



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΤΜΗΜΑ ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ  
ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**Προσομοίωση Δικτύων Υψηλών Ταχυτήτων με Χρήση NS-2**

**Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**

Μαρία Δ. Κόνιαρη

**Επιβλέπων:** Παναγιώτης Δεμέστιχας

Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

Πειραιάς, Μάιος 2010

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΙΑ

## Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι αρχικά η μελέτη των ασύρματων ευρυζωνικών τεχνολογιών WiFi, WiMax και UMTS με στόχο να εξετάσουμε στη συνέχεια τη διαδικτύωση ετερογενών ασύρματων δικτύων. Συγκεκριμένα, να μελετήσουμε εκτενέστερα τη διαπομπή μεταξύ των προαναφερθέντων διαδικτυωμένων ετερογενών δικτύων σύμφωνα με τη χρήση του προτύπου IEEE 802.21.

Η παρούσα εργασία είναι διαρθρωμένη σε 8 κεφάλαια:

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο έχουμε μια σύντομη εισαγωγή. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην αρχιτεκτονική του προτύπου IEEE 802.11 και στις βασικές υπηρεσίες που μας προσφέρει. Μετέπειτα, αναφερόμαστε στις προδιαγραφές του φυσικού στρώματος του και στο στρώμα ελέγχου του μέσου καθώς επίσης και σε θέματα ποιότητας υπηρεσίας και ασφάλειας που παρέχει.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για το πρότυπο IEEE 802.16, τόσο για την αρχιτεκτονική του όσο και για τους τύπους καναλιών που χρησιμοποιεί. Αναλύεται διεξοδικά η διαστρωμάτωση του προτύπου δίνοντας μεγάλη έμφαση στο φυσικό στρώμα και στο στρώμα ελέγχου του μέσου. Τέλος, αναφερόμαστε στο τρόπο που λειτουργεί το πρότυπο WiMAX, στην ποιότητα υπηρεσίας και στην ασφάλεια που παρέχει.

Στο τέταρτο κεφάλαιο κατά τον ίδιο τρόπο αναλύεται και το UMTS δίκτυο. Με ιδιαίτερη αναφορά στην αρχιτεκτονική του δικτύου και τα interfaces που έχουν τα δίκτυα αυτά μεταξύ των δομικών τους στοιχείων. Επιπροσθέτως, γίνεται μία σύντομη ανάλυση των τριών διαφορετικών τύπων καναλιών του UTRAN και ολοκληρώνουμε το κεφάλαιο με την ανάλυση της ποιότητας υπηρεσίας και ασφάλειας που μας παρέχει.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στην προσομοίωση και αναλύουμε κάποια από τα βασικά εργαλεία προσομοίωσης για μελέτη δικτύων, όπως το OMNET++, το OPNET και τον NS-2. Ο NS-2 αποτέλεσε και εργαλείο προσομοίωσης για τα σενάρια της παρούσας εργασίας, ένα εργαλείο ευρέως διαδεδομένο στην πανεπιστημιακή κοινότητα.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τους λόγους για τους οποίους η ενσωμάτωση διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών είναι αναγκαία. Καθώς επίσης αναλύουμε το πρότυπο IEEE 802.21 όπου αποτελεί και την λύση για την διαπομπή σε ετερογενή δίκτυα.

Στο έβδομο κεφάλαιο έχουμε την καταγραφή των σεναρίων των προσομοιώσεων μας. Αναλύουμε τα αποτελέσματα από την διαπομπή με χρήση του προτύπου 802.21, ενός (1), πέντε (5) και δέκα (10) κινητών τερματικών μεταξύ διαδίκτυωμένων διαφορετικών τύπων δικτύων. Τέλος, εξετάζουμε το μέσο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων και την από άκρο σε άκρο μέση καθυστέρηση που μπορεί να έχουμε πριν, κατά τη διάρκεια της μεταπομπής και μετά.

Τέλος, καταγράφονται τα συμπεράσματα της έρευνας και εξετάζεται αν τα συμπεράσματα ανταποκρίνονται στους αρχικά επιδιωκόμενους στόχους.

## Ευχαριστίες

Με την ευκαιρία συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που χωρίς την πολύτιμη βοήθεια τους δε θα ήταν εφικτή η περάτωση της.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμότατα τον καθηγητή μου, κύριο **Παναγιώτη Δεμέστιχα**, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστούμε καθώς και για την αμέριστη και συνεχή συμπαράσταση και εμπιστοσύνη που έδειξε τόσο καιρό στο πρόσωπό μου και στη δουλειά μου.

Επίσης, θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον υποψήφιο διδάκτορα Μάριο Λογοθέτη για τις πολύτιμες συμβουλές του, τις γνώσεις που μου μετέδωσε και τα σχόλια του που ήταν καίρια ώστε να φέρω εις πέρας την εργασία μου.

Επιπλέον, δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτρια και φίλη μου Αλεξάνδρα Μιχώτα για τη διαρκή συμπαράσταση και βοήθεια που μου πρόσφερε στο να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία και την ευχαριστώ και για τα ωραία φοιτητικά χρόνια που έχουμε περάσει

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική στήριξη και αγάπη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησης μου στο πανεπιστήμιο.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	3
Ευχαριστίες .....	5
Περιεχόμενα .....	6
Κατάλογος Πινάκων .....	9
Κατάλογος Σχημάτων.....	10
Συντομογραφίες .....	12
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>16</b>
1.1. Εισαγωγή.....	16
<b>2. IEEE 802.11 – WiFi.....</b>	<b>18</b>
2.1. Εισαγωγή.....	18
2.2. Αρχιτεκτονική – Τοπολογία Δικτύου .....	18
2.2.1. Ανεξάρτητα Δίκτυα.....	19
2.2.2. Δίκτυα Υποδομής.....	19
2.3. Βασικές Υπηρεσίες του IEEE 802.11 .....	20
2.4. Στοίβα Πρωτοκόλλων του IEEE 802.11 .....	21
2.5. Φυσικό στρώμα στο IEEE 802.11 .....	24
2.5.1. Infrared (Υπέρυθρες Ακτίνες) .....	24
2.5.2. Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS & Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS .....	24
2.6. Στρώμα Ελέγχου του Μέσου στο IEEE 802.11 .....	26
2.6.1. DCF (Distribution Coordination Function).....	26
2.6.2. PCF (Point Coordination Function) .....	26
2.7. Ποιότητα Υπηρεσίας στο IEEE 802.11 .....	27
2.7.1. EDCF (Enhanced Distribution Function).....	27
2.7.2. HCF (Hybrid Coordination Function).....	28
2.8. Ασφάλεια στο IEEE 802.11 .....	28
2.9. Υποπρότυπα του IEEE 802.11 .....	29
<b>3. IEEE 802.16 – WiMAX.....</b>	<b>31</b>
3.1. Εισαγωγή.....	31
3.2. Αρχιτεκτονική – Τοπολογία Δικτύου .....	33
3.3. Στοίβα Πρωτοκόλλου του IEEE 802.16 .....	34

3.4.	Φυσικό Στρώμα στο IEEE 802.16.....	35
3.4.1.	IEEE 802.16.....	35
3.4.2.	IEEE 802.16 a/ d.....	36
3.4.3.	Διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)...	37
3.5.	Στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης στο μέσο στο IEEE 802.16.....	39
3.6.	Ποιότητα Υπηρεσίας στο IEEE 802.16.....	40
3.7.	Ασφάλεια στο IEEE 802.16.....	41
3.8.	Υποπρότυπα του IEEE 802.16.....	42
<b>4.</b>	<b>UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).....</b>	<b>43</b>
4.1.	Εισαγωγή.....	43
4.2.	Αρχιτεκτονική του UMTS.....	44
4.2.1.	Interfaces.....	47
4.3.	Στρωματοποιημένη δομή του UMTS Air Interface.....	48
4.3.1.	Τα κανάλια του UTRAN.....	48
4.4.	Ποιότητα Υπηρεσίας του UMTS.....	52
4.5.	Ασφάλεια στο UMTS.....	53
<b>5.</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....</b>	<b>55</b>
5.1.	Εισαγωγή.....	55
5.2.	Εργαλεία Προσομοίωσης για Μελέτη Δικτύων.....	58
5.2.1.	OMNET++.....	58
5.2.2.	OPNET.....	59
5.2.3.	Network Simulator – 2 (NS - 2).....	60
<b>6.</b>	<b>ΔΙΑΠΟΜΠΗ ΜΕΤΑΞΥ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ IEEE 802.21.....</b>	<b>62</b>
6.1.	Εισαγωγή.....	62
6.2.	Διαδικτύωση Ετερογενών Ασύρματων Τεχνολογιών.....	62
6.3.	Πρότυπο IEEE 802.21.....	63
<b>7.</b>	<b>ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ &amp; ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>68</b>
7.1.	Εισαγωγή.....	68
7.2.	Σενάρια Προσομοίωσης και Παράμετροι Προσομοίωσης.....	68
7.3.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	76
<b>8.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>88</b>
8.1.	Εισαγωγή.....	88
8.2.	Συμπεράσματα.....	88

Βιβλιογραφική Αναφορά .....	90
<b>Παράρτημα .....</b>	<b>96</b>

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΙΑ



## Κατάλογος Πινάκων

<a href="#">Πίνακας</a> 3.1. Παραλλαγές του φυσικού στρώματος του WiMAX.....	37
<a href="#">Πίνακας</a> 4.1. Τα λογικά κανάλια του UTRAN .....	50
<a href="#">Πίνακας</a> 4.2. Τα κανάλια μεταφοράς του UTRAN .....	51
<a href="#">Πίνακας</a> 7.1. Παράμετροι του 802.11 για το πρώτο σενάριο προσομοίωσης.....	72
<a href="#">Πίνακας</a> 7.2. Παράμετροι του UMTS για το πρώτο σενάριο προσομοίωσης .....	72
<a href="#">Πίνακας</a> 7.3. Παράμετροι του 802.16 για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης.....	75
<a href="#">Πίνακας</a> 7.4. Παράμετροι του UMTS για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης.....	75

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Διάρθρωση Ανεξάρτητου Δικτύου .....	19
Σχήμα 2.2. Διάρθρωση Δικτύου Υποδομής.....	20
Σχήμα 2.3. Το μοντέλο OSI .....	22
Σχήμα 3.1. Τοπολογία, Point-to-Multipoint (PTM) & Point-to-Point (PTP) .....	33
Σχήμα 3.2: Δομή του PHY και του MAC στο WiMAX.....	35
Σχήμα 3.3. Τα υποεπίπεδα του επιπέδου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο .....	39
Σχήμα 4.1. Αρχιτεκτονική UMTS .....	45
Σχήμα 4.2 Αρχιτεκτονική UMTS.....	46
Σχήμα 4.3. Στρώματα του UMTS air interface .....	48
Σχήμα 4.4. Κανάλια, Λογικά / Μεταφοράς / Φυσικά.....	49
Σχήμα 6.1 Υπόδειξη ως προς το χρόνο για τη προσπάθεια προτυποποίησης του IEEE 802.21 .....	64
Σχήμα 6.2 MIIH σε ετερογενή δίκτυο πρόσβασης.....	65
Σχήμα 6.3 Πρότυπο IEEE802.21.....	67
Σχήμα 7.3 Avg. Throughput ενός χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi.....	78
Σχήμα 7.4 Avg. Throughput πέντε χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi.....	79
Σχήμα 7.5 Avg. Throughput δέκα χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi.....	79
Σχήμα 7.6 Σύγκριση Avg. Throughput για 1, 5 και 10 χρήστες στα δίκτυα Umts και Wifi.....	80
Σχήμα 7.7 Avg. End to End Delay ενός χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi.....	81
Σχήμα 7.8 Avg. End to End Delay πέντε χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi .....	82
Σχήμα 7.9 Avg. End to End Delay δέκα χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi .....	82
Σχήμα 7.10 Σύγκριση Avg. End to End Delay για 1, 5 και 10 χρήστες στα δίκτυα Umts και Wifi.....	83

Σχήμα 7.11 Avg. Throughput ενός χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax .....	84
Σχήμα 7.12 Avg. Throughput πέντε χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax .....	84
Σχήμα 7.13 Avg. Throughput δέκα χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax .....	85
Σχήμα 7.14 Σύγκριση Avg. Throughput για 1, 5 και 10 χρήστες στα δίκτυα Umts και WiMax .....	85
Σχήμα 7.15 Avg. End to End Delay ενός χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax .....	86
Σχήμα 7.16 Avg. End to End Delay πέντε χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax.....	86
Σχήμα 7.17 Avg. End to End Delay δέκα χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax.....	87
Σχήμα 7.18 Σύγκριση Avg. End to End delay για 1, 5 και 10 χρήστες στα δίκτυα Umts και WiMax .....	87

## Συντομογραφίες

Ακρόνυμο	Επεξήγηση
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
AIFS	Arbitrary Inter Frame Space
AK	Authorization Key
AP	Access Point
API	Application Programming Interfaces
ARQ	Automatic Repeat Request
BCCH	Broadcast Control Channel
BE	Best Effort
BER	Bit Error Rate
BM-SC	Broadcast/Multicast Service Center
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BSA	Basic Service Area
BSS	Base Service Set
CBR	Consant Bit Rate
CCCH	Common Control Channel
CP	Cyclic Prefix
CPS	Common Part Sublayer
CS	Convergence Sublayer
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidence
CTCH	Common Traffic Channel
CTS	Clear To Send
DCCH	Dedicated Control Channel
DCF	Distribution Coordination Function
DCH	Dedicated Channel
DES	Data Encryption Data
DFS	Dynamic Frequency Selection
DS	Distribution System
DSCH	Downlink Shared Channel

DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DTCH	Deticated Traffic Channel
EDCA	Enhanced Distribution Channel Access
ertPS	Enhanced Real-Time Polling Service
ESS	Extend Service Set
FACH	Forward Access Channel
FDD	Frequency Division Duplexing
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FTP	File Transfer Protocol
GFSK	Gaussian FSK
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GTP	GPRS tunneling protocol
HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
HMAC	Hashed Message Authentication Code
HR-DSSS	High Rate DSSS
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HS-DSCH	High – Speed DSCH
HSPDA	High-Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IBSS	Independent Basic Service Set
ICI	Inter-Carrier Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEFT	Internet Engineering Task Force
ISDN	Integrated Services Digital Network
LAC	Link Access Control
LLC	Logic Link Control
LOS	Line Of Size
MAC	Medium Access Control
MICS	Media Independent Command Services
MIES	Media Independent Event Services

MIH	Media Independent Handover
MIHF	Media Independent Handover Function
MIHU	MISH User
MIIS	Media Independent Information Services
NAM	Network Animator
ND	Neighbour Discovery
NLOS	Non Line Of Sight
NRTPS	Non Real-Time Polling Service
NS	Network Simulator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open System Interconnection
PCCH	Padding Control Channel
PCF	Point Coordination Function
PDN	Public Data Network
PDP	Packet Data Protocol
PHY	Physical Layer
PKM	Private Key Management
PLCD	Physical Layer Convergence Procedure
PMD	Physical Medium Dependent
PoA	Point of Attachment
PoS	Point of Service
PS	Packet-Switched
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTM	Point To Multipoint
PTP	Point To Point
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QSTA	QoS STation
RA	Router Advertisements
RAB	Radio Access Bearer
RACH	Random Access Channel
RED	Random Early Drop
RNC	Radio Network Controller

RS	Router Solicitation
RSA	Rivert – Shamir – Adleman
rtPS	Real-Time Polling Service
RTS	Request To Send
SAP	Service Access Point
SAP	CS service access point
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIM	Subscriber Identify Module
SIP	Session Initiation Proocol
SS	Subscriber Station
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal Equipment
TEIF	Tunnel Endpoint Identifier
TPC	Transmit Power Control
TXOP	Transmit Opportunities
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UGS	Unsolicited Grant Service
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS terrestrial radio-access network
W-CDMA	Wideband-Code Division Multiple Access
WEP	Wired Equivalent Privacy
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLANS	Wireless Local Area Networks
WMANs	Wireless Metropolitan Area Networks

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1. Εισαγωγή**

Στη σύγχρονη κοινωνία, το οικονομικό, βιομηχανικό, τεχνολογικό και πολιτιστικό περιβάλλον καθώς και οι συνθήκες ζωής μεταβάλλονται ραγδαία. Η άνθιση της τεχνολογίας και των εφαρμογών της είναι τεράστια ενώ παράλληλα οι απαιτήσεις και οι ανάγκες των πολιτών αλλά και των ίδιων των κρατών για παροχή προηγμένων υπηρεσιών ολοένα αυξάνουν. Στο σημερινό περιβάλλον υψηλής τεχνολογίας, η βάση πάνω στην οποία θα θεμελιωθεί η ανταγωνιστικότητα αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από προηγμένες δικτυακές υποδομές υψηλής ποιότητας, ορθολογικά κοστολογημένες, οι οποίες θα προσφέρουν επαρκείς ρυθμούς μετάδοσης και αδιάλειπτη λειτουργία στους χρήστες καθώς και εύκολη δυνατότητα πρόσβασης για την πλειοψηφία του πληθυσμού. Τα δίκτυα «ευρυζωνικής πρόσβασης» μπορούν να καλύψουν από τεχνολογικής σκοπιάς αυτές τις σύγχρονες απαιτήσεις και η ταχεία ανάπτυξη τους αποτελεί για όλα τα αναπτυγμένα και αρκετά αναπτυσσόμενα κράτη σημαντικό στρατηγικό στόχο.

Οι κυριότερες ευρυζωνικές τεχνολογίες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: τις ενσύρματες και τις ασύρματες. Οι ασύρματες τεχνολογίες με τις οποίες και θα ασχοληθούμε εκτενέστερα στα παρακάτω κεφάλαια χωρίζονται και αυτές με τις σειρά τους στις εξής επιμέρους τεχνολογίες.

Ασύρματες ευρυζωνικές τεχνολογίες:



- WiFi
- WiMax
- 3G/UMTS

Τα τελευταία χρόνια έχει ξεκινήσει έρευνα για τη χρήση ετερογενών δικτύων, δηλαδή τη συνύπαρξη πολλών από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες με σκοπό την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της καθεμιάς, ανάλογα με την περίπτωση. Ο στόχος είναι η παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας στο χρήστη και μεγαλύτερη διαθεσιμότητα σημείων πρόσβασης (αφού κάποια δίκτυα έχουν εμβέλεια σε περιοχές που τα άλλα δεν υπάρχουν). Με πιο απλά λόγια, εκεί που κάποιοι χρήστες θα αναγκάζονταν να αποκλειστούν λόγω έλλειψης δικτυακών πόρων, μπορούν να εξυπηρετηθούν μέσω άλλης τεχνολογίας, με ανάλογη αύξηση των κερδών των παρόχων (δικτύων και υπηρεσιών) και παράλληλη μείωση των ποσοστών δυσαρεστημένων χρηστών. Εκτός όμως από τις πολλές τεχνολογίες (άρα και τους πολλούς παροχείς δικτύων), είναι εφικτή και η συνύπαρξη πολλών παροχέων υπηρεσιών (που μπορεί να είναι και παροχείς δικτύων ταυτόχρονα), αφού η διαφορετικότητα των δικτύων επιτρέπει την προσφορά υπηρεσιών με μεγάλες ανισότητες στις απαιτήσεις τους. Έτσι, δημιουργείται ένα περιβάλλον δικτύων και υπηρεσιών, η σωστή λειτουργία του οποίου προϋποθέτει τη συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων παρόχων. [2][3]

## **2. IEEE 802.11 – WiFi**

### **2.1. Εισαγωγή**

Τον Ιούνιο του 1997, το Ινστιτούτο των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών – Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) κατέληξε στο αρχικό πρότυπο για ασύρματα δίκτυα Wireless Local Area Networks (WLANs), IEEE 802.11. Αυτό το πρότυπο προδιέγραφε ως συχνότητα λειτουργίας τα 2,4 GHz, με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 1 και 2 Mbps.

Αποτελεί το πρώτο πρότυπο για ασύρματη δικτύωση και ακολουθείται από τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα μέχρι και σήμερα. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα τα οποία είναι συμβατά με το πρότυπο IEEE 802.11 ονομάζονται και δίκτυα Wi-Fi «Wireless Fidelity» (Ψηφιακή Πιστότητα). [3]

### **2.2. Αρχιτεκτονική – Τοπολογία Δικτύου**

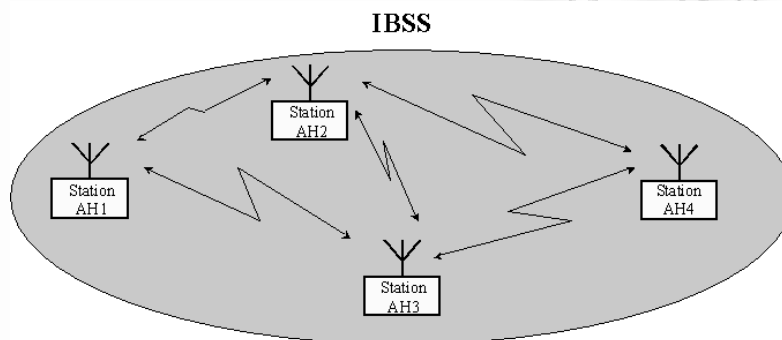
Η διάρθρωση ενός ασύρματου IEEE 802.11 δικτύου μπορεί να είναι πολύ απλή ως και αρκετά σύνθετη, παρουσιάζοντας εξαιρετική δυνατότητα κλιμάκωσης.

Ορίζονται δύο διαφορετικοί τρόποι διάρθρωσης δικτύου:

- τα ανεξάρτητα δίκτυα (independent networks)
- τα δίκτυα υποδομής (infrastructure networks)

### 2.2.1. Ανεξάρτητα Δίκτυα

Η πιο απλή διάρθρωση στην οποία το BSS (Basic Service Set - κυψέλη) αποτελείται από δύο ή περισσότερους ασύρματους κόμβους ή σταθμούς (STAs) και κάθε σταθμός επικοινωνεί απευθείας με όλους τους υπόλοιπους εφόσον βρίσκεται στη περιοχή ραδιοκάλυψής τους. Το BSS σε αυτή την περίπτωση αναφέρεται και ως IBSS (Independent Basic Service Set) ή ad-hoc BSS ή ad-hoc δίκτυο και είναι συνήθως προσωρινό, δηλαδή δημιουργείται για κάποιο σκοπό και στη συνέχεια διαλύεται. Πρόκειται για τον απλούστερο τύπο ασύρματου δικτύου.



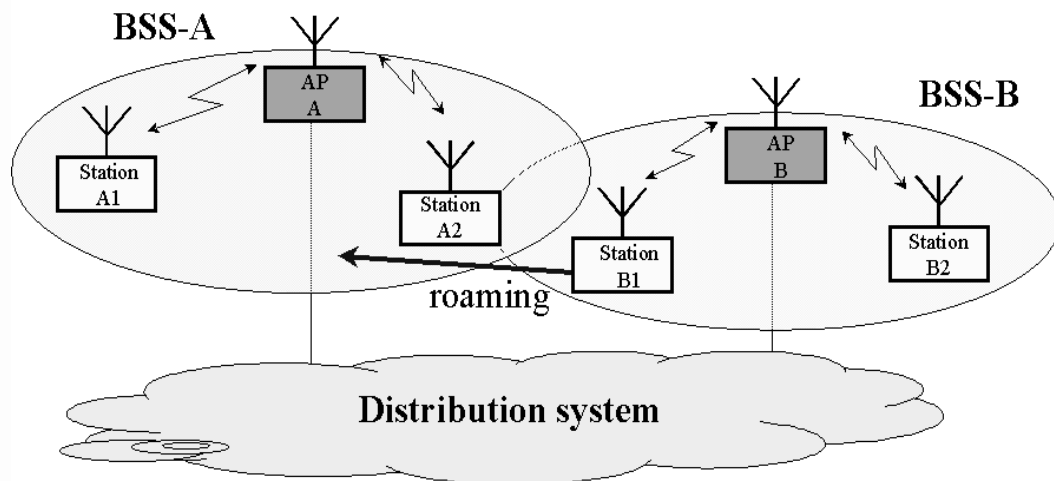
Σχήμα 2.1. Διάρθρωση Ανεξάρτητου Δικτύου

### 2.2.2. Δίκτυα Υποδομής

Ακολουθεί μια κυψελοειδή αρχιτεκτονική, όπου το δίκτυο χωρίζεται σε κυψέλες με κάθε κυψέλη να ονομάζεται BSS (Basic Service Set). Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει ένα σταθμό βάσης AP (Access Point) και ένα αριθμό από ασύρματους σταθμούς. Το AP παρέχει τη λειτουργία της μεταγωγής στο BSS. Έτσι όλοι οι σταθμοί επικοινωνούν κατευθείαν μόνο με το AP και αυτό μετáγει τα πακέτα από τον ένα σταθμό στον άλλον.

Τα AP συνδέονται μεταξύ τους ή/και με άλλα δίκτυα μέσω ενός δικτύου μετάδοσης το οποίο ονομάζεται DS (Distribution System). Η IEEE δεν προδιαγράφει την υλοποίηση αυτού του δικτύου. Έτσι αυτό μπορεί να είναι

Ethernet ενσύρματο, ασύρματο, ή και κάποια άλλη τεχνολογία. Το δίκτυο αυτό έχει τη μορφή ενός δικτύου κορμού (backbone). Έτσι τα AP παρέχουν την υπηρεσία της τοπικής πρόσβασης στους ασύρματους σταθμούς πελάτες, καλύπτοντας τα τελευταία εκατοντάδες μέτρα. Στην συνέχεια το δίκτυο κορμού μεταφέρει την πληροφορία από το ένα AP στο άλλο. Όλη η δομή δικτύου αυτή ονομάζεται ESS (Extended Service Set). [5][6][7]



Σχήμα 2.2. Διάρθρωση Δικτύου Υποδομής

### 2.3. Βασικές Υπηρεσίες του IEEE 802.11

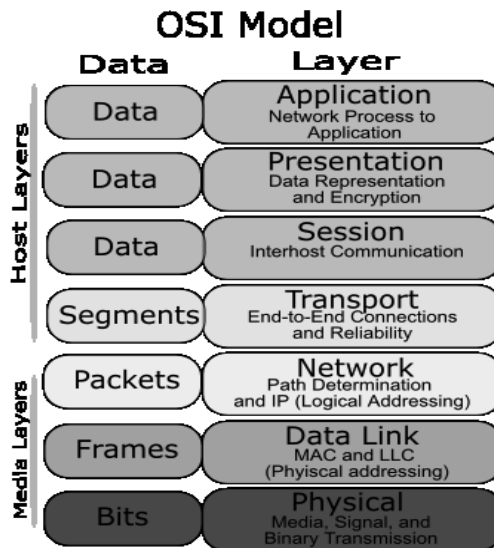
Το ασύρματο δίκτυο 802.11 προσφέρει εννέα βασικές υπηρεσίες:

- **Distribution:** Η υπηρεσία αυτή είναι απαραίτητη για την παράδοση ενός πλαισίου από το AP στον τελικό προορισμό του. Συνίσταται στον εντοπισμό του παραλήπτη, ώστε να γίνει εφικτή η τελική παράδοση του πλαισίου.
- **Integration:** Η υπηρεσία αυτή παρέχεται από το σύστημα διανομής. Είναι υπεύθυνη για τη διασύνδεση του συστήματος διανομής DS σε ένα δίκτυο διαφορετικό του 802.11. Στην ουσία είναι υπεύθυνη για την μετάφραση των πλαισίων από τον ένα τύπο στον άλλο.
- **MSDU Delivery:** Η παράδοση των πλαισίων MAC (MAC Service Data Unit) στον τελικό προορισμό τους.

- **Association:** Απαραίτητη διαδικασία συσχετισμού ενός σταθμού με το AP, προκειμένου να είναι σε θέση να στείλει και να δεχτεί πλαίσια μέσω του ασυρμάτου δικτύου.
- **Reassociation:** Χρησιμοποιείται από τους κινητούς σταθμούς σε περίπτωση μετακίνησης από ένα BSS σε άλλο.
- **Disassociation:** Η διαδικασία αυτή αφαιρεί έναν σταθμό από το δίκτυο. Το MAC του 802.11 μπορεί να χειριστεί και σταθμούς που εγκαταλείπουν το δίκτυο χωρίς να κάνουν πρώτα disassociation.
- **Authentication:** Αν απαιτείται από το διαχειριστή του δικτύου, πρέπει κάθε χρήστης να πιστοποιεί την ταυτότητά του πριν να προχωρήσει στη διαδικασία του association.
- **Deauthentication:** Τερματισμός μιας ισχύουσας κατάστασης authentication. Τερματίζει επίσης και το association, εφόσον το authentication είναι προαπαιτούμενο αυτού.
- **Privacy:** Λόγω του ασύρματου περιβάλλοντος μετάδοσης έχει οριστεί από το 802.11 μία προαιρετική υπηρεσία κρυπτογράφησης των δεδομένων που ονομάζεται WEP (Wired Equivalent Privacy). [8]

#### 2.4. Στοιβά Πρωτοκόλλων του IEEE 802.11

Καταρχήν για την καλύτερη κατανόηση των παρακάτω, θα παρουσιάσουμε εν συντομία το μοντέλο OSI (Open System Interconnection):



Σχήμα 2.3. Το μοντέλο OSI

- **Επίπεδο 1**, Φυσικό (Physical). Μεταφέρει σήματα στο φυσικό μέσο.
- **Επίπεδο 2**, Σύνδεσης ή Ζεύξης (Data Link). Αναλαμβάνει τον συγχρονισμό και έλεγχο της σωστής μεταφοράς δεδομένων κατά μήκος της φυσικής σύνδεσης.
- **Επίπεδο 3**, Επίπεδο Δικτύου (Network). Αναλαμβάνει λειτουργίες δρομολόγησης και μεταγωγής.
- **Επίπεδο 4**, επίπεδο Μεταφοράς (Transport). Χρησιμοποιεί τα επίπεδα 1 έως 3 (επίπεδα δικτύου) για να προσφέρει μια διαφανή (transparent) μεταφορά δεδομένων διαμέσου του δικτύου από το ένα σύστημα στο άλλο.
- **Επίπεδο 5**, επίπεδο Συνόδου (Session). Ελέγχει την εγκαθίδρυση και τον τερματισμό των συνδέσεων μεταφοράς. Αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ των στρωμάτων που έχουν σχέση με τη μεταφορά δεδομένων (επίπεδο 4) και αυτών που αφορούν τις εφαρμογές (επίπεδα 5-7).
- **Επίπεδο 6**, επίπεδο Παρουσίασης (Presentation). Αναλαμβάνει τον χειρισμό και τη μορφοποίηση των δεδομένων.
- **Επίπεδο 7**, επίπεδο Εφαρμογής (Application). Είναι το Ενδιάμεσο Επικοινωνίας (Interface) μεταξύ των εφαρμογών των τελικών χρηστών και των υπολοίπων επιπέδων.

Τα επίπεδα 1 έως 4 είναι προσανατολισμένα στη μεταφορά των δεδομένων και τα επίπεδα 1 έως 3 αφορούν υπηρεσίες που προσφέρονται από ένα δίκτυο. Τέλος, τα επίπεδα 4 έως 7 αφορούν λειτουργίες του τελικού χρήστη.

Το κάθε επίπεδο προσθέτει κατά την αποστολή στα δεδομένα που του έδωσε το προηγούμενο επίπεδο ένα "περίβλημα" έτσι ώστε το περιεχόμενο να είναι αδιαφανές για το επίπεδο που παρέχει την υπηρεσία. Το "περίβλημα" χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του πρωτοκόλλου του επιπέδου που το πρόσθεσε. Για παράδειγμα, σε ένα πακέτο που φεύγει από το επίπεδο 7 θα προστεθούν διαδοχικά πληροφορίες στην αρχή ή και στο τέλος και θα αφαιρεθούν διαδοχικά από το άλλο άκρο κατά την άφιξη, έτσι ώστε τα δεδομένα να φτάσουν στο επίπεδο 7 όπως στάλθηκαν. Οι πληροφορίες αυτές είναι διαφόρων ειδών όπως χαρακτήρες ελέγχου σφαλμάτων, διευθύνσεις κ.λπ. Αυτή η πράξη λέγεται ενθυλάκωση και γίνεται σε όλα τα πακέτα είτε αυτά προέρχονται από το αμέσως υψηλότερο επίπεδο είτε είναι πακέτα που δημιουργούνται κατά τον τεμαχισμό μεγαλύτερου πακέτου στο επίπεδο.

Όπως όλα τα 802.x πρότυπα, έτσι και το 802.11 επικεντρώνεται στα δύο χαμηλότερα στρώματα του μοντέλου OSI (Open System Interconnection), δηλαδή στο φυσικό στρώμα (Physical Layer-PHY) και στο υπόστρωμα MAC (Medium Access Control - Ελέγχου προσπέλασης Μέσων) του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων (Data Link Layer) .

Το υπόστρωμα MAC ορίζει πώς γίνεται η εκχώρηση του καναλιού, δηλαδή ποιος θα μεταδώσει στη συνέχεια. Το υπόστρωμα LLC (Logical Link Control-Ελεγχος Λογικού Συνδέσμου) του στρώματος Data Link βρίσκεται πάνω από το υπόστρωμα MAC, έχει υλοποιηθεί ως IEEE 802.2 και δουλειά του είναι να κρύβει τις διαφορές ανάμεσα στις διαφορετικές παραλλαγές του 802, έτσι ώστε να κάνει τις παραλλαγές αυτές "αόρατες" όσον αφορά το επίπεδο δικτύου.

Το πρότυπο του 1997 καθορίζει τρεις επιτρεπόμενες τεχνικές μετάδοσης για το φυσικό στρώμα (PHY). Η μέθοδος των υπερύθρων και άλλες δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούν ραδιοκύματα μικρής εμβέλειας χρησιμοποιώντας τεχνικές που ονομάζονται FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) και DSSS (Direct

Sequence Spread Spectrum). Και οι δύο χρησιμοποιούν ένα τμήμα του φάσματος στο οποίο δεν απαιτείται ειδική άδεια (τη ζώνη ISM στα 2,4 GHz). Το 1999 παρουσιάστηκαν δύο νέες τεχνικές για επίτευξη υψηλότερου εύρους ζώνης. Οι τεχνικές αυτές ονομάζονται OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και HR-DSSS (High Rate DSSS) και λειτουργούν μέχρι τα 54 Mbps και τα 11 Mbps αντίστοιχα. Το 2001 παρουσιάστηκε και μια δεύτερη τεχνική διαμόρφωσης OFDM, αλλά σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων από την πρώτη. [9][10]

## **2.5. Φυσικό στρώμα στο IEEE 802.11**

Το φυσικό επίπεδο αναλαμβάνει την μετάδοση των δεδομένων μεταξύ των κόμβων, αναλαμβάνοντας τις λειτουργίες όπως της διαμόρφωσης, λήψης και εκπομπής. Προδιαγράφονται τρεις τεχνικές διαμόρφωσης:

### **2.5.1. Infrared (Υπέρυθρες Ακτίνες)**

Η τεχνική των υπέρυθρων ακτινών δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα λόγω του χαμηλού εύρους ζώνης και του γεγονότος ότι το φως του ήλιου εξαφανίζει τα υπέρυθρα σήματα. Τα υπέρυθρα σήματα δεν μπορούν να διαπεράσουν τους τοίχους, έτσι οι κυψέλες (BSS) που βρίσκονται σε ξεχωριστά δωμάτια είναι καλά απομονωμένες η μία από την άλλη.

### **2.5.2. Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS & Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS**

Και η FHSS και η DSSS είναι τεχνικές εξάπλωσης απλωμένου φάσματος (spread spectrum). Και στις δύο υποστηρίζονται ρυθμοί μετάδοσης 1 και 2 Mbps στην ζώνη συχνοτήτων 2.4 – 2.4835 GHz. Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι δύο τεχνικές έχουν τις ρίζες τους σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπου η στιβαρότητα στη μετάδοση και η αντοχή σε παράσιτα είναι πρωταρχικοί στόχοι. Σήμερα έχουν παραδοθεί για εμπορική και βιομηχανική εκμετάλλευση.



**FHSS:** Η τεχνική Frequency Hopping Spread Spectrum στηρίζει τη λειτουργία της στη μεταπήδηση μεταξύ των συχνοτήτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα οι μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες που δεν γνωρίζουν σε ποιες συχνότητες θα πρέπει να συντονιστούν, να αποκόπτονται από την επικοινωνία. Μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου το διατιθέμενο φάσμα διαχωρίζεται σε ξεχωριστά κανάλια, που στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων που λειτουργούν στη συχνότητα των 2,4GHz ανέρχονται σε 79. Κατά την έναρξη της επικοινωνίας, ο πομπός και ο δέκτης "συμφωνούν" σε έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο για τη μεταπήδηση των συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να μπορούν να συντονίζονται ταυτόχρονα στη σωστή συχνότητα. Η τεχνική FHSS υλοποιήθηκε αρχικά από τον αμερικανικό στρατό, που αναζητούσε τρόπους προστασίας των ραδιοφωνικών εκπομπών του από υποκλοπές και ο αλγόριθμος στην αρχική μορφή του δεν ήταν τίποτε περισσότερο από διάτρητες καρτέλες που εισάγονταν στους πομπούς και στους δέκτες.

**DSSS:** Αργότερα, καθώς η ψηφιακή τεχνολογία αντικαθιστούσε τα αναλογικά συστήματα, αναπτύχθηκε μία νέα τεχνική που ονομάστηκε Direct Sequence Spread Spectrum. Με τη μέθοδο αυτή το σήμα δεν μεταπηδά από τη μία συχνότητα στην άλλη, αλλά αντίθετα διαμοιράζεται σε όλο το φάσμα των διατιθέμενων συχνοτήτων ταυτόχρονα. Για την ακρίβεια, η τεχνική DSSS χωρίζει το φάσμα συχνοτήτων σε 14 επικαλυπτόμενα κανάλια των 22MHz και χρησιμοποιεί ένα κανάλι κάθε φορά. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει υψηλότερο ρυθμό διαμεταγωγής, επειδή ο πομπός και ο δέκτης δεν χρειάζεται να συντονίζονται συνεχώς.

Και οι δύο τεχνικές παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στις παρεμβολές, αφού στην περίπτωση του FHSS το σήμα μεταπηδά μόνο σε ελεύθερες συχνότητες, ενώ στην περίπτωση του DSSS ο δέκτης μπορεί να λαμβάνει τη χρήσιμη πληροφορία διαχωρίζοντας τις παρεμβολές. Ο συνδυασμός και των δύο τεχνικών στον ίδιο περιβάλλοντα χώρο μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο δίκτυο που χρησιμοποιεί το πρότυπο FHSS, αφού δεν θα μπορεί να ανιχνεύσει καμία ελεύθερη συχνότητα. Αντίθετα, η παρουσία πολλαπλών δικτύων FHSS συνήθως δεν προξενεί προβλήματα, αφού είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου διαφορετικά σήματα θα τύχει να πέσουν πάνω στην ίδια συχνότητα. [11] [12] [13][14]

## 2.6. Στρώμα Ελέγχου του Μέσου στο IEEE 802.11

Πρόκειται για ένα αριθμό από πρωτόκολλα και σκοπό έχει να ελέγξει – ορίσει την χρήση του κοινόχρηστου μέσου διάδοσης (του ραδιοφωρέα) και την αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων. Οι λειτουργίες που προδιαγράφονται είναι οι ακόλουθες:

### Πρόσβαση των σταθμών στο φυσικό δίαυλο

Ορίζονται δύο τρόποι πρόσβασης:

#### 2.6.1. DCF (Distribution Coordination Function)

Αποτελείται βασικά από ένα μηχανισμό CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Σύμφωνα με αυτόν ένας σταθμός που επιθυμεί να εκπέμψει ανιχνεύει το ραδιοδίαυλο. Αν ο δίαυλος είναι ελεύθερος για ένα χρονικό διάστημα ο σταθμός εκπέμπει μετά από ένα τυχαίο χρονικό διάστημα. Αυτός ο τρόπος είναι ένας καλός συμβιβασμός ανάμεσα στην καθυστέρηση μετάδοσης και στην πιθανότητα συγκρούσεων των πακέτων. Ο δέκτης θα ελέγξει το λαμβανόμενο πακέτο και θα στείλει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης ACK. Αν ο αποστολέας δεν δεχτεί το μήνυμα ACK θα υποθέσει ότι έγινε μία σύγκρουση πακέτων και θα γίνει επανεκπομπή του από το MAC επίπεδο.

Επειδή σε μία κυψέλη μπορεί ένας σταθμός να μην μπορεί να ακούσει τους υπόλοιπους αλλά μόνο το AP, ορίζεται ένας μηχανισμός ανίχνευσης ιδεατής φέρουσας (virtual carrier sense). Σύμφωνα με αυτόν, ο σταθμός που επιθυμεί να εκπέμψει στέλνει ένα μήνυμα RTS (Request To Send) στο AP και αυτό του απαντά με ένα μήνυμα CTS (Clear To Send) αν ο ραδιοδίαυλος είναι κενός. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μία κράτηση του διαύλου για τον συγκεκριμένο σταθμό.

#### 2.6.2. PCF (Point Coordination Function)

Προαιρετικός τρόπος πρόσβασης, χρησιμοποιείται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου απαιτείται προνομιακή μεταχείριση έναντι της απλής μετάδοσης

δεδομένων. Σε αυτό το AP ερωτά κάθε ένα σταθμό ξεχωριστά εάν έχει δεδομένα προς μετάδοση. Με αυτόν τον τρόπο ένας σταθμός μπορεί να αποκτήσει μεγαλύτερης προτεραιότητας πρόσβαση. Το AP μοιράζει τον χρόνο του ανάμεσα στους δύο τρόπους πρόσβασης. [4][15]

## **2.7. Ποιότητα Υπηρεσίας στο IEEE 802.11**

Η επιτροπή IEEE παρουσίασε το πρωτόκολλο 802.11 το οποίο χρησιμοποιεί εναλλακτικούς μηχανισμούς για την ικανοποίηση εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Το PCF του 802.11 δεν προσέφερε ικανοποιητικό επίπεδο QoS λόγω του ότι παρουσίασε πολλά άλλα προβλήματα, όπως οι απροσδόκητες καθυστερήσεις των πλαισίων beacon , άγνωστοι (μεταβλητοί) χρόνοι μετάδοσης.

### **Μηχανισμοί Πρόσβασης:**

#### **2.7.1. EDCF (Enhanced Distribution Function)**

Το EDCF (Enhanced Distribution Function) είναι ένας από τους μηχανισμούς που χρησιμοποιεί το 802.11 για να προσφέρει αξιόπιστο Quality of Service (QoS). Το EDCF είναι η προτεινόμενη επέκταση στο DCF είναι το EDCF (Enhanced Distribution Function) το οποίο εισάγει την έννοια των "κατηγοριών κυκλοφορίας". Κάθε σταθμός που ανήκει στο BSS διαθέτει 8 κατηγορίες κυκλοφορίας δηλαδή επίπεδα προτεραιότητας. Χρησιμοποιώντας το EDCF οι σταθμοί προσπαθούν να μεταδώσουν δεδομένα μόλις ανιχνεύσουν ότι το μέσο είναι ανενεργό μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που ορίζεται από το αντίστοιχο επίπεδο προτεραιότητας και ονομάζεται AIFS (Arbitrary Inter Frame Space). Μία υπηρεσία υψηλότερης προτεραιότητας θα έχει μικρότερο AIFS από μία κατηγορία μικρότερης προτεραιότητας. Επομένως οι σταθμοί οι οποίοι μεταδίδουν δεδομένα υπηρεσίας που έχουν προτεραιότητα μικρότερη από κάποια άλλη πρέπει να περιμένουν περισσότερο χρόνο από ότι αυτή για αποκτήσουν τον έλεγχο του μέσου.

Για να αποφευχθούν συγκρούσεις μεταξύ σταθμών που εξυπηρετούν ίδιες υπηρεσίες (και άρα ίδιες προτεραιότητες), ο κάθε σταθμός περιμένει για ένα τυχαίο αριθμό χρονοσχισμών πριν μεταδώσει δεδομένα (που ονομάζεται παράθυρο ανταγωνισμού - contention window). Αν κάποιος σταθμός B μεταδώσει πριν ολοκληρωθεί η αντίστροφη μέτρηση του A, τότε ο A θα πρέπει να περιμένει για να μηδενιστεί το παράθυρο ανταγωνισμού για να μεταδώσει στην επόμενη διαθέσιμη χρονική σχισμή.

### **2.7.2. HCF (Hybrid Coordination Function)**

Η υβριδική λειτουργία συντονισμού (Hybrid Coordination Function) αντικαθιστά τα παραδοσιακά DCF και PCF σε σταθμούς οι οποίοι υλοποιούν το πρωτόκολλο 802.11e. Οι σταθμοί αυτοί ονομάζονται QSTA (QoS STations) και ο μηχανισμός είναι υποχρεωτικός σε αυτούς (και όχι προαιρετικός όπως ο PCF στο κλασικό 802.11). Μέσα στο HCF υπάρχουν δύο διαφορετικοί μηχανισμοί πρόσβασης, η Ενισχυμένη Διανεμημένη Πρόσβαση Καναλιών (Enhanced Distribution Channel Access - EDCA) και η Ελεγχόμενη Πρόσβαση Καναλιών (HCF Controlled Channel Access - HCCA). Σε αντίθεση με το PCF το οποίο χρησιμοποιούσε δύο διαφορετικές ακολουθίες ανταλλαγής πλαισίων την περίοδο με και χωρίς ανταγωνισμό, το HCF ορίζει ένα ενιαίο τρόπο ανταλλαγής πλαισίων. Το HCF δίνει στους σταθμούς (QSTAs) του δικτύου το δικαίωμα μετάδοσης μέσω των πλαισίων TXOP (Transmit Opportunities - "ευκαιρίες μετάδοσης"). Οι σταθμοί μπορούν να λάβουν τέτοια πακέτα από τους 2 μηχανισμούς πρόσβασης (EDCA - HCCA). Ένα TXOP δίνει την δυνατότητα σε ένα σταθμό να αποκτήσει τον έλεγχο του μέσου για καθορισμένο χρονικό σημείο στο μέλλον και για μία μέγιστη διάρκεια. [16][17]

## **2.8. Ασφάλεια στο IEEE 802.11**

Τα πρωτόκολλα 802.11 περιλαμβάνουν έναν προαιρετικό μηχανισμό πιστοποίησης κόμβων (μόνο για δομημένα δίκτυα) και κρυπτογράφησης δεδομένων, ονόματι WEP (Wired Equivalent Privacy), ο οποίος λειτουργεί ως

εξής: μετά τη συσχέτιση ενός σταθμού σε ένα BSS ο κόμβος στέλνει στο AP ένα αίτημα πιστοποίησης ταυτότητας. Το AP απαντά στέλνοντας του ένα τυχαίο κείμενο το οποίο ο κόμβος κρυπτογραφεί, χρησιμοποιώντας ένα κλειδί που έχει ρυθμιστεί από τους χρήστες του τοπικού δικτύου και είναι κοινό σε όλους τους κόμβους, και στέλνει πίσω στο σημείο πρόσβασης. Το AP επιβεβαιώνει ότι το κείμενο που έλαβε είναι η ορθά κρυπτογραφημένη, σύμφωνα με το σωστό κλειδί, εκδοχή αυτού που έστειλε και απαντά με μια επιβεβαίωση πιστοποίησης η οποία αναθέτει μία ταυτότητα στον κόμβο (η οποία γίνεται γνωστή και στους άλλους κόμβους). Από εκείνη τη στιγμή κι έπειτα ο σταθμός μπορεί να ανταλλάσει δεδομένα στο WLAN με την ταυτότητα αυτή. Όταν ο κόμβος επιθυμεί να αποχωρήσει από το δίκτυο στέλνει ένα αίτημα αποπιστοποίησης πριν την αποσυσχέτιση. Για την αποφυγή υποκλοπών τα δεδομένα που διακινούνται στο δίκτυο κρυπτογραφούνται με ένα κρυφό κλειδί 40-bit (το ίδιο με αυτό της πιστοποίησης). Στον παραλήπτη ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία. [18][19]

## 2.9. Υποπρότυπα του IEEE 802.11

- **IEEE 802.11a**

Χρησιμοποιεί τη ζώνη των 5 GHz και OFDM. Ταχύτητα μικρότερη των 54 Mbps.

- **IEEE 802.11b** (Χρησιμοποιείται στην Ελλάδα)

Χρησιμοποιεί τη ζώνη των 2.4 GHz και DSSS. Ταχύτητα μικρότερη των 11 Mbps.

- **IEEE 802.11e**

Παρέχει εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας.

- **IEEE 802.11f**

Κινητικότητα των σταθμών μέσα σε ένα IP δίκτυο (Intra-network Handover).

- **IEEE 802.11g**

Επεκτείνει το 802.11b ώστε να προσεγγίζει ταχύτητες υψηλότερες από 11 Mbps.

- **IEEE 802.11i**

Πρότυπο το οποίο μελετά θέματα ασφάλειας στα WLANs.

- **IEEE 802.11h**

Η ομάδα αυτή θα προσπαθήσει να εισάγει στο 802.11a την δυνατότητα για καλύτερο έλεγχο συγκρούσεων, καθώς και την λειτουργία Transmit Power Control (TPC) – Δυναμική Λειτουργία Καναλιών και Dynamic Frequency Selection (DFS) – Δυναμική Επιλογή Καναλιών. Μια συσκευή θα επιλέγει αυτόματα την ελάχιστη αναγκαία ισχύ εκπομπής πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε ανταλλαγή δεδομένων. [10]

### **3. IEEE 802.16 – WiMAX**

#### **3.1. Εισαγωγή**

Το Δεκέμβριο του 2001, η IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) υιοθέτησε το πρότυπο 802.16, για Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks – WMANs), γνωστό και σαν WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για ασύρματη πρόσβαση ευρείας ζώνης. Όπως είναι γνωστό όμως στις εταιρίες δεν επιτρέπεται να συμμετέχουν ενεργά στις ομάδες της IEEE μπορούν όμως να ιδρύσουν οργανισμούς οι οποίοι θα δοκιμάζουν τα πρωτόκολλα και θα εξετάζουν τη διαλειτουργικότητα τους. Καθώς, λοιπόν, οι ασύρματες επικοινωνίες είναι το πιο ενδιαφέρον τεχνολογικά κομμάτι των επικοινωνιών, δε φαντάζει περίεργο το να αναφέρουμε ότι μόλις παρουσιάστηκε και εγκρίθηκε το πρώτο μέρος του 802.16, αμέσως ιδρύθηκε και ένας οργανισμός που θα το εξέταζε και θα προσπαθούσε να το εκμεταλλευτεί. Το όνομα αυτού: WiMAX ή καλύτερα WiMAX Forum, όπως ονομάζεται η ένωση των εταιριών και γενικότερα των οργανισμών που εξετάζουν και παρακολουθούν στενά το WiMAX. Όπως συμβαίνει με τα πρότυπα της σειράς 802 για ασύρματα τοπικά δίκτυα, έτσι και το 802.16 καθορίζει μια οικογένεια προτύπων με επιλογές για συγκεκριμένες ρυθμίσεις.

Το πρότυπο IEEE 802.16 σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί σε μια ευρεία μπάντα συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 2 ως 66 GHz. Υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης ως και 72 Mbps στον αέρα ενώ η πραγματική ταχύτητα στο Ethernet

υπολογίζεται στα 50 Mbps. Οι αποστάσεις που μπορούν να καλυφθούν ξεπερνούν τα 50 Km σε συνθήκες οπτικής επαφής. Μια σημαντική διαφορά του προτύπου IEEE 802.16 σε σχέση με το IEEE 802.11 είναι ότι το πρώτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής φυσικά με ρυθμούς μετάδοσης πολύ χαμηλότερους των 50 Mbps. Το πρότυπο IEEE 802.16 είναι μια πολύ καλή εναλλακτική λύση ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης στις ήδη υπάρχουσες μεθόδους επικοινωνίας όπως οι καλωδιακές και οι ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές.

Ενώ οι περισσότερες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες αυτόν το καιρό για σταθερή ευρυζωνική ασύρματη υπηρεσία μπορούν μόνο να παρέχουν LOS (Line of Site: Ζεύξη με Οπτική Επαφή), η τεχνολογία WiMAX έχει αναπτυχθεί ώστε να παρέχει έξοχη κάλυψη NLOS (Non Line of Site: Ζεύξη χωρίς Οπτική Επαφή). Η προχωρημένη τεχνολογία WiMAX προσφέρει μεγάλες αποστάσεις κάλυψης ως και 50 χιλιόμετρα κάτω από συνθήκες LOS και τυπική κυψελωτή ακτίνα 8 χιλιομέτρων κάτω από συνθήκες NLOS.

Λόγω των μεγάλων αποστάσεων που καλύπτει και ταυτόχρονα τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που μπορεί να παρέχει, το πρότυπο WiMAX βρίσκει πολλές εφαρμογές, λύνοντας σημαντικά προβλήματα που απασχολούν τους τεχνικούς δικτύων μέχρι σήμερα. Τρεις είναι οι βασικότερες χρήσεις του:

**Δίκτυο κορμού στα κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας.** Η εισαγωγή του προτύπου αυτού αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος εξάπλωσης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας μιας και αποτελεί οικονομικότερη πρόταση, αν συγκριθεί με την οπτική ίνα, για τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας. Εξασφαλίζει ταυτόχρονα αξιοπιστία και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούν τα δίκτυα κορμού των κινητών δικτύων επικοινωνιών.

**Ευρύ φάσμα Συχνοτήτων κατά Απαίτηση (Broadband on Demand).** Παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης κάνοντας εφικτή τη χρήση της τεχνολογίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, κάτι που με το πρότυπο IEEE 802.11 σε μεγάλες αποστάσεις δεν ήταν εφικτό.

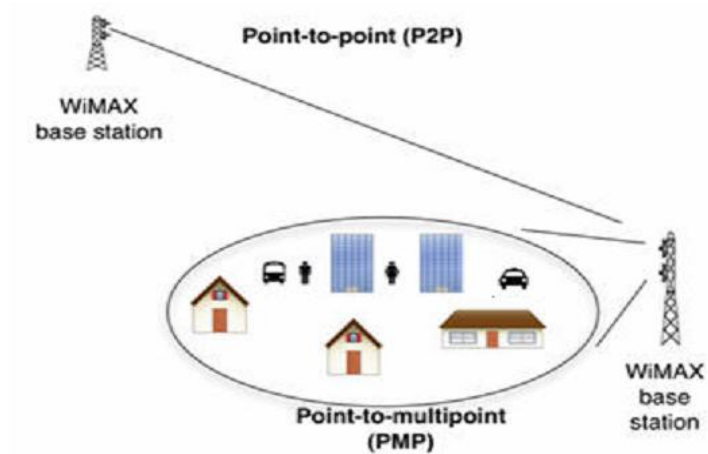
**Παρέχει κάλυψη σε περιοχές που είναι αδύνατο να καλυφθούν με χρήση χαλκού ή οπτικής ίνας.** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν συμπλήρωμα δικτύων



οπτικών ινών σε τμήματα του εδάφους στα οποία το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης δικτύων οπτικών ινών είναι απαγορευτικό. [20][21]

### 3.2. Αρχιτεκτονική – Τοπολογία Δικτύου

Το πρότυπο IEEE 802.16 σχεδιάστηκε κατά βάση ώστε να καλύπτει κυρίως συνδέσεις «Σημείου σε Πολλαπλά Σημεία» (Point-to-Multipoint, PTM) χωρίς ωστόσο να αποκλείεται και η χρήση του για συνδέσεις «Σημείο σε Σημείο» (Point-to-Point, PTP).



**Σχήμα 3.1.** Τοπολογία, Point-to-Multipoint (PTM) & Point-to-Point (PTP)

Το πιο ευρέως διαδεδομένο πρότυπο Ασύρματου Μητροπολιτικού δικτύου αυτή τη στιγμή είναι το 802.16a, που λειτουργεί στη μάντα των 2-11 GHz και δεν απαιτεί την ύπαρξη οπτικής επαφής. Το υποπρότυπο αυτό λειτουργεί παράλληλα με το 802.16 για να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη χρησιμοποίηση των συχνοτήτων και την τοπολογία του διαδικτύου.

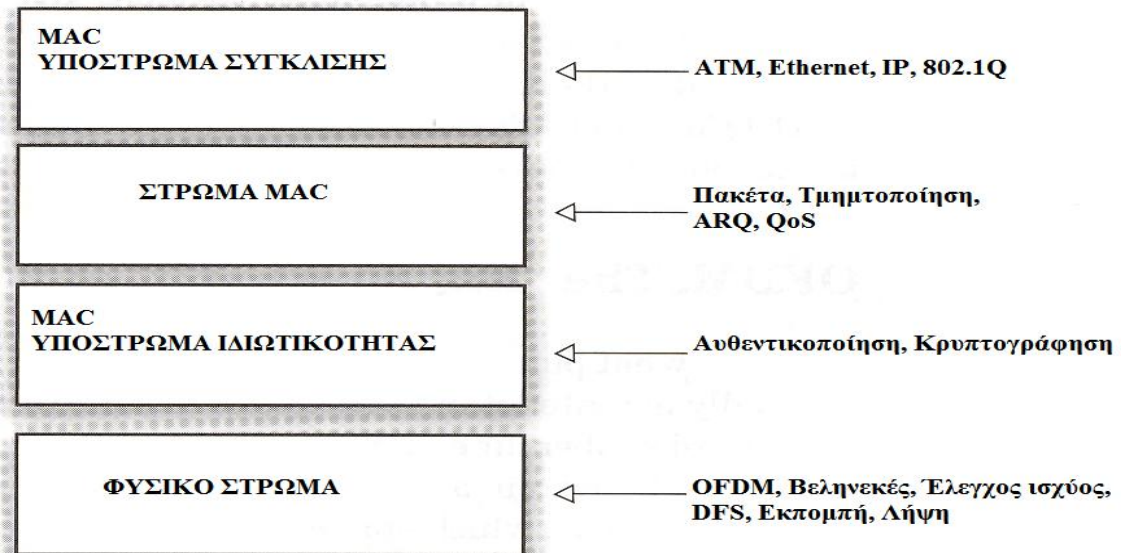
Μια σύνηθες αρχιτεκτονική του 802.16a, περιλαμβάνει ένα σταθμό βάσης τοποθετημένο σε κάποιο ψηλό κτίριο που επικοινωνεί με μια point-to-multipoint σύνδεση με τους χρήστες. Έχει εμβέλεια ως 30 Km περίπου, με μια τυπική ακτίνα κυνέλης στα 6-9 Km. Συνήθως ένας σταθμός βάσης επικοινωνεί με άλλους σταθμούς συνδρομητών (subscriber stations, SSs), οι οποίοι προσφέρουν

πρόσβαση σε κτίρια (γραφεία ή κατοικίες). Μέσα στην ακτίνα εμβέλειας, η χωρίς οπτική επαφή επίδοση είναι βέλτιστη. Με διαμοιραζόμενους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 75 Mbps, ένας απλός σταθμός βάσης μπορεί να παρέχει επαρκές εύρος ζώνης για να καλύψει επιχειρήσεις και εκατοντάδες σπίτια με ρυθμούς σύνδεσης εφάμιλλους με το DSL, χρησιμοποιώντας 20 MHz εύρους κανάλια.

Οι point-to-point συνδέσεις αναφέρονται γενικά σε μια σύνδεση που περιορίζεται σε δυο σημεία τέλους, συνήθως οικοδεσπότες (host) υπολογιστές. Επιπλέον στις νεότερες εκδόσεις του 802.16 προστέθηκε η δυνατότητα πολυγωνικής δικτύωσης (mesh networking), σύμφωνα με την οποία οι διάφοροι κόμβοι μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα και ως σταθμοί βάσης και ως σταθμοί συνδρομητών. [22][23]

### **3.3. Στοιβά Πρωτοκόλλου του IEEE 802.16**

Όπως όλα τα πρότυπα της σειράς 802 της IEEE, έτσι και το 802.16 γνωστό σαν WiMAX επικεντρώνεται στα δυο χαμηλότερα στρώματα του μοντέλου διαστρωμάτωσης OSI (Open System Interconnection) που ερμηνεύεται «Πρότυπο Διασύνδεσης Ανοιχτών Συστημάτων», δηλαδή το Φυσικό Στρώμα (Physical Layer-PHY) και στο Στρώμα Ελέγχου του Μέσου (Medium Access Control - MAC). Οι αλλαγές που εκτελέστηκαν στα δυο παραπάνω στρώματα σε σχέση με το πρότυπο 802.11 είναι σημαντικές. Οι αλλαγές αυτές έχουν σαν στόχο την δημιουργία ενός προτύπου το οποίο θα μπορούσε να καλύψει τα κενά που αφήνει ο προκάτοχος του (IEEE 802.11) και ταυτόχρονα να κάνει γεγονός την Ασύρματη Ευρυζωνική Πρόσβαση (Broadband Wireless Access).



Σχήμα 3.2: Δομή του PHY και του MAC στο WiMAX

### 3.4. Φυσικό Στρώμα στο IEEE 802.16

Το φυσικό επίπεδο στο WiMax διαφοροποιείται στον τρόπο πρόσβασης στο μέσο, από την αρχική έκδοση στις επόμενες IEEE 802.16a/d. Ο κύριος λόγος είναι ότι οι δύο εκδόσεις του προτύπου λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες και η μεν πρώτη είναι τεχνολογία LOS ενώ η δεύτερη δεν έχει ανάγκη για οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη.

#### 3.4.1. IEEE 802.16

Στην αρχική σχεδίαση του φυσικού επιπέδου, οι συχνότητες λειτουργίας ανήκουν στο εύρος 10-66 GHz, με την ανάγκη για οπτική επαφή μεταξύ SS (Subscriber Station) και BS (Base Station). Έτσι έχει επιλεγθεί η διαμόρφωση μοναδικού φέροντος (Wireless MAN-SC). Ο BS αρχικά μεταδίδει ένα σήμα που είναι πολυπλεγμένο στο χρόνο (TDM signal) και ο κάθε SS ξεχωριστά δεσμεύει σειριακά τα slots. Η πρόσβαση στο uplink γίνεται μέσω της πολλαπλής πρόσβασης διαιρεμένου χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) στην

οποία ο κάθε SS, αποστέλλει πληροφορία μόνο στα χρονικά διαστήματα που του έχουν ανατεθεί από τον BS.

Το πρότυπο έχει επιλέξει έναν ευέλικτο τρόπο για τη συνύπαρξη των καναλιών αποστολής και παραλαβής. Πιο συγκεκριμένα, επιτρέπει τη διαίρεση στο χρόνο (Time Division Duplexing, TDD), στην οποία το uplink και το downlink μοιράζονται το ίδιο κανάλι αλλά δεν μεταδίδουν ταυτόχρονα. Πράγματι, σε αυτή την περίπτωση συνήθως προηγούνται τα χρονικά slots για το downlink και έπονται τα slots για το uplink. Επίσης, το πρότυπο επιτρέπει και τη διαίρεση στη συχνότητα για το downlink και uplink (Frequency Division Duplexing, FDD), στην οποία το downlink και uplink λειτουργούν σε διαφορετικά κανάλια και θεωρητικά μεταδίδουν ταυτόχρονα. Επίσης, υπάρχει υποστήριξη και για half-duplex FDD, στην οποία το uplink και downlink λειτουργούν σε διαφορετικά κανάλια, ωστόσο δεν μεταδίδουν και λαμβάνουν ταυτόχρονα, ώστε ο πομπός και ο δέκτης να είναι πιο απλές συσκευές.

#### 3.4.2. IEEE 802.16 a/ d

Στη συγκεκριμένη έκδοση του προτύπου, το φυσικό επίπεδο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργεί στο φάσμα συχνοτήτων 2-11GHz και χωρίς την ανάγκη για οπτική επαφή. Έτσι, ενώ αρχικά οι κεραιές θα έπρεπε να είναι σε ψηλό σημείο με οπτική επαφή, τώρα σε αυτό το πρότυπο θα μπορούσαν απλά να είναι στην οροφή ενός κτιρίου ακόμα και μέσα στο διαμέρισμα. Επόμενο είναι, να υπάρξει πολυοδική εξασθένιση που δημιουργεί σημαντικά πρόβλημα. Έτσι έχουν δημιουργηθεί τρεις διαφορετικές προδιαγραφές σε σχέση με το φυσικό επίπεδο:

- **Wireless MAN-SCa:** χρησιμοποιεί διαμόρφωση μοναδικού φέροντος.
- **Wireless MAN-OFDM:** χρησιμοποιεί πολύπλεξη με ορθογώνια διαίρεση φάσματος και με 256 σημεία στον FFT (Fast Fourier Transform). Εδώ η πρόσβαση γίνεται χρησιμοποιώντας TDMA. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση προορίζεται για αδειοδοτημένες περιοχές φάσματος.
- **Wireless MAN-OFDMA:** χρησιμοποιεί πολλαπλή πρόσβαση με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας και με 2048 σημεία στον FFT. Εδώ η πολλαπλή πρόσβαση

είναι εφικτή απλά κατευθύνοντας ένα υποσύνολο από χρήστες σε ξεχωριστούς δέκτες. [1][24][25][27]

**Πίνακας 3.1.** Παραλλαγές του φυσικού στρώματος του WiMAX

Όνομασία	Λειτουργία	LOS / NLOS	Συχνότητα	Duplexing
WirelessMAN-SC	Point-to-Point	LOS	10-66 GHz	TDD, FDD
WirelessMAN-SCa	Point-to-Point	NLOS	2-11 GHz	TDD FDD
WirelessMAN-OFDM	Point-to-Multipoint	NLOS	2-11 GHz	TDD FDD
WirelessMAN-OFDMA	Point-to-Multipoint	NLOS	2-11 GHz	TDD FDD
Wireless HUMAN	Point-to-Multipoint	NLOS	2-11 GHz	TDD

### 3.4.3. Διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) είναι ένα σχήμα διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων συχνοτήτων που κωδικοποιεί δεδομένα σε ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα. Αντίθετα, από τα σχήματα διαμόρφωσης με μοναδικό φέροντα όπου μόνο ένα σήμα στο χρόνο μπορεί να χρησιμοποιεί τη συχνότητα, το OFDM στέλνει πολλαπλά σήματα παράλληλα σε συχνότητες που είναι ειδικά υπολογισμένες να είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Ουσιαστικά, τα εισερχόμενα δεδομένα διαιρούνται σε πολλαπλά παράλληλα σε μικρότερες ροές δεδομένων μειωμένου ρυθμού και στη συνέχεια κάθε ροή διαμορφώνεται και μεταδίδεται ξεχωριστά ορθογώνια ως προς τις άλλες συχνότητες.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του OFDM είναι το επιπλέον bandwidth που αποκομίζει. Στην κλασική διαίρεση συχνότητας, το συνολικό bandwidth διαιρείται σε διάφορα υποκανάλια, τα οποία όμως περιέχονται μέσα σε διαστήματα ασφαλείας, έτσι ώστε να μειώνονται οι παρεμβολές μεταξύ των υποκαναλιών. Στο OFDM επειδή οι συχνότητες των υποκαναλιών είναι κατάλληλες επιλεγμένες έτσι ώστε

να είναι ορθογώνιες, αυτά τα διαστήματα ασφαλείας δεν είναι απαραίτητα και επομένως παραλείποντας τα, κερδίζουμε επιπλέον bandwidth.

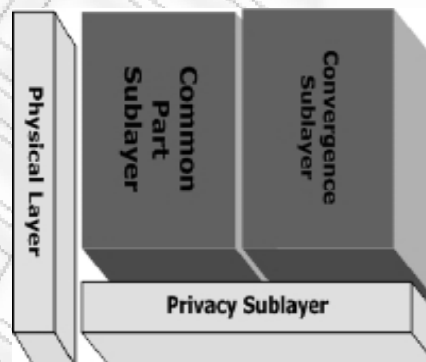
Το μεγάλο μειονέκτημα του OFDM είναι η απαιτητικότητα του για μεγάλο συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη. Οποιαδήποτε έλλειψη συγχρονισμού μετατρέπει τις φερόμενες συχνότητες σε μη ορθογώνιες, δημιουργώντας το πρόβλημα γνωστό ως inter-carrier interference (ICI). Ένα από τις περιπτώσεις έλλειψης συγχρονισμού εμφανίζεται από την μετακίνηση του πομπού ή/και του δέκτη εξαιτίας του φαινομένου Doppler. Η κατάσταση μπορεί να επιδεινωθεί σε περιπτώσεις που το φαινόμενο του multipath propagation delay είναι ισχυρό.

Το OFDM βασίζεται σε μια βασική παρατήρηση ότι τα σχήματα με μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης συμβόλων υποφέρουν λιγότερο από προβλήματα παρεμβολών που δημιουργούνται από το multipath. Έτσι είναι πιο αποτελεσματικό να μεταδίδουμε έναν αριθμό από σύμβολα σε χαμηλό ρυθμό παράλληλα, παρά σε μοναδική ροή δεδομένων με υψηλό ρυθμό. Αναφορικά με τη διόρθωση του συγχρονισμού μεταξύ πομπού και δέκτη μία από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις είναι η εισαγωγή ενός διαστήματος φρουρού (guard interval) μεταξύ των συμβόλων OFDM. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μεταδίδεται το cyclic prefix (CP) το οποίο αποτελεί την αντιγραφή ενός κομματιού από το τέλος του OFDM συμβόλου. Ο λόγος που αντιγράφεται και αποστέλλεται ένα κομμάτι από το τέλος είναι να μετατρέψει το σήμα σε περιοδικό το οποίο καταστέλλει τις παρεμβολές από το multipath propagation. Το βασικό μειονέκτημα του CP είναι ότι δημιουργεί ένα overhead και έτσι μειώνεται το bandwidth.

Η αποκωδικοποίηση του σήματος γίνεται χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) και με τεχνικές άμεσης διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction, FEC). Η τεχνική FEC επιτρέπει στο δέκτη να διορθώσει έναν αριθμό λαθών χωρίς να ζητήσει επαναμετάδοση της πληροφορίας μιας και το μέσο είναι ασύρματο. Η τεχνική FEC, βασίζεται σε επιπλέον bits που έχουν προστεθεί ως overhead στο αρχικό μήνυμα και έτσι ο δέκτης όχι μόνο μπορεί και ανιχνεύει έναν αριθμό λαθών αλλά μπορεί να υπολογίζει ποιο είναι το πιθανότερο μήνυμα που ήθελε να μεταδώσει ο αποστολέας. [26]

### 3.5. Στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης στο μέσο στο IEEE 802.16

Γενικότερα, το IEEE 802.16 Medium Access Control (MAC) επίπεδο λειτουργεί όπως ένα κλασικό MAC επίπεδο που στόχο του έχει να ελέγχει την πρόσβαση στο μέσο. Όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση το μέσο είναι ασύρματο και έτσι θα πρέπει επιπλέον, να διαχειρίζεται αποδοτικά τους πόρους. Το IEEE 802.16 MAC χρησιμοποιεί συνδέσεις (connection oriented) ανεξάρτητα από το πιο είναι το παραπάνω επίπεδο. Έτσι κάθε SS δημιουργεί μία ή περισσότερες συνδέσεις για την επικοινωνία του με τον BS. Αυτό επιτρέπει στο WiMAX να διαχειρίζεται καλύτερα τις προδιαγραφές του χρήστη σε σχέση με τις υπηρεσίες. Το IEEE 802.16 MAC έχει δημιουργηθεί με στόχο να εξυπηρετεί εκατοντάδες συνδέσεις από εκατοντάδες χρήστες και επιπλέον να ικανοποιεί τις επιλεγμένες προδιαγραφές. Εκτός από τον χρονοπρογραμματισμό του μέσου για την παροχή QoS, οι ενέργειες του IEEE 802.16 MAC περιλαμβάνουν λειτουργίες προσαρμογής της ζεύξης (Radio Link Control), αυτόματης επανάληψης αιτήματος (Automatic Repeat Request - ARQ) έτσι ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός λάθους (Bit Error Rate - BER).



**Σχήμα 3.3.** Τα υποεπίπεδα του επιπέδου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο

Επειδή το WiMAX έχει προτυποποιηθεί για να μπορέσει να συνδέσει και να εξυπηρετήσει διαφορετικά δίκτυα, όπως για παράδειγμα IP και ATM δίκτυα, έχουν δημιουργηθεί επιπλέον επίπεδα στο εσωτερικό του data link. Συνεπώς το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο διαιρείται σε 3 υποεπίπεδα: το υποεπίπεδο σύγκλισης υπηρεσιών (Service Specific Convergence Sublayer - CS) παρέχει οποιοσδήποτε μετασχηματισμό και αντιστοιχία εξωτερικών δεδομένων που

λαμβάνονται από το σημείο πρόσβασης του CS (CS service access point - SAP) προερχόμενα από το επίπεδο δικτύου. Το CS τοποθετείται στην κορυφή του επιπέδου που περιέχει το κοινό κομμάτι του IEEE 802.16 MAC (Common Part Sublayer - CPS). Ουσιαστικά το CS είναι μια διεπαφή του IEEE 802.16 με τα υψηλότερα στρώματα. Το CPS παρέχει τη βασική λειτουργικότητα του MAC αναφορικά με την πρόσβαση στο σύστημα, δέσμευση bandwidth, δημιουργία των συνδέσεων για αποστολή δεδομένων και έλεγχο και διατήρηση της σύνδεσης. Πιο αναλυτικά, το CS δέχεται δεδομένα από το υψηλότερο επίπεδο, συμπιέζει την επικεφαλίδα αν είναι ενεργοποιημένη η συμπίεση (Payload Header Suppression), τα κατηγοριοποιεί σύμφωνα με διάφορα κριτήρια απόδοσης και τα παραδίδει στο κατάλληλο SAP του CPS. Το CPS με τη σειρά του δημιουργεί μια MAC επικεφαλίδα και περνά τα δεδομένα προς το φυσικό επίπεδο σύμφωνα με τις απαιτήσεις του QoS που έχει συμφωνήσει ο χρήστης. Επιπλέον το τρίτο κατά σειρά επίπεδο εντός του MAC στρώματος είναι το υπόστρωμα ασφαλείας (Privacy Sublayer) το οποίο αναλαμβάνει να λειτουργίες αυθεντικοποίησης, κρυπτογράφησης και ανταλλαγής κλειδιών ασφαλείας. [1][24][25][27]

### 3.6. Ποιότητα Υπηρεσίας στο IEEE 802.16

Το IEEE 802.16 υποστηρίζει πέντε επίπεδα υπηρεσιών με στόχο να εξυπηρετήσει καλύτερα τον απαιτητικό χρήστη που αποζητά εγγυήσεις μετάδοσης των δεδομένων του. Οι πέντε διαφορετικές κλάσης διαφοροποιούνται από διάφορες παραμέτρους όπως είναι ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης, η καθυστέρηση και η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter).

- **Unsolicited Grant Service (UGS):** Το UGS σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει ροή υπηρεσιών πραγματικού χρόνου που παράγουν πακέτα δεδομένων σταθερού μεγέθους που στέλνονται ανά περιοδικά διαστήματα, όπως Voice over IP.

- **Real-Time Polling Service (rtPS):** Το rtPS σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει ροές υπηρεσιών πραγματικού χρόνου που παράγει πακέτα δεδομένων μεταβλητού μεγέθους που στέλνονται ανά περιοδικά διαστήματα, όπως MPEG video.



- **Enhanced Real-Time Polling Service (ertPS):** Είναι ένας συνδυασμός των UGS και rtPS υπό την έννοια ότι περιοδικά αποστέλλονται πακέτα, αλλά με μεταβλητό μέγεθος.
- **Non Real-Time Polling Service (nrtPS):** Το nrtPS σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει ροές μη πραγματικού χρόνου που απαιτούν παροχή δεδομένων με μεταβλητό μέγεθος που στέλνονται ανά τακτά διαστήματα, όπως FTP.
- **Best Effort (BE):** Καμιά εγγύηση δεν προσφέρεται. Ο χρήστης αυτής της υπηρεσίας χρησιμοποιεί το διαθέσιμο bandwidth από τις προηγούμενες. Είναι κατάλληλη για εφαρμογές που δεν είναι κρίσιμες στο χρόνο όπως email, web browsing και FTP. [1][24][25][27]

### 3.7. Ασφάλεια στο IEEE 802.16

Κάθε τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης και ιδιαιτέρως αυτή που προσφέρει μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης, θα πρέπει να εμπεριέχει ισχυρά πρωτόκολλα ασφαλείας, τα οποία εγγυώνται στους χρήστες ασφάλεια και εμπιστοσύνη για τις συναλλαγές τους. Επίσης, θα πρέπει αν υπάρχουν μηχανισμοί που θα αποτρέπουν τους κακεντρεχείς χρήστες να εισέλθουν στο δίκτυο και να υποκλέψουν πόρους. Το WiMAX χρησιμοποιεί έναν αριθμό από πολύ ανθεκτικούς αλγορίθμους για να αποτρέψει τα παραπάνω φαινόμενα. Σε κάθε SS είναι εγκατεστημένη μια ψηφιακή πιστοποίηση X.509 από τον κατασκευαστή όπως και η πιστοποίηση του ίδιου του κατασκευαστή. Οι πιστοποιήσεις αυτές αποστέλλονται στον BS και χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ της MAC διεύθυνσης του SS και του δημόσιου κλειδιού Rivest-Shamir-Adleman (RSA).

Ο BS αξιοποιεί τις πιστοποιήσεις που έχει δεχθεί από τον SS και καθορίζει από αυτές το επίπεδο του SS στο δίκτυο. Στην περίπτωση που ο SS είναι εξουσιοδοτημένος να εισέλθει στο δίκτυο, τον αυθεντικοποιεί περιλαμβάνοντας στην απάντησή του και ένα κλειδί αυθεντικοποίησης (Authorization Key - AK), το οποίο είναι κρυπτογραφημένο με το δημόσιο κλειδί του SS. Περιοδικά ο SS ανανεώνει αυτή τη πληροφορία για λόγους ασφαλείας.

Κατά τη διάρκεια των συναλλαγών, το IEEE 802.16 εγγυάται την μυστικότητα των δεδομένων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Private Key Management (PKM). Το PKM στηρίζεται στις πιστοποιήσεις X.509 και στην κρυπτογράφηση RSA για την αυθεντικοποίηση. Τα δεδομένα κρυπτογραφούνται χρησιμοποιώντας τουλάχιστον 56 bits στη μέθοδο κρυπτογράφησης Data Encryption Standard (DES), ενώ τα κλειδιά ανταλλάσσονται χρησιμοποιώντας το 3DES. Τέλος τα μηνύματα του PKM πρωτοκόλλου, πιστοποιούνται χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Hashed Message Authentication Code (HMAC). [1]

### **3.8. Υποπρότυπα του IEEE 802.16**

- **IEEE 802.16a**

Επέκταση του προτύπου στη ζώνη 2-11 GHz. Υποστήριξη συνδέσεων NLOS.

- **IEEE 802.16c**

Καλύπτει τη λειτουργία του προτύπου στη ζώνη συχνοτήτων 10-66 GHz σε συνθήκες οπτικής επαφής

- **IEEE 802.16d**

Παρέχει εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας

- **IEEE 802.16-2004**

IEEE 802.16a και IEEE 802.16c και IEEE 802.16d

- **IEEE 802.16e**

Το υποπρότυπο IEEE 802.16e εισάγει και περιγράφει την έννοια της κινητικότητας των χρηστών από ένα σταθμό βάσης σε άλλο. Στο υποπρότυπο αυτό ορίζεται ότι ένας κινητός χρήστης μπορεί να συνεχίσει να εξυπηρετείται από το δίκτυο ακόμα και αν κινείται με ταχύτητες οι οποίες προσεγγίζουν τα 120 Km/h. Ωστόσο η παραπάνω τιμή είναι ενδεικτική-πειραματική, καθώς μέχρι τη στιγμή αυτή δεν υπάρχει κάποιο διαθέσιμο προϊόν στην αγορά συμβατό με το IEEE 802.16e υποπρότυπο που να πιστοποιεί την προαναφερθείσα τιμή.[21]

## **4. UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)**

### **4.1. Εισαγωγή**

Ο όρος UMTS προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων "Universal Mobile Telecommunications System" (Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών). Πρόκειται για την εξέλιξη σε σχέση με την χωρητικότητα, την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και την ύπαρξη νέων υπηρεσιών, των κινητών δικτύων δεύτερης γενιάς. Σήμερα, περισσότερα από εξήντα 3G/UMTS δίκτυα που χρησιμοποιούν την πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (W-CDMA Wideband-Code Division Multiple Access) τεχνολογία λειτουργούν σε 25 χώρες. Για την οργάνωση του όλου εγχειρήματος έχει θεσπιστεί ειδικός μη κερδοσκοπικός οργανισμός με την ονομασία Third Generation Partnership Project (3GPP) του οποίου μέλημα είναι η παρακολούθηση και η καθοδήγηση των εξελίξεων στην συγκεκριμένη τεχνολογική περιοχή.

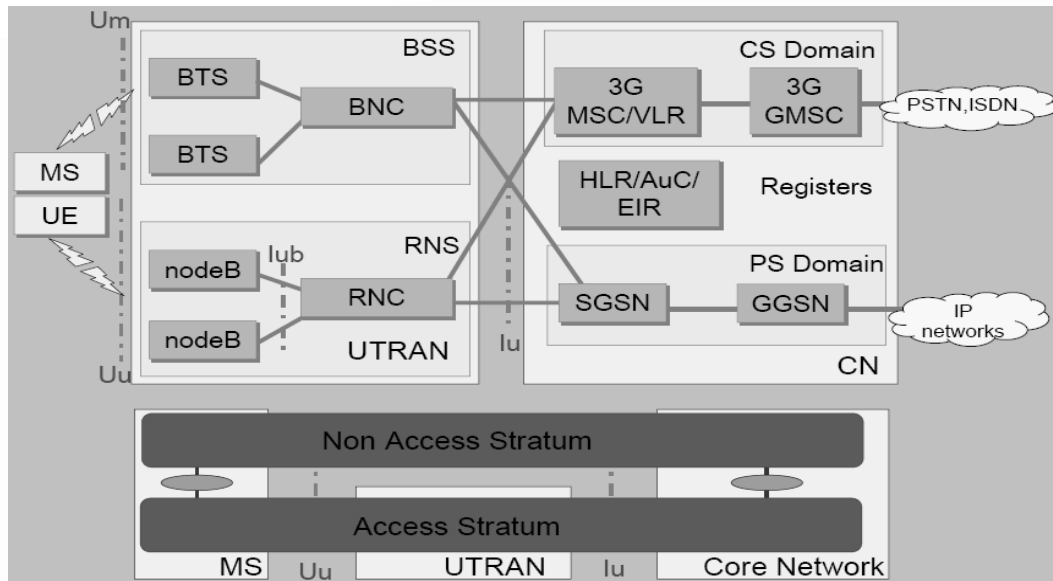
Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα των UMTS δικτύων ξεχωρίζουμε τους αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων και την ταυτόχρονη υποστήριξη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων και φωνής. Πιο συγκεκριμένα, το UMTS δίκτυο στην αρχική του φάση, θεωρητικά προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 384 kbps σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται αυξημένη κινητικότητα του χρήστη. Αντίθετα, όταν ο χρήστης παραμένει ακίνητος οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνουν κατά πολύ φθάνοντας την τιμή των 2 Mbps.

Εκτιμάται ότι στο μέλλον θα υπάρξει περαιτέρω αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Ήδη, ο 3GPP έχει θέσει σαν standard δύο νέες τεχνολογίες. Πρόκειται για το High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) και το High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες ουσιαστικά αποτελούν εξέλιξη του UMTS, αφού υπόσχονται ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων έως και 14,4 Mbps στο downlink και 5.8 Mbps στο uplink. [28][29]

## 4.2. Αρχιτεκτονική του UMTS

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός UMTS δικτύου. Πιο συγκεκριμένα λοιπόν, ένα δίκτυο UMTS αποτελείται από βασικές οντότητες:

- UE (User Equipment): Εξοπλισμός χρήστη.
- Το δίκτυο κορμού (CN - Core Network): Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση των τηλεφωνημάτων καθώς και για τις συνδέσεις για μεταφορά δεδομένων με εξωτερικά δίκτυα.
- Το δίκτυο επίγειας ασύρματης πρόσβασης (UTRAN - UMTS Terrestrial Radio Access Network): το UTRAN είναι υπεύθυνο για οτιδήποτε σχετίζεται με το ασύρματο μέρος του δικτύου.



**Σχήμα 4.1.** Αρχιτεκτονική UMTS

Το UE (User Equipment) αποτελείται από το κινητό τερματικό, τον εξοπλισμό τερματικού και την Subscriber Identify Module (SIM).

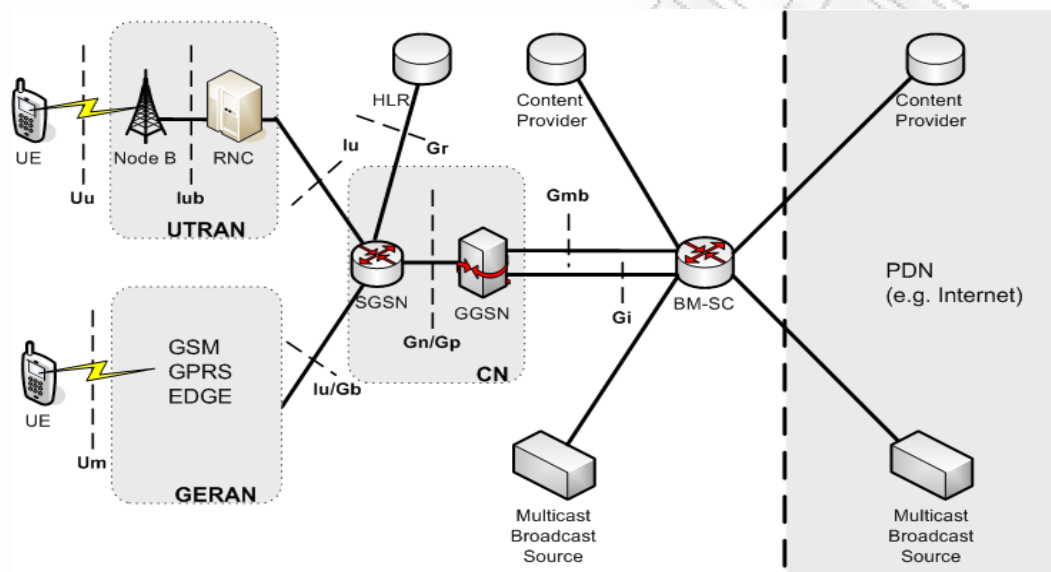
Το CN (core network) αποτελείται από δύο domains:

- Το circuit-switched (CS - μεταγωγή κυκλώματος), το οποίο παρέχει πρόσβαση στο Public Switched Telephone Network (PSTN) και το Integrated Services Digital Network (ISDN)
- Το packet-switched (PS - μεταγωγή πακέτου), το οποίο παρέχει πρόσβαση στα IP δίκτυα.

Το packet-switched (PS - μεταγωγή πακέτου) μέρος του UMTS δικτύου αποτελείται από δύο GPRS κόμβους υποστήριξης, τον Gateway GPRS Support Node (GGSN) όπου διασυνδέει τους κόμβους SGSNs με εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων όπως το X.25 και το Internet και τον Serving GPRS Support Node (SGSN) όπου είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών για τις υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων. Ο GGSN συνδέεται με τον SGSN μέσω της διεπαφής Gn και με το UTRAN μέσω της διεπαφής Iu.

Το UTRAN αποτελείται από τον ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης (RNC - radio network controller) και το Node B. Ο RNC είναι υπεύθυνος για το γενικό έλεγχο των λογικών πόρων που παρέχονται από τους Κόμβους-B καθώς επίσης ο RNC διαχειρίζεται τους πόρους του air interface μεταξύ των Κόμβων-B και των

σχετικών με αυτούς UE. Το Node B αποτελεί την βάση που προσφέρει κάλυψη στο αντίστοιχο κελί. Το Node B συνδέεται με τον εξοπλισμό του χρήστη (user equipment - UE) μέσω της διεπαφής Uu (βασισμένο στην τεχνολογία W-CDMA) και με το RNC μέσω της διεπαφής Iub. Επιπλέον, υπάρχει και ένας άλλος κόμβος σχετιζόμενος με τις υπηρεσίες broadcast/multicast (BM-SC - Broadcast/Multicast Service Center), ο οποίος λειτουργεί σαν το σημείο εισόδου για την παραλαβή των δεδομένων για εξωτερικές πηγές. Τα παραπάνω παρουσιάζονται καλύτερα στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.2 Αρχιτεκτονική UMTS

Προτού ένας χρήστης είναι σε θέση να ανταλλάξει δεδομένα με ένα εξωτερικό PDN (Public Data Network) πρέπει να εγκαθιδρύσει μία εικονική σύνδεση με αυτό το PDN. Από την στιγμή που ο συγκεκριμένος κινητός χρήστης γίνει γνωστός στο δίκτυο τα πακέτα μεταφέρονται μεταξύ αυτού και του δικτύου, βασισμένα στο Packet Data Protocol (PDP), το οποίο αποτελεί το πρωτόκολλο του επιπέδου δικτύου του UMTS. Ένα στιγμιότυπο του PDP ονομάζεται PDP context και περιέχει όλες τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την σύνδεση με το εξωτερικό δίκτυο όπως τις διευθύνσεις αποστολέα και παραλήπτη καθώς και την ποιότητα της υπηρεσίας. Ένα PDP context εγκαθιδρύεται για όλες τις εφαρμογές που κατευθύνονται προς ή προέρχονται από μία IP διεύθυνση. Μία ενεργοποίηση ενός PDP context ουσιαστικά αποτελεί μία διαδικασία αίτησης - απάντησης

μεταξύ του κινητού χρήστη (UE) και του GGSN. Μία επιτυχής PDP context ενεργοποίηση οδηγεί στην δημιουργία δύο GPRS Tunneling Protocol (GTP) συνόδων για τον εκάστοτε χρήστη. Η πρώτη GTP σύνοδος δημιουργείται μεταξύ του GGSN και του SGSN πάνω από την διεπαφή Gn, ενώ η δεύτερη δημιουργείται μεταξύ του SGSN και του RNC πάνω από την διεπαφή Iu. Τα IP πακέτα τα οποία προορίζονται για μία εφαρμογή χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα GTP contexts, προσαρτώνται σε αυτά και μέσω του PDP μεταφέρονται στο αντίστοιχο SGSN. Το SGSN ανακτά τα IP πακέτα, ζητά το κατάλληλο PDP context βασισμένο στο UE και στο PDP και προωθεί τα πακέτα στο κατάλληλο RNC. Παράλληλα, το RNC διατηρεί έναν φορέα ασύρματης πρόσβασης (RAB - Radio Access Bearer). Αντίστοιχα με τα PDP context, ένα RAB context επιτρέπει στο RNC να ανακτήσει την ταυτότητα του αποστολέα που έχει συσχετιστεί με ένα GTP. Αφού πλέον το RNC έχει ανακτήσει το πακέτο, το προωθεί στο κατάλληλο Node B. Τέλος, χρησιμοποιείται ένας Tunnel Endpoint Identifier (TEID) στις διεπαφές Gn και Iu έτσι ώστε να μπορεί να αναγνωριστεί το τέλος του tunnel στον κόμβο που δέχεται τα πακέτα. [30][31][32][33][34]

#### 4.2.1. Interfaces

Τα interfaces που έχουν τα δίκτυα αυτά μεταξύ των δομικών τους στοιχείων είναι τα ακόλουθα:

**Cu interface:** Είναι το interface μεταξύ της κάρτας (USIM) και του κινητού.

**Uu interface:** Είναι το interface μεταξύ συνδρομητή και δικτύου.

**Iu interface:** Συνδέει το UTRAN με το CN. Εξυπηρετεί τόσο τις packet συνδέσεις όσο και τις switch.

**Iur interface:** Συνδέει δύο διαφορετικά RNC. Έτσι δίνει την δυνατότητα για soft handover κάτι που δεν υπήρχε στο GSM. Handover είναι η διαδικασία στην οποία αλλάζει η κυψέλη που εξυπηρετεί τον συνδρομητή (π.χ. λόγω μετακίνησης του). Στο GSM η κυψέλη που εξυπηρετεί τον συνδρομητή είναι μοναδική κάθε φορά. Στο UMTS δίνεται η δυνατότητα να εξυπηρετηθεί από περισσότερα.

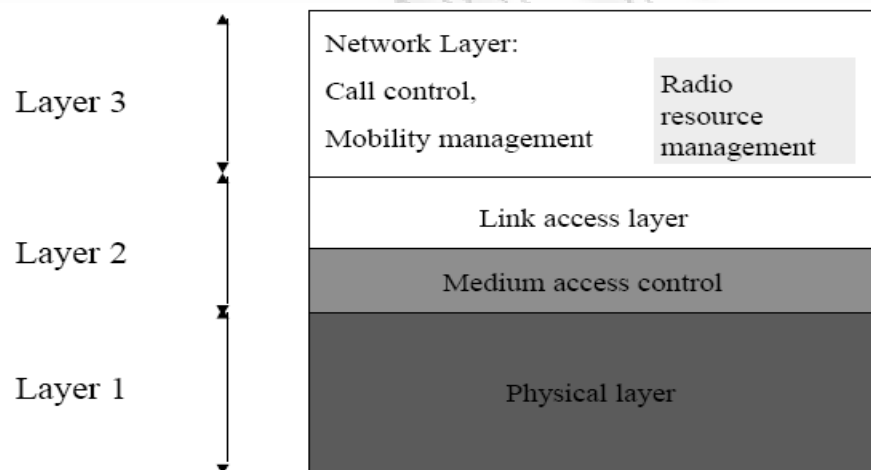
**Iub interface:** Συνδέει το σταθμό βάσης με το RNC.

**Gn interface:** Είναι interface που τοποθετείται μεταξύ των GPRS Support Nodes.

[34]

### 4.3. Στρωματοποιημένη δομή του UMTS Air Interface

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα οι λειτουργίες του UMTS air interface είναι δομημένες σε στρώματα πρωτοκόλλων. Το φυσικό κανάλι πραγματοποιεί κωδικοποίηση, διαμόρφωση, διάδοση για τα φυσικά κανάλια. Το στρώμα σύνδεσης χωρίζεται περαιτέρω σε δύο υποεπίπεδα : MAC (Medium Access Control) και LAC (Link Access Control). Το στρώμα πρόσβασης μέσω συντονίζει τους πόρους που προσφέρονται από το φυσικό επίπεδο. Το στρώμα πρόσβασης σύνδεσης πραγματοποιεί τις λειτουργίες που είναι απαραίτητες για την εγκατάσταση, διατήρηση και απελευθέρωση μιας λογικής σύνδεσης. Το στρώμα δικτύου περιλαμβάνει λειτουργίες ελέγχου κλίσης, διαχείρισης κινητικότητας και διαχείρισης πόρων δικτύου.

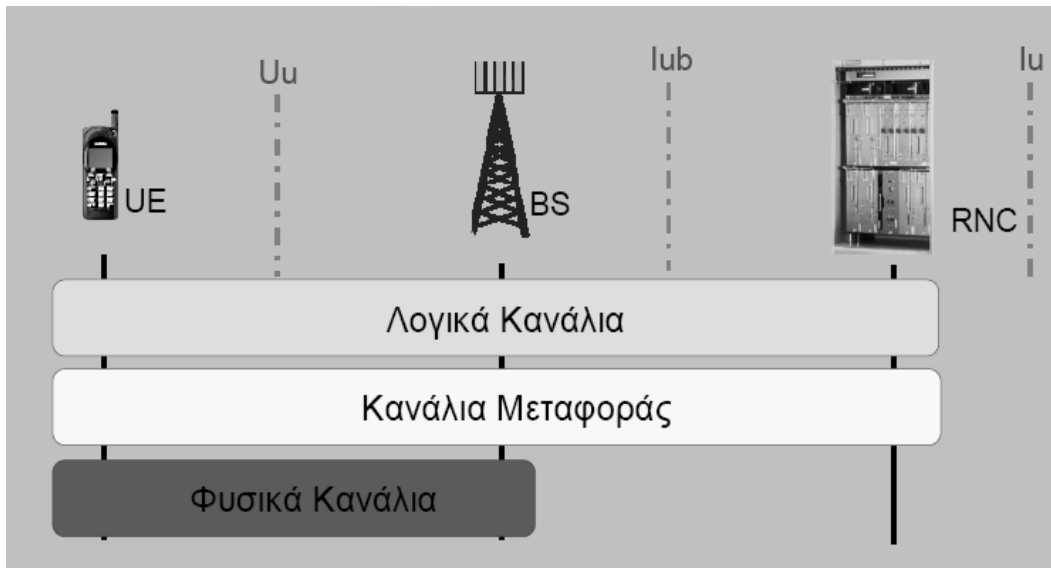


Σχήμα 4.3. Στρώματα του UMTS air interface

#### 4.3.1. Τα κανάλια του UTRAN

Στο UTRAN υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι καναλιών: τα λογικά κανάλια, τα κανάλια μεταφοράς και τα φυσικά κανάλια. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται κάθε τύπος.





**Σχήμα 4.4.** Κανάλια, Λογικά / Μεταφοράς / Φυσικά

#### 4.3.1.1. Φυσικά Κανάλια

Τα φυσικά κανάλια είναι αυτά που προσδιορίζουν τα ακριβή χαρακτηριστικά του φυσικού μέσου. Αυτό γιατί αποτελούν τα κανάλια τα οποία χρησιμοποιούνται στο επίπεδο φυσικού μέσου της ασύρματης διεπαφής. Το φάσμα συχνοτήτων που διατίθεται σε αυτά τα κανάλια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους. Στη λειτουργία FDD (Frequency Division Duplex), οι ανερχόμενοι και οι κατερχόμενοι σύνδεσμοι έχουν το δικό τους κανάλι συχνοτήτων. Αντίθετα, στη λειτουργία TDD (Time Division Duplex) υπάρχει μόνο ένα κανάλι συχνοτήτων το οποίο χωρίζεται σε χρονοσχισμές. Στη συνέχεια οι χρονοσχισμές μοιράζονται στον ανερχόμενο και τον κατερχόμενο σύνδεσμο. Με βάση τον τρόπο διαχείρισης του φάσματος συχνοτήτων τα φυσικά κανάλια διαχωρίζονται σε FDD και TDD φυσικά κανάλια. Κάθε κατηγορία διαιρείται περαιτέρω σε άλλες δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν το συγκεκριμένο φυσικό κανάλι χρησιμοποιείται στον ανερχόμενο ή στον κατερχόμενο σύνδεσμο.

#### 4.3.1.2. Λογικά Κανάλια

Οι υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων του πρωτοκόλλου MAC παρέχονται μέσω των λογικών καναλιών. Τα λογικά κανάλια είναι αυτά που προσδιορίζουν τον τύπο της πληροφορίας που μεταδίδεται. Χρησιμοποιούνται στη διεπαφή μεταξύ των επιπέδων RLC και MAC. Τα κανάλια αυτά μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: τα κανάλια ελέγχου και τα κανάλια κίνησης. Στη συνέχεια, ένα κανάλι ελέγχου μπορεί να είναι είτε κοινό είτε αφιερωμένο. Κοινά λέγονται τα κανάλια point-to-multipoint, ενώ αφιερωμένα λέγονται τα κανάλια point-to-point, δηλαδή αυτά που χρησιμοποιούνται μόνο από ένα χρήστη. Ο Πίνακας παρουσιάζει τα λογικά κανάλια καθώς και τη λειτουργία τους.

**Πίνακας 4.1.** Τα λογικά κανάλια του UTRAN

Λογικό Κανάλι Ελέγχου	Λειτουργία
Broadcast Control Channel (BCCH)	Κατερχόμενο κανάλι για broadcasting πληροφοριών ελέγχου
Paging Control Channel (PCCH)	Κατερχόμενο κανάλι μεταφορά πληροφορίας paging
Dedicated Control Channel (DCCH)	Κανάλι διπλής κατεύθυνσης για μεταφορά πληροφοριών αφιερωμένου ελέγχου
Common Control Channel (CCCH)	Κανάλι διπλής κατεύθυνσης για μεταφορά πληροφοριών ελέγχου μεταξύ του δικτύου και των UEs.
Λογικό Κανάλι Κίνησης	Λειτουργία
Dedicated Traffic Channel (DTCH)	Αφιερωμένο κανάλι για τη μεταφορά πληροφοριών για ένα UE
Common Traffic Channel (CTCH)	Κατερχόμενο κανάλι point-to-multipoint για μεταφορά πληροφοριών για όλες ή μια ομάδα UEs.

#### 4.3.1.3. Κανάλια Μεταφοράς

Τα κανάλια μεταφοράς είναι αυτά που προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα μεταφερθούν τα δεδομένα από το επίπεδο φυσικού μέσου. Ουσιαστικά, τα κανάλια αυτά χρησιμοποιούνται στη διεπαφή που βρίσκεται μεταξύ του MAC πρωτοκόλλου και του αμέσως κατώτερου επιπέδου. Υπάρχουν δύο κατηγορίες καναλιών μεταφοράς: τα κοινά κανάλια (common channels) και τα αφιερωμένα (dedicated). Τα κοινά κανάλια είναι κανάλια μονής κατεύθυνσης τα οποία χρησιμοποιούνται από όλους τους χρήστες σε ένα κελί. Τα σημαντικότερα από τα κανάλια αυτά είναι το Forward Access Channel (FACH) για τον κατερχόμενο σύνδεσμο και το Random Access Channel (RACH) για τον ανερχόμενο. Επίσης, στην κατηγορία των κοινών καναλιών ανήκει το Downlink Shared Channel (DSCH) καθώς και το High-Speed DSCH (HS-DSCH). Τα συγκεκριμένα κανάλια είναι πάντα συσχετισμένα με ένα αφιερωμένο κανάλι. Ειδικότερα, το HS-DSCH αποτελεί ένα κανάλι που υλοποιεί την τεχνολογία High-Speed Downlink Packet Access (HSPDA). Είναι ένα βελτιστοποιημένο κανάλι για ταχύτερη μετάδοση δεδομένων το οποίο ενσωματώνει έναν ευέλικτο μηχανισμό προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει μόνο ένα είδος αφιερωμένου καναλιού. Πρόκειται για το Dedicated Channel (DCH) το οποίο είναι διπλής κατεύθυνσης και δεσμεύεται για ένα μόνο χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι αν ένα DCH δεσμευθεί είτε ως ανερχόμενος είτε ως κατερχόμενος σύνδεσμος, τότε πρέπει να δεσμευθεί και για την αντίθετη κατεύθυνση. Στην αντίθετη κατεύθυνση όμως, ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να διαφέρει. [35] [36]

**Πίνακας 4.2.** Τα κανάλια μεταφοράς του UTRAN

Κοινά Κανάλια	Λειτουργία
Broadcast Channel (BCH)	Κατερχόμενο κανάλι για broadcasting πληροφορία
Paging Channel (PCH)	Κατερχόμενο κανάλι μεταφοράς πληροφορίας paging
Random Access Channel	Ανερχόμενο κανάλι για αρχική

(RACH)	πρόσβαση στο δίκτυο
Common Packet Channel (CPCH)	Ανερχόμενο κανάλι για μετάδοση καταιγιστικής πληροφορίας
Forward Access Channel (FACH)	Κατερχόμενο κανάλι για μεταφορά μικρών ποσοτήτων πληροφορίας
Downlink Shared Channel (DSCH)	Κατερχόμενο κανάλι για μεταφορά αφιερωμένων δεδομένων ελέγχου και κίνησης
High –Speed Downlink Shared Channel (HS-DSCH)	Κατερχόμενο κανάλι βελτιστοποιημένο για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης
Uplink Shared Channel (USCH)	Ανερχόμενο κανάλι για μεταφορά αφιερωμένων δεδομένων ελέγχου κίνησης

#### Αφιερωμένο Κανάλι

#### Λειτουργίες

Dedicated Channel (DCH)

Κανάλι διπλής κατεύθυνσης  
αφιερωμένο σε ένα UE

## 4.4. Ποιότητα Υπηρεσίας του UMTS

Οι υπηρεσίες δικτύου (Network Services) είναι από άκρο-σε-άκρο (end-to-end), δηλαδή, από ένα TE (Terminal Equipment) σε ένα άλλο TE. Μια από άκρο-σε-άκρο υπηρεσία μπορεί να έχει συγκεκριμένο Quality of Service (QoS) το οποίο παρέχεται για το χρήστη μιας δικτυακής υπηρεσίας. Είναι ο χρήστης που αποφασίζει αν είναι ικανοποιημένος ή όχι από το παρεχόμενο QoS. Για να πραγματοποιηθεί το QoS ενός συγκεκριμένου δικτύου μια φέρουσα υπηρεσία (Bearer Service) με σαφώς ορισμένα χαρακτηριστικά και λειτουργικότητα πρέπει να «στηθεί» από την πηγή στον προορισμό μιας υπηρεσίας. Μια bearer service περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους για να επιτρέψει τη διάθεση του συμφωνημένου QoS.

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές τάξεις QoS:

- **Conversational class:** Κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου με περιορισμούς στην καθυστέρηση (π.χ. τηλεφωνία)
- **Streaming class:** Κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου και είναι ανεκτική σε περιορισμένες καθυστερήσεις (π.χ. media streaming)
- **Interactive class:** Κατάλληλη για εφαρμογές ερωταποκρίσεων, υπάρχει υψηλή αξιοπιστία, λογική καθυστέρηση (π.χ. web browsing)
- **Background class:** Κατάλληλη για εφαρμογές που έχουν σχέση για τη μεταφορά αρχείων, υψηλή αξιοπιστία (π.χ. FTP) [33] [37]

#### 4.5. Ασφάλεια στο UMTS

Η ασφάλεια είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα του UMTS για να παρέχει ένα σταθερό, ασφαλές πλαίσιο στο οποίο μπορεί να στηριχθεί ένας συνδρομητής. Η ασφάλεια UMTS έχει εξελιχθεί από τις αρχές που χρησιμοποιήθηκαν πρώτα στο GSM. Εντούτοις, έχουν υπάρξει διάφορες βασικές βελτιώσεις έναντι της ασφάλειας GSM, για να εξετάσει τις αντιληπτές αδυναμίες στην αρχιτεκτονική ασφάλειας GSM. Επίσης, το UMTS ενσωματώνει μηχανισμούς ασφάλειας για να απεικονίσει τη φύση της κυκλοφορίας που το δίκτυο προορίζεται να μεταφέρει, και δανείζεται πολλά από την εμπειρία με την ασφάλεια στο διαδίκτυο. Το σύστημα UMTS έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα από τα άλλα δίκτυα, από τη στιγμή που το ζήτημα της ανταλλαγής κλειδιών λύνεται μέσω της έκδοσης μιας ενότητας ταυτότητας υπηρεσιών χρηστών (USIM) κάρτα που περιέχει το κλειδί. Εντούτοις, τα κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα χρησιμοποιούν ένα τυποποιημένο βασικό μήκος 128 bit τα οποία θεωρούνται απροσπέλαστα από ξένη εισβολή. Μια προσπάθεια εισβολής είναι όπου ο επιτιθέμενος δοκιμάζει εξαντλητικά όλα τα πιθανά κλειδιά για μια αντιστοιχία. Στατιστικά, η πιθανότητα από μια αντιστοιχία θα εμφανιστεί αφότου έχουν δοκιμαστεί τα μισά από τα κλειδιά. Ένα βασικό μήκος 128 bit παράγει αρκετά πιθανά κλειδιά (2128) ώστε θα έπαιρνε ένα μη ρεαλιστικό χρονικό διάστημα για να σπάσουν. Φυσικά, οι επιθέσεις μπορούν να γίνουν με άλλους τρόπους, ψάχνοντας τις αδυναμίες μέσα στους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται. Κάθε ασφαλές σύστημα πρέπει να προβλέπει το ακόλουθο πλαίσιο για την προστασία χρηστών:

- Μυστικότητα: εξασφαλίζει ότι μόνο τα εξουσιοδοτημένα άτομα μπορούν να διαβάσουν τις πληροφορίες.
- Επικύρωση: αποδεικνύει την ταυτότητα του αποστολέα μηνυμάτων.
- Ακεραιότητα στοιχείων: εξασφαλίζει ότι τα στοιχεία δεν μπορούν να αλλάξουν χωρίς ανίχνευση.

Το UMTS δεν διευκρινίζει συγκεκριμένους αλγορίθμους που πρέπει να χρησιμοποιούνται αλλά περιλαμβάνει μια επιλεγμένη προεπιλογή συνόλου δοκιμασμένων και εμπιστευμένων αλγορίθμων μέσα σε ένα πλαίσιο που επιτρέπει την εισαγωγή άλλων αλγορίθμων. Οι αλγόριθμοι συμπεριλαμβανόμενοι μέσα στις προδιαγραφές είναι ο f8 αλγόριθμος εμπιστευτικότητας και f9 αλγόριθμος ακεραιότητας. [38]

## 5. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

### 5.1. Εισαγωγή

Η προσομοίωση αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές και ισχυρές μεθόδους, που χρησιμοποιούνται στην έρευνα για τον σχεδιασμό και την παρακολούθηση της λειτουργίας σύνθετων διαδικασιών και συστημάτων. Σύμφωνα με τον R.E.Shannon (1975) η προσομοίωση ορίζεται ως η διαδικασία σχεδιασμού του μοντέλου κάποιου πραγματικού συστήματος και πραγματοποίησης πειραμάτων με το μοντέλο αυτό που αποσκοπούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος ή/και στην αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών για τη λειτουργία του συστήματος. Δεδομένου του παραπάνω ορισμού, θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε την προσομοίωση ως μια εφαρμοσμένη πειραματική μεθοδολογία, με την οποία μπορούμε:

- Να περιγράψουμε την συμπεριφορά ενός συστήματος.
- Να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο προκειμένου να προβλέψουμε μελλοντικές συμπεριφορές, δηλαδή αποτελέσματα από την αλλαγή του συστήματος ή του τρόπου λειτουργίας του.

Εμβαθύνοντας λίγο περισσότερο στην έννοια της μοντελοποίησης, θα μπορούσαμε να πούμε πως ένα μοντέλο αναπαριστά την δομή και την λειτουργικότητα του πραγματικού συστήματος και είναι παρόμοιο αλλά απλούστερο από στο σύστημα που αντιπροσωπεύει. Ένα καλό μοντέλο ουσιαστικά είναι αυτό που ενσωματώνει τα θετικά στοιχεία του ρεαλισμού και ταυτόχρονα της απλότητας. Ωστόσο μια κρίσιμη ερώτηση αφορά το πότε πρέπει

να γίνεται χρήση προσομοίωσης αντί του πειραματισμού με το πραγματικό σύστημα. Οι γενικές περιπτώσεις στις οποίες συνήθως χρησιμοποιείται μοντελοποίηση και ανάλυση βάση προσομοίωσης είναι οι ακόλουθες:

- Όταν είναι αδύνατο ή έχει υπερβολικό κόστος η παρατήρηση συγκεκριμένων διαδικασιών στον πραγματικό κόσμο.
- Όταν υπάρχουν προβλήματα για τα οποία υπάρχει μεν μαθηματικό μοντέλο, ωστόσο είναι αδύνατο ή υπερβολικά πολύπλοκο να βρεθούν λύσεις με αναλυτικές μεθόδους.
- Όταν είναι αδύνατη ή έχει υπερβολικό κόστος η επικύρωση της ορθότητας του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει το πραγματικό σύστημα, επειδή π.χ. δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα.

Η προσομοίωση χρησιμοποιείται επίσης πριν εφαρμοστούν αλλαγές σε ένα υπάρχον σύστημα ή πριν κατασκευαστεί ένα νέο σύστημα, προκειμένου να μειωθούν οι πιθανότητες αποτυχίας, να εξαλειφθούν απρόβλεπτα σημεία συμφόρησης, να προληφθεί η υπερκατανάλωση ή υποκατανάλωση πόρων και να βελτιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος. Επιπλέον η προσομοίωση υπερτερεί των αναλυτικών μεθόδων για την ανάλυση συστημάτων για τους εξής λόγους:

- Μπορούμε να εξετάσουμε νέους σχεδιασμούς του συστήματος χωρίς να αφιερώνουμε πόρους στην υλοποίησή τους.
- Η προσομοίωση επιτρέπει την εξέταση υποθέσεων σχετικά με το πώς ή το γιατί συγκεκριμένα φαινόμενα συμβαίνουν σε ένα σύστημα.
- Η προσομοίωση επιτρέπει τον πλήρη έλεγχο του χρόνου. Έτσι είναι εφικτό η καταγραφή μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα η συμπεριφορά ενός συστήματος που λειτουργεί για μήνες ή χρόνια.
- Εναλλακτικά είναι δυνατή η επιβράδυνση των φαινομένων προκειμένου να μελετηθούν
- Η προσομοίωση επιτρέπει την διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το πώς λειτουργεί στην πραγματικότητα το μοντελοποιημένο σύστημα και ποιες μεταβλητές είναι οι πιο σημαντικές για την απόδοσή του.
- Η προσομοίωση έχει την δύναμη να επιτρέπει τον πειραματισμό με νέες και άγνωστες καταστάσεις ώστε να απαντά σε υποθετικά ερωτήματα.



Τα βήματα που εμπλέκονται στην διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου προσομοίωσης, στον σχεδιασμό του πειράματος και στην διενέργεια της ανάλυσης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι τα εξής:

Βήμα 1. Ορισμός του προβλήματος.

Βήμα 2. Μορφοποίηση του προβλήματος.

Βήμα 3. Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων για το πραγματικό σύστημα.

Βήμα 4. Μορφοποίηση και ανάπτυξη του μοντέλου του συστήματος.

Βήμα 5. Επικύρωση του μοντέλου.

Βήμα 6. Τεκμηρίωση μοντέλου για μελλοντική χρήση.

Βήμα 7. Επιλογή του κατάλληλου σχεδίου πειραμάτων.

Βήμα 8. Επαλήθευση των συνθηκών των πειραμάτων για όλες τις εκτελέσεις της προσομοίωσης.

Βήμα 9. Εκτέλεση προσομοίωσης.

Βήμα 10. Ερμηνεία και παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Βήμα 11. Πρόταση περαιτέρω ενεργειών.

Αυτή είναι μια λογική ταξινόμηση των βημάτων σε μια μελέτη προσομοίωσης. Ωστόσο, ίσως αποδειχτεί αναγκαίο να γίνουν επαναλήψεις σε διάφορα σημεία προτού επιτευχθούν οι στόχοι της προσομοίωσης. Ίσως να μην χρειαστούν όλα τα παραπάνω βήματα ή μπορεί μερικά από αυτά να μην είναι εφικτά. Από την άλλη πλευρά ίσως απαιτηθούν και επιπλέον βήματα για την ολοκλήρωση μιας μελέτης.

Κλείνοντας αυτήν την εισαγωγή στην προσομοίωση, θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι περισσότερες μελέτες προσομοίωσης σήμερα γίνονται χρησιμοποιώντας πακέτα λογισμικού προσομοίωσης, αντί να κάνουν χρήση μοντέλων που αναπτύχθηκαν με γλώσσες προγραμματισμού γενικού σκοπού. Υπάρχουν εκατοντάδες προϊόντα προσομοίωσης στην αγορά, και το ερώτημα που τίθεται είναι πως διαλέγει κανείς το καλύτερο δεδομένου του προβλήματος που θέλει να μελετήσει. Κάποιες από τις παραμέτρους που συχνά εξετάζονται κατά την επιλογή είναι: η προσφερόμενη ευελιξία στην μοντελοποίηση, η ευκολία στη χρήση, η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τμημάτων κώδικα, η διεπαφή χρήστη, οι απαιτήσεις σε λογισμικό, οι στατιστικές δυνατότητες, η δυνατότητες

γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων, η υποστήριξη πελατών και η τεκμηρίωση. [39]

## 5.2. Εργαλεία Προσομοίωσης για Μελέτη Δικτύων

Μερικοί από τα εργαλεία προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη μελέτη συμπεριφοράς δικτύων είναι το OMNet++, το OPNET (Optimized Network Engineering Tool), και ο NS-2 (Network Simulator-2). Φυσικά πρέπει να διευκρινίσουμε ότι στην αγορά κυκλοφορεί μια πληθώρα εργαλείων προσομοίωσης δικτύων που έχουν κατασκευαστεί από ερευνητικά κέντρα για ικανοποίηση δικών τους σκοπών ή δεν κυκλοφορούν ελεύθερα ή δεν είναι πλήρως τεκμηριωμένοι. Οι προσομοιωτές που αναφέρουμε είναι από τους γνωστότερους που κυκλοφορούν και χρησιμοποιούνται σήμερα ανάλογα με τις ανάγκες που υπάρχουν σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια θα δώσουμε μια σύντομη περιγραφή των παραπάνω εργαλείων προσομοίωσης.

### 5.2.1. OMNET++

Το Omnet++ είναι ένα περιβάλλον προσομοίωσης ανοιχτού κώδικα που αναπτύχθηκε στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Βουδαπέστη από τον Andr'as Varga. Είναι πακέτο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων βασισμένο στη γλώσσα C++. Αρχικός τομέας εφαρμογών του OMNET++ είναι η προσομοίωση δικτύων υπολογιστών και άλλων καταναμημένων συστημάτων.

Το OMNeT++ χρησιμοποιεί λογισμικές μονάδες που ορίζονται με μια γλώσσα ορισμού με την ονομασία NED (Network Discription). Η γλώσσα NED διευκολύνει την περιγραφή ενός δικτύου με την περιγραφή των συνιστωσών του. Τα προσομοιωμένα μοντέλα αποτελούνται από ιεραρχικά τοποθετημένες ενότητες. Υπάρχουν δύο τύποι ενότητων, οι απλές και οι σύνθετες ενότητες. Οι απλές ενότητες διαμορφώνουν το χαμηλότερο επίπεδο ιεραρχίας και μπορούν αυθαίρετα να συνδυαστούν για να διαμορφώσουν σύνθετες ενότητες.

Το OMNeT++ εφαρμόζει πολλά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την απεικόνιση. Με το ενσωματωμένο γραφικό περιβάλλον χρήστη μπορούν να απεικονιστούν η τοπολογία του δικτύου, οι κόμβοι και τα μηνύματα που ανταλλάσσονται κατά την προσομοίωση. Ακόμα είναι δυνατή η βαθύτερη μελέτη των περιεχομένων των μηνυμάτων και των μεταβλητών των κόμβων.

Το OMNET++ τρέχει εξίσου καλά στα Linux και στα περισσότερα λειτουργικά συστήματα που βασίζονται ή μοιάζουν με Unix, αλλά και σε Win32 πλατφόρμες (Windows 2000, XP). [48] [49]

### **5.2.2. OPNET**

Το λογισμικό υλικό OPNET (Optimized Network Engineering Tool) είναι ένα εμπορικό πρόγραμμα, το οποίο παρέχει ένα ευρύ αναπτυξιακό περιβάλλον για τον προσδιορισμό, προσομοίωση και ανάλυση απόδοσης δικτύων επικοινωνιών. Μία μεγάλη ποικιλία από συστήματα επικοινωνιών, από ένα μικρό τοπικό δίκτυο μέχρι ένα καθολικό δορυφορικό δίκτυο μπορεί να αναλυθεί. Η λειτουργία του λογισμικού OPNET είναι βασισμένη σε προσομοιώσεις διακριτών γεγονότων και αποτελεί αξιόπιστο εργαλείο για τον σχεδιασμό και την μελέτη δικτύων επικοινωνιών, πρωτοκόλλων και εφαρμογών σε ένα ευέλικτο περιβάλλον.

Επιπλέον, οι λειτουργίες του λογισμικού έχουν υλοποιηθεί στην γλώσσα προγραμματισμού C/C++ ώστε το αποτέλεσμα να είναι υψηλού επιπέδου. Ο προσομοιωτής OPNET παρέχει ένα εκτεταμένο αριθμό πρωτοκόλλων και εφαρμογών.

Το λογισμικό πακέτο αποτελείται από έναν αριθμό εργαλείων, κάθε ένα από τα οποία εστιάζει σε συγκεκριμένες πλευρές της λειτουργίας των μοντέλων. Αυτά τα εργαλεία αντιστοιχούν στις τρεις σημαντικές φάσεις μοντελοποίησης και προσομοίωσης των σχεδίων, δηλαδή το εργαλείο ανάπτυξης μοντέλου, το εργαλείο εκτέλεσης της προσομοίωσης και το εργαλείο ανάλυσης αποτελεσμάτων. Όλα μαζί συνεργάζονται προκειμένου να σχεδιαστεί, να προσομοιωθεί και να αναλυθεί το δίκτυο. [50]

### 5.2.3. Network Simulator – 2 (NS - 2)

Ο Network simulator – 2 (NS-2) είναι ένα open source σύστημα το οποίο δημιουργήθηκε στο πανεπιστήμιο του Berkeley και χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα από την πανεπιστημιακή κοινότητα. Παρέχει σημαντική υποστήριξη στην προσομοίωση πρωτοκόλλων επικοινωνίας, δρομολόγησης επάνω σε ενσύρματα αλλά και ασύρματα δίκτυα, στη σύγκριση πρωτοκόλλων και στα νέα αρχιτεκτονικά σχέδια.

Ο NS-2 είναι ένας αντικειμενοστραφής προσομοιωτής γραμμένος σε C++ και OTcl ( αντικειμενοστραφής έκδοση της γλώσσας TCL). Οι προγραμματιστές του NS-2 προκειμένου να ισορροπήσουν ανάμεσα στην υψηλή επιπέδου υλοποίηση και στην ευκολία προγραμματισμού χώρισαν τον προσομοιωτή σε δυο τμήματα. Το ένα τμήμα (κυρίως για την διασύνδεση με το χρήστη) είναι γραμμένο στη γλώσσα OTcl ώστε να μη χρειάζεται ο απλός χρήστης να γνωρίζει την δυσκολότερη αλλά πανίσχυρη C++ προκειμένου να τον χρησιμοποιήσει. Ο υπόλοιπος κώδικας του NS-2 είναι γραμμένος στην γλώσσα C++ ώστε το αποτέλεσμα να είναι υψηλού επιπέδου και να είναι αποδοτικός σε σχέση με τη ταχύτητα. Δηλαδή, ένα δικτυακό πρόβλημα μπορεί να εκφραστεί μόνο με την OTcl, μόνο με την C++ ή και με συνδυασμό των δύο. Συνήθως η παραμετροποίηση του προβλήματος γίνεται με την OTcl για μεγαλύτερη ταχύτητα και ευκολία, ενώ το υπόλοιπο πρόβλημα χρησιμοποιεί κώδικα C++. Τα αντικείμενα της C++ έχουν αναπαρασταθεί και σαν αντικείμενα της OTcl, ώστε να μπορεί να εκφράσει κάποιος ένα πρόβλημα και με τους δύο τρόπους.

Ο NS-2 είναι ανοιχτός κώδικας με ιδιαίτερη «αύξηση εμπιστοσύνης» στα αποτελέσματα και υποστηρίζεται από τις πλατφόρμες FreeBSD, Linux, Solaris, Windows, Mac. Είναι ένας προσομοιωτής διακριτών γεγονότων (discrete-event simulator), δηλαδή φυσικές δραστηριότητες μεταφράζονται σε γεγονότα (events).

Στον NS-2 είναι ενσωματωμένα τα γνωστότερα δικτυακά πρωτόκολλα και μοντέλα.

Μοντέλα κίνησης (Traffic models) και Εφαρμογές (applications):

- Web, FTP, telnet, constant-bit rate(CBR)

Πρωτόκολλα μεταφοράς (Transport protocols):

- Unicast: TCP (π.χ. Reno, Vegas), UDP, Multicast

Δρομολόγηση (Routing) και ουρές αναμονής (queuing):

- Static routing, DV routing, multicast, Ad-Hoc routing
- Διαχείριση ουρών αναμονής (Queuing disciplines): drop-tail, RED (Random Early Drop)

Φυσικά μέσα διάδοσης (Physical media):

- Ενσύρματα (Wired – point-to-point, LANs), Ασύρματα (Wireless), Δορυφορικά (satellite)

Ο προσομοιωτής NS-2 καθορίζει την προσομοίωση και παράγει αποτελέσματα (ίχνη ή traces) σε αρχεία. Από τα παραγόμενα αρχεία μπορούμε να έχουμε ανάλυση των στοιχείων με Tcl scripts, συχνά με γλώσσα Awk (γλώσσα προγραμματισμού που επιτρέπει την εύκολη επεξεργασία αρχείων), γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων με Xgraph και με τον Network Animator (NAM) μπορούμε να έχουμε οπτικοποίηση (visualization) μιας προσομοίωσης.

Ο NS-2 είναι το εργαλείο που κρίθηκε κατάλληλο για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας. Δεν είναι ένα πλήρως εμπορικό προϊόν, ούτε και έχει τελειώσει η ανάπτυξη του είναι αποτέλεσμα συνεχιζόμενης ερευνητικής και προγραμματιστικής προσπάθειας με λάθη στο software τα οποία ανακαλύπτονται συνεχώς και διορθώνονται. Ωστόσο, είναι πολύ δημοφιλής και αρκετές εκατοντάδες από ερευνητικά άρθρα που χρησιμοποιούν τον NS-2 είναι διαθέσιμα. [40] [41] [42]

## **6. ΔΙΑΠΟΜΠΗ ΜΕΤΑΞΥ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΙΕΕΕ 802.21**

### **6.1. Εισαγωγή**

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τους λόγους για τους οποίους η διαδικτύωση διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών είναι χρήσιμη και στη συνέχεια να γίνει η ανάλυση του προτύπου ΙΕΕΕ 802.21 που αναφέρεται ως η λύση που εξετάστηκε για την διαπομπή σε ετερογενή δίκτυα.

### **6.2. Διαδικτύωση Ετερογενών Ασύρματων Τεχνολογιών**

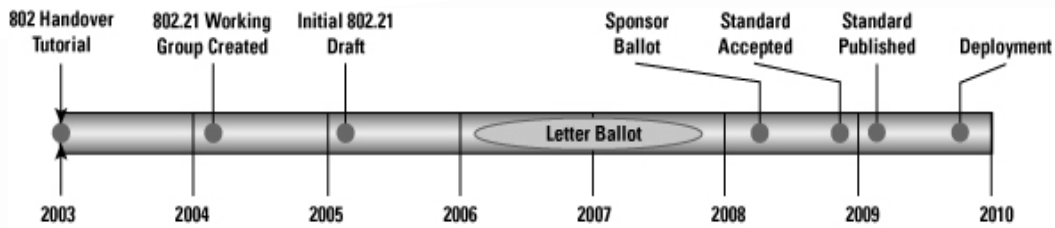
Σήμερα υπάρχουν στον κόσμο διάφορα ασύρματα συστήματα. Χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες εκπομπής και έχουν διαφορετικά πρωτόκολλα και αρχιτεκτονικές. Είναι σχεδιασμένα για την ικανοποίηση των αναγκών συγκεκριμένων υπηρεσιών και ποικίλουν πολύ όσον αφορά το bandwidth, την περιοχή κάλυψης, το κόστος καθώς και την ποιότητα της υπηρεσίας που προσφέρουν. Παρόλα αυτά, κανένα από αυτά δεν ικανοποιεί ταυτόχρονα την χαμηλή καθυστέρηση (low latency), το υψηλό bandwidth, και τις διάφορες ανάγκες των χρηστών σχετικά με την περιοχή κάλυψης με ταυτόχρονο χαμηλό κόστος. Αφού τα διαφορετικά συστήματα αυτά ικανοποιεί το καθένα τις ανάγκες για τις οποίες είναι σχεδιασμένο, είναι συμπληρωματικά μεταξύ τους, μπορούν δηλαδή να λειτουργήσουν σε συνεργασία ώστε να προσφέρουν στους χρήστες πάντα το καλύτερο δυνατό. Για να γίνει όμως δυνατή αυτή η συνεργασία πρέπει

να επιτευχθεί η ικανοποιητική διασύνδεση των υπαρχόντων ασύρματων συστημάτων, ώστε οι χρήστες να λαμβάνουν τις υπηρεσίες τους μέσω του καταλληλότερου ασύρματου δικτύου σε κάθε στιγμή.

Οι στόχοι της διαδικτύωσης διαφορετικών ασύρματων συστημάτων είναι η εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της κάθε τεχνολογίας, με ταυτόχρονη εξάλειψη των πιθανών μειονεκτημάτων της. Επίσης πρέπει να διασφαλίζει ότι ο χρήστης σε κάθε χρονική στιγμή θα χρησιμοποιεί την καλύτερη δυνατή τεχνολογία, ενώ επίσης πρέπει να διαθέτει μηχανισμούς που θα παρέχουν τη μέγιστη ποιότητα ασφάλειας και ιδιωτικότητας. Η ύπαρξη πρωτοκόλλων και μεθόδων για την σωστή φορητότητα μεταξύ των συστημάτων είναι αναγκαία.

### **6.3. Πρότυπο IEEE 802.21**

Η λύση που εξετάστηκε για την επιλογή πρόσβασης για τη διαπομπή σε ετερογενή δίκτυα είναι μέσα από τις προτάσεις της IEEE. Η IEEE έχει ορίσει μια ομάδα εργασίας (working group), η οποία ασχολείται με τον ορισμό προτύπων (standards) για την επίτευξη διαπομπής και συμβατότητας μεταξύ δικτύων με διαφορετικό τύπο τεχνολογίας που μπορεί να ανήκει τόσο στο σύνολο των 802 προτύπων της IEEE όσο και σε άλλα πρότυπα (π.χ. κυψελωτά). Η κατεύθυνση στην οποία κινείται η ομάδα αυτή αναφέρεται ως Διαπομπή Ανεξάρτητη του Μέσου MIH (Media Independent Handover), ενώ το σύνολο των σχετικών προτύπων είναι γνωστά ως IEEE 802.21. Το IEEE 802.21 ορίζει ένα πλαίσιο που βελτιώνει κάθετη διαπομπή παρέχοντας πληροφορίες για τις τεχνολογίες του στρώματος σύνδεσης προς τα υψηλότερα στρώματα.



**Σχήμα 6.1** Υπόδειξη ως προς το χρόνο για τη προσπάθεια προτυποποίησης του IEEE 802.21

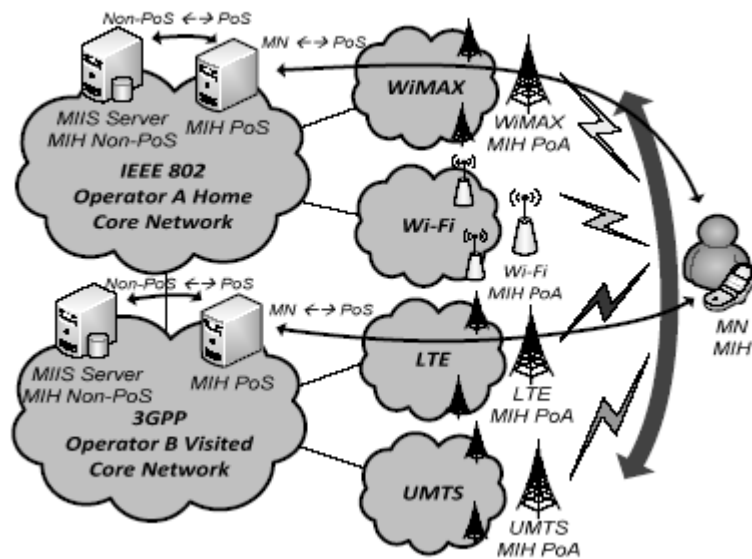
Το IEEE 802.21 έχει ως σκοπό να εντοπίσει (Initiate), ετοιμάσει (Prepare) και εκτελέσει (Execute) το handover. Η φάση Initiation Handover εκτιμά τις παρούσες συνθήκες του δικτύου, με σκοπό να αποφασίσει αν απαιτείται διαπομπή. Αν οι συνθήκες είναι ικανοποιητικές δεν υπάρχει λόγος για την ανεύρεση νέων διαθέσιμων δικτύων. Στην περίπτωση που το τερματικό βρίσκεται σε περιοχή επικαλυπτόμενων δικτύων διευκολύνει την ανακάλυψη δικτύου και τις διαδικασίες επιλογής, ανταλλάσσοντας πληροφορίες δικτύων που βοηθούν τις κινητές συσκευές να καθορίζουν ποιο δίκτυο είναι γειτονικό τους. Αυτές οι πληροφορίες δικτύου περιλαμβάνουν πληροφορίες για τον τύπο σύνδεσης, αναγνώριση σύνδεσης, διαθεσιμότητα σύνδεσης και ποιότητα σύνδεσης. Αυτή η διαδικασία ανακάλυψης και επιλογής δικτύου επιτρέπει σε ένα κινητό να επικοινωνεί με τα πιο κατάλληλα δίκτυα. Ουσιαστικά πρόκειται για μια διαδικασία αξιολόγησης υπαρχόντων δικτύων σύμφωνα με τα κριτήρια που ορίζουν οι προτιμήσεις του χρήστη, στα πλαίσια της γενικότερης προσπάθειας για βέλτιστη σύνδεση (Always Best Connected). Στη φάση Handover Preparation έχουμε την εγκαθίδρυση της νέας σύνδεσης όπου το τερματικό ζητάει μια σύνδεση IP εφόσον υπάρχει αλλαγή πρόσβασης AP. Τέλος, στη φάση Handover Execution αφού έχει γίνει η εγκαθίδρυση της σύνδεσης αρχίζει η μεταφορά των πακέτων με το τερματικό να λαμβάνει δεδομένα από τη νέα σύνδεση.

Η πιο απλή μέθοδος διαπομπής είναι η σκληρή διαπομπή (hard handover). Ονομάζεται έτσι λόγω του γεγονότος πως το τερματικό για να αποκτήσει ένα νέο σημείο πρόσβασης θα πρέπει να εγκαταλείψει το AP που χρησιμοποιούσε μέχρι την στιγμή αυτή, έτσι ώστε να διατηρεί μόνο μία σύνδεση ανά πάσα στιγμή (break before make). Δεδομένης της διακοπής της σύνδεσης θα υπάρχει και απώλεια πακέτων, η οποία εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται μέχρι να



εγκατασταθεί σύνδεση με το νέο AP, το εύρος ζώνης και τις διάφορες καθυστερήσεις.

Ένα ετερογενές περιβάλλον παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Ένα δίκτυο με τεχνολογίες όπως WiFi, WiMAX, UMTS περιλαμβάνοντας το IEEE 802.21 Point of Attachment (PoA) και Point of Service (PoS). Το PoA είναι το σημείο σύνδεσης της τεχνολογίας πρόσβασης, ενώ το PoS είναι η MIH οντότητα που επικοινωνεί με το τερματικό.



Σχήμα 6.2 MIH σε ετερογενή δίκτυο πρόσβασης

#### 6.4. Media Independent Handover Function (MIHF)

Η καρδιά του 802.21 είναι το Media Independent Handover Function (MIHF) το οποίο υποκρύπτει τις ιδιομορφίες των διαφορετικών τεχνολογιών στρωμάτων σύνδεσης από τις υψηλότερες οντότητες στρώματος κινητικότητας. Οι οντότητες υψηλότερου στρώματος, γνωστές ως MIH Users (MIUs) μπορούν να λαμβάνουν πλεονεκτήματα των MIH πλαισίων, περιλαμβάνοντας πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας, όπως για παράδειγμα Mobile IPv4, Mobile IPv6, Session Initiation Protocol (SIP) καθώς και άλλους αλγορίθμους απόφασης κινητικότητας.

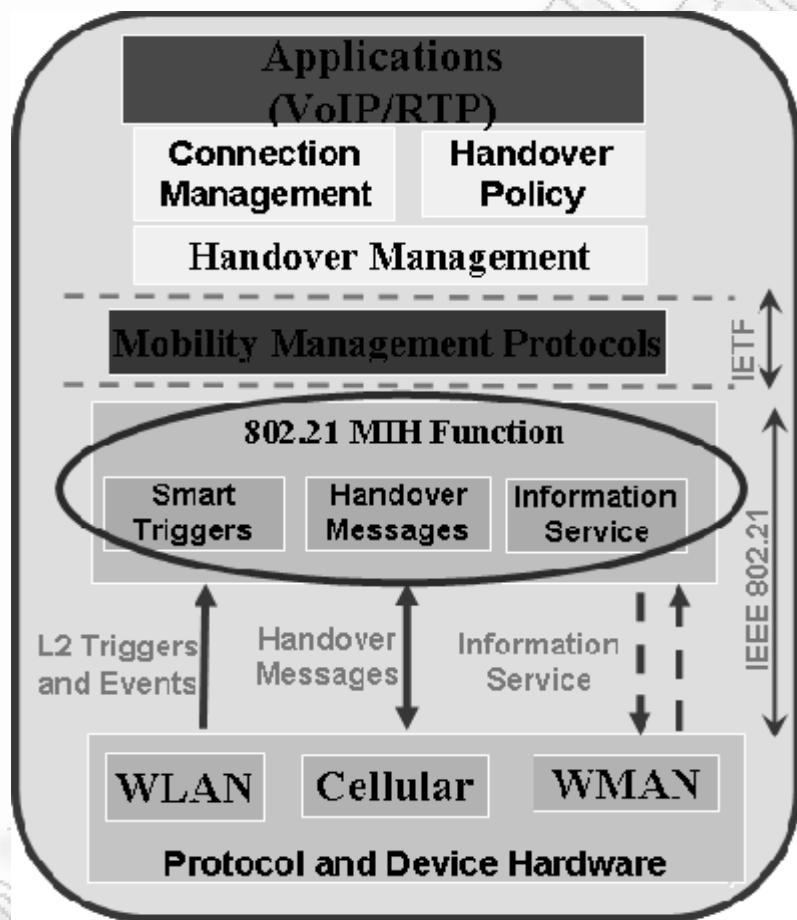
Το εκάστοτε πρωτόκολλο κινητικότητας έχει ως κύριο στόχο να διατηρεί το ρυθμό της ροής πληροφοριών κατά τη διάρκεια διαπομπής, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται συνεχή και πανταχού παρούσα πρόσβαση στους χρήστες, ανάλογα με το είδος της κίνησης, η μπορούμε να χειριστούμε την κινητικότητα σε ένα από τα επίπεδα της ζεύξης δεδομένων, του δικτύου ή του επιπέδου εφαρμογής. Δεδομένου ότι η κινητικότητα στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων καθορίζεται από την τεχνολογία πρόσβασης και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των δυσκολιών που συνεπάγεται το ετερογενές περιβάλλον θα συζητήσουμε την κινητικότητα μόνο στα δυο ανώτερα επίπεδα. Στο επίπεδο δικτύου έχουμε την έκδοση 4 και 6 του πρωτόκολλου MobileIP. Το πρωτόκολλο κινητικότητας είναι αυτό που αποδίδει IP διεύθυνση σε έναν κινητό κόμβο, όταν αλλάζει το σημείο σύνδεσης του στο δίκτυο. Το Mobile IPv4 (MIPv4) που ανέπτυξε η IETF (Internet Engineering Task Force) επιτρέπει στους κινητούς κόμβους να μετακινούνται μεταξύ υποδικτύων. Θεωρείται κατάλληλο για διαχείριση κινητικότητας μεταξύ ετερογενών δικτύων. Το πρωτόκολλο Mobile IPv6 αποτελεί την εξέλιξη του Mobile IPv4 στο πλαίσιο της γενικότερης μετάβασης από το IPv4 στο IPv6, με σκοπό την δημιουργία περισσότερων διαθέσιμων IP διευθύνσεων. Έτσι το νέο δίκτυο IPv6 εμφανίζει ως πλεονεκτήματα τον τετραπλάσιο χώρο διευθύνσεων (128 bits αντί για 32). Στο επίπεδο εφαρμογής έχουμε τη χρήση του πρωτοκόλλου SIP (Session Initiation Protocol).

Η MIHF πλατφόρμα παρέχει τρεις διαφορετικές υπηρεσίες με σκοπό να εντοπίσει, ετοιμάσει και εκτελέσει το handover. Αυτές είναι:

- Media Independent Event Services (MIES): Η MIES υπηρεσία παρέχει αναφορές γεγονότων, όπως δυναμικές αλλαγές σε συνθήκες σύνδεση, κατάσταση σύνδεσης και ποιότητα σύνδεσης, που πραγματοποιούνται στον πελάτη (τοπικά) και στο δίκτυο (μακρινά). Μερικά από τα πιο συνηθισμένα γεγονότα έχουν να κάνουν με την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση μιας ζεύξης (Link Up, Link Down), η σταδιακή ενίσχυση ή απώλεια σήματος μιας ζεύξης (Link Going Up, Link Going Down)
- Media Independent Command Services (MICS): Χρησιμοποιείται από τα το υψηλότερο στρώματα ώστε να ελέγχει τα χαμηλότερα στρώματα και για να αποφασίσουν για την κατάσταση σύνδεσης και τον έλεγχο

πρόσβασης σε διαφορετικά δίκτυα. Καθιστούν ικανούς τους MIH χρήστες να διαχειρίζονται και να ελέγχουν τη σύνδεση διαπομπής.

- Media Independent Information Services (MIIS): Παρέχει πληροφορίες για ετερογενή δίκτυα σε μια περιοχή. Κρατάει λίστα με τα γειτονικά δίκτυα ώστε να παρέχει ομαλή διαπομπή για έναν ασύρματο κόμβο. Ο σκοπός είναι να πετύχει μια σφαιρική άποψη από όλα τα ετερογενή δίκτυα στην περιοχή με σκοπό να βελτιστοποιήσει το handover καθώς γίνεται περιπλάνηση μεταξύ των ετερογενών δικτύων.



Σχήμα 6.3 Πρότυπο IEEE802.21

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, παρατηρεί κανείς ότι το IEEE 802.21 προσπαθεί να προτυποποιήσει την κάθετη διαπομπή προκειμένου να καταστεί αυτή εφικτή ανεξαρτήτως τεχνολογιών, υπηρεσιών και πρωτοκόλλων κινητικότητας. [43] [44] [46] [47]

## **7. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

### **7.1. Εισαγωγή**

Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται τόσο τα σενάρια όσο και οι παράμετροι της προσομοίωσης. Μετέπειτα, έχουμε την ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, δηλαδή από τη διαπομπή ενός (1), πέντε (5) και δέκα (10) κινητών τερματικών μεταξύ διαδίκτυωμένων ετερογενών δικτύων UMTS και 802.11, UMTS και 802.16 με χρήση του προτύπου 802.21. Επίσης μελετάμε το μέσο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων και την από άκρο σε άκρο μέση καθυστέρηση που έχουμε πριν, κατά τη διάρκεια της μεταπομπής και μετά.

### **7.2. Σενάρια Προσομοίωσης και Παράμετροι Προσομοίωσης**

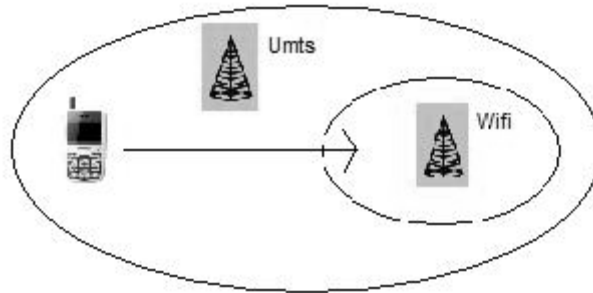
Για την εκτέλεση των σεναρίων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων Network Simulator (NS) – 2. Η έκδοση του NS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ο ns-2.29, μέσω του πακέτου ns-allinone-2.29. Αξίζει να σημειώσουμε ότι για την υλοποίηση του UMTS στον ns-2, δεν υπάρχει κάποια έτοιμη ενσωματωμένη στο συνολικό πακέτο λύση. Είναι όμως διαθέσιμη μια επέκταση του ns-2 (EURANE) που υποστηρίζει το UMTS. Τα σενάρια εκτελέστηκαν σε περιβάλλον Linux. Η επεξεργασία των μετρήσεων που λαμβάνονται από το Network Simulator γίνεται με τη χρήση ενός φίλτρου

γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού AWK και τέλος, η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση του Microsoft Excel.

Πριν αρχίσουμε την ανάλυση των σεναρίων μας, αξίζει να αναφέρουμε ότι για την διαπομπή στα ετερογενή δίκτυα χρησιμοποιήθηκε το Media Independent Handover (MIH) και το Neighbour Discovery (ND). Ο Neighbour Discovery (ND) είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται για εντοπισμό γειτονικών δικτύων από τους ασύρματους κόμβους. Τόσο το MIH όσο και το ND αποτελούν προσθήκες του National Institute of Standards and Technology (NIST) τα οποία επιδιορθώθηκαν ώστε να δουλεύουν στον ns-2.29. [45]

### **Σενάριο: Διαπομπή κινητού τερματικού μεταξύ ετερογενών δικτύων UMTS και WiFi**

Το σενάριο αυτό αποτελείται από ένα WiFi δίκτυο το οποίο είναι ολοκληρωτικά επικαλυπτόμενο από ένα UMTS δίκτυο. Επιπροσθέτως, υπάρχει και ένας ασύρματος κόμβος, ο οποίος συνδέεται με 2 interfaces και δεν επικοινωνεί με άλλους κόμβους του δικτύου, παρά μόνο έμμεσα μέσω των δύο interfaces. Για τη λύση του προβλήματος της δρομολόγησης εισάγουμε τους Base Stations, ένα για κάθε δίκτυο. Οι σταθμοί βάσης είναι υπεύθυνοι για την αποστολή πακέτων προς την ασύρματη περιοχή. Αρχικά ο ασύρματος κόμβος βρίσκεται μέσα στο UMTS δίκτυο και είναι συνδεδεμένος με τον σταθμό βάσης αυτού του δικτύου. Καθώς κινείται εντοπίζει το WiFi δίκτυο αρχίζει η διαδικασία της μεταπομπής. Με τη βοήθεια των δυο παραπάνω μηχανισμών ο ασύρματος κόμβος ανταλλάσει πληροφορίες δικτύου με σκοπό να εντοπίσει το γειτονικό δίκτυο. Στη συνέχεια έχουμε την εγκαθίδρυση νέας σύνδεσης και τέλος αρχίζει η μεταφορά δεδομένων με το τερματικό να λαμβάνει δεδομένα από τη νέα σύνδεση.



**Σχήμα 7.1** Παρουσίαση μετακίνησης τερματικού μεταξύ ετερογενών δικτύων

Όπως είναι γνωστό, απαραίτητο στοιχείο για ένα σενάριο προσομοίωσης στον ns είναι η σωστά ορισμένοι παράμετροι για ιεραρχική δρομολόγηση σε επίπεδο δικτύου. Η ιεραρχική δρομολόγηση χρησιμοποιείται για τη μείωση της απαίτησης για μνήμη μίας μεγάλης τοπολογίας. Η τοπολογία διασπάται σε επίπεδα ιεραρχίας, με αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους του πίνακα δρομολόγησης. Τα βέλτιστα αποτελέσματα βρέθηκαν ότι εμφανίζονται για 3 επίπεδα ιεραρχίας. Τα επίπεδα ιεραρχίας της τοπολογίας του σεναρίου μας αποτελούνται από 5 domains, με ένα cluster στο κάθε domain και αριθμός κόμβων 3 (UMTS: MN+RNC+BS), 1 (router 0), 1 (router 1), 2 (802.11: MN+BS), 1 (MULTIFACE node) για κάθε cluster αντίστοιχα. Για να είναι δυνατή η χρήση της ιεραρχικής δρομολόγησης στην προσομοίωση μας, ορίστηκε η ιεραρχία της τοπολογίας και δόθηκε σε κάθε κόμβο μία ιεραρχική διεύθυνση. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται δυο δρομολογητές router0 και router1 με διευθύνσεις (1.0.0) και (2.0.0) αντίστοιχα για να εξυπηρετήσουν τη δρομολόγηση. Επιπλέον, έχουμε δυο σταθμούς βάσης (bstation802\_11 και bstationUMTS ) για το δίκτυο 802.11 και UMTS με διευθύνσεις (3.0.0) και (0.0.1) αντίστοιχα. Τα interfaces (iface1, iface2) με διευθύνσεις (3.0.1) και (0.0.2). Τον RNC (όπου αποτελεί τον ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης στο utran) με διεύθυνση (0.0.0) και τέλος τον MultiFaceNode με διεύθυνση (4.0.0) στον οποίο προσαρτώνται τα δύο interfaces.

Είναι γνωστό ότι σε προσομοιώσεις του ns – 2 ο κάθε κόμβος έχει κάποιες συντεταγμένες. Στο σενάριο μας οι σταθμοί βάσης των ετερογενών δικτύων UMTS και WiFi είναι τοποθετημένες στις διαστάσεις (50, 100) και (90, 100) αντίστοιχα. Ο ασύρματος κόμβος βρίσκεται αρχικά στη θέση (40, 100) και από το δεύτερο λεπτό της προσομοίωσης αρχίζει την κίνηση του μεταξύ των δύο

σταθμών βάσεις με σταθερή ταχύτητα 3m/sec και καταλήγει στην θέση με συντεταγμένες (110,100).

Επιπλέον, υπάρχουν ασύρματα μοντέλα διάδοσης τα οποία χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της λαμβανόμενης ισχύς του σήματος του κάθε πακέτου. Στο φυσικό στρώμα του κάθε ασύρματου κόμβου, υπάρχει ένα λαμβανόμενο κατώφλι (threshold). Όταν ένα πακέτο λαμβάνεται, αν η ισχύς του σήματος είναι χαμηλότερη από το κατώφλι αυτό, τότε το πακέτο μαρκάρεται ως λανθασμένο και απορρίπτεται από το MAC στρώμα. Το μοντέλο ασύρματης διάδοσης που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωσή μας είναι το two-ray ground reflection model (τέλειας επίπεδης ανάκλασης) και καλύπτουμε μια εμβέλεια της τάξεως των 20 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη στο ασύρματο δίκτυο WiFi. Το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιούμε και για το δίκτυο του UMTS και καλύπτουμε εμβέλεια της τάξεως των 750 περίπου μέτρων.

Η προσομοίωση λαμβάνει χώρα σε διάστημα 60 min. Η περιοχή κίνησης του ασύρματου κόμβου είναι επίπεδη διαστάσεων 200X200m για το συνδυασμό των ετερογενών δικτύων UMTS – WiFi.

Αφού δημιουργήσαμε την τοπολογία, αξίζει να αναφέρουμε ότι ως παρεχόμενη υπηρεσία στο τερματικό, χρησιμοποιείται μια κίνηση UDP. Στη διαδικασία αυτή δημιουργείτε και ένας CBR δημιουργός κίνησης (traffic generator), ο οποίος στέλνει πακέτο μεγέθους 1000 bytes (χωρίς τις επιπλέον επικεφαλίδες των κατωτέρων στρωμάτων) με το διάστημα (interval) μεταξύ των πακέτων να ανέρχεται στα 0.2 sec. Η παραγωγή κίνησης από τον traffic generator ξεκινά από το δεύτερο λεπτό της προσομοίωσης και τελειώνει τη χρονική στιγμή που τελειώσει και η προσομοίωση.

Περισσότερες λεπτομέρειες για την τοπολογία και άλλα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης μπορούν να βρεθούν στον πλήρη κώδικα tcl, ο οποίος βρίσκεται στο Παράρτημα.

**Πίνακας 7.1.** Παράμετροι του 802.11 για το παραπάνω σενάριο προσομοίωσης

Παράμετροι	Τιμές
Net – Interface	WirelessPHY
MAC πρωτόκολλο επιπέδου	MAC/802_11
Πρωτόκολλο δρομολόγησης	DSDV
Τύπος διασύνδεσης στρώμα	LL
Antenna μοντέλο	Antenna/OmniAntenna
Interface Queue type	Queue/DropTail/ PriQueue
Μέγιστο πακέτο στο ifq	50
Κανάλι τύπου	WirelessChannel
Propagation μοντέλο	TwoRayGround
Συνολικός Χρόνος Προσομοίωσης	60 min
Μέγεθος Τοπολογίας/Περιβάλλοντος	200X200
Traffic Patern	UDP πράκτορας με την κίνηση CBR
Μέγεθος πακέτου	1000 bytes

**Πίνακας 7.2.** Παράμετροι του UMTS για το παραπάνω σενάριο προσομοίωσης

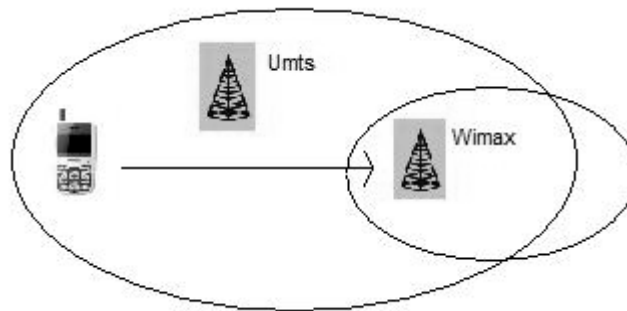
Παράμετροι	Τιμές
Propagation μοντέλο	TwoRayGround
Συνολικός Χρόνος Προσομοίωσης	60 min
Μέγεθος Τοπολογίας/Περιβάλλοντος	200X200
Traffic Patern	UDP πράκτορας με την κίνηση CBR
Μέγεθος πακέτου	1000 bytes



### Σενάριο: Διαπομπή κινητού τερματικού μεταξύ ετερογενών δικτύων UMTS και WiMax

Η υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου μας αποτελείται από τους ίδιους κόμβους (όπως στο πρώτο σενάριο) οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους κατά τον ίδιο τρόπο όμως αλλάζουν πολλές από τις παραμέτρους μας. Σκοπός μας και εδώ είναι να μελετήσουμε τη διαπομπή του κινητού τερματικού μεταξύ των ετερογενών δικτύων UMTS και WiMax.

Το δεύτερο σενάριο αυτό αποτελείται από ένα WiMax δίκτυο το οποίο επικαλύπτεται κατά το ήμισυ από ένα UMTS δίκτυο. Επιπροσθέτως, υπάρχει και ένας ασύρματος κόμβος, ο οποίος συνδέεται και πάλι με 2 interfaces. Για τη λύση του προβλήματος της δρομολόγησης εισάγουμε και εδώ τους Base Stations, ένα για κάθε δίκτυο. Οι σταθμοί βάσης είναι υπεύθυνοι για την αποστολή πακέτων προς την ασύρματη περιοχή. Αρχικά ο ασύρματος κόμβος βρίσκεται μέσα στο UMTS δίκτυο και είναι συνδεδεμένος με τον σταθμό βάσης αυτού του δικτύου. Καθώς κινείται εντοπίζει το WiMax δίκτυο και αρχίζει η διαδικασία της μεταπομπής. Ανταλλάσει πληροφορίες δικτύου γίνεται εγκαθίδρυση της νέας σύνδεσης και τέλος αρχίζει η μεταφορά δεδομένων με το τερματικό να λαμβάνει δεδομένα από τη νέα σύνδεση.



Σχήμα 7.2 Παρουσίαση μετακίνησης τερματικού μεταξύ ετερογενών δικτύων

Τα επίπεδα ιεραρχίας της τοπολογίας του σεναρίου μας αποτελούνται από 5 domains, με ένα cluster στο κάθε domain και αριθμός κόμβων 3 (UMTS: MN+RNC+BS), 1 (router 0), 1 (router 1), 2 (802.16: MN+BS), 1 (MULTIFACE node) για κάθε cluster αντίστοιχα. Για να είναι δυνατή η χρήση της ιεραρχικής δρομολόγησης στην προσομοίωση μας, ορίστηκε και εδώ η ιεραρχία της

τοπολογίας και δόθηκε σε κάθε κόμβο μία ιεραρχική διεύθυνση. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται δυο δρομολογητές router0 και router1 με διευθύνσεις (1.0.0) και (2.0.0) αντίστοιχα για να εξυπηρετήσουν τη δρομολόγηση. Επιπλέον, έχουμε δυο σταθμούς βάσης (bstation802\_11 και bstationUMTS ) για το δίκτυο 802.16 και UMTS με διευθύνσεις (3.0.0) και (0.0.1) αντίστοιχα. Τα interfaces (iface1, iface2) με διευθύνσεις (3.0.1) και (0.0.2). Τον RNC με διεύθυνση (0.0.0) και τέλος τον MutiFaceNode με διεύθυνση (4.0.0) στον οποίο προσαρτώνται τα interfaces.

Στο δεύτερο σενάριο της προσομοίωσης μας οι σταθμοί βάσης των ετερογενών δικτύων UMTS και wimax είναι τοποθετημένες στις διαστάσεις (50, 100) και (550, 100) αντίστοιχα. Ο ασύρματος κόμβος βρίσκεται αρχικά στη θέση (40, 100) και από το δεύτερο λεπτό της προσομοίωσης αρχίζει την κίνηση του μεταξύ των δύο σταθμών με σταθερή ταχύτητα 5m/sec και καταλήγει στην θέση με συντεταγμένες (1000,100).

Το μοντέλο ασύρματης διάδοσης που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωση μας είναι το two-ray ground reflection model (τέλεια επίπεδης ανάκλασης) και καλύπτουμε μια εμβέλεια της τάξεως των 465 μέτρων μεταξύ πομπού και δέκτη στο ασύρματο δίκτυο WiMax. Το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιούμε και για το δίκτυο του UMTS και καλύπτουμε εμβέλεια της τάξεως των 750 περίπου μέτρων.

Η προσομοίωση λαμβάνει χώρα σε διάστημα 60 min. Η περιοχή κίνησης του ασύρματου κόμβου είναι επίπεδη διαστάσεων 2000X2000m για το συνδυασμό των ετερογενών δικτύων UMTS – WiMax.

Επιπλέον, ως παρεχόμενη υπηρεσία στο τερματικό, χρησιμοποιείται μια κίνηση UDP. Στη διαδικασία αυτή δημιουργείτε και ένας CBR δημιουργός κίνησης (traffic generator), ο οποίος στέλνει πακέτο μεγέθους 1000 bytes (χωρίς τις επιπλέον επικεφαλίδες των κατωτέρων στρωμάτων) με το διάστημα (interval) μεταξύ των πακέτων να ανέρχεται στα 0.2 sec. Η παραγωγή κίνησης από τον traffic generator ξεκινά από το δεύτερο λεπτό της προσομοίωσης και τελειώνει τη χρονική στιγμή που τελειώσει και η προσομοίωση.

Περισσότερες λεπτομέρειες και για αυτή την τοπολογία και άλλα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης μπορούν να βρεθούν στον πλήρη κώδικα tcl, ο οποίος βρίσκεται στο Παράρτημα.

**Πίνακας 7.3.** Παράμετροι του 802.16 για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης

Παράμετροι	Τιμές
Net – Interface	WirelessPHY/OFDM
MAC πρωτόκολλο επιπέδου	MAC/802_16
Πρωτόκολλο δρομολόγησης	DSDV
Τύπος διασύνδεσης στρώμα	LL
Antenna μοντέλο	Antenna/OmniAntenna
Interface Queue type	Queue/DropTail/ PriQueue
Μέγιστο πακέτο σε ifq	50
Κανάλι τύπου	WirelessChannel
Propagation μοντέλο	TwoRayGround
Συνολικός Χρόνος Προσομοίωσης	60 min
Μέγεθος Τοπολογίας/Περιβάλλοντος	2000X2000
Traffic Patern	UDP πράκτορας με την κίνηση CBR
Μέγεθος πακέτου	1000 bytes

**Πίνακας 7.4.** Παράμετροι του UMTS για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης

Παράμετροι	Τιμές
Propagation μοντέλο	TwoRayGround
Συνολικός Χρόνος Προσομοίωσης	60 min
Μέγεθος Τοπολογίας/Περιβάλλοντος	2000X2000
Traffic Patern	UDP πράκτορας με την κίνηση CBR
Μέγεθος πακέτου	1000 bytes

Αξίζει να σημειώσουμε ότι έχουν γίνει οι προσομοιώσεις των παραπάνω σεναρίων με τις ίδιες παραμέτρους και για περισσότερους από ένα έναν ασύρματο κόμβο. Τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### 7.3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Μετά την εκτέλεση των παραπάνω σεναρίων προσομοίωσης έχουμε τη συγκέντρωση και ανάλυση των αποτελεσμάτων με σκοπό τόσο να αξιολογήσουμε τη διαπομπή μεταξύ ετερογενών δικτύων στην οποία γίνεται χρήση του προτύπου 802.21, όσο και να συλλέξουμε επιμέρους αποτελέσματα, μεταβάλλοντας τον αριθμό των χρηστών (1, 5 και 10 χρήστες), ώστε μέσω των μετρήσεων να διεξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη μέση διαμεταγωγή (Throughput), δηλαδή το μέσο πλήθος των πακέτων που μπορεί να δεχτεί και να μεταδώσει ένα δίκτυο στη μονάδα του χρόνου, αλλά και για την από άκρο σε άκρο μέση χρονική καθυστέρηση (End to End Delay), δηλαδή το μέσο χρόνο που απαιτείται για ένα πακέτο ώστε να μεταφερθεί μέσα στο δίκτυο από την πηγή στον προορισμό.

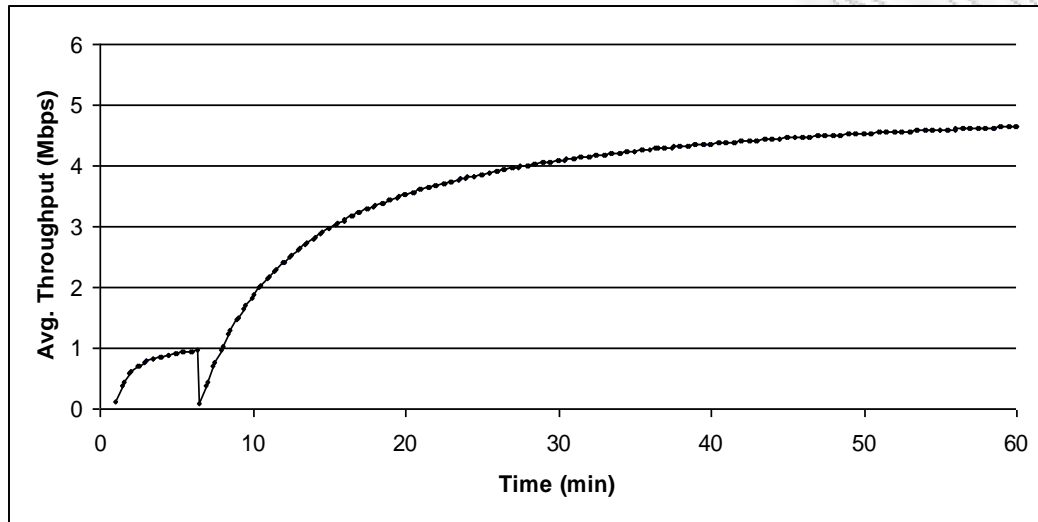
Πριν δούμε τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις μας, καλό θα ήταν να εκτιμήσουμε τα πιθανά αποτελέσματα βασιζόμενοι στο θεωρητικό υπόβαθρο που διαθέτουμε. Αρχικά πρέπει να αναφέρουμε ότι το πρωτόκολλο 802.21 που κάνουμε χρήση προσπαθεί να προτυποποιήσει την κάθετη διαπομπή προκειμένου να καταστεί εφικτή ανεξαρτήτων τεχνολογιών υπηρεσιών και πρωτοκόλλων κινητικότητας. Η κάθετη όμως διαπομπή ονομάζεται έτσι λόγω του γεγονότος πως το τερματικό για να αποκτήσει ένα νέο σημείο πρόσβασης θα πρέπει να εγκαταλείψει το AP που χρησιμοποιούσε μέχρι την στιγμή αυτή, έτσι ώστε να διατηρεί μόνο μία σύνδεση ανά πάσα στιγμή. Δεδομένης της διακοπής της σύνδεσης θα υπάρχει και απώλεια πακέτων, η οποία εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται μέχρι να εγκατασταθεί σύνδεση με το νέο AP, το εύρος ζώνης και τις διάφορες καθυστερήσεις. Άρα αναμενόμενο αποτέλεσμα από τις προσομοιώσεις μας θα είναι να υπάρχει απώλεια σύνδεσης και κατ' επέκταση και απώλεια πακέτων τη στιγμή που εγκαταλείπει το σταθμό βάσης του ενός δικτύου και μέχρι να γίνει επανασύνδεση με το επόμενο.

Επιπλέον, από τα αποτελέσματα του μέσου Throughput και της end to end μέσης καθυστέρησης θα εξάγουμε συμπεράσματα για το κατά πόσο αξίζει η διαπομπή μεταξύ των ετερογενών δικτύων. Όπως γνωρίζουμε το 802.21 εκτιμά τις συνθήκες του δικτύου στο οποίο βρίσκεται και αν οι συνθήκες δεν είναι ικανοποιητικές απαιτεί ανεύρεση νέων διαθέσιμων δικτύων. Απώτερο θεμιτό αποτέλεσμα λοιπόν είναι να έχουμε αύξηση του ρυθμού μετάδοσης και μείωση της καθυστέρησης καθώς μεταβαίνει το κινητό τερματικό από το Umts δίκτυο στο Wifi ή στο Wimax δίκτυο.

Σε ότι έχει να κάνει με την αύξηση των χρηστών αναμένουμε παράλληλη αύξηση του Throughput στο εκάστοτε δίκτυο καθότι αυξάνονται τα πακέτα που στέλνονται. Επίσης, το κανάλι αρχικά έχει ανοχή και η μικρή αύξηση των χρηστών δεν επηρεάζει αρνητικά την επίδοσή του. Όσο όμως ο αριθμός μεγαλώνει περιμένουμε μείωση της διέλευσης αφού ο κάθε ασύρματος κόμβος παρενοχλείται από τους κοντινούς σε αυτόν κόμβους. Αναμενόμενο αποτέλεσμα τελικά είναι η μέση καθυστέρηση του πακέτου να αυξάνει συνεχώς.

Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις απεικονίζονται τα αποτελέσματα μας. Στην γραφική παράσταση (Σχήμα 7.3) παρατηρούμε το μέσο ρυθμό Throughput για έναν χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi. Αρχικά, ο μέσος ρυθμός μετάδοσης ξεκινάει από χαμηλές τιμές στο Umts δίκτυο και φτάνει λίγο πριν το 1 Mbps κοντά στα 7 πρώτα λεπτά της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, έχουμε μια κατακόρυφη μείωση του μέσου Throughput που φτάνει σε τιμή κοντά στο μηδέν. Αυτή η κατακόρυφη μείωση παρατηρείται τη χρονική στιγμή των 7 πρώτων λεπτών, η στιγμή αυτή είναι η στιγμή της διαπομπής, όπου ο κινητός κόμβος μεταβαίνει από το ένα δίκτυο στο άλλο. Όπως αναφέραμε και νωρίτερα τη στιγμή εκείνη έχουμε απώλεια σύνδεσης και τα πακέτα που στέλνονται απορρίπτονται, άρα λογικό να παρατηρείται κατακόρυφη μείωση του μέσου Throughput με τιμή κοντά στο μηδέν. Το θετικό αποτέλεσμα από την κατακόρυφη πτώση είναι ότι δε διαρκεί παρά ελάχιστα και αυτό γιατί με τους μηχανισμούς που διαθέτει το πρότυπο 802.21 έχει καταφέρει να εντοπίσει ήδη το γειτονικό δίκτυο πριν τη στιγμή της διαπομπής και με την εγκαθίδρυση παρατηρούμε ότι αρχίζει κατευθείαν η μεταφορά δεδομένων από τη νέα σύνδεση. Έτσι καθώς ο κινητός κόμβος μεταβαίνει στο Wifi δίκτυο παρατηρούμε ότι το

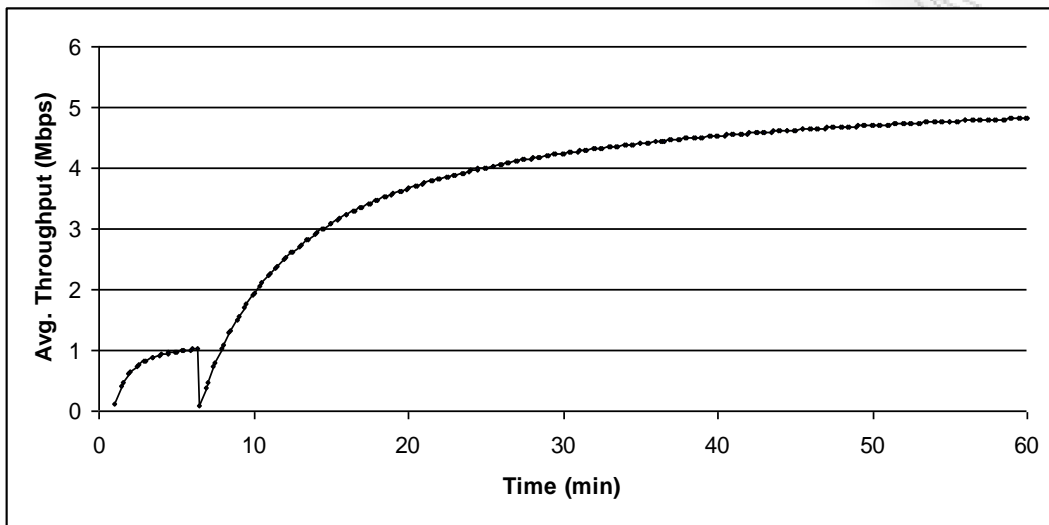
μέσο Throughput αρχίζει πάλι να αυξάνει σταδιακά με τιμές που φτάνουν κοντά στα 4,5 Mbps προς το τέλος της προσομοίωσης. Οι τιμές του μέσου Throughput στο Wifi δίκτυο είναι αρκετά ικανοποιητικές συγκριτικά με τις τιμές στο Umts δικτύου, άρα αντιλαμβανόμαστε ότι άξιζε η διαδικασία της διαπομπής.



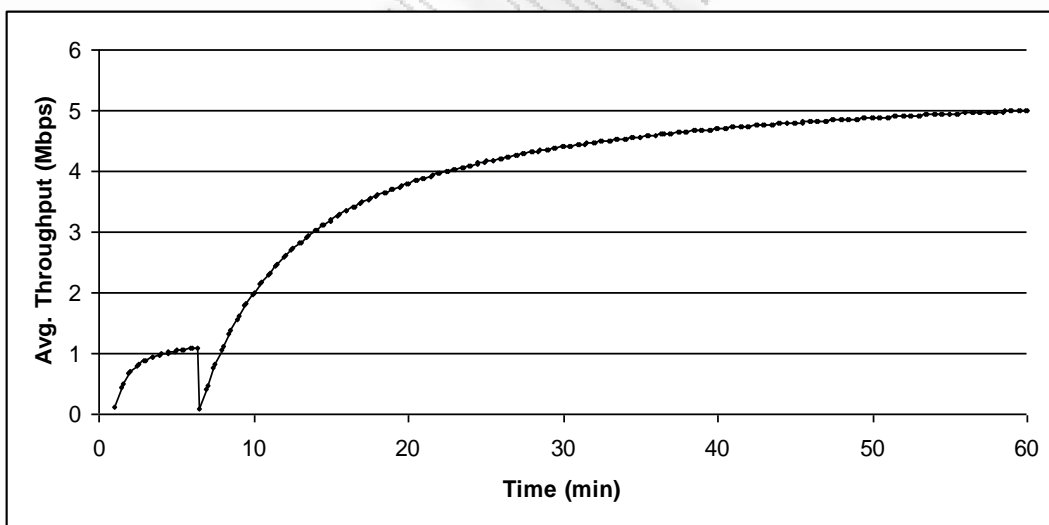
**Σχήμα 7.3** Avg. Throughput ενός χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi

Στις επόμενες δύο γραφικές παραστάσεις (Σχήμα 7.4, Σχήμα 7.5) αξίζει να προσέχουμε ότι όντως όσο αυξάνονται οι χρήστες έχουμε και αύξηση του μέσου Throughput. Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης για πέντε χρήστες ξεκινάει από χαμηλές τιμές στο Umts δίκτυο και φτάνει το 1 Mbps κοντά στα 7 πρώτα λεπτά της προσομοίωσης, ενώ στη γραφική παράσταση των 10 χρηστών βλέπουμε ότι το μέσο Throughput ξεπερνάει ελαφρώς το 1 Mbps. Στις επόμενες δύο γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ξανά ότι κατά το σημείο της διαπομπής μεταξύ των δικτύων Umts και Wifi για πέντε και δέκα χρήστες έχουμε και πάλι κατακόρυφη μείωση του μέσου ρυθμού μετάδοσης που φτάνει σε τιμή κοντά στο μηδέν, εξηγώντας νωρίτερα γιατί συμβαίνει αυτό. Στη συνέχεια, αφού ο κινητός κόμβος έχει μεταβεί στο Wifi δίκτυο βλέπουμε ότι το μέσο Throughput αρχίζει πάλι να ανεβαίνει σε τιμές που φτάνουν κοντά στα 5 Mbps για πέντε χρήστες και τιμές που ξεπερνούν ελαφρώς το 5 Mbps για 10 χρήστες προς το τέλος της προσομοίωσης. Το παρακάτω αποτέλεσμα θα έπρεπε να είναι και το αναμενόμενο διότι όπως προαναφέραμε με την αύξηση των χρηστών αναμένουμε

παράλληλη αύξηση του Throughput στο εκάστοτε δίκτυο καθότι αυξάνονται τα πακέτα που στέλνονται.



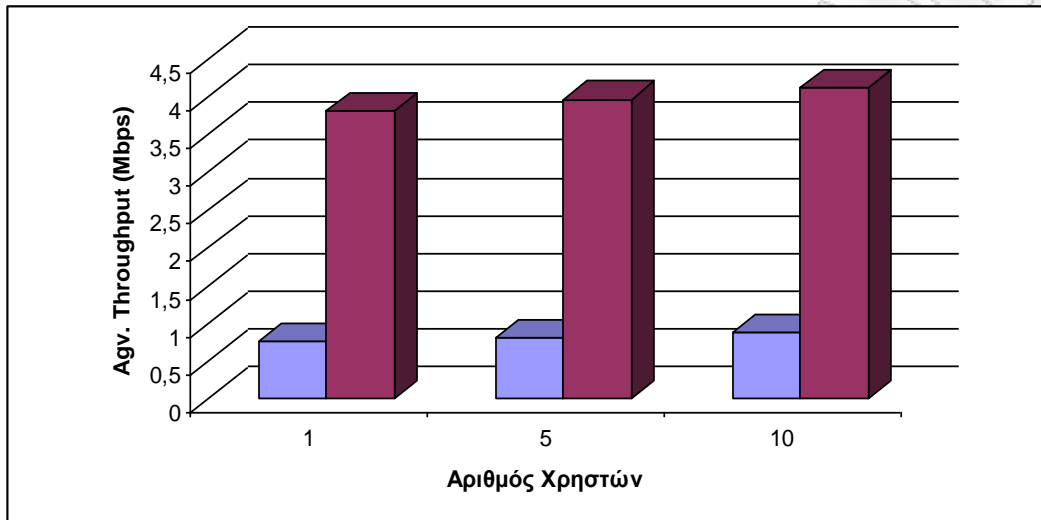
**Σχήμα 7.4** Avg. Throughput πέντε χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi



**Σχήμα 7.5** Avg. Throughput δέκα χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi

Το επόμενο σχήμα (Σχήμα 7.6) δίνεται κατά κύριο λόγο για σύγκριση του μέσου ρυθμού μετάδοσης ως προς τους χρήστες. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Umts δίκτυο, ενώ με μοβ χρώμα τα αποτελέσματα για το Wifi δίκτυο. Παρατηρούμε ξεκάθαρα για άλλη μία φορά ότι έχουμε έστω και

απειροελάχιστη αύξηση του μέσου ρυθμού μετάδοσης καθώς αυξάνονται οι χρήστες καθώς επίσης ορθά έγινε η διαδικασία της διαπομπής από το ένα δίκτυο στο άλλο αφού οι ρυθμοί μετάδοσης είναι μεγαλύτεροι στο Wifi δίκτυο.

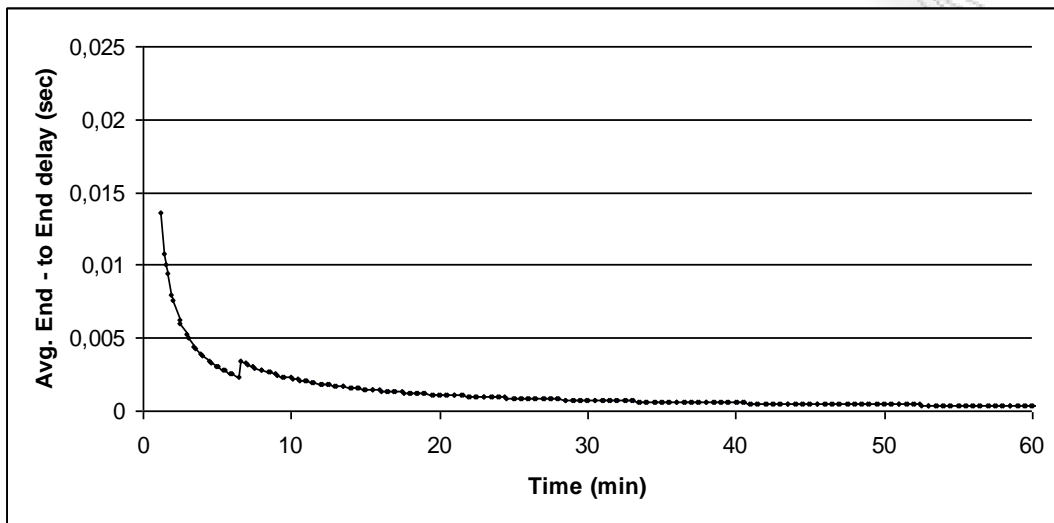


**Σχήμα 7.6** Σύγκριση Avg. Throughput για 1, 5 και 10 χρήστες στα δίκτυα Umts και Wifi

Στην επόμενη γραφική παράσταση (Σχήμα 7.7) παρατηρούμε τη μέση end to end καθυστέρηση ενός χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi. Η μέση end to end καθυστέρηση ενός χρήστη ξεκινάει από τιμές στο Umts δίκτυο που φτάνει λίγο πάνω από τα 0,01 sec στην αρχή της προσομοίωσης και καταλήγει σε τιμή αρκετά κάτω από 0,005 sec κοντά στα 7 πρώτα λεπτά της προσομοίωσης. Στη συνέχεια έχουμε τη στιγμή της διαπομπής όπου ο κινητός κόμβος μεταβαίνει από το ένα δίκτυο στο άλλο. Όπως αναφέραμε και νωρίτερα τη στιγμή εκείνη έχουμε απώλεια σύνδεσης, όμως με τους μηχανισμούς που διαθέτει το πρότυπο 802.21 έχει καταφέρει να εντοπίσει ήδη το γειτονικό δίκτυο πριν τη στιγμή της διαπομπής. Έτσι έχουμε άμεση εγκαθίδρυση σύνδεσης με το Wifi δίκτυο και παρατηρούμε ότι η μέση end to end καθυστέρηση σε αυτό το δίκτυο αρχίζει από μία τιμή λίγο πάνω από τα 0,03 sec και μειώνεται σε τιμή κοντά στο μηδέν προς το τέλος της προσομοίωσης. Η μέση καθυστέρηση του Wifi δικτύου είναι αναμενόμενο να είναι μικρότερη έναντι ενός Umts δικτύου λόγω του ότι το Wifi δίκτυο έχει μεγαλύτερο capacity, δηλαδή μεγαλύτερο ρυθμό



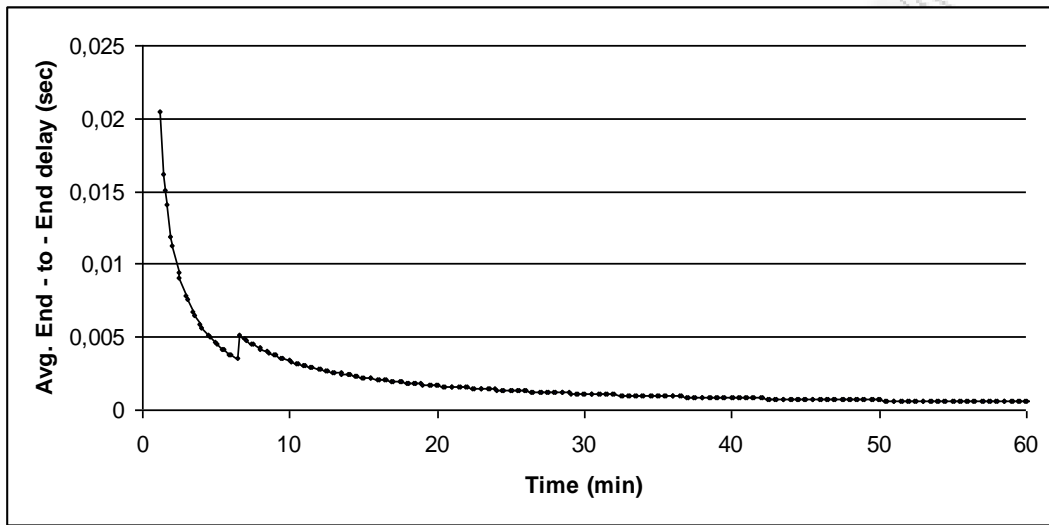
με τον οποίο μπορούμε να λάβουμε δεδομένα. Άρα, ορθή η απόφαση μεταπομπής στο Wifi δίκτυο.



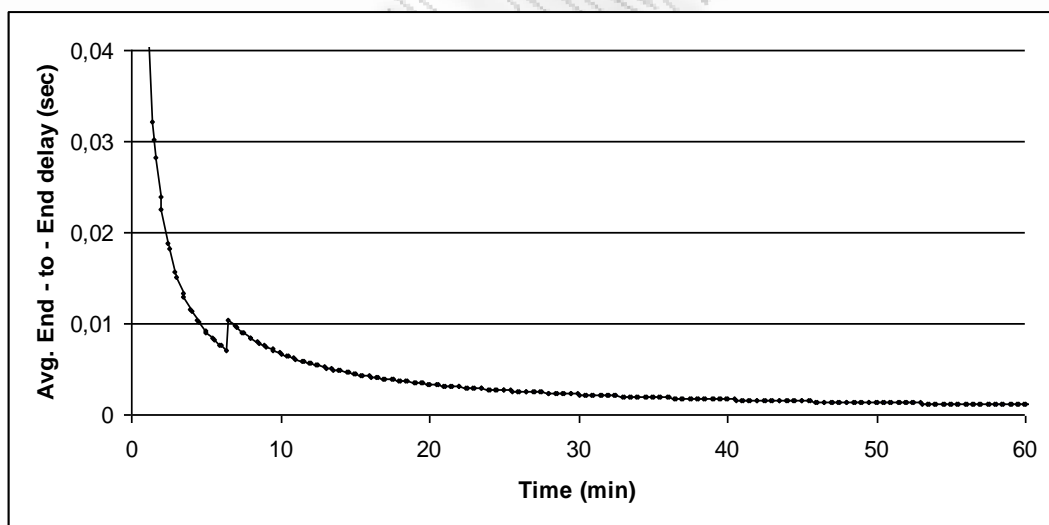
**Σχήμα 7.7** Avg. End to End Delay ενός χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi

Στις επόμενες δύο γραφικές παραστάσεις (Σχήμα 7.8, Σχήμα 7.9) παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται οι χρήστες έχουμε και αύξηση της μέσης end to end καθυστέρησης. Για πέντε χρήστες ξεκινάει στο Umts δίκτυο από τιμές που φτάνουν τα 0,2 sec και καταλήγει σε τιμές κοντά στα 0,003 sec τα 7 πρώτα λεπτά της προσομοίωσης, ενώ στη γραφική παράσταση των 10 χρηστών βλέπουμε ότι η μέση end to end καθυστέρηση ξεκινάει από τιμές 0,04 sec και καταλήγει σε τιμές λίγο κάτω από το 0,01 λίγο πριν τη διαπομπή. Τη στιγμή της διαπομπής μεταξύ των δικτύων Umts και Wifi για πέντε και δέκα χρήστες αντίστοιχα παρατηρείται και πάλι απώλεια σύνδεσης. Στη συνέχεια, αφού ο κινητός κόμβος έχει μεταβεί στο Wifi δίκτυο βλέπουμε ότι η μέση end to end καθυστέρηση ξεκινάει από 0,005 sec για πέντε χρήστες και πέφτει, καταλήγοντας στο 0,001 sec πέραν της οποίας δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή της τιμής της ως το τέλος της μίας ώρας προσομοίωσης. Για 10 χρήστες στο Wifi δίκτυο οι τιμές της μέσης end to end καθυστέρησης κινούνται πτωτικά κατά τον ίδιο τρόπο με τιμές που ξεκινούν κοντά στο 0,01 sec και καταλήγουν περίπου στο 0,002 sec. Με την αύξηση των χρηστών υπάρχει όπως προαναφέραμε μείωση της διέλευσης και έτσι η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση αυξάνεται συνεχώς στο εκάστοτε δίκτυο. Όμως και

πάλι η μέση καθυστέρηση μειώνεται καθώς μεταβαίνουμε στο Wifi δίκτυο ανεξάρτητα από τους πόσους χρήστες έχουμε κάθε φορά.



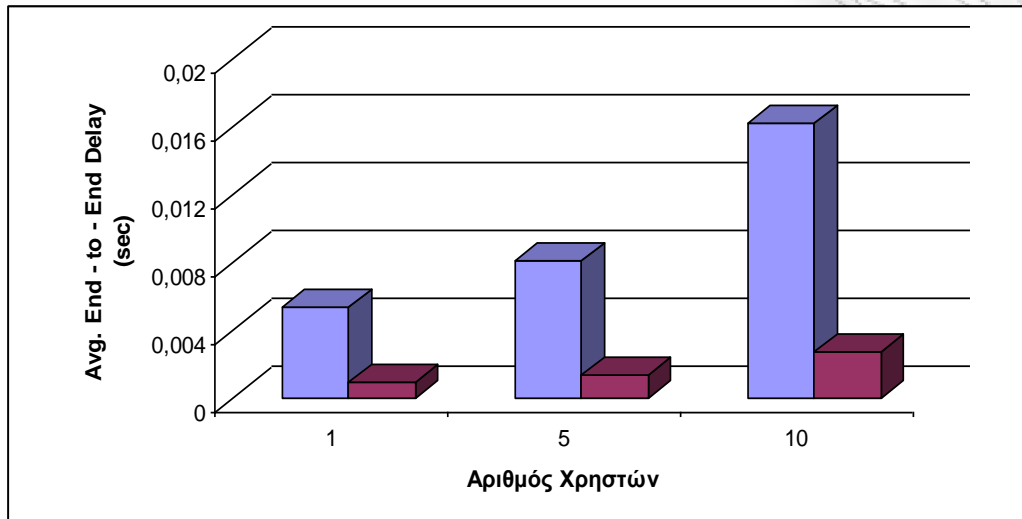
**Σχήμα 7.8** Avg. End to End Delay πέντε χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi



**Σχήμα 7.9** Avg. End to End Delay δέκα χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wifi

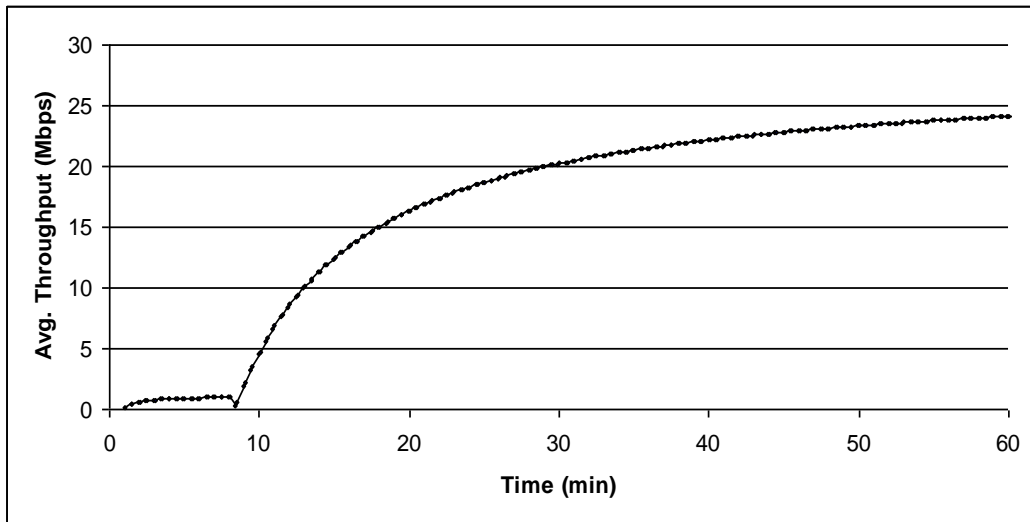
Το επόμενο σχήμα (Σχήμα 7.10) δίνεται κατά κύριο λόγο για σύγκριση της μέσης End to End καθυστέρησης ως προς τους χρήστες. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Umts δίκτυο, ενώ με μοβ χρώμα τα αποτελέσματα για το Wifi δίκτυο. Παρατηρούμε για άλλη μία φορά ότι έχουμε

αύξηση της μέσης End to End καθυστέρησης καθώς αυξάνονται οι χρήστες λόγω του ότι υπάρχει ενόχληση του κάθε κόμβου από τους άλλους κοντινούς κόμβους του. Ωστόσο, άξιζε η διαδικασία της διαπομπής από το ένα δίκτυο στο άλλο αφού η μέση καθυστέρηση μειώνεται στο Wifi δίκτυο.

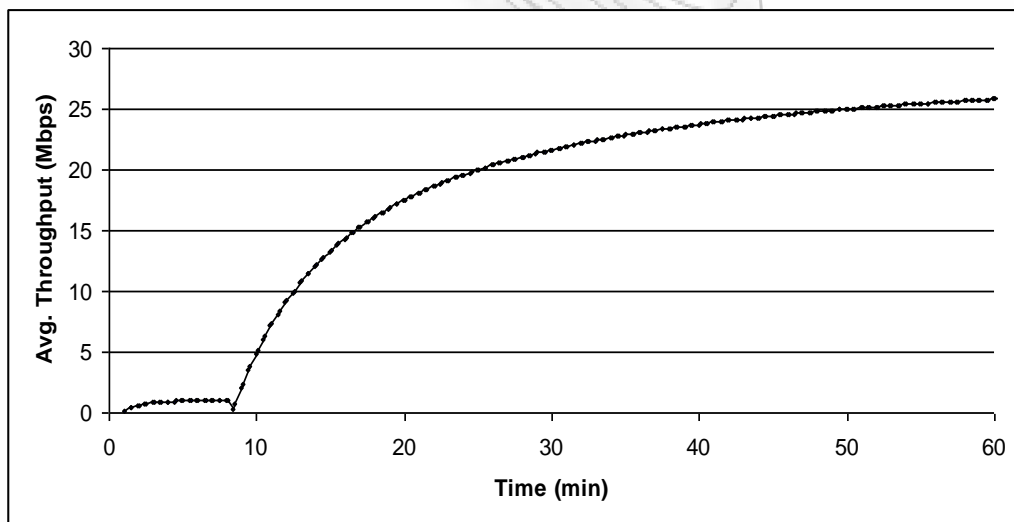


**Σχήμα 7.10** Σύγκριση Avg. End to End Delay για 1, 5 και 10 χρήστες στα δίκτυα Umts και Wifi

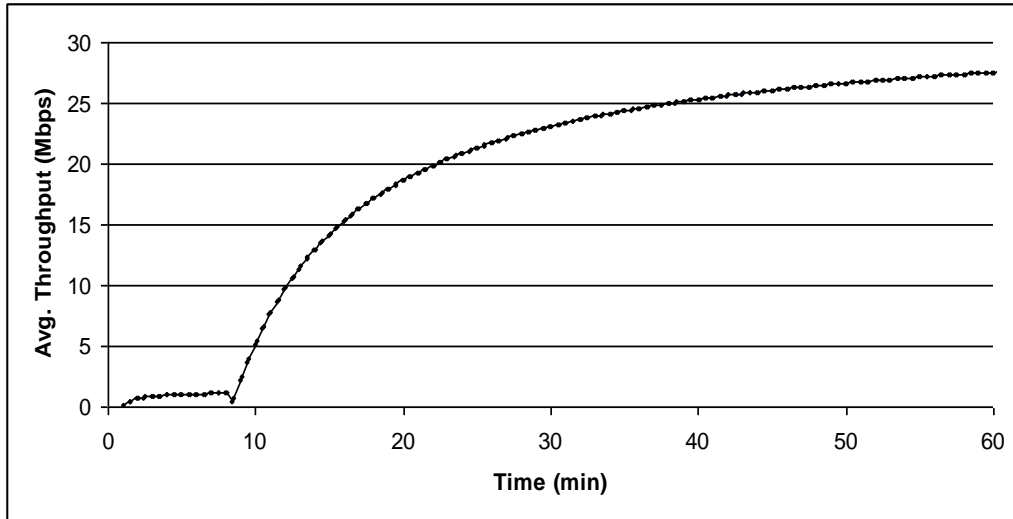
Τα αποτελέσματα από το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης όπως είναι αναμενόμενο δεν έχουν ιδιαίτερη απόκλιση από τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου τουλάχιστον σε ότι αφορά τη διαπομπή του κινητού τερματικού μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και Wimax. Σημαντική διαφορά έχουμε όμως στις τιμές του μέσου Throughput και της end to end μέσης καθυστέρησης και αυτό όχι στο Umts δίκτυο αλλά στο Wimax δίκτυο. Παρακάτω παραθέτουμε τις γραφικές παραστάσεις με τη σειρά που παρουσιάστηκαν και στην προηγούμενη ανάλυση του πρώτου σεναρίου. Το μόνο που αξίζει να αναφέρουμε ως περαιτέρω πληροφορία είναι ότι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης του Wimax δικτύου αγγίζει τα 25 Mbps ανάλογα και με τον αριθμό των χρηστών που έχουμε κάθε φορά καθώς επίσης ότι η μέση καθυστέρηση στο Wimax δίκτυο έχει τιμές μικρότερες από ότι αυτές που είδαμε νωρίτερα στο Wifi δίκτυο. Λογικό αν αναλογιστούμε το capacity που έχει ένα Wimax δίκτυο. Στη συνέχεια έχουμε τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων.



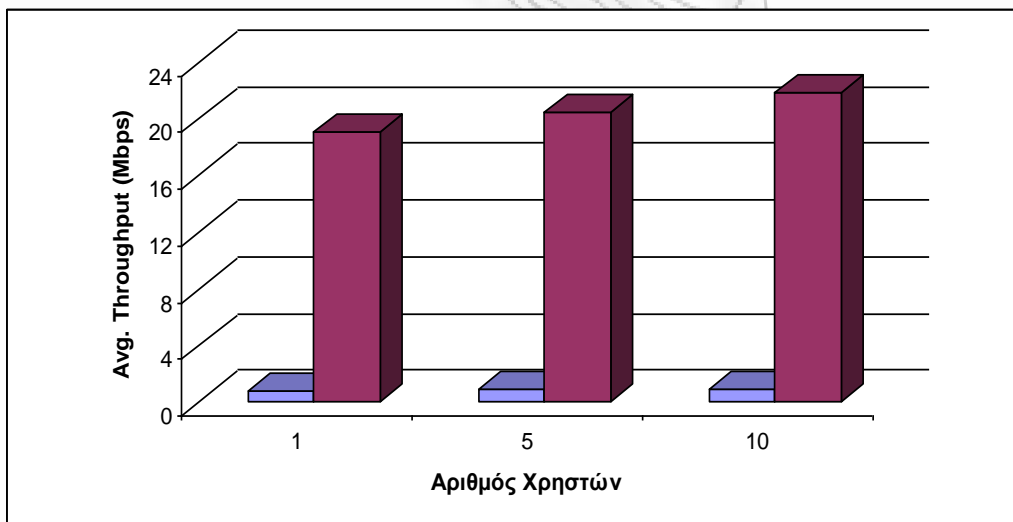
**Σχήμα 7.11** Avg. Throughput ενός χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax



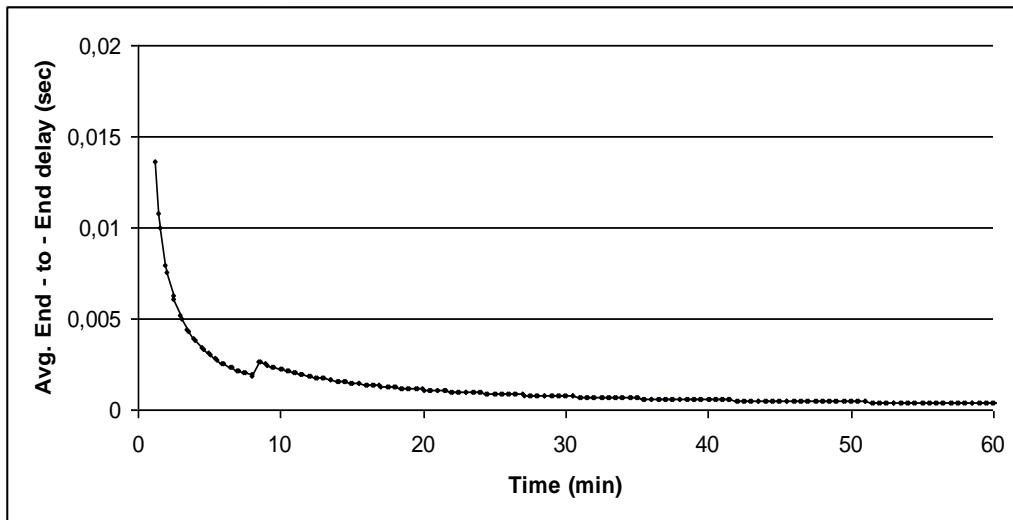
**Σχήμα 7.12** Avg. Throughput πέντε χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax



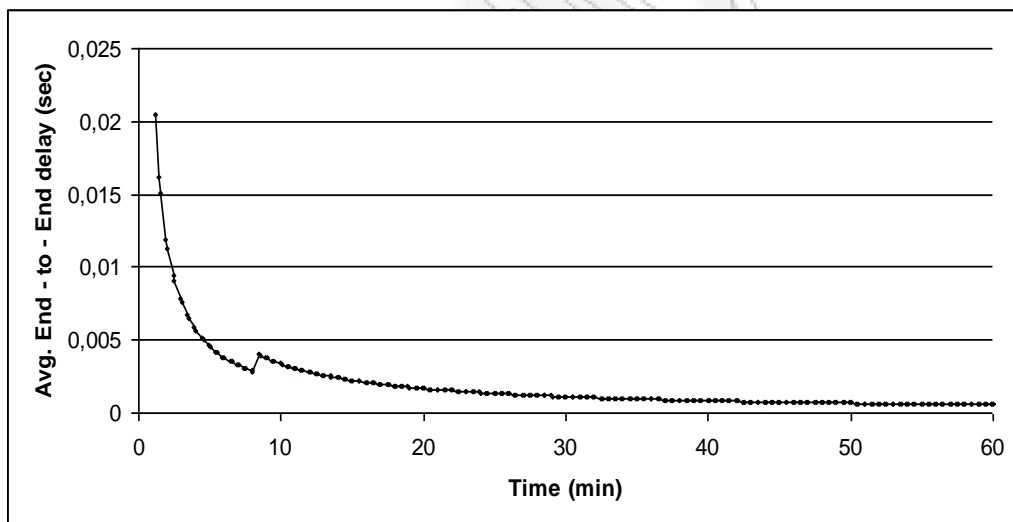
Σχήμα 7.13 Avg. Throughput δέκα χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax



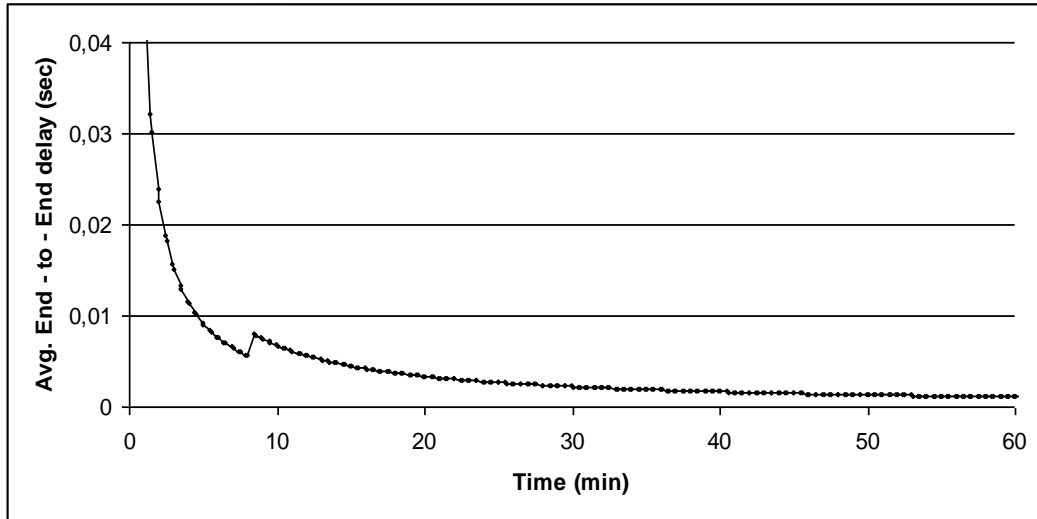
Σχήμα 7.14 Σύγκριση Avg. Throughput για 1, 5 και 10 χρήστες στα δίκτυα Umts και WiMax



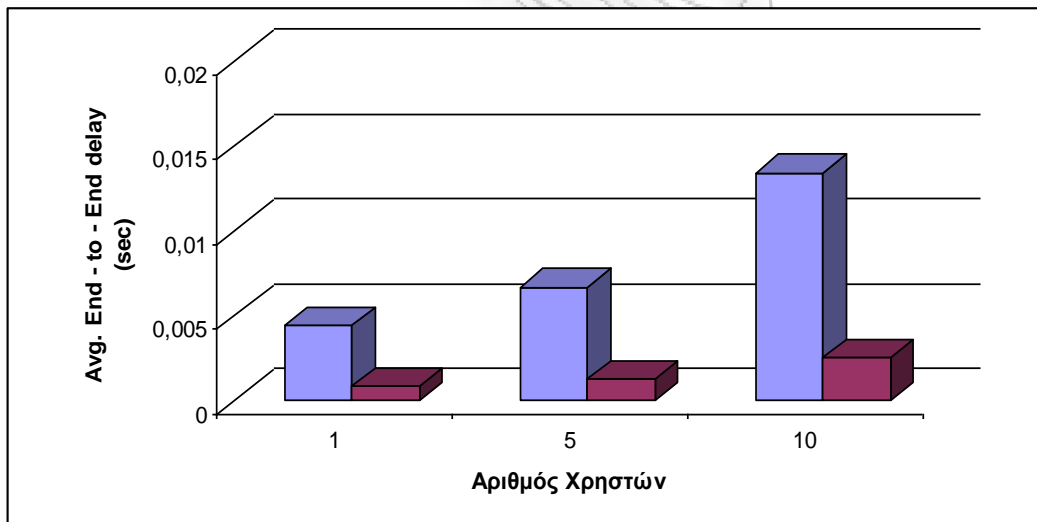
**Σχήμα 7.15** Avg. End to End Delay ενός χρήστη μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax



**Σχήμα 7.16** Avg. End to End Delay πέντε χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax



Σχήμα 7.17 Avg. End to End Delay δέκα χρηστών μεταξύ των ετερογενών δικτύων Umts και WiMax



Σχήμα 7.18 Σύγκριση Avg. End to End delay για 1, 5 και 10 χρήστες στα δίκτυα Umts και WiMax

## **8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **8.1. Εισαγωγή**

Το κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν μετά τη περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και εξετάζει αν τα συμπεράσματα ανταποκρίνονται στους αρχικά επιδιωκόμενους στόχους.

### **8.2. Συμπεράσματα**

Σκοπός της εργασίας ήταν να μελετήσει τα ασύρματα δίκτυα Wifi, Wimax και Umts και στη συνέχεια να εξετάσει τη διαδικτύωση ετερογενών ασύρματων δικτύων και συγκεκριμένα να επικεντρωθεί στη διαπομπή μεταξύ των προαναφερθέντων δικτύων με χρήση του προτύπου IEEE 802.21.

Όπως προαναφέραμε το πρότυπο 802.21 προσπαθεί να προτυποποιήσει τη κάθετη διαπομπή, όπως είναι γνωστό στην κάθετη διαπομπή το τερματικό για να αποκτήσει το νέο σημείο πρόσβασης πρέπει να εγκαταλείψει το AP που χρησιμοποιούμε μέχρι εκείνη τη στιγμή ώστε να διατηρεί μόνο μία σύνδεση ανά πάσα στιγμή. Με τη διακοπή της σύνδεσης όμως έχουμε απώλεια πακέτων μέχρις ότου να εγκατασταθεί η σύνδεση με το νέο AP. Από τα αποτελέσματα διαπιστώσαμε ότι τη στιγμή της διαπομπής έχουμε μια κατακόρυφη μείωση του μέσου ρυθμού μετάδοσης και της από άκρο σε άκρο μέσης καθυστέρησης. Όμως



η μείωση δε διήρκησε παρά ελάχιστα, δεδομένου ότι το 802.21 διαθέτει μηχανισμούς που καταφέρνει να εντοπίσει το γειτονικό δίκτυο πριν από τη στιγμή της διαπομπής και με την εγκαθίδρυση έχουμε κατευθείαν μεταφορά δεδομένων από το νέο δίκτυο.

Επιπλέον, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας συμπεραίνουμε ότι ορθά οι μηχανισμοί του 802.21 προχώρησαν στη διαδικασία διαπομπής και μετάβασης των κινητών τερματικών σε νέα δίκτυα. Οι μηχανισμοί εκτίμησαν ότι οι συνθήκες του Umts δικτύου όπου πρόσφερε ρυθμό μετάδοσης που έφτανε το 1 Mbps δεν ήταν ικανοποιητικές. Προχώρησε έτσι στην ανεύρεση νέων δικτύων Wifi με μέσο ρυθμό μετάδοσης περίπου στα 4,5 Mbps και Wimax κοντά στα 25 Mbps και με τιμές end to end μέσης καθυστέρησης μικρότερες στα Wifi και Wimax δίκτυα έναντι του Umts δικτύου. Αναμενόμενο λόγω του μεγαλύτερου capacity που διαθέτουν.

Σε ότι έχει να κάνει με τον αριθμό των χρηστών που υπάρχουν σε ένα δίκτυο καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όντως καθώς αυξάνονται οι χρήστες έχουμε έστω και απειροελάχιστη αύξηση του μέσου ρυθμού μετάδοσης στο εκάστοτε δίκτυο και αυτό γιατί αυξάνονται τα πακέτα. Επίσης, στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και για την από άκρο σε άκρο μέση καθυστέρηση η οποία αυξάνει συνεχώς με την αύξηση των χρηστών αφού έχουμε μείωση της διέλευσης και ο κάθε κόμβος παρενοχλείται από τους άλλους κοντινούς προς αυτόν κόμβο.

Γενικά, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η διαδικτύωση ετερογενών ασύρματων συστημάτων είναι αναγκαία και χρήσιμη για την κάλυψη των αυξημένων αναγκών των χρηστών σήμερα. Επίσης, οι μηχανισμοί του προτύπου 802.21 βοηθούν ώστε η διαπομπή μεταξύ διαδικτυωμένων ετερογενών δικτύων να γίνεται σε αμελητέο χρόνο και έτσι να έχουμε σχεδόν συνεχή μεταφορά δεδομένων και με την δυνατότητα τους να εκτιμούν συνεχώς τις συνθήκες του κάθε δικτύου και να προχωράνε στην ανεύρεση νέων καλύτερων δικτύων προσφέρουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στους χρήστες.

## Βιβλιογραφική Αναφορά

- [1] Frank Ohrtman, «WiMAX handbook, Building 802.16 Wireless Networks», McGraw-Hill, 2005
- [2] «Ευρυζωνικότητα – Υπηρεσίες Προώθησης Ευρυζωνικότητας»  
<http://broadband.cti.gr/el/evrizonikotita/evrizonikotita.php>
- [3] «Broadband Technology Overview, White Paper»  
<http://www.corning.com/docs/opticalfiber/wp6321.pdf>
- [4] «IEEE802.11»  
[http://el.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11](http://el.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11)
- [5] «IEEE 802.11 Architecture»,  
<http://www.scribd.com/doc/3864389/802-11-Architecture>
- [6] «Introduction to IEEE 802.11»,  
<http://www.intelligraphics.com/introduction-ieee-80211>
- [7] «IEEE 802.11 Architecture»,  
[http://www.tutorial-reports.com/wireless/wlanWiFi/WiFi\\_architecture.php](http://www.tutorial-reports.com/wireless/wlanWiFi/WiFi_architecture.php)
- [8] «Υπηρεσίες IEEE802.11»  
[http://www.patraswireless.net/tutorial/basic%20tutorial/tutorial/ieee\\_802\\_11b.htm](http://www.patraswireless.net/tutorial/basic%20tutorial/tutorial/ieee_802_11b.htm)
- [9] «OSI Model»,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/OSI\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/OSI_model)
- [10] «How 802.11 Wireless Works»,  
[http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc757419\(WS.10\).aspx](http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc757419(WS.10).aspx)

- [11] «IEEE 802.11 Overview»,  
<http://wow.eecs.berkeley.edu/ergen/docs/IEEE-802.11overview.ppt#257>
- [12] «Wireless Data Technology»,  
[http://books.google.gr/books?id=6Y-nc3-8w4MC&pg=PA100&lpg=PA100&dq=phy+layer+in+ieee802.11+-+infrared&source=bl&ots=Org2Ft1ZL5&sig=GKdxAoQVi-IDp5iMvnYkKjje0y4&hl=el&ei=IzStSvGNHOqMjAeZuuiBCA&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=10#v=onepage&q=&f=false](http://books.google.gr/books?id=6Y-nc3-8w4MC&pg=PA100&lpg=PA100&dq=phy+layer+in+ieee802.11+-+infrared&source=bl&ots=Org2Ft1ZL5&sig=GKdxAoQVi-IDp5iMvnYkKjje0y4&hl=el&ei=IzStSvGNHOqMjAeZuuiBCA&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=10#v=onepage&q=&f=false)
- [13] «Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)»,  
<http://www.qsl.net/n9zia/wireless/dsss.html>
- [14] «Frequency Hopped Spread Spectrum (FHSS)»,  
<http://www.qsl.net/n9zia/wireless/fhss.html>
- [15] «MAC Layer Introduction & the IEEE802.11 standard»,  
<http://www.ecse.rpi.edu/homepages/abouzeid/6962-05/monet05.pdf>
- [16] «Παροχή Στοχαστικών Εγγυήσεων (QoS) σε IEEE 802.11 δίκτυα»,  
[http://www.iit.demokritos.gr/IIT\\_SS/Presentations/on\\_off\\_802.11MAC.pdf](http://www.iit.demokritos.gr/IIT_SS/Presentations/on_off_802.11MAC.pdf)
- [17] Stefan Mangold, Sunghyun Choi, Peter May, Ole Klein, Guido Hiertz, Lothar Stibor, «IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service»,  
<http://www.mwnl.snu.ac.kr/~schoi/publication/Conferences/02-EW.pdf>
- [18] «Overview of IEEE 802.11 Security»,  
[http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2001/Mar01/01154r0P802-15\\_TG3-Overview-of-802-11-Security.ppt#332.2,Acknowledgements](http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2001/Mar01/01154r0P802-15_TG3-Overview-of-802-11-Security.ppt#332.2,Acknowledgements)

- [19] «Wired Equivalent Privacy»,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wired\\_Equivalent\\_Privacy](http://en.wikipedia.org/wiki/Wired_Equivalent_Privacy)
- [20] «WiMAX – Techteam.gr/wiki», <http://techteam.gr/wiki/WiMAX>
- [21] «Προώθηση της Ευρυζωνικότητας – Δυτική Ελλάδα»,  
<http://broadband.cti.gr/el/evrizonikotita/wimax.php>
- [22] «Wireless Architecture : point-to-point and point to multipoint»,  
[http://www.wimax.com/education/wimax/wireless\\_architectures](http://www.wimax.com/education/wimax/wireless_architectures)
- [23] «WiMAX’s technology for LOS and NLOS environments»,  
<http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAXNLOSgeneral-versionaug04.pdf>
- [24] Carl Eklund, Roger B. Marks, Kenneth L. Stanwood, Stanley Wang, “IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access”, IEEE Communications Magazine, June 2002, pp 98-107
- [25] «IEEE 802.16 Wireless MAN “ Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access systems”»,  
[http://www.ceenet.org/workshops/lectures2004/Richard\\_Perlman/additional\\_materials\(wimax\)/802\\_16B-Wireless-MAN.ppt](http://www.ceenet.org/workshops/lectures2004/Richard_Perlman/additional_materials(wimax)/802_16B-Wireless-MAN.ppt)
- [26] «Orthogonal Frequency Division Multiplexing»  
[http://pc.parnu.ee/~ttamb/ikt/net/fyysiline\\_andmelyli/wlan/wimax\\_jms/303787.pdf](http://pc.parnu.ee/~ttamb/ikt/net/fyysiline_andmelyli/wlan/wimax_jms/303787.pdf)
- [27] «The 802.16 WirelessMAN MAC »,  
[http://www.ieee802.org/16/docs/01/80216-01\\_58r1.pdf](http://www.ieee802.org/16/docs/01/80216-01_58r1.pdf)
- [28] «Universal Mobile Telecommunications System»,

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Mobile\\_Telecommunications\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Mobile_Telecommunications_System)
- [29] «3GPP», <http://www.3gpp.org/article/UMTS>
- [30] «The UMTS Architecture»,  
<http://www.scribd.com/doc/17298925/the-UMTS-Architecture>
- [31] «A look at PDP Context in UMTS networks»,  
[http://www.3g4g.co.uk/Tutorial/ZG/zg\\_pdp](http://www.3g4g.co.uk/Tutorial/ZG/zg_pdp)
- [32] «UMTS Architecture Description»  
<http://www.wireless-center.net/Wireless-Internet-Technologies-and-Applications/1855.html>
- [33] «Ευρυζωνικά δίκτυα»,  
[http://dtps.unipi.gr/files/notes/2008-2009/eksamino\\_7/eyryzwnika\\_diktya/mathima\\_UMTS.pdf](http://dtps.unipi.gr/files/notes/2008-2009/eksamino_7/eyryzwnika_diktya/mathima_UMTS.pdf)
- [34] «UMTS network architecture»,  
[http://www.tek.com/Measurement/App\\_Notes/2F\\_14251/eng/architecture.pdf](http://www.tek.com/Measurement/App_Notes/2F_14251/eng/architecture.pdf)
- [35] «UMTS/WCDMA Logical, Transport and Physical Channels»,  
<http://www.networkdictionary.com/Wireless/UMTS-WCDMA-Logical.php>
- [36] «UMTS / WCDMA Channels»,  
<http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/UMTS/UMTS-wcdma-channels.php>
- [37] «Quality of Services»,  
<http://www.UMTSworld.com/technology/qos.htm>

- [38] K. Boman, G. Horn, P. Howard, and V. Niemi, «UMTS Security», IEEE Communications Magazine, October 2002
- [39] «Αναφορά σχετικά με τις ικανότητες του προσομοιωτή» Δεκέμβριος 2005,  
[http://mm.aueb.gr/research/EZRP/TechnicalReports/QUALNETSIMULATOR\\_TR.pdf](http://mm.aueb.gr/research/EZRP/TechnicalReports/QUALNETSIMULATOR_TR.pdf)
- [40] «ns-2, Contributed\_Code»,  
[http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/Contributed\\_Code](http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/Contributed_Code)
- [41] «Network Simulation»,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_simulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Network_simulation)
- [42] «NS (Simulator)», [http://en.wikipedia.org/wiki/Ns\\_\(simulator\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Ns_(simulator))
- [43] «IEEE 802.21», <http://www.ieee802.org/21/>
- [44] Enrique Stevens-Navarro, «Vertical Handoff in Heterogeneous Wireless Networks» October 2006
- [45] The Network Simulator (NS-2) NIST add – on IEEE 802.21 model (Based on IEEE p802.21/D03.00)  
[http://w3.antd.nist.gov/seamlessandsecure/files/mobility/doc/MIH\\_module.pdf](http://w3.antd.nist.gov/seamlessandsecure/files/mobility/doc/MIH_module.pdf)
- [46] Ashutosh Dutta, Yoshihiro Ohba, Henning Schulzrinne, “Seamless Handover across Heterogeneous Networks – An IEEE 802.21 Centric Approach”
- [47] Perdo Neves, Susana Sargento, Kostas Pentikousis, “Enhanced Media Independent Handover Framework”

[48] OMNET++

<http://www.omnetpp.org/home/what-is-omnet>

[49] Περιγραφή Εργαλείου OMNET++,

<http://www.cs.uoi.gr/~grogkako/interconnection/files/%F0%E1%F1%E%F5%F3%DF%E1%F3%E7Omnet++.ppt>

[50] OPNET and Network simulator

[http://www.telecomlab.oulu.fi/kurssit/521365A\\_tietoliikennetekniikan\\_simuloinnit\\_ja\\_tyokalut/Opnet\\_esittely\\_07.pdf](http://www.telecomlab.oulu.fi/kurssit/521365A_tietoliikennetekniikan_simuloinnit_ja_tyokalut/Opnet_esittely_07.pdf)

## Παράρτημα

```

# Topology scenario:
#
#          bstation802_11(3.0.0)->
#          /
#          /
# router0(1.0.0)---router1(2.0.0)-- +-----+
#          \          + iface1:802.11(3.0.1)|
#          \          +-----+MutiFaceNode || (4.0.0)
#          rnc(0.0.0)  + iface0:UMTS(0.0.2)
#          |          +-----+
#          bstationUMTS(0.0.1)->
#
#Check input parameters
if {$argc != 0} {
    puts ""
    puts "Wrong Number of Arguments! No arguments in this topology"
    puts ""
    exit (1)
}

global ns

#Define global simulation parameters
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover1 set case_ [lindex
$argv 0]

#Cefine coverage area for base station: 20m coverage
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.0134
Phy/WirelessPhy set freq_ 2412e+6
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 2.90781e-09

#Define frequency of RA at base station
Agent/ND set maxRtrAdvInterval_ 6
Agent/ND set minRtrAdvInterval_ 2

#Define MAC 802_11 parameters
Mac/802_11 set bss_timeout_ 5
Mac/802_11 set pr_limit_ 1.2 ;

#Wireless routing algorithm update frequency (in seconds)
Agent/DSDV set perup_ 8

#Define DEBUG parameters
Agent/ND set debug_ 1
    
```



```
Agent/MIH set debug_ 1
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover1 set debug_ 1
Mac/802_11 set debug_ 0
```

```
#Rate at which the nodes start-stop moving
set moveStart 120
set moveStop 3600
```

```
#Speed of the mobile nodes (m/sec)
set moveSpeed 3
```

```
#Parameters
```

```
set X_bsUMTS 50.0
set Y_bsUMTS 100.0
set X_bs802_11 90.0
set Y_bs802_11 100.0
set X_mn 40.0
set Y_mn 100.0
set X_dst 110.0
set Y_dst 100.0
```

```
set packetSize 1000
set interval 0.2
```

```
#Defines function for flushing and closing files
```

```
proc finish {} {
global ns f quiet namtrace
$ns flush-trace
close $f
close $namtrace
exec nam out.nam &
puts "Simulation ended..."
}
```

```
exit 0
}
```

```
#set global variables
set output_dir .
```

```
#Create the simulator
set ns [new Simulator]
$ns use-newtrace
```

```
#Open file for trace
set f [open out.res w]
$ns trace-all $f
```

```
set namtrace [open out.nam w]
$ns namtrace-all-wireless $namtrace 200 200
```

```
#set up for hierarchical routing (needed for routing over a basestation)
$ns node-config -addressType hierarchical
AddrParams set domain_num_ 5 ;           #domain number
AddrParams set cluster_num_ {1 1 1 1} ;  #cluster number for each domain
lappend tmp 3 ;                           #UMTS: MN+RNC+BS
lappend tmp 1 ;                           #router 0
lappend tmp 1 ;                           #router 1
lappend tmp 2 ;                           #802.11: MN+BS
lappend tmp 1 ;                           #MULTIFACE nodes
AddrParams set nodes_num_ $tmp

#Configure UMTS
$ns set hsdSchEnabled_ 1addr
$ns set hsdSch_rlc_set_ 0
$ns set hsdSch_rlc_nif_ 0

#Configure RNC node
$ns node-config -UMTSNodeType rnc
set rnc [$ns create-UMTSnode 0.0.0] ;

#Configure UMTS base station
$ns node-config -UMTSNodeType bs \
    -downlinkBW 384kbs \
    -downlinkTTI 10ms \
    -uplinkBW 384kbs \
    -uplinkTTI 10ms \
    -hs_downlinkTTI 2ms \
    -hs_downlinkBW 384kbs

set bsUMTS [$ns create-UMTSnode 0.0.1] ;
$bsUMTS set X_ $X_bsUMTS
$bsUMTS set Y_ $Y_bsUMTS
$bsUMTS set Z_ 0.0
puts "bsUMTS created"

#Connect RNC and base station
$ns setup-Iub $bsUMTS $rnc 622Mbit 622Mbit 15ms 15ms DummyDropTail
2000

$ns node-config -UMTSNodeType ue \
    -baseStation $bsUMTS \
    -radioNetworkController $rnc

set iface0 [$ns create-UMTSnode 0.0.2] ;
$iface0 set X_ $X_mn
$iface0 set Y_ $Y_mn
$iface0 set Z_ 0.0
puts "iface0 created"
```

```
#Node address for router0 and router1.
set router0 [$sns node 1.0.0]
set router1 [$sns node 2.0.0]

#Connect links
$ns duplex-link $rnc $router1 622Mbit 0.4ms DropTail 1000
$ns duplex-link $router1 $router0 100MBit 30ms DropTail 1000
$rnc add-gateway $router1

#Creation of the MutiFaceNodes. It must be done before the 802.11
$ns node-config -multiIf ON ;           #to create MultiFaceNode
set multiFaceNode [$sns node 4.0.0]
$ns node-config -multiIf OFF ;         #reset attribute

#Now we add 802.11 nodes
#Parameter for wireless nodes
set opt(chan) Channel/WirelessChannel ; #channel type for 802.11
set opt(prop) Propagation/TwoRayGround ; #radio-propagation model
802.11
set opt(netif) Phy/WirelessPhy ;       #network interface type 802.11
set opt(mac) Mac/802_11 ;              #MAC type 802.11
set opt(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ; #interface queue type 802.11
set opt(ll) LL ;                       #link layer type 802.11
set opt(ant) Antenna/OmniAntenna ;     #antenna model 802.11
set opt(ifqlen) 50 ;                   #max packet in ifq 802.11
set opt(adhocRouting) DSDV ;           #routing protocol 802.11
set opt(UMTSRouting) "" ;              #routing for UMTS (to reset
node config)

set opt(x) 200 ;                        #X dimension of the topography
set opt(y) 200 ;                        #Y dimension of the topography

#Configure rate for 802.11
Mac/802_11 set basicRate_ 11Mb
Mac/802_11 set dataRate_ 11Mb
Mac/802_11 set bandwidth_ 11Mb

#Create the topography
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)
puts "Topology created"

#Create God
create-god 1;                            #give the number of nodes

#Configure Access Points
$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
               -llType $opt(ll) \
               -macType $opt(mac) \
               -channel [new $opt(chan)] \
```

```
-ifqType $opt(ifq) \  
-ifqLen $opt(ifqlen) \  
-antType $opt(ant) \  
-propType $opt(prop) \  
-phyType $opt(netif) \  
-topoInstance $topo \  
-wiredRouting ON \  
-agentTrace ON \  
-routerTrace ON \  
-macTrace ON \  
-movementTrace ON  
  
#Configure Base station 802.11.  
set bstation802_11 [$ns node 3.0.0]  
$bstation802_11 set X_ $X_bs802_11  
$bstation802_11 set Y_ $Y_bs802_11  
$bstation802_11 set Z_ 0.0  
#we need to set the BSS for the base station  
set bstationMac [$bstation802_11 getMac 0]  
set AP_ADDR_0 [$bstationMac id]  
$bstationMac bss_id $AP_ADDR_0  
$bstationMac enable-beacon  
puts "bstation802_11 created"  
  
#Creation of the wireless interface 802.11  
$ns node-config -wiredRouting OFF \  
-macTrace ON  
  
set iface1 [$ns node 3.0.1];  
$iface1 random-motion 0; #disable random motion  
$iface1 base-station [AddrParams addr2id [$bstation802_11 node-addr]] ;  
#attach mn to basestation  
$iface1 set X_ $X_mn  
$iface1 set Y_ $Y_mn  
$iface1 set Z_ 0.0  
$ns at 0 "$iface1 setdest $X_dst $Y_dst $moveSpeed"  
puts "iface1 created"  
  
#Add link to backbone  
$ns duplex-link $bstation802_11 $router1 100MBit 15ms DropTail 1000  
  
#Add the interfaces to supernode  
$multiFaceNode add-interface-node $iface0  
$multiFaceNode add-interface-node $iface1  
  
#Install ND modules  
#take care of UMTS. The ND module is on the rnc node NOT in the base station  
set nd_rncUMTS [$rnc install-nd]  
$nd_rncUMTS set-router TRUE  
$nd_rncUMTS router-lifetime 5
```

```
$nd_rncUMTS enable-broadcast FALSE
$nd_rncUMTS add-ra-target 0.0.2 ; #in UMTS there is no notion of broadcast.

set nd_ue [$iface0 install-nd]

#Now WLAN
set nd_bs802_11 [$bstation802_11 install-nd]
$nd_bs802_11 set-router TRUE
$nd_bs802_11 router-lifetime 18
$ns at 1 "$nd_bs802_11 start-ra"

set ifmgmt_bs [$router0 install-default-ifmanager]

#Install MIH on AP/BS
set mih_bs [$bstation802_11 install-mih]
$ifmgmt_bs connect-mih $mih_bs

set tmp2 [$bstation802_11 set mac_(0)] ; #in 802.11 one interface is created
$tmp2 mih $mih_bs
$mih_bs add-mac $tmp2

set nd_mn [$iface1 install-nd]

#Add the handover module for the Interface Management
set handover [new Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover1]
$multiFaceNode install-ifmanager $handover

$nd_mn set-ifmanager $handover
$nd_ue set-ifmanager $handover

#Install MIH in multi-interface node
set mih [$multiFaceNode install-mih]

#create connection between MIH and iface management
$handover connect-mih $mih ;
$handover nd_mac $nd_mn [$iface1 set mac_(0)]

$router0 install-default-ifmanager

#Create traffic: UDP application between router0 and Multi interface node
#Create a UDP agent
set udp(0) [new Agent/UDP]
$udp(0) set packetSize_ $packetSize

#Create a CBR traffic source and attach it to udp(0)
set cbr(0) [new Application/Traffic/CBR]
$scbr(0) set packetSize_ $packetSize
$scbr(0) set interval_ $interval
$scbr(0) attach-agent $udp(0)
#Router0 is transmitter
```

```
$ns attach-agent $router0 $udp(0)

#Create the Null agent
set null(0) [new Agent/Null]

#Attach agents to interfaces
$ns attach-agent $iface0 $null(0)
$ns attach-agent $iface1 $null(0)

#Multiface node is receiver
$multiFaceNode attach-agent $null(0) $iface0
$handover add-flow $null(0) $udp(0) $iface0 1 ;
$null(0) listen

#Do registration in UMTS. This will create the MACs in UE and base stations
$ns node-config -lType UMTS/RLC/AM \
    -downlinkBW 384kbs \
    -uplinkBW 384kbs \
    -downlinkTTI 20ms \
    -uplinkTTI 20ms \
    -hs_downlinkTTI 2ms \
    -hs_downlinkBW 384kbs

#For the first HS-DCH, we must create. If any other, then use attach-dch
set dch0 [$ns create-dch $iface0 $null(0)]; # multiface node receiver
$ns attach-dch $iface0 $handover $dch0
$ns attach-dch $iface0 $nd_ue $dch0

#Now we can register the MIH module with all the MACs
set tmp2 [$iface0 set mac_(2)]; #in UMTS and using DCH the MAC to use is 2
(0 and 1 are for RACH and FACH)
$tmp2 mih $mih
$mih add-mac $tmp2

set tmp2 [$iface1 set mac_(0)]; #in 802.11 one interface is created
$tmp2 mih $mih
$mih add-mac $tmp2

#Start the traffic
$ns at $moveStart "$cbr(0) start"

#Stop the traffic
$ns at $moveStop "$cbr(0) stop"

#Finish the simulation
$ns at $moveStop "finish"

#Run the simulation
$ns run
```

**# Topology scenario:**

```

#
#
#          bstation802_16(3.0.0)->
#          /
#          /
# router0(1.0.0)---router1(2.0.0)-- +-----+
#          \          + iface1:802.16(3.0.1)|
#          \          +--+ MutiFaceNode || (4.0.0)
#          rnc(0.0.0)  + iface0:UMTS(0.0.2)
#          |          +-----+
#          bstationUMTS(0.0.1)->
#
#
#

```

**#Check input parameters**

```

if {$argc != 0} {
    puts ""
    puts "Wrong Number of Arguments! No arguments in this topology"
    puts ""
    exit (1)
}

```

global ns

**#Define global simulation parameters**

```

Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover1 set case_ [lindex
$argv 0]

```

**#Define frequency of RA at base station**

```

Agent/ND set maxRtrAdvInterval_ 6
Agent/ND set minRtrAdvInterval_ 2

```

**#Wireless routing algorithm update frequency (in seconds)**

```

Agent/DSDV set perup_ 8

```

**#Define DEBUG parameters**

```

Agent/ND set debug_ 1
Agent/MIH set debug_ 1
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover1 set debug_ 1
Mac/802_16 set debug_ 0

```

**#Rate at which the nodes start-stop moving**

```

set moveStart 120
set moveStop 3600
#Speed of the mobile nodes (m/sec)
set moveSpeed 5

```

**#Parameters**

```

set X_bsUMTS 50.0

```

```
set Y_bsUMTS    100.0
set X_bs802_16  550.0
set Y_bs802_16  100.0
set X_mn        40.0
set Y_mn        100.0
set X_dst       1000.0
set Y_dst       100.0

set packetSize  1000
set interval    0.2

#Defines function for flushing and closing files
proc finish {} {
global ns f quiet namtrace
$ns flush-trace
close $f
close $namtrace
exec nam out1.nam &
puts " Simulation ended..."

exit 0
}

#Set global variables
set output_dir .

#Create the simulator
set ns [new Simulator]
$ns use-newtrace

#Open file for trace
set f [open out1.res w]
$ns trace-all $f

set namtrace [open out1.nam w]
$ns namtrace-all-wireless $namtrace 200 200

#set up for hierarchical routing (needed for routing over a basestation)
$ns node-config -addressType hierarchical
AddrParams set domain_num_ 5 ;           #domain number
AddrParams set cluster_num_ {1 1 1 1 1} ; #cluster number for each domain
lappend tmp 3 ;                           #UMTS:MN+RNC+BS
lappend tmp 1 ;                           #router 0
lappend tmp 1 ;                           #router 1
lappend tmp 2 ;                           #802.16: MN+BS
lappend tmp 1 ;                           #MULTIFACE nodes
AddrParams set nodes_num_ $tmp

#Configure UMTS.
#Note: The UMTS configuration MUST be done first otherwise it does not work
```



```
#furthermore, the node creation in UMTS MUST be as follow
#rnc, base station, and UE (User Equipment)
$ns set hsdSchEnabled_ 1addr
$ns set hsdSch_rlc_set_ 0
$ns set hsdSch_rlc_nif_ 0

#Configure RNC node
$ns node-config -UMTSNodeType rnc
set rnc [$ns create-UMTSnode 0.0.0] ;

#Configure UMTS base station
$ns node-config -UMTSNodeType bs \
    -downlinkBW 384kbs \
    -downlinkTTI 10ms \
    -uplinkBW 384kbs \
    -uplinkTTI 10ms \
    -hs_downlinkTTI 2ms \
    -hs_downlinkBW 384kbs

set bsUMTS [$ns create-UMTSnode 0.0.1] ;
$bsUMTS set X_ $X_bsUMTS
$bsUMTS set Y_ $Y_bsUMTS
$bsUMTS set Z_ 0.0
puts "bsUMTS Created"

#Connect RNC and base station
$ns setup-Iub $bsUMTS $rnc 622Mbit 622Mbit 15ms 15ms DummyDropTail
2000

$ns node-config -UMTSNodeType ue \
    -baseStation $bsUMTS \
    -radioNetworkController $rnc

set iface0 [$ns create-UMTSnode 0.0.2] ;
$iface0 set X_ $X_mn
$iface0 set Y_ $Y_mn
$iface0 set Z_ 0.0
puts "iface0 Created"

#Node address for router0 and router1.
set router0 [$ns node 1.0.0]
set router1 [$ns node 2.0.0]

#Connect links
$ns duplex-link $rnc $router1 622Mbit 0.4ms DropTail 1000
$ns duplex-link $router1 $router0 100MBit 30ms DropTail 1000
$rnc add-gateway $router1

#Creation of the MutiFaceNodes. It MUST be done before the 802.16
```

```
$ns node-config -multiIf ON ;      #to create MultiFaceNode
set multiFaceNode [$ns node 4.0.0]
$ns node-config -multiIf OFF ;      #reset attribute

#Now we add 802.16 nodes

#Parameter for wireless nodes
set opt(chan) Channel/WirelessChannel ;      #channel type for 802.16
set opt(prop) Propagation/TwoRayGround ;      #radio-propagation model 802.16
set opt(mac) Mac/802_16
set opt(netif) Phy/WirelessPhy/OFDM
set opt(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;      #interface queue type 802.16
set opt(ll) LL ;      #link layer type 802.16
set opt(ant) Antenna/OmniAntenna ;      #antenna model 802.16
set opt(ifqlen) 50 ;      #max packet in ifq 802.16
set opt(adhocRouting) DSDV ;      #routing protocol 802.16
set opt(UMTSRouting) "" ;      #routing for UMTS (to reset node
config)
set opt(channel) [new $opt(chan)];      #channel to be shared by all wireless
nodes

set opt(x) 2000 ;      #X dimension of the topography
set opt(y) 2000 ;      #Y dimension of the topography

#Create the topography
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)
puts "Topology created"

#Create God
create-god 1 ;      #give the number of nodes

#Configure 802.16 nodes
#Define coverage area for base station: 465m coverage
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 2.90781e-12 ;
Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.9*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]

#Configure access points
$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
-lType $opt(ll) \
-macType $opt(mac) \
-channel $opt(channel) \
-ifqType $opt(ifq) \
-ifqLen $opt(ifqlen) \
-antType $opt(ant) \
-propType $opt(prop) \
-phyType $opt(netif) \
-topoInstance $topo \
```

```
-wiredRouting ON \  
-agentTrace ON \  
-routerTrace OFF \  
-macTrace ON \  
-movementTrace OFF
```

```
#Configure Base station 802.16.
```

```
set bstation802_16 [$ns node 3.0.0] ;  
$bstation802_16 set X_ $X_bs802_16  
$bstation802_16 set Y_ $Y_bs802_16  
$bstation802_16 set Z_ 0.0  
set clas [new SDUClassifier/Dest]  
[$bstation802_16 set mac_(0)] add-classifier $clas
```

```
#Set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
```

```
set bs_sched [new WimaxScheduler/BS]  
[$bstation802_16 set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched  
[$bstation802_16 set mac_(0)] set-channel 1  
puts "BS 802.16 created"
```

```
#Creation of the wireless interface 802.16
```

```
$ns node-config -wiredRouting OFF \  
-macTrace ON
```

```
set iface2 [$ns node 3.0.1] ;  
$iface2 random-motion 0 ; #disable random motion  
$iface2 base-station [AddrParams addr2id [$bstation802_16 node-addr]] ;  
#attach mn to basestation  
$iface2 set X_ $X_mn  
$iface2 set Y_ $Y_mn  
$iface2 set Z_ 0.0  
set clas [new SDUClassifier/Dest]  
[$iface2 set mac_(0)] add-classifier $clas
```

```
#Set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
```

```
set ss_sched [new WimaxScheduler/SS]  
[$iface2 set mac_(0)] set-scheduler $ss_sched  
[$iface2 set mac_(0)] set-channel 1  
$ns at 0 "$iface2 setdest $X_dst $Y_dst $moveSpeed"  
puts "iface2 created ..."
```

```
#Add link to backbone
```

```
$ns duplex-link $bstation802_16 $router1 100MBit 15ms DropTail 1000
```

```
#Add the interfaces to supernode
```

```
$multiFaceNode add-interface-node $iface0  
$multiFaceNode add-interface-node $iface2
```

```
#Install ND modules
#Take care of UMTS
#Note: The ND module is on the rnc node NOT in the base station
set nd_rncUMTS [$rnc install-nd]
$nd_rncUMTS set-router TRUE
$nd_rncUMTS router-lifetime 5
$nd_rncUMTS enable-broadcast FALSE
$nd_rncUMTS add-ra-target 0.0.2 ; #in UMTS there is no notion of broadcast.

set nd_ue [$iface0 install-nd]

#Now WLAN
set nd_bs802_16 [$bstation802_16 install-nd]
$nd_bs802_16 set-router TRUE
$nd_bs802_16 router-lifetime 18
$ns at 1 "$nd_bs802_16 start-ra"

set nd_mn [$iface2 install-nd]

set ifmgmt_bs [$bstation802_16 install-default-ifmanager]

set mih_bs [$bstation802_16 install-mih]
$ifmgmt_bs connect-mih $mih_bs

set tmp2 [$bstation802_16 set mac_(0)] ; #in 802.16 one interface is created
$tmp2 mih $mih_bs
$mih_bs add-mac $tmp2

#Add the handover module for the Interface Management
set handover [new Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover1]
$multiFaceNode install-ifmanager $handover

#Install interface manager into multi-interface node and CN
$nd_mn set-ifmanager $handover
$nd_ue set-ifmanager $handover

#Install MIH in multi-interface node
set mih [$multiFaceNode install-mih]

$handover connect-mih $mih ; #create connection between MIH and
iface management
$handover nd_mac $nd_mn [$iface2 set mac_(0)]

$router0 install-default-ifmanager

#Create traffic: UDP application between router0 and Multi interface node

#Create a UDP agent
set udp(0) [new Agent/UDP]
$udp(0) set packetSize_ $packetSize
```

```
#Create a CBR traffic source and attach it to udp(0)
set cbr(0) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr(0) set packetSize_ $packetSize
$cbr(0) set interval_ $interval
$cbr(0) attach-agent $udp(0)

#Create the Null agent
set null(0) [new Agent/Null]

$ns attach-agent $iface0 $null(0)

#Router0 is transmitter
$ns attach-agent $router0 $udp(0)

#Multiface node is receiver
$multiFaceNode attach-agent $null(0) $iface0
$handover add-flow $null(0) $udp(0) $iface0 1 ;
$null(0) listen

#Do registration in UMTS. This will create the MACs in UE and base stations
$ns node-config -lType UMTS/RLC/AM \
    -downlinkBW 384kbs \
    -uplinkBW 384kbs \
    -downlinkTTI 20ms \
    -uplinkTTI 20ms \
    -hs_downlinkTTI 2ms \
    -hs_downlinkBW 384kbs

#For the first HS-DCH, we must create. If any other, then use attach-dch
set dch0 [$ns create-dch $iface0 $null(0)];
$ns attach-dch $iface0 $handover $dch0
$ns attach-dch $iface0 $nd_ue $dch0

#Now we can register the MIH module with all the MACs
set tmp2 [$iface0 set mac_(2)] ; #in UMTS and using DCH the MAC to use is
2 (0 and 1 are for RACH and FACH)
$tmp2 mih $mih
$mih add-mac $tmp2

set tmp2 [$iface2 set mac_(0)] ; #in 802.16 one interface is created
$tmp2 mih $mih
$mih add-mac $tmp2

$ns at $moveStart "$cbr(0) start"

$ns at $moveStop "$cbr(0) stop"

#Finish the simulation
$ns at $moveStop "finish"
```

```
#Run the simulation  
$ns run
```

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΛΗ