμές (Ευκαιρίες για Μετάδοση, Transmit Opportunities, TXOPs) στη σύνδεση μέσα στην περιοχή PCF.

Επιπλέον, η περιοχή PCF περιέχει χρόνο για προσωρινές χρονοσχισμές, κατάλληλο για χρήση μόνο κατά την τρέχουσα περίοδο beacon. Αυτές οι χρονοσχισμές παρέχουν επιπλέον εύρος ζώνης για μικρό χρονικό διάστημα σε συνδέσεις που το απαιτούν για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις τους για ποιότητα υπηρεσίας. Όταν αυτό το χρονικό διάστημα δεν χρησιμοποιείται για CF υπηρεσίες, είναι ελεύθερο να χρησιμοποιηθεί για CSMA κίνηση. Όπως και πριν, οι σταθμοί πρέπει να λαμβάνουν το μήνυμα beacon για να γνωρίζουν πότε το χρονικό διάστημα είναι διαθέσιμο για CSMA κίνηση.

Η επικοινωνία στο HPAV γίνεται άμεσα μεταξύ σταθμών, όμως ο Cco παρακολουθεί τα μηνύματα που ανταλλάσσονται. Η επικεφαλίδα κάθε μηνύματος περιέχει πληροφορίες για την ποσότητα δεδομένων που εκκρεμούν για αποστολή στη σύνδεση. Σε μια σύνδεση αν αυτή η ποσότητα υπερβεί ένα άνω όριο, ο CCo, μπορεί να της εκχωρήσει επιπλέον χρόνο από την περιοχή PCF.

Η διαρκής περιοχή CSMA παρέχει επικοινωνία που υπόκειται σε ανταγωνισμό με προτεραιότητα. Χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχει CSPEC και/ή όταν η κίνηση είναι μικρής διάρκειας. Όταν τελεί υπό λειτουργία συνύπαρξης με το HP 1.0, ή “Υβριδική Λειτουργία”, το AV λειτουργεί σε αρμονία με τις συσκευές HP 1.0 και τους επιτρέπει να επικοινωνούν κατά τη διάρκεια της περιόδου CSMA.

1.3.2.3 ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Διαδικασίες ελέγχου εισόδου εξασφαλίζουν ότι επιτρέπεται η είσοδος μόνο σε συσκευές που έχουν την κατάλληλη άδεια. Η ικανότητα ενός σταθμού να συγκρατεί ένα αριθμό διαφορετικών κλειδιών ασφαλείας του επιτρέπει τη συμμετοχή του σε πολλαπλά λογικά δίκτυα AV (AV Logical Networks, AVLNs).

Όλη η κίνηση δεδομένων και σχεδόν όλη η κίνηση ελέγχου μέσα στο AVLN (εκτός από ένα περιορισμένο αριθμό μηνυμάτων ελέγχου των οποίων η κρυπτογράφηση είναι αδύνατη) ασφαλιζεται από ένα κλειδί κρυπτογράφησης AES 128 bits, που παρέχει ασφάλεια υψηλού επιπέδου. Αυτή η κρυπτογράφηση χρησιμοποιεί το κλειδί κρυπτογράφησης του δικτύου και εκτελείται σε διαφορετικά μέρη κατά τη δημιουργία των MAC-PDUs. Το κλειδί αυτό μπορεί να διαφοροποιείται με αυτόματο και δυναμικό τρόπο.

1.3.2.4 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΜΕ BPL

Το HPAV επιτρέπει τη συμβατότητα με BPL με δύο τρόπους: Συμβατότητα Υπηρεσιών και Συμβατότητα Τεχνολογιών. Η Συμβατότητα Υπηρεσιών παρέχει μια αποτελεσματική και ενιαία επέκταση των υπηρεσιών, ενώ η Συμβατότητα Τεχνολογιών επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικές τεχνολογίες.

Το φυσικό στρώμα στο HPAV επιτρέπει τη συμβατότητα και τη διαλειτουργικότητα με τις συσκευές που υπακούουν στο πρότυπο HomePlug 1.0. Η προδιαγραφή απαιτεί να επιτρέπεται η συμβατότητα, ενώ η διαλειτουργικότητα είναι προαιρετική.

Συμβατότητα σημαίνει ότι οι συσκευές HPAV είναι ικανές για επικοινωνία χαμηλού επιπέδου με συσκευές HP 1.0, συμβατότητα που είναι αναγκαία για να μοιραστούν το μέσο. Αντίθετα, μια συσκευή που παρέχει διαλειτουργικότητα μπορεί να ανταλλάσσει δεδομένα φορτίου με μια συσκευή 1.0.

1.3.2.5 ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΔΙΚΤΥΑ

Το πρότυπο HPAV παρέχει μηχανισμούς που εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία γειτονικών δικτύων χωρίς παρεμβολές. Όταν ανιχνευθεί ένα γειτονικό δίκτυο, οι γειτονικοί CCo μπορούν να προγραμματίσουν εκπομπές στα δικά τους δίκτυα μετά από συνεργασία χωρίς να παρεμβάλλουν στα γειτονικά τους. Για να είναι δυνατή η συνεργασία αυτή κάθε CCo διατηρεί μια Λίστα Δικτύων που παρεμβάλλουν. Σε αυτή τη λίστα προσδιορίζεται η ταυτότητα όλων των γειτονικών CCos που μπορεί να ακούσει κάθε CCo. Κάθε CCo αποστέλλει τη λίστα του στους υπόλοιπους CCo. Το πρότυπο HPAV απαιτεί κάθε CCo να αναγνωρίζει όλες τις λίστες των γειτονικών δικτύων ώστε να μην παρεμβάλλει στα δίκτυα αυτά. Κάθε CCo γνωρίζοντας πλέον τη λίστα των δικτύων στα οποία παρεμβάλλει συνεργάζεται με τους CCo αυτών των δικτύων ώστε να εκπέμπει ο καθένας σε διαφορετική χρονική στιγμή στην οποία λαμβάνουν μόνο οι σταθμοί του ενδιαφερόμενου δικτύου και όχι οι γειτονικοί.

1.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παραπάνω παρουσίαση του προτύπου HPAV καθώς και των απαιτήσεων του προτύπου p1901 είναι φανερό η αλληλοσυσχέτιση τους. Πολλές από τις απαιτήσεις του p1901 ικανοποιούνται από το HPAV όπως είναι λογικό. Το πρότυπο που θα ικανοποιεί όλες τις παραπάνω απαιτήσεις ή και καινούριες που θα θεωρηθούν αναγκαίες είναι ο επόμενος στόχος της IEEE και αναμένεται να δημοσιευθεί στο εγγύς μέλλον. Δεδομένου ότι το μόνο πρότυπο σε τελική μορφή είναι το HPAV, αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως βάση στη συνέχεια στην παρούσα διπλωματική. Το νέο πρότυπο που ετοιμάζει η IEEE θα είναι πιθανώς βελτιωμένο και θα έχει διαφορές σε σχέση με το HPAV. Τα αποτελέσματα όμως της παρούσας εργασίας δεν αναμένεται να διαφοροποιηθούν με βάση το πρότυπο που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί.

Περισσότερες λεπτομέρειες για την αρχιτεκτονική ενός συστήματος BPL μπορεί να βρεθεί στα [3,4].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: WiMAX

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τον Οκτώβριο του 2001 η IEEE παρουσίασε το πρώτο πρότυπο της οικογένειας 802.16 που περιγράφει το πρωτόκολλο για ένα μητροπολιτικό ασύρματο δίκτυο σχεδιασμένο να λειτουργεί στην μπάντα συχνοτήτων 10GHz-66GHz. Η τεχνολογία αυτή, γνωστή ως WiMAX, ακρωνύμιο του Worldwide intreroperability for Microwave Access, προσφέρεται για ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση στον τελικό

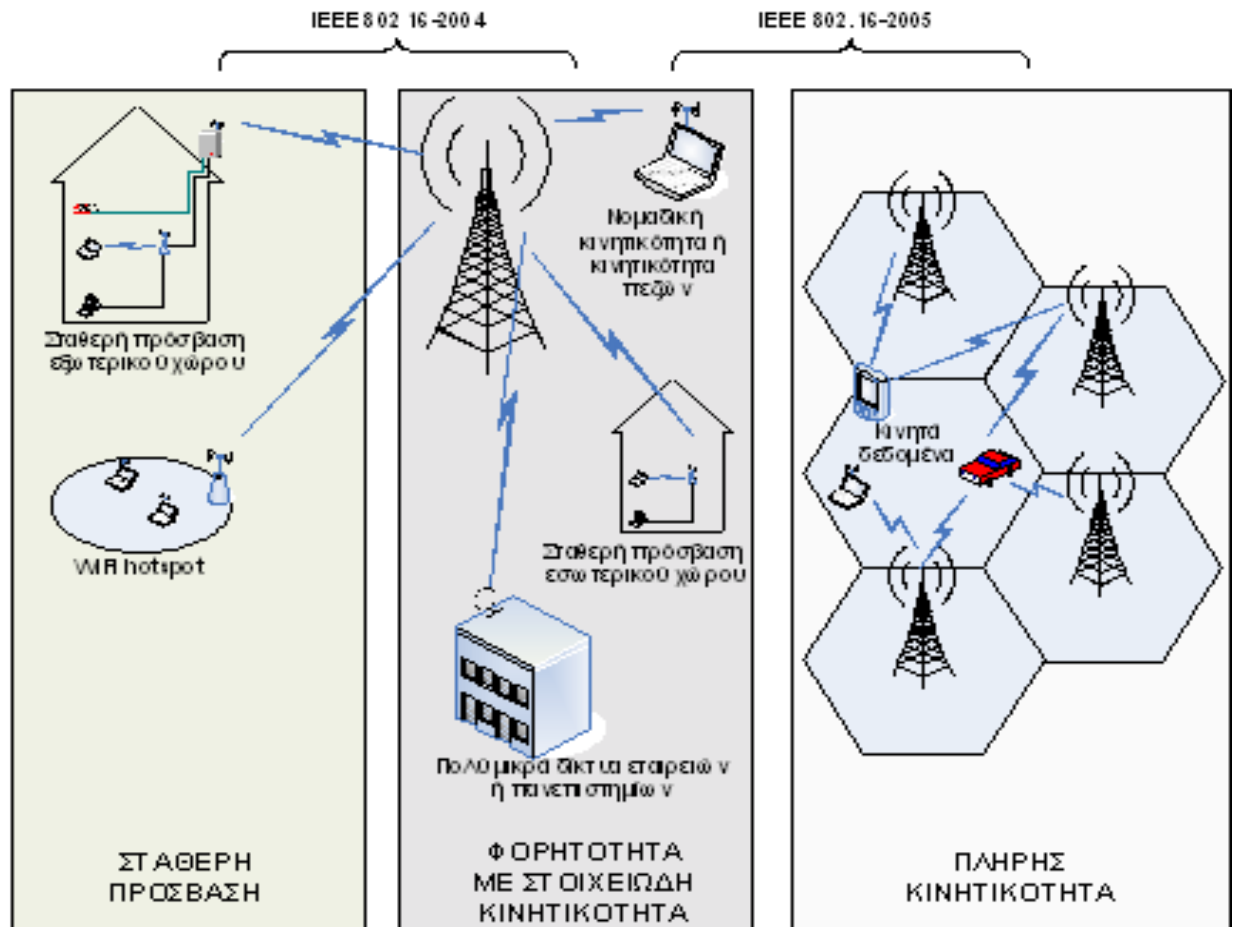
χρήστη εναλλακτικά των τεχνολογιών xDSL ή για δίκτυο κορμού για hotspots Wi-fi. Υπόσχεται υψηλές ταχύτητες της τάξης των 63 Mbps στην κάτω ζεύξη και 28 Mbps στην άνω ζεύξη σε αποστάσεις έως 50 km σε συνθήκες οπτικής επαφής και έως 8 km σε συνθήκες μη οπτικής επαφής. Το μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας WiMAX είναι ότι προσφέρεται εύκολα και γρήγορα στον τελικό χρήστη ακόμα και σε δύσβατες περιοχές εφόσον δεν είναι αναγκαία η υλοποίηση νέας υποδομής για την εφαρμογή της.

Το πρότυπο 802.16 αποτελείται από τα πρωτόκολλα και τις τροποποιήσεις τους που περιγράφονται σύντομα ακολούθως [6]:

802.16a [7]: Προδιαγράφει το φυσικό στρώμα και στρώμα ζεύξης για διαλειτουργικά point-to-multipoint ευρυζωνικά ασύρματα σταθερά συστήματα πρόσβασης. Έχει σχεδιασθεί κυρίως για συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες της τάξης των 30 GHz, αλλά εφαρμόζεται ευρέως σε συχνότητες 10-66 GHz. Για συχνότητες άνω των 10 GHz απαιτούνται συνθήκες οπτικής επαφής.

802.16d ή 802.16-2004: Υποστηρίζει *σταθερή* και *νομαδική* πρόσβαση. Συμπληρώνει το προηγούμενο πρότυπο και διορθώνει λάθη και αντιφάσεις του κυρίως σε λειτουργίες και χαρακτηριστικά που χρησιμεύουν σε τυπική πραγματοποίηση του προτύπου σε εφαρμογή. Εξειδικεύεται στην μάντα συχνοτήτων 2-11 GHz στην οποία οι συνθήκες μη οπτικής επαφής αποτελούν τεχνική παράμετρο.

802.16e ή 802.16-2005: Αποτελεί τροποποίηση των προηγούμενων προτύπων στο φυσικό στρώμα και στρώμα ζεύξης για συνδυασμό σταθερής και *κινητής/φορητής* λειτουργίας. Το σημαντικότερο στοιχείο που προσθέτει αυτή η τροποποίηση είναι η υποστήριξη κινητών επικοινωνιών στις αδειοδοτημένες συχνότητες της ζώνης 2 με 6 GHz. Για το λόγο αυτό συχνά αναφέρεται ως “κινητό WiMAX” (mobile WiMAX). Η ταχύτητα που προβλέπεται να φθάνει το κινητό είναι μέχρι 125 km/h.



Σχήμα 2.1.1: Τύποι πρόσβασης που προσφέρει η τεχνολογία WiMAX.

Ακολουθεί επεξήγηση των όρων που χρησιμοποιούνται παραπάνω για τον προσδιορισμό της πρόσβασης που προσφέρουν τα πρότυπα [8]:

- Σταθερή πρόσβαση:** Το τερματικό θεωρείται σταθερό σε μια μοναδική γεωγραφική θέση μέσα στα όρια μιας κυψέλης, η οποία ελέγχεται από ένα σταθμό βάσης κατά τη διάρκεια της σύνδεσης και μπορεί να συνδεθεί και να αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Ενδέχεται να είναι σε θέση να επιλέξει τον καταλληλότερο σταθμό βάσης τη στιγμή της εισόδου στο δίκτυο. Τυπικά, η συσκευή αποτελεί μέρος του ίδιου τομέα σταθμού βάσης ή κυψέλης και κάθε νέα ανάθεσή του σε διαφορετικό τομέα ή κυψέλη ελέγχεται και πραγματοποιείται από το δίκτυο, για παράδειγμα σε περίπτωση βλάβης της σύνδεσης.
- Νομαδική πρόσβαση:** Το τερματικό θεωρείται σταθερό σε μια μοναδική γεωγραφική θέση μέσα στα όρια μιας κυψέλης τουλάχιστον για το διάστημα

όπου η σύνδεση υπηρεσίας δεδομένων (service data session) του δικτύου είναι σε λειτουργία. Αν το τερματικό μετακινηθεί σε μια διαφορετική θέση μέσα στο ίδιο ασύρματο δίκτυο (π.χ. αλλαγή κυψέλης ή τομέα), η σύνδεση του χρήστη αναγνωρίζεται και εγκαθίσταται μια νέα σύνδεση υπηρεσίας δεδομένων. Ως προς την επιλογή του σταθμού βάσης ισχύουν όσα και στη σταθερή πρόσβαση.

- **Φορητότητα:** Η συσκευή του χρήστη διατηρεί τη σύνδεση υπηρεσίας δεδομένων εφόσον κινείται με ταχύτητα πεζού μέσα σε μια συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης του δικτύου. Είναι διαθέσιμες περιορισμένες δυνατότητες διαπομπών κατά τη διάρκεια μιας σύνδεσης υπηρεσίας δεδομένων καθώς ο χρήστης μεταφέρεται σε μια άλλη κυψέλη ή σε άλλο τομέα μέσα στην ίδια κυψέλη.
- **Απλή κινητικότητα:** Η συσκευή του χρήστη διατηρεί μια σύνδεση υπηρεσίας δεδομένων για υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου καθώς κινείται με ταχύτητες οχήματος μέσα σε περιοχή κάλυψης του δικτύου. Οι διαπομπές μεταξύ τομέων και κυψελών παρέχουν σύνδεση χωρίς διακοπές για όλες τις εφαρμογές μη πραγματικού χρόνου.
- **Πλήρης κινητικότητα:** Η συσκευή του χρήστη διατηρεί μια σύνδεση υπηρεσίας δεδομένων καθώς κινείται με υψηλές ταχύτητες οχήματος μέσα σε περιοχή κάλυψης του δικτύου. Οι διαπομπές μεταξύ κυψελών και τομέων είναι εγγυημένες και παρέχουν σύνδεση χωρίς διακοπές για όλες τις εφαρμογές.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τύποι πρόσβασης που προσφέρει το WiMAX και οι ανάλογες απαιτήσεις.

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΣΥΣΚΕΥΕΣ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΕΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΔΙΑΠΟΜΠΕΣ	802.16-2004	802.16e
Σταθερή πρόσβαση	Οικιακές συσκευές εξωτερικού και εσωτερικού χώρου	Μοναδική	Στατική	Όχι	Ναι	Ναι
Νομαδική πρόσβαση	Οικιακές συσκευές εσωτερικού χώρου, κάρτες PCMCIA	Πολλαπλές	Στατική	Όχι	Ναι	Ναι
Φορητότητα	κάρτες PCMCIA, μίνι κάρτες	Πολλαπλές	Ταχύτητα πεζού	Σκληρές διαπομπές	Όχι	Ναι
Απλή κινητικότητα	Κάρτες PCMCIA, μίνι κάρτες, PDAs	Πολλαπλές	Χαμηλή ταχύτητα οχήματος	Σκληρές διαπομπές	Όχι	Ναι
Πλήρης κινητικότητα	Κάρτες PCMCIA, μίνι κάρτες, PDAs, έξυπνα τηλέφωνα	Πολλαπλές	Υψηλή ταχύτητα οχήματος	Χαλαρές διαπομπές	Όχι	Ναι

Πίνακας 2.1.1: Τύποι πρόσβασης του WiMAX και οι απαιτήσεις τους.

2.2 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

2.2.1 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Στην οικογένεια προτύπων 802.16a-d ορίζονται τρεις τρόποι υλοποίησης του φυσικού στρώματος για σταθερές επικοινωνίες:

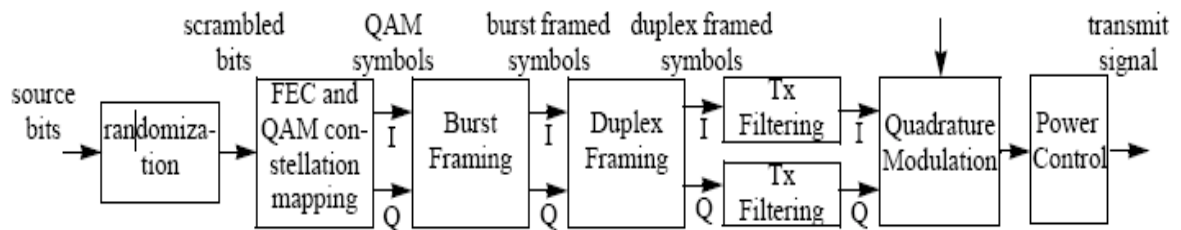
- Διαμόρφωση απλού φέροντος
- Διαμόρφωση OFDM με 256 φέροντα και πολλαπλή πρόσβαση βασισμένη σε TDMA
- Διαμόρφωση OFDM με 2048 φέροντα και πολλαπλή πρόσβαση βασισμένη σε OFDMA

Από τα προηγούμενα σχήματα, αυτά που βασίζονται σε OFDM διαμόρφωση είναι καταλληλότερα για λειτουργία σε συνθήκες μη οπτικής επαφής. Τελικά, έχει

επικρατήσει το σχήμα OFDM με 256 φέροντα (που είναι κοινό μεταξύ προτύπων 802.16 και ETSI HiperMAN) κυρίως λόγω του ταχύτερου υπολογισμού του ταχέως μετασχηματισμού Fourier (FFT) που προσφέρει και των ελαστικότερων απαιτήσεων που εμφανίζει ως προς το συγχρονισμό στη συχνότητα, σε σχέση με το σχήμα OFDM με 2048 φέροντα. Στην υλοποίηση του φυσικού στρώματος με χρήση OFDM 256 φερόντων, τα 192 από αυτά χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων, τα 56 παραμένουν κενά ως διαστήματα φύλαξης και τα υπόλοιπα 8 χρησιμοποιούνται ως μόνιμα πιλοτικά σύμβολα. Επιπλέον, για να αντιμετωπίζει καλύτερα τα φαινόμενα πολύοδης διάδοσης χρησιμοποιούνται 8, 16, 32 ή 64 επιπλέον δείγματα ως κυκλικό πρόθεμα ανάλογα με την αναμενόμενη διασπορά.

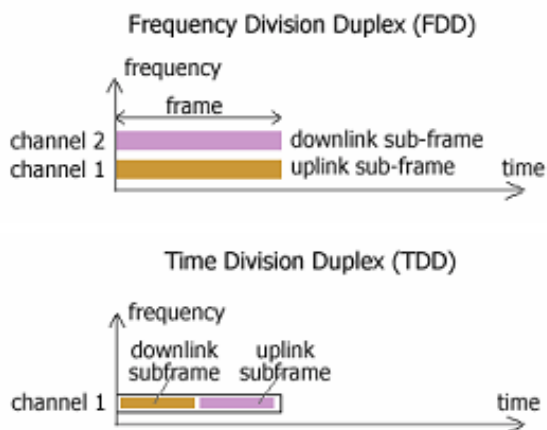
Οι τεχνικές διαμόρφωσης που υποστηρίζονται για τις σταθερές επικοινωνίες είναι οι 2-PSK, 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM και η επιλογή τους εξαρτάται από τα επίπεδα του σηματοθορυβικού λόγου στο διάυλο. Συγκεκριμένα, όταν οι συνθήκες στο διάυλο είναι ιδανικές επιλέγεται το υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης (256-QAM στη συγκεκριμένη περίπτωση). Αντίθετα, όταν παρατηρείται εξασθένιση του σήματος προτιμώνται χαμηλότερα σχήματα διαμόρφωσης ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα και σταθερότητα της σύνδεσης. Με αυτή την τεχνική αντιμετωπίζονται οι επιλεκτικές ως προς το χρόνο διαλείψεις και γίνεται η καλύτερη δυνατή χρήση της χωρητικότητας του διαύλου. Σημαντικό, επίσης, για τη βελτιστοποίηση της χρήσης της χωρητικότητας του διαύλου είναι ότι τα πρότυπα 802.16 προβλέπουν μεταβλητά εύρη ζώνης από 1.5 έως 20 MHz με βήμα 250 kHz, προσφέροντας τη δυνατότητα να μπορούν να προσαρμοστούν με τις διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τη χρήση συχνοτήτων ανά τον κόσμο.

Όσον αφορά την προστασία της μετάδοσης από λάθη, αυτή πραγματοποιείται με διάφορους κώδικες διόρθωσης λαθών, όπως Forward Error Correction (FEC) Reed-Solomon συνδυασμένη εσωτερικά με συνελκτικό κώδικα. Επιπλέον, εφαρμόζεται ανάδευση (interleaving) για να μετριάσει την επίπτωση των καταγιστικών λαθών. Τέλος, έχει προβλεφθεί προαιρετικά η χρήση turbo κώδικα, η οποία μπορεί να αυξήσει την κάλυψη του συστήματος υπό το κόστος αυξημένης πολυπλοκότητας και ταχύτητας του αποκωδικοποιητή [9]. Τα λάθη που δεν διορθώνονται μέσω των τεχνικών που προαναφέρθηκαν διορθώνονται με επαναποστολή του εσφαλμένου πλαισίου μέσω της λειτουργίας ARQ (Automatic repeat request).



Σχήμα 2.2.1.1: Block διάγραμμα της διαδικασίας εκπομπής

Ο διαχωρισμός του εύρους ζώνης για τις ζεύξεις ανόδου και καθόδου στο πρότυπο 802.16 γίνεται είτε με αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας (FDD) είτε με αμφιδρόμηση με διαίρεση χρόνου (TDD) (σχήμα 2.1.1). Κατά την αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας το κανάλι χωρίζεται σε δυο μονόδρομους υποδιαύλους, ένα για τη ζεύξη ανόδου και ένα για τη ζεύξη καθόδου. Αντίθετα, κατά την αμφιδρόμηση με διαίρεση χρόνου ο διάυλος είναι αμφίδρομος και χωρίζεται σε χρονοσχισμές οι οποίες ανατίθενται στις ζεύξεις ανόδου και καθόδου σύμφωνα με τον αλγόριθμο πολυπλεξίας χρόνου. Δεδομένου ότι σε κάθε χώρα ισχύουν διαφορετικοί κανονισμοί, το πρότυπο 802.16 έχει προβλέψει ώστε να υποστηρίζει και τους δυο τρόπους αμφιδρόμησης για να μπορεί να απευθύνεται σε όλο τον κόσμο.



Σχήμα 2.2.1.2: Αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας (FDD) και με διαίρεση χρόνου (TDD)

Ένα άλλο προαιρετικό χαρακτηριστικό που προβλέπεται στο πρότυπο είναι η χρήση «έξυπνων κεραιών». Οι έξυπνες κεραιές είναι στοιχειοκεραίες οι οποίες με τη χρήση έξυπνων αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν τη διεύθυνση λήψης ενός σήματος και να προσανατολίζονται προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Ο προσανατολισμός στην επιθυμητή διεύθυνση

επιτυγχάνεται με κατάλληλη τροποποίηση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας ώστε ο κύριος λοβός ακτινοβολίας της κεραίας να βρίσκεται στη διεύθυνση του επιθυμητού σήματος, ενώ στις διευθύνσεις από τις οποίες καταφθάνουν ανεπιθύμητα σήματα να υπάρχουν μηδενισμοί του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας. Το αποτέλεσμα είναι η καταπίεση των σημάτων που καταφθάνουν από πολύοδη διάδοση και η αύξηση του περιθωρίου διαλείψεων. Οι ιδιότητες των έξυπνων κεραιών λειτουργούν ενάντια της εξασθένησης που προκαλείται στις συνθήκες μη οπτικής επαφής.

Πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του προτύπου 802.16d είναι η εφαρμογή ελέγχου της ισχύος εκπομπής [10]. Ο σταθμός βάσης αποστέλει πληροφορίες ελέγχου ισχύος σε κάθε μονάδα με σκοπό τη ρύθμιση της ισχύος που εκπέμπουν προς το σταθμό βάσης σε προκαθορισμένο επίπεδο. Το επίπεδο ισχύος προκαθορίζεται δυναμικά ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίαυλο (π.χ. εξασθένηση) και η κάθε μονάδα καλείται να εκπέμψει την ακριβή ισχύ που χρειάζεται κάθε φορά και όχι υψηλότερη. Αν το επίπεδο ισχύος είχε προκαθοριστεί στατικά σύμφωνα με τις χειρότερες συνθήκες που θα μπορούσαν να επικρατήσουν στο δίαυλο, μέρος της ισχύος που θα εκπέμπονταν όταν επικρατούσαν καλές συνθήκες θα ήταν περιττό, ίσως και επιζήμιο. Με αυτό τον τρόπο το σύστημα επιτυγχάνει σημαντική οικονομία σε ενέργεια και λιγότερες παρεμβολές σε γειτονικούς σταθμούς.

2.2.2 ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΓΙΑ ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Το πρότυπο που ορίζει τις προδιαγραφές για το WiMAX στις κινητές επικοινωνίες είναι το 802.16e και έχει πολλές ομοιότητες με το 802.16d αλλά και σημαντικές διαφορές. Καταρχήν, το πρότυπο 802.16e περιορίζεται στις συχνότητες 2-6 GHz, έναντι των 2-11 GHz, και εφαρμόζεται σε συνθήκες οπτικής επαφής ή μη. Κύρια διαφορά των προτύπων αποτελεί η διαμόρφωση, καθώς το 802.16e χρησιμοποιεί αποκλειστικά SOFDMA (Scalable OFDMA) με 2048 φέροντα. Το 802.16e προβλέπει τη χρήση μικρότερου αριθμού τεχνικών διαμόρφωσης, των εξής τριών: 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM. Τέλος, τα πιθανά εύρη ζώνης που προβλέπονται είναι 1.75, 3.5, 5.7, 10, 20 MHz. Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα στοιχεία των προτύπων 802.16-2004 και 802.16-2005. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που προβλέπεται με το πρότυπο 802.16-2004 είναι 75 Mbps για χρήση φάσματος 20 MHz, ενώ το πρότυπο 802.16-2005 προβλέπει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 15 Mbps για χρήση φάσματος 5 MHz.

Parameter/property	Fixed WiMAX	Mobile WiMAX
Standard	802.16-2004	802.16e-2005
Scenario	LOS/NLOS (fixed nomadic, portable)	LOS/NLOS (mobile)
Frequency range	2 - 11 GHz	2 – 6 GHz
Possible Signal Bandwidth	250 KHz steps from 1,5 to 20 MHz	1,75/3,5/5/7/10/20 MHz
Max. Data rate	75Mbit/s at 20 MHz	15 Mbit/s at 5MHz
Modulation type	Single-Multicarrier modulation (OFDM or OFDMA with 256 carrier)	Multicarrier modulation (SOFDMA with uip 2048 carrier)
Description	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMa	WirelessMAN-SOFDMA
Modulation method	2-PSK, 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM, 256.QAM	4-PSK, 16-QAM, 64-QAM
Duplex method	FDD or TDD	FDD or TDD
Maximum range	Approx. 50 km	Approx. 5 km
Coverage (typic.)	Approx. 15 km (with outdoor antenna) Approx. 5 km (with indoor antenna)	Approx. 1,5 km

Πίνακας 2.2.1: Συγκεντρωτικά στοιχεία των προτύπων 802.16-2004 και 802.16-2005

2.3 ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΖΕΥΞΗΣ

Το στρώμα ζεύξης χωρίζεται σε δύο υποστρώματα, τα υποστρώματα σύγκλισης και κοινού μέρους. Ορίζονται δύο είδη υποστρώματος σύγκλισης ανάλογα με την υπηρεσία στην οποία απευθύνονται. Το υπόστρωμα σύγκλισης ATM απευθύνεται σε υπηρεσίες ATM και το υπόστρωμα σύγκλισης πακέτου απευθύνεται σε υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου όπως IPv4, IPv6, Ethernet και VLAN. Η βασική λειτουργία του υποστρώματος είναι να κατατάσσει τις Μονάδες Δεδομένων Υπηρεσιών (Service Data Unit, SDU) στην κατάλληλη σύνδεση MAC, να διατηρεί την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσιών και να διαχειρίζεται την εκχώρηση εύρους ζώνης.

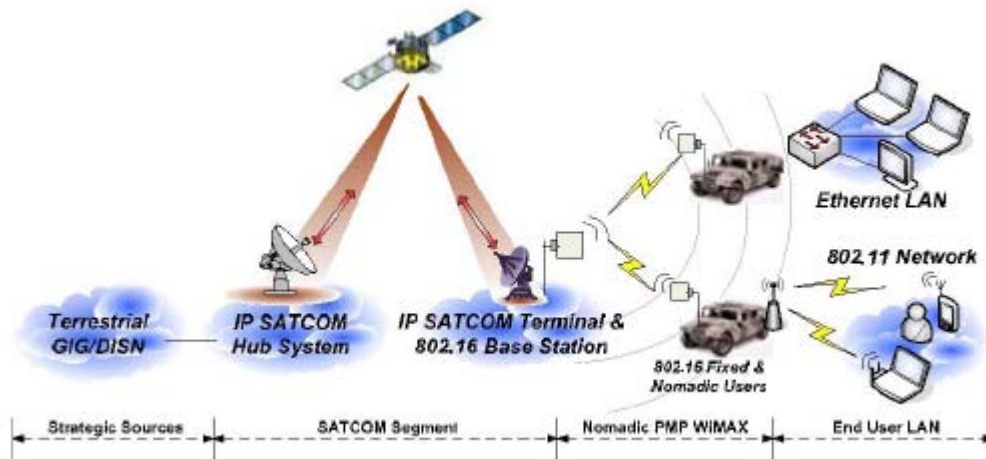
Το υπόστρωμα κοινού μέσου είναι κοινό για όλες τις υπηρεσίες. Είναι σχεδιασμένο σε αρχιτεκτονική σημείου προς πολλαπλά σημεία με ένα κεντρικό σταθμό βάσης να

χειρίζεται εκατοντάδες τελικούς χρήστες ταυτόχρονα. Η πρόσβαση στο μέσο προς τους χρήστες (downlink) γίνεται με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) ενώ προς το σταθμό βάσης (uplink) γίνεται βάσει αλγόριθμου πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (TDMA), δηλαδή με ανάθεση «μεταβλητών» χρονοθυρίδων. Οι χρονοθυρίδες στην ουσία είναι σταθερής διάρκειας και όχι μεταβλητές, όμως μπορεί να γίνει ανάθεση περισσότερων από μιας χρονοθυρίδας ανά χρήστη. Η ανάθεση των χρονοθυρίδων γίνεται από το σταθμό βάσης με κριτήριο τις απαιτήσεις του πελάτη σε ποιότητα υπηρεσιών επιτυγχάνοντας βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Το πρωτόκολλο του στρώματος ζεύξης είναι συνεπώς ελαστικό σε μοντέλα κίνησης με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ανεκτή καθυστέρηση και το επιθυμητό εύρος ζώνης. Οι εφαρμογές που υποστηρίζονται ποικίλλουν από εφαρμογές με απαίτηση για μικρή χρονική καθυστέρηση, όπως υπηρεσίες φωνής και VoIP, μέχρι υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας όπως οι υπηρεσίες Διαδικτύου.

Το στρώμα ζεύξης είναι προσανατολισμένο στη σύνδεση. Όλες οι υπηρεσίες, ακόμα και αυτές που εξ ορισμού δεν χρησιμοποιούν σύνδεση, ανατίθενται σε μια σύνδεση. Συνεπώς, παρέχεται ένας μηχανισμός για ανάθεση φάσματος, παροχή δεδομένης ποιότητας υπηρεσιών και δρομολόγηση των δεδομένων στο σωστό υπόστρωμα σύγκλισης ώστε να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις κάθε τελικού χρήστη. Μια άλλη λειτουργία που παρέχει το στρώμα ζεύξης είναι η αίτηση αυτόματης αναμετάδοσης (ARQ) χάρη στην οποία κρύβονται τα λάθη που προκαλούνται στη ραδιομετάδοση από τα ανώτερα στρώματα, βελτιώνοντας έτσι την τελική επίδοση. Επίσης, υποστηρίζονται λειτουργίες κρυπτογράφησης που προσδίδουν ασφάλεια στα προσωπικά δεδομένα του χρήστη. Τέλος, είναι δυνατός ο αυτόματος έλεγχος ισχύος για εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των παρεμβολών.

2.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ WiMAX

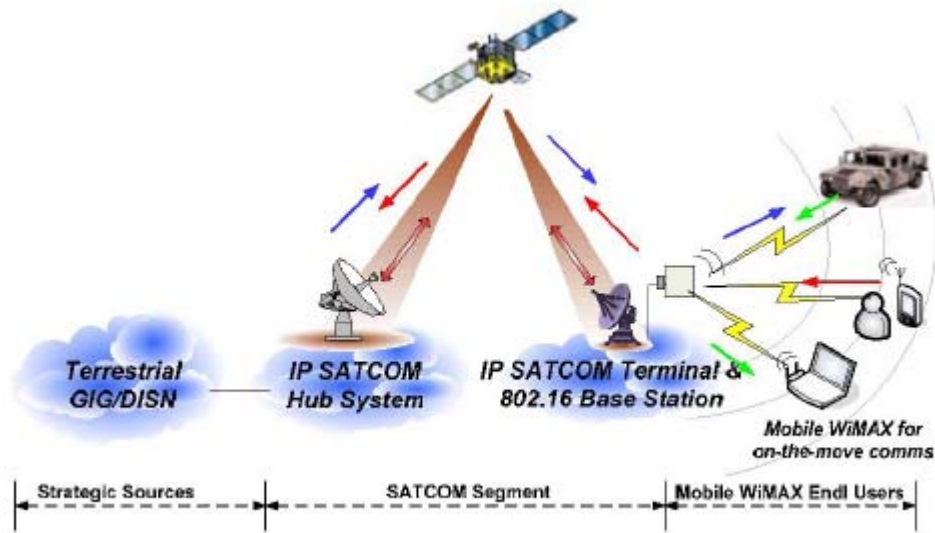
Δεδομένης της συνεχόμενης ανάπτυξης της τεχνολογίας WiMAX και της προώθησης της στην αγορά είναι λογικό να υπάρχουν ήδη διάφορα μοντέλα προσφερόμενων υπηρεσιών και να δημιουργούνται συνεχώς νέα. Τα μοντέλα υπηρεσιών που έχουν δημιουργηθεί για την αγορά αντικατοπτρίζουν τα υπάρχοντα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για στρατιωτικούς σκοπούς [11].



Σχήμα 2.4.1 : Τεχνολογία WiMAX προσφέρει σημείο προς πολλαπλά σημεία δίκτυο κορμού για σταθερά/νομαδικά δίκτυα 802.11 και τοπικά δίκτυα.

Η τεχνολογία 802.16-2004 που είναι διαθέσιμη σήμερα προορίζεται για σταθερή πρόσβαση και προϋποθέτει τη χρήση συνδρομητικών κεραιών εξωτερικού χώρου ή συνδρομητικών μονάδων εσωτερικού χώρου με κατευθυντικές κεραίες. Αυτές οι λύσεις χρησιμεύουν στη σύνδεση κτιρίων και κατοικιών με μια σταθερή τοπολογία σημείου προς πολλαπλά σημεία. Στο εσωτερικό των κτιρίων αυτών η συνδεσιμότητα μέσω WiMAX επεκτείνεται μέχρι τον τελικό χρήστη με τη βοήθεια τεχνολογιών όπως το Wi-fi και τα τοπικά δίκτυα. Στο σχήμα 2.4.1 φαίνεται η χρήση σταθερού δικτύου WiMAX για να συνδέσει δίκτυα Wi-fi και σταθερά τοπικά δίκτυα με δορυφορικό δίκτυο κορμού.

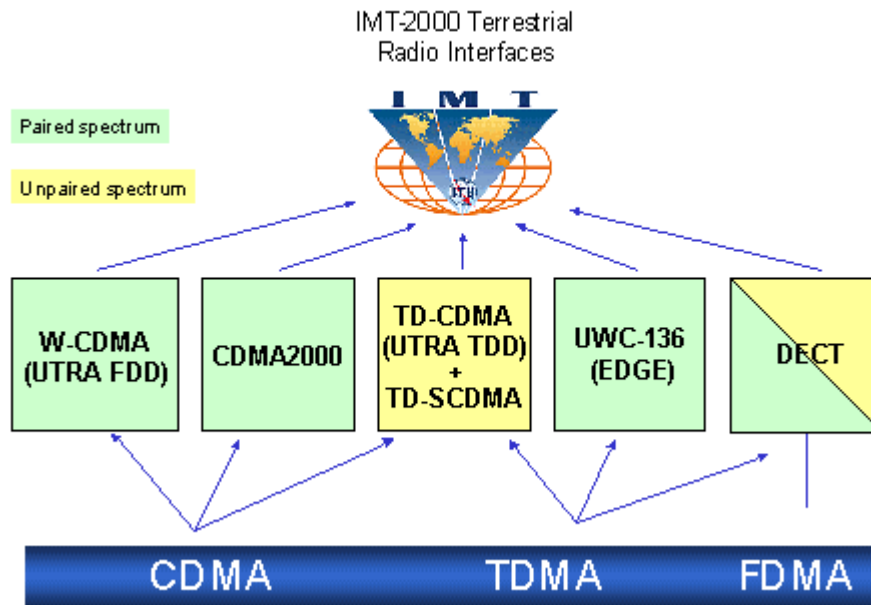
Από την άλλη πλευρά, οι λύσεις που βασίζονται στο πρότυπο 802.16e υποστηρίζουν τελείως διαφορετικά μοντέλα υπηρεσιών. Το κινητό WiMAX βρίσκεται ακόμα σε δοκιμές αν και αναμένεται να γίνει σύντομα διαθέσιμο στην αγορά. Θα προσφέρει τη δυνατότητα απευθείας σύνδεσης του τελικού χρήστη στο σταθμό βάσης ενώ αυτός κινείται. Λόγω της δυνατότητας κίνησης, της υποστήριξης διαπομπών από το πρότυπο και τη μεγαλύτερη ακτίνα σε σχέση με το 802.11, αναμένεται η ανάπτυξη του «κινητού WiMAX» να γίνει σε κυψελωτή μορφή.



Σχήμα 2.4.2: Σταθμός βάσης «κινητού WiMAX» σε άμεση σύνδεση με τελικούς χρήστες σε κίνηση.

2.5 Η ΘΕΣΗ ΤΟΥ WiMAX ΣΤΙΣ ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Οι τεχνολογίες 3G αποτελούν την τρίτη γενιά τηλεπικοινωνιακών προτύπων για κινητές επικοινωνίες στη ζώνη συχνοτήτων 2.57 GHz -2.69 GHz. Η οικογένεια προτύπων 3G ορίστηκε από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) το 1999 και ονομάζεται IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000). Ο σκοπός του IMT-2000 είναι να ενοποιήσει όλες τις κινητές συσκευές ανά τον κόσμο μέσα από ένα μοναδικό και παγκόσμιο πρότυπο ραδιομετάδοσης. Οι τεχνολογίες που συμπεριλήφθηκαν αρχικά στο πρότυπο είναι οι εξής 5: W-CDMA, CDMA2000, TD-CDMA/TD-SDMA, DECT, UWC-136. Στο σχήμα 2.5.1 φαίνονται οι 5 τεχνολογίες του IMT-2000 και οι τύποι πολλαπλής προσπέλασης που αυτές χρησιμοποιούν [18].



Σχήμα 2.5.1: Οι τεχνολογίες του IMT-2000 και οι τύποι πολλαπλής προσπέλασης που χρησιμοποιούν

Τον Οκτώβριο του 2007 στη Γενεύη πραγματοποιήθηκε το πρώτο μεγάλο βήμα για την προώθηση της τεχνολογίας WiMAX στην αγορά των κινητών επικοινωνιών. Η ITU αποφάσισε να συμπεριλάβει το WiMAX στην οικογένεια προτύπων IMT-2000. Αυτό σημαίνει ότι το WiMAX μπορεί πλέον επίσημα να χρησιμοποιείται για τη συχνότητα των 2.5 GHz. Το κύριο πλεονέκτημά του είναι ότι είναι η μόνη τεχνολογία του προτύπου IMT-2000 που χρησιμοποιεί OFDMA. Ήδη μεγάλες εταιρείες τηλεπικοινωνιών έχουν αγοράσει άδειες για τη χρήση της τεχνολογίας WiMAX τόσο στο εξωτερικό όσο και στην Ελλάδα.

2.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία WiMAX έχει ήδη χρησιμοποιηθεί με επιτυχία. Όταν το τσουνάμι χτύπησε την Ινδονησία, η τηλεπικοινωνιακή υποδομή είχε εξαφανιστεί. Τα συνεργεία διάσωσης που εργάστηκαν εκεί χρησιμοποίησαν την τεχνολογία WiMAX λόγω της ταχείας και εύκολης εγκατάστασής της. Το ίδιο συνέβη και όταν ο τυφώνας Κατρίνα χτύπησε τη Νέα Ορλεάνη. Το δίκτυο που στήθηκε για να διευκολύνει τις παντελώς κατεστραμμένες επικοινωνίες ήταν δίκτυο WiMAX.

Παρότι η τεχνολογία WiMAX φαίνεται να υπερτερεί των προγενέστερών της, γεγονός λογικό καθώς προτυποποιήθηκε πολύ πρόσφατα, χρειάζεται να δώσει μάχη

για να καθιερωθεί. Οι εναλλακτικές τεχνολογίες βρίσκονται στην αγορά εδώ και μεγάλο χρονικό διάστημα και είναι ήδη καθιερωμένες. Παρ'όλα αυτά, τα πρώτα βήματα έχουν γίνει και το μέλλον της τεχνολογίας WiMAX παρουσιάζεται ευοίωνα.

2.7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ OFDM

Η ραγδαία εξέλιξη των εφαρμογών φωνής και video μέσω του internet στις μέρες μας έχουν αυξήσει τη ζήτηση για υπηρεσίες που προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Πολλές προσπάθειες στο πεδίο της έρευνας γίνονται για την εύρεση του επόμενου συστήματος επικοινωνίας που θα προσφέρει την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσιών. Οι έρευνες επικεντρώνονται στον προσδιορισμό του κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης που θα προσφέρει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και θα είναι ικανό να αντισταθμίζει τα προβλήματα που παρουσιάζει ο εκάστοτε διάυλος.

Μια τεχνική που κερδίζει συνεχώς έδαφος στις σύγχρονες επικοινωνίες έναντι άλλων σχημάτων διαμόρφωσης που κάνουν χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας είναι η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Τα κύρια χαρακτηριστικά που την καθιστούν καταλληλότερη για ευρυζωνικές εφαρμογές είναι η εξοικονόμηση φάσματος που προσφέρει καθώς και η άριστη επίδοσή της σε κανάλια που υποφέρουν από υψηλά επίπεδα διασποράς. Η τεχνική διαμόρφωσης OFDM έχει υιοθετηθεί ήδη από πρότυπα για ασύρματες επικοινωνίες της IEEE (802.11a, 802.16) και του ETSI (HIPERLAN/2), για το ψηφιακό ραδιόφωνο και την ψηφιακή τηλεόραση στην Ευρώπη (DAB, DVB-T) καθώς και για την τεχνολογία ψηφιακής γραμμής συνδρομητή (xDSL). Επιπλέον, χρήση της OFDM γίνεται και στα πρότυπα HomePlug 1.0 και AV για ευρυζωνικές επικοινωνίες μέσω του ηλεκτρικού δικτύου διανομής.

Οι τεχνικές διαμόρφωσης με πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM) έχουν ως γενική ιδέα τη διαίρεση του καναλιού σε N υποκανάλια, διαμορφώνοντας ένα σήμα σε N υποφέροντα αντί σε ένα. Το κάθε υποκανάλι μπορεί να χρησιμοποιεί το ίδιο ή και διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης από τα υπόλοιπα υποκανάλια, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίαυλο. Συνεπώς, ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης μοιράζεται στα N υποκανάλια είτε ισόποσα είτε με άνισο τρόπο, εξασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη επίδοση του συστήματος. Προκειμένου να αποφευχθεί η παρεμβολή

μεταξύ γειτονικών υποκαναλιών και να είναι δυνατή η ανεξάρτητη φάραση των υποφερόντων, οι τεχνικές FDM χρειάζονται ένα διάστημα φύλαξης μεταξύ των φασμάτων των διαμορφωμένων υποφερόντων. Αυτό το διάστημα φύλαξης που μένει αχρησιμοποίητο σε κάθε υποκανάλι μειώνει το διαθέσιμο φάσμα στον τελικό χρήστη. Αντίθετα, η OFDM χρησιμοποιεί ορθογώνια μεταξύ τους υποφέροντα τα οποία επιτρέπεται να επικαλύπτονται εφόσον διατηρούν την ιδιότητα της ορθογωνιότητας. Αυτή τους η ιδιότητα τα απαλλάσσει από την αναγκαιότητα ύπαρξης διαστήματος φύλαξης και ως συνέπεια, επιτυγχάνει καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος.

Η OFDM αποτελεί τεχνική πολυπλεξίας, χαρακτηρίζεται όμως ως σχήμα διαμόρφωσης καθώς η πληροφορία που πολυπλέκεται προέρχεται από ένα μόνο χρήστη. Στην περίπτωση που η πληροφορία που πολυπλέκεται προέρχεται από διαφορετικούς χρήστες πρόκειται για σχήμα πολλαπλής προσπέλασης, που είναι γνωστό ως Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). Σε αυτή την περίπτωση σε κάθε χρήστη ατιστοιχεί ένα ή περισσότερα φέροντα ανάλογα με την ποιότητα υπηρεσιών που επιθυμείται. Η διαμόρφωση OFDM χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες τεχνικές πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου και συχνότητας (TDM, FDM) καθώς και διαίρεσης κώδικα (CDM).

2.7.1 Η ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ OFDM

Η εξασφάλιση της ορθογωνιότητας των υποφερόντων επιτυγχάνεται με χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (DFT) [12]. Σύμφωνα με τη θεωρία του DFT μια ακολουθία N μιγαδικών αριθμών x_0, x_1, \dots, x_{N-1} μετασχηματίζεται σε μια ακολουθία N μιγαδικών αριθμών X_0, \dots, X_{N-1} σύμφωνα με τον τύπο:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, k = 0, \dots, N-1$$

Ο Αντίστροφος Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier δίνεται από τον τύπο:

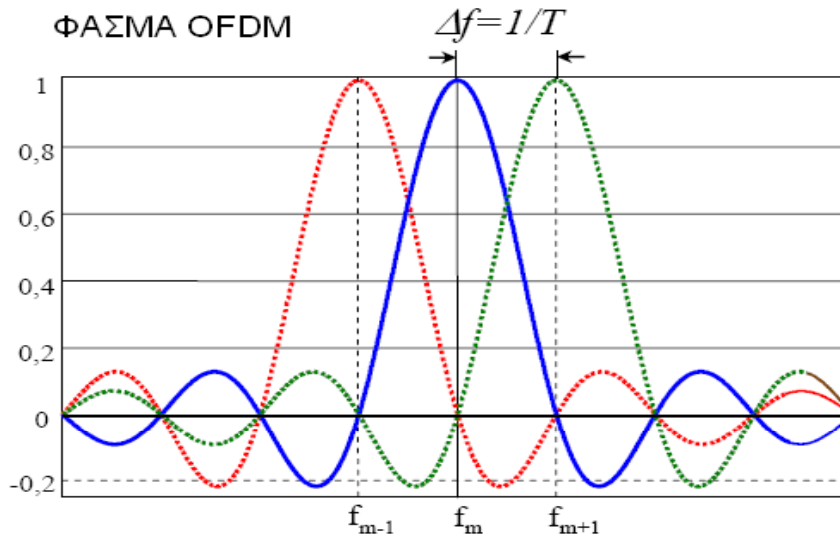
$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn}, n = 0, \dots, N-1$$

Τα διανύσματα $e^{\frac{2\pi i}{N}kn}$, που σύμφωνα με τον τύπο του Euler εκφράζουν ημίτονα και συνημίτονα, σχηματίζουν μια ορθογώνια βάση για τα N-διάστατα διανύσματα των μιγαδικών ακολουθιών. Ένα σήμα στο διανυσματικό χώρο του DFT μπορεί να εκφραστεί ως ο γραμμικός συνδυασμός των ορθογώνιων ημιτόνων. Ο μετασχηματισμός στην ουσία συσχετίζει το σήμα εισόδου του με κάθε μια από τις ημιτονοειδείς εξισώσεις βάσης. Έτσι ο DFT χρησιμοποιείται στον πομπό OFDM για να μεταθέσει το σήμα εισόδου σε N ορθογώνια υποφέροντα (δηλαδή στις ορθογώνιες συναρτήσεις βάσης του DFT). Ομοίως, στην πλευρά του δέκτη ο μετασχηματισμός χρησιμοποιείται ξανά για να επεξεργαστεί τα λαμβανόμενα υποφέροντα.

Αν το σήμα εισόδου έχει κάποια ενέργεια σε μια συγκεκριμένη συχνότητα υπάρχει κορυφή στη συσχέτιση του σήματος εισόδου και του ημιτόνου βάσης που βρίσκεται στην αντίστοιχη συχνότητα. Η συσχέτιση που πραγματοποιεί ο DFT για ένα δεδομένο υποφέρον βλέπει μόνο την ενέργεια για το συγκεκριμένο υποφέρον, ενώ η ενέργεια των γειτονικών φερόντων δε συμβάλει δεδομένου ότι είναι ασυσχέτιστη. Σχηματικά, παρατηρούμε ότι στο φάσμα των ορθογώνιων υποφερόντων όλες οι κορυφές αντιστοιχούν σε μηδενισμούς των γειτονικών υποφερόντων (βλ. Σχήμα 1.1).

Στην πράξη, η απευθείας εφαρμογή του DFT δίνει πολυπλοκότητα $O(N^2)$ που κρίνεται μη ικανοποιητική. Στη θέση του DFT χρησιμοποιείται ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) ,αλγόριθμος ταχέως υπολογισμού του DFT με πολυπλοκότητα $O(N \cdot \log_2 N)$ και ο αντίστροφός του, IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Στην πλευρά του πομπού, το προς μετάδοση σήμα διαμορφώνεται ψηφιακά με κάποιο γνωστό σχήμα διαμόρφωσης (QPSK, QAM, 16-QAM κ.τ.λ.) και μετατρέπεται από σειριακό σε παράλληλο για να τροφοδοτήσει τον IFFT. Το σειριακό σήμα αντιμετωπίζεται από τον IFFT σαν να βρίσκεται στο πεδίο της συχνότητας και το μετασχηματίζει στο πεδίο του χρόνου. Ο IFFT δέχεται στην είσοδο του N σύμβολα (όπου N είναι ο αριθμός των υποκαναλιών), καθένα με περίοδο T. Κάθε σύμβολο δρα ως ένα μιγαδικό βάρος για την αντίστοιχη ημιτονοειδή συνάρτηση βάσης. Οι συναρτήσεις βάσης του IFFT είναι N ημίτονα σε N συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας βασικής συχνότητας. Οπότε στην έξοδο του IFFT υπάρχει το άθροισμα των N σταθμισμένων ημιτόνων. Η αντίστροφη διαδικασία λαμβάνει χώρα στην πλευρά του δέκτη. Το λαμβανόμενο σήμα από το πεδίο του

χρόνου μεταφέρεται στο πεδίο της συχνότητας μέσω μιας διάταξης FFT. Ιδανικά, η έξοδος του FFT δίνει τα αρχικά σύμβολα που έστειλε ο πομπός.



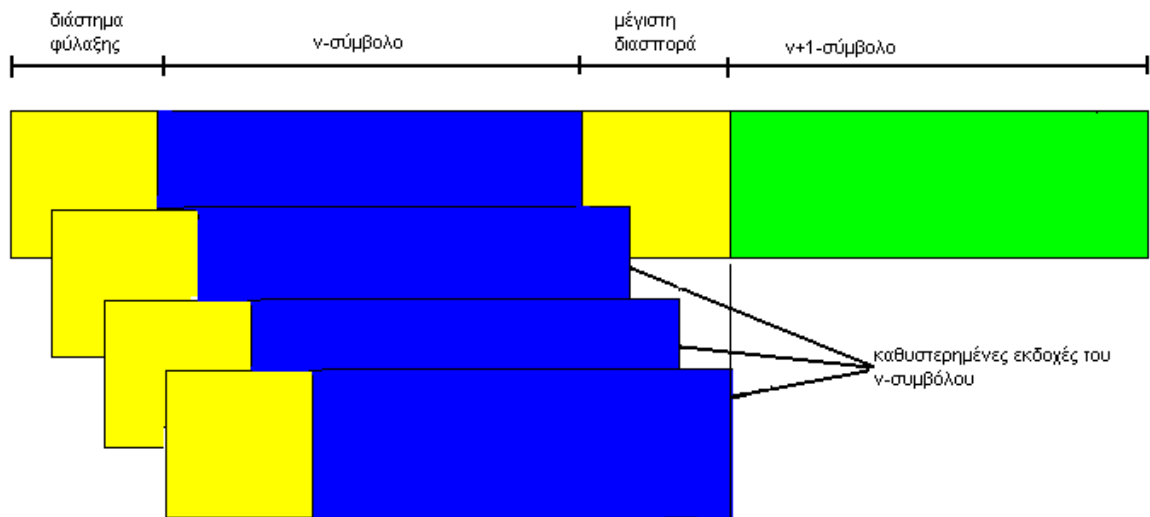
Σχήμα 2.7.1: Φάσμα OFDM τριών υποφερρόντων. Οι μηδενισμοί αντιστοιχούν σε κορυφές γειτονικών υποφερρόντων.

1.2 ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΦΥΛΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ

Ένα σοβαρό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι ασύρματες ζεύξεις είναι οι διαλείψεις λόγω του φαινομένου των πολλαπλών διαδεύσεων. Αυτό οφείλεται στη συμβολή κυμάτων που έχουν ανακλαστεί από αντικείμενα στο περιβάλλον (δέντρα, λόφους, βουνά, κτίρια ή οχήματα) και έχουν ακολουθήσει διαφορετικούς δρόμους. Η διαφορά φάσης των καθυστερημένων εκδοχών επηρεάζεται από τη διαδρομή που ακολούθησαν και από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που αντιμετώπισαν κατά μήκος της τροχιάς. Ανάλογα με τη διαφορά φάσης μεταξύ των διαφόρων συνιστωσών η συμβολή τους μπορεί να δράσει ενισχυτικά ή καταστροφικά για το σήμα. Στις ενσύρματες επικοινωνίες καθυστερημένα αντίγραφα λόγω ανακλάσεων μπορούν να δημιουργηθούν στις ασυνέχειες του μέσου μετάδοσης λόγω ανεπιτυχούς προσαρμογής.

Το αποτέλεσμα της συμβολής καθυστερημένων εκδοχών του συμβόλου είναι η διασπορά αυτού στο χρόνο. Δεδομένου ότι το δεύτερο σύμβολο ακολουθεί αμέσως μετά το πρώτο, αναμένεται να υπάρχει παρεμβολή του πρώτου στο δεύτερο, φαινόμενο που ονομάζεται διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference-ISI).

Για την αποφυγή της παρεμβολής μεταξύ γειτονικών συμβόλων έχει καθιερωθεί η χρήση ενός διαστήματος φύλαξης στην αρχή κάθε συμβόλου [13]. Όπως διαπιστώνεται και από το σχήμα 1.2 αρκεί το διάστημα φύλαξης να είναι ίσο με τη μέγιστη διασπορά που εισάγει ο διάυλος ώστε μην παρεμβάλουν τα γειτονικά σύμβολα. Από την άλλη πλευρά το διάστημα φύλαξης καταλαμβάνει ένα χρονικό διάστημα στο οποίο δε μεταδίδεται πληροφορία, οπότε μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Έχει επικρατήσει να ορίζεται αρχικά το διάστημα φύλαξης ίσο με τη μέγιστη διασπορά και στη συνέχεια να επιλέγεται η διάρκεια συμβόλου να είναι τουλάχιστον 4 φορές μεγαλύτερη από τη διάρκεια του διαστήματος φύλαξης ώστε να μην συμβαίνει μεγάλη υποβάθμιση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

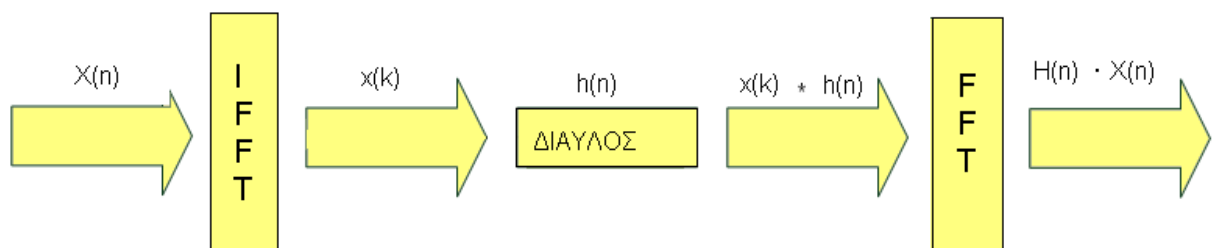


Σχήμα 2.7.2: Καθυστερημένες εκδοχές συμβόλου λόγω ανακλάσεων και η σημασία του διαστήματος φύλαξης.

Ένα άλλο είδος παρεμβολής που απαντάται μόνο στα σχήματα που κάνουν χρήση πολλών φερόντων είναι η ενδοσυμβολική παρεμβολή. Αυτή ορίζεται ως η παρεμβολή μεταξύ των υποκαναλιών ενός συμβόλου, δηλαδή η παρεμβολή του συμβόλου στον εαυτό του. Για την αποφυγή αυτού του είδους παρεμβολής έχει υιοθετηθεί η χρήση της κυκλικής επέκτασης στο χώρο του διαστήματος φύλαξης. Αν θεωρηθεί ότι το διάστημα φύλαξης είναι μήκους K , τότε αυτό καταλαμβάνεται από ένα αντίγραφο των K τελευταίων bits του συμβόλου.

Σύμφωνα με τη θεωρία σημάτων και συστημάτων, η συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου ισοδυναμεί με πολλαπλασιασμό στο πεδίο της συχνότητας στο συνεχές χρόνο. Για σήματα διακριτού χρόνου αυτή η ιδιότητα ισχύει μόνο αν τα σήματα είναι άπειρης διάρκειας ή αν τουλάχιστον ένα από αυτά είναι περιοδικό στο εύρος της συνέλιξης. Στις ψηφιακές επικοινωνίες, τα σύμβολα που φθάνουν στο δέκτη έχουν περάσει από μια διαδικασία συνέλιξης με την κρουστική απόκριση του διαύλου στο πεδίο του χρόνου. Για να ισοδυναμεί η συνέλιξη αυτή με πολλαπλασιασμό στο πεδίο της συχνότητας πρέπει να ισχύει ένα από τα παραπάνω κριτήρια. Εφόσον σήμα άπειρης διάρκειας δεν μπορεί να υπάρξει στη φύση, επιλέγεται να μετατραπεί το σήμα σε περιοδικό. Έτσι όπως ορίστηκε το διάστημα φύλαξης με χρήση κυκλικής επέκτασης των K τελευταίων bits, το σύμβολο με την επέκταση φαίνεται πια περιοδικό στη συνέλιξη με το διάυλο.

Το ζητούμενο είναι να εξουδετερωθεί η επιρροή του διαύλου στο σήμα. Στην πλευρά του δέκτη μετά την εφαρμογή του FFT το λαμβανόμενο σήμα έχει μεταφερθεί στο πεδίο της συχνότητας όπου η συνέλιξη του διαύλου με το σήμα στο χρόνο ισοδυναμεί πλέον με πολλαπλασιασμό τους, χάρη στην περιοδικότητα που προσδώθηκε στο σήμα. Επομένως για να εξουδετερωθεί η επιρροή του διαύλου και δεδομένου ότι η κρουστική του απόκριση είναι γνωστή, έστω $H(n)$, αρκεί να χρησιμοποιηθεί ένας αντισταθμιστής στο δέκτη με συνάρτηση μεταφοράς $H(n)^{-1}$. Βεβαίως, στα παραπάνω έχει γίνει η παραδοχή ότι ο δίαυλος δεν εισάγει θόρυβο.



Σχήμα 2.7.3: Σύστημα μετάδοσης OFDM

2.7.3 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της OFDM είναι η χρήση κωδικοποίησης εκ των προτέρων διόρθωσης λαθών (FEC) και ανάδευση (interleaving). Σε ένα κανάλι επιλεκτικό ως προς τη συχνότητα είναι πιθανό τα σύμβολα που μεταφέρονται από ένα

υποφέρον ή από διαδοχικά υποφέροντα να δεχτούν μεγάλη εξασθένηση, οδηγώντας σε λάθη στη λαμβανόμενη ακολουθία bits. Η τυχαία διασπορά των bits σε όλο το χρησιμοποιούμενο από την εφαρμογή φάσμα μπορεί να ενισχύσει το σύστημα έναντι στα καταιγιστικά λάθη, καθώς ένα αποτελεσματικό σχήμα κωδικοποίησης μπορεί πλέον να τα διορθώσει. Ένα κλασικό παράδειγμα ανάδευσης παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4.

Λέξεις προς αποστολή:

aaaabbbbccccdddeeeffffgggg

Μετά την ανάδευση:

abcdefghijklmnopabcdefghijklmnop

Μετάδοση με καταιγισμό λαθών:

abcdefghijklmnop_____abcdefghijklmnop

Ληφθείσες λέξεις μετά την αποανάδευση:

aa_abbbbccccddde_eef_ffg_gg

Σχήμα 2.7.4: Παράδειγμα ανάδευσης

Στο παραπάνω παράδειγμα ένα ικανοποιητικό σχήμα κωδικοποίησης είναι σε θέση να διορθώσει τα μεμονωμένα λάθη μετά τη διαδικασία αποανάδευσης (de-interleaving) ενώ θα ήταν αδύνατο να διορθώσει τα συνεχόμενα λάθη που προκαλούνται από το κανάλι, καθώς κάθε κώδικας έχει τη δυνατότητα να διορθώνει συγκεκριμένο αριθμό λαθών μέσα σε δεδομένο αριθμό bits. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν κώδικες διόρθωσης λαθών συχνά αναφέρονται ως COFDM (Coded OFDM).

Ένα κριτήριο για τον επιτυχημένο σχεδιασμό ενός δέκτη OFDM είναι η επίτευξη συγχρονισμού. Ο συγχρονισμός, τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα, κρίνεται υψίστης σημασίας για τον εντοπισμό της αρχής του OFDM συμβόλου και την ευθυγράμμιση των συχνοτήτων των τοπικών ταλαντωτών του διαμορφωτή και του αποδιαμορφωτή. Ο μη ακριβής συγχρονισμός έχει ως αποτέλεσμα να χαθεί μερικώς η ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφερόντων και να εισαχθούν διασυμβολική και διαφεροντική (intercarrier) παρεμβολή.

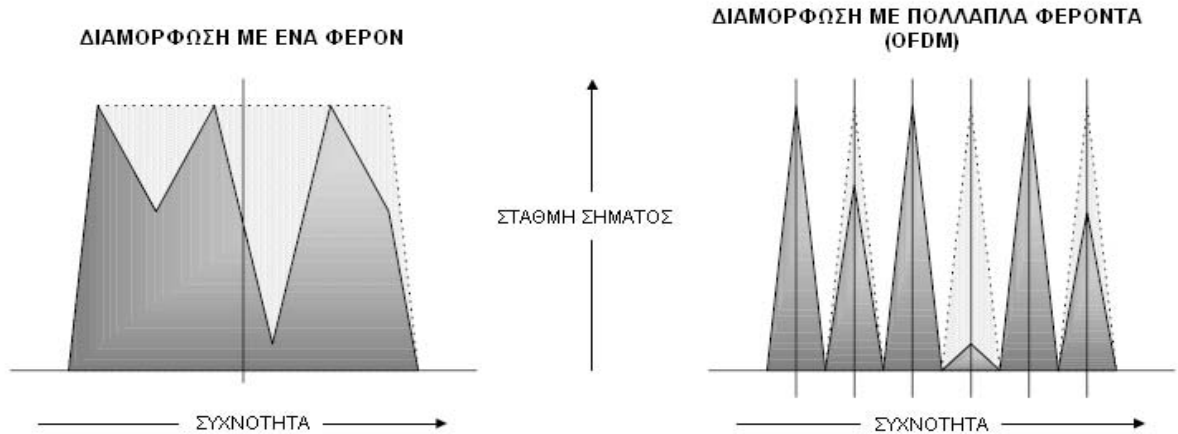
2.7.4 ΤΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

OFDM ΣΤΟ WiMAX

Η τεχνική διαμόρφωσης OFDM αποτελεί ένα από τα εργαλεία της τεχνολογίας WiMAX που της επιτέπει να προσφέρει υπηρεσίες υπό συνθήκες μη οπτικής επαφής (Non Line Of Sight, NLOS) [14]. Στη διάδοση κάτω από συνθήκες μη οπτικής επαφής το σήμα φθάνει στο δέκτη από ανακλάσεις, σκέδαση και διαθλάσεις του απευθείας σήματος. Τα λαμβανόμενα σήματα διαφέρουν από το απευθείας σήμα ως προς την εξασθένηση, την καθυστέρηση και την πόλωση. Για να είναι δυνατή η μετάδοση σε συνθήκες μη οπτικής επαφής πρέπει να γίνει χρήση του φαινομένου πολυόδης διάδοσης προς όφελος της τεχνολογίας. Αυτό είναι δυνατό εν μέρει χάρη στα χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης OFDM.

Αρχικά, η δομή του συμβόλου OFDM προσφέρει το πλεονέκτημα της λειτουργίας με τη μεγαλύτερη χρονική διασπορά που εισάγει η NLOS διάδοση χάρη στο διάστημα φύλαξης που υποστηρίζει. Όπως αναφέρεται και παραπάνω, η κυματομορφή της OFDM είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να εξαλείφει τη διασυμβολική παρεμβολή και να καθιστά εύκολη την αντιστάθμιση στο δέκτη. Επιπλέον, χάρη στη διαίρεση του φάσματος OFDM σε πολλαπλά φέροντα στενής ζώνης τα επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα φαινόμενα εξασθένησης περιορίζονται σε ένα υποσύνολο φερόντων και γίνεται σχετικά πιο εύκολη η αντιστάθμισή τους.

Στο σχήμα 1.5 φαίνεται ένα σήμα πρώτα διαμορφωμένο από ένα φέρον κι έπειτα διαμορφωμένο από πολλαπλά υποφέροντα (όπως συμβαίνει στην OFDM). Το διακεκομμένο μέρος δείχνει το φάσμα του σήματος που εστάλη, ενώ το γκρι μέρος δείχνει το φάσμα που ελήφθη. Είναι φανερό πως σε κάποιες συχνότητες η στάθμη του σήματος πέφτει σημαντικά λόγω εξασθένησης. Είναι πιο εύκολο να αντισταθμιστεί η εξασθένηση αυτή στα υποφέροντα, ξεχωριστά στο καθένα, παρά σε ολόκληρο το πλατύ φασματικά σήμα ενός φέροντος.



Σχήμα 2.7.5: Εξασθένιση σε κανάλι επιλεκτικό ως προς τη συχνότητα

2.7.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ OFDM ΣΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ HP 1.0 ΚΑΙ HP AV

Τα πρότυπα (specifications) για ευρυζωνικές επικοινωνίες μέσω του ηλεκτρικού δικτύου διανομής HomePlug 1.0 ΚΑΙ HomePlug AV αποτελούν επίσης παραδείγματα εφαρμογής της διαμόρφωσης OFDM. Στο HomePlug 1.0 η OFDM ορίζεται ως η βασική μέθοδος διαμόρφωσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί 84 υποφέροντα με ίσα διαστήματα μεταξύ τους στη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 4,5 MHz και 21 MHz. Χάρη στην κυκλική επέκταση και στις διαφορικές τεχνικές διαμόρφωσης (DBPSK, DQPSK) δεν υπάρχει ανάγκη αντιστάθμισης.

Λόγω της ευαισθησίας της OFDM σε offset συχνότητας και στο θόρυβο φάσης που προκαλούν διαφεροντική παρεμβολή (Inter-Carrier Interference ICI) το πρότυπο HomePlug AV κάνει χρήση της τεχνικής OFDM με παράθυρο. Με αυτήν την εξελιγμένης μορφής τεχνική OFDM, το OFDM σύμβολο φιλτράρεται με ένα φίλτρο παραθύρου (window filter) στο πεδίο του χρόνου π.χ. ένα ανορθωμένο ημίτονο (raised sin). Η εφαρμογή του παραθύρου μειώνει τους πλευρικούς λοβούς στο φάσμα του σήματος OFDM, περιορίζοντας έτσι την ευαισθησία στο offset συχνότητας και εξοικονομώντας την ενέργεια που εκπέμπεται εκτός του επιθυμητού εύρους ζώνης. Παρ'όλα αυτά, μετά την εφαρμογή του παραθύρου χάνεται η ιδιότητα της ορθογωνιότητας των υποφερόντων. Στο [16] προτείνεται ένας αλγόριθμος για την αποκατάσταση της ορθογωνιότητας μεταξύ των υποφερόντων. Περισσότερα για τις βασικές αρχές που διέπουν τη διαμόρφωση OFDM με παράθυρο μπορούν να βρεθούν στα [15, 17].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΒΡΙΔΙΚΟ

ΔΙΚΤΥΟ BPL-WiMAX

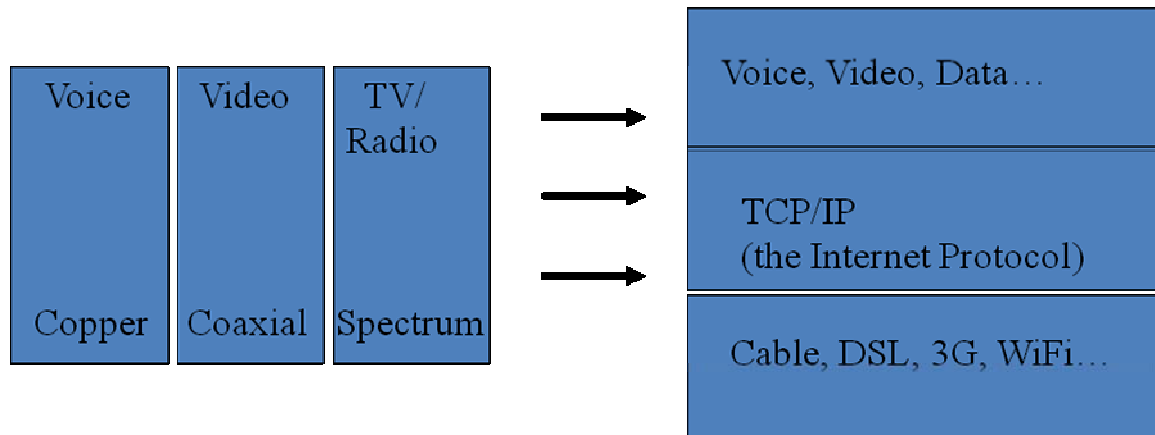
3.1 ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

3.1.1 Ορισμός

Ο χώρος των τηλεπικοινωνιών αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς. Νέες ευρυζωνικές υπηρεσίες έρχονται στην επικαιρότητα και ένα δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να τις προσφέρει στον τελικό χρήστη με συνέπειες στις απαιτήσεις του. Τα ήδη εγκατεστημένα δίκτυα αδυνατούν να ενσωματώσουν νέες υπηρεσίες δεδομένου ότι είναι σχεδιασμένα για συγκεκριμένες υπηρεσίες μόνο. Σε αυτά τα πλαίσια δημιουργήθηκε η ιδέα των δικτύων επόμενης γενιάς, γνωστών ως NGNs (Next Generation Networks).

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) [19] ένα δίκτυο επόμενης γενιάς ορίζεται ως ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτου, ικανό να παρέχει Υπηρεσίες Τηλεπικοινωνιών σε χρήστες κάνοντας χρήση πολλαπλών ευρυζωνικών τεχνολογιών μεταφοράς με δυνατότητα παροχής Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS-enabled). Στα δίκτυα επόμενης γενιάς, οι λειτουργίες που σχετίζονται με τις υπηρεσίες είναι ανεξάρτητες των τεχνολογιών που σχετίζονται με τη μεταφορά και την κινητικότητα των χρηστών. Επιπλέον, επιτρέπεται στους χρήστες η απελευθερωμένη πρόσβαση σε υπηρεσίες ανεξάρτητες του δικτύου.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, τα δίκτυα επόμενης γενιάς σχεδιάζονται έτσι ώστε η ενσωμάτωση των τεχνολογιών πρόσβασης να είναι οριζόντια και όχι κατακόρυφη και όλες οι υπηρεσίες να χρησιμοποιούν για μεταφορά την τεχνολογία IP (all-IP). Ένας χρήστης NGN, ο οποίος μπορεί να παραμένει σταθερός σε μια θέση ή να κινείται, έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί εφαρμογές ανεξάρτητα από το δίκτυο παρόχου στο οποίο ανήκει. Τα δίκτυα NGN είναι κατάλληλα για παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών με διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών τόσο στα αστικά κέντρα όσο και σε απομακρυσμένες περιοχές.



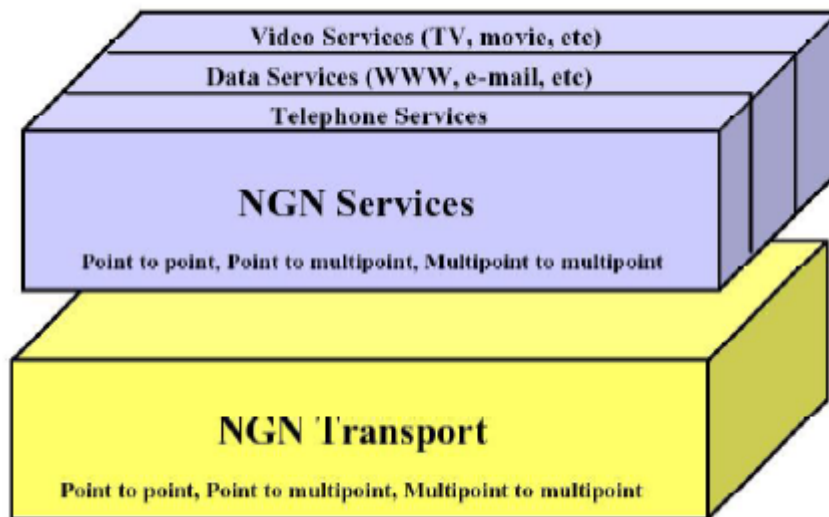
Σχήμα 3.1.1: Οριζόντια ενσωμάτωση τεχνολογιών πρόσβασης

3.1.2 Χαρακτηριστικά NGN

Τα κύρια χαρακτηριστικά του δικτύου επόμενης γενιάς συνοψίζονται παρακάτω [20,21]:

- Μεταφορά βασισμένη στη μεταγωγή πακέτου
- Διαχωρισμός συναρτήσεων ελέγχου που προσφέρουν συγγενείς λειτουργίες (call/ session, application/ service)
- Αποσύνδεση της παροχής υπηρεσιών από το στρώμα μεταφοράς και παροχή διεπιφανειών ανοικτού κώδικα
- Υποστήριξη μεγάλης ποικιλίας υπηρεσιών και ομαδοποίηση αυτών σε κλάσεις (πραγματικού χρόνου και μη, πολυμέσων, streaming)
- Ευρυζωνική πρόσβαση με εξασφαλισμένη end-to-end ποιότητα υπηρεσιών
- Υποστήριξη κινητικότητας, φορητότητας
- Ελεύθερη πρόσβαση σε υπηρεσίες από χρήστες που ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους
- Ποικιλία σχημάτων ταυτοποίησης που μπορούν να μεταφραστούν σε διευθύνσεις IP με σκοπό τη δρομολόγηση σε δίκτυα IP
- Ενοποιημένα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσιών για την ίδια υπηρεσία ανεξαρτήτως τερματικού πρόσβασης του χρήστη

- Ενοποιημένες σταθερές και κινητές επικοινωνίες
- Υποστήριξη πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης τελευταίου μιλίου
- Συμβατότητα με όλους τους κανονισμούς που αφορούν τομείς όπως η ασφάλεια, η εξασφάλιση των προσωπικών δεδομένων και οι επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης



Σχήμα 3.1.1: Η ανεξαρτησία του επιπέδου μεταφοράς από το επίπεδο εφαρμογών

3.1.3 ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΤΩΝ NGN

Το δίκτυο που αποτελεί το μεγαλύτερο δίκτυο πρόσβασης εγκατεστημένο αυτή τη στιγμή είναι το τηλεφωνικό δίκτυο, το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία χαλκού. Το μειονέκτημα του χαλκού είναι ότι υποστηρίζει μόνο υπηρεσίες στενής ζώνης, γεγονός που κάνει την αντικατάστασή του επιτακτική. Τη λύση που θα αντικαταστήσει το χαλκό δίνουν οι παρακάτω τεχνολογίες οι οποίες προσφέρουν ευρυζωνική πρόσβαση και αναμένεται να ενσωματωθούν στο δίκτυο πρόσβασης των NGN:

- **Οπτική ίνα:** Η οπτική ίνα επιτρέπει επικοινωνία διπλής κατεύθυνσης και υπόσχεται ταχύτητες για τελικούς χρήστες της τάξης των 160 Mbit/s στην κάτω ζεύξη και 120 Mbit/s στην άνω ζεύξη. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης μοιράζεται στους τελικούς χρήστες του τοπικού σημείου διανομής. Ήδη μεγάλο μέρος του χάλκινου τηλεφωνικού δικτύου ανά τον κόσμο έχει αντικατασταθεί από οπτικές ίνες οι οποίες προσφέρουν αξιόπιστη και ευρυζωνική επικοινωνία. Το έργο εγκατάστασης οπτικών ινών όμως είναι

χρονοβόρο και υψηλού κόστους, καθώς απαιτεί διαδικασίες εκσκαφής. Επομένως, η επένδυση σε οπτικές ίνες μπορεί να αποβεί συμφέρουσα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου η ζήτηση είναι υψηλή, αλλά όχι σε αγροτικές περιοχές με περιορισμένη ζήτηση.

- **Ευρυζωνικές Ασύρματες Τεχνολογίες:** Οι καταλληλότερες τεχνολογίες σε αυτή την κατηγορία για δίκτυα πρόσβασης NGN είναι οι τεχνολογίες Wi-fi και WiMAX. Λόγω της ευκολίας στην εγκατάστασή τους και της ευελιξίας που προσφέρουν, οι τεχνολογίες αυτές είναι κατάλληλες για απομακρυσμένες περιοχές που δεν διαθέτουν ενσύρματη υποδομή για ευρυζωνική πρόσβαση.

Η τεχνολογία Wi-fi προσφέρει υπηρεσίες σε μια τυπική ακτίνα 45 m σε κλειστό χώρο και 90 m σε εξωτερικό χώρο, αν και σε τοπολογίες σημείου προς σημείο ή σημείου προς πολλαπλά σημεία μπορεί να βελτιώσει την εμβέλειά της. Εκτός των προαναφερθεισών τοπολογιών, το Wi-fi μπορεί να οργανωθεί σε mesh δίκτυο με δορυφορικό δίκτυο κορμού μέσω πολύ μικρών τερματικών συσκευών (VSAT) για να φθάσει ακόμα και στις πλέον απομακρυσμένες περιοχές.

Οι ασύρματες τεχνολογίες έχουν το πλεονέκτημα της εύκολας εγκατάστασης και ευελιξίας αλλά υστερούν στα χαρακτηριστικά της σύνδεσης (κάλυψη, ταχύτητα, συμμετρία) όταν απευθύνονται σε πολλούς χρήστες, καθώς το φάσμα διαμοιράζεται σε αυτούς. Συνεπώς, θεωρούνται περισσότερο συμπληρωματικές προς τις ενσύρματες λύσεις παρά ανταγωνιστικές εναλλακτικές λύσεις.

- **Broadband over Power lines (BPL)**

Με τη χρήση του ηλεκτρικού δικτύου διανομής ως τηλεπικοινωνιακού μέσου μετάδοσης παρέχονται ευρυζωνικές υπηρεσίες με το πλεονέκτημα της μη εξάρτησης της σύνδεσης από την απόσταση από τον κεντρικό σταθμό ή από τον αριθμό των χρηστών. Η σύνδεση με το τερματικό του χρήστη γίνεται στη Χ.Τ. μέσω ενός “BPL modem” που συνδέεται σε οποιαδήποτε ηλεκτρική υποδοχή. Παρ’όλα αυτά, η επίσημη προτυποποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη και το διαθέσιμο φάσμα που

πρόσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία στον τελικό χρήστη είναι ακόμα υπό έρευνα.

- **Κινητά Δίκτυα 3G**

Οι τεχνολογίες τρίτης γενιάς προσφέρουν κινητές υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και εικόνας βασιζόμενες σε IP σε ταχύτητες που θεωρητικά φθάνουν τα 2-4 Mbps. Παρά το γεγονός ότι η ζήτηση σε δίκτυα τρίτης γενιάς από τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας έχει αυξηθεί σημαντικά, είναι αναγκαία η αναβάθμισή τους ώστε να υποστηρίξουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης.

- **Δορυφορικές επικοινωνίες**

Οι δορυφορικές επικοινωνίες συνδέονται με την ψηφιακή τηλεόραση, το ψηφιακό ραδιόφωνο και σε ειδικές περιπτώσεις με την κινητή τηλεφωνία. Χάρη σε νέα τεχνολογικά επιτεύγματα (όπως αλγόριθμοι συμπίεσης δεδομένων) είναι δυνατή η αποτελεσματικότερη χρήση του φάσματος που επιτρέπει την παροχή δορυφορικών ευρυζωνικών επικοινωνιών. Η σύνδεση επιτυγχάνεται μέσω γεωστατικού δορυφόρου και οικιακού εξοπλισμού που αποτελείται από μικρή εξωτερική κεραία και μονάδα εσωτερικού χώρου. Τα προβλήματα που αναζητούν λύση είναι ο περιορισμός του φάσματος στην άνω ζεύξη και η καθυστέρηση που εισάγει η δορυφορική μετάδοση και δεν ευνοεί τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

3.2 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ BPL-WiMAX ΩΣ NGN

Οι τεχνολογίες WiMAX και BPL είναι δύο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες οι οποίες εφαρμοζόμενες χωριστά, παρουσιάζουν προβλήματα στην εφαρμογή τους ως δίκτυα πρόσβασης για NGN. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η μια τεχνολογία φαίνεται να συμπληρώνει την άλλη και συνεπώς ένας συνδυασμός των δύο συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματά τους και εξουδετερώνει ορισμένα μειονεκτήματά τους. Το BPL προσφέρει το ενσύρματο μέσο που χρειάζεται το WiMAX για δίκτυο κορμού, ενώ από την άλλη πλευρά το WiMAX παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης στις περιπτώσεις που το εύρος ζώνης του BPL δεν είναι επαρκές.

Οι δυο τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν με διαφορετικούς τρόπους δημιουργώντας έτσι ένα πλήθος πιθανών τοπολογιών για ένα υβριδικό δίκτυο BPL-

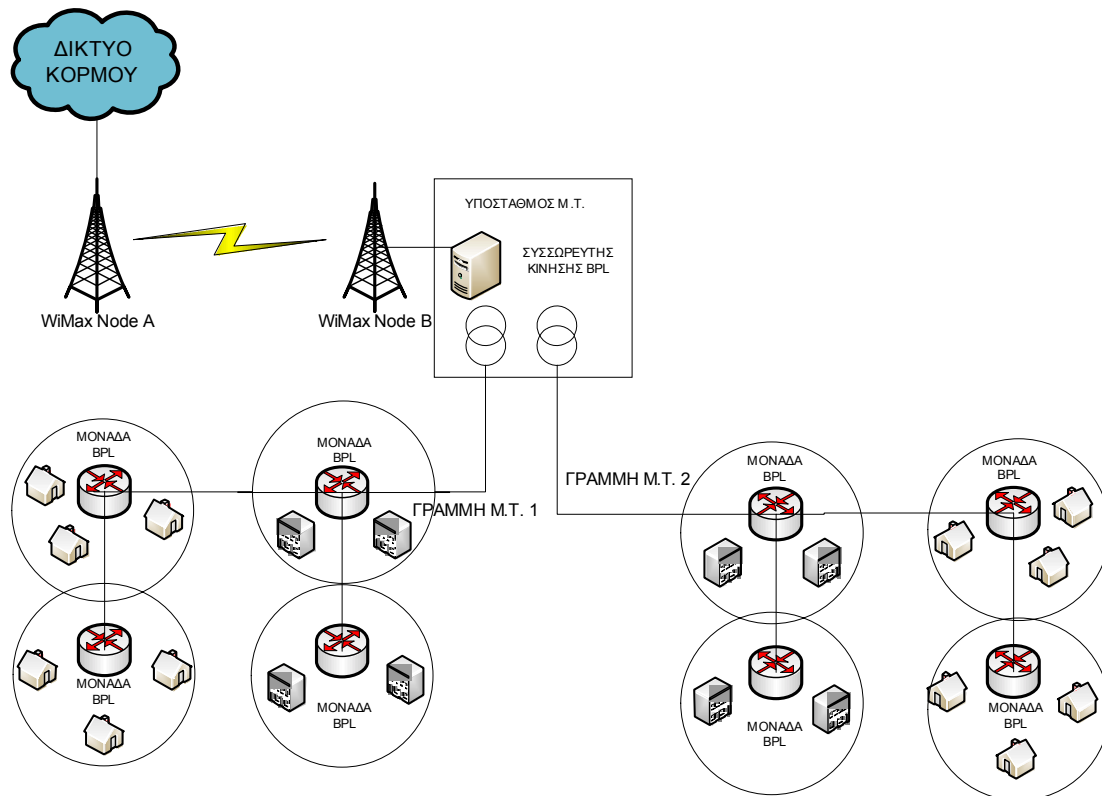
WiMAX [22]. Σε μια τοπολογία οι δυο τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιούνται είτε ως συμπληρωματικές είτε ως εναλλακτικές, εξυπηρετώντας διαφορετικούς σκοπούς στην κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις τοπολογίες πάνω στις οποίες βασίζονται τα μοντέλα προς προσομοίωση στην παρούσα διπλωματική:

3.2.1 Το WiMAX ως backhaul για δίκτυο BPL

Σε κάθε περίπτωση, το δίκτυο BPL αποτελείται από μονάδες BPL τοποθετημένες κατά μήκος μιας γραμμής Μ.Τ. . Κάθε μονάδα BPL είναι υπεύθυνη για μια κυψέλη αποτελούμενη από έναν περιορισμένο αριθμό τελικών χρηστών. Η κίνηση από τις γραμμές Μ.Τ. συγκεντρώνεται στον υποσταθμό Μ.Τ. όπου βρίσκεται ο συγκεντρωτής κίνησης BPL και στη συνέχεια μεταφέρεται στο δίκτυο κορμού. Το δίκτυο κορμού οφείλει να έχει υψηλή χωρητικότητα για να ανταπεξέλθει στο φορτίο που του ανατίθεται. Για το λόγο αυτό αποτελείται συνήθως από οπτικές ίνες. Η διασύνδεση του δικτύου κορμού με το δίκτυο των τελικών χρηστών πραγματοποιείται μέσω ενός ενδιάμεσου δικτύου που καλείται backhaul ή δίκτυο ενδιάμεσου μιλίου.

Λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας που διαθέτουν, οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δίκτυο ενδιάμεσου μιλίου. Αντ'αυτών, η διασύνδεση θα μπορούσε να γίνει με οπτικές ίνες. Το WiMAX προσφέρει μια οικονομικότερη και ταχύτερη ως προς την υλοποίηση της εναλλακτική στις οπτικές ίνες, αφού διαθέτει το απαιτούμενο εύρος ζώνης και, επιπλέον, δεν χρειάζεται εγκατάσταση υποδομής.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2.2.1, στην περίπτωση αυτή ο συγκεντρωτής κίνησης BPL συνδέεται με ένα κόμβο WiMAX ο οποίος μεταφέρει ασύρματα τη συγκεντρωμένη κίνηση σε ένα δεύτερο κόμβο WiMAX απευθείας συνδεδεμένο στο δίκτυο κορμού. Όταν η απόσταση που απαιτείται να καλύψει το δίκτυο ενδιάμεσου μιλίου είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα εμβέλειας του κόμβου WiMAX χρησιμοποιούνται ενδιάμεσοι κόμβοι WiMAX, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από την απόσταση που καλύπτεται. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι χρησιμοποιούνται ως επαναλήπτες.

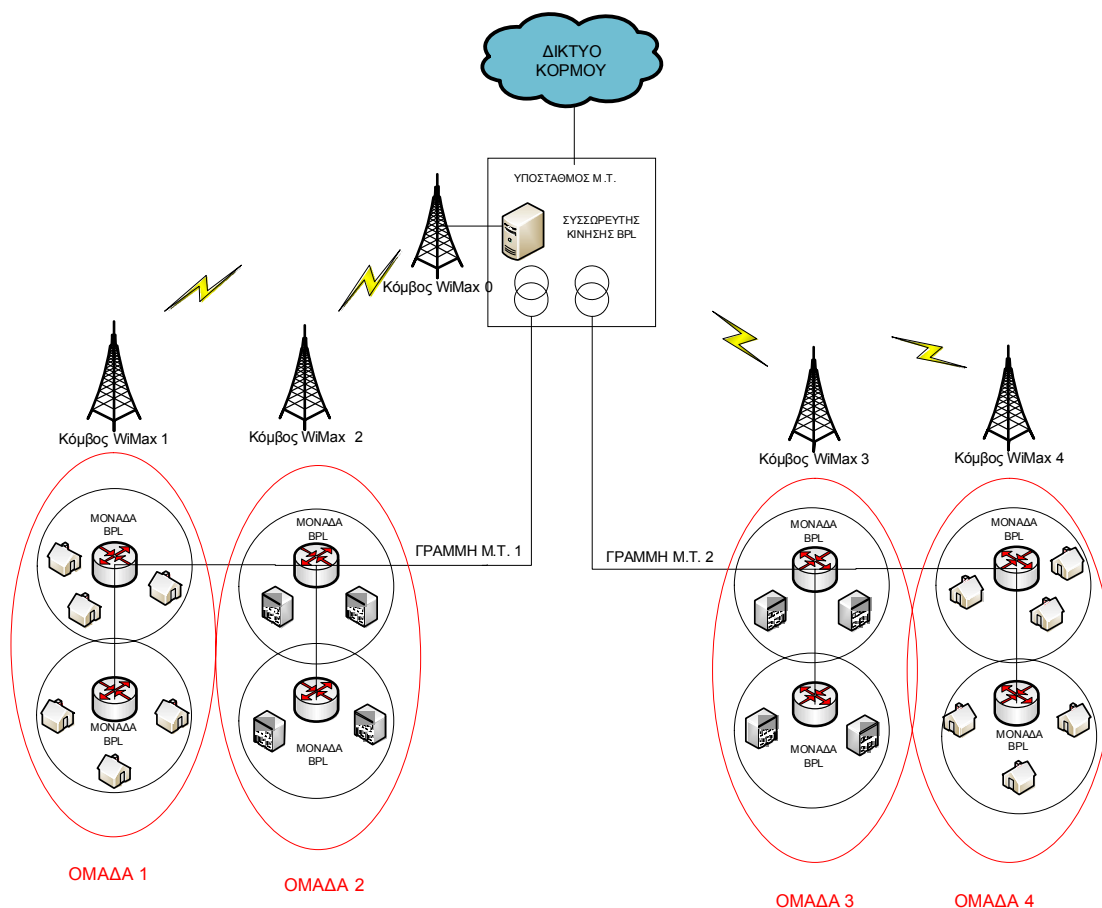


Σχήμα 3.2.1.1: Δίκτυο BPL με WiMAX να λειτουργεί ως backhaul

Αυτή η τοπολογία ενδείκνυται για απομακρυσμένες περιοχές οι οποίες δε διαθέτουν την υποδομή ενός δικτύου οπτικών ινών να αναλάβει το ρόλο του δικτύου ενδιάμεσου μιλίου.

3.2.2 Το WiMAX ως συσσωρευτής κίνησης για ομάδες BPL

Σε μια γραμμή Μ.Τ. που συγκεντρώνει την κίνηση από όλες τις κυψέλες που βρίσκονται κατά μήκος της εμφανίζεται συμφόρηση. Οι γραμμές Μ.Τ. αποτελούν στενωπό της επίδοσης του BPL δικτύου. Προς επίλυση αυτού του προβλήματος, οι κυψέλες μιας γραμμής Μ.Τ. χωρίζονται σε ομάδες (clusters). Κάθε ομάδα ανατίθεται σε ένα κόμβο WiMAX ο οποίος συγκεντρώνει την κίνηση IP που παράγεται από την ομάδα και πραγματοποιεί τη διασύνδεσή της με το δίκτυο κορμού (σχήμα 3.2.2.1). Σε αυτή την περίπτωση, κάθε κόμβος WiMAX αναλαμβάνει το ρόλο του backhaul δικτύου για την ομάδα του.

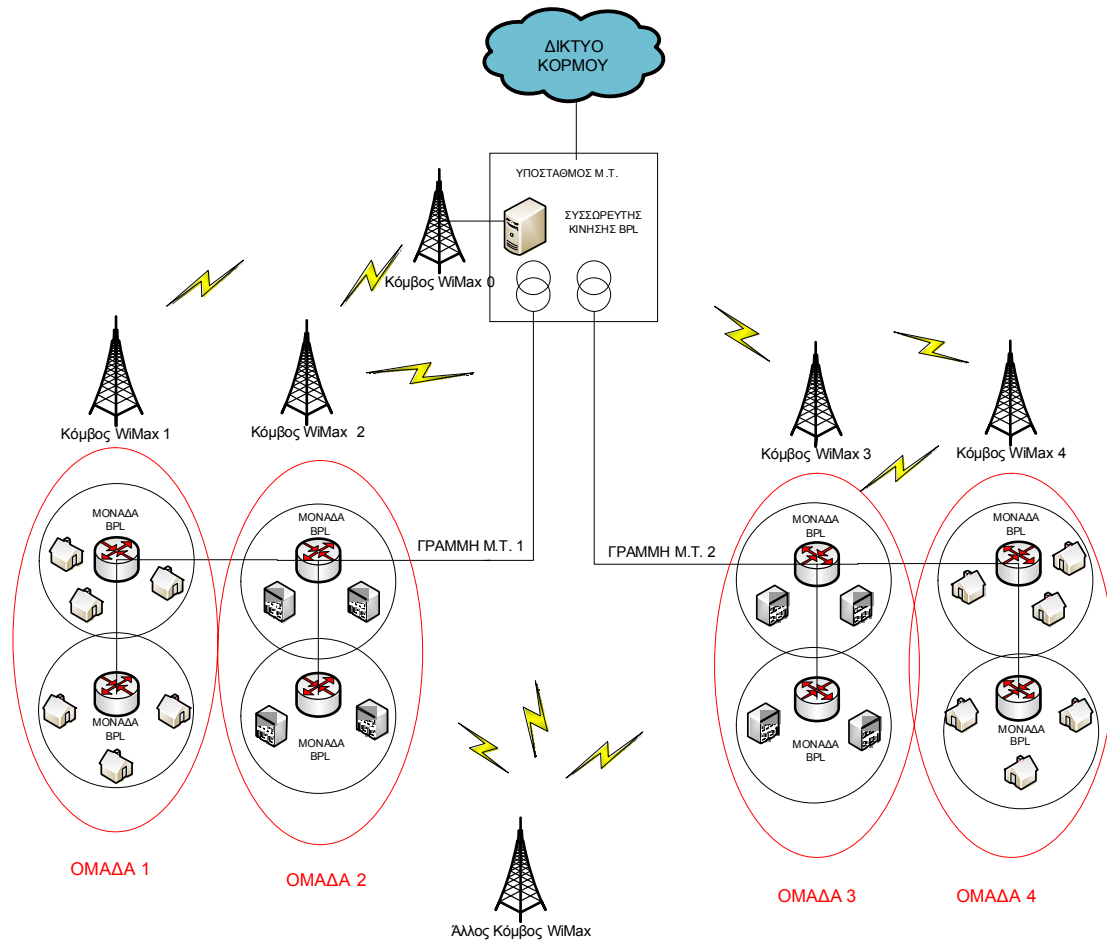


Σχήμα 3.2.2.1: Δίκτυο BPL με το WiMAX να δρα ως συσσωρευτής κίνησης

3.2.3 Το WiMAX ως διασύνδεση μεταξύ ομάδων BPL

Ακολουθείται πάλι η μέθοδος ομαδοποίησης των μονάδων BPL που περιγράφηκε προηγουμένως. Η διαφορά είναι ότι οι υπεύθυνοι για τις ομάδες BPL κόμβοι WiMAX διασυνδέονται μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα ασύρματο δίκτυο που υπερτίθεται του ενσύρματου (σχήμα 3.2.3.1). Αυτή η τοπολογία είναι η μόνη από τις τρεις στην οποία οι τεχνολογίες BPL- WiMAX χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά. Υπάρχουν δυο επιλογές, η κίνηση κυκλοφορεί είτε μέσω του ενσύρματου δικτύου BPL είτε μέσω του ασύρματου δικτύου WiMAX. Η επιλογή μεταξύ των δύο δικτύων μπορεί να γίνεται από το χρήστη ή αυτόματα από τους δρομολογητές, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση των δικτύων και τις απαιτήσεις του χρήστη.

Αυτή η τοπολογία αποτελεί ένα πλήρως υβριδικό, mesh δίκτυο το οποίο συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνολογιών και είναι κατάλληλο για να προσφέρει υπηρεσίες απαιτήσεων υψηλού ρυθμού μετάδοσης και χαμηλής καθυστέρησης σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.



Σχήμα 3.2.3.1: Δίκτυο BPL χωρισμένο σε ομάδες οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κόμβων WiMAX

3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Συμπερασματικά, τα δίκτυα επόμενης γενιάς είναι μια ιδέα που φαίνεται ότι θα απασχολήσει έντονα το χώρο των τηλεπικοινωνιών στο εγγύς μέλλον καθώς προσφέρουν σταθερή και κινητή πρόσβαση σε ευρυζωνικές εφαρμογές σε όλα τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη της γης ανεξάρτητα του παρόχου. Ένα παράδειγμα δικτύου επόμενης γενιάς είναι το υβριδικό δίκτυο BPL-WiMAX. Οι δύο τεχνολογίες, συνδυαζόμενες σε διάφορες τοπολογίες, αλληλοεξουδετερώνουν ορισμένα από τα μειονεκτήματά τους και προσφέρουν βέλτιστες συνθήκες ευρυζωνικής πρόσβασης ακόμα και σε απομακρυσμένες περιοχές μέσω της ήδη υπάρχουσας υποδομής του ηλεκτρικού δικτύου διανομής και της εύκολα εφαρμόσιμης ασύρματης τεχνολογίας WiMAX.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

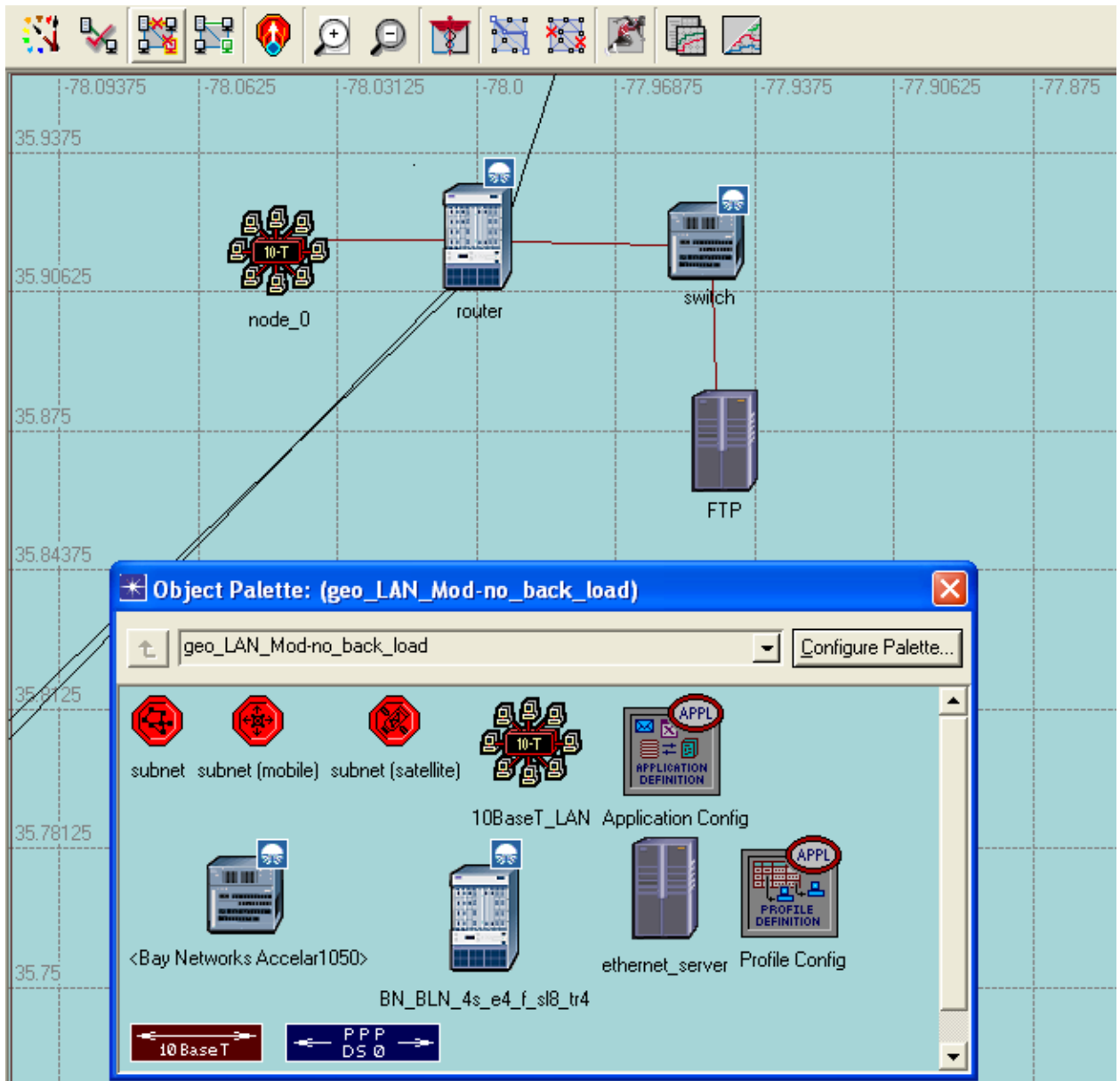
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ OPNET

Το πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι το OPNET 10.5. Με το OPNET μπορεί να προσομοιωθεί οποιοδήποτε δίκτυο αφού, εκτός της μεγάλης ποικιλίας γνωστών τεχνολογιών που διαθέτει το πρόγραμμα υλοποιημένες, παρέχεται στο χρήστη η ελευθερία να δημιουργήσει κάποια άλλη τεχνολογία από το μηδέν. Βεβαίως, για να είναι δυνατή η δημιουργία νέας τεχνολογίας ο χρήστης απαιτείται να είναι άριστα εξοικειωμένος με το πρόγραμμα καθώς αυτό περιέχει ένα πολύ μεγάλο αριθμό επιλογών.

Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι χωρισμένο σε επίπεδα. Αν υποτεθεί μια ιεραρχία για τα επίπεδα χρήσης του OPNET, αυτή έχει την ακόλουθη μορφή. Στις υψηλότερες θέσεις της ιεραρχίας το περιβάλλον είναι φιλικότερο στο χρήστη ενώ στα κατώτερα επίπεδα απαιτούνται γνώσεις προγραμματισμού σε γλώσσα C.

1. **Δημιουργία δικτύου:** Σε αυτό το επίπεδο υπάρχει η επιφάνεια εργασίας η οποία αναπαριστά το χώρο όπου θα στηθεί το δίκτυο. Το μέγεθός της μπορεί να είναι από ένα τμήμα του παγκόσμιου χάρτη έως ένας χώρος γραφείου. Τα αντικείμενα που θα αποτελέσουν το δίκτυο προστίθενται στο χώρο μέσω της αντίστοιχης παλέτας (ένα παράδειγμα παλέτας φαίνεται στο σχήμα 4.1.1). Σε κάθε υλοποιημένη τεχνολογία του προγράμματος αντιστοιχεί μια παλέτα, η οποία περιέχει τα αντικείμενα που απαρτίζουν τη συγκεκριμένη τεχνολογία, όπως δρομολογητές, γέφυρες, σταθμούς εργασίας, ζεύξεις κ.ά. Κάθε αντικείμενο έχει ένα πλήθος επιλογών διαθέσιμες στο χρήστη που καθορίζουν τη λειτουργία του.
2. **Δημιουργία κόμβου:** Ο χρήστης έχει πρόσβαση σε κάθε αντικείμενο που χρησιμοποιείται στην επιφάνεια εργασίας με ένα διπλο κλικ επάνω του. Τότε ανοίγει ο Node Editor στον οποίο εμφανίζονται τα πρωτόκολλα που διέπουν το συγκεκριμένο αντικείμενο (σχήμα 4.1.2). Κάθε πρωτόκολλο παριστάνεται από ένα τετράγωνο. Υπάρχουν διάφορα είδη τετραγώνων με διαφορετικές

λειτουργίες. Τα τετράγωνα συνδέονται μεταξύ τους με γραμμές οι οποίες υποδηλώνουν τη μεταξύ τους σχέση.

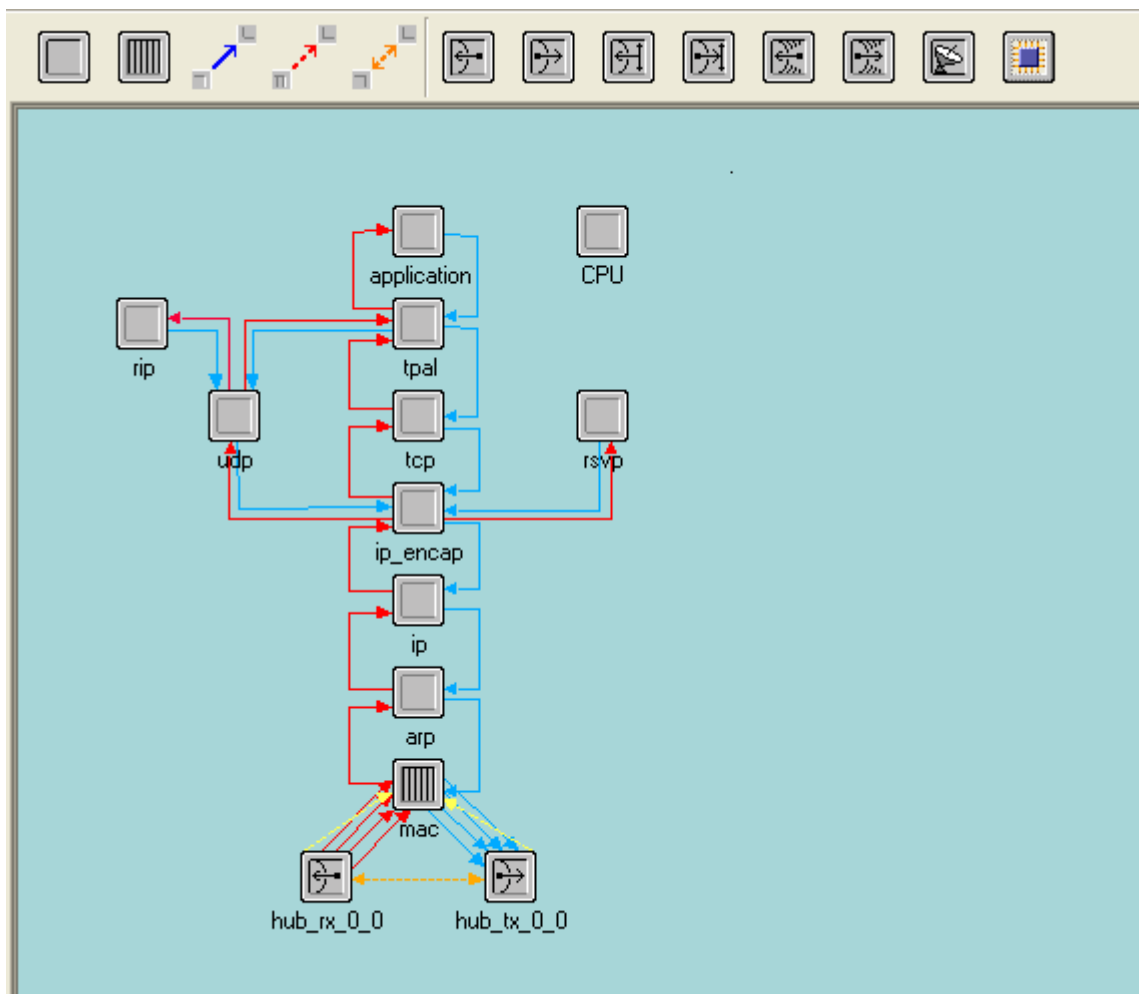


Σχήμα 4.1.1: Ένα δείγμα δικτύου στην επιφάνεια εργασίας και η αντίστοιχη παλέτα

3. **Δημιουργία διαδικασίας:** Τα πρωτόκολλα αποτελούνται από διαδικασίες. Με διπλό κλικ στο τετράγωνο του επιθυμητού πρωτοκόλλου ο χρήστης αποκτά πρόσβαση στις διαδικασίες που το αποτελούν (σχήμα 4.1.3). Οι διαδικασίες ακολουθούν μια λογική σειρά η οποία απεικονίζεται σε μορφή block διαγράμματος. Διάφορα γεγονότα κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης (π.χ. η έλευση ενός πακέτου) ωθούν το μοντέλο να μεταβαίνει από μια κατάσταση σε άλλη. Τους κανόνες με τους οποίους γίνονται οι μεταβάσεις και

το τι συμβαίνει σε κάθε κατάσταση τα ορίζει ο χρήστης με κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού C.

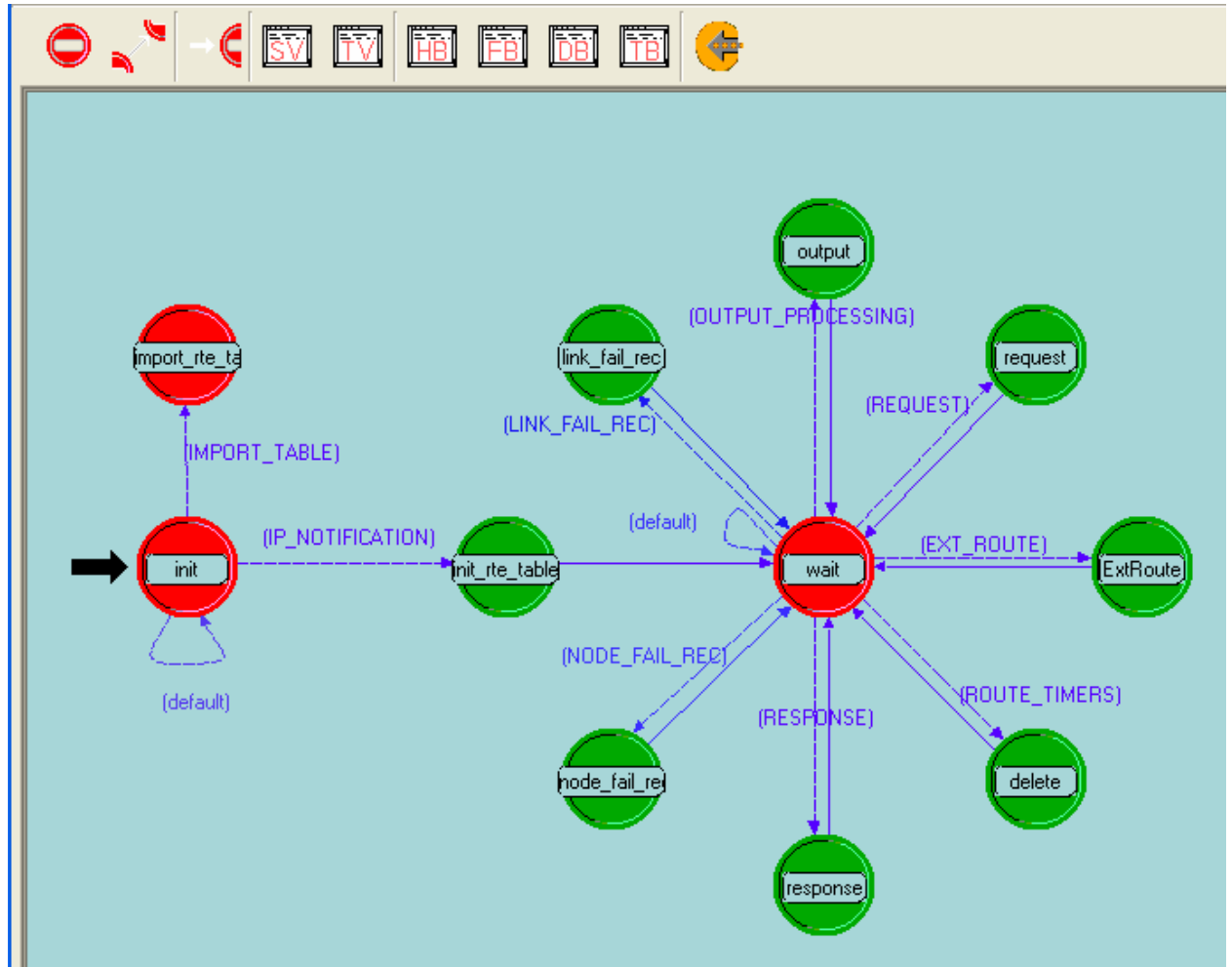
4. **Πηγαίος κώδικας:** Στο χαμηλότερο επίπεδο δημιουργίας ενός δικτύου ορίζονται οι συναρτήσεις που εκτελούνται σε κάθε κατάσταση. Στα ήδη υλοποιημένα μοντέλα όλα τα προηγούμενα καθώς και οι κώδικες είναι έτοιμοι. Ειδικά οι κώδικες περιέχουν εκτενή σχόλια προς κατανόηση τους από το χρήστη (σχήμα 4.1.4).



Σχήμα 4.1.2: Node Editor ενός αντικειμένου

Γίνεται φανερή από την παραπάνω σύντομη περιγραφή η τεράστια ελευθερία που παρέχεται στο χρήστη να τροποποιήσει τα έτοιμα μοντέλα όπως επιθυμεί, ακόμα και στο χαμηλότερο επίπεδό τους. Για όλα τα παραπάνω προσφέρονται λεπτομερέστετες οδηγίες στη «Βοήθεια» του προγράμματος, οι οποίες αν μελετηθούν διεξοδικά μπορούν να δώσουν τη δυνατότητα σε έναν αρχάριο

χρήστη να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε επιθυμία του όσον αφορά στην προσομοίωση.



Σχήμα 4.1.3: Process Editor

```

File Edit Options
1  /* Transition Executives */
2
3  static void
4  ip_dispatch_do_init (void)
5  {
6      int      scheme = 0;
7      int      status;
8      Objid   ip_proc_info_objid, compound_objid;
9      Objid   ip_multicast_info_objid;
10     Objid   ip_acl_config_objid;
11     Objid   ad_hoc_parms_id;
12     Objid   ad_hoc_parms_child_id;
13     Objid   compound_attr_objid;
14
15     FIN (ip_dispatch_do_init ());
16
17     /* Prepare the fake model state shared by the various children */
18     op_pro_modmem_install (&module_data);
19     module_data.igmp_attributes_ptr = (IpT_Igmp_Attributes *)OPC_NIL;
20     ip_rte_set_procs (&module_data, ip_dispatch_error, ip_dispatch_warn);
21
22     /* Initialize the default routes (v4 and v6) to invalid. */
23     module_data.default_route_addr_array [InetC_Addr_Family_v4] = INETC_AD
24     module_data.default_route_addr_array [InetC_Addr_Family_v6] = INETC_AD
25     module_data.default_route_intf_index_array [InetC_Addr_Family_v4] = IP
26     module_data.default_route_intf_index_array [InetC_Addr_Family_v6] = IP
27
28     /* Initialize the IP address package. */
29     ip_address_pkg_init ();
30
31     /* Initialize the IP datagram package. */
32     ip_dgram_package_init ();
33
34     /* Initialize important state variables for this process. */
35     ip_dispatch_sv_init ();
36
37     /* Initialize the global address table. */
38     ip_rtab_init ();
39
40     /* Initialize statistic handles to be used for collecting IP */
41     /* layer statistics. */
42     ip_rte_stathandle_init ();
43
44     /* Initialize the Sim. Log notification handles that will be */
45     /* used in this process model. This initialization is done via */
46     /* an external C file. */
47     ip_notif_log_handles_init ();
48
49     /* The interface table pointer is made available to other */
50     /* processes by registering it in the model-wide registry. */
51     /* Allocate memory for the data structure used to store this */
52     /* information and set the interface table information. */
53     ip_info_ptr = (IpT_Info *) op_prg_mem_alloc (sizeof (IpT_Info));
54     ip_info_ptr->ip_iface_table_ptr = module_data.interface_table_ptr;
55

```

Σχήμα 4.1.4: Δείγμα κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού C που περιγράφει μια διαδικασία

4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ

Ο σκοπός της προσομοίωσης της παρούσας διπλωματικής είναι η σύγκριση της επίδοσης τριών διαφορετικών τοπολογιών ενός υβριδικού δικτύου BPL-WiMAX. Η τεχνολογία BPL δεν είναι υλοποιημένη στο OPNET καθώς είναι σχετικά πρόσφατη και δεν έχει προτυποποιηθεί ακόμα. Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία WiMAX, η οποία προτυποποιήθηκε το 2006, έχει υλοποιηθεί σε OPNET αλλά διατίθεται σε

ξεχωριστό, εξαιρετικά ακριβό πακέτο στην αγορά γεγονός που το κάνει δυσεύρετο. Η έκδοση του OPNET που χρησιμοποιήθηκε δεν περιείχε το πακέτο για το WiMAX και η εύρεσή του δεν έγινε δυνατή παρά τις προσπάθειες που έγιναν.

Δεδομένης της δυσκολίας και πολυπλοκότητας που θα παρουσίαζε, η υλοποίηση των τεχνολογιών BPL-WiMAX στο OPNET από το μηδέν θεωρήθηκε ότι υπερβαίνει τα όρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αντ' αυτών, χρησιμοποιήθηκαν τεχνολογίες ήδη υλοποιημένες στο πρόγραμμα οι οποίες με τις κατάλληλες τροποποιήσεις θεωρείται ότι προσομοιώνουν τις επιθυμητές μη διαθέσιμες τεχνολογίες.

Για το ενσύρματο BPL κομμάτι του υβριδικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε ως βάση η ενσύρματη σύνδεση ethernet 1000BaseT. Το χαρακτηριστικό που τροποποιήθηκε στη σύνδεση αυτή ώστε να προσομοιώνει το BPL είναι η ιδιότητα «ber», η οποία στο πρόγραμμα ορίζεται ως η πιθανότητα εσφαλμένων bits σε ένα πακέτο που αποστέλλεται σε μια σύνδεση σημείο προς σημείο.

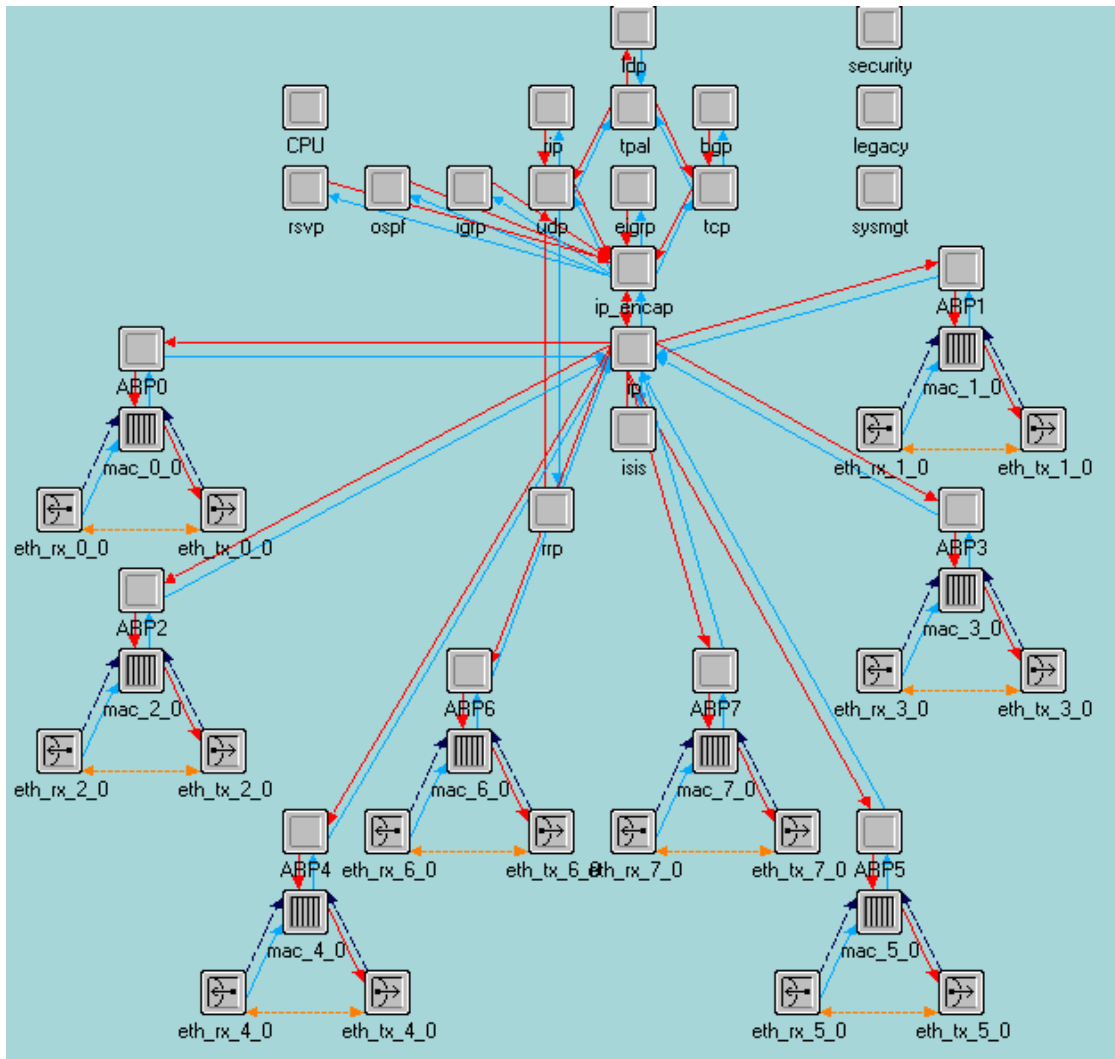
Για την προσομοίωση της τεχνολογίας WiMAX χρησιμοποιήθηκε ως βάση η υλοποιημένη τεχνολογία Wi-fi. Όσον αφορά το φυσικό στρώμα της τεχνολογίας επιλέχθηκε να γίνεται χρήση διαμόρφωσης OFDM, όπως ορίζουν οι κανονισμοί για το φυσικό στρώμα στα πρότυπα της οικογένειας 802.16.

4.2.1 Σχεδιασμός τοπολογιών

Το πρώτο βήμα της προσομοίωσης ήταν να σχεδιαστούν οι τοπολογίες. Οι κόμβοι που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι συμβατοί μεταξύ τους και να μπορούν να επικοινωνούν. Μη συμβατοί είναι οι κόμβοι οι οποίοι δεν υποστηρίζουν ίδιες τεχνολογίες οπότε δεν μπορούν να συνδεθούν και να επικοινωνήσουν. Σε περιπτώσεις όπου δεν υπήρχε κόμβος που να διαθέτει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ήταν δυνατή η υλοποίηση του μέσω της λειτουργίας “Node Creator” που διαθέτει το OPNET. Για τις απαιτήσεις όλων των προσομοιώσεων δημιουργήθηκε ένας δρομολογητής με 8 ενσύρματες διεπαφές, το μοντέλο του οποίου φαίνεται στο σχήμα 4.2.1.

Οι τρεις τοπολογίες διαφέρουν ως προς την αρχιτεκτονική αλλά διαθέτουν και κοινά στοιχεία για να είναι δυνατή η σύγκριση τους ως προς την επίδοση. Πρώτον, επιλέχθηκε να προσομοιωθεί μόνο το τμήμα του δικτύου που μεσολαβεί μεταξύ

συγκεντρωτή κίνησης και των τελικών χρηστών και όχι η σύνδεση τους με το δίκτυο κορμού.



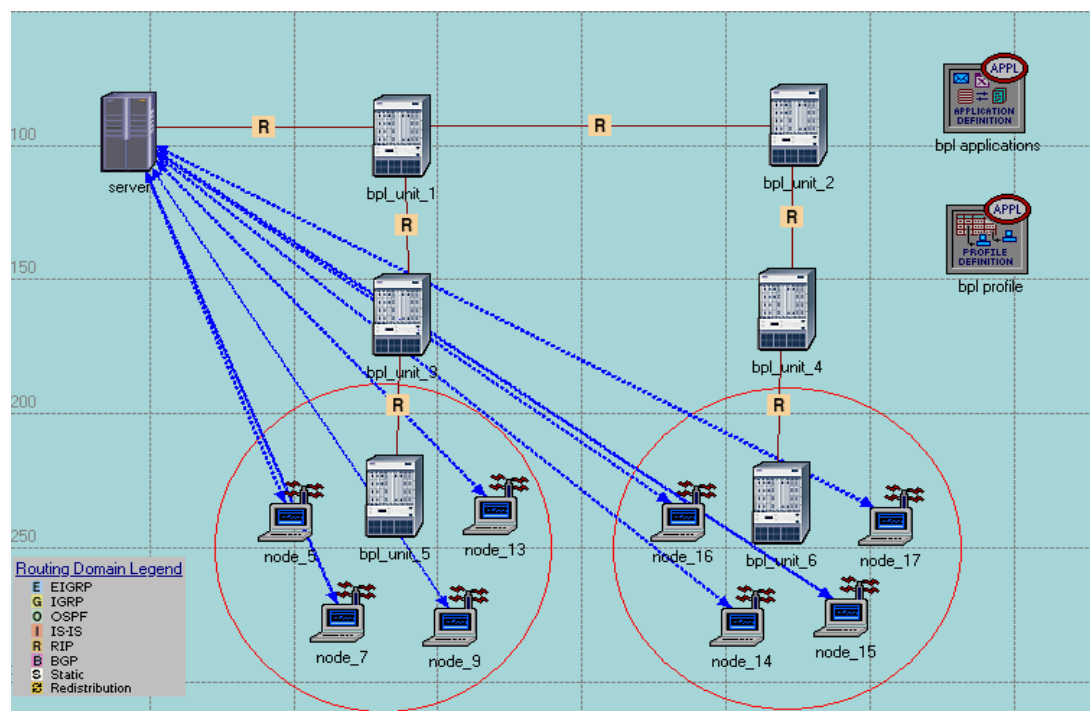
Σχήμα 4.2.1: Μοντέλο δρομολογητή με 8 ενσύρματες διεπαφές

Οι συσσωρευτές κίνησης αντιστοιχούν στην προσομοίωση με εξυπηρετητές και οι τελικοί χρήστες με σταθμούς εργασίας. Ως μονάδες BPL έχουν χρησιμοποιηθεί δρομολογητές των οποίων οι διεπαφές εξαρτώνται από την τοπολογία. Δεύτερον, η πρόσβαση των τελικών χρηστών στο ενσύρματο δίκτυο επιλέχθηκε να γίνεται ασύρματα σε όλες τις τοπολογίες και όχι ενσύρματα μέσω BPL modems. Οι κόμβοι που επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα είναι σημειωμένοι μέσα σε κόκκινους κύκλους. Τρίτο κοινό στοιχείο είναι ότι σε όλες τις τοπολογίες έχει εφαρμοστεί πρωτόκολλο δρομολόγησης RIP. Η σύγκριση της επίδοσης του δικτύου με διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν απασχόλησε την παρούσα διπλωματική. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο για να διευκολύνεται η

δρομολόγηση του φορτίου από τους κόμβους και αυτό είναι κοινό σε όλες τις τοπολογίες για να μην αλλοιωθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων λόγω επιλογής διαφορετικού πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Τέλος, στην προσπάθεια να μην υπάρχουν μεγάλες διαφορές στο μέγεθος των τοπολογιών για να είναι συγκρίσιμα τα φορτία που διακινούνται, προσομοιώθηκαν σε κάθε τοπολογία δυο γραμμές Μ.Τ. οι οποίες καταλήγουν να εξυπηρετούν τέσσερις σταθμούς εργασίας η καθεμία. Ο αριθμός των σταθμών εργασίας επιλέχθηκε να είναι μικρός επειδή το εύρος ζώνης της ασύρματης σύνδεσης είναι δεδομένο και διαμοιράζεται στους σταθμούς. Συνεπώς, με μεγαλύτερο πλήθος σταθμών θα αντιστοιχούσε πολύ στενο εύρος ζώνης σε κάθε σταθμό και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων δε θα ήταν ο επιθυμητός.

4.2.1.1 Τοπολογία 1: Το WiMAX ως backhaul για δίκτυο BPL

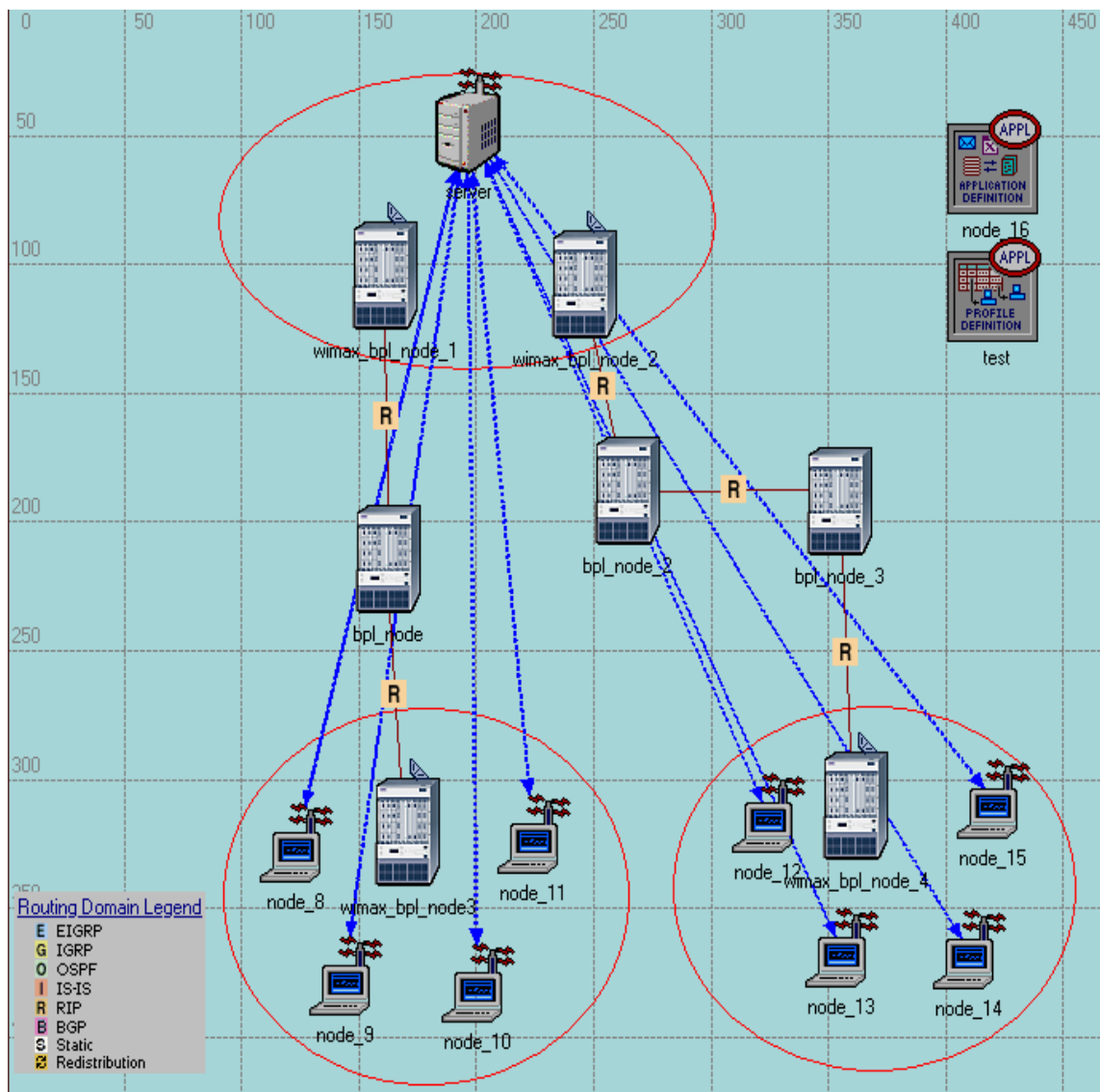
Η πρώτη τοπολογία που σχεδιάστηκε ήταν αυτή που χρησιμοποιεί το WiMAX ως backhaul για το δίκτυο BPL. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.1.1, η κίνηση ξεκινάει από τον εξυπηρετητή και μέσω δρομολογητών που διαθέτουν μόνο ενσύρματες διεπαφές καταλήγει στους τελικούς χρήστες ή ακολουθεί την αντίθετη πορεία. Οι δρομολογητές που συνδέονται με τους τελικούς χρήστες διαθέτουν μια ενσύρματη και μια ασύρματη διεπαφή.



Σχήμα 4.2.1.1: Προσομοίωση τοπολογίας «BPL με WiMAX backhaul» στο OPNET

4.2.1.2 Τοπολογία 2: Το WiMAX ως συγκεντρωτής κίνησης για ομάδες BPL

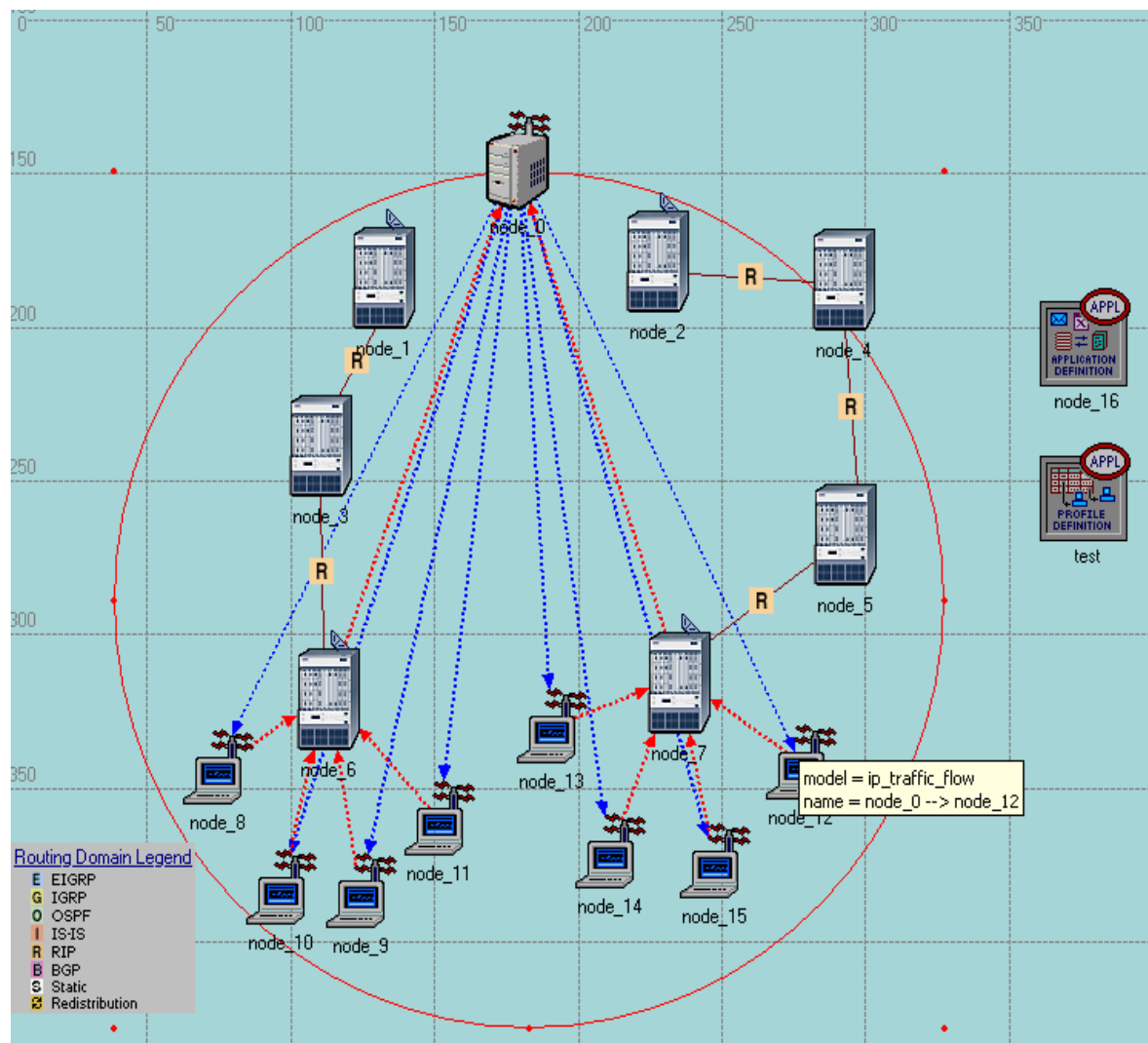
Στη δεύτερη τοπολογία η κίνηση απο τους σταθμούς εργασίας, που μεταφέρεται μέσω μιας γραμμής Μ.Τ. σε μονάδες BPL, συγκεντρώνεται σε ένα κόμβο BPL-WiMAX ο οποίος παίζει το ρόλο του συγκεντρωτή κίνησης για αυτή τη γραμμή (σχήμα 4.2.1.2). Αυτός μεταφέρει την κίνηση στον τελικό συγκεντρωτή κίνησης BPL ασύρματα. Οι δρομολογητές που συνδέονται με τους τελικούς χρήστες καθώς και οι συγκεντρωτές κίνησης για κάθε γραμμή διαθέτουν μια ενσύρματη και μια ασύρματη διεπαφή.



Σχήμα 4.2.1.2: Προσομοίωση τοπολογίας «BPL με WiMAX συγκεντρωτή» στο OPNET

4.2.1.3 Τοπολογία 3: Το WiMAX ως διασύνδεση μεταξύ ομάδων BPL

Η τρίτη τοπολογία είναι όμοια αρχιτεκτονικά με τη δεύτερη. Η μόνη διαφορά είναι ότι όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι μεταξύ σταθμών εργασίας και εξυπηρετητή διαθέτουν μια ασύρματη διεπαφή και 2 ενσύρματες διεπαφές. Όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι επικοινωνούν τόσο ενσύρματα όσο και ασύρματα μεταξύ τους και ασύρματα με τον εξυπηρετητή δημιουργώντας ένα mesh ασύρματο δίκτυο (σχήμα 4.2.1.3).



Σχήμα 4.2.1.3.1: Προσομοίωση τοπολογίας «BPL με WiMAX διασύνδεση» στο OPNET

4.2.2 Εφαρμογή κίνησης

Το OPNET προσφέρει ένα αριθμό επιλογών για την εφαρμογή κίνησης σε μια τοπολογία. Για παράδειγμα, μπορεί να επιλεγεί ο όγκος του φορτίου που διακινείται (σε bits/sec) σε μια ενσύρματη σύνδεση για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η

μέθοδος που κρίθηκε ότι δημιουργεί κίνηση κοντά στην πραγματικότητα είναι αυτή που δημιουργεί κίνηση κάνοντας χρήση εφαρμογών που διαθέτει το OPNET. Οι εφαρμογές που διατίθενται συνδυάζονται μέσα σε προφίλ κίνησης τα οποία, στη συνέχεια, εφαρμόζονται στους κόμβους της τοπολογίας που διαθέτουν αυτή την επιλογή. Στη δημιουργία του προφίλ, εκτός από το πλήθος και το είδος των εφαρμογών, επιλέγονται και άλλα χαρακτηριστικά της κίνησης που δημιουργείται, όπως η διάρκεια της κάθε εφαρμογής, ο χρόνος που αυτή θα ξεκινήσει μέσα στην προσομοίωση και η επαναληπτικότητα της. Στο σχήμα 4.2.2 φαίνεται το παράθυρο με τις επιλογές του προφίλ που εφαρμόστηκε σε όλες τις προσομοιώσεις.

?	└ name	bpl prof
?	└ model	Profile Config
?	▣ Profile Configuration	(...)
?	└ rows	1
	▣ row 0	
?	└ Profile Name	bpl applic
?	▣ Applications	(...)
?	└ rows	4
	▣ row 0	
?	└ Name	File Transfer (Light)
?	└ Start Time Offset (seconds)	uniform (0, 300)
?	└ Duration (seconds)	End of Profile
?	▣ Repeatability	(...)
?	└ Inter-repetition Time (sec...	exponential (300)
?	└ Number of Repetitions	Unlimited
?	└ Repetition Pattern	Serial
	▣ row 1	Video Conferencing (Heavy),uniform (0, ...
	▣ row 2	Voice over IP Call (GSM Quality),uniform...
	▣ row 3	Web Browsing (Light HTTP1.1),uniform (...)
?	└ Operation Mode	Simultaneous
?	└ Start Time (seconds)	uniform (100, 110)
?	└ Duration (seconds)	End of Simulation
?	▣ Repeatability	(...)
?	└ Inter-repetition Time (seconds)	constant (300)
?	└ Number of Repetitions	constant (0)
?	└ Repetition Pattern	Serial

Σχήμα 4.2.2 Παράθυρο επιλογών του προφίλ κίνησης που εφαρμόστηκε στις προσομοιώσεις

Η επιλογή των εφαρμογών έγινε με βάση τις υπηρεσίες που είναι επιθυμητό να υποστηρίζει το υβριδικό δίκτυο BPL-WiMAX. Κάθε υπηρεσία αντιστοιχίστηκε στην εφαρμογή που την περιγράφει καλύτερα από αυτές που διαθέτει το OPNET. Η αντιστοιχία παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2.2.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΣΤΟ ΟΡNET
Απλή επικοινωνία	Αποστολή μηνυμάτων πολυμέσων	File transfer (light)
Παρακολούθηση χώρου	Εικόνα υψηλής ποιότητας	Video Conference (high)
IPTV	Διαδραστικά μέσα ιδιαίτερα υψηλής ποιότητας	Video Conference (light)
VoIP	Ηλεκτρονική τηλεφωνία	VoIP (GSM quality)
Ευρυζωνική πρόσβαση	Φυλλομέτρηση	Web browsing (light HTTP 1.0)

Πίνακας 4.2.2: Η αντιστοιχία μεταξύ υπηρεσιών που προσφέρονται από το δίκτυο και των εφαρμογών που παρέχει το ΟΡNET

4.2.3 Επιλογή στατιστικών

Όταν έχει ολοκληρωθεί η δημιουργία του δικτύου απομένει η επιλογή των στατιστικών που θα συλλεγούν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και η προσομοίωση είναι έτοιμη να πραγματοποιηθεί. Τα στατιστικά που επιλέχθηκαν για τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- **Ethernet delay (sec):** Η καθυστέρηση από άκρη σε άκρη όλων των πακέτων Ethernet που λήφθηκαν από όλους τους σταθμούς.
- **IP traffic received (packets/sec):** Ο συνολικός αριθμός των δεδομενογραμμμάτων ευρεκπομπής, πολυεκπομπής και unicast που λήφθηκαν από ένα κόμβο από όλες τις διεπαφές IP ανά δευτερόλεπτο.
- **IP traffic sent (packets/sec):** Ο συνολικός αριθμός των δεδομενογραμμμάτων ευρεκπομπής, πολυεκπομπής και unicast που στάλθηκαν από ένα κόμβο από όλες τις διεπαφές IP ανά δευτερόλεπτο.
- **IP traffic dropped (packets/sec) :** Ο αριθμός των δεδομενογραμμμάτων IP που χάθηκαν από όλους τους κόμβους IP ανά δευτερόλεπτο. Οι λόγοι για να

χαθεί ένα δεδομένογραμμα είναι έλλειψη χώρου στον προσωρινό καταχωρητή του κεντρικού επεξεργαστή ή του επεξεργαστή μιας χρονοθυρίδας, υπέρβαση του μέγιστου αριθμού hops, μη εύρεση διαδρομής προς τον προορισμό από τον πίνακα δρομολόγησης κόμβου που υποστηρίζει πρωτόκολλο δρομολόγησης.

- **TCP delay (sec):** Η καθυστέρηση των πακέτων που λήφθηκαν από τα στρώματα TCP σε ολόκληρο το δίκτυο για όλες τις συνδέσεις. Η μέτρηση της αρχίζει τη στιγμή της αποστολής του πακέτου από την πηγή του TCP στρώματος και ολοκληρώνεται τη στιγμή που αυτό λαμβάνεται από τον προορισμό στο TCP στρώμα.
- **TCP retransmission count:** Ο συνολικός αριθμός επαναμεταδόσεων TCP στο δίκτυο. Εμφανίζεται όταν δεδομένα επαναμεταδίδονται από τον ενταμιευτή TCP.
- **Wireless LAN Data dropped (bits/sec):** Το συνολικό μέγεθος των πακέτων δεδομένων υψηλότερου στρώματος που χάθηκαν από το στρώμα MAC όλων των ασυρμάτων κόμβων του δικτύου λόγω υπερχείλισης του προσωρινού ενταμιευτή υψηλού επιπέδου ή αποτυχίας επαναμετάδοσής τους μέσα στο προβλεπόμενο χρονικό όριο.
- **Wireless LAN delay (sec):** Η καθυστέρηση από άκρη σε άκρη όλων των πακέτων που λήφθηκαν και προωθήθηκαν σε υψηλότερα επίπεδα από το στρώμα MAC όλων των ασυρμάτων κόμβων του δικτύου.
- **Wireless LAN throughput (bits/sec):** Ο συνολικός αριθμός bits που προωθήθηκαν από το στρώμα MAC όλων των ασυρμάτων κόμβων του δικτύου σε υψηλότερα επίπεδα προς τον απαιτηθέντα χρόνο.

4.2.4 ΤΕΛΙΚΕΣ ΕΠΙΛΟΓΕΣ

Ο τελικός σκοπός των προσομοιώσεων είναι να γίνει σύγκριση ως προς την επίδοση του δικτύου με σταθερά κάποια χαρακτηριστικά. Τα σενάρια που δημιουργήθηκαν και για τα οποία συλλέχθηκαν τα στατιστικά μετά από προσομοίωση είναι εννιά. Για κάθε μια από τις τρεις τοπολογίες προσομοιώθηκαν τρία σενάρια με διαφορετικές τιμές της μεταβλητής «ber» της ενσύρματης σύνδεσης, που αναφέρεται παραπάνω. Οι

τιμές της μεταβλητής «ber» που χρησιμοποιήθηκαν είναι 0.000001, 0.0001 και 0.01. Η διαφορά στις τιμές της πιθανότητας εσφαλμένων bits μεταφράζεται σε διαφορετική ποιότητα καναλιού. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες καναλιών όσον αφορά στην ποιότητα τους [24].

- **Κανάλι LOS:** Αναπαριστά την από άκρη σε άκρη μετάδοση όταν δεν υπάρχουν διακλαδώσεις στην τοπολογία της γραμμής. Πρόκειται για το καλύτερο σενάριο μετάδοσης μέσω γραμμής M.T. / BPL. Αντιστοιχεί στις συνθήκες οπτικής επαφής που συναντώνται στις ασύρματες επικοινωνίες.
- **Καλό κανάλι:** Αναπαριστά γραμμή με μικρό αριθμό διακλαδώσεων και μεγάλο ηλεκτρικό μήκος αυτών.
- **Κακό κανάλι:** Αναπαριστά γραμμή με μεγάλο αριθμό διακλαδώσεων και μικρό ηλεκτρικό μήκος αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 9 προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Η σύγκριση μεταξύ τους γίνεται σε δυο μέρη. Πρώτα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα κάθε τοπολογίας με χρήση των τριών διαφορετικών διαύλων και στη συνέχεια συγκρίνονται οι τρεις τοπολογίες μεταξύ τους με χρήση καλών διαύλων μόνο.

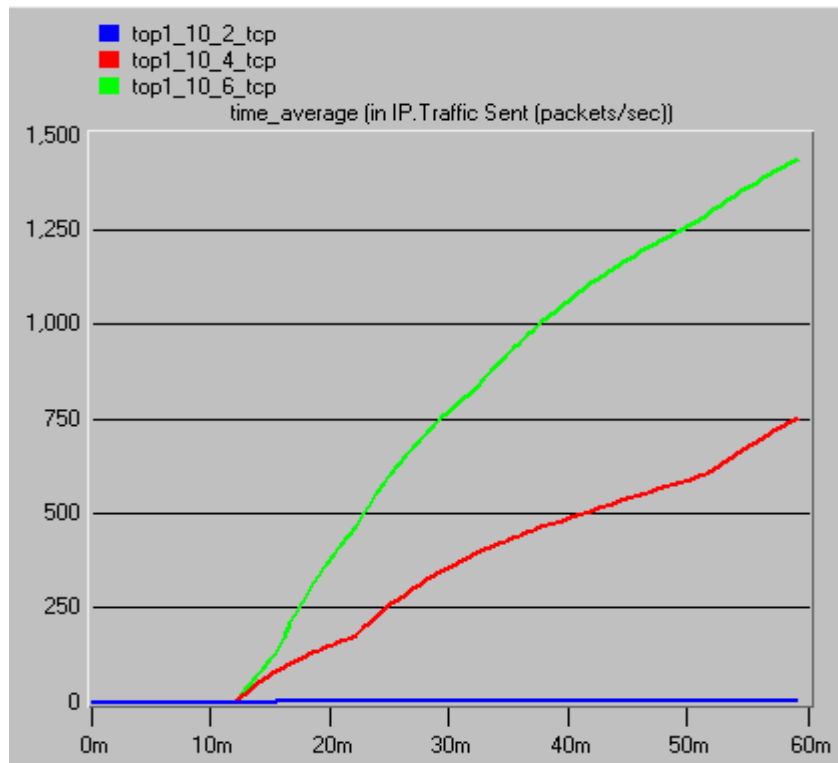
5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ

Ο σκοπός αυτής της ενότητας είναι να σχολιαστεί η επίδοση των τριών τύπων διαύλου BPL στην ίδια τοπολογία. Κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε διαφορετικές τιμές πιθανότητας εσφαλμένων bits. Η αντιστοίχιση καναλιών με πιθανότητα λάθους και χρώμα με το οποίο αναπαρίστανται στα διαγράμματα φαίνεται στον πίνακα 5.1.1.

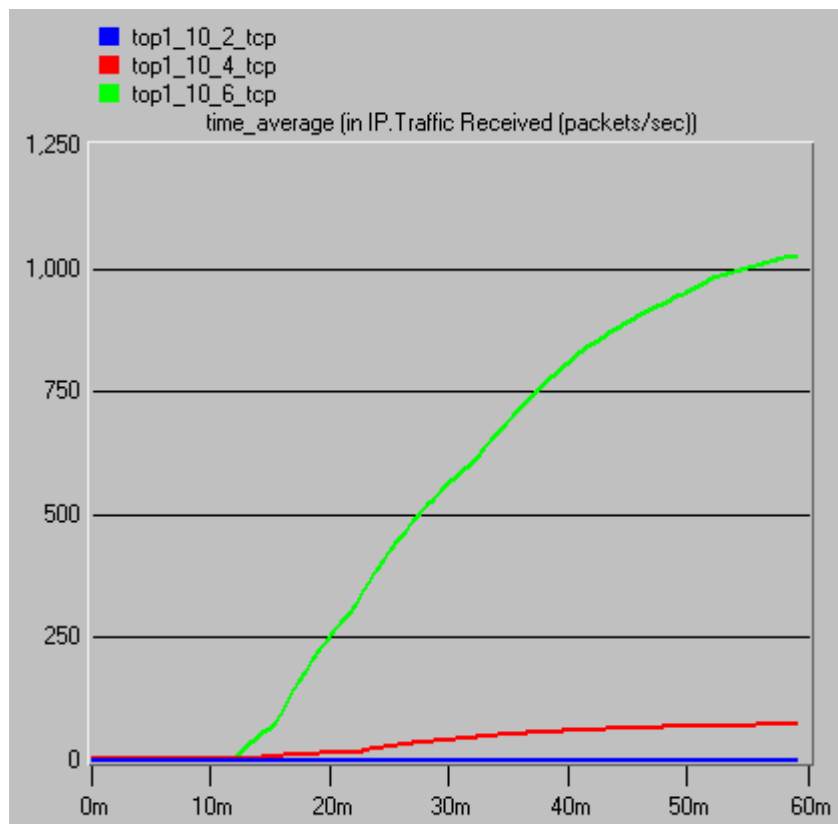
Τύπος διαύλου BPL	"BER"	ΧΡΩΜΑ
κακός	0.01	μπλε
καλός	0.0001	κόκκινο
LOS	0.000001	πράσινο

Πίνακας 5.1.1: Αντιστοίχιση διαύλων BPL με πιθανότητα λάθους και χρώμα με το οποίο αναπαρίστανται στα διαγράμματα

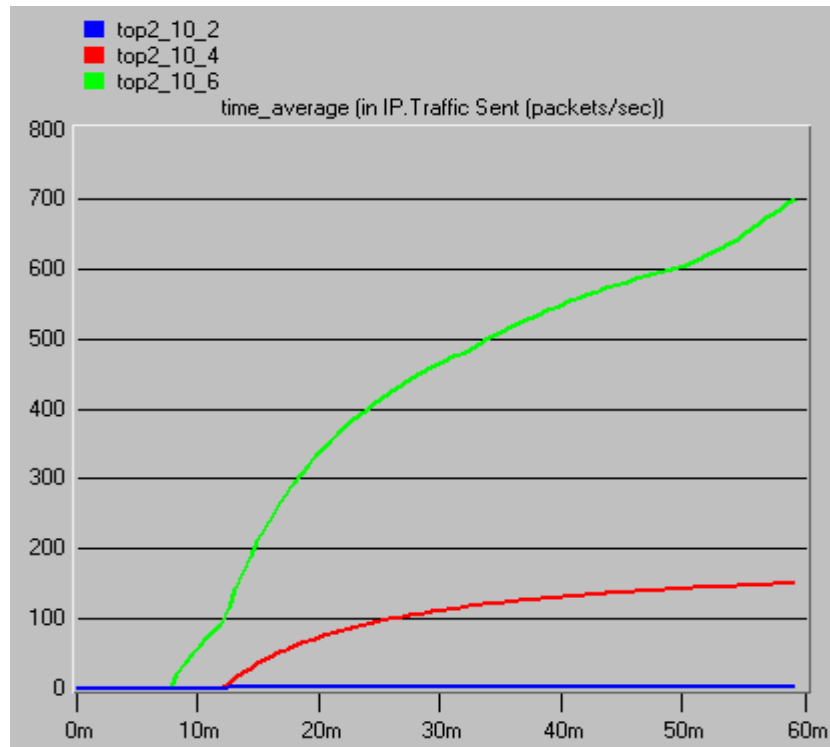
Οι πρώτες γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται δείχνουν τη συνολική κίνηση IP που κατευθύνεται από τον εξυπηρετητή προς όλους τους κόμβους, και το αντίστροφο, για τους τρεις τύπους διαύλου BPL. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται ο χρόνος της προσομοίωσης σε λεπτά (min). Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για χρόνο προσομοίωσης μίας ώρας. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται ο αριθμός πακέτων.



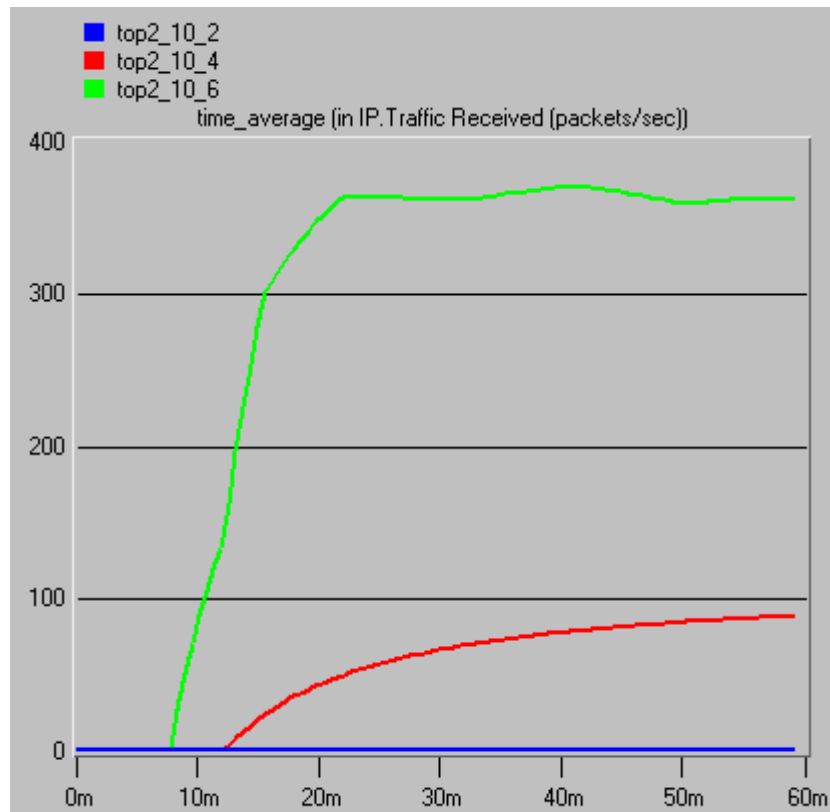
Σχήμα 5.1.1: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul»



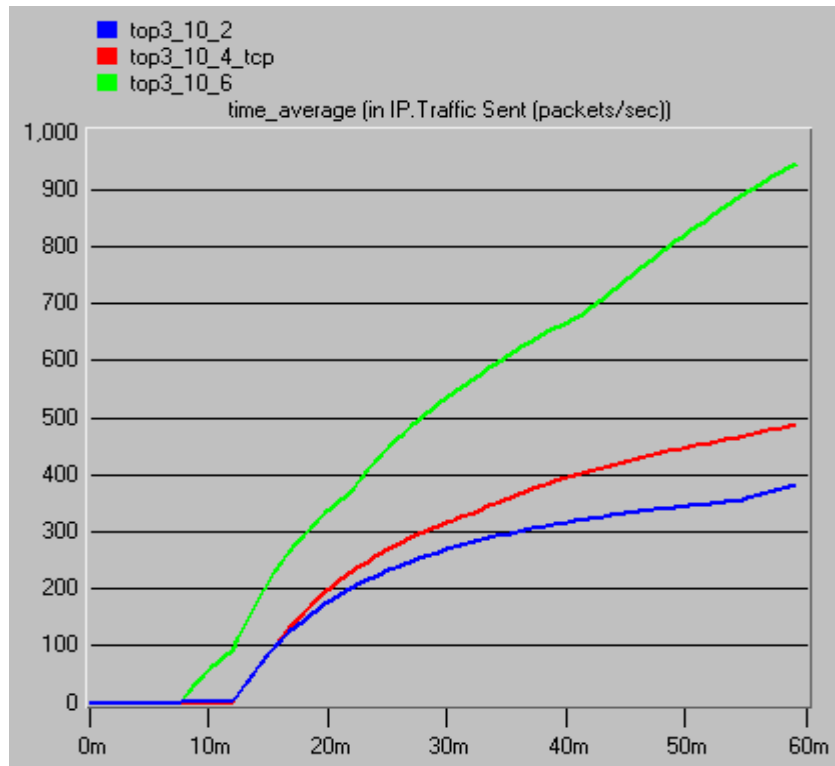
Σχήμα 5.1.2: Η κίνηση που έλαβε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul»



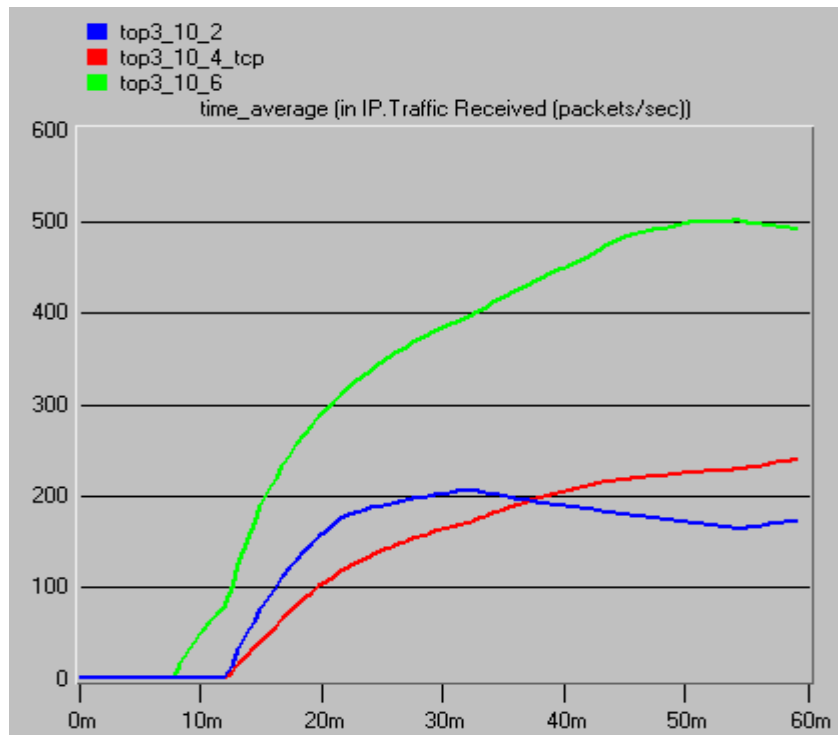
Σχήμα 5.1.3: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή»



Σχήμα 5.1.4: Η κίνηση που έλαβε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή»



Σχήμα 5.1.5: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση»

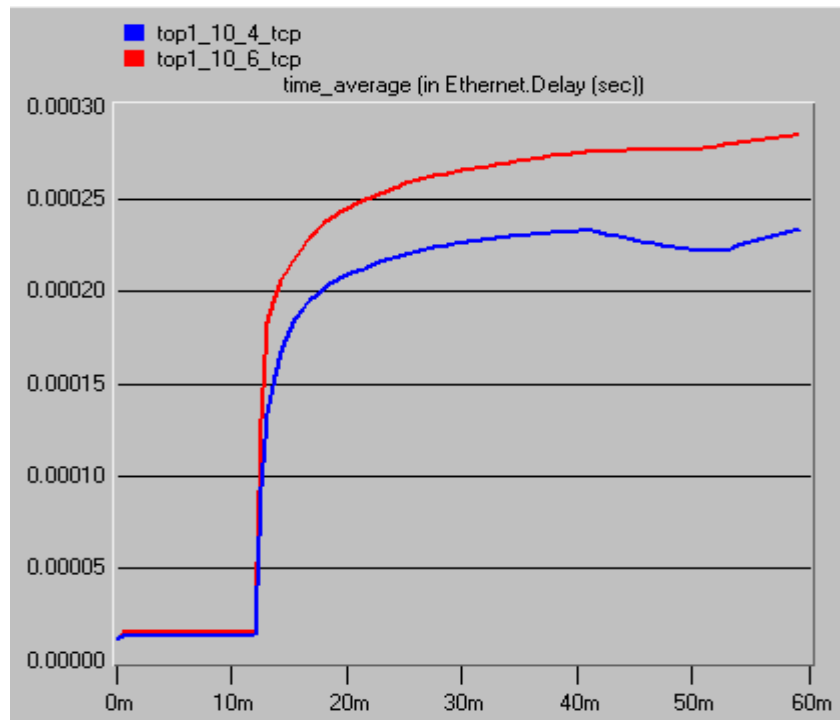


Σχήμα 5.1.6: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για την τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση»

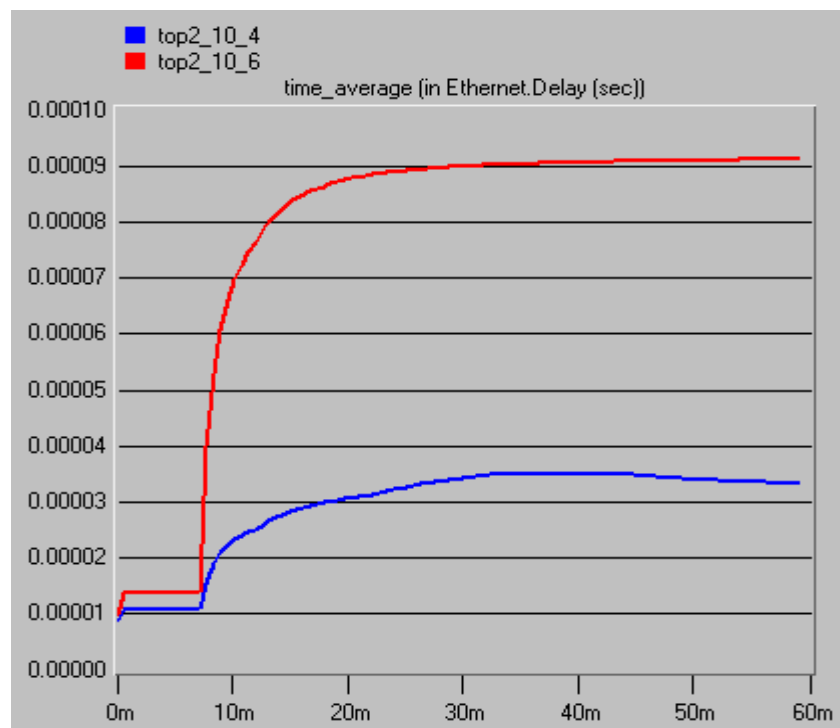
Γίνεται φανερό από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις ότι όσο μειώνεται η πιθανότητα λάθους τόσο αυξάνονται η αποστελλόμενη και η ληφθείσα κίνηση. Δεδομένης της σχέσης που έχει η πιθανότητα λάθους με την κίνηση που διακινείται αυτό είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα. Όσο χειροτερεύει η ποιότητα του διαύλου αυξάνονται τα λάθη που συμβαίνουν κατά τη μετάδοση και κατά συνέπεια αυξάνεται ο αριθμός των χαμένων πακέτων. Το αποτέλεσμα είναι μείωση του αριθμού των πακέτων που μεταδίδονται επιτυχώς, γεγονός που μεταφράζεται σε μείωση της συνολικής διακινούμενης κίνησης.

Παρατηρείται, επίσης, από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις ότι στις τοπολογίες «BPL με WiMAX backhaul» και «BPL με WiMAX συγκεντρωτή» η διακινούμενη κίνηση για κακό δίαυλο είναι μηδενική, ενώ στην τρίτη τοπολογία για τον ίδιο δίαυλο η κίνηση έχει ικανοποιητικές τιμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δυο πρώτες τοπολογίες βασίζονται στην ενσύρματη λύση, ενώ η τρίτη έχει και τη δυνατότητα μεταφοράς κίνησης με ασύρματο τρόπο. Σε περιπτώσεις, δηλαδή, που λόγω μεγάλης πιθανότητας λάθους η μεταφορά δεδομένων από το ενσύρματο μέσο είναι αδύνατη, η τρίτη τοπολογία προσφέρει την εναλλακτική λύση της πλήρους μεταφοράς της κίνησης από το ασύρματο μέσο. Οι δύο άλλες τοπολογίες δεν διαθέτουν εναλλακτικό τρόπο μετάδοσης οπότε αδυνατούν να μεταφέρουν οποιαδήποτε κίνηση.

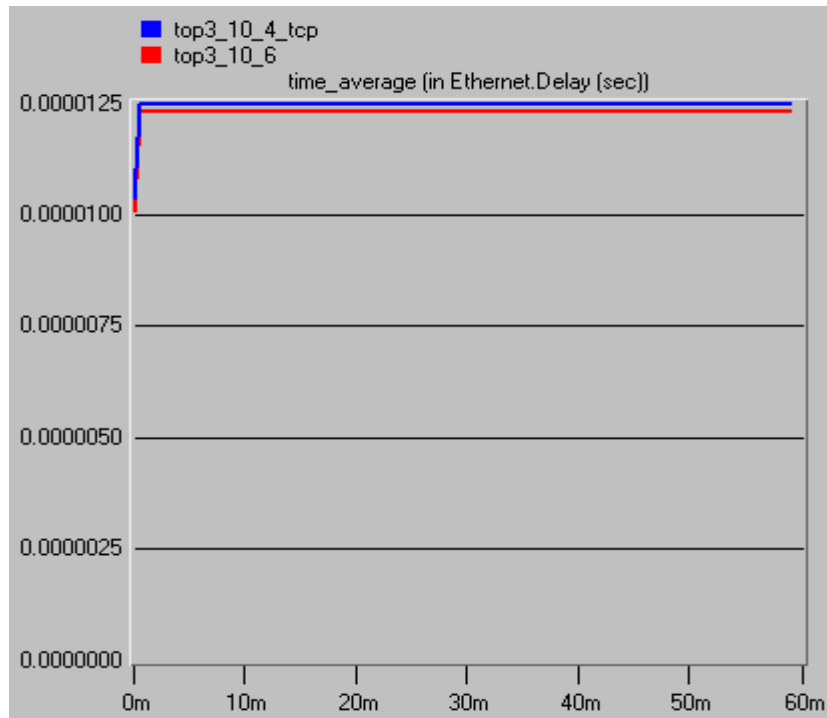
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν την καθυστέρηση που εισάγεται από το ενσύρματο μέσο. Στον κάθετο άξονα απεικονίζεται αυτή τη φορά ο χρόνος σε δευτερόλεπτα (sec).



Σχήμα 5.1.7: Η καθυστέρηση που εισάγει το ενσύρματο μέσο στην τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul»



Σχήμα 5.1.8: Η καθυστέρηση που εισάγει το ενσύρματο μέσο στην τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή»



Σχήμα 5.1.9: Η καθυστέρηση που εισάγει το ενσύρματο μέσο στην τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση»

Το πρόγραμμα δεν παρήγαγε καμπύλες για κακό δίαυλο. Αυτό στις πρώτες 2 τοπολογίες οφείλεται στο γεγονός ότι δεν διακινήθηκαν καθόλου πακέτα, για τα οποία να μπορεί να υπολογιστεί καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά, στην τρίτη τοπολογία τα πακέτα διακινήθηκαν από το ασύρματο μέσο, οπότε πάλι δεν υπήρχε καθυστέρηση να υπολογιστεί στο ενσύρματο μέσο.

Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι γενικά όσο αυξάνεται η πιθανότητα λάθους μειώνεται η καθυστέρηση. Αυτή η παρατήρηση φαίνεται να διαφέρει από το αναμενόμενο. Η εξήγηση αυτού βασίζεται στο ότι η καθυστέρηση που δείχνουν οι καμπύλες υπολογίζεται για το σύνολο των πακέτων που διακινήθηκαν. Οι καμπύλες, δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους γιατί αναφέρονται σε διαφορετικά φορτία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οπότε είναι αναμενόμενο, όσο αυξάνεται η πιθανότητα λάθους και μειώνεται το φορτίο που διακινείται, να μειώνεται και η καθυστέρηση αφού υπάρχει μικρότερος ανταγωνισμός πακέτων στο μέσο (π.χ. στους ενταμιευτές των δρομολογητών).

5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΛΟ ΚΑΝΑΛΙ

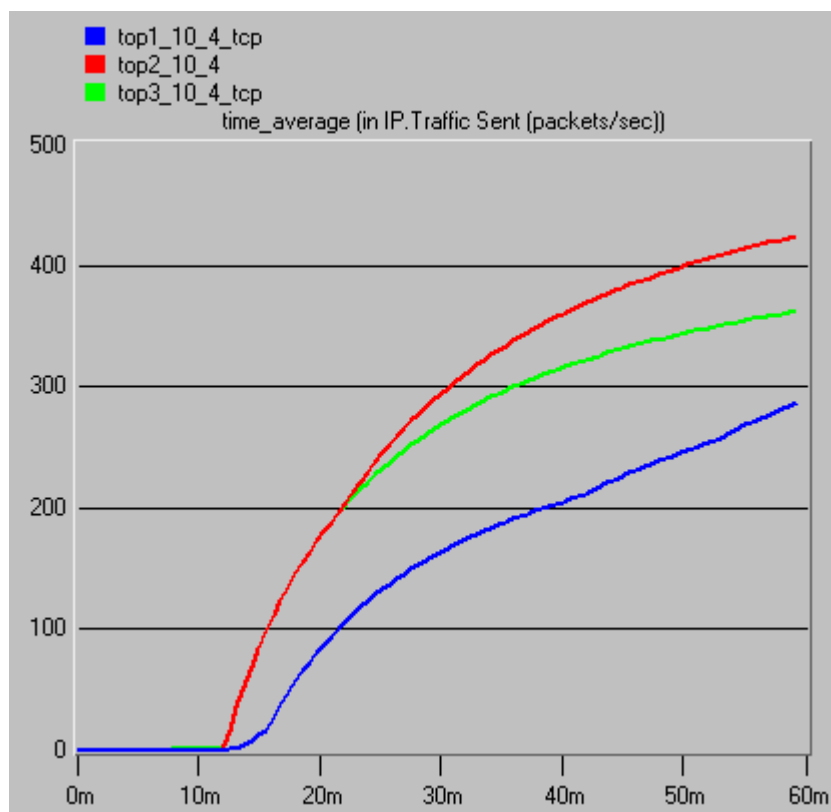
Ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι να γίνει σύγκριση μεταξύ των επιδόσεων που παρουσιάζουν οι τρεις τοπολογίες. Οι γραφικές παραστάσεις που επιλέχθηκε να παρουσιαστούν είναι για καλό δίαυλο. Η αντιστοίχιση των καμπυλών με τις τοπολογίες στις οποίες αναφέρονται έχει ως δείχνει ο ακόλουθος πίνακας.

Τοπολογία	Χρώμα
BPL με WiMAX backhaul	μπλε
BPL με WiMAX συγκεντρωτή	κόκκινο
BPL με WiMAX διασύνδεση	πράσινο

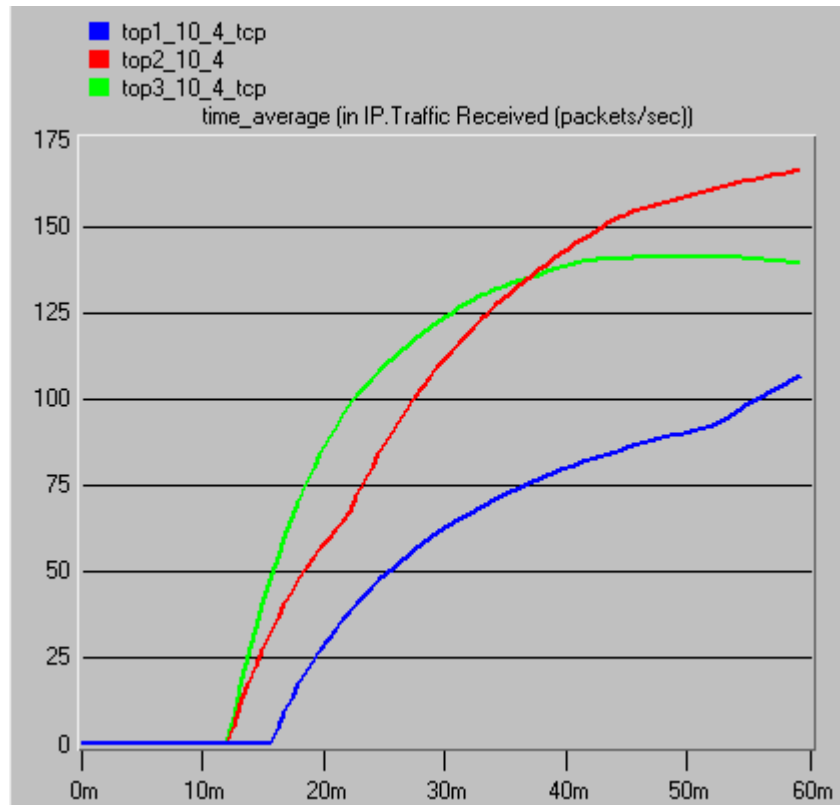
Πίνακας 5.2: Αντιστοίχιση τοπολογιών με το χρώμα καμπύλης που τους αναλογεί

5.2.1 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΚΙΝΟΥΜΕΝΗ ΚΙΝΗΣΗ IP

Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τη συνολική αποστελλόμενη και ληφθείσα κίνηση IP από τον εξυπηρετητή καθώς και τα πακέτα που χάθηκαν για τις τρεις τοπολογίες.



Σχήμα 5.2.1.1: Η κίνηση που έστειλε ο εξυπηρετητής για τις τρεις τοπολογίες

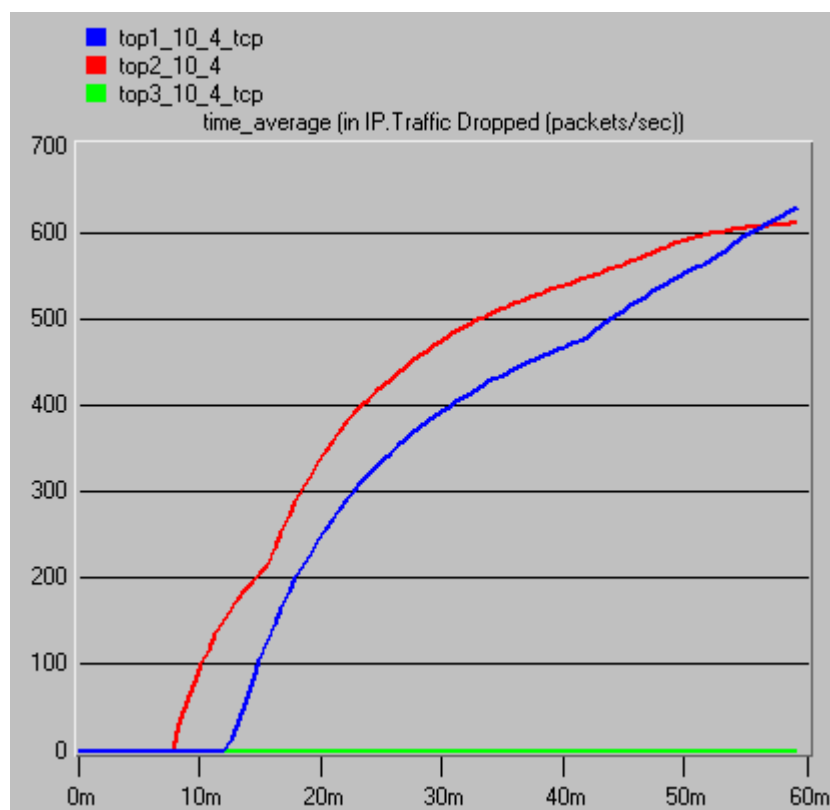


Σχήμα 5.2.1.2: Η κίνηση που έλαβε ο εξυπηρετητής για τις τρεις τοπολογίες

Όσον αφορά τη διακινούμενη κίνηση, η τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul» παρουσιάζει τη χαμηλότερη επίδοση από τις τρεις, ενώ οι τοπολογίες «BPL με WiMAX συγκεντρωτή» και «BPL με WiMAX διασύνδεση» παρουσιάζουν παρόμοια επίπεδα διακινούμενης κίνησης.

Η τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» είναι αναμενόμενο να εξυπηρετεί υψηλά επίπεδα διακινούμενης κίνησης καθώς τα δεδομένα έχουν μόνιμα δυο επιλογές ως προς τη μετάδοσή τους, το ενσύρματο μέσο (τη γραμμή Μ.Τ.) και το ασύρματο μέσο (το mesh δίκτυο που υπερτίθεται της γραμμής Μ.Τ. και ενώνει όλους τους κόμβους μεταξύ τους). Εκτός της επιλογής του μέσου μετάδοσης, στην τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» προσφέρεται και μια επιπλέον ευκολία στη διακίνηση των δεδομένων. Τα δεδομένα που διακινούνται μέσω του ασυρμάτου μέσου, λόγω της ιδιότητας του δικτύου να είναι mesh (mesh ονομάζεται ένα δίκτυο του οποίου όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους είτε άμεσα είτε μέσω κάποιας διδρομής.), μπορούν να φθάσουν στον προορισμό τους μέσω πολλών διαδρομών. Αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να αποφεύγουν κόμβους που παρουσιάζουν συνωστισμό.

Από την άλλη πλευρά, στην τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul» ο μόνος τρόπος μετάδοσης είναι το ενσύρματο μέσο σε όλη τη διαδρομή ενώ στη δεύτερη τα δεδομένα μεταδίδονται είτε μέσω ενσύρματου μέσου σε ένα τμήμα ή μέσω ασυρμάτου μέσου σε ένα άλλο τμήμα της μετάδοσης. Στις δυο πρώτες τοπολογίες δεν υφίσταται τμήμα της διαδρομής που να συνδυάζει τα δυο μέσα, οπότε το λογικό είναι να διακινείται λιγότερη κίνηση σε αυτές σε σχέση με την τρίτη τοπολογία. Το υψηλό επίπεδο κίνησης που παρατηρείται, παρ'όλα αυτά, για τη δεύτερη τοπολογία μπορεί να οφείλεται σε αναμεταδόσεις. Σύμφωνα με τις καμπύλες του σχήματος 5.2.1.3, στη δεύτερη τοπολογία χάνονται τα περισσότερα πακέτα. Αυτό οδηγεί το σύστημα σε επαναμεταδόσεις πακέτων, γεγονός που αυξάνει τα επίπεδα της κίνησης που φαίνεται να διακινείται. Σημαντικό είναι, επίσης, το γεγονός ότι στην τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» δεν χάνονται πακέτα.

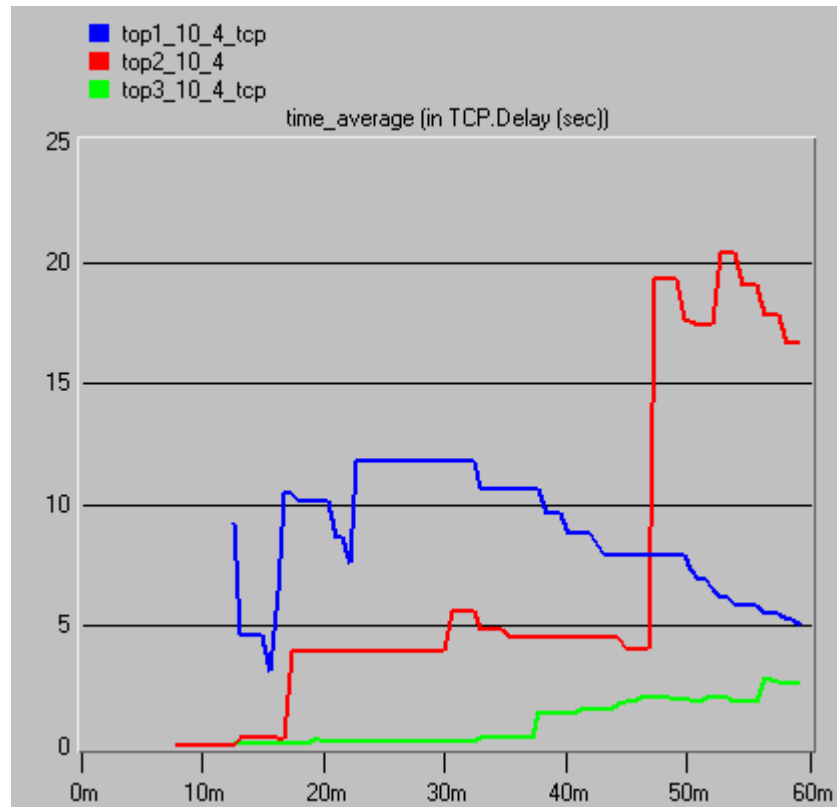


Σχήμα 5.2.1.3: Η κίνηση που χάθηκε για τις τρεις τοπολογίες

5.2.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ TCP

Το πρωτόκολλο TCP εκτελείται μόνο στα τερματικά συστήματα και όχι στους ενδιάμεσους κόμβους (γέφυρες, δρομολογητές) [25, 26]. Κατά τη λειτουργία του, συχνό φαινόμενο είναι η συμφόρηση. Συμφόρηση εμφανίζεται λόγω έλλειψης χώρου

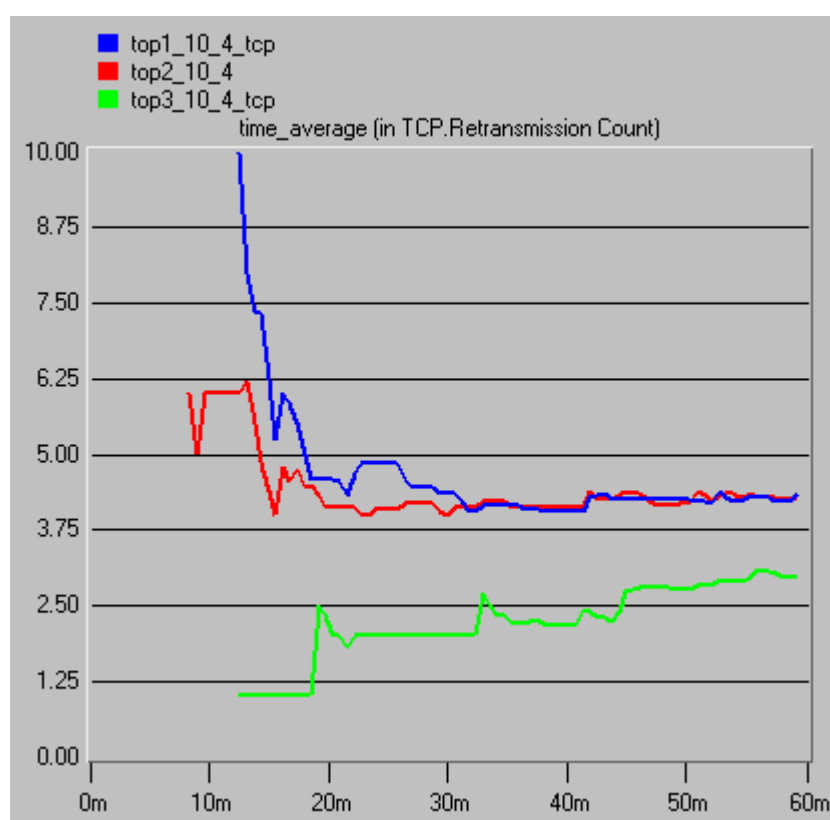
στους προσωρινούς ενταμιευτές ή λόγω της επιθυμίας πολλών αποστολέων να στείλουν δεδομένα με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Ένας μηχανισμός αντιμετώπισης της συμφόρησης που διαθέτει το πρωτόκολλο TCP είναι όταν παρατηρείται συμφόρηση να χαμηλώνει το ρυθμό αποστολής δεδομένων. Οποιαδήποτε απώλεια πακέτων μεταφράζεται από το TCP ως συμφόρηση και οδηγεί σε μείωση του ρυθμού μετάδοσης και συνεπώς σε αύξηση της καθυστέρησης TCP.



Σχήμα 5.2.2.1: Η συνολική καθυστέρηση TCP για τις τρεις τοπολογίες

Η υψηλή καθυστέρηση TCP που φαίνεται στο σχήμα 5.2.2.1 για την τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul» μπορεί να οφείλεται σε συμφόρηση στους τελικούς χρήστες, οι οποίοι δέχονται δεδομένα ταχύτερα σε σχέση με όσο μπορούν να εξυπηρετήσουν. Την ενδεχόμενη παρουσία συμφόρησης που οδηγεί σε αύξηση της καθυστέρησης επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 5.2.2.2 που δείχνει ότι για την πρώτη τοπολογία είναι μεγαλύτερος ο αριθμός των αναμεταδόσεων. Στην τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» φαίνεται να λύνεται το πρόβλημα της συμφόρησης, καθώς η καθυστέρηση που παρουσιάζεται είναι σαφώς μικρότερη. Η μικρή αυτή καθυστέρηση οφείλεται στην πλήρη υβριδικότητα της τοπολογίας αυτής η οποία διαθέτει δυο εναλλακτικά μέσα για να εξυπηρετεί δεδομένα.

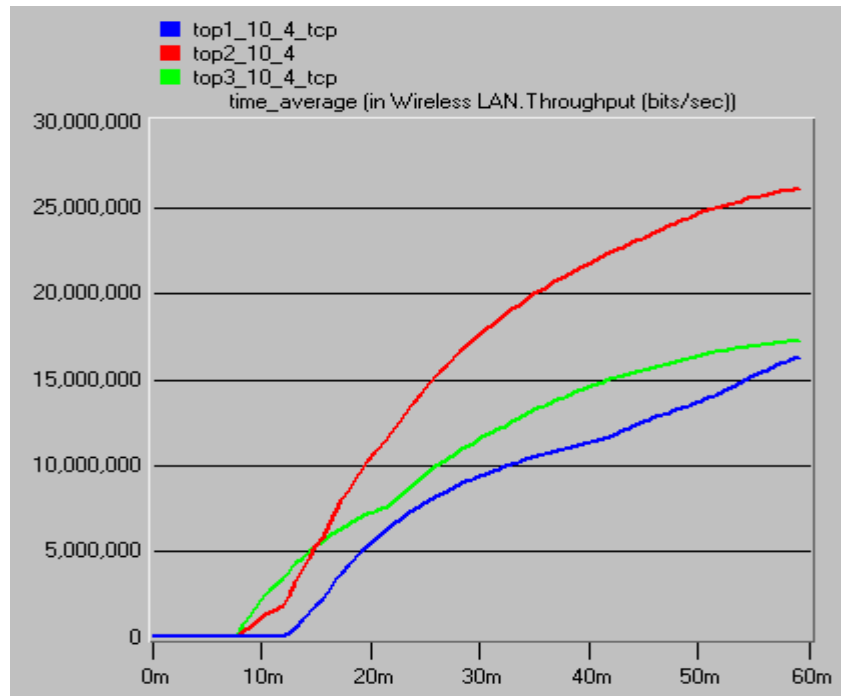
Στη τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή» παρατηρείται κατά διαστήματα υψηλότερη καθυστέρηση από την τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul» και μεγάλος αριθμός αναμεταδόσεων. Μια πιθανή εξήγηση για αυτά τα αποτελέσματα είναι ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται. Η μετάβαση από το ασύρματο μέσο στο ενσύρματο και το αντίθετο προσθέτουν επιπλέον καθυστέρηση στο σύστημα. Η τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση», παρά την υβριδικότητά της, δεν αντιμετωπίζει το ίδιο πρόβλημα διότι οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται εναλλακτικά, και όχι συμπληρωματικά, οπότε δεν είναι αναγκαίες οι μεταβάσεις από το ένα μέσο στο άλλο.



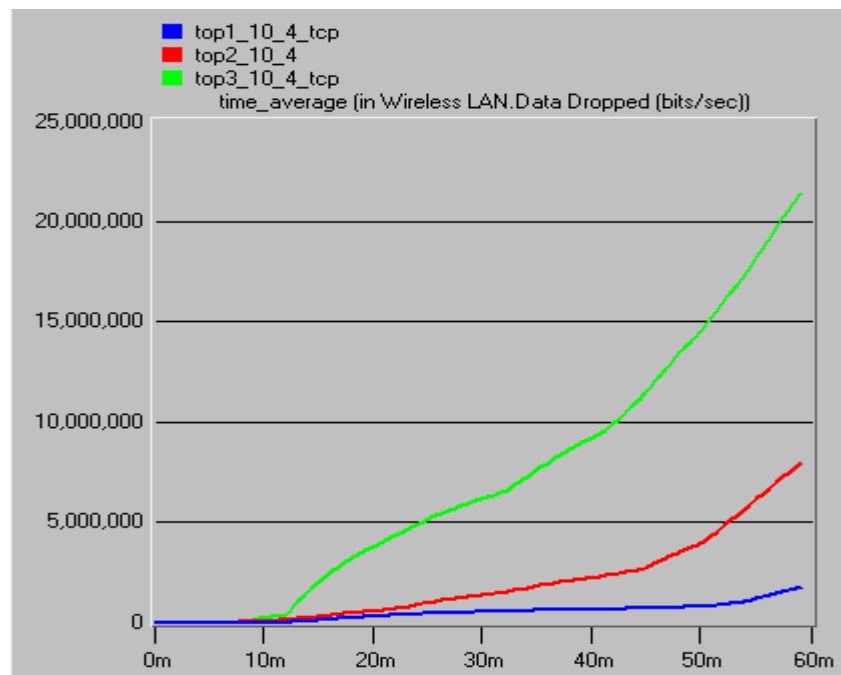
Σχήμα 5.2.2.2: Ο αριθμός επαναμεταδόσεων TCP για τις τρεις τοπολογίες

5.2.3 ΜΕΓΕΘΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ

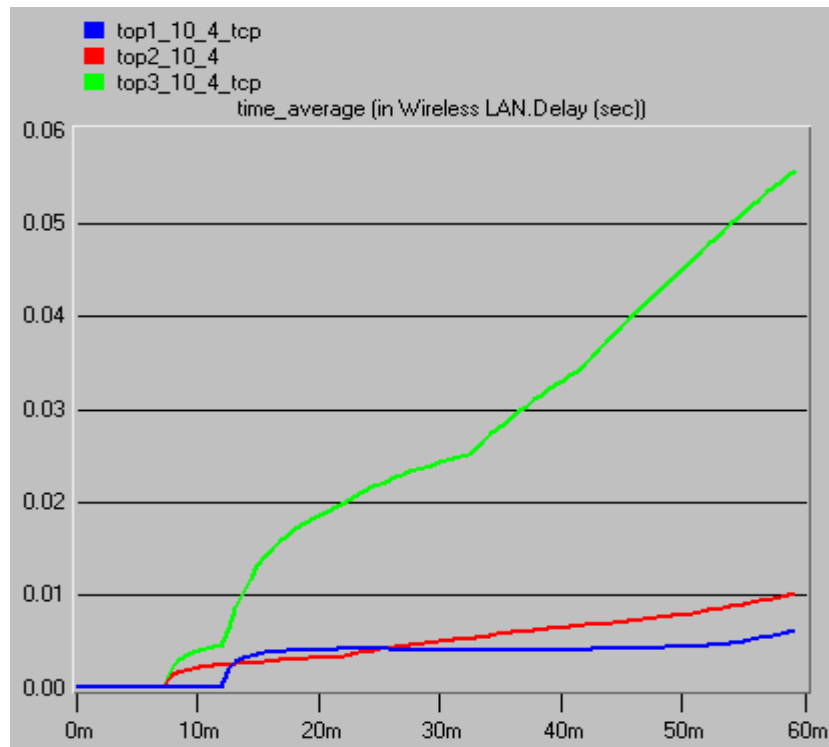
Ακολουθούν οι καμπύλες για τις τρεις τοπολογίες για τα μεγέθη που αφορούν το ασύρματο μέσο μόνο. Αναμένεται η πρώτη τοπολογία που βασίζεται κυρίως στην ενσύρματη λύση να έχει τη χαμηλότερη επίδοση στα μεγέθη που αφορούν αποκλειστικά τις ασύρματες ζεύξεις.



Σχήμα 5.2.3.1: Η ρυθμοαπόδοση στο ασύρματο μέσο για τις τρεις τοπολογίες



Σχήμα 5.2.3.2: Τα χαμένα δεδομένα για το ασύρματο μέσο για τις τρεις τοπολογίες



Σχήμα 5.2.3.3: Η καθυστέρηση στο ασύρματο μέσο για τις τρεις τοπολογίες

Η τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul» πράγματι έχει πράγματι τη χαμηλότερη ρυθμοαπόδοση λόγω των λιγοστών ασυρμάτων ζεύξεων που διαθέτει. Είναι επόμενο να έχει και λιγότερα χαμένα πακέτα και μικρότερη καθυστέρηση εφόσον διακινεί λιγότερη κίνηση ασύρματα. Τη μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση παρουσιάζει η υβριδική τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή». Ενδιαφέρον προκαλεί η παρατήρηση ότι στη τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» παρατηρούνται υψηλά επίπεδα χαμένων πακέτων τα οποία σχετίζονται με την υψηλή καθυστέρηση και τη σχετικά χαμηλή ρυθμοαπόδοση.

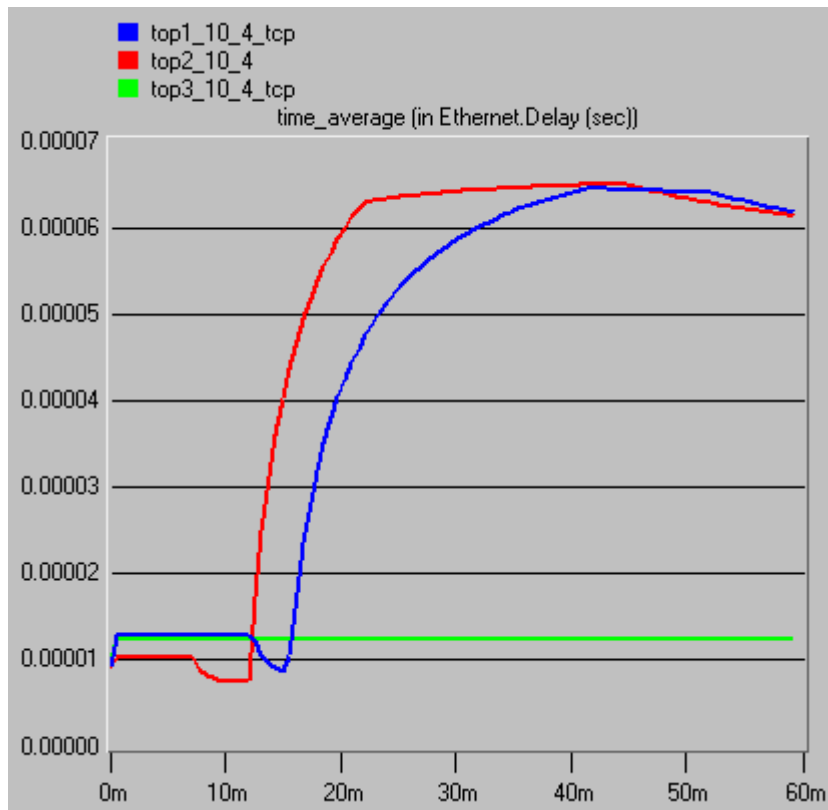
Δεδομένου του γεγονότος ότι κάθε ασύρματη ζεύξη έχει επιλεγθεί κατά το σχεδιασμό των προσομοιώσεων να υποστηρίζει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ίσο με 54 Mbps, μπορεί να υποθεθεί ότι για κίνηση που υπερβαίνει αυτό το ρυθμό μετάδοσης οι ασύρματες ζεύξεις παρουσιάζουν στενωπό επίδοσης. Στην προκειμένη περίπτωση, όταν ο ρυθμός μετάδοσης γίνεται ταχύτερος από αυτόν που μπορεί να υποστηριχθεί στις ζεύξεις, τα δεδομένα δεν μεταδίδονται άμεσα αλλά αποθηκεύονται στους προσωρινούς ενταμιευτές μέχρι να γίνει δυνατή η μετάδοσή τους. Αυτό προκαλεί συμφόρηση η οποία οδηγεί είτε σε καθυστέρηση στη μετάδοση του πακέτου ή σε απώλεια του πακέτου αν υπάρχει έλλειψη χώρου στην ουρά αναμονής.

Την καλύτερη επίδοση στα ασύρματα μεγέθη παρουσιάζει η τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή» με την υψηλότερη ρυθμοαπόδοση, μικρό αριθμό χαμένων πακέτων και μικρή καθυστέρηση.

5.2.4 ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΣΤΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΟ ΜΕΣΟ

Η παρατήρηση της καθυστέρησης που προσθέτει το ενσύρματο μέσο επιβεβαιώνει ότι στην τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» το ενσύρματο μέσο, δεχόμενο τη βοήθεια του ασύρματου μέσου ως εναλλακτικού μέσου, παρουσιάζει βελτιωμένη λειτουργία. Η καθυστέρηση που παρατηρείται απέχει από την αντίστοιχη στις άλλες τοπολογίες. Οι διαφορές μεταξύ των άλλων δυο τοπολογιών είναι πολύ μικρές για να συγκριθούν και να δώσουν κάποιο συμπέρασμα.

Ίδια χαρακτηριστικά (πιθανότητα λάθους, πολύοδη διάδοση) με την ασύρματη ζεύξη παρουσιάζει και μια ζεύξη BPL. Καθώς η συμπεριφορά μιας ζεύξης BPL είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά μιας ασύρματης ζεύξης, η στενωπός επίδοσης που περιγράφηκε προηγουμένως παρουσιάζεται και στο ενσύρματο μέσο. Τα πακέτα ανταγωνίζονται για το κοινό μέσο και ο συνωστισμός πακέτων στους ενταμιευτές οδηγεί σε απώλεια πακέτων και αύξηση της καθυστέρησης. Στην τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» κάθε πακέτο μπορεί να επιλέξει να μεταδοθεί μέσω του μέσου (ενσύρματου ή ασύρματου) που παρουσιάζει τη χαμηλότερη χρησιμοποίηση βοηθώντας έτσι στη λύση του προβλήματος του συνωστισμού. Η μείωση αυτή του συνωστισμού του ενσύρματου μέσου μεταφράζεται σε μείωση της καθυστέρησης που προσθέτει το ενσύρματο μέσο στο σχήμα 5.2.4.

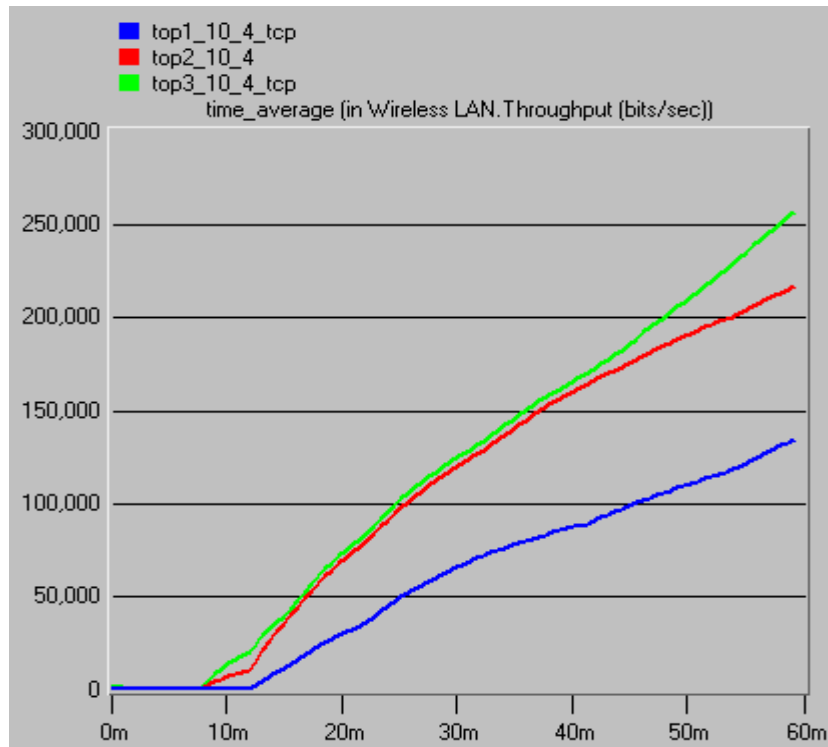


Σχήμα 5.2.4: Η καθυστέρηση στο ενσύρματο μέσο για τις τρεις τοπολογίες

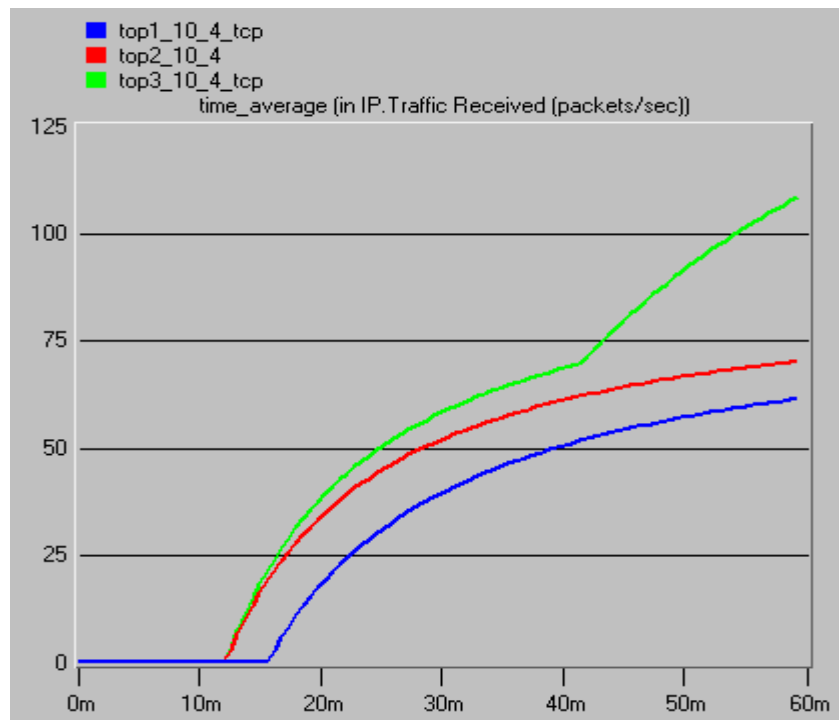
5.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΕΝΩΠΙΟΥ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΡΙΤΗΣ

ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

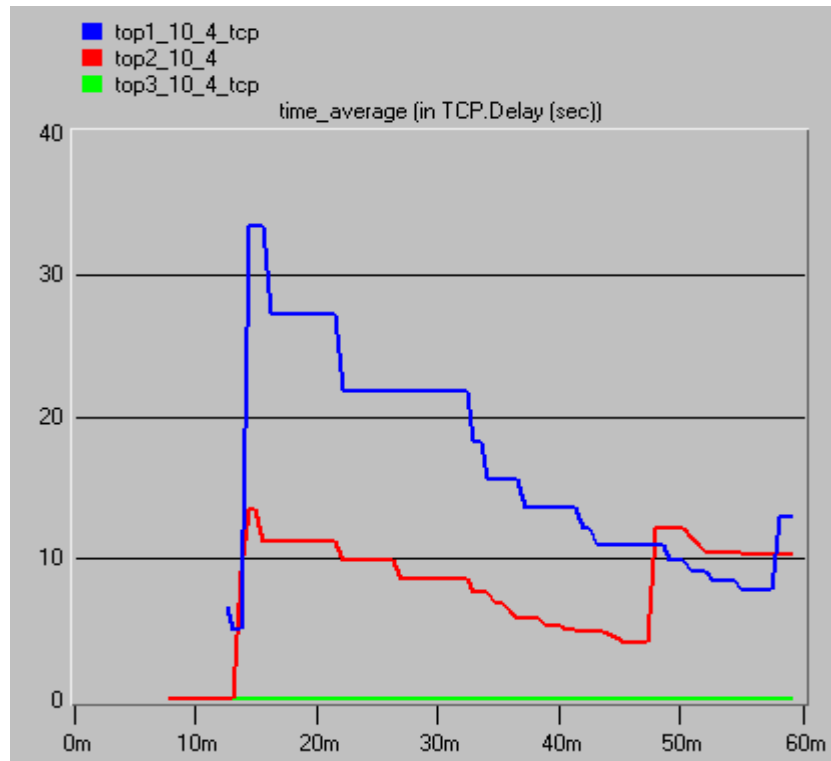
Τα προηγούμενα αποτελέσματα δεν δίνουν μια ξεκάθαρη απάντηση στο ποια τοπολογία έχει την καλύτερη επίδοση. Είναι σαφές ότι οι δυο τοπολογίες που παρουσιάζονται αποτελεσματικότερες στη μετάδοση δεδομένων είναι οι «BPL με WiMAX συγκεντρωτή» και «BPL με WiMAX διασύνδεση». Υποτέθηκε προηγουμένως ότι η αδυναμία που παρατηρήθηκε στο ασύρματο μέσο για την τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» οφείλεται σε στενωπό επίδοσης λόγω του ρυθμού μετάδοσης που υποστηρίζουν οι ασύρματες ζεύξεις. Σε μια προσπάθεια διερεύνησης εάν αυτή η υπόθεση έχει βάση, πραγματοποιήθηκε άλλη μια σειρά προσομοιώσεων. Οι νέες προσομοιώσεις διαφέρουν από τις αρχικές μόνο στην κίνηση που εφαρμόστηκε. Αφαιρέθηκαν οι εφαρμογές βίντεο (high quality και light) με σκοπό την εφαρμογή ενός λιγότερου απαιτητικού προφίλ κίνησης ως προς το ρυθμό μετάδοσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια σε μορφή γραφικών παραστάσεων.



Σχήμα 5.3.1: : Η ρυθμοαπόδοση στο ασύρματο μέσο για τις τρεις τοπολογίες



Σχήμα 5.3.2: : Η κίνηση που έλαβε ο εξυπηρετητής για τις τρεις τοπολογίες



Σχήμα 5.3.3: Η συνολική καθυστέρηση TCP για τις τρεις τοπολογίες

Οι καμπύλες της ρυθμοαπόδοσης στο ασύρματο μέσο και της κίνησης που διακινείται επιβεβαιώνουν την υπόθεση ότι, όταν δεν παρατηρείται στενωπός επίδοσης, η τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» υπερτερεί των άλλων δύο. Εντυπωσιακή δε είναι η βελτίωση στην καθυστέρηση TCP που προσφέρει η τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση» έναντι των άλλων δυο (σχήμα 5.3.3) .

5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.4.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

Το πρώτο συμπέρασμα που προέκυψε από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής είναι ότι όσο αυξάνεται η πιθανότητα λάθους μειώνεται η ικανότητα του ενσύρματου μέσου να διακινεί πακέτα. Οι τοπολογίες που δεν έχουν ως εναλλακτική λύση την ασύρματη επηρεάζονται άμεσα από αυτό και διακινούν λιγότερη κίνηση. Για κακό δίαυλο, οι δύο πρώτες τεχνολογίες παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική κίνηση, ενώ η τρίτη τοπολογία επηρεάζεται αρνητικά μεν, αλλά η κίνηση της είναι σε ικανοποιητικά

επίπεδα. Συνεπώς, όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του ενσύρματου διαύλου τόσο καλύτερη επίδοση παρουσιάζουν οι τρεις τοπολογίες.

5.4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για κάθε τοπολογία ξεχωριστά παρουσιάζονται ακολούθως:

- **Τοπολογία «BPL με WiMAX backhaul»:** Αποτελεί μια λύση που στηρίζεται στο ενσύρματο μέσο μόνο και αυτό της προσδίδει τη μεγαλύτερη απλότητα από άποψη αρχιτεκτονικής δικτύου και το χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης. Παρ'όλα αυτά, υστερεί από τις υβριδικές λύσεις τόσο στη μετάδοση δεδομένων όσο και στην καθυστέρηση. Παρουσιάζει τη μικρότερη διακινούμενη κίνηση από τις τρεις τοπολογίες και τις μεγαλύτερες καθυστερήσεις στο ενσύρματο μέσο και στο πρωτόκολλο TCP.
- **Τοπολογία «BPL με WiMAX συγκεντρωτή»:** Συνδυάζει ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της ασύρματης και της ενσύρματης τεχνολογίας σε μια αρχιτεκτονική δικτύου όπου αυτές χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά. Παρουσιάζει ικανοποιητικά επίπεδα ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και καθυστέρησης. Το πρόβλημα της φαίνεται να είναι η μετάβαση στην οποία υπόκεινται τα δεδομένα από το ενσύρματο στο ασύρματο μέσο, και το αντίθετο, και η οποία εισάγει επιπλέον καθυστέρηση.
- **Τοπολογία «BPL με WiMAX διασύνδεση»:** Είναι η απόλυτα υβριδική λύση συνδυάζοντας ένα ενσύρματο και ένα ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και εναλλακτικά το ένα του άλλου. Η επίδοση που παρουσιάζει είναι η καλύτερη των τριών σε όλα τα επίπεδα, όπως ήταν αναμενόμενο. Το πρόβλημα της στενωπού επίδοσης που εμφανίστηκε κατά την πρώτη σειρά προσομοιώσεων μπορεί να λυθεί κάνοντας χρήση ασυρμάτων ζεύξεων που υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, πράγμα υλοποιήσιμο. Η τεχνολογία WiMAX, άλλωστε, προσφέρει ρυθμούς μεγαλύτερους του ρυθμού των 54 Mbps που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις..

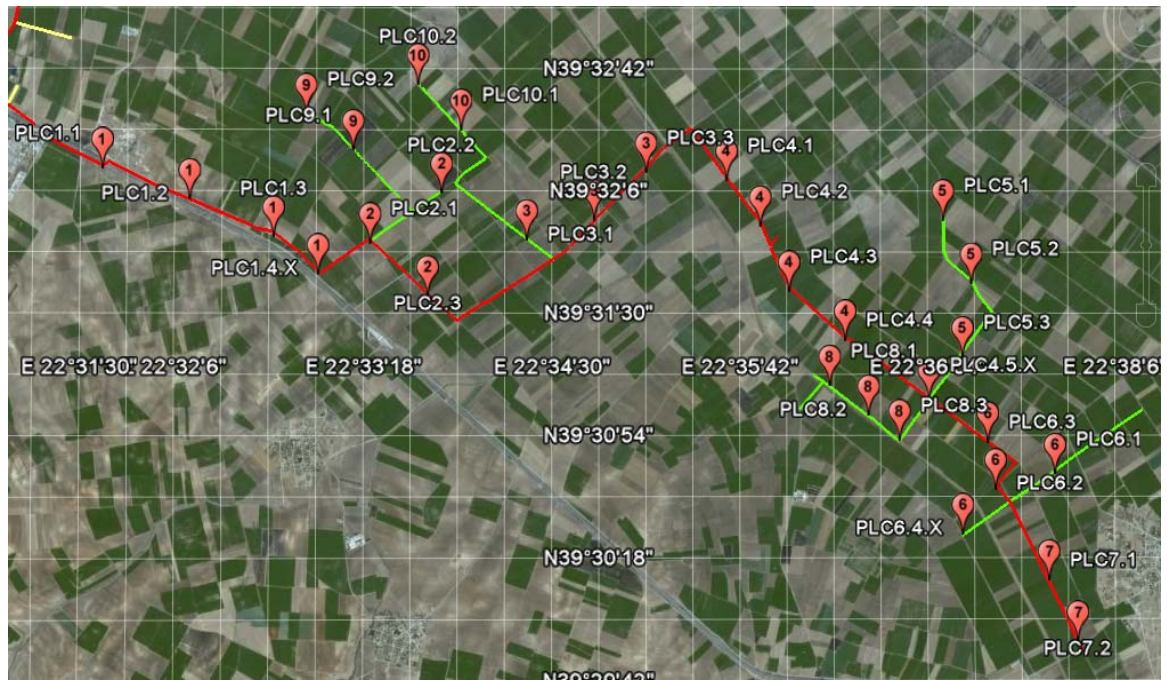
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΛΑΡΙΣΑΣ

Στο τελευταίο μέρος της παρούσας διπλωματικής θεωρήθηκε σκόπιμο να ερευνηθεί η επίδοση ενός πραγματικού δικτύου μέσω προσομοιώσεων. Το υπάρχον δίκτυο που επιλέχθηκε να προσομοιωθεί είναι ένα υβριδικό δίκτυο BPL-Wi-fi που είναι εγκατεστημένο στην περιοχή της Λάρισας [27]. Η Λάρισα είναι μια πόλη άμεσα συνδεδεμένη με τις αγροτικές δραστηριότητες κυρίως λόγω της γεωγραφικής της θέσης. Οι τεράστιες πεδιάδες του Θεσσαλικού κάμπου ευνοούν την αγροτική ανάπτυξη και ο έλεγχος των μεγάλων εκτάσεων καλλιέργειας είναι δύσκολο έργο. Παρ'όλα αυτά, ο έλεγχος των αρδευτικών συστημάτων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κρίνεται αναγκαίος, κυρίως κατά τη θερινή περίοδο.

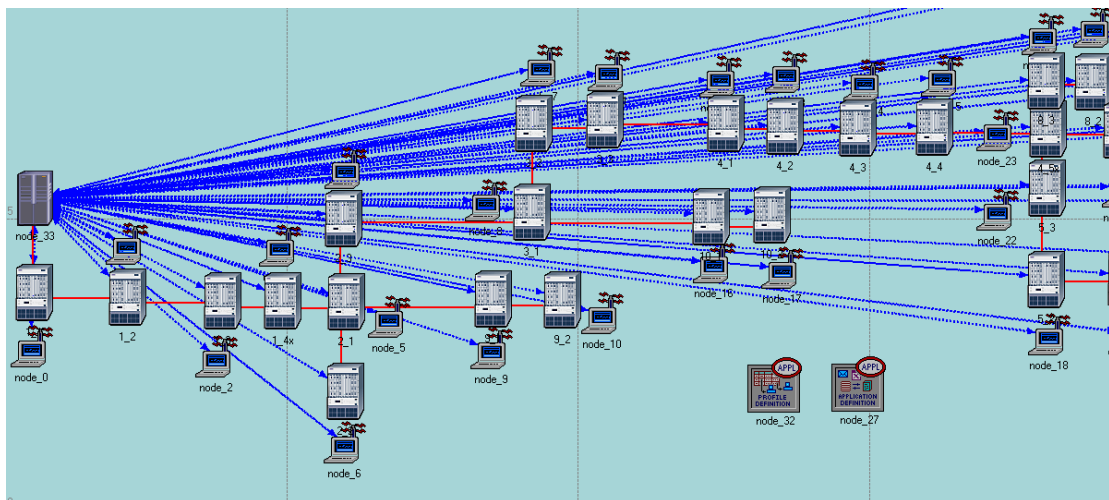
Μια λύση για απομακρυσμένο έλεγχο των καλλιεργιών προσφέρει ο συνδυασμός των τεχνολογιών BPL-Wi-fi. Σε μια περιοχή όπως αυτή της Λάρισας, όπου δεν προβλέπεται η εγκατάσταση δικτύων χαλκού ή οπτικών ινών, η τεχνολογία BPL εκμεταλλεύεται το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής που διασχίζει τις πεδιάδες για να προσφέρει ευρυζωνική επικοινωνία. Στο σχήμα 6.1 φαίνεται το τμήμα του εγκατεστημένου δικτύου BPL- Wi-fi στη Λάρισα που προσομοιώθηκε. Αποτελείται από 31 μονάδες BPL κατά μήκος μιας γραμμής Μ.Τ., κάθε μια από τις οποίες διαθέτει επιπλέον 2 διεπαφές Wi-fi. Ο ρόλος των μονάδων είναι να συλλέγουν δεδομένα για μια συγκεκριμένη περιοχή που επιβλέπουν και να τα μεταφέρουν σε ένα κεντρικό ελεγκτή ή σε γειτονικές μονάδες. Τα σήματα ελέγχου είναι, προς το παρόν, σήματα στενής ζώνης αλλά στο μέλλον θα μπορούσε να εισαχθούν ευρυζωνικές εφαρμογές όπως η επίβλεψη σε πραγματικό χρόνο μέσω εικόνας βίντεο.



Σχήμα 6.1: Μέρος του εγκατεστημένου δικτύου BPL- Wi-fi στη Λάρισα

6.2 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΛΑΡΙΣΑΣ

Η προσομοίωση του δικτύου της Λάρισας έγινε σε πλήρη αντιστοιχία με τις προσομοιώσεις των τριών τοπολογιών. Χρησιμοποιήθηκαν δρομολογητές με τέσσερις ενσύρματες και δυο ασύρματες διεπαφές ως μονάδες BPL. Οι συνδέσεις μεταξύ των μονάδων BPL είναι ενσύρματες συνδέσεις οι οποίες παρουσιάζουν πιθανότητα λάθους κατά τη μετάδοση της τάξης του 0.0001.



Σχήμα 4.3.2: Μέρος της τοπολογίας του δικτύου της Λάρισας όπως προσομοιώθηκε στο OPNET

Κάθε μονάδα BPL επικοινωνεί ασύρματα με ένα σταθμό εργασίας. Οι σταθμοί εργασίας επικοινωνούν με ένα εξυπηρετητή που έχει το ρόλο του κεντρικού σταθμού ελέγχου. Οι αποστάσεις μεταξύ των μονάδων BPL είναι ίσες με τις πραγματικές αποστάσεις που έχουν μετρηθεί στο δίκτυο της Λάρισας (πίνακας 4.3.2). Η κίνηση που διακινείται αμφίδρομα μεταξύ εξυπηρετητή και σταθμών εργασίας επιλέχθηκε να είναι αυτή που δημιουργεί η εφαρμογή του OPNET «Light web browsing» η οποία έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την κίνηση που διακινείται πραγματικά στο δίκτυο της Λάρισας. Τα στατιστικά που επιλέχθηκε να συλλεχθούν κατά την προσομοίωση είναι τα ίδια με τις προηγούμενες προσομοιώσεις.

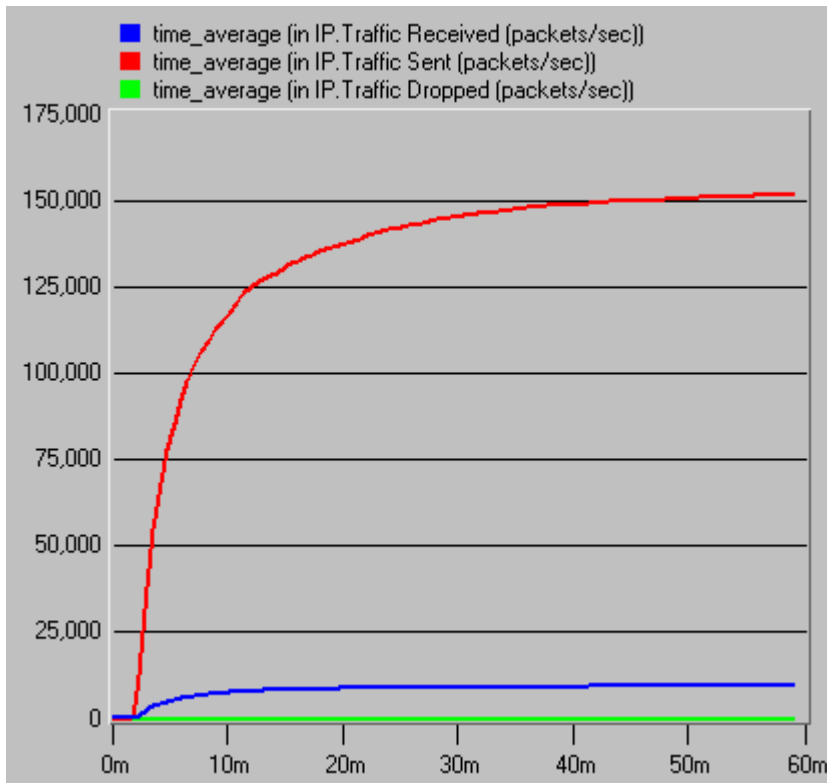
Μονάδα (από)	Μονάδα(προς)	Μέτρα
PLC1.1	PLC1.2	820
PLC1.2	PLC1.3	810
PLC1.3	PLC1.4.X	530
PLC1.4.X	PLC2.1	540
PLC2.1	PLC9.1	1215
PLC9.1	PLC9.2	555
PLC2.1	PLC2.2	763
PLC2.1	PLC2.3	700
PLC2.3	PLC3.1	1608
PLC3.1	PLC10.1	1534
PLC10.1	PLC10.2	525
PLC3.1	PLC3.2	750
PLC3.2	PLC3.3	638
PLC3.3	PLC4.1	1036
PLC4.1	PLC4.2	515
PLC4.2	PLC4.3	610
PLC4.3	PLC4.4	690
PLC4.4	PLC4.5.X	942
PLC4.5.X	PLC8.3	458
PLC8.3	PLC8.2	380
PLC8.2	PLC8.1	440
PLC4.5.X	PLC5.3	513
PLC5.3	PLC5.2	772
PLC5.2	PLC5.1	686
PLC4.5.X	PLC6.3	647
PLC6.3	PLC6.2	547
PLC6.2	PLC6.4.X	659
PLC6.2	PLC6.1	672
PLC6.2	PLC7.1	950
PLC7.1	PLC7.2	610

Πίνακας 4.3.2: Αποστάσεις μεταξύ μονάδων BPL

6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

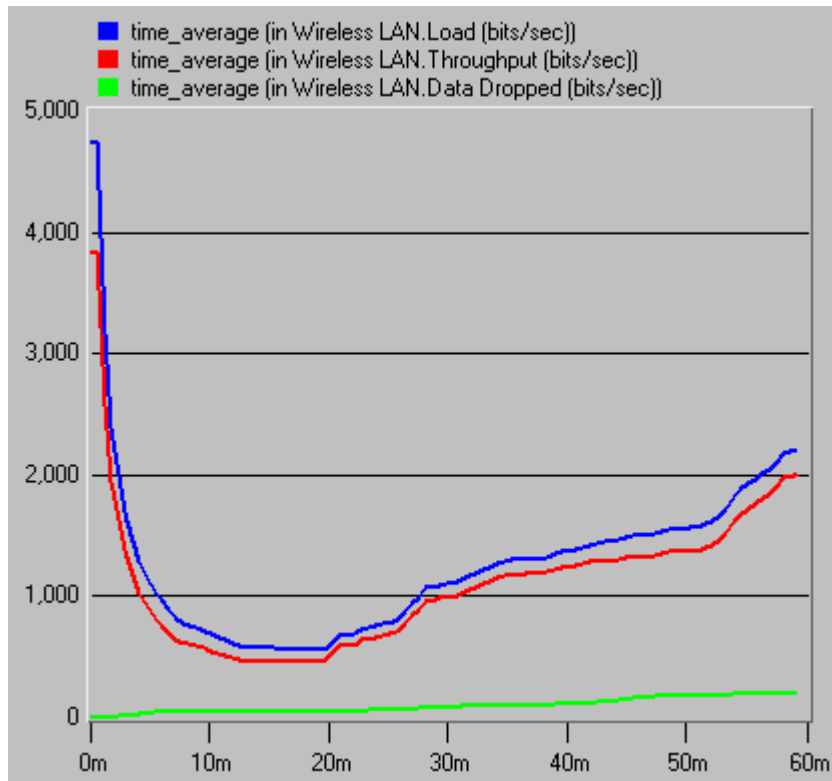
Οι καμπύλες της IP κίνησης που διακινείται στο δίκτυο της προσομοίωσης δείχνουν σημαντική διαφορά μεταξύ της κίνησης που αποστέλλει ο εξυπηρετητής και αυτής που λαμβάνει. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε και κατά τις μετρήσεις στο δίκτυο της Λάρισας. Δεδομένου του ότι τα αποτελέσματα αφορούν στην κίνηση που έστειλε και έλαβε ο εξυπηρετητής η ασυμμετρία αυτή είναι αναμενόμενη. Επιπλέον, η κίνηση που επιλέχθηκε να εφαρμοστεί ήταν η φυλλομέτρηση ελαφριάς μορφής, η οποία ευνοεί την ασυμμετρία μεταξύ αποστελλόμενης και λαμβανόμενης κίνησης από τον εξυπηρετητή.

Παρατηρείται, επίσης, ότι η σύνδεση είναι αξιόπιστη αφού δεν χάνονται πακέτα κατά τη μεταφορά.



Σχήμα 6.3.1: Κίνηση IP που λήφθηκε (μπλε), που στάλθηκε (κόκκινο) και που χάθηκε (πράσινο)

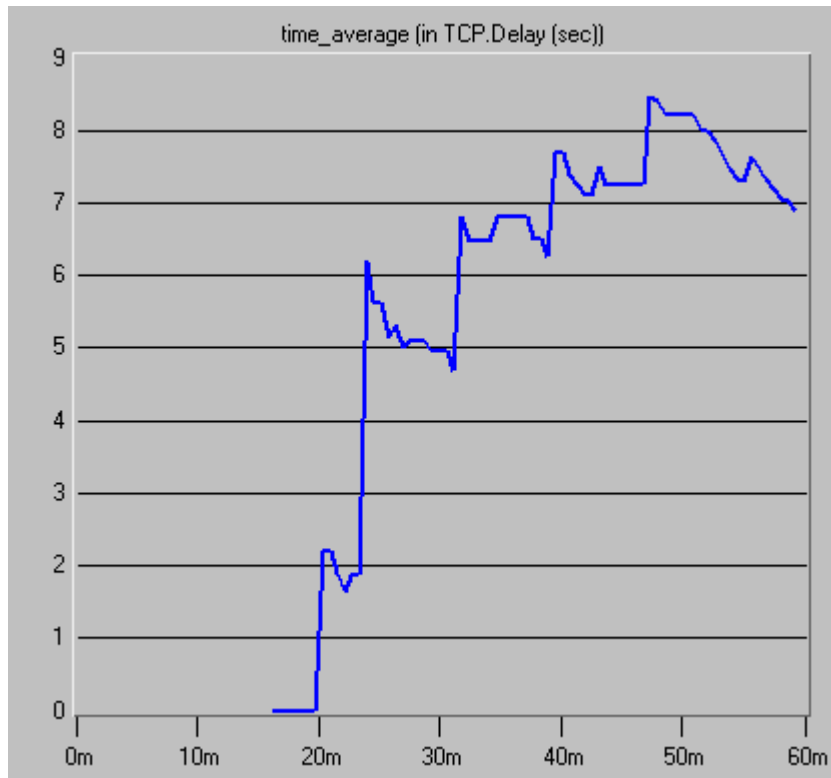
Από το σχήμα 6.3.2 παρατηρείται ότι η ρυθμοαπόδοση στο ασύρματο μέσο είναι σχεδόν ίση με το φορτίο. Η διαφορά τους είναι τα πακέτα που χάθηκαν, ο αριθμός των οποίων είναι μικρός.



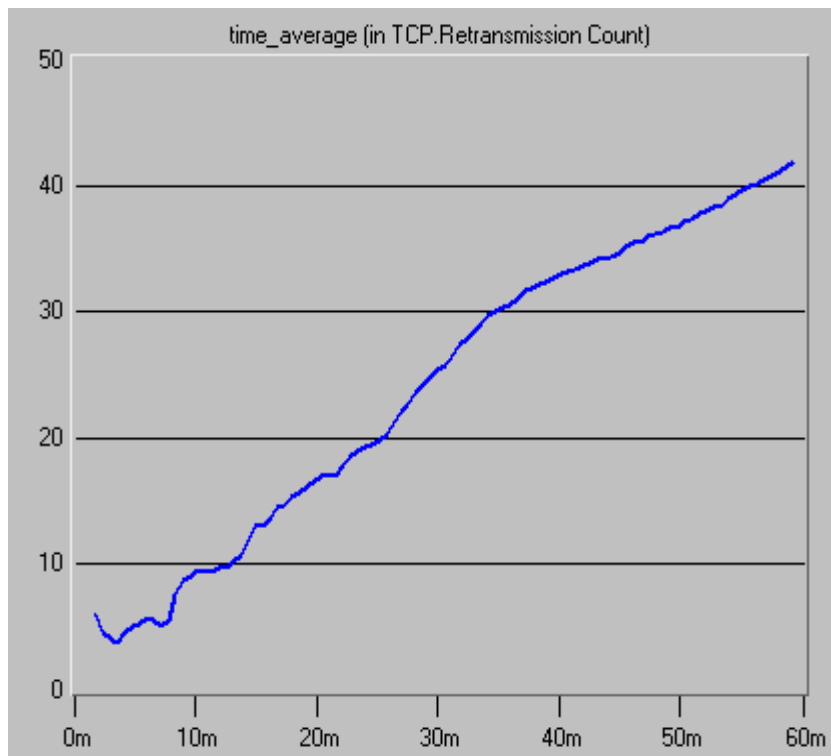
Σχήμα 6.3.2: Φορτίο(μπλε), ρυθμοαπόδοση (κόκκινο) και χαμένα δεδομένα(πράσινο) στο ασύρματο μέσο

Η καθυστέρηση και οι αναμεταδόσεις του πρωτοκόλλου TCP παρουσιάζουν αύξουσα μορφή με το χρόνο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο περνάει ο χρόνος της προσομοίωσης περισσότερα πακέτα συσσωρεύονται στους ενταμιευτές, οπότε αυξάνεται ο χρόνος αναμονής των πακέτων μέχρι να εξυπηρετηθούν. Όταν οι ενταμιευτές δεν έχουν πλέον χώρο προσωρινής ενταμίευσης τα πακέτα χάνονται οπότε το πρωτόκολλο TCP αναμεταδίδει την πληροφορία. Αυτός είναι ο λόγος που αυξάνει και ο αριθμός των αναμεταδόσεων με το χρόνο της προσομοίωσης.

Το επίπεδο της καθυστέρησης TCP, η οποία υπερβαίνει τα 8 δευτερόλεπτα σε μερικές περιπτώσεις, είναι πολύ υψηλό. Το πρωτόκολλο TCP δεν είναι κατάλληλο λοιπόν για τη χρήση του ως πρωτοκόλλο μεταφοράς στο υβριδικό δίκτυο που μελετάται. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και η μελέτη του υπάρχοντος δικτύου μετά από μετρήσεις. Το πρωτόκολλο μεταφοράς που κρίθηκε καταλληλότερο και χρησιμοποιήθηκε τελικά στην υλοποίηση του δικτύου στη Λάρισα είναι το UDP.

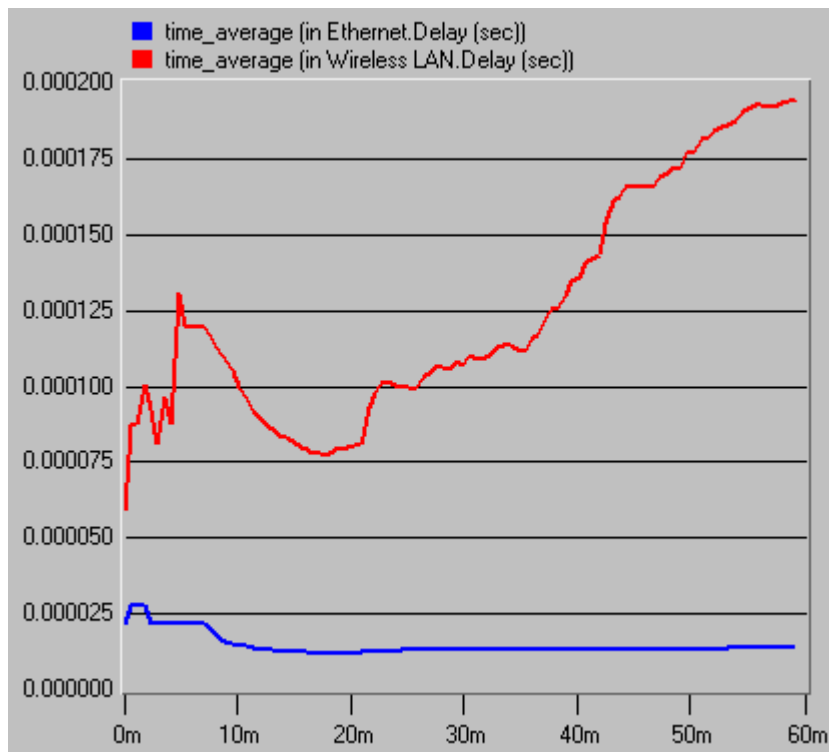


Σχήμα 6.3.3: Καθυστέρηση TCP



Σχήμα 6.3.4: Αριθμός αναμεταδόσεων TCP

Οι καθυστερήσεις που παρατηρήθηκαν τόσο στο ασύρματο όσο και στο ενσύρματο μέσο είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα της τάξης των μs. Από την κορυφή των καμπυλών εξάγεται το συμπέρασμα ότι το ενσύρματο μέσο δεν επηρεάζεται από τη διάρκεια της λειτουργίας των υπηρεσιών που εφαρμόζονται καθώς παρουσιάζει σταθερή καθυστέρηση. Αντίθετα, η καμπύλη της καθυστέρησης που προσθέτει το ασύρματο μέσο έχει ανοδική πορεία με το χρόνο. Αυτό οφείλεται στη στενωπό επίδοσης που παρουσιάζει το ασύρματο μέσο όπως εξηγήθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 6.3.5: Καθυστέρηση στο ενσύρματο (μπλε) και στο ασύρματο μέσο (κόκκινο)

6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την προσομοίωση του υβριδικού δικτύου της Λάρισας δεν είναι δυνατό να συγκριθούν με πραγματικές μετρήσεις καθώς το πρόγραμμα προσομοίωσης δεν λαμβάνει υπόψη τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Για παράδειγμα, ασύρματες συνδέσεις σε μεγάλες αποστάσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο πραγματικό δίκτυο, χάρη στα ιδιαίτερα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής, δεν ήταν δυνατό να λειτουργήσουν στις ίδιες αποστάσεις στο πρόγραμμα προσομοίωσης. Επιπλέον, κάθε γραμμή Μ.Τ. παρουσιάζει

ιδιομορφίες ανά τμήματα οι οποίες επίσης δεν μπορούν να εισαχθούν στην προσομοίωση.

Παρ'όλα αυτά, μελετήθηκε η γενικότερη συμπεριφορά ενός δικτύου μεγέθους συμβατού με την πραγματικότητα. Παρατηρήθηκε η αδυναμία του πρωτοκόλλου TCP να λειτουργήσει στα επιθυμητά πλαίσια και διαπιστώθηκε ότι τα επίπεδα καθυστέρησης που προσφέρει το υβριδικό δίκτυο είναι σε χαμηλά επίπεδα, ανεκτά για συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν τελικά ότι το υβριδικό δίκτυο BPL- Wi-fi είναι μια λύση που συνιστάται για απομακρυσμένες/ αγροτικές περιοχές και δεν απέχει από την πραγματικότητα αφού έχει ήδη υλοποιηθεί πιλοτικά στην περιοχή της Λάρισας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] HomePlug AV White Paper
- [2] IEEE P1901 Draft Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications
- [3] Broadband Powerline Communications Networks, Halif Hrasnica, Abdelfattch Haidine, Ralf Lehnert
- [4] A.B. Dalby, "Signal Transmission on Power Lines; (Analysis of power line circuits)", Proc. 1997 International Symposium on Power-line Communications and its Applications", Essen, Germany, 1997.
- [5] K. Dostert, "Telecommunications over the Power Distribution Grid; Possibilities and Limitations", Proc. 1997 International Symposium on Power-line Communications and its Applications", Essen, Germany, 1997.
- [6] D33: New business models and technical feasibility with Wi-Fi, WiMAX, UWB, ZigBee and Bluetooth, OPERA
- [7] IEEE 802.16a Standard and WiMAX, Igniting Broadband Wireless Access, White Paper
- [8] Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks, November 2005, Prepared by Senza Fili Consulting on behalf of the WIMAX Forum
- [9] Broadband Wireless Access with WiMax/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential, Arunabha Ghosh and David R. Wolter, SBC Laboratories Inc., Jeffrey G. Andrews and Runhua Chen, The University of Texas at Austin
- [10] WiMAX's technology for LOS and NLOS environments, WiMAX Forum
- [11] OPERATIONAL CONSIDERATIONS OF DEPLOYING WIMAX TECHNOLOGY AS A LAST-MILE, TACTICAL COMMUNICATION SYSTEM, Bruce Bennett, Defense Information Systems Agency, Arlington, VA and Pamela Hemmings. Booz Allen Hamilton, Herndon, VA
- [12] The principles of OFDM by Louis Litwin and Michael Pugel , RF Signal Processing , January 2001

- [13] Μετάδοση δεδομένων ευρείας ζώνης με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνοτήτων (OFDM), Γεώργιος Πάντος, 2003
- [14] WiMAX's technology for LOS and NLOS environments , WiMAX Forum white paper, Main contributors: Eugene Crozier (System Architect, SR Telecom); Allan Klein (VP System and Technology, SR Telecom)
- [15] Windowed/Shaped OFDM and OFDM-OQAM:Alternative Multicarrier Modulations for Wireless Applications, Ch.mo Prof. S.Pupolin , A. Assalini , Trivellato Matteo
- [16] Adaptive Decision Feedback Orthogonality Restoration Filter for Windowed OFDM, Pinchieh Huang Yumin Lee, Dept. of Electrical Engineering and Graduate Institute of Communication Eng., National Taiwan University, Taipei 106 17, Taiwan
- [17] R. van Nee and R. Prasad, OFDM for wireless multimedia communications, Artech House Publishers, 2000.
- [18] <http://www.mobilecomms-technology.com/projects/imt2000/> ,15/1/2009
- [19] ITU-T NGN FG Proceedings Part I
- [20] Convergence and Next Generation Networks, Ministerial Background Report DSTI/ICCP/CISP(2007)2/FINAL
- [21] Next Generation Network (NGN) Services, Telcordia Technologies
- [22] Technological Convergence: Design of a BPL-WiMAX integrated network, Angeliki M. Sarafi, Georgios I. Tsiropoulos, Panayotis G. Cottis
- [23] Επίδραση του εδάφους στα δίκτυα BPL Μέσης Τάσης , Μανουσάκης Μιχάλης, 2008
- [24] Capacity of overhead Medium Voltage Power Line Communications Channels, A. G. Lazaropoulos, P. G. Cottis
- [25] Δικτύωση Υπολογιστών, Προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω με έμφαση στο διαδίκτυο James F. Kurose, Keith W. Ross
- [26] Δίκτυα υπολογιστών, Andrew Tanenbaum
- [27] Hybrid Wireless-Broadband over Power Lines: A Promising Broadband Solution in Rural Areas, Angeliki M. Sarafi, Georgios I. Tsiropoulos and Panayotis G. Cottis