



ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ
«ΓΙΑΡΡΤΗ ΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ»
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΑΡΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Πτυχιακή Εργασία

Εισαγωγή στην τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης WiMax, μελέτη της αρχιτεκτονικής υλοποίησης της και των χαρακτηριστικών της. Σύγκριση με τις είδη υπάρχουσες τεχνολογίες και εξέταση των μελλοντικών προκλήσεων της.

Εισηγητές:
Σκαλιδάκης Αντώνιος
Μπαταγιάννης Απόστολος

Επιβλέπων καθηγητής:
Ναστάκος Μιχαήλ

Πτυχιακή εργασία

Εισαγωγή στην τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης WiMax, μελέτη της αρχιτεκτονικής υλοποίησης της και των χαρακτηριστικών της. Σύγκριση με τις είδη υπάρχουσες τεχνολογίες και εξέταση των μελλοντικών προκλήσεων της.

Εισηγητές:

Σκαλιδάκης Αντώνιος

A.M.: 2007215

e-mail: askalidakhs@hotmail.com

Μπαταγιάννης Απόστολος

A.M: 2007160

E-mail: abatagiannis@gmail.com

Επιβλέπων καθηγητής:

Ναστάκος Μιχαήλ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	3
Εικόνες	6
Πίνακες	7
Ακρωνύμια	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή.....	12
1.1. Η εξέλιξη των ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων	12
1.1.1. Ασύρματα συστήματα τοπικού βρόχου στενής ζώνης.....	13
1.1.2. Ευρυζωνικά συστήματα Πρώτης γενιάς με οπτική επαφή (Line Of Sight - LOS) ..	14
1.1.3. Ευρυζωνικά συστήματα Δεύτερης γενιάς χωρίς οπτική επαφή (Non Line Of Sight - NLOS)	15
1.1.4. Ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα βάσει προτύπων	15
1.2. Ο ρόλος των συστημάτων πέραν της 3 ^{ης} Γενιάς	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Το σύστημα WiMAX	19
2.1. Βασικά χαρακτηριστικά	19
2.1.1. Φυσικό επίπεδο OFDM.....	19
2.1.2. Υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.....	19
2.1.3. Υποστήριξη κλιμακωτού εύρους ζώνης και ρυθμού δεδομένων.....	20
2.1.4. Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση.....	20
2.1.5. Αναμεταδόσεις στρώματος ζεύξης.....	20
2.1.6. Υποστήριξη για TDD και FDD	21
2.1.7. Υποστήριξη πολλαπλής πρόσβασης βάσει του OFDMA	21
2.1.8. Δυναμική ανάθεση πόρων	21

2.1.9. Προηγμενες τεχνικες κεραιων	22
2.1.10. Ποιοτητα υπηρεσιων	22
2.1.11. Ευελιξια υλοποιηση του WiMAX βασει προτυπων του IEEE802.16	22
2.2. Το Φυσικο στρωμα του WiMAX.....	24
2.2.1. Βασικα γνωρισματα του OFDM.....	25
2.2.2. Πλεονεκτηματα και μειωνεκτηματα του OFDM.....	26
2.2.3. Υλοποιησεις του OFDM στο WiMAX.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μελετη αρχιτεκτονικης συστηματος WiMAX	30
3.1. Βασικες αρχες σχεδιασης.....	30
3.2. Αρχιτεκτονικη δικτυου WiMAX	31
3.2.1. Λειτουργιες του Access Service Network (ASN)	33
3.2.2. Λειτουργιες του Connectivity Service Network (CSN)	34
3.2.3. Σημεια αναφορας (Reference Points – RP)	35
3.3. Βασικες λειτουργιες αρχιτεκτονικης.....	36
3.3.1. Ανιχνευση και επιλογη δικτυου.....	37
3.3.2. Αναθεση διευθυνσεων IP	37
3.3.3. Ασφαλεια στο WiMAX	38
3.3.4. Διαχειριση πορων.....	41
3.4. Το WiMAX στην ελλαδα και στον κοσμο	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Άλλα συστηματα επικοινωνιων	46
4.1. Συστηματα τεχνολογιας OFDMA.....	46
4.1.1. WLAN (IEEE 802.11)	46
4.1.2. LTE – Long Term Evolution.....	49

4.2. Περιγραφή συστήματος UMTS	54
4.3. Περιγραφή συστήματος HSDPA.....	58
4.4. Σύγκριση με το σύστημα WiMAX.....	60
4.4.1. Ρυθμός δεδομένων.....	60
4.4.2. Χωρητικότητα	61
4.4.3. Συμμετρικότητα ζεύξεων.....	61
4.4.4. Υπηρεσίες και εφαρμογές πρωτοκόλλου IP	61
4.4.5. Κινητικότητα	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα και προκλήσεις	64
5.1. Συμπεράσματα.....	64
5.2. Προκλήσεις.....	65
Βιβλιογραφια.....	69

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική λογικών οντοτήτων επιπέδου δικτύου [3]..... 33

Εικόνα 2: Reference points αρχιτεκτονικής δικτύου WiMAX [3] 36

Εικόνα 3: Επίπεδα ασφαλείας στο WiMAX [3], [19] 39

Εικόνα 4: Ενδεικτική αρχιτεκτονική ελέγχου πρόσβασης χρηστών [3]..... 40

Εικόνα 5: Δομή ασύρματου δικτύου WLAN 47

Εικόνα 6: Χαρακτηριστικά διαύλου δικτύου LTE [33], [34]..... 51

Εικόνα 7: Δομή πλαισίου LTE 51

Εικόνα 8: Παράμετροι OFDM συστήματος στο E-UTRAN [33], [34]..... 52

Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική επιπέδου δικτύου E-UTRAN (LTE) [35] 50

Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού του E-UTRAN (LTE) [21] 51

Εικόνα 11: Αρχιτεκτονική UMTS [7], [12] 53

Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική HSDPA [36] 57

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Χρονολογική εξέλιξη των ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων [3].....	13
Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά του προτύπου 802.16 και η εξέλιξή του [3].....	24
Πίνακας 3: Σύγκριση χαρακτηριστικών WiMAX [4].....	60
Πίνακας 4: Προκλήσεις και προσεγγίσεις για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα [3]	66

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

Αρχικά	Εξήγηση
A	
AAA	Authentication, Authorization, Accounting
AAS	Advanced Antenna Systems
AES	Advanced Encryption Standard
AM	Adaptive Modulation
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AP	Access Point
APA	Adaptive Power Allocation
ARQ	Automatic Retransmission reQuests
ASN	Access Service Network
B	
B3G	Beyond 3 rd Generation
BS	Base Station
BSS	Basic Service Set Service
C	
CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CoA	Care-of Address
COFDM	Coded OFDM
CSN	Connectivity Service Network
D	
DHCP	Dynamic Host Control Protocol
DS	Distribution System
DSA	Dynamic Subcarrier Assignment
DSL	Digital Subscriber Line
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DVB	Digital Video Broadcast

DVB-H	DVB-Handheld
E	
E-UTRAN	Evolved UTRAN
F	
FDD	Frequency Division Duplex
FECC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
G	
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
H	
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HoA	Home Address
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
I	
IASA	Inter-Access System Anchor
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IETF	Internet Engineering Task Force
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol
IPsec	Internet Protocol Security
ISI	Inter-Symbol Interference
ISM	Industrial Scientific and Medical
J	
K	
KPI	Key Performance Indicator
L	
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
M	

SGSN	Serving GPRS Support Node
SNR	Signal to Noise Ratio
STA	WLAN Station
T	
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TLS	Transport Layer Security
TTI	Transmission Time Interval
U	
UE	User Entity και User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure
UPE	User Plane Entity
USIM	Universal SIM
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
V	
VBR	Variable Bit Rate
VoIP	Voice Over IP
W	
WCDMA	Wideband CDMA
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
X	
Y	
Z	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο παρέχεται μια εισαγωγή στην τεχνολογία των ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων η οποία αποτελεί τον ευρύτερο επιστημονικό τομέα εντός του οποίου εντάσσεται το υπό μελέτη σύστημα Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) [1], [2]. Επιπλέον, παρουσιάζεται η εξέλιξη των προτύπων του WiMAX καθώς και το περιβάλλον των ασύρματων επικοινωνιών σήμερα εντός του οποίου το σύστημα WiMAX παίζει ίσως τον σημαντικότερο ρόλο, καθώς καλείται να αντιμετωπίσει την πρόκληση της μεταξύ τους διασύνδεσης [3],[4].

1.1. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η εξέλιξη των ασύρματων ευρυζωνικών είναι αμιγώς συσχετισμένη με το WiMAX και ξεκινάει από την αναζήτηση ανταγωνιστικής εναλλακτικής λύσης έναντι των παραδοσιακών τεχνολογιών ενσύρματης πρόσβασης. Η εξέλιξη των ερευνητικών δραστηριοτήτων της επιστήμης στον τομέα αυτό και η παράλληλη ραγδαία ανάπτυξη του Διαδικτύου και των αντίστοιχων υπηρεσιών, αποτέλεσαν τα κίνητρα τόσο για την ανάπτυξη των ευρυζωνικών δικτύων όσο και για την οικονομική εκμετάλλευσή τους μέσω των παρεχόμενων, ευρυζωνικών πλέον, υπηρεσιών. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας περίπου, αναπτύχθηκαν διάφορα συστήματα ασύρματης πρόσβασης τα οποία διέφεραν σημαντικά σε δυνατότητες απόδοσης, υποστηριζόμενα πρωτόκολλα, φάσμα συχνοτήτων, υπηρεσίες και άλλες παραμέτρους. Ωστόσο, οι επιτυχείς υλοποιήσεις των ευρυζωνικών δικτύων περιορίζονται μόνο σε εξειδικευμένες εφαρμογές και αγορές και όχι για το ευρύ κοινό και ο λόγος για την αρνητική αυτή εξέλιξη είναι προφανώς η έλλειψη ενός κοινού προτύπου. Η εμφάνιση του WiMAX ως βιομηχανικό πρότυπο αναμένεται να αλλάξει όμως αυτή τη κατάσταση.

Δεδομένης της μεγάλης ποικιλίας των εμπορικών λύσεων που αναπτύχθηκαν, στον παρακάτω πίνακα παρέχεται μια σύντομη ανασκόπηση μερικών από τα πιο αξιοσημείωτα γεγονότα που σχετίζονται με την εξέλιξη των ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων.

Η τεχνολογία WiMAX έχει εξελιχθεί μέσα από τα παρακάτω τέσσερα στάδια:

- Ασύρματα συστήματα τοπικού βρόχου στενής ζώνης.
- Ευρυζωνικά συστήματα πρώτης γενιάς με οπτική επαφή (Line Of Sight - LOS).

- Ευρυζωνικά συστήματα δεύτερης γενιάς χωρίς οπτική επαφή (Non Line Of Sight - NLOS).
- Ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα βάσει προτύπων.

Πίνακας 1: Χρονολογική εξέλιξη των ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων [3]

Date	Event
February 1997	AT&T announces development of fixed wireless technology code named "Project Angel"
February 1997	FCC auctions 30MHz spectrum in 2.3GHz band for wireless communications services (WCS)
September 1997	American Telecasting (acquired later by Sprint) announces wireless Internet access services in the MMDS band offering 750kbps downstream with telephone dial-up modem upstream
September 1998	FCC relaxes rules for MMDS band to allow two-way communications
April 1999	MCI and Sprint acquire several wireless cable operators to get access to MMDS spectrum
July 1999	First working group meeting of IEEE 802.16 group
March 2000	AT&T launches first commercial high-speed fixed wireless service after years of trial
May 2000	Sprint launches first MMDS deployment in Phoenix, Arizona, using first-generation LOS technology
June 2001	WiMAX Forum established
October 2001	Sprint halts MMDS deployments
December 2001	AT&T discontinues fixed wireless services
December 2001	IEEE 802.16 standards completed for > 11GHz.
February 2002	Korea allocates spectrum in the 2.3GHz band for wireless broadband (WiBro)
January 2003	IEEE 802.16a standard completed
June 2004	IEEE 802.16-2004 standard completed and approved
September 2004	Intel begins shipping the first WiMAX chipset, called Rosedale
December 2005	IEEE 802.16e standard completed and approved
January 2006	First WiMAX Forum-certified product announced for fixed applications
June 2006	WiBro commercial services launched in Korea
August 2006	Sprint Nextel announces plans to deploy mobile WiMAX in the United States

1.1.1. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΟΠΙΚΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΣΤΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ

Η πρώτη υπηρεσία η οποία θα έπρεπε να παρέχεται σε ικανοποιητικό επίπεδο από τα ασύρματα δίκτυα είναι φυσικά η τηλεφωνία, που αποτελεί την βασική υπηρεσία φωνής σε κάθε δίκτυο. Τα συστήματα αυτά που ονομάζονται ασύρματου τοπικού βρόχου (Wireless Local Loop - WLL), ήταν αρκετά επιτυχής σε διάφορες αναπτυσσόμενες χώρες των οποίων η υψηλή ζήτηση για τις βασικές τηλεφωνικές υπηρεσίες δεν μπορούσε να υπηρετηθεί με τη

χρήση των υφιστάμενων υποδομών. Ωστόσο, σε άλλες χώρες όπου οι υφιστάμενες υποδομές ήταν σε επάρκεια για την κάλυψη της συνολικής ζήτησης τα συστήματα WLL έπρεπε να προσφέρουν πρόσθετη αξία προς τους χρήστες προκειμένου να είναι ανταγωνιστική. Αυτό συνέβη με την παράλληλη εξέλιξη και ανάπτυξη του Διαδικτύου το 1993, όταν πολλοί πάροχοι υπηρεσιών μέσω του WLL είδαν την παροχή υψηλής ταχύτητας πρόσβασης στο Διαδίκτυο ως έναν τρόπο διαφοροποίησης των ασύρματων συστημάτων. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της AT&T η οποία στο πλαίσιο του έργου «Project Angel» ανέπτυξε σύστημα ασύρματης πρόσβασης το οποίο παρείχε δύο γραμμές φωνής και μια σύνδεση δεδομένων 128kbps. Άλλες εταιρίες παροχής ασύρματων υπηρεσιών Internet (Wireless Internet Service Provider - WISP) ανέπτυξαν παρόμοια συστήματα στις μπάντες συχνοτήτων 900MHz και 2.4GHz τα οποία υποστήριζαν ταχύτητες αρχικά έως και μερικές εκατοντάδες kilobits ανά δευτερόλεπτο οι οποίες συνεχώς βελτιώνονταν.

1.1.2. ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΜΕ ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΑΦΗ (LINE OF SIGHT - LOS)

Με την εμφάνιση της τεχνολογίας Digital Subscriber Line (DSL) [5] που παρέχει αρκετά υψηλές ταχύτητες (πχ. Mbps), τα ασύρματα συστήματα έπρεπε να υποστηρίζουν πλέον πολύ υψηλότερες ταχύτητες προκειμένου να παραμείνουν ανταγωνιστικά στην αγορά. Έτσι ξεκίνησε η ανάπτυξη συστημάτων υψηλότερων συχνοτήτων λειτουργίας (2.5GHz και 3.5GHz). Επιπλέον, εμφανίστηκαν τα συστήματα Local Multipoint Distribution Systems (LMDS) τα οποία υποστήριζαν έως και αρκετές εκατοντάδες megabits ανά δευτερόλεπτο και λειτουργούσαν σε πολύ υψηλές συχνότητες 24GHz και 39GHz. Τα συστήματα αυτά τα οποία απευθύνονταν για επαγγελματική χρήση είχαν αρχικά επιτυχία αλλά και ορισμένα σημαντικά προβλήματα τόσο στην εγκατάσταση κεραιών όσο και στην εμβέλειά τους.

Μετά το 1990 πραγματοποιήθηκε ευρεία χρήση της μπάντας των 2.5GHz η οποία ονομάζονταν μπάντα Multichannel Multipoint Distribution Services (MMDS). Έως τότε η μπάντα αυτή χρησιμοποιούνταν για την παροχή ασύρματων υπηρεσιών καλωδιακής μετάδοσης βίντεο, ειδικά στις αγροτικές περιοχές όπου οι υπηρεσίες καλωδιακής τηλεόρασης δεν ήταν διαθέσιμες (ΗΠΑ, 1990). Αρκετές εταιρίες χρησιμοποίησαν τους σταθμούς βάσης που χρησιμοποιούνταν για την ασύρματη συνδρομητική καλωδιακή τηλεόραση, οι οποίοι είχαν συνήθως αρκετές εκατοντάδες μέτρα ύψος και τη δυνατότητα κάλυψης LOS για αποστάσεις μέχρι 35 μίλια, χρησιμοποιώντας πομπούς υψηλής ισχύος. Στα συστήματα MMDS πρώτης γενιάς ο συνδρομητής έπρεπε να εγκαταστήσει εξωτερική κεραία αρκετά

υψηλή η οποία θα στόχευε προς τον σταθμό βάσης έτσι ώστε να εξασφαλιζόνταν η επαφή LOS. Παρά το γεγονός ότι ξεκίνησε έτσι η παροχή αμφίδρομων υπηρεσιών (ΗΠΑ, 2000), η εγκατάσταση της εξωτερικής κεραιάς και η επίτευξη του LOS αποδείχτηκαν σημαντικά εμπόδια. Επιπλέον, δεδομένου ότι ο σταθμός βάσης έπρεπε να καλύπτει μια αρκετά ευρεία περιοχή ήταν θέμα χρόνου να αναδειχτεί ακόμα ένα σημαντικό πρόβλημα, αυτό της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος.

1.1.3. ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΑΦΗ (NON LINE OF SIGHT - NLOS)

Τα ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα δεύτερης γενιάς είχαν σαν στόχο να ξεπεράσουν τον περιορισμό της οπτικής επαφής πομπού και δέκτη (LOS) και να παρέχουν παράλληλα μεγαλύτερη χωρητικότητα. Αυτό επιτεύχθηκε α) με την χρήση μιας κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής και β) με την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος για τη βελτίωση της σύνδεσης και της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Πολλές εταιρίες εξέλιξαν τα συστήματα πρώτης γενιάς τα οποία πλέον λειτουργούσαν αποδοτικά χωρίς να απαιτείται οπτική επαφή έχοντας εφαρμόσει τεχνικές όπως Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) αλλά και Code Division Multiple Access (CDMA), οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο. Τα ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα δεύτερης γενιάς είχαν ικανοποιητική απόδοση σε ακτίνα μερικών χιλιομέτρων καλύπτοντας κυρίως σταθερά υπολογιστικά συστήματα. Επιπλέον, δεδομένης της εμβέλειας του συστήματος και της αντίστοιχης ζήτησης που προέκυπτε από αυτή, η χωρητικότητα ήταν αρκετά υψηλή της τάξεως των μερικών Mbps.

1.1.4. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΑΣΕΙ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Το 1998, το Ινστιτούτο Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) δημιούργησε την ομάδα 802.16 για την ανάπτυξη ενός προτύπου για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα Wireless Metropolitan Area Networks (WMANs). Στόχος της ομάδας αυτής ήταν η ανάπτυξη λύσεων-συστημάτων τα οποία θα λειτουργούσαν στη ζώνη συχνοτήτων από 10GHz έως 66GHz και θα παρείχαν συνδέσεις υψηλών ταχυτήτων κυρίως σε επιχειρήσεις οι οποίες δεν είχαν πρόσβαση σε άλλα ευρυζωνικά δίκτυα (πχ. οπτικών ινών). Η ομάδα IEEE 802.16 παρήγαγε το πρότυπο WMAN-Single Carrier (WMAN-SC) το οποίο εγκρίθηκε τον Δεκέμβριο του 2001. Κατόπιν η ομάδα κατέβαλε προσπάθειες για την επέκταση και τροποποίησή του έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί στις αδειοδοτημένες ή μη συχνότητες ανάμεσα στην

ζώνη των 2 GHz έως 11GHz και να μην απαιτείται οπτική επαφή. Η προσπάθεια αυτή ολοκληρώθηκε το 2003 προσθέτοντας την τεχνική πρόσβασης OFDM ως μέρος του φυσικού επιπέδου. Έτσι η τεχνική OFDM είχε καθιερωθεί ως μια μέθοδος για την αντιμετώπιση της πολυδιαδρομικής διάδοσης και αποτέλεσε μέρος σχεδόν όλων των προτύπων της οικογένειας IEEE 802.11.

Περεταίρω εκδόσεις του προτύπου πραγματοποιήθηκαν και ολοκληρώθηκαν το 2004, καταλήγοντας στο τελικό πρότυπο IEEE 802.11-2004 το οποίο εγκρίθηκε ως βάση για το High Performance Metropolitan Area Networks (HIPERMAN) [6] από το European Telecommunications and Standards Institute (ETSI) [7]. Το 2003 η ομάδα 802.16 ξεκίνησε την προσπάθεια για περεταίρω βελτίωση, με απώτερο στόχο το νέο πρότυπο να επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών και εφαρμογών σε υψηλά επίπεδα κινητικότητας των χρηστών. Το νέο πρότυπο δημοσιεύθηκε επισήμως το Δεκέμβριο του 2005 ως IEEE 802.16e-2005.

Οι προδιαγραφές IEEE 802.16 είναι μια συλλογή προτύπων με ένα πολύ ευρύ πεδίο εφαρμογής και προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι ποικίλες ανάγκες της βιομηχανίας, το πρότυπο ενσωματώνει μια ευρεία ποικιλία επιλογών για την λειτουργία του. Το IEEE ανέπτυξε τις προδιαγραφές αλλά άφησε στη βιομηχανία την επιλογή της μετατροπής τους σε ένα διαλειτουργικό πρότυπο. Το WiMAX Forum [1] διαμορφώθηκε για να λύσει αυτό το πρόβλημα και να προωθήσει λύσεις με βάση τα πρότυπα του IEEE 802.16 και στο οποίο συμμετέχουν κατασκευαστές δικτυακού εξοπλισμού, πάροχοι δικτύων κ.α. Επιπλέον, το Φόρουμ WiMAX διαμορφώθηκε ακολουθώντας το παράδειγμα του Wi-Fi Alliance [8] το οποίο είχε μεγάλη επιτυχία στην προώθηση και την παροχή διαλειτουργικότητας για τα προϊόντα με βάση το πρότυπο IEEE 802.11 για τα Wireless Local Area Networks (WLAN) [9].

1.2. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΕΡΑΝ ΤΗΣ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ

Το σημερινό ασύρματο περιβάλλον αποτελείται από πολλά ετερογενή ασύρματα δίκτυα ορισμένα από τα οποία είναι τα κυψελωτά δίκτυα (Global System for Mobile communication - GSM [10], Enhanced Data rates for Global Evolution - EDGE [11], UMTS [12]), τα ασύρματα τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα (WLAN και Wireless Metropolitan Area Networks - WMAN), και άλλα. Αυτό αποτέλεσε την βάση για την θεμελίωση μιας νέας τάσης στο χώρο των ασύρματων περιβαλλόντων που ονομάζεται πέραν της τρίτης γενιάς (Beyond 3rd Generation - B3G). Σε αυτό το πλαίσιο η ενοποίηση των ετερογενών ασύρματων δικτύων και η ολοκλήρωσή τους σε ένα καταναμημένο ευρυζωνικό σύστημα εξασφαλίζει

την παροχή της καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας. Το πρόβλημα στην υλοποίηση είναι η πολυπλοκότητα και η ετερογένεια των ασυρμάτων δικτύων σε συνδυασμό με το περιορισμένο φάσμα του ασύρματου περιβάλλοντος και στην αδυναμία πλήρους αξιοποίησης του φάσματος (υπο-χρησιμοποίηση φάσματος). Η αρχιτεκτονική του δικτύου τόσο από πλευρά του δικτύου όσο και από πλευρά τερματικού σε επίπεδο λογισμικού και υλικού θα πρέπει να είναι αναδιαρθρώσιμη ώστε να επιτρέπει την μεταβολή των παραμέτρων λειτουργίας τους. Μερικές από τις παραμέτρους αυτές είναι οι εξής:

- Η ζώνη συχνοτήτων
- Ο τύπος διαμόρφωσης
- Ο τύπος κωδικοποίησης καναλιού
- Ο τύπος κωδικοποίησης λαθών
- Η τεχνική πολλαπλή πρόσβασης
- Η τεχνική διαίρεσης αμφίδρομης επικοινωνίας
- Η μέγιστη ισχύ εκπομπής
- Ο ελάχιστος ρυθμός δεδομένων

Απώτερος σκοπός με την ενοποίηση των δικτύων είναι η συνεργασία τους για την βέλτιστη χρησιμοποίηση του φάσματος με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης χωρητικότητας του δικτύου προκειμένου να παρέχουν αδιάλειπτες υπηρεσίες με τον καλύτερο δυνατό και με εφικτό τρόπο, από άποψη κόστους, και παράλληλα να επιτυγχάνεται συνεχής σύνδεση με την υπηρεσία μέσω διαπομπών μεταξύ των ραδιοτεχνολογιών πρόσβασης με τρόπο διαφανή στον χρήστη.

Όπως προαναφέραμε παραπάνω η τάση για τα συστήματα B3G είναι η ενοποίηση όλων των τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης σε ένα δομημένο αυτόνομο ευρυζωνικό σύστημα. Όπως είναι φυσικό κάθε αυτόνομο σύστημα έχει την δυνατότητα αυτο-διαχείρισης του (self-management). Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά που δηλώνουν την έννοια της αυτοδιαχείρισης:

- **Αυτο-Ρύθμιση (self-configuration):** Τα συστήματα ρυθμίζουν τις παραμέτρους λειτουργίας τους αυτόνομα σύμφωνα με πολιτικές ανωτέρου επιπέδου. Έτσι κάθε φορά που εισέρχεται μια νέα μονάδα, θα ενοποιείται διαφανώς ενώ το υπόλοιπο δίκτυο θα προσαρμόζεται αυτόματα σε αυτή την μονάδα.

- Αυτο-Βελτιστοποίηση (self-optimization): Τα αυτόνομα συστήματα σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δεν επαναλαμβάνονται στο σύνολο ρυθμίσεων που τους έχουν δοθεί αλλά προσπαθούν να εντοπίζουν δυναμικά την καλύτερη λύση βάσει των εκάστοτε συνθηκών που επικρατούν στο περιβάλλον διάδοσης και των αντίστοιχων βέλτιστων διαρθρώσεων.
- Αυτο-θεραπεία (self-healing): Τα αυτόνομα συστήματα εκτελούν από μόνα τους ενέργειες για ανίχνευση, αναγνώριση και επιδιόρθωση του τοπικών προβλημάτων τόσο σε υλικό όσο και σε λογισμικό σε αντίθεση με τα παραδοσιακά που απαιτούν ένα μεγάλο αριθμό τμημάτων για την εκτέλεση αυτών των ενεργειών.
- Αυτο-προστασία (self-protect): Τα αυτόνομα συστήματα προστατεύονται με 2 τρόπους, προληπτικά και αντιδραστικά. Ο προληπτικός τρόπος χρησιμοποιείται για την καταγραφή και την αναγνώριση των προβλημάτων που θα προκύψουν βάση των στοιχείων που έχουν συλλέξει ενώ ο αντιδραστικός τρόπος χρησιμοποιείται αφενός για την λήψη μέτρων για την αποφυγή τους ή τον περιορισμό της βλάβης και αφετέρου για την αναδιοργάνωση των μηχανισμών αυτο-θεραπείας όταν συμβεί κάποια κακόβουλη και επιβλαβή ενέργεια

Όπως είναι αντιληπτό, το σύστημα WiMAX το οποίο διαθέτει πληθώρα προτύπων τα οποία στοχεύουν στην διαλειτουργικότητα των επιμέρους συστημάτων, μπορεί να αποτελέσει βασικό παράγοντα για την επίτευξη των παραπάνω στόχων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ WiMAX

Στον κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία του συστήματος WiMAX τα οποία αποτελούν ίσως και τις σημαντικότερες διαφορές έναντι άλλων συστημάτων που θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία αναφορικά με το φυσικό στρώμα του συστήματος καθώς και με το επίπεδο πρόσβασης τα οποία θα μας βοηθήσουν κατόπιν στην κατανόηση της αρχιτεκτονική του.

2.1. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το WiMAX είναι μια ασύρματη ευρυζωνική λύση που προσφέρει ένα πλούσιο σύνολο χαρακτηριστικών με μεγάλη ευελιξία ως προς τις επιλογές ανάπτυξης και τις δυνατότητες προσφοράς υπηρεσιών. Στις παρακάτω υποενότητες παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του [2], [3], [4].

2.1.1. ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ OFDM

Το φυσικό στρώμα του WiMAX βασίζεται σε ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας, ένα σύστημα που προσφέρει μεγάλη αντοχή στην πολυδιαδρομική διάδοση (multipath), και επιτρέπει, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο WiMAX να λειτουργεί σε συνθήκες NLOS. Το OFDM είναι πλέον ευρέως αναγνωρισμένο ως η καλύτερη μέθοδος για την αντιμετώπιση του multipath για ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες.

2.1.2. ΥΨΗΛΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων στο φυσικό στρώμα (PHY) του WiMAX μπορεί να αγγίζει τα 74Mbps όταν λειτουργεί σε φάσμα εύρους 20MHz. Αναλυτικότερα, σε φάσμα 10MHz, χρησιμοποιώντας το σύστημα TDD με αναλογία ζεύξης καθόδου (downlink) προς ζεύξη ανόδου (uplink) 3:1, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων PHY είναι περίπου 25Mbps για το downlink και 6.7Mbps για το uplink. Αυτοί οι μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων επιπέδου PHY επιτυγχάνονται όταν χρησιμοποιείται διαμόρφωση 64-QAM με ποσοστό διόρθωσης σφάλματος κωδικοποίησης 5/6. Υπό πολύ καλές συνθήκες σήματος (υψηλό Signal to Noise

Ratio - SNR), μπορούν να επιτευχθούν ακόμη υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων με τη χρήση πολλαπλών κεραιών και χωρικής πολυπλεξίας.

2.1.3. ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΚΛΙΜΑΚΩΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το WiMAX έχει μια κλιμακωτή αρχιτεκτονική φυσικού στρώματος που επιτρέπει εύκολα την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων με το διαθέσιμο εύρος ζώνης καναλιού. Αυτή η ιδιότητα υποστηρίζεται με τη λειτουργία OFDMA, όπου το μέγεθος του Fast Fourier Transform (FFT) μπορεί να καθοριστεί με βάση το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού. Για παράδειγμα, ένα σύστημα WiMAX μπορεί να χρησιμοποιήσει μέγεθος FFT των 128 bits ή των 512 ή των 1048 bits όταν το εύρος ζώνης καναλιού είναι 1.25MHz, 5MHz, ή 10MHz, αντίστοιχα. Το χαρακτηριστικό αυτό της κλιμακωτής ανάθεσης εύρους ζώνης, και κατ' επέκταση του ρυθμού δεδομένων, μπορεί να γίνει δυναμικά για την υποστήριξη της περιαγωγής ή μεταπομπής των χρηστών μεταξύ διαφορετικών δικτύων που μπορεί να έχουν διαφορετικές κατανομές εύρους ζώνης.

2.1.4. ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

Το WiMAX υποστηρίζει μια σειρά σχημάτων διαμόρφωσης και διόρθωσης σφαλμάτων κωδικοποίησης. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά είναι ότι η διαμόρφωση και κωδικοποίηση μπορεί να πραγματοποιείται δυναμικά έτσι ώστε να επιτρέπει στο σύστημα να αλλάζει σχήμα ανά χρήστη και ανά πλαίσιο, βάσει των συνθηκών του καναλιού (πχ. SNR). Με τον τρόπο αυτό το WiMAX έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται (adaptability) στις συνθήκες του περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και κατ' επέκταση είτε να μεγιστοποιείται ο ρυθμός δεδομένων όπου αυτό είναι εφικτό είτε να διατηρείται σε σταθερά επίπεδα παρά το γεγονός ότι οι συνθήκες του περιβάλλοντος μπορεί να χειροτερέψουν. Ο αλγόριθμος προσαρμογής απαιτεί συνήθως τη χρήση του σχήματος με το οποίο μπορεί να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός ρυθμός δεδομένων για τους χρήστες, έτσι ώστε οι πόροι του δικτύου να αξιοποιούνται κατά το μέγιστο δυνατό. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας του δικτύου πολλές φορές ονομάζεται και best-effort στην διεθνή βιβλιογραφία [13].

2.1.5. ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΕΙΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΖΕΥΞΗΣ

Για τις συνδέσεις που απαιτούν αυξημένη αξιοπιστία, το WiMAX υποστηρίζει Automatic Retransmission ReQuests (ARQ) στο στρώμα ζεύξης. Οι συνδέσεις με δυνατότητα ARQ απαιτούν από κάθε πακέτο που μεταδίδεται να αναγνωρίζεται (acknowledged) από το δέκτη. Τα πακέτα που δεν αναγνωρίζονται θεωρούνται χαμένα και μεταδίδονται εκ νέου. Επίσης, το WiMAX επίσης υποστηρίζει προαιρετικά υβριδικό-ARQ, το οποίο είναι ένα αποτελεσματικό υβρίδιο μεταξύ Forward Error Correction (FEC) και ARQ.

2.1.6. ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΓΙΑ TDD ΚΑΙ FDD

Τα πρότυπα IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16e-2005 υποστηρίζουν τόσο την αμφίδρομη επικοινωνία διαίρεσης χρόνου (TDD) και διαίρεσης συχνότητας (FDD), όσο και την ημιαμφίδρομη επικοινωνία FDD, η οποία επιτρέπει μια χαμηλού κόστους υλοποίηση του συστήματος. Το TDD ευνοείται από την πλειοψηφία των εφαρμογών λόγω των πλεονεκτημάτων της:

- Ευελιξία στην επιλογή αναλογίας uplink προς downlink ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
- Δυνατότητα να αξιοποιήσει την αμοιβαιότητα καναλιού (channel reciprocity) προκειμένου να πραγματοποιείται καλύτερη εκτίμηση της ζεύξης καθόδου (ως προς την κατεύθυνση) βάσει των χαρακτηριστικών της ζεύξης ανόδου.
- Δυνατότητα να εφαρμόζεται σε ανεξαρτήτως φάσματος λειτουργίας
- Απλούστερος σχεδιασμός του πομποδέκτη.

Όλα τα αρχικά προφίλ WiMAX βασίζονται σε TDD, εκτός από δύο σταθερά WiMAX προφίλ των 3.5GHz.

2.1.7. ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΟΥ OFDMA

Η έκδοση του WiMAX για υψηλή κινητικότητα χρησιμοποιεί το OFDM ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, όπου σε διαφορετικούς χρήστες μπορούν να διατίθενται διάφορα υποσύνολα των OFDM τόνων. Το OFDMA διευκολύνει την αξιοποίηση του συχνοτικού και του πολύ-χρηστικού διαχωρισμού για να βελτιώσει σημαντικά την χωρητικότητα του συστήματος.

2.1.8. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΘΕΣΗ ΠΟΡΩΝ

Τόσο η κατανομή πόρων για το uplink όσο και για το downlink ελέγχονται από έναν scheduler στο σταθμό βάσης. Η χωρητικότητα μοιράζεται μεταξύ πολλών χρηστών με βάση τη ζήτηση, χρησιμοποιώντας ένα σχήμα Time Division Multiplexing (TDM). Κατά τη χρήση του OFDMA-PHY, η πολυπλεξία γίνεται επιπρόσθετα στη διάσταση της συχνότητας, με την κατανομή διαφορετικών υποσυνόλων OFDM sub-carriers σε διαφορετικούς χρήστες. Οι πόροι μπορούν να κατανεμηθούν και στο πεδίο του χώρου, με τη χρήση των προαιρετικών Advanced Antenna Systems (AAS) [14], [15]. Το πρότυπο επιτρέπει στους πόρους του εύρους ζώνης να κατανεμηθούν στο χρόνο, τη συχνότητα, και το χώρο και έχει έναν ευέλικτο μηχανισμό για να εφαρμόζει δυναμικά την κατανομή των πόρων ανά πλαίσιο.

2.1.9. ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΕΡΑΙΩΝ

Η υλοποίηση του WiMAX διαθέτει ένα σύνολο τεχνικών ενσωματωμένων στο σχεδιασμό φυσικού στρώματος, που επιτρέπουν τη χρήση τεχνικών πολλαπλών κεραιών, όπως beamforming (κατευθυντική εκπομπή και λήψη), τη χωροχρονική κωδικοποίηση και τη χωρική πολυπλεξία. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της συνολικής χωρητικότητας και της φασματικής απόδοσης του συστήματος, με την εφαρμογή πολλαπλών κεραιών του πομπού ή/και του δέκτη (Multiple Input Multiple Output - MIMO) [16], [17].

2.1.10. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

Το στρώμα ζεύξης (ή αλλιώς Medium Access Control - MAC) του WiMAX έχει μια αρχιτεκτονική σχεδιασμένη να υποστηρίζει πληθώρα εφαρμογών, όπως υπηρεσίες φωνής και πολυμέσων. Το σύστημα προσφέρει, εκτός από την καλύτερη δυνατή κίνηση δεδομένων (best effort), και υποστήριξη για σταθερό και μεταβλητό ρυθμό δεδομένων (Constant Bit Rate – CBR και Variable Bit Rate - VBR), σε πραγματικό ή μη χρόνο. Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το WiMAX MAC έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει ένα μεγάλο αριθμό χρηστών, με πολλαπλές συνδέσεις ανά τερματικό (υποσύνολο sub-carriers), το καθένα με τη δική του απαίτηση QoS (ανάλογα με το SNR ανά sub-carrier).

2.1.11. ΕΥΕΛΙΞΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ WiMAX ΒΑΣΕΙ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΤΟΥ IEEE802.16

Τα βασικά χαρακτηριστικά των προτύπων του IEEE 802.16 παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 2. Τα πρότυπα αυτά παρέχουν μια ποικιλία από εντελώς διαφορετικούς τύπους

σχεδιασμού. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλές επιλογές για την υλοποίηση του φυσικού στρώματος όπως: το φυσικό στρώμα μονού φέροντος που ονομάζεται WirelessMAN-SCa, το φυσικό στρώμα OFDM που ονομάζεται WirelessMAN-OFDM και το φυσικό στρώμα OFDMA που ονομάζεται WirelessMAN-OFDMA. Ομοίως, υπάρχουν διάφοροι τύποι αρχιτεκτονικής MAC, αμφίδρομης επικοινωνίας, μπάντας συχνοτήτων κτλ. Σκοπός αυτών των προτύπων είναι να καλύψουν έναν αριθμό εφαρμογών και πιθανών σεναρίων ανάπτυξης και επομένως προσφέρουν στους μηχανικούς τηλεπικοινωνιών και προγραμματιστές ανάπτυξης συστημάτων μια πληθώρα τύπων σχεδιασμού.

Ωστόσο, για λόγους επίτευξης της διαλειτουργικότητας, είναι απαραίτητο το πρότυπο να περιορίζεται σχεδιαστικά και να επικεντρώνεται στους στόχους της εκάστοτε υλοποίησης. Το WiMAX Forum το καταφέρνει αυτό ορίζοντας έναν συγκεκριμένο αριθμό προφίλ συστήματος και προφίλ πιστοποίησης.

Το *προφίλ συστήματος* ορίζει το υποσύνολο των υποχρεωτικών και προαιρετικών χαρακτηριστικών σε φυσικό και MAC στρώμα που έχει επιλέξει το WiMax Forum από το πρότυπο IEEE 802.16-2004 ή από το πρότυπο IEEE 802.16e-2005. Πρέπει να τονισθεί ότι η κατάσταση ενός συγκεκριμένου γνωρίσματος ως υποχρεωτική ή προαιρετική μέσα σε ένα προφίλ συστήματος WiMax μπορεί να είναι διαφορετική από αυτήν στο αρχικό πρότυπο IEEE. Επί του παρόντος, το WiMax Forum έχει δύο ξεχωριστά προφίλ συστήματος: το προφίλ σταθερού συστήματος που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16-2004, με OFDM PHY και το προφίλ συστήματος κινητικότητας που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005, με κλιμακωτό OFDMA PHY.

Ως *προφίλ πιστοποίησης* ορίζεται ένα συγκεκριμένο παράδειγμα προφίλ συστήματος στο οποίο προσδιορίζονται επιπλέον η συχνότητα λειτουργίας, το εύρος φάσματος καναλιού και η λειτουργία αμφίδρομης επικοινωνίας. Ο εκάστοτε εξοπλισμός WiMAX πιστοποιεί την διαλειτουργικότητά του έναντι ενός συγκεκριμένου προφίλ πιστοποίησης. Γι' αυτό το λόγο, το WiMAX Forum έχει ορίσει πέντε προφίλ σταθερής πιστοποίησης και δεκατέσσερα προφίλ πιστοποίησης κινητικότητας [18]. Μέχρι σήμερα οι εξοπλισμοί πιστοποιούνται έναντι δύο σταθερών προφίλ WiMAX. Είναι συστήματα των 3.5GHz, που λειτουργούν μέσω καναλιού εύρους 3.5MHz, χρησιμοποιώντας το προφίλ σταθερού συστήματος που βασίζεται στο φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.16-2004 και με στρώμα MAC σημείου-προς-πολλαπλά σημεία. Το ένα εκ των δύο προφίλ χρησιμοποιεί αμφίδρομη

επικοινωνία διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Duplex - FDD) και το άλλο αμφίδρομη επικοινωνία διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplex - TDD).

Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά του προτύπου 802.16 και η εξέλιξή του [3]

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Status	Completed December 2001	Completed June 2004	Completed December 2005
Frequency band	10GHz-66GHz	2GHz-11GHz	2GHz-11GHz for fixed; 2GHz-6GHz for mobile applications
Application	Fixed LOS	Fixed NLOS	Fixed and mobile NLOS
MAC architecture	Point-to-multipoint, mesh	Point-to-multipoint, mesh	Point-to-multipoint, mesh
Transmission scheme	Single carrier only	Single carrier, 256 OFDM or 2,048 OFDM	Single carrier, 256 OFDM or scalable OFDM with 128, 512, 1,024, or 2,048 subcarriers
Modulation	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Gross data rate	32Mbps-134.4Mbps	1Mbps-75Mbps	1Mbps-75Mbps
Multiplexing	Burst TDM/TDMA	Burst TDM/TDMA/ OFDMA	Burst TDM/TDMA/ OFDMA
Duplexing	TDD and FDD	TDD and FDD	TDD and FDD
Channel bandwidths	20MHz, 25MHz, 28MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz
Air-interface designation	WirelessMAN-SC	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN ^a	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN ^a
WiMAX implementation	None	256 - OFDM as Fixed WiMAX	Scalable OFDMA as Mobile WiMAX

2.2. ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ WiMAX

Το φυσικό στρώμα του WiMAX βασίζεται σε ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM). Το OFDM είναι το σύστημα μετάδοσης που προτιμάται για την επίτευξη υψηλού

ρυθμού δεδομένων, video και πολυμέσων. Επίσης, χρησιμοποιείται, εκτός του WiMAX, και από διάφορα άλλα εμπορικά συστήματα ευρείας ζώνης, συμπεριλαμβανομένων των DSL, Wi-Fi, Digital Video Broadcast-Handheld (DVB-H) και άλλων που θα περιγραφούν εν συντομία στο Κεφάλαιο 3. Το OFDM είναι ένα αποδοτικό σύστημα για την υλοποίηση δικτύων υψηλών ταχυτήτων σε περιβάλλον ραδιοκυμάτων χωρίς οπτική επαφή ή σε περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών (multipath). Σε αυτή την ενότητα, θα καλύψουμε τα βασικά στοιχεία του OFDM και θα γίνει μια επισκόπηση του φυσικού στρώματος WiMAX.

2.2.1. ΒΑΣΙΚΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ ΤΟΥ OFDM

Το OFDM ανήκει σε μια οικογένεια συστημάτων μετάδοσης που ονομάζεται διαμόρφωση πολλαπλού φέροντος (multicarrier), η οποία βασίζεται στην ιδέα α) της διαίρεσης ενός υψηλού ρυθμού ρεύματος δεδομένων (stream) σε διάφορα παράλληλα streams χαμηλότερου ρυθμού και β) της διαμόρφωσης κάθε stream σε ξεχωριστά φέροντα που συχνά ονομάζονται ως sub-carriers. Τα συστήματα διαμόρφωσης multicarrier εξαλείφουν ή ελαχιστοποιούν τη διασυμβολική παρεμβολή (Inter-Symbol Interference - ISI) κάνοντας τη διάρκεια συμβόλου αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε οι καθυστερήσεις που προκαλούνται από το κανάλι να είναι ένα αμελητέες, συνήθως μικρότερες από το 10% της διάρκειας συμβόλου. Το OFDM είναι μια φασματικά αποδοτική έκδοση της διαμόρφωσης multicarrier, όπου τα sub-carriers έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να είναι όλα ορθογώνια μεταξύ τους κατά τη διάρκεια συμβόλου, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη μη επικαλυπτόμενων καναλιών sub-carrier για την εξάλειψη της παρεμβολής ανάμεσά τους (inter-carrier). Επιλέγοντας το πρώτο subcarrier να έχει συχνότητα τέτοια ώστε να έχει ακέραιο αριθμό κύκλων σε μια περίοδο συμβόλου, και διαμορφώνοντας την απόσταση μεταξύ γειτονικών sub-carriers (εύρος ζώνης subcarrier) να είναι $BSC=B/L$, όπου B είναι το ονομαστικό εύρος ζώνης (ίσο με το ρυθμό δεδομένων), και L είναι ο αριθμός των sub-carriers, διασφαλίζουμε ότι όλα τα sub-carriers είναι ορθογώνια μεταξύ τους κατά την περίοδο συμβόλου. Μπορεί να αποδειχθεί ότι το σήμα OFDM είναι ισοδύναμο με τον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (IDFT) της σειράς δεδομένων που παίρνονται κάθε φορά ως L . Αυτό καθιστά εξαιρετικά εύκολη την υλοποίηση OFDM πομπών και δεκτών σε διακριτό χρόνο χρησιμοποιώντας IFFT (αντίστροφος ταχύς μετασχηματισμός Fourier) και FFT, αντιστοίχως. Προκειμένου να εξαλειφθεί εντελώς η ISI, χρησιμοποιούνται διαστήματα φύλαξης μεταξύ των OFDM σύμβολων. Κάνοντας το διάστημα φύλαξης μεγαλύτερο από την αναμενόμενη διασπορά καθυστέρησης multipath, το ISI μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς. Η προσθήκη ενός

διαστήματος φύλαξης, όμως, συνεπάγεται απώλεια ισχύος και μείωση απόδοσης στο εύρος ζώνης. Το ποσό της χαμένης ισχύος εξαρτάται από το πόσο μεγάλο μέρος της διάρκειας του OFDM συμβόλου είναι ο χρόνος φύλαξης. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος συμβόλου τόσο μικρότερη είναι η απώλεια ισχύος και η απόδοση εύρους ζώνης. Το μέγεθος του FFT σε OFDM σχεδιασμό θα πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά, και να υπάρχει ισορροπία μεταξύ της προστασίας από το multipath, του φαινομένου Doppler, του κόστους και της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού. Για ένα δεδομένο εύρος ζώνης, η επιλογή μεγάλου μεγέθους FFT θα μείωνε την απόσταση των sub-carriers και θα αύξανε τον χρόνο συμβόλου. Αυτό διευκολύνει την προστασία κατά της διασποράς καθυστέρησης multipath. Η μειωμένη απόσταση των sub-carriers, ωστόσο, καθιστά το σύστημα πιο ευάλωτο σε inter-carrier παρεμβολές, εξαιτίας του φαινομένου Doppler στις κινητές εφαρμογές.

2.2.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ OFDM

Το OFDM έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι εναλλακτικών λύσεων για τη μετάδοση δεδομένων υψηλού ρυθμού. Παρακάτω περιγράφονται εν συντομία τα βασικότερα:

Μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα: Το OFDM μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα με τη χρήση FFT / IFFT, και οι απαιτήσεις επεξεργασίας αυξάνονται ελαφρώς γρηγορότερα, από την αντίστοιχη γραμμική αύξηση, ανάλογα με το ρυθμό δεδομένων ή το εύρος ζώνης. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα του OFDM αποδεικνύεται ότι είναι $O(\log BT_m)$, όπου B είναι το εύρος ζώνης και T_m είναι η διασπορά καθυστέρησης.

Αξιοποίηση της διαφοροποίησης συχνοτήτων: Το OFDM διευκολύνει την κωδικοποίηση και την διαδικασία frequency interleaving στο πεδίο των συχνοτήτων, κάτι που μπορεί να προσφέρει ανθεκτικότητα ενάντια στα σφάλματα που προκαλούνται σε τμήματα του εκπεμπόμενου (μεταδιδόμενου) φάσματος που υφίστανται βαθιές διαλείψεις (deep fades).

Πολλαπλή πρόσβαση: Το OFDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σχήμα πολλαπλής πρόσβασης, όπου τα διαφορετικά sub-carriers μπορούν να κατανέμονται σε πολλούς χρήστες. Αυτό το σχήμα αναφέρεται ως OFDMA και αξιοποιείται ιδιαίτερα στο πρότυπο που υποστηρίζει υψηλή κινητικότητα των χρηστών IEEE802.16e. Σε σχετικά αργά χρονικά μεταβαλλόμενα κανάλια, είναι δυνατό να επιτευχθεί σημαντική αύξηση της χωρητικότητας με την προσαρμογή του ρυθμού δεδομένων ανά χρήστη σύμφωνα με την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) του εκάστοτε sub-carrier.

Αντοχή σε παρεμβολές στενής ζώνης: Το OFDM θεωρείται σχετικά ανθεκτικό δεδομένου ότι τέτοιου είδους παρεμβολές επηρεάζουν μόνο το υποσύνολο των sub-carriers που ανήκουν στην ζώνη αυτή. Απομονώνοντας τα sub-carriers αυτά ή χρησιμοποιώντας τα σε διαφορετικές περιοχές, με καλύτερο SNR, το σύστημα μπορεί να αντιμετωπίσει σε πολύ καλό βαθμό αυτό το είδος παρεμβολών.

2.2.3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΤΟΥ OFDM ΣΤΟ WiMAX

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η σταθερή και κινητή έκδοση του WiMAX έχουν ελαφρώς διαφορετικές υλοποιήσεις του φυσικού στρώματος OFDM. Το σταθερό WiMAX, που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16-2004, χρησιμοποιεί φυσικό στρώμα OFDM που βασίζεται σε 256 FFT. Το κινητό WiMAX, που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005, χρησιμοποιεί κλιμακωτό φυσικό στρώμα OFDMA όπου τα μεγέθη FFT μπορούν να κυμαίνονται από 128 έως 2.048 bits.

Σταθερό WiMAX OFDM-PHY: Όπως προαναφέρθηκε, στην έκδοση αυτή το μέγεθος FFT είναι σταθερό στα 256, από τα οποία τα 192 sub-carriers χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων, 8 χρησιμοποιούνται ως πιλοτικά sub-carriers για την εκτίμηση των καναλιών και το συγχρονισμό, και τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται ως guard band sub-carriers για την μείωση παρεμβολών (ομοδιαυλικών ή κοντινού διαύλου – co-channel ή adjacent channel). Δεδομένου ότι το μέγεθος FFT είναι σταθερό, το διάστημα των sub-carriers ποικίλλει ανάλογα με το εύρος ζώνης καναλιού. Όταν χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα εύρη ζώνης, η απόσταση των sub-carriers αυξάνει, και ο χρόνος συμβόλου μειώνεται. Η μείωση του χρόνου συμβόλου σημαίνει ότι ένα μεγαλύτερο μέρος πρέπει να καταμεριστεί ως χρόνος φύλαξης για να ξεπεραστεί η διασπορά καθυστέρησης. Το WiMAX επιτρέπει μια πληθώρα χρόνων φύλαξης που επιτρέπει στους σχεδιαστές συστημάτων να «πειραματιστούν» μεταξύ φασματικής απόδοσης και αντοχής της διασποράς καθυστέρησης. Για μέγιστη αντοχή διασποράς καθυστέρησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το 25% του χρόνου φύλαξης, όπου μπορούν να εφαρμοστούν διασπορές καθυστέρησης μέχρι και 16μs όταν λειτουργούν σε ένα κανάλι εύρους 3.5MHz και μέχρι 8μs όταν λειτουργούν σε ένα κανάλι εύρους 7MHz. Σε κανάλια που δεν επηρεάζονται αρκετά λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath), ο χρόνος φύλαξης μπορεί να περιοριστεί στο 3%.

Κινητή έκδοση του WiMAX OFDMA-PHY: Στο κινητό WiMAX, το μέγεθος FFT είναι κλιμακωτό από 128 έως 2048. Όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης αυξάνεται, το μέγεθος FFT

αυξάνεται επίσης τόσο ώστε το διάστημα των subcarriers να είναι πάντα 10.94kHz. Αυτό κρατά σταθερή τη διάρκεια του σύμβολου OFDM, που είναι η βασική μονάδα πόρων, και ως εκ τούτου η επίδραση στα υψηλότερα στρώματα είναι ελάχιστη. Ο κλιμακωτός αυτός σχεδιασμός διατηρεί επίσης το κόστος σε χαμηλά επίπεδα. Η απόσταση των subcarriers στα 10.94kHz επιλέχθηκε ως μια καλή ισορροπία για την κάλυψη των απαιτήσεων της διασποράς καθυστέρησης και της διασποράς του φαινομένου Doppler για τη λειτουργία σε μικτά σταθερά και κινητά περιβάλλοντα. Αυτή η απόσταση των sub-carriers μπορεί να υποστηρίξει τιμές διασποράς καθυστέρησης έως και 20 μs και κινητικότητα έως και 125 χλμ την ώρα όταν λειτουργούν στα 3.5GHz. Η απόσταση sub-carrier των 10.94kHz σημαίνει ότι χρησιμοποιούνται FFT μεγέθους 128, 512, 1.024, και 2.048 όταν το εύρος ζώνης καναλιού είναι 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, και 20 MHz, αντίστοιχα.

Sub-channels στο OFDMA: Σύμφωνα με την διαδικασία του sub-channelization, τα διαθέσιμα sub-carriers μπορούν να χωριστούν σε διάφορες ομάδες που ονομάζεται sub-channels. Το σταθερό WiMAX που βασίζεται στο OFDM-PHY επιτρέπει μια περιορισμένη μορφή sub-channelization και μόνο στο uplink. Το πρότυπο ορίζει 16 sub-channels, όπου 1, 2, 4, 8, ή όλα τα σύνολα μπορούν να ανατεθούν σε έναν χρήστη στο uplink. Το sub-channelization στο uplink στο σταθερό WiMAX επιτρέπει τη μετάδοση στους χρήστες χρησιμοποιώντας μόνο ένα μέρος (λιγότερο από το 1/16) του εύρους ζώνης που δίνεται από την σταθμό βάσης, το οποίο βελτιώνει την ζεύξη. Η βελτίωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει περαιτέρω την εμβέλεια κάλυψης ή/και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών των χρηστών. Το κινητό WiMAX που βασίζεται στο OFDMA-PHY επιτρέπει το sub-channelization τόσο στο uplink όσο και στο downlink, και επίσης, όπως και στο σταθερό WiMAX, τα sub-channels αποτελούν την ελάχιστη μονάδα πόρων συχνότητας που διατίθεται από το σταθμό βάσης. Ως εκ τούτου, διαφορετικά sub-channels μπορούν να ανατίθενται σε διαφορετικούς χρήστες, ως ένας μηχανισμός πολλαπλής πρόσβασης. Αυτός ο τύπος πολλαπλής πρόσβασης καλείται ορθογωνιακή πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (OFDMA), και δίνει το όνομά της στο κινητό WiMAX PHY. Τα sub-channels μπορούν να συσταθούν με τη χρήση είτε συνεχόμενων sub-carriers είτε sub-carriers που είναι κατανεμημένα σε όλο το εύρος του καναλιού. Τα sub-channels που σχηματίζονται με τη χρήση των κατανεμημένων sub-carriers παρέχουν μεγαλύτερο διαχωρισμό συχνότητας, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τις κινητές εφαρμογές για τον περιορισμό παρεμβολών. Το WiMAX ορίζει διάφορα σχήματα sub-channelization βασισμένα στα κατανεμημένα φέροντα τόσο για το uplink όσο και για το downlink. Ένα από

αυτά, που ονομάζεται Partial Usage of Sub-Carriers (PUSC), είναι υποχρεωτικό για όλες τις κινητές υλοποιήσεις του WiMAX. Τα αρχικά προφίλ του WiMAX καθορίζουν 15 και 17 sub-channels για το downlink και το uplink αντίστοιχα, για λειτουργία PUSC σε εύρος ζώνης 5MHz. Για λειτουργία στα 10MHz, είναι 30 και 35 κανάλια, αντίστοιχα. Το σχήμα sub-channelization που βασίζεται σε συνεχόμενα sub-carriers στο WiMAX ονομάζεται band Adaptive Modulation and Coding (AMC). Αν και ο διαχωρισμός των συχνοτήτων δεν ισχύει εδώ, η ζώνη AMC επιτρέπει στους σχεδιαστές του συστήματος να αξιοποιήσουν τον διαχωρισμό πολλών χρηστών, κατανέμοντας sub-channels στους χρήστες με βάση την απόκριση συχνότητας τους (channel state information μεταφρασμένο σε SNR). Αν το σύστημα δεν μπορεί να διαθέσει σε κάθε χρήστη ένα sub-channel που να μεγιστοποιεί το SNR ή Signal to Interference Noise Ratio (SINR) του, ο διαχωρισμός πολλαπλών χρηστών μπορεί να προσφέρει σημαντική βελτίωση στη συνολική χωρητικότητα του συστήματος. Γενικά, τα γειτονικά sub-channels είναι πιο κατάλληλα για σταθερές και χαμηλής κινητικότητας εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ WiMAX

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί αναλυτικά η αρχιτεκτονική του συστήματος WiMAX. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές σχεδίασης από τις οποίες διέπεται η αρχιτεκτονική και στην συνέχεια θα παρουσιαστούν όλες οι επιμέρους οντότητες. Για κάθε οντότητα θα περιγραφεί ο ρόλος τους και τέλος οι βασικότερες λειτουργίες στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής, όπως ανίχνευση δικτύου, ανάθεση διευθύνσεων, ζητήματα ασφαλείας, διαχείριση πόρων κ.α. [3], [4], [19].

3.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Η ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής του WiMAX πέρασε μέσα από διάφορα στάδια τα περισσότερα από τα οποία είναι παρόμοια με τις γενικές αρχές του σχεδιασμού των δικτύων IP. Ωστόσο ο απώτερος στόχος της σχεδίασης της αρχιτεκτονικής ήταν α) η εναρμόνιση με τα ενσύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, πχ. DSL, και β) η υποστήριξη υψηλού βαθμού κινητικότητας. Μερικές από τις σημαντικότερες σχεδιαστικές αρχές που καθόρισαν την ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής του WiMAX είναι οι ακόλουθες:

- **Functional decomposition:** Οι βασικές συνιστώσες της αρχιτεκτονικής πρέπει να αποτελούνται από επιμέρους οντότητες, η υλοποίηση των οποίων δεν θα πρέπει να συσχετίζεται με συγκεκριμένα στοιχεία δικτύου. Η αρχιτεκτονική θα πρέπει να είναι ανοικτή έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι η υλοποίηση θα μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή. Η αρχιτεκτονική επιτρέπει την διαφορετική αποσύνθεση των συνιστωσών εκ μέρους των κατασκευαστών ανά εμπορική εφαρμογή.
- **Modularity and flexibility:** Η αρχιτεκτονική του δικτύου πρέπει να βασίζεται σε αυτόνομες οντότητες (modules) και παράλληλα να είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να επιτρέπει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και επιλογών ανάπτυξης. Η δομή επιτρέπει την ανάπτυξη είτε κεντρικής είτε κατακεντρωμένης είτε υβριδικής αρχιτεκτονική. Με τον τρόπο αυτό η πρόσβαση στο δίκτυο μπορεί να υλοποιηθεί με πολλούς τρόπους λαμβάνοντας υπόψη την ετερογένεια των τοπολογιών που μπορεί να συνυπάρχουν σε ένα ενιαίο δίκτυο πρόσβασης.

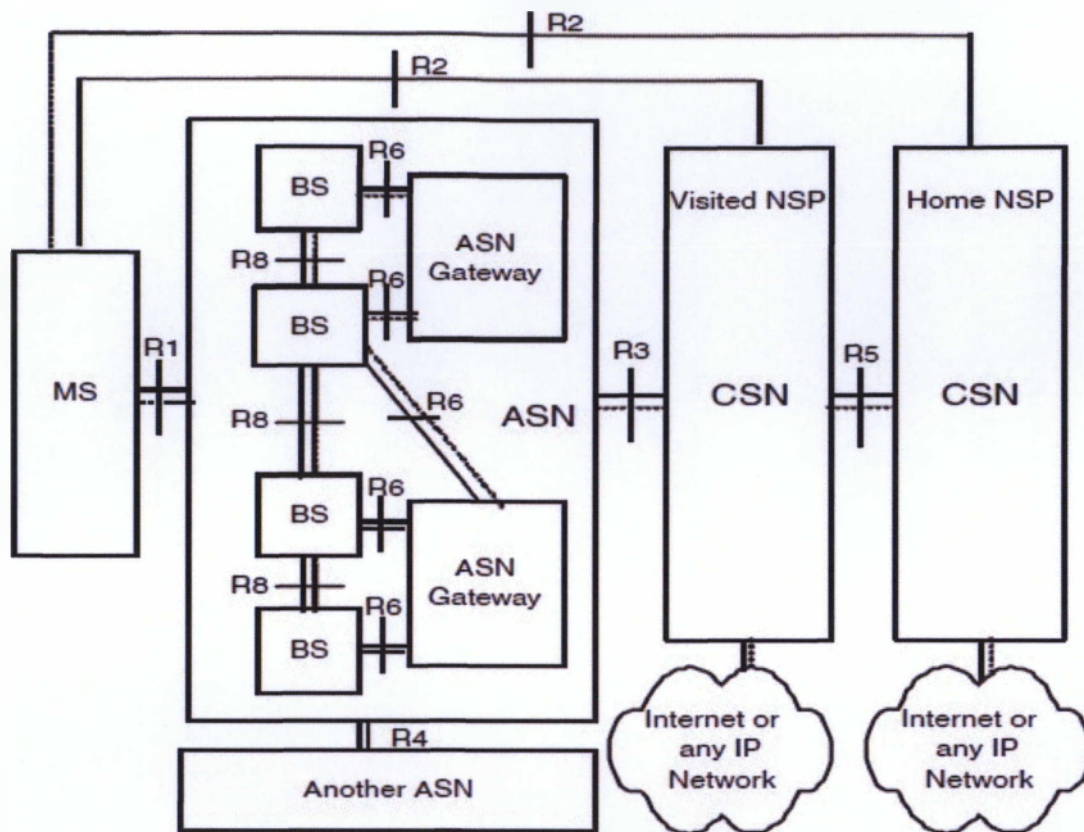
- **Support for variety of usage models:** Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, τα μοντέλα χρήσης είναι το Nomadic, Portable, Simple mobility και Full mobility. Η αρχιτεκτονική πρέπει να υποστηρίζει την συνύπαρξη των μοντέλων αυτών καθώς και την εξέλιξη από το αρχικό μοντέλο προς τα επόμενα. Επίσης πρέπει να εξασφαλίζονται βασικά επίπεδα ποιότητας και ασφάλειας καθώς επίσης και να υποστηρίζονται τα πρωτόκολλα Ethernet και IP.
- **Decoupling of access and connectivity services:** Η αρχιτεκτονική πρέπει να μην συσχετίζει την πρόσβαση στο δίκτυο με τις τεχνολογίες παροχής υπηρεσιών. Τα στοιχεία του δικτύου πρόσβασης πρέπει να είναι ανεξάρτητα από τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου IEEE 802.16-2005 έτσι ώστε η πρόσβαση στο δίκτυο να αποτελεί ξεχωριστό τομέα της αρχιτεκτονικής από αυτόν της παροχής υπηρεσιών IP.
- **Support for a variety of business models:** Η αρχιτεκτονική επιτρέπει την λογική διάκριση μεταξύ των α) του παρόχου του δικτύου πρόσβασης, β) του παρόχου πρόσβασης των συνδρομητών στις υπηρεσίες και γ) του παρόχου των εφαρμογών και υπηρεσιών στο δίκτυο. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική θα υποστηρίζει την ανίχνευση υπηρεσιών ή παρόχων υπηρεσιών τόσο από την πλευρά των συνδρομητών ή του παρόχου πρόσβασης των συνδρομητών σε υπηρεσίες.
- **Extensive use of IETF protocols:** Όλες οι διαδικασίες που προβλέπονται στο επίπεδο δικτύου και τα πρωτόκολλα που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να βασίζονται στα κατάλληλα Requests for Comments (RFCs) του Internet Engineering Task Force (IETF) [20]. Λειτουργίες όπως ασφάλεια και επίπεδο ποιότητας από άκρο-σε-άκρο (end-to-end), επίπεδα κινητικότητας συνδρομητών, διαχείριση, παροχή υπηρεσιών κλπ θα πρέπει να βασίζονται στον μέγιστο βαθμό στα υπάρχοντα πρωτόκολλα του IETF, καθώς επίσης και σε επεκτάσεις όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο.
- **Support for access to incumbent operator services:** Μέσω των πρωτοκόλλων του IETF η αρχιτεκτονική θα μπορεί να παρέχει πρόσβαση σε υπάρχουσες υπηρεσίες και άλλα παραδοσιακά δίκτυα των 3GPP [21] και 3GPP2 [22].

3.2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ WiMAX

Στην Εικόνα 1 φαίνεται η αρχιτεκτονική των λογικών οντοτήτων σε επίπεδο δικτύου του WiMAX, η οποία χωρίζεται στα παρακάτω λογικά τμήματα:

- **Mobile Station (MS):** Αποτελούν το μέσο πρόσβασης των χρηστών στο δίκτυο.

- **Base Station (BS):** Είναι υπεύθυνος για την παροχή της ραδιοεπαφής στον MS. Οι επιπλέον λειτουργίες που μπορούν να είναι μέρος του BS είναι οι λειτουργίες διαχείρισης micromobility, όπως η ενεργοποίηση μεταπομπής, η διαχείριση ραδιοπόρων, η επιβολή πολιτικής QoS, η ταξινόμηση κίνησης, λειτουργίες Dynamic Host Control Protocol (DHCP) [23], η διαχείριση κλειδιών και συνόδων κλπ.
- **Access Service Network (ASN):** Αποτελείται από ένα ή περισσότερους σταθμούς βάσης (Base Station - BS) καθώς και από ένα ή περισσότερα σημεία πρόσβασης προς άλλα ASNs (ASN Gateways).
- **ASN GateWay:** Η πύλη ASN λειτουργεί συνήθως ως σημείο συγκέντρωσης κίνησης στρώματος ζεύξης μέσα σε ένα ASN. Πρόσθετες λειτουργίες που μπορεί να είναι μέρος της πύλης ASN περιλαμβάνουν την διαχείριση τοποθεσίας και τηλεειδοποίησης ανάμεσα στα ASNs, τον έλεγχο διαχείρισης ραδιοπόρων και τον έλεγχο εισόδου, την απόκρυψη των προφίλ συνδρομητών και των κλειδιών κρυπτογράφησης, τη λειτουργικότητα AAA, την αποκατάσταση και διαχείριση της κινητικότητας των MSs με τους σταθμούς βάσης, την επιβολή QoS και πολιτικής και τη δρομολόγηση στο επιλεγμένο CSN.
- **Connectivity Service Network (CSN):** Παρέχει σύνδεση μέσω του πρωτοκόλλου IP καθώς και όλες τις απαραίτητες λειτουργίες επιπέδου δικτύου. Κάθε συνδρομητής εξυπηρετείται από το CSN είτε του παρόχου δικτύου που ανήκει (Home NSP) είτε του παρόχου δικτύου που επισκέπτεται (Visited NSP), όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις περιαγωγής (roaming).



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική λογικών οντοτήτων επιπέδου δικτύου [3]

3.2.1. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ ACCESS SERVICE NETWORK (ASN)

Οι βασικές λειτουργίες του ASN είναι οι παρακάτω:

- Παροχή πρόσβασης προς τους MSs μέσω του προτύπου IEEE 802.16e.
- Ανίχνευση δικτύου και επιλογή του CSN/NSP βάσει προτιμήσεων των συνδρομητών.
- Πιστοποίηση, Εξουσιοδότηση και Χρέωση (Authentication, Authorization, Accounting – AAA) συνδρομητών.
- Εγκατάσταση σύνδεσης IP ανάμεσα στον MS και το CSN.
- Διαχείριση πόρων (πχ. συχνότητες, ισχύ εκπομπής κλπ) και ανάθεση βάσει της πολιτικής εξασφάλισης κατάλληλου επίπεδου ποιότητας υπηρεσιών.
- Λειτουργίες handover, διαχείριση κινητικότητας συνδρομητών, παροχή συνδέσεων mobile-IP κλπ.

Ο BS λειτουργεί σε μια συγκεκριμένη συχνότητα που του έχει ανατεθεί και είναι υπεύθυνος να καλύψει μια περιοχή του δικτύου WiMAX υλοποιώντας το πρότυπο IEEE-802.16e για την

επικοινωνία του με τους MSs που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς του στην περιοχή αυτή. Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες του BS είναι η δυνατότητα σύνδεσής του με περισσότερα από ένα ASNs (μέσω των αντίστοιχων ASN Gateways) έτσι ώστε να επιτευχθεί η εξισορρόπηση του φορτίου σε περιπτώσεις που αυτό είναι αναγκαίο για την εξασφάλιση των επίπεδων ποιότητας. Επιπλέον είναι υπεύθυνος για μια πληθώρα άλλων βασικών λειτουργιών όπως οι παρακάτω:

- Scheduling για τις ζεύξεις ανόδου (uplink) και καθόδου (downlink).
- Κατηγοριοποίηση τηλεπικοινωνιακής κίνησης βάσει των χαρακτηριστικών της.
- Διαχείριση συνόδων υπηρεσιών των συνδρομητών.
- Υλοποίηση επιπέδου παροχής υπηρεσιών προς τους συνδρομητές.
- Παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των MSs εντός της εμβέλειάς του.
- Λειτουργίες DHCP για την σύνδεση των MSs.
- Κρυπτογράφηση συνδέσεων.

Όλη η κίνηση η οποία εξυπηρετείται από τους BSs του ASN μεταφέρεται είτε προς άλλα ASNs είτε απευθείας στο CSN. Η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας πραγματοποιείται μέσω του ASN gateway του οποίου οι βασικότερες λειτουργίες είναι οι εξής:

- Διαχείριση τοποθεσίας συνδρομητών (δεδομένου του BSs με τον οποίο συνδέεται).
- Εξυπηρετητής συνόδων υπηρεσιών και διαχείριση κινητικότητας συνδρομητών.
- Πραγματοποιεί έλεγχο πρόσβασης των συνδρομητών στο δίκτυο και μπορεί να αποθηκεύσει προσωρινά το προφίλ τους καθώς και τα κλειδιά κρυπτογράφησης.
- Παρέχει στοιχεία επί των διαδικασιών AAA (Authentication, Authorization, Accounting).
- Παρέχει τις πολιτικές διασφάλισης επιπέδου ποιότητας παρεχόμενων υπηρεσιών.
- Υλοποιεί διαδικασίες δρομολόγησης πρωτοκόλλων IPv4 και IPv6 από και προς τα CSNs.

3.2.2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥ CONNECTIVITY SERVICE NETWORK (CSN)

Οι σημαντικότερες λειτουργίες του CSN είναι οι παρακάτω:

- Εξυπηρετητής για την διαχείριση και ανάθεση των διευθύνσεων IP στα MSs των χρηστών κατόπιν αιτήσεώς τους για έναρξη υπηρεσιών.

- Διαχείριση και υλοποίηση των διαδικασιών AAA (Authentication, Authorization, Accounting).
- Διαχείριση πολιτικών πρόσβασης χρηστών στο δίκτυο και διαχείριση επιπέδων ποιότητας ανά υπηρεσία και προφίλ χρήστη.
- Διαχείριση διαδικασιών περιαγωγής ανάμεσα στα CSNs και τους παρόχους δικτύου.
- Διαχείριση κινητικότητας χρηστών ανάμεσα στα ASNs.
- Έλεγχος πρόσβασης συνδρομητών σε άλλα δίκτυα, είδος υπηρεσιών και τήρηση νομικού πλαισίου.

3.2.3. ΣΗΜΕΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (REFERENCE POINTS – RP)

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 υπάρχουν ορισμένα Reference Points (RPs) τα οποία συμβολίζουν την λογική σύνδεση ορισμένων λειτουργιών που ανήκουν σε (ή εμπλέκουν) διαφορετικές λογικές οντότητες της αρχιτεκτονικής. Για λόγους ευελιξίας τα RPs δεν είναι απαραίτητο να υλοποιούν πραγματικές διεπαφές επικοινωνίας, εκτός και αν στην υλοποίηση του κατασκευαστή οι λογικές οντότητες του RP βρίσκονται σε διαφορετικές συσκευές (πχ. στοιχεία δικτύου). Στην Εικόνα 2 απεικονίζονται και περιγράφονται τα RPs της αρχιτεκτονικής.

Reference Point	End Points	Description
R1	MS and ASN	Implements the air-interface (IEEE 802.16e) specifications. R1 may additionally include protocols related to the management plane.
R2	MS and CSN	For authentication, authorization, IP host configuration management, and mobility management. Only a logical interface and not a direct protocol interface between MS and CSN.
R3	ASN and CSN	Supports AAA, policy enforcement, and mobility-management capabilities. R3 also encompasses the bearer plane methods (e.g., tunneling) to transfer IP data between the ASN and the CSN.
R4	ASN and ASN	A set of control and bearer plane protocols originating/terminating in various entities within the ASN that coordinate MS mobility between ASNs. In Release 1, R4 is the only interoperable interface between heterogeneous or dissimilar ASNs.
R5	CSN and CSN	A set of control and bearer plane protocols for interworking between the home and visited network.
R6	BS and ASN-GW	A set of control and bearer plane protocols for communication between the BS and the ASN-GW. The bearer plane consists of intra-ASN data path or inter-ASN tunnels between the BS and the ASN-GW. The control plane includes protocols for mobility tunnel management (establish, modify, and release) based on MS mobility events. R6 may also serve as a conduit for exchange of MAC states information between neighboring BSs.
R7	ASN-GW-DP and ASN-GW-EP	An optional set of control plane protocols for coordination between the two groups of functions identified in R6.
R8	BS and BS	A set of control plane message flows and, possibly, bearer plane data flows between BSs to ensure fast and seamless handover. The bearer plane consists of protocols that allow the data transfer between BSs involved in handover of a certain MS. The control plane consists of the inter-BS communication protocol defined in IEEE 802.16e and additional protocols that allow controlling the data transfer between the BS involved in handover of a certain MS.

Εικόνα 2: Reference points αρχιτεκτονικής δικτύου WiMAX [3]

3.3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ορισμένες από τις βασικότερες λειτουργίες του WiMAX, η παροχή των οποίων βασίζεται στην έξυπνη και αποδοτική σχεδίαση της αρχιτεκτονικής του. Πιο συγκεκριμένα οι λειτουργίες αυτές είναι: η ανίχνευση και επιλογή του δικτύου από την μεριά του χρήστη που αποτελεί ένα από τα πιο καινοτόμα στοιχεία του δικτύου, η διαδικασία ανάθεσης διευθύνσεων IP αντιμετωπίζοντας τα προβλήματα κινητικότητας των χρηστών και διαφάνειας του δικτύου, τις ενέργειες διασφάλισης ασφαλών συνδέσεων καθώς και ένα από τα σημαντικότερα και καινοτόμα χαρακτηριστικά που είναι η δυναμική διαχείριση πόρων βάσει των δυνατοτήτων που παρέχονται από το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ζεύξης.

3.3.1. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των δικτύων WiMAX είναι η δυνατότητα που παρέχουν στα MSs να εντοπίζουν είτε αυτόματα είτε με την βοήθεια του χρήστη, το κατάλληλο δίκτυο τα χαρακτηριστικά του οποίου μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των συνδρομητών βάσει του προφίλ αυτών. Κάθε MS εφόσον βρίσκεται σε ένα περιβάλλον όπου συνυπάρχουν πολλά διαθέσιμα δίκτυα στα οποία μπορεί να συνδεθεί, έχει στην διάθεσή του κατ' επέκταση και πολλούς παρόχους υπηρεσιών που μπορούν να το εξυπηρετήσουν. Η υλοποίηση της ανίχνευσης και επιλογής του δικτύου έγκειται σε 4 καλά καθορισμένες διαδικασίες:

- **NAP discovery:** Με την διαδικασία ανίχνευσης του NAP ο MS μπορεί να ανακτήσει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τους NAPs που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς του.
- **NSP discovery:** Ο MS ανιχνεύει τους NSPs που μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες μέσω του ASN που θα επιλεγεί αργότερα. Ο MS έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει δυναμικά την ανίχνευση αυτή είτε κατά την αρχική ανίχνευση ή κατά την είσοδό του στο δίκτυο. Επιπλέον, οι διαθέσιμοι NSPs μπορούν να μεταδοθούν και από τους BSs ως απάντηση στο αντίστοιχο request του MS. Εναλλακτικά, κάθε MS μπορεί να διαθέτει λίστα με όλους τους NSPs τους οποίους θα πρέπει να εντοπίζει. Ωστόσο, σε περίπτωση που ο NAP (που έχει ήδη επιλεγεί από την προηγούμενη διαδικασία) έχει μοναδικό NSP, τότε η διαδικασία ανίχνευσης του NSP είναι προφανώς περιττή.
- **NSP enumeration and selection:** Μετά την ανίχνευση των NSPs, ο MS θα πρέπει να επιλέξει κάποιον από αυτούς (σε περίπτωση που είναι περισσότεροι του ενός) βάσει συγκεκριμένου αλγορίθμου. Η επιλογή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε αυτόματα είτε με την βοήθεια του χρήστη του MS έτσι ώστε να έχει και τον έλεγχο των συνδέσεων που πραγματοποιεί και χρεώνεται για αυτές.
- **ASN attachment:** Με την επιλογή του NSP, ο MS συνδέεται με τον κατάλληλο ASN στον οποίο παρέχει πληροφορίες α) ταυτοποίησής του και β) Home NSP.

3.3.2. ΑΝΑΘΕΣΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΩΝ IP

Ο βασικός μηχανισμός ανάθεσης διευθύνσεων IP προς τους MSs είναι ο DHCP. Εναλλακτικά, το CSN του Home NSP (βλ. και σχήμα αρχιτεκτονικής Εικόνα 1) μπορεί να διαθέσει ένα σύνολο διευθύνσεων IP στον ASN, ο οποίος θα μπορεί να τις αναθέσει στους MSs μέσω του DHCP. Σε περίπτωση σταθερού σημείου πρόσβασης στο δίκτυο η διευθυνσιοδότηση πρέπει να πραγματοποιηθεί από το CSN του Home NSP είτε δυναμικά είτε στατικά. Σχετικά με τα μοντέλα χρήσης (nomadic, portable και mobile access) μπορεί να πραγματοποιηθεί δυναμική διευθυνσιοδότηση είτε από το CSN του Home NSP είτε από το visited CSN ανάλογα με τις συμφωνίες περιαγωγής του συνδρομητών.

Η υποστήριξη διευθύνσεων του πρωτοκόλλου IPv6 πραγματοποιείται μέσω κατάλληλου IPv6 δρομολογητή εντός του ASN έτσι ώστε σε κάθε MS να μπορεί να ανατεθεί μια globally routable (δρομολογήσιμη) διεύθυνση IP. Για διευθυνσιοδότηση μέσω του mobile IPv6 πρωτοκόλλου, ο MS αποκτά τις διευθύνσεις α) care-of address (CoA) από το ASN και β) home address (HoA) από το CSN. Κάθε MS μπορεί να χρησιμοποιήσει μια από τις δύο αυτές διευθύνσεις ανάλογα με το αν δρομολογεί τα πακέτα απευθείας στους κόμβους ή μέσω του CSN. Σε περίπτωση του πρωτοκόλλου IPv6 επιτρέπεται είτε η stateful autoconfiguration παραμετροποίηση του MS DHCPv6 (RFC 3315) [24] είτε η stateless address autoconfiguration (RFC 2462) [25], ενώ με το Mobile IPv6 η HA ανατίθεται από το stateless DHCP. Προκειμένου να επιτευχθεί stateful configuration ο DHCP εξυπηρετητής βρίσκεται εντός του CSN αλλά και κατά μήκος της σύνδεσης προς το CSN ενώ για stateless configuration ο MS θα χρησιμοποιήσει είτε διαδικασίες ανίχνευσης των «γειτόνων» του είτε μέσω του DHCP προκειμένου να λάβει πληροφορίες παραμετροποίησης.

3.3.3. ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΟ WiMAX

Η ασφάλεια, όχι μόνο στο WiMAX αλλά και γενικά στα συστήματα επικοινωνιών, είναι ένα αρκετά ευρύ και πολύπλοκο ζήτημα. Ωστόσο, οι βασικοί άξονες που καθορίζουν την ασφάλεια είναι οι παρακάτω ανεξαρτήτως συστήματος:

- **Privacy:** Προστασία από «ωτακουστές» καθώς τα δεδομένα του χρήστη μεταδίδονται από άκρο-σε-άκρο στο δίκτυο.
- **Data integrity:** Προστασία τόσο των δεδομένων όσο και των σημάτων ελέγχου από τυχών αλλοιώσεις κατά την μετάδοσή τους και μεταφορά τους στο δίκτυο.
- **Authentication:** Πιστοποίηση της ταυτότητας του χρήστη ή/και της συσκευής του. Αντίστοιχα, ο χρήστης ή/και η συσκευή του θα πρέπει να πιστοποιήσει την

ταυτότητα του δικτύου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται και αμοιβαία πιστοποίηση (mutual authentication).

- **Authorization:** Διαδικασία έγκρισης ενός πιστοποιημένου χρήστη για χρήση συγκεκριμένων υπηρεσιών.
- **Access control:** Ο έλεγχος πρόσβασης εξασφαλίζει ότι μόνο εγκεκριμένοι χρήστες επιτρέπεται να κάνουν χρήση συγκεκριμένων υπηρεσιών.

Όπως είναι φυσικό, εφόσον μελετάμε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα όπως το WIMAX το οποίο υλοποιεί το πρότυπο IEEE802.16, η ασφάλεια αφορά σχεδόν όλα τα επιμέρους επίπεδα του OSI, τα οποία υλοποιεί. Κάθε επίπεδο χειρίζεται διαφορετικά ζητήματα ασφαλείας ανάλογα με τον ρόλο του. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένο με την άποψη ότι σε ένα σύστημα επικοινωνιών πρέπει να υπάρχουν πολλαπλοί μηχανισμοί ασφαλείας ώστε ακόμα και σε περιπτώσεις που κάποιος από αυτούς καταρρεύσει, το σύστημα να συνεχίσει να προστατεύεται από τους υπόλοιπους. Στην Εικόνα 3 εμφανίζονται οι μηχανισμοί ασφαλείας για τα επιμέρους επίπεδα.

Layer	Security Mechanism	Notes
Link	AES encryption, device authentication, port authentication (802.1X)	Typically done only on wireless links
Network	Firewall, IPsec, AAA infrastructure (RADIUS, DIAMETER)	Protects the network and the information going across it
Transport	Transport-layer security (TLS)	Provides secure transport-layer services, using certificate architecture
Application	Digital signatures, certificates, secure electronic transactions (SET), digital rights management (DRM)	Can provide both privacy and authentication; relies mostly on public key infrastructure

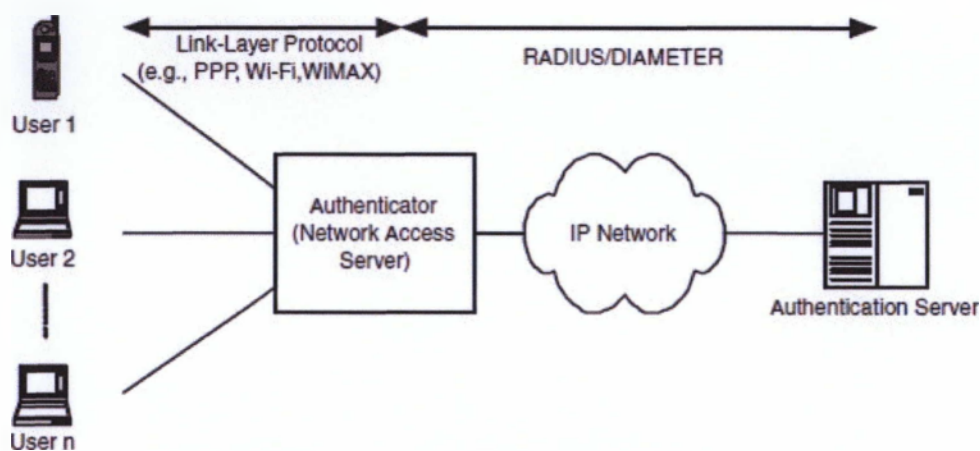
Εικόνα 3: Επίπεδα ασφαλείας στο WIMAX [3], [19]

Στο επίπεδο ζεύξης απαιτείται κρυπτογράφηση (πχ. βάσει προτύπου Advanced Encryption Standard – AES [26]) έτσι ώστε να εξασφαλιστεί πως κάποιος ωτακουστής, παρά το γεγονός ότι μπορεί να λαμβάνει το σήμα που εκπέμπεται δεν θα μπορεί να το αποκρυπτογραφήσει και να έχει πρόσβαση στα δεδομένα που μεταφέρει. Επιπλέον, απαιτείται και έλεγχος πρόσβασης ώστε να μην επιτρέπεται η σύνδεση στο δίκτυο σε μη εγκεκριμένο χρήστη. Όπως είναι εύκολο να φανταστεί κανείς, σε ενσύρματα συστήματα δεν χρησιμοποιείται συχνά η κρυπτογράφηση καθώς είναι δυσκολότερο να αποκτήσει κάποιος πρόσβαση στο μέσο διάδοσης που είναι το καλώδιο, ενώ αντίθετα στα ασύρματα συστήματα είναι ο αέρας.

Στο επίπεδο δικτύου υπάρχουν ακόμα περισσότεροι τρόποι προκειμένου να επιτευχθεί σημαντικός βαθμός ασφαλείας. Το πρωτόκολλο Internet Protocol Security (IPsec) [27] χρησιμοποιείται για τις διαδικασίες πιστοποίησης και κρυπτογράφησης ενώ μέσω των firewalls επιτυγχάνεται η προστασία του δικτύου από κακόβουλες επιθέσεις. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα Remote Access Dial-In User Service (RADIUS) [28] και DIAMETER10 [29] είναι υπεύθυνα για την υλοποίηση των διαδικασιών AAA.

Στο επίπεδο μεταφοράς το πρωτόκολλο Transport Layer Security (TLS) [30] προσθέτει επιπλέον ασφάλεια για την ορθή μεταφορά των πακέτων ενώ στο επίπεδο εφαρμογής υπάρχει πληθώρα μηχανισμών ασφαλείας όπως ψηφιακές υπογραφές, ψηφιακά πιστοποιητικά, κ.α.

Ο έλεγχος πρόσβασης είναι ο μηχανισμός μέσω του οποίου εξασφαλίζεται ότι μόνο εγκεκριμένοι χρήστες επιτρέπεται να έχουν πρόσβαση στους πόρους του δικτύου. Κάθε σύστημα πρόσβασης έχει τις οντότητες: α) ο supplicant που αιτείται την πρόσβασή του στο δίκτυο, β) τον authenticator που ελέγχει το σημείο πρόσβασης του supplicant και γ) την οντότητα που αποφασίζει εν τέλει εάν η αίτηση πρόσβασης του supplicant θα γίνει δεκτή ή όχι. Στην Εικόνα 4 φαίνεται μια τυπική αρχιτεκτονική ελέγχου πρόσβασης που χρησιμοποιείται ως επί των πλείστων από τους NSPs.



Εικόνα 4: Ενδεικτική αρχιτεκτονική ελέγχου πρόσβασης χρηστών [3]

Η αρχιτεκτονική του WiMAX υλοποιεί όπως έχει ήδη αναφερθεί το σύνολο των AAA (Authentication, Authorization, Accounting) διαδικασιών και επιπλέον έχει την δυνατότητα να εγκρίνει την ροή υπηρεσιών, να ελέγχει το επίπεδο υπηρεσίας καθώς και να διαχειρίζεται με ασφάλεια την κινητικότητα των χρηστών [19]. Μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ασφαλείας του συστήματος WiMAX είναι οι παρακάτω:

- Πιστοποίηση τόσο του χρήστη όσο και της συσκευής του καθώς και αμοιβαίο έλεγχο ταυτότητας του MS και του NSP, βάσει του Privacy Key Management Version 2 (PKMv2) όπως προβλέπεται στο πρότυπο in IEEE 820.16e-2005.
- Οι μηχανισμοί πιστοποίησης θα πρέπει να βασίζονται σε διάφορους τύπους διαπιστευτηρίων όπως κωδικοί, Subscriber Identity Module (SIM) cards, Universal SIM (USIM), Universal Integrated Circuit Card (UICC), Removable User Identity Module (RUIM) καθώς και πιστοποιητικά X.509, αρκεί να είναι κατάλληλα όπως προδιαγράφεται στο RFC 4017 [31].
- Υποστήριξη περιαγωγής ανάμεσα στους Home και Visited NSPs καθώς και υλοποίηση του πρωτοκόλλου RADIUS στα ASNs και CSNs. Η υλοποίηση των διαδικασιών AAA θα επιτρέπουν επίσης στο Home CSN να ανακτήσει πληροφορίες σχετικά με την ταυτότητα των Visited CSNs από τα ASNs.

3.3.4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ

Η διαχείριση των ραδιο-πόρων ενός δικτύου ονομάζεται Radio Resource Management (RRM) και ο στόχος της είναι η αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου από την αξιοποίηση των πόρων του. Στο WiMAX οι διαδικασίες RRM υλοποιούνται εντός του ASN και περιλαμβάνουν:

- Ανάκτηση πληροφοριών από τους BSs και τα MSs για την υλοποίηση των διαδικασιών RRM.
- Προώθηση των πληροφοριών και μετρήσεων σε βάσεις δεδομένων εντός του δικτύου.
- Διατήρηση τοπικής βάσης δεδομένων για την μετρήσεις που ανακτώνται.
- Ανταλλαγή πληροφοριών και μετρήσεων ανάμεσα στις τοπικές βάσεις δεδομένων των ASNs.
- Διάθεση των μετρήσεων και σε άλλες οντότητες του δικτύου όπου είναι απαραίτητες (πχ. έλεγχος μεταπομπών και επιπέδου ποιότητας υπηρεσιών).

Στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής του WiMAX, οι λειτουργίες RRM χωρίζεται στις παρακάτω λειτουργικές οντότητες:

- **Radio Resource Agent (RRA):** Ο RRA βρίσκεται σε κάθε BS και συλλέγει μετρήσεις για συγκεκριμένους δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs) όπως

ισχύς λαμβανόμενου σήματος τόσο του BS από την εκπομπή των MSs όσο και των MSs από την εκπομπή του BS. Επιπλέον, ο RRA είναι υπεύθυνος για να αποστέλλει πληροφορίες σχετικά με την διαθεσιμότητα άλλων γειτονικών BSs στην περιοχή, προς τους MSs που είναι συνδεδεμένοι με τον BS του RRA.

- **Radio Resource Controller (RRC):** Η λογική οντότητα RRC μπορεί να βρίσκεται είτε στον BS είτε στον ASN-GW είτε σε δικό του εξυπηρετητή εντός του ASN. Στόχος του είναι η συλλογή των μετρήσεων των KPIs από τους RRAs με σκοπό να διατηρεί μια τοπική βάση δεδομένων διαχείρισης πόρων αποκλειστικά για την περιοχή που καλύπτει.

Η επικοινωνία των RRA και RRC όταν υλοποιούνται σαν ξεχωριστές οντότητες βασίζεται στο σημείο αναφοράς R6 (βλ. Εικόνα 2). Η επικοινωνία ανάμεσα στα RRCs μπορεί να βασίζεται και μέσω του σημείου αναφοράς R4 σε περίπτωση που υλοποιούνται εκτός του BS και μέσω του σημείου αναφοράς R8 σε περίπτωση που βρίσκονται εντός του BS. Κάθε RRA εντός του BS είναι επίσης υπεύθυνο για τον έλεγχο των πόρων του βάσει α) των εκτιμήσεων των KPIs του BS και β) των εκτιμήσεων των KPIs των γειτονικών BS που παρέχονται από τον RRC. Ο έλεγχος πόρων από τον RRA περιλαμβάνει την ισχύ εκπομπής, έλεγχος των επιπέδων PHY και MAC, έλεγχος γειτονικών BSs, λειτουργίες διασφάλισης παροχής υπηρεσιών και υλοποίησης πολιτικών πρόσβασης σε αυτές και βοηθητικές λειτουργίες για την υλοποίηση των μεταπομπών των MS. Η επικοινωνία ανάμεσα στον RRA και RRC βασίζεται σε συγκεκριμένες διαδικασίες οι οποίες κατηγοριοποιούνται στους παρακάτω τύπους:

- Ο πρώτος τύπος αφορά τις διαδικασίες παροχής αναφορών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποστολή των εκτιμήσεων των KPIs α) από τον RRA στον RRC και β) μεταξύ των RRCs.
- Ο δεύτερος τύπος αφορά τις διαδικασίες υποστήριξης αποφάσεων από τον RRC προς τον RRA, προκειμένου να μεταφερθούν χρήσιμες οδηγίες για την υλοποίηση των πολιτικών RRM από την μεριά του BS.

Επιπλέον, πέρα από τους παραπάνω τύπους, η επικοινωνία RRA και RRC βασίζεται και σε ορισμένες περισσότερο κλασσικές διαδικασίες όπως αναφορές σχετικά με την ποιότητα του καναλιού ανά MS, διαθέσιμη και ελεύθερη χωρητικότητα ανά BS καθώς και ανάκτηση της κατάστασης γειτονικών BSs. Μελλοντικές επεκτάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν επιπλέον

διαδικασίες όπως αναδιάρθρωση του sub-channel, κανόνες εκπομπής, μέγιστη ισχύ εκπομπής, λόγος Uplink/Downlink κλπ.

3.4. ΤΟ WiMAX ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

Με δεδομένο ότι το WiMAX θα μπορούσε, κάτω από τις κατάλληλες προϋποθέσεις, να αντικαταστήσει την κινητή τηλεφωνία, είναι φανερό ότι η διάδοσή του δεν θα είναι και τόσο εύκολη σε παγκόσμιο επίπεδο.

Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι μετά τον πρόσφατο τυφώνα που έπληξε τη Νέα Ορλεάνη των Ηνωμένων Πολιτειών και τις καταστροφές που επέφερε στο ενσύρματο δίκτυο τηλεπικοινωνιών, τα σωστικά συνεργεία προχώρησαν στην άμεση δημιουργία δικτύου WiMAX για την κάλυψη των αναγκών επικοινωνίας στην περιοχή.

Από τον Οκτώβριο του 2010, το Φόρουμ WiMAX υποστήριξε πάνω από 592 WiMAX (σταθερής και κινητής τηλεφωνίας) τα δίκτυα έχουν αναπτυχθεί σε περισσότερες από 148 χώρες μεταξύ τους και η Ελλάδα, που καλύπτει πάνω από 621 εκατομμύρια συνδρομητές. Μέχρι το Φεβρουάριο του 2011, το Φόρουμ WiMAX ανέφερε ότι παρέχει κάλυψη σε πάνω από 823 εκατομμύρια ανθρώπους, και εκτιμήσεις ότι οι συνδρομητές του θα ξεπεράσουν το 1 δισεκατομμύριο μέχρι το τέλος του έτους.

Η Νότια Κορέα ξεκίνησε ένα δίκτυο WiMAX στο 2ο τρίμηνο του 2006. Μέχρι το τέλος του 2008 υπήρχαν 350.000 συνδρομητές WiMAX σε όλη την Κορέα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, από τις αρχές του 2010 το WiMAX φαινόταν να ανέρχεται πολύ γρήγορα σε σχέση με τις άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες, αν και η πρόσβαση στη Βόρεια Αμερική καθυστέρησε.

Η YOTA, ο μεγαλύτερος φορέας εκμετάλλευσης του δικτύου WiMAX στον κόσμο ανακοίνωσε το Μάιο 2010 ότι θα πραγματοποιηθούν νέες επεκτάσεις του δικτύου LTE καθώς και, στη συνέχεια, θα γίνει η αλλαγή των υφιστάμενων δικτύων της.

Στην Ελλάδα λειτουργούν πιλοτικά ακόμα δίκτυα WiMAX όπως αυτό του ΟΤΕ στο Άγιο Όρος, στην Ανατολική Αττική (Μεσογεία), της Ιπποκρατείου Πολιτείας και του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών.

Κατά τα τέλη του Αυγούστου του 2008 ολοκληρώθηκε η εγκατάσταση του πιλοτικού δικτύου WiMAX του ΟΤΕ στο Άγιον Όρος. Το πιλοτικό αυτό δίκτυο παρέχει υπηρεσίες ευρυζωνικότητας και IP τηλεφωνίας (VoIP). Η επίτευξη παροχής των υπηρεσιών αυτών πραγματοποιήθηκε σε μία περιοχή εξαιρετικά δυσπρόσιτη, με περιορισμένες υποδομές σε οδικά δίκτυα, μέσα μεταφοράς και μέσα επικοινωνιών, καθώς και με απουσία εγκατεστημένου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Συνολικά, εγκαταστάθηκαν 6 σταθμοί βάσης με την εμβέλεια του δικτύου να φτάνει τα 50χλμ, καλύπτοντας την πλειοψηφία των Μονών και Σκητών του Αγίου Όρους, σε σχεδόν όλη την έκταση της Χερσονήσου. Το δίκτυο WiMAX που έχει υλοποιηθεί έχει τη δυνατότητα μετάδοσης έως και 60 Mbps (αμφίδρομα). Οι σταθμοί βάσης WiMAX του ΟΤΕ εκπέμπουν στην φασματική ζώνη των 3,5 GHz που έχει απονεμηθεί στον ΟΤΕ από την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων.

Στην αρχική φάση λειτουργίας, που βρίσκεται σε εξέλιξη, έχουν ήδη συνδεθεί οι πρώτοι χρήστες τόσο στο Άγιον Όρος όσο και στη Νήσο Αμμουλιανή και την περιοχή της Ιερισσού με ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση. Επίσης, χρήστες στις Καρυές απολαμβάνουν υπηρεσιών ADSL μέσω του διασυνδεδεμένου στο WiMAX ειδικού εξοπλισμού (DSLAM). Μεταξύ των χρηστών των υπηρεσιών του δικτύου συγκαταλέγονται 6 μεγάλες Μονές, η Αθωνιάδα Σχολή, καθώς και η Ιερά Επιστοασία της Αθωνικής Πολιτείας.

Τα μέχρι στιγμής συμπεράσματα από τη λειτουργία του δικτύου WiMAX στο Άγιον Όρος είναι ενθαρρυντικά αφού το σύστημα έχει λειτουργήσει απρόσκοπτα ακόμα και σε εξαιρετικά δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

Παράλληλα με το δίκτυο WiMAX στο Άγιον Όρος, ο ΟΤΕ έχει εγκαταστήσει και αξιολογεί δύο ακόμη πιλοτικά συστήματα WiMAX, στην Ανατολική Αττική και την Ιπποκράτειο Πολιτεία, προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα ευρυζωνικής πρόσβασης σε περιοχές που είτε δεν υπάρχει πρόσβαση με δίκτυο χαλκού είτε η πρόσβαση με το χάλκινο δίκτυο έχει μεγάλο μήκος και δεν επιτρέπει την παροχή ικανοποιητικών ταχυτήτων.

Με τις εγκατεστημένες υποδομές, κάτοικοι στις περιοχές των Μεσογείων, της Ιπποκρατείου Πολιτείας και του Λεκανοπεδίου αποκτούν πιλοτικά τη δυνατότητα ευρυζωνικού Internet και IP τηλεφωνίας, χρησιμοποιώντας modem και τις τηλεφωνικές συσκευές που ήδη διαθέτουν. Οι σταθμοί βάσης, τους οποίους κατασκεύασε η канаδική Redline Communications, εκπέμπουν στη ζώνη των 3,5 GHz και μπορούν να επιτύχουν ταχύτητες μετάδοσης έως και 18 Mbps αμφίδρομα ανά sector 7 MHz, ενσωματώνοντας ψηφιακή κρυπτογράφηση για λόγους ασφάλειας. Πρόσβαση στα δίκτυα έχουν προς το παρόν μόνο

οι κάτοικοι που είχαν δηλώσει συμμετοχή στο πιλοτικό πρόγραμμα της εταιρείας, το οποίο δεν δέχεται πλέον νέες εγγραφές.

Ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών, αξιοποιώντας τις τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των επικοινωνιών και των ευρυζωνικών εφαρμογών, για πρώτη φορά στο διεθνή αεροδρομιακό χώρο ανέπτυξε σύνθετες υπηρεσίες με ενιαίο δίκτυο δεδομένων, φωνής και τηλεοπτικού σήματος μέσω WiMax, βελτιώνοντας έτσι τις υπηρεσίες ηλεκτρονικού περιβάλλοντος για ιδιωτική αλλά και εταιρική χρήση, αξιοποιώντας την υπερσύγχρονη κεντρική υποδομή του Αερολιμένα.

Ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών, κάτοχος άδειας πιλοτικής χρήσης WiMax από την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων για την περιοχή Σπάτα-Κορωπί, ανέπτυξε πιλοτικά WiMax εφαρμογές σε τρεις τεχνολογικές ενότητες, ανάλογα με τη χρήση τους (ιδιωτική / εταιρική χρήση / παροχή κομβικής υποδομής).[32]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΆΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Στο κεφάλαιο περιγράφονται εν συντομία ορισμένες από τις πλέον σύγχρονες τεχνολογίες ορισμένες από τις οποίες είναι ανταγωνιστικές του WiMAX ενώ άλλες μπορεί να χαρακτηριστούν ως και συμπληρωματικές [4]. Αρχικά δίνεται έμφαση σε άλλα συστήματα που βασίζονται στο OFDMA, όπως και το WiMAX, ενώ στην συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα πιο παραδοσιακά πλέον συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα. Τέλος, γίνεται σύγκριση του WiMAX με άλλα συστήματα βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων [3], [4].

4.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ OFDMA

Τα πιο γνωστά ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούν την τεχνική OFDM και κατά επέκταση την τεχνική πολλαπλή πρόσβασης OFDMA είναι το πρότυπο IEEE 802.11a, IEEE 802.11g και το IEEE 802.11n που αποτελούν εκδόσεις του WLAN ή Wi-Fi (εμπορική ονομασία), το IEEE 802.16 γνωστό και ως WMAN ή WiMax και το LTE (Long Term Evolution)

Οι λόγοι για τους οποίους προτιμάται το OFDMA έχουν αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες. Συνοπτικά είναι οι παρακάτω:

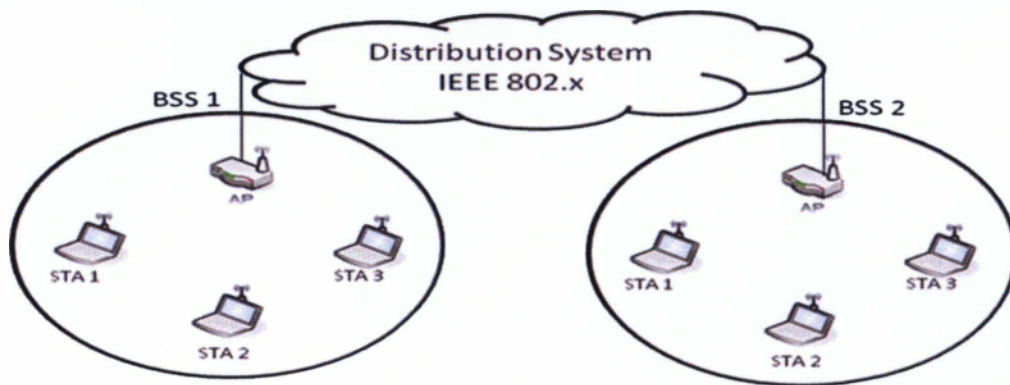
- Παρέχει καλύτερους ρυθμούς δεδομένων στους χρήστες.
- Έχουμε εξοικονόμηση του φάσματος σε σχέση με τις τεχνικές μονής φέρουσας.
- Αντιμετωπίζει πάρα πολύ καλά το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης.
- Θεωρείται δυναμική τεχνική γιατί επιλέγει τον βέλτιστο τρόπο για την αξιοποίηση των ασύρματων πόρων μέσω της ανάδρασης που παίρνει από το ραδιοπεριβάλλον.

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα συστήματα WLAN και LTE.

4.1.1. WLAN (IEEE 802.11)

Το πρότυπο IEEE 802.11 γνωστό και ως ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) είναι βασισμένο στην αρχιτεκτονική του κυψελωτού δικτύου, όπου το δίκτυο υποδιαιρείται σε κυψέλες (cells) τα οποία ονομάζονται BSS (Basic Set Service) [9]. Σε κάθε κυψέλη υπάρχει ένας κεντρικός σταθμός βάσης που είναι γνωστός και ως Σημείο Πρόσβασης (Access Point –AP). Ένα BSS περιέχει τυπικά έναν ή περισσότερα ασύρματα τερματικά που ονομάζονται

Σταθμοί (Station-STA) και ανάλογα με τις δυνατότητες του AP κάθε κυψέλης μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες όπως να επιτρέπουν επικοινωνία τοπικά μεταξύ των χρηστών είτε μεταξύ χρηστών διαφορετικών κυψελών και εάν είναι δυνατό την πρόσβαση τους στο Διαδίκτυο. Οι ασύρματοι σταθμοί, που μπορεί να είναι σταθεροί ή κινητοί και ο κεντρικός σταθμός βάσης επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο ασύρματου MAC IEEE 802.11. Πολλαπλά APs μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους (για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας ένα ενσύρματο Ethernet ή ένα άλλο ασύρματο κανάλι) για να δημιουργήσουν ένα σύστημα κατανομής (Distribution System - DS).



Εικόνα 5: Δομή ασύρματου δικτύου WLAN

Αν και τα δομικά στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ίδια για όλα τα πρότυπα στις οικογένειες του IEEE 802.11 υπάρχουν διαφορές στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο φυσικό επίπεδο και στη μάντα συχνότητων που χρησιμοποιείται. Αρχικά τα πρότυπα του IEEE 802.11 χρησιμοποιούσαν τεχνικές όπως:

- Η μέθοδος ευθείας ακολουθίας (Direct Sequence Spread Spectrum-DSSS) χρησιμοποιεί την 2.4 GHz μάντα συχνότητων και χρησιμοποιεί μια ψευδοτυχαία ακολουθία ευρείας ζώνης που πολυπλέκεται με την ακολουθία στενής ζώνης που κάθε φορά πάει να μεταδοθεί προκειμένου έτσι να απλωθεί το σήμα σε όλο το εύρος. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπονται επιθέσεις παρεμβολών (jamming) και παραβίασης, περιορίζει τις παρεμβολές από άλλα σήματα στενής ζώνης και μειώνει την πιθανότητα για λάθη μετάδοσης.
- Η μέθοδος μεταπήδησης συχνότητας (Frequency Hopping Spread Spectrum- FHSS) χρησιμοποιεί και αυτή την 2.4 GHz μάντα συχνότητων. Και αυτή η μέθοδος προσπαθεί να απλώσει το σήμα προς μετάδοση πάλι σε όλο το φάσμα, ο τρόπος με τον οποίο προσπαθεί να το κάνει είναι με το μεταβαίνει από συχνότητα σε

συχνότητα σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο ψευδοτυχαίο σχήμα και ο χρόνος παραμονής σε αυτήν την συχνότητα είναι για μισό δευτερόλεπτο. Έτσι πάλι έχουμε αποτροπή ωτακουστικών επιθέσεων άλλα και την δυνατότητα κάθε φορά που παρατηρούνται παρεμβολές σε αυτή την συχνότητα να μεταβαίνουμε σε άλλη.

Επειδή το WLAN χρησιμοποιεί μπάντες συχνοτήτων Industrial Scientific and Medical (ISM) που δεν απαιτούν αδειοδότηση έχει ως αποτέλεσμα να προκαλούνται παρεμβολές από άλλα ασύρματα δίκτυα. Αν και οι παραπάνω τεχνικές αντιμετωπίζουν τις παρεμβολές αυτές δεν παρέχουν μεγάλους ρυθμούς δεδομένων με μέγιστο ρυθμό δεδομένων για κάθε μέθοδο να είναι τα 2 Mbps. Όμως με την γρήγορη εξέλιξη της ασύρματης τεχνολογίας, την μείωση του κόστους του ασύρματου εξοπλισμού και τη ζήτηση για παροχή νέων ασύρματων υπηρεσιών έγινε γνωστή η απαίτηση για παροχή μεγαλύτερων ρυθμών δεδομένων. Η λύση σε αυτό ήταν η υιοθέτηση νέων τεχνικών όπως (HR/DSSS) που χρησιμοποιήθηκε από το πρότυπο IEEE 802.11b, η τεχνική OFDM που χρησιμοποιήθηκε από το πρότυπο IEEE 802.11a και το πρότυπο IEEE 802.11g. Το πρότυπο 802.11a χρησιμοποιεί την τεχνική πολυπλεξίας COFDM όπου (C-Coded) αναφέρεται στους κώδικες ελέγχου λαθών. Η λειτουργία του οποίου καθορίζεται στη ζώνη U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) στα 5 GHz. Για αυτόν τον λόγο εμφανίζει σαφώς λιγότερες παρεμβολές από τη ζώνη ISM και από άλλες ασύρματες συσκευές (κινητά, Bluetooth) καθώς και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, που το μέγιστο όριο είναι το 54 Mbps.

Η επίτευξη του μέγιστου ορίου μετάδοσης επιτυγχάνεται μόνο όταν τα λάθη μετάδοσης δεν είναι πολλά, στην αντίθετη περίπτωση ο ρυθμός πέφτει στον επόμενο δυνατό ρυθμό μέχρις ότου υπάρξουν οι κατάλληλες συνθήκες για παραμονή σε αυτό τον ρυθμό μετάδοσης. Το πρότυπο 802.11g είναι ένας συνδυασμός των προτύπων IEEE 802.11a και του IEEE 802.11b, το οποίο προσπαθεί να επεκτείνει τους ρυθμούς δεδομένων του προτύπου 802.11b χρησιμοποιώντας την τεχνική OFDM στην μπάντα των 2.4 GHz, έτσι επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης της τάξης των 54 Mbps, διατηρώντας παράλληλα τη συμβατότητα με το διαδεδομένο πρότυπο IEEE 802.11b.

Για να μπορέσει να εφαρμοστεί η τεχνική OFDM στο φυσικό στρώμα έγιναν κάποιες αλλαγές στα δύο επίπεδα από τα οποία αποτελείται το πρωτόκολλο, το υψηλότερο υπο-επίπεδο που αποτελείται από την συνάρτηση PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) και από το χαμηλότερο υπο-επίπεδο που είναι η συνάρτηση PMD (Physical Medium Dependent) ενώ το επίπεδο MAC παρέμεινε το ίδιο. Αυτές είναι οι εξής:

- Μια συνάρτηση η οποία υιοθετεί τις δυνατότητες του PMD συστήματος στην υπηρεσία του φυσικού επιπέδου. Αυτή η συνάρτηση υποστηρίζεται από την PLCP η οποία ορίζει μια μέθοδο για την δημιουργία των πλαισίων από την υπηρεσία του υποεπιπέδου μονάδων δεδομένων που είναι ταιριαστό για αποστολή και λήψη δεδομένων και πληροφορίες διαχείρισης.
- Ένα PMD σύστημα όπου η συνάρτηση ορίζει τα χαρακτηριστικά και τις μεθόδους μετάδοσης και λήψης μέσω του ασύρματου μέσου ανάμεσα σε δύο η περισσότερους σταθμούς.

Το πρότυπο IEEE 802.11n χρησιμοποιεί και αυτό την τεχνική OFDM αλλά προκειμένου να επιτύχει μεγάλη χωρητικότητα του συστήματος οπότε και μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων χρησιμοποιεί τεχνικές όπως MIMO και συνάθροιση πλαισίων (Frame Aggregation). Στην τεχνική MIMO έχουμε πολλαπλές κεραιές τόσο στον αποστολέα όσο και στον δέκτη, οι οποίες στέλνουν ή λαμβάνουν ταυτόχρονα το ίδιο σύμβολο. Έτσι στο χρόνο έχουμε την παράλληλη μετάδοση του ίδιου συμβόλου αυξάνοντας την χωρητικότητα του συστήματος. Η ιδέα της τεχνικής MIMO είναι ίδια με της τεχνικής OFDM όπου βασίζονται στον διαχωρισμό μεταξύ τους ότι για κάποιο χρονικό διάστημα όλες οι κεραιές δεν μπορούν να είναι σε εξασθένιση.

4.1.2. LTE – LONG TERM EVOLUTION

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το πρότυπο Long Term Evolution στις 3GPP ή αλλιώς E-UTRAN (Evolved – UTRAN).[33] Το εξελιγμένο δίκτυο UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network) θα μπορεί να παρέχει πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων χρησιμοποιώντας πιο μεγάλα εύρη ζώνης και πιο εξελιγμένη εμπειρία χρήστη. Φυσικά αυτό το νέο δίκτυο θα υλοποιηθεί πάνω στα ήδη υπάρχοντα 3G δίκτυα ενώ παράλληλα θα πρέπει να ακολουθήσει την πορεία των προηγούμενων 3G δικτύων τόσο για την κινητικότητα των χρηστών όσο και για την υψηλή απόδοση φάσματος. Συνεπώς το νέο δίκτυο δεν θα αντικαταστήσει τα ήδη υπάρχοντα αλλά θα χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με τα υπόλοιπα δίκτυα 3G προσφέροντας νέες υπηρεσίες αλλά και καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας.

Από μεριάς πρόσβασης στο μέσο:

- Βελτιώνει την απόδοση του φάσματος, το throughput του χρήστη και την καθυστέρηση

- Απλοποιεί την δομή του δικτύου πρόσβασης
- Υποστηρίζει υπηρεσίες βασισμένες σε IP (packet switch services)

Από μεριάς δικτύου:

- Επιφέρει βελτιώσεις στο throughput, χωρητικότητα και καθυστέρηση,
- Απλοποιεί την δομή του δικτύου κορμού
- Βελτιστοποιεί τις υπηρεσίες και την κίνησης IP
- Υποστηρίζει τεχνολογίες πρόσβασης που δεν ανήκουν στην οικογένεια της 3GPP

Το 2005 επιλέχθηκε για το LTE η τεχνική που θα χρησιμοποιούνταν για ραδιοεπαφή του συστήματος οι οποίες ήταν η OFDM(A) για την κάτω ζώνη και η τεχνική μονής φέρουσας SC-FDMA για την πάνω ζώνη. Επιπλέον ορίστηκαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά για το φυσικό στρώμα [34] , [35]:

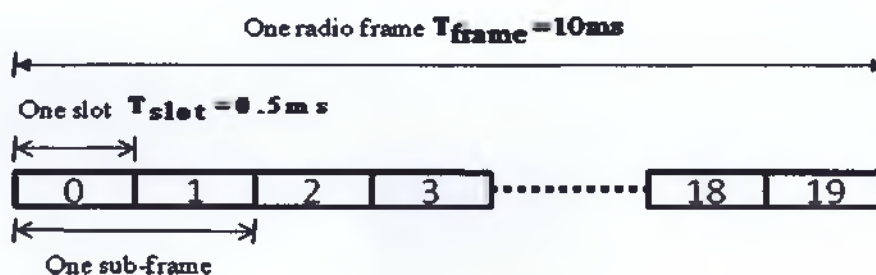
- Χρησιμοποιούνται οι εξής διαμορφώσεις: QPSK, 16QAM και η 64QAM, και για τη πάνω και κάτω ζώνη
- Χρησιμοποιούνται MIMO συστήματα τόσο για την μεριά του χρήστη όσο και από την μεριά του σταθμού βάσης, με δυνατότητα ως τέσσερις κεραιές για την μεριά των κινητών χρηστών και τέσσερις από την μεριά του σταθμού βάσης.
- Υποστήριξη στιγμιαίων υψηλών ρυθμών και για την κάτω και για την άνω ζώνη τα οποία θα πρέπει να κλιμακώνονται ανάλογα με τα διαφορετικά μεγέθη του κατανεμημένου φάσματος
- Υποστήριξη τεχνικών πρόσβασης στο μέσο διάδοσης με FDD και TDD και για τις δύο ζώνες
- Υποστήριξη διαφορετικών φασμάτων και επαναχρησιμοποίηση κωδικών καναλιών

Στην παρακάτω εικόνα αναφέρονται ορισμένα από τα χαρακτηριστικά που έχουν οριστεί για την διεπαφή του δικτύου LTE.

	Downlink	Uplink
Duplex	TDD,FDD	TDD,FDD
Multiplexing	OFDMA	SC-FDMA
Modulation	QPSK,16QAM,64QAM	QPSK,16QAM,64QAM
Peak Rate	100 Mbps	20 Mbps
Spectrum	1.25 MHz,2.5 MHz,5 MHz,10 MHz,15 MHz,20 MHz .	
Mobility	Optimal performance for 0-15 km/h, moderate performance for 50-120 km/h and operational performance for 120-350 km/h	
MIMO	Up to 4x4	

Εικόνα 6: Χαρακτηριστικά διαύλου δικτύου LTE [34] , [35]

Η δομή του πλαισίου του LTE συστήματος αποτελείται από ένα πλαίσιο μακρής διάρκειας μεγέθους 10 ms, το οποίο περιλαμβάνει 20 στιγμές (slots) διάρκειας 0.5 ms το οποίο φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7: Δομή πλαισίου LTE

Το σήμα προς μετάδοση για κάθε χρονική σχισμή κατεβάσματος καθορίζεται από ένα ζευγάρι στοιχείων (k,l) όπου το k δείχνει την περιοχή των συχνοτήτων και το l την περιοχή του χρόνου σε ένα πίνακα πόρων από sub-carriers και σύμβολα. Ο αριθμός των sub-carriers εξαρτάται από το εύρος ζώνης της κυψέλης και ο αριθμός των συμβόλων εξαρτάται από το μέγεθος του κυκλικού προθέματος που έχει χρησιμοποιηθεί για την χρονική σχισμή και έχουν οριστεί στην τιμή 7 ή 6.

Στον παρακάτω πίνακα κάνουμε μια συγκεντρωτική παρουσίαση των παραμέτρων που μπορεί να πάρει η διεπαφή του E-UTRAN για διαφορετικά εύρη ζώνης μετάδοσης και διαφορετικά μεγέθη κυκλικών προθεμάτων ενώ διατηρούμε το ίδιο μέγεθος για την συχνότητα διαχωρισμού των sub-carriers.

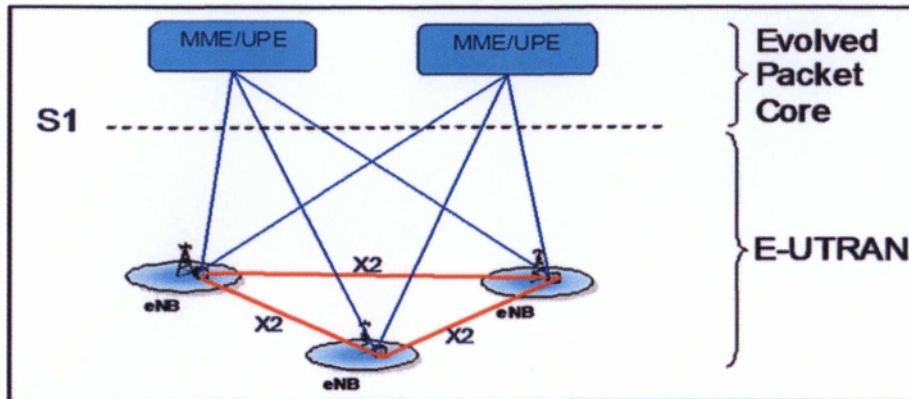
Transmission BW		1.25 MHz	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
One slot duration		0.5 ms					
Sub-carrier spacing		15 kHz					
FFT size		128	256	512	1024	1536	2048
Number of occupied sub-carriers		72	150	300	600	900	1200
Number of OFDM symbols per slot (normal / extended CP)		7/6					
CP length (μs/sample)	normal	$(4.69/9) \times 6, (5.21/10) \times 1$	$(4.69/18) \times 6, (5.21/20) \times 1$	$(4.69/36) \times 6, (5.21/40) \times 1$	$(4.69/72) \times 6, (5.21/80) \times 1$	$(4.69/108) \times 6, (5.21/120) \times 1$	$(4.69/144) \times 6, (5.21/160) \times 1$
	extended	16.67/32	16.67/64	16.67/128	16.67/256	16.67/384	16.67/512

Εικόνα 8: Παράμετροι OFDM συστήματος στο E-UTRAN [34] , [35]

Όπως βλέπουμε καθώς αυξάνουμε το φάσμα που χρησιμοποιούμε στο σύστημα αυξάνεται και το μέγεθος του FFT όμως ο αριθμός των sub-carriers που τελικά χρησιμοποιούνται είναι αρκετά μικρότερος, πιο συγκεκριμένα για το φάσμα των 5 MHz το οποίο αποτελείται από 512 sub-carriers μόνο οι 300 ασχολούνται με μετάδοση δεδομένων τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται για απόσταση ασφαλείας σε γειτονικές μπάντες. Επίσης παρατηρούμε ότι ο αριθμός των συμβόλων που στέλνονται ανά χρονική σχισμή για κυκλικό προθέμα με κανονικό μήκος είναι 7 και με διάρκεια προθέματος της μορφής $(4.69/\text{εξαρτάται από το φάσμα που λειτουργούμε})$ για τα πρώτα έξι σύμβολα και $(5.21/\text{xxx})$ για το τελευταίο σύμβολο ενώ στο μεγαλύτερο μέγεθος προθέματος έχουμε διάρκεια στις μορφές $16.67/\text{xxx}$. Οι μεγαλύτερες τιμές κυκλικού προθέματος χρησιμοποιούνται σε συστήματα που παρουσιάζουν μεγάλες καθυστερήσεις. Επίσης ξέρουμε ότι η τεχνική OFDM παρέχει αρκετές τεχνικές για κατανομή φάσματος στα τμήματα του δικτύου σε μια ή περισσότερες κυψέλες και διαχείριση πόρων μέσω αλγορίθμων όπως DSA (Dynamic Subcarrier Assignment), APA (Adaptive Power Allocation) και AM (Adaptive Modulation) στο εσωτερικό των κυψελών παρέχοντας έτσι αρκετούς τρόπους για ένα ευέλικτο σχήμα διαχείρισης πόρων ικανό να εντοπίσει τα προβλήματα στην περιοχή εξυπηρέτησης και να παρέχει λύσεις για κατάλληλη προσαρμογή στο δίκτυο.

Οι κόμβοι που παρέχουν τις λειτουργίες για διαχείριση των πόρων είναι οι εξελιγμένοι κόμβοι eNBs οι οποίοι εκτός από την διαχείριση μέσω αλγορίθμων RRM ασχολούνται με οποιοδήποτε θέμα που έχει σχέση με το περιβάλλον διάδοσης, την διαχείριση της

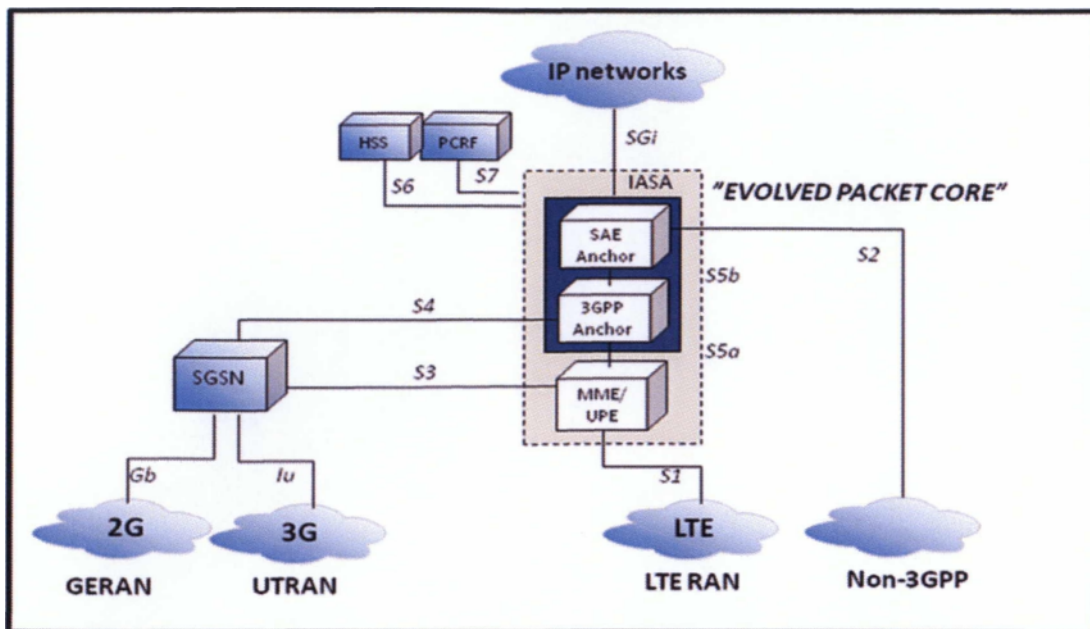
αποκεντροποιημένης κινητικότητας και άλλα οι οποίοι βρίσκονται στο δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική επιπέδου δικτύου E-UTRAN (LTE) [36]

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται απλοποιημένα η αρχιτεκτονική του δικτύου LTE, πρώτα έχουμε την δομή του δικτύου πρόσβασης που αποτελείται από τις εξελιγμένες κεραιές eNBs που συνδέονται μεταξύ τους με την διεπαφή X2 και δεύτερον το εξελιγμένο δίκτυο κορμού EPC (Evolved Packet Core) όπου κάθε κεραιά eNBs συνδέεται μέσω της διεπαφής S1 στο δίκτυο κορμού στις οντότητες MME/UE (Mobility Management Entity/User Plane Entity).

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού το οποίο επιτρέπει την σύνδεση όλων των ασύρματων δικτύων τόσο αυτών που ανήκουν στην οικογένεια της 3GPP δηλαδή 2G και 3G αλλά και δίκτυα που δεν ανήκουν σε αυτή.



Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού του E-UTRAN (LTE) [21]

Η σύνδεση πραγματοποιείται μέσω του τμήματος που αναφέρεται ως IASA (Inter-Access System Anchor) όπου τα δίκτυα 2 και 3 γενιάς και το LTE συνδέονται μέσω του τμήματος 3GPP –Anchor και τα υπόλοιπα μη 3GPP δίκτυα μέσω στις SAE (System Architecture Evolution) Anchor, έτσι μέσω αυτών των οντοτήτων μπορεί το IASA να υποστηρίξει την κινητικότητα των ασύρματων δικτύων. Η οντότητα MME έχει ως λειτουργία την διαχείριση και την αποθήκευση του περιεχομένου του σχήματος έλεγχου του UE (User Entity), UE πιστοποίηση, διαχείριση κινητικότητας, δημιουργία προσωρινής id. Αντίθετα, η οντότητα UPE (User Plane Entity) ασχολείται με την δρομολόγηση και την προώθηση των πακέτων, την κρυπτογράφηση, την έναρξη αναζήτησης (paging), την αποθήκευση και την διαχείριση του περιεχομένου του UE και την υποστήριξη της κινητικότητας.

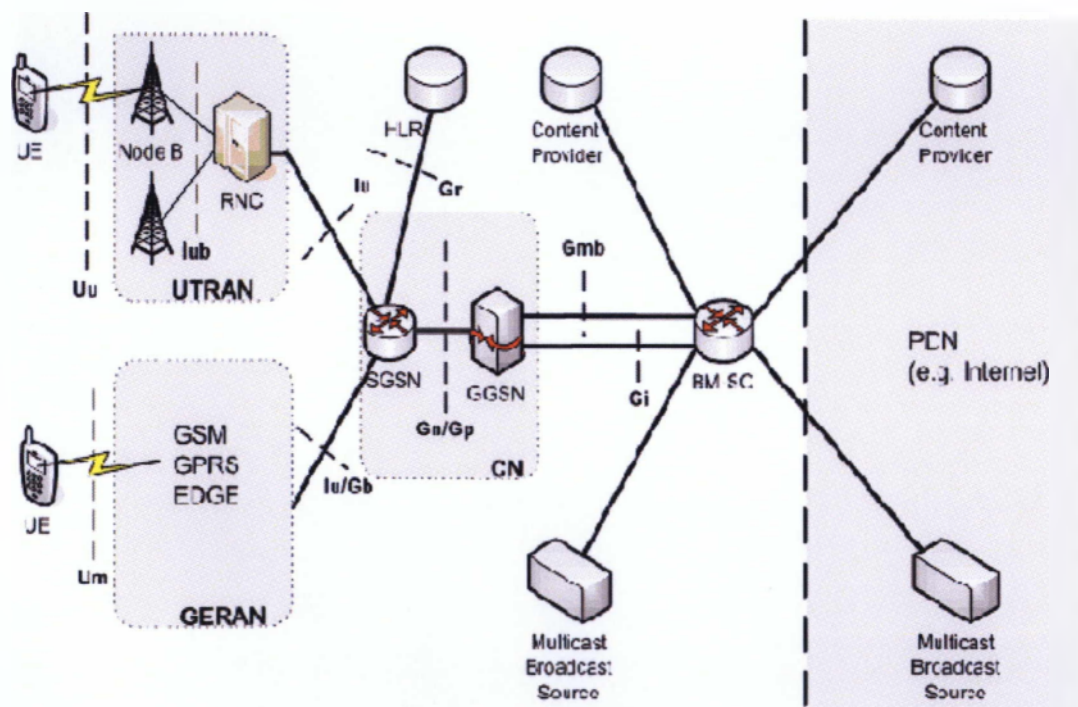
4.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ UMTS

Το “Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών” (Universal Mobile Telecommunications System - UMTS) [12] αποτελεί την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών σε σχέση με τη χωρητικότητα, την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και την ύπαρξη νέων υπηρεσιών των κινητών δικτύων δεύτερης γενιάς. Ένα δίκτυο UMTS, που ανήκει στην 3^η πλέον γενεά (3G), επιτυγχάνει αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων και ταυτόχρονη υποστήριξη δεδομένων και φωνής. 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 υποστηρίζεται ότι μπορούν να φτάσουν την τιμή των 2 Mbps.

Εκτιμάται ότι στο μέλλον θα υπάρξει περαιτέρω αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων με την ανάπτυξη του High Speed Downlink Packet Access (HSDPA), στο οποίο αναφερόμαστε στη συνέχεια. Η συγκεκριμένη τεχνολογία ουσιαστικά αποτελεί εξέλιξη του UMTS, αφού υπόσχονται ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων έως και 14,4 Mbps στο downlink και 5.8 Mbps στο uplink.

Ένα δίκτυο UMTS αποτελείται από δύο βασικές οντότητες: το δίκτυο κορμού (core network, CN) και το δίκτυο επίγειας ασύρματης πρόσβασης (UTRAN). Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση των τηλεφωνημάτων με βάση το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (Global System for Mobile Communications, GSM) καθώς και για τις συνδέσεις για μεταφορά δεδομένων με εξωτερικά δίκτυα, με βάση το πρότυπο Γενικής Υπηρεσίας Ραδιοεπικοινωνίας με Πακέτα (General Packet Radio Service -GPRS). Αντίθετα, το UTRAN είναι υπεύθυνο για οτιδήποτε σχετίζεται με το ασύρματο μέρος του δικτύου.



Εικόνα 11: Αρχιτεκτονική UMTS [7], [12]

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε πως το CN αποτελείται από δύο κόμβους υποστήριξης της υπηρεσίας GPRS τους gateway GPRS support node (GGSN) και serving GPRS support node (SGSN). Ο SGSN είναι υπεύθυνος για την εξυπηρέτηση των κινητών σταθμών (MSs) που βρίσκονται στη δικαιοδοσία του ενώ ο GGSN αποτελεί την πύλη επικοινωνίας με εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Το δίκτυο επίγειας ασύρματης πρόσβασης (UTRAN) αποτελείται από τον ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης (RNC - radio network controller) και το Node B το οποίο αποτελεί την βάση που προσφέρει κάλυψη στην αντίστοιχη κυψέλη. Το Node B (σταθμός βάσης) μετατρέπει τις ροές δεδομένων μεταξύ του εξοπλισμού των χρηστών (User Equipment - UE) και του RNC και συμμετέχει στη διαχείριση των ασυρμάτων πόρων. 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 Gi. Το RNC αποτελεί το κόμβο διασύνδεσης που σχετίζεται με τον έλεγχο του Node B. Είναι το σημείο πρόσβασης υπηρεσίας για όλες τις υπηρεσίες που παρέχει το UTRAN στο CN.

Το δίκτυο UMTS χρησιμοποιεί για τη λειτουργία του την τεχνολογία WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), η οποία επιτρέπει σε κυψέλες που ανήκουν σε ίδιους ή διαφορετικούς σταθμούς βάσης και ακόμα που ελέγχονται από διαφορετικούς RNCs, να επικαλύπτονται και να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα χωρίς να υπάρξει πρόβλημα στο δίκτυο. Την ακτίνα κάλυψης ενός Node B επηρεάζουν αρκετοί παράγοντες. Εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους, την πολεοδομία της περιοχής και την αρχιτεκτονική που ακολουθεί ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Σε μια τυπική αστική περιοχή η ακτίνα κάλυψης μπορεί να εκτείνεται στα 2.5 km ενώ σε επαρχιακές περιοχές μπορεί να φτάσει στα 30 km. Λόγω της τεχνολογίας WCDMA η ακτίνα των κυψελών δεν είναι σταθερή ούτε πολύ μεγάλη. Όσον αφορά στους ρυθμούς μετάδοσης ένα δίκτυο UMTS θεωρητικά υποστηρίζει μετάδοση δεδομένων με ρυθμούς πάνω από 1920Kbps. Ωστόσο χρήστες που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα δε μπορούν να περιμένουν ρυθμούς μετάδοσης πάνω από 384 kbit/s.

Το δίκτυο UMTS άνοιξε τον δρόμο για πολλές επαναστατικές υπηρεσίες για την εποχή που πρωτοεμφανίστηκε, καθώς έως τότε η επικοινωνία βασιζόταν στο δίκτυο GSM:

- Γρήγορη πρόσβαση στο Διαδίκτυο
- Ταχύτερη αποστολή και λήψη MMS (Multimedia Messaging Service), μηνύματα με εικόνα και ήχο.

- Downloading: Λήψη ήχων, εφαρμογών και βίντεο στο κινητό τηλέφωνο με απευθείας πλοήγηση στο Διαδίκτυο.
- Audio και video πραγματικού χρόνου (streaming).
- Συνομιλίες με εικόνα (Video-Conference): Οι υψηλές ταχύτητες του UMTS επιτρέπουν όχι μόνο τη συνομιλία με ήχο αλλά τη δυνατότητα να βλέπουμε ταυτόχρονα το συνομιλητή μας σε πραγματικό χρόνο, σε συνδυασμό με τη χρήση της ενσωματωμένης κάμερας που διαθέτουν τα κινητά τηλέφωνα τρίτης γενιάς.
- Δυνατότητα online αγορών και συναλλαγών
- Location-Based υπηρεσίες (υπηρεσίες περιεχομένου κατά τοποθεσία): Υπηρεσίες που δίνουν πληροφορίες ανάλογα με την τοποθεσία και λειτουργούν ως οδηγοί αγοράς αλλά και ως πολύτιμα βοηθήματα σε ώρα ανάγκης (π.χ. εύρεση διανυκτερευόντων φαρμακείων).

Οι υπηρεσίες δικτύου θεωρούνται υπηρεσίες από άκρο σε άκρο, δηλαδή από έναν τερματικό εξοπλισμό Terminal Equipment - TE) σε ένα άλλο TE. Μια από άκρο σε άκρο υπηρεσία μπορεί να έχει μια ορισμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) που παρέχεται για το χρήστη μιας Υπηρεσίας Δικτύου. Είναι ο χρήστης που αποφασίζει εάν είναι ικανοποιημένος με την παρεχόμενη QoS ή όχι. Για να πραγματοποιήσει ένα ορισμένο δίκτυο QoS, μια Υπηρεσία Φερόντων (Bearer Service) με σαφώς καθορισμένα χαρακτηριστικά και λειτουργία πρέπει να ρυθμιστεί από την πηγή στον προορισμό μιας υπηρεσίας. Μια Υπηρεσία Φερόντων περιλαμβάνει όλες τις πτυχές που θα επιτρέψουν την παροχή QoS. Αυτές οι πτυχές είναι μεταξύ άλλων σηματοδότηση έλεγχου, μεταφορά επιπέδου χρηστών και λειτουργική διαχείριση QoS. Στο UMTS έχουν οριστεί τέσσερις κλάσεις για QoS καθεμία με ξεχωριστές παραμέτρους κίνησης:

- Συνομιλίας (conversational class)
 - Διατηρεί τον χρόνο ανάμεσα στα πακέτα κατά τη μετάδοση
 - Σχεδίαση πάνω στην ανθρώπινη αντίληψη
 - Υπηρεσία Πραγματικού χρόνου
 - Παραδείγματα: Voice over IP, Video Conferencing, Video telephony, Video gaming
- streaming class):
 - Διατηρεί τον χρόνο ανάμεσα στα πακέτα κατά τη μετάδοση
 - Υπηρεσία Πραγματικού χρόνου

- Παραδείγματα: Video on demand, Multimedia, Webcast
- Διαδραστική (interactive class):
 - Περιορισμένος χρόνος απόκρισης
 - Διατηρεί με ακρίβεια το περιεχόμενο των πακέτων
 - Παραδείγματα: Web browsing, Database access, Network gaming
- Παρασκηνίου (background class):
 - Διατηρεί με ακρίβεια το περιεχόμενο των πακέτων
 - Παραδείγματα: Email, File transfer, SMS, Downloading

Στα κυριότερα πλεονεκτήματα του UMTS ξεχωρίζουμε τους αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων και την ταυτόχρονη υποστήριξη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων και φωνής. Μεταφέρει χαμηλού κόστους αλλά και υψηλής χωρητικότητας δεδομένα με ρυθμούς που αγγίζουν τα 2Mbps. Πολύ θετικό στοιχείο για την ανάπτυξη του δικτύου είναι και οι προσφερόμενες υπηρεσίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, βασικό πρόβλημα στο UMTS δίκτυο, όπως και σε όλα τα ασύρματα δίκτυα είναι η εμφάνιση των παρεμβολών. Όταν υπάρχουν πολλοί πομποδέκτες σε κάποια περιοχή, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους και μερικοί από αυτούς χρησιμοποιούν διαύλους της ίδιας συχνότητας, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν διαύλους με παραπλήσιες συχνότητες, έχουμε ένα επικοινωνιακό περιβάλλον, όπου ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την ποιότητα της ζεύξης είναι οι παρεμβολές. Σημαντικό πρόβλημα μπορεί να αποτελέσει η ποιότητα του ασύρματου καναλιού. Αν η ποιότητα δεν είναι η απαιτούμενη σημαντικές παράμετροι της μετάδοσης, όπως η Καθυστέρηση Πακέτου (packet delay) και η Στιγμαία Απόκλιση Καθυστέρησης Πακέτου (Jitter) επηρεάζονται κατά διάφορους τρόπους. Τέλος, αξιοσημείωτο μειονέκτημα είναι ότι δεν υποστηρίζει φωνή σε ικανοποιητικά επίπεδα.

4.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ HSDPA

Το HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) [37] είναι πρωτόκολλο επικοινωνιών κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς και αποτελεί μετεξέλιξη του UMTS (3.5G). Είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που παρέχει πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες για την αποδοτική μετάδοση δεδομένων. Η τεχνολογία αυτή υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και υψηλή ποιότητα υπηρεσίας. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία WCDMA και παρέχει στα δίκτυα τα οποία βασίζονται στο UMTS εκτός από υψηλότερες ταχύτητες στη μεταφορά δεδομένων και μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Οι τρέχουσες επεκτάσεις HSDPA υποστηρίζουν ταχύτητες downlink συνδέσεων 1.8, 3.6, 7.2 και 14.4 Mbit/s και όσον αφορά στη χωρητικότητα παρέχουν 2 με 3 φορές μεγαλύτερο throughput σε σχέση με το UMTS. Ένα άλλο πλεονέκτημα τους είναι ότι επιτυγχάνουν μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης (Round Trip Time - RTT) άρα και μείωση των καθυστερήσεων. Γενικότερα το βασικό χαρακτηριστικό στο HSDPA είναι η γρήγορη προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης στις γρήγορες παραλλαγές των radio Links.

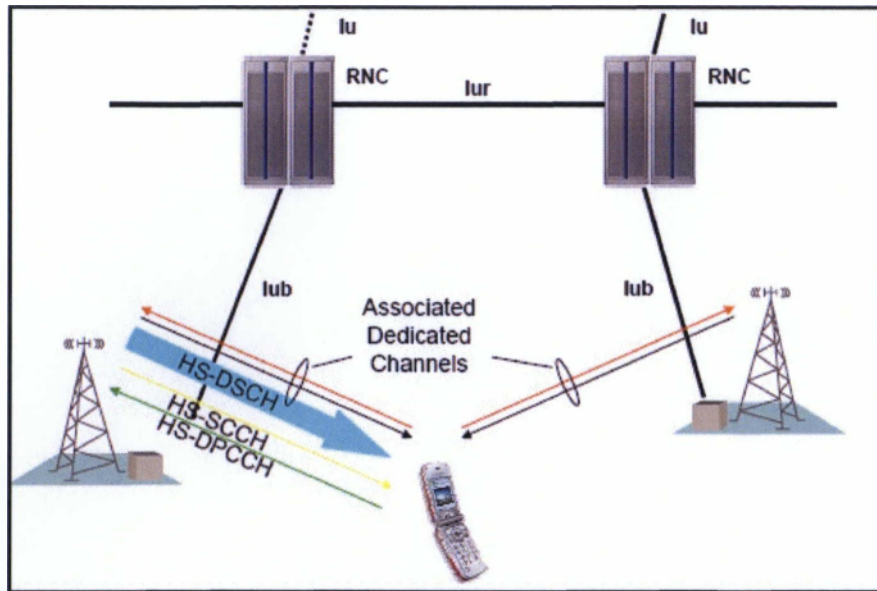
Το HSDPA όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι βασισμένο στην τεχνική WCDMA και επιτυγχάνει μεγαλύτερη χωρητικότητα και μικρές καθυστερήσεις. Προκειμένου να βελτιωθεί το data rate των downlink και να μειωθεί ακόμη περισσότερο η καθυστέρηση, το HSDPA υιοθετεί τρεις βασικές τεχνολογίες: την Adaptive Modulation and Coding (AMC), την Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) και την fast invoke.

- AMC: Σύμφωνα με την αλλαγή ποιότητας της ραδιοζεύξης, το δίκτυο μπορεί να επιλέξει τον κατάλληλο τρόπο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Το δίκτυο μπορεί επίσης να επιλέξει τον πιο κατάλληλο τρόπο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σε μια downlink σύνδεση. Κατά συνέπεια, ένας συνδρομητής είναι σε θέση να επιτύχει βέλτιστο throughput.
- HARQ: Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στην συνάρτηση που καθορίζει την αναμετάδοση των πακέτων και ελέγχεται από το RNC, να ανακαταναμεηθεί στον Node B και να ελέγχεται από αυτόν. Επιπλέον, μειώνονται τα επ-αναμεταδιδόμενα πακέτα καθώς γίνεται retransmit μόνο στα λανθασμένα.
- Fast Invoke: Η συνάρτηση invoke επιτρέπει στο σύστημα την αποστολή δεδομένων σε έναν συνδρομητή υπό τις καλύτερες συνθήκες.

Συνοψίζοντας, τα βασικά χαρακτηριστικά είναι:

- Μικρή τιμή του TTI (Transmission Time Interval), δηλαδή του χρόνου μετάδοσης, άρα μικρή τιμή του delay. (TTI= 2msec)
- Κοινή μετάδοση καναλιών
- Γρήγορη προσαρμογή συνδέσεων και υψηλότερη διαμόρφωση
- Μείωση αριθμού των retransmitted πακέτων.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του HSDPA.



Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική HSDPA [37]

4.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ WiMAX

Στην υπο-ενότητα αυτή επιχειρείται η σύγκριση του WiMAX τόσο με τα προαναφερθέντα συστήματα όσο και με ορισμένα παραδοσιακότερα. Ορισμένα από αυτά είναι αρκετά γνωστά λόγω της ευρείας χρήσης τους λόγω της ικανότητάς τους να καλύπτουν την πλειονότητα των αναγκών των χρηστών ενώ άλλα είναι λιγότερο γνωστά είτε λόγω της περιορισμένης εμβέλειάς τους είτε λόγω της συμπληρωματικής τους χρήσης από τους παρόχους των δικτύων ασύρματης πρόσβασης. Στον Πίνακα 3 εμφανίζονται συνοπτικά τα συγκριτικά χαρακτηριστικά του WiMAX με άλλα συστήματα [4].

4.4.1. ΡΥΘΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ένα από τα σημαντικότερα και αντικειμενικότερα κριτήρια βάσει του οποίου θα μπορούσαν να συγκριθούν οι διάφορες τεχνολογίες, είναι ο τελικός ρυθμός δεδομένων που επιτυγχάνεται για τον χρήστη. Τόσο η ταχύτητες που επιτυγχάνει το WiMAX όσο και το LTE εξαρτώνται από το εύρος ζώνης (αριθμός sub-carriers) που χρησιμοποιείται. Έτσι, αντίθετα με τα 3G συστήματα τα οποία έχουν καθορισμένο εύρος καναλιού που αποδίδεται σε κάθε χρήστη, το WiMAX έχει κλιμακωτό εύρος ζώνης από 1.25MHz έως 20MHz το οποίο διευκολύνει τόσο την υλοποίηση των συστημάτων όσο και την αποδοτική διαχείριση των καναλιών. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση καναλιού 10MHz με TDD και με 3:1

λόγο downlink-to-uplink και με 2×2 πομποδέκτες MIMO. Στην περίπτωση αυτή το WiMAX μπορεί να παρέχει έως και 46Mbps downlink ενώ στο uplink 7Mbps συνολικά.

4.4.2. ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Δεδομένου ότι το WiMAX όπως και άλλα συστήματα (πχ. LTE, UMTS) υλοποιούν κυψελωτά δίκτυα, πρέπει να μελετηθεί και η συνολική χωρητικότητα που μπορεί να παρέχει το σύστημα με δεδομένους πόρους. Η αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται από την χρήση του των διαθέσιμων πόρων και κατά πόσο αυτοί αξιοποιούνται έχουν άμεση σχέση με την χωρητικότητα. Το γεγονός ότι το WiMAX χρησιμοποιεί πολλαπλούς πομποδέκτες δίνει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι άλλων συστημάτων όπως τα 3G. Η τεχνική OFDM είναι περισσότερο «δεκτική» στην υλοποίηση MIMO συστημάτων συγκριτικά με τα συστήματα CDMA τα οποία εισάγουν επιπλέον πολυπλοκότητα για την υλοποίησή τους. Επιπλέον με την τεχνική αυτή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο διαχωρισμός των συχνοτήτων όπως και ο διαχωρισμός των χρηστών μεταξύ τους είναι ευκολότερος με αποτέλεσμα να αξιοποιείται περισσότερο το διαθέσιμο εύρος ζώνης και κατ' επέκταση να βελτιώνεται η συνολική χωρητικότητα.

4.4.3. ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟΤΗΤΑ ΖΕΥΞΕΩΝ

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η υποστήριξη συστημάτων επικοινωνιών τα οποία παραδοσιακά παρείχαν σταθερή πρόσβαση. Το γεγονός ότι το WiMAX λόγω του OFDMA μπορεί να διαρθρώσει δυναμικά την ζεύξη ανόδου και καθόδου και να παρέχει συμμετρικότητα στις ζεύξεις του, μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες σταθερής υποδομής καθώς και να εξυπηρετήσει κίνηση δικτύου κορμού.

4.4.4. ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ IP

Η σχεδίαση του WiMAX (βλ. Κεφάλαιο 2) έγινε εξ' αρχής με σκοπό να υποστηρίξει πληθώρα υπηρεσιών (video, voice, multimedia, etc.), πρωτοκόλλων, κίνηση CBR και VBR, best-effort κλπ. Πολλά από τα προαναφερθέντα συστήματα είναι επίσης σε θέση να καλύψουν τις ανάγκες αυτές διασφαλίζοντας την παροχή υπηρεσιών σε διάφορα επίπεδα παροχής υπηρεσιών. Ωστόσο, με το WiMAX η πολυπλοκότητα για την υποστήριξη των παραπάνω χαρακτηριστικών είναι σαφώς μικρότερη με αποτέλεσμα και το αντίστοιχο κόστος για τον πάροχο να είναι χαμηλό καθώς τα συστήματα 3G έχουν διαφορετική αρχιτεκτονική

υποδομή ανάλογα με τον τύπο των υπηρεσιών (voice, data). Επιπλέον, στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα και οι απαραίτητες διεπαφές για την λήψη περιεχομένου (πολυμεσικού ή μη) από τρίτες οντότητες (3rd party entities) κάνοντας έτσι ακόμα ευκολότερη την υλοποίηση IP υπηρεσιών, κάτι το οποίο θα πρέπει σε περιπτώσεις άλλων δικτύων να γίνει περαιτέρω υλοποίηση προσαρμοσμένη στην εκάστοτε περίπτωση ελπίζοντας ότι η συγκεκριμένη υλοποίηση δεν θα επηρεάσει την απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου και δεν θα επιβαρύνει την πολυπλοκότητά του.

4.4.5. ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ένα σημαντικό ζήτημα για το οποίο ακόμα το WiMAX δεν έχει ξεκάθαρη συμπεριφορά για τον τρόπο με το οποίο το αντιμετωπίζει είναι η κινητικότητα των χρηστών, ειδικά σε υψηλά επίπεδα που αναπτύσσονται ταχύτητες ίσες με αυτές των κινούμενων αντικειμένων (αυτοκίνητα, τρέινα, κλπ.). Αντίθετα, τα συστήματα 3G, LTE και HSDPA δεν αντιμετωπίζουν ιδιαίτερα προβλήματα καθώς τα υψηλά επίπεδα κινητικότητας ήταν ένας από τους βασικότερους πυλώνες της σχεδίασής τους (3G) και παρέμεινα ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά στις μετέπειτα εξελίξεις (HSDPA και κατόπιν LTE). Στο WiMAX το οποίο σχεδιάστηκε σαν σταθερό ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυο η υποστήριξη κινητικότητας προέκυψε σαν ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό, η υλοποίηση του οποίου έπρεπε να βρει θέση εντός της υπάρχουσας σχεδίασής του.

Πίνακας 3: Σύγκριση χαρακτηριστικών WIMAX [4]

	Standard	Usage	Throughput	Range	Frequency
UWB	802.15.3a	WPAN	110–480 Mbps	Up to 30 ft	7.5 GHz
Bluetooth	802.15.1	WPAN	Up to 720 kbps	Up to 30 ft	2.4 GHz
Wi-Fi	802.11a	WLAN	Up to 54 Mbps	Up to 300 ft	5 GHz
Wi-Fi	802.11b	WLAN	Up to 11 Mbps	Up to 300 ft	2.4 GHz
Wi-Fi	802.11g	WLAN	Up to 54 Mbps	Up to 300 ft	2.4 GHz
WIMAX	802.16d	WMAN Fixed	Up to 75 Mbps (20 MHz BW)	Typical 4–6 miles	<11 GHz
WIMAX	802.16e	WMAN Mobile	Up to 30 Mbps (10 MHz BW)	Typical 1–3 miles	2.6 GHz
EDGE	2.5G	WWAN	Up to 384 kbps	Typical 1–5 miles	1900 MHz
CDMA2000 /1xEVDO	3G	WWAN	Up to 2.4 Mbps (typical 300–600 kbps)	Typical 1–5 miles	400, 800, 900, 1700, 1800, 1900, 2100 MHz
WCDMA /UMTS	3G	WWAN	Up to 2 Mbps (Up to 10 Mbps with HSDPA Technology)	Typical 1–5 miles	1800, 1900, 2100 MHz

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας καθώς και άξονες μελλοντικής έρευνας τόσο βάσει της βιβλιογραφίας όσο και των ραγδαίων εξελίξεων στον τομέα των τηλεπικοινωνιών.

5.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικότερα στοιχεία του WiMAX που περιγράφηκαν αναλυτικά είναι ο τρόπος λειτουργίας του και η παρουσίασή του σαν ενιαίο σύστημα ασύρματου ευρυζωνικού δικτύου το οποίο υποστηρίζει υπηρεσίες σταθερής υποδομής και συνεχώς επεκτείνεται. Η αρχιτεκτονική του είναι το βασικό στοιχείο μελέτης τόσο ως προς την τελική του μορφή αλλά και ως προς την ικανοποίηση των σχεδιαστικών του στόχων. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν διάφορα άλλα συστήματα επικοινωνιών ευρυζωνικά και μη. Τα συστήματα αυτά αναφέρονται συχνά στην διεθνή βιβλιογραφία και ήδη αποτελούν συστήματα σε λειτουργία κάποια από τα οποία θα αντικατασταθούν μελλοντικά από το WiMAX και με άλλα θα λειτουργήσει συνεργατικά.

Το WiMAX βασίζεται σε ένα αρκετά ευέλικτο και αξιόπιστη ασύρματη διεπαφή η οποία σχεδιάστηκε από το IEEE και την ομάδα 802.16. Το φυσικό του επίπεδο βασίζεται στην τεχνική OFDM η οποία αντιμετωπίζει ένα μεγάλο σύνολο προβλημάτων φυσικού επιπέδου (πχ. multipath) και μπορεί να υλοποιήσει τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων και δυναμικού τρόπου λειτουργίας. Επιπλέον, μέσω των τεχνικών δυναμικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και διαχωρισμού συχνοτήτων μπορεί να βελτιώσει τόσο την αποδοτικότητά του όσο και την χωρητικότητά του εξυπηρετώντας είτε μεγαλύτερο σύνολο χρηστών είτε καλύτερο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας. Στον στόχο αυτό συνεισφέρει και η δυνατότητα υλοποιήσεων μέσω MIMO συστημάτων τα οποία μέσω κατάλληλης επεξεργασίας του λαμβανόμενου σήματος αντιμετωπίζουν προβλήματα του φυσικού επιπέδου. Το επίπεδο MAC μπορεί να φιλοξενήσει μια ποικιλία τύπων κίνησης, συμπεριλαμβανομένων της φωνής, του βίντεο και των πολυμέσων, και να παρέχει υψηλό επίπεδο υπηρεσίας. Η ασφάλεια του WiMAX εξασφαλίζεται με εξελεγμένους αλγόριθμους κρυπτογράφησης καθώς και με διαδικασίες αμοιβαίας επαλήθευσης ταυτότητας του χρήστη, συσκευής αλλά και δικτύου. Επίσης, η υλοποίηση λειτουργιών υποστήριξης κινητικότητας

πραγματοποιείται με καλά καθορισμένες διαδικασίες μεταπομπής καθώς και με χαμηλά ποσοστά κατανάλωσης ισχύος για τις φορητές συσκευές. Η αρχιτεκτονική του υποστηρίζει πληθώρα πρωτοκόλλων, δεδομένου όπως προαναφέρθηκε ότι σχεδιάστηκε σαν σταθερή ασύρματη υποδομή, όπως είναι το IP και επιτρέπει την αξιοποίηση όλων των οφελών του που επηρεάζουν το επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών, ασφάλεια αλλά και κινητικότητα χρηστών.

Η αρχιτεκτονική του WiMAX παρέχει επίσης ένα σύνολο χαρακτηριστικών τα οποία παρέχουν ευελιξία τόσο στην υλοποίησή της όσο και στην διαλειτουργικότητά της. Όπως περιγράφηκε επίσης η αρχιτεκτονική μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλά σενάρια χρήσης καθώς και υλοποιεί διαδικασίες AAA τόσο σε τοπικό επίπεδο όσο και ανάμεσα σε διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης ή παρόχους υπηρεσιών. Όπως και με άλλα συστήματα επικοινωνιών το WiMAX υλοποιεί κλιμακωτά επίπεδα υπηρεσιών τόσο στην σταθερή όσο και στην κινητή έκδοση η οποία βασίζεται στο πρωτόκολλο mobile IP και μπορεί να υλοποιηθεί χωρίς την χρήση του mobile IP client. Η διαχείριση των πόρων του δικτύου πραγματοποιείται μέσω καλά καθορισμένων διαδικασιών που περιλαμβάνουν τις οντότητες RRA και RRC. Τέλος, συγκριτικά με άλλα δίκτυα παρατηρείται πως το WiMAX αποτελεί ένα ενδιάμεσο επίπεδο ανάμεσα στα συστήματα WLAN και 3G ή B3G εάν ληφθούν υπόψη όλες οι βασικές παράμετροι όπως ταχύτητα πρόσβασης, εμβέλεια, επίπεδο υπηρεσιών, κινητικότητα και κόστος.

5.2. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4) συνοψίζονται ορισμένες από τις σημαντικότερες προκλήσεις γενικά για τα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα. Επιπλέον παρέχονται ορισμένες προσεγγίσεις η υλοποίηση των οποίων, τουλάχιστον από θεωρητική σκοπιά, θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των υπηρεσιών που θα πρέπει να παρέχονται από τα ευρυζωνικά δίκτυα.

Όπως προαναφέρθηκε ο πίνακας αυτός αναφέρει γενικά τις προκλήσεις και τις θεωρητικές τους λύσεις όχι για το WiMAX αλλά για οποιοδήποτε ευρυζωνικό ασύρματο δίκτυο. Ωστόσο παρατηρείται πως η θεωρητική προσέγγιση των προκλήσεων είναι εναρμονισμένη με την υλοποίηση του WiMAX και ως εκ τούτου το σύστημα θα μπορούσε να επικεντρωθεί περισσότερο στην περαιτέρω βελτίωση. Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με την πρώτη απαίτηση NLOS κάλυψη, στο Κεφάλαιο 2 έγινε συγκεκριμένη αναφορά στην τεχνική OFDM η οποία

επιτρέπει στο WiMAX να παρέχει συνδέσεις χωρίς να απαιτείται οπτική επαφή ανάμεσα σε πομπό και δέκτη δεδομένου ότι αντιμετωπίζει επαρκώς φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης καθώς και παρεμβολών εφόσον σε κάθε χρήστη ανατίθεται διαφορετικό σύνολο από ορθογώνια sub-carriers. Επιπλέον, πέρα από τον διαχωρισμό συχνοτήτων (Diversity στην στήλη Potential Solution) παρέχεται και η δυνατότητα AMC βάσει των πληροφοριών του καναλιού (sub-carrier SNR).

Πίνακας 4: Προκλήσεις και προσεγγίσεις για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα [3]

Service Requirements	Technical Challenge	Potential Solution
Non-line-of-sight coverage	Mitigation of multipath fading and interference	Diversity, channel coding, etc.
High data rate and capacity	Achieving high spectral efficiency	Cellular architecture, adaptive modulation and coding, spatial multiplexing, etc.
	Overcoming intersymbol interference	OFDM, equalization, etc.
	Interference mitigation	Adaptive antennas, sectorization, dynamic channel allocation, CDMA, etc.
Quality of service	Supporting voice, data, video, etc. on a single access network	Complex MAC layer
	Radio resource management	Efficient scheduling algorithms
	End-to-end quality of service	IP QoS: DiffServ, IntServ, MPLS, etc.
Mobility	Ability to be reached regardless of location	Roaming database, location update, paging
	Session continuity while moving from the coverage area of one base station to another	Seamless handover
	Session continuity across diverse networks	IP-based mobility: mobile IP
Portability	Reduce battery power consumption on portable subscriber terminals	Power-efficient modulation; sleep, idle modes and fast switching between modes; low-power circuit; efficient signal-processing algorithms
Security	Protect privacy and integrity of user data	Encryption
	Prevent unauthorized access to network	Authentication and access control
Low cost	Provide efficient and reliable communication using IP architecture and protocols	Adaptation of IP-based protocols for wireless; adapt layer 2 protocols for IP

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καθώς και τα πλεονεκτήματα του OFDM και WiMAX (υπο-ενότητα 4.4) είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς το πώς επιτυγχάνεται η δεύτερη

απαίτηση καθώς η αντιμετώπιση των παρεμβολών και ο δυναμικός σχεδιασμός προσδίδουν στο WiMAX την ιδιότητα της προσαρμοστικότητας στο περιβάλλον έτσι ώστε να το αντιμετωπίζει και να προσαρμόζεται κατάλληλα δυναμικά. Αντίστοιχα επηρεάζεται και το επίπεδο QoS εφόσον βελτιώνεται η ταχύτητα πρόσβασης και χωρητικότητα και επιπλέον υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω βελτίωση υλοποιώντας νέους scheduling αλγορίθμους στους BSs καθώς και προσαρμοστικές κεραιές. Παρά το γεγονός ότι το WiMAX έχει υλοποιήσει διαδικασίες για την υποστήριξη κινητικότητας (μεταπομπές, αντίστοιχες διαδικασίες AAA, κλπ.), απαιτούνται περαιτέρω ενέργειες προκειμένου να επιτευχθεί αντίστοιχο επίπεδο κινητικότητας συγκριτικά με άλλα συστήματα (3G, LTE). Η υιοθέτηση mobile IP πρωτοκόλλου συμβάλλει προς αυτήν την κατεύθυνση ωστόσο θα πρέπει να διασφαλιστεί και το επίπεδο QoS προς τους χρήστες κατά τις διαδικασίες αυτές.

Η αποδοτικότητα του φάσματος και η δυναμική προσαρμογή στο περιβάλλον (AMC) περιορίζουν άσκοπη χρήση ενέργειας από την μεριά της συσκευής του χρήστη (MS). Ωστόσο περαιτέρω βελτίωση προφανώς μπορεί να προκύψει με νέους αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος οι οποίοι θα είναι λιγότερο πολύπλοκοι και θα βασίζονται ενδεχομένως σε σχηματισμούς MIMO συστημάτων.

Ως προς την ασφάλεια, παρά το γεγονός ότι λαμβάνονται σημαντικά μέτρα ασφαλείας, είναι αυτονόητο πως οι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης θα πρέπει να συνεχώς να βελτιώνονται και παράλληλα να καθορίζονται επαρκώς οι αντίστοιχες διαδικασίες πιστοποίησης και ελέγχου πρόσβασης.

Τέλος, όπως περιγράφηκε και στην υπο-ενότητα 4.4., το σύστημα WiMAX είναι σε θέση να παρέχει ένα δίκτυο το οποίο περιλαμβάνει την πλειονότητα των θετικών χαρακτηριστικών άλλων δικτύων (παραδοσιακών, συμπληρωματικών ή μη), να εισάγει νέα χαρακτηριστικά που προδιαγράφουν ένα αξιόπιστο σύστημα επικοινωνιών και παράλληλα να διατηρεί το κόστος λειτουργίας του σε χαμηλά επίπεδα, λαμβάνοντας φυσικά τα οφέλη που προκύπτουν από αυτό τόσο για τους χρήστες όσο και για τους παρόχους δικτύου πρόσβασης και υπηρεσιών.

Έχοντας αντιμετωπίσει τις προαναφερθείσες προκλήσεις που ενδέχεται να προκύψουν, το σύστημα WiMax μπορεί να αναβαθμίσει το επίπεδο της επικοινωνίας μας μέσα από την εφαρμογή του στην IP τηλεφωνία (VoIP), στην βιντεοτηλεφωνία (skype, ICQ, MSN messenger κ.α.) με άμεση χρήση σε PDA, Tablets, Laptops, Netbooks κ.α. Όμως οι

διευκολύνσεις που αναμένεται να φέρει το WiMAX στον καθημερινό τρόπο ζωής δεν σταματούν εδώ. Η παρακολούθηση video on demand και online τηλεοπτικών ή ραδιοφωνικών μεταδόσεων προγραμμάτων θα επιτρέπει σε κάποιο φίλαθλο να παρακολουθεί το ματς της αγαπημένης του ομάδας εν κινήσει, μέσω Internet, στον επαγγελματία να ενημερώνεται για τις τιμές των μετοχών κατά τη διαδρομή από το σπίτι προς την εργασία του, αλλά και στον μουσικόφιλο χρήστη να γεμίζει τις ώρες ενός πολύωρου πληκτικού ταξιδιού αγοράζοντας τραγούδια mp3 και video clips από online καταστήματα. Η αποστολή ενός e-mail με μεγάλα συνημμένα αρχεία, ενώ βρίσκεστε καθ'οδόν, σήμερα είναι πρακτικά ανέφικτη, εκτός φυσικά αν χρησιμοποιήσετε το όχι και τόσο οικονομικό 3G. Το WiMAX με πολλαπλάσιες ταχύτητες θα κοστίζει σημαντικά λιγότερο. [38][38]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) Forum, available at: <http://www.wimaxforum.org/>
- [2] IEEE 802.16™: Broadband Wireless Metropolitan Area Networks (WMANs), available at: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>
- [3] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed, "Fundamentals of WiMAX - Understanding Broadband Wireless Networking", Prentice Hall, ISBN: 0-13-222552-2
- [4] Hsiao-Hwa Chen, Mohsen Guizani, "Next Generation of Wireless Systems and Networks", John Wiley & Sons, ISBN: 13 978-0-470-02434-8
- [5] Digital subscriber line (DSL), available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_subscriber_line
- [6] High Performance Metropolitan Area Networks (HiperMAN) by ETSI, available at: <http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/MAN.aspx>
- [7] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), available at: <http://www.etsi.org/>
- [8] Wi-Fi Alliance global non-profit organization, available at: <http://www.wi-fi.org/>
- [9] IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks (WLAN), The Working Group for WLAN Standards, available at: <http://www.ieee802.org/11/>
- [10] Global System for Mobile communication (GSM) by ETSI, available at: <http://www.etsi.org/WebSite/technologies/gsm.aspx>
- [11] Enhanced Data rates for Global Evolution (EDGE) by ETSI, available at: <http://www.etsi.org/WebSite/technologies/edge.aspx>
- [12] Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) by ETSI, available at: <http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/UMTS.aspx>
- [13] H.L. Vu, et al, "Performance Analysis of Best-Effort Service in Saturated IEEE 802.16 Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59, Issue 1, pp: 460-472, September 2009, DOI: 10.1109/TVT.2009.2033191
- [14] Advanced Antenna System (AAS) Techniques for WiMAX by Nokia Siemens Networks, available at: http://www.nokiasiemensnetworks.com/NR/rdonlyres/44D50AED-853A-41BF-A6FB-228AA66EC7AB/6402/Advanced_Antenna_WiMAX_071129.pdf

- [15] Advanced Antenna System (AAS) Techniques for WiMAX, available at:
<http://wimaxcommunity.ning.com/profiles/blogs/advanced-antenna-system-aas>
- [16] G.T.A. El Sanousi, "A WIMAX MIMO Network Architecture Exploiting Spatial Diversity of Multiple Antenna Sites", Second International Conference on Advances in Mesh Networks, 2009. MESH June 2009, pp: 79-84, DOI: 10.1109/MESH.2009.21
- [17] M. Tran, et al, "Mobile WiMAX MIMO performance analysis: Downlink and uplink", IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC September 2008, pp:1-5, DOI: 10.1109/PIMRC.2008.4699700
- [18] Requirements and Recommendations for WiMAX Forum Mobility Profiles, November, 2005, available at:
http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2009/08/WMF-T21-001-R010v01%20Rel%201.0%20Mobility%20Profile%20Requirements.pdf
- [19] Laurent Butti, "WiMAX: Security Analysis and Experience Return", R&D of France Telecom, Forum for Incident Response and Security Teams (FIRST), 2007, available at: <http://www.first.org/conference/2007/papers/butti-laurent-slides.pdf>
- [20] Internet Engineering Task Force (IETF), available at: <http://www.ietf.org/>
- [21] 3rd Generation Partnership Project, available at: <http://www.3gpp.org/>
- [22] 3rd Generation Partnership Project 2, available at: <http://www.3gpp2.org/>
- [23] Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP), available at:
http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_Host_Configuration_Protocol
- [24] RFC 3315: Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6) by IETF, available at: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3315.txt>
- [25] RFC 2462: IPv6 Stateless Address Autoconfiguration by IETF, available at:
<ftp://ftp.ripe.net/rfc/rfc2462.txt>
- [26] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Announcing the Advanced Encryption Standard (AES)", November 26, 2001, available at:
<http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf>
- [27] Internet Protocol Security (IPsec), available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/IPsec>
- [28] RFC 2865: Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS) by IETF, available at:
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2865.txt>

- [29] Introduction to Diameter - Get the next generation AAA protocol, by IBM, available at: <http://www.ibm.com/developerworks/library/wi-diameter/index.html>
- [30] RFC 2246: The Transport Layer Security (TLS) Protocol by IETF, available at: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2246.txt>
- [31] RFC 4017: Extensible Authentication Protocol (EAP) Method Requirements for Wireless LANs by IETF, available at: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4017.txt>
- [32] "Σε πιλοτική λειτουργία δύο δίκτυα WiMax στην Αττική." available at: <http://news.in.gr/science-technology/article/?aid=940341>
- [33] Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) by ETSI, available at: <http://www.etsi.org/WebSite/technologies/utran.aspx>
- [34] 3GPP Specification detail, Technical Specification 25.301, "*Radio interface protocol architecture*", available at: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25301.htm>
- [35] 3GPP Specification detail, Technical Specification 25.201, "*Physical layer - general description*", available at: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25201.htm>
- [36] Adrian Scrase, ETSI Vice President, "*Overview of the current status of 3GPP LTE*", Mobile World Congress, February 2008, available at: http://www.etsi.org/website/document/barcelona_2008.pdf
- [37] 3GPP Specification detail, TS 25.308, "*High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)*", available at: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25308.htm>
- [38] "Wimax information" available at: <http://www.techteam.gr/wiki/WiMAX>