



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ WiMAX & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΑ ΤΑΚΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Ι. Αρβανίτης

Γεώργιος Ε. Τσαπράνης

Επιβλέπων: Μιχαήλ Ε. Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ WiMAX & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΑ ΤΑΚΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Ι. Αρβανίτης

Γεώργιος Ε. Τσαπράνης

Επιβλέπων: Μιχαήλ Ε. Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την :

.....
Μιχαήλ Ε. Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Στασινόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ε. Συκάς
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

.....
Αθανάσιος Ι. Αρβανίτης
Γεώργιος Ε. Τσαπράνης

Διπλωματούχοι Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί και Μηχανικοί Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright ©, Αθανάσιος Αρβανίτης, 2009
Copyright © Γεώργιος Τσαπράνης, 2009
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη παρουσίαση του προτύπου IEEE 802.16 και η προσπάθεια σύνδεσης του με την εφαρμογή του σε στρατιωτικές χρήσεις.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία αναδρομή στις ασύρματες επικοινωνίες, τους νόμους της φυσικής στους οποίους βασίζονται και στην IEEE (συγκεκριμένα μια σύντομη αναδρομή στα πρωτόκολλα του Working Group 802). Τέλος, γίνεται και μια Εισαγωγή στην Ασύρματη Πρόσβαση Ευρείας Ζώνης.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία επισκόπηση στις αιτίες που οδήγησαν στην ανάπτυξη του προτύπου IEEE 802.16 και στην εξέλιξή του. Γίνεται επίσης αναφορά στο WiMAX Forum και παρουσιάζονται οι διαδικασίες πιστοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μία σύντομη παρουσίαση του προτύπου IEEE 802.11 και της τεχνολογίας WiFi ως προπομπός της τεχνολογίας WiMAX. Αναφέρονται τέλος τα τεχνικά πλεονεκτήματα του WiMAX έναντι του WiFi και οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων WiMAX και 3G.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές συστημάτων WiMAX σταθερής και κινητής πρόσβασης με βάση τα πρότυπα IEEE 802.16-2004 και 802.16e.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στην ανάλυση επίδοσης των συστημάτων mobile WiMAX.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται αναφορά στην ασφάλεια επικοινωνιών στα δίκτυα WiMAX, αναλύεται το υπόστρωμα ασφαλείας και οι μηχανισμοί πιστοποίησης και εξουσιοδότησης.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται αναφορά στα θέματα αρχιτεκτονικής των δικτύων WiMAX. Αναλύονται οι επιμέρους οντότητες που απαρτίζουν ένα δίκτυο WiMAX και τους τρόπους με τους οποίους αυτές συνδέονται έτσι ώστε το δίκτυο να είναι πλέον αποτελεσματικό και λειτουργικό με τον υπόλοιπο κορμό του διαδικτύου και να υπάρχει διαλειτουργικότητα μεταξύ των προϊόντων WiMAX .

Στο Κεφάλαιο 8 αναφέρονται πιθανές στρατιωτικές εφαρμογές του WiMAX και τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησής του σε στρατιωτικά τακτικά δίκτυα. Αναφέρονται χαρακτηριστικά ορισμένων τύπων τερματικών και δίνεται ένα παράδειγμα χρήσης για εφαρμογή που απαιτεί μεταφορά εικόνας από το πεδίο της μάχης στα κέντρα λήψης αποφάσεων.

Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, WiMAX, WiMAX Forum, WiFi, OFDM, ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα, ασύρματες πόλεις

ABSTRACT

The purpose of this diplomatic thesis is the complete presentation of the IEEE 802.16 std and the WiMAX Broadband Wireless Access technology in order to present its application in military tactical wireless communications.

In Chapter 1 we present the story of wireless communications, the physics laws in which they are based and in IEEE (mainly in Working Group 802 Protocols). Finally, there is an introduction in Broadband Wireless Access technology.

In Chapter 2 we present the reasons that led in the evolution of the IEEE 802.16 std and how it all begun and then how it was developed. There is also reference to WiMAX Forum and finally to certification processes.

In Chapter 3 follows a brief presentation of the IEEE 802.11 std, the WiFi technology as the precursor of WiMAX. We also make reference about the technical advantages of WiMAX towards WiFi and the differences between WiMAX and 3G.

In Chapter 4 we describe the technical characteristics and specifications of a fixed and Mobile WiMAX system based on the IEEE 802.16-2004 and 802.16e std.

In Chapter 5 we describe the performance for the basic minimal configuration Mobile WiMAX systems.

In Chapter 6 we present the WiMAX network security basics, we analyze MAC security sublayer, authorization and authentication mechanisms.

In Chapter 7 we present the WiMAX network architecture. We also analyse the several parts that WiMAX systems consist of and the possible ways they can be connected.

In Chapter 8 we present the military applications of WiMAX and the advantages which are made in military wireless tactical networks. We also refer some kinds and types of (THALES) terminals and finally we give an example where it is required the transmission of images and video (live) from the battle field to the Command Post.

Key Words

Wireless Broadband Networks, WiMAX, WiMAX Forum, WiFi, OFDM, Wireless MAN, Wireless cities

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	13
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1.1– Μια Εισαγωγή στις Ασύρματες Τεχνολογίες	17
1.1.1 Γενικά.....	17
1.1.2 Νόμοι - Χαρακτηριστικά Ασυρμάτων Τεχνολογιών	18
1.2 IEEE Working Group Standardization Bodies	20
1.3 Εισαγωγή στην Ασύρματη Πρόσβαση Ευρείας Ζώνης.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ IEEE 802.16	27
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
2.2 WiMAX	27
2.3 Το πρότυπο IEEE 802.16.....	28
2.3.1 IEEE 802.16-2001.....	29
2.3.2 IEEE 802.16c	29
2.3.3 IEEE 802.16a	29
2.3.4 IEEE 802.16-2004.....	29
2.3.5 IEEE 802.16e	30
2.4 WiMAX Forum.....	30
2.4.1 Στόχος του WiMAX Forum.....	30
2.4.2 WiMAX Forum Certified TM	31
2.4.2.1 Χαρακτηριστικά πιστοποίησης.....	31
2.4.2.2 Διαδικασία πιστοποίησης	32
2.4.2.3 Οφέλη πιστοποίησης.....	33
2.4.2.3.1 Πάροχοι δικτύου	34
2.4.2.3.2 Κατασκευαστές.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - WLAN 802.11x	35
3.1 Εισαγωγή	35
3.2 Πρωτόκολλα	35
3.2.1 Το αρχικό πρότυπο 802.11	35
3.2.2 Το πρότυπο 802.11b	36
3.2.3 Το πρότυπο 802.11a.....	37
3.2.4 Το πρότυπο 802.11g	38
3.2.5 Το πρότυπο 802.11n	39
3.3 Πιστοποίηση	39
3.4 Η εξέλιξη του Wi-Fi	40
3.5 Προκλήσεις.....	41
3.6 Σύγκριση WiMAX με άλλες ασύρματες τεχνολογίες.....	43
3.6.1 WiMAX και WiFi.....	43
3.6.2 WiMAX και 3G WWAN.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ WiMAX	49
4.1 Εισαγωγή	49
4.2 Γενικά χαρακτηριστικά WiMAX (802.16).....	49
4.2.1 Τοπολογία δικτύου.....	49
4.2.2 Πρωτόκολλα	50
4.2.3 Μέθοδοι διαμόρφωσης - πολυπλεξίας.....	51

4.2.4 Φάσμα - Ζώνες Συχνοτήτων.....	52
4.3 Χαρακτηριστικά WiMAX (802.16-2004)	52
4.3.1 Τοπολογία δικτύου.....	52
4.3.3 Μέθοδοι διαμόρφωσης – πολυπλεξίας	54
4.3.4 Φάσμα - Ζώνες Συχνοτήτων.....	54
4.4 Χαρακτηριστικά WiMAX φορητής πρόσβασης (802.16e)	56
4.5 Χαρακτηριστικά WiMAX πολλαπλών αναμεταδοτών (802.16j).....	58
4.6 Το φυσικό επίπεδο του WiMAX	59
4.6.1 Χαρακτηριστικά του WirelessMAN-SC PHY (10-66 GHz).....	59
4.6.1.1 Πλαισιοποίηση (framing).....	60
4.6.1.2 Μέθοδοι αμφιδρόμησης duplexing.....	60
4.6.1.2.1 Λειτουργία FDD	60
4.6.1.2.2 Λειτουργία TDD	61
4.6.1.3 TTG (Transmit Transition Gap).....	61
4.6.1.4 PHY κάτω ζεύξης (downlink).....	62
4.6.1.5 PHY άνω ζεύξης (uplink)	63
4.6.1.6 Ρυθμοί συμβόλων και εύρη ζώνης καναλιών	64
4.6.1.7 Υποσύστημα Ελέγχου.....	64
4.6.1.7.1 Τεχνική Συγχρονισμού.....	64
4.6.1.7.2 Έλεγχος Συχνοτήτων (Frequency Control).....	64
4.6.1.7.3 Έλεγχος ισχύος (Power Control)	65
4.6.1.8 Χαρακτηριστικά πομπού.....	65
4.6.1.8.1 Ισχύς Εξόδου.....	65
4.6.1.8.2 Μάσκα εκπομπής και απόδοση παρακαείμενου καναλιού	65
4.6.1.8.3 Ακρίβεια διαμόρφωσης.....	66
4.6.1.9 Χαρακτηριστικές τιμές PHY-SC	67
4.6.2 Χαρακτηριστικά του WirelessMAN SCa PHY (<11GHz).....	68
4.6.2.1 Έλεγχος ισχύος	68
4.6.2.2 Απαιτήσεις συστήματος.....	69
4.6.3 Χαρακτηριστικά του WirelessMAN-OFDM PHY (<11GHz)	70
4.6.3.1. Περιγραφή του OFDM	71
4.6.3.2 Απαιτήσεις Συστήματος.....	72
4.6.3.2.1 Απαιτήσεις πομπού	72
4.6.3.2.2 Απαιτήσεις δέκτη.....	73
4.6.3.3 Χαρακτηριστικές τιμές PHY-OFDM.....	75
4.6.4 Χαρακτηριστικά του WirelessMAN-OFDMA PHY (<11GHz).....	75
4.6.4.1. Περιγραφή του OFDMA.....	75
4.6.4.2 Δομή πλαισίων.....	76
4.6.4.2.1 Δομή πλαισίου PMP	77
4.6.4.3 Απαιτήσεις Συστήματος.....	78
4.6.4.3.1 Απαιτήσεις πομπού	78
4.6.4.3.2 Απαιτήσεις Δέκτη	78
4.6.4.4 Χαρακτηριστικές τιμές PHY-OFDMA.....	80
4.7 Στρώμα Media Access Control (MAC)	80
4.7.1 Εισαγωγή	80
4.7.3 Πλαίσια του MAC	81
4.7.3.1 MAC επικεφαλίδα.....	81
4.7.3.2 Ωφέλιμο φορτίο (payload)	82
4.7.4 Μηνύματα διαχείρισης MAC.....	83
4.7.5 Ποιότητα υπηρεσιών (QoS).....	84

4.7.6 Διαχείριση Κινητικότητας	84
4.7.6.1 Διαχείριση Ισχύος	84
4.7.6.2 Διαπομπή	85
4.7.7 Υπηρεσίες Multicast και Broadcast	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ	87
5.1 Ανάλυση επίδοσης για κινητά συστήματα πρόσβασης	87
5.1.1 Παράμετροι του συστήματος Mobile WiMAX	87
5.1.2 Υπολογισμοί της σύνδεσης του Mobile WiMAX (Link budget)	88
5.1.3 Αξιοπιστία του Mobile WiMAX	90
5.1.4 Απόδοση συστήματος WiMAX	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ WiMAX	95
6.1 Εισαγωγή	95
6.2 Υπόστρωμα ασφαλείας	95
6.2.1 Αρχιτεκτονική	95
6.2.2 Ασφαλής ενθυλάκωση των MPDUs	96
6.2.3 Key Management Protocol (PKM)	96
6.2.4 Πρωτόκολλο πιστοποίησης (Authentication protocol)	97
6.2.4.1 Πιστοποίηση PKM RSA	97
6.2.4.1 Πιστοποίηση PKM EAP	98
6.3 Key Management Protocol (PKM)	98
6.3.1 PKM Version 1	98
6.3.1.1 Δεσμοί ασφαλείας (Security Associations-SA)	98
6.3.1.2 Εξουσιοδότηση συνδρομητικού σταθμού και ανταλλαγή AK	99
6.3.2 Ανάλυση ανταλλαγής μηνυμάτων TEK	100
6.3.2.1 Ανταλλαγή TEK για τοπολογία PMP	100
6.3.2.2 Ανταλλαγή TEK για τοπολογία Mesh	101
6.3.3 PKM Version 2	101
6.3.3.1 Ανταλλαγή TEK για τοπολογία PMP	101
6.3.3.2 Δημιουργία κλειδιού	102
6.3.3.2.1 Εξουσιοδότηση βασισμένη σε RSA	103
6.3.3.2.2 Πιστοποίηση EAP	103
6.4 Μέθοδοι Κρυπτογράφησης	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ WiMAX	107
7.1 Εισαγωγή	107
7.2 Αρχιτεκτονική δικτύων WiMAX	107
7.2.1 Λειτουργικές οντότητες δικτύου	109
7.2.2 Inter-ASN σημεία αναφοράς (Reference Points - RPs)	110
7.2.3 Λειτουργικές οντότητες ASN	111
7.2.4 Intra-ASN σημεία αναφοράς	111
7.2.5 Προφίλ των ASN	113
7.2.5.1 Profile A	113
7.2.5.2 Profile B	115
7.2.5.3 Profile C	115
7.2.6 Σύγκριση μεταξύ των προφίλ.	117
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ WiMAX ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	119
8.1. Πιθανές στρατιωτικές εφαρμογές του WiMAX	119
8.2 Στρατοί που χρησιμοποιούν ήδη το WiMAX	119
8.3 Τακτικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση του WiMAX σε στρατιωτικές εφαρμογές.	120

8.3.1 Υψηλή απόδοση.....	120
8.3.2 Ευελιξία	120
8.3.3 Κορυφαίο επίπεδο τεχνολογίας	120
8.3.4 Τακτική και Ασφάλεια.....	120
8.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από τη χρήση του WIMAX σε στρατιωτικά δίκτυα	120
8.4.1 Πλεονεκτήματα.....	120
8.4.2 Μειονεκτήματα	121
8.5 Δυνατότητες συνεργασίας τακτικών δικτύων WiMAX-WiFi.....	121
8.6 Παράδειγμα στρατιωτικού WiMAX δικτύου : Μονάδες Εφοδιασμού (Σταθμοί Διοικητικής Μέριμνας).....	122
8.7 Τακτικά δίκτυα WIMAX.....	123
8.7.1 Ικανότητα διαβίβασης δεδομένων (ρυθμαπόδοση) ως προς την απόσταση	123
8.7.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη για κεραία Σταθμού Βάσης στα 25m & 2,3GHz σε ζεύξη χωρίς οπτική επαφή	124
8.8 Εφαρμογή χρησιμοποίησης τακτικού δικτύου WIMAX - Μεταφορά εικόνας από το πεδίο μάχης στα κέντρα λήψης αποφάσεων	125
8.8.1 Εισαγωγή	125
8.8.2 Περιγραφή εφαρμογής.....	127
8.9 Συμπεράσματα από την αναγκαιότητα του WiMAX δικτύου σε στρατιωτικές εφαρμογές	134
Αναφορές -Βιβλιογραφία.....	136
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	138

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 : Χρήσεις WiMAX	24
Σχήμα 2: Οι ζεύξεις μεταξύ των σταθμών βάσης WiMAX.....	25
Σχήμα 3: Ένα τυπικό δίκτυο WiMAX.....	27
Σχήμα 4: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, περιοχή ασύρματης κάλυψης, φόρτωση καναλιού	28
Σχήμα 5: Σχηματική διασύνδεση προτύπων WiMAX.....	30
Σχήμα 6: Προφίλ συστήματος και πιστοποίησης	32
Σχήμα 7: Η διαδικασία πιστοποίησης.....	33
Σχήμα 8: Συνύπαρξη Wi-Fi και WiMAX.....	41
Σχήμα 9: Τοπολογία δικτύου PTP και PMP	50
Σχήμα 10: Στοίβα πρωτοκόλλων WiMAX	51
Σχήμα 11: Τοπολογία δικτύου mesh.....	53
Σχήμα 12: Παγκόσμια χρησιμοποίηση συχνοτήτων.....	56
Σχήμα 13: Τοπολογία δικτύου MMR	59
Σχήμα 14: Κατανομή εύρους ζώνης σε FDD	61
Σχήμα 15: Δομή πλαισίου TDD.....	61
Σχήμα 16: Δομή υποπλαισίου κάτω ζεύξης TDD	62
Σχήμα 17: Δομή υποπλαισίου κάτω ζεύξης FDD.....	63
Σχήμα 18: Δομή υποπλαισίου άνω ζεύξης.....	63
Σχήμα 19: EVM.....	67
Σχήμα 20: Δημιουργία OFDM σήματος.....	71
Σχήμα 21: Δομή πλαισίου OFDM	72
Σχήμα 22: Περιγραφή OFDM στο πεδίο της συχνότητας.....	72
Σχήμα 23: Περιγραφή OFDMA στο πεδίο της συχνότητας.....	76
Σχήμα 24: Δομή πλαισίου OFDM για εφαρμογή TDD	77
Σχήμα 25: Μορφή του MAC PDU	81
Σχήμα 26: Μορφή επικεφαλίδας MAC PDU γενικού τύπου.....	82
Σχήμα 27: Εξομοίωση απόδοσης για την κάλυψη του καναλιού ελέγχου για TU κανάλι.	91
Σχήμα 28: Βελτίωση φασματικής απόδοσης συστήματος WiMAX.	94
Σχήμα 29: Διεκπαιρεωτότητα για διάφορες τιμές του λόγου DL/UL και βελτιωμένου συστήματος WiMAX.	94
Σχήμα 30: Υπόστωμα ασφαλείας	96
Σχήμα 31: Σχέση μεταξύ πεδίων δράσης WiMAX NWG και IEEE802.16	107
Σχήμα 32: Network Reference Model (NRM).....	108
Σχήμα 33: Σχέση μεταξύ συνδρομητών και παρόχων WiMAX.....	109
Σχήμα 34: Μοντέλο αναφοράς για διεσπασμένο ASN σε BS και μια αδιάσπαστη ASN GW.	112
Σχήμα 35: Μοντέλο αναφοράς για διασπασμένο ASN σε BS και πολλαπλές ASN GW... ..	112
Σχήμα 36: Μοντέλο αναφοράς για διάσπαση ASN-GW.....	112
Σχήμα 37: Λειτουργική άποψη του ASN Profile A.....	114
Σχήμα 38: Λειτουργική άποψη του ASN Profile B.....	115
Σχήμα 39: Λειτουργική άποψη του ASN Profile C.....	116
Σχήμα 40: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα από τη χρήση του WiMAX (σε στρατιωτικά δίκτυα).....	121
Σχήμα 41: Από το τακτικό ασύρματο δίκτυο σε νέες ενοποιημένες λύσεις συνεργασίας WiMAX-WiFi.....	121
Σχήμα 42: Μια ευέλικτη λύση με δυνατότητες συνεργασίας σε πολλές εφαρμογές.....	122

Σχήμα 43: Στρατιωτική Μονάδα Διοικητικής Μέριμνας σε καταυλισμό	122
Σχήμα 44: Ενδεικτικό παράδειγμα απαιτούμενου εξοπλισμού για την υλοποίηση στρατιωτικού τακτικού WiMAX δικτύου	123
Σχήμα 45: Διάγραμμα κάλυψης δικτύου ως προς διαμόρφωση, συχνότητα και ύψος κεραίας.....	123
Σχήμα 46: Χαρακτηριστικά του TWS 5000 της εταιρίας Thales (χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός στην εφαρμογή μας). Συγκεκριμένα : Σταθμός Βάσης, Τερματικός Σταθμός και Φορητό τερματικό.....	126
Σχήμα 47: Ενδεικτικός τρόπος κατανομής εξοπλισμού για την υλοποίηση του WiMAX δικτύου.....	127
Σχήμα 48: Μια ευέλικτη λύση με δυνατότητες συνεργασίας σε πολλές εφαρμογές.....	128
Σχήμα 49: Καθορισμός των διαφόρων επιπέδων στρατιωτικής διοίκησης.....	129
Σχήμα 50: Αρχική υποβολή αιτήματος από Τάγμα Υποστηρίξεως.....	130
Σχήμα 51: Υποβολή αιτήματος από το Σταθμό Διοικητικής Μέριμνας.....	131
Σχήμα 52: Αίτημα της Διοίκησης να μάθουν από τα τμήματα ασφαλείας για την ασφάλεια των απαιτούμενων κινήσεων.....	132
Σχήμα 53: Τα τμήματα ασφαλείας μεταφέρουν μέσω webcam και WiMAX δικτύου, «ζωντανή» εικόνα στο Σταθμό Διοίκησης.....	133
Σχήμα 54: Μεταφέρεται η διαταγή της Διοίκησης σε όλους τους ενδιαφερόμενους για ενέργεια αλλά και πληροφορία.....	134

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: IEEE projects.....	23
Πίνακας 2: Σύγκριση WiMAX με άλλες ασύρματες τεχνολογίες.....	43
Πίνακας 3: Ρυθμοί μετάδοσης και μέγεθος καναλιού	64
Πίνακας 4: Φασματική μάσκα για downlink κανάλι στα 28MHz.....	66
Πίνακας 5: Φασματική μάσκα για uplink κανάλι στα 28MHz	66
Πίνακας 6: Φασματική μάσκα NFD για uplink και downlink	66
Πίνακας 7: Τιμές EVM ανά σχήμα διαμόρφωσης	67
Πίνακας 8: Ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση συστήματος σε ομοδιαυλική παρεμβολή	70
Πίνακας 9: Μέση τιμή σχετικού RMS λάθους αστερισμού	73
Πίνακας 10: Παραδοχές για την ευαισθησία στο ελάχιστο επίπεδο εισόδου του δέκτη Rss	73
Πίνακας 11: Παρεμβολή παρακείμενου καναλιού σε σχέση με τη διαμόρφωση.....	74
Πίνακας 12: Παράμετροι της κλιμακωτής SOFDMA	76
Πίνακας 13: Μέση τιμή σχετικού RMS λάθους αστερισμού.....	78
Πίνακας 14: SNR παραδοχές για τον πομπό	79
Πίνακας 15: Πεδία της επικεφαλίδας MAC PDU γενικού τύπου	82
Πίνακας 16: Παράμετροι συστήματος Mobile WiMAX.....	87
Πίνακας 17: Παράμετροι OFDMA	88
Πίνακας 18: Μοντέλο αποσβέσεων.....	88
Πίνακας 19: Υπολογισμός ζεύξης καθόδου για Mobile WiMAX.....	89
Πίνακας 20: Υπολογισμός ζεύξης ανόδου για Mobile WiMAX	90
Πίνακας 21: Μοντέλα καναλιών πολλαπλών διαδρομών για εξομοίωση απόδοσης.....	92
Πίνακας 22: Μοντέλο καναλιών πολλαπλών χρηστών για εξομοίωση απόδοσης...92	92
Πίνακας 23: Υποθέσεις διάταξης Mobile WiMAX	93
Πίνακας 24: Επίδοση συστήματος WiMAX.	94
Πίνακας 25: Διαλειτουργικά σημεία αναφοράς του Profile A.	114
Πίνακας 26: Διαλειτουργικά σημεία αναφοράς του Profile C.	116
Πίνακας 27: Σύγκριση των προφίλ.	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1– Μια Εισαγωγή στις Ασύρματες Τεχνολογίες

1.1.1 Γενικά

Ο κόσμος και η τεχνολογία των ασύρματων τεχνολογιών και ειδικότερα των ασύρματων επικοινωνιών είναι ο πιο ραγδαία αναπτυσσόμενος αυτή τη στιγμή στους κόλπους των τεχνολογικών επιστημών.

Από τη δεκαετία του 1980, οπότε και η ιδέα της ασύρματης επικοινωνίας σταμάτησε να είναι μια απλή θεωρητική ουτοπία, η ασύρματη τεχνολογία άρχισε να εξελίσσεται τόσο πολύ, ώστε σήμερα να θεωρείται το de facto standard για την υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών αναγκών.

Όταν ο R. Metcalfe συνέλαβε και υλοποίησε την ιδέα του Ethernet, πιθανόν να μην μπορούσε να συλλάβει και το ότι ο αιθέρας που υπήρχε μέσα στα απτά καλώδια των LANs για να μεταδοθεί η πληροφορία, θα μπορούσε να μετατραπεί στο απλούστερο δυνατό αέριο μέσο, τον αέρα που υπάρχει γύρω μας, χωρίς είτε καλώδια είτε κάποιο άλλο υλικό μέσο.

Τώρα πλέον οι ασύρματες τεχνολογίες στις τηλεπικοινωνίες έχουν προχωρήσει απίστευτα πολύ και χρησιμοποιούνται στις κινητές τηλεπικοινωνίες, στα αμυντικά συστήματα, στην τηλεκαίτευση, την τηλεϊατρική, την ψηφιακή τηλεόραση και σε πολλές ακόμα υπηρεσίες.

Οι τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης τα τελευταία χρόνια έχουν γνωρίσει σημαντική εξέλιξη, καθώς από τα πλεονεκτήματά τους επωφελούνται τόσο οι πάροχοι υπηρεσιών μετάδοσης δεδομένων, όσο και οι ιδιώτες ή οι απλοί χρήστες. Η ευκολία εγκατάστασης ενός ασύρματου δικτύου, οδήγησε στην ανάπτυξη σήμερα εκατομμυρίων δικτύων Wi-Fi σε ολόκληρο τον πλανήτη. Παρόλα αυτά, το Wi-Fi αντιμετωπίζει μειονεκτήματα που έρχεται να λύσει μια νέα τεχνολογία, η οποία ακούει στο όνομα WiMAX.

Κάνοντας μια ανασκόπηση του τρόπου με τον οποίο η συντριπτική πλειοψηφία των σημερινών χρηστών πλοηγείται στο διαδίκτυο, μάλλον η πιο συνηθισμένη εικόνα που σχηματίζει κανείς στο μυαλό του είναι αυτή των καλωδίων που απαιτούνται για τη σύνδεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με κάποιο modem ή router. Η πρόσβαση στο Internet μέσω ενσύρματων δικτύων μπορεί να παρουσιάζει ως πλεονέκτημα την υψηλή σταθερότητα της σύνδεσης, ωστόσο περιορίζει σημαντικά την ευελιξία του χρήστη, ο οποίος θα πρέπει να βρίσκεται σε ένα σταθερό σημείο προκειμένου να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες του διαδικτύου.

Τα τελευταία χρόνια γνώρισε σημαντική απήχηση σε παγκόσμια κλίμακα μια εξελιγμένη τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης, το Wi-Fi, το οποίο απλοποιεί τις διαδικασίες σύνδεσης ενός χρήστη με το Internet. Το Wi-Fi όμως, αν και αρκετά απλό στη χρήση, δεν έφερε την πραγματική επανάσταση, που όλοι περίμεναν και αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην περιορισμένη εμβέλεια της κάλυψής του. Στην πραγματικότητα η εν λόγω τεχνολογία αξιοποιήθηκε κυρίως για σύνδεση ηλεκτρονικών υπολογιστών και δρομολογητών (routers) σε οικιακούς ή εταιρικούς χώρους και όχι για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Internet σε μια γεωγραφικά εκτεταμένη περιοχή. Με την εμβέλειά του να περιορίζεται στα 100 μέτρα, δεν θα μπορούσε φυσικά να περιμένει κανείς κάτι διαφορετικό.

Το μειονέκτημα της περιορισμένης εμβέλειας του Wi-Fi άφησε ως μοναδική λύση για τους χρήστες που επιθυμούν μόνιμη πρόσβαση στο διαδίκτυο εν κινήσει, τη χρήση των τεχνολογιών GPRS και 3G, μέσω των GSM και UMTS δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Οι εν λόγω τεχνολογίες προσφέρουν μεν σταθερή σύνδεση σε κάθε σημείο όπου υπάρχει κάλυψη σήματος από το δίκτυο, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι ο συνδρομητής μπορεί να πλοηγείται στα web sites που τον ενδιαφέρουν, να «κατεβάζει» τα e-mail του και να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε άλλη υπηρεσία του Internet ακόμη και στη διάρκεια ενός ταξιδιού από τη μία άκρη μιας χώρας στην άλλη, χωρίς καμία σχεδόν διακοπή της σύνδεσης.

Όμως τόσο το GPRS όσο και το 3G διαθέτουν ένα σημαντικό μειονέκτημα, που κράτησε μειωμένη τη συνδρομητική βάση: τις υψηλές χρεώσεις. Παρόλο που ο χρήστης είναι σε συνεχή σύνδεση με το Internet, χωρίς να υφίσταται χρονοχρέωση, η κοστολόγηση της πρόσβασης γίνεται σύμφωνα με τον όγκο των διακινούμενων δεδομένων. Ενδεικτικά στη χώρα μας, 1 MB δεδομένων που στέλνει ή λαμβάνει ο συνδρομητής GPRS/3G φθάνει να κοστολογείται μέχρι και 5 ευρώ, κάτι που καθιστά απαγορευτική τη χρήση της υπηρεσίας ακόμη και για πλοήγηση σε web sites λίγα λεπτά καθημερινά. [1]

1.1.2 Νόμοι - Χαρακτηριστικά Ασύρματων Τεχνολογιών

Ας μιλήσουμε όμως λίγο για τις ασύρματες τεχνολογίες, εν γένει, τα χαρακτηριστικά τους και τους νόμους που τις διέπουν.

Γενικά, οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες διέπονται από τέσσερις νόμους. [2]

- Ο νόμος του Shannon.

Ο νόμος του Shannon περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_o W} \right)$$

όπου C είναι η χωρητικότητα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος σε bits/second, P είναι η ισχύς του σήματος σε Watt, W είναι το εύρος ζώνης του σήματος σε Hertz και N_o είναι η μονόπλευρη πυκνότητα φάσματος θορύβου.

Ο παραπάνω νόμος λέει ότι αν υπάρχει ένας πομπός και ένας δέκτης, η χωρητικότητα ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος εξαρτάται γραμμικά από το διαθέσιμο εύρος ζώνης και λογαριθμικά από το σηματοθορυβικό λόγο (signal-tonoise ratio, SNR).

- Ο νόμος του Moore.

Ο παραπάνω νόμος υπογραμμίζει πως η επίδοση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων διπλασιάζεται κάθε 18 μήνες.

- Ο 3ος νόμος δηλώνει πως η αξία ενός δικτύου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας της σύνδεσης.

- Ο 4ος νόμος λέει ότι η αξία ενός δικτύου είναι ανάλογη του τετραγώνου του αριθμού των συσκευών οι οποίες μπορούν να συνδεθούν σε αυτό.

Με βάση τους παραπάνω νόμους λειτουργούν τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και προσπαθούν να καλύψουν τις αυξημένες ανάγκες των συνδρομητών και της

βιομηχανίας. Ποιες είναι αυτές οι ανάγκες όμως; Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, πρέπει να είναι τα εξής:

- Ικανότητα να μεταφέρουν φωνή, ήχο και βίντεο, όπως επίσης και δεδομένα.
- Δυνατότητα λειτουργίας συσκευών με διαφορετική τιμή, κατανάλωση ισχύος και ρυθμό δεδομένων.
- Διάθεση φάσματος ικανοποιητικά και δυναμικά στις διάφορες συσκευές δικτύου.

Ιστορικά, όπως και στα ενσύρματα μέσα, η ανάπτυξη της ασύρματης τεχνολογίας προχωρούσε σε 2 μονοπάτια-τα δίκτυα φωνής και τα δίκτυα δεδομένων. Τα δίκτυα προσανατολισμένα στη μετάδοση φωνής αναπτύχθηκαν πρώτα και ο λόγος ήταν καθαρά εμπορικός, καθώς η αγορά για προϊόντα προσανατολισμένα σε φωνή και τέτοιες υπηρεσίες αναπτύχθηκαν πιο γρήγορα.

Παρ' όλ' αυτά, σήμερα υπάρχουν δύο σημαντικές μακροχρόνιες τάσεις της αγοράς. Πρώτον, η αγορά για προϊόντα και υπηρεσίες δεδομένων μεγαλώνει αντιληπτά πιο γρήγορα από την αγορά για προϊόντα και υπηρεσίες φωνής. Δεύτερον, και οι 2 προαναφερθείσες αγορές αναπτύσσονται και εξελίσσονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δίκτυα προσανατολισμένα σε φωνή να έχουν αυξημένες δυνατότητες δεδομένων και τα μοντέρνα δίκτυα για δεδομένα να μπορούν άνετα να μεταφέρουν φωνή. Λογικό επακόλουθο είναι οι εταιρείες που αναλαμβάνουν την έρευνα και την ανάπτυξη των εν λόγω δικτύων να βρίσκονται σε συνεχώς αυξανόμενο ανταγωνισμό, τους καρπούς του οποίου απολαμβάνει ο τελικός χρήστης.

Όλα τα παραπάνω μας καταδεικνύουν το συμπέρασμα ότι η ιδανική ασύρματη τεχνολογία θα πρέπει να μεταφέρει φωνή, ήχο, (κινούμενη) εικόνα, καθώς και δεδομένα με την ίδια επιτυχία και ποιότητα. Το λεγόμενο, λοιπόν, triple play είναι το ζητούμενο στις μέρες μας και κάθε εταιρεία που αναπτύσσει ασύρματες τεχνολογίες προσέχει καταρχάς, τα προϊόντα της να ικανοποιούν την παραπάνω συνθήκη.

Κάτι τέτοιο, βέβαια, δεν είναι κάτι το εύκολο, για τους παρακάτω λόγους. Η φωνή, ο ήχος και το βίντεο έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από τα δεδομένα. Για τα δεδομένα, λοιπόν, η πιο σημαντική παράμετρος είναι ο ρυθμός μετάδοσης (throughput), ενώ η καθυστέρηση δεν είναι και τόσο σημαντική. Για τη φωνή και το βίντεο, απαιτείται κάποιος ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης, αλλά η καθυστέρηση του σήματος είναι επίσης σημαντική. Σε αυτόν τον τομέα γίνεται η μεγαλύτερη προσπάθεια και αξίζει να σημειωθεί πως όλα τα ασύρματα πρότυπα από την ομάδα του IEEE 802 κινούνται προς αυτήν την κατεύθυνση.

Η δυνατότητα του ασύρματου δικτύου να υποστηρίζει πολλές διαφορετικές (σε τιμή, κατανάλωση ισχύος και ρυθμό μετάδοσης), όπως και η δυναμική εκχώρηση φάσματος είναι οι απαιτήσεις που προβληματίζουν παγκόσμια τις εταιρείες, όπως και την IEEE. Επειδή είναι δύσκολο να βγούνε πολλές εταιρικές συσκευές εκτός παιχνιδιού και καθώς ένα standard (802.11™ ή 802.16™) πιθανό να μη λύνει όλα τα προβλήματα του λόγου για τον οποίον δημιουργήθηκαν, το κάθε πρωτόκολλο υποστηρίζει διαφορετικές συχνότητες, διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και όλες σχεδόν τις συσκευές που ικανοποιούν τις minimum απαιτήσεις του πρωτοκόλλου. Βλέπουμε, παραδείγματος χάριν, στο πρωτόκολλο 802.11™, το 802.11b™ να υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων 1, 2, 5.5 και 11 Mb/s, το 802.11a™ 6 έως 54 Mb/s και συσκευές με ρυθμούς 6 Mb/s να κοστίζουν το ίδιο με συσκευές των 54 Mb/s.

Η ικανότητα του δικτύου να εκχωρεί δυναμικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι απαραίτητη, καθώς το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι περιορισμένο και μοιράζεται και σε άλλες ασύρματες συσκευές. Όσο αυξανόταν ο αριθμός των διαφορετικών τεχνολογιών,

τόσο η ευελιξία εκχώρησης φάσματος γινόταν σημαντικότερος παράγοντας σε ένα ασύρματο δίκτυο. Τα τελευταία, βέβαια, πρωτόκολλα έχουν χαρακτηριστικά για τον έλεγχο κάθε συχνότητας και κατά το πόσο αυτή ανήκει στο δεδομένο φάσμα ή ελέγχεται από άλλη συσκευή.

Από τα παραπάνω, γίνεται ξεκάθαρο ότι οι υπάρχουσες τεχνολογίες έχουν έλλειψη από πολλά χαρακτηριστικά του ιδανικού μοντέλου ασύρματης τεχνολογίας. Καθώς γίνεται η σύμβαση ότι μια τέτοια ιδανική τεχνολογία δεν υπάρχει, έχουμε οδηγηθεί σε 3 κύριες διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες.

- Τα ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής (wireless local area networks, WLAN).
- Τα ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής (wireless personal area networks, WPAN).
- Τα ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής (wireless metropolitan area networks, WMAN), επίσης γνωστά και ως δίκτυα ευρείας ζώνης ασύρματης πρόσβασης (broadband wireless access networks).

Με τα τελευταία θα ασχοληθούμε και αναλυτικά παρακάτω. Πριν προχωρήσουμε στα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα, θα γίνει μια αναφορά στην IEEE και πιο συγκεκριμένα μια σύντομη αναδρομή στα πρωτόκολλα του Working Group 802 της IEEE.

1.2 IEEE Working Group Standardization Bodies

Η ανάπτυξη των μεγάλων αγορών για τις υπηρεσίες ασυρμάτων υπηρεσιών δεν εξαρτώνται μόνο στη διαθεσιμότητα του επαρκούς φάσματος στο συγκεκριμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων, αλλά επίσης και στη διαθεσιμότητα των προτύπων (standards) που υπάρχουν. Ο κύριος λόγος γιατί οι μεγάλες αγορές δεν είναι εφικτές χωρίς τα πρότυπα, είναι επειδή οι μεγάλοι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών θέλουν να έχουν την επιλογή της αγοράς εξοπλισμού από πολλαπλούς προμηθευτές και όχι από μία μόνο εταιρεία.

Με την απουσία των προτύπων, οι μεγάλοι πάροχοι υπηρεσιών απλά απέχουν από τη χρήση της υπάρχουσας τεχνολογίας. Η ύπαρξη των προτύπων επίσης βοηθάει τις μικρές επιχειρήσεις της τεχνολογίας να εισέλθουν στην αγορά της στις μεγάλες αγορές, μειώνοντας τα ρίσκα που συνδέονται με την προμήθεια προϊόντων όπως τα chipsets ημιαγωγών, λογισμικό, firmware κτλ.

Τα πρότυπα φαίνονται σαν εθελοντικές συμφωνίες μεταξύ εταιρειών ημιαγωγών και τεχνολογίας, κατασκευαστών εξοπλισμού και παρόχων υπηρεσιών. Μέχρι και αρκετά χρόνια πριν, δεν υπήρχε κανένα πρωτόκολλο για ασύρματες επικοινωνίες δεδομένων. Η ολική αγορά ήταν μικρή, κατακερματισμένη και κυριαρχούμενη από αρκετές ιδιοκτησιακές τεχνολογίες. Η δραματική αύξηση της αγοράς είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της ανάγκης αρκετών πρωτοκόλλων, όπως τα IEEE 802.11a™, 802.11b™ και 802.11g™. Τα πρότυπα επιτρέπουν εξοπλισμό από διαφορετικές εταιρείες να συνεργάζονται σε ένα δίκτυο. Τα πρότυπα δημιουργούν μαζικές αγορές για εξοπλισμό, ο οποίος δημιουργεί οικονομία κλιμάκωσης για τους κατασκευαστές. Η οικονομική συνέπεια των προτύπων είναι ακόμα πιο σημαντική από την απελευθέρωση της αγοράς. Η αγορά για προϊόντα τυποποιημένα κατά ένα πρότυπο χαρακτηρίζεται από σημαντικό ανταγωνισμό, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες τιμές. Για να υπερκεράσουν αυτήν την τάση, πολλές εταιρείες ψάχνουν για τρόπους ώστε να διαφοροποιηθούν μέσα στην αγορά, αλλά

παράλληλα να προσφέρουν τα προτυποποιημένα προϊόντα. Γενικά, τα πρότυπα δίχως άλλο, προωθούν τη δημιουργικότητα, την καινοτομία και την επιχειρηματικότητα.

Επειδή τα πρότυπα ευνοούν τις μαζικές αγορές, η πνευματική ιδιοκτησία που απαιτείται για τη δημιουργία ενός προτύπου αξιολογείται πολύ ψηλά. Άλλωστε, αρκετές από τις πιο υψηλές πατέντες για πνευματική ιδιοκτησία στον κόσμο είναι αυτές που καλύπτουν ένα τέτοιο πρότυπο ή μέρος του. Έτσι, η πολιτική πνευματικής ιδιοκτησίας κατά τη δημιουργία ενός προτύπου είναι πολύ σημαντική.

Οι ανοιχτοί οργανισμοί, όπως οι οργανισμοί που αναπτύσσουν πρότυπα, σχηματίζονται για να αναπτύσσουν τα πρότυπα, έτσι ώστε να μην ευνοούν καμία εταιρεία, αλλά έχουν ως σκοπό να ωφελήσουν το κοινό καλό. Η IEEE είναι ένα ανοιχτό σώμα ανάπτυξης προτύπων. Πριν ένα IEEE πρότυπο υιοθετηθεί, ζητείται από εταιρείες που είναι γνωστό ότι διαθέτουν απαραίτητες πατέντες γι' αυτό μια επιβεβαίωση ότι η εν λόγω εταιρεία είτε δε θα ενδυναμώσει κάποια από τις τωρινές είτε τις μελλοντικές πατέντες τις (ή μέρος τους) εμποδίζοντας κάποια άλλη εταιρεία, είτε ότι θα διαθέσει άδειες με αποζημίωση ή σε λογικές τιμές σε διάφανη βάση. Δεν υπάρχει εγγύηση από την IEEE ότι ένα πρότυπο δεν παραβιάζει την πνευματική περιουσία τρίτων, ακόμη και αν οι τρίτοι αυτοί δε θέλουν να μοιραστούν τα πνευματικά δικαιώματα. Τώρα, πως ακριβώς οριοθετούνται οι όροι “λογικός” και “διαφανής” είναι θέμα μόνο ενός δικαστηρίου.

Ειδικότερα στην IEEE, τα πρότυπα για τις επικοινωνίες δεδομένων αναπτύσσονται από την κοινότητα IEEE 802, που αποκαλείται επίσης και Επιτροπή Πρωτοκόλλων Τοπικών και Μητροπολιτικών Δικτύων (Local and Metropolitan Area Networks Standards Committee – LMSC) και χορηγείται από την IEEE Computer Society. Η IEEE 802 έχει την ευθύνη της ανάπτυξης και συντήρησης παγκοσμίων προτύπων και προτεινόμενων πρακτικών για επικοινωνίες υπολογιστών. Μερικά από τα επιτυχημένα πρότυπα της IEEE 802 είναι:

- IEEE 802.3™ ή Ethernet standard
- IEEE 802.5™ ή Token Ring standard
- IEEE 802.11™ ή Wi-Fi standard.

Όλα τα παραπάνω έχουν υιοθετηθεί από την ISO/IEC Joint Technical Committee 1 (JTC1) ως International Standards.

Αν και η IEEE έχει την έδρα της στις Η.Π.Α., υπάρχει τεράστια παγκόσμια αναγνώριση και στήριξη, ειδικά στις διάφορες συνεδριάσεις που οργανώνει και πολλά πρότυπα που εισάγονται από την IEEE αναγνωρίζονται ως παγκόσμια standards. Η κοινότητα IEEE 802 αποτελείται από πολλές ομάδες εργασίας, που οργανώνονται γύρω από σημαντικές εφαρμογές. Τα πρότυπα της IEEE 802 σχετίζονται με το φυσικό στρώμα και το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων, όπως αυτά ορίζονται στο ISO open systems interconnections (OSI) reference model. Τα πρότυπα της IEEE 802 χωρίζουν το στρώμα σύνδεσης δεδομένων σε 2 υποστρώματα, το logical link control (LLC) και το medium access control (MAC). Το LLC εισήχθη στο 802.2™ και είναι κοινό για όλα τα 802 MACs.

Στη δεκαετία του '90 δραστηριοποιήθηκε η ομάδα εργασίας του 802.11™ με εντυπωσιακά αποτελέσματα, καθώς ήταν το πρώτο πρωτόκολλο με τόσο μεγάλη απήχηση στον κόσμο και φυσικά την αγορά της ασύρματης τεχνολογίας. Η τεχνολογία, όμως, δε μένει στάσιμη και εφόσον το εμπορικό ενδιαφέρον ήταν μεγαλύτερο από ποτέ άλλοτε σχετικά με τις ασύρματες τεχνολογίες, το 1999 2 ακόμα ομάδες εργασίες δημιουργήθηκαν.

Η IEEE 802.15™ που δραστηριοποιήθηκε στα ασύρματα προσωπικά δίκτυα και

Η IEEE 802.16™ που δραστηριοποιήθηκε στα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα και στη λεγόμενη ασύρματη κάλυψη ευρείας ζώνης.

Η συμμετοχή στις ομάδες αυτές είναι ανοιχτή σε όποιον θέλει να συμμετάσχει με οποιονδήποτε ωφέλιμο τρόπο. Δεν επιτρέπεται σε εταιρείες να συμμετέχουν. Μόνο μεμονωμένα πρόσωπα δύνανται να ψηφίσουν και να αποφασίσουν. Οι τελευταίοι προέρχονται συνήθως από τις ΗΠΑ, τον Καναδά, την Ευρώπη, την Ιαπωνία και την Αυστραλία. Τα πρότυπα που προκύπτουν από τη μελέτη της ομάδας εργασίας πρώτα γίνονται πρότυπα της IEEE και έπειτα προτείνονται στην επιτροπή της ISO/IEC για αναγνώριση ως παγκόσμιου προτύπου. Η εμπορική επιτυχία των 802.11™ και 802.15™, όπως και οι εργασίες για το 802.16 έχουν αναδείξει την IEEE το πλέον αναγνωρίσιμο σώμα δημιουργίας ασύρματων προτύπων.

Το ότι ένα παγκόσμιο πρότυπο υπάρχει, δε σημαίνει απαραίτητα και ότι θα επιτύχει στην αγορά της τεχνολογίας. Η επιτυχία αυτή εξαρτάται όχι μόνο από την ποιότητα τα τεχνολογίας, αλλά επίσης και από εταιρικούς και πολιτικούς λόγους. Έτσι, πρέπει να υπάρχει μια συγκεκριμένη συμπίεση μεταξύ των ενδιαφερομένων εταιρειών και των αντίστοιχων πολιτικών θεμάτων ώστε να υπάρξει ευτυχής έκβαση. Στη βιομηχανία, η συμπίεση αυτή είναι ευκολότερο να επιτευχθεί. Για να γίνει λοιπόν πραγματικότητα η επιτυχία του προτύπου, οι εταιρείες δημιουργούν άλλες μορφές βιομηχανικών, αυτή τη φορά, οργανισμών για τα πρότυπα. Τέτοιοι οργανισμοί συνδεδεμένοι με τα πρωτόκολλα 802.11™ και 802.16™ είναι οι Wi-Fi και WiMAX. Το εγχείρημα των οργανισμών αυτών περιλαμβάνει δοκιμές για να διαπιστωθεί η διαλειτουργικότητα (interoperability) ανάμεσα στα προϊόντα από διαφορετικές εταιρείες και την προώθηση των προϊόντων που είναι τυποποιημένα κατά το συγκεκριμένο πρότυπο στην αγορά.

Πιο συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε το 802.16™ Working Group της IEEE.

Η ομάδα εργασίας 802.16™ της IEEE είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη προτύπων και την πρόταση πρακτικών πάνω στα δίκτυα ευρείας ζώνης ασύρματης πρόσβασης. Η ομάδα αυτή δημιουργήθηκε το Μάρτιο του 1999 και έχει αναπτύξει αρκετές εργασίες:

- α) Ασύρματη διεπαφή (που περιέχει ένα MAC και ένα PHY) για λειτουργία στην περιοχή μεταξύ 10 και 66 GHz.
- β) IEEE 802.16™, συμπλήρωμα που καθορίζει πρόσθετα φυσικά στρώματα και κατάλληλες τροποποιήσεις του MAC για λειτουργία στην περιοχή μεταξύ 2 και 11 GHz, συμπεριλαμβανομένων αδειοδοτημένων και μη ζωνών.
- γ) IEEE πρότυπο 802.16.2™ και 802.16.2a™, που παρέχουν μια συνιστώμενη πρακτική συνύπαρξης
- δ) IEEE 802.16e™, που αναπτύσσεται τώρα για την υποστήριξη κινητών χρηστών.. Επιπρόσθετα, η IEEE 802.16™ έχει προδιαγράψει διαλειτουργία, η οποία συνήθως πραγματοποιείται εκτός των προτύπων IEEE 802.

Συγκεντρωμένα, τα projects της IEEE είναι τα εξής:

Πίνακας 1: IEEE projects

Αριθμός	Περιγραφή
802.16	Fixed Broadband wireless systems between 10 and 66 GHz
802.16a	Amendment for operation between 2 and 11 GHz
802.16c	Enhancement including system profiles between 10 and 66 GHz
802.16.2	Coexistence between 10 and 66 GHz
802.16/Conf01 802.16/Conf02 802.16/Conf03	Test and conformance specifications
802.16d	System profiles
802.16e	Enhancement to support mobility

1.3 Εισαγωγή στην Ασύρματη Πρόσβαση Ευρείας Ζώνης

Τα τελευταία χρόνια, η περιοχή των επικοινωνιών δεδομένων ευρείας ζώνης γνώρισα πολύ μεγάλη ανάπτυξη. Ο όρος “ευρείας ζώνης” χρησιμοποιείται συνήθως για να καταδείξει τη δυνατότητα μεταφοράς σημαντικού εύρους ζώνης σε κάθε χρήστη, πολύ υψηλότερη από τα στενής ζώνης modem φωνής. Ακολουθώντας την ορολογία της ITU, ο όρος “ευρεία ζώνη” σημαίνει ρυθμοί μετάδοσης μεγαλύτεροι από 1.5 Mb/s. Η πρόσβαση στο internet ευρείας ζώνης έγινε μια βιομηχανία μαζικής αγοράς φτάνοντας περισσότερα από 100 εκατομμύρια σπίτια και 3 εκατομμύρια επιχειρήσεις στις ΗΠΑ. Η πρόσβαση ευρείας ζώνης φτάνει ένα ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό σε κάποιες άλλες εκβιομηχανοποιημένες χώρες, όπως η Κορέα και ο Καναδάς. Για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, είναι γνωστό ότι οι κύριες τεχνολογίες για το internet ευρείας ζώνης είναι το DSL, η καλωδιακή, η ασύρματη και οι επικοινωνίες οπτικών ινών. Από αυτές τις 4 τεχνολογίες, οι 2 – το DSL και η καλωδιακή τεχνολογία- είναι ώριμες τεχνολογίες και έχουν φτάσει τη μαζική αγορά. Οι οπτικές επικοινωνίες παρέχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αλλά το κόστος της εγκατάστασης είναι εξαιρετικά υψηλό, πόσο μάλλον σε αστικές περιοχές όπου βρίσκονται οι περισσότεροι πελάτες. Λόγω του κόστους, δεν είναι ξεκάθαρο αν οι οπτικές επικοινωνίες θα μπορέσουν ποτέ να γίνουν μια τεχνολογία μαζικής αγοράς. Παρόλα αυτά, αναμένεται ότι τα συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης θα γίνουν μία τεχνολογία η οποία γενικά είναι ανταγωνιστική στο DSL και την καλωδιακή, συνδέοντας τις οικίες των επιχειρήσεων και των χρηστών με τα κύρια δίκτυα.

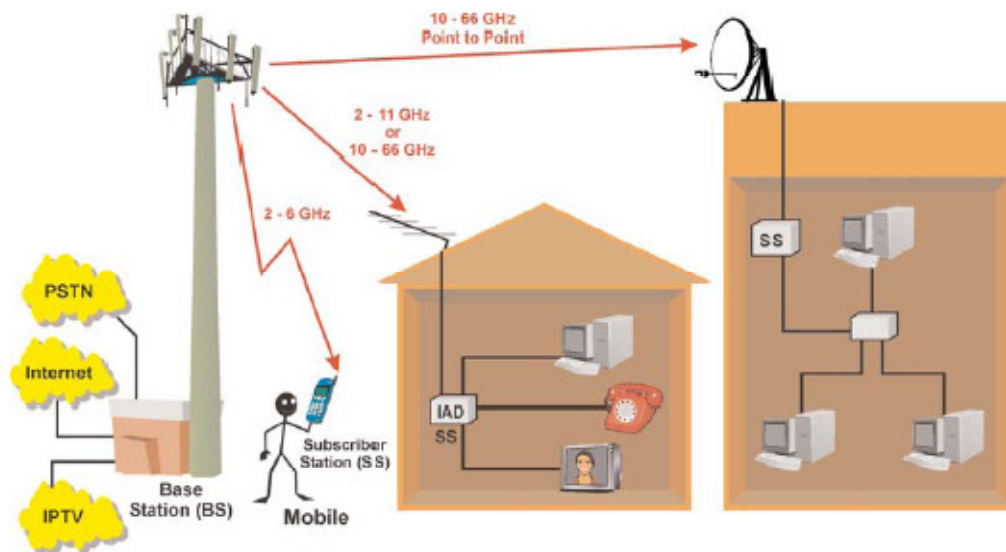
Ξεκάθαρα πλέον, αν τα συστήματα πρόσβασης ευρείας ζώνης πρόκειται να ανταγωνιστούν το DSL και την καλωδιακή πρόσβαση, η ανάπτυξη της αγοράς τους πρέπει να είναι τουλάχιστον σημαντική. Πρώτα, μακροπρόθεσμα, τα συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης είναι ικανά να μεταφέρουν σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς από το DSL ή το καλώδιο. Η τεχνολογία του DSL απαιτεί από τους πελάτες να είναι κοντά στα κεντρικά γραφεία της τηλεφωνικής εταιρείας και μπορεί να μεταφέρει μέχρι 6 Mb/s σε αποστάσεις περί των 18.000 ποδών. Προς το παρόν, οι περισσότεροι κάτοχοι γραμμής DSL έχουν πολύ μικρότερες ταχύτητες. Οι πελάτες που βρίσκονται πάνω από 18.000 πόδια μακριά από το κεντρικό γραφείο της τηλεφωνικής εταιρείας δεν μπορούν να έχουν την υπηρεσία DSL.

Παρόμοια κατάσταση επικρατεί και με την καλωδιακή τεχνολογία, όπου η αντίστοιχη υπηρεσία ευρείας ζώνης μεταφέρει 1.5 Mb/s, αλλά απαιτεί καλώδιο τηλεόρασης. Αν και οι περισσότερες εταιρείες και οι περισσότεροι κάτοικοι στη Βόρεια

Αμερική έχουν πρόσβαση είτε στην τεχνολογία DSL είτε στην καλωδιακή, αρκετοί δεν έχουν. Αυτοί οι χρήστες αποτελούν μια σημαντική υποψήφια αγορά για την πρόσβαση ευρείας ζώνης. Επίσης, συγκρινόμενη με τα δίκτυα DSL και καλωδίου, η χρήση των ασύρματων τεχνικών έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων για τους χρήστες και τους παρόχους των υπηρεσιών. Για τους παρόχους υπηρεσιών, αυτά τα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνουν σχετικά χαμηλού κόστους εξοπλισμό. Για τους χρήστες, τα οφέλη περιλαμβάνουν την ευκολία μιας ασύρματης σύνδεσης.

Ποια είναι όμως η αρχιτεκτονική των δικτύων ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης; Σταθερά συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης τυπικά περιλαμβάνουν τουλάχιστον έναν σταθμό βάσης (Base Station, BS) και έναν αριθμό σταθμών υπηρεσίας (subscriber stations, SS). Επίσης, πιθανόν να υπάρχουν ζεύξεις μεταξύ των σταθμών βάσης, επαναλήπτες και πιθανόν άλλος εξοπλισμός. Οι σταθμοί βάσης παρέχουν συνδέσεις στα κύρια δίκτυα (core networks) από τη μία πλευρά και ραδιοσύνδεση με τους σταθμούς υπηρεσίας από την άλλη.

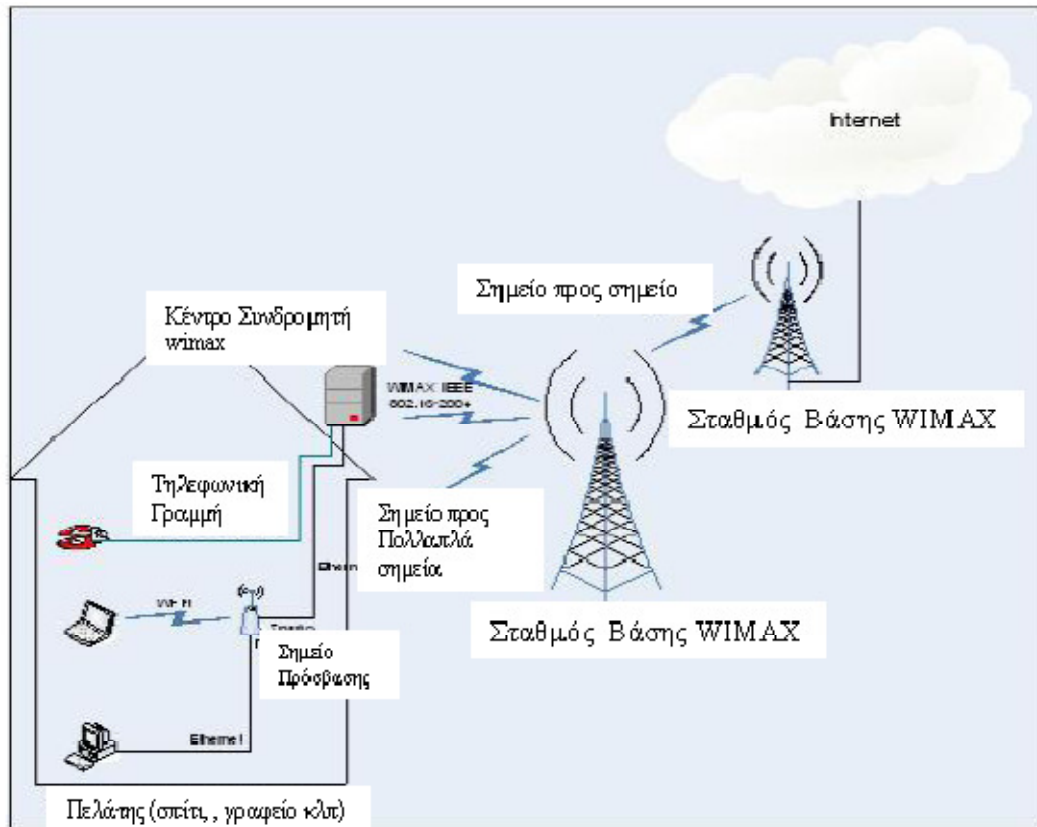
Μια αναφορά στα παραπάνω φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1 : Χρήσεις WiMAX

Τα σταθερά συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης έχουν αρχιτεκτονικές πολλαπλών σημείων (multipoint architectures). Ο όρος multipoint περιλαμβάνει point-to-multipoint (PMP) και multipoint-to-multipoint (MP-MP). Τα συστήματα PMP περιλαμβάνουν σταθμούς βάσης, σταθμούς υπηρεσίας και σε μερικές περιπτώσεις, επαναλήπτες. Στο uplink, δηλαδή κατά την αποστολή σήματος από το τερματικό στο σταθμό βάσης, ο αποστολέας είναι ο σταθμός υπηρεσίας και ο παραλήπτης είναι ο σταθμός βάσης. Στο downlink, αντίστοιχα, ο αποστολέας είναι ο σταθμός βάσης και ο παραλήπτης ο σταθμός υπηρεσίας. Σημειώνουμε ότι μια διαφορά σε σύγκριση με τα WLAN και τα WPAN είναι ότι χρησιμοποιούνται κεραιές με ποικιλία διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν κεραιές σχετικά μεγάλης δέσμης, χωρισμένη σε έναν ή περισσότερους τομείς, παρέχοντας κάλυψη 360ο με μία ή περισσότερες κεραιές. Η κεραιά (μία από όλες) του σταθμού βάσης είναι ικανή να χειρίζεται πολλαπλούς ανεξάρτητους τομείς ταυτόχρονα. Σε ένα κανάλι δεδομένης συχνότητας και δοσμένου τομέα κεραιάς, όλοι οι σταθμοί λαμβάνουν την ίδια εκπομπή. Για να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη μιας

περιοχής, μπορεί να χρειαστούν περισσότεροι του ενός σταθμοί βάσης. Η σύνδεση μεταξύ των σταθμών βάσης δεν είναι μέρος του σταθερού συστήματος ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης. Η σύνδεση επιτυγχάνεται από τη χρήση των ραδιοζεύξεων, καλωδίων οπτικών ινών ή αντίστοιχων μέσων. Οι ζεύξεις μεταξύ των σταθμών βάσης μπορεί μερικές φορές να χρησιμοποιούν κομμάτι από την ίδια ανάθεση συχνότητας όπως τα σταθερά συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης.



Σχήμα 2: Οι ζεύξεις μεταξύ των σταθμών βάσης WiMAX

Η δρομολόγηση στον κατάλληλο σταθμό βάσης είναι μια συνάρτηση του κύριου δικτύου. Γενικά, οι σταθμοί υπηρεσίας χρησιμοποιούν πολύ κατευθυντικές κεραιές προς το σταθμό βάσης. Οι σταθμοί υπηρεσίας μοιράζονται τη χρήση του ραδιοκαναλιού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλες μεθόδους πρόσβασης, όπως διαμοιρασμός συχνότητας, διαμοιρασμός χρόνου ή διαμοιρασμός κώδικα. Μερικά συστήματα χρειάζονται και επαναλήπτες. Σε ένα PMP σύστημα, οι επαναλήπτες γενικά χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την κάλυψη σε τοποθεσίες όπου οι σταθμοί βάσης δεν έχουν οπτική επαφή στις περιοχές τοπικής κάλυψης, ή, εναλλακτικά να επεκτείνουν την κάλυψη ενός συγκεκριμένου σταθμού βάσης πέρα από τη συνηθισμένη ακτίνα εκπομπής του. Ο επαναλήπτης μεταφέρει την πληροφορία από ένα σταθμό βάσης σε έναν ή πολλούς σταθμούς υπηρεσίας. Μπορεί να λειτουργεί στις ίδιες συχνότητες στη ζεύξη καθόδου (downlink), όπως αυτές που χρησιμοποιεί, κοιτώντας το σταθμό βάσης, ή μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες (π.χ. αποδιαμόρφωση και διαμόρφωση της κυκλοφορίας στα διαφορετικά κανάλια). MP- MP ή mesh συστήματα έχουν την ίδια λειτουργικότητα, όπως τα PMP συστήματα. Στα MP-MP συστήματα, η κυκλοφορία μπορεί να περάσει μέσω ενός ή πολλών επαναληπτών ώστε να φτάσει στο σταθμό υπηρεσίας. Οι

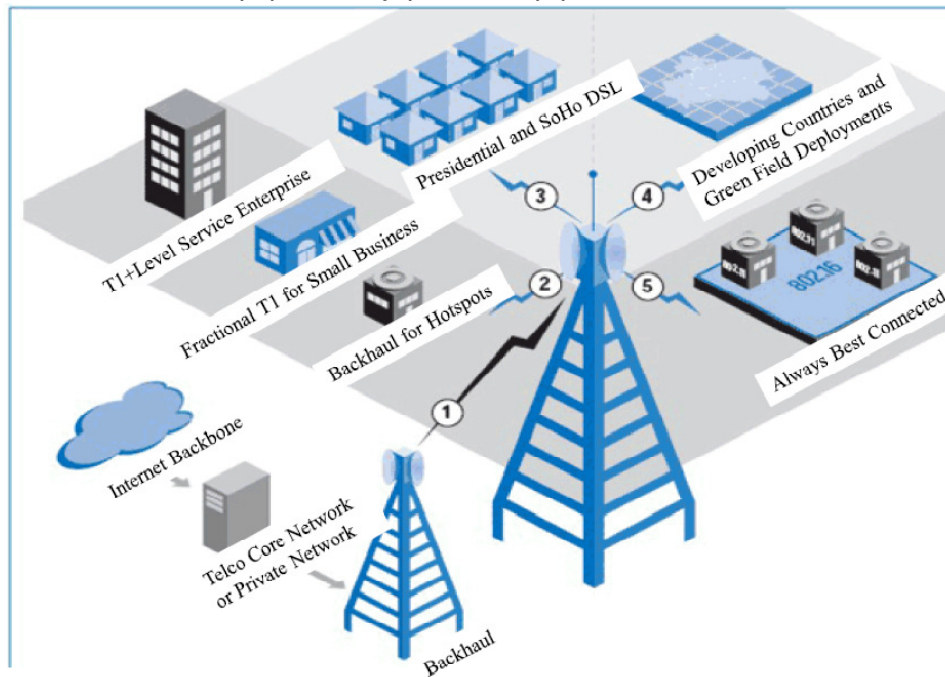
περισσότεροι σταθμοί είναι επαναλήπτες που επίσης παρέχουν συνδέσεις για τοπικούς πελάτες. Οι κεραίες είναι συνήθως κατευθυντικές, τύπου στενής δέσμης με τρόπους για απομακρυσμένη χρήση.

Αυτά τα δίκτυα λειτουργούν με διαφάνεια, έτσι οι χρήστες δε γνωρίζουν ότι οι υπηρεσίες παρέχονται ασύρματικά. Ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης παρέχει σύνδεση σε πολλές κατοικίες χρηστών μέσα σε μια ραδιοκαλυπτόμενη περιοχή. Παρέχει μία ποσότητα εύρους ζώνης, η οποία μοιράζεται αυτόματα σε όλους τους χρήστες. Η ζήτηση από διαφορετικούς χρήστες είναι συχνά στατιστικά μικρής συσχέτισης, επιτρέποντας το δίκτυο να μεταφέρει σημαντικό εύρος ζώνης-υπό-ζήτηση (bandwidth-on-demand) σε πολλούς χρήστες με ένα υψηλό επίπεδο διαθεσιμότητας φάσματος. Γίνεται επίσης σημαντική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. Το εύρος των εφαρμογών είναι πολύ ευρύ και εξελίσσεται γρήγορα. Περιλαμβάνει φωνή, δεδομένα και υπηρεσίας ψυχαγωγίας κάθε είδους. Ο κάθε πελάτης μπορεί να απαιτεί μια διαφορετική ποικιλία από υπηρεσίες. Αυτή η ποικιλία πιθανόν να αλλάζει γρήγορα καθώς οι συνδέσεις εγκαθίστανται ή τερματίζονται. Η ροή της κυκλοφορίας μπορεί να είναι μονοκατευθυντική, ασύμμετρη ή συμμετρική, αλλάζοντας ξανά με τον καιρό. Με μερικές περιοχές, τα συστήματα που μεταφέρουν αυτές τις υπηρεσίες αναφέρονται ως Ασύρματα Συστήματα Πολυμέσων (Multimedia Wireless Systems, MWS) ώστε να αναδεικνύουν την σύγκλιση μεταξύ των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και των υπηρεσιών ψυχαγωγίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ IEEE 802.16

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκρηκτική ανάπτυξη του διαδικτύου κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας έχει οδηγήσει στην ολοένα αυξανόμενη ζήτηση από τους χρήστες του για υψηλής ταχύτητας πρόσβαση σε οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκονται. Οι εταιρίες παροχής υπηρεσιών διαδικτύου (Internet Service Providers –ISPs) προσπάθησαν να καλύψουν τις ανάγκες των πελατών τους με την τεχνολογία DSL (Digital Subscriber Line) η οποία αν και εμφανίστηκε ως πρωτοποριακή λύση τελευταίου-μιλίου (last-mile solution) συνοδευόταν από περιορισμούς στην απόδοση, αφού αναπτύχθηκε επάνω στις ήδη υπάρχουσες τηλεφωνικές γραμμές, αλλά και στην κάλυψη ορισμένων περιοχών (ημιαστικών, αραιοκατοικημένων κλπ.) όπου ο αριθμός υποψηφίων πελατών δε θα δικαιολογούσε τη δαπάνη ανάπτυξης της τεχνολογίας και δε θα προσέφερε τα προσδοκώμενα κέρδη στις εταιρίες. Επιπλέον, η λύση της αντικατάστασης των τηλεφωνικών γραμμών με οπτικές ίνες, προσφέροντας υψηλότερες ταχύτητες, θα ανέβαζε το κόστος της επένδυσης αλλά και το χρόνο υλοποίησης λόγω των απαραίτητων εργασιών (σκάψιμο, άπλωμα των ινών κλπ). Έτσι άρχισε η αναζήτηση εναλλακτικής πρότασης για την λύση τελευταίου μιλίου, με την ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση (Broadband Wireless Access–BWA) να προβάλλει ως η ιδανικότερη.



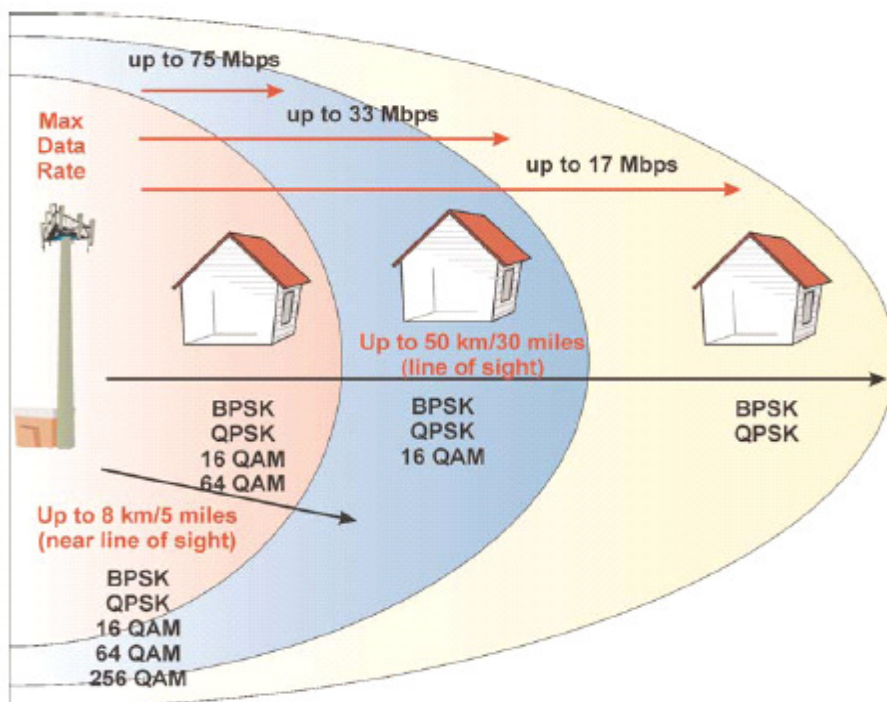
Σχήμα 3: Ένα τυπικό δίκτυο WiMAX

2.2 WiMAX

Ο όρος WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) είναι συνώνυμος με το πρότυπο IEEE 802.16 για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WirelessMAN). Προορισμός του είναι να γίνει μία παγκοσμίως διαθέσιμη τεχνολογία αφού η βάση του (το πρότυπο IEEE 802.16) αναγνωρίζεται ως πρότυπο αναφοράς από το

ETSI (European Telecommunication and Standards Institute) για το αντίστοιχο ευρωπαϊκό HIPERMAN (High Performance Radio MAN) αλλά και για το αντίστοιχο WiBro (Wireless Broadband) που αναπτύσσεται στην Κορέα.

Στην αρχική του έκδοση το πρότυπο IEEE 802.16 αναφερόταν για εφαρμογές απ'ευθείας οπτικής επαφής (Line Of Sight-LOS) στο φάσμα συχνοτήτων 10-66GHz όμως επόμενες τροποποιήσεις το επέκτειναν για εφαρμογές μη οπτικής επαφής (Non-LOS) στο φάσμα συχνοτήτων <11GHz με αδειοδότηση ή χωρίς. Η συνεχής εξέλιξη του θα το καταστήσει σε λίγο καιρό ικανό να απευθύνεται σε κινητούς χρήστες που επιθυμούν ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση. Τα συστήματα WiMAX, καλύπτοντας το κενό μεταξύ των ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless LAN) και των δικτύων ευρείας περιοχής (WAN), θα παράσχουν μία οικονομική εναλλακτική λύση στην ευρυζωνική πρόσβαση με τεχνολογία DSL, όπου αυτή είναι διαθέσιμη, ενώ το πιο σημαντικό είναι ότι θα προσφέρει ευρυζωνική πρόσβαση σε περιοχές όπου το DSL δεν έχει ακόμα φτάσει. [3]



Σχήμα 4: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, περιοχή ασύρματης κάλυψης, φόρτωση καναλιού

2.3 Το πρότυπο IEEE 802.16

Από το 1998 πολλές εταιρίες είχαν ξεκινήσει να αναπτύσσουν και να προσφέρουν προϊόντα για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση. Προκειμένου τα προϊόντα αυτά να ακολουθήσουν ένα συγκεκριμένο πρότυπο, οργανώθηκε το 1999 μία ομάδα εργασίας στα πλαίσια του οργανισμού IEEE 802. Το πρότυπο που προτάθηκε αφορούσε τα ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής WirelessMAN για συχνοτήτες 10-66GHz ενώ το Νοέμβριο του ίδιου έτους ξεκίνησαν οι μελέτες για παρόμοιες υπηρεσίες στις συχνοτήτες 2-11GHz.

2.3.1 IEEE 802.16-2001

Το πρώτο πρότυπο εγκρίθηκε ως WirelessMAN-SC IEEE 802.16-2001 και εκδόθηκε το 2002. Αφορούσε συχνότητες 10-66GHz, όπου υπάρχει ακόμα διαθέσιμο φάσμα παγκοσμίως, και μόνο για επικοινωνίες απ' ευθείας οπτικής επαφής (Line Of Sight-LOS) λόγω των ισχυρών απωλειών διάδοσης που οφείλονται στα μικρά μήκη κύματος. Το πρότυπο προδιέγραφε air-interface μονού φέροντος (Single Carrier), εύρος καναλιών 25 και 28MHz και ρυθμούς έως 120Mbps σε κανάλι 25MHz.

2.3.2 IEEE 802.16c

Αποτέλεσε την πρώτη τροποποίηση του IEEE 802.16-2001 και συμπεριλάμβανε χαρακτηριστικά συστημάτων που ορίστηκαν ως η βάση για τη διεξαγωγή των τεστ συμμόρφωσης των διαφόρων συστημάτων με τις προδιαγραφές του προτύπου.

2.3.3 IEEE 802.16a

Τον Απρίλιο του 2003 εκδόθηκε το πρότυπο IEEE 802.16a που αφορούσε συχνότητες 2-11GHz συμπεριλαμβάνοντας τις συχνότητες με ή χωρίς αδειοδότηση χρήσης τους, για επικοινωνίες μη οπτικής επαφής (Non-LOS) και επομένως σε περιβάλλον με ισχυρές απώλειες λόγω πολυδιαδρομικής παρεμβολής. Το πρότυπο προδιέγραφε τρία air interface :

- i. WirelessMAN-SC μονού φέροντος
- ii. WirelessMAN-OFDM με μετασχηματισμό 256 σημείων
- iii. WirelessMAN-OFDMA με μετασχηματισμό 2048 σημείων ενώ προέβλεπε ρυθμούς έως 70Mbps σε κανάλι 14MHz και σε απόσταση μέχρι 50Km.

2.3.4 IEEE 802.16-2004

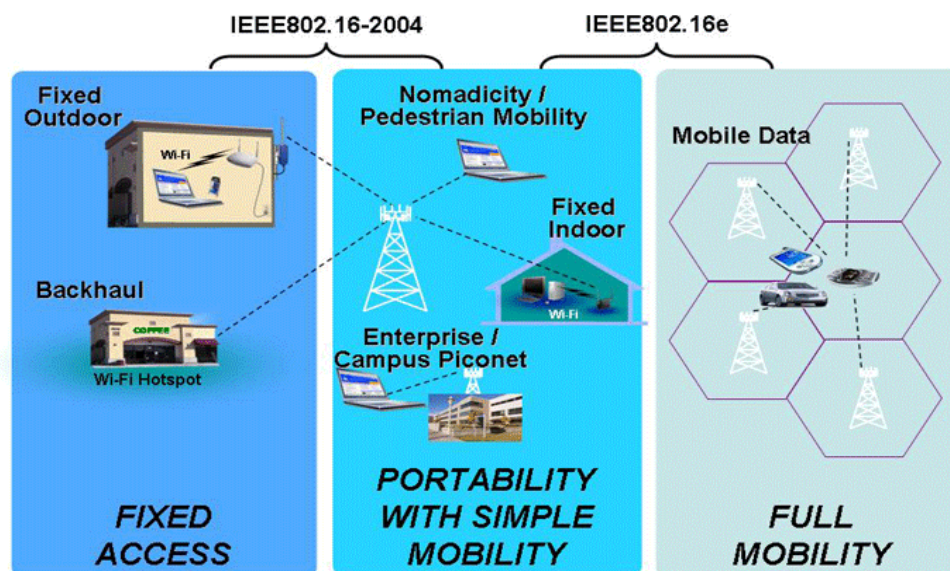
Το 2004 εκδόθηκε το πρότυπο IEEE 802.16-2004 το οποίο αναθεώρησε και αντικατέστησε όλα τα προηγούμενα. Αναφέρεται σε σταθερά συστήματα ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης που υποστηρίζουν υπηρεσίες πολυμέσων. Το πρότυπο προδιαγράφει πέντε air interfaces:

- i. WirelessMAN-SC για συχνότητες 10-66GHz
- ii. WirelessMAN-SCa για αδειοδοτημένες συχνότητες <11GHz
- iii. WirelessMAN-OFDM για αδειοδοτημένες συχνότητες <11GHz
- iv. WirelessMAN-OFDMA για αδειοδοτημένες συχνότητες <11GHz
- v. WirelessHUMAN για μη αδειοδοτημένες συχνότητες <11GHz

Το πρότυπο είναι σε χρήση έως σήμερα και περαιτέρω ανάλυσή του θα ακολουθήσει σε επόμενο κεφάλαιο.

2.3.5 IEEE 802.16e

Το Δεκέμβριο του 2005 εκδόθηκε το IEEE 802.16e που αφορά την ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση για κινητά συστήματα. Το πρότυπο υιοθετεί air interface OFDMA για βελτιωμένη πολυδιαδρομική απόδοση σε περιβάλλοντα μη απ'ευθείας οπτικής επαφής (NLOS). Παρουσιάζεται ακόμη η κλιμακωτή OFDMA (Scalable OFDMA-SOFDMA) για να υποστηρίξει κλιμακούμενα εύρη καναλιών από 1.25 έως 20MHz . Η πρώτη έκδοση του προτύπου καλύπτει εύρη καναλιών 5, 7, 8.75 και 10MHz για τις αδειοδοτημένες συχνότητες 2.3, 2.5 και 3.5GHz ενώ προβλέπει ρυθμούς downlink έως 63Mbps, uplink έως 28Mbps σε κανάλι εύρους 10MHz.[4][5][6]



Σχήμα 5: Σχηματική διασύνδεση προτύπων WiMAX

2.4 WiMAX Forum

Το WiMAX Forum είναι μία μη κερδοσκοπική οργάνωση που δημιουργήθηκε από τους κατασκευαστές συστημάτων WiMAX (ολοκληρωμένων ή τμημάτων αυτών) καθώς και από παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών με σκοπό να προάγει και να πιστοποιήσει τη συμβατότητα και τη διαλειτουργικότητα των προϊόντων που προσφέρουν ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση και λειτουργούν στη βάση που καθορίζουν τα πρότυπα IEEE 802.16 και ETSI HiperMAN για τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WirelessMAN).

Με έτος έναρξης των λειτουργιών το 2003 και με ιδρυτικά μέλη τις Intel, Alvarion, ATT, Array Com, Nortel, Motorola, Samsung κ.α. σήμερα αριθμεί πάνω από 350 μέλη στη λίστα των οποίων περιλαμβάνονται τα κορυφαία ονόματα στο χώρο των κατασκευαστών-τηλεπικοινωνιών-παρόχων δικτύων όπως Nokia, Vodafone, BellSouth, Cisco Systems, Verizon, China Telecom και πολλοί άλλοι.

2.4.1 Στόχος του WiMAX Forum

Στόχος του Forum είναι η επιτάχυνση της εισαγωγής στην αγορά των μητροπολιτικών ευρυζωνικών εφαρμογών για σταθερά, φορητά και κινητά συστήματα. Ο μόνος τρόπος που μπορεί να επιτευχθεί αυτό είναι με τη διεξαγωγή ελέγχων που γίνονται

σε ανεξάρτητα εργαστήρια (το εργαστήριο Cetecom στην Ισπανία ήταν το πρώτο που πραγματοποίησε ελέγχους σε εξοπλισμό WiMAX ενώ πρόσφατα το εργαστήριο Telecommunications Technology Association (TTA) στην Κορέα λειτουργεί ως δεύτερο εργαστήριο πιστοποίησης) και την πιστοποίηση από το Forum ότι τα συστήματα αυτά λειτουργούν με βάση τα πρότυπα και ότι είναι εγγυημένη η διαλειτουργικότητα μεταξύ τους.

2.4.2 WiMAX Forum Certified™

Το πρόγραμμα πιστοποίησης WiMAX Forum Certified™ ξεκίνησε στα μέσα του 2005 και εξασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των κατασκευαστών, ενώ τα πρώτα πιστοποιημένα προϊόντα ανακοινώθηκαν τον Ιανουάριο του 2006 και βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.16-2004 για σταθερά συστήματα WiMAX. Τα πρώτα προϊόντα κινητών συστημάτων WiMAX (πρότυπο IEEE 802.16e) αναμένεται να πιστοποιηθούν το 2007.

2.4.2.1 Χαρακτηριστικά πιστοποίησης

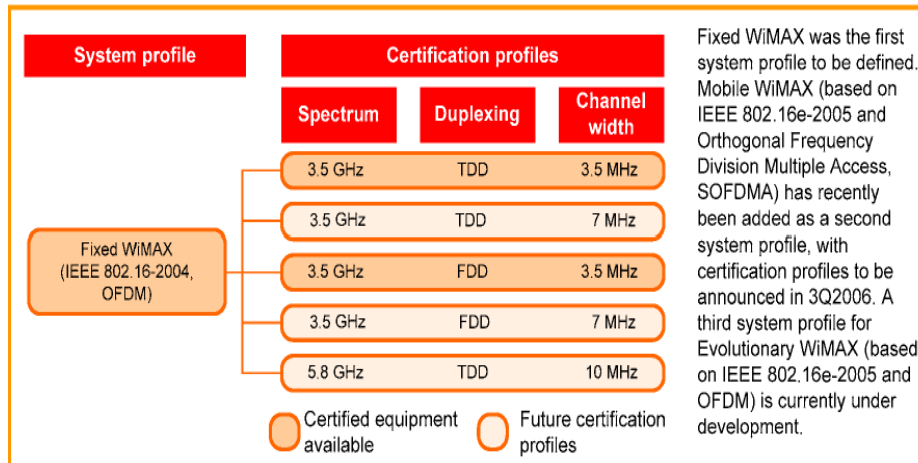
Οι απαιτήσεις για την εξέταση των προϊόντων WiMAX καθορίζονται από τα προφίλ του συστήματος και τα προφίλ πιστοποίησης.

Τα προφίλ συστήματος βασίζονται στις διάφορες εκδοχές των προτύπων IEEE 802.16 και ETSI HiperMAN και καθορίζουν τα υποχρεωτικά και προαιρετικά χαρακτηριστικά που ελέγχονται σε εξοπλισμό WiMAX. Η λίστα των χαρακτηριστικών που ελέγχονται είναι πιο αυστηρή απ' ό,τι στα ήδη υπάρχοντα πρότυπα (χαρακτηριστικά που προαιρετικά ελέγχονται σε άλλα πρότυπα υπόκεινται σε υποχρεωτικούς ελέγχους σε εξοπλισμό που ακολουθεί τα πρότυπα του WiMAX) αλλά δεν περιλαμβάνει κανένα νέο χαρακτηριστικό που δεν περιλαμβάνεται ήδη στα πρότυπα. Για παράδειγμα το προφίλ συστήματος που βασίζεται στο 802.16-2004 για σταθερά συστήματα WiMAX προβλέπει τον έλεγχο λειτουργίας σε συχνότητες έως 11GHz ενώ το πρότυπο προβλέπει τη λειτουργία και σε συχνότητες έως 66GHz.

Προς το παρόν υπάρχουν δύο προφίλ συστήματος, ένα για σταθερό και ένα για κινητό σύστημα WiMAX. Το προφίλ σταθερού συστήματος υποστηρίζει πέντε προφίλ πιστοποίησης που καθορίζουν την κλάση των προϊόντων που διαλειτουργούν μεταξύ τους με βάση:

- i. τη συχνότητα λειτουργίας (<11GHz)
- ii. το εύρος των καναλιών (1.75–10MHz) και
- iii. τη μέθοδο duplexing (TDD ή FDD)

Σήμερα έχουν οριστεί τα προφίλ πιστοποίησης στα 3.5GHz όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο η TDD (Time Division Duplex) όσο και η FDD (Frequency Division Duplex) καθώς και στα 5.8GHz με TDD.



Σχήμα 6: Προφίλ συστήματος και πιστοποίησης [7]

Από το Μάιο του 2006 τα προϊόντα WiMAX πιστοποιούνται με βάση την 1^η έκδοση (Release 1) που επικεντρώνεται αποκλειστικά στον υποχρεωτικό έλεγχο: του air interface, της εισόδου στο δίκτυο, των δυναμικών υπηρεσιών και της κατανομής του εύρους ζώνης. Η 2^η έκδοση (Release 2) θα περιλαμβάνει επιπλέον και τρεις (3) προαιρετικούς ελέγχους:

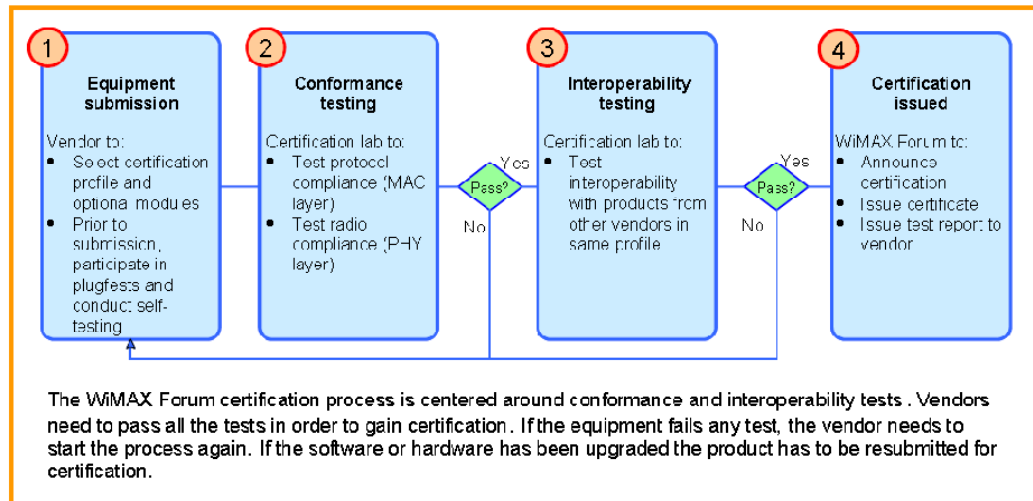
- i. Ποιότητα υπηρεσίας (QoS) για βελτιωμένη υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου (real-time)
- ii. Πρότυπο βελτιωμένης κρυπτογράφησης AES (Advanced Encryption Standard) για ενισχυμένη ασφάλεια
- iii. Αυτόματη αίτηση επανεκπομπής ARQ (Automatic Repeat reQuest) για βελτιωμένο link budget

Περαιτέρω προαιρετικοί έλεγχοι για χαρακτηριστικά όπως sub-channelization για τη ζεύξη ανόδου (uplink), CTC (Convolutional Turbo Code) και STC (Space Time Coding) μπορούν να πραγματοποιηθούν σε οποιοδήποτε έλεγχο πιστοποίησης όταν τουλάχιστον τρεις (3) κατασκευαστές υποβάλλουν προϊόντα που τα υποστηρίζουν.

2.4.2.2 Διαδικασία πιστοποίησης

Η διαδικασία πιστοποίησης, περιλαμβάνει δύο είδη ελέγχων που επικεντρώνονται, όπως άλλωστε και τα πρότυπα τα οποία ακολουθούν τα υπό δοκιμή προϊόντα, στο φυσικό στρώμα (PHY layer) και στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control layer):

- i. Έλεγχος προσαρμογής, που διασφαλίζει ότι το προϊόν ενσωματώνει σωστά τις προδιαγραφές που καθορίζουν τα πρότυπα.
- ii. Έλεγχος διαλειτουργικότητας, για να διαπιστωθεί ότι προϊόντα διαφορετικών κατασκευαστών λειτουργούν εντός του ίδιου δικτύου.



Σχήμα 7: Η διαδικασία πιστοποίησης [7]

Τουλάχιστον τρεις (3) κατασκευαστές θα πρέπει να υποβάλλουν προϊόντα εντός του ίδιου προφίλ πιστοποίησης προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία ελέγχου διαλειτουργικότητας.

Όλα τα προϊόντα που εξετάστηκαν με το ίδιο προφίλ πιστοποίησης και με τα κριτήρια της ίδιας έκδοσης (Release) διαλειτουργούν εξ' ολοκλήρου μεταξύ τους αλλά είναι και συμβατά με προϊόντα που εξετάστηκαν με κριτήρια προηγούμενης έκδοσης (backward compatibility). Νέες εκδόσεις θα δώσουν τη δυνατότητα στους παρόχους δικτύων να εισάγουν καινούργια χαρακτηριστικά στο δίκτυό τους και να γνωρίζουν ποια από αυτά υποστηρίζονται από τα διάφορα τμήματα (εξοπλισμούς) του δικτύου.

Σε ένα δίκτυο WiMAX με εξοπλισμό πιστοποιημένο με κριτήρια διαφορετικών εκδόσεων, η διαλειτουργικότητα θα περιορίζεται στα χαρακτηριστικά εκείνα που ελέγχθηκαν υπό τα κριτήρια της παλαιότερης έκδοσης.

2.4.2.3 Οφέλη πιστοποίησης

Η διαλειτουργικότητα είναι ο πιο προφανής λόγος για έναν πάροχο δικτύου ή έναν συνδρομητή να επιλέξει προϊόντα με την πιστοποίηση WiMAX Forum Certified. Ωστόσο η πιστοποίηση φέρνει επιπλέον πλεονεκτήματα που θέτουν τη βάση για την ευρείας κλίμακας υιοθέτηση της τεχνολογίας WiMAX, αφού το πρόγραμμα πιστοποίησης:

- Καθορίζει τον τρόπο εφαρμογής των προτύπων IEEE 802.16, ETSI HiperMAN στα προϊόντα WiMAX

- Μειώνει το συνολικό κόστος αφού η επικέντρωση των προσπαθειών στην ανάπτυξη μίας τεχνολογίας σε συνδυασμό με την ταχύτερη αύξηση της ζήτησης για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση, θα οδηγήσει στη γρήγορη μείωση των τιμών στα προϊόντα WiMAX

- Αυξάνει τον ανταγωνισμό στην αγορά, ενθαρρύνοντας περισσότερους κατασκευαστές στην παραγωγή προϊόντων WiMAX και οδηγώντας σε περαιτέρω μείωση των τιμών. Επιπλέον οι κατασκευαστές θα έχουν τη δυνατότητα να επικεντρωθούν στην

ανάπτυξη συγκεκριμένων προϊόντων (π.χ. μόνο σταθμούς βάσης ή συγκεκριμένους τύπους εξοπλισμού για συνδρομητές) οδηγώντας στην ταχύτερη εξέλιξή τους.

2.4.2.3.1 Πάροχοι δικτύου

Πιο συγκεκριμένα, τα οφέλη για τους παρόχους δικτύων είναι:

i. Δυνατότητα επιλογής εξοπλισμού από πολλούς κατασκευαστές κερδίζοντας έτσι ευελιξία στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη του δικτύου τους και μειώνοντας το οικονομικό ρίσκο αφού η χρήση πιστοποιημένων προϊόντων τους δίνει την ευχέρεια να ενσωματώσουν καινούργιο εξοπλισμό στο δίκτυο χωρίς να είναι απαραίτητη η αφαίρεση-κατάργηση του παλαιού που είναι ήδη εγκατεστημένου και σε λειτουργία.

ii. Μείωση των τιμών του εξοπλισμού λόγω του αυξημένου ανταγωνισμού των κατασκευαστών.

iii. Συμβατότητα εξοπλισμών (backward compatibility) μειώνοντας το οικονομικό ρίσκο, αφού υπάρχει η εξασφάλιση ότι ο καινούργιος εξοπλισμός θα διαλειτουργεί με τον ήδη υπάρχοντα.

2.4.2.3.2 Κατασκευαστές

Ταυτόχρονα, τα οφέλη για τους κατασκευαστές προϊόντων WiMAX είναι:

i. Πρόσβαση σε διευρυμένη αγορά, αφού οι χαμηλές τιμές, ο αυξημένος ανταγωνισμός και η ευελιξία που προσφέρεται στους παρόχους δικτύων (όπως αναφέρθηκε παραπάνω) θα ανεβάσει τη ζήτηση για προϊόντα WiMAX και θα δημιουργήσει περισσότερες ευκαιρίες για τους κατασκευαστές.

ii. Οφέλη από τη μείωση του κόστους παραγωγής. Χαμηλότερες τιμές δε σημαίνει απαραίτητα χαμηλό κέρδος αφού θα αντισταθμιστεί με το χαμηλό κόστος παραγωγής λόγω της αύξησης του όγκου των πωλήσεων.

iii. Ανταπόκριση στις ανάγκες και τις απαιτήσεις των παρόχων δικτύων για διαλειτουργικότητα χωρίς τη διεξαγωγή επιπλέον δοκιμών.

iv. Εξασφάλιση διαλειτουργικότητας πριν την είσοδο των προϊόντων στην αγορά οπότε και είναι ευκολότερη και οικονομικότερη η επίλυση των τυχόν προβλημάτων συμβατότητας και διαλειτουργικότητας που θα προκύψουν.[7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - WLAN 802.11x

3.1 Εισαγωγή

Το IEEE 802.11 πρότυπο καταδεικνύει ένα σύνολο προτύπων WLAN που αναπτύσσονται από την ομάδα εργασίας 11 του Institute of Electrical and Electronics Engineers LAN/MAN Standards Committee (IEEE 802). Ο όρος 802.11x χρησιμοποιείται επίσης για να δείξει αυτό το σύνολο προτύπων και δεν πρέπει να μπερδεύεται με οποιοδήποτε από τα στοιχεία του. Δεν υπάρχει από μόνο του πρότυπο 802.11x. Ο όρος IEEE 802.11 χρησιμοποιείται επίσης για να αναφερθεί στο αρχικό 802.11, το οποίο τώρα μερικές φορές καλείται "802.11 legacy". Η οικογένεια 802.11 περιλαμβάνει αυτή την περίοδο έξι τεχνικές διαμόρφωσης που όλες χρησιμοποιούν το ίδιο πρωτόκολλο. Οι δημοφιλέστερες (και πιο παραγωγικές) τεχνικές είναι εκείνες που καθορίζονται από τις τροποποιήσεις a, b και g στα αρχικά πρότυπα. Η ασφάλεια συμπεριλήφθηκε από την αρχή και ενισχύθηκε αργότερα μέσω της τροποποίησης 802.11i. Άλλα πρότυπα στην οικογένεια (c,f,h,j,n) είναι αναβαθμίσεις υπηρεσιών και επεκτάσεις ή διορθώσεις στις προηγούμενες προδιαγραφές. Το 802.11b ήταν το πρώτο ήταν το πρώτο ευρέως αποδεκτό πρότυπο δικτύωσης που ακολουθήθηκε από τα 802.11a και g. Τα πρότυπα 802.11b και g χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz που λειτουργεί σύμφωνα με τους κανόνες του μέρους 15 της FCC (Federal Communications Commission).

Το πρότυπο 802.11a χρησιμοποιεί τη ζώνη των 5 GHz. Η λειτουργία στη ζώνη συχνότητας 2.4 GHz του εξοπλισμού 802.11b και 802.11g μπορεί να υποστεί παρεμβολή από φούρνους μικροκυμάτων, ασύρματα τηλέφωνα, συσκευές Bluetooth, και άλλες συσκευές που χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Το ποιο μέρος του φάσματος ραδιοσυχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ποικίλλει μεταξύ των χωρών, με τους αυστηρότερους περιορισμούς να έχουν τεθεί στις ΗΠΑ. Ενώ είναι αλήθεια ότι στις ΗΠΑ οι 802.11a και g συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν νόμιμα χωρίς μια άδεια, δεν είναι αλήθεια ότι τα 802.11a και g λειτουργούν σε μια χωρίς άδεια (unlicensed) περιοχή του φάσματος ραδιοσυχνότητας. Η χωρίς άδεια (νόμιμη) λειτουργία του 802.11 a & g καλύπτεται από το μέρος 15 των FCC κανόνων.

3.2 Πρωτόκολλα

3.2.1 Το αρχικό πρότυπο 802.11

Η αρχική έκδοση του τυποποιημένου IEEE 802.11 που αποδεσμεύτηκε το 1997 ορίζει δύο ακατέργαστους (raw) ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2Mbps για να διαβιβαστεί μέσω των υπέρυθρων σημάτων (IR) στη βιομηχανική ή επιστημονική ιατρική ζώνη συχνότητας στα 2.4GHz. Το IR παραμένει ένα μέρος των προτύπων αλλά δεν έχει καμία πραγματική εφαρμογή.

Τα αρχικά πρότυπα καθορίζουν την CSMA/CA ως μέθοδο προσπέλασης μέσου. Ένα σημαντικό ποσοστό της διαθέσιμης ακατέργαστης χωρητικότητας των καναλιών θυσιάζεται (μέσω των μηχανισμών CSMA/CA) προκειμένου να βελτιωθεί η αξιοπιστία των μεταδόσεων των δεδομένων υπό διαφορετικές και δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τουλάχιστον πέντε διαφορετικά, κάπως διαλειτουργικά, εμπορικά προϊόντα εμφανίστηκαν χρησιμοποιώντας την αρχική προδιαγραφή, από επιχειρήσεις όπως οι Alvarion (PRO.11 και BreezeAccess-II), Netwave Technologies (AirSurfer Plus and AirSurfer Pro), Symbol Technologies (Spectrum24), και Proxim (OpenAir). Μια αδυναμία αυτής της αρχικής προδιαγραφής ήταν ότι πρόσφερε τόσες πολλές επιλογές ώστε η διαλειτουργικότητα ήταν μερικές φορές πολύ δύσκολο να συνειδητοποιηθεί. Είναι πραγματικά περισσότερο μια "μετα-προδιαγραφή" παρά μια άκαμπτη προδιαγραφή, επιτρέποντας στους μεμονωμένους προμηθευτές προϊόντων την ευελιξία να διαφοροποιήσουν τα προϊόντα τους. Το Legacy 802.11 συμπληρώθηκε γρήγορα (και διαδόθηκε) από το 802.11b. Η διαδεδομένη υιοθέτηση των δικτύων 802.11 εμφανίστηκε μόνο αφότου το 802.11b επικυρώθηκε και κατά συνέπεια λίγα δίκτυα έτρεξαν στο απλό 802.11 πρότυπο.

3.2.2 Το πρότυπο 802.11b

Η τροποποίηση 802.11b στο αρχικό πρότυπο επικυρώθηκε το 1999. Το 802.11b έχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 11Mbps και χρησιμοποιεί το CSMA/CA ως μέθοδο προσπέλασης μέσου, όπως και το αρχικό πρότυπο. Λόγω του CSMA/CA, στην πράξη ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να πετύχει μια 802.11b εφαρμογή είναι 5.9Mbps σε TCP και 7.1Mbps σε UDP. Τα προϊόντα 802.11b εμφανίστηκαν στην αγορά πολύ γρήγορα, δεδομένου ότι το 802.11b είναι μια άμεση επέκταση της τεχνικής διαμόρφωσης DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Τεχνικά, το 802.11b χρησιμοποιεί την Complementary Code Keying (CCK) ως τεχνική διαμόρφωσης, που είναι μία διαφοροποίηση του CDMA. Ως εκ τούτου, τα chipsets και τα υπόλοιπα προϊόντα εύκολα αναβαθμίστηκαν ώστε να υποστηρίζουν τις αναβαθμίσεις του 802.11b. Η δραματική αύξηση στη ρυθμοαπόδοση (throughput) του 802.11b (έναντι των αρχικών προτύπων) μαζί με τις ουσιαστικές μειώσεις τιμών οδήγησαν στη γρήγορη αποδοχή του 802.11b ως οριστική ασύρματη τεχνολογία του τοπικού LAN. Το 802.11b χρησιμοποιείται συνήθως σε μια point-to-multipoint (PMP) διαμόρφωση, όπου ένα σημείο πρόσβασης επικοινωνεί μέσω μιας πανκατευθυντικής κεραίας (omni-directional antenna) με έναν ή περισσότερους πελάτες που βρίσκονται σε μια περιοχή κάλυψης γύρω από το σημείο πρόσβασης. Η χαρακτηριστική indoor κάλυψη είναι 30m σε ρυθμό 11Mbps και 90m σε 1Mbps. Με τις εξωτερικές κεραίες υψηλού κέρδους, το πρωτόκολλο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στις σταθερές, από σημείο σε σημείο (PtP) εφαρμογές σε τυπικές εμβέλειες 8km, παρόλο που κάποιες αναφορές υποστηρίζουν την επίτευξη εμβελειών της τάξης των 80-120km, εφόσον υπάρχει οπτική επαφή (LOS). Αυτό γίνεται συνήθως αντί των δαπανηρών μισθωμένων γραμμών ή του πολύ δυσκίνητου εξοπλισμού τηλεπικοινωνιών μέσω μικροκυμάτων.

Οι σχεδιαστές τέτοιων εγκαταστάσεων που επιθυμούν να παραμείνουν εντός των διατάξεων του νόμου πρέπει εντούτοις να είναι προσεκτικοί για τους νομικούς περιορισμούς σχετικά με την ενεργή ακτινοβολούσα δύναμη (effective radiated power). Οι κάρτες 802.11b μπορούν να λειτουργήσουν σε 11Mbps, αλλά θα κλιμακωθούν σε 5.5, κατόπιν 2, κατόπιν 1Mbps (Adaptive Rate Selection-προσαρμοστική επιλογή ρυθμού), εάν η ποιότητα σημάτων γίνει θέμα. Δεδομένου ότι οι χαμηλότεροι ρυθμοί δεδομένων χρησιμοποιούν τις λιγότερο σύνθετες και πιο επαρκείς μεθόδους κωδικοποίησης των δεδομένων, είναι λιγότερο ευαίσθητοι στην παραμόρφωση λόγω της παρεμβολής και της εξασθένησης των σημάτων. Επεκτάσεις έχουν γίνει στο πρωτόκολλο 802.11b (π.χ., σύνδεση καναλιών και τεχνικές μετάδοσης εκρηκτικής κίνησης) προκειμένου να αυξηθεί η ταχύτητα σε 22, 33, και 44Mbps, αλλά οι επεκτάσεις δεν έχουν επικυρωθεί από την IEEE.

Πολλές επιχειρήσεις καλούν τις ενισχυμένες εκδόσεις "802.11b +". Τις επεκτάσεις αυτές τις έχει προλάβει κατά ένα μεγάλο μέρος η ανάπτυξη του 802.11g που έχει ρυθμό μετάδοσης μέχρι 54Mbps και είναι backwards-compatible (συμβατό με προηγούμενες εκδόσεις) με το 802.11b.

3.2.3 Το πρότυπο 802.11a

Η τροποποίηση 802.11a στο αρχικό πρότυπο επικυρώθηκε το 1999. Το πρότυπο 802.11a χρησιμοποιεί το ίδιο βασικό πρωτόκολλο με το αρχικό πρότυπο, λειτουργεί στη ζώνη 5GHz, και χρησιμοποιεί 52 sub-carrier OFDM με ένα μέγιστο raw ρυθμό μετάδοσης 54Mbps, το οποίο παράγει ρεαλιστική καθαρή επιτεύξιμη ρυθμοαπόδοση περίπου στα 20Mbps. Ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να μειωθεί σε 48, 36, 24, 18, 12, 9 έπειτα 6Mbps, αν είναι απαραίτητο. Το 802.11a έχει 12 μη-επικαλυπτόμενα κανάλια, 8 για indoor και 4 για point-to-point (P2P) χρήση. Δεν είναι διαλειτουργικό με το 802.11b, εκτός εάν χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός που χρησιμοποιείται και στα δύο πρότυπα.

Δεδομένου ότι η ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz χρησιμοποιείται ευρέως, η χρησιμοποίηση της ζώνης 5GHz δίνει στο 802.11a το πλεονέκτημα της μικρότερης παρεμβολής. Εντούτοις, αυτή η υψηλή συχνότητα φερόντων έχει επίσης και μειονεκτήματα. Περιορίζει τη χρήση του 802.11a σε LOS, γεγονός που απαιτεί τη χρήση περισσότερων σημείων πρόσβασης. Επίσης, σημαίνει ότι το 802.11a δεν μπορεί να διεισδύσει στην αγορά όσο το 802.11b, δεδομένου ότι το σήμα απορροφάται ευκολότερα, ασχέτως εάν έχουν ίδια ισχύ. Διαφορετικές χώρες έχουν διαφορετική ρυθμιστική υποστήριξη, αν και η Παγκόσμια Διάσκεψη Τηλεπικοινωνιών (World Radiotelecommunications Conference) του 2003 την κατέστησε ευκολότερη για παγκόσμια χρήση.

Το 802.11a εγκρίθηκε αμέσως από τους κανονισμούς στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία αλλά σε άλλες περιοχές, όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση έπρεπε να περιμένει περισσότερο για έγκριση. Οι ευρωπαϊκοί ρυθμιστές εξέταζαν τη χρήση των ευρωπαϊκών προτύπων HIPERLAN, αλλά στο μέσο του 2002 εγκρίθηκε η χρήση του 802.11a και στην Ευρώπη. Στις ΗΠΑ, μια απόφαση της FCC στο μέσο του 2003 έδωσε περισσότερο φάσμα στα κανάλια 802.11a. Από τα 52 subcarriers OFDM, τα 48 είναι για δεδομένα και 4 είναι subcarriers-πilotοι με έναν χωρισμό φέροντος 0.3125MHz (20MHz/64). Κάθε ένα από αυτά τα subcarriers μπορεί να είναι BPSK, QPSK, 16QAM ή 64QAM. Το συνολικό εύρος ζώνης είναι 20MHz με ένα κατειλημμένο εύρος ζώνης 16.6MHz. Η διάρκεια συμβόλου είναι 4sec με ένα διάστημα φύλαξης (guard interval) 0.8msec. Η πραγματική παραγωγή και η αποκωδικοποίηση των ορθογώνιων συνιστωσών γίνονται στη ζώνη βάσης χρησιμοποιώντας DSP (Digital Signal Computing) που μετατρέπεται σε 5GHz στον πομπό. Κάθε ένα από τα subcarriers θα μπορούσε να παρασταθεί ως σύνθετος αριθμός. Το σήμα στο πεδίο του χρόνου παράγεται με τη λήψη ενός Αντίστροφου Γρήγορου Μετασχηματισμού Φουριέ (IFFT). Αντίστοιχα ο δέκτης μετατρέπει κάτω, τα δείγματα σε 20MHz και κάνει έναν FFT για να ανακτήσει τους αρχικούς συντελεστές. Τα πλεονεκτήματα της OFDM περιλαμβάνουν τη μειωμένη επίδραση της πολυδιαυλικής παρεμβολής στη λήψη και την αυξημένη φασματική αποδοτικότητα.

Τα προϊόντα 802.11a άρχισαν το 2001, καθυστερώντας τα προϊόντα 802.11b λόγω της αργής διαθεσιμότητας των 5GHz στοιχείων που απαιτήθηκαν για να δημιουργηθούν τα προϊόντα αυτά. Το 802.11a δεν υιοθετήθηκε ευρέως στο σύνολο του επειδή το 802.11b ήταν ήδη ευρέως υιοθετημένο, λόγω των μειονεκτημάτων του 802.11a, λόγω των φτωχών

αρχικών προϊόντων εφαρμογής που καθιστούσαν την εμβέλεια του ακόμα πιο περιορισμένη και λόγω των κανονισμών. Οι κατασκευαστές του εξοπλισμού 802.11a αποκρίθηκαν στην έλλειψη επιτυχίας στις αγορές με τη βελτίωση των εφαρμογών (η τεχνολογία της τρέχουσας γενιάς 802.11a έχει χαρακτηριστικά εμβέλειας πολύ πιο κοντά σε εκείνα του 802.11b), και με την παραγωγή τεχνολογίας που μπορεί να χρησιμοποιήσει περισσότερα από ένα 802.11 πρότυπα. Υπάρχουν κάρτες dual-band, dual-mode ή tri-mode που μπορούν αυτόματα να χειριστούν τα 802.11a και το b, ή το a, το b και το g. Ομοίως, υπάρχουν σημεία πρόσβασης που μπορούν να υποστηρίξουν όλα αυτά τα πρότυπα ταυτόχρονα.

3.2.4 Το πρότυπο 802.11g

Τον Ιούνιο του 2003, ένα τρίτο πρότυπο διαμόρφωσης επικυρώθηκε: το 802.11g. Αυτή η μορφή λειτουργεί στα 2.4GHz (όπως το 802.11b) αλλά επιτυγχάνει ένα μέγιστο ακατέργαστο ρυθμό μετάδοσης 54Mbps ή περίπου καθαρή ρυθμοαπόδοση 24.7Mbps όπως το υλικό (hardware) 802.11a. Το 802.11g θα λειτουργήσει με το υλικό 802.11b. Οι λεπτομέρειες της προσπάθειας καλής κοινής λειτουργίας των b και g κατέλαβε ένα μεγάλο μέρος της παρατεταμένης τεχνικής διαδικασίας. Στα παλαιότερα δίκτυα, εντούτοις, η παρουσία ενός συμμετέχοντος 802.11b μειώνει σημαντικά την ταχύτητα ενός δικτύου 802.11g. Το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στο 802.11g είναι OFDM για ρυθμούς μετάδοσης των 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 και 54Mbps, και μετατρέπεται (όπως το πρότυπο 802.11b) σε CCK για 5.5 και 11Mbps και DBPSK/DQPSK+DSSS για 1 και 2Mbps. Παρόλο που το 802.11g λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνότητας με το 802.11b, μπορεί να επιτύχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης λόγω των ομοιοτήτων του με το 802.11a.

Το πρότυπο 802.11, με το πλήθος των χρηστών που το υιοθέτησαν πρόωρα κατέκλυσε τον καταναλωτικό κόσμο, αρχής γενομένης από τον Ιανουάριο του 2003, πολύ πριν από την επικύρωση του. Οι εταιρικοί χρήστες συγκρατήθηκαν και η Cisco και άλλοι μεγάλοι κατασκευαστές εξοπλισμού περίμεναν μέχρι την επικύρωση. Μέχρι το καλοκαίρι 2003, οι ανακοινώσεις άκμαζαν. Τα περισσότερα από τα dual-band προϊόντα 802.11a/b έγιναν dual-band/tri-mode, υποστηρίζοντας τα a, b, και g σε ένα ενιαίο κινητό προσαρμοστή (adaptor) καρτών ή σημείο πρόσβασης. Παρά τη σημαντική αποδοχή του, το 802.11g πάσχει από την ίδια παρεμβολή με το 802.11b στην ήδη κορεσμένη ζώνη των 2.4GHz. Οι συσκευές που λειτουργούν σε αυτήν την ζώνη περιλαμβάνουν τους φούρνους μικροκυμάτων, τις συσκευές Bluetooth και τα ασύρματα τηλέφωνα.

Ενώ το 802.11g κράτησε την υπόσχεση της υψηλότερης ρυθμοαπόδοσης, τα πραγματικά αποτελέσματα υποβιβάστηκαν από διάφορους παράγοντες: σύγκρουση με τις αποκλειστικά 802.11b συσκευές, έκθεση στις ίδιες πηγές παρεμβολής όπως το 802.11b, περιορισμένη καναλοποίηση (channelization) (μόνο 3 πλήρως μη-επικαλυπτόμενα κανάλια όπως το 802.11b) και το γεγονός ότι οι υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης του 802.11g είναι συχνά πιο ευαίσθητοι στην παρεμβολή απ' ό,τι το 802.11b, αναγκάζοντας τις συσκευές 802.11g να μειώσουν το ρυθμό μετάδοσης στον ίδιο ρυθμό που χρησιμοποιείται από το 802.11b. Η τάση προς τα dual-mode/tri-mode προϊόντα, οδηγεί επίσης σε οικονομίες κλίμακας (π.χ. κατασκευή ενιαίου τσιπ). Για τον καταναλωτή, τα προϊόντα dual-mode/tri-mode εξασφαλίζουν την καλύτερη δυνατή ρυθμοαπόδοση σε οποιοδήποτε δεδομένο περιβάλλον.

3.2.5 Το πρότυπο 802.11n

Τον Ιανουάριο του 2004 η IEEE ανήγγειλε ότι είχε διαμορφώσει μια νέα 802.11 ομάδα εργασίας για να αναπτύξει μια νέα τροποποίηση στα 802.11 πρότυπα για ασύρματα δίκτυα LAN. Η πραγματική ρυθμοαπόδοση υπολογίζεται να φθάσει σε θεωρητικά 540Mbps (που μπορεί να απαιτήσει ένα ακόμα υψηλότερο ακατέργαστο ρυθμό μετάδοσης στο φυσικό στρώμα), και πρέπει να είναι μέχρι 40 φορές γρηγορότερο από το 802.11b, και σχεδόν 10 φορές γρηγορότερο από το 802.11a ή το 802.11g. Εκτιμάται ότι το 802.11n θα προσφέρει επίσης καλύτερη απόσταση λειτουργίας από τα υπάρχοντα δίκτυα.

Υπήρξαν δύο ανταγωνιστικές προτάσεις του προτύπου 802.11n: το WWiSE (World-Wide Spectrum Efficiency) που υποστηρίζεται από επιχειρήσεις συμπεριλαμβανομένων των Broadcom και το TGn Sync που υποστηρίζεται από την Intel και την Philips. Οι προαναφερθέντες ανταγωνιστές του 802.11 και άλλη μία ομάδα, η MIMOT είπαν στα τέλη Ιουλίου 2005 ότι θα συγχώνευαν τις αντίστοιχες προτάσεις τους ως σχέδιο που θα στελνόταν στην IEEE το Σεπτέμβριο 2005, ενώ μια τελική έκδοση θα υποβαλλόταν το Νοέμβριο. Η διαδικασία τυποποίησης αναμένεται να ολοκληρωθεί το δεύτερο μισό του 2006.

Το 802.11n χτίζει επάνω στα προηγούμενα 802.11 πρότυπα με την προσθήκη MIMO (multiple-input multiple-output). Η MIMO χρησιμοποιεί τις κεραίες πολλαπλών πομπών και δεκτών για να επιτρέψει την αυξανόμενη ρυθμοαπόδοση δεδομένων μέσω χωρικής πολυπλεξίας και να αυξήσει την εμβέλεια μέσω της εκμετάλλευσης του διαφορισμού, ίσως μέσω των σχημάτων κωδικοποίησης όπως την κωδικοποίηση Alamouti. Η Enhanced Wireless Consortium (EWC) συγκροτήθηκε για να βοηθήσει την IEEE να επιταχύνει τη διαδικασία ανάπτυξης του 802.11n και να προαγάγει μια τεχνολογική προδιαγραφή για τη διαλειτουργικότητα των ασύρματων προϊόντων τοπικών δικτύωσης περιοχής (WLAN). Στις 19 Ιανουαρίου 2006, η ομάδα εργασίας IEEE 802.11n ενέκρινε την προδιαγραφή των κοινών προτάσεων, βασισμένη στην προδιαγραφή της EWC ως επιβεβαιωμένη πρόταση 802.11n. Στη συνεδρίαση του Μαρτίου 2006, η IEEE 802.11 ομάδα εργασίας έστειλε το σχέδιο 802.11n στην πρώτη ψηφοφορία μέσω επιστολών (letter ballot), το οποίο σημαίνει ότι οι περισσότεροι από τους 500 ψηφοφόρους του 802.11 πρέπει να αναθεωρήσουν το έγγραφο και να προτείνουν επισκευή λαθών, αποτυχιών κλπ., αλλαγές και βελτιώσεις.

3.3 Πιστοποίηση

Επειδή η IEEE θέτει μόνο τις προδιαγραφές αλλά δεν εξετάζει τον εξοπλισμό για τη συμμόρφωση με αυτές, μια εμπορική ομάδα αποκαλούμενη Wi-Fi συμμαχία, πραγματοποιεί ένα πρόγραμμα πιστοποίησης στο οποίο τα μέλη πληρώνουν για να συμμετέχουν. Ουσιαστικά, όλες οι επιχειρήσεις που πωλούν 802.11 εξοπλισμό είναι μέλη. Το εμπορικό σήμα Wi-Fi, που είναι ιδιοκτησία της ομάδας και χρησιμοποιείται μόνο στον συμβατό εξοπλισμό, προορίζεται να εγγυηθεί τη διαλειτουργικότητα. Αυτήν την περίοδο, "το Wi-Fi " μπορεί να σημαίνει οποιοδήποτε από τα 802.11a, b, ή g. Από το Φθινόπωρο του 2003, το Wi-Fi περιλαμβάνει επίσης το πρότυπο ασφαλείας Wi-Fi προστατευμένης πρόσβασης (Wi-Fi Protected Access-WPA). Τελικά "το Wi-Fi " θα σημαίνει επίσης τον εξοπλισμό που εφαρμόζει τα IEEE 802.11i πρότυπα ασφάλειας. Προϊόντα που λένε ότι είναι Wi-Fi είναι υποχρεωτικό να δηλώνουν επίσης τη ζώνη συχνοτήτων στην οποία λειτουργούν (2.4 ή 5 GHz).

3.4 Η εξέλιξη του Wi-Fi

Με την προσοχή να στρέφεται στο WiMAX, είναι εύκολο να ξεχάσουμε ότι το Wi-Fi εξελίσσεται επίσης γρήγορα και βασίζεται στην ογκώδη επένδυση έρευνας και ανάπτυξης που οδηγείται στη συνέχεια από το μέγεθος της πραγματικής και πιθανής αγοράς. Wi-Fi εφαρμογές εμφανίζονται όχι μόνο στα lap-top και PDAs, αλλά και σε τόσο διαφορετικό εξοπλισμό, από τα κινητά τηλέφωνα, τους μετρητές χώρων στάθμευσης, τις κάμερες ασφάλειας και τον εξοπλισμό οικιακής ψυχαγωγίας. Κατά συνέπεια, το Wi-Fi θα συνεχίσει να γίνεται γρηγορότερο, ασφαλέστερο, πιο αξιόπιστο και με πλήρως προτυποποιημένα χαρακτηριστικά. Αυτές οι πρόοδοι θα οδηγήσουν στη συνέχεια στη συνεχή υιοθέτηση, η οποία, στη συνέχεια, θα οδηγήσει σε ακόμα περισσότερη επένδυση έρευνας και ανάπτυξης.

Οι πολυάριθμες επιτροπές προτύπων, που εργάζονται κάτω από την IEEE 802.11 (Wi-Fi) ομπρέλα, αναπτύσσουν τις βελτιώσεις που θα επεκτείνουν τη δυνατότητα εφαρμογής των ασύρματων τεχνολογιών 802.11 σε νέους τομείς. Τα αποτελέσματα της εργασίας εν εξελίξει θα είναι μελλοντικές βιομηχανικών-προτύπων εκδόσεις του Wi-Fi σε ταχύτητα 100+Mbps, με την υποστήριξη QoS για εφαρμογές όπως η φωνή και το βίντεο, που να επιτρέπει την κινητικότητα-ταχεία περιαγωγή και ακόμα περισσότερα.

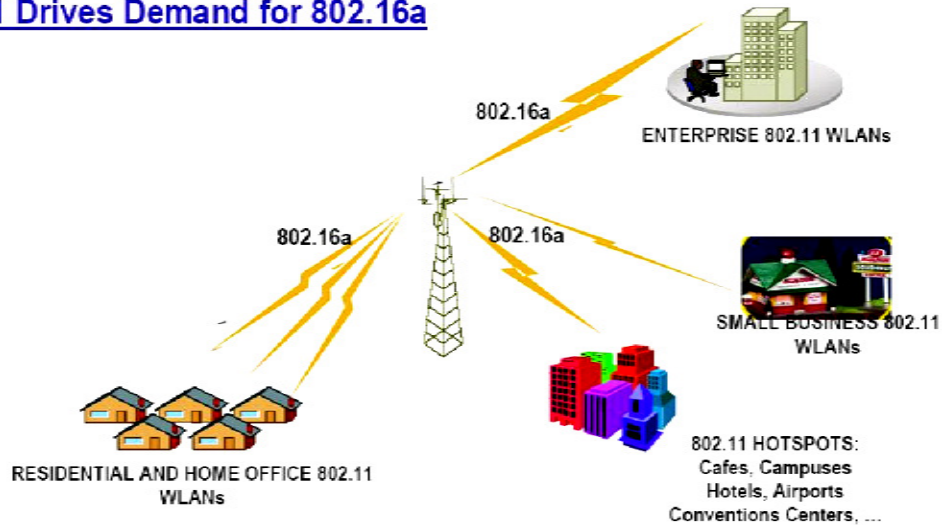
Η εξέλιξη του Wi-Fi περιλαμβάνει τα ακόλουθα 802.11 πρότυπα που είναι υπό ανάπτυξη:

- **802.11e:** καθορίζει τις βελτιώσεις για να παρέχει ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Θα περιλάβει υποστήριξη για την πλέον σημαντική πρόσβαση στις διαφορετικές κατηγορίες μετάδοσης δεδομένων και ειδών χρηστών. Αυτό θα οδηγήσει σε πολύ βελτιωμένη απόδοση για τις εφαρμογές όπως το βίντεο, η ροή πολυμέσων και η φωνή, εκτός από την παροχή της πρόσβασης κατά προτεραιότητα ανά-χρηστών κατά χρήση ή κατά εφαρμογή
- **802.11j:** καθορίζει τις επεκτάσεις για να επιτρέψει τη λειτουργία στις ζώνες των 4.9GHz και 5GHz στην Ιαπωνία
- **802.11k:** εστιάζει στην τυποποίηση των ραδιο-μετρήσεων που θα επιτρέψουν την ομοιόμορφη μέτρηση των πληροφοριών στις διαφορετικές πλατφόρμες κατασκευαστών. Αυτό θα οδηγήσει σε δίκτυα 802.11 που είναι ευκολότερο να ελέγξουν, άρα και να κάνουν αποδοτικότερη την χρήση του διαθέσιμου φάσματος
- **802.11n:** εστιάζει στη δημιουργία προτύπων για την περαιτέρω αύξηση της ρυθμοαπόδοσης των ασύρματων δικτύων. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί μεγαλύτερη από 100Mbps ωφέλιμη ρυθμοαπόδοση μέσα από ένα 802.11 κανάλι επικοινωνιών
- **802.11r:** μειώνει την καθυστέρηση των διαπομπών όταν οι συσκευές των πελατών κινούνται μεταξύ σημείων πρόσβασης ή πλέγματος δρομολογητών. Οι γρηγορότερες διαπομπές θα είναι κρίσιμες για την κάλυψη σε πραγματικό χρόνο των απαιτήσεων των ευαίσθητων σε καθυστέρηση, εφαρμογών όπως η φωνή, ειδικά στις κινητές επικοινωνίες, όπου οι συσκευές πελατών αναμένεται να μετακινούνται συχνά
- **802.11s:** καθορίζει μια αρχιτεκτονική πλέγματος (mesh architecture) βασισμένη σε 802.11 που θα επιτρέπει τα προσαρμόσιμα, αυτοδιαμορφούμενα και ανεκτικά σε ελαττώματα δίκτυα πλέγματος που θα επεκτείνουν τη δυνατότητα εφαρμογής και τη

χρησιμότητα 802.11 των δικτύων στις περιοχές που είναι δύσκολο να εγκατασταθεί ενσύρματο δίκτυο και τις μεγαλύτερες πανεπιστημιούπολεις.[8]

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο αναμένεται να συνυπάρξουν τα συστήματα 802.16 και 802.11

802.11 Drives Demand for 802.16a



Σχήμα 8: Συνύπαρξη Wi-Fi και WiMAX

3.5 Προκλήσεις

Οι χαρακτηριστικές τοπολογίες δικτύων 802.11 που συνδέονται με τις λύσεις last-mile και την κάλυψη hot-zone (περιοχών υψηλής κυκλοφοριακής ταχύτητας δεδομένων) χρησιμοποιούν είτε κατευθυντικές κεραιές είτε τοπολογίες πλέγματος δικτύων (mesh-network). Το Wi-Fi παρέχει την πιστοποίηση IEEE 802.11 για επικοινωνίες πελάτη προς σημείο πρόσβασης (AP). Εντούτοις, backhaul εφαρμογές που απαιτούνται τυπικά για ασύρματο last-mile και την κάλυψη hot-zone είναι ακόμα κάτω από καθεστώς ιδιοκτησίας, παρέχοντας κατά συνέπεια ελάχιστη ή καμία διαλειτουργικότητα.

Επειδή τα IEEE 802.11 πρότυπα σχεδιάστηκαν για να απαλλάξουν τα δίκτυα τοπικής περιοχής (τοπικό LAN) από τη χρήση καλωδίων, οι εφαρμογές μητροπολιτικής πρόσβασης αντιμετωπίζουν τις ακόλουθες προκλήσεις:

- **Χωρίς πρότυπο (Non-standard) ασύρματη επικοινωνία:** Σήμερα, οι ασύρματες συνδέσεις που χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν σημεία πρόσβασης 802.11 στη δικτύωση πλέγματος, προέρχονται από συγκεκριμένους προμηθευτές. Τα προτεινόμενο πρότυπο IEEE 802.11s, που εκτιμάται ότι θα επικυρωθεί το 2007, θα τυποποιήσει τη δικτύωση πλέγματος Wi-Fi
- **Παροχή ποιότητας της υπηρεσίας (QoS):** Το QoS αναφέρεται στη δυνατότητα του δικτύου να παράσχει την καλύτερη υπηρεσία για την επιλεγμένη κίνηση δεδομένων μέσα στο δίκτυο, μέσα από διάφορες τεχνολογίες. Ο στόχος των τεχνολογιών QoS είναι να παράσχουν την προτεραιότητα που απαιτείται από κάποια αμφίδρομη και σε πραγματικό χρόνο μεταφορά δεδομένων, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει ότι με αυτές τις ενέργειες η μεταφορά δεδομένων στις άλλες διαδρομές δεν αποτυγχάνει. Γενικά, οι

χωρίς άδεια (unlicensed) ζώνες μπορούν να υπόκεινται στα ζητήματα QoS επειδή η επέκταση είναι ανοικτή σε καθεμία. Η πρόοδος στα σχετικά πρότυπα και τις σχετικές τεχνολογίες, εντούτοις, βοηθάει στον μετριασμό των προβλημάτων με τις χωρίς άδεια ζώνες, όπως η παρεμβολή λόγω πολλαπλών διαδρομών. Τα προτεινόμενα IEEE 802.11e πρότυπα, που πρόκειται να επικυρωθούν το 2006, θα τυποποιήσουν την τοπολογία πλέγματος δικτύων Wi-Fi.

- **Ακριβές backhaul δαπάνες:** Το Backhaul αναφέρεται και στη σύνδεση από το σημείο πρόσβασης στον πάροχο υπηρεσιών και στη σύνδεση από τον πάροχο στο δίκτυο κορμού. Για να επεκτείνουν τους ασύρματους κόμβους πρόσβασης, οι πάροχοι στηρίζονται ακόμα στα καλώδια για την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Μερικοί πάροχοι βρίσκουν τη χρήση καλωδίων για μεγάλες περιοχές πάρα πολύ ακριβή.
- **Περιορισμένες υπηρεσίες:** Χωρίς QoS, οι εφαρμογές όπως η φωνή πάνω από το πρωτόκολλο IP (VoIP) μπορούν να μειώσουν την ποιότητα μιας κλήσης, περιορίζοντας κατά συνέπεια τη δυνατότητα του προμηθευτή στις υπηρεσίες data, άρα και την απόκτηση από τον πάροχο καινούριων πελατών. Οι τρέχουσες λύσεις για Wi-Fi last mile και κάλυψη μεγάλης εμβέλειας προσφέρουν άριστη μεταφορά δεδομένων. Μερικοί πάροχοι προσφέρουν ιδιόκτητο QoS.

Παρά τις προκλήσεις, οι ασύρματες λύσεις μετρό-πρόσβασης έχουν συνεχώς ζήτηση για τους ακόλουθους λόγους:

- ❖ Οι ασύρματες λύσεις metro-access που είναι διαθέσιμες σήμερα, όπως οι εφαρμογές δικτύωσης πλέγματος, είναι οικονομικά πιο αποδοτικές και εύκαμπτες από τα - συνδεδεμένα με καλώδιο- αντίστοιχά τους.
- ❖ Αυτές οι λύσεις παρέχουν μια βασισμένη σε πρότυπο σύνδεση από τους AP προς κινητούς χρήστες για την κάλυψη hot zone.
- ❖ Οι WISPs μπορούν να προσφέρουν ευρυζωνικές υπηρεσίες σε γεωγραφικά δύσκολες περιοχές (όπως οι αγροτικές πόλεις).
- ❖ Οι τοπικές κυβερνήσεις μπορούν να παρέχουν ελεύθερη πρόσβαση για τις επιχειρήσεις ή τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης (όπως πυροσβεστική, αστυνομία).
- ❖ Τα εκπαιδευτικά ιδρύματα μπορούν να διευρύνουν την εκμάθηση μέσω της, σε απευθείας σύνδεση, συνεργασίας μεταξύ των σπουδαστών και της σχολής ,εντός και εκτός πανεπιστημιούπολης.
- ❖ Οι επιχειρήσεις και τα μεγάλα ιδιωτικά δίκτυα μπορούν να επικοινωνήσουν και να ελέγξουν τις δραστηριότητες-αλυσίδες σε πραγματικό χρόνο.

3.6 Σύγκριση WiMAX με άλλες ασύρματες τεχνολογίες

Πίνακας 2: Σύγκριση WiMAX με άλλες ασύρματες τεχνολογίες

	Ταχύτητα (Mbps)	Εμβέλεια	Συχνότητα	Διασύνδεση	Κατάσταση	Υποστ.
Bluetooth	1 Mbps	10m	2.4 GHz	Καμία	Διαθέσιμο	Ericsson, IBM, Intel, Toshiba, Nokia Siemens, Motorola
Home RF	2 Mbps	50m	2.4 GHz	Ethernet	Διαθέσιμο	Promix, Intel, HP, 3COM, Motorola
Hyper Lan Type 1	24 Mbps	50m	5 GHz	Ethernet	Διαθέσιμο	ETSI, Promix, HP, IBM, Xircom, Nokia Siemens
Hyper Lan Type 2	54 Mbps	<150m	5 GHz	Ethernet, ATM, IP, UMTS, Firewire, PPP		ETSI, Promix, HP, IBM, Xircom, Nokia, Ericsson, Dell, TI
IEEE 802.11	2 Mbps	100m-2km	2.4 GHz	Ethernet	Διαθέσιμο	Cisco, Lucent, 2Com, Apple, Nokia, Compaq
802.11b	11 Mbps	-/-	2.4 GHz	Ethernet	Διαθέσιμο	
802.11a	54 Mbps	-/-	5 GHz	Ethernet	Διαθέσιμο	
802.11g	54 Mbps	-/-	2.4 GHz	Ethernet	Διαθέσιμο	
WiMAX	70 Mbps	70km	2-11 GHz		Διαθέσιμο	Red Line, Intel, WiChorus, Ericsson, Nokia Siemens,

3.6.1 WiMAX και WiFi

Τεχνικά πλεονεκτήματα WiMAX έναντι του WiFi

Τα IEEE 802.16 δίκτυα χρησιμοποιούν το στρώμα LLC (Logical Link Control που τυποποιείται και ως IEEE 802.2) όπως και άλλα LAN και WAN. Μια σημαντική πτυχή του IEEE 802.16 είναι ότι καθορίζει το στρώμα MAC που υποστηρίζει τις προδιαγραφές του πολλαπλού φυσικού στρώματος (PHY). Αυτό είναι κρίσιμο ώστε να επιτρέψει στους κατασκευαστές εξοπλισμού να διαφοροποιήσουν τις προσφορές τους. Αυτό είναι επίσης μια σημαντική πτυχή του γιατί το WiMAX μπορεί να περιγραφεί ως "πλαίσιο για την εξέλιξη της ασύρματης ευρυζωνικότητας", παρά μια στατική εφαρμογή ασύρματων τεχνολογιών. Οι αναβαθμίσεις στις τρέχουσες και στις νέες τεχνολογίες και ενδεχομένως στις νέες βασικές τεχνολογίες που ενσωματώνονται στο φυσικό στρώμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Μια συγκλίνουσα τάση είναι η χρήση των multi-mode και multi-radio SoC (System on a Chip) και σχεδίων συστημάτων που είναι εναρμονισμένα μέσω της χρήσης του κοινού MAC, της διαχείρισης συστημάτων, της περιαγωγής (roaming), του IMS (IP Multimedia system) και άλλων επιπέδων του συστήματος. Το WiMAX μπορεί να περιγραφεί ως μία τολμηρή προσπάθεια σφυρηλάτησης πολλών τεχνολογιών για να εξυπηρετήσει πολλές ανάγκες σε πολλά φάσματα. Το στρώμα MAC είναι σημαντικά διαφορετικό από αυτό του 802.11 Wi-Fi (αλλά και του Ethernet). Στο Wi-Fi, το MAC χρησιμοποιεί «ανταγωνιστική» πρόσβαση-όλοι οι συνδρομητικοί σταθμοί που επιθυμούν να περάσουν δεδομένα μέσω ενός σημείου πρόσβασης (AP), ανταγωνίζονται για την προσοχή του σε τυχαία βάση. Αυτό μπορεί να αναγκάσει τους απόμακρους από το AP κόμβους να διακόπτονται επανειλημμένα από τους λιγότερο ευαίσθητους, πιο κοντινούς κόμβους, μειώνοντας πολύ τη ρυθμοαπόδοσή τους. Αντιθέτως, στο 802.16 MAC ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να ανταγωνιστεί μόνο μία φορά (για την αρχική του είσοδο μέσα στο δίκτυο). Μετά από αυτό,

διατίθεται μια χρονοσχισημή από το σταθμό βάσης. Η χρονοσχισημή μπορεί να διευρυνθεί ή να περιοριστεί, αλλά παραμένει ορισμένη στο συνδρομητή, με την έννοια ότι άλλοι συνδρομητές δεν μπορούν να την χρησιμοποιήσουν αλλά περιμένουν τη σειρά τους εκ περιτροπής. Αυτός ο αλγόριθμος προγραμματισμού είναι ανθεκτικός στην υπερφόρτωση και το μεγάλο αριθμό εγγραφών (αντίθετα από το 802.11). Είναι επίσης πολύ περισσότερο αποδοτικός σε εύρος ζώνης. Ο αλγόριθμος επιτρέπει επίσης στο σταθμό βάσης να ελέγχει την ποιότητα της υπηρεσίας, με την εξισορρόπηση των αναθέσεων με βάση τις ανάγκες των συνδρομητικών σταθμών.

Μια πρόσφατη προσθήκη στο πρότυπο WiMAX είναι εν εξελίξει και θα προσθέσει πλήρη ικανότητα δικτύωσης πλέγματος (mesh networking) καθιστώντας τους κόμβους WiMAX ικανούς να λειτουργούν ταυτόχρονα σε διαμόρφωση συνδρομητικού σταθμού και σταθμού βάσης. Αυτό θα θολώσει την αρχική διάκριση και θα επιτρέπει την ευρεία υιοθέτηση του πλέγματος δικτύου που βασίζεται στο WiMAX. Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.16, ορίζει εύρος από 10 έως 66GHz. Αργότερα προστέθηκε πρόβλεψη υποστήριξης για συχνότητες από 2 έως 11GHz, του οποίου τα περισσότερα τμήματα είναι χωρίς άδεια διεθνώς και μόνο πολύ λίγα από αυτά απαιτούν ακόμα κρατικές άδειες. Το ενδιαφέρον των περισσότερων επιχειρήσεων θα είναι πιθανώς στο κομμάτι αυτό, καθώς δεν απαιτεί αδειοδοτημένες συχνότητες. Οι προδιαγραφές του WiMAX βελτιώνονται σε πολλούς από τους περιορισμούς του Wi-Fi, με την παροχή αυξημένου εύρους ζώνης και ισχυρότερης κρυπτογράφησης. Στοχεύει επίσης να παρέχει σύνδεση μεταξύ των τελικών σημείων (endpoints) των δικτύων που είναι NLOS σε μερικές περιπτώσεις.[9]

Προκλήσεις του WiMax έναντι του IEEE 802.11

Αν και τα δύο πρότυπα μοιράζονται κάποια θεμελιώδη βασικά χαρακτηριστικά προσεγγίζουν το θέμα της ασύρματης δικτύωσης από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες. Τα δύο πρότυπα σχεδιάστηκαν για να εξυπηρετήσουν διαφορετικούς σκοπούς πράγμα που κάνει τη σύγκρουση τους σχεδόν αδύνατη.

Μια σημαντική διαφορά του προτύπου IEEE 802.16 σε σχέση με το IEEE 802.11 είναι ότι το πρώτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής φυσικά με ρυθμούς μετάδοσης πολύ χαμηλότερους των 50 Mbps.

Το πρότυπο IEEE 802.16 παρέχει υψηλού επιπέδου **ποιότητα υπηρεσίας**. Το επίπεδο MAC του προτύπου είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει στους χρήστες, όταν οι ίδιοι το επιθυμούν, εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης και ταυτόχρονα κίνηση best effort σε χρήστες που καλύπτονται από το ίδιο base station κάτι που το πρότυπο IEEE 802.11 δεν μπορούσε να εξασφαλίσει. Δηλαδή, αν υποθέσουμε ότι δύο χρήστες καλύπτονται από το ίδιο base station, είναι δυνατό ο ένας χρήστης να έχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας και ο δεύτερος χρήστης να δέχεται και να στέλνει απλή IP κίνηση best effort κάτι που με το πρότυπο 802.11 δεν ήταν δυνατό. Δηλαδή χρήστες που βρισκόταν στην κάλυψη ενός Access Point είχαν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας.

Η πιο θεμελιώδης διαφορά είναι ότι το WiFi είναι μια τεχνολογία για τοπική δικτύωση και σχεδιάστηκε για να δώσει μια κινητικότητα σε ιδιωτικά ενσύρματα LAN ενώ το WiMAX σχεδιάστηκε για να παρέχει BWA υπηρεσίες. Η ιδέα πίσω από τις BWA υπηρεσίες είναι η ασύρματη πρόσβαση στο internet χωρίς καλώδια και DSL τεχνολογίες. Έτσι λοιπόν ενώ το WiFi υποστηρίζει εύρος μετάδοσης μερικών εκατοντάδων μέτρων, τα WiMAX συστήματα μπορούν να υποστηρίξουν υπηρεσίες μεγαλύτερες των 30 μιλίων. Το

παραπάνω επιχείρημα μπορεί μάλιστα να δικαιολογήσει γιατί δεν γίνεται τόσο μεγάλος λόγος στην αγορά για το WiMAX όσο για το WiFi, αφού το WiFi στοχεύει στο χρήστη ενώ το WiMAX χρησιμοποιείται σαν η κύρια αρτηρία μεταφοράς δεδομένων σε μακρινές αποστάσεις.

Μια άλλη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το WiMax παρέχει συμμετρικό εύρος ζώνης για πολλά χιλιόμετρα και σειρά με την ισχυρότερη κρυπτογράφηση (3DES or AES) και συγκεκριμένα με τη λιγότερη παρέμβαση. Αντίθετα το πρότυπο IEEE 802.11 έχει την κρυπτογράφηση WEP ή WPA και δεν μπορεί να υπάρξει μεγάλη παρέμβαση σε περιοχές όπως αυτές όπου υπάρχουν πολλοί συνδεδεμένοι χρήστες.

Επίσης οι δυναμικές ζώνες του προτύπου IEEE 802.11 είναι backhauled στο ADSL, επομένως η πρόσβαση WiFi είναι τυπικά υποστηριζόμενη και έχει πολύ μικρές upload ταχύτητες μεταξύ του δρομολογητή και του Διαδικτύου.

Εκτός από αυτές τις διαφορές σχετικά με το εύρος μετάδοσης των δύο προτύπων, υπάρχουν αρκετές διαφορές στη ραδιοτεχνολογία που διακρίνουν τα δύο πρότυπα. Από τη μια πλευρά το WiMax αποτελείται από ένα πολύ μεγάλο εύρος πιθανών υλοποιήσεων για να μπορεί να παίξει το ρόλο του μεταφορέα σήματος σε ολόκληρο τον κόσμο και από την άλλη το WiFi περιγράφει 4^{ων} τύπων ραδιοσυνδέσεις οι οποίες δουλεύουν στις συχνότητες 2.4 ή 5 GHz στη μη νόμιμη περιοχή. Και αυτό που είναι αξιόλογο να σημειωθεί εδώ, είναι ότι ενώ όλες οι υλοποιήσεις του WiFi χρησιμοποιούν μη νόμιμες συχνοτικές μπάντες, το WiMAX δουλεύει σε νόμιμες και μη, συχνοτικές μπάντες.

Επίσης τα πρότυπα WiFi και WiMAX έχουν και μία σημαντική διαφορά στο εύρος ζώνης των καναλιών. Το WiFi καθορίζει ένα σταθερό εύρος ζώνης καναλιού που είναι 25MHz για το 802.11b και 20MHz για τα 802.11a και 802.11g. Αντίθετα στο WiMAX, το εύρος ζώνης του καναλιού είναι προσαρμοστικό και κυμαίνεται από το 1.25MHz μέχρι τα 20MHz .

3.6.2 WiMAX και 3G WWAN

Διαφορές συστημάτων WiMAX και 3G

Οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων WiMAX και 3G μπορούν να εστιαστούν στα παρακάτω σημεία:

- **Εξασθένιση:** Δεδομένου ότι το WiMAX κατά κύριο λόγο πρόκειται να λειτουργήσει στις ζώνες συχνοτήτων των 2.5, 3.5 ή 5.8GHz, μπορεί να απαιτηθούν περισσότερες κυψέλες σε σύγκριση με το 3G (που έχει χαρακτηριστικές συχνοότητες <2GHz), λόγω της χρήσης υψηλότερων συχνοτήτων. Ο κύριος αντίκτυπος θα είναι στους παρόχους που προγραμματίζουν να επεκτείνουν τις υπηρεσίες τους στο unlicensed φάσμα των 5.8GHz. Εντούτοις, οι δαπάνες που συνδέονται με το licensed φάσμα για το 3G και το φάσμα των 2.5-3.5GHz μπορούν να αντισταθμίσουν το κόστος για τις πρόσθετες περιοχές κυψελών, οπότε η επίπτωση στο κόστος πρέπει να εξεταστεί διεξοδικά από τους παρόχους υπηρεσιών
- **Παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών:** Οι OFDM/OFDMA διαμορφώσεις λειτουργούν πολύ καλύτερα από το CDMA σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών, δεδομένου ότι υπερνικούν πιο εύκολα τη διασυμβολική παρεμβολή, η οποία συμβαίνει όταν τα ανακλώμενα σήματα επικαλύπτουν το μεταδιδόμενο σήμα

- **Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα:** Η OFDMA είναι ανθεκτικότερη δεδομένου ότι η παράλληλη φύση της επιτρέπει τη διόρθωση των λαθών που παρουσιάζονται στα υπο-φέροντα
- **Μετατόπιση συχνότητας και θόρυβος φάσης:** Η OFDMA είναι πιο ευαίσθητη στη μετατόπιση συχνότητας και το θόρυβο φάσης που οδηγεί στην παρεμβολή μεταξύ φερόντων (Inter Carrier Interference-ICI), αν και αυτό είναι κάπως μετριασμένο από τη χρήση των διαστημάτων φύλαξης (guard bands).
- **Απόρριψη παλμού θορύβου:** Δεδομένου ότι τα σύμβολα OFDMA είναι μεγαλύτερα σε διάρκεια από τα σύμβολα CDMA, ένας παλμός θορύβου (impulse noise) μπορεί να μην προκαλέσει αύξηση στο ποσοστό λάθους. Για CDMA, μερικά σύμβολα μπορούν να χαθούν, και αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση του Bit Error Rate (BER)
- **Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση(AMC):** Η OFDMA χρησιμοποιεί καλύτερα την προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, οπότε επιτυγχάνει υψηλότερη ρυθμαπόδοση (9.6Mbps) όταν συγκρίνεται με την WCDMA (3Mbps). Αυτή η δοκιμή εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας OFDM και 16QAM (το IEEE 802.16e υποστηρίζει 64QAM). Επιπλέον, η OFDMA μπορεί να είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει την υψηλότερη διάταξη διαμόρφωσης (υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων) σε μεγαλύτερες εμβέλειες
- **AMC και OFDMA:** Η OFDMA μπορεί να είναι σε θέση να βελτιώσει περαιτέρω το πλεονέκτημά της σε σχέση με το CDMA με την εφαρμογή AMC στο επίπεδο των υπο-φερόντων. Αυτό είναι γνωστό ως Space Division Multiple Access (SDMA) και θα μπορούσε να επιτρέψει τη βελτιστοποίηση της επιλογής υπο-φερόντων, με βάση τη γεωγραφική θέση
- **Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας:** Η CDMA, υιοθετεί τη χρήση μέσου όρου παρεμβολής, ο οποίος επιτρέπει μια επαναχρησιμοποίηση συχνότητας της τάξης του 1. Η OFDMA χρειάζεται χαρακτηριστικά μια επαναχρησιμοποίηση συχνότητας 1 έως 3, το οποίο σημαίνει ότι η επιτεύξιμη ρυθμαπόδοση ανά κυψέλη για ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης πρέπει να διαιρεθεί με το 3. Προηγμένα συστήματα κεραιών (Advanced Antenna Systems-AAS) μπορούν να επιτρέψουν στην OFDMA να υπερνικήσει αυτόν τον περιορισμό, αν και η χρήση των AAS μπορεί να είναι ακριβή
- **Περιορισμοί κώδικα:** Λόγω των περιορισμών της διαθεσιμότητας του κώδικα και της πολυπλοκότητας των πελατών, οι περισσότεροι HSDPA πελάτες θα περιοριστούν σε 5 από το μέγιστο των 15 κωδίκων. Επιπλέον, δεδομένου ότι κάθε χρήστης θα χρειαστεί τουλάχιστον έναν κώδικα για φωνή ή data, αυτό θα μπορούσε να ασκήσει σημαντική επίδραση στον αριθμό των χρηστών που υποστηρίζει κάθε σύστημα, ειδικά όταν συγκρίνεται με τον υψηλό αριθμό υπο-φερόντων που χρησιμοποιεί η OFDMA.
- **Ποιότητα υπηρεσίας (QoS):** Το WiMAX διαθέτει MAC προσανατολισμένο στα data (data oriented MAC) έναντι του ουσιαστικά circuit-switched MAC των HSDPA και WCDMA. Το WiMAX μπορεί επίσης να εκμεταλλευθεί τους πολλαπλούς τρόπους πολυπλεξίας, συμπεριλαμβανομένης της δυναμικής ασυμμετρίας TDD, γεγονός που επιτρέπει στο uplink/downlink εύρος ζώνης να διατεθεί σύμφωνα με τις τρέχουσες συνθήκες κίνησης δεδομένων

- **Φωνή:** Τα συστήματα CDMA είναι πολύ καλύτερα ταιριαγμένα για να χειριστούν τις κινητές κλήσεις φωνής επειδή υποστηρίζουν πολλαπλά σχέδια κωδικοποίησης φωνής, αργαγής διαπομπές (handoffs) και περιαγωγή
- **Κόστος εξοπλισμού:** Τα βασισμένα σε OFDMA συστήματα μπορούν ευκολότερα να εφαρμοστούν, δεδομένου ότι δεν απαιτούν την υψηλή πολυπλοκότητα ενός δέκτη RAKE που απαιτείται σε CDMA. Μπορεί επίσης να είναι απλούστερο να εφαρμόσει εξισορρόπηση (equalization), ακύρωση παρεμβολής (interference cancellation) και αλγόριθμους προσαρμοστικών κεραιών (adaptive antenna array algorithms) με OFDMA, όπου οι αλγόριθμοι δημιουργούνται στο πεδίο της συχνότητας
- **Πρότυπα στα οποία βασίζονται:** Το WiMAX (OFDMA) είναι βασισμένο στο IEEE 802.16e, ένα ανερχόμενο βιομηχανικό πρότυπο, που του επιτρέπει να αποφύγει τις δαπανηρές ιδιόκτητες διεπαφές που υπάρχουν στα 3G δίκτυα. Αυτό του επιτρέπει επίσης να εκμεταλλευθεί άλλες τυποποιημένες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένης της εργασίας που γίνεται στην προτεινόμενη ομάδα εργασίας 802.21 IEEE Handoff
- **Προηγμένες ραδιο-τεχνικές:** Το WiMAX (OFDMA) μπορεί να είναι σε θέση να εκμεταλλευθεί καλύτερα τις τεχνικές διαφορικής λήψης (Space Time Coding, Maximum Ratio Combining), MIMO και έξυπνης τεχνολογίας κεραιών.[10]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ WiMAX

4.1 Εισαγωγή

Το 1998 το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών των ΗΠΑ (IEEE) σύστησε μια ομάδα εργασίας με την ονομασία 802.16 για να αναπτύξει ένα νέο πρότυπο που θα κάλυπτε τις ανάγκες των ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων (wireless metropolitan area network - WMAN). Οι απαιτήσεις σε υψηλές ταχύτητες και μεγαλύτερη ευελιξία σε ασύρματο δίαυλο συνέβαλαν στη δημιουργία ολοένα και πιο εξελιγμένων προτύπων.

Η εξέλιξη των προτύπων 802.16 αποσκοπεί στην τυποποίηση και διαλειτουργικότητα (interoperability) μεταξύ των συστημάτων που αναπτύσσονται από τις διάφορες εταιρείες κατασκευής ασύρματων συστημάτων και συμβάλει στην εξέλιξη και εμπορευματοποίηση των προϊόντων των προϊόντων WiMax.

Στην σημερινή κατάσταση το WiMAX έχει δύο κύριες κατηγορίες: η μια απευθύνεται σε σταθερή ασύρματη πρόσβαση και καλύπτεται από το πρότυπο IEEE 802.16-2004 και η άλλη απευθύνεται σε φορητή ασύρματη πρόσβαση και καλύπτεται από το πρότυπο IEEE 802.16e. Και τα δύο πρότυπα αποτελούν εξέλιξη των νεότερων εκδόσεων IEEE 802.16 και IEEE 802.16a. Το πρότυπο IEEE 802.16 καθορίζει μόνο το φυσικό επίπεδο (physical – PHY layer) και το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (media access control – MAC layer) ενώ τα ανώτερα στρώματα δεν υπολογίζονται.

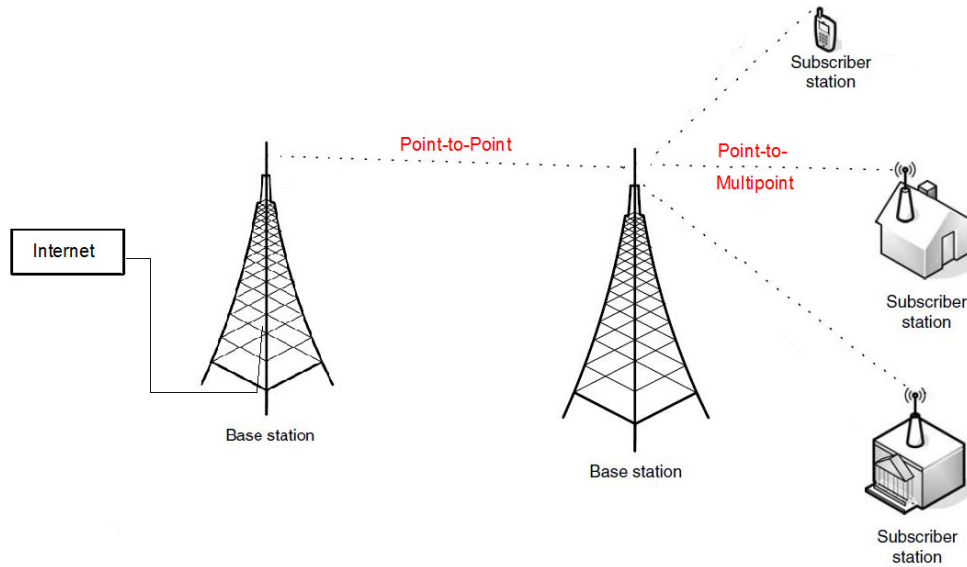
4.2 Γενικά χαρακτηριστικά WiMAX (802.16)

Το πρότυπο 802.16 σχεδιάστηκε για σταθερή πρόσβαση (fixed). Είναι γνωστό και ως "fixed Wireless". Καθορίζει τα συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης που λειτουργούν στο αδειοθετημένο φάσμα 10-66 Ghz . Το πρότυπο 802.16 μπορεί να λειτουργήσει και με άλλα ασύρματα δίκτυα όπως τα συστήματα κινητών και τα ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless LANs). Επιμέρους χαρακτηριστικά περιγράφονται παρακάτω.

4.2.1 Τοπολογία δικτύου

Το 802.16 ορίζει δυο τοπολογίες δικτύου: σημείου προς σημείο point-to-point (PTP) και σημείου προς πολλαπλούς αποδέκτες point-to-multipoint (PMP). Μια σύνδεση PTP ουσιαστικά είναι μια σύνδεση δυο σημείων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση όπου η απαίτηση για εύρος ζώνης είναι μεγάλη (π.χ. οργανισμοί και ιδρύματα) ή θέλουμε να συνδέσουμε ασύρματα σταθμούς βάσης μεταξύ τους. Υλοποιείται με κεραιές υψηλού κέρδους και κατευθυντικότητας και έχει αυξημένο κόστος. Λέγεται και σύνδεση backhaul.

Αντίθετα μια σύνδεση PMP στοχεύει να συνδέσει τους οικιακούς ή επαγγελματικούς συνδρομητές με το σταθμό βάσεως. Η απαίτηση σε εύρος ζώνης δεν είναι μεγάλη και το κόστος χρήσης είναι μειωμένο. Λέγεται και σύνδεση last-mile. [11]



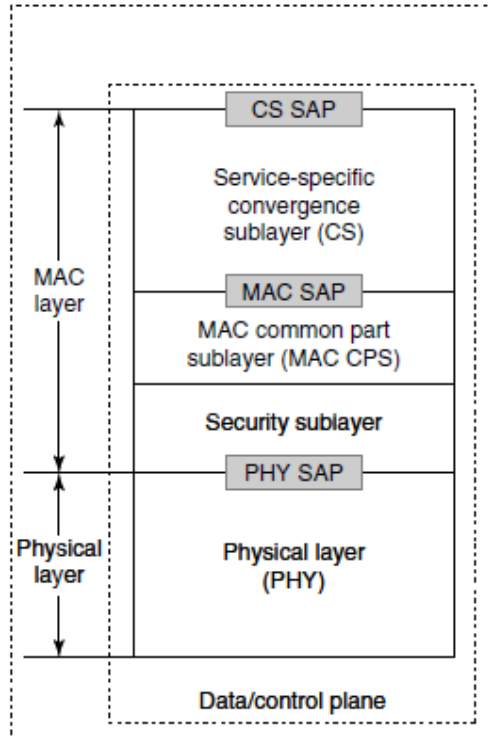
Σχήμα 9: Τοπολογία δικτύου PTP και PMP

4.2.2 Πρωτόκολλα

Τα πρότυπα 802.16 καλύπτουν τα δυο χαμηλότερα στρώματα του μοντέλου OSI: το στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (media access control – MAC layer) και το φυσικό στρώμα (physical – PHY layer).

Το επίπεδο MAC είναι αυτό που θα ορίσει ποιος συνδρομητής (Subscriber Station – SS) θα είναι σε θέση να συνδεθεί στο δίκτυο και διαιρείται σε τρία υποστρώματα: το υπο-στρώμα σύγκλισης ως προς την υπηρεσία (service-specific convergence sublayer - CS), το γενικό υπό-στρώμα (common part sublayer CPS), και το υποστρώμα ασφαλείας. Το CS μετατρέπει τα εισερχόμενα δεδομένα σε πακέτα δεδομένων MAC. Το γενικό υπό-στρώμα CPS είναι υπεύθυνο για την σωστή λειτουργία, εγκατάσταση σύνδεσης και διατήρησή της. Το υπόστρώμα ασφαλείας είναι υπεύθυνο για την κρυπτογράφηση (encryption), εξουσιοδότηση (authorization) και την σωστή αλλαγή κλειδιών κωδικοποίησης.

Το φυσικό στρώμα είναι υπεύθυνο για την μετάδοση και λήψη των δεδομένων.



Σχήμα 10: Στοιβή πρωτοκόλλων WiMAX [5]

4.2.3 Μέθοδοι διαμόρφωσης - πολυπλεξίας

Το πρότυπο 802.16 χρησιμοποιεί σχήματα διαμόρφωσης μονού φέροντος στο οποίο όλα τα πακέτα εκπέμπονται μέσω ενός φέροντος συχνότητας. Τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται είναι τρία: QPSK (quadrature phase shift keying), 16QAM (quadrature amplitude modulation), και 64QAM. Τα υψηλότερα σχήματα, όπως το 64QAM μας δίνει την δυνατότητα να κωδικοποιήσουμε περισσότερα σύμβολα ανά σύμβολο για να επιτύχουμε μεγαλύτερο ρυθμό διάδοσης, αλλά είναι περισσότερο ευάλωτο σε παρεμβολές.

Το 802.16 υποστηρίζει τόσο την αμφιδρόμηση διαίρεσης συχνότητας (frequency division duplexing - FDD) όσο και την αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου (time division duplexing - TDD). Για την FDD απαιτούνται δυο κανάλια, ένα για εκπομπή και ένα για λήψη, υποστηρίζει συμμετρική κίνηση (uplink και downlink) και χαρακτηρίζεται από χαμηλή φασματική απόδοση, υψηλό κόστος και μικρές καθυστερήσεις. Για την TDD απαιτείται ένα κανάλι το οποίο χωρίζεται σε διαφορετικές χρονοσχισμές, μπορεί να υποστηρίξει και ασύμμετρη κίνηση, έχει καλύτερη φασματική απόδοση από την FDD, αλλά δεν μπορεί να λαμβάνει και να εκπέμψει την ίδια στιγμή. Δηλαδή η TDD χρησιμοποιεί δύο ευδιάκριτα σύνολα χρονοσχισμών στην ίδια συχνότητα για uplink και downlink σύνδεση, ενώ η FDD χρησιμοποιεί δύο ξεχωριστές συχνότητες. Η TDD γίνεται χρήσιμη σε περιβάλλοντα όπου τα ζευγάρια καναλιών δεν είναι διαθέσιμα λόγω κανονιστικών περιορισμών, ή όπου οι μη αδειοδοτημένες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Οι TDD και FDD λύσεις δεν είναι διαλειτουργικές δεδομένου ότι χρησιμοποιούν διαφορετικές ζώνες και διαφορετική τεχνική πολυπλεξίας.

Επιπλέον η TDD μπορεί να υποστηρίξει Wi-Fi πλέγματος, ενώ η FDD δεν μπορεί. Μια λύση FDD κοστίζει περισσότερο επειδή απαιτεί περισσότερο υλικό (hardware) για να

υποστηρίζει τα χωριστά uplink και downlink κανάλια. Το κόστος δικαιολογείται από την αποδοτικότερη χρήση του εύρους ζώνης και την βελτιωμένη QoS.[3]

Η πολυπλεξία αναφέρεται στη διαδικασία δημιουργίας αμφίδρομων καναλιών για uplink και downlink μεταδόσεις δεδομένων. Το 802.16 υποστηρίζει τεχνικές πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (time division multiplexing –TDM) για το κανάλι καθόδου και διαίρεσης χρόνου πολλαπλής πρόσβασης (time division multiple access - TDMA) για το κανάλι ανόδου. Στην TDM οι συνδρομητές χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων αλλά σε διαφορετικές χρονοσχισμές. Η TDMA είναι ένα ευέλικτο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης στο οποίο οι χρονοσχισμές μπορούν να διανεμηθούν στους συνδρομητές ανάλογα με το φορτίο κίνησης που έχουν.

4.2.4 Φάσμα - Ζώνες Συχνοτήτων

Το πρότυπο 802.16 καθορίζει τα συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης που λειτουργούν στο αδειοθετημένο φάσμα 10-66 Ghz το οποίο είναι ακριβό αλλά δεν είναι τόσο ευάλωτο σε παρεμβολές και υπάρχει περισσότερο διαθέσιμο φάσμα. Επειδή σε αυτό το φάσμα τα ραδιοκύματα δεν μπορούν να διαπεράσουν τα κτίρια, το πρότυπο έχει εφαρμογές κυρίως σε συνδέσεις οπτικής επαφής (line-of-sight – LOS). Σε σύγκριση με τις συνδέσεις μη οπτικής επαφής (nonline-of-sight – NLOS) οι συνδέσεις LOS δεν είναι τόσο ευέλικτες αλλά είναι περισσότερο ισχυρές και σταθερές απέναντι σε σφάλματα μετάδοσης.

Το εύρος συχνοτήτων που υποστηρίζονται στο αδειοθετημένο φάσμα 10-66 Ghz είναι 20 ή 25Mhz (Η.Π.Α) και 28 Mhz (Ευρώπη). [5]

Βελτιώσεις του μοντέλου 802.16 υπήρξαν τα πρότυπα 802.16a και 802.16c. Τα χαρακτηριστικά τους συμπεριλήφθηκαν στο πρότυπο με ονομασία 802.16-2004.

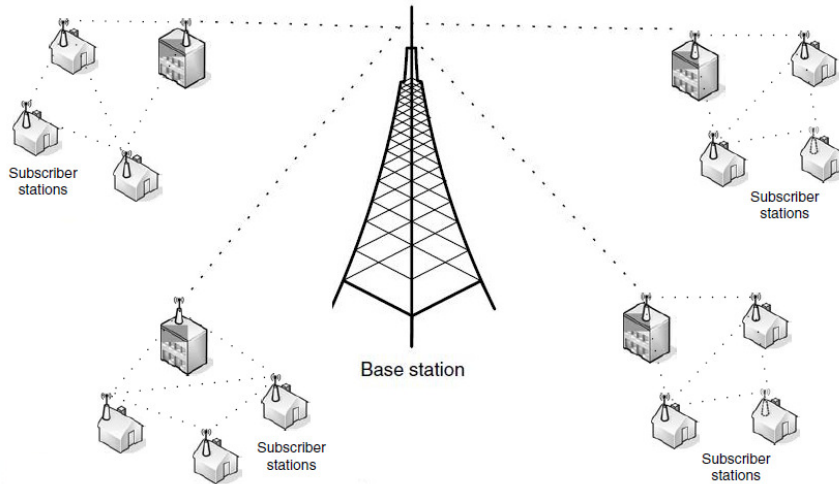
4.3 Χαρακτηριστικά WiMAX (802.16-2004)

Το πρότυπο 802.16-2004 είναι ένα πρότυπο ασύρματης τεχνολογίας που σχεδιάστηκε για σταθερή πρόσβαση (fixed) και δημοσιεύτηκε τον Οκτώβριο του 2004. Είναι συνδυασμός και βελτίωση των προτύπων 802.16a και 802.16c τα οποία και αντικατέστησε.

Οι βασικές διαφορές με το αρχικό πρότυπο 802.16 είναι ότι εκτός από το αδειοθετημένο φάσμα 10-66 Ghz γίνεται και χρήση των μη αδειοδοτημένων ζωνών 2-11 Ghz, στις οποίες είναι δυνατή η διάδοση μη οπτικής επαφής (NLOS), η χρησιμοποίηση OFDM τεχνολογίας και η τοπολογία πλέγματος (mesh).

4.3.1 Τοπολογία δικτύου

Επιπρόσθετα με τις τοπολογίες PTP και PMP γίνεται χρήση και της τοπολογίας πλέγματος (mesh). Στην τοπολογία αυτή δίνεται η δυνατότητα στον κάθε χρήστη (SS) να συμπεριφέρεται σαν ένα ξεχωριστό access point μεταδίδοντας πακέτα δεδομένων στους γείτονες του. Με αυτόν τον τρόπο το δίκτυο μπορεί να επεκταθεί.



Σχήμα 11: Τοπολογία δικτύου mesh [13]

Η τοπολογία mesh μπορεί να διαιρεθεί σε δυο υποκατηγορίες. Την τοπολογία πλέγματος προκαθορισμένης διαδρομής (switched mesh) και την τοπολογία πλέγματος με επιλεγόμενες διαδρομές (route mesh). Στην πρώτη κατηγορία η δρομολόγηση είναι σταθερή και γίνεται μέσω προκαθορισμένης διαδρομής. Στην δεύτερη δίνεται η δυνατότητα, αφού ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι, να επιλέξουμε διαφορετικές διαδρομές. Τέτοιο παράμετροι είναι η πυκνότητα του δικτύου, η απώλεια πακέτων, το επίπεδο παρεμβολών, η καθυστέρηση και οι διάφορες μεταβολές του δικτύου. Η τοπολογία switched mesh είναι πιο αποτελεσματική, ωστόσο λόγω της πολυπλοκότητάς της απαιτεί μεγάλα ποσά μνήμης, γρήγορους επεξεργαστές και πολύπλοκους αλγορίθμους δρομολόγησης.

4.3.2 Πρωτόκολλα

Το φυσικό στρώμα (PHY) έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ανέχεται την καθυστέρηση διάδοσης, και συγκεκριμένα ανέχεται μέχρι 10 nsec, 1000 φορές μεγαλύτερη από το πρότυπο 802.11.

Το 802.16-2004 στηρίζεται σε ένα πρωτόκολλο πρόσβασης αιτήματος-χρηγήγησης που, σε αντίθεση με την πρόσβαση μέσω ανταγωνισμού (contention-based) που χρησιμοποιείται στο 802.11, δεν επιτρέπει τις συγκρούσεις δεδομένων και, επομένως, χρησιμοποιεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης αποτελεσματικότερα. Καμία σύγκρουση σημαίνει καμία απώλεια εύρους ζώνης λόγω της αναμετάδοσης δεδομένων. Όλη η επικοινωνία συντονίζεται από το σταθμό βάσεως.

Για το φυσικό στρώμα το 802.16-2004 περιγράφει air interfaces:

- i. WirelessMAN-SC για συχνότητες 10-66GHz
- ii. WirelessMAN-SCa για αδειοδοτημένες συχνότητες <11GHz
- iii. WirelessMAN-OFDM για αδειοδοτημένες συχνότητες <11GHz
- iv. WirelessMAN-OFDMA για αδειοδοτημένες συχνότητες <11GHz
- v. WirelessHUMAN για μη αδειοδοτημένες συχνότητες <11GHz

Ανάλυση των interfaces θα γίνει σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

4.3.3 Μέθοδοι διαμόρφωσης – πολυπλεξίας

Τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στο 802.16-2004 είναι όπως και στο 802.16 το QPSK, 16QAM και 64QAM. Τα υψηλότερα σχήματα (π.χ. 64QAM) έχουν μεγάλο ρυθμό διάδοσης, αλλά είναι περισσότερο ευάλωτα σε παρεμβολές. Για να υπάρξει μεγαλύτερη ευελιξία το 802.16-2004 χρησιμοποιεί προσαρμοστική διαμόρφωση (adaptive modulation). Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη μετάδοση, την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, τις παρεμβολές από γειτονικούς διαύλους, την παρουσία θορύβου και όποια άλλη παράμετρο επηρεάζει την ασύρματη σύνδεση, δίνεται η δυνατότητα επιλογής ή εναλλαγής του καταλληλότερου σχήματος διαμόρφωσης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε την καλύτερη επίδοση, αποφεύγουμε διακοπές στη σύνδεση μεταξύ χρηστών και μικρότερο αριθμό σφαλμάτων κατά τη σύνδεση.

Το 802.16-2004 υποστηρίζει τόσο την αμφιδρόμηση διαίρεσης συχνότητας (frequency division duplexing - FDD) όσο και την αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου (time division duplexing - TDD). Οι αδειοδοτημένες λύσεις χρησιμοποιούν FDD ενώ οι μη αδειοδοτημένες χρησιμοποιούν TDD.

Το 802.16-2004 επιπλέον υποστηρίζει τεχνικές ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (orthogonal frequency division multiplexing –OFDM) που επιτρέπει συνδέσεις υψηλής ταχύτητας και προς τις δυο κατευθύνσεις. Η OFDM χρησιμοποιεί γρήγορο μετασχηματισμό Furtier (FFT). Το μέγεθος του FFT είναι 256, που σημαίνει ότι για την OFDM ορίζονται 256 υπο-κανάλια (φέροντα). Συνεπώς το σήμα OFDM διαιρείται σε 256 φέροντα αντί των 64 που χρησιμοποιεί το πρότυπο 802.11. Ο μεγαλύτερος αριθμός φερόντων στην ίδια ζώνη συχνότητας οδηγεί σε στενότερα υποφέροντα με μικρούς ρυθμούς συμβόλων, δηλαδή σε με μεγαλύτερες περιόδους συμβόλων. Ως αποτέλεσμα το OFDM είναι σαφώς πιο ανθεκτικό στην παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών.

4.3.4 Φάσμα - Ζώνες Συχνοτήτων

Το πρότυπο 802.16-2004 μπορεί να λειτουργήσει στο αδειοθετημένο φάσμα 10-66 Ghz και στο μη αδειοθετημένο φάσμα 2-11 Ghz. Η απόφαση για την χρησιμοποίηση αδειοθετημένου φάσματος ή όχι λαμβάνεται αφού εξεταστούν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του καθενός.

Η χρήση του αδειοδοτημένου φάσματος έχει το προφανές πλεονέκτημα της προστασίας έναντι στις παρεμβολές από άλλους ασύρματους παρόχους. Το μειονέκτημα είναι η διαδικασία χορήγησης των αδειών. Για να αναπτύξει μια αδειοδοτημένη λύση, ένας πάροχος δικτύου ή υπηρεσιών πρέπει να αγοράσει φάσμα. Αυτή η διαδικασία ποικίλλει ανάλογα με τους τοπικούς κανονισμούς και μπορεί να είναι από πολύ απλή και γρήγορη έως σύνθετη και χρονοβόρα ενώ στις χώρες όπου πραγματοποιούνται σχετικές δημοπρασίες μπορεί να είναι εξαιρετικά ακριβή. Επιπλέον χαρακτηριστικό είναι ότι σε αυτό το φάσμα τα ραδιοκύματα δεν μπορούν να διαπεράσουν τα κτίρια και απαιτούνται συνδέσεις οπτικής επαφής (line-of-sight – LOS). Εξάιρεση οι χαμηλότερες συχνότητες που συνδέονται με τις αδειοδοτημένες ζώνες (2.5GHz και 3.5GHz) που ευνοούν την επικοινωνία NLOS. Η χρήση του αδειοδοτημένου φάσματος είναι επιθυμητή σε μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές όπου είναι πιθανή η δραστηριοποίηση πολλών παρόχων ή όταν το κόστος δεν είναι το μείζον ζήτημα για την επιλογή της τεχνολογίας, επειδή η τεχνολογία έχει βελτιστοποιηθεί για αυτήν την εφαρμογή (άλλες τεχνολογίες όπως η 3G θα κοστίσουν περισσότερο και θα έχουν χειρότερη απόδοση)

Η χρήση του μη αδειοδοτημένου φάσματος δίνει στον ασύρματο πάροχο το πλεονέκτημα της άμεσης χρήσης του αλλά διατρέχει τον κίνδυνο παρεμβολής από

γειτονικούς παρόχους στο μέλλον. Επιπλέον η χαμηλότερες αρχικές δαπάνες και η γρήγορη ανάπτυξη του δικτύου το καθιστούν ιδιαίτερα ενδιαφέρον. Το μη αδειοδοτημένο φάσμα αφ' ετέρου, είναι συχνά μια καλή επιλογή σε περιοχές με αραιοκατοικημένα περιβάλλοντα. Σε αυτές τις περιοχές ο μετριασμός παρεμβολών επιτυγχάνεται εύκολα μέσω του συντονισμού συχνότητας μεταξύ των χειριστών. Τέτοιες περιοχές είναι οι μεγάλες υπανάπτυκτες περιοχές ή οι περιοχές με χαμηλό επίπεδο υποστήριξης, όπως αγροτικές περιοχές, μια απομονωμένη πανεπιστημιούπολη οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις, τα ναυπηγεία κλπ.

Οι ζώνες τριών συχνοτήτων αρχικού ενδιαφέροντος με τους σημερινούς κανονισμούς είναι:

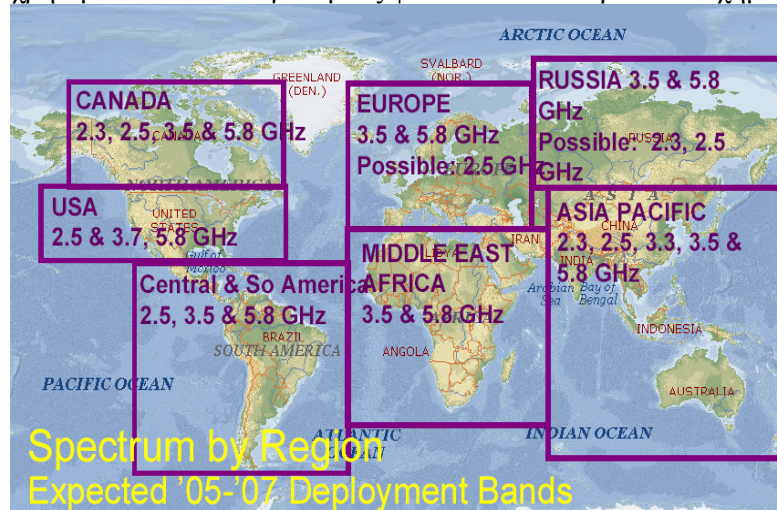
- η μη αδειοδοτημένη ζώνη των 5.8GHz (γνωστή ως Universal National Information Infrastructure [UNII] στις ΗΠΑ)
- η αδειοδοτημένη ζώνη των 2.5GHz (γνωστά ως Multipoint Distribution Service (MDS) ζώνη, γνωστή και ως Broadband Radio Service [BRS] στις ΗΠΑ)
- η αδειοδοτημένη ζώνη των 3.5GHz [11]

i. **Μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων 5GHz:** Τα φάσματα συχνότητας ενδιαφέροντος περιλαμβάνουν τις ζώνες μεταξύ 5.25 και 5.85GHz. (Η ζώνη μεταξύ 5.15-5.25GHz συνηθέστερα σχεδιάζεται για τις χαμηλής ισχύος, indoor εφαρμογές που την κάνει λιγότερο ενδιαφέρουσα για τις WiMAX εφαρμογές. Επειδή στην πλειοψηφία των χωρών το μη αδειοδοτημένο φάσμα είναι "ελεύθερο" προς χρήση, αυτή η ζώνη είναι στρατηγικής σημασίας για να επιτρέψει την επέκταση σε αγροτικές και απομακρυσμένες αγορές με χαμηλή ποιότητα υπηρεσιών και μικρή πληθυσμιακή πυκνότητα. Σε αντίθεση με το Wi-Fi που στοχεύει πρώτιστα τις εφαρμογές εσωτερικού χώρου δικτύων τοπικής περιοχής (LAN), το WiMAX στοχεύει σε εφαρμογές εσωτερικού και εξωτερικού χώρου της μεγαλύτερης σε εμβέλεια μητροπολιτικής περιοχής και έτσι ωφελείται από τα υψηλότερα επιτρεπόμενα επίπεδα ισχύος εξόδου. Στο άνω τμήμα της ζώνης των 5GHz (5.725-5.850GHz), πολλές χώρες επιτρέπουν υψηλότερη ισχύ εξόδου, 4Watts σε σχέση με 1Watt EIRP στις χαμηλότερες συχνότητες της ζώνης, γεγονός που κάνει τη ζώνη αυτή ελκυστικότερη στις εφαρμογές WiMAX. Η κυβέρνηση των ΗΠΑ εξετάζει τις προτάσεις για αύξηση της ισχύος εξόδου στις μη αδειοδοτημένες ζώνες για τις αγροτικές περιοχές προκειμένου να διευκολύνει τις λιγότερο δαπανηρές επεκτάσεις στις περιοχές με χαμηλή ποιότητα υπηρεσιών. Έχει προταθεί ισχύς εξόδου μέχρι 25Watt.

ii. **Αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων 3.5GHz:** Το αρχικό αδειοδοτημένο φάσμα που διατίθεται για BWA εφαρμογές σε αυτήν την γενική περιοχή συχνοτήτων βρίσκεται μεταξύ των 3.4 και 3.6GHz αν και υπάρχουν μερικές νέες κατανομές μεταξύ 3.3-3.4 και 3.6-3.8GHz. Ζώνες μεταξύ 3.4 και 3.6GHz έχουν διατεθεί για τη σταθερή ασύρματη πρόσβαση (Fixed Wireless Access) στην πλειοψηφία των χωρών, με εξαίρεση τις ΗΠΑ. Σε αυτές τις ζώνες, το WiMAX Forum εστιάζει στο να ελαχιστοποιήσει τις περιττές τεχνικές και ρυθμιστικές απαιτήσεις που μπορούν να εμποδίσουν τη χρήση χαρακτηριστικών BWA μοντέλων, π.χ., νομαδική ή φορητή χρήση lap-top, και γενικά την ανάπτυξη της αγοράς.

iii. **Αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων 2.5GHz:** Οι ζώνες μεταξύ 2.5 και 2.77GHz έχουν διατεθεί στις ΗΠΑ, Μεξικό, Βραζιλία και μερικές της χώρες νοτιοανατολικής Ασίας. Το WiMAX Forum συμμετέχει στις τρέχουσες παγκόσμιες προσπάθειες που προέρχονται από συστάσεις που προέκυψαν από το World Radio Conference (WRC) το 2000—με στόχο να διευρύνουν τη διαθεσιμότητα αυτών των ζωνών για σταθερές, φορητές και κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές. Επίσης επικρατούσα ζώνη στη Νοτιοανατολική Ασία (περιλαμβάνοντας την Αυστραλία, τη Νότια Κορέα & τη Νέα Ζηλανδία), είναι αυτή των 2.3GHz.

Οι ζώνες που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 12: Παγκόσμια χρησιμοποίηση συχνοτήτων. [12]

Το εύρος ζώνης των καναλιών μπορεί να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των 1.25, 1.5 και 1.5 MHz με ανώτερο όριο συνολικά τα 20MHz. Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι μικρότερα από το σταθερό εύρος των 20 MHz που χρησιμοποιεί το Wi-Fi. Έτσι αποφεύγεται η σπατάλη εύρους ζώνης για τυχόν χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης. [11]

4.4 Χαρακτηριστικά WiMAX φορητής πρόσβασης (802.16e)

Το πρότυπο IEEE 802.16e είναι ένα πρότυπο ασύρματης τεχνολογίας που σχεδιάστηκε για φορητή πρόσβαση (mobile) και δημοσιεύτηκε τον Φεβρουάριο του 2006. Αποτελεί συνώνυμο του Mobile WiMAX και είναι μια τροποποίηση της βασικής προδιαγραφής 802.16-2004. Στοχεύει στο να διατηρούνται οι κινητοί συνδρομητές συνδεδεμένοι στο ασύρματο MAN ενώ μετακινούνται. Υποστηρίζει φορητές συσκευές όπως έξυπνα κινητά τηλέφωνα, PDAs, υπολογιστές notebook και laptop. Ορίζεται επίσης ότι ένας κινητός χρήστης θα μπορεί να εξυπηρετείται από το δίκτυο ακόμη και αν κινείται με ταχύτητες οι οποίες προσεγγίζουν τα 120 km/h.

Οι βασικές διαφορές με το 802.16-2004 είναι η χρησιμοποίηση OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) και SOFDMA (Scalable OFDMA) τεχνολογίας και η υποστήριξη για διαπομπές (handoffs) και περιαγωγή. Η SOFDMA χρησιμοποιεί γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT) με μέγεθος που μπορεί να ποικίλει και να λάβει τιμές 128, 512, 1024 και 2048. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να χρησιμοποιήσει αρκετά εύρη συχνοτήτων και να ανταποκριθεί αποτελεσματικότερα στις διάφορες συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο. [13]

Οι πάροχοι υπηρεσιών που αναπτύσσουν το 802.16e μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο για να παρέχουν σταθερή υπηρεσία. Οι δύο εκδόσεις του WiMAX θα συνυπάρξουν και θα καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση στις σταθερές και κινητές αγορές. Εκτός από τον προβληματισμό εάν θέλουν να εγκαταστήσουν ένα κινητό ή σταθερό δίκτυο, κατά επιλογή μιας λύσης WiMAX οι πάροχοι πρέπει να αξιολογήσουν πρόσθετους παράγοντες όπως οι αγορές-στόχοι, η διαθεσιμότητα του φάσματος, οποιοδήποτε ρυθμιστικοί περιορισμοί και χρονικούς περιορισμούς της επέκτασης. Τα προϊόντα 802.16-2004 είναι λιγότερο σύνθετα

από τα 802.16e αντίστοιχα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύτερο φάσμα των μη αδειοδοτημένων ζωνών, και προσφέρουν σε μερικές περιπτώσεις, υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης από τον εξοπλισμό 802.16e. Αφετέρου, καλύτερο περιθώριο συνδέσεων (link margin), υποστήριξη κινητικότητας, βελτιωμένη κάλυψη εσωτερικών χώρων και η εύκαμπτη διαχείριση του φάσματος είναι μερικά από τα πλεονεκτήματα που προσφέρονται από τα 802.16e προϊόντα.

Οι περισσότεροι πάροχοι θα αναπτύξουν μόνο μια έκδοση WiMAX στα δίκτυά τους. Υπάρχουν διάφορες επιλογές «μετανάστευσης» (migration) διαθέσιμες σε εκείνους τους operators που επιλέγουν να κινηθούν από ένα 802.16-2004 δίκτυο προς ένα 802.16e δίκτυο. Αυτές περιλαμβάνουν τα δίκτυα επικαλύψεων (overlay), συσκευές χρηστών διπλής λειτουργίας (dual-mode), σταθμούς βάσεως με λογισμικό που επιδέχεται βελτίωση και σταθμούς βάσεως διπλής λειτουργίας (dual-mode). [13]

Τα συστήματα Mobile WiMAX προσφέρουν κλιμάκωση (scalability) τόσο στην τεχνολογία πρόσβασης του μέσου όσο και στην αρχιτεκτονική του δικτύου, παρέχοντας έτσι μεγάλη ευελιξία στις επιλογές ανάπτυξης του δικτύου και στις προσφερόμενες υπηρεσίες. Μερικά από τα γενικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος Mobile WiMAX είναι:

- **Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης:** Η χρήση κεραιών MIMO καθώς και ευέλικτων σχημάτων sub-channelization, εξελιγμένης κωδικοποίησης και διαμόρφωσης επιτρέπουν στην τεχνολογία Mobile WiMAX να υποστηρίζει μέγιστους ρυθμούς κάτω ζεύξης έως 63Mbps ανά τομέα και άνω ζεύξης έως 28Mbps ανά τομέα για δίαυλο εύρους 10MHz.

- **Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS):** Η sub-channelization και τα σχήματα σηματοδοσίας που βασίζονται στο MAC παρέχουν έναν ευέλικτο μηχανισμό για βέλτιστη κατανομή του διατιθέμενου χώρου, χρόνου και φάσματος στη βάση του εκάστοτε πλαισίου για αύξηση της ποιότητας υπηρεσιών.

- **Κλιμάκωση (Scalability):** Το Mobile WiMAX είναι σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να λειτουργεί σε διάφορα εύρη διαύλου (1.25–20MHz) προκειμένου να είναι πάντα σε συμμόρφωση με τις διαφορετικές προδιαγραφές που συναντώνται σε διαφορετικές χώρες του κόσμου.

- **Ασφάλεια:** Τα χαρακτηριστικά του Mobile WiMAX που αφορούν τα θέματα της ασφάλειας είναι τα καλύτερα της αγοράς και συμπεριλαμβάνουν:

- i. Πιστοποίηση με βάση το πρωτόκολλο EAP (Extensible Authentication Protocol)

- ii. Κρυπτογράφηση με χρήση του κώδικα AES-CCM (Advanced Encryption Std–Counter with Cipher-block chaining Message authentication code)

- iii. Σχήματα προστασίας μηνυμάτων ελέγχου που βασίζονται στους κώδικες CMAC (Cipher-based Message Authentication Code) και HMAC (Hash Message Authentication Code)

- **Κινητικότητα:** Υποστηρίζει βέλτιστα σχήματα διαπομπής με καθυστερήσεις μικρότερες των 50msec για να εξασφαλίσει εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real-time) όπως VoIP χωρίς μείωση της ποιότητας, ενώ ευέλικτα σχήματα διαχείρισης διασφαλίζουν την ασφάλεια κατά τη διάρκεια της διαπομπής.

- **Τεχνολογίες έξυπνων κεραιών:** Το Mobile WiMAX υιοθετεί όλο το εύρος των τεχνολογιών των έξυπνων κεραιών προκειμένου να ενισχύσει την απόδοση του συστήματος. Οι τεχνολογίες που υποστηρίζονται περιλαμβάνουν: Τεχνική ελέγχου κατευθυντικότητας κεραιών (beamforming), Space Time Code (STC) για να μειώσει το περιθώριο διαλείψεων (fade margin) και χωρική πολυπλεξία (Spatial Multiplexing - SM) για να αυξηθεί η ρυθμοαπόδοση. Με την SM μεταδίδονται πολλαπλά ρεύματα δεδομένων με πολλαπλές κεραιές.

- **Κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας:** Στο Mobile WiMAX, οι χρήστες επικοινωνούν χρησιμοποιώντας υπο-κανάλια τα οποία καταλαμβάνουν ένα μικρό

κλάσμα του εύρους ζώνης του διαύλου. Έτσι, τα προβλήματα παρεμβολής που παρουσιάζονται στα όρια της κυψέλης μπορούν εύκολα να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη διαμόρφωση της χρήσης των υπο-καναλιών χωρίς την προσφυγή στον παραδοσιακό τρόπο κατανομής των συχνοτήτων.

- **Υπηρεσίες Multicast και Broadcast:** Οι υπηρεσίες Multicast και Broadcast που υποστηρίζονται από το Mobile WiMAX συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά των DVB-H (Digital Video Broadcast), MediaFLO και 3GPP E-UTRA (3G Partnership Project). Ικανοποιούν προδιαγραφές όπως: Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης και μεγάλη εμβέλεια χρησιμοποιώντας Single Frequency Network (SFN), ευέλικτη κατανομή των πόρων, χαμηλή κατανάλωση ισχύος από το κινητό τερματικό και χαμηλό χρόνο μεταγωγής διαύλου [6]

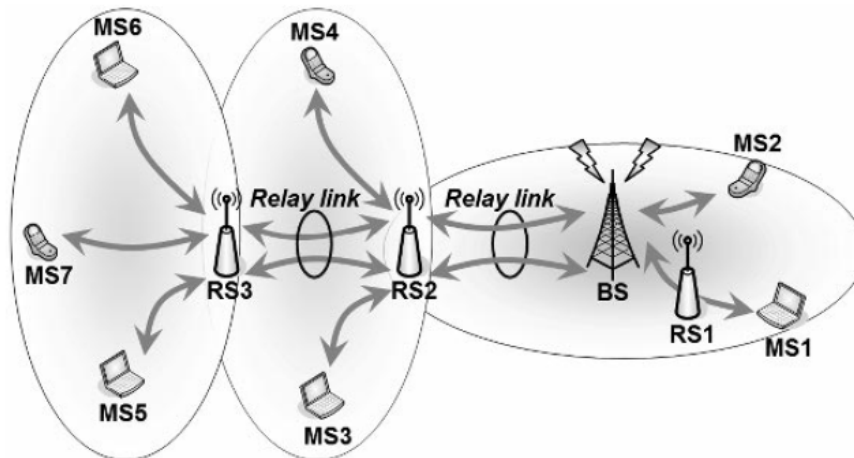
4.5 Χαρακτηριστικά WiMAX πολλαπλών αναμεταδοτών (802.16j)

Το πρότυπο IEEE 802.16e δημοσιεύτηκε τον Φεβρουάριο του 2006. Τον Μάρτιο του 2006 δημιουργήθηκε μια νέα ομάδα εργασίας με όνομα 802.16j που επιχειρεί να τροποποιήσει το τρέχον πρότυπο 802.16e με σκοπό να υποστηρίξει κινητή αναμετάδοση (mobile multi-hop relay - MMR) στο ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυο.

Η αρχιτεκτονική του νέου δικτύου MMR έχει ως προϋπόθεση την υψηλή απόδοση των σταθμών αναμετάδοσης. Οι αναμεταδότες αυτοί θα εξυπηρετούν ως αθροιστικό σημείο για λογαριασμό των σταθμών βάσης. Οι αναμεταδότες θα συλλέγουν κίνηση από τους πολλαπλούς κινητούς χρήστες που σχετίζονται με αυτούς και ομοίως θα διανέμουν κίνηση προς τους χρήστες. Έτσι φυσικά προκύπτει η έννοια της "άθροισης της κίνησης". Ωστόσο η έννοια της σύνδεσης και ο συσχετιζόμενος μηχανισμός δημιουργίας πακέτων δεδομένων που ορίζεται στο 802.16e, εάν εφαρμοστεί απευθείας στην σύνδεση του αναμεταδότη μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση και να περιορίσει σημαντικά την συνολική χωρητικότητα του δικτύου.

Μια τεχνική που ονομάζεται (tunneling) έχει προταθεί για τα δίκτυα 802.16j. Η τεχνική αυτή βελτιώνει την απόδοση και υλοποιεί την ουσιαστική έννοια της άθροισης. Επιπλέον προσπαθεί να αποφύγει την πιθανή χειροτέρευση στις συνδέσεις των αναμεταδοτών και απλοποιεί σημαντικά το χειρισμό της κίνησης στους ενδιάμεσους αναμεταδότες. Ουσιαστικά μια σύνδεση τούνελ είναι μια αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης και του αναμεταδότη.

Μια ενδεχόμενη τοπολογία ενός δικτύου 802.16j MMR φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι σταθμοί αναμετάδοσης βοηθούν το σταθμό βάσης να επικοινωνήσει με τους κινητούς χρήστες εκείνους που είναι είτε αρκετά μακριά από το σταθμό βάσης, είτε παρουσιάζουν μη ικανοποιητικά επίπεδα υπηρεσιών στην απευθείας επικοινωνία με το σταθμό βάσης.



Σχήμα 13: Τοπολογία δικτύου MMR [14]

Το 802.16j έχει υιοθετήσει την χρήση της πρόσβασης OFDMA, εκμεταλλεόμενη την απόδοση σε NLOS περιβάλλοντα σε συχνότητες κάτω των 11 GHz. [14]

4.6 Το φυσικό επίπεδο του WiMAX

Το φυσικό επίπεδο (physical layer-PHY) του WiMAX είναι βασισμένο στο IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16e πρότυπο και σχεδιάστηκε κληρονομώντας κάποια στοιχεία από το Wi-Fi και συγκεκριμένα από το 802.11a.

Το IEEE 802.16 προδιαγράφει πέντε PHY επίπεδα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το MAC επίπεδο που προδιαγράφει το ίδιο πρότυπο. Τα air interfaces αυτά είναι:

- α. WirelessMAN-SC για συχνότητες 10-66GHz
- β. WirelessMAN-SCa για αδειοδοτημένες συχνότητες 2-11GHz
- γ. WirelessMAN-OFDM για αδειοδοτημένες συχνότητες 2-11GHz
- δ. WirelessMAN-OFDMA για αδειοδοτημένες συχνότητες 2-11GHz
- ε. WirelessHUMAN για μη αδειοδοτημένες συχνότητες 2-11GHz

4.6.1 Χαρακτηριστικά του WirelessMAN-SC PHY (10-66 GHz)

Για το σχεδιασμό του PHY επιπέδου για τις συχνότητες 10-66GHz πρέπει να ληφθεί υπόψη η LOS επαφή. Γίνεται χρήση διαμόρφωσης με μονό φέρον και μετάδοση με μορφή ριπών. Οι ριπές μεταδίδονται πλαίσιο προς πλαίσιο με προσαρμόσιμα προφίλ, στα οποία οι παράμετροι της μετάδοσης, περιλαμβανομένων της διαμόρφωσης και των σχημάτων κωδικοποίησης μπορούν να τροποποιηθούν. Η τροποποίηση γίνεται σε κάθε συνδρομητικό σταθμό. Για την αμφιδρόμηση χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι TDD και FDD. Το εύρος συχνοτήτων που υποστηρίζονται 20 ή 25Mhz (Η.Π.Α) και 28 Mhz (Ευρώπη)

Το PHY άνω ζεύξης (uplink) χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό TDMA και DAMA. Η τεχνική DAMA (Demand Assignment Multiple Access) είναι μία τεχνική ανάθεσης χωρητικότητας που προσαρμόζεται όσο χρειάζεται για να ανταποκριθεί βέλτιστα σε αλλαγές απαιτήσεων στους διάφορους σταθμούς. Το uplink κανάλι χωρίζεται σε χρονοσχιμές. Ο αριθμός των χρονοσχιμών που διατίθενται για διάφορες χρήσεις

ελέγχεται από το MAC του σταθμού βάσης και μπορεί να διαφοροποιείται, προκειμένου να επιτευχθεί βελτιστοποίηση. Το κανάλι κάτω ζεύξης (downlink) είναι TDM με την πληροφορία για κάθε συνδρομητικό σταθμό να πολυπλέκεται σε ένα μοναδικό συρμό δεδομένων και να λαμβάνεται από όλους τους συνδρομητές που βρίσκονται μέσα στον ίδιο τομέα. Το downlink PHY περιλαμβάνει ένα υπο-στρώμα σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence) που παρεμβάλλει ένα byte-δείκτη (byte-pointer) στην αρχή του ωφέλιμου φορτίου για να βοηθήσει το δέκτη να αναγνωρίσει την αρχή του MAC PDU. Τα bits δεδομένων που έρχονται από το υπο-στρώμα σύγκλισης μετάδοσης σε τυχαία σειρά, είναι κωδικοποιημένα με FEC και τοποθετημένα σε ένα QPSK, 16QAM ή 64-QAM (προαιρετικός) σηματικό αστερισμό. Το uplink PHY βασίζεται σε TDMA μετάδοση ριπών. Κάθε ριπή είναι σχεδιασμένη να μεταφέρει MAC PDU μεταβλητού μήκους. Ο πομπός τυχαιοποιεί τα εισερχόμενα δεδομένα, τα κωδικοποιεί με FEC και τα τοποθετεί σε QPSK, 16QAM (προαιρετικός) ή 64QAM (προαιρετικός) σηματικό αστερισμό.

4.6.1.1 Πλαισιοποίηση (framing)

Η προδιαγραφή του PHY λειτουργεί σε σχήμα πλαισίου. Μέσα σε κάθε πλαίσιο υπάρχει ένα uplink και ένα downlink υποπλαίσιο. Το downlink υποπλαίσιο αρχίζει με τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για τον έλεγχο και το συγχρονισμό του πλαισίου. Στην TDD περίπτωση, το downlink υποπλαίσιο προηγείται και έπεται το uplink, ενώ στην FDD έχουμε ταυτόχρονη μετάδοση των δύο πλαισίων.

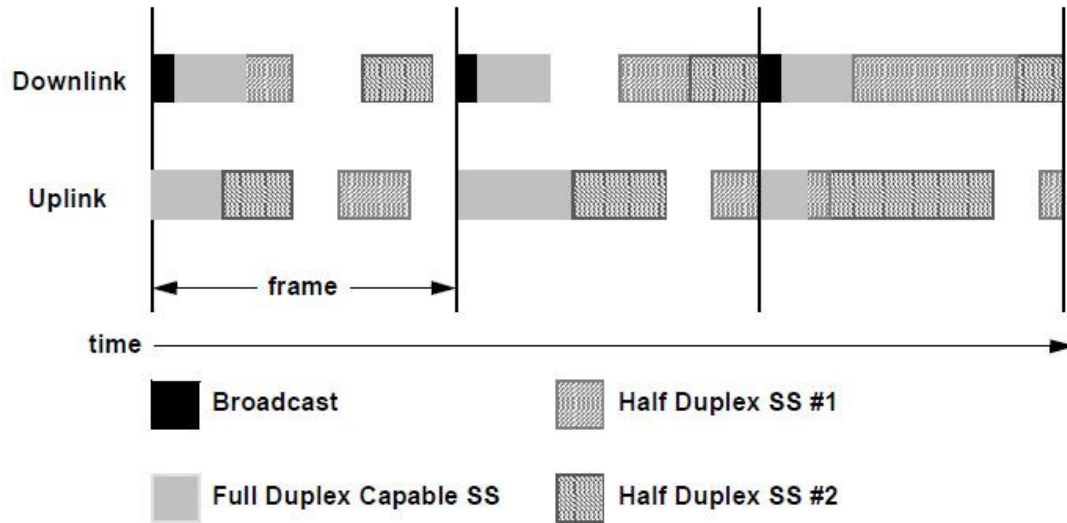
Κάθε συνδρομητικός σταθμός (SS) θα προσπαθήσει να λάβει όλα τα κομμάτια του downlink εκτός από τις ριπές εκείνες για τις οποίες το προφίλ ριπών είτε δεν εφαρμόζεται από τον σταθμό είτε είναι λιγότερο σταθερό από το τρέχον λειτουργικό προφίλ που χρησιμοποιεί. Οι Half-Duplex σταθμοί δεν θα προσπαθήσουν να ακούσουν τα downlink τμήματα που συμπίπτουν με την κατανεμηθείσα uplink μετάδοση

4.6.1.2 Μέθοδοι αμφιδρόμησης duplexing

Για την αμφιδρόμηση (duplexing) χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι TDD και FDD. Για την αναγνώρισή τους χρησιμοποιείται η παράμετρος Type η οποία για την τιμή 0 αντιστοιχεί η TDD , ενώ για την τιμή 0 αντιστοιχεί η FDD.

4.6.1.2.1 Λειτουργία FDD

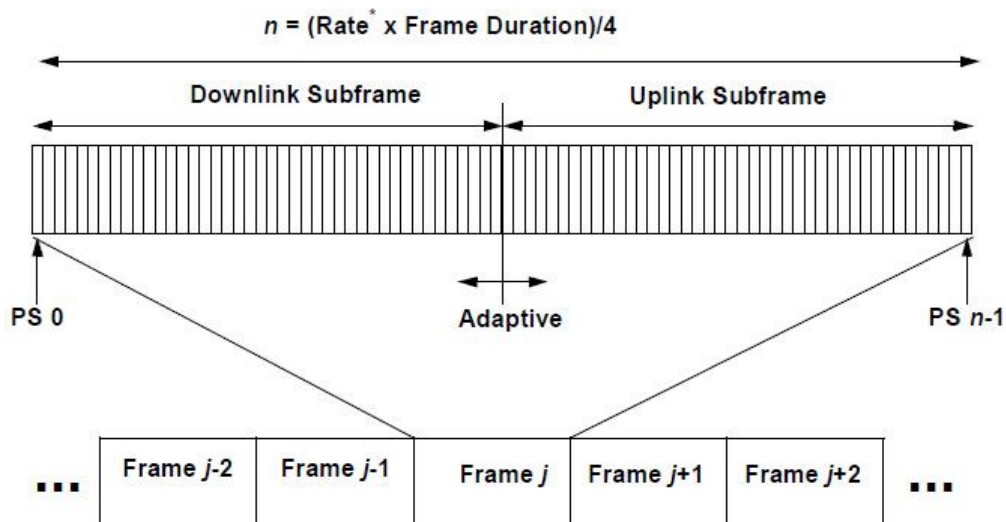
Στην FDD λειτουργία, τα uplink και downlink κανάλια βρίσκονται σε διαφορετικές συχνότητες. Η ικανότητα του downlink να μεταδίδεται με ριπές, διευκολύνει τη χρήση διαφορετικών τύπων διαμόρφωσης και επιτρέπει στο σύστημα να υποστηρίξει ταυτόχρονα full-duplex συνδρομητικούς σταθμούς (που μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν ταυτόχρονα) και half-duplex σταθμούς (που μπορούν μόνο να μεταδίδουν ή μόνο να λαμβάνουν).



Σχήμα 14: Κατανομή εύρους ζώνης σε FDD

4.6.1.2.2 Λειτουργία TDD

Στην περίπτωση της λειτουργίας TDD, οι uplink και downlink μεταδόσεις μοιράζονται την ίδια συχνότητα, αλλά χωρίζονται στο πεδίο του χρόνου. Επίσης, ένα TDD πλαίσιο έχει καθορισμένη διάρκεια και περιλαμβάνει ένα uplink και ένα downlink υποπλαίσιο. Η πλαιοποίηση TDD είναι προσαρμόσιμη με την έννοια ότι η χωρητικότητα της ζεύξης που κατανέμεται στο downlink σε σχέση με το uplink μπορεί να ποικίλει .



Σχήμα 15: Δομή πλαισίου TDD [5]

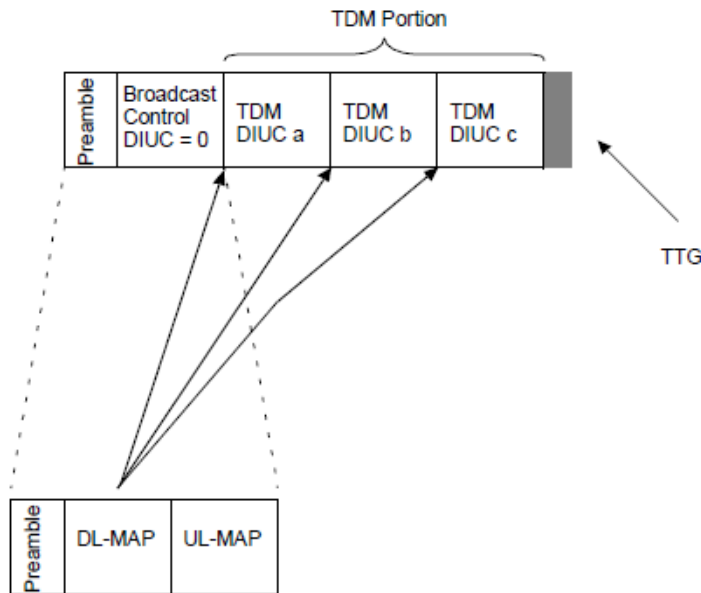
4.6.1.3 TTG (Transmit Transition Gap)

Το TTG είναι ένα κενό μεταξύ της downlink και της uplink ριπής που ακολουθεί. Αυτό το κενό παρέχει χρόνο στο σταθμό βάσης ώστε να μεταπέσει από τη διαμόρφωση πομπού στην αντίστοιχη του δέκτη. Κατά τη διάρκειά του, ο σταθμός βάσης δεν εκπέμπει διαμορφωμένα δεδομένα αλλά απλώς επιτρέπει στις κεραίες πομπού/δέκτη(Tx/Rx) και

στον τομέα λήψης του σταθμού βάσης να ενεργοποιηθούν. Μετά το κενό, ο δέκτης σταθμός βάσης πρέπει να κοιτάξει για τα πρώτα σύμβολα της uplink ριπής. Το χάσμα έχει διάρκεια ακέραιο πολλαπλάσιο της διάρκειας των χρονοσχισμών (PS), και αρχίζει στην έναρξη μίας χρονοσχιμής. Κατά αντιστοιχία, υπάρχει το RTG (Receive Transition Gap) που είναι το κενό μεταξύ της uplink και της downlink που ακολουθεί.

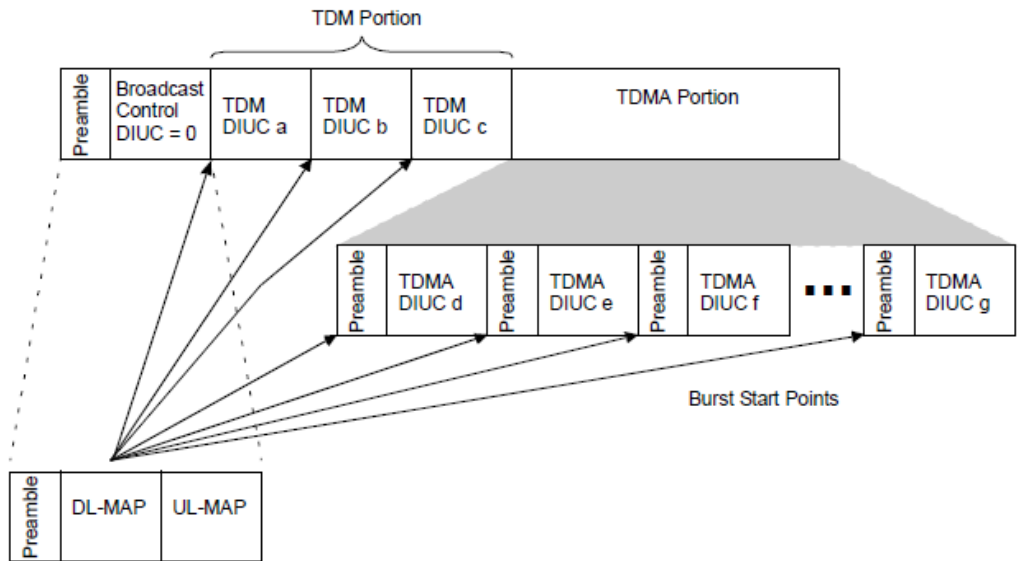
4.6.1.4 PHY κάτω ζεύξης (downlink)

Το υποπλαίσιο κάτω ζεύξης (downlink) χρησιμοποιεί τον κώδικα χρησιμοποίησης κάτω ζεύξης (Downlink Interval Usage Code - DIUC). Η δομή του υποπλαισίου που χρησιμοποιεί TDD φαίνεται στο σχήμα 16. Το υποπλαίσιο κάτω ζεύξης ξεκινάει με το πρόθεμα έναρξης του πλαισίου (Frame Start Preamble) που χρησιμεύει για συγχρονισμό και εξισορρόπηση. Ακολουθείται από τμήμα ελέγχου πλαισίου (Frame Control Section) που περιέχει το DL-MAP (downlink map) για την τρέχουσα κάτω ζεύξη όπως και το UL-MAP που θα χρησιμεύσει αργότερα. Τα μηνύματα DL-MAP και UL-MAP περιέχουν πληροφορίες ελέγχου για τα υπο-πλαίσια της κάτω και της άνω ζεύξης αντίστοιχα. Ακολουθεί το τμήμα TDM που μεταφέρει τα δεδομένα και είναι οργανωμένο σε ριπές. Το TTG διαχωρίζει την κάτω από την άνω ζεύξη.



Σχήμα 16: Δομή υποπλαισίου κάτω ζεύξης TDD [5]

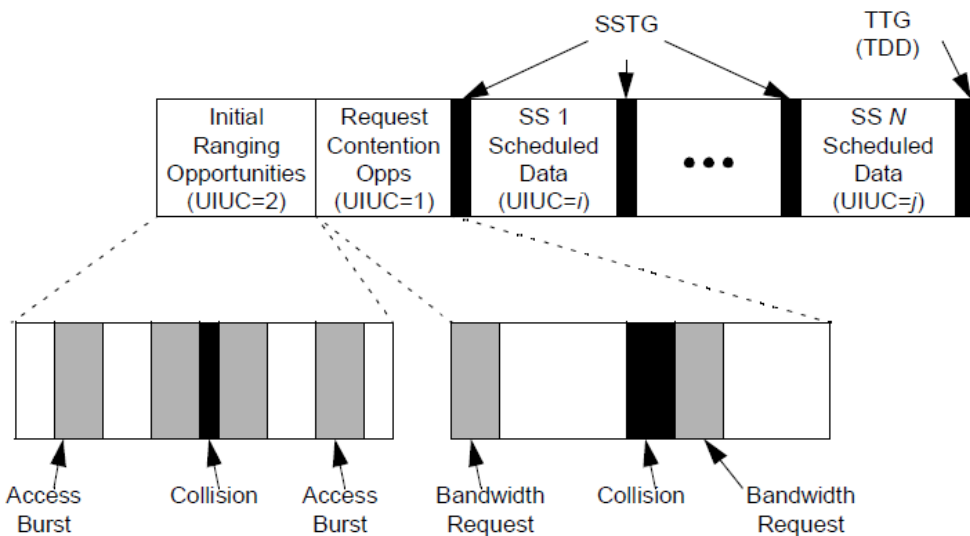
Με παρόμοιο τρόπο το υποπλαίσιο που χρησιμοποιεί FDD ξεκινάει με το πρόθεμα έναρξης του πλαισίου (Frame Start Preamble), ακολουθείται από τμήμα ελέγχου πλαισίου και από το τμήμα TDM που μεταφέρει τα δεδομένα και είναι οργανωμένο σε ριπές. Επιπλέον ακολουθείται από ένα TDMA τμήμα που χρησιμεύει στο να στέλνει δεδομένα στην περίπτωση που υπάρχει half-duplex συνδρομητής.



Σχήμα 17: Δομή υποπλαισίου κάτω ζεύξης FDD [5]

4.6.1.5 PHY άνω ζεύξης (uplink)

Το υποπλαισίο άνω ζεύξης (uplink) που χρησιμοποιεί τον κώδικα χρησιμοποίησης ζεύξης ανόδου (Uplink Interval Usage Code - UIUC) για να καθορίσει το είδος της μετάδοσης, όπως για αρχική χρησιμοποίηση του συστήματος ή απαίτηση για πολυεκπομπή. Το κενό SSTG απομονώνει τις εκπομπές από διάφορους συνδρομητές κατά τη διάρκεια που εκπέμπουν. Το κενό αυτό επιτρέπει τον σταθμό βάσης να συγχρονιστεί με τον νέο συνδρομητή.



Σχήμα 18: Δομή υποπλαισίου άνω ζεύξης [5]

4.6.1.6 Ρυθμοί συμβόλων και εύρη ζώνης καναλιών

Το φάσμα που διατίθεται μεταξύ 10-66 GHz για τα συστήματα PMP είναι μεγάλο. Παρά τους κανονισμούς που ισχύουν κατά τόπους υπάρχει επαρκής κοινός τόπος για ένα προεπιλεγμένο RF εύρος ζώνης καναλιού και πρέπει να καθορισθεί για κάθε κύρια γεωγραφική περιοχή. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε να διασφαλιστεί ότι τα προϊόντα που θα δημιουργηθούν με βάση αυτό το πρότυπο θα έχουν διαλειτουργικότητα. Τα συστήματα χρησιμοποιούν παλμό Nyquist ανυψωμένου συνημίτονου με roll-off παράγοντα ίσο με 0.25 και θα λειτουργούν στην προεπιλεγμένη RF ρύθμιση καναλιών, που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3: Ρυθμοί μετάδοσης και μέγεθος καναλιού

Μέγεθος καναλιού (MHz)	Ρυθμός συμβόλων (MBd)	Bit Rate (Mb/s) QPSK	Bit Rate (Mb/s) 16QAM	Bit Rate (Mb/s) 64QAM	Συνιστώμενη Διάρκεια Πλαισίου(ms)	Αριθμός χρονοσχισμών/πλαίσιο
20	16	32	64	96	1	4000
25	20	40	80	120	1	5000
28	22.4	44.8	89.6	134.4	1	5600

Εξαιτίας των κατά τόπους νομοθεσιών δεν υπάρχει κάποιο πλάνο για τη χρησιμοποίηση συγκεκριμένων συχνοτήτων.

4.6.1.7 Υποσύστημα Ελέγχου

4.6.1.7.1 Τεχνική Συγχρονισμού

Ο αποδιαμορφωτής κάτω ζεύξης τυπικά παρέχει ένα ρολόι αναφοράς εξόδου που παράγεται από το downlink ρολόι συμβόλων. Ο ακριβής συγχρονισμός των uplink χρονοσχισμών εξασφαλίζεται από μία εκτενή διαδικασία βαθμολόγησης που ορίζεται από το MAC, για να διασφαλίσει ότι οι uplink μεταδόσεις από πολλούς χρήστες δεν παρεμβάλουν η μία στην άλλη. Για το λόγο αυτό, το PHY πρέπει να υποστηρίξει υπολογισμούς του ακριβούς χρόνου στον σταθμό βάσης και την ελαστικότητα να τροποποιεί κατάλληλα το χρονισμό στον συνδρομητικό σταθμό, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του πομπού.

4.6.1.7.2 Έλεγχος Συχνοτήτων (Frequency Control)

Προκειμένου να ικανοποιηθούν πιο αυστηρές από τις έως σήμερα προϋπάρχουσες απαιτήσεις, η εκπεμπόμενη RF κεντρική συχνότητα και για τον σταθμό βάσης αλλά και για όλους τους συνδρομητικούς σταθμούς πρέπει να έχει ακρίβεια καλύτερη από $\pm 10 \times 10^{-6}$. Προκειμένου να ικανοποιηθεί αυτή η βασική απαίτηση, οι παρακάτω επιπρόσθετες απαιτήσεις έχουν προκύψει για τους σταθμούς βάσης και τους συνδρομητικούς σταθμούς:

- Η ακρίβεια της συχνότητας του φέροντος πρέπει να είναι $\pm 8 \times 10^{-6}$
- Ο συνδρομητικός σταθμός θα είναι κλειδωμένος στη συχνότητα του σταθμού βάσης
- Η συχνότητα φέροντος του συνδρομητικού σταθμού θα είναι μεταξύ $\pm 1 \times 10^{-6}$ της συχνότητας του σταθμού βάσης

4.6.1.7.3. Έλεγχος ισχύος (Power Control)

Ο αλγόριθμος ελέγχου ισχύος υποστηρίζεται για το uplink κανάλι από μία αρχική βαθμονόμηση και μία περιοδική διαδικασία προσαρμογής, χωρίς καμία απώλεια δεδομένων. Ο σταθμός βάσης πρέπει να είναι ικανός να παρέχει ακριβείς μετρήσεις ισχύος της ληφθείσας ριπής σήματος. Αυτή η μέτρηση μπορεί κατόπιν να συγκριθεί με ένα επίπεδο αναφοράς, και το προκύπτον σφάλμα να επανατροφοδοτήσει τον συνδρομητικό σταθμό μέσω ενός μηνύματος βαθμονόμησης από το MAC. Ο αλγόριθμος ελέγχου ισχύος σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει εξασθένιση ισχύος λόγω της απόστασης ή διακυμάνσεις ισχύος σε ρυθμούς το πολύ έως 20db/sec με βάθος τουλάχιστον 40db. Η ακριβής εφαρμογή του αλγορίθμου καθορίζεται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Το συνολικό εύρος ελέγχου ισχύος αποτελείται από μία σταθερή ποσότητα και από μία ποσότητα που ελέγχεται αυτόματα από ανατροφοδότηση. Ο αλγόριθμος ελέγχου ισχύος λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση των ενισχυτών ισχύος RF με τα διάφορα προφίλ ριπών. Για παράδειγμα, όταν έχουμε αλλαγή από ένα προφίλ σε ένα άλλο, τα περιθώρια ισχύος πρέπει να διατηρούνται ώστε να μην έχουμε κορεσμό του ενισχυτή και να προληφθεί η παραβίαση των μασκών εκπομπής. Σε ενίσχυση του FPC (Fast Power Control) για το απλό φέρον, υπάρχουν αποτελέσματα που παρουσιάζουν ζώνες συχνοτήτων που υφίστανται σημαντική απόσβεση λόγω βροχοπτώσεων ή του φυλλώματος των δέντρων.

4.6.1.8 Χαρακτηριστικά πομπού

Εκτός και αν ορίζεται με διαφορετικό τρόπο, οι απαιτήσεις του πομπού αναφέρονται στη θύρα εξόδου του πομπού και εφαρμόζονται με τον πομπό συντονισμένο σε οποιοδήποτε κανάλι.

4.6.1.8.1 Ισχύς Εξόδου

Σε όσα αναφέρονται παρακάτω, η ισχύς ορίζεται ως η μέση ισχύς όταν εκπέμπεται ένα σήμα (με εξαίρεση τον νεκρό χρόνο μεταξύ των ριπών) μετρούμενη με βάση τα τυχαία bits μιας εκπεμπόμενης ριπής.

- **Για τον σταθμό βάσης:** Ένας σταθμός βάσης δεν πρέπει να εκπέμπει EIRP που να υπερβαίνει είτε τα +28.5dBm/1MHz είτε περιορισμούς από την τοπική νομοθεσία.

- **Για τον συνδρομητικό σταθμό:** Ένας συνδρομητικός σταθμός δεν πρέπει να παράγει EIRP πυκνότητα ισχύος που να υπερβαίνει είτε τα +39.5dBm/1MHz είτε περιορισμούς από την τοπική νομοθεσία.

4.6.1.8.2 Μάσκα εκπομπής και απόδοση παρακείμενου καναλιού

Οι παράμετροι εκπομπής πρέπει να συμμορφώνονται με τα υπάρχοντα πρότυπα ETSI έχοντας ακόμη αυστηρότερες απαιτήσεις και συγκεκριμένα:

- Ζώνη Συχνοτήτων από 40.5 GHz έως 43.5 GHz: EN 301 997-1
- Ζώνη Συχνοτήτων από 24.25 GHz έως 29.5 GHz: EN 301 213-3

Στο downlink κανάλι, το εκπεμπόμενο φάσμα δεν πρέπει να υπερβαίνει τη φασματική μάσκα όπως αυτή ορίζεται στον ακόλουθο πίνακα, που καθορίζει πιο αυστηρές προδιαγραφές από τη φασματική μάσκα System Type C που ορίζει το EN 301 213-3 πρότυπο.

Πίνακας 4: Φασματική μάσκα για downlink κανάλι στα 28MHz

Offset (MHz)	συχνότητας	13	14	4.4	14.8	22.4	28	56	70
Σχετική (db)	attenuation	0	-15	-20	-28	-34	-42	-52	-52

Στο uplink κανάλι, το εκπεμπόμενο φάσμα δεν πρέπει να υπερβαίνει τη φασματική μάσκα όπως αυτή ορίζεται στον ακόλουθο πίνακα, που καθορίζει πιο αυστηρές προδιαγραφές από τη φασματική μάσκα System Type B που ορίζει το EN 301 213-3 πρότυπο.

Πίνακας 5: Φασματική μάσκα για uplink κανάλι στα 28MHz

Offset (MHz)	συχνότητας	1.2	13.5	4.5	22.4	28	56	70
Σχετική (db)	attenuation	0	-7	-17	-32	-37	-52	-52

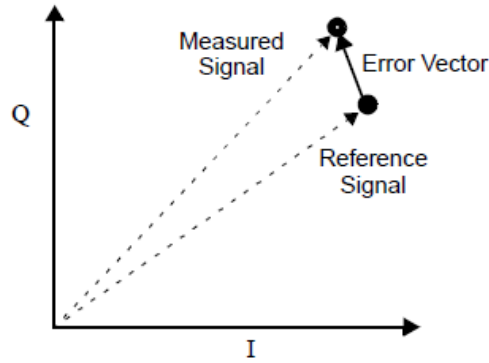
Η μάσκα Net-Filter-Discriminator (NFD), την οποία πρέπει να εγγυάται το σύστημα, ορίζεται παρακάτω:

Πίνακας 6: Φασματική μάσκα NFD για uplink και downlink

Offset (MHz)	FD-DL (db)	FD-UL (db)
28	35.5	29
31.5	39	34.5
35	42	38.5
38.5	45	41
42	46.5	43
49	49	46.5
56	51	50
59.5	51.5	51
63	52	51.5
70	52	52
77	52	52
84	52	52

4.6.1.8.3 Ακρίβεια διαμόρφωσης

Για την ακρίβεια διαμόρφωση εισάγεται ένα μέγεθος που ονομάζεται error vector magnitude (EVM). Το EVM ορίζει το μέσο σφάλμα του αστερισμού σε σχέση με το πιο μακρινό σημείο ισχύος του. Το EVM πρέπει να μετράται κατά το συνεχές τμήμα μιας ριπής που καταλαμβάνει τουλάχιστον το 1/4 του συνολικού πλαισίου εκπομπής, σε εκπομπή με μέγιστη ισχύ. Το απαιτούμενο EVM μπορεί να εκτιμηθεί από το περιθώριο που εφαρμόζεται στον πομπό, αν ως διάνυσμα σφάλματος θεωρήσουμε θόρυβο ο οποίος προστίθεται στον θόρυβο του καναλιού. Με τον όρο περιθώριο εφαρμογής (implementation margin) εννοούμε την επιπλέον ισχύ που χρειάζεται ώστε να παραμείνει σταθερός ο σηματοθορυβικός λόγος C/N, κατά τη μετάβαση από τον ιδανικό στον πραγματικό πομπό.



Σχήμα 19: EVM [5]

Με βάση τις τιμές του πίνακα 6, οι τιμές του EVM θα είναι οι ακόλουθες:

- EVM 12% και 6% για 4QAM και 16QAM αντίστοιχα, όταν μετράται από έναν «ιδανικό» δέκτη χωρίς equalizer και με εύρος ζώνης για αναπαραγωγή φέροντος από 1% έως 5%.
- EVM 10%, 3% και 1.5% για 4QAM, 16QAM και 64QAM αντίστοιχα, όταν μετράται από έναν «ιδανικό» δέκτη χωρίς equalizer και με εύρος ζώνης για αναπαραγωγή φέροντος από 1% έως 5%.

Πίνακας 7: Τιμές EVM ανά σχήμα διαμόρφωσης

Διαμόρφωση	Tx implementation margin	Rx-AWGN C/N BER=10E-6 4 MAC-PDUs	Peak-to-average	EVM (%) without equalization	EVM (%) without equalization
4-QAM+RS	0.5 dB	10	0 dB	12	10
16-QAM+RS	1.0 dB	17	2.55 dB	6	3
64-QAM+RS	1.5 dB	23	3.68 dB	N/A	1.5

Το μετρούμενο EVM θα περιλαμβάνει την ακρίβεια φίλτρου του πομπού, μετατροπέα D/A, ανισορροπίες του διαμορφωτή (modulator imbalances), μη εντοπισμένο (untracked) θόρυβο φάσης και μη γραμμικό ενισχυτή ισχύος.[5]

4.6.1.9 Χαρακτηριστικές τιμές PHY-SC

PS: Για το WirelessMAN-SC PHY, μία φυσική σχισμή (physical slot-PS) είναι η διάρκεια των τεσσάρων συμβόλων διαμόρφωσης στον ρυθμό συμβόλων της downlink μετάδοσης.

- **Ρυθμός Συμβόλων:** Ο ρυθμός συμβόλων πρέπει να βρίσκεται στο εύρος τιμών 10-44.8MBd, με βήμα των 100kBd.
- **Κεντρική Συχνότητα Uplink:** Η uplink κεντρική συχνότητα πρέπει να είναι πολλαπλάσιο των 250 MHz.
- **Κεντρική Συχνότητα Downlink:** Η downlink κεντρική συχνότητα πρέπει να είναι πολλαπλάσιο των 250 MHz.
- **Μεταβολή χρόνου εκκίνησης μετάδοσης ανά σταθμό (Tolerated Poll Jitter):** Για το 10-66GHz PHY, η ελάχιστη τιμή του Poll Jitter είναι 3000μs.
- **Χρόνος έναρξης κατανομής (Allocation Start Time):** Η μονάδα του Allocation Start Time είναι mini-σχισμές από την αρχή του downlink πλαισίου στην οποία το UL-MAP μήνυμα εμφανίζεται.

- **Μονάδες ρύθμισης χρονισμού (Timing Adjust Units):** Η μονάδα ρύθμισης χρονισμού είναι 1/4 σύμβολα διαμόρφωσης. Κατά τη διάρκεια περιοδικής ταξινόμησης, το εύρος της τιμής αυτής της παραμέτρου πρέπει να περιορίζεται στο ± 2 σύμβολα διαμόρφωσης.

4.6.2 Χαρακτηριστικά του WirelessMAN SCa PHY (<11GHz)

Το WirelessMAN-SCa PHY βασίζεται στην τεχνολογία απλού φέροντος και σχεδιάστηκε για NLOS λειτουργία σε ζώνες συχνοτήτων <11GHz. Για τις αδειοδοτημένες ζώνες, τα επιτρεπόμενα εύρη ζώνης των καναλιών περιορίζονται από το εύρος ζώνης που παρέχεται από τους κανονισμούς, διαιρεμένο από οποιαδήποτε δύναμη του 2 και όχι μικρότερα από 1.25MHz.

Τα στοιχεία μέσα στο PHY περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- TDD και FDD ορισμούς, με χρήση των ενός από τα δύο
- TDMA uplink
- TDM ή TDMA downlink
- Adaptive Modulation και FEC για uplink και για downlink
- Δομή πλαισίων που ικανοποιεί αυξημένο συγχρονισμό και εκτίμηση απόδοσης καναλιού σε NLOS συνθήκες και περιβάλλοντα με μεγάλη καθυστέρηση.
- FEC με χρήση Reed-Solomon και Trellis Coded Modulation (TCM)
- Μη ύπαρξη δυνατότητας FEC με χρήση ARQ για ανίχνευση λαθών
- Επιπρόσθετες BTC και CTC FEC επιλογές
- Space Time Coding επιλογή
- Στιβαρές διαμορφώσεις για χαμηλή CINR λειτουργία
- Μορφοποίηση παραμέτρων και MAC/PHY μηνύματα που διευκολύνουν την προαιρετική εφαρμογή των AAS

Η διαδικασία μετάδοσης είναι παρόμοια με πριν. Τα προς μετάδοση δεδομένα πρέπει πρώτα να τυχαιοποιηθούν, μετά να κωδικοποιηθούν κατά FEC και να χαρτογραφηθούν σε QAM σύμβολα. Τα QAM σύμβολα θα πλαισιοποιηθούν μέσα σε μία ομάδα ριτών, που τυπικά εισάγει πλεονάζοντα σύμβολα πλαισιοποίησης. Τα σύμβολα των ριτών πολυπλέκονται σε ένα duplex πλαίσιο που μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλές ριπές. Οι διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται είναι BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM και 256QAM (προαιρετικός)

4.6.2.1 Έλεγχος ισχύος

Ο αλγόριθμος ελέγχου ισχύος υποστηρίζεται για το uplink κανάλι από μία αρχική βαθμολόγηση και μία περιοδική διαδικασία προσαρμογής, χωρίς καμία απώλεια δεδομένων. Ο σταθμός βάσης πρέπει να είναι ικανός να παρέχει ακριβείς μετρήσεις ισχύος της ληφθείσας ριπής σήματος. Αυτή η μέτρηση μπορεί κατόπιν να συγκριθεί με ένα επίπεδο αναφοράς, και το προκύπτον σφάλμα να επανατροφοδοτήσει τον συνδρομητικό σταθμό μέσω ενός μηνύματος βαθμονόμησης από το MAC. Ο αλγόριθμος ελέγχου ισχύος σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει εξασθένιση ισχύος λόγω της απόστασης ή διακυμάνσεις ισχύος σε ρυθμούς το πολύ έως 30 db/second με βάθος τουλάχιστον 10db. Ο αλγόριθμος ελέγχου ισχύος λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση των ενισχυτών ισχύος RF με τα διάφορα προφίλ ριτών. Για παράδειγμα, όταν σε QAM διαμόρφωση έχουμε αλλαγή από ένα προφίλ σε ένα άλλο, τα περιθώρια ισχύος πρέπει να διατηρούνται ώστε να μην έχουμε

ψαλίδισμα ισχύος κορυφής, να προληφθεί η παραβίαση των μασκών εκπομπής και/ή η υπερβολική EVM πομπού.

4.6.2.2 Απαιτήσεις συστήματος

• **Ακρίβεια συχνότητας καναλιού:** Η ακρίβεια συχνότητας καναλιού RF για έναν συνδρομητικό σταθμό πρέπει να είναι μεταξύ $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ του επιλεγμένου RF φέροντος σε ένα εύρος θερμοκρασίας από -40 έως $+65^\circ\text{C}$ και για χρόνο 5 ετών από την ημερομηνία παραγωγής του εξοπλισμού από τον κατασκευαστή του. Η ακρίβεια συχνότητας για τον σταθμό βάσης πρέπει να είναι μεταξύ $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ του επιλεγμένου RF φέροντος σε ένα επιχειρησιακό εύρος θερμοκρασίας από -40 έως $+65^\circ\text{C}$ και για χρόνο 10 ετών από την ημερομηνία παραγωγής του εξοπλισμού.

• **Ρυθμός συμβόλων:** Για έναν roll-off παράγοντα a , ο ονομαστικός ρυθμός συμβόλων (Symbol Rate-SR) σε MBd/s, για ένα εφαρμοσμένο εύρος ζώνης BW σε MHz, θα είναι $SR = (BW - 0.088) / (1 + a)$.

• **Μεταβολή χρονισμού συμβόλων (Symbol Timing Jitter):** Η ελάχιστη προς τη μέγιστη διαφορά του χρονισμού συμβόλων (symbol timing) σε μία περίοδο 2sec θα είναι μικρότερη από το 2% της ονομαστικής περιόδου συμβόλων. Αυτή η προδιαγραφή για τη μεταβολή χρονισμού θα διατηρείται για ένα λειτουργικό εύρος θερμοκρασίας από -40 έως $+65^\circ\text{C}$.

• **Ελάχιστο SNR και EVM πομπού:** Ένα μεταδιδόμενο σήμα θα έχει SNR όχι μικρότερο από 40db στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας του πομπού. Το EVM του πομπού πρέπει να είναι όχι μεγαλύτερο από 3.1%, θεωρώντας την περίπτωση 64QAM.

• **Επίπεδο ελέγχου ισχύος πομπού:** Ένας σταθμός βάσης και ένας συνδρομητικός σταθμός θα παρέχουν αντίστοιχα, $\geq 30\text{dB}$ και $\geq 20\text{dB}$ μονοτονικού επιπέδου ελέγχου ισχύος, με κλιμακούμενο μέγεθος βήματος από 1dB. Η σχετική ακρίβεια του μηχανισμού ελέγχου ισχύος και για τον συνδρομητικό σταθμό και για τον σταθμό βάσης είναι $\pm 25\%$ του βήματος ελέγχου σε dB, αλλά όχι περισσότερο από 4dB. (π.χ για βήμα 10dB η σχετική ακρίβεια είναι 2.5dB). Το επίπεδο ελέγχου απόλυτης ακρίβειας για σταθμό βάσης και συνδρομητικό σταθμό είναι μεταξύ $\pm 6\text{dB}$.

• **Απαιτήσεις ισχύος:** Η ισχύς εξόδου του πομπού πρέπει να επιτυγχάνει τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν αμέσως προηγουμένως μέσα σε 5μs. Μεταβατικά φαινόμενα που οφείλονται στην επίδραση του φίλτρου του πομπού πρέπει να υπολογίζονται στην πραγματοποίηση χρονικών υπολογισμών.

• **Πλαστές εκπομπές κατά τη διάρκεια ριπών:** Ένας πομπός πρέπει να ελέγχει τις πλαστές εκπομπές για να προσαρμόζεται με τις κανονιστικές διατάξεις πριν και κατά τη διάρκεια της αύξησης ισχύος (ramp-up), κατά τη διάρκεια και μετά από τη μείωση ισχύος (ramp-down), και πριν και μετά από μία ομάδα ριπών σε ένα TDM/TDMA σχήμα.

• **Πλαστές εκπομπές εκτός ζώνης:** Οι πλαστές εκπομπές εκτός ζώνης θα προσαρμόζονται με την εφαρμογή τοπικών κανονιστικών φασματικών μασκών.

• **Ευαισθησία δέκτη:** Η ευαισθησία του δέκτη πρέπει να είναι καλύτερη από τις τιμές που παρουσιάζονται στην παρακάτω λίστα (υπολογισμένη για $BER = 10^{-6}$ χωρίς κωδικοποίηση) και με συνολικό επίπεδο θορύβου 7db (στον δέκτη) και 3db απώλειες εφαρμογής. (Εύρος ζώνης σε MHz):

- QPSK: $-93.2 + 10 \cdot \log(BW)$
- 16QAM: $-86.2 + 10 \cdot \log(BW)$
- 64QAM: $-80 + 10 \cdot \log(BW)$

Οι θεωρητικές τιμές του SNR_{req} (για ακωδικοποιητά σήματα με $BER = 10^{-6}$) είναι οι ακόλουθες:

- QPSK: 9.8db

- 16QAM: 16.8db
- 64QAM: 23db

• **Μέγιστο σήμα εισόδου δέκτη:** Ένας σταθμός βάσης πρέπει να είναι σε θέση να λαμβάνει ένα σήμα μέγιστης ισχύος ίσης με -40dbm και θα πρέπει να αντέχει ένα μέγιστο σήμα εισόδου ίσο με 0dbm χωρίς να προκαλείται βλάβη στο κύκλωμα. Ένας συνδρομητικός σταθμός πρέπει να είναι σε θέση να λαμβάνει ένα σήμα μέγιστης ισχύος ίσης με -20dbm και θα πρέπει να αντέχει ένα μέγιστο σήμα εισόδου ίσο με 0dbm χωρίς να προκαλείται βλάβη στο κύκλωμα.

• **Παρεμβολή παρακαίμενου διαύλου στο δέκτη:** Ένα σύστημα πρέπει να επιτυγχάνει ελάχιστη απόδοση σε παρεμβολή παρακαίμενου και εναλλακτικού διαύλου σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, όπου όλες οι μετρήσεις αναφέρονται σε μη κωδικοποιημένη διαμόρφωση:

Πίνακας 8: Ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση συστήματος σε ομοδιαυλική παρεμβολή

	Για BER= 10^{-3} με υποβάθμιση 3dB	Για BER= 10^{-3} με υποβάθμιση 1dB
Παρεμβολή 1 ^{ου} γειτονικού διαύλου	BPSK: -12 QPSK: -9 16QAM: +2 64QAM: +9 256QAM: +16	BPSK: -8 QPSK: -5 16QAM: +2 64QAM: +9 256QAM: +16
Παρεμβολή 2 ^{ου} γειτονικού διαύλου	BPSK: -37 QPSK: -34 16QAM: -27 64QAM: -20 256QAM: +12	BPSK: -33 QPSK: -30 16QAM: -22 64QAM: -16 256QAM: -9

4.6.2.3 Χαρακτηριστικές τιμές PHY-SCa

• **Χρόνος έναρξης κατανομής (Allocation Start Time) άνω ζεύξης:** Η μονάδα του Allocation Start Time είναι PS (physical slot) από την έναρξη του downlink πλαισίου στην οποία το UL-MAP μήνυμα εμφανίζεται. Η ελάχιστη τιμή που έχει καθορισθεί για την παράμετρο αυτή είναι ίση με τη διάρκεια ενός πλαισίου.

• **PS:** Η φυσική σχισμή ορίζεται από την εξίσωση: $PS=4 \cdot \text{Διάρκεια Συμβόλου}$

• **Μονάδες ρύθμισης χρονισμού (Timing Adjust Units):** Η μονάδα ρύθμισης χρονισμού είναι 1/32 σύμβολα διαμόρφωσης

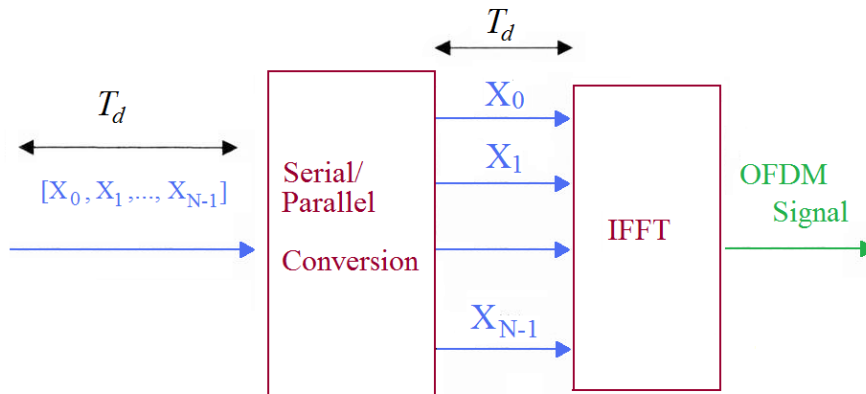
4.6.3 Χαρακτηριστικά του WirelessMAN-OFDM PHY (<11GHz)

Το κύριο χαρακτηριστικό του WirelessMAN-OFDM PHY είναι ότι βασίζεται στην OFDM διαμόρφωση. Η OFDM είναι ένα κατάλληλο σχήμα για μετάδοση δεδομένων με υψηλό ρυθμό και καλύπτει τις απαιτήσεις για NLOS λειτουργία στις ζώνες συχνοτήτων κάτω από τα 11 GHz.

4.6.3.1. Περιγραφή του OFDM

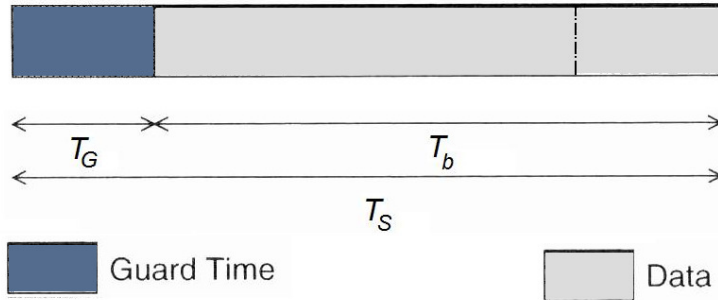
Η OFDM ανήκει σε μια οικογένεια σχημάτων μετάδοσης που ονομάζεται διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων. Βασίζεται στην ιδέα του διαχωρισμού ενός δεδομένου ροής δεδομένων (stream) με υψηλό ρυθμό μετάδοσης σε πολλά παράλληλα stream με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης και κατόπιν στην διαμόρφωση αυτών πάνω σε ξεχωριστά φέροντα. Τα φέροντα αυτά, που ονομάζονται και υπο-φέροντα ή τόνοι, επιλέγονται έτσι ώστε το ένα να είναι ορθογώνιο του άλλου (θεωρητικά) και με αυτόν τον τρόπο εξουδετερώνεται η διασυμβολική παρεμβολή (ISI).

Η βασική αρχή για την OFDM είναι η χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT). Γενικά ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) είναι ένας μαθηματικός υπολογισμός που μας βοηθά να υπολογίσουμε τον διακριτό Fourier. Ο FFT χρησιμοποιείται για οποιοδήποτε αριθμό σημείων N , όμως για απλούστερα αποτελέσματα ο N είναι δύναμη του 2 (πχ. $N=256$). Ο αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (IFFT) εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία. Ο IFFT δύναμης N , εφαρμόζεται σε N σημεία, δημιουργεί την OFDM κυματομορφή, όπου κάθε σύμβολο μεταδίδεται σε μια από τις N ορθογώνιες συχνότητες. Κάθε σύμβολο μπορεί να είναι διαμορφωμένο με πιθανόν διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης.



Σχήμα 20: Δημιουργία OFDM σήματος

Αν η χρονική διάρκεια συμβόλου είναι T_b , τότε $T_b = 1/\Delta f$, όπου Δf είναι το εύρος ζώνης των ορθογώνιων συχνοτήτων. Στην πραγματικότητα η διάρκεια ενός OFDM συμβόλου είναι λίγο μεγαλύτερη, λόγω της προσθήκης του κυκλικού προθέματος Cyclic Prefix (CP) στην αρχή του συμβόλου. Το CP χρησιμοποιείται για να συλλέγει πολυδιαδρομικά σήματα και να διατηρήσει την ορθογωνιότητα των τόνων και η χρονική διάρκειά του συμβολίζεται με T_g (guard time). Ο λόγος T_g/T_b συχνά αναφέρεται ως G . Επιλογή μεγάλης τιμής του G δίνει ανθεκτικότητα σε άσχημες συνθήκες ενός ραδιοδιαύλου όμως ελαττώνεται ο ρυθμός μετάδοσης. Τιμές του G για OFDM and OFDMA PHY layers είναι 1/4, 1/8, 1/16 και 1/32, ενώ για το mobile (OFDMA) υποχρεωτικά επιλέγεται η τιμή 1/8.

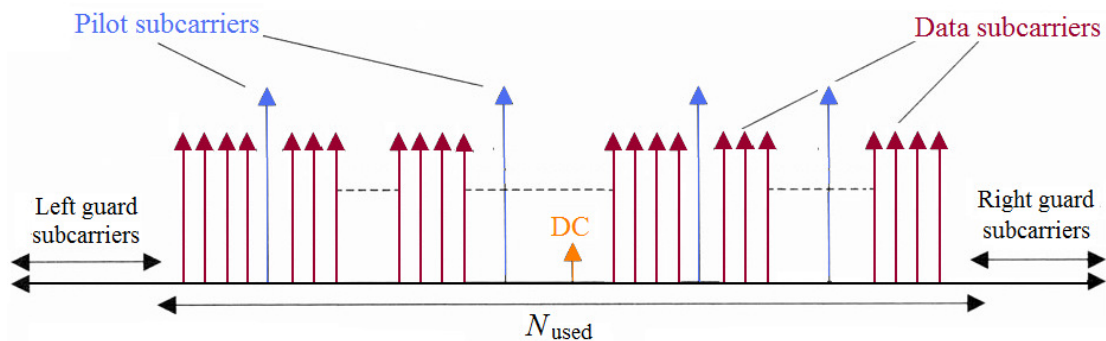


Σχήμα 21: Δομή πλαισίου OFDM [5]

Κατά την έναρξη της επικοινωνίας, ένας συνδρομητικός σταθμός πρέπει να ψάξει όλες τις πιθανές τιμές του CP μέχρι να βρει την τιμή του CP που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης. Ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να χρησιμοποιήσει το ίδιο CP κατά το uplink. Εφόσον ένα CP επιλεγεί από τον σταθμό βάσης για λειτουργία κατά το downlink, αυτό δεν πρέπει να αλλάξει. Αλλαγή του CP θα αναγκάσει όλους τους συνδρομητικούς σταθμούς να επανασυγχρονιστούν με τον σταθμό βάσης.

Η περιγραφή στο πεδίο της συχνότητας περιλαμβάνει τη βασική δομή ενός OFDM συμβόλου. Ένα OFDM σύμβολο αποτελείται από υπο-φέροντα (subcarriers), ο αριθμός των οποίων καθορίζει το μέγεθος του FFT που χρησιμοποιείται. Υπάρχουν οι παρακάτω τύποι subcarriers:

- Data subcarriers, για μεταφορά δεδομένων
- Pilot subcarriers, για διάφορους υπολογιστικούς σκοπούς
- Null subcarriers, όπου δεν έχουμε καθόλου μετάδοση και χρησιμοποιούνται για τα guard bands, τα μη ενεργά subcarriers και το
- DC (Direct Current) subcarrier, είναι τύπος null subcarrier. Το DC είναι το subcarrier του οποίου η συχνότητα είναι ίση με την κεντρική συχνότητα RF του πομπού. Αντιστοιχεί στη συχνότητα μηδέν για ένα FFT σήμα που δεν έχει διαμορφωθεί. [15]



Σχήμα 22: Περιγραφή OFDM στο πεδίο της συχνότητας

4.6.3.2 Απαιτήσεις Συστήματος

4.6.3.2.1 Απαιτήσεις πομπού

- **Επίπεδο ελέγχου ισχύος πομπού:** Για έναν συνδρομητικό σταθμό που δεν υποστηρίζει την υπο-καναλοποίηση, ο πομπός θα υποστηρίζει ένα μονοτονικό (διατηρεί την υπάρχουσα δομή) επίπεδο ελέγχου ισχύος 30dB τουλάχιστον. Για έναν συνδρομητικό

σταθμό που υποστηρίζει την υπο-καναλοποίηση, ο πομπός θα υποστηρίζει ένα μονοτονικό επίπεδο ελέγχου ισχύος 50dB τουλάχιστον. Το ελάχιστο μέγεθος του βήματος είναι τουλάχιστον 1 dB. Η σχετική ακρίβεια του μηχανισμού ελέγχου ισχύος είναι ± 1.5 dB για μεγέθη βήματος που δεν υπερβαίνουν τα 15dB, ± 3 dB για μεγέθη βήματος από 15 έως 30 dB και ± 5 dB για μεγέθη μεγαλύτερα των 30dB. Για έναν σταθμό βάσης, ο πομπός θα υποστηρίζει ένα μονοτονικό επίπεδο ελέγχου ισχύος 10dB τουλάχιστον.

- **Σφάλμα αστερισμού πομπού:** Για να εξασφαλιστεί ότι ο SNR του δέκτη δεν θα υποβαθμιστεί περισσότερο από 0.5db εξαιτίας του SNR του πομπού, το σχετικό RMS λάθος αστερισμού, υπολογισμένο σε μέση τιμή λαμβάνοντας υπόψη τα subcarriers, OFDM πλαίσια και πακέτα, δεν θα υπερβαίνει μία τιμή που εξαρτάται από το προφίλ της ριπής, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 9: Μέση τιμή σχετικού RMS λάθους αστερισμού

Είδος Ριπής	Σχετικό λάθος αστερισμού	
	για τον συνδρομητικό σταθμό (dB)	για το σταθμό βάσης (dB)
BPSK-1/2	-13.0	-13.0
QPSK-1/2	-16.0	-16.0
QPSK-3/4	-18.5	-18.5
16-QAM-1/2	-21.5	-21.5
16-QAM-3/4	-25.0	-25.0
64-QAM-2/3	-29.0	-29.0
64-QAM-3/4	-30.0	-31.0

4.6.3.2.2 Απαιτήσεις δέκτη

Οι απαιτήσεις του δέκτη αφορούν μετρήσεις που γίνονται στον σύνδεσμο (κοννέκτορα) όπου εισέρχεται το σήμα από την κεραία. Σε περίπτωση όπου έχουμε εσωτερική κεραία κάνουμε την παραδοχή ότι χρησιμοποιούμε κεραία με κέρδος 0dB.

- **Ευαισθησία Δέκτη:** Το BER που μετράται μετά από το FEC πρέπει να είναι μικρότερο από 10^{-6} . Τα επίπεδα ελάχιστης εισόδου μετρούνται με χρήση των καθορισμένων προτυποποιημένων μορφών για τα πακέτα των μηνυμάτων και με χρήση ενός AWGN καναλιού. Η ευαισθησία στο ελάχιστο επίπεδο εισόδου του δέκτη R_{ss} δίνεται από τη σχέση

$$R_{ss} = -101 + SNR_{Rx} + 10 \cdot \log[F_s \cdot (N_{used} \cdot N_{subchannels}) / (N_{FFT} 16)] \quad (1), \quad \text{όπου}$$

SNR_{Rx} : ο SNR του δέκτη σε db, σύμφωνα με τον πίνακα

F_s : η συχνότητα δειγματοληψίας

$N_{υποκαναλιών}$: ο αριθμός των subchannels.

Πίνακας 10: Παραδοχές για την ευαισθησία στο ελάχιστο επίπεδο εισόδου του δέκτη R_{ss}

Διαμόρφωση	Ρυθμός κώδικα	SNR πομπού σε db
BPSK	1/2	3.0
QPSK	1/2	6.0
QPSK	3/4	8.5
16-QAM	1/2	11.5
16-QAM	3/4	15.0
64-QAM	2/3	10.0
64-QAM	3/4	21.0

- **Μέγιστο σήμα εισόδου δέκτη:** Ο δέκτης πρέπει να είναι σε θέση να αποκωδικοποιεί ένα μέγιστο σήμα της τάξης των -30dBm

- **Απόρριψη παρακείμενου και εναλλακτικού καναλιού δέκτη:** Η απόρριψη παρακείμενου και εναλλακτικού καναλιού δέκτη θα αντιμετωπιστεί από το απαιτούμενο δυναμικό εύρος του πομπού, από 3db πάνω από το επίπεδο αναφοράς ευαισθησίας μέχρι το μέγιστο επίπεδο σήματος εισόδου. Η απόρριψη παρακείμενου και εναλλακτικού καναλιού πρέπει να μετράται στην ελάχιστη ευαισθησία θέτοντας την ισχύ του επιθυμητού σήματος 3db πάνω από τον λόγο της εξίσωσης (1) και αυξάνοντας το επίπεδο ισχύος του παρεμβάλλοντος σήματος μέχρι να επιτευχθεί ο ρυθμός λάθους. Επίσης μέτρηση πρέπει να γίνεται και κατά την περίπτωση μέγιστου σήματος εισόδου, ελαττώνοντας σε αυτήν την περίπτωση την ισχύ του παρεμβάλλοντος σήματος.

Και στις δύο περιπτώσεις, η διαφορά ισχύος μεταξύ του επιθυμητού σήματος και του παρεμβάλλοντος καναλιού είναι ο λόγος C/I. Το παρεμβάλον σήμα θα είναι ένα προσαρμόσιμο OFDM σήμα, χωρίς συγχρονισμό με το σήμα που ελέγχεται από το τεστ. Για έλεγχο μη-παρακείμενου καναλιού, η μέθοδος ελέγχου είναι πανομοιότυπη εκτός από το γεγονός ότι το παρεμβάλον κανάλι θα πρέπει να είναι οποιοδήποτε κανάλι, εκτός από το παρακείμενο ή το ομοδιαυλικό. Για το PHY, η ελάχιστη απόρριψη πρέπει να υπερβαίνει τις τιμές του ακόλουθου πίνακα:

Πίνακας 11: Παρεμβολή παρακείμενου καναλιού σε σχέση με τη διαμόρφωση.

Διαμόρφωση/Κωδικοποίηση	Παρεμβολή παρακείμενου καναλιού C/I (dB)	Παρεμβολή μη παρακείμενου καναλιού C/I (dB)
16QAM-3/4	-11	-30
64QAM-3/4	-4	-23

- **Μέγιστο ανεκτό σήμα δέκτη:** Ο δέκτης πρέπει να αντέχει μέγιστο σήμα 0dBm χωρίς να προκαλείται σε αυτόν βλάβη

- **Απόρριψη σήματος ειδώλου πομπού:** Ο πομπός θα πρέπει να παρέχει ελάχιστο λόγο απόρριψης σήματος ειδώλου της τάξης των 60db. Η απαίτηση για απόρριψη θα πρέπει να περιλαμβάνει όλους τους όρους των ειδώλων που παράγονται στην RF συχνότητα του δέκτη και στις επακόλουθες ενδιάμεσες συχνότητες (IF).

- **Απαιτήσεις συχνότητας και χρονισμού:** Στον σταθμό βάσης η κεντρική συχνότητα εκπομπής, η κεντρική συχνότητα λήψης και η συχνότητα ρολογιού των συμβόλων πρέπει να προέρχονται από τον ίδιο ταλαντωτή αναφοράς. Στον σταθμό βάσης η ανοχή της συχνότητας αναφοράς πρέπει να είναι καλύτερη από $\pm 8 \cdot 10^{-6}$ για τις αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων και για 10 χρόνια από την ημερομηνία κατασκευής του εξοπλισμού. Στον συνδρομητικό σταθμό, η κεντρική συχνότητα εκπομπής και η συχνότητα ρολογιού των δειγμάτων συγχρονίζονται και κλειδώνονται στον σταθμό βάσης με ανοχή το πολύ 2% του διαστήματος μεταξύ των subcarriers για την κεντρική συχνότητα εκπομπής (1% σε περίπτωση υπο-καναλισμού) και 5 ppm της συχνότητας ρολογιού. Για συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τοπολογία πλέγματος (mesh) όλες οι συχνότητες των συσκευών πρέπει να έχουν ακρίβεια της τάξης του $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ και να επιτυγχάνουν συγχρονισμό στους γειτονικούς τους κόμβους με ανοχή το πολύ 3% του διαστήματος των subcarriers.

Κατά τη διάρκεια της περιόδου συγχρονισμού, ο συνδρομητικός σταθμός αποκτά συγχρονισμό συχνότητας με τη συγκεκριμένη ανοχή πριν επιχειρήσει οποιαδήποτε uplink εκπομπή. Κατά τη διάρκεια κανονικής (normal) λειτουργίας, ο συνδρομητικός σταθμός

ανιχνεύει όλες τις αλλαγές της συχνότητας και αναβάλλει κάθε εκπομπή αν έχει χαθεί ο συγχρονισμός. Κάθε συνδρομητικός σταθμός αποκτά και προσαρμόζει τον χρονισμό (timing) του κατά τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα uplink OFDM σύμβολα να φθάνουν συγχρονισμένα στον σταθμό βάσης με μία ακρίβεια $\pm 50\%$ του ελάχιστου διαστήματος προστασίας (guard interval) ή καλύτερη. [5], [16]

4.6.3.3 Χαρακτηριστικές τιμές PHY-OFDM

- **Χρόνος έναρξης κατανομής (Allocation Start Time) άνω ζεύξης:** Η μονάδα του Allocation Start Time είναι PS από την έναρξη του downlink πλαισίου στην οποία το UL-MAP μήνυμα εμφανίζεται. Η ελάχιστη τιμή που έχει καθορισθεί για την παράμετρο αυτή είναι ένα σημείο στο πλαίσιο 1ms μετά από το τελευταίο σύμβολο του UL-MAP.

- **PS:** Η φυσική σχισμή ορίζεται από την εξίσωση:
 $PS = 4 / \text{Συχνότητα Δειγματοληψίας } F_s$

- **Μονάδες ρύθμισης χρονισμού (Timing Adjust Units):** Η μονάδα ρύθμισης χρονισμού είναι $1 / F_s$

4.6.4 Χαρακτηριστικά του WirelessMAN-OFDMA PHY (<11GHz)

Το κύριο χαρακτηριστικό του WirelessMAN-OFDMA PHY είναι ότι βασίζεται στην OFDMA πολλαπλή πρόσβαση.

4.6.4.1. Περιγραφή του OFDMA

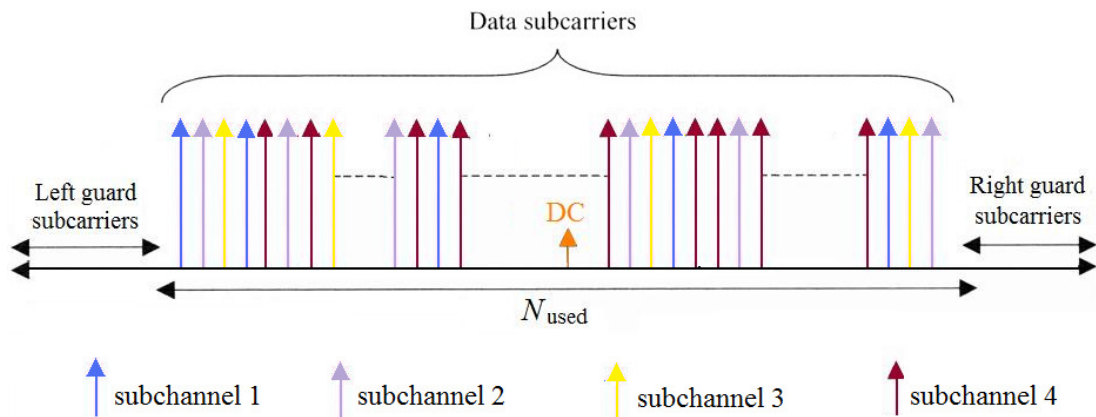
Ένα OFDMA σύστημα διαιρεί τα διαθέσιμα υπο-φέροντα σε ομάδες, οι οποίες ονομάζονται υπο-κανάλια, και μεταβιβάζει ένα ή περισσότερα υπο-κανάλια σε διάφορους χρήστες για ταυτόχρονη εκπομπή. Σήματα από διάφορους χρήστες επικαλύπτονται στο πεδίο της συχνότητας αλλά κατέχουν διαφορετικά υπο-φέροντα. Η ορθογωνιότητα ανάμεσα στα υποφέροντα αυτά αποτρέπει την παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης μεταξύ των χρηστών (MAI). [14]

Ωστόσο η OFDMA πολλαπλή πρόσβαση δεν είναι το μόνο χαρακτηριστικό του OFDMA PHY. Η κυριότερη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η μετάδοση OFDM είναι κλιμακωτή. Αν και η λέξη κλιμακωτή δεν εμφανίζεται στο πρότυπο της IEEE, το OFDMA PHY χαρακτηρίζεται ότι έχει κλιμακωτή OFDMA (Scalable – SOFDMA). Η κλιμάκωση είναι η αλλαγή του μεγέθους του FFT και κατά συνέπεια του αριθμού των υπο-φερόντων. Τα μεγέθη FFT που υποστηρίζονται είναι 128, 512, 1024 και 2048. Η τιμή 256 του OFDM PHY δεν υποστηρίζεται. Για τα προφίλ κινητού WiMAX υποχρεωτικές τιμές είναι μόνο οι 512 και 1024.

Η δομή του πλαισίου του OFDMA είναι ίδια με αυτή του OFDM της εικόνας 4.11. Ομοίως έχουμε την προσθήκη του κυκλικού προθέματος (CP) στην αρχή του συμβόλου. Ο λόγος T_g/T_b , γνωστός και ως G μπορεί να λάβει τις τιμές 1/32, 1/16, 1/8 και 1/4, ενώ για κινητούς χρήστες υποχρεωτικά επιλέγεται να έχει την τιμή 1/8. Η εγκατάσταση επικοινωνίας είναι ίδια με αυτή του OFDM, δηλαδή ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να ψάξει όλες τις πιθανές τιμές του CP μέχρι να βρει την τιμή του CP που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης. Ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να χρησιμοποιήσει το ίδιο CP κατά το uplink. Εφόσον ένα CP επιλεγεί από τον σταθμό βάσης για λειτουργία κατά το downlink,

αυτό δεν πρέπει να αλλάξει. Αλλαγή του CP θα αναγκάσει όλους τους συνδρομητικούς σταθμούς να επανασυγχρονιστούν με τον σταθμό βάσης.

Στο πεδίο της συχνότητας, το OFDMA σύμβολο αποτελείται από υπο-φέροντα (subcarriers), ο αριθμός των οποίων καθορίζει το μέγεθος του FFT που χρησιμοποιείται. Οι τύποι των subcarriers (Data, Pilot, Null και DC) χρησιμοποιούνται και εδώ. [15]



Σχήμα 23: Περιγραφή OFDMA στο πεδίο της συχνότητας

Οι παράμετροι της SOFDMA φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 12: Παράμετροι της κλιμακωτής SOFDMA

Παράμετροι	Τιμές			
System Channel Bandwidth (MHz)	1.25	5	10	20
Sampling Frequency (F_p in MHz)	1.4	5.6	11.2	22.4
FFT Size (N_{FFT})	128	512	1024	2048
Number of Sub-Channels	2	8	16	32
Sub-Carrier Frequency Spacing	10.94 kHz			
Useful Symbol Time ($T_b = 1/f$)	91.4 microseconds			
Guard Time ($T_g = T_b/8$)	11.4 microseconds			
OFDMA Symbol Duration ($T_s = T_b + T_g$)	102.9 microseconds			
Number of OFDMA Symbols (5 ms Frame)	48			

Σημειώνεται ότι η πρώτη έκδοση (Release 1) της ομάδας εργασίας του WiMAX Forum αναπτύσσει το προφίλ συστημάτων με εύρος ζώνης στα 5 και 10MHz. [6]

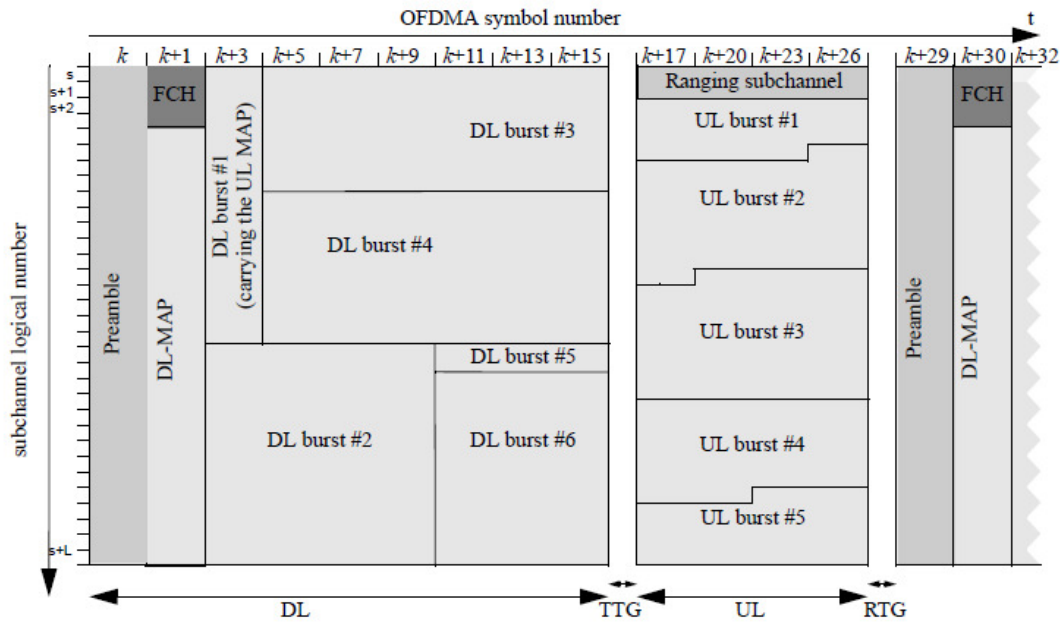
4.6.4.2 Δομή πλαισίων

Για την αμφιδρόμηση (duplexing) στις αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι TDD και FDD. Οι συνδρομητικοί σταθμοί μπορεί να χρησιμοποιήσουν και H- FDD (Half-Duplex FDD). Στις μη αδειοδοτημένες ζώνες όμως χρησιμοποιείται μόνο η μέθοδος TDD.

4.6.4.2.1 Δομή πλαισίου PMP

Όταν τίθεται σε λειτουργία ένα σύστημα TDD το πλαίσιο δημιουργείται από τις εκπομπές του σταθμού βάσης και του συνδρομητικού σταθμού. Κάθε πλαίσιο στην εκπομπή κάτω ζεύξης ξεκινά με ένα πρόθεμα (preamble) και ακολουθείται από την περίοδο DL εκπομπής και την περίοδο UL εκπομπής. Τα κενά TTG και RTG πρέπει να εισάγονται μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης και στο τέλος του πλαισίου, αντίστοιχα, για να επιτρέψουν τον σταθμό βάσης να αντιστρέψει την λειτουργία του και να αποφεύγονται οι συγκρούσεις.

Η δομή ενός πλαισίου OFDM για εφαρμογή TDD φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 24: Δομή πλαισίου OFDM για εφαρμογή TDD [16]

Για να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος, σε ένα πλαίσιο περιλαμβάνονται οι εξής πληροφορίες ελέγχου:

- **Preamble (Προοίμιο):** Χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό και αποτελεί το πρώτο σύμβολο του πλαισίου.
- **FCH - Frame Control Head:** Ακολουθεί το preamble και περιέχει πληροφορίες για τη διαμόρφωση του πλαισίου, όπως το μήκος των μηνυμάτων του πρωτοκόλλου MAC το σχήμα κωδικοποίησης και τα χρησιμοποιήσιμα sub-channels.
- **DL-MAP και UL-MAP :** Περιέχει πληροφορίες κατανομής των υπο-καναλιών και άλλες πληροφορίες ελέγχου για τα υπο-πλαίσια της κάτω και της άνω ζεύξης αντίστοιχα.
- **UL Ranging:** Χρησιμοποιείται από τα κινητά τερματικά για να διεξάγουν προσαρμογές χρόνου, συχνότητας και ισχύος καθώς και αιτήσεις εύρους ζώνης.
- **UL CQICH (Channel Quality Indicator sub-Channel):** Χρησιμοποιείται από τα κινητά τερματικά για να παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού.
- **UL ACK:** Χρησιμοποιείται από τα κινητά τερματικά για να παρέχει αναγνώριση HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest)

Η δομή των πλαισίων αλλάζουν σε περιπτώσεις όπως η χρήση προσαρμοστικών κεραιών.

Η κατανομή των υπο-καναλιών στην κάτω ζεύξη μπορεί να γίνει είτε με μερική χρήση (Partial Usage of Subchannels - PUSC), όπου μέρος των υποκαναλιών ανατίθενται στον πομπό, είτε με πλήρη χρήση (Full Usage of the Subchannels - FUSC), όπου το σύνολο των υπο-καναλιών ανατίθενται για χρήση στον πομπό.

4.6.4.3 Απαιτήσεις Συστήματος

4.6.4.3.1 Απαιτήσεις πομπού

- **Επίπεδο ελέγχου ισχύος πομπού:** Ο πομπός υποστηρίζει ένα μονοτονικό επίπεδο ελέγχου ισχύος 45db τουλάχιστον (30db για μη αδειοδοτημένες ζώνες) με ελάχιστο μέγεθος 1db και σχετική ακρίβεια $\pm 0.5\text{db}$
- **Σφάλμα αστερισμού πομπού:** Για να εξασφαλιστεί ότι ο SNR του δέκτη δεν θα υποβαθμιστεί περισσότερο από 0.5db εξαιτίας του SNR του πομπού, το σχετικό RMS λάθος αστερισμού, υπολογισμένο σε μέση τιμή λαμβάνοντας υπόψη τα υπο-φέροντα, OFDM πλαίσια και πακέτα, δεν θα υπερβαίνει μία τιμή που εξαρτάται από το προφίλ της ριθής, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 13: Μέση τιμή σχετικού RMS λάθους αστερισμού

Είδος Ριθής	Σχετικό λάθος αστερισμού	
	για τον συνδρομητικό σταθμό (dB)	για το σταθμό βάσης (dB)
QPSK-1/2	-15.0	-15.0
QPSK-3/4	-18.0	-18.0
16-QAM-1/2	-20.5	-20.5
16-QAM-3/4	-24.0	-24.0
64-QAM-1/2	-26.0	-26.0
64-QAM-2/3	-28.0	-28.0
64-QAM-3/4	-30.0	-31.0

4.6.4.3.2 Απαιτήσεις Δέκτη

- **Ευαισθησία Δέκτη (dBm):** Το BER που υπολογίζεται μετά το FEC πρέπει να είναι μικρότερο από 10^{-6} , στα επίπεδα ισχύος που ορίζονται από την εξίσωση (2), για τυποποιημένα μηνύματα και τεστ συνθηκών. Τα επίπεδα ελάχιστης εισόδου μετρούνται με χρήση των καθορισμένων προτυποποιημένων μορφών για τα πακέτα των μηνυμάτων ή με χρήση ενός AWGN καναλιού

Το ελάχιστο επίπεδο ευαισθησίας του δέκτη, R_{ss} , δίνεται από τη σχέση

$$R_{ss} = -114 + SNR_{Rx} + 10 \cdot \log_{10}(R) + 10 \cdot \log_{10}(F_s \cdot N_{used} / N_{FFT}) + ImpLoss + NF \quad (2), \text{ όπου}$$

SNR_{Rx} : ο SNR του δέκτη σε dB, σύμφωνα με τον πίνακα

R: ο παράγοντας επανάληψης

F_s : η συχνότητα δειγματοληψίας σε MHz

ImpLoss: οι απώλειες εφαρμογών που περιλαμβάνουν μη ιδανικά αποτελέσματα στο δέκτη. Η θεωρητική του τιμή είναι 5 dB.

NF: η μορφή θορύβου που αναφέρεται στην είσοδο της κεραίας. Η θεωρητική του τιμή είναι 8 dB.

Πίνακας 14: SNR παραδοχές για τον πομπό

Διαμόρφωση	Ρυθμός κώδικα	SNR πομπού (dB)
QPSK	$\frac{1}{2}$	5.0
	$\frac{3}{4}$	8.0
16-QAM	$\frac{1}{2}$	10.5
	$\frac{3}{4}$	14.0
64-QAM	$\frac{1}{2}$	16.0
	$\frac{2}{3}$	18.0
	$\frac{3}{4}$	20.0

Οι παραπάνω τιμές του πίνακα μετρήθηκαν σε δίαυλο AWGN και έχει γίνει χρήση κώδικα CC.

- **Απόρριψη παρακείμενου και μη-παρακείμενου καναλιού δέκτη:** Η απόρριψη παρακείμενου και εναλλακτικού καναλιού δέκτη μετράται τοποθετώντας την επιθυμητή ισχύ του σήματος 3dB πάνω από την ευαισθησία του δέκτη και αυξάνοντας το επίπεδο ισχύος του παρεμβάλλοντος σήματος μέχρι να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος ρυθμός λαθών. Η διαφορά ισχύος μεταξύ του παρεμβάλλοντος σήματος και του επιθυμητού καναλιού είναι η απόρριψη παρακείμενου καναλιού. Το παρεμβάλον σήμα στο παρακείμενο κανάλι θα είναι ένα προσαρμοζόμενο OFDMA σήμα, μη συγχρονισμένο με το σήμα του καναλιού που βρίσκεται υπό έλεγχο. Η διαδικασία του τεστ για μη παρακείμενα κανάλια είναι ακριβώς η ίδια με τη μόνη διαφορά ότι το παρεμβάλον κανάλι μπορεί να είναι οποιοδήποτε κανάλι διαφορετικό από το παρακείμενο ή το ομοδιαυλικό.

- **Μέγιστο σήμα εισόδου δέκτη:** Ο δέκτης του συνδρομητή πρέπει να είναι σε θέση να αποκωδικοποιεί ένα μέγιστο σήμα της τάξης των -30dBm, ενώ του σταθμού βάσης της τάξης των -45dBm.

- **Μέγιστο ανεκτό σήμα δέκτη:** Ο δέκτης πρέπει να αντέχει μέγιστο σήμα 0dBm χωρίς να προκαλείται σε αυτόν βλάβη.

- **Ανοχές κεντρικής συχνότητας και συχνότητας χρονισμού συμβόλων:** Στον σταθμό βάσης η κεντρική συχνότητα εκπομπής, η κεντρική συχνότητα λήψης και η συχνότητα ρολογιού των συμβόλων πρέπει να προέρχονται από τον ίδιο ταλαντωτή αναφοράς. Στον σταθμό βάσης η ακρίβεια της συχνότητας αναφοράς πρέπει να είναι καλύτερη από $\pm 2 \cdot 10^{-6}$. Ομοίως και στον συνδρομητικό σταθμό, η κεντρική συχνότητα εκπομπής και η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να προέρχονται από τον ίδιο ταλαντωτή αναφοράς. Ως εκ τούτου, ο συνδρομητικός σταθμός κατά την εκπομπή θα πρέπει να και κλειδώνεται στον σταθμό βάσης, έτσι ώστε η κεντρική συχνότητα να μην αποκλίνει περισσότερο του 2% του διαστήματος μεταξύ των subcarriers. Για συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τοπολογία δικτύου όλες οι συχνότητες των συσκευών πρέπει να έχουν ακρίβεια της τάξης του $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ και να επιτυγχάνουν συγχρονισμό στους γειτονικούς τους κόμβους με ανοχή το πολύ 3% του διαστήματος μεταξύ των subcarriers. Κατά τη διάρκεια της περιόδου συγχρονισμού, ο συνδρομητικός σταθμός αποκτά συγχρονισμό συχνότητας με τη συγκεκριμένη ανοχή πριν επιχειρήσει οποιαδήποτε uplink εκπομπή. Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας, ο συνδρομητικός σταθμός ανιχνεύει όλες τις αλλαγές της συχνότητας υπολογίζοντας την αντιστάθμιση συχνότητας κάτω ζεύξης και αναβάλλει κάθε εκπομπή αν έχει χαθεί ο συγχρονισμός.

4.6.4.4 Χαρακτηριστικές τιμές PHY-OFDMA

- **Χρόνος έναρξης κατανομής (Allocation Start Time) άνω ζεύξης:** Η μονάδα του Allocation Start Time είναι PS από την έναρξη του downlink πλαισίου στην οποία το UL-MAP μήνυμα εμφανίζεται. Η ελάχιστη τιμή που έχει καθοριστεί για την παράμετρο αυτή είναι 10 OFDMA σύμβολα.

- **PS:** Η φυσική σχισμή ορίζεται από την εξίσωση:

$$PS = 4 / \text{Συχνότητα Δειγματοληψίας } F_s.$$

- **Μονάδες ρύθμισης χρονισμού (Timing Adjust Units):** Η μονάδα ρύθμισης χρονισμού είναι $1/F_s$. [5], [16]

4.7 Στρώμα Media Access Control (MAC)

4.7.1 Εισαγωγή

Το επίπεδο MAC είναι αυτό που θα ορίσει ποιος συνδρομητικός σταθμός θα είναι σε θέση να συνδεθεί στο δίκτυο. Το επίπεδο MAC υποστηρίζει ασύρματα δίκτυα με τοπολογίες point-to-multipoint (PMP) και mesh. Το MAC είναι προσανατολισμένο σε σύνδεση.

Σύμφωνα με το πρότυπο του 802.16 μια σύνδεση ορίζεται ως ένας αμφίδρομος καθορισμός μεταξύ ομότιμων MAC του σταθμού βάσης και του συνδρομητή με σκοπό τη μεταφορά κίνησης ροής υπηρεσιών. Μια ροή υπηρεσιών αναφέρεται σαν μια αμφίδρομη ροή MAC SDUs σε μια σύνδεση που εξασφαλίζεται μια συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσιών. Ένα αναγνωριστικό μήκους 16 bit (connection identifier - CID) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει μια σύνδεση σε ένα δίκτυο, ενώ ένα άλλο αναγνωριστικό service flow identifier (SFID) χρησιμεύει να καθοριστούν οι παράμετροι της ροής υπηρεσιών της σύνδεσης.

4.7.2 Υπο-στρώματα του MAC

Το επίπεδο MAC διαιρείται σε τρία υποστρώματα:

- το υπο-στρώμα σύγκλισης ως προς την υπηρεσία (service-specific convergence sublayer - CS),

- το κοινό υπό-στρώμα (common part sublayer CPS), και

- το υπο-στρώμα ασφαλείας.

Τα υποστρώματα αυτά αλληλεπιδρούν το ένα με το άλλο σε στα σημεία πρόσβασης υπηρεσίας (service access points – SAP).

Το MAC-CS συνδέει το κοινό υπόστρώμα MAC-CPS με το επίπεδο δικτύου. Ταξινομεί και καθορίζει τα SDUs (Service Data Units) στην κατάλληλη σύνδεση MAC. Επεξεργάζεται, εάν απαιτείται, τα υψηλότερου επιπέδου PDUs (Protocol Data Units) με βάση την ταξινόμηση. Παραδίδει τα CS PDUs στο κατάλληλο MAC SAP και δέχεται τα CS PDUs από την ομότιμη οντότητα.

Το κοινό υπό-στρώμα CPS είναι υπεύθυνο για την σωστή λειτουργία, εγκατάσταση σύνδεσης και διατήρησή της. Κατανέμει το διαθέσιμο εύρος ζώνη και διατηρεί την σύνδεση μεταξύ των δυο πλευρών. Το πρότυπο 802.16-2004 καθορίζει μια σειρά από μηνύματα διαχείρισης και μετάδοσης. Τα μηνύματα διαχείρισης ανταλλάσσονται μεταξύ συνδρομητικού σταθμού και σταθμού βάσης πριν την εγκατάσταση και κατά τη διάρκεια της σύνδεσης. Όταν η σύνδεση πραγματοποιηθεί τα μηνύματα μετάδοσης ανταλλάσσονται για να επιτρέψουν την μετάδοση των δεδομένων.

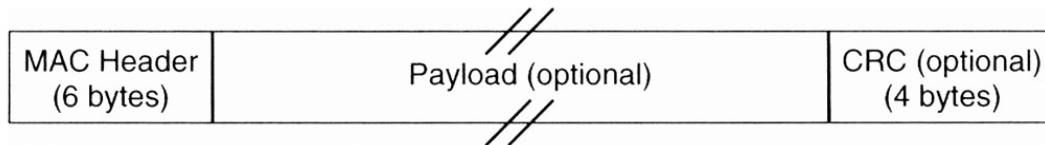
Το MAC-CPS δέχεται δεδομένα από διάφορα MAC-CS μέσω των σημείων MAC SAP που είναι ταξινομημένα για συγκεκριμένες συνδέσεις. Η ποιότητα υπηρεσιών (QoS) λαμβάνεται υπόψη για τη μετάδοση και τον προγραμματισμό των δεδομένων από το PHY επίπεδο. Το MAC-CPS περιλαμβάνει διαδικασίες διαφόρων τύπων, όπως πλαισιοποίηση, πολλαπλή πρόσβαση, κατανομή και απαίτηση εύρους ζώνης, προγραμματισμός, διαχείριση ασύρματων πόρων, διαχείριση QoS. [25]

Το υπόστρωμα ασφαλείας είναι υπεύθυνο για την κρυπτογράφηση (encryption), εξουσιοδότηση (authorization) και την σωστή αλλαγή κλειδιών κωδικοποίησης. Η κρυπτογράφηση διατηρεί μυστικά όλα τα δεδομένα που μεταδίδονται. Κρυπτογραφούνται μόνο τα ωφέλιμα φορτία των πλαισίων και όχι οι κεφαλίδες.

Την στιγμή που ένας συνδρομητικός σταθμός συνδέεται σε ένα σταθμό βάσης, οι δυο σταθμοί εκτελούν αμοιβαία πιστοποίηση ταυτότητας με κρυπτογράφηση δημοσίου κλειδιού RSA χρησιμοποιώντας κλειδιά X.509. Τα ωφέλιμα φορτία των πλαισίων κρυπτογραφούνται με ένα σύστημα συμμετρικού κλειδιού, είτε το DES με αλυσιδωτή σύνδεση τμημάτων κρυπτογραφικού κώδικα (cipher block chaining), είτε το τριπλό DES με δύο κλειδιά. Είναι πιθανόν να προστεθεί σύντομα το σύστημα AES. Ο έλεγχος ακεραιότητας χρησιμοποιεί το SHA-1. [17]

4.7.3 Πλαίσια του MAC

Το πλαίσιο του MAC είναι γνωστό και σαν MAC PDU. Έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα



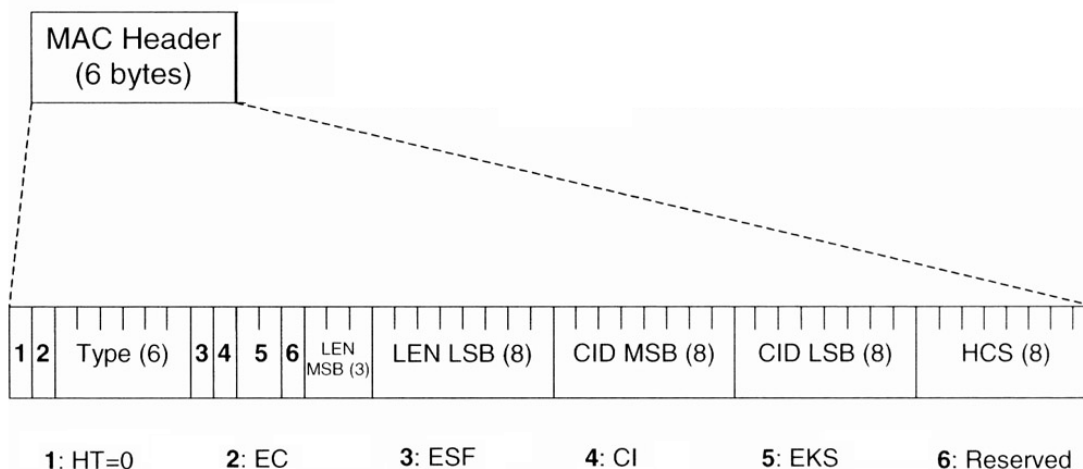
Σχήμα 25: Μορφή του MAC PDU

Κάθε PDU αρχίζει με μία επικεφαλίδα σταθερού μήκους (header), η οποία μπορεί να ακολουθείται από το ωφέλιμο φορτίο (payload). Το ωφέλιμο φορτίο περιέχει πληροφορία μεταβλητού μήκους οπότε το MAC PDU μπορεί να αποτελείται από μεταβλητό αριθμό bytes. Αυτό επιτρέπει στο MAC να εξυπηρετεί διάφορους τύπους κίνησης δεδομένων ανωτέρου στρώματος, χωρίς να έχει γνώση της μορφής ή του σχηματισμού των bits αυτών των μηνυμάτων (διαδικασία tunneling). Ένα MAC PDU μπορεί να περιλαμβάνει CRC, η χρήση του οποίου είναι υποχρεωτική για SCA, OFDM και OFDMA PHY στρώματα.

4.7.3.1 MAC επικεφαλίδα

Για την κάτω ζεύξη ορίζεται ένας τύπος επικεφαλίδας, η γενική μορφή DL MAC επικεφαλίδας, με την οποία ξεκινά κάθε MAC PDU που περιέχει είτε μηνύματα διαχείρισης MAC είτε δεδομένα του υποστρώματος σύγκλισης (CS). Για την άνω ζεύξη ορίζονται δύο τύποι επικεφαλίδων. Ο πρώτος τύπος είναι ο γενικό τύπος επικεφαλίδας με την οποία ξεκινά κάθε MAC PDU που περιέχει είτε μηνύματα διαχείρισης MAC είτε δεδομένα του CS. Ο δεύτερος τύπος είναι ο τύπος χωρίς ωφέλιμο φορτίο. Ο διαχωρισμός των δυο τύπων UL MAC PDU γίνεται από το πεδίο Header Type (HT) μήκους ενός bit, στην αρχή της επικεφαλίδας MAC.

Η επικεφαλίδα γενικού τύπου περιλαμβάνει τα πεδία που φαίνονται στο σχήμα και αναλύονται στον πίνακα που ακολουθούν



Σχήμα 26: Μορφή επικεφαλίδας MAC PDU γενικού τύπου [16]

Πίνακας 15: Πεδία της επικεφαλίδας MAC PDU γενικού τύπου

Όνομα πεδίου	Μήκος (bits)	Περιγραφή
HT	1	Header Type: τιμή 0 δηλώνει γενικό τύπο επικεφαλίδας, τιμή 1 επικεφαλίδα χωρίς ωφέλιμο φορτίο
EC	1	Encryption Control: τιμή 0 δηλώνει ότι το ωφέλιμο φορτίο δεν είναι κρυπτογραφημένο, ενώ για 1 είναι. Για MAC PDU χωρίς ωφέλιμο φορτίο δηλώνει τύπο I ή II
Type	6	Υποδεικνύει τις υπο-επικεφαλίδες και ειδικούς τύπους ωφέλιμου φορτίου
ESF	1	Extended Subheader Field: 1 υπάρχει εκτενής υποεπικεφαλίδα
CI	1	CRC Indicator: για τιμή 1 υπάρχει έλεγχος CRC, για 0 δεν υπάρχει
EKS	1	Encryption Key Sequence: είναι ο δείκτης του κλειδιού TEK που χρησιμοποιείται στην κρυπτογράφηση
LEN	11	Length: δηλώνεται το μήκος της MAC PDU μαζί με την επικεφαλίδα και το CRC
CID	16	Connection Identifier : προσδιορίζει το είδος της σύνδεσης
HCS	8	Header Check Sequence: διορθώνει τυχόν λάθη στην επικεφαλίδα

4.7.3.2 Ωφέλιμο φορτίο (payload)

Το ωφέλιμο φορτίο μπορεί να ξεκινάει από μια ή περισσότερες υπο-επικεφαλίδες (subheader). Το πεδίο Type μεγέθους 6 bits από την επικεφαλίδα έχει υποδηλώσει από πριν την ύπαρξη ή όχι αυτών. Υπάρχουν πέντε τύποι υπο-επικεφαλίδων: Mesh, Fragmentation, Packing, Fast Feedback Allocation και Grant Management.

Το υπόλοιπο ωφέλιμο φορτίο μπορεί να μεταφέρει μια μεμονωμένη SDU (Service Data Unit), τεμάχια από SDU, σύνολο από SDUs και σύνολο τεμαχίων από SDU. Αυτά εξαρτώνται από τι έχει συμφωνηθεί από πριν όσο αφορά την τεμαχιοποίηση και την ομαδοποίηση. [15]

4.7.4 Μηνύματα διαχείρισης MAC

- **Downlink Channel Descriptor (DCD) μήνυμα:** Ένα DCD μήνυμα εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης κατά περιοδικά διαστήματα προκειμένου να ορίσει τα χαρακτηριστικά του downlink φυσικού καναλιού. Ο σταθμός βάσης παράγει DCD περιλαμβάνοντας την καταμέτρηση των αλλαγών διαμόρφωσης και την ταυτότητα του downlink καναλιού

- **Downlink Map (DL-MAP) μήνυμα:** Το DL-MAP μήνυμα ορίζει την πρόσβαση στην downlink πληροφορία. Ο σταθμός βάσης παράγει DL-MAP μηνύματα περιλαμβάνοντας τα παρακάτω πεδία:

- Συγχρονισμού PHY
- Καταμέτρησης DCD
- Ταυτότητας σταθμού βάσης

- **Uplink Channel Descriptor (UCD) μήνυμα:** Το UCD μήνυμα εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης κατά περιοδικά διαστήματα προκειμένου να ορίσει τα χαρακτηριστικά του uplink φυσικού καναλιού. Ο σταθμός βάσης παράγει UCD μηνύματα που περιλαμβάνουν την καταμέτρηση των αλλαγών διαμόρφωσης, Ranging Backoff Start, Ranging Backoff End, Request Backoff Start και Request Backoff End.

- **Uplink Map (UL-MAP) μήνυμα:** Το UL-MAP μήνυμα ορίζει την πρόσβαση στην uplink πληροφορία. Ο σταθμός βάσης παράγει UL-MAP μηνύματα περιλαμβάνοντας τα παρακάτω πεδία:

- UCD καταμέτρηση
- Χρόνος έναρξης κατανομής
- Map IEs

- **Μήνυμα Ranging Request (RNG-REQ):** Ένα RNG-REQ μήνυμα εκπέμπεται από τον συνδρομητικό σταθμό κατά την έναρξη της επικοινωνίας αλλά και περιοδικά για να καθορίσει την καθυστέρηση του δικτύου και για να αιτηθεί αλλαγή επιπέδου ισχύος και/ή downlink προφίλ ριπής. Το RNG-REQ μπορεί να σταλεί κατά την αρχική ταξινόμηση και στα διαστήματα παροχής δεδομένων.

Όταν ο συνδρομητικός σταθμός προσπαθεί να εισέλθει στο δίκτυο, τότε το RNG-REQ περιλαμβάνει το downlink προφίλ ριπής που αιτήθηκε καθώς και την MAC διεύθυνση του. Όταν το RNG-REQ μεταδίδεται κατά το αρχικό ranging στη σύνδεση του σταθμού βάσης, τότε το μήνυμα πρέπει να περιλαμβάνει την έκδοση του MAC. Επιπλέον, στο RNG-REQ μήνυμα μπορεί να περιλαμβάνεται η broadcast ικανότητα του AAS.

- **Μήνυμα Ranging Response (RNG-RSP):** Το RNG-RSP μήνυμα αποστέλλεται από τον σταθμό βάσης σε απάντηση του ληφθέντος RNG-REQ μηνύματος και επιπλέον μπορεί να μεταδοθεί ανώνυμα για να στείλει διορθώσεις βασισμένες σε μετρήσεις που έχουν γίνει σε άλλα δεδομένα που ελήφθησαν ή σε MAC μηνύματα. Οπότε, ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να είναι προετοιμασμένος να λάβει ένα RNG-RSP μήνυμα οποιαδήποτε στιγμή και όχι μόνο μετά από μία μετάδοση RNG-REQ.

- **Μήνυμα Registration Request (REG-REQ):** Ένα REG-REQ μήνυμα αποστέλλεται από τον συνδρομητικό σταθμό κατά τη διάρκεια της έναρξης της επικοινωνίας και λαμβάνει σαν απάντηση ένα Registration Response (REG-RSP) μήνυμα από τον σταθμό βάσης.

4.7.5 Ποιότητα υπηρεσιών (QoS)

Στο στρώμα MAC η ποιότητα υπηρεσιών εξασφαλίζεται μέσω υπηρεσιών ροής (service flows) ή πιο συγκεκριμένα μίας αμφίδρομης ροής πακέτων με συγκεκριμένες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσιών. Οι παράμετροι της υπηρεσίας ροής μπορούν να διαχειρίζονται δυναμικά μέσω μηνυμάτων MAC για να εξυπηρετήσουν τις απαιτήσεις τις υπηρεσίας ή της εφαρμογής που παρέχεται. Η ποιότητα υπηρεσιών που βασίζεται στη υπηρεσία ροής εφαρμόζεται τόσο στην κάτω όσο και στην άνω ζεύξη για να παρέχεται βελτιωμένη QoS και στις δύο ζεύξεις.

Το στρώμα MAC προβλέπει διαφοροποίηση στην ποιότητα υπηρεσιών για διαφορετικούς τύπους εφαρμογών και ορίζει τέσσερις τύπους υπηρεσιών:

- Unsolicited Grant Services (UGS): είναι σχεδιασμένο για υπηρεσίες με σταθερό ρυθμό μετάδοσης, όπως VoIP
- Real-Time Polling Services (rtPS): είναι σχεδιασμένο για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι οποίες απαιτούν ποικίλα μεγέθη πακέτων δεδομένων σε περιοδική βάση, όπως είναι Streaming Audio ή Video
- Non-Real-Time Polling Services (nrtPS): είναι σχεδιασμένο για υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου που απαιτούν διάφορους τύπους όγκου δεδομένων
- Best Effort Services (BE): είναι σχεδιασμένο για τυπική κίνηση δεδομένων όπως Internet web browsing και FTP μεταφορά αρχείων. [5], [16]

4.7.6 Διαχείριση Κινητικότητας

Η διάρκεια της μπαταρίας και η διαπομπή είναι δύο κρίσιμα θέματα στις κινητές εφαρμογές. Το Mobile WiMAX υποστηρίζει τις λειτουργίες Sleep Mode και Idle Mode για τη βέλτιστη διαχείριση ισχύος του κινητού τερματικού. Επίσης υποστηρίζει διαπομπή για την εναλλαγή μεταξύ σταθμών βάσης χωρίς διακοπή της σύνδεσης για τερματικά που κινούνται με ταχύτητες οχημάτων.

4.7.6.1 Διαχείριση Ισχύος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για την αποτελεσματική διαχείριση ισχύος το Mobile WiMAX υποστηρίζει τις λειτουργίες Sleep Mode και Idle Mode.

Στη λειτουργία Sleep Mode το τερματικό τίθεται για προκαθορισμένες περιόδους εκτός της διεπαφής αέρα (air interface) του σταθμού βάσης με τον οποίο επικοινωνεί. Κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων το τερματικό δεν έχει τη δυνατότητα να παράγει κίνηση είτε στην άνω είτε στην κάτω ζεύξη. Η λειτουργία αυτή έχει σκοπό να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ισχύος από τον τερματικό αλλά και την κατανάλωση πόρων του σταθμού βάσης στο οποίο την αρμοδιότητα ανήκει. Επίσης παρέχει την ευελιξία στο τερματικό να αναζητήσει άλλους σταθμούς βάσης προκειμένου να συλλέξει πληροφορίες για βοηθήσει τη διαπομπή κατά τη διάρκεια του Sleep Mode.

Η λειτουργία Idle Mode παρέχει τη δυνατότητα στο τερματικό να γίνεται περιοδικά διαθέσιμο για μετάδοση μηνυμάτων κάτω ζεύξης χωρίς να εγγράφεται (register) σε συγκεκριμένο σταθμό βάσης. Η λειτουργία αυτή ωφελεί το τερματικό από την εκτέλεση των διαδικασιών της διαπομπής και άλλων λειτουργιών, ενώ ωφελεί το δίκτυο και το σταθμό βάσης εξαλείφοντας την κίνηση που παράγεται λόγω διαπομπής από ουσιαστικά ανενεργά τερματικά. Ταυτόχρονα όμως παρέχει μία απλή μέθοδο (paging) για να ειδοποιήσει το τερματικό για ενδεχόμενη εισερχόμενη κίνηση (downlink traffic).

4.7.6.2 Διαπομπή

Το πρότυπο 802.16e υποστηρίζει τρεις μεθόδους διαπομπής:

- i. Hard Hand Off (HHO) που είναι υποχρεωτική
- ii. Fast Base Station Switching (FBSS) που είναι προαιρετική
- iii. Macro Diversity HandOver (MDHO) που είναι επίσης προαιρετική

4.7.7 Υπηρεσίες Multicast και Broadcast

Οι υπηρεσίες Multicast και Broadcast που υποστηρίζονται από το Mobile WiMAX συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά των DVB-H (Digital Video Broadcast), MediaFLO και 3GPP E-UTRA (3G Partnership Project) και ικανοποιούν τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης και μεγάλη εμβέλεια χρησιμοποιώντας Single Frequency Network (SFN)
- Ευέλικτη κατανομή των πόρων
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος από το κινητό τερματικό
- Χαμηλός χρόνος μεταγωγής διαύλου [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ

5.1 Ανάλυση επίδοσης για κινητά συστήματα πρόσβασης

5.1.1 Παράμετροι του συστήματος Mobile WiMAX

Το Mobile WiMAX βασιζόμενο στην κλιμακωτή OFDMA, έχει την ευελιξία να λειτουργήσει σε διαφορετικές συχνότητες, απλά ρυθμίζοντας τις παραμέτρους του συστήματος. Θεωρούμε ένα σύστημα Mobile WiMAX με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά σαν ένα παράδειγμα προς μελέτη για μια ποσοτική αξιολόγηση της επίδοσης συστημάτων Mobile WiMAX. Στους πίνακες που ακολουθούν, στον πίνακα 16 δίνονται οι παράμετροι του συστήματος, στον πίνακα 17 συνοψίζονται οι παράμετροι της OFDMA και στον πίνακα 18 δίνονται οι αποσβέσεις που παραδεχόμαστε ότι ισχύουν για το συγκεκριμένο σύστημα.

Πίνακας 16: Παράμετροι συστήματος Mobile WiMAX

Παράμετροι	Τιμή
Αριθμός κελιών με τρεις τομείς	19
Συχνότητα λειτουργίας	2500MHz
Αμφιδρόμηση	TDD
Εύρος ζώνης καναλιών	10MHz
Απόσταση μεταξύ σταθμών βάσης	2.8 km
Ελάχιστη απόσταση κινητού συνδρομητή από σταθμό βάσης	36 m
Προδιαγραφές κεραιάς	70° (-3 dB) με 20 dB front-to-back ratio
Ύψος σταθμού βάσης	32 m
Ύψος κινητού τερματικού	1.5 m
Κέρδος κεραιάς σταθμού βάσης	15 dBi
Κέρδος κεραιάς κινητού τερματικού	-1 dBi
Μέγιστη ισχύς ενισχυτή ισχύος σταθμού βάσης	43 dBm
Μέγιστη ισχύς ενισχυτή ισχύος κινητού τερματικού	23 dBm
Αριθμός κεραιών Tx/Rx σταθμού βάσης	Tx: 2 ή 4 Rx: 2 ή 4
Αριθμός κεραιών Tx/Rx κινητού τερματικού	Tx: 1 Rx: 2
Στάθμη θορύβου σταθμού βάσης	4 Db
Στάθμη θορύβου κινητού τερματικού	7 dB

Πίνακας 17: Παράμετροι OFDMA

Παράμετροι		Τιμή
Εύρος ζώνης καναλιών		10 MHz
Συχνότητα δειγματοληψίας		11.2 MHz
Μέγεθος FFT		1024
Απόσταση συχνότητας υπο-καναλιών		10.94 kHz
Διάρκεια συμβόλου (T_b)		91.4 μ sec
Διάρκεια T_g (guard time)		11.4 μ sec
Διάρκεια συμβόλου OFDMA ($T_s = T_b + T_g$)		102.9 μ sec
Διάρκεια πλαισίου		5 msec
Αριθμός συμβόλων OFDMA		48
DL PUSC	Null Sub-carriers	184
	Pilot Sub-carriers	120
	Data Sub-carriers	720
	Υποκανάλια	30
UL PUSC	Null Sub-carriers	184
	Pilot Sub-carriers	280
	Data Sub-carriers	560
	Υποκανάλια	35

Πίνακας 18: Μοντέλο αποσβέσεων

Παράμετροι	Τιμή
Μοντέλο υπολογισμού διαλείψεων	COST 231 Suburban
Απώλειες σκίασης	8 dB
Συσχετισμός σκίασης σταθμού βάσης	0.5 dB
Απώλειες διείσδυσης	10 dB

5.1.2 Υπολογισμοί της σύνδεσης του Mobile WiMAX (Link budget)

Ο παρακάτω υπολογισμός που αφορά τη σύνδεση βασίζεται στις παραμέτρους του συστήματος και στο μοντέλο υπολογισμού απωλειών διαδρομής των πινάκων 16-18. Η τιμή των 5.56 dB που χρησιμοποιείται για το περιθώριο διαλείψεων λόγω σκίασης εξασφαλίζει πιθανότητα κάλυψης 75% στα όρια της κυψέλης και 90% στο εσωτερικό αυτής. Το περιθώριο παρεμβολών είναι της τάξης των 2 dB για την ζεύξη καθόδου και 3 dB για την ζεύξη ανόδου, θεωρώντας ότι χρησιμοποιούμε επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (1,1,3). Το ίδιο περιθώριο μπορεί να μειωθεί στο 0.2 dB στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης (1,3,3) αλλά έχοντας ως αντίτιμο την μείωση της φασματικής απόδοσης. Οι μακροχρόνιες διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών υπολογίζονται στα 4 dB, θεωρώντας 0.5 συσχέτιση απωλειών σκίασης. Η εμβέλεια της κυψέλης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε μοντέλο υπολογισμού, όπως για παράδειγμα το μοντέλο COST 231-Hata και το μοντέλο Erceg-Greenstein.

Πίνακας 19: Υπολογισμός ζεύξης καθόδου για Mobile WiMAX

Mobile WiMAX Downlink				
Υποδομή σταθμού βάσης	MAP	Κίνηση – PUSC		Μονάδες
Ισχύς Tx ανά στοιχείο κεραίας	10.0	10.0	10.0	Watts
Αριθμός Tx στοιχείων κεραίας	2	2	2	
Κυκλικό συνδυαζόμενο κέρδος	3.0	3.0	3.0	dB
Κέρδος κεραίας Tx	15.0	15.0	15.0	dB
Κέρδος ενίσχυσης πιλότου	-0.7	-0.7	-0.7	dB
EIRP	57.3	57.3	57.3	dBm
Βασική ζώνη μετάθεσης	PUSC	PUSC	PUSC	
Αριθμός υπο-φέροντων	840	840	840	
Ισχύς ανά υπο-φέρον	28.1	28.1	28.1	dBm
Κινητό τερματικό (φορητή συσκευή σε εσωτερικό χώρο)				
Κέρδος κεραίας Rx	-1.0	-1.0	-1.0	dB
Κέρδος κεραίας Rx λόγω πολυδιαδρομικών ανακλάσεων (2 κεραίες)	3.0	3.0	3.0	dB
Θόρυβος Rx	7.0	7.0	7.0	dB
Περιθώρια				
Περιθώριο διαλείψεων λόγω βλάστησης	5.56	5.56	5.56	dB
Περιθώριο ταχέων διαλείψεων	6.0	2.0	2.0	dB
Περιθώριο παρεμβολών	2.0	2.0	2.0	dB
Απώλειες διείσδυσης	10.0	10.0	10.0	dB
Συνολικό περιθώριο	23.56	19.56	19.56	dB
Ευαισθησία κινητού Rx				
Θερμικός θόρυβος	-174	-174	-174	dBm/Hz
Απόσταση υπο-φέροντων	10.94	10.94	10.94	kHz
Διαμόρφωση	QPSK 1/8	QPSK 1/2	16 QAM 1/2	
Απαιτούμενο SNR	-3.31	3.49	8.93	dB
Απόσταση δέλτα από το όριο ακτίνας κάλυψης της κυμέλης	0.82			
Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων		2.88	5.76	Mbps
Ευαισθησία Rx (ανά υπο-φέρον)	-129.9	-123.2	-117.7	dBm
Ευαισθησία Rx (μικτή)	-100.7	-93.9	-88.4	dBm
Κέρδος συστήματος	160.0	153.3	147.8	dB
Μέγιστες επιτρεπτές απώλειες διαδρομής	136.4	133.7	128.2	dB

Το μοντέλο COST 231-Hata βασίζεται σε εμπειρικά αποτελέσματα στη ζώνη συχνοτήτων των 2 GHz και τείνει να κάνει μια συντηρητική πρόβλεψη για τη ζώνη των 2.5 GHz. Το μοντέλο Erceg-Greenstein είναι ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται συχνά σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων και προβλέπει ακτίνα κάλυψης η οποία είναι περίπου 70% μεγαλύτερη. Επίσης οι μέγιστες απώλειες διαδρομής, 128.2 dB, αντιστοιχούν σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ζεύξης καθόδου στα όρια της κυμέλης της τάξης των 5.76 Mbps, ενώ αντίστοιχα για την ζεύξη ανόδου σε ρυθμό της τάξης των 115 kbps (ρυθμοί πολύ μεγαλύτεροι από τα συστήματα 3G). Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης στα όρια των κυμελών οδηγούν σε μικρότερο μέγεθος κυμελών. Εναλλακτικά, καλύτερος υπολογισμός σύνδεσης και μεγαλύτερο μέγεθος κυμελών μπορούν να επιτευχθούν σε μικρότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα όρια των κυμελών όπως φαίνεται στους πίνακες 19 και 20.

Πίνακας 20: Υπολογισμός ζεύξης ανόδου για Mobile WiMA

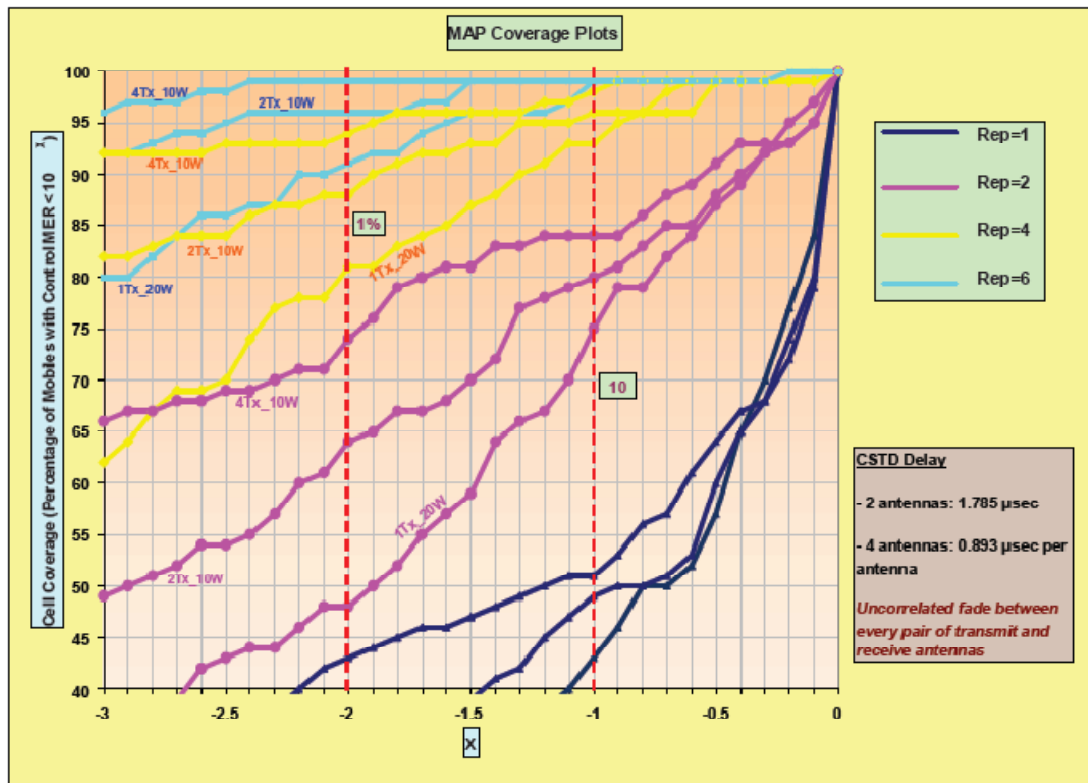
Κινητό τερματικό (φορητή συσκευή σε εσωτερικό χώρο)	FB κανάλι	Πλήρης κατανομή κίνησης		Μονάδες
Ισχύς Tx ανά στοιχείο κεραίας	200	200	200	Mw
Αριθμός στοιχείων κεραίας Tx	1	1	1	
Κέρδος κεραίας Tx	-1.0	-1.0	-1.0	dBi
EIRP	22.0	22.0	22.0	dBm
Ζώνη μετάθεσης	FB κανάλι	PUSC	PUSC	
Διαθέσιμα υπο-φέροντα	70	840	840	
Κατανεμημένα υπο-κανάλια	2.5	3	9	
Κατανεμημένα υπο-φέροντα	70	72	216	
Κατανεμημένα data carriers	60	48	144	
Ισχύς ανά κατανεμημένο υπο-φέρον	3.56	3.44	-1.33	dBm
Σταθμός βάσης Rx				
Κέρδος κεραίας Rx	15.0	15.0	15.0	dBi
Κέρδος κεραίας Rx (πολυόδευσης)	3.0	3.0	3.0	dBi
Θόρυβος Rx	4.0	4.0	4.0	db
Περιθώρια				
Περιθώριο διαλείψεων λόγω βλάστησης	5.56	5.56	5.56	dB
Περιθώριο ταχέων διαλείψεων	4.0	2.0	2.0	dB
Περιθώριο παρεμβολών	3.0	3.0	3.0	dB
Απώλειες διείσδυσης	10.0	10.0	10.0	dB
Συνολικό περιθώριο	22.56	20.56	20.56	dB
Ευαισθησία σταθμού βάσης Rx				
Θερμικός θόρυβος	-174	-174	-174	dBm/Hz
Απόσταση υπο-φερόντων	10.94	10.94	10.94	kHz
Τύπος διαμόρφωση	ποικίλος	QPSK 1/8	QPSK 1/8	
Απαιτούμενο SNR	-6.0	-2.5	-2.5	dB
Απόσταση δέλτα από το όριο ακτίνας κάλυψης της κυψέλης	0.66			
Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων		38	115	kbps
Ευαισθησία Rx (ανά υπο-φέρον)	-135.6	-132.1	-132.1	dBm
Ευαισθησία Rx (μικτή)	-117.2	-113.6	-108.8	dBm
Κέρδος συστήματος	157.2	153.5	148.8	dB
Μέγιστες επιτρεπτές απώλειες διαδρομής	134.6	133.0	128.2	dB

5.1.3 Αξιοπιστία του Mobile WiMAX

Οι πληροφορίες ελέγχου του Mobile WiMAX βρίσκονται στα μηνύματα MAP στην αρχή κάθε πλαισίου. Τα μηνύματα MAP ελέγχουν την κατανομή της ζεύξης ανόδου και καθόδου με ευέλικτο τρόπο και έτσι βελτιώνουν την φασματική απόδοση και την ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Συνεπώς η αξιοπιστία των μηνυμάτων αυτών είναι κρίσιμη για την απόδοση του συστήματος.

Η κάλυψη της ζεύξης καθόδου προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας την διάταξη που προβλήθηκε προηγουμένως με ή χωρίς κυκλική εναλλαγή εκπομπής (Cyclic Shift Transmit Diversity – CSTD). Το CSTD είναι μια προσαρμογή της ιδέας της καθυστέρησης λόγω πολλαπλών διαδρομών στα συστήματα OFDM. Με το CSTD κάθε στοιχείο κεραίας στην

διάταξη εκπομπής αποστέλλει μια κυκλικά μετατοπισμένη εκδοχή του ίδιου OFDM συμβόλου (για σύμβολο b), $x(n,b)$ ($0 \leq n \leq N-1$, όπου N είναι το μέγεθος FFT του συστήματος). Για παράδειγμα, αν υπάρχουν M_b κεραίες εκπομπής στο σταθμό βάσης και η κεραία 1 στέλνει ένα μη μετατοπισμένο σύμβολο OFDM, τότε η κεραία m εκπέμπει το ίδιο OFDM σύμβολο κυκλικά όμως μετατοπισμένο κατά $(m-1)D$ δείγματα. Άξιο να σημειωθεί είναι ότι κάθε κεραία προσθέτει ένα κυκλικό πρόθεμα μετά την κυκλική μετατόπιση του OFDM συμβόλου και με τον τρόπο αυτό η προστασία έναντι καθυστέρησης λόγω πολλαπλών διαδρομών που προσφέρεται δεν επηρεάζεται από το CSTD.



Σχήμα 27: Εξομοίωση απόδοσης για την κάλυψη του καναλιού ελέγχου για TU κανάλι. [6]

Το σχήμα 27 δείχνει τη συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (Cumulative Distribution Function - CDF) του καναλιού ελέγχου για διάφορους ρυθμούς με 1,2 και 4 κεραίες χρησιμοποιώντας το μοντέλο υπολογισμού αποσβέσεων του πίνακα 5γ. Μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα ότι χρησιμοποιώντας CSTD με δύο κεραίες εκπομπής και λήψης, R=1/2 CTC κώδικα με επανάληψη 6, περίπου 95% κάλυψη της κυψέλης επιτυγχάνεται PER 1%. Η απόδοση του MAC μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας προστασία από παρεμβολές στην μονάδα του κινητού τερματικού.

Το μέγεθος του μηνύματος MAP μπορεί να πάρει διάφορες τιμές. Εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών σε ένα πλαίσιο. Όταν στο δίκτυο κυριαρχεί εκρηκτική κίνηση δεδομένων όπως FTP και HTTP κίνηση τότε ο αριθμός χρηστών που προγραμματίζονται για το κάθε πλαίσιο είναι σχετικά μικρός (λιγότεροι από 10). Στην περίπτωση αυτή η ανάθεση πόρων γίνεται πιο αποτελεσματικά και το μήνυμα MAP κυρίως περιέχει το fixed MAP overhead. Το MAP overhead σε αυτήν την περίπτωση είναι της τάξης του 10% σε ένα κανάλι 10MHz με μέγεθος πλαισίου 5 millisecond. Όταν στο δίκτυο κυριαρχεί κίνηση VoIP τότε ο αριθμός των χρηστών που χωρούν σε ένα πλαίσιο μπορεί να είναι

μεγαλύτερος. Το MAP overhead αυξάνεται γραμμικά όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με τον όρο overhead αναφερόμαστε στην ψηφιακή πληροφορία που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών με σκοπό την διευθυνσιοδότηση, τον έλεγχο μεταφοράς των δεδομένων, την ανίχνευση και διόρθωση των λαθών.

Για το έλεγχο του MAP overhead, το Mobile WiMAX εισάγει υπο-MAP πολυεκπομπής, τα οποία επιτρέπουν πολλαπλά υπο-MAP μηνύματα να στέλνονται με διαφορετικούς ρυθμούς σε χρήστες με διαφορετικά SINR. Επομένως, ενώ τα μηνύματα εκπομπής στέλνονται με τη μεγαλύτερη αξιοπιστία που απαιτείται για να καλυφθεί μια κυψέλη μέχρι τα όριά της, τα κοινά μηνύματα ελέγχου, π.χ. ανάθεσης κίνησης, μπορούν να διανεμηθούν πιο αποδοτικά σύμφωνα με τις συνθήκες SINR του κάθε χρήστη. Όπως φαίνεται στο σχήμα 27, σε ένα μεγάλο ποσοστό της περιοχής κάλυψης μπορεί να υποστηριχθεί υψηλός ρυθμός μετάδοσης από QPSK 1/12 με 1% PER (σχεδόν 60% για QPSK 1/4). Συνεπώς με πολυεκπομπή των μηνυμάτων υπο-MAP, το control overhead μπορεί να ελαττωθεί σημαντικά. Ακόμη και με μεγάλο αριθμό χρηστών (20 χρήστες στην ζεύξη καθόδου και 2 χρήστες στην ζεύξη ανόδου) σε ένα πλαίσιο, το MAP overhead είναι μικρότερο από 20%. Έτσι τα μηνύματα ελέγχου για το Mobile WiMAX είναι πλέον ευέλικτα για μεταφορά δεδομένων, έχουν αξιοπιστία και ικανότητα να μεταβάλλει το overhead που εξαρτάται από το φορτίου του δικτύου και τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται.

5.1.4 Απόδοση συστήματος WiMAX

Εξομοιώσεις βασισμένες στη μεθοδολογία 1xEV-DV πραγματοποιήθηκαν για να εκτιμηθεί η επίδοση του Mobile WiMAX. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αναγράφονται στους πίνακες 16, 17 και 18. Η εξομοίωση θεωρεί ετερογενείς κινητούς χρήστες οι οποίοι περιγράφονται στους πίνακες 21 και 22.

Πίνακας 21: Μοντέλα καναλιών πολλαπλών διαδρομών για εξομοίωση απόδοσης.

Πρότυπο καναλιού	Path 1 (dB)	Path 2 (dB)	Path 3 (dB)	Path 4 (dB)	Path 5 (dB)	Path 6 (dB)	Rake Fingers
ITU Ped.B Ch-103	-3.92	-4.82	-8.82	-11.92	-11.72	-27.82	1,2,3,4,5,6,
ITU Veh.A Ch-104	-3.14	-4.14	-12.14	-13.14	-18.14	-23.14	1,2,3,4,5,6,

Πίνακας 22: Μοντέλο καναλιών πολλαπλών χρηστών για εξομοίωση απόδοσης.

Πρότυπο καναλιού	Αριθμός διαδρομών	Ταχύτητα	Εξασθένιση	Πιθανότητα πρόσβασης
ITU Ped.B Ch-103	6	3 km/h	Jakes	0.60
ITU Veh.A Ch-104	6	30 km/h	Jakes	0.30
	6	120 km/h	Jakes	0.10

Υπάρχουν 10 χρήστες ανά τομέα. Η κίνηση θεωρείται ότι είναι κίνηση FTP. Ο προγραμματισμός γίνεται με δίκαιο αναλογικό τρόπο. Κάθε σταθμός βάσης υλοποιεί τρεις τομείς με μία κυψέλη και συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων ίσο με ένα. Ο διάυλος θεωρείται ιδανικός και η προσαρμογή της σύνδεσης ρεαλιστική. Η συχνότητα φέροντος είναι ίση με 2.5GHz. Το frame overhead για καταμέτρηση του Προοιμίου, MAP OH και UL Control Channel είναι 7 OFDMA σύμβολα για την ζεύξη καθόδου και 3 για την ζεύξη ανόδου. Ένα σύμβολο κατανέμεται για TTG επί συνόλου 11 overhead συμβόλων

και 37 συμβόλων δεδομένων τόσο για την ζεύξη καθόδου όσο και για την ζεύξη ανόδου. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις υποθέσεις και την διάταξη αναγράφονται στον πίνακα 23.

Η απόδοση συνοψίζεται στον πίνακα 24 για εφαρμογή TDD με εύρος ζώνης καναλιού 10MHz, διατάξεις κεραιών SISO και MIMO και λόγο DL/UL 28:9 και 22:15 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το Mobile WiMAX έχει μεγάλη φασματική απόδοση. Με χρήση δύο κεραιών για λήψη, η φασματική απόδοση για την ζεύξη καθόδου είναι περίπου 1.2 bits/sec/Hz και η φασματική απόδοση για την ζεύξη ανόδου είναι 0.55 bits/sec/Hz. Με χρήση 2x2 MIMO η φασματική απόδοση βελτιώνεται περεταίρω μεταξύ 55% και 60% για την ζεύξη καθόδου και 35% περίπου για την ζεύξη ανόδου. Η υψηλή φασματική απόδοση σε συνδυασμό με το μεγάλο εύρος ζώνης παρέχει μεγάλη διεκπαιρευτικότητα ανά τομέα για τα συστήματα Mobile WiMAX. Με χρήση 2x2 MIMO και λόγο DL/UL 3:1, η διεκπαιρευτικότητα ανά τομέα για την ζεύξη καθόδου είναι 13.60 Mbps και για την ζεύξη ανόδου είναι 1.83 Mbps. Με λόγο DL/UL 3:2 οι τιμές είναι 10.63 Mbps και 3.05 Mbps για ζεύξη ανόδου και καθόδου αντίστοιχα. Η μεγάλη διεκπαιρευτικότητα ανά τομέα είναι αναγκαία για να επιτρέψει ευρυζωνικές υπηρεσίες συμπεριλαμβανομένων video και VoIP.

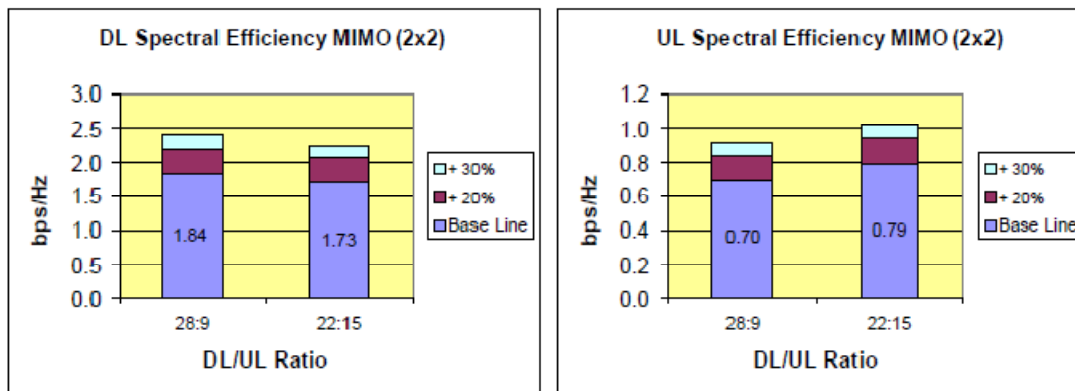
Πίνακας 23: Υποθέσεις διάταξης Mobile WiMAX

Παράμετροι		Τιμή
Διάταξη κυψελών		3 τομείς/ κυψέλη
Αναχρησιμοποίηση συχνοτήτων		1,1,3
Χρήστες/τομέα		10
Τύπος κίνησης		Full Buffer
Εκτίμηση διαύλου		Ιδανικός
Προγραμματιστής		Proprietary Proportional Fair
Προσαρμογή σύνδεσης		Ρεαλιστική με ανατροφοδότηση
Διάταξη κεραιών		1x2, 2x2
Υποστήριξη MIMO	DL	Alamuti STC/VSM switch
	UL	Collaborative SM
HARQ		CC, 3 αναμεταδώσεις
Κωδικοποίηση		CTC
Frame overhead		11 σύμβολα OFDM (7 DL, 3 UL, 1 TTG)
Σύμβολα δεδομένων ανά πλαίσιο		37
DL/UL διαχωρισμός	A	28:9
	B	22:15

Πρέπει να σημειωθεί ότι 11 σύμβολα για το overhead είναι μια συντηρητική εκτίμηση για overhead. Για τις περισσότερες εφαρμογές η κίνηση είναι εκρηκτική και το WiMAX μπορεί να λειτουργήσει πιο αποτελεσματικά με λιγότερο overhead. Επιπλέον θεωρήθηκε ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε PUSC υπο-καναλισμό και δεν λήφθηκε υπόψιν το κέρδος από τον προγραμματισμό επιλεκτικών συχνοτήτων. Με υπο-καναλισμό AMC επιλεκτικών συχνοτήτων η φασματική απόδοση μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο κατά 15 με 20%. Επομένως, σε ένα σύστημα WiMAX η φασματική απόδοση έχει περιθώρια βελτίωσης μεταξύ 20 και 30% σε σχέση με τα αποτελέσματα του πίνακα 24. Η βελτίωση της φασματικής απόδοσης φαίνεται στο σχήμα 28 για διάταξη κεραιών 2x2 MIMO.

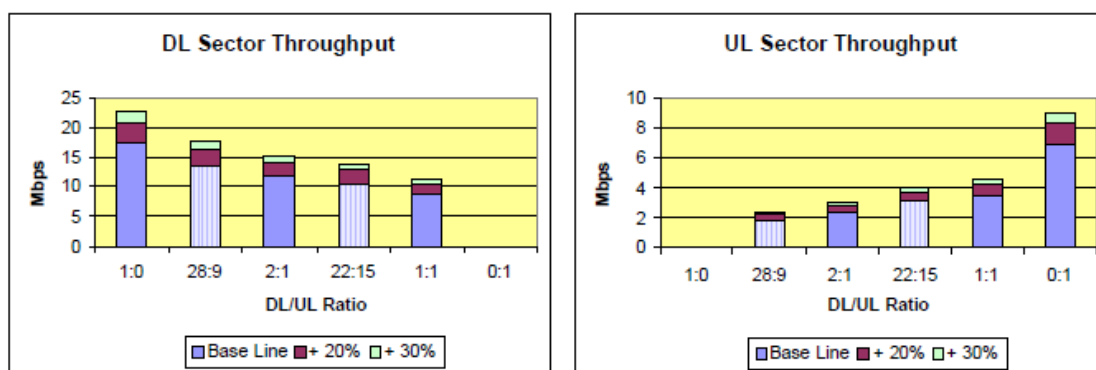
Πίνακας 24: Επίδοση συστήματος WiMAX.

Περιπτώσεις		DL: 28 σύμβολα UL: 9 σύμβολα		DL: 22 σύμβολα UL: 15 σύμβολα	
Κεραία	Σύνδεση	Διεκπαιρεώτητα ανά τομέα	Φασματική απόδοση	Διεκπαιρεώτητα ανά τομέα	Φασματική απόδοση
SIMO	DL	8.8 Mbps	1.19 bps/Hz	6.6 Mbps	1.07 bps/Hz
	UL	1.38 Mbps	0.53 bps/Hz	2.20 Mbps	0.57 bps/Hz
MIMO	DL	13.60 Mbps	1.84 bps/Hz	10.63 Mbps	1.73 bps/Hz
	UL	1.83 Mbps	0.70 bps/Hz	3.05 Mbps	0.79 bps/Hz



Σχήμα 28: Βελτίωση φασματικής απόδοσης συστήματος WiMAX. [6]

Ένα ακόμη πλεονέκτημα ενός συστήματος Mobile WiMAX είναι η δυνατότητα να προσαρμόζει το λόγο DL/UL συνεχώς και δυναμικά στις συνθήκες κίνησης που επικρατούν προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η χρησιμοποίηση του φάσματος. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 29 όπου τα πλαίσια αναπαραστών τις βασικές τιμές του πίνακα 24. Φαίνεται ότι η μέγιστη διεκπαιρεώτητα ζεύξης καθόδου ανά τομέα μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 20 Mbps ενώ για την ζεύξη ανόδου μεγαλύτερη από 8 Mbps. Με έναν τυπικό λόγο DL/UL μεταξύ 1:3 και 1:1 η διεκπαιρεώτητα ζεύξης καθόδου ανά τομέα μπορεί να ποικίλει από 10 έως 17 Mbps, ενώ για την ζεύξη ανόδου από 2 έως 4 Mbps.



Σχήμα 29: Διεκπαιρεώτητα για διάφορες τιμές του λόγου DL/UL και βελτιωμένου συστήματος WiMAX. [6]

Τα αποτελέσματα εδώ βασίζονται στη βασική διάταξη Mobile WiMAX MIMO (2x2). Επιπλέον βελτιώσεις της απόδοσης μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη χρήση εξελιγμένων χαρακτηριστικών του Mobile WiMAX όπως οι έξυπνες κεραίες (AAS). [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ WiMAX

6.1 Εισαγωγή

Η υποστήριξη για θέματα ασφάλειας είναι υποχρεωτική σε κάθε δίκτυο επικοινωνιών. Στα ασύρματα δίκτυα η ασφάλεια είναι ακόμη περισσότερο σημαντική για να προστατεύσει τόσο τους χρήστες όσο και το δίκτυο. Αφού το ασύρματο μέσο για την επικοινωνία είναι διαθέσιμο σε όλους, οι εισβολείς μπορούν να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο το οποίο καθίσταται τρωτό στους συνδρομητές και στο πάροχο του δικτύου.

6.2 Υπόστρωμα ασφαλείας

Το υπόστρωμα ασφαλείας παρέχει μυστικότητα, γνησιότητα ή εμπιστευτικότητα στους συνδρομητές κατά τη χρήση του ασύρματου ευρυζωνικού δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή κρυπτογραφικών μετασχηματισμών στις MPDUs που μεταφέρονται δια μέσου των συνδέσεων μεταξύ συνδρομητικών σταθμών και σταθμού βάσης.

Επιπλέον, το υπόστρωμα ασφαλείας εξασφαλίζει στους παρόχους ισχυρή προστασία από την κλοπή υπηρεσιών. Ο σταθμός βάσης προστατεύεται από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων, ασφαρίζοντας τις συνδεδεμένες ροές υπηρεσιών κατά μήκος του δικτύου. Το υπόστρωμα ασφαλείας υιοθετεί ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού για servers/πελάτες με το οποίο ο server, δηλαδή ο σταθμός βάσης ελέγχει τη διανομή των κλειδιών στους πελάτες-συνδρομητικούς σταθμούς. Επιπλέον, οι βασικοί μηχανισμοί μυστικότητας ενδυναμώνονται με την προσθήκη ψηφιακής πιστοποίησης της συσκευής του συνδρομητικού σταθμού στο πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού.

Αν κατά τη διάρκεια των διαπραγματεύσεων ο συνδρομητικός σταθμός διευκρινίσει ότι δε διαθέτει ασφάλεια βασισμένη στο IEEE 802.16, τότε τα βήματα της εξουσιοδότησης και της ανταλλαγής κλειδιών, παραλείπονται. Ο σταθμός βάσης, εφόσον έχει προβλεφθεί τέτοια περίπτωση, θα θεωρήσει τον συνδρομητικό σταθμό ως πιστοποιημένο, αλλιώς ο συνδρομητικός σταθμός δεν θα εξυπηρετηθεί. Καμία κρυπτογράφηση δεδομένων ή ανταλλαγή κλειδιών δεν πραγματοποιείται.

6.2.1 Αρχιτεκτονική

Η μυστικότητα αποτελείται από δύο συστατικά πρωτόκολλα:

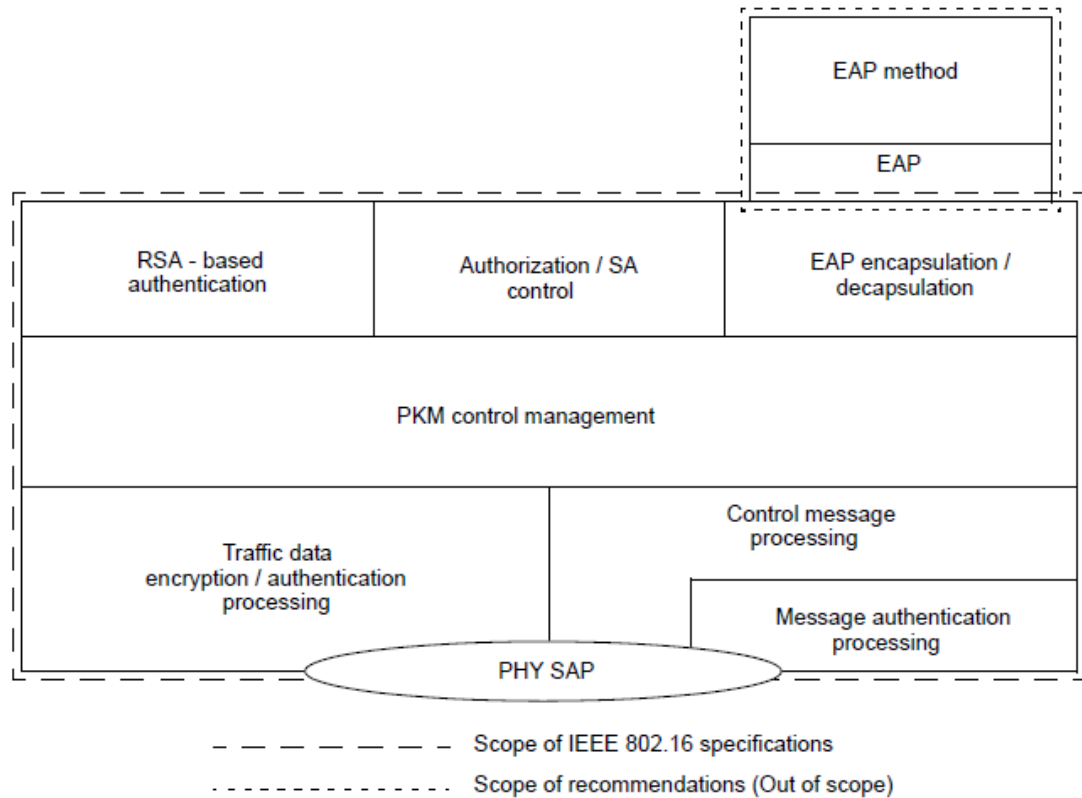
α. Ένα πρωτόκολλο ενθυλάκωσης για την ασφάλεια των πακέτων δεδομένων κατά μήκος του BWA δικτύου. Το πρωτόκολλο αυτό ορίζει:

(1). μία ομάδα από κρυπτογραφικές ακολουθίες (cryptographic suites) π.χ. ζευγάρια αλγορίθμων για κρυπτογράφηση δεδομένων και πιστοποίηση.

(2). τους κανόνες εφαρμογής των αλγορίθμων αυτών στο φορτίο των MAC PDU.

β. Ένα Key Management Protocol (PKM) που παρέχει την ασφαλή διανομή των δεδομένων των κλειδιών από τον σταθμό βάσης στον συνδρομητικό σταθμό. Μέσω του πρωτοκόλλου αυτού, ο σταθμός βάσης και οι συνδρομητικοί σταθμοί συγχρονίζουν αυτά τα δεδομένα.

Η στοίβα των πρωτοκόλλων για τα στοιχεία ασφάλειας του συστήματος φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 30: Υπόστρωμα ασφαλείας [16]

6.2.2 Ασφαλής ενθυλάκωση των MPDUs

Οι υπηρεσίες κρυπτογράφησης ορίζονται ως μία ομάδα δυνατοτήτων που βρίσκονται μέσα στο MAC υπόστρωμα ασφαλείας. Η πληροφορία της επικεφαλίδας MAC που αναφέρεται στην κρυπτογράφηση βρίσκεται στη γενική μορφή της επικεφαλίδας MAC.

Η κρυπτογράφηση πάντα εφαρμόζεται στο MAC PDU φορτίο, όταν αυτό απαιτείται, ενώ η γενική MAC επικεφαλίδα δεν κρυπτογραφείται. Όλα τα MAC μηνύματα διαχείρισης πρέπει να στέλνονται χωρίς κρυπτογράφηση ώστε να υφίστανται καταχώρηση, ταξινόμηση από το MAC.

6.2.3 Key Management Protocol (PKM)

Το πρωτόκολλο PKM επιτρέπει τόσο την αμοιβαία απόδειξη γνησιότητας όσο και την μονομερή (π.χ. όταν ο σταθμός βάσης πιστοποιεί τον συνδρομητή, αλλά όχι το αντίστροφο). Υποστηρίζει επίσης την περιοδική επαναπιστοποίηση/επαναεξουσιοδότηση και την ανανέωση των κλειδιών.

Το PKM χρησιμοποιεί είτε το πλαίσιο εργασίας EAP (Extensible Authentication Protocol) ή το ψηφιακό πιστοποιητικό X.509 μαζί με τον RSA αλγόριθμο δημόσιου κλειδιού ή μια ακολουθία που αρχίζει με πιστοποίηση RSA και ακολουθείται από

πιστοποίηση EAP. Χρησιμοποιεί ισχυρούς αλγόριθμους κρυπτογράφησης για την πραγματοποίηση των ανταλλαγών κλειδιών μεταξύ σταθμού βάσης και συνδρομητικού σταθμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος RSA, ο οποίος είναι γνωστός με τα αρχικά των τριών εφευρετών της (Rivest, Shamir, Adleman), είναι αργός για κρυπτογράφηση μεγάλων όγκων δεδομένων, αλλά χρησιμοποιείται ευρέως για διανομή κλειδιών.

Το πρωτόκολλο PKM εγκαθιστά ένα κοινό μυστικό (που ονομάζεται κλειδί εξουσιοδότησης - Authorization Key – AK) μεταξύ σταθμού βάσης και συνδρομητικού σταθμού. Το κοινό αυτό μυστικό χρησιμοποιείται έπειτα για να εξασφαλίσει την ακόλουθη PKM ανταλλαγή των κλειδιών TEK (Traffic Encryption Key). Τα TEK είναι συμμετρικά κλειδιά που χρησιμοποιούνται στην κρυπτογράφηση μηνυμάτων. Κατά κανόνα τα TEK αλλάζουν συχνά. Αυτός ο μηχανισμός δύο βημάτων για τη διανομή των κλειδιών επιτρέπει την ανανέωση των TEK χωρίς να προκαλεί υπολογιστικά επίπονες διαδικασίες.

Ο σταθμός βάσης πιστοποιεί την αυθεντικότητα ενός συνδρομητικού σταθμού πελάτη κατά την αρχική εξουσιοδότηση. Κάθε συνδρομητικός σταθμός παρουσιάζει τα διαπιστευτήριά του, τα οποία είναι ένα μοναδικό ψηφιακό πιστοποιητικό X.509 που έχει εκδοθεί από τον κατασκευαστή του συνδρομητικού σταθμού (στην περίπτωση της πιστοποίησης RSA) ή διαπιστευτήρια που καθορίζονται από τον χειριστή (στην περίπτωση της πιστοποίησης EAP).

Ο σταθμός βάσης συνδέει την ελεγμένη πλέον ταυτότητα του συνδρομητικού σταθμού με έναν επί πληρωμή συνδρομητή, και εν συνεχεία με τις υπηρεσίες δεδομένων για τις οποίες αυτός είναι εξουσιοδοτημένος. Με αυτή την AK ανταλλαγή, ο σταθμός βάσης εγκαθιστά μία πιστοποιημένη ταυτότητα για τον συνδρομητικό σταθμό και τις υπηρεσίες για τις οποίες αυτός έχει πρόσβαση.

Εφόσον ο σταθμός βάσης πιστοποιεί τον συνδρομητικό σταθμό, μπορεί να προστατευθεί από έναν επιτιθέμενο που χρησιμοποιεί έναν συνδρομητικό σταθμό κλώνο, μεταμφιεσμένο σε νόμιμο συνδρομητικό σταθμό.

Το PKM εμμένει σε ένα μοντέλο πελάτη/server όπου ο συνδρομητικός σταθμός, δηλ. ο PKM πελάτης, αιτείται κλειδί και ο σταθμός βάσης, δηλ. ο PKM server ανταποκρίνεται σε αυτές τις αιτήσεις, εξασφαλίζοντας ότι οι συνδρομητικοί σταθμοί θα λάβουν μόνο το keying υλικό για το οποίο έχουν εξουσιοδότηση

6.2.4 Πρωτόκολλο πιστοποίησης (Authentication protocol)

Ένας συνδρομητικός σταθμός χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο PKM για να αποκτήσει πιστοποίηση και τα απαραίτητα κλειδιά από το σταθμό βάσης και να υποστηρίξει την περιοδική επαναπιστοποίηση και ανανέωση του κλειδιού.

Το PKM υποστηρίζει δύο ξεχωριστούς μηχανισμούς πιστοποίησης:

Πρωτόκολλο RSA (υποχρεωτικό στην έκδοση RKMv1, προαιρετικό την έκδοση RKMv1)

Έκτακτο πρωτόκολλο πιστοποίησης - Extensible Authentication Protocol (EAP)

(προαιρετικό, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά)

6.2.4.1 Πιστοποίηση PKM RSA

Το πρωτόκολλο PKM RSA χρησιμοποιεί το ψηφιακό πιστοποιητικό X.509 [IETF RFC 3280], τον RSA αλγόριθμο δημόσιου κλειδιού [PKCS#1] ο οποίος δίνει τα κοινά κλειδιά κρυπτογράφησης RSA στην διεύθυνση MAC του συνδρομητικού σταθμού.

Ο σταθμός βάσης πιστοποιεί την αυθεντικότητα ενός συνδρομητικού σταθμού - πελάτη κατά την αρχική εξουσιοδότηση. Κάθε συνδρομητικός σταθμός φέρει ένα μοναδικό ψηφιακό πιστοποιητικό X.509 που εκδίδεται από τον κατασκευαστή. Το ψηφιακό

πιστοποιητικό περιέχει το δημόσιο κλειδί του συνδρομητικού σταθμού και την MAC διεύθυνσή του. Όταν απαιτείται ένα ΑΚ, ο συνδρομητικός σταθμός παρουσιάζει το ψηφιακό πιστοποιητικό του στον σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης επαληθεύει το ψηφιακό πιστοποιητικό και κατόπιν χρησιμοποιεί το επικυρωμένο δημόσιο κλειδί για να κρυπτοποιήσει ένα ΑΚ, το οποίο ο σταθμός βάσης αποστέλλει πίσω στον συνδρομητικό σταθμό.

Όλοι οι συνδρομητικοί σταθμοί που χρησιμοποιούν RSA πιστοποίηση θα πρέπει να έχουν εργοστασιακά εγκατεστημένα RSA ιδιωτικά/δημόσια ζεύγη κλειδιών ή να παρέχουν έναν εσωτερικό αλγόριθμο που να δημιουργεί τέτοια κλειδιά δυναμικά. Στην περίπτωση που ένας συνδρομητικός σταθμός βασίζεται σε εσωτερικό αλγόριθμο που να δημιουργεί RSA ζεύγη κλειδιών τότε τα κλειδιά αυτά πρέπει να δημιουργούνται πριν από την πρώτη συναλλαγή ΑΚ.

6.2.4.1 Πιστοποίηση PKM EAP

Η πιστοποίηση EAP χρησιμοποιεί το Εκτατό πρωτόκολλο πιστοποίησης - Extensible Authentication Protocol (EAP) [IETF RFC 3748] σε συνδυασμό με μια EAP μέθοδο που επιλέγεται από τον χρήστη (π.χ. EAP-TLS). Η μέθοδος EAP χρησιμοποιεί ένα ιδιαίτερο είδος πιστοποιητικού, όπως το X.509 στην περίπτωση του EAP-TLS (EAP-Transport Layer Security), ή ένα Subscriber Identity Module στην περίπτωση του EAP-SIM. Τα ειδικά πιστοποιητικά και η μέθοδος EAP δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.

6.3 Key Management Protocol (PKM)

Υπάρχουν δυο πρωτόκολλα PKM που υποστηρίζονται στο IEEE 802.16e. PKM version 1 και PKM version 2 με περισσότερα χαρακτηριστικά όπως νέα ιεραρχία κλειδιών, AES-CMAC, AES-key-wraps και MBS.

6.3.1 PKM Version 1

6.3.1.1 Δεσμοί ασφαλείας (Security Associations-SA)

Ο δεσμός ασφαλείας (SA) είναι μία ομάδα πληροφοριών ασφάλειας που ένας σταθμός βάσης και ένας ή περισσότεροι πελάτες-συνδρομητικοί σταθμοί μοιράζονται προκειμένου να υποστηρίξουν ασφαλή επικοινωνία κατά μήκος του WiMAX δικτύου. Τρεις τύποι SA έχουν καθορισθεί: Primary, Static και Dynamic. Κάθε συνδρομητικός σταθμός εγκαθιστά μία Primary SA κατά τη διαδικασία της έναρξης επικοινωνίας του. Static SA παρέχεται μέσα στον σταθμό βάσης. Dynamic SA εγκαθίσταται και καταργείται σε απάντηση της αρχικοποίησης και του τερματισμού της ροής συγκεκριμένων υπηρεσιών. Οι Static και Dynamic SA μπορούν να μοιραστούν από πολλαπλούς συνδρομητικούς σταθμούς.

Η πληροφορία που εμπεριέχει ένα SA περιλαμβάνει την κρυπτογραφική ακολουθία (Cryptographic Suite). Η πληροφορία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει τα TEK και τα διανύσματα αρχικοποίησης (Initialization Vectors - IV). Το ακριβές περιεχόμενο του SA εξαρτάται από την κρυπτογραφική ακολουθία του. Τα SA ταυτοποιούνται με την χρήση των SAID (Security Association Identifier). Το SAID είναι το αναγνωριστικό ενός δικτύου και έχει μήκος 4-bit. Κάθε συνδρομητικός σταθμός εγκαθιστά μία αποκλειστική Primary SA με τον σταθμό βάσης. Το SAID κάθε Primary SA του συνδρομητικού σταθμού είναι ίσο με το Basic CID (Connection Identifier) του σταθμού αυτού. Χρησιμοποιώντας το

PKM, ένας συνδρομητικός σταθμός αιτείται από τον σταθμό βάσης του το υλικό κρυπτογράφησης (keying material). Ο σταθμός βάσης πρέπει να διασφαλίσει ότι κάθε πελάτης-συνδρομητικός σταθμός έχει πρόσβαση στο SA που δικαιούται.

Το υλικό κρυπτογράφησης (π.χ. το κλειδί Data Encryption Standard (DES) και το CBC διάλυμα αρχικοποίησης) έχει περιορισμένο χρόνο ζωής. Όταν ο σταθμός βάσης μεταφέρει το υλικό κρυπτογράφησης στον συνδρομητικό σταθμό, του παρέχει επίσης και τον εναπομείναντα χρόνο ζωής. Είναι ευθύνη του συνδρομητικού σταθμού να αιτηθεί νέο υλικό από τον σταθμό βάσης, όταν ο χρόνος ζωής του υλικού που κατέχει λήγει στον σταθμό βάσης. Αν το τρέχον υλικό λήξει προτού ένα καινούριο αφιχθεί, ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να ακολουθήσει ξανά τη διαδικασία εισόδου στο δίκτυο.

6.3.1.2 Εξουσιοδότηση συνδρομητικού σταθμού και ανταλλαγή ΑΚ

Η εξουσιοδότηση του συνδρομητικού σταθμού είναι η διαδικασία όπου ο σταθμός βάσης πιστοποιεί την ταυτότητα ενός συνδρομητικού σταθμού:

α). Ο σταθμός βάσης και ο συνδρομητικός σταθμός εγκαθιστούν ένα κοινό ΑΚ μέσω RSA, από το οποίο προκύπτουν ένα κλειδί κρυπτογράφησης Key Encryption Key (KEK) και τα μηνύματα πιστοποίησης κλειδιών.

β). Ο σταθμός βάσης παρέχει στον πιστοποιημένο πλέον συνδρομητικό σταθμό ταυτότητες (πχ τις SAID) και ιδιότητες του primary και static SA, για τις οποίες ο συνδρομητικός σταθμός έχει την εξουσιοδότηση να αποκτήσει πληροφορίες κλειδιών

Αφού πετύχει την αρχική εξουσιοδότηση ο συνδρομητικός σταθμός ζητάει επανεξουσιοδότηση κατά περιοδικά διαστήματα από τον σταθμό βάσης, διότι κάθε συνδρομητικός σταθμός πρέπει να διατηρείται σε κατάσταση εξουσιοδότησης με τον σταθμό βάσης, ώστε να μπορεί να ανανεώνει τα TEK που είναι έτοιμα να λήξουν.

6.3.1.3 Εξουσιοδότηση μέσω RSA πρωτοκόλλου πιστοποίησης

Κάθε συνδρομητικός σταθμός ξεκινά την πιστοποίηση στέλνοντας στον σταθμό βάσης του ένα μήνυμα Authentication Information, το οποίο περιλαμβάνει το πιστοποιητικό X.509 του κατασκευαστή σταθμού. Το μήνυμα αυτό είναι αυστηρά πληροφοριακό, π.χ. ο σταθμός βάσης μπορεί να το αγνοήσει. Παρόλα αυτά, παρέχει στον σταθμό βάσης έναν μηχανισμό για να μάθει το πιστοποιητικό κατασκευαστή του συνδρομητικού σταθμού-πελάτη του.

Ο συνδρομητικός σταθμός στέλνει στον σταθμό βάσης ένα Authorization Request μήνυμα, το οποίο αποτελεί αίτηση για ΑΚ και περιλαμβάνει:

α). Το πιστοποιητικό X.509

β). Περιγραφή των αλγορίθμων κρυπτογράφησης που υποστηρίζει ο συνδρομητικός σταθμός. Οι κρυπτογραφικές του δυνατότητες παρουσιάζονται στον σταθμό βάσης σαν μια λίστα από ανιχνευτές κρυπτογραφικών ακολουθιών, καθένας από τους οποίους υποδεικνύει ένα συγκεκριμένο ζευγάρι αλγορίθμων για κρυπτογράφηση και πιστοποίηση δεδομένων, που χρησιμοποιεί ο συνδρομητικός σταθμός.

γ). Το Basic CID του σταθμός βάσης, που είναι το πρώτο static CID που ο σταθμός βάσης αναθέτει στον συνδρομητικό σταθμό.

Σε απάντηση στο Authorization Request μήνυμα ο σταθμός βάσης επικυρώνει την ταυτότητα του αιτούντος συνδρομητικού σταθμού, αποφασίζει τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης και το πρωτόκολλο υποστήριξης που θα μοιραστεί με τον συνδρομητικό σταθμό, ενεργοποιεί ένα ΑΚ, το κρυπτογραφεί με το δημόσιο κλειδί του συνδρομητικού σταθμού και το στέλνει πίσω σε αυτόν με ένα μήνυμα Authorization Reply το οποίο περιλαμβάνει:

- Ένα ΑΚ κρυπτογραφημένο με το δημόσιο κλειδί του συνδρομητικού σταθμού.
- Έναν αριθμό ακολουθίας κλειδιού 4-bit (key sequence number), που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό μεταξύ των διαδοχικά παραγόμενων ΑΚ.
- Τον χρόνο ζωής του κλειδιού.
- Τις ταυτότητες (π.χ. τις SAID) και τις ιδιότητες του απλού primary και zero ή περισσότερων static SA για τα οποία ο συνδρομητικός σταθμός έχει εξουσιοδότηση να αποκτήσει πληροφορίες σχετικά με τα κλειδιά.

Καθώς το Authorization Reply θα αναγνωρίσει τα static SA επιπλέον του primary SA του οποίου το SAID ταιριάζει με το Basic CID του αιτούμενου συνδρομητικού σταθμού, το Authorization Reply δεν θα αναγνωρίσει κανένα Dynamic SA.

Ο σταθμός βάσης, σε απάντηση του Authorization Request του συνδρομητικού σταθμού πρέπει να αποφασίσει αν ο αιτών συνδρομητικός σταθμός, του οποίου την ταυτότητα μπορεί να πιστοποιήσει μέσω του ψηφιακού πρωτοκόλλου X.509, είναι εξουσιοδοτημένος για βασικές unicast υπηρεσίες, και για το αν ο συνδρομητικός σταθμός έχει συνδρομή για επιπλέον υπηρεσίες. Σημειώνεται ότι οι προστατευμένες υπηρεσίες που ένας σταθμός βάσης καθιστά διαθέσιμες σε έναν συνδρομητικό σταθμό εξαρτώνται από την κρυπτογραφική ακολουθία που μοιράζονται ο συνδρομητικός σταθμός και ο σταθμός βάσης. Ένας συνδρομητικός σταθμός πρέπει να ανανεώνει κατά περιόδους διαστήματα το ΑΚ του στέλνοντας ξανά Authorization Request στον σταθμό βάσης.

Για την αποφυγή διακοπών στην παροχή υπηρεσιών κατά τη διάρκεια της επαναεξουσιοδότησης, τα διαδοχικά παραγόμενα ΑΚ έχουν επικαλυπτόμενους χρόνους ζωής. Συνδρομητικοί σταθμοί και σταθμός βάσης πρέπει να έχουν την ικανότητα να υποστηρίζουν μέχρι δύο ταυτόχρονα ενεργά ΑΚ κατά τη διάρκεια αυτών των μεταβατικών περιόδων. Η λειτουργία των αλγορίθμων προγραμματισμού για Authorization Request σε συνδυασμό με την ικανότητα του σταθμού βάσης να χρησιμοποιεί και να αναπροσαρμόζει τα ΑΚ των συνδρομητικών σταθμών, εξασφαλίζουν ότι ο συνδρομητικός σταθμός μπορεί να ανανεώσει τα TEK χωρίς διακοπές κατά τη διάρκεια των περιόδων επαναεξουσιοδότησης των συνδρομητικών σταθμών.

6.3.2 Ανάλυση ανταλλαγής μηνυμάτων TEK

6.3.2.1 Ανταλλαγή TEK για τοπολογία PMP

Προκειμένου να αποκτήσει εξουσιοδότηση, ένας συνδρομητικός σταθμός ξεκινάει μία ξεχωριστή TEK μηχανή κατάστασης για κάθε ένα από τα SAID που αναγνωρίστηκαν στο Authorization Reply μήνυμα. Ο μηχανισμός TEK μηχανή που λειτουργεί μέσα στον συνδρομητικό σταθμό είναι υπεύθυνος για να διαχειριστεί το υλικό κρυπτογράφησης με το αντίστοιχο SAID και να στείλει περιοδικά μηνύματα Key Request στον σταθμό βάσης για να ανανεωθούν τα κλειδιά των αντίστοιχων SAID. Ο σταθμός βάσης απαντά στο Key Request με ένα μήνυμα Key Reply που περιέχει τα κλειδιά του σταθμού βάσης που είναι ενεργά για ένα συγκεκριμένο SAID. Το TEK στο Key Reply μήνυμα είναι κρυπτογραφημένο μέσω της χρήσης κατάλληλου KEK που πηγάζει από το ΑΚ.

Σημειώνεται ότι κάθε στιγμή ο σταθμός βάσης διατηρεί 2 ενεργά σετ υλικού-κλειδιών ανά SAID. Υπάρχει επικάλυψη στον χρόνο ζωής των δύο αυτών σετ με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε ένα να καθίσταται ενεργό στο μέσο του χρόνου ζωής του προηγούμενου και να λήγει στο μέσο του χρόνου ζωής του επόμενου από αυτό. Ο σταθμός βάσης περιλαμβάνει στα Key Reply μηνύματα και τα δύο ενεργά σετ υλικού-κλειδιών του SAID. Το Key Reply παρέχει στον αιτούντα συνδρομητικό σταθμό, εκτός από το TEK και τις παραμέτρους έναρξης επικοινωνίας και τον εναπομείναντα χρόνο ζωής του για κάθε σετ,

προκειμένου να υπολογίσει πότε ο σταθμός βάσης θα ακυρώσει ένα συγκεκριμένο TEK, άρα και πότε να προγραμματίσει μελλοντικά Key Requests ώστε ο σταθμός βάσης να στείλει Key Reply προτού λήξει το κλειδί που έχει στη διάθεση του ο συνδρομητικός σταθμός.

Η λειτουργία του αλγορίθμου προγραμματισμού Key Request της TEK μηχανής κατάστασης σε συνδυασμό με την ικανότητα του σταθμού βάσης να χρησιμοποιεί και να αναπροσαρμόζει τα κλειδιά των SAID, εξασφαλίζουν ότι ο συνδρομητικός σταθμός μπορεί να ανταλλάσσει συνεχώς κρυπτογραφημένες πληροφορίες με τον σταθμό βάσης.

Μία TEK μηχανή κατάστασης παραμένει ενεργή για όσο χρονικό διάστημα:

α). Ο συνδρομητικός σταθμός είναι εξουσιοδοτημένος να λειτουργεί στο πεδίο ασφαλείας του σταθμού βάσης π.χ. έχοντας ένα έγκυρο AK.

β). Ο συνδρομητικός σταθμός είναι εξουσιοδοτημένος να συμμετέχει στην συγκεκριμένη SA π.χ. όταν ο σταθμός βάσης συνεχίζει να παρέχει ανανεωμένο υλικό-κλειδιών κατά τη διάρκεια των κύκλων επαναπόκτησης κλειδιών.

6.3.2.2 Ανταλλαγή TEK για τοπολογία Mesh

Προκειμένου να αποκτήσει εξουσιοδότηση, ένας κόμβος ξεκινά για κάθε «γείτονα» έναν ξεχωριστό μηχανισμό TEK για κάθε ένα από τα SAID που αναγνωρίστηκαν στο Authorization Reply μήνυμα. Κάθε μηχανισμό TEK που λειτουργεί μέσα στον κόμβο είναι υπεύθυνος για να διαχειριστεί το κρυπτογραφικό υλικό με το αντίστοιχο SAID και περιοδικά να στείλει μηνύματα Key Request στον σταθμό βάσης για να ανανεώσει τα κλειδιά των αντίστοιχων SAID. Ο «γείτονας» απαντά στο Key Request μήνυμα με ένα Key Reply μήνυμα που περιέχει τα κλειδιά του σταθμού βάσης που είναι ενεργά για ένα συγκεκριμένο SAID. Το TEK στο Key Reply μήνυμα είναι κρυπτογραφημένο μέσω της χρήσης κατάλληλου KEK που πηγάει από το AK.

Σημειώνεται ότι κάθε στιγμή ο κόμβος διατηρεί 2 ενεργά σετ υλικού-κλειδιών ανά SAID ανά «γείτονα». Υπάρχει επικάλυψη στον χρόνο ζωής των δύο αυτών σετ με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε ένα να καθίσταται ενεργό στο μέσο του χρόνου ζωής του προηγούμενου και να λήγει στο μέσο του χρόνου ζωής του επόμενου από αυτό. Ο «γείτονας» περιλαμβάνει στα Key Reply μηνύματα και τα δύο ενεργά σετ υλικού-κλειδιών του SAID. Το Key Reply παρέχει στον αιτούντα κόμβο, εκτός από το TEK, και τον εναπομείναντα χρόνο ζωής του για κάθε σετ, προκειμένου να υπολογίσει πότε ο «γείτονας» θα ακυρώσει ένα συγκεκριμένο TEK, άρα και πότε να προγραμματίσει μελλοντικά Key Requests ώστε να στείλει Key Reply προτού λήξει το κλειδί που έχει στη διάθεση του ο κόμβος.

6.3.3 PKM Version 2

6.3.3.1 Ανταλλαγή TEK για τοπολογία PMP

Εάν ο συνδρομητικός σταθμός και ο σταθμός βάσης αποφασίσουν ότι δεν υπάρχει εξουσιοδότηση, τότε κανένας από τους δυο δεν ασκεί χειραψία SA-TEK ούτε και Key Αίτηση/Key Απάντηση. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή του SAID είναι μηδενική. Μετά την επίτευξη της εξουσιοδότησης ο συνδρομητικός σταθμός ξεκινά ένα ξεχωριστό μηχανισμό TEK για κάθε μία από τις SAIDs που προσδιορίζονται στο μήνυμα Authorization Reply ή στο PKMv2 SA-TEK-RSP μήνυμα, αν η κρυπτογράφηση των δεδομένων κίνησης έχει προβλεφτεί για μια ή περισσότερες ροές υπηρεσίας. Κάθε μηχανισμός TEK που λειτουργεί στο πλαίσιο του συνδρομητικού σταθμού είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση του υλικού του γραμμικού κώδικα που συνδέονται με τους αντίστοιχους SAID. Ο TEK μηχανισμός

αποστέλλει περιοδικά μήνυμα αιτήματος Key Request στον σταθμό βάσης ζητώντας ανανέωση του υλικού του κώδικα των αντίστοιχων SAIDs τους.

Ο σταθμός βάσης ανταποκρίνεται στο Key Request με ένα μήνυμα απάντησης Key Reply, το οποίο περιέχει το ενεργό υλικό κώδικα για ένα συγκεκριμένο SAID. Τα TEKs και KEKs μπορούν να έχουν μήκος 64 bit ή 128 bit. Τα SA που επιλέγουν οποιαδήποτε μέθοδο κρυπτογράφησης με βασικό μέγεθος μπλοκ των 128 bit πρέπει να χρησιμοποιούν 128-bit TEKs και KEKs. Διαφορετικά θα χρησιμοποιούνται TEKs και KEKs των 64-bit. Το όνομα TEK-64 χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ένα TEK των 64-bit και TEK-128 χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ένα TEK 128-bit. Αντίστοιχες το ίδιο συμβαίνει για τα ονόματα KEK-64 και KEK-128.

Για τα SA που επιλέγουν μέθοδο κρυπτογράφησης DES-CBC, το TEK στην απάντηση Key Reply είναι κρυπτογραφημένο με τριπλό DES (3-DES) (κρυπτογράφηση – αποκρυπτογράφηση -κρυπτογράφηση ή λειτουργία EDE), χρησιμοποιώντας διπλό κλειδί, 3-DES KEK που προέρχονται από την ΑΚ. Για τα SA που επιλέγουν μέθοδο κρυπτογράφησης με κλειδί των 128-bit, όπως λειτουργία AES-CCM, το TEK στην απάντηση Key Reply είναι AES κωδικοποιημένο χρησιμοποιώντας ένα κλειδί 128-bit που προέρχονται από την ΑΚ και 128-bit μέγεθος μπλοκ.

Σημειώνεται ότι ο σταθμός βάσης ανά πάσα στιγμή διατηρεί δυο ειδών υλικό κώδικα ανά SAID. Η διάρκεια ζωής των δυο αυτών «γενιών» επικαλύπτονται, έτσι ώστε κάθε «γενιά» ενεργοποιείται στα μέσα της ζωής του προκατόχου της. Ο σταθμός βάσης περιλαμβάνει στις απαντήσεις Key Reply και τις δυο ενεργές «γενιές» μιας SAID.

Για τα SA που επιλέγουν μέθοδο κρυπτογράφησης CBC, η απάντηση Key Reply, εκτός από το TEK και το διάλυμα αρχικοποίησης CBC, ορίζει τον συνδρομητικό σταθμό που αιτείται και τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής των δυο σετ του υλικού κώδικα. Για τα SA που επιλέγουν μέθοδο κρυπτογράφησης AES-CCM, η απάντηση Key Reply εκτός από το TEK ορίζει τον συνδρομητικό σταθμό που αιτείται και τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής των δυο σετ του υλικού κώδικα. Ο συνδρομητικός σταθμός λαμβάνει τα μηνύματα και χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που σχετίζονται με τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής για να εκτιμηθεί τότε ο σταθμός βάσης θα ακυρώσει μια συγκεκριμένη TEK, και ως εκ τούτου για να προγραμματίσει την επόμενη αίτηση Key Request. Η λειτουργία του αλγόριθμου προγραμματισμού του μηχανισμού TEK σε συνδυασμό με την επαναλαμβανόμενη ενημέρωση που ασκεί ο σταθμός βάσης εξασφαλίζουν ότι ο συνδρομητικός σταθμός θα είναι σε θέση να ανταλλάσει συνεχώς κρυπτογραφημένα μηνύματα με τον σταθμό βάσης.

Ο μηχανισμός TEK παραμένει ενεργός για όσο χρονικό διάστημα:

α). Ο συνδρομητικός σταθμός είναι εξουσιοδοτημένος να λειτουργεί στο πεδίο ασφαλείας του σταθμός βάσης π.χ. έχοντας ένα έγκυρο ΑΚ.

β). Ο συνδρομητικός σταθμός είναι εξουσιοδοτημένος να συμμετέχει στην συγκεκριμένη SA π.χ. όταν ο σταθμός βάσης συνεχίζει να παρέχει ανανεωμένο υλικό-κλειδιών κατά τη διάρκεια των κύκλων επαναπόκτησης κλειδιών.

Οι MAC PDUs που αποστέλλονται σε συνδέσεις που ανήκουν σε ένα SA το οποίο περιλαμβάνει στοιχεία κρυπτογράφησης, πρέπει να είναι κρυπτογραφημένα. Οι MAC PDUs που ελήφθησαν σε εν λόγω συνδέσεις χωρίς να σταλεί το EC bit πρέπει να απορρίπτονται.

6.3.3.2 Δημιουργία κλειδιού

Το πρωτόκολλο PKMv2 ορίζει ποια είναι τα κλειδιά που υπάρχουν στο σύστημα και πώς παράγονται τα κλειδιά. Δεδομένου ότι υπάρχουν δύο συστήματα πιστοποίησης, το ένα βασισμένο στον αλγόριθμο RSA και το άλλο στο EAP, υπάρχουν δυο κύριες πηγές για το υλικό κώδικα.

Τα κλειδιά που χρησιμοποιούνται για την προστασία της ακεραιότητας των μηνυμάτων προέρχονται από το αρχικό υλικό κλειδιών που δημιουργήθηκαν κατά τη διαδικασία πιστοποίησης και εξουσιοδότησης. Η διαδικασία εξουσιοδότησης που βασίζεται στον αλγόριθμο RSA αποφέρει το προ-βασικό ΑΚ (pre-PAK) ενώ η διαδικασία που βασίζεται σε ΕΑΡ αποφέρει το MSK. Το PAK είναι το Primary Authorization Key, ενώ το MSK είναι το κοινό κύριο κλειδί (Master Shared Key – MSK) που προέρχεται από τις δύο πλευρές κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου ΕΑΡ.

6.3.3.2.1 Εξουσιοδότηση βασισμένη σε RSA

Όταν χρησιμοποιείται εξουσιοδότηση βασισμένη σε RSA, τότε αποστέλλονται μηνύματα PKMv2 RSA-Request, PKMv2 RSA-Reply, PKMv2 RSA-Reject, και PKMv2 RSA-Acknowledgement συμμετέχουν στο pre-PAK. Το pre-PAK αποστέλλεται κρυπτογραφημένο από τον σταθμό βάσης στον συνδρομητικό σταθμό μαζί με το δημόσιο κλειδί του πιστοποιητικού του συνδρομητικού σταθμού. Το pre-PAK χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία του PAK. Το PAK εν συνεχεία θα χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του ΑΚ. Το μήκος του PAK είναι 160-bit.

6.3.3.2.2 Πιστοποίηση ΕΑΡ

Εάν μια RSA αμοιβαία εξουσιοδότηση έλαβε χώρα πριν από την ανταλλαγή ΕΑΡ ή αν το πρώτο ΕΑΡ έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια λειτουργίας ΕΑΡ-in-EΑΡ, τότε τα μηνύματα ΕΑΡ μπορεί να προστατεύονται με ΕΙΚ-ΕΑΡ Integrity Key που προέρχεται από το pre-PAK. Το μήκος του ΕΙΚ είναι 160-bit.

Το προϊόν της ανταλλαγής του ΕΑΡ που μεταφέρεται στο IEEE 802.16 στρώμα είναι το Master Session Key (MSK), το οποίο έχει μήκος 512 bits.

Εάν απαιτείται περισσότερο υλικό κλειδιών για μελλοντική κωδικοποίηση συνδέσεων, το μέγεθος του PMK μπορεί να αυξηθεί. Μετά από επιτυχή βασική πιστοποίηση ΕΑΡ, εάν ο συνδρομητικός σταθμός ή ο σταθμός βάσης διαπραγματεύεται την εξουσιοδότηση μέσω της λειτουργίας «πιστοποιημένο ΕΑΡ μετά από ΕΑΡ», τότε τα πιστοποιημένα μηνύματα ΕΑΡ θα μεταφέρουν και δεύτερο ΕΑΡ μήνυμα. Όσο προστατεύονται τα δεύτερα μηνύματα τα πρώτα θα δεσμεύονται. Προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν κακόβουλη επίθεση πρέπει να τηρηθούν κάποια κριτήρια όπως ΕΑΡ-PSK ή ΕΑΡ-ΑΚΑ.

Εάν ο συνδρομητικός σταθμός και ο σταθμός βάσης διαπραγματεύονται μέσω της λειτουργίας διπλού ΕΑΡ (όπως «πιστοποιημένο ΕΑΡ μετά από ΕΑΡ»), τότε εκτελούν δύο γύρους του ΕΑΡ ως εξής:

1). Για να ξεκινήσει πρώτος γύρος ΕΑΡ διπλού ΕΑΡ, ο συνδρομητικός σταθμός στέλνει μήνυμα εκκίνησης PKMv2 ΕΑΡ Start χωρίς χαρακτηριστικό γνώρισμα.

2). Ο συνδρομητικός σταθμός και ο σταθμός βάσης εκτελούν συνομιλία πρώτου γύρου ΕΑΡ με μήνυμα μεταφοράς PKMv2 ΕΑΡ Transfer χωρίς κώδικα γνησιότητας HMAC/CMAC (keyed-Hash Message Authentication Code - HMAC/ Cipher-based MAC – CMAC).

3). Κατά την διάρκεια της πρώτης ΕΑΡ συνομιλία, εάν ο σταθμός βάσης πρέπει να στείλει ΕΑΡ-Success. Θα αποσταλεί προς τον συνδρομητικό σταθμό το ωφέλιμο φορτίο του ΕΑΡ μαζί με μήνυμα PKMv2 ΕΑΡ Complete προσημασμένο από το ΕΙΚ που μόλις δημιουργήθηκε. Ο συνδρομητικός σταθμός αφού λάβει το μήνυμα ΕΑΡ Complete κατέχει πλέον τα ΕΙΚ και PMK και μπορεί να επικυρώσει το μήνυμα. Εάν λάβει μήνυμα ΕΑΡ-Failure ή δεν είναι σε θέση να επικυρώσει το μήνυμα, τότε η εξουσιοδότηση αποτυγχάνει.

4). Μετά από επιτυχή πρώτο γύρο, ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να στείλει μήνυμα εκκίνησης PKMv2 EAP Start προσημασμένο με EIK προκειμένου να ξεκινήσει ο δεύτερος γύρος EAP συνομιλίας. Εάν ο σταθμός βάσης επικυρώσει το παραπάνω μήνυμα, τότε θα ξεκινήσει δεύτερο EAP αποστέλλοντας μήνυμα PKMv2 Authenticated EAP προς το συνδρομητικό σταθμό, το οποίο συμπεριλαμβάνει EAP-Identity /Request.

5). Ο συνδρομητικός σταθμός και ο σταθμός βάσης εκτελούν την συνομιλία δεύτερου γύρου.

6). Εάν η συνομιλία δεύτερου γύρου είναι επιτυχής, τότε δημιουργούνται τα AK από τα PMK και PMK2. Ο συνδρομητικός σταθμός και ο σταθμός βάσης εκτελούν τριμερή χειραγία SA-TEK

Μετά από την αρχική επιτυχημένη πιστοποίηση ο συνδρομητικός σταθμός και ο σταθμός βάσης θα πρέπει να εκτελέσουν επαναπιστοποίηση που ορίζει ο εναπομείναντας χρόνος ζωής PMK Και PMK2. Στην επαναπιστοποίηση εκτελείται διπλό EAP όπως και στην αρχική πιστοποίηση.

6.4 Μέθοδοι Κρυπτογράφησης

Εδώ διευκρινίζονται οι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης και τα μεγέθη των κλειδιών που χρησιμοποιούνται από το PKM πρωτόκολλο. Όλες οι εφαρμογές των σταθμών βάσης και των συνδρομητικών σταθμών χρησιμοποιούν μέθοδο data encryption packet, TEK encryption και message digest calculation.

- **Μέθοδοι κρυπτογράφησης δεδομένων:**

α). Μέθοδος κρυπτογράφησης με DES σε λειτουργία CBC: Αν ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης δεδομένων στην κρυπτογραφική ακολουθία ενός SA ισούται με 0x01, τα δεδομένα στις συνδέσεις που σχετίζονται με αυτό το SA, πρέπει να χρησιμοποιήσουν τη λειτουργία CBC (Cipher Block Chaining) του αλγορίθμου DES (Data Encryption Standard) αλγόριθμου για να κρυπτογραφήσουν το ωφέλιμο φορτίο των MAC PDU.

β). Μέθοδος κρυπτογράφησης με AES σε λειτουργία CCM: Αν ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης δεδομένων στην κρυπτογραφική ακολουθία ενός SA ισούται με 0x02, τα δεδομένα στις συνδέσεις που σχετίζονται με αυτό το SA, πρέπει να χρησιμοποιήσουν τη λειτουργία CCM (Counter with CBC-MAC) του προτύπου AES (Advanced Encryption Standard) για να κρυπτογραφήσουν το ωφέλιμο φορτίο των MAC PDU.

γ). Μέθοδος κρυπτογράφησης με AES σε λειτουργία CTR: Αν ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης δεδομένων στην κρυπτογραφική ακολουθία ενός MBS GSA (Multicast Broadcast Service Group Security Association) ισούται με 0x80, τα δεδομένα στις συνδέσεις που σχετίζονται με αυτό το SA, πρέπει να χρησιμοποιήσουν τη λειτουργία CTR (Counter mode) του αλγορίθμου AES για να κρυπτογραφήσουν το ωφέλιμο φορτίο των MAC PDU.

δ). Μέθοδος κρυπτογράφησης με AES σε λειτουργία CTR: Αν ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης δεδομένων στην κρυπτογραφική ακολουθία ενός SA ισούται με 0x03, τα δεδομένα στις συνδέσεις που σχετίζονται με αυτό το SA, πρέπει να χρησιμοποιήσουν τη λειτουργία CBC του αλγορίθμου AES για να κρυπτογραφήσουν το ωφέλιμο φορτίο των MAC PDU.

- **Κρυπτογράφηση των TEK:** Χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι κρυπτογράφησης των TEK:

α). Encryption του TEK με 3-DES: Η μέθοδος κρυπτογράφησης του TEK που χρησιμοποιείται για τα SA με τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης του αναγνωριστικού (identifier) TEK στην κρυπτογραφική ακολουθία να ισούται με 0x01. Ο σταθμός βάσης

κρυπτογραφεί την τιμή των πεδίων του TEK στο μήνυμα Key Reply και τα στέλνει στον συνδρομητικό σταθμό.

β).Encryption του TEK με RSA: Η μέθοδος κρυπτογράφησης του TEK με RSA χρησιμοποιείται για τα SA με τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης του αναγνωριστικού (identifier) TEK στην κρυπτογραφική ακολουθία να ισούται με 0x02.

γ).Encryption του TEK-128 με AES: Η μέθοδος κρυπτογράφησης του TEK-128 χρησιμοποιείται για τα SA με τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης του αναγνωριστικού (identifier) TEK στην κρυπτογραφική ακολουθία να ισούται με 0x03.

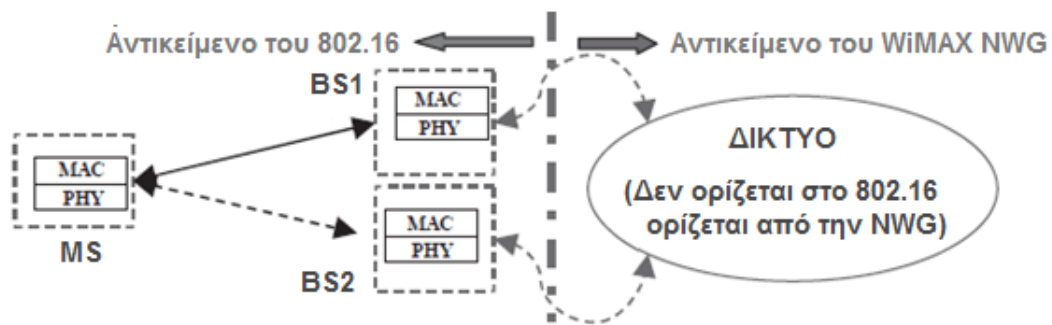
δ).Encryption του TEK-128 με AES Key Wrap: : Η μέθοδος κρυπτογράφησης του TEK-128 χρησιμοποιείται για τα SA με τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης του αναγνωριστικού (identifier) TEK στην κρυπτογραφική ακολουθία να ισούται με 0x04. Ο αλγόριθμος AES Key Wrap δέχεται ένα κρυπτογράφημα μαζί με την τιμή ελέγχου ακεραιότητας. Ο αλγόριθμος αποκωδικοποίησης επιστρέφει ένα μη κωδικοποιημένο κείμενο και την τιμή ελέγχου ακεραιότητας. [5], [16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ WiMAX

7.1 Εισαγωγή

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005, που εγκρίθηκε ως η τροποποίηση του 802.16-2004, είναι η προδιαγραφή των επιπέδων PHY και MAC για συνδυασμό σταθερής και κινητής λειτουργίας. Οι προδιαγραφές του περιορίζονται στη διεπαφή αέρα μεταξύ μιας συσκευής πελάτη και ενός σταθμού βάσης (BS). Το πρότυπο ορίζει τα στοιχειώδη για την PHY και MAC ασύρματη σύνδεση (μεταξύ συσκευής-πελάτη και ενός BS) για τις λειτουργίες που απαιτούνται για ένα κινητό σύστημα ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης όπως την ανακάλυψη και επιλογή του δικτύου, την είσοδο και την έξοδο στο δίκτυο, την ποιότητα υπηρεσιών (QoS), την ασφάλεια, την κινητικότητα (διαχείριση διαπομπών), τους τρόπους διαχείρισης ισχύος (Active/Sleep/Idle λειτουργία) και άλλα. Η έννοια του υποστρώματος σύγκλισης Sub-layer (CS) στο πρότυπο επιτρέπει πολυπλεξία διαφόρων τύπων κίνησης του δικτύου στο στρώμα MAC. Ωστόσο, η προδιαγραφή της αρχιτεκτονικής του δικτύου είναι πέρα από το πεδίο εφαρμογής του προτύπου IEEE 802.16. Για παράδειγμα, ενώ προσδιορίζονται οι στοιχειώδεις MAC διαδικασίες διαπομπής μεταξύ ενός κινητού σταθμού (MS) και Σταθμού Βάσης (BS), οι διαδικασίες που πρέπει να αναλάβουν οι σταθμοί βάσης προκειμένου να διευκολυνθεί η διαπομπή έχουν μείνει απροσδιόριστες.

Το WiMAX Forum (<http://www.wimaxforum.org>) είναι μία μη κερδοσκοπική ομάδα που ασχολείται με την υιοθέτηση και την διαλειτουργικότητα των συστημάτων WiMAX. Τον Ιανουάριο του 2005, το WiMAX Forum σχημάτισε το NetworkWorking Group (NWG) για να καθορίσει τη συμπληρωματική διαλειτουργική αρχιτεκτονική του δικτύου, όπως φαίνεται στο σχήμα 31.

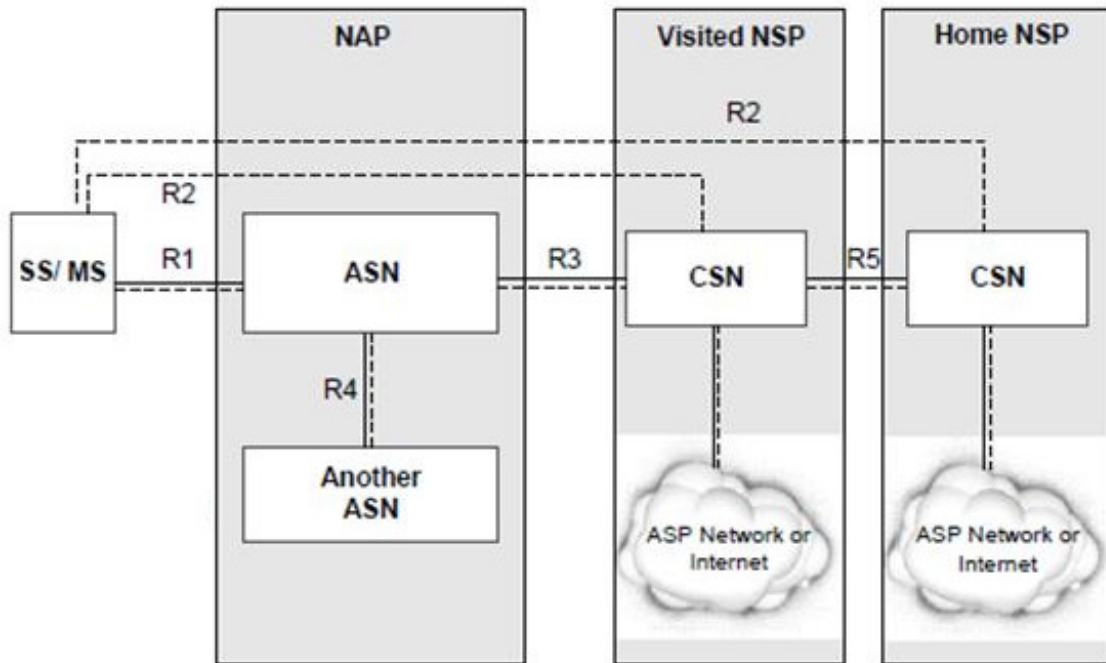


Σχήμα 31: Σχέση μεταξύ πεδίων δράσης WiMAX NWG και IEEE802.16 [14]

7.2 Αρχιτεκτονική δικτύων WiMAX

Η αρχιτεκτονική του δικτύου WiMAX μπορεί να περιγραφεί με την βοήθεια του μοντέλου αναφοράς Network Reference Model (NRM), το οποίο ορίζει τις βασικές λειτουργικές οντότητες και τα σημεία αναφοράς πάνω στα οποία βασίζονται τα κατά μέρους τμήματα ενός δικτύου. Το WiMAX NRM γενικά αποτελείται από μερικές λογικές οντότητες όπως είναι ο κινητός σταθμός (Mobile Station – MS), το δίκτυο πρόσβασης υπηρεσιών (Access Service Network – ASN), το δίκτυο σύνδεσης υπηρεσιών

(Connectivity Service Network – CSN) και τις αλληλεπιδράσεις τους μέσω των σημείων αναφοράς R1-R5.

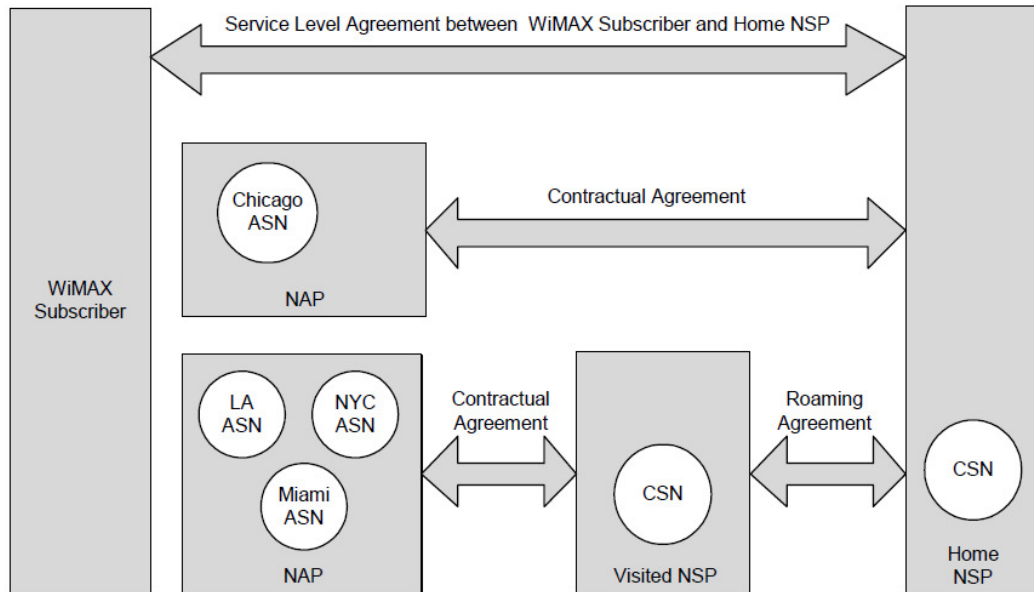


ASN: Access Service Network
 SS/MS: Subscriber/Mobile Station
 CSN: Connectivity Service Network
 NAP: Network Access Providers
 NSP: Network Service Providers

υπόμνημα γραμμών
 επίπεδο φορέων ———
 επίπεδο ελέγχου - - - - -

Σχήμα 32: Network Reference Model (NRM) [18]

Σε ανώτερο επίπεδο το WiMAX NRM διακρίνεται σε Network Access Providers (NAP) και Network Service Providers (NSP). Ένας πάροχος NAP είναι μια οντότητα - επιχείρηση που παρέχει υποδομή ασύρματης πρόσβασης WiMAX που υλοποιείται χρησιμοποιώντας μία ή περισσότερες ASNs. Ένας πάροχος NSP είναι μια επιχειρηματική οντότητα που παρέχει IP συνδεσιμότητα και WiMAX υπηρεσίες στους συνδρομητές σύμφωνα με το επίπεδο υπηρεσιών που έχει προκαθοριστεί από πριν μέσω συμφωνιών με ένα ή περισσότερους παρόχους NAP. Ο πάροχος NSP ενδέχεται να έχει τον έλεγχο του δικτύου CSN.



Σχήμα 33: Σχέση μεταξύ συνδρομητών και παρόχων WiMAX [19]

7.2.1 Λειτουργικές οντότητες δικτύου

Καθένα από τα MS, ASN και CSN αντιπροσωπεύει μια λογική ομαδοποίηση των λειτουργιών που περιγράφονται ως εξής:

- **Κινητός σταθμός (MS):** είναι γενικά το σύνολο του κινητού εξοπλισμού που παρέχει ασύρματη σύνδεση μεταξύ ενός συνδρομητικού σταθμού και του δικτύου WiMAX.

- **Δίκτυο πρόσβασης υπηρεσίας (Access Service Network - ASN):** Το δίκτυο ASN αντιπροσωπεύει το σημείο εισόδου του MS σε ένα δίκτυο WiMAX, και ως εκ τούτου, πρέπει να υποστηρίζει ένα ολοκληρωμένο σύνολο λειτουργιών του δικτύου που απαιτούνται για την παροχή ασύρματης πρόσβασης στο MS. Οι παρακάτω λειτουργίες είναι υποχρεωτικές για όλους ASNs ανεξάρτητα από την κινητικότητα που υποστηρίζουν:

- 802.16 Layer-2 συνδεσιμότητα για τους WiMAX MS.
- Μεταφορά AAA μηνυμάτων σε οικιακό δίκτυο WiMAX συνδρομητή για πιστοποίηση, εξουσιοδότηση και καταμέτρηση (Authentication, Authorization, Accounting – AAA)
- Ανίχνευση και επιλογή του παρόχου NSR που επιθυμεί ο συνδρομητής.
- Λειτουργικότητα Relay για την για την εγκατάσταση συνδεσιμότητας

Layer-3 (L3)

- Διαχείριση ασύρματων πόρων (Radio Resource Management – RRM).
- QoS και διαχείρισή της.
- Διοχέτευση ASN-CSN και ASN-ASN (tunneling).

Επιπρόσθετα για την υποστήριξη της κινητικότητας το ASN υποστηρίζει τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Κινητικότητας ASN πρόσδεσης (anchored)
- Κινητικότητας CSN πρόσδεσης (anchored)
- Αναζήτησης (paging) και διαχείρισης εντοπισμού

- **Δίκτυο συνδεσιμότητας υπηρεσίας (Connectivity Service Network – CSN):** Το δίκτυο CSN ορίζεται σαν ένα σύνολο λειτουργιών που παρέχουν υπηρεσίες

συνδεσιμότητας IP στους συνδρομητές. Ένα CSN δίκτυο περιλαμβάνει συνήθως διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως δρομολογητές, AAA proxy/servers, βάσεις δεδομένων των χρηστών και διαλειτουργικές συσκευές για χρήση ως gateway. Ένα CSN δίκτυο παρέχει λειτουργίες όπως:

- MS IP address και παραμέτρους τερματικών συσκευών.
- Πρόσβαση στο internet.
- Υπηρεσίες AAA.
- Έλεγχο εισόδου που βασίζεται σε προφίλ εγγεγραμμένων χρηστών.
- Υποστήριξη ASN-CSN tunneling.
- Διευθέτηση του λογαριασμού των συνδρομητών.
- Inter-CSN tunneling για περιαγωγή.
- Inter-ASN κινητικότητα
- Συνδεσιμότητα σε υπηρεσίες WiMAX, όπως IP multimedia υπηρεσίες (IMS), υπηρεσίες θέσεις (Location Based Services – LBS), υπηρεσίες peer-to-peer και προβλεψιμότητα.

Κάθε λειτουργία μπορεί να απαιτεί αλληλεπίδραση μεταξύ δύο ή περισσότερων λειτουργικών οντοτήτων. Επίσης, κάθε μία από τις λειτουργίες που προσδιορίζονται μέσα σε λογική οντότητα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μία μόνο φυσική συσκευή ή να διανεμηθεί σε πολλαπλές φυσικές συσκευές.

7.2.2 Inter-ASN σημεία αναφοράς (Reference Points - RPs)

Στο μοντέλο WiMAX NRM, στο σχήμα 7-2 εισάγονται διάφορα διαλειτουργικά σημεία αναφοράς. Ένα σημείο αναφοράς είναι μια διεπαφή που συγκεντρώνει τα λειτουργικά πρωτόκολλα μεταξύ διαφορετικών οντοτήτων που βρίσκονται σε κάθε πλευρά του. Τα πρωτόκολλα που σχετίζονται με ένα σημείο RP ενδέχεται να μην καταλήγουν πάντα στην ίδια λειτουργική οντότητα. Για παράδειγμα δυο πρωτόκολλα που σχετίζονται σε ένα σημείο RP μπορεί να προέρχονται και να καταλήγουν σε διάφορες λειτουργικές οντότητες. Το μοντέλο WiMAX NRM ορίζει τα παρακάτω σημεία αναφοράς:

- R1: περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα και τις διαδικασίες μεταξύ των MS και ASN. Αυτό περιλαμβάνει τα στρώματα PHY και MAC που ορίζονται από το πρότυπο IEEE 802.16, καθώς και τα πρωτόκολλα L3 και τις διαδικασίες που σχετίζονται με τον έλεγχο και τη διαχείριση της αλληλεπίδρασης των επιπέδων.
- R2: περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα και τις διαδικασίες μεταξύ των MS και του δικτύου CSN που σχετίζονται κυρίως με την πιστοποίηση, την εξουσιοδότηση και τον διαχείριση των IP που δημιουργούνται.
- R3: περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα ελέγχου επιπέδου καθώς και τη μεταφορά του IP μεταξύ ASN και CSN. Αυτό το σημείο RP υποστηρίζει AAA, διατομή και κινητικότητα καθώς και το απαραίτητο tunneling για μεταφορά δεδομένων του χρήστη μεταξύ και ASN του CSN.
- R4: περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα ελέγχου και διαδικασίες μεταξύ διαφόρων ASN όπως RRM, κινητικότητα MS κατά μήκος των ASN και αδρανής λειτουργία. Το R4 εξυπηρετεί την διαλειτουργικότητα των RP κατά μήκος κάθε ζεύγους ASNs ανεξάρτητα από την εσωτερική διαμόρφωσή τους
- R5: περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα ελέγχου και φορέα (Bearer) για την υποστήριξη περιαγωγής (roaming) μεταξύ ενός δικτύου CSN που λειτουργεί μέσω οικείου δικτύου NSP και ενός που λειτουργεί μέσω δικτύου-επισκέπτη NSP.

Ο συνδυασμός των RPs R1, R2, R3 και R4 υποστηρίζουν την διαλειτουργικότητα μεταξύ λειτουργιών που παρέχονται στο MS, σε ένα ή περισσότερα ASNs και στο CSN.

7.2.3 Λειτουργικές οντότητες ASN

Το μοντέλο WiMAX NRM ορίζει το ASN ως λογική ομαδοποίηση των λειτουργικών οντοτήτων και των πρωτοκόλλων που σχετίζονται με τις υπηρεσίες πρόσβασης, δημιουργώντας έτσι ένα ευέλικτο και διαλειτουργικό πλαίσιο για να τεθεί σε εφαρμογή η αρχιτεκτονική του ασύρματου δικτύου πρόσβασης WiMAX. Χρησιμοποιώντας τα ίδια λειτουργικά πρωτόκολλα, δίνεται η δυνατότητα να αντιστοιχίσουμε κάποιες λειτουργικές οντότητες σε διαφορετικές λογικές οντότητες εντός του ίδιου ASN. Έτσι βελτιστοποιείται ο σχεδιασμός του ASN για διαφορετικές χρήσεις και μοντέλα ανάπτυξης. Οι διαφορετικοί τρόποι σχεδίασης του συνόλου των λειτουργιών ενός δικτύου ASN σε φυσικά στοιχεία του δικτύου δίνει την δυνατότητα για την ύπαρξη ενός συνόλου ASN προφίλ. Για παράδειγμα, σε μια συγκεκριμένη υλοποίηση, το ASN αναλύεται και οι λειτουργίες του χωρίζονται επιλεκτικά σε δύο συγκεκριμένα φυσικά πρόσωπα που ονομάζονται σταθμός βάσης - Base Station (BS) και ASN Gateway (ASN-GW), όπως απεικονίζεται στο σχήμα 34. Με αυτό το προφίλ ASN, ένα ASN μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερους Σταθμοί Βάσης (BS) και τουλάχιστον μία πύλη ASN Gateway (ASN-GW). Η BS και ASN-GW λειτουργίες μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

Ο Σταθμός Βάσης (BS) είναι μια λογική οντότητα που αποτελείται κυρίως από λειτουργίες που σχετίζονται με την ασύρματη μετάδοση. Σε αυτόν τον ορισμό κάθε BS αποτελεί ένα τομέα με μια εκχώρηση συχνοτήτων. Ένας BS μπορεί επίσης να συμπεριλάβει πρόσθετες εφαρμογές ειδικών λειτουργιών, όπως η downlink και uplink scheduler. Πολλαπλοί BS μπορούν να συνδεθούν σε ένα ASN. Οι BS μπορούν να συνδέονται σε περισσότερες από μία ASN Gateway για να υπάρξει εξισορρόπηση φορτίου και πλεονασμός.

Η πύλη ASN Gateway (ASN-GW) είναι μια λογική οντότητα που αντιπροσωπεύει ένα σύνολο λειτουργικών οντοτήτων ελέγχου που είτε έχουν συνδεθεί με μια αντίστοιχη λειτουργία στο ίδιο ASN (π.χ. με έναν BS), μια λειτουργία του CSN είτε με μια λειτουργία σε διαφορετικό ASN. Η ASN-GW επίσης εκτελεί δρομολόγηση ή γεφυρώνει λειτουργίες.

Οι λειτουργίες του ASN που εκτελούνται σε ένα ASN-GW μπορούν προαιρετικά να διαχωριστούν σε δυο ομάδες λειτουργιών που ονομάζονται σημείο απόφασης (Decision Point - DP) και σημείο επιβολής (Enforcement Point - EP). Το EP περιλαμβάνει λειτουργίες φορέα. Το DP περιλαμβάνει όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες, όπως για παράδειγμα RRM, και μπορεί να συνεργάζεται με μια ή περισσότερες ASN-GW. Η διάσπαση των λειτουργιών του ASN είναι προαιρετική.

7.2.4 Intra-ASN σημεία αναφοράς

Τα ακόλουθα σημεία αναφοράς ορίζονται εντός του πλαισίου ενός ASN:

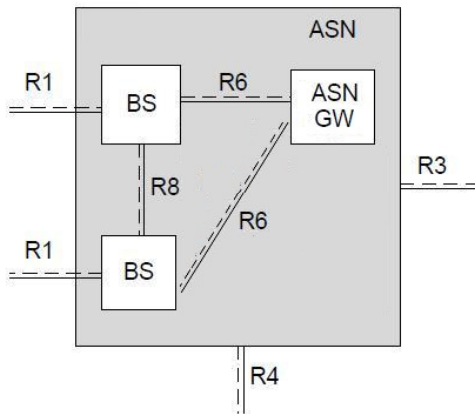
- R6: περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα ελέγχου και μεταφοράς μεταξύ του σταθμού βάσης και της πύλης ASN-GW. Το επίπεδο ελέγχου αποτελείται από QoS, πρωτόκολλα ασφαλείας και πρωτόκολλα που σχετίζονται με την κινητικότητα. Ενδεχομένως να περιλαμβάνει και πρωτόκολλα διαχείρισης ασύρματων πόρων.

- R7: προαιρετικό σημείο αναφοράς που χωρίζει απόφαση και εκτέλεση λειτουργιών σε ένα ASN-GW. Εάν υποστηρίζεται, το R7 αποτελείται από ένα προαιρετικό σύνολο των πρωτοκόλλων ελέγχου εντός ενός ASN GW για AAA και συντονισμό των

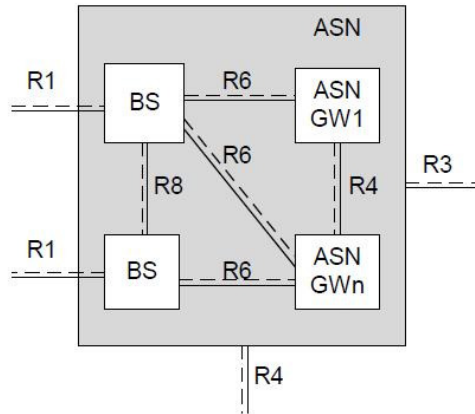
ενεργειών , καθώς και το συντονισμό μεταξύ των δύο ομάδων των λειτουργιών που εμπλέκονται στο R6.

- R8: προαιρετικό σημείο αναφοράς μεταξύ των Σταθμών Βάσης για να εξασφαλισθεί γρήγορη και συνεχής διαπομπή. Η διαπομπή γίνεται μέσω άμεσης και γρήγορης μεταφοράς του περιεχομένου της MAC και των δεδομένων μεταξύ των Σταθμών Βάσης που εμπλέκονται στην διαπομπή ενός συγκεκριμένου κινητού τερματικού. Εάν υποστηρίζεται, το περιεχόμενο της διαπομπής και τα σχετικά μηνύματα ελέγχου στο R8 θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται στα πρωτόκολλα IEEE 802,16-2005 και 802.16g.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το σημείο αναφοράς R6 σε συνδυασμό με το R4 μπορεί να χρησιμεύσει ως διάυλος για την ανταλλαγή πληροφοριών MAC μεταξύ των σταθμών βάσης που δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω του R8. Επίσης εάν η ASN αποτελείται από πολλαπλές ASN-GWS τότε οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ASN-GWS ακολουθούν τα πρωτόκολλα R4 πλήρως συμβατά με τις Inter-ASN ισοδύναμες προδιαγραφές. [14] [16] [18] [19]



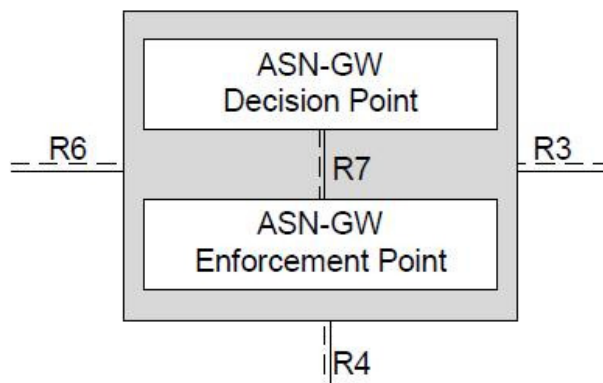
Σχήμα 34



Σχήμα 35

Σχήμα 34: Μοντέλο αναφοράς για διεσπασμένο ASN σε BS και μια αδιάσπαστη ASN GW.

Σχήμα 35: Μοντέλο αναφοράς για διασπασμένο ASN σε BS και πολλαπλές ASN GW.



Σχήμα 36: Μοντέλο αναφοράς για διάσπαση ASN-GW. [19]

7.2.5 Προφίλ των ASN

Ένα προφίλ χαρτογραφεί τις λειτουργίες ενός δικτύου ASN στα επιμέρους τμήματά του, δηλαδή τον σταθμό βάσης και το ASN-GW, έτσι ώστε να αναγνωρίζονται τα πρωτόκολλα και τα μηνύματα που διέρχονται από τα σημεία αναφοράς. Η ομάδα εργασίας NWG μέχρι στιγμής έχει ορίσει τρία προφίλ. Τα τρία αυτά προφίλ δείχνουν τρεις πιθανές υλοποιήσεις ενός δικτύου ASN και δεν δεσμεύουν τους κατασκευαστές να υποστηρίξουν υποχρεωτικά και τα τρία. Εάν ένας κατασκευαστής επιλέξει να υλοποιήσει κάποιο από τα τρία προφίλ, τότε η υλοποίηση αυτή θα πρέπει να είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές που ορίζονται από την NWG. Η απεικόνιση μιας λειτουργίας είτε στον σταθμό βάσης είτε στο ASN GW στα παρακάτω σχήματα δεν σημαίνει ότι η λειτουργία αυτή υπάρχει και σε όλους τους υπόλοιπους μηχανισμούς αυτού του προφίλ.

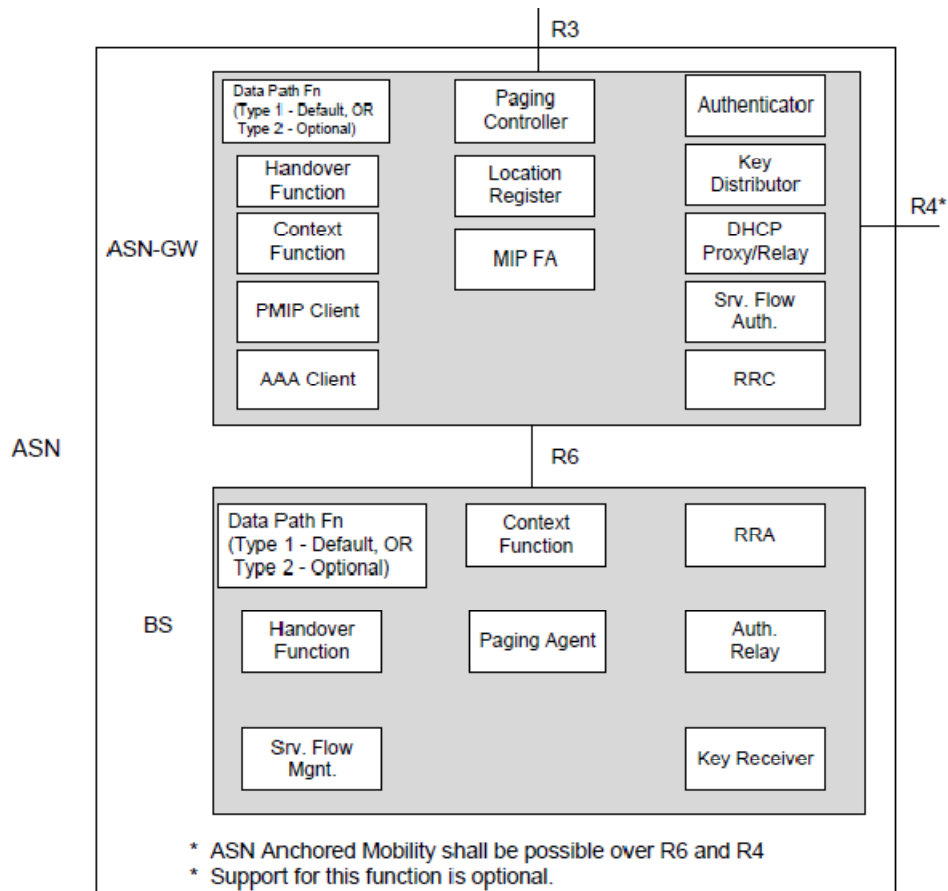
Ο σκοπός ενός ASN profile είναι να περιγράψει τα σημεία αναφοράς RP που βρίσκονται εντός του ASN και χρησιμοποιούνται για την διαλειτουργικότητα εκτός του ASN. Ένα δίκτυο ASN οποιουδήποτε προφίλ θα πρέπει να είναι σε θέση να συνεργαστεί με ένα ASN διαφορετικού προφίλ με τη βοήθεια των εσωτερικών σημείων αναφοράς R4. Έτσι η διαλειτουργικότητα είναι ανεξάρτητη από το προφίλ που θα επιλεγεί. Ο ορισμός των ASN profiles επίσης σκοπεύει στην δημιουργία ενός πλαισίου εργασίας για διαλειτουργικότητα των οντοτήτων εντός του δικτύου

7.2.5.1 Profile A

Οι λειτουργίες που καθορίζονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του ASN-GW είναι αυτές που φαίνονται στο σχήμα 37.

Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του Profile A είναι:

- Ο έλεγχος διαπομπών γίνεται στο ASN GW.
- Ο έλεγχος ασυρμάτων πόρων RRC γίνεται στο ASN GW και επιτρέπει διαχείριση RRM του σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης.
- Η κινητικότητα ASN πρόσδεσης (anchored) μεταξύ των σταθμών βάσης θα πρέπει να πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις φυσικές συνδέσεις R6 και R4.



Σχήμα 37: Λειτουργική άποψη του ASN Profile A. [19]

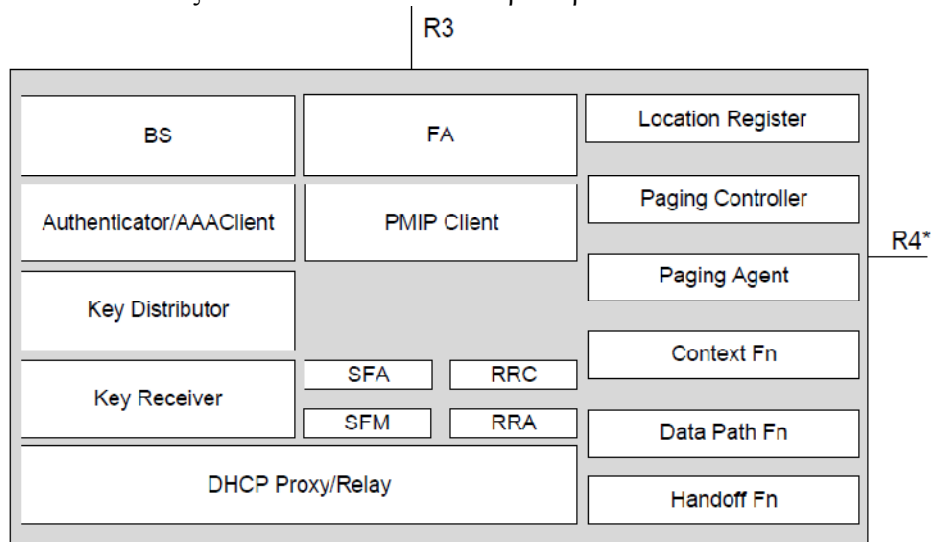
Πίνακας 25: Διαλειτουργικά σημεία αναφοράς του Profile A.

Κατηγορία λειτουργιών	Λειτουργία	Οντότητα της ASN	Πρωτόκολλα	Σχετικό σημείο RP
Ασφάλεια	Πιστοποίηση	ASN GW	Auth Relay Primitives	R6
	Auth Relay	BS	Auth Relay Primitives	R6
	Key Distributor	ASN GW	AK Transfer Primitives	R6
	Key Receiver	BS	AK Transfer Primitives	R6
Κινητικότητα εντός της ASN	Data Path Fn (Type 1 or 2)	ASN GW & BS	Data Path Control Primitives	R6
	Handover Fn	ASN GW & BS	HO Control Primitives	R6
	Context Server & Client	ASN GW & BS		R6
Κινητικότητα L3	MIP FA	ASN GW	Client MIP	R6
	MIP AR	ASN GW	Client MIP	R6
Διαχείριση ασυρμάτων πόρων RRM	RRC	ASN GW	RRM Primitives	R6
	RRA	BS	RRM Primitives	R6
Αναζήτησης (paging)	Paging Agent	BS	Paging & Idle Mode Primitives	R6
	Paging Controller	ASN GW	Paging & Idle Mode Primitives	R6
QoS	SFA	ASN GW	BS	R6
	SFM	BS		

7.2.5.2 Profile B

Το Profile B του ASN χαρακτηρίζεται από απρόβλεπτες εσωτερικές διεπαφές του ASN και ως εκ τούτου η διαλειτουργικότητα δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Ωστόσο τα Profile B θα πρέπει να είναι συμβατά με για να συνεργαστούν με τα υπόλοιπα δίκτυα ASN μέσω των σημείων R3 και R4. Η κινητικότητα πρόσδεσης εκτός του ASN θα πρέπει να δυνατή μέσω του R4. Χαρτογράφηση των λειτουργιών δεν ορίζεται για το Profile B και έτσι μπορούν να υπάρξουν διαφορετικές υλοποιήσεις των λειτουργιών. Για παράδειγμα, σε μια υλοποίηση μπορούν να συμπεριληφθούν όλες οι λειτουργίες σε μια μόνο συσκευή - οντότητα όπως ένας ολοκληρωμένος σταθμός βάσης (Integrated BS). Σε μια άλλη υλοποίηση ενδέχεται η λειτουργικότητα του ASN να διανεμηθεί σε πολλαπλούς κόμβους του δικτύου.

Οι διάφορες οντότητες, διεπαφές και πρωτόκολλα σε ένα Profile B ASN ορίζονται από του κατασκευαστές και δεν θα αναλυθούν περεταίρω.



Σχήμα 38: Λειτουργική άποψη του ASN Profile B. [19]

Σημειώσεις:

1. Καμία υπόθεση δεν έχει γίνει που να αφορά την τοποθέτηση των λειτουργιών εντός του ASN.
2. Επιτρέπει την κεντρική, διανεμημένη ή υβριδική υλοποίηση. Οι εσωτερικές διεπαφές δεν προβάλλονται σε αυτό το προφίλ.

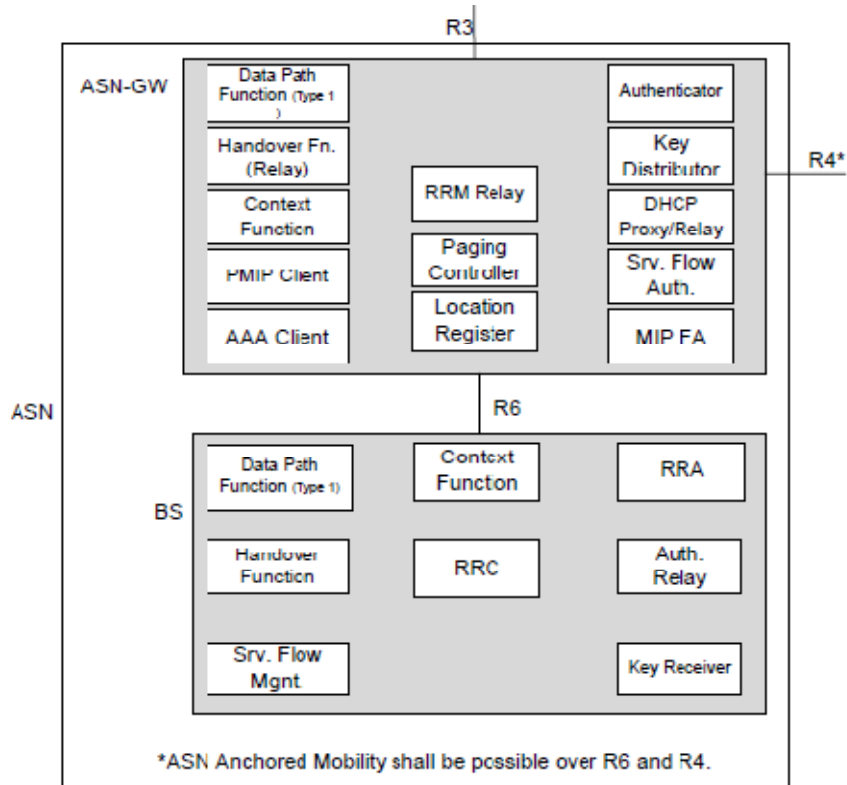
7.2.5.3 Profile C

Σύμφωνα με το Profile C οι λειτουργίες που καθορίζονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του ASN-GW είναι αυτές που φαίνονται στο σχήμα 39.

Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του Profile C είναι:

- Ο έλεγχος διαπομπών γίνεται στον σταθμό βάσης.
- Ο έλεγχος ασυρμάτων πόρων RRC γίνεται στον σταθμό βάσης και επιτρέπει διαχείριση RRM στον σταθμό βάσης. Η λειτουργία αναμετάδοσης γίνεται στο ASN GW και συγκεκριμένα για να αναμεταδώσει τα μηνύματα RRM από σταθμό βάσης σε σταθμό βάσης μέσω του R6.

- Όπως και στο Profile A, η κινητικότητα ASN πρόσδεσης (anchored) μεταξύ των σταθμών βάσης θα πρέπει να πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις φυσικές συνδέσεις R6 και R4. [18] [19]



Σχήμα 39: Λειτουργική άποψη του ASN Profile C. [19]

Πίνακας 26: Διαλειτουργικά σημεία αναφοράς του Profile C.

Κατηγορία λειτουργιών	Λειτουργία	Οντότητα της ASN	Πρωτόκολλα	Σχετικό σημείο RP
Ασφάλεια	Πιστοποίηση	ASN GW	Auth Relay Primitives	R6
	Auth Relay	BS	Auth Relay Primitives	R6
	Key Distributor	ASN GW	AK Transfer Primitives	R6
	Key Receiver	BS	AK Transfer Primitives	R6
Κινητικότητα εντός της ASN	Data Path Fn (Type 1)	ASN GW & BS	Data Path Control Primitives	R6
	Handover Fn	ASN GW & BS	HO Control Primitives	R6
	Context Server & Client	ASN GW & BS		R6
Κινητικότητα L3	MIP FA	ASN GW	Client MIP	R6
	MIP AR	ASN GW	Client MIP	R6
Διαχείριση ασυρμάτων RRM	RRC	BS	RRM Primitives	R6
	RRA	BS	None (BS internal)	
	RRC Relay	ASN GW	RRM Primitives	R6
Αναζήτηση (paging)	Paging Agent	BS	Paging & Idle Mode Primitives	R6
	Paging Controller	ASN GW	Paging & Idle Mode Primitives	R6
QoS	SFA	ASN GW	QoS Primitives	R6
	SFM	BS		

7.2.6 Σύγκριση μεταξύ των προφίλ.

Στο παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των τριών προφίλ που χρησιμοποιούνται για πιθανές υλοποιήσεις ενός δικτύου ASN. [20] [21]

Πίνακας 27: Σύγκριση των προφίλ.

ASN προφίλ	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Profile A	Κεντρική ιδέα Ξεχωριστά ΣΒ και ASN GW Ξεχωρίζει RRM: RRA στον ΣΒ και RRC στο ASN GW	Κατάλληλη για υλοποίηση απλών pico-cell Ήπια διαπομπή (soft HO) Λιγότερα backhauls για μηνύματα RRM	Δυσκολία στη λειτουργικότητα μεταξύ ΣΒ και ASN GW διαφορετικών κατασκευαστών Βαρύ φορτίο για ASN GW Λιγότεροι κατασκευαστές
Profile B	Καταναμημένη ιδέα ΣΒ και ASN GW μαζί	Απλή αρχιτεκτονική Κατάλληλη για ανάπτυξη χαμηλής κλίμακας	Δυσκολία να προσαρμόσει IP και ασύρματες λειτουργίες σε χρήστες Ακριβή για ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας
Profile C	Καταναμημένη ιδέα Ξεχωριστά ΣΒ και ASN GW RRM στον ΣΒ	Κατάλληλη για υλοποίηση απλών pico-cell Ευκολία στη λειτουργικότητα μεταξύ ΣΒ και ASN GW διαφορετικών κατασκευαστών	Επιπλέον backhauls για μηνύματα RRM

7.3 Προκλήσεις σε θέματα αρχιτεκτονικής δικτύων WiMAX

Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής των δικτύων WiMAX είναι συνεχής. Τα κυριότερα στοιχεία σε σχέση με τα θέματα που απασχολήσουν τις μελλοντικές εργασίες περιλαμβάνουν τα παρακάτω

α. **MBS:** Multicast Broadcast Scheme. Αφορά το γενικό πλαίσιο που θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου να υπάρξει υποστήριξη υπηρεσιών multimedia. Το MBS απαιτεί για την υλοποίηση του έναν κεντρικό server ο οποίος θα διανείμει το περιεχόμενο καθώς και έναν κεντρικό ελεγκτή για να συνδιαλέγει με τον συγχρονισμό των σταθμών βάσης.

β. **Emergency Services:** Υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης: Οι επείγουσες κλήσεις πρέπει να παρέχονται μαζί με τις υπηρεσίες θέσης. Οι υπηρεσίες θέσης μπορούν να βασίζονται στις πληροφορίες που παρέχονται ανά κυψέλη ή σε GPS.

γ. **HO Data Integrity:** HO ακεραιότητα δεδομένων: σχεδιάστηκε για να μειώσει την απώλεια πακέτων κατά την διάρκεια διαπομπής. Οι επικρατέστερες απόψεις έχουν να κάνουν με την χρήση ενδιάμεσης μνήμης (buffering), διπλή εκπομπή (bi-casting) με ή χωρίς υποστήριξη ροής ARQ. Εξελεγκμένα σχήματα διαπομπών όπως η γρήγορη αλλαγή σταθμού βάσης (Fast-Base-Station-Switching) and διαπομπή μακροσκοπικής διαφορικής λήψης (Macro-Diversity-Handover) λαμβάνονται εξίσου υπόψη.

δ. **IWK:** Διαλειτουργικότητα (Interworking – IWK): Εταιρίες τηλεπικοινωνιακών συστημάτων σχεδιάζουν συσκευές διπλής λειτουργίας προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τόσο σε δίκτυα WiMAX όσο και EVDO/Rev A. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι κάρτες, USB ή ακόμη και συσκευές χειρός. Το όφελος αυτών των συσκευών θα είναι η συνεχής σύνδεση με το διαδίκτυο.

ε. **Lawful Intercept – LIS:** Νόμιμη παρακολούθηση: Είναι υποχρεωτική από διάφορους εθνικούς κανονισμούς. Η βασική ιδέα είναι για το LIS είναι να διευκρινιστεί η

ταυτότητα του κινητού τερματικού για το οποίο γίνεται αναζήτηση από τις αρμόδιες υπηρεσίες επιβολής του νόμου (Law Enforcement Agency – LEA) και κατόπιν η κίνηση ροής δεδομένων αντιγράφεται από αυτές.

στ. **Διαχείριση θέσης:** Είναι υπηρεσία που παρέχεται με πρόσθετη χρέωση και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την θέση που βρίσκεται ο χρήστης. Παραδείγματα είναι: ο εντοπισμός της θέσης ενός χρήστη σε ένα χάρτη, ο προσδιορισμός σημείων γενικού ενδιαφέροντος της γύρω περιοχής κ.λ.π. Αυτή η αρχιτεκτονική αυτή υποστηρίζεται από το ASN με την υποστήριξη συγκεκριμένων εφαρμογών.

ζ. **OTA:** Over-The-Air: Αφορά συσκευές που έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορούν να διαχειρίζονται υπηρεσίες OTA. Παραδείγματα είναι: η λήψη και εγκατάσταση νέου λογισμικού και η διανομή νέων εκδόσεων λογισμικού. Η πρόβλεψη για OTA απαιτεί σχεδιασμό για την διαχείριση αυτών των συσκευών πριν από την είσοδό τους στο δίκτυο.

η. **PCC:** περιγράφει τον έλεγχο πολιτικής και χρέωσης (Policy and Charging Control). Για τα χαρακτηριστικά του PCC θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η διασύνδεση με υπηρεσίες δικτύων όπως 3GPP/3GPP2/TISPAN/ IMS.

θ. **ROHC / PHS:** Η μέθοδος Payload Header Suppression (PHS) εισήχθη στο πρότυπο 802.16e. Η Robust Header Compression (ROHC) είναι μια νέα μέθοδος η οποία μπορεί να μειώσει την κεφαλίδα IP.

ι . **Simple IP:** Η απλή IP έχει σχεδιαστεί για πάροχο που επιθυμεί να αναπτύξει σταθερό WiMAX δίκτυο. Αυτή η δυνατότητα δεν απαιτεί Home Agent.

ια . **USI:** Universal Services Interface: είναι ένα πλαίσιο που καθορίζει τις απαιτούμενες διαπαφές ενός WiMAX δικτύου προς έμμεσα εμπλεκόμενους παρόχους ASP και iASP. Αυτές οι διεπαφές επιτρέπουν την προβολή των δυνατοτήτων ενός δικτύου WiMAX και τις πληροφορίες των χρηστών μεταξύ των SP και ASP με τρόπο ελεγχόμενο και ασφαλή. [22]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ WiMAX ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

8.1. Πιθανές στρατιωτικές εφαρμογές του WiMAX

Οι εφαρμογές των δικτύων WiMAX για στρατιωτική χρήση είναι οι παρακάτω:

- i. Απευθείας επικοινωνία μεταξύ στρατοπέδων (με on line ανταλλαγή δεδομένων) που βρίσκονται εντός συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής π.χ. νομός ή νησί. Με τον τρόπο αυτό θα ελαττωθούν οι χρόνοι διεκπεραίωσης θεμάτων και θα καταπολεμηθεί η όποια μορφή γραφειοκρατίας.
- ii. Χρήση ασύρματου δικτύου για ασφάλεια εγκαταστάσεων, παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο ευαίσθητων τομέων ή εγκαταστάσεων με χρήση κάμερας, μετάδοση εικόνας σε κέντρο ελέγχου από το οποίο μπορεί να δίδονται άμεσες εντολές για επέμβαση σε περίπτωση ύπαρξης οποιουδήποτε προβλήματος. Σε μια εποχή που το προσωπικό των εφεδρών του ελληνικού στρατού μειώνονται δραστικά, η χρήση καμερών για την ασφάλεια των στρατοπέδων είναι το αμέσως επόμενο στάδιο.
- iii. Διασύνδεση στοιχείων αυτοκινούμενων μονάδων (αρμάτων, πυροβολικού κλπ.) με κέντρα διεύθυνσεως πυρός ή παρατηρητές που βρίσκονται σε μακρινές αποστάσεις για την on line ανταλλαγή δεδομένων που αφορούν στοιχεία βολής (θέσεις εχθρικών μονάδων και στόχων, θέσεις φίλιων μονάδων για αποφυγή εσφαλμένης βολής). Ένα τέτοιο σενάριο θα αναλυθεί εκτενέστερα στο τέλος του κεφαλαίου.

8.2 Στρατοί που χρησιμοποιούν ήδη το WiMAX

Μερικά από τα παραδείγματα των εφαρμογών που μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση του WiMAX φαίνονται από τη μέχρι τώρα χρησιμοποίησή του από στρατούς διεθνώς :

- i. Ισραηλινός στρατός χρησιμοποίησε ευρέως WiMAX δίκτυα κατά τη διάρκεια των εχθροπραξιών του στο Λίβανο.
- ii. Ο στρατός της Κορέας χρησιμοποιεί WiMAX δίκτυα, και ειδικότερα τις εφαρμογές που του προσφέρει η Samsung (Samsung Wibro).
- iii. Το σώμα των πεζοναυτών του αμερικάνικου στρατού (US Marines Corps) ανέπτυξε στον πόλεμο στο Ιράκ WiMAX δίκτυα κυρίως για δομές και ζεύξεις peer to peer (δηλαδή σε δίκτυο που επιτρέπει σε δύο ή περισσότερους υπολογιστές να μοιράζονται τους πόρους τους ισοδύναμα).
- iv. Στο αμερικανικό ναυτικό (US Navy) βρίσκεται σε εξέλιξη δοκιμή της δυνατότητας ανάπτυξης WiMAX δικτύων για την υλοποίηση Ship-to-Shore και Ship-to-Ship επικοινωνίας.
- v. Ο γαλλικός στρατός προμηθεύτηκε με την BLR-IP εφαρμογή των WiMAX δικτύων για την εφαρμογή του στις μονάδες του υποστήριξης και διοικητικής μέριμνας.
- vi. Στον Ινδικό στρατό βρίσκεται σε εξέλιξη μελέτη (TCS) στην οποία η χρήση του WiMAX είναι απαραίτητη.

Από όλα τα παραπάνω παραδείγματα, τα οποία συνεχώς με το χρόνο θα αυξάνονται, γίνεται φανερό ότι σε ένα σύγχρονο και διαρκώς μεταβαλλόμενο στρατιωτικό περιβάλλον επιχειρήσεων η χρήση του WiMAX πρόκειται να αντικαταστήσει ή ακόμα και να

συνεργαστεί αρμονικά με τις ήδη υπάρχουσες πατροπαράδοτες μορφές επικοινωνίας στις εφαρμογές υποστήριξης μάχης.

8.3 Τακτικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση του WiMAX σε στρατιωτικές εφαρμογές.

8.3.1 Υψηλή απόδοση

- i. Υψηλή ταχύτητα διαβίβασης δεδομένων (ρυθμαπόδοση) και υψηλή φασματική ικανότητα.
- ii. Κάλυψη τόσο με ζεύξεις με οπτική επαφή (Line-Of-Sight) σε ακτίνα δεκάδων χιλιομέτρων, όσο και με ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή (Non-Line-Of-Sight) σε ακτίνα χιλιομέτρων.
- iii. Δυνατότητα κινητικότητας.

8.3.2 Ευελιξία

- i. Σημείου προς σημείο (Point-To-Point) διαρθρώσεις (Όταν το WiMAX χρησιμοποιείται ως «Δίκτυο Κορμού»).
- ii. Σημείου προς Πολλαπλά Σημεία (Point to Multipoint) διαρθρώσεις (Όταν το WiMAX χρησιμοποιείται ως «Δίκτυο Πρόσβασης»).
- iii. Διαρθρώσεις πολλαπλών τακτικών δικτύων και τερματικών.
- iv. Δυνατότητα λειτουργίας σε ευρεία μπάντα συχνοτήτων.

8.3.3 Κορυφαίο επίπεδο τεχνολογίας

- i. Βασισμένο στην τεχνολογία του IP πρωτοκόλλου.
- ii. Το WiMAX είναι ο πρωτοπόρος των BWA/4G τεχνολογιών.
- iii. Το WiMAX Forum παρέχει τη δυνατότητα ανταλλαγής και συνεργασίας στοιχείων και πληροφοριών με άλλα συστήματα (μεταξύ Σταθμών Βάσης και τερματικών).

8.3.4 Τακτική και Ασφάλεια

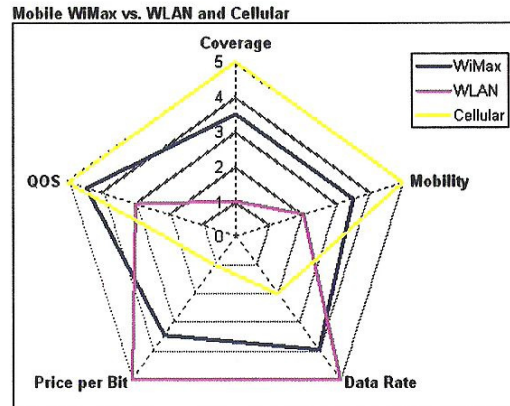
- i. Δίκτυα «πυρήνα» (με δυνατότητα κεντρικού ελέγχου) αφού λειτουργούν με Σταθμούς Βάσης και τερματικά.
- ii. Αυξημένη ασφάλεια για τη συνολική «από άκρη σε άκρη» (End-to-End) σύνδεση των χρηστών του, παρά το γεγονός ότι λειτουργεί σε ασύρματο περιβάλλον.
- iii. Χρησιμοποιεί το ίδιο περιβάλλον εργασίας με τα υπόλοιπα παραδοσιακά στρατιωτικά δίκτυα επικοινωνιών.

8.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από τη χρήση του WIMAX σε στρατιωτικά δίκτυα

8.4.1 Πλεονεκτήματα

- i. Υψηλή ταχύτητα διαβίβασης δεδομένων (ρυθμαπόδοση).

- ii. Σημαντικά μεγάλο βεληνεκές κάλυψης.
- iii. Δυνατότητα για ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή (Non Line-Of-Sight).
- iv. Υψηλή ποιότητα υπηρεσιών.
- v. Κινητικότητα.
- vi. Τερματικά χαμηλού σχετικά κόστους (asymmetric BS/terminal architecture).
- vii. Αποτελεί δίκτυο συμπληρωματικό και απόλυτα συμβατό με το WiFi (WiMAX backhaul of WiFi LANs).

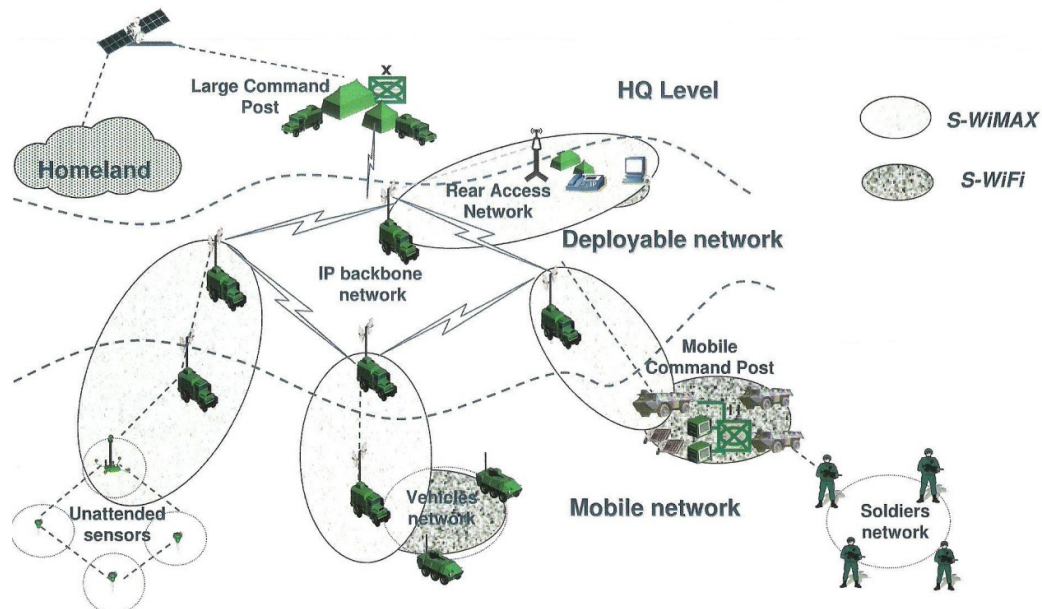


Σχήμα 40: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα από τη χρήση του WiMAX (σε στρατιωτικά δίκτυα) [23]

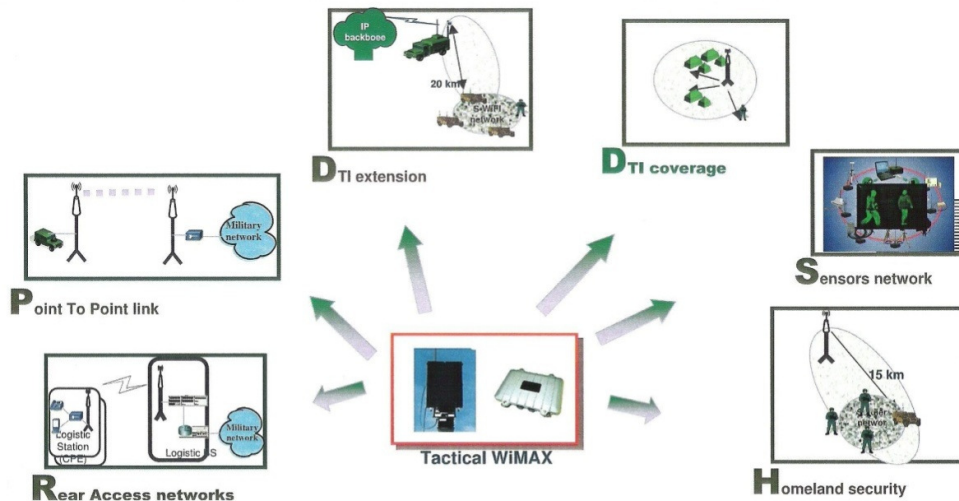
8.4.2 Μειονεκτήματα

- i. Βασισμένο σε μια συγκεντρωτική-κεντρική αρχιτεκτονική.
- ii. Δεν παρέχει τη δυνατότητα ηλεκτρονικών αντιμέτρων (No ECCM capacity).

8.5 Δυνατότητες συνεργασίας τακτικών δικτύων WiMAX-WiFi



Σχήμα 41: Από το τακτικό ασύρματο δίκτυο σε νέες ενοποιημένες λύσεις συνεργασίας WiMAX-WiFi. [23]



Σχήμα 42: Μια ευέλικτη λύση με δυνατότητες συνεργασίας σε πολλές εφαρμογές [23]

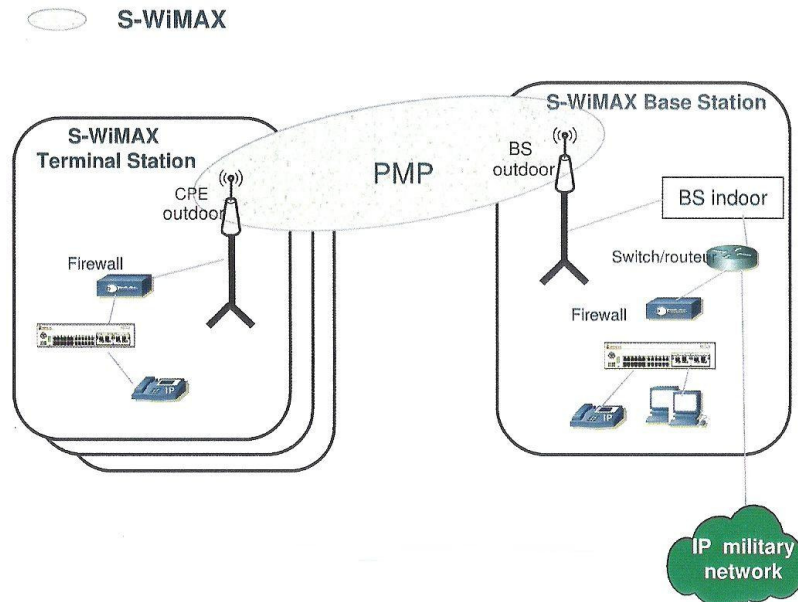
8.6 Παράδειγμα στρατιωτικού WiMAX δικτύου : Μονάδες Εφοδιασμού (Σταθμοί Διοικητικής Μέριμνας)



Σχήμα 43: Στρατιωτική Μονάδα Διοικητικής Μέριμνας σε καταυλισμό [23]

i. Χαρακτηριστικά

- 2,3 GHz ζώνη συχνοτήτων.
- Μεταφορά φωνής & δεδομένων (voice & data) με τους εξής τρόπους : Αναλογικά – IP telephone – PC.
- 128 Kbps κατ'ελάχιστο (UL,DL) για κάθε τερματικό σταθμό.
- Τοπολογία Σημείου προς πολλαπλά Σημεία (Point To Multipoint).
- Σταθερή δομή & σύνδεση (τόσο μέσω Σταθμού Βάσης όσο και μέσω τερματικών).
- Εξωτερικοί σταθμοί βάσης με ομοιοκατευθυντική κεραία.
- Σταθεροί εξωτερικοί σταθμοί με κατευθυντική κεραία.
- Κάλυψη μέχρι και 20Km.
- Ασφάλεια από άκρη σε άκρη (End-To-End) ζεύξης.



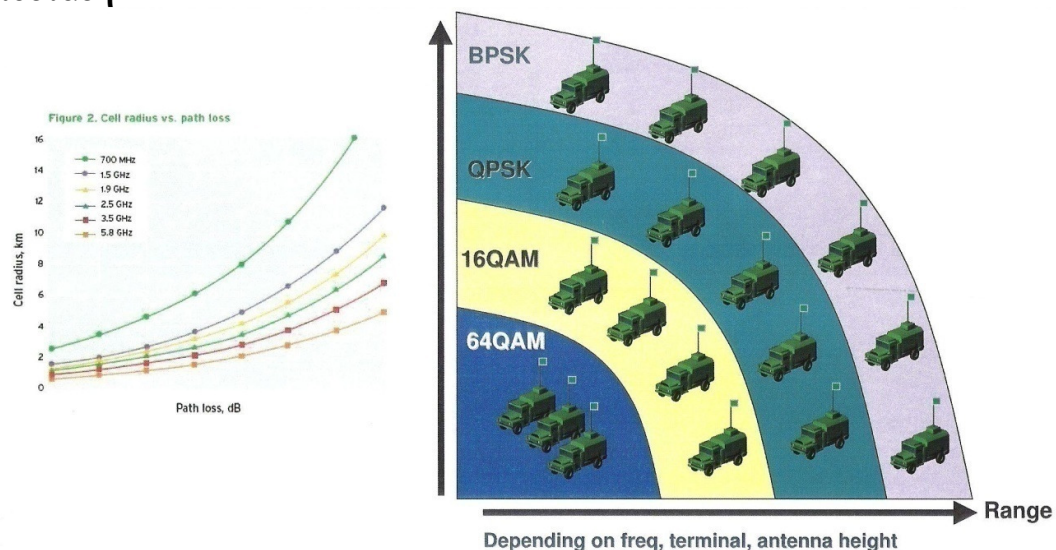
Σχήμα 44: Ενδεικτικό παράδειγμα απαιτούμενου εξοπλισμού για την υλοποίηση στρατιωτικού τακτικού WiMAX δικτύου [23]

ii. Πλεονεκτήματα

- Δυνατότητα κεντρικού ελέγχου μέχρι και τις επιχειρησιακές ομάδες του εφοδιασμού (Διοικητικής Μέριμνας).
- Ταχύτατη ανάπτυξη.
- Δυνατότητα ευρείας κλιμάκωσης.
- Άρτια συνεργασία και διαλειτουργικότητα με άλλα τακτικά στρατιωτικά δίκτυα.

8.7 Τακτικά δίκτυα WIMAX

8.7.1 Ικανότητα διαβίβασης δεδομένων (ρυθμαπόδοση) ως προς την απόσταση

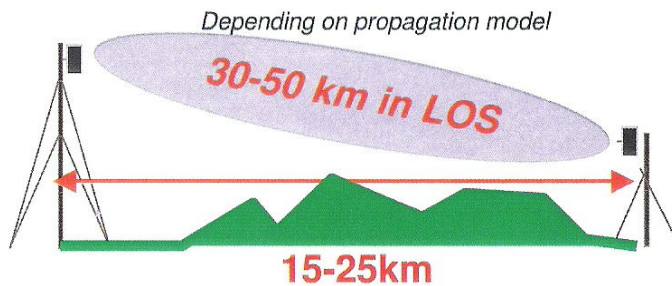


Σχήμα 45: Διάγραμμα κάλυψης δικτύου ως προς διαμόρφωση, συχνότητα και ύψος κεραίας [23]

Από την παραπάνω χαρακτηριστική εικόνα φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το επιθυμητό βεληνεκές κάλυψης, τόσο «χαμηλότερο» είναι το επίπεδο της διαμόρφωσης αλλά συγχρόνως και η ικανότητα διαβίβασης δεδομένων.

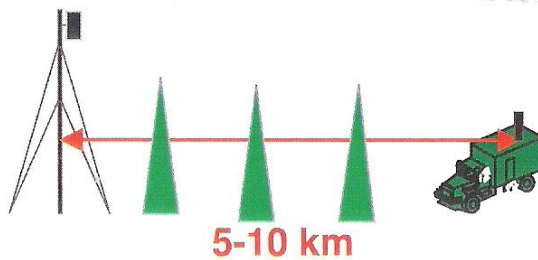
8.7.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη για κεραία Σταθμού Βάσης στα 25m & 2,3GHz σε ζεύξη χωρίς οπτική επαφή

i. Σταθερό τερματικό



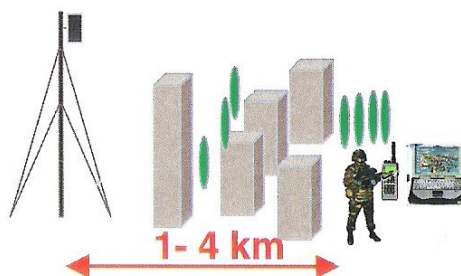
- Κεραία τερματικού στα 8m
- Κατευθυντική κεραία 15dBi
- 27 – 30 dBm Tx

ii. Τερματικό επί οχήματος



- Κεραία τερματικού στα 2m
- Ομοιοκατευθυντική κεραία 6dBi
- 27 dBm Tx

iii. Τερματικό επί μαχητή



- Κεραία τερματικού στα 1,5m
- Ομοιοκατευθυντική κεραία 2dBi

- 23 dBm Tx

8.8 Εφαρμογή χρησιμοποίησης τακτικού δικτύου WiMAX - Μεταφορά εικόνας από το πεδίο μάχης στα κέντρα λήψης αποφάσεων

8.8.1 Εισαγωγή

Σε όλες τις προηγούμενες παραγράφους έγινε αναλυτική επεξήγηση των χαρακτηριστικών καθώς και των δυνατοτήτων χρησιμοποίησης του WiMAX σε στρατιωτικά δίκτυα. Η ανάλυση ήταν εντελώς θεωρητική και στηρίχθηκε κυρίως στα τεχνικά χαρακτηριστικά του απαραίτητου εξοπλισμού καθώς και στις λοιπές δυνατότητες του ασύρματου αυτού δικτύου.

Στη συνέχεια θα γίνει η παρουσίαση μίας εφαρμογής που μπορεί να επιτευχθεί στο πεδίο της μάχης με τη χρήση του WiMAX. Το σενάριο καθώς και οι λεπτομέρειες της εφαρμογής θα αναλυθούν εκτενέστερα παρακάτω. Οι πληροφορίες αυτού του κεφαλαίου προέρχονται από την εταιρία THALES HELLAS και συγκεκριμένα από το «5th European PR4G User's conference» WORKSHOP (**Tactical WiMAX**).

Επιπλέον το σενάριο της εφαρμογής που ακολουθεί στηρίζεται στις δυνατότητες που παρέχει το σύστημα TWS 5000 της εταιρίας THALES, το οποίο αποτελείται από τα εξής :

i. Εξωτερικό τερματικό

- Ενσωματωμένη κατευθυντική κεραία
- PoE παροχή ισχύος
- Ελάχιστοι περιορισμοί SWAP



ii. Τερματικό επί οχήματος

- Εξωτερική κεραία
- Ενοποιημένη – κοινή χρήση με άλλα πρωτόκολλα WF για μελλοντική χρήση (WiFi/WiMAX/xx)
- Μέτριοι περιορισμοί SWAP



iii. Φορητά τερματικά

- Ενσωματωμένη ομοιοκατευθυντική κεραία
- Χρήση μόνο WiMAX ή multi-mode
- Αρκετοί περιορισμοί SWAP



Το **TWS 5000** είναι το αποτέλεσμα της συνεργασίας μεταξύ των εταιριών Thales και Alcatel-Lucent που έχουν ήδη εφαρμόσει σε πολλές **WiMAX** εφαρμογές δικτύων παγκοσμίως. Χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.16e και καθιστά εφικτή κάθε ασύρματη υπηρεσία ακόμα και για τον πιο απαιτητικό χρήστη.

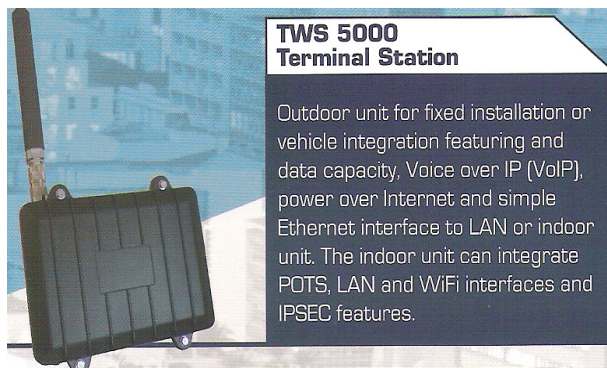
Συγκεκριμένα για το **TWS 5000** γνωρίζουμε τα παρακάτω :

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ



TWS 5000 Base Station

Outdoor Base Station with various antenna configuration and indoor Access Core (Operation and Maintenance, ASN gateway, Authentication server, DHCP server...) integrated in a compact transit casing easily deployable.



TWS 5000 Terminal Station

Outdoor unit for fixed installation or vehicle integration featuring and data capacity, Voice over IP (VoIP), power over Internet and simple Ethernet interface to LAN or indoor unit. The indoor unit can integrate POTS, LAN and WiFi interfaces and IPSEC features.



TWS 5000 Man-portable Terminal

Man-portable terminal for fixed, nomadic or mobile applications, featuring and data capacity for Voice over IP (VoIP). Technology evolution will extend the portfolio of TWS 5000 terminal to future handheld solutions.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

FEATURES

MAIN CHARACTERISTICS

- **Standard:** IEEE802.16e-2005
- **Frequency band:** 2.2 - 2.4 GHz
- **Radio access:** TDD
- **Channel band:** 5, 10 MHz
- **Modulation:** QPSK, 16 QAM, 64 QAM
- **Output power:** up to 27 dBm +/- 1dB dynamic power management by 1dB step
- **Smart antenna support**
- **Receiver diversity**
- **Antenna:** omni-directional 6 dB, other directional antenna on demand
- **Throughput:** up to 5 Mbps (DL)
up to 5 Mbps (UL)
- **QoS management** handling according to the IEEE802.16 standard
- **Security:** native 802.16e
external IPSEC (option)
- **Management:**
 - web from local PC, including configuration, diagnostics and SW upload
 - SNMPV3 for remote control

PHYSICAL CHARACTERISTICS

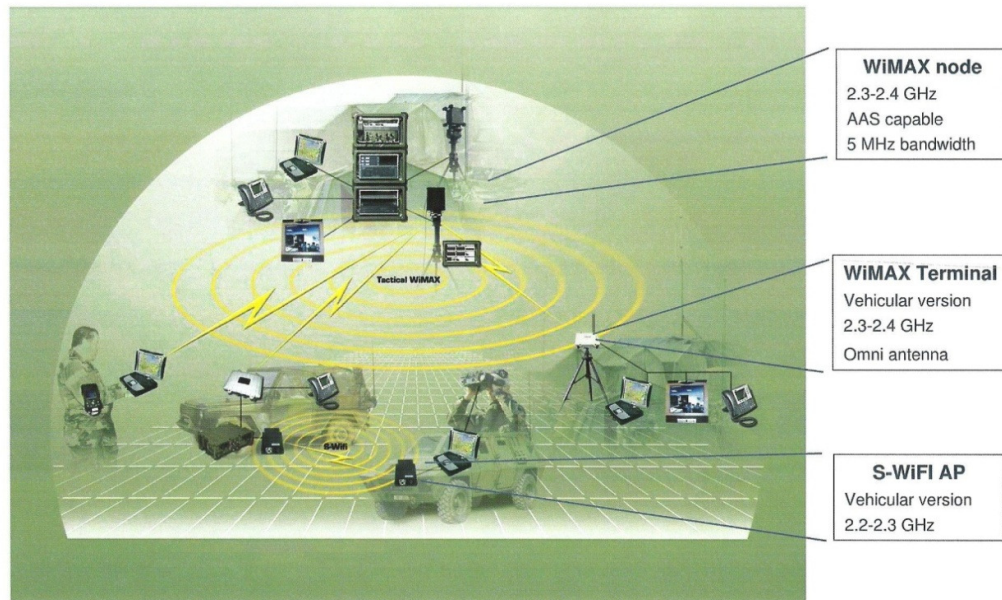
- **Size:**
 - Outdoor unit: (HxLxW) 250x150x70 mm
Weight < 2.5 kg
 - Indoor unit: (HxLxW) 250x150x55 mm
Weight < 2 kg
- **Interfaces:** 1 Ethernet RJ45 for LAN or indoor unit
- **Power supply:** PoE, 10-48 VDC
- **Antenna:** 2 RF connectors for Rx diversity or MIMO

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

- **Operating Temperature:** -30 °C to +50 °C
- **Storage Temperature:** -30 °C to +70 °C
- **Environmental:** IP67
- **EMC and safety:** MIL-STD-461E

Σχήμα 46: Χαρακτηριστικά του TWS 5000 της εταιρίας Thales (χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός στην εφαρμογή μας). Συγκεκριμένα : Σταθμός Βάσης, Τερματικός Σταθμός και Φορητό τερματικό

8.8.2 Περιγραφή εφαρμογής



Σχήμα 47: Ενδεικτικός τρόπος κατανομής εξοπλισμού για την υλοποίηση του WiMAX δικτύου. [23]

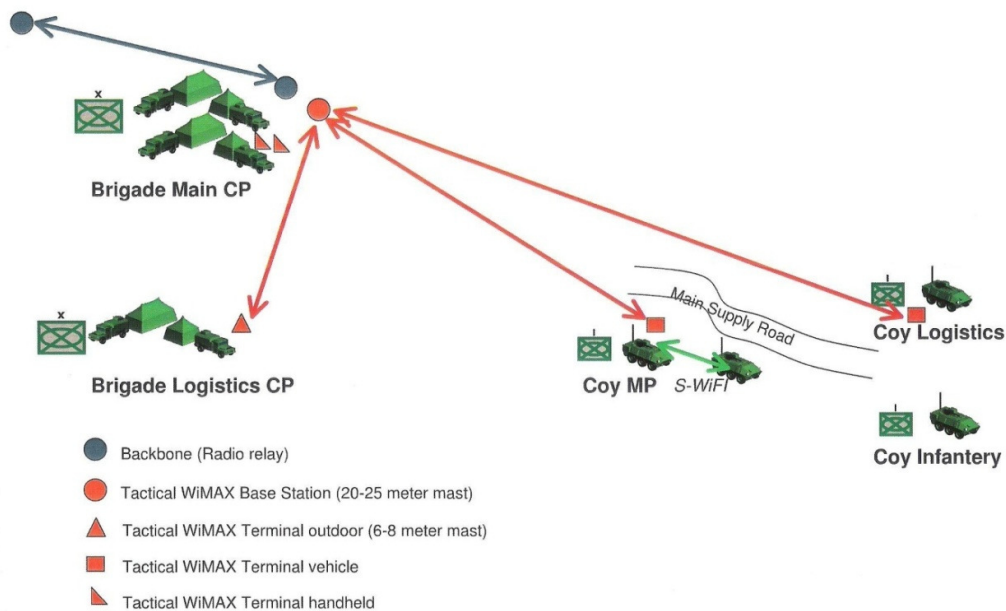
Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός τρόπος κατανομής του εξοπλισμού (τερματικού σταθμού TWS 5000) για την υλοποίηση του WiMAX δικτύου.

Ακολουθώντας, θα ορίσουμε το σενάριο της άσκησης:

Υπάρχουν ανεπτυγμένες οι δυνάμεις μιας Ταξιαρχίας όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Είναι επιθυμητή η επικοινωνία στο Σταθμού Διοίκησης (Main CP) τόσο με τον Σταθμό Διοικητικής Μέριμνας (Logistics CP) όσο και με τις ανεπτυγμένες στο Χώρο Διασποράς Μονάδες μάχης της Ταξιαρχίας.

Σε ένα περιβάλλον όπως αυτό που περιγράφουμε στην άσκησή μας, οι επικοινωνίες της κεντρικής διοίκησης με τις λοιπές μονάδες της που βρίσκονται σε διασπορά είναι αναγκαία και μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό τακτικό πλεονέκτημα επί του αντιπάλου, όταν αυτές είναι ασφαλείς και αξιόπιστες. Πιο συγκεκριμένα, οι ασύρματες επικοινωνίες παρέχουν επιπλέον τη δυνατότητα της κινητικότητας και ευελιξίας των δυνάμεων μάχης, γεγονός το οποίο είναι απαραίτητο σε ένα σύγχρονο στρατιωτικό περιβάλλον.

Θα περιγράψουμε σε φάσεις, ακριβώς όπως υλοποιείται και στο πεδίο της μάχης, την προσπάθεια κάποιου από τα τμήματα μάχης ενός μεγάλου στρατιωτικού σχηματισμού να ανεφοδιαστεί σε καύσιμα. Η συγκεκριμένη ενέργεια μπορεί να ακούγεται απλή στην υλοποίησή της σε ένα περιβάλλον φίλιο και ειρηνικό, αλλά σε συνθήκες μάχης είναι απαραίτητη η εξασφάλιση της ασφαλούς κίνησης του προσωπικού και των μέσων.



Σχήμα 48: Μια ευέλικτη λύση με δυνατότητες συνεργασίας σε πολλές εφαρμογές [23]

Με τα σημερινά μέσα και τις υπάρχουσες τεχνολογίες οι πληροφορίες που μπορεί να υπάρχουν και οι οποίες δείχνουν αν είναι ασφαλής ή όχι η πραγματοποίηση μιας τέτοιας κίνησης δεν εξασφαλίζουν πάντα το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτό που λείπει και έρχεται να συμπληρώσει με μεγάλη επιτυχία το στρατιωτικό δίκτυο WiMAX, όπως θα φανεί και στο σενάριο της άσκησης που ακολουθεί, είναι η μεταφορά εικόνας σε «ζωντανή μετάδοση» (live) από τον επιθυμητό χώρο. Με το νέο αυτό δεδομένο, αυτός που αποφασίζει για την κίνηση ή όχι του προσωπικού και των μέσων έχει ίδια άποψη και αναλόγως πράττει.

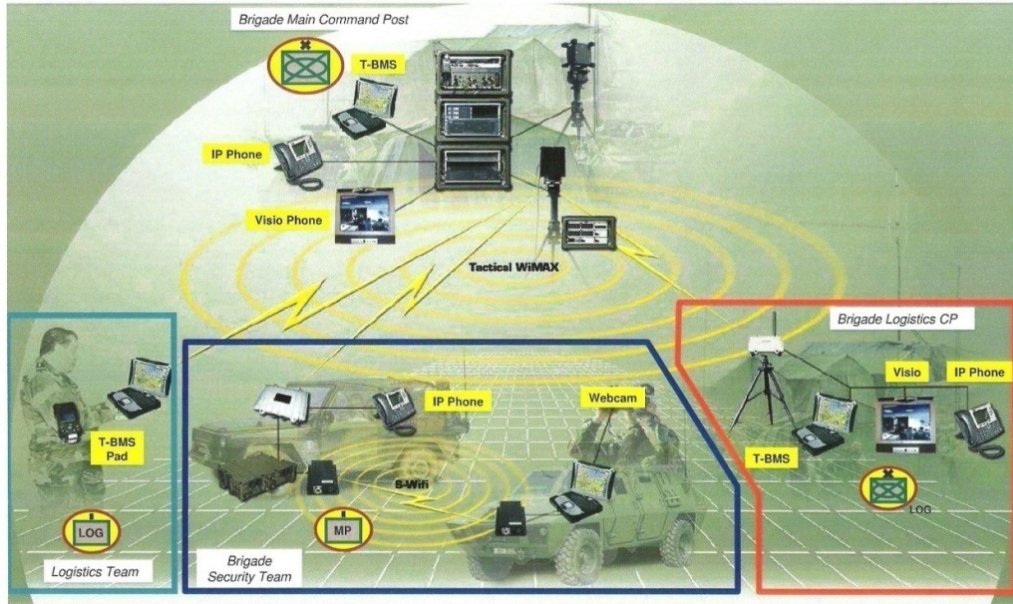
Στην περίπτωση που εξετάζουμε και η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 9δ, τα τμήματα μάχης (Τάγμα Πεζικού – Τάγμα Υποστηρίξεως ή Διοικητικής Μέριμνας – Τάγμα Στρατονομίας) βρίσκονται σε απόσταση από τον Σταθμό Διοίκησης και από τον Σταθμό Διοικητικής Μέριμνας όσο και με τις ανεπτυγμένες στο Χώρο Διασποράς Μονάδες μάχης της Ταξιαρχίας. Στην εικόνα αυτή υπάρχουν τόσο τα τμήματα μάχης όσο και ο Σταθμός Διοίκησης, ενώ φαίνεται και το βασικό δρομολόγιο εφοδιασμού μέσω του οποίου πραγματοποιούνται οι κινήσεις από και προς το πεδίο της μάχης.

Υπάρχουν ακόμα στο σχήμα οι παραστάσεις που εικονίζουν το είδος των τερματικών WiMAX που χρησιμοποιούνται σε κάθε επίπεδο στρατιωτικής διοίκησης και επικοινωνίας (Backbone – Base Station – Outdoor – vehicle – handheld)

Για αποφυγή παρερμηνειών, διευκρινίζεται ότι τα επίπεδα στρατιωτικής διοίκησης που αναφέρονται είναι ενδεικτικά και φανταστικά και αποτελούν μέρος του σεναρίου της εφαρμογής μας.

Διευκρινίζεται επίσης ότι αναφέρονται ενδεικτικά στις εικόνες που ακολουθούν τα τεχνικά μέσα που χρησιμοποιούνται στο σενάριο της άσκησης που θα περιγράψουμε παρακάτω.

Brigade Main CP and Logistics CP – MP Company – Logistics Company



Σχήμα 49: Καθορισμός των διαφόρων επιπέδων στρατιωτικής διοίκησης [23]

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα διάφορα επίπεδα στρατιωτικής διοίκησης και ο τρόπος επικοινωνίας τους, μέσω WiMAX δικτύου. Συγκεκριμένα τα διάφορα επίπεδα στρατιωτικής διοίκησης διαθέτουν τον παρακάτω εξοπλισμό:

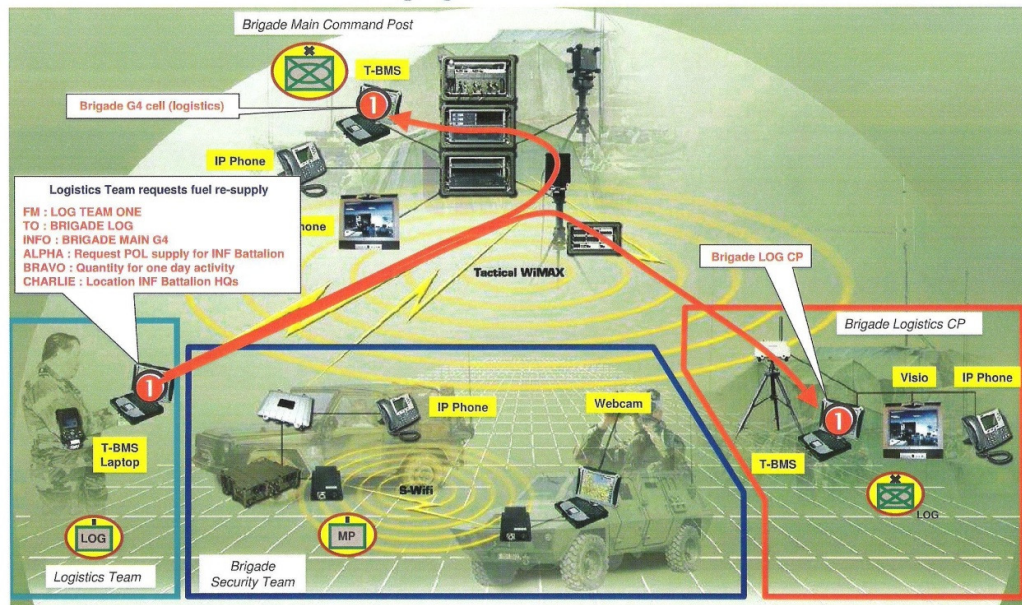
- i. Το Τάγμα Υποστηρίξεως διαθέτει φορητά τερματικά WiMAX.
- ii. Το Τάγμα Στρατονομίας διαθέτει S-WiFi AP (vehicular version) καθώς και [IP phone και Webcam].
- iii. Ο Σταθμός Διοικητικής Μέρμνας διαθέτει WiMAX terminal (vehicular version) με ομοκατευθυντική κεραία [Visio – IP phone – T-BMS].
- iv. Ο Σταθμός Διοίκησης της Ταξιαρχίας διαθέτει WiMAX node [Visio – IP phone – T-BMS].

➤ **Φάση I : Αρχική υποβολή αιτήματος**

Οι μονάδες μάχης της Ταξιαρχίας έχουν αρχίσει να εξαντλούν τα καύσιμά τους και απευθύνονται για το λόγο αυτό στα αποθέματα καυσίμου που διαθέτει γι' αυτές η μονάδα υποστηρίξεως της Ταξιαρχίας. Το Τάγμα Υποστηρίξεως βρίσκεται και αυτό σε απόσταση από το Σταθμό Διοίκησης καθώς και από τον Σταθμό Διοικητικής Μέριμνας (όπου και τηρούνται τα κυρίως αποθέματα της εφοδιαστικής αλυσίδας). Οι μονάδες χρησιμοποιούν για την μεταξύ τους επικοινωνία το δίκτυο WiMAX και τον εξοπλισμό που αναφέρθηκε παραπάνω.

Υποβάλλεται ιεραρχικά λοιπόν το αίτημα από το Τάγμα Υποστηρίξεως (Logistics Team) στο Σταθμό Διοικητικής Μέριμνας της Ταξιαρχίας (Brigade LOG CP) ενώ ταυτόχρονα τίθεται το θέμα υπόψη του αρμόδιου γραφείου του επιτελείου της Ταξιαρχίας (Brigade G4 cell – logistics), όπου είναι και το τμήμα που θα εγκρίνει ή όχι την υλοποίηση του αιτήματος (κίνηση για ανεφοδιασμό καυσίμου).

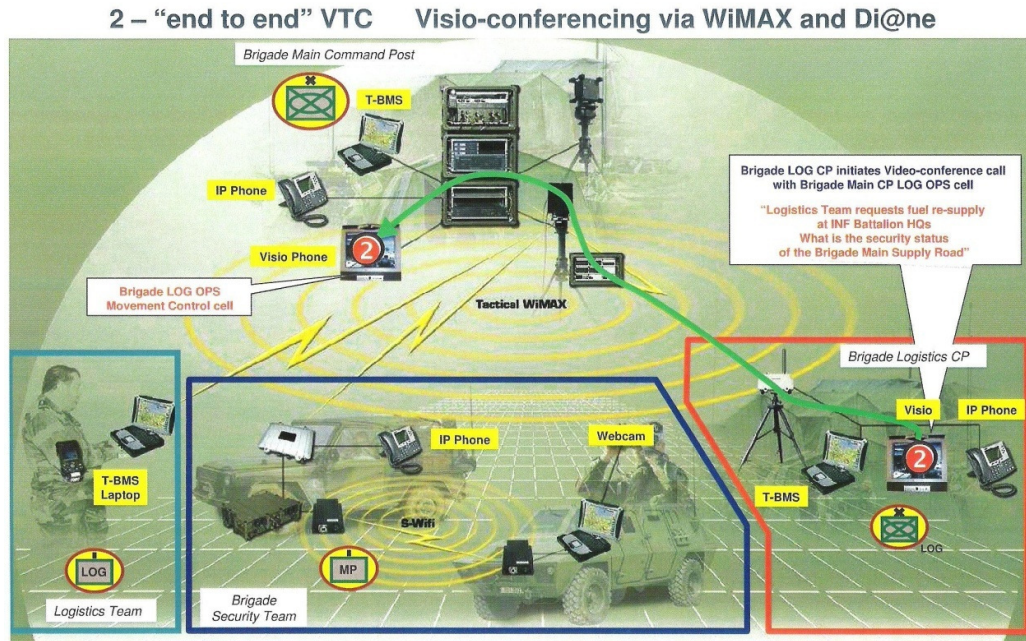
1 – “end to end” messaging T-BMS e-mails via WiMAX and Di@ne



Σχήμα 50: Αρχική υποβολή αιτήματος από Τάγμα Υποστηρίξεως [23]

➤ **Φάση II** : Ιεραρχική διαβίβαση του αιτήματος των τμημάτων μάχης.

Το αίτημα του ανεφοδιασμού των καυσίμων υποβάλλεται από το Σταθμό Διοικητικής Μέριμνας, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παροχή της ποσότητας του καυσίμου, στη διοίκηση της Ταξιαρχίας, η οποία έχει υπό τις διαταγές της μονάδες που θα εξασφαλίσουν την απαιτούμενη ασφάλεια. Το αίτημα λοιπόν αυτό αναφέρει ότι υπάρχει η ανάγκη του ανεφοδιασμού των μονάδων μάχης και ζητάει να μάθει πιο είναι το επίπεδο ασφαλείας του δρομολογίου εφοδιασμού που χρησιμοποιείται.



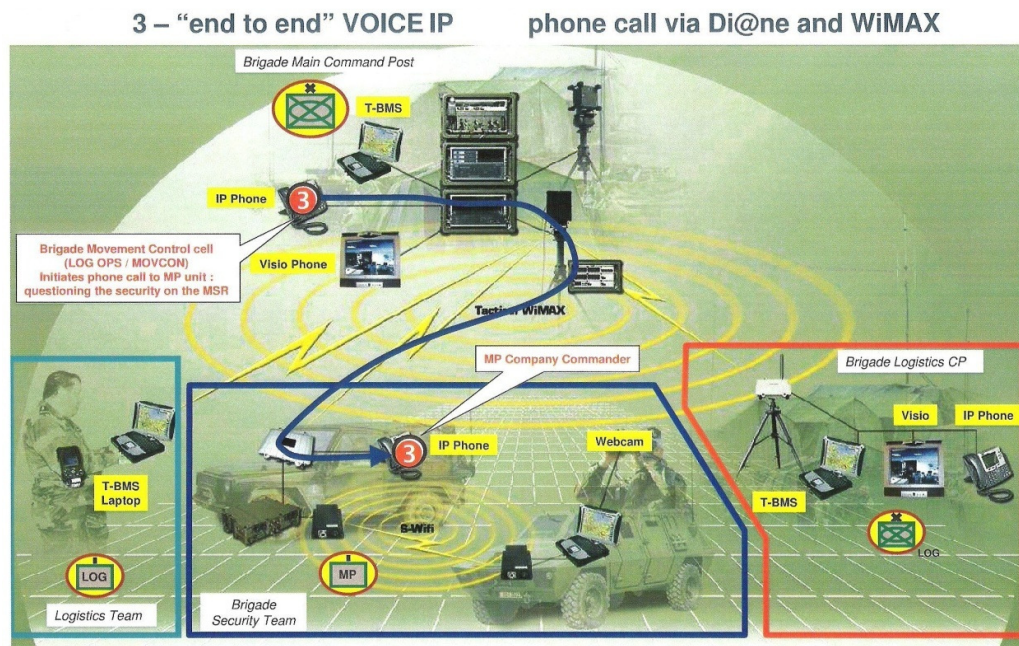
Σχήμα 51: Υποβολή αιτήματος από το Σταθμό Διοικητικής Μέριμνας [23]

➤ **Φάση III : Επικοινωνία με «Ομάδα Ασφαλείας» ή αλλιώς Τάγμα Στρατονομίας**

Η Διοίκηση της Ταξιαρχίας καλείται να αποφασίσει για την πραγματοποίηση της κίνησης και συγκεκριμένα κάτω από ποιες συνθήκες ασφαλείας πρέπει να πραγματοποιηθεί. Συγκεκριμένα, θα εξεταστεί αρχικά η χρησιμοποίηση του βασικού δρομολογίου εφοδιασμού (το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 48) και σε περίπτωση αδυναμίας για λόγους ασφαλείας μπορεί να προτιμηθεί κάποιο εναλλακτικό.

Το αρμόδιο γραφείο ελέγχου κινήσεως (Brigade Movement Control cell) καλεί τηλεφωνικά την μονάδα Στρατονομίας (MP unit) η οποία βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από το βασικό δρομολόγιο εφοδιασμού των μονάδων μάχης.

Ο ρόλος του τμήματος αυτού της Ταξιαρχίας έχει ως στόχο του την εξασφάλιση της ασφαλούς κίνησης των μέσων όταν αυτά κινούνται μέσω του βασικού δρομολογίου εφοδιασμού και η θέση του είναι τέτοια που του επιτρέπει να έχει σαφή εικόνα της τρέχουσας κατάστασης.



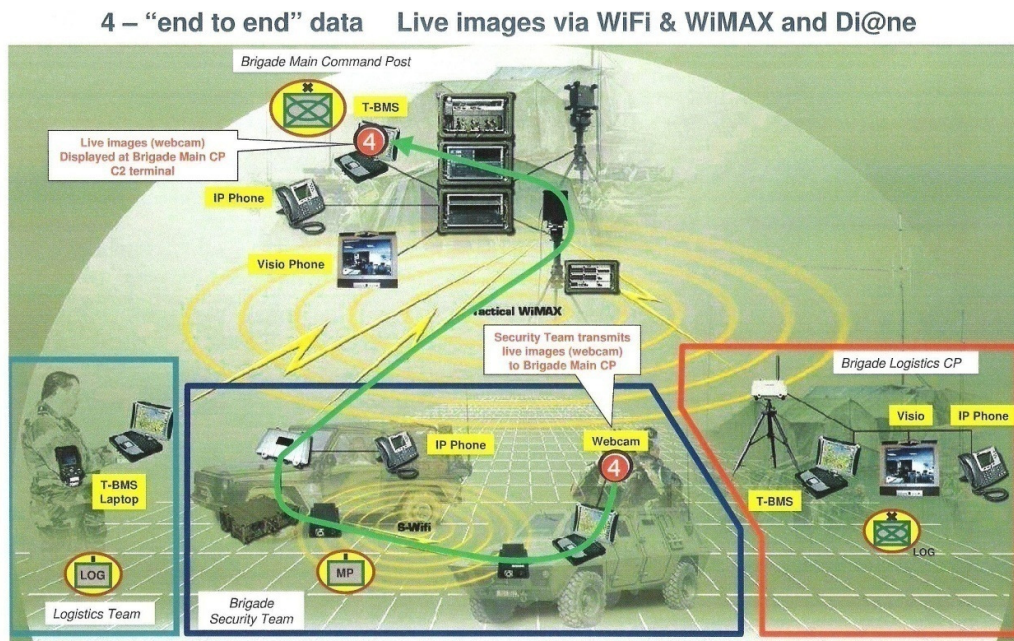
Σχήμα 52: Αίτημα της Διοίκησης να μάθουν από τα τμήματα ασφαλείας για την ασφάλεια των απαιτούμενων κινήσεων. [23]

➤ **Φάση IV : Μεταφορά εικόνας από το πεδίο που ενδιαφέρει στον Σταθμό Διοίκησης (και λήψης αποφάσεων)**

Το Τάγμα Στρατονομίας, διαθέτοντας τα μέσα και την τεχνολογία WiMAX, είναι σε θέση να μεταφέρει «ζωντανή εικόνα» (live images) μέσω του δικτύου WiMAX και να δίνεται με αυτόν τον τρόπο η δυνατότητα λήψης μιας απόφασης από την διοίκηση της Ταξιαρχίας κάτω από τις καλύτερες δυνατές συνθήκες.

Σε μια διαφορετική περίπτωση όπου δεν υπάρχει το WiMAX δίκτυο, θα υπήρχε κατά την προηγούμενη «Φάση II» η τηλεφωνική επικοινωνία της Διοίκησης της Ταξιαρχίας με το Τάγμα Στρατονομίας όπου και προφορικά θα υπήρχε η περιγραφή της κατάστασης.

Μπορεί κάτι τέτοιο να φαντάζει πιο απλό σε κάποιον που δεν γνωρίζει την σημασία και την ιδιαίτερη αξία της τακτικής κατάστασης ενός πεδίου μάχης ή μιας εμπόλεμης περιοχής γενικότερα. Είναι διαφορετικό αυτός που αποφασίζει να λαμβάνει μια τόσο σημαντική απόφαση (για τυχόν κινδύνους για τις ζωές του προσωπικού που θα κινηθεί και τα μέσα) από την περιγραφή κάποιου άλλου από το να έχει ίδια άποψη (και μάλιστα live) της κατάστασης.

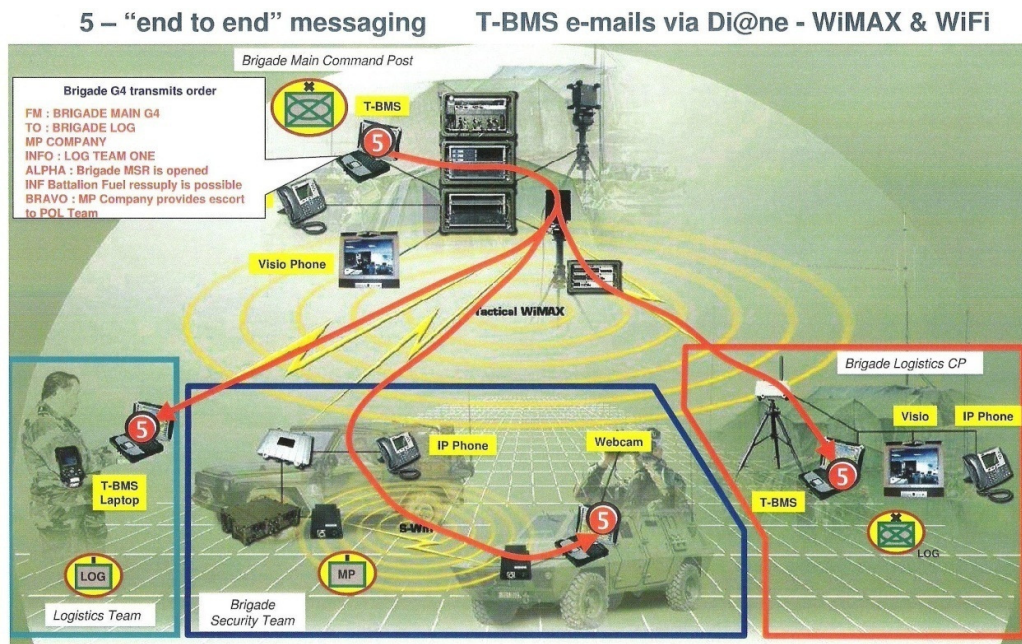


Σχήμα 53: Τα τμήματα ασφαλείας μεταφέρουν μέσω webcam και WiMAX δικτύου, «ζωντανή» εικόνα στο Σταθμό Διοίκησης. [23]

➤ **Φάση V** : Έκδοση διαταγής κίνησης τμημάτων για τον ανεφοδιασμό καυσίμων

Η Διοίκηση της Ταξιαρχίας εκδίδει διαταγή που εγκρίνει την κίνηση για ανεφοδιασμό καυσίμων. Έχοντας σαν γνώμονα την ασφάλεια του προσωπικού και των μέσων που μετέχουν στην κίνηση και σύμφωνα με τα δεδομένα που είδε από τη «ζωντανή μετάδοση» του WiMAX δικτύου αποφάσισε :

- α. Το βασικό δρομολόγιο εφοδιασμού είναι ασφαλές.
- β. Η πραγματοποίηση της κίνησης για ανεφοδιασμό καυσίμων είναι δυνατόν να γίνει μέσω του δρομολογίου αυτού.
- γ. Να διατεθεί από την Στρατονομία τμήμα που θα συνοδεύει τη φάλαγγα των οχημάτων για την παροχή ασφαλείας.



Σχήμα 54: Μεταφέρεται η διαταγή της Διοίκησης σε όλους τους ενδιαφερόμενους για ενέργεια αλλά και πληροφορία. [23]

8.9 Συμπεράσματα από την αναγκαιότητα του WiMAX δικτύου σε στρατιωτικές εφαρμογές

Από το προηγούμενο σενάριο άσκησης που αναπτύχθηκε εκτενώς, φαίνεται άμεσα η διαφορά του δικτύου WiMAX από όλα τα υπόλοιπα που αποτελούν τους «προγόνους» του. Προσπαθήσαμε να βρούμε και να προβάλλουμε την αξία του συγκεκριμένου δικτύου μέσα από ένα απλό και συνηθισμένο στρατιωτικό σενάριο το οποίο είναι συνάμα και ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η στρατιωτική υπηρεσία ακόμα και σε καιρό ειρήνης (με διαφορά μόνο στον βαθμό ασφαλείας). Θα θέλαμε να κλείσουμε την προσπάθειά μας αυτή μνημονεύοντας τα πλεονεκτήματα που αποκομίζει ένας στρατός που χρησιμοποιεί τα δίκτυα αυτά:

- **Ευρυζωνικές υπηρεσίες πολυμέσων :** φωνής, πληροφορίας, εικόνας και βίντεο τα οποία διαβιβάζονται με την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών και σε ένα ευρύ φάσμα ρυθμού μετάδοσης.
- **Υψηλή ευελιξία :** ευελιξία χρησιμοποίησης συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται σε μπάντες για στρατιωτικές εφαρμογές, προσαρμογή της πληροφορίας ανάλογα με την χωρητικότητα και τον ρυθμό του διαύλου
- **Μεγάλη κάλυψη :** με τη χρησιμοποίηση της WiMAX SOFDMA τεχνολογίας σε συνδυασμό με τις ιδιότητες των κεραιών όπως «diversity – beamfoaming – MIMO».
- **Πλήρης κινητικότητα :** η χρήση του mobile WiMAX (802.16e) παρέχει την παραπάνω ιδιότητα.
- **Απλός έλεγχος και διαχείριση :** διότι όλα τα τερματικά που χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπως και αυτά που ενδεικτικά αναφέρονται στο σενάριο της άσκησης “TWS 5000 Terminal Station” της εταιρίας THALES ELECTRONICS SYSTEMS, είναι πολύ απλά στον χειρισμό και στον έλεγχο κατά τη χρήση τους.
- **Εύκολη ανάπτυξη στο πεδίο :** άμεση ανάπτυξη των κινητών τερματικών και εύκολη κλιμάκωση και εφαρμογή σε κρίσιμες καταστάσεις μάχης.
- **Ολοκληρωμένη λύση :** με χρησιμοποίηση πολύ ελαφριών τερματικών και σταθμών βάσης.
- **Βελτιωμένη ασφάλεια επικοινωνιών :** εκτός από το ασύρματο περιβάλλον, όλες οι εταιρίες που παρέχουν τεχνολογία WiMAX στρατιωτικού δικτύου έχουν και λύσεις που συνεργάζονται και εξασφαλίζουν την ασφάλη από άκρη σε άκρη μεταφορά πληροφορίας.

Σήμερα, περισσότερο παρά ποτέ, η επιτυχής έκβαση μιας πολεμικής επιχείρησης στηρίζεται στην απόκτηση, συλλογή και στον κατάλληλο διαμοιρασμό των πληροφοριών. Σε αυτόν τον κρίσιμο τομέα των επικοινωνιών το μέλλον μοιάζει ότι ανήκει στην τεχνολογία του WiMAX. Οι χρήστες του παγκοσμίως αυξάνονται και στην πολεμική βιομηχανία με προοπτική απόκτησης του ρόλου που του αξίζει στα πεδία του μέλλοντος, αυτή του κυρίαρχου.

Αναφορές -Βιβλιογραφία

- [1] <http://www.techteam.gr/wiki/WiMAX> ‘Techteam.gr Wiki’, 2009
- [2] Todor Cooklev, ‘Wireless Communication Standards: a study of IEEE 802.11™, 802.15™, and 802.16™’, Artech House, 2002
- [3] WiMAX Forum, Business Case Models for Fixed BWA based on WiMAX Technology and the 802.16 Std
- [4] Marks R. B., IEEE Standard 802.16 for Global Broadband Wireless Access 21-10-2003
- [5] IEEE, IEEE Std 802.16-200: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems 24-6-2004
- [6] WiMAX Forum, Mobile WiMAX-Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation March 2006
- [7] WiMAX Forum, The WiMAX Forum Certified Program for Fixed WiMAX Jan 2007
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.16_WiMAX
- [10] Intel Technical White Paper, *Understanding WiMAX and 3G for Portable & Mobile Broadband Wireless* December 2004
- [11] Syed Ahson, Mohammad Ilyas, WiMax Applications, CRC Press,2008
- [12] WiMAX Forum, WF Day in the life with WiMAX, Sep 2005
- [13] Jeffrey G.Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed, Fundamentals of WiMAX, Feb 2007
- [14] Kwan-Cheng Chen, J.Roberto B.de Marca, Mobile WiMAX, Apr.2008
- [15] Loutfi Nuaymi, WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access, 2007
- [16] IEEE 802.16 Working Group, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems– Amendment 2: IEEE Std. 802.16e-2005, Feb 2006
- [17] Andrew S. Tanenbaum, Δίκτυα Υπολογιστών, 4η εκδ, 2003
- [18] “Network Working Group Stage 2 Specification, Release 1 version 1.2,” WiMAX Forum, Jan 2009.

[19] “Network Working Group Stage 3 Specification Release 1,” WiMAX Forum, February 2009.

[20] Kuo-Hui Li, WiMAX Network Architecture, Intel Mobility Group
June 2006.

[21] Θεολόγου Μ. Ε., *Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών* Αθήνα, Μάρτιος 2004, Εκδόσεις ΕΜΠ

[22] Mustafa Ergen ,The Access Service Network in WiMAX: The Role of ASN-GW, WiChorus, Inc. 2008

[23] «5th European PR4G User’s conference». WORKSHOP 3 (**Tactical WiMAX**). THALES ELECTRONICS SYSTEMS.

Συνομογραφίες

3-DES	triple Data Encryption Standard
3GPP	3rd Generation Partnership Project
AAS	Adaptive Antenna System
AAA	Authentication, Authorization, Accounting
AGC	Automatic Gain Control
AK	Authorization Key
ARQ	Automatic Repeat request
ASN	Access Service Network
ASN-GW	ASN Gateway
ATDD	Adaptive Time Division Duplexing
ATM	Asynchronous Mtransfer Mode
BCC	Block Convolutional Code
BE	Best Effort
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BR	Bandwidth Request
BS	Base Station
BSN	Block Nequence Number
BTC	Block Turbo Code
BW	Bandwidth
BWA	Broadband Wireless access
C/I	Carrier-to-Interference ratio
C/N	Carrier-to-Noise ratio
CA	Certification Authority
CBC	Cipher Block Chaining
CDF	Cumulative Distribution Function
CC	Confirmation Code
CCI	Co-channel Interference
CCS	Common Vhannel Signaling
CCV	Clock Comparison Value
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	European Conference of Postal and Telecom administrations
ChID	Channel Identifier
CID	Connection Identifier
CINR	Carrier-to-interference-and-noise ratio
CIR	Channel Impulse Response
CLP	Cell loss Priority
CP	Cyclix Prefix
CPS	Common Part Sublayer
CRC	Cyclix Redundancy Check
CS	Convergence Sublayer
CSN	Connectivity Service Network

CSCF	Centralized Scheduling Configuration
CSCH	Centralized Scheduling
CSTD	Cyclic Shift Transmit Diversity
DAMA	Demand Assigned Multiple Access
DARS	Digital Audio Radio Satellite
DCD	Downlink Channel Descriptor
DES	Data Encryption Standard
DFS	Dynamic Frequency Selection
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DIUK	Downlink Interval Usage Code
DL	Downlink
DM	Directed Mesh
DSA	Dynamic Service Addition
DSC	Dynamic Service Change
DSCH	Distributed Scheduling
DSCP	Differentiate Services Codepoint
DSD	Dynamic Service Deletion
DSx	Dynamic Service addition, change or deletion
DP	Decision Point
EAP	Extensible Authentication Protocol
EAP-TLS	EAP-Transport Layer Security
EAP-SIM	EAP-Subscriber Identity Module
EC	Encryption Control
ECB	Electronic Code book
EDE	Encrypt-Decrypt-Encrypt
EESS	Earth Exploratory Satellite System
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
EKS	Encryption Key Sequence
EP	Enforcement Point
EVM	Error Vector Magnitude
FC	Fragmentation Control
FCH	Frame Control Header
FDD	Frequency Division Duplex or Duplexing
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FPC	Fast Power Control
FSH	Fragmentation Subheader
FSN	Fragment Sequence Number
FSS	Fixed Satellite Service
GF	Galois Field
GPS	Global Positioning System
GS	Guard Symbol
HCS	Header Check Sequence
HEC	Header Error Check

H-FDD	Half-duplex Frequency Division Duplex
HMAC	Hashed Message Authentication Code
HO	Handover
HT	Header Type
HUMAN	High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMS	Internet Multimedia Services
IMS	IP Multimedia Subsystem
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunications Union
IWF	Interworking Function
IWK	Interworking
IV	Initialization Vectors
KEK	Key Encryption Key
KEYMAT	Keying Material
LAN	Local Area Network
LBS	Location Based Services
LEA	Law Enforcement Agency
LFSR	Linear Feedback Shift Register
LIS	Lawful Intercept
LLC	Logical Link Control
LOS	Line-Of-Sight
LSB	Least Significant Bit
MAC	Medium Access Control Layer
MAN	Metropolitan Area Network
MBS	Multicast and Broadcast Service
MDS	Multipoint Distribution Service
MIB	Management Information Base
MIC	Message Integrity Check
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
MPEG	Moving pictures Experts Group
MS	Mobile Station
MSK	Master Session Key
NAP	Network Access Providers
NLOS	Non-Line-of-sight
NNI	Network-to-network Interface (or network node interface)
nrtPS	Non-real-time Polling Service
NSP	Network Service Providers
NWG	Network Working Group
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OTA	Over-The-Air
OID	Object Identifier
PBR	Piggyback Request

PCC	Policy and Charging Control
PDU	Protocol Data Unit
PHS	Payload Header Suppression
PHSF	Payload Header Suppression Field
PHSI	Payload Header Suppression Index
PHSM	Payload Header Suppression Mask
PHSS	Payload Header Suppression Size
PHSV	Payload Header Suppression Valid
PHY	Physical Layer
PKM	Privacy Key Management
PKM	Key Management Protocol
PMD	Physical Medium Dependent
PMP	Point-to-multipoint
PS	Physical Slot
PSH	Packing Subheader
PTI	Payload Type Indicator
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
REQ	Request
RLAN	Radio Local Access Network
RNG	Ranging
ROHC	Robust Header Compression
RP	Reference Point
RRA	Radio Resource Allocation
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RS	Reed-Solomon
RSA	Rivest, Shamir, Adleman
RSP	Response
RSS	Receive Signal Strength
RSSI	Receive Signal Strength Indicator
RTG	Receive Transition Gap
rtPS	Real-time Polling Service
Rx	Receiver
SA	Security Association
SAID	Security Association Identifier
SAP	Service Access Point
SAR	Synthetic Aperture Radar
SC	Single Carrier
SDU	Service Data Unit
SF	Service Flow
SFID	Service Flow Identifier
SHA	Secure Hash Algorithm

SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	Signal-to-noise Ratio
SS	Subscriber Station
SSTG	Subscriber Station Transition Gap
STC	Space Time Coding
TC	Transmission Convergence Sublayer
TCM	Trellis Coded Modulation
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex or Duplexing
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TEK	Traffic Encryption Key
TFTP	Trivial File Transfer Protocol
TISPAN	Telecommunication and Internet Converged Services and Protocols for Advanced Networking
TTG	Transmit Transition Gap
Tx	Transmitter
UCD	Uplink Channel Descriptor
UDP	User Datagram Protocol
UGS	Unsolicited Grant Service
UL	Uplink
UNI	User-to-network Interface (or user-network interface)
USI	Universal Services Interface
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure
VCI	Virtual Channel Identifier
VLAN	Virtual Local Area Network
VPI	Virtual Path Identifier
WirelessMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WirelessHUMAN	Wireless High-speed Unlicensed Metropolitan Area Networks