

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Στέφος

Επιβλέπων: Φώτης Βαρτζιώτης

Άρτα, Ιούλιος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εκπόνηση μιας μελέτης ραδιοκάλυψης αστικής περιοχής με τη χρήση της ασύρματης τεχνολογίας WiMAX, καθώς ακόμη και την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την εύλογη λειτουργία του δικτύου, με τη χρήση δύο λογισμικών, το Radio Mobile και το OPNET Modeler. Ακόμη παρουσιάζεται η θεωρητική γνώση και η παρουσίαση των χαρακτηριστικών γύρω από την τεχνολογία WiMAX.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή σχετικά με την ασύρματη τεχνολογία WiMAX, καθώς και την ανάγκη που έδωσε την ώθηση στους ειδικούς, ώστε να αναπτύξουν και εξελίξουν το πρότυπο IEEE 802.16.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση της τεχνολογίας WiMAX, καθώς και μια σύντομη παρουσίαση της εξέλιξης του προτύπου IEEE 802.16. Αναλύεται ακόμη η υλοποίηση του φυσικού στρώματος και του επιπέδου MAC.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του WiMAX και τις τεχνικές παραμέτρους που χρησιμοποιεί η παραπάνω ασύρματη τεχνολογία. Ακόμη παρουσιάζονται οι τύποι υπηρεσίας που θα προσφέρονται στους χρήστες, καθώς επίσης και οι τεχνικές δυσκολίες που μπορούν να προκύψουν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται κυρίως η σύγκριση παρόμοιων τεχνολογιών με το WiMAX.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η προσομοίωση δικτύου με τη χρήση των λογισμικών OPNET Modeler και Radio Mobile σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, καθώς και η παρουσίαση αποτελεσμάτων σχετικά με τη βέλτιστη ραδιοκάλυψη.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια οικονομική ανάλυση με βάσει τιμές της αγοράς, τόσο για τον εξοπλισμό του δικτύου, όσο και για τους πελάτες του δικτύου.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα σχετικά με το αν η επένδυση στο ασύρματο δίκτυο είναι συμφέρουσα ή όχι.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

WiMAX, PHY, MAC, OFDM, OFDMA, QoS

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to conduct a radio coverage survey over an urban area with the use of wireless technology WiMAX and even the outcome of results concerning the right operation of the network with the use of two software, the Radio Mobile and the OPNET Modeler. Yet the theoretical knowledge and the presentation of characteristics concerning everything over WiMAX technology.

In the first chapter there is an introduction over the wireless technology wimax , and the impetus that was created from the need for such technology lead the experts to develop and evolve the standard IEEE 802.16.

In the second chapter there is an analysis of the WiMAX and a brief presentation of the evolution of the IEEE 802.16 standard .There is also a reference over the implementation of the physical and the MAC layers.

In the third chapter there is a description over the technical characteristics of the WiMAX and the technical parameters that are used from the above wireless technology. There is also a presentation of the different variations of service that are applied to the users, thus the technical difficulties that may occur.

In the fourth chapter there is a comparison over alike technologies with the WiMAX.

In the fifth chapter there is a simulation of a network with the use of the two software OPNET Modeler and Radio Mobile and as follows the presentation of the results concerning the optimized radio coverage.

In the sixth chapter a financial analysis on the basis of actual market prices concerning the equipment and the customers of the network.

In the seventh chapter there is a sum up concerning if the investment in the network was advantageous or not.

Key Words

WiMAX, PHY, MAC, OFDM, OFDMA, QoS

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε του ΤΕΙ Άρτας κ. Βαρτζιώτη Φώτη για τη βοήθεια και καθοδήγηση του για την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική και οικονομική υποστήριξη τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	2-3
Ευχαριστίες.....	4
Περιεχόμενα	5-6
Κεφάλαιο 1	
Εισαγωγή.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
2.1 WiMAX.....	8-9
2.2 ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΙΕΕΕ 802.16.....	9
2.2.1 ΙΕΕΕ 802.16-2001.....	10
2.2.2 ΙΕΕΕ 802.16a.....	10
2.2.3 ΙΕΕΕ 802.16-2004d(Fixed WiMAX).....	10
2.2.4 ΙΕΕΕ 802.16-2005e(Mobile WiMAX).....	11
2.3 Φυσικό στρώμα PHY.....	12-13
2.4 Επίπεδο MAC.....	13-14
2.4.1 Υπό- επίπεδο Ασφαλείας.....	14
2.4.2 Υπό- επίπεδο κοινού τμήματος MAC.....	14
2.4.3 Υπό- επίπεδο σύγκλισης εξαρτώμενο από την υπηρεσία.....	15
2.5 Ζώνες συχνοτήτων.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
3.1 OFDM.....	17
3.2 OFDMA.....	18-19
3.2.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ OFDMA.....	19-20
3.3 FDD-TDD.....	20
3.3.1 Η ΤΕΧΝΙΚΗ TDD.....	20-21
3.3.2 Η ΤΕΧΝΙΚΗ FDD.....	21
3.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ FDD-TDD.....	22
3.4 QUALITY OF SERVICE.....	23
3.4.1 ΤΥΠΟΙ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ.....	24-25
3.5 MIMO (Multiple Input Multiple Output).....	26-27
3.6 Υβριδική τεχνική αυτόματης επαναμετάδοσης (H-ARQ).....	27-28
3.7 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΥΚΟΛΙΕΣ.....	28-30
3.7.1 Απώλειες ελεύθερου χώρου.....	30-31
3.7.2 Απώλειες διάδοσης σε συστήματα διάδοσης μη- οπτικής και οπτικής επαφής.....	31-32
3.7.3 Σκίαση και απώλειες διαδρομής.....	32-33
3.7.4 Φαινόμενο Doppler.....	33
3.7.5 Πολυδιαδρομική παρεμβολή.....	33
3.7.6 Διασυμβολική παρεμβολή.....	33-34
3.7.7 Ομοιοδιαυλική παρεμβολή.....	34
3.8 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΟ WiMAX.....	34-35

3.8.1 Απειλές του επιπέδου MAC.....	35-36
3.8.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	36
3.8.3 Κρυπτογράφηση στο WiMAX.....	37
3.8.4 DES-3DES.....	38
3.8.5 AES.....	38
3.8.6 TLS.....	38-39
3.8.7 PKM.....	39
3.8.9 X.509 Πιστοποιητικά.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
4.1 Σύγκριση WiMAX με Wi-Fi.....	40-41
4.2 Σύγκριση WiMAX με 3G.....	41-42
4.3 Σύγκριση WiMAX με LTE.....	42
4.4 WiBro.....	42-43
4.5 WiMAX ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
5.1 ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ ΟΡNET MODELER.....	44-63
5.2 ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ RADIO MOBILE.....	64-79
5.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΟΡNET MODELER.....	80-86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 87	
6.1 ΚΟΣΤΟΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ.....	87-90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93-94
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	95-96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση του διαδικτύου από τους πολίτες και η ραγδαία ανάπτυξη του, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια δημιούργησε την ανάγκη για πρόσβαση σε αυτό από οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκεται ο χρήστης. Σε αυτή την ανάγκη η σταθερή ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση (Fixed Broadband Wireless Access - FBWA) έδωσε μια πάρα πολύ καλή και αξιόπιστη λύση έναντι της σταθερής ενσύρματης πρόσβασης DSL (Digital Subscriber Line). Στις ενσύρματες τεχνολογίες η αντικατάσταση των περιορισμένων σε απόδοση και ήδη εγκατεστημένων χάλκινων καλωδίων με οπτικές ίνες ώστε να επιτευχθούν αυξημένοι ρυθμοί μετάδοσης και απόδοσης, απαιτεί μεγάλο κόστος και χρόνο ιδιαίτερα στις αραιοκατοικημένες περιοχές όπου δεν υπάρχουν ενσύρματες υποδομές. Η λύση στα παραπάνω δόθηκε με την ασύρματη πρόσβαση η οποία επιτεύχθηκε αρχικά με το γνωστό σε όλους μας WI-FI το οποίο όμως δημιουργεί δυσχέρειες όσον αναφορά τη χρήση του λόγω του ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εξαρτάται από την απόσταση η οποία περιορίζεται στα 100 μέτρα, δημιουργώντας έτσι την ανάγκη για παροχή υπηρεσιών με μεγαλύτερη γεωγραφική κάλυψη, λύση η οποία δίνετε με το πρότυπο IEEE 802.16 (WiMAX) το οποίο φθάνει σε εμβέλεια τα 35 χιλιόμετρα και παραπάνω. ^[1]Ειδικότερα το WI-FI επέτρεψε την πρόσβαση στο internet σε πολύ μικρή εμβέλεια γύρω από τα σημεία πρόσβασης (hotspots), όπως ξενοδοχεία, αεροδρόμια, καφετέριες κ.α. Το WiMAX θα είναι σε θέση να κάνει το ίδιο σε εμβέλεια ολόκληρης πόλης, τα κτήρια της οποίας θα καλύπτουν με το σήμα τους οι εταιρίες παροχής internet.

^[2]Στην Ελλάδα άρχισε να λειτουργεί πιλοτικά το δίκτυο WiMAX του ΟΤΕ το Σεπτέμβριο του 2008 με δοκιμαστική εκπομπή στο Άγιο όρος και ακολούθησε το εργαστήριο Έρευνας και Ανάπτυξης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων PASIPHAΕ τον Οκτώβριο του 2008 με δοκιμαστική πιλοτική εκπομπή για ερευνητικές-εκπαιδευτικές δραστηριότητες, όπου οι περιοχές κάλυψης είναι όλο το Ηράκλειο Κρήτης.

¹ <https://el.wikipedia.org/wiki/WiMAX>

² <https://el.wikipedia.org/wiki/WiMAX>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ WiMAX

2.1 WiMAX

Η τεχνολογία WiMAX είναι σχετικά μια νέα τεχνολογία που αναπτύχθηκε ώστε να δώσει λύσεις σε προβλήματα από άποψη κόστους, χρόνου και απόδοσης. Θα χρησιμοποιήσουμε την παραπάνω τεχνολογία ώστε να προσομοιώσουμε την εγκατάσταση του δικτύου μας.

Το WiMAX είναι μια τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης όπου θα μπορεί να εξασφαλίζει επικοινωνία σε μια ολόκληρη πόλη ή σε πιο απομακρυσμένες περιοχές όπου η ενσύρματη δικτύωση είναι ασύμφορη από άποψη κόστους(λόγος ο οποίος έδωσε ώθηση για την ανάπτυξη της ασύρματης τεχνολογίας) και χρόνου και μάλιστα με αληθινές ευρυζωνικές ταχύτητες. Η αρχιτεκτονική του δικτύου WiMAX βασίζεται στο IP-πρωτόκολλο. Όλες οι υπηρεσίες(στρώματος ,μεταφοράς, διαχείρισης σύνδεσης, ασφάλειας και κινητικότητας) διεκπεραιώνονται μέσω πρωτοκόλλου IP. Το γεγονός αυτό διευκολύνει τη συνεργασία και τη σύγκλιση, με τεχνολογίες άλλων επικοινωνιακών δικτύων .^[3]

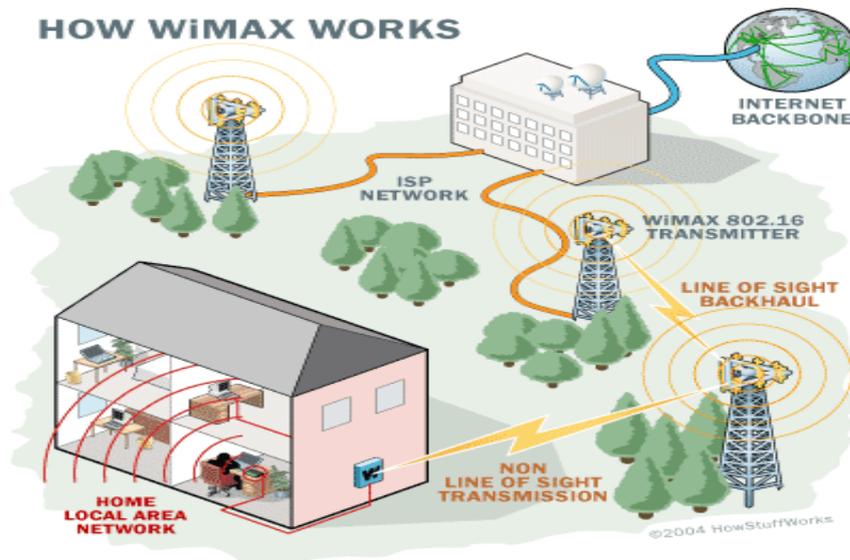
^[4]Μερικά από τα πλεονεκτήματα του WiMAX είναι τα παρακάτω:

- ❖ Ιδιωτικές εταιρίες θα έχουν την δυνατότητα να αναπτύξουν ανεξάρτητα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών και υπηρεσιών internet, με πολύ μεγάλη ευκολία, καθώς δεν απαιτείται η εγκατάσταση καλωδίων σε κάθε σημείο της χώρας, αυξάνοντας τον ανταγωνισμό.
- ❖ Ο συνδρομητής θα μπορεί να χρησιμοποιήσει τη σύνδεση του από οπουδήποτε, ακόμη και εν κινήσει μέσα στην πόλη ή και ολόκληρη την χώρα. Κάτι που δεν είναι εφικτό με τις σημερινές συνδέσεις ADSL, ούτε και με την τεχνολογία WI-FI, λόγω της περιορισμένης εμβέλειας.
- ❖ Ένα δίκτυο WiMAX που θα καλύπτει μια μεγαλούπολη μπορεί να εγκατασταθεί σε λίγες μέρες, σε αντίθεση με έναν αντίστοιχο ενσύρματο δίκτυο που θα χρειαζόταν πολλούς μήνες ή και χρόνια.
- ❖ Μετακομίζοντας σε άλλη περιοχή, ο συνδρομητής δεν θα χρειαστεί να κάνει ενεργοποίηση ευρυζωνικής σύνδεσης στο νέο του χώρο, όπως ισχύει για τις γραμμές ADSL. Αφού θα καλύπτεται από το ασύρματο σήμα του παρόχου υπηρεσιών WiMAX, μπορεί να αρχίσει άμεσα να χρησιμοποιεί τη σύνδεση του.

³ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

⁴ el.wikipedia.org/wiki/wimax

- ❖ Λόγω των υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων, το WiMAX θα επιτρέπει επίσης την πραγματοποίηση τηλεφωνικών κλήσεων ή και βίντεοκλήσεων.



[5]Εικόνα: Σταθμοί βάσης και σταθμοί συνδρομητών WiMAX.

2.2 ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΠΡΟΤΥΠΩΝ IEEE 802.16

Η οικογένεια προτύπων IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.16 αποτέλεσε μια επανάσταση στο χώρο των ασύρματων επικοινωνιών, η οποία πρωτοεμφανίστηκε το 1998 με σκοπό να εκδώσει πρότυπα ραδιοεπαφής(air-interface) για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα, όπου θα παρέχει υπηρεσίες σε σταθερούς και κινητούς χρήστες, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο φυσικό μέσο και στο υπό-επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC-Medium Access Control).

⁵www.HowStuffWorks.com

2.2.1 IEEE 802.16-2001

Το πρότυπο IEEE 802.16-2001 εκδόθηκε τον Απρίλιο του 2002. Αφορούσε ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα τα οποία εξυπηρετούσαν ζεύξεις σημείου προς πολλαπλά σημεία (Point-to-Multipoint) με οπτική επαφή πομπού-δέκτη (LOS) και σε συχνότητες 10-66GHz. Χρησιμοποιεί απλή διαμόρφωση, μονής φέρουσας (όχι δηλαδή OFDM), αφού προορίζεται για μετάδοση σε συνθήκες (LOS-Line of Sight). Επίσης προβλέπει διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, ανάλογα με την συχνότητα, τις συνθήκες διάδοσης, τη μέγιστη επιθυμητή απόσταση κάλυψης.^[6]

2.2.2 IEEE 802.16a

Τον Ιανουάριο παρουσιάστηκε το πρότυπο IEEE 802.16a το οποίο εκπέμπει σε συχνότητες 2-11GHz και συνθήκες χωρίς οπτική επαφή(NLOS-Non Line of Sight) και συνεπώς σε περιβάλλον με ισχυρές απώλειες λόγω πολυδιαδρομικής παρεμβολής. Χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία OFDM για να αντιμετωπιστούν τα έντονα φαινόμενα πολύ-διαδρομικής διάδοσης που εμφανίζονται σε τέτοιες περιπτώσεις.^[7]

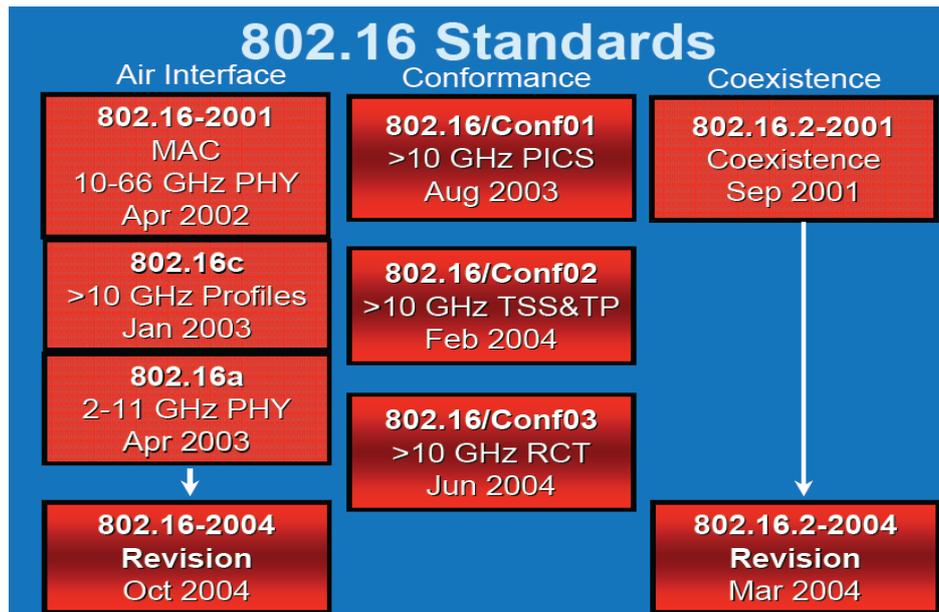
2.2.3 IEEE 802.16-2004d(Fixed WiMAX)

Το πρωτόκολλο IEEE 802.16-2004 ήρθε να αντικαταστήσει τα πρωτόκολλα 802.16-2001,802.16c-2002,802.16a-2003. Ονομάζεται και (Fixed WiMAX) για το λόγο ότι αναφέρετε σε σταθερούς χρήστες. Παρουσιάστηκε το 2004 και λειτουργήσε σε συχνότητες 2-11GHz, με συνθήκες διάδοσης NLOS. Έχει 3 βασικούς μεθόδους μετάδοσης 1)Μονής φέρουσας 2)256-OFDM 3)2048-OFDM. Η επιλογή γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και της λειτουργίας του συστήματος. Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης μπορεί να είναι 1-75 Mbps. Ακόμη η μέθοδος αμφιδρόμησης είναι TDD ή FDD και η μέθοδος πολυπλεξίας είναι Burst TDM ή TDMA ή OFDMA.^[8]

⁶ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

⁷ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

⁸ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008



Εικόνα: Η εξέλιξη των προτύπων μέχρι το 2004

2.2.4 IEEE 802.16-2005e(Mobile WiMAX)

Τον Οκτώβριο του 2005 ήρθε η αναβάθμιση των υπηρεσιών του WiMAX ώστε να ανταγωνιστή τα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G). Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την παροχή υπηρεσιών κινητικότητας, ώστε να μπορούν οι χρήστες να λαμβάνουν δεδομένα και ενώ βρίσκονται εν κινήσει. Οι συχνότητες που εκπέμπει για κινητούς χρήστες(mobile) είναι από 2-6GHz και για σταθερούς χρήστες(fixed) από 2-11GHz. Επιπλέον στο στρώμα PHY έχει προστεθεί μια ακόμη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης και στο επίπεδο MAC έχουν γίνει αλλαγές για την υποστήριξη της κινητικότητας των δεκτών εντός του δικτύου αλλά και μεταξύ διαφορετικών δικτύων. Υποστηρίζει κινητικότητα χρηστών με ταχύτητες 125Km/h, ενώ ταυτόχρονα έχουμε περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας στο φορητό εξοπλισμό. Επίσης υποστηρίζει μέθοδο μετάδοσης (μονής φέρουσας, 256-OFDM, 128/512/1024/2048-OFDM) και για την μέθοδο πολυπλεξίας OFDMA προβλέπεται η τεχνολογία MIMO(Multiple-Input-Multiple-Output), δηλαδή την χρήση μέχρι και 4 κεραίες εκπομπής και λήψης αντίστοιχα. Ακόμη για θέματα ασφάλειας και σωστής μετάδοσης χρησιμοποιούνται τεχνικές κρυπτογράφησης δεδομένων για την διασφάλιση του απορρήτου επικοινωνιών, ενώ για την μείωση του ρυθμού σφαλμάτων χρησιμοποιεί κώδικες LDPC(Low Density Parity Codes).^[9]

⁹ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

2.3 Φυσικό στρώμα PHY^[10]

Το φυσικό στρώμα που υιοθετήθηκε από το πρότυπο IEEE 802.16 χωρίζεται σε 4 κατηγορίες που διαφοροποιούνται ανάλογα με την ζώνη συχνοτήτων. Παρακάτω θα αναλύσουμε τις 4 διαφορετικές υλοποιήσεις του φυσικού στρώματος:

- ❖ **WirelessMAN SC:** Είναι το φυσικό στρώμα που χρησιμοποίησε το πρότυπο IEEE 802.16-2001 και περιελάμβανε τεχνολογία μονής φέρουσας στη ζώνη συχνοτήτων 10-66GHz με ύπαρξη οπτικής επαφής (LOS). Η μέθοδος αμφιδρόμησης είναι είτε TDD ή FDD. Επίσης οι μέθοδοι διαμόρφωσης είναι QPSK,16-QAM και προαιρετικά 64-QAM.
- ❖ **WirelessMAN SCa:** Η συγκεκριμένη υλοποίηση είναι παρόμοια με την Wireless MAN SC και υιοθετήθηκε από το πρότυπο 802.16a-2003. Χρησιμοποιεί και αυτή διαμόρφωση μονής φέρουσας συχνότητας και υποστηρίζει αμφιδρόμηση μέσω FDD και TDD. Το εύρος που είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί είναι 2-11GHz, χωρίς οπτική επαφή (NLOS). Ακόμη υποστηρίζει την μέθοδο BPSK ή και προαιρετικά 256-QAM.
- ❖ **WirelessMAN OFDM:** Εδώ η υλοποίηση υιοθετήθηκε από συστήματα σταθερής πρόσβασης WiMAX (Fixed) και αναφέρεται σε συχνότητες 2-11GHz. Έχει πολύ καλή κάλυψη τόσο σε εσωτερικούς χώρους όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Χρησιμοποιεί τεχνολογία OFDM με 256 φέροντα για τη μετάδοση υψηλού ρυθμού δεδομένων αλλά και για την αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων. Χρησιμοποιεί διαμορφώσεις BPSK,QPSK,16-QAM και προαιρετική 64-QAM. Ακόμη η αμφιδρόμηση υλοποιείται μέσω TDD και FDD, ενώ σε ζώνες μη αδειοδότησης χρησιμοποιεί μόνο TDD.
- ❖ **WirelessMAN OFDMA:** Είναι η υλοποίηση που χρησιμοποιήθηκε από το πρότυπο IEEE 802.16-2005, όπου απευθύνετε σε συστήματα πρόσβασης από κινητούς χρήστες (WiMAX mobile). Τα χαρακτηριστικά του είναι συχνότητες από 2-11GHz σε συνθήκες NLOS , χρησιμοποιεί τεχνολογία OFDMA 2048 φέροντα. Η αμφιδρόμηση υλοποιείται μέσω TDD και FDD, ενώ σε ζώνες μη αδειοδότησης χρησιμοποιεί μόνο TDD και η διαμόρφωση μπορεί να μεταβάλλεται από QPSK σε 16-QAM ή

¹⁰ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

64-QAM. Τέλος υποστηρίζει τεχνικές διαφορικής εκπομπής με κωδικοποίηση Alamouti, τεχνικές MIMO και H-ARQ.^[11]

2.4 ΕΠΙΠΕΔΟ MAC

Το MAC(Media Access Controller) επίπεδο είναι υπεύθυνο για την διασύνδεση του στρώματος PHY με τα ανώτερα επίπεδα του δικτύου. Έπειτα τα ανώτερα στρώματα στέλνουν προς το επίπεδο MAC πακέτα δεδομένων που ονομάζονται μονάδες δεδομένων υπηρεσιών MAC(MAC Service Data Units-MSDUs) και με βάση αυτές σχηματίζει πακέτα τα οποία ονομάζονται μονάδες δεδομένων πρωτοκόλλου MAC(MAC Protocol Data Units- MPDUs), τα οποία προωθούνται στο στρώμα PHY. Το επίπεδο MAC είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να προσαρμόζετε σε σχέση με μελλοντικά πρωτόκολλα ως αναφορά την δομή, το μέγεθος των πακέτων MPDU, ώστε να επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης. Με λίγα λόγια είναι υπεύθυνο για την διαχείριση του μέσου επικοινωνίας, δηλαδή το κανάλι.

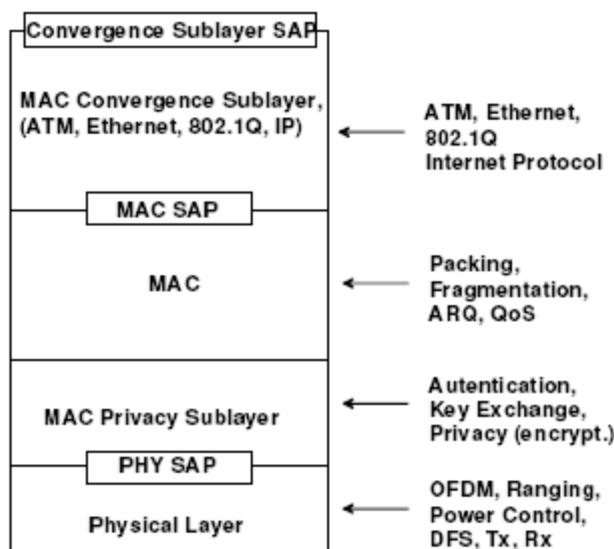
Παρακάτω έχουμε μερικές από τις σημαντικότερες λειτουργίες του επιπέδου MAC:

- Συνένωση των SDUs που λαμβάνονται από υψηλότερα επίπεδα, σε MPDUs
- Επιλογή του κατάλληλου επιπέδου ισχύος και προφίλ εκπομπής για τη μετάδοση των MPDUs
- Δυνατότητα επανεκπομπής των πλαισίων μέσω ARQ.
- Έλεγχος προτεραιότητας και QoS για MPDUs που προέρχονται από διαφορετικές πηγές
- Χρονοπρογραμματισμός μετάδοσης MPDUs μέσω του στρώματος PHY
- Υποστήριξη διαδικασιών κινητικότητας
- Υποστήριξη διαδικασιών ασφάλειας και ελέγχου κλειδιών

Κάθε πλαίσιο του επιπέδου MAC εμπεριέχει μια γενική επικεφαλίδα όπου υποδηλώνει πληροφορίες σχετικά με το πλαίσιο, δηλαδή περιέχει πληροφορίες όπως το μήκος του πλαισίου, σχετικά με την κρυπτογράφηση του πακέτου, το κλειδί κρυπτογράφησης, το αναγνωριστικό σύνδεσης και γενικά πληροφορίες σχετικά με την διαχείριση του δικτύου.

¹¹ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

Το επίπεδο MAC του WiMAX χαρακτηρίζεται από την ποιότητα υπηρεσίας(QoS).^[12]



Εικόνα : Διαστρωμάτωση επιπέδου MAC

2.4.1 Υπό- Επίπεδο Ασφαλείας

Το υπό- επίπεδο ασφαλείας είναι υπεύθυνο για την ασφάλεια των χρηστών σε ότι έχει να κάνει με την υποκλοπή δεδομένων μέσω των ραδιοδιαύλων. Η ασφάλεια των δεδομένων εξασφαλίζεται μέσω αλγορίθμων κωδικοποίησης. Χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές πιστοποίησης χρήστη όπως τη χρήση κρυπτογράφησης, κωδικούς ασφαλείας, ψηφιακά πιστοποιητικά, έξυπνες κάρτες.^[13]

2.4.2 Υπό- Επίπεδο κοινού τμήματος MAC

Το υπό- επίπεδο κοινού τμήματος MAC είναι υπεύθυνο για την εγκατάσταση, συντήρηση, τερματισμό των συνδέσεων. Κάθε σύνδεση χαρακτηρίζεται από ένα αναγνωριστικό σύνδεσης(Connection Identifier-CID), μήκους 16 bits. Οι παράμετροι QoS περιγράφουν την σύνδεση ώστε να είναι πιο διαχειρίσιμη από το επίπεδο MAC.^[14]

¹² ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

¹³ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

¹⁴ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

2.4.3 Υπό- Επίπεδο σύγκλισης εξαρτώμενο από την υπηρεσία

Το συγκεκριμένο υπό- επίπεδο είναι υπεύθυνο για την σύνδεση του κοινού τμήματος MAC με τα πρωτόκολλα υψηλότερων επιπέδων, μέσω των σημείων πρόσβασης υπηρεσιών (Service Access Points - SAP) του υπό-επιπέδου σύγκλισης. Τα πρότυπα IEEE 802.16 υποστηρίζουν 2 είδη πρωτοκόλλων, το ένα είναι το πρωτόκολλο ATM και το άλλο πρωτόκολλα που έχουν σχέση με την μετάδοση πακέτων όπως το πρωτόκολλο IP.^[15]

2.5 Ζώνες συχνότητων

Ένα δίκτυο WiMAX με βάσει το πρότυπο 802.16-2005 εκπέμπει σε συχνότητες από 2-11GHz σε σταθερούς χρήστες και 2-6GHz για κινητούς χρήστες. Η αδειοδοτημένη ζώνη συχνότητων που πρότείνει το WiMAX Forum εμπίπτει στις περιοχές των 2.3GHz, 2.5GHz, 3.5GHz, ενώ δίνει και την περιοχή 5.8 GHz για μη αδειοδοτημένη χρήση.

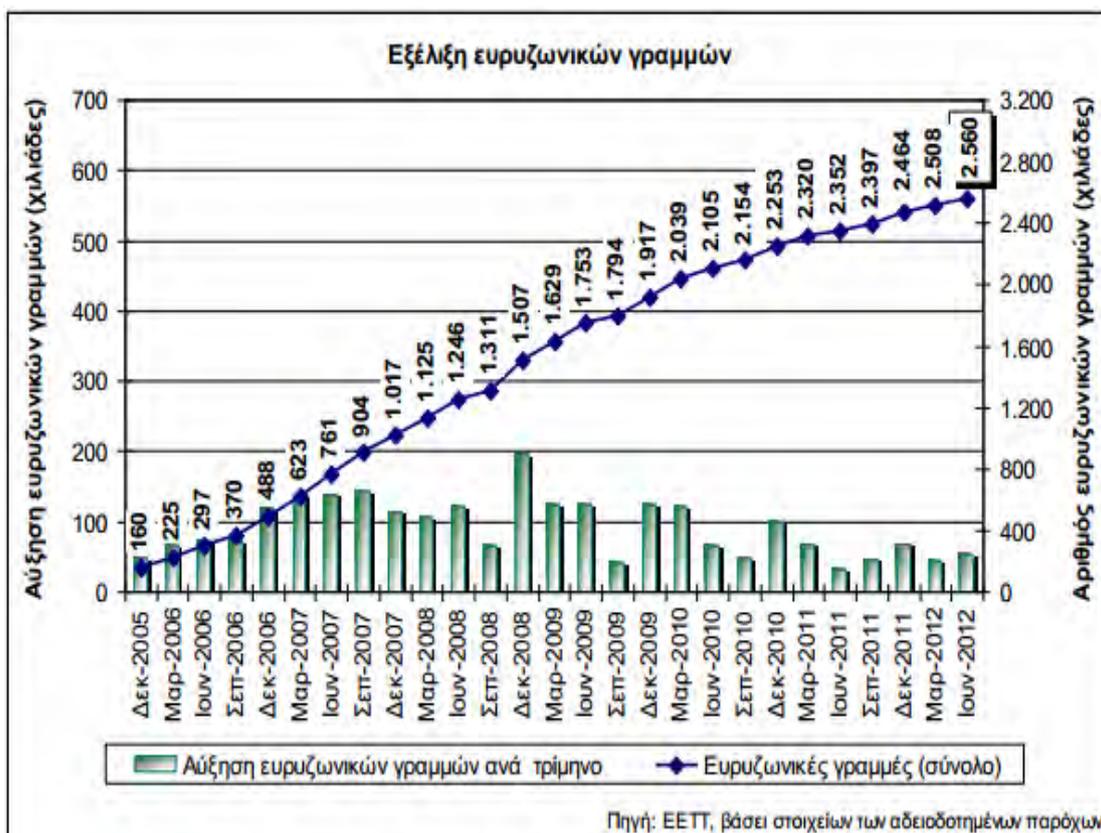
Όταν μιλάμε για εφαρμογές ευρείας κάλυψης τότε η καλύτερη λύση είναι η αδειοδοτημένη ζώνη συχνότητων, καθώς αποκλείει τυχόν παρεμβολές από άλλους παρόχους. Ακόμη οι συχνότητες οι οποίες λειτουργούν στην αδειοδοτημένη ζώνη συχνότητων ευνοούν την NLOS επικοινωνία, καθώς και εφαρμογές ευρείας κάλυψης point-to-multipoint. Βέβαια υπάρχουν και τα μειονεκτήματα όπως παραδείγματος χάριν είναι οι υψηλές δαπάνες και η χρονοβόρα διαδικασία χορήγησης της άδειας η οποία βέβαια ποικίλει ανάλογα την χώρα.

Από την άλλη η μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνότητων ενδείκνυται για παρόχους που προτιμάνε χαμηλότερο κόστος δαπανών. Όπως αναφέραμε και παραπάνω υπάρχει κάποια αναλογία μεταξύ κόστους και του λόγου σήματος προς θόρυβο S/N λόγω γειτονικών παρεμβολών. Η μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνότητων προτιμάται σε πιο αραιοκατοικημένες περιοχές με τη κατάλληλη μελέτη και εξειδικευμένες χρήσεις κεραιών, για εφαρμογές point-to-point μεγάλων αποστάσεων, για λύσεις point-to-multipoint σε αγροτικές περιοχές και αναπτυσσόμενες χώρες.

Τελικώς η λύση ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες της αγοράς και εμπίπτει όπως είπαμε στην αναλογία κόστους και τη ποιότητα του σήματος. Στην Ελλάδα οι άδειες ανήκουν κυρίως στον ΟΤΕ, όπου έχει δημιουργήσει 3 πιλοτικά δίκτυα (Άγιο όρος, Αθήνα, Θεσσαλονίκη) και ανήκουν στην ζώνη συχνότητων των 3.5GHz.^[16]

¹⁵ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

¹⁶ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008



Εικόνα: Εξέλιξη των ευρυζωνικών συνδέσεων στη Ελλάδα[17]

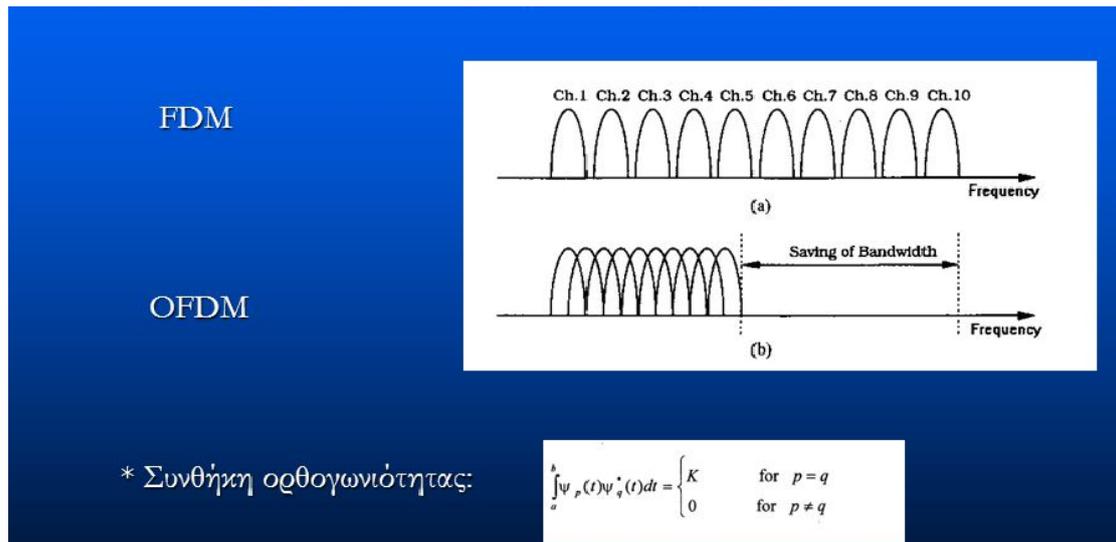
¹⁷ EETT, Βάσει στοιχείων αδειοδοτημένων παρόχων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ WiMAX

3.1 OFDM

Η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing- OFDM) είναι η τεχνική διαμόρφωσης που βασίζεται η τεχνολογία WiMAX. Είναι μια τεχνική διαμόρφωσης πολλαπλών φερουσών, όπου το προς μετάδοση σήμα διαιρείται σε ένα μεγάλο αριθμό παράλληλων σημάτων στενής ζώνης. Δηλαδή έχουμε μία ροή δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης το οποίο χωρίζεται σε παράλληλες ροές δεδομένων με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την διαμόρφωση αυτών σε διαφορετικά φέροντα σήματα. Γενικά στις παράλληλες τεχνικές μετάδοσης τα προς μετάδοση ψηφιακά δεδομένα διοχετεύονται παράλληλα στα υποκανάλια όπου αντιστοιχούν σε κάποιο φορέα, με λίγα λόγια έχουμε ισοδύναμα συστήματα τα οποία μεταδίδουν ταυτόχρονα σήματα με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης, ώστε ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης να παραμένει σταθερός και να έχουμε επίπεδη εξασθένηση. Λόγω της διαμόρφωσης στα συστήματα υψηλών ρυθμών μετάδοσης επιτυγχάνεται η αντιμετώπιση στην διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference-ISI), όπου όταν η χρονική απόκριση του διαύλου είναι μεγαλύτερη της διάρκειας των συμβόλων του σήματος ή ισοδύναμα η απόκριση συχνότητας αυτού παρουσιάζει παραμορφώσεις εντός της χρήσιμης ζώνης του σήματος. Γενικά η τεχνική OFDM έναντι της απλής FDM επιτυγχάνει λιγότερη φασματική αλλοίωση και αυτό συμβαίνει όταν τα υποκανάλια είναι μεταξύ τους ορθογώνια και αλληλοκαλυπτόμενα. Τα OFDM σήματα υλοποιούνται με τη χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (DFT) ή με τον Ταχύ Μετασχηματισμό Fourier (FFT). Η OFDM διαμόρφωση έχει πλεονεκτήματα όπως την αντιμετώπιση του φαινομένου της πολυόδευσης, διαχειρίζεται καλύτερα το εύρος ζώνης, μεγαλύτερη αντοχή του συστήματος, καθώς επίσης επιτυγχάνει και μειωμένη διασυμβολική παρεμβολή (ISI).^[18]

¹⁸ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008



Εικόνα: Τεχνική διαμόρφωσης OFDM

3.2 OFDMA

Στο WiMAX το OFDM χρησιμοποιείται ως διαμόρφωση αλλά και ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA. Στην περίπτωση αυτή οι χρήστες μοιράζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και σε διαφορετικά φέροντα του OFDM, έτσι οι υποφέρουσες κατανέμονται δυναμικά στους χρήστες (ιδιότητα της FDMA) σε διάφορες χρονικές στιγμές (ιδιότητα της TDMA). Στην ουσία συνδυάζει τις τεχνικές FDMA και TDMA. Τα φέροντα που χρησιμοποιούν οι χρήστες είναι μεταξύ τους ορθογώνια και το κάθε φέρον αντιστοιχεί σε μια έξοδο και σε μια είσοδο IFFT/FFT. Σημαντικό πλεονέκτημα της OFDMA είναι η ανθεκτικότητα σε φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης, πράγμα που εξασφαλίζεται από την διαμόρφωση OFDM. Η απόδοση της OFDMA βασίζεται σε 2 παράγοντες, ένας είναι η προσαρμοστική διαμόρφωση (AMC) και ο δεύτερος είναι η διαφορικότητα πολλαπλών χρηστών. Η προσαρμοστική διαμόρφωση (AMC) έχει να κάνει με την αξιοποίηση των μέσων ώστε να επιτυγχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης, ενώ η διαφορικότητα πολλαπλών χρηστών αφορά τον προγραμματισμό των χρηστών ώστε να αυξάνεται η απόδοση του συστήματος. Έτσι ο συνδυασμός κωδικοποίησης και διαμόρφωσης αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση της

χωρητικότητα, πλησιάζοντας έτσι γραφικά την καμπύλη κατά Shannon.^[19]

3.2.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ OFDMA^[20]

Το φυσικό επίπεδο του WiMAX κατανέμει τους πόρους συχνότητας και χρόνου στους χρήστες. Η κατανομή των πόρων γίνεται από τον αλγόριθμο προγραμματισμού (scheduling algorithm), ο οποίος καθορίζει τα φέροντα που θα αποδοθούν στον κάθε χρήστη καθώς και την ισχύ με την οποία ο κάθε χρήστης θα εκπέμπει στο φέρον. Το πεδίο δεδομένων του κάθε χρήστη χωρίζεται από τα λεγόμενα slots_(σχισμές), δηλαδή ένα slot είναι ένα υπό-κανάλι OFDMA με ένα ή περισσότερα σύμβολα OFDM.

Μερικοί από τους ευρύτερα γνωστούς αλγόριθμους προγραμματισμού είναι :

- **Μεγίστου Συνολικού Ρυθμού (Maximum Sum Rate- MSR):**
Ο αλγόριθμος αυτός στοχεύει στη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό στη συνολικά εκπεμπόμενη ισχύ.^[21]
- **Μέγιστης Αμεροληψίας (Maximum Fairness-MF)**
Ο αλγόριθμος αυτός στοχεύει στην όσο το δυνατόν πιο «δίκαια» κατανομή των ράδιο-πόρων μεταξύ των χρηστών.^[22]
- **Περιορισμών στον κατ'αναλογία ρυθμό (Proportional Rate Constraints-PRC)**
Ο αλγόριθμος RPC είναι μια γενίκευση του αλγόριθμου MF και αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, με την προϋπόθεση όμως ότι ο τελικός ρυθμός μετάδοσης του κάθε χρήστη θα πρέπει να είναι ανάλογος κάποιας προκαθορισμένης σταθερής τιμής. Έτσι, προκαθορίζονται κάποιοι «συντελεστές σπουδαιότητας» των χρηστών, ανάλογα με τις απαιτήσεις των υπηρεσιών του καθενός. Ο αλγόριθμος υλοποιείται με προσεγγιστικές λύσεις, για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του δικτύου.^{[23][24]}

¹⁹ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

²⁰ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

²¹ Zhang, Y., J. and Letaif, K. B., "Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems", IEEE Transactions on Wireless Communications, 3(4):1516, September 2004.

²² Rhee, W., and Cioffi, J., M., "Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation", In Proc. Of IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1085-1089, Tokyo, May 2000.

²³ Z. Shen, J. G. Andrews, and B. Evans, "Optimal power allocation for multiuser OFDM", In Proc. Of IEEE Globecom, pp.337-341, San Francisco, December 2003.

- **Αναλογικής Αμεροληψίας (Proportional Fairness-PF):**
Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος στοχεύει στην κατανομή των ραδιο-
πόρων με τρόπο που να εξασφαλίζει τη βελτιστοποίηση της μέσης
διεκπεραίωσης του δικτύου.^{[25][26]}

3.3 FDD-TDD

Σε όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα , έτσι και στο WiMAX έχουμε αμφίδρομη μετάδοση πληροφορίας από πομπούς και δέκτες. Η μετάδοση της πληροφορίας χωρίζεται σε κατερχόμενη ροή-downlink και σε ανερχόμενη ροή-uplink. Για την ρύθμιση της μετάδοσης της πληροφορίας χρησιμοποιούνται δύο είδη τεχνικών αμφίδρομης εκπομπής, η (Frequency Division Duplex-FDD) τεχνική διαχωρισμού στη συχνότητα και η (Time Division Duplex-TDD) τεχνική διαχωρισμού στο χρόνο.

3.3.1 Η ΤΕΧΝΙΚΗ TDD

Η τεχνική TDD χρησιμοποιεί έναν μόνο δίαυλο, τον οποίο διαμοιράζει στο πεδίο του χρόνου, χρησιμοποιώντας κάποιες χρονοσχισμές για τις κατευθύνσεις μετάδοσης. Κατά την εναλλαγή των ρόλων των σταθμών βάσης και των σταθμών συνδρομητών (από πομπό σε δέκτη και αντίστροφα) για την αποφυγή τυχόν συγκρούσεων δεδομένων διαφορετικών κατευθύνσεων, χρησιμοποιείται ένας χρονικός διαχωρισμός ασφαλείας η Transmit Transition Gap (TTG). Έτσι με τη χρήση του διαχωρισμού ασφαλείας υπάρχει ένα κενό όπου πομπός και δέκτης δεν εκπέμπουν δεδομένα, εξασφαλίζοντας έτσι να μην συμπίπτουν τα δεδομένα. Κατά τη διάρκεια του TTG οι κεραιές του σταθμού βάσης και των σταθμών συνδρομητών σταματάνε να εκπέμπουν δεδομένα, ώστε να γίνει η ανταλλαγή των ρόλων μεταξύ των κεραιών(από πομπός σε δέκτης και το αντίστροφο).

Το χάσμα έχει διάρκεια ακέραιο πολλαπλάσιο της διάρκειας των χρονοσχισμών, και αρχίζει στην έναρξη μίας χρονοσχισμής. Κατά

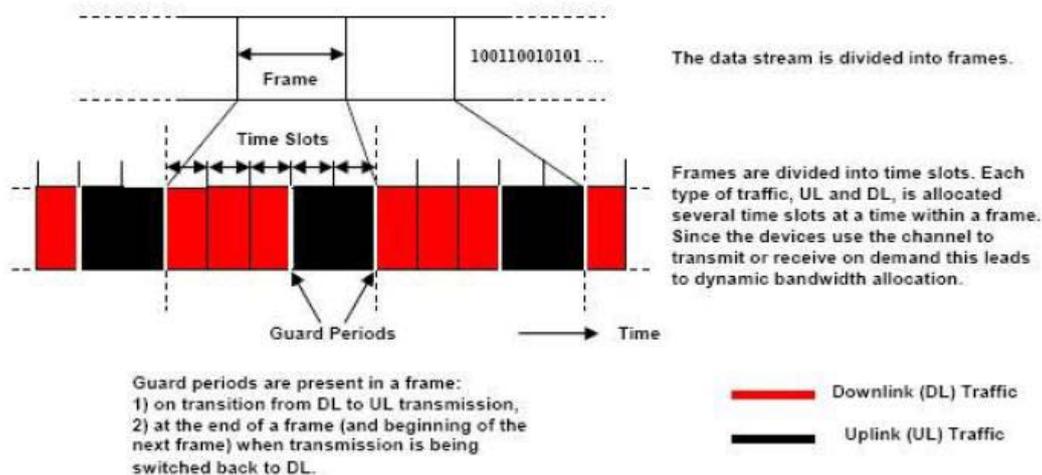
²⁴ I. Wong, Z. Shen, B. Evans, and J. Andrews, "A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems", In Proc. Of IEEE Signal Processing Workshop, pp.1-6, Austin, TX, October 2004.

²⁵ D. Tse. Multiuser diversity in wireless networks. In Stanford Wireless Communications Seminar, www.stanford.edu/group/wcs/. April 2001

²⁶ P. Viswanath, D. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas", IEEE Transactions on Information Theory, 48(6):1277-1294, June 2002.

αντιστοιχία, υπάρχει το RTG (Receive Transition Gap) που είναι το κενό μεταξύ της uplink και της downlink ριπής που ακολουθεί. ^[27]

Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η τεχνική TDD:



Εικόνα : Η τεχνική TDD

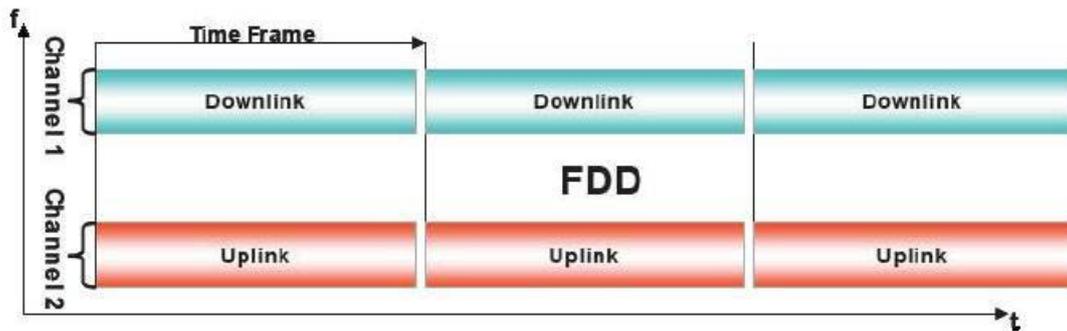
3.3.2 Η ΤΕΧΝΙΚΗ FDD

Η τεχνική FDD χρησιμοποιεί δύο κανάλια σε διαφορετικές συχνότητες, ένα για uplink και ένα για downlink. Οι σταθμοί βάσης μεταδίδουν στην downlink συχνότητα φέροντος ενώ οι συνδρομητικοί σταθμοί μεταδίδουν στην uplink συχνότητα φέροντος. Τώρα για την αποφυγή τυχόν παρεμβολών μεταξύ των δύο ροών της υπό-ζώνης, δηλαδή της κατερχόμενης και της ανερχόμενης ροής παρεμβάλετε ένα συχνοτικό διάστημα φύλαξης της τάξης των 50-100MHz. ^[28]

Η τεχνική FDD φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:

²⁷ Τερζάκης Ιωάννης, Δημήτριος Τσαπάρας, Διπλωματική Εργασία. <<Σχεδίαση ασύρματων δικτύων WiMAX για πρόσβαση και διασύνδεση. Μελέτη ποιότητας (Qos) και ανάλυση υποστηριζόμενων υπηρεσιών δικτύου>>, Απρίλιος 2007

²⁸ Τερζάκης Ιωάννης, Δημήτριος Τσαπάρας, Διπλωματική Εργασία. <<Σχεδίαση ασύρματων δικτύων WiMAX για πρόσβαση και διασύνδεση. Μελέτη ποιότητας (Qos) και ανάλυση υποστηριζόμενων υπηρεσιών δικτύου>>, Απρίλιος 2007



Εικόνα : Η τεχνική FDD

3.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ FDD-TDD

Οι τεχνικές αμφιδρόμησης TDD και FDD είναι δύο τεχνικές οι οποίες αν μη τι άλλο διαφέρουν ως προς την τεχνική και η κάθε μια θα μπορούσαμε να πούμε ότι εξυπηρετεί το δικό της σκοπό. Από φασματικής άποψης η τεχνική TDD είναι πιο αποδοτική, καθώς χρησιμοποιεί το μισό φάσμα για εκπομπή και λήψη από τη τεχνική FDD. Από την άλλη η FDD προσφέρει αποδοτικότερη χρήση του εύρους ζώνης και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών λόγω των δύο καναλιών, ένα για downlink και ένα για uplink, συνυπολογίζοντας πάντα και το κόστος που απαιτεί, λόγω του περισσότερου υλικού(hardware) που χρησιμοποιεί. Επομένως όταν έχουμε να κάνουμε με εφαρμογές για μετάδοσης φωνής όπου η επικοινωνία είναι αμφίδρομη και η μετάδοση της πληροφορίας γίνεται τόσο στο downlink όσο και στο uplink κανάλι, τότε προτείνεται η FDD τεχνική, λόγω της αποδοτικότερης αξιοποίησης του μέσου, ενώ όταν αναφερόμαστε σε μετάδοση όπου η μετάδοση της πληροφορίας γίνεται περισσότερο ως προς τη λήψη, όπως σε εφαρμογές π.χ(internet, video, audio streaming) όπου καταλαβαίνουμε ότι το downlink είναι αυξημένο, τότε η τεχνική που ενδείκνυται είναι η TDD καθώς η δυνατότητα που έχουμε ως προς την ευελιξία του ποσοστού των χρονοσχισμών που θα μεταδίδει ο διάυλος προς κάθε κατεύθυνση π.χ(70%-30%, 50%-50% κλπ) δεν δίδει την δυνατότητα σπατάλης εύρους ζώνης, όπως θα συνέβαινε στην FDD. Άρα για ένα δίκτυο WiMAX όπου η κύρια χρήση από τους χρήστες είναι εφαρμογές φωνής τότε ενδείκνυται η τεχνική FDD, ενώ για εφαρμογές που το downlink είναι αυξημένο ενδεδειγμένη λύση είναι η τεχνική TDD. ^[29]

²⁹ Τερζάκης Ιωάννης, Δημήτριος Τσαπάρας, Διπλωματική Εργασία. <<Σχεδίαση ασύρματων δικτύων WiMAX για πρόσβαση και διασύνδεση. Μελέτη ποιότητας (Qos) και ανάλυση υποστηριζόμενων υπηρεσιών δικτύου>>, Απρίλιος 2007

3.4 QUALITY OF SERVICE

Με τον όρο Qos αναφερόμαστε σε ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν το είδος και τις απαιτήσεις μιας υπηρεσίας. Στο WiMAX υπάρχει η έννοια της ροής υπηρεσίας (Service Flow) που αντιπροσωπεύει μια ροή πακέτων με κοινά χαρακτηριστικά Qos στο οποίο αποδίδεται ένα αναγνωριστικό ροής υπηρεσίας (Service Flow Identifier - SFID). Σε ένα ευρυζωνικό δίκτυο οι απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής και του κάθε χρήστη ποικίλουν, άρα θα πρέπει να υπάρχουν πολλά επίπεδα υπηρεσιών.

Οι παράμετροι που καθορίζουν το είδος και τις απαιτήσεις μιας υπηρεσίας αναλύονται παρακάτω:

- **Προτεραιότητα κίνησης (Traffic Priority):** Η παράμετρος αυτή δίνει προτεραιότητα σε μια υπηρεσία έναντι κάποιας άλλης, όταν υπάρχει σύγκρουση απαιτήσεων μεταξύ των υπηρεσιών.
- **Μέγιστος διατηρούμενος ρυθμός μετάδοσης (Maximum sustained traffic rate):** Υποδηλώνει τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης της υπηρεσίας σε bits/sec.
- **Μέγιστο μέγεθος ριπής (Maximum traffic burst):** Είναι το μέγιστο μέγεθος ριπής δεδομένων για τη δεδομένη υπηρεσία.
- **Μέγιστη διάρκεια λανθάνουσας κατάστασης (Maximum Latency):** Δηλώνει το μέγιστο χρόνο σε msec από τη στιγμή που θα φθάσει ένα πακέτο στη διεπαφή του δικτύου μέχρι και την αποστολή του στη ραδιοεπαφή.
- **Ανεκτή μεταβλητότητα (Tolerated Jitter):** Είναι η μέγιστη καθυστέρηση σε msec που μπορεί υποστηρίξει μια σύνδεση.
- **Είδος χρονοπρογραμματισμού ροής υπηρεσίας (Service flow scheduling type):** Είναι ένα προφίλ από παραμέτρους Qos, όπου υποστηρίζει πέντε υπηρεσίες για τη μετάδοση δεδομένων σε μία σύνδεση. Οι υπηρεσίες θα αναλυθούν αναλυτικότερα παρακάτω.
- **Παραμέτρους Qos που μπορεί να καθορίσει ο πάροχος.**
- **Ελάχιστος δεσμευμένος ρυθμός μετάδοσης (Minimum reserved traffic rate):** Δηλώνει τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης σε bps (bits per second) που έχει ανατεθεί για μετάδοση της εν λόγω υπηρεσίας.^[30]

³⁰ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ. (ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ). 2008

3.4.1 ΤΥΠΟΙ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Στο πρότυπο 802.16 στο επίπεδο MAC υποστηρίζονται πέντε τύποι υπηρεσιών για τη μετάδοση δεδομένων μιας σύνδεσης μεταξύ σταθμού βάσης και σταθμού συνδρομητή που υποστηρίζονται από τον αλγόριθμο προγραμματισμού του MAC layer. Οι τύποι αυτοί είναι οι:

- **Unsolicited Grant Services (UGS):** Ο συγκεκριμένος τύπος υπηρεσίας υποστηρίζει υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπου ανά τακτά χρονικά διαστήματα μεταδίδονται πακέτα δεδομένων σταθερού μήκους. Αναφέρεται σε υπηρεσίες σταθερού ρυθμού μετάδοσης (Constant Bit Rate-CBR), που απαιτούν αυστηρό χρονοπρογραμματισμό και εγγύηση για τη ρυθμοαπόδοση(throughput), την καθυστέρηση και τη μεταβλητότητα. Στις υπηρεσίες αυτές δεν επιβαρύνεται με πλεονάζουσα τηλεπικοινωνιακή κίνηση καθώς δεν απαιτούνται αποστολή μηνυμάτων αίτησης από τους κινητούς σταθμούς.
- **Real-time Polling Services (rtPS):** Είναι μια υπηρεσία πραγματικού χρόνου, που υποστηρίζει μετάδοση πακέτων μεταβλητού μήκους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ο σταθμός συνδρομητή έχει τη δυνατότητα περιοδικών αιτήσεων εύρους ζώνης προς το σταθμό βάσης. Παράδειγμα της εν λόγω υπηρεσίας συναντάμε στο κωδικοποιημένο κατά MPEG-2 σήμα video. Αυτός ο τύπος υπηρεσίας περιέχει περισσότερη πλεονάζουσα πληροφορία στην αίτηση από την UGS, αλλά υποστηρίζει μεταβλητά μεγέθη εκχώρησης ώστε να επιτυγχάνεται αποδοτικότητα στη μετάδοση δεδομένων. Η υπηρεσία προσφέρει δυνατότητες περιοδικών αιτήσεων, σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπουν στο Σταθμό Συνδρομητή να προσδιορίσει το μέγεθος της επιθυμητής εκχώρησης.
- **Nonreal-time Polling Services (nrtPS):** Αυτός ο τύπος υποστηρίζει υπηρεσίες, που τα δεδομένα αποτελούνται από πακέτα μεταβλητού μήκους, με περιορισμό τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης, όπως για παράδειγμα στις ftp εφαρμογές. Ο σταθμός βάσης παρέχει δυνατότητα αιτήσεων σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, ενώ ο σταθμός συνδρομητή έχει δυνατότητες αίτησης συμφόρησης, αίτησης μονοεκπομπής και εκπομπής δεδομένων.
- **Best Effort(BE):** Είναι υπηρεσίες όπου το δίκτυο διαχειρίζεται την τηλεπικοινωνιακή κίνηση με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, καθώς δεν απαιτούνται απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί το μέγιστο ρυθμό δεδομένων. Ανάλογο παράδειγμα βλέπουμε στη πλοήγηση στο διαδίκτυο.

- **Extended real-time variable rate (ERT-VR) services:** Η συγκεκριμένη υπηρεσία υποστηρίζεται μόνο στο Mobile WiMAX και είναι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου οι οποίες παράγουν μεταβλητού μεγέθους πακέτα σε περιοδική βάση, ενώ έχει και κάποιους περιορισμούς ως αναφορά όρια για τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης και τη μέγιστη καθυστέρηση. Ανάλογο παράδειγμα συναντάμε στις υπηρεσίες VoIP. Η εν λόγω υπηρεσία αποκαλείται και Extended real-time Polling Services (ErtPS).^[31]

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε τύπου υπηρεσίας και οι εφαρμογές που ενδείκνυται ανά τύπο.

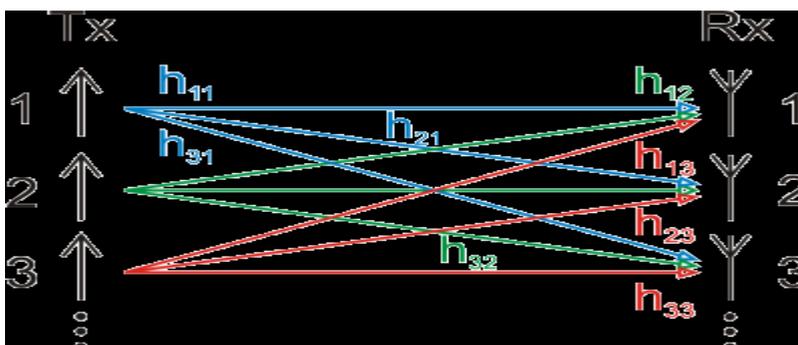
Κατηγορία QoS	Υπηρεσίες	Χαρακτηριστικά QoS
UGS Unsolicited Grant Service	VoIP	Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Jitter Tolerance
rtPS Real-Time Packet Service	Streaming Audio or Video	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Traffic Priority
ErtPS Extended Real-Time Packet Service	Voice with Activity Detection (VoIP)	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Jitter Tolerance Traffic Priority
nrtPS Non-Real-Time Packet Service	File Transfer Protocol (FTP)	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Traffic Priority
BE Best-Effort Service	Data Transfer, Web Browsing, etc.	Maximum Sustained Rate Traffic Priority

Πίνακας : Εφαρμογές Mobile WiMAX και QoS

³¹ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

3.5 MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων στο πρότυπο Mobile WiMAX, επιλέχθηκαν εξελιγμένα συστήματα κεραιών (Advanced Antenna Systems - AAS) για την υποστήριξή του. Τέτοια συστήματα κεραιών επιτρέπουν αφενός την καλύτερη εξυπηρέτηση των κινητών χρηστών και αφετέρου την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Τα προαναφερθέντα συστήματα με τη χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής/λήψης επιτρέπουν ταυτόχρονη επεξεργασία του σήματος στο χώρο και στο χρόνο, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του σήματος, την χωρητικότητα του καναλιού και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Όσο πιο πολλές κεραίες χρησιμοποιούνται τόσο μεγαλύτερη αύξηση της χωρητικότητας καναλιού παρατηρείται.



Εικόνα: Τεχνολογία MIMO

Οι πιο βασικές τεχνικές MIMO που χρησιμοποιούνται στο WiMAX είναι οι:

- **Spatial multiplexing:** Στην χωρική πολυπλεξία η κάθε κεραία εκπομπής εκπέμπει ξεχωριστά μια ροή δεδομένων και από την άλλη ο δέκτης διαχωρίζει της ροές με τεχνικές χωρό-χρονικής επεξεργασίας. Με την τεχνική αυτή παρατηρείται αύξηση της χωρητικότητας.
- **Space-Time Block Coding –STC:** Η συγκεκριμένη τεχνική αναφέρεται σε διαφορεική εκπομπή με χρήση χώρο-χρονικής κωδικοποίησης συστάδας (Space-Time Block Coding-STBC). Σε πάνω από μια κεραία εκπομπής χρησιμοποιείται κωδικοποίηση Alamouti^[32]. Γενικά είναι ανεκτική στα λάθη, χωρίς όμως να

³² https://en.wikipedia.org/wiki/Space%E2%80%93time_block_code

ανταποκρίνεται καλά στο θέμα της χωρητικότητας. Ο πομπός δεν χρειάζεται να γνωρίζει το κανάλι.

- **Beamforming:** Εδώ έχουμε την δυνατότητα να τροποποιήσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας, αλλάζοντας κατευθύνσεις στους λοβούς και στις παρεμβολές. Είναι μια τεχνική που προσφέρει αξιοπιστία, καθώς και αύξηση της χωρητικότητας. Ακόμη ο σταθμός βάσης θα πρέπει να γνωρίζει το κανάλι επικοινωνίας.

Οι τεχνικές που εφαρμόζονται στα συστήματα κεραιών διακρίνονται σε δύο τρόπους λειτουργίας:

- **Κλειστού βρόχου (Closed-Loop):** Εδώ ο πομπός έχει γνώση για το κανάλι. Στην τεχνική TDD η γνώση επιτυγχάνεται λόγω της ανταποδοτικότητας του καναλιού και στις δύο κατευθύνσεις, ενώ στην FDD απαιτεί την ύπαρξη καναλιού επιστροφής. Οι πολλαπλές κεραίες σε πομπό και δέκτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για διαμόρφωση διαγράμματος ακτινοβολίας είτε για συστήματα MIMO κλειστού βρόχου.
- **Ανοιχτού βρόχου (Open-Loop):** Ο πομπός δεν γνωρίζει την κατάσταση του καναλιού. Στην περίπτωση αυτή οι πολλαπλές κεραίες σε πομπό και δέκτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επίτευξη διαφορισμού στο δέκτη (συστήματα MISO- Multiple Inputs Single Output)³³ ή για χωρική πολυπλεξία (MIMO- Multiple Inputs Multiple Outputs).^[34]

3.6 Υβριδική τεχνική αυτόματης επαναμετάδοσης (H-ARQ)

Οι υβριδικές τεχνικές αυτόματης αίτησης επανεκπομπής (Hybrid Automatic Retransmission Request) επιτυγχάνουν πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά σε μια ζεύξη, σε σύγκριση με μια απλή τεχνική ARQ, έχοντας όμως παράλληλα αυξημένη πολυπλοκότητα. Υλοποιείται στο στρώμα PHY.

33

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1237157&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F18%2F27735%2F01237157.pdf%3Farnumber%3D1237157>

³⁴ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

Στο Mobile WiMAX υποστηρίζονται 2 τύποι:

- Η πρώτη ονομάζεται **chase combining** και εφαρμόζεται όταν ένα πακέτο δεν ληφθεί σωστά τότε επανεκπέμπεται αυτόματα και αυτό γίνεται συνέχεια μέχρι να ληφθεί σωστά το πακέτο, μάλιστα ο δέκτης συνδυάζει το εσφαλμένο πακέτο με την επανεκπομπή του, έτσι ώστε να έχουμε πιο αξιοπιστία στην αποκωδικοποίηση.
- Ο δεύτερος τύπος καλείται και **incremental redundancy** και πετυχαίνει χαμηλότερο ρυθμό σφαλμάτων από τον τύπο 1. Και αυτό γιατί το σχήμα puncturing που χρησιμοποιείται μεταβάλλεται μεταξύ διαδοχικών επανεκπομπών, μειώνοντας και τον ρυθμό κωδικοποίησης. Έτσι σε κάθε επανεκπομπή η πιθανότητα σφάλματος μειώνεται. Το συγκεκριμένο σχήμα puncturing που χρησιμοποιείται σε κάθε επανεκπομπή δηλώνεται με ένα ειδικό αναγνωριστικό (Sub-Packet Identity-SPID). Αποδεικνύεται ότι η H-ARQ τύπου 2 επιτυγχάνει χαμηλότερο ρυθμό σφαλμάτων από το τύπο 1, με αύξηση όμως της πολυπλοκότητας και των πλεονάζοντων δεδομένων.^[35]

3.7 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΥΚΟΛΙΕΣ

Το WiMAX όπως έχουμε αναφέρει ακολουθεί τις αρχές της ασύρματης επικοινωνίας, πράγμα το οποίο δηλώνει από μόνο του την ευαισθησία που έχει ως προς την ασφάλεια και την ορθότητα της μετάδοσης του σήματος, λόγω των διαφόρων παρεμβολών που μπορούν να αλλοιώσουν το αρχικό μας σήμα.

Η σχεδίαση ενός δικτύου WiMAX στηρίζεται είτε στην αρχιτεκτονική της Point-to-Point σύνδεσης, που χρησιμοποιείται εκεί που υπάρχουν δύο σημεία επικοινωνίας(πομπός και δέκτης), είτε στην αρχιτεκτονική Point-to-Multipoint, όπου ένας σταθμός βάσης θα μπορεί να εξυπηρετήσει εκατοντάδες συνδρομητές. Στις ασύρματες επικοινωνίες το βασικό πρόβλημα ήταν η ανικανότητα να προσφέρουν υπηρεσίες χωρίς οπτική επαφή(NLOS), γεγονός που περιόριζε την εξάπλωση των ασύρματων τεχνολογιών στις αγορές. Τώρα με έναν WiMAX σταθμό βάσης προσφέρουμε NLOS υπηρεσίες, δηλαδή ο σταθμός θα επικοινωνεί με συνδρομητές οι οποίοι δεν βρίσκονται στο πεδίο οράσεως τους και

³⁵ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008

μάλιστα με πολύ καλή εμβέλεια και όγκο δεδομένων. Βέβαια σε συνθήκες LOS η επικοινωνία λειτουργεί πιο αποδοτικά, καθώς στην NLOS επικοινωνία μπορεί να παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη (κτήρια, δένδρα, λόφοι κ.α) πράγμα που σημαίνει ότι θα υπάρχει κάποια μείωση στην εμβέλεια του σήματος. Για τον ορθό σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου θα πρέπει να λάβουμε υπόψη την περιοχή ραδιοκάλυψης (συνθήκες περιβάλλοντος) και τις διάφορες παρεμβολές που μπορεί να προκύψουν σε μια ραδιοδιάδοση. Όπως γνωρίζουμε η ισχύς του δέκτη είναι η ισχύς που στέλνει ο πομπός μείον τις απώλειες που μπορούν να προκύψουν κατά τη μετάδοση. Για κινητούς συνδρομητές με NLOS επικοινωνία τα πράγματα δυσκολεύουν.

Οι παραμορφώσεις που μπορούν να προκύψουν σε ένα σήμα κατά την διάδοση χωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- Την ανάκλαση (reflection)
- Τη περίθλαση (diffraction)
- Τη σκέδαση (scattering)

Με τον όρο ανάκλαση αναφερόμαστε στο φαινόμενο που λαμβάνει χώρα όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε εμπόδιο με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με το μήκος κύματος. Παραδείγματα ανάκλασης έχουμε π.χ(επιφάνεια εδάφους, κτήρια, αντικείμενα κ.α). Τα ανακλώμενα κύματα μπορούν να συμβάλουν ανάλογα με τη φάση τους, είτε αρνητικά είτε θετικά στο συνολικό σήμα. Η περίθλαση από την άλλη είναι η περίπτωση όπου το σήμα εκτρέπεται της πορείας του καθώς στην διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη έχει μεσολαβήσει κάποιο αδιαπέραστο σώμα, παράγοντας έτσι δευτερογενή σήματα σύμφωνα με την αρχή του Huygens^[36]. Με την περίθλαση μπορούμε να εξηγήσουμε το φαινόμενο της μετάδοσης του σήματος χωρίς οπτική επαφή. Η αποφυγή της περίθλασης μπορεί να επιτευχθεί μέσω μοντέλων διάδοσης, όπου μπορούμε να εξασφαλίσουμε την καθαρότητα του σήματος ως μια απόσταση, η οποία ονομάζεται ζώνης Fresnel. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να διαπιστώσουμε τη μη ύπαρξη εμποδίων ως ένα μεγάλο ποσοστό απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη για την αποφυγή της εμφάνισης της περίθλασης, εξασφαλίζοντας έτσι

³⁶ http://www.chemistry.uoc.gr/frudakis/Courses/Physics_II_ClassicalWaves/06-Superposition.pdf

την ασφαλή μετάδοση. Η σκέδαση συμβαίνει όταν το σήμα αλληλεπιδρά με την ύλη ή κάποιο αντικείμενο και «διασκορπίζεται» προς πολλές κατευθύνσεις. Έχει αποδειχθεί ότι η σκέδαση είναι μηχανισμός διάδοσης ο οποίος είναι πολύ δύσκολος να προβλεφθεί στα ασύρματα συστήματα.^[37]

3.7.1 Απώλειες ελεύθερου χώρου^[38]

Στην περίπτωση που η κεραία εκπομπής βρίσκεται στον ελεύθερο χώρο και εκπέμπει με ισχύ εξόδου P_t με κατευθυντικό κέρδος G_t και ο δέκτης βρίσκεται σε απόσταση d μέτρων από την κεραία βάσης, τότε η πυκνότητα ισχύος στον δέκτη είναι ίση με:

$$W = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (2.1)$$

Η διαθέσιμη ισχύς στη κεραία του δέκτη, η οποία έχει ενεργό επιφάνεια A δίνεται από τη σχέση:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \cdot A = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (2.2)$$

όπου το G_r είναι το κατευθυντικό κέρδος της κεραίας του δέκτη. Έτσι προκύπτει ότι ο λόγος λαμβανόμενης ισχύος προς εκπεμπόμενη ισχύ είναι ίσος με:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (2.3)$$

Σχέση η οποία είναι και γνωστή ως η εξίσωση του Friis. Εάν υποθέσουμε ότι c είναι η ταχύτητα του φωτός τότε από την σχέση $c = \lambda f$ προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left[\frac{c}{4\pi f d} \right]^2 \quad (2.4)$$

³⁷ Κωνσταντίνος Μερτζάνης, Μεταπτυχιακή Εργασία. <<ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ WiMAX>> Φεβρουάριος 2010

³⁸ Κωνσταντίνος Μερτζάνης, Μεταπτυχιακή Εργασία. <<ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ WiMAX>> Φεβρουάριος 2010

Η τελευταία σχέση μετατρέπεται και σε dB ακολουθώντας την παρακάτω σχέση:

$$L_f = 10 \log \frac{P_r}{P_t} = 10 \log G_t + 10 \log G_r - 20 \log f - 20 \log d + k \quad (2.5)$$

Όπου

$$k = 20 \log \frac{3 \cdot 10^8}{4\pi} = 147.6 \quad (2.6)$$

Από την εξίσωση (2.4) παρατηρούμε ότι η διάδοση στον ελεύθερο χώρο ακολουθεί τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου όσον αφορά στην απόσταση d ανάμεσα στο πομπό και στο δέκτη, οπότε η λαμβανόμενη ισχύς πέφτει κατά 6 dB όταν η απόσταση d διπλασιάζεται. Επίσης οι απώλειες ελεύθερου χώρου μεταβάλλονται αντιστρόφως ανάλογα με τη συχνότητα.

Γνωρίζοντας τη πυκνότητα ισχύος μπορούμε να υπολογίσουμε και την ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου E από τη σχέση:

$$W = \frac{E^2}{n} \quad (2.7)$$

Όπου $n = 120\pi$ είναι η κυματική αντίσταση ελεύθερου χώρου. Έτσι προκύπτει:

$$\frac{E^2}{120\pi} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \Leftrightarrow E = \frac{\sqrt{30 P_t G_t}}{d} \quad (2.8)$$

Όπου η τελική λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη είναι:

$$P_r = \frac{E^2 A}{n} = \frac{E^2}{120\pi} \cdot \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} = \left[\frac{E\lambda}{2\pi} \right]^2 \cdot \frac{G_r}{120} \quad (2.9)$$

3.7.2 Απώλειες διάδοσης σε συστήματα διάδοσης μη- οπτικής και οπτικής επαφής

Τα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών στη πλειοψηφία τους αναφέρονται αναφέρονται σε περιβάλλον μη-οπτική επαφή (NLOS). Στην εξίσωση 2.4 παρατηρούμε ότι, για διάδοση οπτικής επαφής (LOS) η λαμβανόμενη ισχύς είναι αντίστροφα ανάλογη του d^2 . Γενικά, η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής αυξάνει εκθετικά με την απόσταση. Για διάδοση οπτικής επαφής χωρίς φυσικά εμπόδια, ο εκθέτης ισούται με $n=2$.

Βάσει εμπειρικών δεδομένων, έχει αναπτυχθεί ένα αρκετά γενικό μοντέλο για διάδοση NLOS το οποίο περιγράφεται από τη σχέση:

$$L(d) = L_f \left[\frac{d}{d_0} \right]^n \quad (2.10)$$

Το οποίο δείχνει ότι η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής L αυξάνει εκθετικά με την απόσταση d . Οι όροι της σχέσης (2.10) είναι οι εξής:

- n =εκθέτης απωλειών διαδρομής. Τυπικές τιμές $3.5 \leq n \leq 5$
- d =απόσταση μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης
- d_0 =απόσταση αναφοράς ή απόσταση μέχρι την οποία ισχύει διάδοση LOS
- L_f =απώλειες διαδρομής σε απόσταση d_0 και διάδοσης LOS
- L =απώλειες διαδρομής για συνδυασμένη διάδοση του σήματος και LOS και NLOS

Ο εκθέτης n δείχνει τον ρυθμό με τον οποίο αυξάνουν οι απώλειες διαδρομής με την απόσταση. Η απόσταση αναφοράς d_0 θεωρεί ότι υπάρχει διάδοση στον ελεύθερο χώρο χωρίς εμπόδια μέχρι απόσταση d_0 από τη κεραία. Είναι σημαντικό να επιλεγεί η απόσταση αναφοράς που είναι κατάλληλη για το κάθε φορά συγκεκριμένο περιβάλλον μετάδοσης.

Η απόλυτη μέση τιμή απωλειών διαδρομής σε dB, ορίζεται ως η τιμή των απωλειών λόγω διαδρομής $L(d_0)$, σε dB από τον πομπό έως την απόσταση αναφοράς, συν τις πρόσθετες απώλειες διαδρομής, που δίνονται από τη σχέση(2.10). Έτσι, η απόλυτη μέση τιμή απωλειών διαδρομής $L(d)$ σε dB, δίνεται από τη σχέση:

$$L(d)=L(d_0)+10 \cdot n \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.11)$$

Εμπειρικά αποτελέσματα δείχνουν, ότι τα τυπικά NLOS συστήματα κινητών επικοινωνιών σε εξωτερικούς χώρους έχουν απώλειες διαδρομής με εκθέτη $3.5 \leq n \leq 5$ και οι δίαυλοι επικοινωνίας εσωτερικών χώρων έχουν απώλειες διαδρομής με εκθέτη $2 \leq n \leq 4$.³⁹

3.7.3 Σκίαση και απώλειες διαδρομής

Η εξίσωση (2.11) δεν λαμβάνει υπόψη την αταξία που υπάρχει στο περιβάλλον και αυτό γιατί δύο διαφορετικές θέσεις όπου η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ίδια, αλλά η μέση ισχύ μπορεί να είναι διαφορετική λόγω της αταξίας που υπάρχει στο περιβάλλον. Μετρήσεις που έχουν γίνει έχουν δείξει, ότι για οποιαδήποτε τιμή του d , η τιμή των απωλειών της διαδρομής $L(d)$ σε μια συγκεκριμένη θέση, είναι τυχαία

³⁹ Κωνσταντίνος Μερτζάνης, Μεταπτυχιακή Εργασία. <<ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ WiMAX>> Φεβρουάριος 2010

και έχει λογαριθμοκανονική κατανομή γύρω από τη μέση τιμή των απωλειών που υπολογίζονται με βάση την απόσταση d .

Δηλαδή :

$$L(d)=L(d)+X_{\sigma}=L(d_0)+10 n \log_{10}(d/d_0)+ X_{\sigma} \quad (2.12)$$

και

$$Pr(d)=Pt(d)-L(d) \quad (2.13)$$

Όπου X_{σ} είναι τυχαία μεταβλητή Gauss (σε dB) με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ (σε dB). Άρα η λογαριθμοκανονική κατανομή στην ουσία περιγράφει τις τυχαίες επιδράσεις σκίασης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μετρήσεων σε θέσεις που έχουν την ίδια απόσταση, αλλά με διαφορετικό βαθμό αταξίας στη διαδρομή διάδοσης. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται κα ως λογαριθμοκανονική σκίαση.

3.7.4 Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο αυτό έχει να κάνει με τη μεταβολή της φάσης του λαμβανόμενου σήματος, το οποίο εξηγείται με τη κίνηση του κινητού τερματικού ή τη κίνηση του περιβάλλοντος διάδοσης γενικότερα, πράγμα που δηλώνει ότι η απόσταση διαδρομής μπορεί να μεταβάλλεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται και ολίσθηση Doppler.^[40]

3.7.5 Πολυδιαδρομική παρεμβολή

Σε συνθήκες μη οπτικής επαφής ο δέκτης λόγω της περίθλασης, διάθλασης και ανάκλασης που υφίστανται το σήμα, λαμβάνει κύματα με διαφορετικά φάσματα, με αποτέλεσμα το σήμα να ενισχύεται ή και ακόμη να προκαλεί διαλείψεις. Η ένταση αυξάνεται ανάλογα με το μήκος της ζεύξης και τη συχνότητα λειτουργίας.^[41]

3.7.6 Διασυμβολική παρεμβολή

Η διασυμβολική παρεμβολή (Inter-Symbol Interference-ISI) συμβαίνει λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης, καθώς στο δέκτη φθάνουν συνιστώσες του σήματος με διαφορετική φάση, προκαλώντας

⁴⁰ Κωνσταντίνος Μερτζάνης, Μεταπτυχιακή Εργασία. <<ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ WiMAX>> Φεβρουάριος 2010

⁴¹ Αναστάσιος Α. Γκιουζέπας, Σπυρίδων Κ. Σκευάς, Διπλωματική Εργασία. << Μελέτη Ραδιοκάλυψης για Συστήματα Τεχνολογίας WiMAX>>, Αθήνα, Μάιος 2010

έτσι υψηλό ρυθμό σφαλμάτων. Το φαινόμενο αυτό περιορίζεται με τη διαμόρφωση OFDM.^[42]

3.7.7 Ομοιοδιαυλική παρεμβολή

Η ομοιοδιαυλική παρεμβολή έχει να κάνει με τη καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος στα ασύρματα δίκτυα, χρησιμοποιώντας διαύλους ίδιας συχνότητας σε μη γειτονικές περιοχές. Έτσι δημιουργούνται κυψέλες στην ίδια ομάδα συχνοτήτων και ονομάζονται ομοιοδιαυλικές. Κατά την σχεδίαση αν οι κυψέλες δεν έχουν την απαραίτητη απόσταση μεταξύ τους δημιουργούνται παρεμβολές. Έτσι κατά την σχεδίαση θα πρέπει οι ομοιοδιαυλικές κυψέλες να έχουν τη κατάλληλη απόσταση.^[43]

3.8 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΟ WiMAX^[44]

Η ασφάλεια του δικτύου WiMAX είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή λειτουργία του δικτύου, καθώς με την μετάδοση του σήματος μπορούν να παρατηρηθούν διάφορες παρεμβολές και έτσι να έχουμε απώλεια δεδομένων ή αλλοίωση του σήματος. Οι απειλές που μπορεί να δεχτεί το σήμα παρατηρούνται σε δύο επίπεδα, το επίπεδο φυσικού στρώματος(PHY) και το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων(MAC). Στο φυσικό στρώμα τα δεδομένα αποτελούνται από πλαίσια τα οποία τα χωρίζουμε σε δύο κατηγορίες, η πρώτη περιέχει πληροφορίες ελέγχου και η δεύτερη τα δεδομένα. Τώρα τα πλαίσια είναι ευάλωτα σε απειλές που ονομάζονται jamming, scrambling και frenselling.

Το jamming παρεμβάλλεται στο αρχικό σήμα μέσω μιας ισχυρής πηγής θορύβου ώστε να μειώνει σημαντικά τη χωρητικότητα του καναλιού. Είναι μια απειλή η οποία εύκολα υλοποιείται από οποιονδήποτε και ο τρόπος αντιμετώπισης του επιτυγχάνεται με την αύξηση της ισχύος των σημάτων μέσω των κεραιών ή με την αύξηση του εύρους ζώνης χρησιμοποιώντας τεχνικές εξάπλωσης συχνότητας π.χ.

⁴² Αναστάσιος Α. Γκιουζέπας, Σπυρίδων Κ. Σκευάς, Διπλωματική Εργασία. << Μελέτη Ραδιοκάλυψης για Συστήματα Τεχνολογίας WiMAX>>, Αθήνα, Μάιος 2010

⁴³ Αναστάσιος Α. Γκιουζέπας, Σπυρίδων Κ. Σκευάς, Διπλωματική Εργασία. << Μελέτη Ραδιοκάλυψης για Συστήματα Τεχνολογίας WiMAX>>, Αθήνα, Μάιος 2010

⁴⁴ Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009

hopping (αναπήδηση συχνότητας) ή direct sequence spread spectrum (DSSS). Ακόμη το jamming μπορεί να ανιχνευθεί με εξοπλισμό ελέγχου ραδιοφάσματος, καθώς και η πηγή του με διάφορα εργαλεία ανεύρεσης ράδιο-κατεύθυνσης.

Τώρα το scrambling είναι η επιβολή θορύβου στο σήμα για σύντομα χρονικά διαστήματα και στοχεύει σε συγκεκριμένα πλαίσια ή τμήματα πλαισίων. Μπορούν να αλλοιώσουν επιλεκτικά τον έλεγχο ή τη διαχείριση πληροφοριών με στόχο να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Το πρόβλημα είναι μεγαλύτερο όταν τα μηνύματα δεν είναι ανεκτικά σε καθυστερήσεις και έτσι οι scrambled πετυχαίνουν να μειώσουν το ωφέλιμο εύρος ζώνης των θυμάτων. Το scrambling είναι πιο δύσκολο να ανιχνευθεί λόγω του ότι μπορεί να οφείλεται σε φυσικές πηγές.

Από την άλλη το frenselling είναι η πιο εύκολη παρεμβολή που μπορεί να δεχτεί το σήμα καθώς μπορεί να εφαρμοστεί στην οπτική διαδρομή του πομπού και του δέκτη μέσω αντικειμένων π.χ.(διαφημιστική πινακίδα) μειώνοντας την ισχύ του σήματος. Είναι σχετικά εύκολο να ανιχνευθεί ελέγχοντας την οπτική επαφή.

3.8.1 Απειλές του επιπέδου MAC^[45]

Το στρώμα συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων (MAC) είναι προσανατολισμένο σε σύνδεση (connection oriented). Υπάρχουν δυο είδη συνδέσεων 1)οι συνδέσεις διαχείρισης και 2)οι συνδέσεις μεταφοράς δεδομένων. Τώρα οι συνδέσεις διαχείρισης χωρίζονται σε τριών ειδών, τις βασικές, τις αρχικές και τις δευτερεύουσες. Η βασική σύνδεση δημιουργείται όταν ένας κινητός σταθμός εισέρχεται στο δίκτυο και χρησιμοποιείται για σύντομα και επείγοντα μηνύματα διαχείρισης. Η αρχική σύνδεση εξίσου με τη βασική σύνδεση δημιουργείται κατά την είσοδο ενός σταθμού στο δίκτυο με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται για μηνύματα διαχείρισης που είναι ανεκτικά στη καθυστέρηση. Από την άλλη η δευτερεύουσα σύνδεση χρησιμοποιείται για ενθυλακωμένα(encapsulated) IP μηνύματα διαχείρισης (π.χ. DHCP, SNMP, TFP). Όλες οι παραπάνω συνδέσεις είναι ασύρματες πράγμα που δηλώνει ότι είναι αρκετά ευαίσθητες σε κάποιον που θέλει να παρεμβάλει τοποθετώντας κατάλληλα μια κεραία, παρεμποδίζοντας έτσι

⁴⁵ Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009

τη σωστή αποστολή δεδομένων. Παραδείγματος χάριν ο επιτιθέμενος θα μπορούσε να τοποθετήσει κατάλληλα ένα πομπό, να πλαστογραφήσει νέα πλαίσια, να τροποποιήσει και να αναμεταδώσει πλαίσια. Έτσι έχουν δημιουργηθεί μηχανισμοί οι οποίοι εξασφαλίζουν την αξιοπιστία της μετάδοσης, κάποιιοι από αυτούς είναι η κρυπτογράφηση των δεδομένων, τα πιστοποιητικά και οι ψηφιακές υπογραφές.

3.8.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ^[46]

Για να εισέλθει ένας κινητός σταθμός στο δίκτυο χρησιμοποιεί με βάση το πιστοποιητικό X.509 το δημόσιο κλειδί(Public Key) που περιέχει για την εξουσιοδότηση με τους σταθμούς βάσης. Καθώς ολοκληρώνεται η πιστοποίηση καθιερώνονται και τα υπόλοιπα κλειδιά τα οποία έχουν ημερομηνία λήξης και πρέπει να ανανεώνονται σε περιοδική βάση μέσω της επαναεξουσιοδότησης. Τώρα οι σταθμοί βάσης καθορίζουν το κλειδί εξουσιοδότησης(Authorization Key),που έχει διάρκεια ζωής ως 70 ημέρες, το οποίο το περνούν στους κινητούς σταθμούς, εφόσον πρώτα το έχουν κρυπτογραφήσει με βάση το δημόσιο κλειδί.

Ο κινητός σταθμός χρησιμοποιεί το κλειδί εξουσιοδότησης για να καθορίσει το Κλειδί Κρυπτογράφησης Κλειδιού(Key Encryption Key)και το Κώδικας Αυθεντικοποίησης μηνύματος βασισμένος σε συνάρτηση σύνοψης(Hash function-based Message Authentication Code). Ο ρόλος της κρυπτογράφησης

κλειδιού είναι για τη κρυπτογράφηση των κλειδιών κίνησης κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους. Παρακάτω φαίνονται τα επιγραμματικά τα βήματα εισόδου ενός σταθμού στο δίκτυο:

- 1) Ανίχνευση κάτω ζεύξης και συγχρονισμός με σταθμό βάσης
- 2) Ανακάλυψη διαθέσιμων καναλιών άνω ζεύξης
- 3) Ταξινόμηση
- 4) Διαπραγμάτευση χωρητικότητας
- 5) Εξουσιοδότηση, πιστοποίηση και ανταλλαγή κλειδιών
- 6) Εγγραφή στο δίκτυο

⁴⁶ Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009

3.8.3 Κρυπτογράφηση στο WiMAX^[47]

Η ασφάλεια του WiMAX δικτύου είναι θεμελιακού χαρακτήρα, καθώς μιλάμε για ασύρματο δίκτυο το οποίο όπως καταλαβαίνουμε είναι πολύ εύκολο να παραβιαστεί, καθώς και στο ότι με βάση την ασφάλεια εξαρτάται η ομαλή λειτουργία του δικτύου. Αυτός είναι και ο λόγος που κατά το σχεδιασμό προστέθηκε και το υπό-επίπεδο ασφάλειας. Παρακάτω αναφέρουμε μερικές από τις απειλές που μπορεί να δεχτεί το ένα ασύρματο δίκτυο:

- 1) Κακόβουλες οντότητες που προσπαθούν να κερδίσουν πρόσβαση στο δίκτυο μέσω των ασύρματων συνδέσεων, οι οποίες δεν είναι αρκετά ασφαλείς.
- 2) Μη κρυπτογραφημένη πληροφορία που περιπλανάται στον αέρα μπορεί να αναχαιτιστεί από οποιονδήποτε έχει έναν κατάλληλα συντονισμένο δέκτη.
- 3) DoS επιθέσεις.
- 4) Η ταυτότητα ενός νόμιμου χρήστη μπορεί να κλαπεί και οι εγκληματίες μπορούν να μεταμφιεστούν ως νόμιμοι χρήστες.
- 5) Οι ιοί και άλλοι κακόβουλοι κώδικες μπορούν εύκολα να εισαχθούν στο δίκτυο και επιπλέον να πολλαπλασιαστούν στην ενσύρματη πλευρά του δικτύου.

Τώρα η αντιμετώπιση των παραπάνω πετυχαίνεται χρησιμοποιώντας μεθόδους κρυπτογράφησης των δεδομένων, πιστοποιητικά και υπογραφές. Τα πιστοποιητικά και οι υπογραφές χρησιμοποιούν και αυτά τη κρυπτογράφηση. Ας δούμε όμως πως λειτουργεί η κρυπτογράφηση. Η όλη δομική διαδικασία ονομάζεται κρυπτοσύστημα ή αλγόριθμος κρυπτογράφησης. Τώρα η κρυπτογράφηση εφαρμόζεται στα δεδομένα και τα μετασχηματίζει σε ακατονόητα κρυπτογραφημένα δεδομένα, συνοδευόμενα από το κλειδί κρυπτογράφησης. Και στη συνέχεια μόλις τα κρυπτογραφημένα δεδομένα μαζί με το κλειδί αποκρυπτογράφησης φθάσουν στο δέκτη αρχίζει η διαδικασία της αποκρυπτογράφησης. Το αναφερόμενο κλειδί αποτελείται από μια τυχαία ακολουθία από bits.

Οι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης χωρίζονται σε 2 κατηγορίες:

- 1) συμμετρικοί ή ιδιωτικού κλειδιού αλγόριθμοι
- 2) δημοσίου κλειδιού αλγόριθμοι

Το WiMAX χρησιμοποιεί τους συμμετρικούς αλγορίθμους και μάλιστα σε συνδυασμό μεταξύ τους.

⁴⁷ Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009

3.8.4 DES-3DES^[48]

Ο πρώτος συμμετρικός αλγόριθμος είναι ο Data Encryption Standard (DES) ο οποίος λειτουργεί ως block cipher σε blocks δεδομένων των 64 bits και χρησιμοποιεί κλειδί των 56 bits. Ο αλγόριθμος DES μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλαπλής κρυπτογράφησης, έτσι το αρχικό μήνυμα κρυπτογραφείται αποτελούμενο από ένα κλειδί και στη συνέχεια αποκρυπτογραφείται χρησιμοποιώντας ένα άλλο κλειδί και στη συνέχεια το αποτέλεσμα κρυπτογραφείται από ένα τρίτο κλειδί. Το κρυπτοσύστημα αυτό ονομάζεται 3DES.

3.8.5 AES^[49]

Το συγκεκριμένο πρότυπο βασίζεται στη λογική κωδικοποίησης ομάδων δεδομένων με ένα μυστικό κλειδί. Υποστηρίζει τη χρήση κλειδίων με μήκος 128,192,256 bits και ανάλογα το μήκος χρησιμοποιείται και η κατάλληλη συντόμευση. Τώρα ο αλγόριθμος ανεξάρτητα το μήκος του κλειδιού κωδικοποιεί δεδομένα με 128 bits. Η διαδικασία κρυπτογράφησης είναι επαναληπτική και κάθε επανάληψη συσχετίζεται με το block δεδομένων της προηγούμενης καθώς και το κλειδί προκύπτει με βάση μια διαδικασία που ορίζει ο αλγόριθμος από το πρώτο κλειδί. Το τελικό αποτέλεσμα είναι το κρυπτογραφημένο μπλόκ.

3.8.6 TLS^[50]

Το TLS (Transport Layer Security) είναι το πρωτόκολλο διάδοχος του SSL(Secure Sockets Layer) που είναι υπεύθυνο για την ομαλή λειτουργία εξυπηρετητή-πελάτη, καθώς εμποδίζει τυχόν υποκλοπές στην επικοινωνία, χρησιμοποιώντας κρυπτογράφηση και πιστοποίηση δεδομένων. Αρχικά το πρωτόκολλο ξεκινά με μια φάση χειραψίας, καθώς ακόμη χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο κρυπτογράφησης(π.χ. DES). Επίσης κατά την φάση της χειραψίας ορίζει κάποια κλειδιά τα οποία τα

⁴⁸ Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009

⁴⁹ Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009

⁵⁰ Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009

χρησιμοποιεί αργότερα κατά την επικοινωνία για τη κρυπτογράφηση των δεδομένων.

3.8.7 PKM^[51]

Είναι ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού που έχει να κάνει με την ασφαλή διαμοίραση, τον συγχρονισμό και την ανανέωση των πληροφοριών που σχετίζονται με το κλειδί ανάμεσα στο σταθμό βάσης και στον σταθμό συνδρομητή.

3.8.9 X.509 Πιστοποιητικά^[52]

Τα πιστοποιητικά αυτά έχουν να κάνουν με την αναγνώριση της σύνδεσης μεταξύ των μερών του δικτύου. Ένα πρότυπο ορίζει ένα πιστοποιητικό κατασκευαστή το οποίο προσδιορίζει τον κατασκευαστή μιας WiMAX συσκευής και πιστοποιητικό σταθμού συνδρομητή το οποίο προσδιορίζει ένα συγκεκριμένο σταθμό συνδρομητή, όπου περιλαμβάνει τη MAC διεύθυνση του στο πεδίο κατόχου. Ένα πιστοποιητικό αποτελείται από τις ακόλουθες πληροφορίες:

- Έκδοση του πιστοποιητικού
- Σειριακός αριθμός του πιστοποιητικού
- Όνομα εκδότη του πιστοποιητικού
- Περίοδος ισχύος του πιστοποιητικού
- Ταυτότητα κατόχου του πιστοποιητικού (MAC διεύθυνση του SS)
- Δημόσιο κλειδί κατόχου του πιστοποιητικού
- Αλγόριθμος υπογραφής του εκδότη και του κατόχου
- Προσδιοριστικό αλγορίθμου υπογραφής
- Υπογραφή της αρχής πιστοποίησης

⁵¹ Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009

⁵² Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

4.1 Σύγκριση WiMAX με Wi-Fi

Πρόκειται για δύο ασύρματες τεχνολογίες οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικές εφαρμογές και ανήκουν στην οικογένεια πρότυπων IEEE. Συγκεκριμένα το Wi-Fi αναφέρετε ως το πρότυπο IEEE 802.11 και η τεχνολογία WiMAX ως το πρότυπο IEEE 802.16. Το Wi-Fi πρόκειται για μια τεχνολογία που αφορά τοπική δικτύωση το οποίο σχεδιάστηκε για να δώσει μια κινητικότητα σε ιδιωτικά ενσύρματα LAN σε σχετικά μικρή εμβέλεια, της τάξης των μερικών εκατοντάδων μέτρων. Το WiMAX από την άλλη πρόκειται μια τεχνολογία που σχεδιάστηκε για να παρέχει ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση (Broadband Wireless Access-BWA) και στοχεύει στην αντικατάσταση των DSL τεχνολογιών, καθώς υποστηρίζει τη μεταφορά δεδομένων σε μακρινές αποστάσεις, της τάξης των 10 χιλιομέτρων. Υποστηρίζει επικοινωνία χωρίς οπτική επαφή, κάτι το οποίο δε το συναντάμε στο πρότυπο IEEE 802.11, μειώνοντας βέβαια το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Επίσης διαφορές συναντάμε στην ασφάλεια μεταξύ των δύο τεχνολογιών, καθώς το WiMAX χρησιμοποιεί κρυπτογράφηση (3DES ή AES), ενώ το Wi-Fi χρησιμοποιεί κρυπτογράφηση WEP ή WPA. Μια σημαντική πτυχή του IEEE 802.16 είναι ότι καθορίζει το επίπεδο MAC που υποστηρίζει τις προδιαγραφές του πολλαπλού φυσικού στρώματος (PHY). Ακόμη 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 ρυθμοαπόδοση τους. Αντιθέτως, στο 802.16 MAC ο συνδρομητικός σταθμός πρέπει να ανταγωνιστεί μόνο μία φορά (για την αρχική του είσοδο μέσα στο δίκτυο). Το Wi-Fi λειτουργεί στη μάντα των συχνοτήτων 2.4 GHz ή 5GHz σε μη νόμιμη περιοχή ενώ το WiMAX λειτουργεί στη νόμιμη μάντα στις συχνότητες 2.3, 2.5 και 3.5GHz, ενώ στη μη νόμιμη μάντα λειτουργεί στα 5.8GHz. Τέλος σε σύγκριση με το πρότυπο 802.11, το 802.16 παρέχει σαφώς

υψηλότερο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας, παροχή αυξημένου εύρους ζώνης και ισχυρότερη κρυπτογράφηση.^[53]

4.2 Σύγκριση WiMAX με 3G

Οι διαφορές των δύο ασύρματων τεχνολογιών είναι πολλές και εμπίπτουν κυρίως στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, πράγμα που οφείλεται στη διαφορικότητα των υπηρεσιών που έχουν σχεδιαστεί να εξυπηρετούν οι δύο τεχνολογίες.

Μια από τις κύριες διαφορές είναι το εύρος συχνοτήτων το οποίο εκπέμπουν οι δυο τεχνολογίες, καθώς ένα δίκτυο WiMAX εκπέμπει στις συχνότητες των 2.3, 2.5, 3.5, 5.8 GHz, σε αντίθεση με το σύστημα UMTS (3G) που λειτουργεί στα 2.1 GHz. Τώρα λόγω της αυξημένης συχνότητας που εκπέμπει ένα σύστημα WiMAX και λόγω της αυξημένης απορροφητικότητας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παρατηρείται στην ατμόσφαιρα όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, στο δίκτυο WiMAX θα χρειαστούνε παραπάνω κυψέλες. Μια ακόμα σημαντική διαφορά είναι ότι ένα σύστημα WiMAX χρησιμοποιεί τη μέθοδο ορθογώνιας διαμόρφωσης με διαίρεση στη συχνότητα (OFDMA), ενώ ένα σύστημα 3G χρησιμοποιεί διαμόρφωση (CDMA). Τώρα οι διαφορές των δύο διαμορφώσεων είναι πολλές, με τη διαμόρφωση OFDMA να θεωρείται πιο αποδοτική καθώς προσφέρει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα ως προς τις παρεμβολές των πολλαπλών διαδρομών, λόγω της καλύτερης αντιμετώπισης της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter-Symbol Interference – ISI) και στις επιλεκτικές διαλείψεις ως προς τη συχνότητα, καθώς επιτρέπεται η διόρθωση λαθών που παρατηρείται στα υποφέροντα. Ωστόσο η OFDMA παρουσιάζεται πιο ευαίσθητη στη μετατόπιση συχνότητας και το θόρυβο φάσης, που έχει επίπτωση στην παρεμβολή μεταξύ φερόντων (Inter Carrier Interference - ICI), αν και αυτό μπορεί εύκολα να επαλειφθεί με τη χρήση των διαστημάτων φύλαξης. Η διαμόρφωση OFDMA χειρίζεται καλύτερα τη προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση AMC από ότι η CDMA. Επίσης δεδομένου ότι τα σύμβολα OFDMA είναι μεγαλύτερα σε διάρκεια από τα σύμβολα CDMA, ένας παλμικός θόρυβος (impulse noise) δεν έχει την ίδια επίδραση. Εν τέλει, με την τεχνολογία

⁵³ Βασδάρης Θωμάς, Τσελίκης Παναγιώτης, Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα WiMAX, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, Σεπτ. 2006

WiMAX μπορεί να μειωθεί ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένου bit πληροφορίας (Bit Error Rate - BER).^[54]

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ WIMAX ΜΕ LTE

Λόγω των αδυναμιών που εμφάνιζε η τεχνολογία 3G τόσο στη ποιότητα των υπηρεσιών όσο και στους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, έδωσε την ανάγκη για τη δημιουργία ενός νέου πρότυπου, βασισμένο στα κλασικά πρότυπα GSM/EDGE και UMTS/HSPA των κινητών επικοινωνιών, το οποίο θα πετύχαινε καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Η εμπορική ονομασία της τεχνολογίας είναι LTE- Long Term Evolution και εμφάνισε βελτιώσεις στη ταχύτητα και τη χωρητικότητα του δικτύου, μέσω τη προσθήκη ενός συνόλου ραδιοεπαφών σε συνδυασμό με ένα πιο εξελιγμένο δίκτυο κορμού. Ανήκει στα δίκτυα 4 γενιάς η οποία θεωρείται η εξέλιξη των δικτύων 3 γενιάς. Τώρα όσον αναφορά συγκριτικά της δύο τεχνολογίες WiMAX και LTE, η LTE χρησιμοποιεί το σύνολο των καινοτομιών που χρησιμοποιούν τα δίκτυα WiMAX, όπως τη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA και τη χρήση έξυπνων κεραιών MIMO. Με λίγα λόγια έχουμε να κάνουμε με μια ανταγωνιστική τεχνολογία σε σχέση με το WiMAX όσον αναφορά το ρυθμό μετάδοσης, τις καθυστερήσεις και τη χωρητικότητα του συστήματος.^[55]

4.4 WiBro

Η βιομηχανία ηλεκτρονικών και τηλεπικοινωνιών της Νότιας Κορέας κάτω από την ηγεσία της Samsung Electronics και ETRI έχει αναπτύξει ένα δικό της πρωτόκολλο το WiBro. Στο τέλος του 2004 η Intel και η LG Electronics συμφώνησαν πως τα πρωτόκολλα WiBro και WiMAX ήταν παρόμοια. Το WiBro υποστηρίζεται από την κυβέρνηση της Νότιας Κορέας με την απαίτηση να δαπανά για κάθε φορέα πάνω από 1.000.000\$ για την ανάπτυξη του. Η Κορέα προσπάθησε να εξελίξει το WiBro σε τοπική και ενδεχομένως και εθνική εναλλακτική επιλογή κυψελωτών συστημάτων στα 3.5 G ή 4 G. Αλλά το WiBro συναντήθηκε

⁵⁴ Ιωάννης Δ. Χαριτούδης, Διερεύνηση τεχνικών παραμέτρων για τη βέλτιστη διαχείριση πόρων και τη βέλτιστη ραδιοκάλυψη στα σύγχρονα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, Διπλωματική εργασία, Πάτρα, Απρίλιος 2013

⁵⁵ Ιωάννης Δ. Χαριτούδης, Διερεύνηση τεχνικών παραμέτρων για τη βέλτιστη διαχείριση πόρων και τη βέλτιστη ραδιοκάλυψη στα σύγχρονα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, Διπλωματική εργασία, Πάτρα, Απρίλιος 2013

με το WiMAX και εναρμονίστηκε με το παρόμοιο του OFDMA 802.16e πρωτόκολλο. Αυτό που κάνει το WiBro να ξεχωρίσει είναι ότι είναι μια κινητή τεχνολογία, πολύ καλά μελετημένη για ασύρματες υπηρεσίες, και το γεγονός ότι η ανάπτυξη του έγινε σε ένα περιβάλλον σύνθετο και ευρυζωνικά κορεσμένο. Έτσι το WiBro θα αναδυθεί εναντίον τεχνολογιών, όπως το 3G και υψηλής ευρυζωνικότητας καλωδιακές τεχνολογίες. Οπότε θα ενισχυθούν οι επαρχιακές αγορές που πάσχουν από μη ανεπτυγμένες ασύρματες τεχνολογίες, δηλαδή αγορές που θεωρούνται κατάλληλες για εφαρμογή του WiMAX.^[56]

4.5 WiMAX ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Μία από τις κοινές παρανοήσεις που πιθανώς συμβαίνουν στο WiMAX είναι το ότι πρόκειται να αποδίδει ταχύτητα της τάξεως των 70 Mbit/s σε απόσταση 48 χιλιομέτρων. Το παραπάνω είναι αληθές αλλά σε ιδανικές συνθήκες, συνεπώς στις περισσότερες περιπτώσεις δεν θα υφίστανται τέτοιου μεγέθους ταχύτητες σε τέτοιες αποστάσεις. Πρακτικά, σε περιβάλλοντα όπως είναι οι επαρχιακές περιοχές όπου οι κεραιές μετάδοσης θα έχουν οπτική επαφή και θα απέχουν μεταξύ τους 10 χιλιόμετρα θα αγγίζουν ταχύτητες της τάξης των 10 Mbit/s. Σε αστικά όμως περιβάλλοντα πιθανώς το 30% των κεραιών μετάδοσης να μην έχουν οπτική επαφή και συνεπώς οι χρήστες θα αγγίζουν ταχύτητες της τάξεως των 10 Mbit/s σε απόσταση 2 χιλιομέτρων. Άλλο ένα εξέχον θέμα για τις αδυναμίες του WiMAX είναι το ότι οι χρήστες στους διάφορους οριοθετημένους τομείς που θα βρίσκονται πρόκειται να μοιράζονται το bandwidth. Συνεπώς αναλόγως με την απασχόληση του δικτύου στους διάφορους τομείς θα εξαρτάται και η ανάλογη απόδοση. Τυπικά η κάθε κυψέλη θα μπορεί να παρέχει 100 Mbit/s backhaul. Οπότε αρκετοί χρήστες θα έχουν ένα εύρος υπηρεσιών 2, 4, 6, 8 ή 10 Mbit/s ούτως ώστε να μπορεί να διαμοιράζεται το φάσμα συχνοτήτων. Το παραπάνω μοντέλο μοιάζει αρκετά με αυτό του δικτύου GSM και του UMTS.^[57]

⁵⁶ <http://el.wikipedia.org/wiki/WiMAX>

⁵⁷ <http://el.wikipedia.org/wiki/WiMAX>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία γίνεται μια μελέτη ενός δικτύου WiMAX με τη χρήση δύο διαφορετικών λογισμικών, το OPNET Modeler και το Radio Mobile. Το δίκτυο θα εγκατασταθεί στην περιοχή της Πρέβεζας, στο χωριό Δρυόφυτον το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 45 χιλιομέτρων βόρειο-ανατολικά της Πρέβεζας και 25 χιλιόμετρα βόρειο-δυτικά της Άρτας. Πρόκειται για μια ημιορεινή περιοχή καθώς βρίσκεται σε υψόμετρο 270 μέτρα. Το δίκτυο στο τεχνικό κομμάτι θα είναι ένα δίκτυο με τοπολογία αστέρα και θα αποτελείται από 2 κεραιές βάσης ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ραδιοκάλυψη, καθώς είναι μια αρκετά λοφώδης περιοχή, όπου θα εκπέμπουν στη συχνότητα των 3.5 GHz και με εύρος 10MHz, δηλαδή στις αδειοδοτημένες συχνότητες από την EETT στην Ελλάδα και θα απευθύνεται κυρίως σε κινητούς χρήστες(mobile). Με βάση τις προσομοιώσεις θα εξάγουμε αποτελέσματα, τα οποία θα μας βοηθήσουν να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με το πόσους σταθμούς βάσης θα χρησιμοποιήσουμε, το ποσοστό που θα καλύπτει ο κάθε σταθμός βάσης, την απόσταση και το υψόμετρο που θα τοποθετηθούν οι σταθμοί βάσης, καθώς και αποτελέσματα σχετικά με τη ρυθμοαπόδοση(throughput) που είναι η πιο σημαντική μέτρηση του δικτύου μας.

5.1 ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ OPNET MODELER

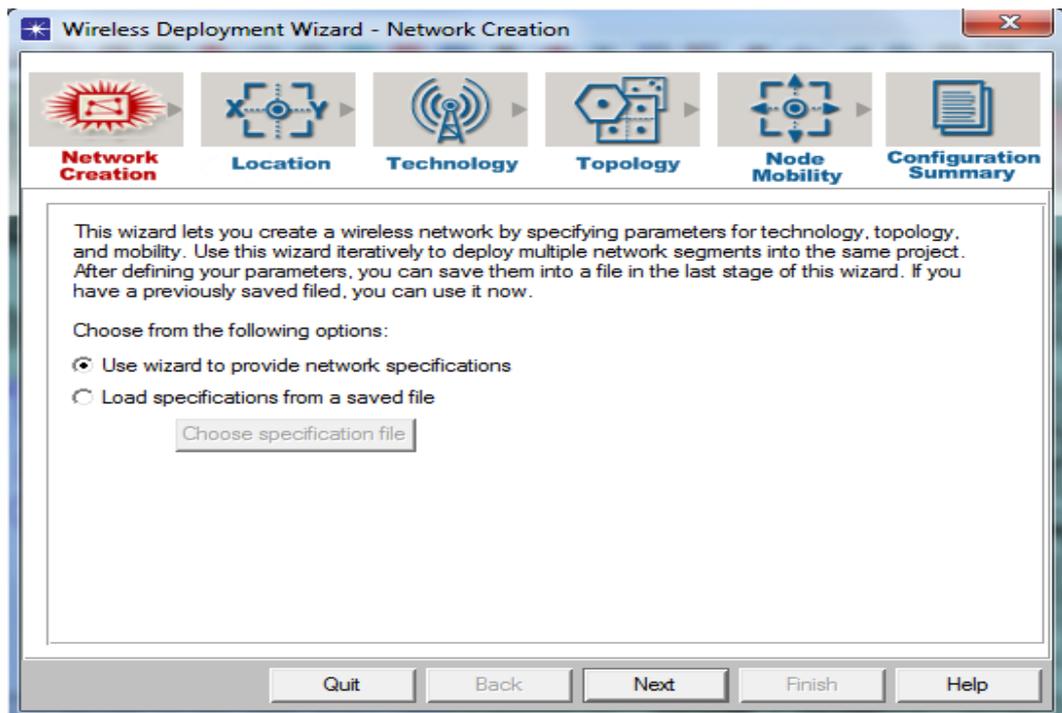
Παρακάτω θα αναλύσουμε την εγκατάσταση του δικτύου που δημιουργήσαμε με τη βοήθεια του προγράμματος OPNET Modeler. Το OPNET Modeler είναι ένα πρόγραμμα το οποίο παρέχει πολλές δυνατότητες σχετικά με τα δίκτυα και μπορεί να μας βοηθήσει σε ότι έχει να κάνει με τις επιδόσεις και την ποιότητα υπηρεσιών που θα παρέχουμε στους χρήστες.

Αρχικά η δημιουργία του δικτύου μας έγινε με τη χρήση του αυτόματου οδηγού “Deploy Wireless Network” που μας παρέχει το πρόγραμμα.



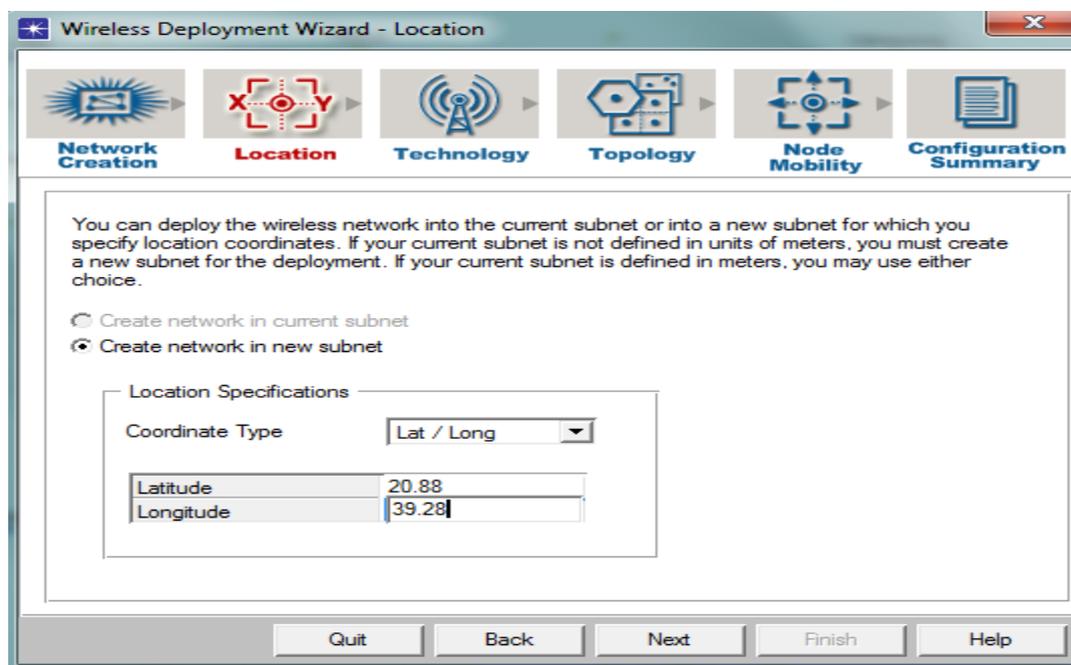
Εικόνα: Οδηγός δημιουργίας δικτύου

Έπειτα μας δίδεται η δυνατότητα να επιλέξουμε την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί, στη προκειμένη περίπτωση WiMAX, την τοπολογία του δικτύου μας, τους σταθμούς βάσης και τους κινητούς σταθμούς που θα μπορούν να υποστηριχθούν, καθώς και την ισχύ εκπομπής τους. Η περιοχή όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω είναι μια ημιορεινή και αγροτική περιοχή, κάτι που το λαμβάνουμε υπόψη λόγω των διάφορων απωλειών που μπορούν να δημιουργούνται. Οι κεραιές που χρησιμοποιήσαμε είναι δύο και αυτό γιατί όπως είπαμε και στη θεωρία η κεραιά με NLOS εκπέμπει καλά μέχρι περίπου 2 Km και επειδή στη προσομοίωση μας η απόσταση από τη πρώτη κεραιά βάσης μέχρι τη περιοχή εμβέλειας είναι περίπου στα 3 Km, γι'αυτό το λόγο χρησιμοποιήσαμε και μια δεύτερη κεραιά ώστε να καλυφθεί η περιοχή με το βέλτιστο δυνατό τρόπο.



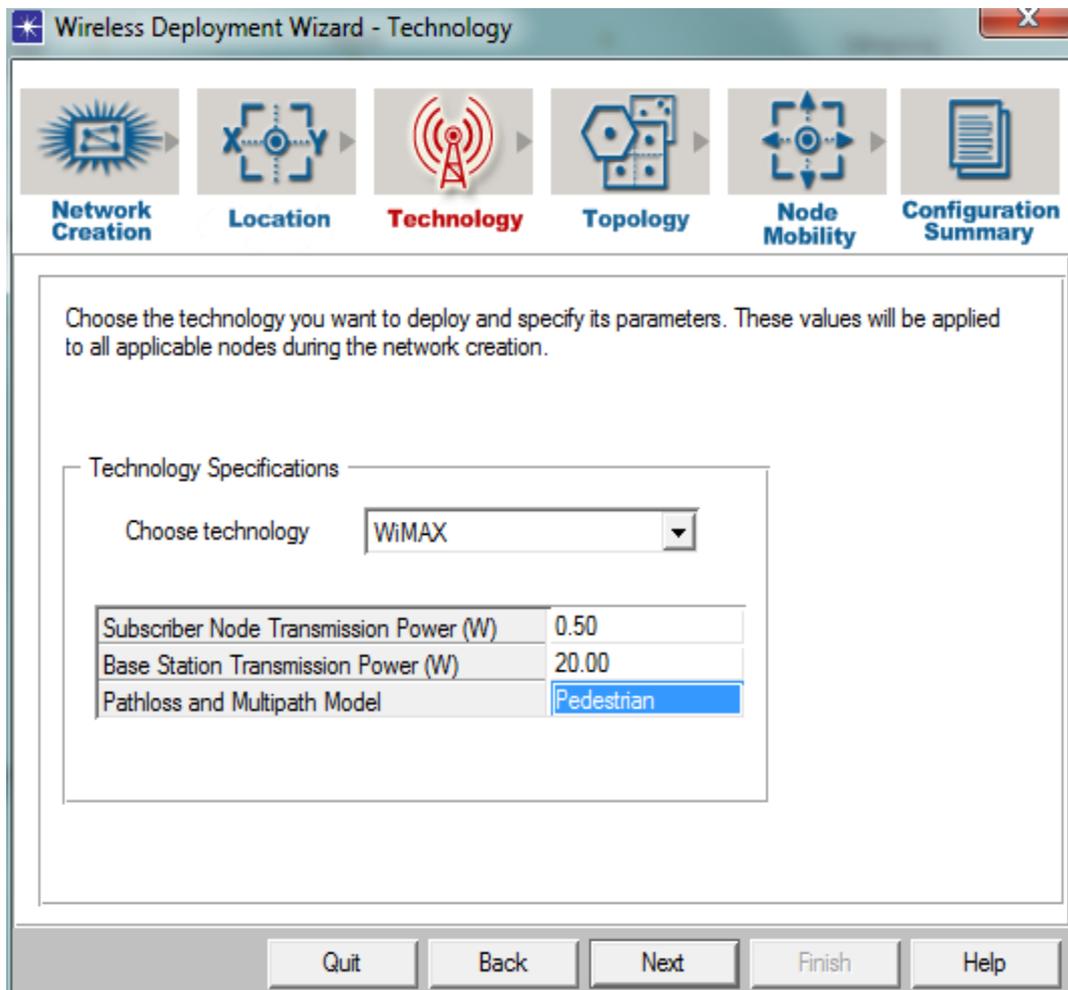
Εικόνα: Οδηγός δημιουργίας δικτύου

Στη παραπάνω εικόνα με την επιλογή που κάνουμε χρησιμοποιούμε ένα οδηγό για τις δικτυακές προδιαγραφές.



Εικόνα: Εκχώρηση συντεταγμένων δικτύου

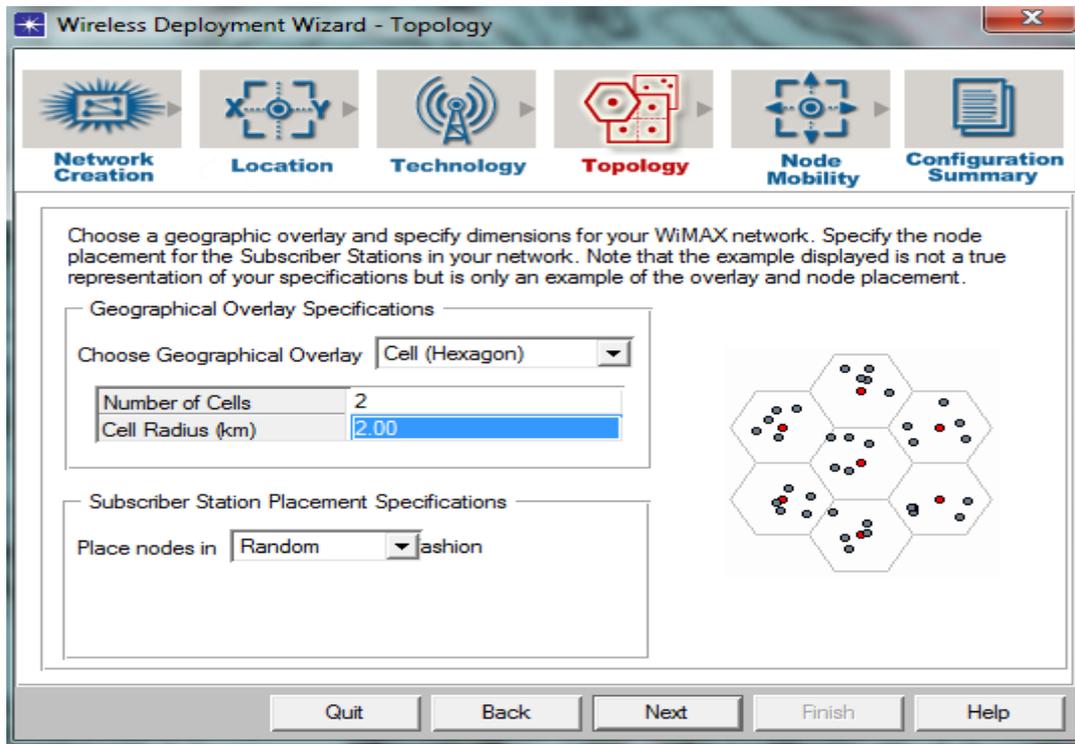
Όπως βλέπουμε παραπάνω στη συγκεκριμένη καρτέλα εισάγουμε το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής που θα εγκαταστήσουμε το δίκτυο.



Εικόνα: Επιλογή τεχνολογίας WiMAX

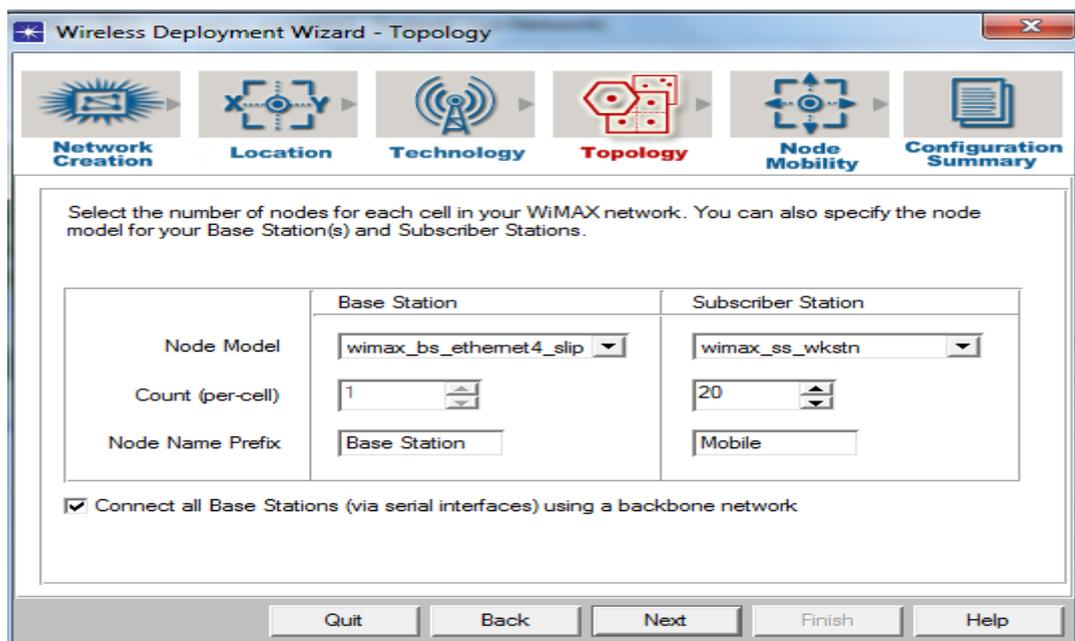
Στη παραπάνω εικόνα επιλέγουμε τη τεχνολογία που θα χρησιμοποιήσουμε, στη προκειμένη περίπτωση WiMAX, καθώς και τη εκπεμπόμενη ισχύ για τους σταθμούς βάσης και για τους σταθμούς συνδρομητών. Επίσης στην επιλογή για την απώλεια διαδρομής και το μοντέλο πολλαπλών διαδρομών επιλέγουμε «πεζός».

Στην επόμενη εικόνα επιλέγουμε τον αριθμό των κελιών και την ακτίνα τους, καθώς και τη θέση των σταθμών.



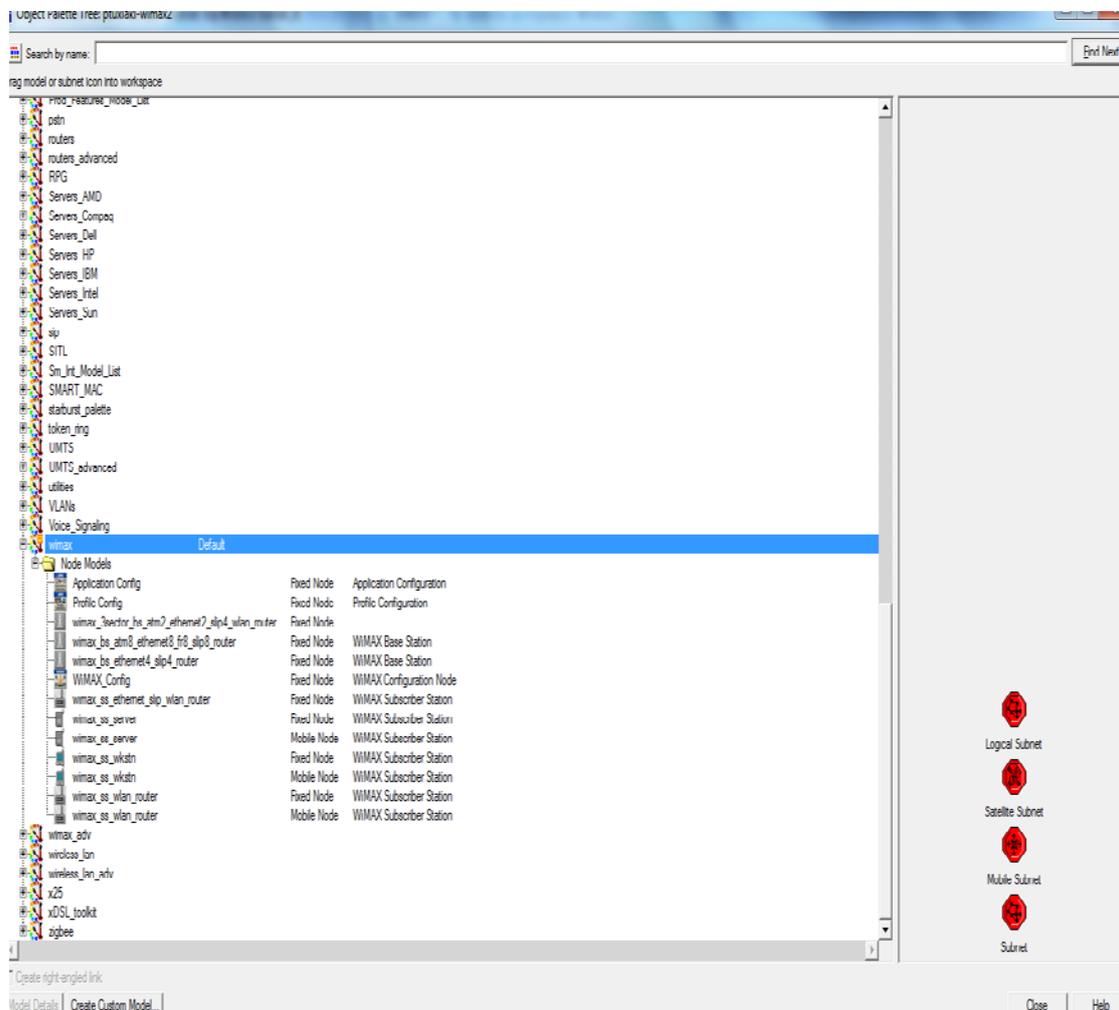
Εικόνα: Δημιουργία κελιών και εμβέλειας

Έπειτα επιλέγουμε το μοντέλο τόσο για τους σταθμούς βάσης, όσο και για τους σταθμούς συνδρομητών, αλλά και του αριθμού των σταθμών ανά base station.



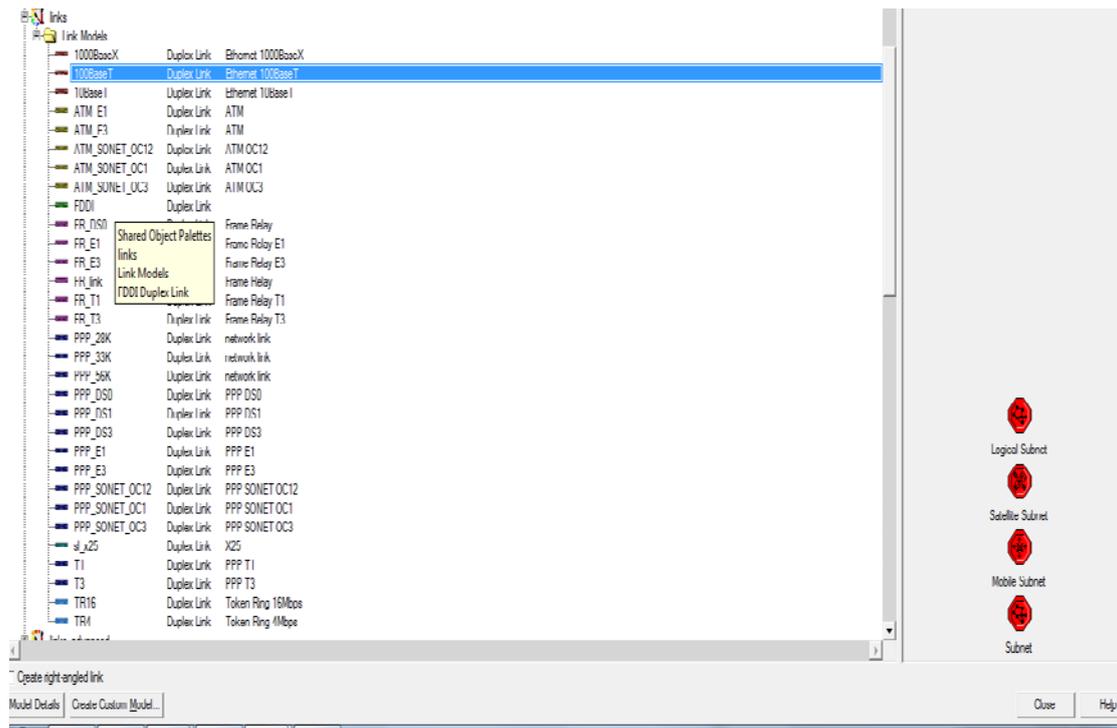
Εικόνα: Αριθμός σταθμών ανά κεραία

Μετά τις αρχικές ρυθμίσεις ανοίγουμε την γραμμή εργαλείων (object palette) από την οποία θα επιλέξουμε τα διάφορα αντικείμενα που υπολείπονται για την προσομοίωση μας, καθώς και έπειτα να κάνουμε τις κατάλληλες τροποποιήσεις που θα χρειαστούν. Παρακάτω θα εισάγουμε ένα Video server και ένα HTTP server, καθώς και ένα Router το οποίο θα δρομολογεί τη κίνηση μεταξύ των σταθμών βάσης αλλά και των servers. Για την διασύνδεση του Router με τους σταθμούς βάσης χρησιμοποιήσαμε ενσύρματη σύνδεση 100BaseT με ονομαστικό data rate 100Mbps.



Εικόνα: Γραμμή εργαλείων (object palette)

Εδώ βλέπουμε τη καρτέλα object palette, όπου θα χρησιμοποιήσουμε τα απαραίτητα εργαλεία για τη προσομοίωση μας.



Εικόνα: Επιλογή διασύνδεσης

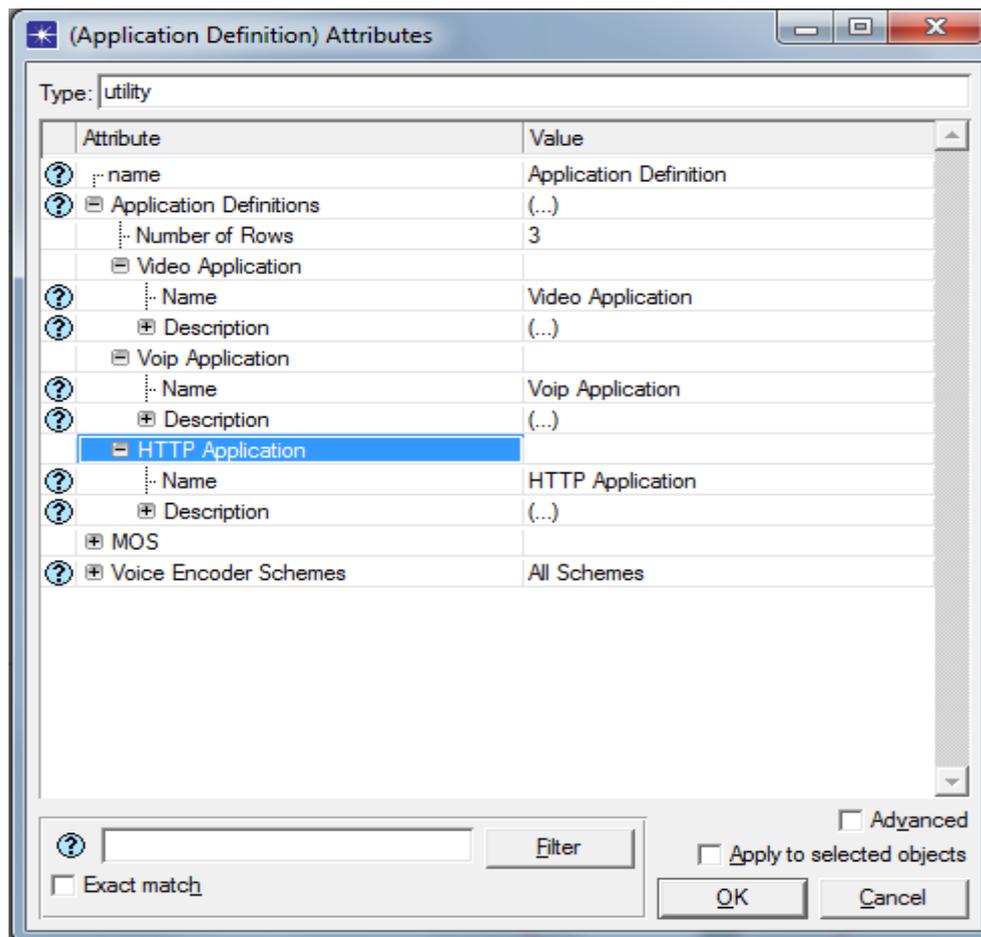
Παραπάνω βλέπουμε τη διασύνδεση που χρησιμοποιήσαμε για τη σύνδεση των σταθμών βάσης και του Router.

Στην συνέχεια θα προσθέσουμε 3 αντικείμενα που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση μας:

- Το αντικείμενο διαμόρφωσης εφαρμογής (Application Definition) περιέχει ρυθμίσεις τυποποιημένων εφαρμογών
- Το αντικείμενο ορισμού προφίλ φορτίου δικτύου (Profile Definition) μοντελοποιεί τη πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων
- Το (WiMAX Configuration) όπου περιέχει τις απαραίτητες ρυθμίσεις για τη παραμετροποίηση του δικτύου μας

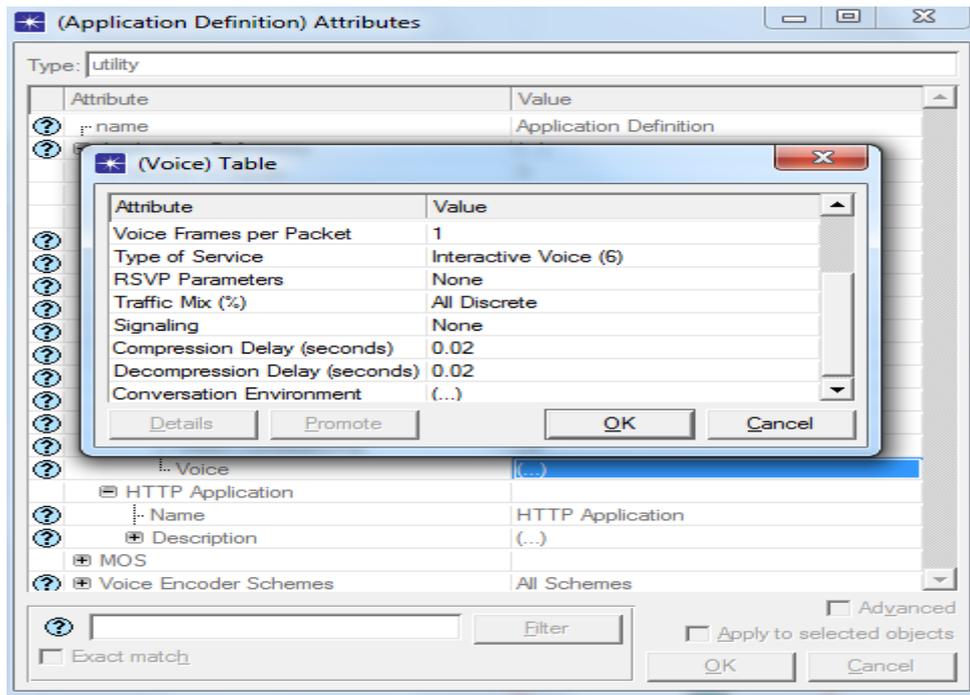
Έπειτα αναλύουμε το εργαλείο Application Definition το οποίο δημιουργεί τη τηλεπικοινωνιακή κίνηση στο δίκτυο μας, καθώς είναι υπεύθυνο για τις παρεχόμενες υπηρεσίες που θα παρέχουμε στους χρήστες. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση θα παρέχουμε τις εξής υπηρεσίες HTTP υπηρεσία, Voice over IP(VoIP), Video on Demand(VoD).

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τις 3 παρεχόμενες υπηρεσίες.



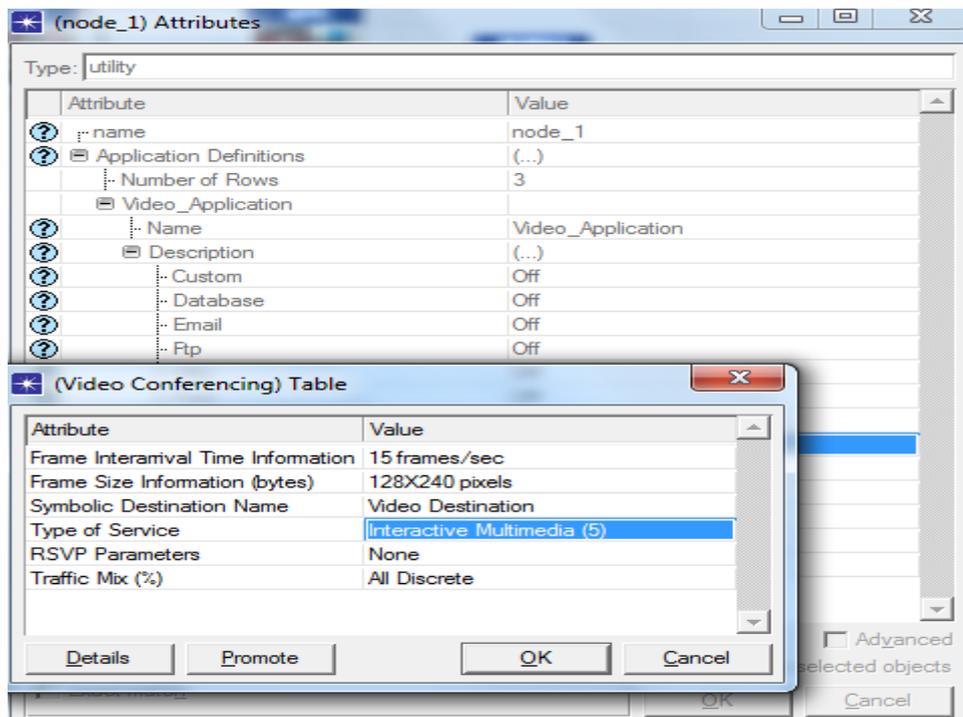
Εικόνα: Εφαρμογές που θα προσφέρουμε στους χρήστες

Στην επόμενη εικόνα θα δούμε πως θα παραμετροποιήσουμε το VoIP Application ώστε να προσφέρουμε υπηρεσίες φωνής στους χρήστες. Βλέπουμε ότι στο πεδίο για τη ποιότητα υπηρεσίας Type of Service(Tos) ορίζουμε Interactive Voice(6).

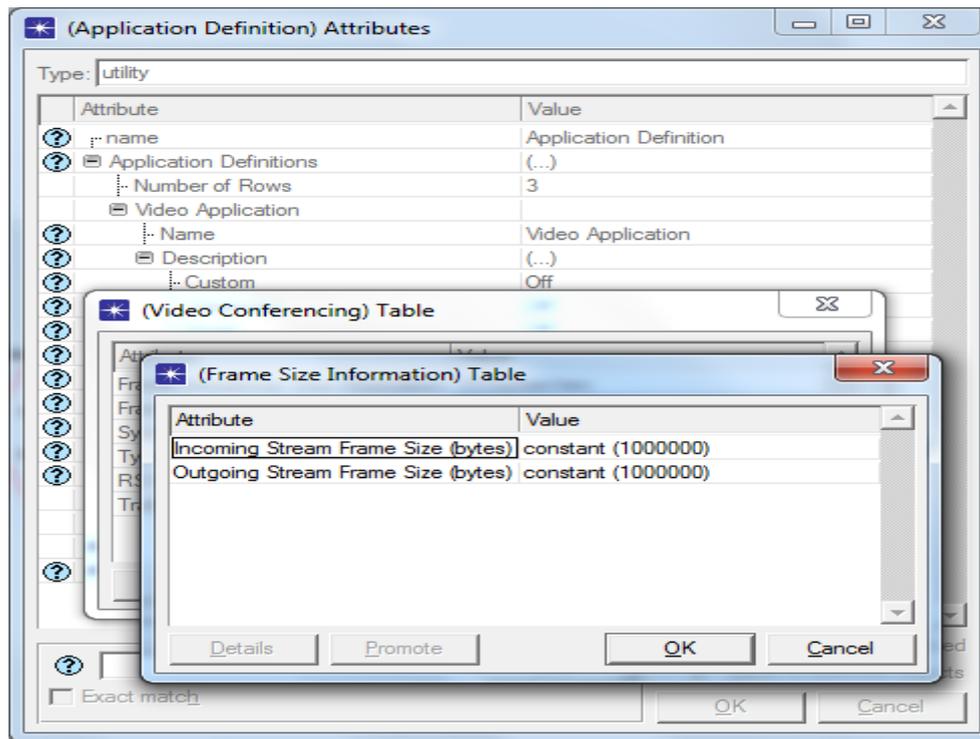


Εικόνα: Ρύθμιση ToS(Type of Service)

Έπειτα θα ορίσουμε την υπηρεσία που θα προσφέρουμε για Video Application. Θα δούμε ότι στο πεδίο Type of Service(ToS) το οποίο καθορίζει τη ποιότητα της υπηρεσίας όπως είπαμε και παραπάνω, επιλέξαμε Interactive Multimedia(5), καθώς και το Frame Size Information(bytes) το οποίο καθορίζει και σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του δικτύου μας σε throughput, το ρυθμίσαμε να είναι 128*240 pixels.

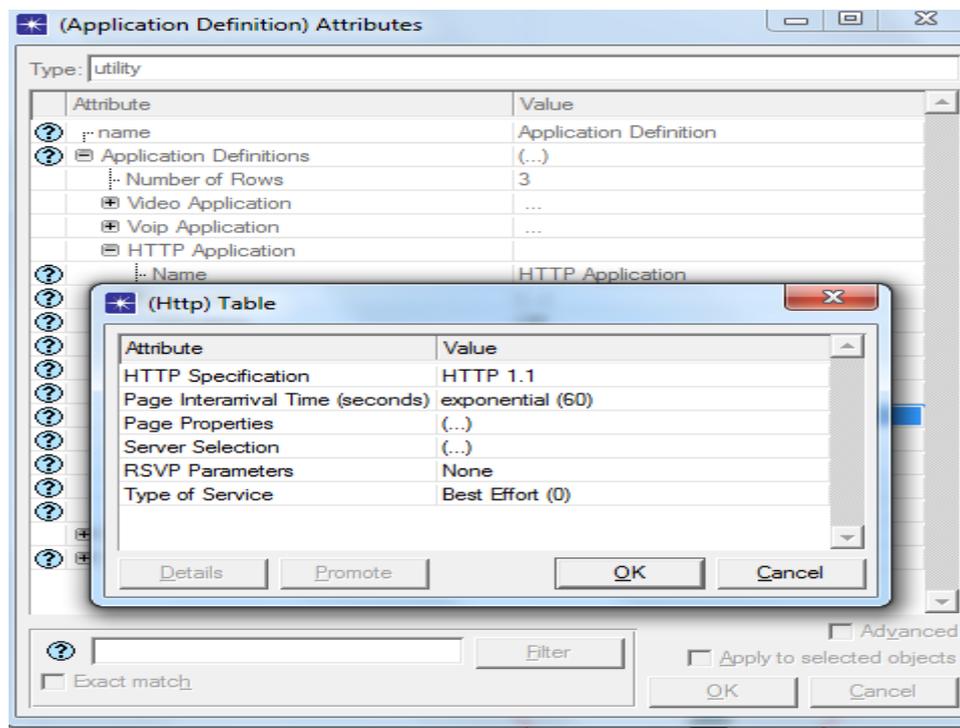


Εικόνα: Ρύθμιση ToS(Type of Service)



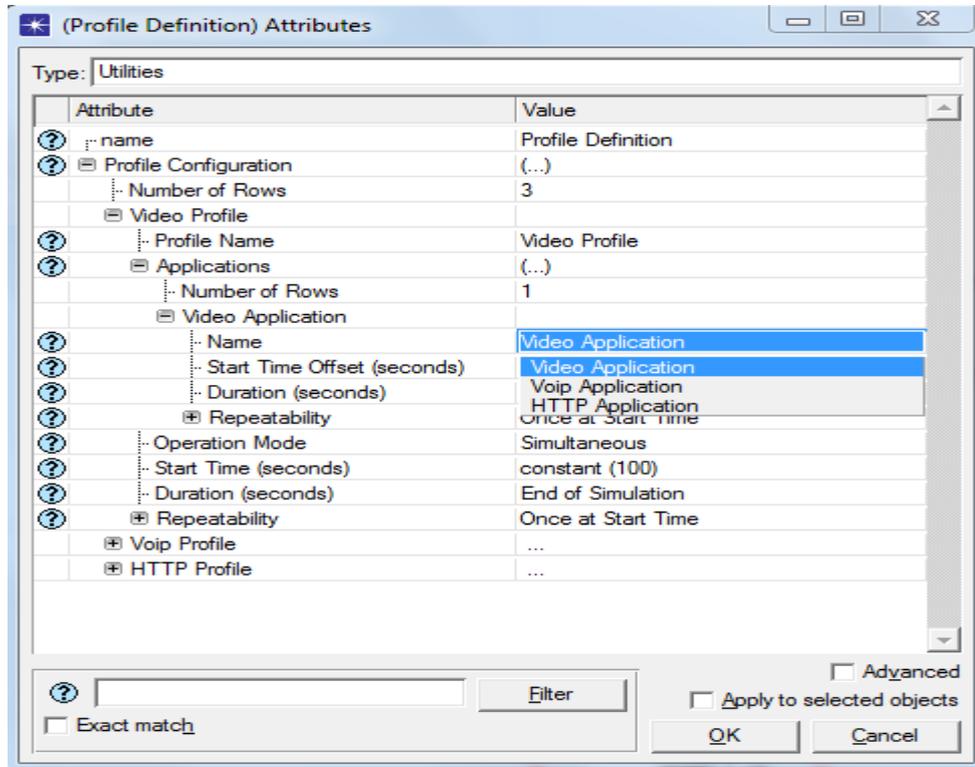
Εικόνα: Ρύθμιση Frame size information

Και τέλος θα δείξουμε και τη παροχή της τρίτης υπηρεσίας που θα παρέχουμε στο χρήστη, την HTTP υπηρεσία στη οποία θα δώσουμε ως Type Of Service(Tos) σε Best Effort(0).

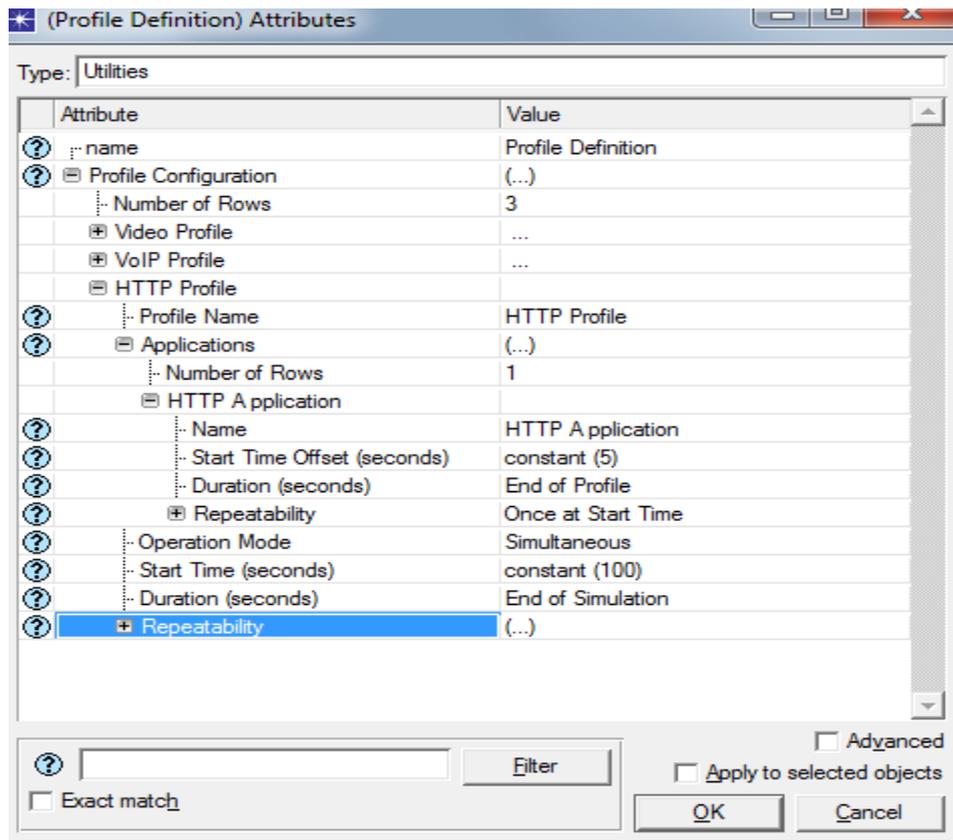


Εικόνα: Ρύθμιση ToS(Type of Service)

Επόμενο βήμα να καθορίσουμε τις ρυθμίσεις για το Profile Definition, όπου θα δημιουργήσουμε τρία προφίλ, ένα για κάθε υπηρεσία.



Εικόνα: Δημιουργία 3 προφίλ



Εικόνα: Παραμετροποίηση Profile Definition

Στη παραπάνω εικόνα φαίνονται οι ρυθμίσεις που έχουμε κάνει στο προφίλ HTTP, οι οποίες είναι κάποιες τυπικές ρυθμίσεις που αφορούν τη προσομοίωση. Οι επιλογές είναι ίδιες και στα υπόλοιπα προφίλ.

Παρακάτω θα δημιουργήσουμε 3 τύπους υπηρεσίας στο WiMAX Configuration οι οποίοι είναι μέρος του MAC Layer και θα τους παρέχουμε στους χρήστες ανάλογα με την υπηρεσία που θα παρέχεται.

name	Wimax Configuration
AMC Profile Sets Definitions	(...)
Contention Parameters	(...)
Efficiency Mode	Efficiency Enabled
MAC Service Class Definitions	(...)
Number of Rows	3
Row 0	
Service Class Name	Gold
Scheduling Type	UGS
Maximum Sustained Traffic Rate (b...	10 Mbps
Minimum Reserved Traffic Rate (bps)	1 Mbps
Maximum Latency (milliseconds)	30.0
Maximum Traffic Burst (bytes)	0
Traffic Priority	Not Used
Unsolicited Poll Interval (milliseconds)	Auto Calculated

Εικόνα: Δημιουργία Gold κλάσης στο QoS

Παραπάνω βλέπουμε τη δημιουργία της Gold κλάσης η οποία αναφέρεται στον UGS τύπο υπηρεσίας και έχει να κάνει με υπηρεσίες Video on Demand, καθώς και τεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν να κάνουν με τη μετάδοση της πληροφορίας.

?	name	Wimax Configuration
?	⊕ AMC Profile Sets Definitions	(...)
?	⊕ Contention Parameters	(...)
?	Efficiency Mode	Efficiency Enabled
?	⊖ MAC Service Class Definitions	(...)
	Number of Rows	3
	⊕ Row 0	...
	⊖ Row 1	
?	Service Class Name	Silver
?	Scheduling Type	rtPS
?	Maximum Sustained Traffic Rate (b...	1 Mbps
?	Minimum Reserved Traffic Rate (bps)	0.5 Mbps
?	Maximum Latency (milliseconds)	30.0
?	Maximum Traffic Burst (bytes)	0
?	Traffic Priority	Not Used
?	Unsolicited Poll Interval (milliseconds)	Auto Calculated

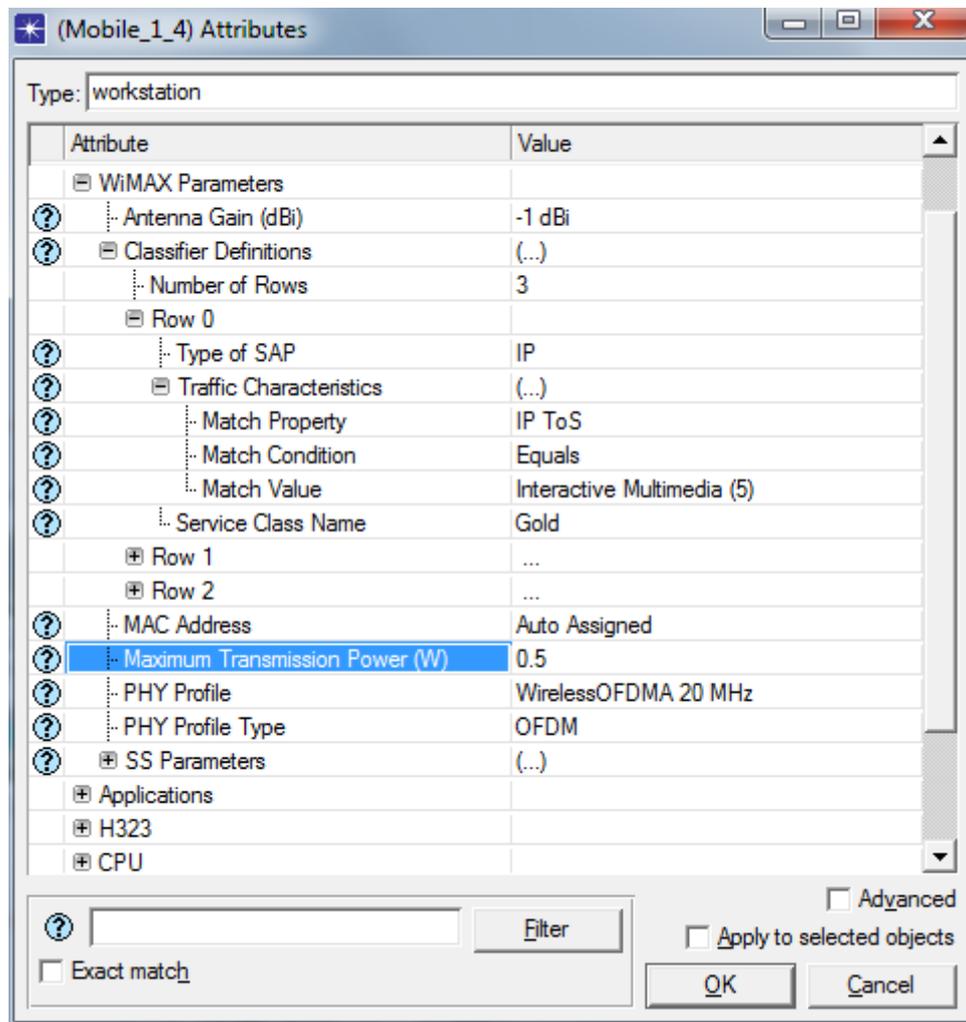
Εικόνα: Δημιουργία Silver κλάσης στο QoS

Εδώ βλέπουμε την απεικόνιση της Silver κλάσης, η οποία αναφέρεται με στο rtPS τύπο υπηρεσίας, ο οποίος έχει να κάνει με υπηρεσίες φώνης. Έχουμε ρυθμίσει το μέγιστος διατηρητέος ρυθμός κίνησης στο 1 Mbps και τον ελάχιστο δεσμευμένο ρυθμό κίνησης στο 0.5 Mbps. Επίσης σαν μέγιστο λανθάνων χρόνο το θέσαμε στα 30 millisecond.

name	Wimax Configuration
⊖ AMC Profile Sets Definitions	(...)
⊖ Contention Parameters	name (...)
Efficiency Mode	Efficiency Enabled
⊖ MAC Service Class Definitions	(...)
Number of Rows	3
⊕ Row 0	...
⊕ Row 1	...
⊖ Row 2	
Service Class Name	Bronze
Scheduling Type	Best Effort
Maximum Sustained Traffic Rate (b...	384 Kbps
Minimum Reserved Traffic Rate (bps)	384 Kbps
Maximum Latency (milliseconds)	30.0
Maximum Traffic Burst (bytes)	0
Traffic Priority	Not Used
Unsolicited Poll Interval (milliseconds)	Auto Calculated

Εικόνα: Δημιουργία Bronze κλάσης στο QoS

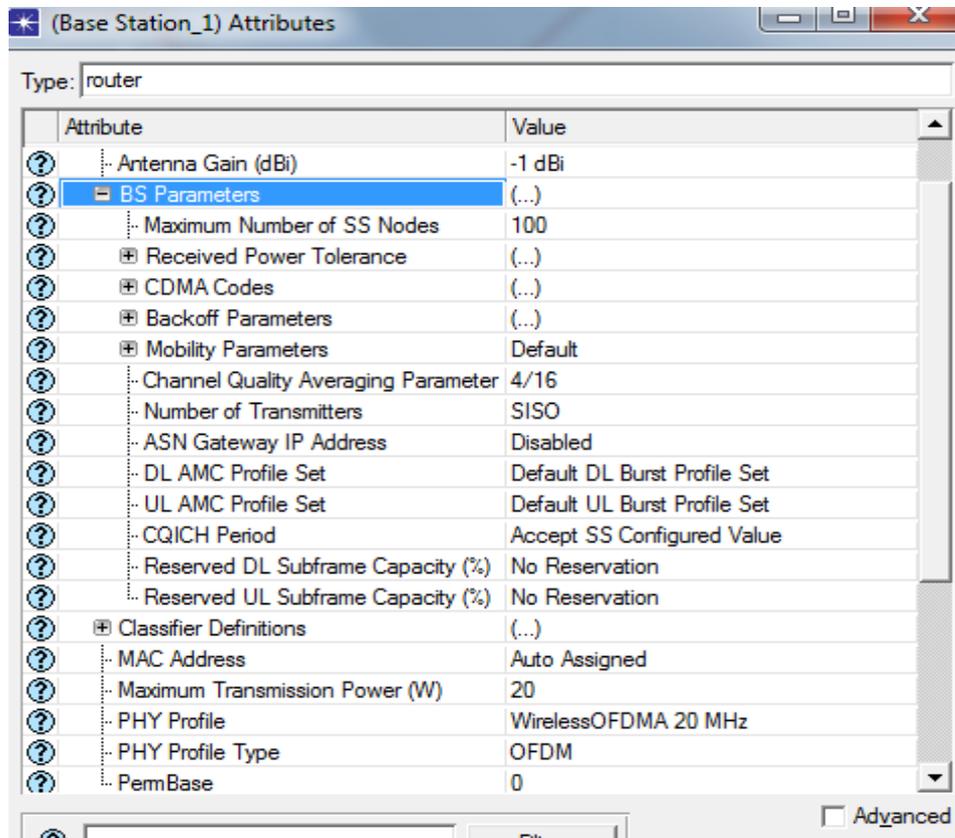
Και τέλος η τελευταία κλάση που ονομάζεται Bronze και αναφέρεται στον Best Effort τύπο υπηρεσίας. Αυτός ο τύπος υπηρεσίας ενδείκνυται για υπηρεσίες FTP και HTTP. Επίσης βλέπουμε και εδώ τις ρυθμίσεις όσον αφορά τη μετάδοση πληροφορίας.



Εικόνα: Εκχώρηση τύπου ποιότητας υπηρεσίας στο χρήστη

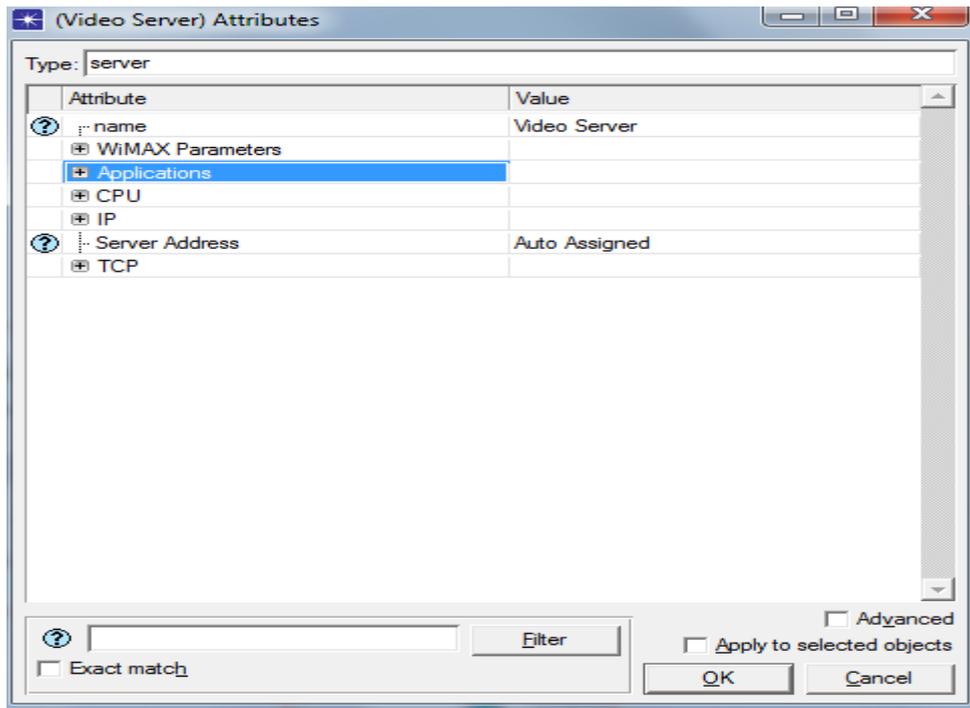
Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε την εκχώρηση των τριών τύπων υπηρεσίας που δημιουργήσαμε στους χρήστες.

Έπειτα θα δούμε τις επιλογές σχετικά με τους base stations και τις τροποποιήσεις που μπορούμε να κάνουμε σχετικά με τις παραμέτρους του WiMAX και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.



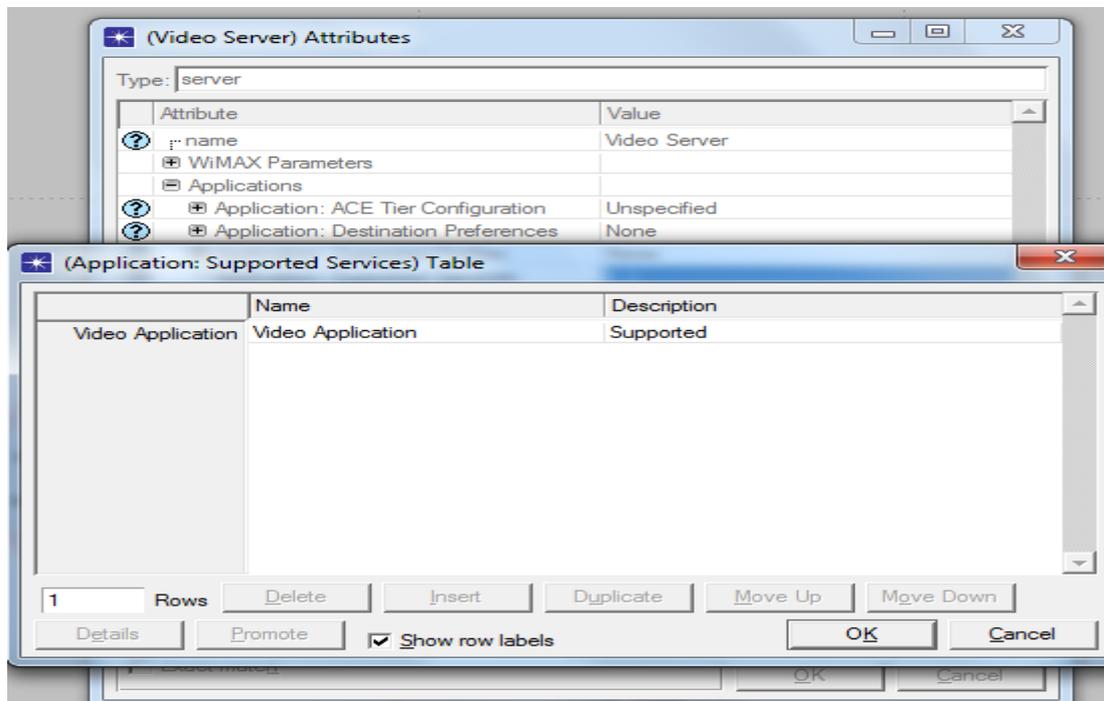
Εικόνα: Λειτουργίες σταθμού βάσης

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα έχουμε θέσει ως μέγιστο αριθμό κόμβων «είκοσι», ακόμη η μέγιστη ισχύς του base station είναι 20 (W). Επίσης βλέπουμε ότι η υλοποίηση του φυσικού επιπέδου χρησιμοποιεί τεχνολογία OFDMA στα 20 MHz. Ακόμη έχουμε τη δυνατότητα να ορίσουμε την MAC Address του σταθμού βάσης.



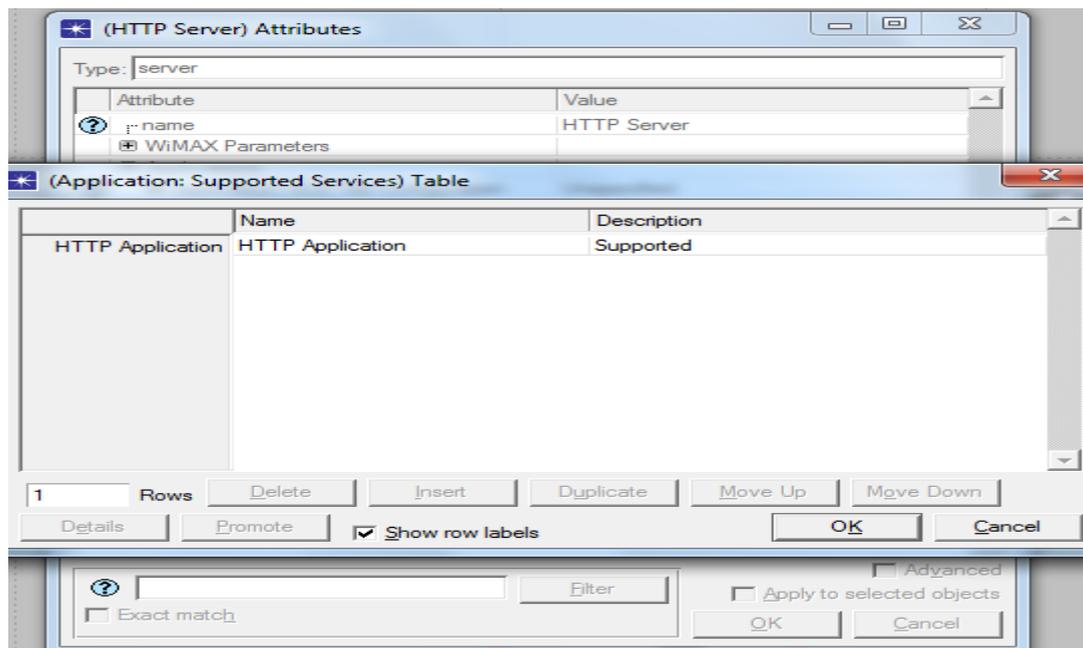
Εικόνα: Παραμετροποίηση των Server του δικτύου

Έπειτα θα δούμε την διαδικασία παραμετροποίησης των Servers του δικτύου.



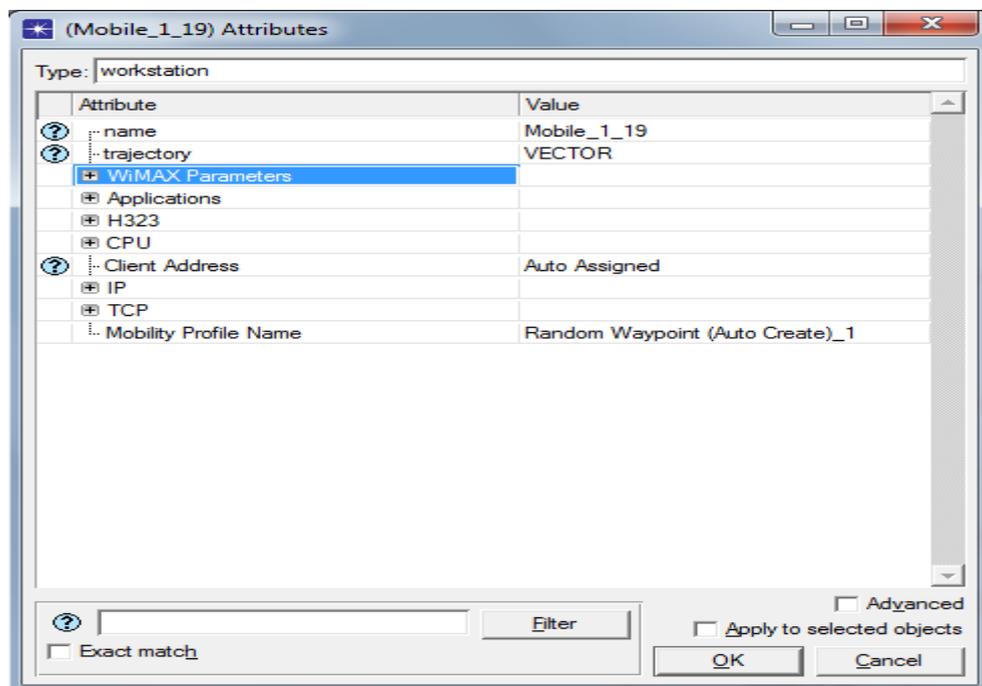
Εικόνα: Δημιουργία Video Server

Όπως βλέπουμε στο Supported Services και στους 2 server θα προσθέσουμε την υπηρεσία που θα προσφέρει ο κάθε server αντίστοιχα.



Εικόνα: Ρυθμίσεις του HTTP Server

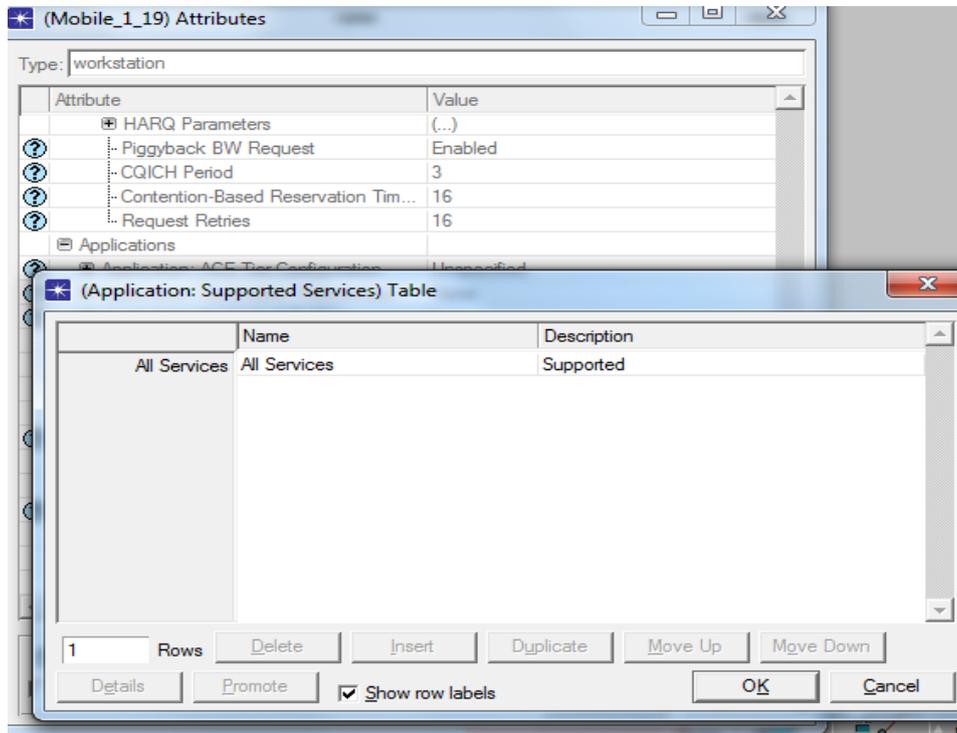
Τώρα θα δούμε πως μπορούμε στο κάθε χρήστη ξεχωριστά να επιλέξουμε ποιες υπηρεσίες θα του παρέχονται.



Εικόνα: Παραμετροποίηση σταθμού συνδρομητή

Όπως βλέπουμε στις εικόνες πηγαίνουμε στην επιλογή applications:supported services και επιλέγουμε την υπηρεσία που θα

παρέχουμε στο χρήστη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση στο χρήστη 19 παρέχουμε όλες τις υπηρεσίες.



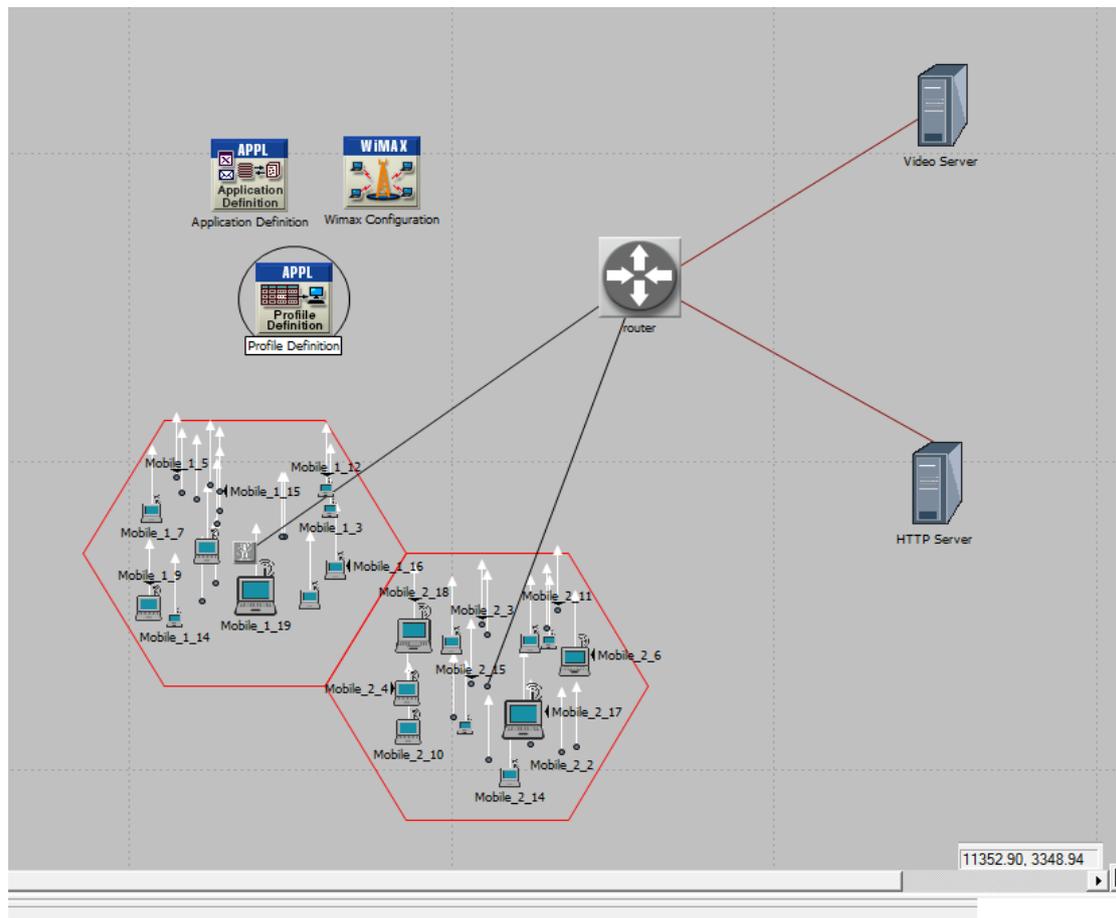
Εικόνα: Παροχή υπηρεσιών στο χρήστη

Και τέλος θα δούμε τις ρυθμίσεις που έχουμε κάνει για τη προσομοίωση του δικτύου μας. Όπως βλέπουμε παρακάτω η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιήσαμε είναι OFDMA 2048 σημείων. Επιλέξαμε κεντρική συχνότητα 3.5GHz και εύρος ζώνης 10MHz για καλύτερη απόδοση του δικτύου. Τώρα όσον αφορά την ισχύ εκπομπής των κεραιών που χρησιμοποιήσαμε με βάση την ισχύουσα νομοθεσία της Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων-ΕΕΤΤ, η οποία αναφέρει ότι η ακτινοβολούμενη ισχύ μιας κεραιάς που εκπέμπει στα 3.5GHz δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 30 dBm (1W). Η ισχύς εκπομπής των σταθμών βάσης του δικτύου μας θα έχουν ισχύ 0.5 Watt, ενώ η ισχύς των base stations θα είναι στα 20Watt. Να επισημάνουμε ότι το πρόγραμμα OPNET Modeler δε μοντελοποιεί κάποια απώλεια της κεραιάς εκπομπής. Στη παρακάτω εικόνα βλέπουμε την εφαρμογή των ρυθμίσεων.

name	Wimax Configuration
AMC Profile Sets Definitions	(...)
Contention Parameters	(...)
Efficiency Mode	Efficiency Enabled
MAC Service Class Definitions	(...)
OFDM PHY Profiles	(...)
Number of Rows	1
Row 0	
Profile Name	WirelessOFDMA 20 MHz
Frame Duration (milliseconds)	5
Symbol Duration (microseconds)	102.86 (n=28/25, delta_f = 10.94 kHz, ...)
Number of Subcarriers	2048
Frame Structure	(...)
Duplexing Technique	TDD
TC Sublayer Overhead Factor	0
Frequency Band	(...)
Base Frequency (GHz)	3.5
Bandwidth (MHz)	10
Frequency Division	(...)
SC PHY Profiles	(...)

Εικόνα: Ρυθμίσεις προσομοίωσης δικτύου

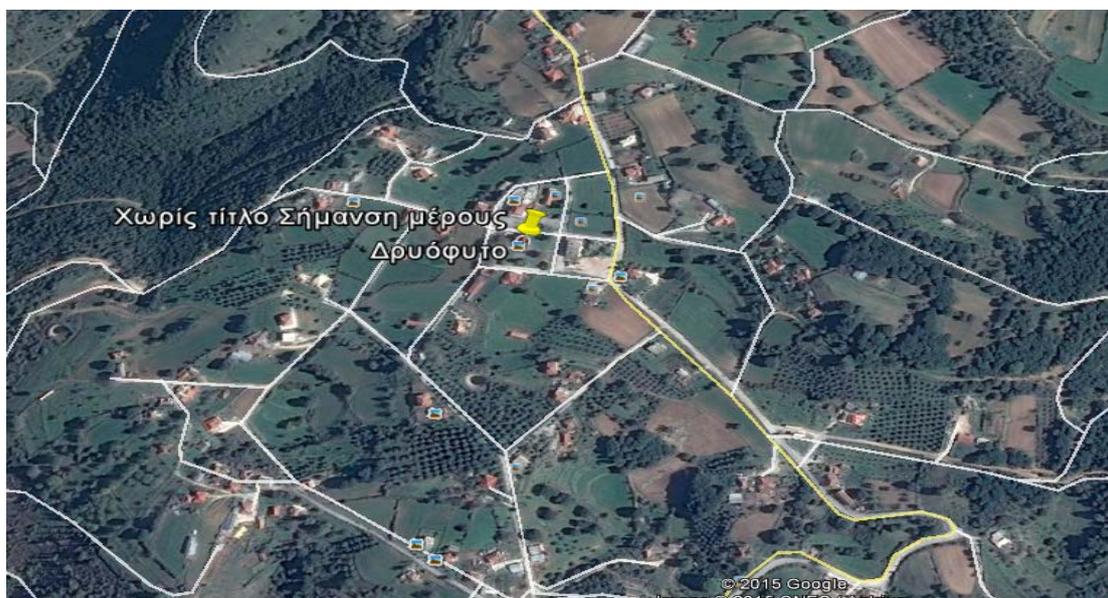
Τέλος θα δούμε τη τελική όψη του δικτύου στο OPNET Modeler.



Εικόνα: Τελική μορφή δικτύου

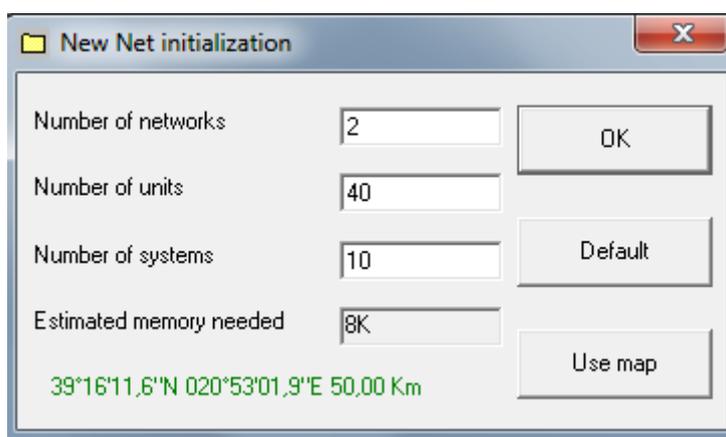
5.2 ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ RADIO MOBILE

Παρακάτω θα δείξουμε τα βασικά βήματα για την μελέτη και προσομοίωση του ασύρματου δικτύου στη περιοχή του Δρυοφύτου Πρεβέζης με τη βοήθεια του λογισμικού Radio Mobile.



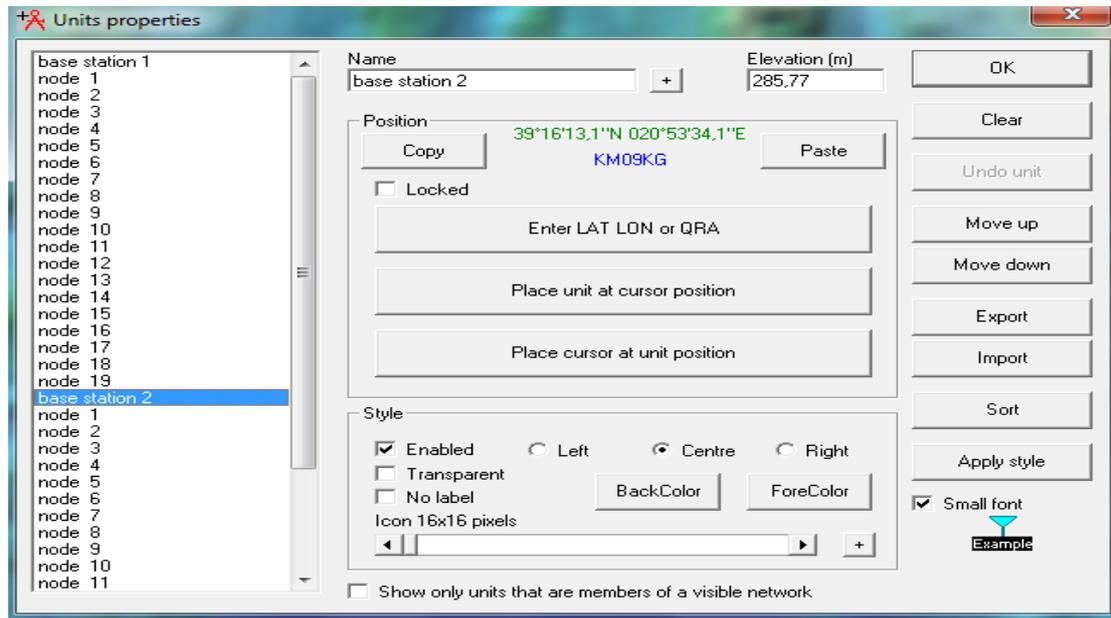
Εικόνα: Περιοχή εγκατάστασης δικτύου μέσω google earth

Αρχικά βλέπουμε τη δημιουργία του δικτύου, όπου εισάγουμε τον αριθμό των σταθμών και των δικτύων που θα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και μάλιστα με δυνατότητα μεγαλύτερου αριθμού συνδέσεων και μονάδων. Επίσης εισάγουμε το χάρτη και τις συντεταγμένες της περιοχής που θα δουλέψουμε.

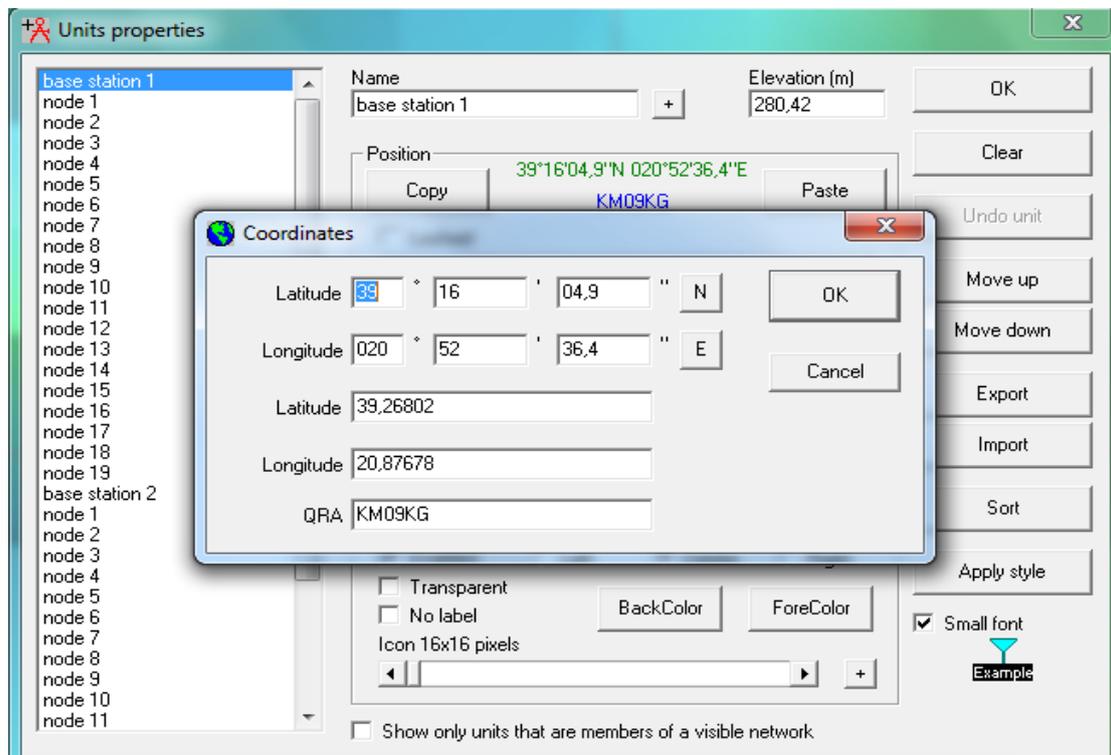


Εικόνα: Δημιουργία δικτύου σε Radio Mobile

Έπειτα ορίζουμε τις συντεταγμένες (γεωγραφικό πλάτος και μήκος) των σταθμών βάσης και των σταθμών συνδρομητών.

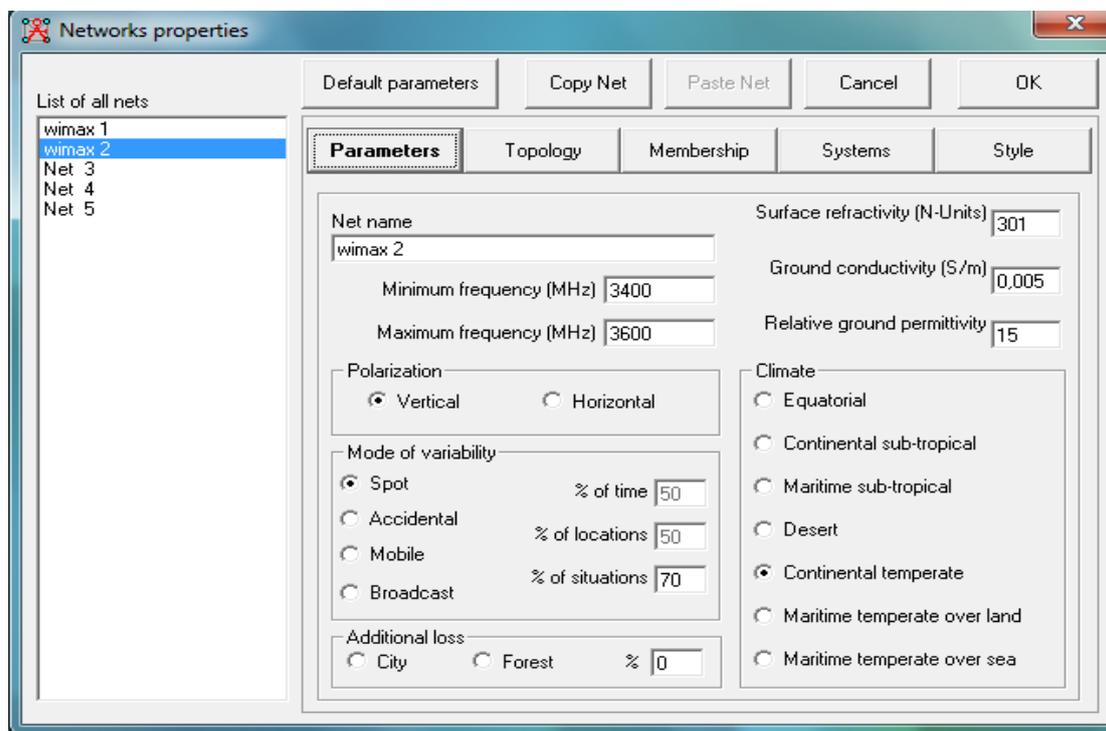


Εικόνα: Ρυθμίσεις σταθμών βάσης και συνδρομητών



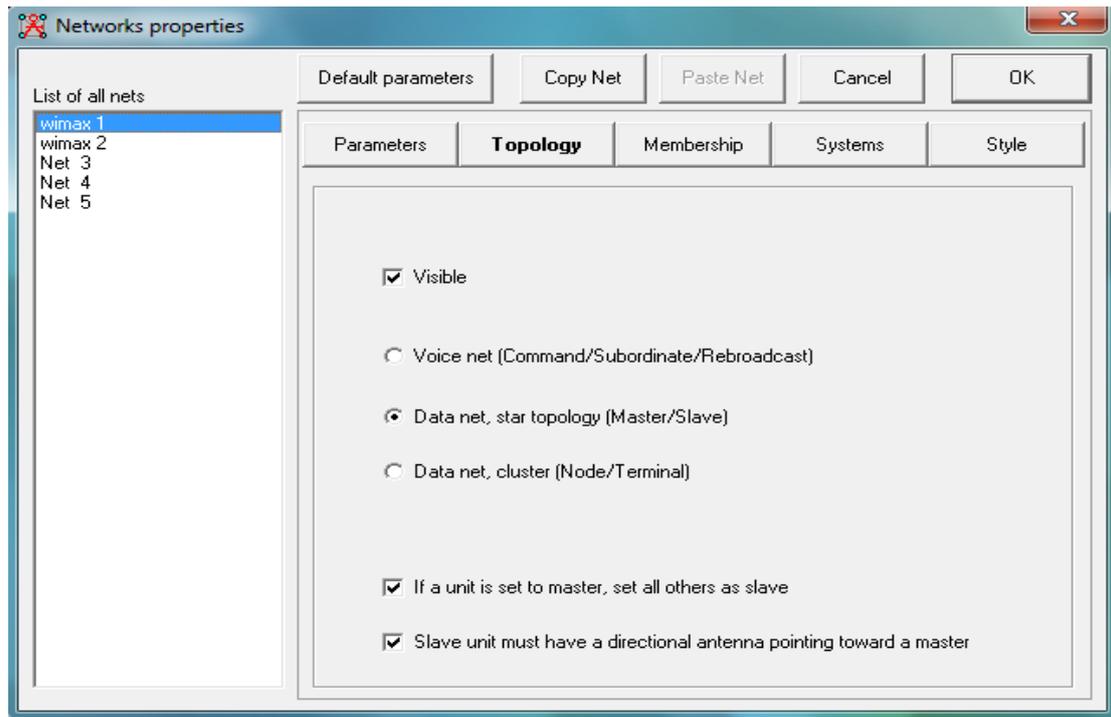
Εικόνα: Εκχώρηση συντεταγμένων

Στη συνέχεια ορίζεται η κάθε ζεύξη ξεχωριστά (ανά ζεύγη σημείων). Επιλέγοντας ταυτόχρονα τη συχνότητα ασύρματης ζεύξης, τον τρόπο ζεύξης (δηλαδή αν θα είναι σταθερή, κινητή κλπ.), το κλίμα που επικρατεί, αν υπάρχουν επιπλέον απώλειες λόγω περιοχής π.χ (αν είναι σε πόλη), αν υπάρχουν διαθλαστικότητες - αγωγιμότητες και το πώς θα εκπέμπεται το σήμα (οριζόντια ή κάθετα).



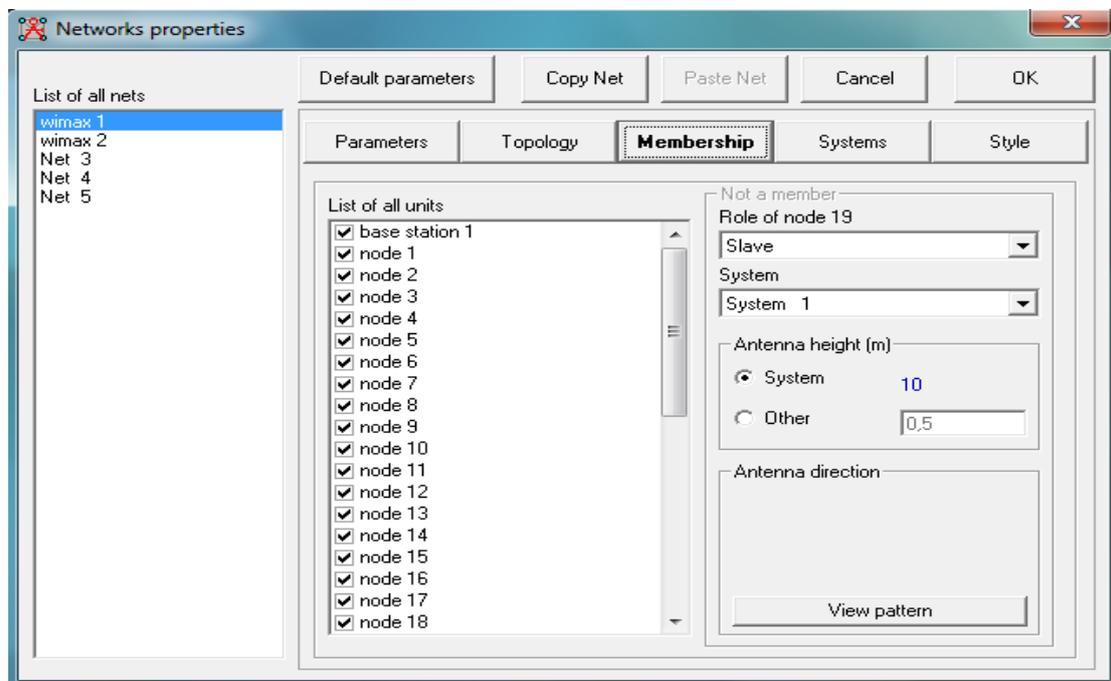
Εικόνα: Παραμετροποίηση δικτύου

Εμείς όπως βλέπουμε παραπάνω έχουμε δώσει συχνότητα 3400-3600MHz, επίσης ορίζεται η πόλωση η οποία είναι κατακόρυφη. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής του κλίματος της περιοχής, στη συγκεκριμένη περίπτωση ήπιο ηπειρωτικό. Επίσης δίνονται τιμές που έχουν να κάνουν με τη διαθλαστικότητα εδάφους (301 N), την αγωγιμότητα του εδάφους (0,005 S/m) και τη σχετική διαπερατότητα εδάφους(15).



Εικόνα: Επιλογή τοπολογίας δικτύου

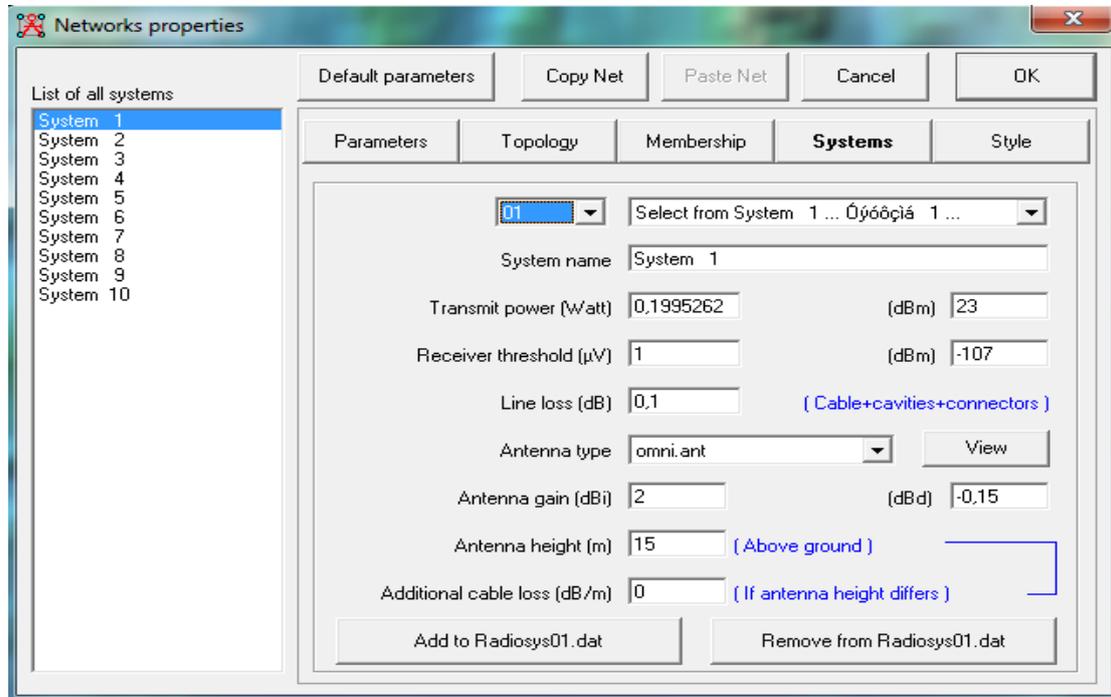
Έπειτα επιλέγουμε τη τοπολογία του δικτύου μας. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε τοπολογία αστέρα.



Εικόνα: Ορισμός ζεύξεις

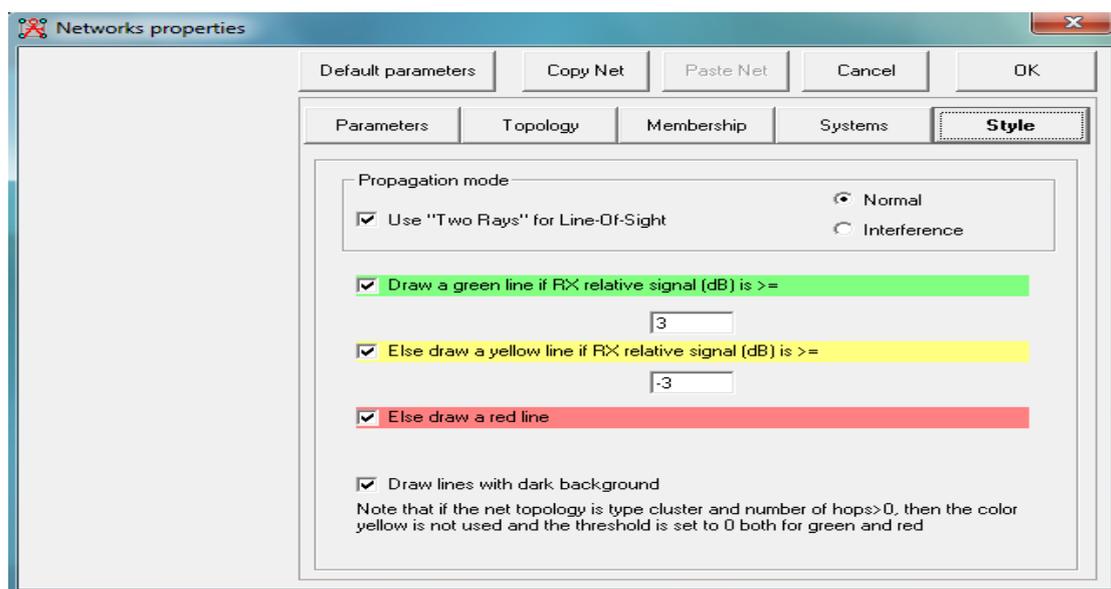
Επόμενη επιλογή η συσχέτιση μεταξύ των ζεύξεων που πρέπει να δημιουργήσουμε για το δίκτυο μας.

Έπειτα ορίζουμε τις παραμέτρους που έχουν να κάνουν με την ισχύ της κεραίας, το κέρδος της κεραίας, τυχόν απώλειες γραμμής(καλώδια+φθορές+ενώσεις), ύψος κεραίας.



Εικόνα: Τεχνικές ρυθμίσεις δικτύου

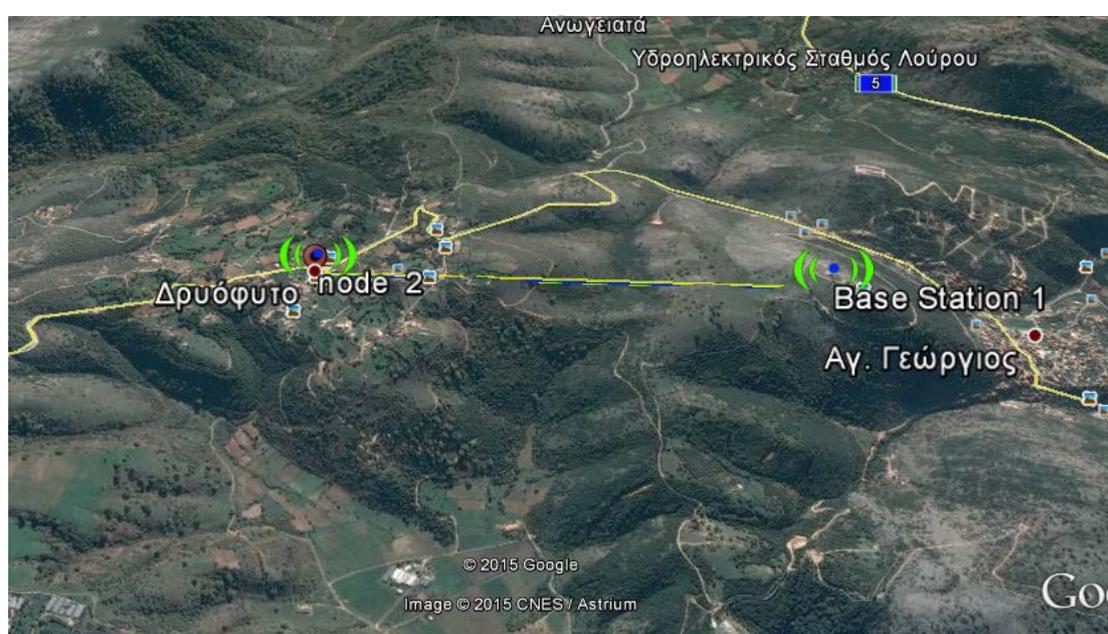
Παρακάτω βλέπουμε τις αποχρώσεις των συνδέσεων που έχουν να κάνουν με τη ποιότητα της ζεύξης. Με πράσινο ορίζεται η ζεύξη με καλή ποιότητα, με το κίτρινο η μέτρια και με το κόκκινο η κακή ή ανεπαρκείς.



Εικόνα: Ρυθμίσεις ζεύξης

ΜΕΛΕΤΗ 1ης ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

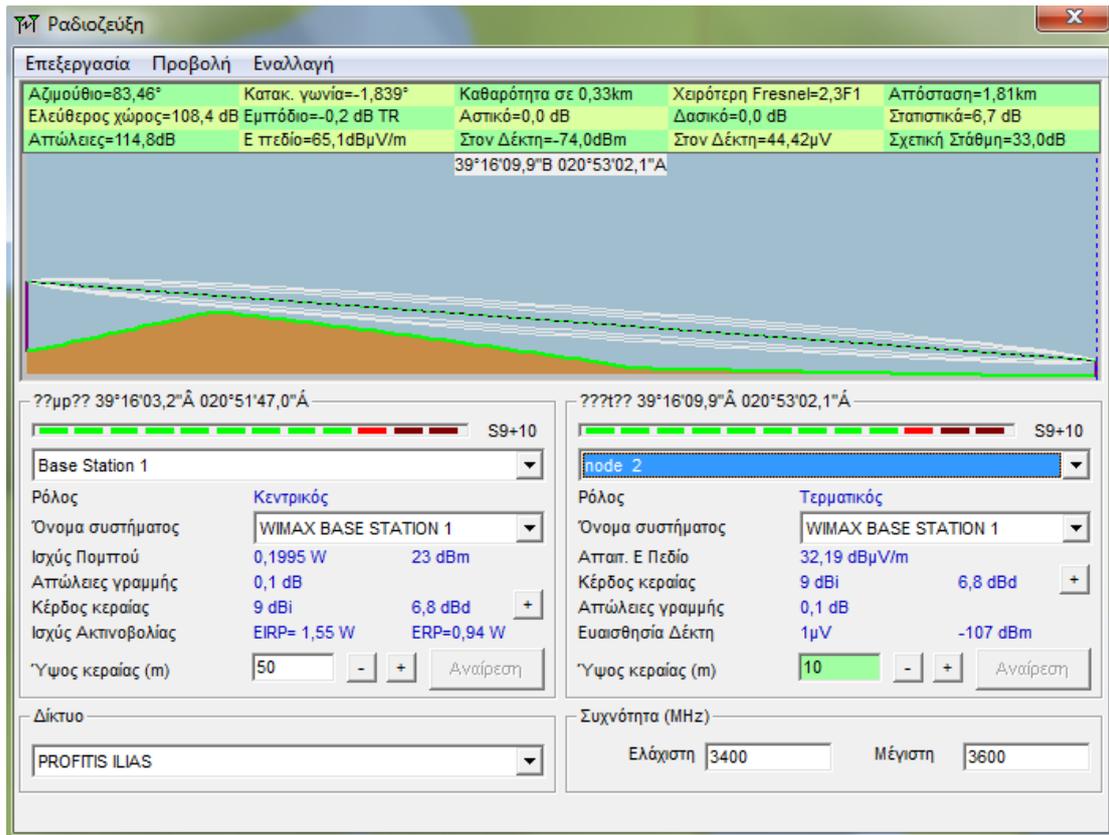
Στη πρώτη μελέτη περίπτωσης επιλέγεται η τοποθέτηση της κεραίας βάσης στον Προφήτη Ηλία, σημείο το οποίο βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο της περιοχής, σε υψόμετρο 385 μέτρα και απέχει από το κεντρικό σημείο της περιοχής του Δρυοφύτου 1,80 χιλιόμετρα. Το λογισμικό Radio Mobile μας δίνει τη δυνατότητα για απεικόνιση του δικτύου μέσω του Google Earth. Στη παρακάτω εικόνα βλέπουμε τη ζεύξη του σταθμού βάσης και ενός χρήστη.



Εικόνα: Ραδιοζεύξη σταθμού βάσης και χρήστη 2 μέσω χάρτη Google Earth

Η κεραία που έχουμε χρησιμοποιήσει είναι ομοιοκατευθυντική omni με ισχύ 23dbm και κέρδος 9dbi, με κεντρική συχνότητα στα 3.5GHz και τοπολογία δικτύου αστέρα. Όπως βλέπουμε στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε ότι η ζεύξη είναι μια καλή ζεύξη, βέβαια να θυμίσουμε ότι το βασικό κριτήριο για τη ποιότητα του σήματος στο Radio Mobile είναι η ύπαρξη οπτικής επαφής (LOS), πράγμα που στη πραγματικότητα μπορεί να διαφέρει, διότι η τεχνολογία WiMAX υποστηρίζει και επικοινωνία NLOS(Non Line of Sight). Με λίγα λόγια μια σύνδεση στο Radio Mobile που δεν είναι καλή, στη πραγματικότητα μπορεί να είναι αρκετά αποδοτική, πράγμα το οποίο διαπιστώνεται με πραγματικές δοκιμές στη περιοχή.

Στη παρακάτω εικόνα βλέπουμε τα χαρακτηριστικά μιας καλής ζεύξης μεταξύ της κεραίας βάσης και της κεραίας του χρήστη. Όπως βλέπουμε υπάρχει μια συνολική απώλεια της ζεύξης της τάξης των 114,8 dB και στο δέκτη φθάνουν τελικά 74 dBm, το οποίο σημαίνει ότι είναι αρκετά πάνω από την ευαισθησία του, άρα έχουμε μια ικανοποιητική ζεύξη. Η απώλειες εμφανίζονται λόγω του λοφίσκου που υπάρχει ανάμεσα στο σταθμό βάσης και το χρήστη.



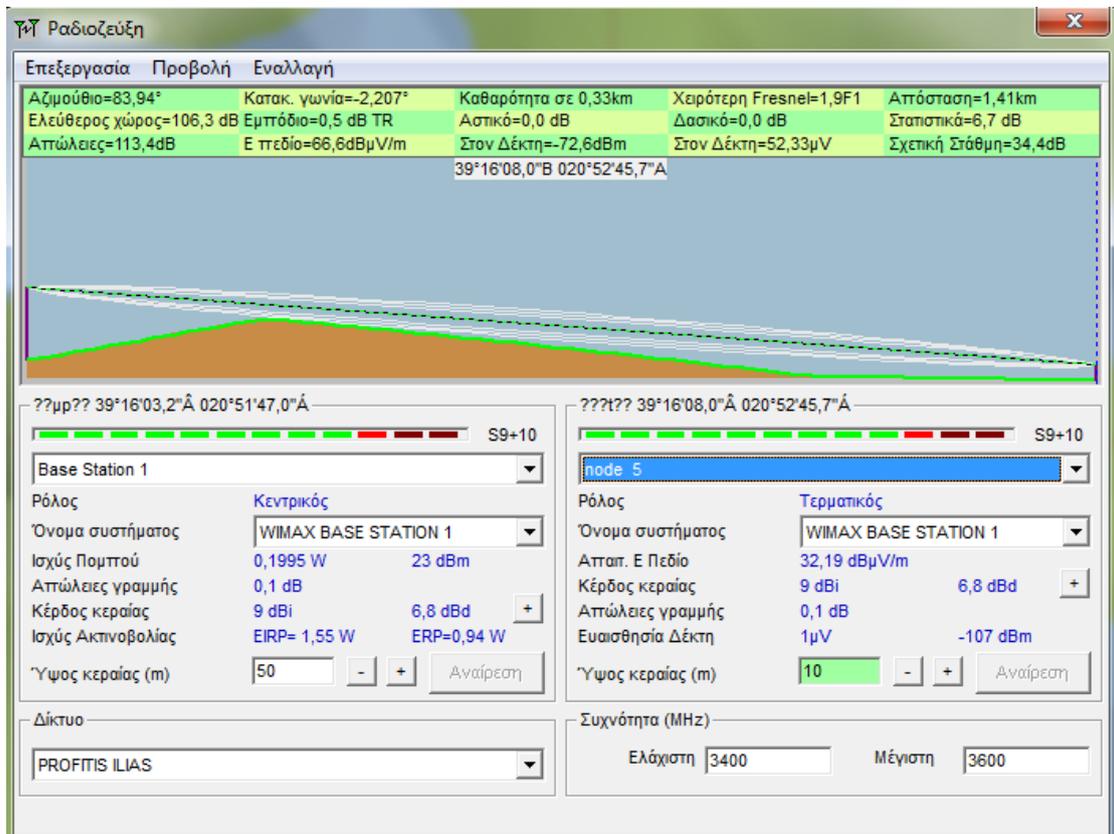
Εικόνα: Ραδιοζεύξη σταθμού βάσης και χρήστη 2

Έπειτα βλέπουμε μια ακόμη σύνδεση με σχετικά καλή ποιότητα επικοινωνίας.

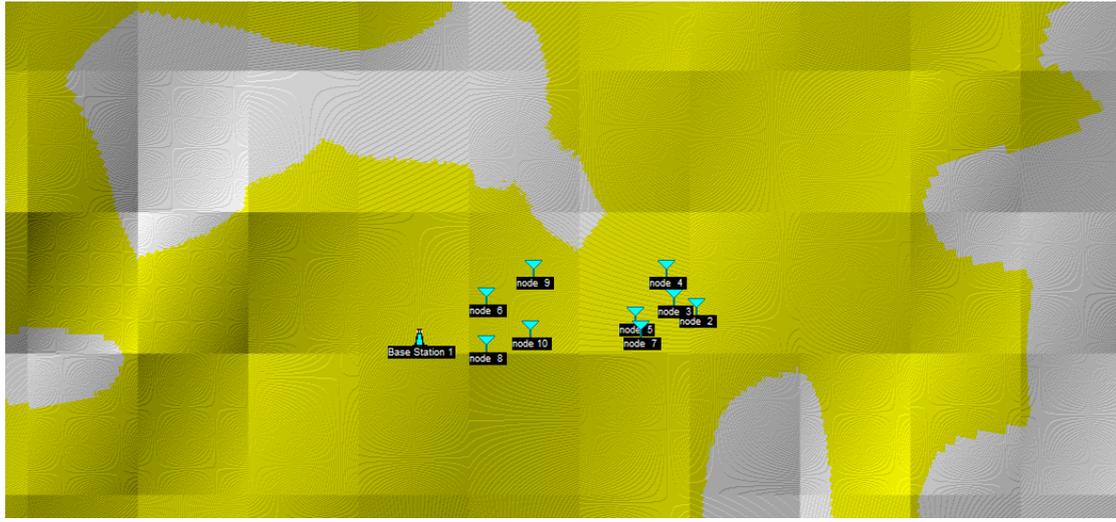


Εικόνα: Ραδιοζεύξη σταθμού βάσης και χρήστη 5 μέσω χάρτη Google Earth

Εξίσου εδώ βλέπουμε μια καλή ραδιοζεύξη, με επικοινωνία LOS.



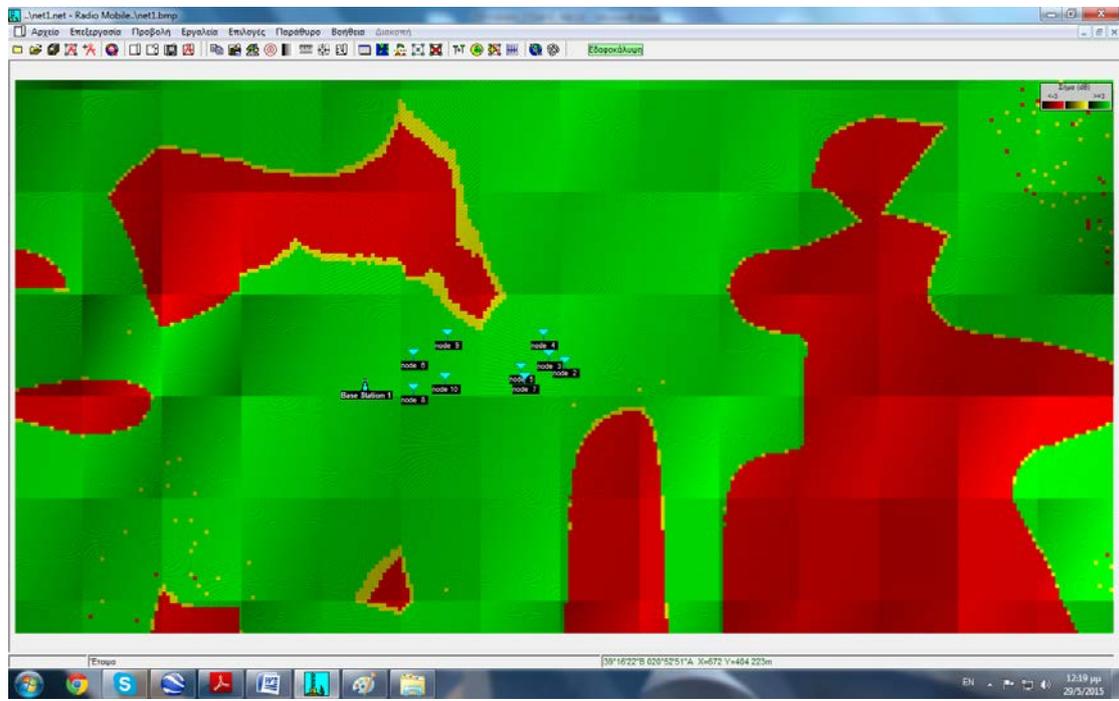
Εικόνα: Ραδιοζεύξη σταθμού βάσης και χρήστη 5



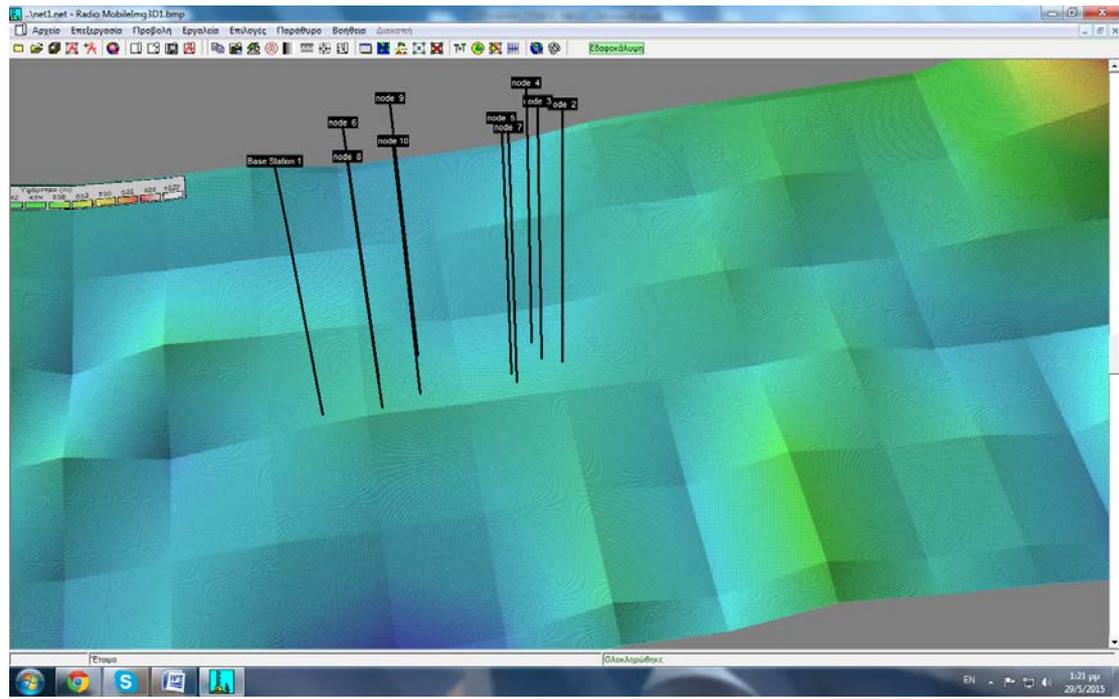
Εικόνα: Απεικόνιση ζώνης Frenshel

Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε με κίτρινο χρώμα της περιοχές που έχουν ασύρματη πρόσβαση στο δίκτυο.

Στην επόμενη εικόνα βλέπουμε τη ποιότητα του σήματος, εκεί που υπάρχει πράσινο χρώμα υποδηλώνει ότι το σήμα μας είναι καλό, δηλαδή είναι $\geq 3\text{dB}$ ενώ εκεί που υπάρχει το κόκκινο χρώμα δεν είναι και πολύ καλή η επικοινωνία και αναφέρεται σε μετάδοση σήματος με ισχύ μικρότερη των $< -3\text{dB}$.



Εικόνα: Περιοχή εμβέλειας σήματος



Εικόνα: Τρισδιάστατη απεικόνιση δικτύου

Εδώ βλέπουμε την τρισδιάστατη απεικόνιση του χάρτη και της περιοχής εμβέλειας του. Τα διαφορετικά χρώματα στην απεικόνιση έχουν να κάνουν με υψομετρικά μεγέθη του κάθε σημείου.

ΜΕΛΕΤΗ 2ης ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Η δεύτερη κεραία που χρησιμοποιήσαμε έχει απόσταση 1,13 χιλιόμετρα από το κέντρο του χωριού και βρίσκεται σε υψόμετρο 282 μέτρα. Η κεραία έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την πρώτη κεραία που χρησιμοποιήσαμε. Παρακάτω βλέπουμε τα χαρακτηριστικά της κεραίας βάσης.

Παράμετροι	Τοπολογία	Κόμβοι	Συστήματα	Στυλ
00			Άδειες άδου VHF ... UHF ...	
Όνομα συστήματος	System 1			
Ισχύς εκπομπής (Watt)	0,1995262	(dBm)	23	
Ευαισθησία δέκτη (μV)	1	(dBm)	-107	
Απώλειες γραμμής (dB)	0,1	(καλώδια+φθορές+ενώσεις)		
Τύπος κεραίας	omni.ant		Προβολή	
Κέρδος κεραίας (dBi)	2	(dBd)	-0,15	
Ύψος κεραίας (m)	10	(από το έδαφος)		
Πρόσθετη απώλεια γραμμής (dB/m)	0	(Αν ύψος κεραίας διαφέρει)		
Προσθήκη στο Radiosys.dat		Αφαίρεση από Radiosys.dat		

Εικόνα: Χαρακτηριστικά κεραίας βάσης



Εικόνα: Περιοχή εμβέλειας σήματος

Εδώ βλέπουμε την απεικόνιση της ποιότητας του σήματος. Εκεί που το χρώμα είναι πράσινο η ποιότητα του σήματος μας είναι πολύ καλή, ενώ εκεί που επικρατεί το κόκκινο χρώμα το σήμα μας είναι εξασθετισμένο.

Ραδιοζεύξη

Επεξεργασία	Προβολή	Εναλλαγή		
Αζιμούθιο=51,55°	Κατακ. γωνία=0,233°	Καθαρότητα σε 0,15km	Χειρότερη Fresnel=6,0F1	Απόσταση=0,68km
Ελεύθερος χώρος=99,9 dB	Εμπόδιο=0,1 dB TR	Αστικό=0,0 dB	Δασικό=0,0 dB	Στασιτικά=6,6 dB
Απώλειες=106,6dB (4)	Ε πεδίο=66,4dBμV/m	Στον Δέκτη=-79,8dBm	Στον Δέκτη=22,94μV	Σχετική Στάθμη=27,2dB

39°16'15,6"B 020°53'29,1"A

??p?? 39°16'02,0"A 020°53'07,0"A

node 5

Ρόλος: Τερματικός

Όνομα συστήματος: WIMAX

Ισχύς Πομπού: 0,1995 W 23 dBm

Απώλειες γραμμής: 0,1 dB

Κέρδος κεραίας: 2 dBi -0,1 dBd

Ισχύς Ακτινοβολίας: EIRP= 0,31 W ERP=0,19 W

Ύψος κεραίας (m): 10

Δίκτυο: wimax 2

???t?? 39°16'15,6"A 020°53'29,1"A

base station 2

Ρόλος: Κεντρικός

Όνομα συστήματος: WIMAX

Απαιτ. Ε Πεδίο: 39,19 dBμV/m

Κέρδος κεραίας: 2 dBi -0,1 dBd

Απώλειες γραμμής: 0,1 dB

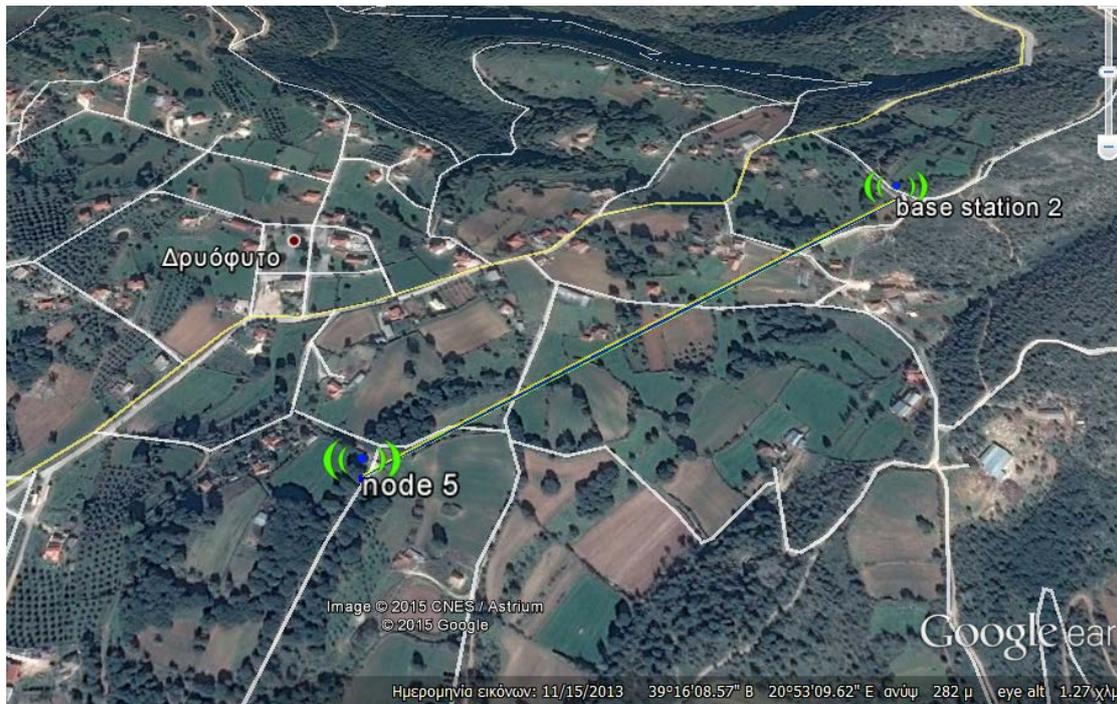
Ευαισθησία Δέκτη: 1μV -107 dBm

Ύψος κεραίας (m): 20

Συχνότητα (MHz): Ελάχιστη 3400 Μέγιστη 3600

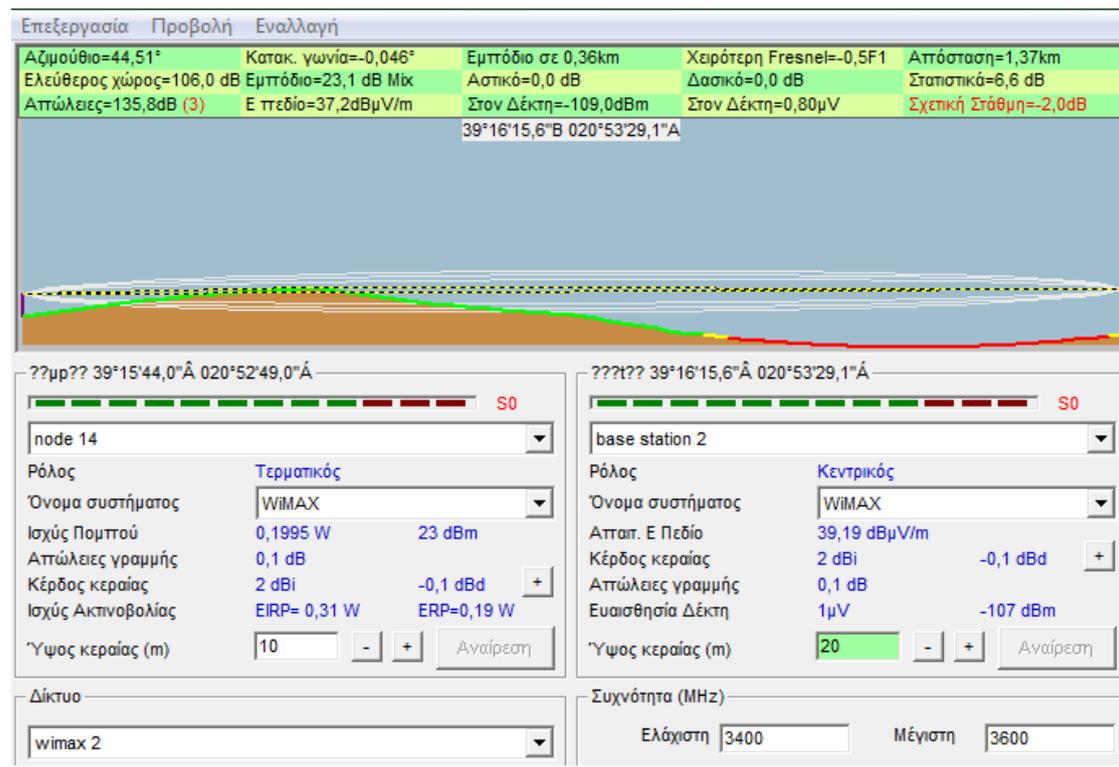
Εικόνα: Ραδιοζεύξη σταθμού βάσης και χρήση 5

Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε μια πολύ καλή ζεύξη μεταξύ της κεραίας βάσης και ενός κινητού χρήστη, καθώς το χρώμα που φαίνεται είναι πράσινο, το οποίο υποδηλώνει όπως έχουμε πει ότι αντικατοπτρίζει μια καλή ζεύξη. Επίσης βλέπουμε ότι υπάρχει μια συνολική απώλεια της ζεύξης της τάξης των 106,6 dB και στο δέκτη φθάνουν τελικά -71,6 dBm, το οποίο σημαίνει ότι είναι αρκετά πάνω από την ευαισθησία του, άρα έχουμε μια ικανοποιητική ζεύξη.



Εικόνα :Απεικόνιση Ραδιοζεύξης μέσω Google Earth

Παραπάνω βλέπουμε τη ραδιοζεύξη μέσω του προγράμματος Google Earth.



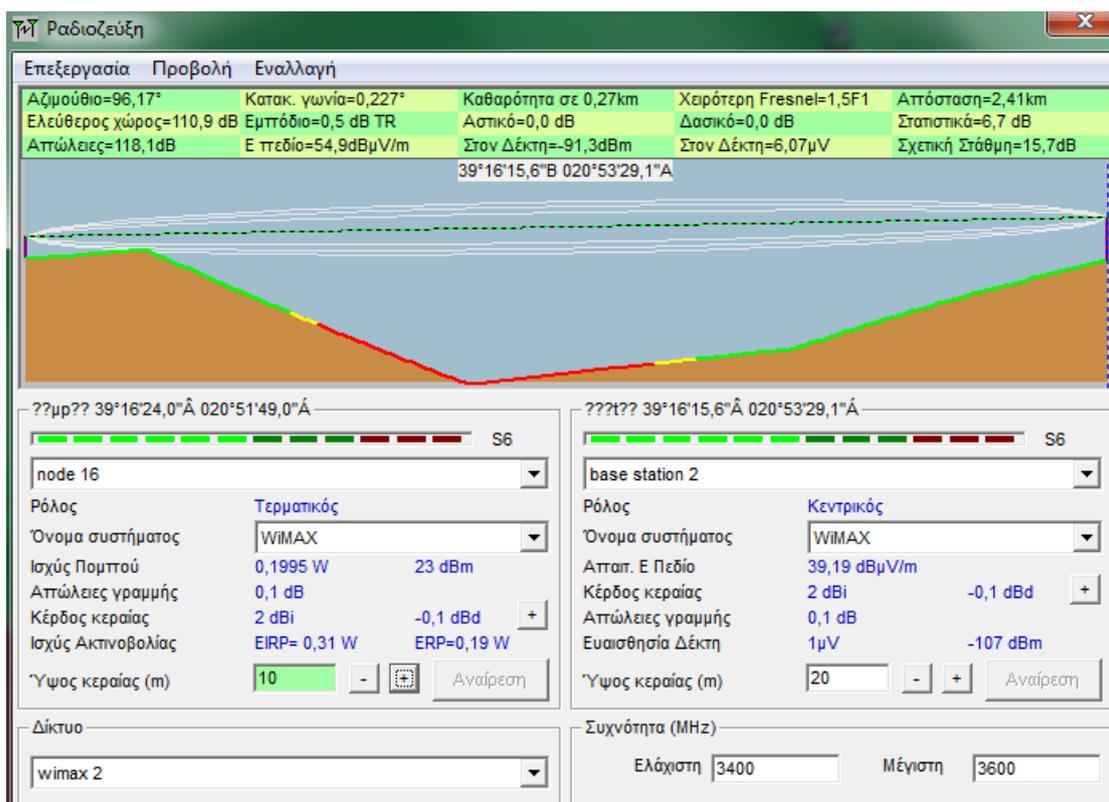
Εικόνα: Ραδιοζεύξη σταθμού βάσης και χρήστη 14

Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε μια κακή ζεύξη, με απώλειες στα 135,8dB. Στο δέκτη στα φθάνουν -109,0 dBm, πράγμα που σημαίνει ότι είναι χαμηλότερη από την ευαισθησία του δέκτη, η οποία είναι στα -107 dBm. Οι απώλειες προκύπτουν όπως φαίνεται και στη εικόνα λόγω του λοφίσκου που μεσολαβεί μεταξύ κεραίας και χρήστη.

Ας δούμε όμως και μια ραδιοζεύξη ενός απομακρυσμένου χρήστη.



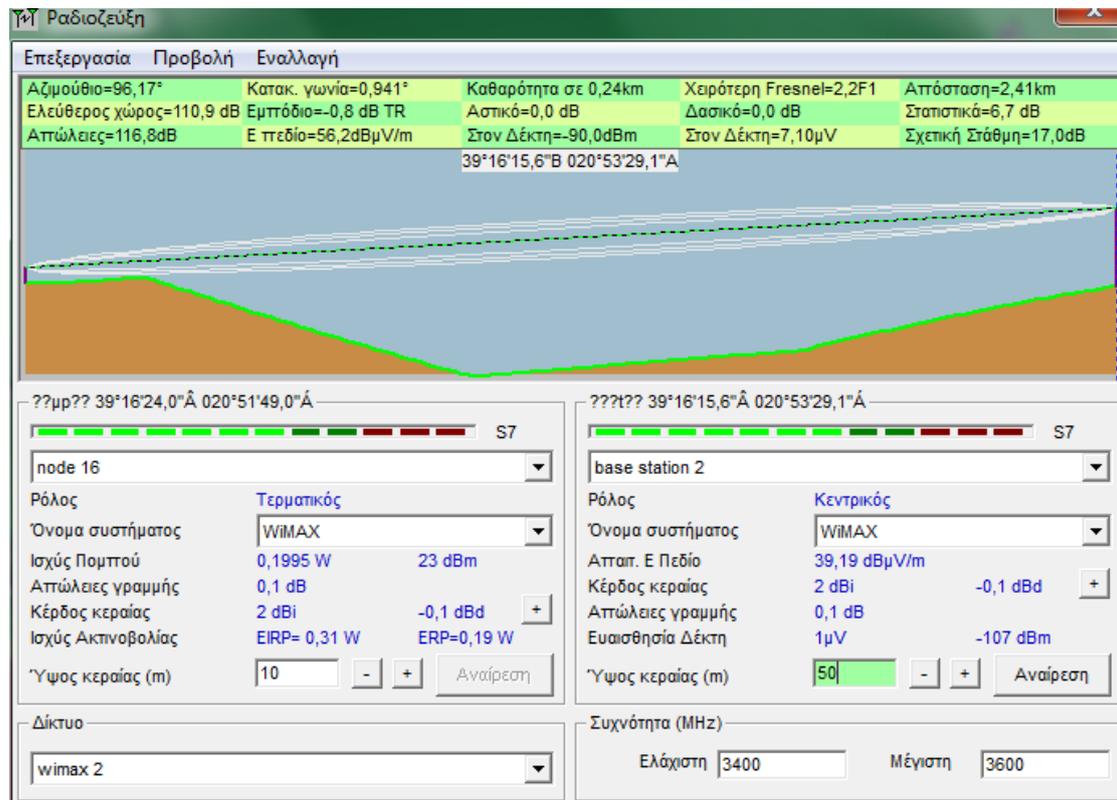
Εικόνα: Ραδιοζεύξη κεραίας βάσης και χρήστη



Εικόνα: Ραδιοζεύξη σταθμού βάσης και χρήστη 16

Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε τη ζεύξη ενός χρήστη ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση 2,41 Km από τη κεραία βάσης. Η ζεύξη θα λέγαμε ότι είναι μιας μέτριας ποιότητας, καθώς όπως βλέπουμε και στην απεικόνιση η ύπαρξη απόστασης αλλά και η απόσταση επηρεάζουν τη ποιότητα του σήματος. Οι απώλειες του σήματος ανέρχονται στα 118,1 dB και στο δέκτη βλέπουμε ότι είναι στα -91,3 dBm, παραπάνω από την ευαισθησία του δέκτη.

Τώρα εάν αυξήσουμε το ύψος της κεραίας θα δούμε ότι οι απώλειες μειώνονται.



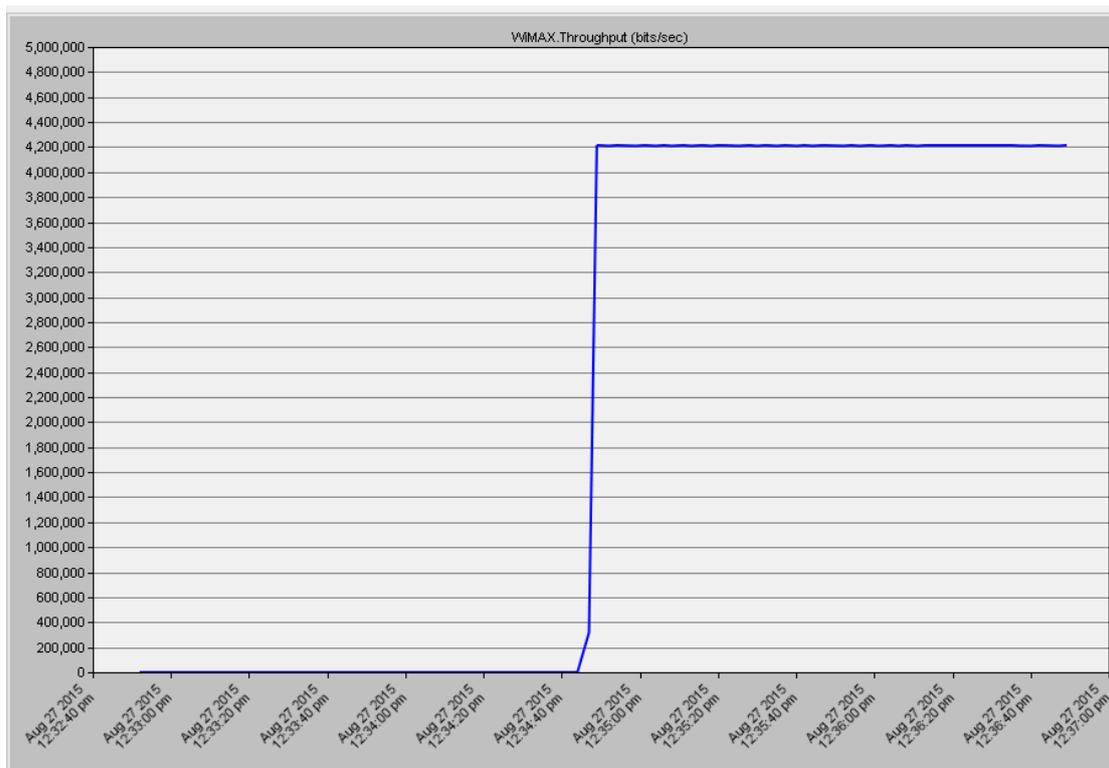
Εικόνα: Ραδιοζεύξη σταθμού βάσης και χρήστη 16

Βλέπουμε στη παραπάνω εικόνα ότι αυξήσουμε το ύψος της κεραίας στα 50 m, και διαπιστώνουμε ότι οι απώλειες μειώνονται στα 116,8 dB και στο αυξάνεται στο -90 dBm.

5.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ OPNET MODELER

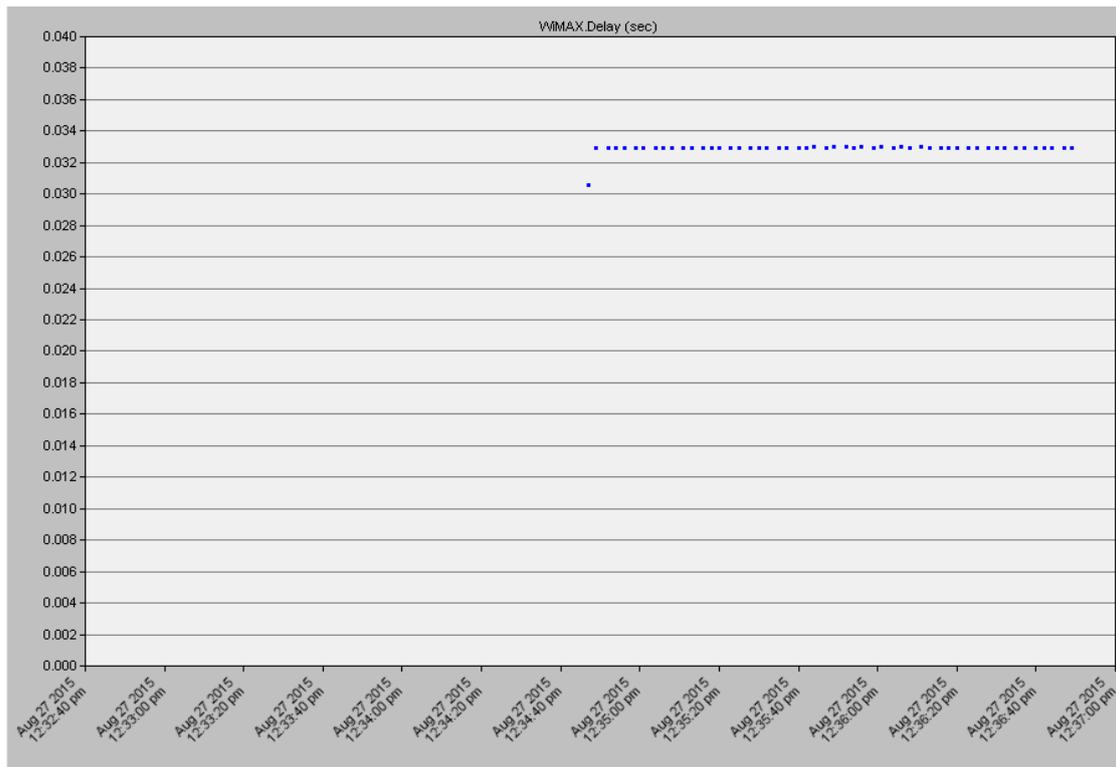
Τελειώνοντας λοιπόν με τη διαδικασία δημιουργίας του δικτύου στο πρόγραμμα OPNET MODELER παρακάτω θα δούμε μερικά από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις θα δούμε το throughput που πετυχαίνει ο χρήστης 1, καθώς και τη καθυστέρηση που υπάρχει στη ζεύξη. Στο συγκεκριμένο χρήστη του έχουμε δώσει τη δυνατότητα για παροχή υπηρεσιών VoD.



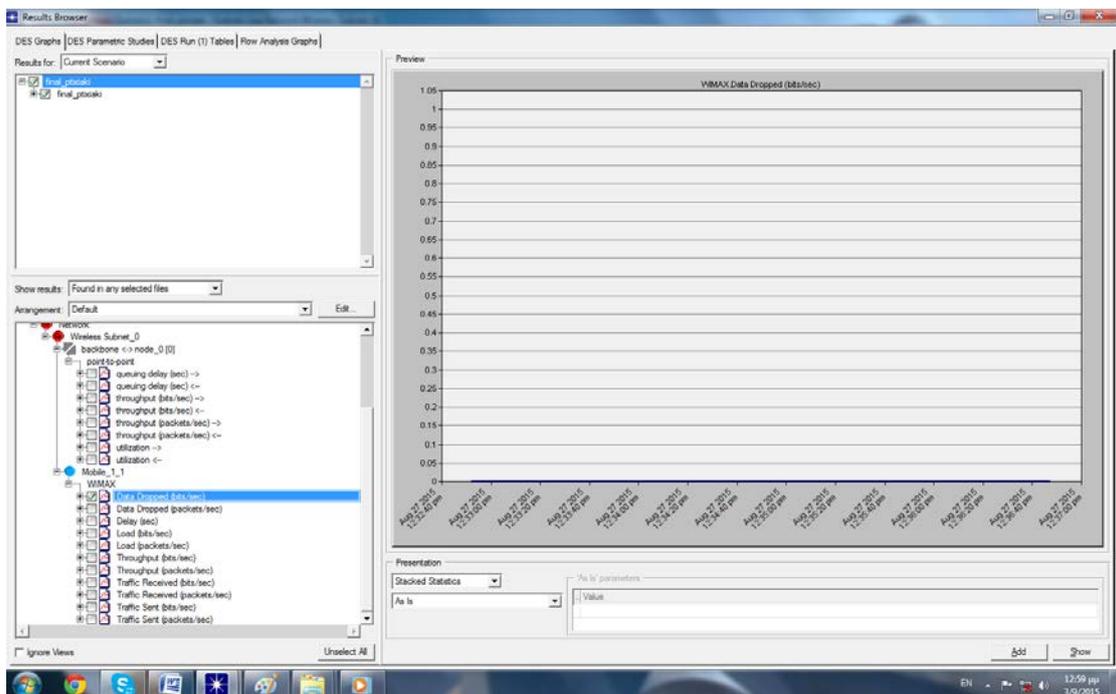
Εικόνα: Throughput του χρήστη 1

Από τη γραφική βλέπουμε το throughput του χρήστη 1 για την υπηρεσία VoD είναι 4.2 Mbps, τιμή η οποία είναι επαρκής όσο αναφορά την απόδοση της υπηρεσίας που θέλουμε να παρέχουμε στο χρήστη.



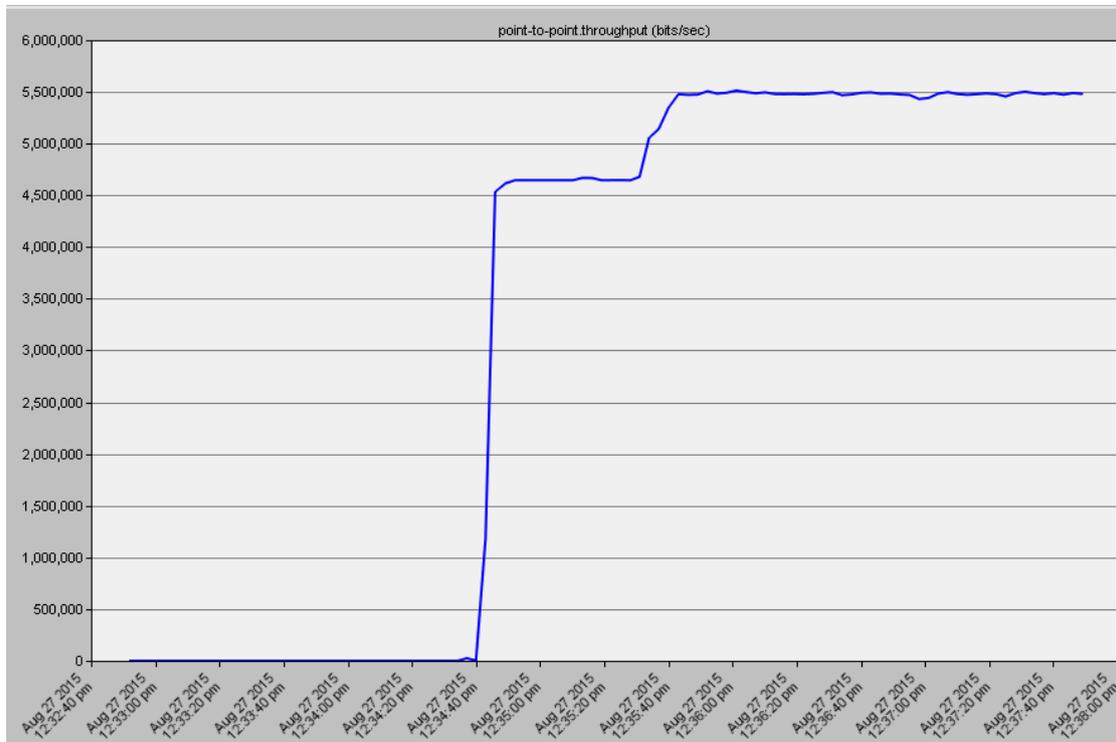
Εικόνα: Delay του χρήστη 1

Παραπάνω βλέπουμε τη καθυστέρηση που επιτυγχάνεται στο χρήστη 1 το οποίο είναι της τάξης 3 msec, τιμή αρκετά χαμηλή η οποία δηλώνει θετικά αποτελέσματα για την απόδοση του δικτύου.



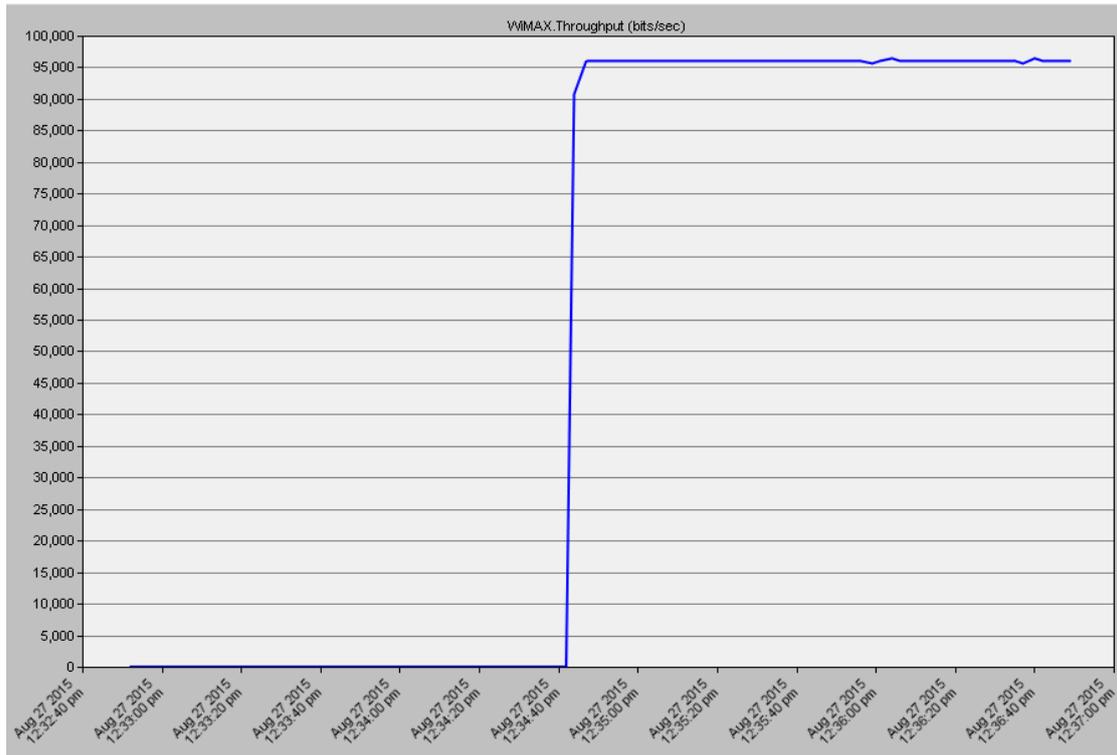
Εικόνα: Data Dropped του χρήστη 1

Στη προηγούμενη εικόνα βλέπουμε πόσα πακέτα χάθηκαν κατά τη μεταφορά δεδομένων και όπως διαπιστώνουμε έχουμε μηδενική απώλεια δεδομένων.



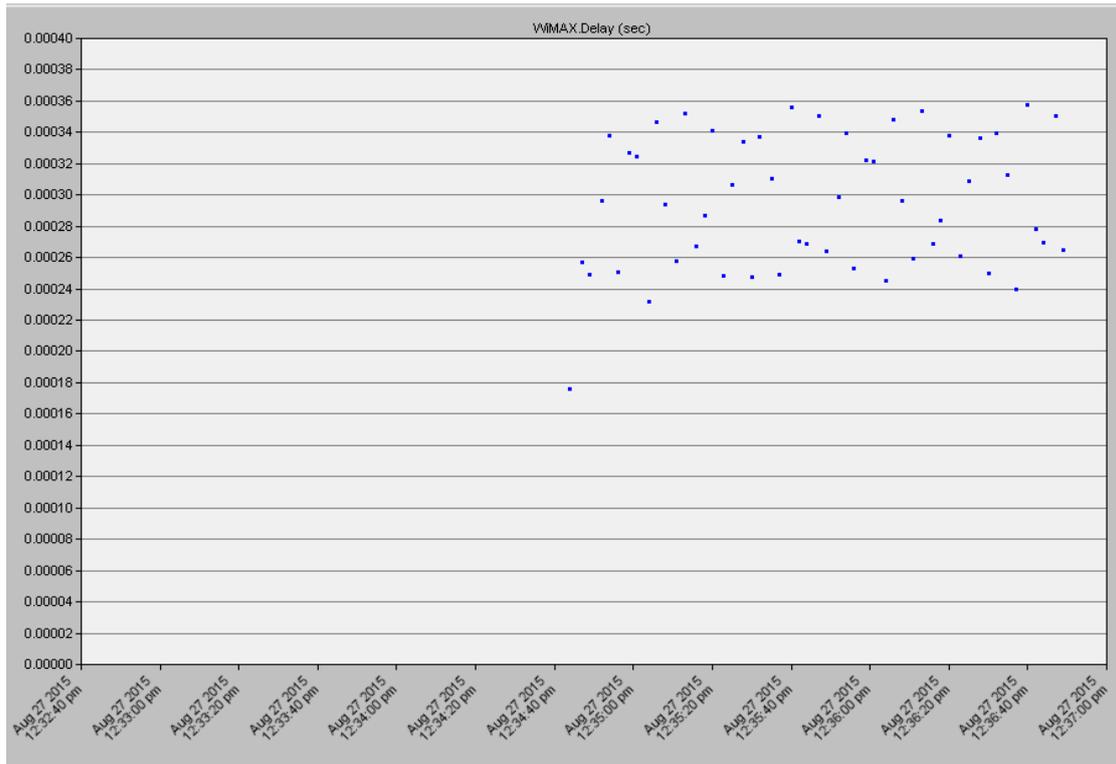
Εικόνα: Throughput του Server

Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε το Throughput του από τη πλευρά του Server, το οποίο ανέρχεται 5.5 Mbps, τιμή η οποία είναι πλήρως ικανοποιητική.



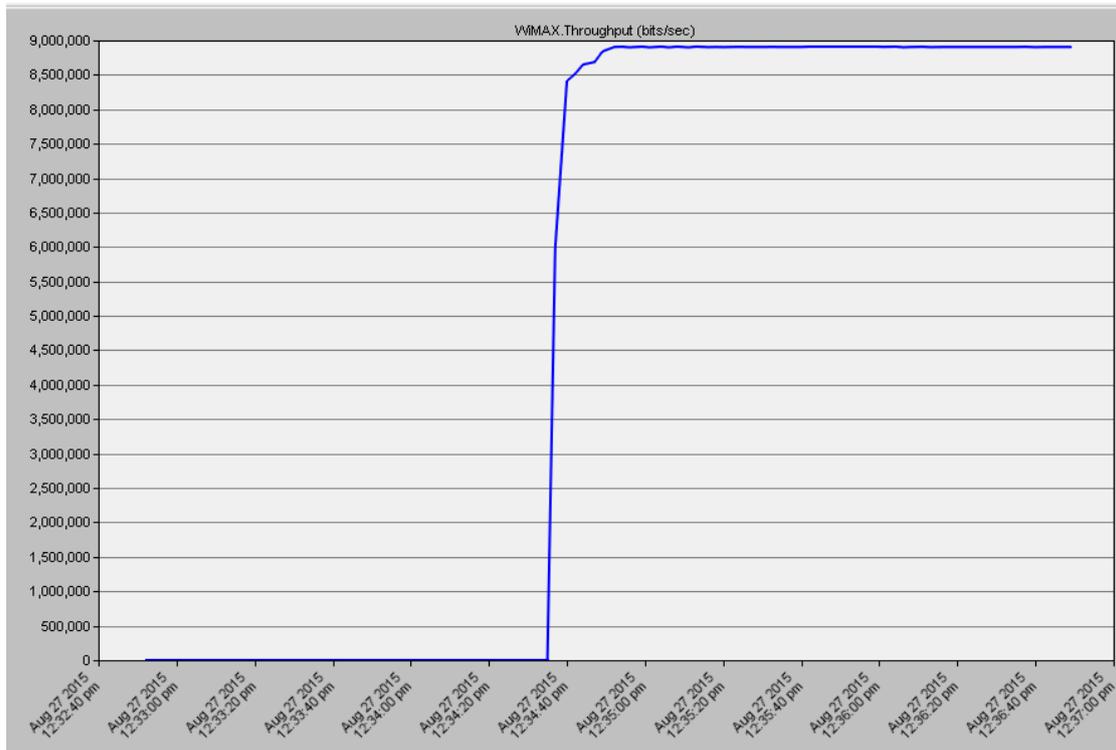
Εικόνα: Throughput του χρήστη 2

Παραπάνω βλέπουμε το throughput του χρήστη 2, στον οποίο παρέχουμε μόνο VoIP υπηρεσία. Όπως βλέπουμε το throughput φθάνει τα 95 Kbps , τιμή η οποία είναι αρκετά ικανοποιητική.



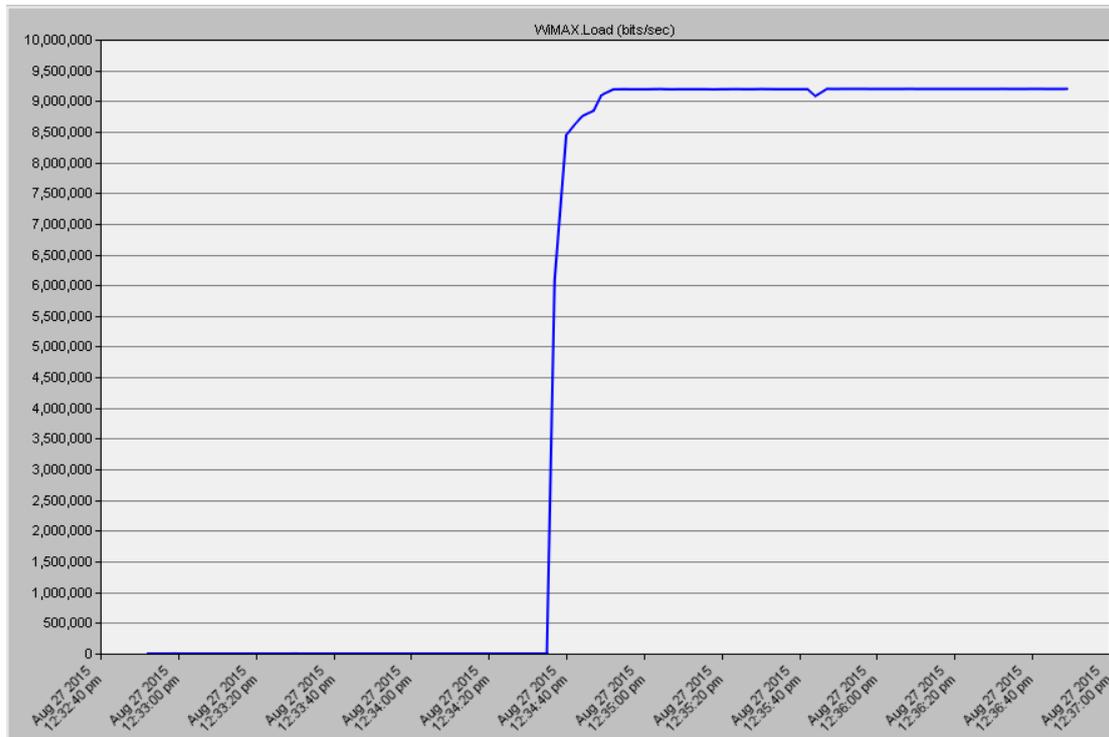
Εικόνα: Delay του χρήστη 2

Στη προηγούμενη εικόνα θα δούμε το delay του χρήστη 2 το οποίο πολύ χαμηλό, πράγμα το οποίο δηλώνει ότι η υπηρεσία η οποία προσφέρουμε είναι αρκετά αποδοτική.



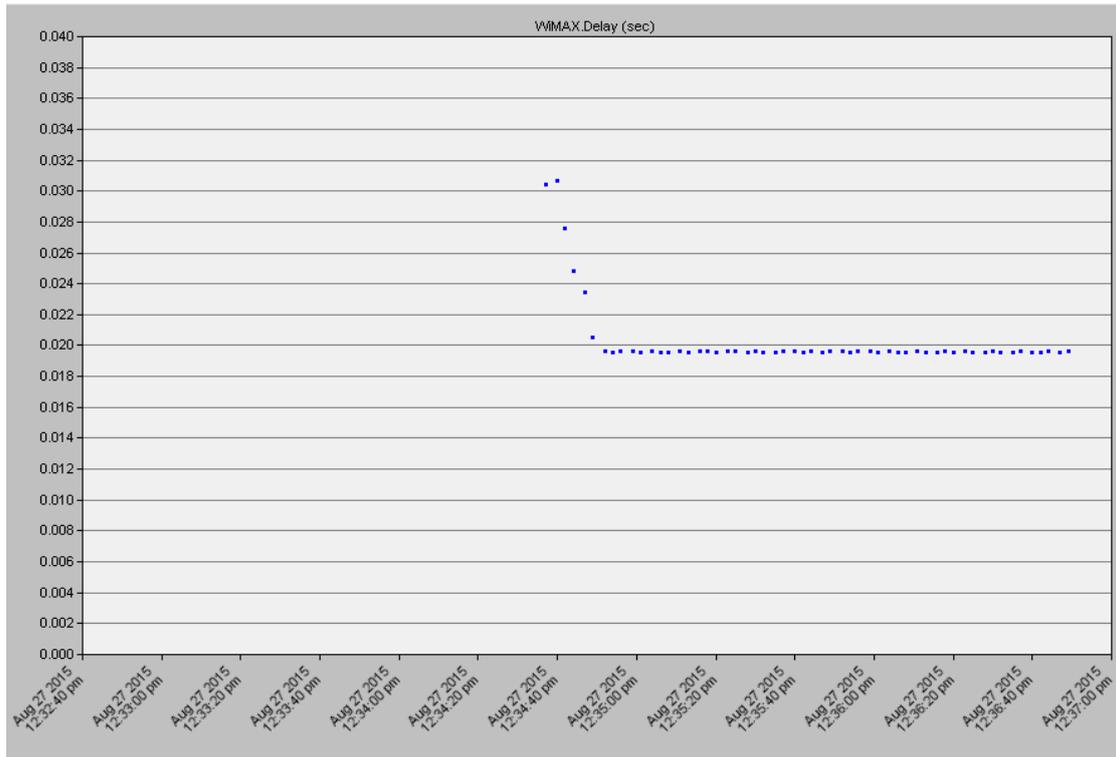
Εικόνα: Throughput του δικτύου

Παραπάνω βλέπουμε το συνολικό throughput του δικτύου το οποίο αντιστοιχείται στα 9Mbps, μέτρηση η οποία μας δείχνει τη ποιότητα του δικτύου μας.



Εικόνα: Φόρτος του δικτύου

Εδώ βλέπουμε το συνολικό φόρτο του δικτύου, το οποίο είναι 9.2 Mbps.



Εικόνα: Καθυστέρηση του δικτύου

Ενώ στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε τη συνολική καθυστέρηση του δικτύου, η οποία ανέρχεται από 20 msec-31 msec, τιμή η οποία είναι σχετικά μικρή εφόσον η μέτρηση αφορά τη συνολική καθυστέρηση του δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 ΚΟΣΤΟΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ

Εφόσον αναλύσαμε την τεχνολογία WiMAX και έχουμε δει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, θα πρέπει να δούμε και το κόστος υλοποίησης του δικτύου, καθώς ο παράγοντας κόστος είναι πολύ σημαντικός όπως έχουμε αναφέρει και στην θεωρία, τόσο για τον επιχειρηματία, όσο και για το συνδρομητή. Στο κόστος θα περιλαμβάνονται οι τιμές ενοικίασης των σταθμών βάσης, οι γραμμές οι οποίες θα μισθωθούν, τα τέλη εκχώρησης και χρήσης των ραδιοσυχνοτήτων, ο εξοπλισμός του χρήστη, καθώς και το κόστος εγκατάστασης του δικτύου. Οι τιμές που παρουσιάζονται είναι ενδεικτικές και προσαρμόζονται ανάλογα τις συνθήκες της αγοράς και ανάλογα την αγοραστική συμπεριφορά του παρόχου. Για τις τιμές των γραμμών θα χρησιμοποιήσουμε τιμοκατάλογο του ΟΤΕ.

Τώρα με βάση την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ), παρακάτω υπολογίζονται τα τέλη χρήσης του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων για κάθε ραδιοδιάυλο που χρησιμοποιείται από κάθε Σταθμό Ραδιοεπικοινωνίας της Σταθερής Υπηρεσίας:

$$TP = \Sigma 1 * \Sigma 2 * \Sigma 3 * KPA$$

TP	Ετήσια τέλη χρήσης σε Ευρώ	920 €
KPA	Συντελεστής Σπανιότητας	115 €
Σ1	Συντελεστής Σπανιότητας (Γεωγραφικής και Φασματικής)	2
Σ2	Ο συντελεστής εύρους ραδιοδιαύλου εκπομπής στο σταθμό	4
Σ3	Ο συντελεστής τεχνολογίας	1

Πίνακας : Συντελεστές υπολογισμού ετησίων τελών χρήσης

Το βασικό τέλος χρήσης ΚΡΑ ισούται με 115 ΕΥΡΩ.
 Ο συντελεστής σπανιότητας (γεωγραφικής και φασματικής)Σ1 για τη περιοχή της Πρέβεζας ισούται με 2.
 Ο συντελεστής εύρους ραδιοδαύλου Σ2 είναι 4.
 Ο συντελεστής τεχνολογίας Σ3 για ψηφιακή τεχνολογία είναι 1.

Άρα συνολικά τα ετήσια τέλη είναι:

$$TP=115*2*4*1=920 \text{ Ευρώ Ετήσια τέλη}$$

Επίσης με κάθε αίτηση Εκχώρησης ή τροποποίησης τέλος εκχώρησης ραδιοσυχνοτήτων είναι ίσο με 115 ευρώ, ανά σταθμό και συχνότητα εκπομπής, που αναλογεί στο κόστος εξέτασης-μελέτης της εκχώρησης.

Δαπάνες	Κόστος
Κόστος ενοικίασης σταθμού βάσης	2*1000 €=2000 € Μήνα
Κόστος Εγκατάστασης Σταθμού Βάσης	2*1500=1600 €
Εφάπαξ Τέλη Ενεργοποίησης Γραμμών (ΟΤΕ)	4*700=2800 €
Συνολικό Κόστος	28400 €

Πίνακας :Δαπάνες Υλοποίησης Δικτύου

Πάγιες Δαπάνες	Κόστος
Συντήρηση	100 €Μήνα
Μίσθωση Χώρων Εγκατάστασης Σταθμού Βάσης	400 €Μήνα
Μίσθωση Γραμμών	1200 €Μήνα
Τέλη Χρήσης Φάσματος Ραδιοσυχνοτήτων	920€12=76,6 €Μηνιαία χρήστη
Φύλαξη Χώρου Σταθμών Βάσης	2000 €Μήνα
Κόστος παροχής ρεύματος	60/Μήνα
Συνολικό Κόστος	9836,60 €Μήνα

Πίνακας :Πάγιες Δαπάνες Δικτύου

Παραπάνω φαίνονται μερικές από τις δαπάνες που θα χρειαστούν. Στο κόστος ενοικίασης έχουμε βάλει μια θεωρητική τιμή διότι οι τιμές ποικίλουν ανάλογα τη κατάσταση της αγοράς και επίσης δε

δημοσιοποιούνται, παρά μόνο για πραγματική κατασκευή δικτύου. Ας υποθέσουμε ότι το κόστος ενοικίασης ανέρχεται στα 1500€ Το κόστος εγκατάστασης είναι 1500€για κάθε κεραία, δηλαδή 3000€και για τις δύο κεραίες. Στο κόστος εγκατάστασης περιλαμβάνονται τα (κοντέινερ, σύστημα μπαταριών για παροχή ρεύματος, ιστός ,καλωδιώσεις, ασφάλεια, τεχνική εργασία, πίνακες, συναγερμός). Οι γραμμές που χρησιμοποιούμε είναι του ΟΤΕ και είναι 155Mbps. Τώρα για συντήρηση του δικτύου το κόστος είναι 100€το μήνα, η μίσθωση χώρου ανέρχεται στα 400€το μήνα, η μίσθωση γραμμών στα 1200€το μήνα , τα τέλη χρήσης φάσματος ραδιοσυχνοτήτων υπολογίζονται με βάση τα ετήσια τέλη χρήσης, τα οποία είναι στα 920€12=76,6€ Ακόμη για τη φύλαξη του χώρου θα δαπανώνται το μήνα 2000€ τα οποία θα περιλαμβάνουν security για φύλαξη του χώρου, πυρασφάλεια, συναγερμός, κάμερες ασφαλείας. Επίσης θα προσθέσουμε και το κόστος παροχής ρεύματος, το οποίο θα ανέρχεται στα 60€το μήνα για τριφασικό ρεύμα.

Δαπάνες Συνδρομητή	Κόστος
Εξοπλισμός	150 €
Μηνιαία Τέλη Συνδεσης	164,70 €

Πίνακας :Δαπάνες Συνδρομητή

Παραπάνω βλέπουμε ένα μέσο κόστος για τους χρήστες.

Τώρα η επιβάρυνση για τους χρήστες, εάν υποθέσουμε ότι οι χρήστες είναι 40 θα είναι: $28400\text{€}/12$ μήνες =2366,60 και $2366,6/40$ χρήστες=59,10 και $9836,60 \text{ €}/40$ χρήστες=245,90. Άρα το μηνιαίο κόστος που καλείται να πληρώσει ο χρήστης είναι $(59.10+245.90) =305 \text{ €}$ και επιπροσθέτως είναι και εξοπλισμός του χρήστη, κάτι το οποίο είναι καθαρά προσωπική επιλογή, γι'αυτό και έχουμε βάλει μια μέση τιμή στα 150€ Οπότε για να κάνει ο πάροχος απόσβεση της επένδυσης σε ένα χρόνο θα πρέπει οι 40 χρήστες να πληρώνουν τουλάχιστον για ένα χρόνο 350 €το μήνα, αλλιώς εάν αυξηθούν οι χρήστες τότε μπορεί η απόσβεση της επένδυσης να γίνει γρηγορότερα ή να ακόμη μπορεί να μειωθεί το κόστος για τους χρήστες ώστε να γίνει πιο ελκυστική η επένδυση.

Η κεραία βάσης που χρησιμοποιήσαμε είναι της σειράς BreezaMAX της εταιρίας Alvarion και συγκεκριμένο μοντέλο Extreme 3600. Η Extreme 3600 είναι μια κεραία σταθμού βάσης, εξωτερικού χώρου και με μηδενικό ενεργειακό αποτύπωμα, σχεδιασμένη για ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση σύμφωνα με το πρότυπο WiMAX 16e. Κατέχει πιστοποίηση από το WiMAX Forum και τηρεί τους κανονισμούς και της οδηγίες του οργανισμού. Είναι κατασκευασμένη για να λειτουργεί τόσο

σε αστικό, όσο και σε αγροτικό περιβάλλον και αποτελεί την ιδανική λύση για εταιρίας παροχής υπηρεσιών ασύρματου διαδικτύου (Wireless Internet Service Providers - WISPs). Επίσης, παρέχει εξελιγμένες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και υποστηρίζει επικοινωνίες πολλαπλών καναλιών, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα του συστήματος. Τέλος λειτουργεί αποτελεσματικά σε ζεύξεις μη οπτικής επαφής (Non Line Of Sight-NLOS) και σε περιβάλλοντα με έντονα χαρακτηριστικά παρεμβολής.⁵⁸

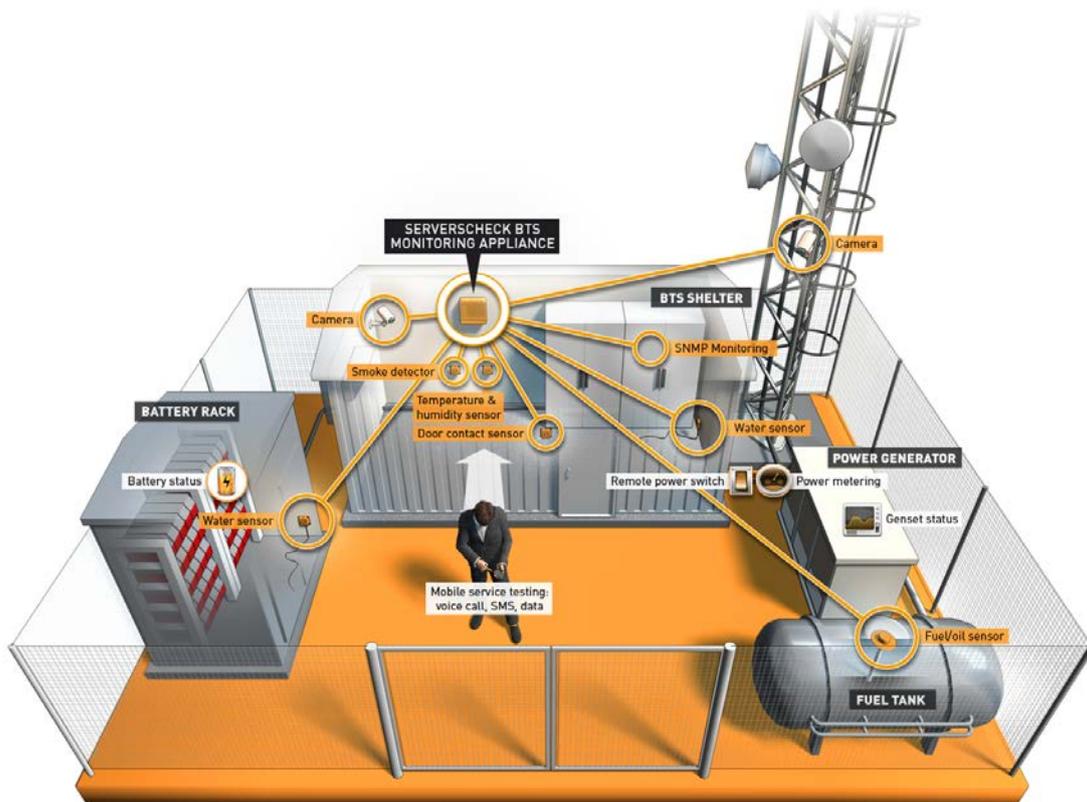


Εικόνα: Κεραία βάσης BreezeMAX Extreme 3600

⁵⁸ Ιωάννης Χαριτούδης, Διπλωματική εργασία <<Διερεύνηση τεχνικών παραμέτρων για τη βέλτιστη διαχείριση πόρων και τη βέλτιστη ραδιοκάλυψη στα σύγχρονα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα>>, Απρίλιος 2013.



Εικόνα: Base Transceiver station



Εικόνα: Base Transceiver Station Components

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά το πέρας της πτυχιακής και με βάση τα αποτελέσματα αυτό το οποίο συμπεραίνουμε είναι ότι ένα δίκτυο WiMAX αποτελεί μια πολύ αξιόπιστη λύση για αγροτικές περιοχές αλλά και αστικές περιοχές θα μπορούσαμε να πούμε. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ικανοποιητικές αποδόσεις όσον αφορά τις υπηρεσίες (VoIP, VoD, και μεταφορά δεδομένων).

Πρόκειται για μια τεχνολογία η οποία με τη πάροδο του χρόνου τείνει να γίνει μια παγκοσμίως διαθέσιμη και ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία και έρχεται να καλύψει τα οποία <κενά> υπάρχουν στη υπάρχουσα δικτυακή δομή και να δώσει λύσης σε προβλήματα που μέχρι τώρα παραμένουν άλυτα.

Τέλος όσον αφορά το οικονομικό κομμάτι που αφορά το κόστος εγκατάστασης και το κόστος εξοπλισμού σε μια αγροτική περιοχή θα λέγαμε ότι δεν είναι αρκετά προσοδοφόρο, διότι λόγω της αυξημένης αρχικής επένδυσης και στους λίγους συνδρομητές που αναφέρεται το κόστος μπορεί να μην είναι τόσο ελκυστικό για τον πελάτη, πράγμα το οποίο με τη προώθηση και την εξέλιξη της τεχνολογίας στην αγορά θα μπορεί να είναι πιο ευέλικτο και προσιτό Αυτά όσον αφορά μια αγροτική περιοχή όπου οι συνδρομητές είναι λιγότεροι, σε μια αστική περιοχή τα πράγματα θα είναι πιο προσοδοφόρα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <https://el.wikipedia.org/wiki/WiMAX>
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ).2008
3. Zhang, Y., J. and Letaif, K. B., "Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems", IEEE Transactions on Wireless Communications, 3(4):1516, September 2004.
4. Rhee. W., and Cioffi, J., M., "Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation", In Proc. Of IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1085-1089, Tokyo, May 2000.
5. Z. Shen, J. G. Andrews, and B.Evans, "Optimal power allocation for multiuser OFDM", In Proc. Of IEEE Globecom, pp.337-341, San Francisco, December 2003.
6. I. Wong, Z. Shen, B. Evans, and J. Andrews, "A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems", In Proc. Of IEEE Signal Processing Workshop, pp.1-6, Austin, TX, October 2004.
7. D. Tse. Multiuser diversity in wireless networks. In Stanford Wireless Communications Seminar, www.stanford.edu/group/wcs/. April 2001
8. P. Viswanath, D. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas", IEEE Transactions on Information Theory,48(6):1277-1294, June 2002.
9. Τερζάκης Ιωάννης, Δημήτριος Τσαπάρας, Διπλωματική Εργασία. <<Σχεδίαση ασύρματων δικτύων WiMAX για πρόσβαση και διασύνδεση. Μελέτη ποιότητας (Qos) και ανάλυση υποστηριζόμενων υπηρεσιών δικτύου>>, Απρίλιος 2007
10. Κωνσταντίνος Μερτζάνης, Μεταπτυχιακή Εργασία. <<ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ WiMAX>> Φεβρουάριος 2010

11. Αναστάσιος Α. Γκιουζέπας, Σπυρίδων Κ. Σκευάς, Διπλωματική Εργασία. << Μελέτη Ραδιοκάλυψης για Συστήματα Τεχνολογίας WiMAX>>, Αθήνα, Μάιος 2010
12. Κουρούς Ιωάννης, Μεταπτυχιακή εργασία, <<Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX>>, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Κοζάνη, Μάιος 2009
13. http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.16_WiMAX
14. Βασδάρης Θωμάς, Τσελίκης Παναγιώτης, Ασύρματα Ευρυζωνικά Δίκτυα WiMAX, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, Σεπτ. 2006
15. <http://wimaxforum.org/>
16. www.wimax.com
17. Ιωάννης Χαριτούδης, Διπλωματική εργασία <<Διερεύνηση τεχνικών παραμέτρων για τη βέλτιστη διαχείριση πόρων και τη βέλτιστη ραδιοκάλυψη στα σύγχρονα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα>>, Απρίλιος 2013.
18. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1237157&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F18%2F27735%2F01237157.pdf%3Farnumber%3D1237157>
19. https://en.wikipedia.org/wiki/Space%E2%80%93time_block_code
20. http://www.chemistry.uoc.gr/frudakis/Courses/Physics_II_ClassicalWaves/06-Superposition.pdf
21. Ιωάννης Δ. Χαριτούδης, Διερεύνηση τεχνικών παραμέτρων για τη βέλτιστη διαχείριση πόρων και τη βέλτιστη ραδιοκάλυψη στα σύγχρονα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα, Διπλωματική εργασία, Πάτρα, Απρίλιος 2013

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

AAS- Advanced Antenna Systems

ADSL- Asymmetric digital subscriber line

BE- Best Effort

BER-bit error rate

BPSK- binary phase shift keying

CID- Connection Identifier

DSL-Digital Subscriber Line

DSSS- direct sequence spread spectrum

EETT-Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων

FFT-fast fourier transform

FBWA– Fixed Broadband Wireless Access

FDD-Frequency Division Duplex

H-ARQ – Hybrid automatic repeat request

ISI- Intersymbol Interference

ICI- Inter Carrier Interference

IMS-IP Multimedia system

IFFT-inverse fast fourier transform

LOS-Line of Sight

LDPC-Low Density Parity Codes

MAC-Medium Access Control

MIMO-Multiple-Input-Multiple-Output

MSDUs- MAC Service Data Units

MSR- Maximum Sum Rate

MPDUs- MAC Protocol Data Units

MF- Maximum Fairness

NLOS-Non Line of Sight

nrtPS- Nonreal-time Polling Services

OFDMA- Orthogonal frequency division multiple access

OFDM-Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PRC- Proportional Rate Constraints

PF- Proportional Fairness

PHY- physical layer

QAM- Quadrature amplitude modulation

QPSK- quadrature phase-shift keying

rtPS- Real-time Polling Services

SAP- Service Access Points

SFID- Service Flow Identifier

SDMA- Space Division Multiple Access

STC- Space-Time Block Coding

SSL-Secure Sockets Layer

SoC -System on a Chip

TDMA- Time division multiple access

TDD-Time Division Duplex

TTG- Transmit Transition Gap

TLS-Transport Layer Security

UGS- Unsolicited Grant Services

